

مقاله پژوهشی

مرور سیستماتیک و متاآنالیز بر اثر بخشی بیوچار در اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در ایران و تعیین فاکتورهای موثر

فوزیه بیگ محمدی^۱، عیسی سلگی^{۲*}، محسن سلیمانی^۳، علی اصغر بسالت پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

۱- دانشجوی دکتری آلودگی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲- دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۳- دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴- پژوهشگر موسسه علمی پژوهشی مدیریت منابع Inter 3، برلین، آلمان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیک: e.solgi@yahoo.com; e.solgi@malayeru.ac.ir

چکیده

استفاده از بیوچار به عنوان اصلاح کننده در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین روشی مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست است. اثر بخشی بیوچار در تثبیت فلزات سنگین با خصوصیات بیوچار و خاک مرتبط است. تعیین مهم‌ترین خصوصیات و ارتباط آنها با اثربخشی بیوچار در موفقیت این روش موثر است. استفاده از دامنه وسیعی از خصوصیات در یک مطالعه مشخص به آسانی امکان پذیر نیست و مناسب‌ترین نتایج با تحلیل یافته‌های مطالعات مختلف به دست می‌آید. بر این اساس در مطالعه حاضر به شیوه متاآنالیز اثربخشی بیوچار در اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در ایران در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ بررسی و فاکتورهای موثر بر آن تعیین شد. به این منظور پس از بررسی نتایج ۳۰ مقاله، در نهایت اطلاعات مورد نیاز در ۱۱ مقاله و ۱۲۳ مشاهده مستقل جمع آوری شد. بر اساس نتایج به دست آمده اثربخشی بیوچار با pH بیوچار، درصد وزنی، زمان انکوباسیون، دمای پیرولیز و غلظت کربن در بیوچار، میزان سیلت و رس در خاک، EC خاک، CEC خاک و ماده آلی خاک دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار و با EC بیوچار، میزان شن و pH خاک دارای همبستگی منفی و معنی‌دار بود. بزرگترین ضرایب همبستگی در مورد CEC خاک ۰/۵۱۵ به دست آمد. در نتیجه این فاکتور مهم‌ترین فاکتور تاثیرگذار بر اثر بخشی بیوچار در تثبیت فلزات سنگین بود. بنابراین با بهبود عواملی که همبستگی مثبت دارند می‌توان اثر بخشی بیوچار را افزایش داد و در مورد برخی خصوصیات که همبستگی منفی دارند با اصلاح آنها اثر بخشی بیوچار قابل بهبود خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح، بیوچار، تثبیت فلزات سنگین، خاک‌های آلوده، متاآنالیز

Systematic Review and Meta-Analysis on the Effectiveness of Biochar in Remediation of Heavy Metals in Contaminated Soils of Iran and Determination of Effective Factors

Fouzieh Beigmohammadi¹, Eisa Solgi^{2*}, Mohsen Soleimani³, Aliasghar Besalatpour⁴

Received: August 17, 2019

Accepted: April 6, 2021

1- Ph. D student of Environmental Pollution, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

2- Assoc. Prof., Dept. of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

3- Assoc. Prof., Dept. of Environment, Faculty of Natural Resource, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

4- Researcher at Inter 3 institute für Ressourcenmanagement, Berlin, Germany

*Corresponding Author, E-mail: e.solgi@yahoo.com; e.solgi@malayeru.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

The use of biochar as an amendment in soils contaminated with heavy metals is an economical and environmentally-friendly method. The biochar's effectiveness in heavy metals stabilization is related to the biochar and soil properties. Success of biochar application is related to determining the most important characteristics of biochar that increase effectiveness of biochar. It is not easy to use a wide range of characteristics in a study, therefore the most appropriate results are obtained by analysis the results from different studies. Meta-analysis is the application of statistical techniques to combine and summarize the findings of multiple studies. By combining data from many studies, meta-analyses can provide more precise information about biochar. Therefore, in the present study, the effectiveness of biochar for remediation of heavy metal contaminated soils in Iran has been studied by meta-analysis and the most important factors were determined.

Methodology

The articles were selected from various databases based on keywords such as bioavailability, various heavy metals forms, biochar, remediation of contaminated soils, heavy metals stabilization, in the of period 2016-2020. The data were extracted from results of 30 articles. Finally, the required information was collected from 11 articles and 123 independent observations. In these studies, the evaluation of heavy metals bioavailability was carried out with different methods, such as mobility, leaching, adsorption kinetics, plants bioavailability and heavy metals bioavailability in soil. In order to determine the effectiveness of biochar, the size effect variable (R) was estimated for the bioavailability differences between the control and treatment groups. Due to, there were different methods for assessing the biochar effectiveness, in this study, the biochar effectiveness was calculated by obtained information from bioavailability studies. Also, Spearman correlation test was used to examine the relationships between variables. Statistical analysis was performed using SPSS and Excel software. Also, Web Plot Digitizer software was used to extract data from the presented graphs in the articles.

Findings

Based on the results from most studies, agricultural wastes were used as the raw materials for biochar production. In these studies, the treatments such as temperature, pyrolysis time, weight percent of biochar in soil, and incubation time were used. The weight percent of biochar in soil was more considered than other treatments by researchers. In the case of soil, variables such as pH, EC, CEC, CCE, soil texture, organic matter were more considered than other physical and chemical properties. There was a statistically significant difference between the studied heavy metals in terms of R variable ($p < 0.05$). According to the results from studies, biochar was more effective in decreasing the bioavailability of soil lead. Also biochar was most effective in reducing the bioavailability of zinc and cadmium. Effectiveness of biochar had significant positive correlation with biochar pH, application rate in soil, incubation time, pyrolysis temperature and carbon content of biochar, the amount of silt and clay in soil, soil EC, soil CEC and soil organic matter but significant negative correlation with biochar EC, amount of sand and soil pH. The highest correlation coefficient (0.515) was found for soil CEC. Therefore, this factor was the most important factors influencing the effectiveness of biochar in stabilization of heavy metals.

Conclusion

In Iran, agricultural wastes have higher priority for biochar production, because the high rate of waste production in agriculture. On the other hand, there are processing problems for other raw materials, including the high concentration of heavy metals in wastewater, high cost and need for advanced equipment to obtain a secure biochar for application in the soil. Based on the obtained results, biochar is effective in stabilizing heavy metals in contaminated soils and in this regard, there is a positive or negative relationship between soil properties and biochar. Therefore, it seems that by improving some factors that have a positive correlation, the effectiveness of the biochar can be increased, and for some characteristics that have a negative correlation, the effectiveness of the biochar can be improved by modifying them. In these studies, the long-term effects and security of biochar applications for soil remediation, soil organisms, and plant growth need to be considered.

Keywords: Biochar, Contaminated soils, Heavy metals stabilization, Meta-analysis, Remediation

مقدمه

خطر بالقوه خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به دلیل تجزیه ناپذیری، تجمع زیستی و سمیت بالای آن‌ها برای امنیت غذایی و سلامت انسان به طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف گزارش شده است (زاما و همکاران ۲۰۱۸). برای اصلاح خاک آلوده به فلزات سنگین، فناوری‌های مختلفی از قبیل شستشوی خاک (فنگ و همکاران ۲۰۲۰)، گیاه پالایی (شاه و داوری ۲۰۲۰)، تثبیت (دای و همکاران ۲۰۱۸) و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان روش‌های مختلف تثبیت فلزات سنگین به عنوان یک روش مقرون به صرفه و دوست دار محیط زیست مطرح است (گاو و همکاران ۲۰۱۹). که در آن به کمک فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی فلزات

سنگین به فرم‌های شیمیایی که از حلالیت و قابلیت دستیابی زیستی کمتری برخوردار هستند تبدیل می‌شوند (ایکسا و همکاران ۲۰۱۹). فلزات سنگین قابل تخریب نیستند، با این حال، دسترسی به آن‌ها می‌تواند با استفاده از مواد تثبیت کننده‌ای که مانع از ورود آن به زنجیره غذایی می‌شوند، کاهش یابد (کائور و همکاران ۲۰۱۸). برای فناوری تثبیت اغلب از اصلاح کننده‌های معدنی و آلی از جمله بیوچار برای کاهش دستیابی زیستی فلزات سنگین در خاک استفاده می‌شود.

بیوچار از حرارت دادن مواد آلی حاوی کربن در شرایط بدون اکسیژن تولید می‌شود (وانگ و همکاران ۲۰۱۶). این ماده یک اصلاح کننده موثر در تثبیت فلزات

مطالعاتی که تا کنون انجام شده است می‌توان به این فاکتورهای مهم دست پیدا کرد. متا آنالیز یک روش آماری برای تجزیه و تحلیل جامع حجم زیادی از داده‌های مطالعات متعدد و ادغام نتایج آنها با هم است (ماهر و همکاران ۲۰۱۵). این روش میزان تغییر در یک ویژگی (که به آن "اندازه اثر" نیز گفته می‌شود) را در پاسخ به یک تیمار تجربی در طیف وسیعی از متغیرها تخمین می‌زند (کیلی و پرپر ۲۰۱۲). متا آنالیز ابزاری مفید برای ارزیابی جامع اثر اصلاح بیوپچار بر اساس مجموعه داده‌های گسترده برای حل استدلال‌های موجود است (لیو و همکاران ۲۰۲۰). از جمله مطالعات متا آنالیز که به بررسی اثر بخشی بیوپچار در اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین پرداخته‌اند می‌توان به مطالعات چن و همکاران ۲۰۱۸؛ یان و همکاران ۲۰۲۰؛ وانگ و همکاران ۲۰۱۶؛ تیان و همکاران ۲۰۲۱ و آلبرت و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کرد. در این زمینه هیچ مطالعه‌ای داخل کشور انجام نشده است و مطالعه حاضر نخستین بررسی در این موضوع است. از زمان آغاز تولید بیوپچار در جهان در کشور ایران نیز محققین به بررسی استفاده از این ماده برای بهبود حاصلخیزی خاک‌ها پرداختند و پس از آن که نقش بیوپچار برای اصلاح خاک‌های آلوده مشخص شد مطالعاتی نیز با این اهداف انجام شد. در بررسی حاضر به شیوه متا آنالیز به مطالعه اثر بخشی بیوپچار برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در ایران پرداخته شده است و مهم‌ترین فاکتورها در میزان این اثر بخشی تعیین خواهد شد.

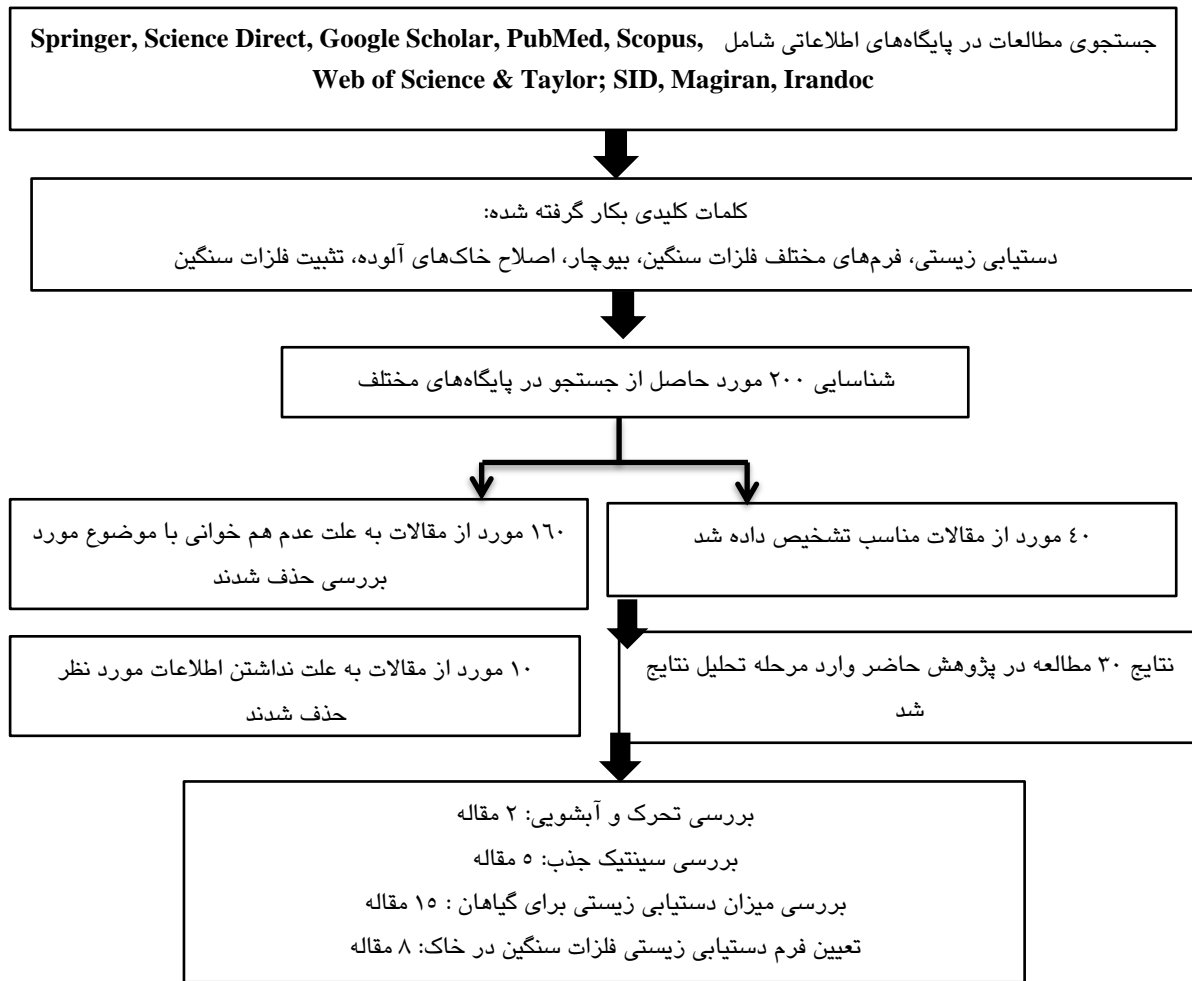
مواد رو روش‌ها

این مطالعه به شیوه متا آنالیز به بررسی فاکتورهای موثر بر میزان دستیابی زیستی فلزات سنگین با استفاده از بیوپچار در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در ایران پرداخت. مطالعات در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ جمع آوری و بر اساس الگوی ارائه شده در شکل ۱ انتخاب شدند.

سنگین در خاک است و اثرات آن با خصوصیات بیوپچار و خصوصیات خاک آلوده ارتباط مستقیمی دارد (چن و همکاران ۲۰۱۸). به طوری که دستیابی زیستی فلزات سنگین در خاک‌هایی با خصوصیات متفاوت، متغیر خواهد بود (یان و همکاران ۲۰۲۰). به طور معمول، بیوپچار می‌تواند مستقیماً از طریق فرآیندهای کمپلکس، ته نشینی، جذب و تبادل کاتیونی یا از طریق روش‌های غیرمستقیم با افزایش pH خاک، فلزات سنگین را بی حرکت و تثبیت کند (هی و همکاران ۲۰۱۹). خاصیت جالب توجه این ماده پایداری و مقاومت بالای آن در برابر تخریب در سیستم های خاک است که به دلیل این ویژگی، بیوپچار ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی را در خاک افزایش می‌دهد (عرب یارمحمدی و همکاران ۲۰۱۷). میزان تثبیت فلزات سنگین توسط بیوپچار به خصوصیات مختلف از جمله pH (یان و همکاران ۲۰۱۱)، میزان مواد معدنی (کاو و همکاران ۲۰۰۹)، میزان تخلخل (هاروی و همکاران ۲۰۱۱) بستگی دارد.

خواص بیوپچار تحت تأثیر درجه حرارت و نوع مواد اولیه است که تمایز آن‌ها می‌تواند منجر به تولید محصولاتی با طیف گسترده‌ای از مقادیر pH، سطح ویژه، مساحت سطح، حجم منافذ، CEC، ماده فرار، خاکستر و محتوای کربن شود (تومچیک و همکاران ۲۰۲۰). همچنین اثر بخشی بیوپچار در تثبیت فلزات سنگین تحت تاثیر خصوصیات خاک (احمد و همکاران ۲۰۱۴) و خصوصیات فلزات سنگین (بیزلی و همکاران ۲۰۱۱) قرار دارد. فرم‌های شیمیایی فلزات سنگین در خاک تعیین کننده‌ی میزان خطر آن‌ها است (یان و همکاران ۲۰۲۰). توزیع فرم‌های مختلف فلزات سنگین در خاک به ویژگی‌های همچون pH، Eh، بافت خاک، ترکیب کانی شناسی، مواد آلی و کربنات و نیز خواص شیمیایی عناصر بستگی دارد (زاهدی فر ۲۰۱۸).

با توجه به گستردگی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوپچار و خاک تعیین موثرترین فاکتورها در این زمینه بسیار اهمیت دارد که با بررسی نتایج



شکل ۱- روند کلی استخراج اطلاعات در مطالعه حاضر.

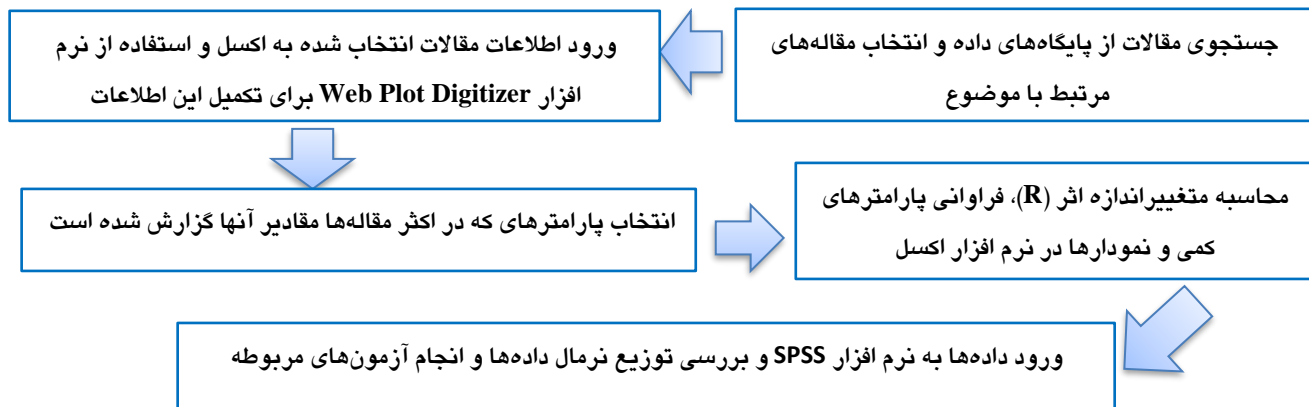
نمونه خاک شاهد و تیمار بود. بر این اساس به صورت کلی برای بررسی اثر بخشی بیوچار بر دستیابی زیستی فلزات سنگین در خاک و تعیین عوامل موثر بر آن از داده‌های ۱۱ مقاله که به طور کلی شامل ۱۲۳ مشاهده مستقل بود، استفاده شد. برای فلز سنگین کادمیوم ۷۳ مشاهده، برای سرب ۳۸ و برای روی ۱۲ مشاهده مستقل استفاده گردید. در شکل ۲ روند تحلیل داده‌ها خلاصه شده است.

به منظور تعیین اثر بخشی بیوچار، متغیر اندازه اثر که میزان تغییرات دستیابی زیستی را بین دو گروه کنترل و تیمار نشان می‌دهد به کمک رابطه ۱ محاسبه شد. این متغیر بر اساس اطلاعات استخراج شده از مطالعاتی که به بررسی دستیابی زیستی فلزات سنگین به کمک سنجش فرم قابل دستیابی زیستی در خاک

بر اساس بررسی انجام شده روی ۳۰ مقاله که اثر بیوچار را بر دستیابی زیستی فلزات سنگین مورد مطالعه قرار دادند؛ ۴ روش شامل بررسی تحرک و آبشویی، بررسی سینتیک جذب، بررسی میزان دستیابی زیستی فلزات سنگین برای گیاهان و تعیین فرم قابل دستیابی زیستی فلزات سنگین در خاک، مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از مطالعات انجام شده به صورت همزمان از چند روش برای ارزیابی دستیابی زیستی فلزات سنگین استفاده کردند به عنوان مثال در کنار بررسی سینتیک جذب، فرم قابل دستیابی زیستی فلزات سنگین را در خاک تحت تاثیر بیوچار سنجش نمودند. شرط به کارگیری مقالات برای بررسی اثر بخشی بیوچار بر دستیابی زیستی فلزات سنگین، ارائه میانگین فرم شیمیایی قابل دستیابی فلزات سنگین در

$$R = \ln(X_t) - \ln(X_c) \quad [1]$$

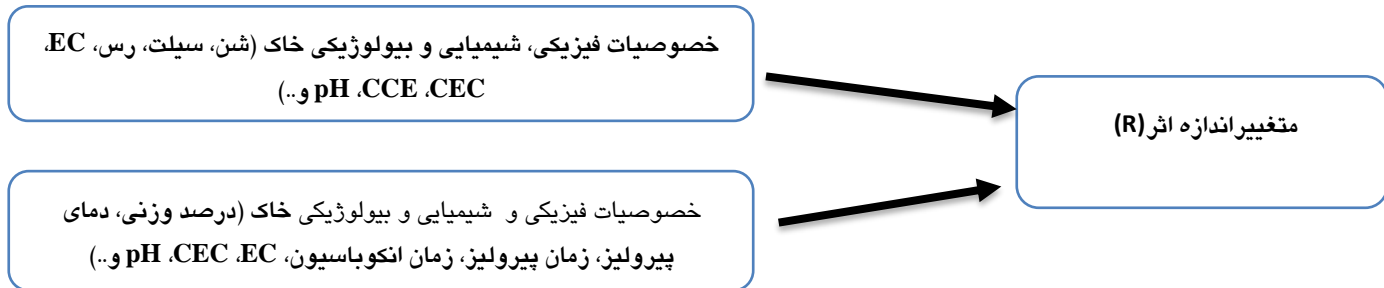
پرداخته‌اند، محاسبه شد. در این رابطه X_c و X_t به ترتیب میانگین متغییر در گروه تیمار و گروه کنترل هستند (چن و همکاران ۲۰۱۸؛ یان و همکاران ۲۰۲۰).



شکل ۲- روند تحلیل داده‌ها.

خصوصیات بیوچار با متغییر R بکار گرفته شد. آنالیزها به کمک نرم افزارهای SPSS و Excel انجام شد. از نرم افزار تحت وب Web Plot Digitizer به منظور استخراج داده‌ها از نمودارهای ارائه شده در مقالات، استفاده شد. چهارچوب نظری تحقیق در شکل ۳ رسم شده است که متغییر اندازه اثر متغییر وابسته و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و بیوچار متغییرهای مستقل هستند.

پس از بررسی توزیع نرمال داده‌ها به کمک آزمون کلموگروف اسمیرنوف مشخص شد که داده‌ها دارای توزیع نرمال نیستند و از آزمون ناپارامتری کروسکال والیس برای مقایسه فلزات سنگین از نظر متغییر نسبت پاسخ استفاده شد. برای تعیین مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر اثر بخشی بیوچار در کاهش دستیابی زیستی فلزات سنگین در خاک آزمون همبستگی اسپیرمن بین متغییرهای خصوصیات خاک و



شکل ۳- چهارچوب نظری تحقیق.

برای تولید بیوچار به منظور اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین استفاده نمودند. فراوانی کاربرد کمپوست و مواد معدنی به همراه بیوچار در این مطالعات بیش از سایر مواد بود و پس از این دو نانو مواد در اولویت بعدی قرار داشتند. با توجه به اینکه در بخش مدیریت پسماندهای کشاورزی در ایران، حجم بالای ضایعات به

نتایج و بحث

فاکتورهای مورد بررسی در مطالعات جمع آوری شده در جدول ۱ خلاصه شده است. بر اساس این نتایج مواد اولیه تولید بیوچار در بیشتر مطالعات صورت گرفته ضایعات کشاورزی بودند و تنها یک مطالعه از لجن فاضلاب و یک مطالعه از پسماند شهری

دادند که شامل بررسی تحرک و آبشویی فلزات سنگین تحت تاثیر بیوچار، سنجش میزان جذب و دستیابی زیستی فلزات سنگین توسط گیاهان، بررسی سنتتیک جذب فلزات سنگین و سنجش فرم‌های مختلف فلزات سنگین پس از کاربرد بیوچار و محاسبه فرم قابل دستیابی زیستی و یا محاسبه فاکتورهای مختلف از جمله فاکتور تحرک فلزات سنگین است. در مطالعاتی که از گیاهان به منظور بررسی دستیابی زیستی فلزات سنگین استفاده کرده‌اند؛ ذرت، شبدر، کاهو و سورگوم بیش از سایر گیاهان به کار گرفته شدند که از این بین ذرت در پژوهش‌های بیشتری استفاده شده است. در بررسی ایزوترم جذب، فروندلیچ و لانگمویر بیش از سایر مدل‌ها بررسی شده‌اند. در این مطالعات همچنین اثرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محیط (خاک و اصلاح کننده) در میزان جذب مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش‌هایی که فرم دستیابی زیستی فلزات سنگین را در خاک مورد سنجش قرار می‌دهند از روش‌هایی همچون استخراج متوالی، عصاره‌گیری با DTPA و EDTA بیش از سایر روش‌ها استفاده شده است. بر اساس بررسی صورت گرفته تمام مطالعات در گلخانه انجام شده است و در اکثر موارد نمونه‌های خاک جمع آوری شده به صورت آزمایشگاهی به فلز سنگین مورد نظر آلوده شدند. بطور کلی نتیجه تمام مطالعات انجام شده در این بررسی کاهش دستیابی زیستی فلزات سنگین را در نتیجه کاربرد بیوچار در پی داشت (جدول ۱).

دلیل عدم فراوری بخش‌های قابل استفاده آن به‌عنوان یکی از مشکلات محیط زیست مطرح است، از راهکارهای کاهش حجم پسماند بخصوص ضایعات کشاورزی می‌توان به تولید بیوچار به عنوان زغال زیستی مورد استفاده در کشاورزی و اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین اشاره کرد. همچنین فراوانی مواد معدنی در کشور و اثر بخشی آنها موجب شده است این مواد نیز از اصلاح کننده‌های مهم در مورد خاک‌های آلوده به فلزات سنگین باشند. در ارتباط با بیوچار و خاک با توجه به اهمیت نقش خصوصیات آنها در تثبیت فلزات سنگین (تومچیکو همکاران ۲۰۲۰) در مطالعات مورد بررسی توجه ویژه‌ای به آنها شده است.

در این بررسی‌ها دما، زمان پیرولیز، درصد وزنی بیوچار به خاک و زمان انکوباسیون تیمارهای مورد بررسی در مورد بیوچار و سایر اصلاح کننده‌ها بودند، که درصد وزنی بیش از سایر تیمارها توسط محققین مورد توجه بوده است. در مطالعات مربوط به بررسی اثرات بیوچار در دستیابی زیستی فلزات سنگین سنجش خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار و خاک بسیار مهم است که بر اساس مطالعات بررسی شده در مورد بیوچار سطح ویژه، میزان خاکستر، CEC ، EC ، pH ، درصد کربن، نیتروژن و هیدروژن از مهم‌ترین فاکتورهای مورد بررسی بودند. در مورد خاک CEC ، EC ، pH ، بافت خاک، ماده آلی بیش از سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مورد توجه بودند. از بین فلزات سنگین سرب و کادمیوم بیش از سایر فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفتند و پس از این دو روی، مس و نیکل فلزات سنگینی بودند که فراوانی بیشتری از مطالعات را به خود اختصاص دادند.

بطور کلی بر اساس بررسی صورت گرفته، محققین میزان دستیابی زیستی فلزات سنگین تحت تاثیر بیوچار را به چهار طریق مورد بررسی قرار

جدول ۱- خلاصه فاکتورهای مورد بررسی در مطالعات جمع آوری شده.

ردیف	مواد اولیه تولید بیوچار	سایر اصلاح کننده‌ها	شرایط تولید بیوچار	تیمارهای بیوچار	فاکتورهای خاک	فلزات سنگین	گیاه و موجود زنده	روش اجرا	نتایج	منطقه مورد مطالعه	رفرنس
۱	تراشه های باقی مانده از سایت چوب و کاغذ	کامپوزیت MTCB	دما (۶۰۰ °C) زمان (۲ ساعت)		pH, CEC	Zn, Cu, Pb	-	بررسی ایزوترم های جذب	فلزات سنگین در پیوند با NH ₂ بی حرکت شدند	اطراف معدن مس سرچشمه کرمان	عرب یار محمدی و همکاران (۲۰۱۷)
۲	ضایعات هرس انگور	-	دما (۵۰۰ °C) زمان (۲ ساعت)	درصد وزنی (۰، ۲، ۵ و ۱۰) و زمان انکوباسیون (۱، ۲، ۴ و ۸ هفته)	CEC, ماده آلی, EC, CCE بافت خاک	Pb, Cd, Zn, Cu	-	اندازه گیری فرکس‌ها قبل و بعد از نکوباسیون	تحرك Pb, Cd, Cu, Zn به ترتیب ۷۰، ۴۹ و ۶۲ درصد در تیمار بیوچار ۱۰ درصد کاهش یافت.	اطراف معدن سرب و روی زنجان	حمزه نژاد و سپهر (۲۰۱۸)
۳	باگاس نیشکر	-		درصد وزنی (۰ و ۴)	pH, CEC	Pb, Cd	ذرت	انکوباسیون و بررسی دستیابی زیستی برای گیاه	دستیابی زیستی Cd و Pb به گیاه کاهش یافت و موجب بهبود رشد آن شد	-	بی‌ریا و همکاران (۲۰۱۷)
۴	تراشه‌های پوست درخت	بیوچار/رس/ناز و کامپوزیت کیتوزان (MTCB)	دما (۶۰۰ °C) زمان (۲ ساعت)		تخلخل، هدایت هیدرولیکی، pH	Pb, Cu, Cd, Zn	-	بررسی تحرك و آبشویی فلزات سنگین در خاک	در هر دو خاک اصلاح شده و اصلاح نشده، Pb و Cd به ترتیب بیشترین و کمترین تحرك را داشتند. Zn و Cu از تحرك متوسطی برخوردار بودند و اثر اصلاح کننده چندان معنی دار نبود.	اطراف کارخانه فرآوری مواد معدنی باما در اصفهان	عرب یار محمدی و همکاران (۲۰۱۸)
۵	کاه ذرت، کاه گندم، پوسته برنج و تفاله ریشه شیرین بیان	-	دما (۵۰۰ °C) زمان (۴ ساعت)	درصد وزنی (۳٪)	بافت خاک، pH, EC, CEC, CCE, N	Pb, Cu, Ni	-	انکوباسیون و بررسی ایزوترم های جذب	جذب بیشتر به صورت چند لایه و ظرفیت جذب به ترتیب Ni < Cu < Pb بود که با ثابت هیدرولیز، شعاع یونی و الکترونگاتیوی این فلزات ارتباط داشت.	ترکیبی از خاک‌های جنوب ایران	بوستانی و همکاران (۲۰۱۹)
۶	تراشه های چوب خشک	نانو آهن صفر ظرفیتی (nZVI)	دما (۷۴۰ °C) زمان (۴ ساعت)		.OC, EC, pH, بافت خاک	Cd	شبدر	بررسی دستیابی زیستی از طریق فاکتورهای انتقال و تجمع در گیاه	غلظت Cd در بافت های گیاهی در حضور نانو آهن صفر ظرفیتی افزایش یافت، در حالی که استفاده از بیوچار باعث بیحرکتی Cd در خاک شد.	جنوب تهران	زند و همکاران (۲۰۲۰)

ادامه جدول ۱-

ردیف	مواد اولیه تولید بیوپچار	سایر اصلاح کننده‌ها	شرایط تولید بیوپچار	تیمارهای بیوپچار	فاکتورهای خاک	فلزات سنگین	گیاه و موجود زنده	روش اجرا	نتایج	منطقه مورد مطالعه	رفرنس
۷	پوسته برنج و خاکستر زغال	-	دما (۳۰۰ °C و ۶۰۰ °C) و زمان (۴ ساعت)	درصد وزنی (۲ و ۵) و دما (۳۰۰ °C و ۶۰۰ °C)	pH ,EC ,CCE ,CEC	Cd ,Pb ,Cr , Ni ,Cu	ذرت	بررسی دستیابی زیستی فلزات سنگین برای گیاه	استفاده از اصلاح کننده ها موجب کاهش تحرک و دستیابی زیستی فلزات سنگین شد	منطقه باجگاه شیراز	صفری (۲۰۱۸)
۸	کاه گندم خشک	-	دما (۴۰۰ °C) زمان (۴ ساعت)	-	pH ,EC ,CEC ماده آلی	Fe	-	بررسی شکل‌های مختلف فلزات سنگین و محاسبه شاخص تحرک	در تیمارهای بیوپچار بخش باقیمانده کمترین و بخش کربنات غالب بود	جنگل‌های فسا در فارس	زاهدی‌فر (۲۰۱۸)
۹	لجن فاضلاب صنعتی	-	دما (۳۰۰ °C و ۶۰۰ °C) و زمان (۳ ساعت)	درصد وزنی (۲، ۴ و ۸) و دما (۳۰۰ °C و ۶۰۰ °C)	pH ,EC ,CEC بافت خاک	Pb ,Cd	-	محاسبه مقدار فلزات سنگین در آب ثقی و آبشویی پس از استفاده از بیوپچار	بیوپچار دمای ۶۰۰ °C، در کاهش فرم تبدیلی موثرتر بود. پس از استفاده از بیوپچار فرم باقیمانده افزایش و در نتیجه دستیابی زیستی کاهش یافت	اطراف معدن سرب و روی آهنگران ملایر	کریمی و همکاران (۲۰۲۰)
۱۰	زباله‌های شهری	کمپوست	درصد وزنی (۱، ۲ و ۴)	درصد وزنی (۱، ۲ و ۴)	pH ,EC ,CEC SAR	Zn ,Cr	علف پشمکی	کاربرد شبکه عصبی مصنوعی و بررسی میزان جذب در گیاه	بیشترین غلظت Zn و Cr به ترتیب با افزودن ۸/۰ درصد کمپوست و ۵۲/۰ درصد بیوپچار مشاهده شد.	شهر صنعتی البرز	روحی و همکاران (۲۰۱۹)
۱۱	کاه و کلش برنج	پومیس، لیکا، زئولیت و بنتونیت -	دما (۴۲۰ °C و ۶۴۰ °C) و زمان (۲ ساعت)	درصد وزنی (۱، ۵ و ۲۰) و دما (۶۴۰ °C و ۴۲۰ °C)	pH ,EC ماده آلی، SOD ,N ,ASP ,CAT	Pb	ذرت	بررسی دستیابی زیستی فلزات سنگین برای گیاه	دستیابی زیستی سرب کاهش یافت و در درصد وزنی ۵ درصد این کاهش بیشتر بود. زئولیت بیشترین کاهش جذب سرب را نشان داد.	سفید شاهکلایی و همکاران (۲۰۱۸)	

ردیف	مواد اولیه تولید بیوچار	سایر اصلاح کننده‌ها	شرایط تولید بیوچار	تیمارهای بیوچار	فاکتورهای خاک	فلزات سنگین	گیاه و موجود زنده	روش اجرا	نتایج	منطقه مورد مطالعه	رفرنس
۱۲	پوسته انار	کمپوست پسماند شهری	دما (۵۰۰ °C)	درصد وزنی (۲ و ۴)	pH, EC بافت خاک CaCO ₃ N, OC	Pb	سورگوم	بررسی دستیابی زیستی فلزات سنگین در گیاه	کاربرد ۲۰ ton ha ⁻¹ کمپوست پسماند شهری به همراه ۱۵ g kg ⁻¹ بیوچار باعث کاهش ۱۱ درصدی در مقدار سرب قابل دسترس در خاک شد.	روستای پاکل در شهرستان شازند	بقائی (۲۰۱۹)
۱۳	تفاله‌های پسته	-	دما (۲۰۰ °C و ۴۰۰ °C)	دما در سه سطح زمان (۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز)	pH, EC CCE, CEC .CaCO ₃ ماده آلی، بافت خاک	Cd	-	اندازه گیری فرم دستیابی زیستی	بیوچار تهیه شده در دمای ۶۰۰ °C بیشترین تأثیر را بر کاهش قابلیت جذب کادمیم نشان داد و با افزایش سطح مصرف بیوچار قابلیت جذب کادمیم کاهش یافت	مجاورت رودخانه بشار یاسوج	افراسیابی و همکاران (۲۰۱۷)
۱۴	بقایای پوست پسته	کمپوست زباله های شهری	دما (۵۰۰ °C)	وزنی (۰ و ۱/۵ درصد)	pH, EC N, بافت خاک آنزیم کاتالاز	Cd	شاهی	بررسی میزان جذب فلزات سنگین به گیاه	کاربرد ۱۵ mg kg ⁻¹ بیوچار در تیمار ۱۵ ton ha ⁻¹ کمپوست زباله شهری و آلوده به ۲۰ mg kg ⁻¹ کادمیوم، به ترتیب باعث کاهش ۱۲ و ۹ درصدی غلظت Cd ریشه و اندام هوایی شد.	شهر زرنديه استان مرکزی	بقائی (۲۰۱۸)
۱۵	پسماند گل رز شاخه بریده	-	زمان (۲ ساعت) دما (۵۰۰ °C)	درصد وزنی (۲، ۵ و ۱۰)	pH, EC بافت خاک N، ماده آلی	Pb, Cd	کاهو	بررسی میزان جذب فلزات سنگین به گیاه و دستیابی زیستی آن‌ها	افزایش بیوچار از ۰ به ۵ و ۱۰ g kg ⁻¹ در سطح آلودگی ۲۰ mg kg ⁻¹ کادمیوم، به ترتیب سبب کاهش ۹۲/۴۷ و ۱۷/۲۴ درصدی مقدار کادمیوم ریشه شد	گلخانه پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد	ولی‌زاده قلعه بیگ و همکاران (۲۰۲۰)
۱۶	کاه و کلش برنج	پومیس، لیکا، زئولیت و بنتونیت	۴۲۰ °C ۶۴۰ به ترتیب در ۳۰ دقیقه و ۲ ساعت	درصد وزنی (۰، ۱ و ۵) دما (۵۰۰ °C و ۶۴۰، ۴۲۰)	pH, EC CEC CCE بافت خاک ماده آلی	Pb, Cd	-	بررسی زیست فراهمی و فرم-های شیمیایی مختلف فلزات سنگین در خاک پس از کاربرد اصلاح‌کننده‌ها	بیشترین کاهش Pb و Cd در بخش تبدالی در بیوچار ۵٪ و ۶۴۰ مشاهده شد که در مقایسه با شاهد، به ترتیب کاهش ۹۶/۵۴ و ۴۱ درصد داشتند.	خاک آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه گرگان	سفیدگری شاهکلایی و همکاران (۲۰۱۹)

ادامه جدول ۱-

ردیف	مواد اولیه تولید بیوپچار	سایر اصلاح کننده‌ها	شرایط تولید بیوپچار	تیمارهای بیوپچار	فاکتورهای خاک	فلزات سنگین	گیاه و موجود زنده	روش اجرا	نتایج	منطقه مورد مطالعه	رفرنس
۱۷	کاه گندم، کاه ذرت، تقاله ریشه شیرین بیان، سبوس برنج و کود گوسفندی	زئولیت	زمان (۴ ساعت) دما (۵۰۰ °C)	درصد وزنی (۰، ۳ و ۶)	pH, EC, CEC, CCE	Zn	-	سنجش فرم‌های شیمیایی فلزات سنگین در خاک و سنتتیک آزاد سازی	هر پنج نوع بیوپچار سبب کاهش معنی‌دار شکل محلول + تبادل و کربناتی و افزایش روی متصل به اکسید آهن بلورین شدند. بیوپچار کاه گندم همراه با ۶ درصد وزنی زئولیت بهترین تیمار در تثبیت روی بود	خاک مزارع دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب شیراز	بوستانی و نجفی قیری، (۲۰۱۸)
۱۸	کود گاوی پوسیده	-	دما (۴۰۰ °C) زمان (۳ ساعت)	درصد وزنی (۰، ۲ و ۴)	pH, EC, CEC, CaCO3	Ni	ذرت	بررسی دستیابی زیستی با استفاده از جمع فلزات سنگین در گیاه	مصرف بیوپچار، غلظت Ni را به طور معنی داری (۳۳ درصد) در اندام هوایی گیاه کاهش داد	مزارع کشاورزی دانشگاه شهید چمران	رحیمی و همکاران (۲۰۱۹)
۱۹	ضایعات کشاورزی آفتابگردان	زئولیت کربن فعال	دما (۶۰۰ °C)	درصد وزنی (۰، ۱/۵، ۱، ۰/۵ و ۲)	pH, EC, CEC, CaCO3	Pb	-	بررسی ایزوترم های جذب	بهترین pH جذب Pb، ه و زمان تعادلی مناسب ۲۴ ساعت بود. با افزایش وزن جاذب، میزان حذف فلز Pb از محلول افزایش یافت.	کرمانشاه	کیهانی نژاد و امیری نژاد (۲۰۱۸)
۲۰	پوست گردو ظرفیتی	نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی	زمان (۴ ساعت) دما (۵۰۰ °C)	درصد وزنی (۰/۵، ۲، ۴ و ۵)	pH, EC, CEC, CaCO3	Cd	-	آزمایشات سینتیک واجذب و سنجش شکل‌های شیمیایی کربناتی شد.	هر سه سطح وزنی در خاک‌های تیمار شده با بیوپچار پوشش داده شده با نانوذرات آهن صفر ظرفیتی سبب کاهش درصد نسبی دو شکل متحرک تبادل و کربناتی شد.	شهرستان خانوک، استان کرمان	صفاری (۲۰۱۹)
۲۱	پوست برنج	-	درصد وزنی (۰، ۲ و ۴)	pH, EC, CEC, ماده آلی، بافت خاک	Zn	ذرت قارچ اندوفیت	ذرت	بررسی دستیابی زیستی فلزات سنگین در گیاه	برای ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ (mg Kg ⁻¹) آلودگی روی نسبت به خاک غیرآلوده، به ترتیب ۰/۲، ۱۰/۱۲، ۱۹/۱۹ و ۲۳/۱۹ درصد کاهش یافت.	باجگاه استان فارس	دیانت مهارلویی و همکاران (۲۰۱۸)

ادامه جدول ۱-

ردیف	مواد اولیه تولید بیوچار	سایر اصلاح کننده‌ها	شرایط تولید بیوچار	تیمارهای بیوچار	فاکتورهای خاک	فلزات سنگین	گیاه و موجود زنده	روش اجرا	نتایج	منطقه مورد مطالعه	رفرنس
۲۲	بیوچار آماده	کمپوست زباله‌های شهری	درصد وزنی (۱۰ و ۲)	EC pH OC N p بافت خاک	Pb	گیاه نسی، استبرق، یونجه	بررسی دستیابی زیستی فلزات سنگین از طریق میزان تجمع در گیاه	بیشترین مقدار RF (فاکتور پالایش) برای فلز Pb در گونه استبرق و تیمار بیوچار ۱ و ۲ درصد به میزان ۰/۰۸ بود.	پازنان گچساران	طوبلی و همکاران (۲۰۱۸)	
۲۳	کاه و کلش برنج	زئولیت، بنتونیت، لیکا و پومیس	دما (۲۰ و ۶۴۰) زمان (۳۰ در ۶۴۰) دقیقه و ۴۲۰ در ۲ (ساعت)	pH, EC CEC CaCO ₃ ماده آلی، بافت خاک	.Cd, Pb	-	سنجش فرم قابل دستیابی زیستی در خاک	بیشترین میزان کاهش Pb با گذشت زمان در سطح ۱٪ بیوچار ۶۴۰ مشاهده گردید	منطقه شش آب شرق استان گلستان	سفیدگر شاهکلایی و همکاران (۲۰۲۰)	
۲۴	کود گاوی	کود گاوی بدون هیچ گونه فراوری	درصد وزنی (۴ و ۲۰)	pH, EC CEC CaCO ₃ ماده آلی، بافت خاک	Ni	-	بررسی سینتیک جذب	کاربرد کود گاوی و بیوچار حاصل از آن در تمام زمان‌ها و سطوح باعث افزایش معنی دار جذب Ni نسبت به تیمار شاهد گردید.	مزارع کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز	رحیمی و همکاران (۲۰۱۸)	
۲۵	برگ گردو	-	دما (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰)	pH, EC CEC CaCO ₃ OC, بافت خاک	Pb	ذرت	میزان دستیابی زیستی فلزات سنگین برای گیاهان	با افزایش دمای تهیه و مقدار کاربرد اصلاح کننده‌ها در خاک آهکی، Pb در دسترس و تجمع زیستی آن در گیاه ذرت کاهش یافت	منطقه سپاهان شهر واقع در جنوب اصفهان	کبیری و حسینی پور (۲۰۱۸)	

ادامه جدول ۱-

ردیف	مواد اولیه تولید بیوپچار	سایر اصلاح کننده‌ها	شرایط تولید بیوپچار	تیمارهای بیوپچار	فاکتورهای خاک	فلزات سنگین	گیاه و موجود زنده	روش اجرا	نتایج	منطقه مورد مطالعه	رفرنس
۲۶	تفاله هویج	-	زمان (۳ ساعت) دما (۵۰۰ °C)	درصد وزنی (۰، ۴ و ۸)	pH .EC CEC بافت خاک OC، ماده آلی	Pb ،Cd	-	بررسی مدل‌های سنتتیک جذب برای فلزات سنگین	حداکثر ظرفیت جذب سطحی Cd و Pb به ترتیب از ۶۴۹/۲۷ و ۸۴۶/۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم (در خاک شاهد) به ۲۰۷۸/۲۹ و ۳۱۸۲/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم (در خاک تیمار شده با ۸ درصد بیوپچار) افزایش یافت.	زمین‌های چای در شهرستان لاهیجان	غلامی و رحیمی (۲۰۲۰)
۲۷	چوب بادام	-	درصد وزنی (۰، ۲۰ و ۴۰)		pH .EC CEC بافت خاک Ca	Pb	ذرت	بررسی توانایی گیاه پالایی از طریق میزان جذب توسط گیاه	افزایش قابلیت گیاه پالایی در حضور بیوپچار	ورامین	حاجی نجفی و همکاران (۲۰۱۶)
۲۸	بیوپچار آماده شهری	کمپوست زباله‌های شهری	درصد وزنی (۰، ۱ و ۲)		EC pH CEC بافت خاک	Pb،Cd Ni ،Cr Zn	جارو علفی	بررسی توانایی گیاه پالایی از طریق میزان جذب توسط گیاه	کاربرد کمپوست زباله شهری و بیوپچار باعث افزایش جذب Pb، Cd، Zn و Ni در خاک‌های آلوده توسط گیاه جارو علفی می‌شوند.	شهرک صنعتی البرز در استان قزوین	جعفری و همکاران (۲۰۱۷)
۲۹	بقایای هرس درخت سیب	-	زمان (۲ ساعت) دما (۵۰۰ °C)	درصد وزنی (۰، ۱۰ و ۲۰، ۵) زمان انکوباسیون (۱، ۲، ۴ و ۸ هفته)	pH .EC CEC CCE بافت خاک CaCO ₃ ماده آلی	Cd Pb Cu Zn	-	بررسی فرم‌های مختلف شیمیایی	کاربرد بیوپچار موجب کاهش معنادار عناصر در بخش‌های تبدالی و کربناتی و افزایش معنادار عناصر در بخش‌های پیوند با ماده آلی و اکسیدهای آهن و منگنز نسبت به خاک شاهد گردید.	اطراف معدن انگوران استان زنجان	حمزه نژاد و همکاران (۲۰۱۸)
۳۰	لجن فاضلاب شهری	-	دما (۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰) و زمان (۱ ساعت)	درصد وزنی (۰، ۳ و ۵) زمان انکوبا سیون (۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ روز)	EC pH بافت خاک	Zn Pb	-	سنجش فرم قابل دستیابی زیستی در خاک	کاربرد بیوپچار موجب تثبیت فلزات سنگین مورد بررسی تا ۷۰ درصد شد.	اطراف معدن سرب و روی باما در اصفهان	فتحیان پور و همکاران (۲۰۱۸)

که با اضافه شدن به خاک، pH خاک را افزایش می‌دهند و بارهای سطحی منفی ناشی از وجود بیوپچار در خاک می‌تواند عامل جذب کاتیون‌های فلزی باشد (کیم و همکاران ۲۰۱۵). بالا بودن pH در بیوپچار موجب افزایش مکان‌های فعال برای جذب فلزات سنگین می‌شود (گیو و همکاران ۲۰۱۴). بنابراین pH بیوپچار با میزان اثر بخشی آن در تثبیت فلزات سنگین دارای همبستگی مثبت است.

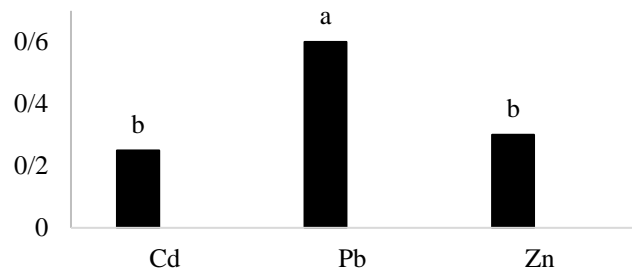
این بررسی نشان داد که دمای پیرولیز نیز با میزان اثر بخشی بیوپچار (R) دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری است و با افزایش میزان دمای پیرولیز میزان اثر بخشی بیوپچار نیز افزایش می‌یابد که با نتایج مطالعه سفیدگر شاهکلایی و همکاران (۲۰۱۸) و افراسیابی و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد. بیوپچار تولید شده در دمای بالاتر دارای سطح ویژه بالاتری است و بیوپچارهای که دارای سطح ویژه بالاتری هستند، به دلیل افزایش مکان‌های واکنشی در دسترس، می‌تواند در اصلاح خاک‌های آلوده مؤثرتر باشند (اوکانر و همکاران ۲۰۱۸). در واقع با افزایش درجه حرارت پیرولیز تجزیه افزایش یافته، ماده فرار بیشتری خارج می‌شود و مواد کربنی بیشتری با ساختار منافذ بازتر تولید می‌شود و از این رو سطح بیشتری را در خود جای می‌دهد (تومچیک و همکاران ۲۰۲۰). از طرفی افزایش دمای پیرولیز موجب افزایش میزان خاکستر و کربن بالاتر و همچنین افزایش pH بیوپچار و در نتیجه تثبیت بیشتر فلزات سنگین از طریق اثر قلیائیت می‌شود (شن و همکاران ۲۰۱۷). بر اساس نتایج به دست آمده، دمای پیرولیز با میزان کربن، CEC و pH بیوپچار دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری بود که تائیدی بر این موضوع می‌باشد (جدول ۲).

نتایج آزمون کروسکال والیس برای مقایسه فلزات سنگین از نظر متغییراندازه اثر (R) در شکل ۴ ارائه شده است. این نتایج نشان داد که بین فلزات سنگین مورد بررسی از نظر متغییر R اختلاف آماری معنی‌داری در سطح ۵ درصد وجود داشت. بر اساس نتایج مطالعات صورت گرفته، بیوپچار در کاهش دستیابی زیستی سرب از اثر بخشی بیشتری برخوردار بوده است. پس از سرب بیوپچار بیشترین اثر بخشی را در مورد دستیابی زیستی روی نسبت به کادمیوم داشت. که احتمالاً به علت تمایل بیشتر سرب نسبت به سایر عناصر مورد مطالعه برای جذب بر روی سطوح تبادل بیوپچار باشد. قدرت اتصال و جذب سرب به سطوح نسبت به سایر فلزات معمولاً بیشتر است (سلیمانی و همکاران ۲۰۱۰).

نتایج آزمون اسپیرمن در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این نتایج متغییر اندازه اثر با مقدار کل فلزات سنگین در خاک و pH بیوپچار در سطح ۵ درصد دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار بود. همچنین متغییر اندازه اثر با درصد وزنی بیوپچار با خاک، زمان انکوباسیون، دمای پیرولیز و غلظت کربن در بیوپچار، میزان سیلت و رس در خاک، EC خاک، CEC خاک و ماده آلی خاک دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح ۱ درصد بود. متغییر اندازه اثر با EC بیوپچار، میزان شن و pH خاک همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح ۱ درصد نشان داد. بزرگترین ضرایب همبستگی در مورد CEC خاک و سیلت به ترتیب ۰/۵۱۵ و ۰/۵۱۴ بود. هر چه میزان pH بیوپچار بیشتر باشد تثبیت فلزات سنگین توسط بیوپچار بیشتر خواهد بود (شن و همکاران ۲۰۱۷) البته نه لزوماً همه فلزات سنگین بلکه فلزات سنگین کاتیونی که در pH قلیایی به فرم رسوبی در می‌آیند. یکی از مکانیسم‌های اصلی بیوپچار برای تثبیت فلزات سنگین در خاک افزایش pH خاک است (بیزلی و همکاران ۲۰۱۱). پس از پیرولیز، بیوپچارها به مواد قلیایی تبدیل می‌شوند

این افزایش به دلیل تجزیه آهسته ترکیبات قلیایی موجود در بیوپچار در طول زمان انکوباسیون است و با افزایش pH میزان دستیابی زیستی فلزات سنگین کاهش می‌یابد (ژانگ و همکاران ۲۰۱۷) و در نتیجه اثر بخشی بیوپچار افزایش می‌یابد.

غلظت کربن در بیوپچار با میزان اثر بخشی بیوپچار در تثبیت فلزات سنگین دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری بود (جدول ۲). مواد آلی می‌تواند بر تثبیت مواد آلاینده تأثیر بگذارد و از این رو بر دستیابی زیستی آلاینده‌ها موثر است (اوکانر و همکاران ۲۰۱۸). مواد آلی در بیوپچار موجب افزایش سطح ویژه بیوپچار و در نتیجه افزایش ظرفیت جذب در آن می‌شوند (لی و همکاران ۲۰۱۹). بنابراین با افزایش غلظت کربن که پایه سازنده اکثر مواد آلی است، اثر بخشی بیوپچار در تثبیت فلزات سنگین افزایش خواهد یافت و رابطه بین میزان کربن بیوپچار و متغییر اندازه اثر مثبت خواهد بود. میزان سیلت و رس در خاک دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با میزان اثر بخشی بیوپچار در تثبیت فلزات سنگین بود (جدول ۲). در خاک‌هایی با محتوای سیلت و رس بالاتر دستیابی زیستی فلزات سنگین کمتر است و در نتیجه کاربرد بیوپچار برای کاهش دستیابی زیستی و تثبیت فلزات سنگین در این خاک‌ها از اثر بخشی بالاتری در مقایسه با خاک‌های با رس و سیلت کمتر برخوردار است. در واقع فلزات سنگین در خاک‌های ریز بافت که محتوای رس و سیلت بالاتری هستند تحرک و دستیابی زیستی کمتری دارند (یان و همکاران ۲۰۲۰) که در واقع به دلیل بار منفی رس، جذب فلزات سنگین بیشتر و در نتیجه دستیابی زیستی کمتر خواهد بود. در این بررسی بر اساس نتایج مطالعات انجام شده میزان شن در خاک با میزان اثر بخشی بیوپچار در تثبیت فلزات سنگین دارای همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح ۱ درصد بود (جدول ۲). در خاک‌های درشت بافت که درصد شن بالاتری دارند نسبت به خاک‌های با محتوای شن کمتر، تثبیت فلزات سنگین کمتر اتفاق می‌افتد. بر این اساس



شکل ۴- مقایسه اثر بخشی بیوپچار در کاهش دستیابی زیستی فلزات سنگین (حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری است).

جدول ۲- ضرایب همبستگی بین خصوصیات خاک و خصوصیات بیوپچار با متغییر اندازه اثر.

متغیر اندازه اثر (میزان اثر بخشی بیوپچار) با درصد وزنی بیوپچار و خاک همبستگی مثبت و معنی‌دار را در سطح ۱ درصد نشان داد (جدول ۲). در واقع هر چه میزان بیوپچار مورد استفاده بیشتر باشد اثر بخشی آن در تثبیت فلزات سنگین بیشتر است که با نتایج مطالعه غلامی و رحیمی، ۲۰۲۰؛ سفیدگر شاهکلایی و همکاران (۲۰۱۹)؛ ولی‌زاده قلعه بیگ و همکاران (۲۰۲۰) و تیان و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد. هر چه میزان بیوپچار نسبت به خاک بیشتر باشد بیوپچار بهتر می‌تواند خصوصیات خاک را تغییر داده و موجب تثبیت فلزات سنگین شود. در واقع بیوپچار خصوصیات مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و از این طریق می‌تواند باعث کاهش تحرک و دستیابی زیستی فلزات سنگین در خاک شود (ایکسیو و همکاران ۲۰۱۸). بر اساس نتایج به دست آمده زمان انکوباسیون با میزان اثر بخشی همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح ۱ درصد داشت که با نتایج مطالعه فتحیان‌پور و همکاران (۲۰۱۸) و سفیدگر شاهکلایی و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد. بطوری هر چه زمان انکوباسیون بیشتر باشد بیوپچار فرصت بیشتری برای تثبیت فلزات سنگین خواهد داشت. با افزایش زمان انکوباسیون، میزان pH خاک بیشتر افزایش می‌یابد که

دستیابی زیستی فلزات سنگین کمتر است در نتیجه اثر بخشی بیوچار در تثبیت فلزات سنگین نیز بیشتر خواهد بود. میزان اثر بخشی بیوچار در تثبیت فلزات سنگین با pH خاک دارای همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح ۱ درصد بود (جدول ۲). در اینجا تثبیت از منظر جذب به وسیله سطوح بیوچار مطرح است که علت آن کاهش غلظت یون‌های محلول در اثر رسوب حاصل از افزایش pH می‌باشد (فتحیان‌پور و همکاران ۲۰۱۸).

نتیجه گیری کلی

بر اساس نتایج به دست آمده پسماندهای کشاورزی در ایران از اولویت بالاتری برای تولید بیوچار برخوردار هستند که می‌تواند به دلیل حجم بالای پسماند در این بخش و همچنین مشکلات فراوری سایر مواد اولیه از جمله پسماندهای صنعتی برای تولید بیوچار باشد. غلظت بالای فلزات سنگین در فاضلاب و پسماندهای صنعتی، هزینه بالا و نیاز به تجهیزات پیشرفته برای ایمن سازی بیوچار حاصل از جمله این مشکلات هستند. خصوصیات بیوچار و خاک عوامل تاثیر گذار بر تثبیت فلزات سنگین در خاک هستند و با تغییر در این خصوصیات اثر بخشی بیوچار تغییر خواهد کرد به طوری که با افزایش CEC در خاک می‌توان اثر بخشی بیوچار در تثبیت فلزات سنگین را افزایش داد.

بیوچار در خاک‌هایی که محتوای شن بالاتری دارند اثر بخشی کمتری خواهد داشت.

ماده آلی خاک همبستگی مثبت و معنی‌دار را با میزان اثر بخشی بیوچار در سطح یک درصد در تثبیت فلزات سنگین نشان داد (جدول ۲). مواد آلی ارتباط نزدیکی با تحرک فلزات سنگین دارند زیرا می‌تواند کلوئیدهای ناپایدار را با فلزات سنگین تشکیل دهد (هیو و همکاران ۲۰۱۷). این مواد به دلیل داشتن بار منفی در جذب فلزات سنگین در خاک و کاهش دستیابی زیستی آنها نقش مهمی دارند (ژو و همکاران ۲۰۱۶) و در خاک‌هایی با مواد آلی بالاتر تثبیت فلزات سنگین توسط اصلاح‌کننده‌های مختلف از جمله بیوچار بهتر صورت می‌گیرد. بنابراین بین اثر بخشی بیوچار و میزان مواد آلی خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. بر اساس نتایج همبستگی اسپیرمن EC و CEC خاک دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح ۱ درصد با اثر بخشی بیوچار در تثبیت فلزات سنگین بود (جدول ۲). هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی نشان دهنده توانایی خاک در تبادل کاتیون‌ها است و بالا بودن این دو ویژگی در خاک توانایی آن در جذب کاتیون‌ها از جمله فلزات سنگین را نشان می‌دهد. ظرفیت تبادل کاتیونی از عوامل تاثیر گذار در تثبیت فلزات سنگین است (تراکال و همکاران ۲۰۱۴). بنابراین در خاکی با هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا تحرک و

منابع مورد استفاده

- Afrasiabi B, Adhami E and Owliaei HR, 2017. Effect of biochar produced at different temperatures on cadmium availability in a calcareous soil under different moisture regims over time. *Journal of Water and Soil* 30(3): 811-821. (In Persian with English absteract)
- Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Vithanage M, Lee SS and Ok YS, 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* 99:19-33.
- Albert HA, Li X, Jeyakumar P, Wei L, Huang L, Huang Q, Kamran M, Shaheen SM, Hou D, Rinklebe J and Liu Z, 2021. Influence of biochar and soil properties on soil and plant tissue concentrations of Cd and Pb: A meta-analysis. *Science of the Total Environment* 755:142582.
- Arabyarmohammadi H, Darban AK, Abdollahy M, Yong R, Ayati B, Zirakjou A and van der Zee SE, 2018. Utilization of a novel chitosan/clay/biochar nanobiocomposite for immobilization of heavy metals in acid soil environment. *Journal of Polymers and the Environment* 26(5): 2107-2119.
- Arabyarmohammadi H, Darban AK, van der Zee SE, Abdollahy M and Ayati B, 2017. Fractionation and leaching of heavy metals in soils amended with a new biochar nanocomposite. *Environmental Science and Pollution Research* 25(7): 6826-6837.

- Baghaie AH, 2018. Interaction effect of municipal waste compost and pistachio residues biochar on decreasing cadmium stress in Shallot (A case study: Zarandieh municipal waste compost). *Journal of Health* 9(3): 277-290. (In Persian with English absteract)
- Baghaie A, 2019. Effect of applying Shazand municipal compost waste and Saveh pomegranate peel biochar on decreasing Pb availability in soil and Sorghum plant. *Iranian Journal of Health and Environment* 11 (2):157-168. (In Persian with English absteract)
- Beesley L, Moreno-Jimenez E, Gomez-Ey les JL, Harris E, Robinson B and Sizmur T, 2011. A review of biochars potential role in the remediation, revegetation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution* 159 (12): 3269-3282.
- Biria M, Moezzi AA and AmeriKhah H, 2017. Effect of Sugarcane bagasses biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soils. *Water and Soil* 31(2): 609-626.
- Boostani H and Najafi-Ghiri M, 2018. Effect of biochar and natural zeolite application on desorption kinetic and chemical fractions of zinc in a Zn-contaminated calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 8(1): 69-88. (In Persian with English absteract)
- Boostani HR, Najafi-Ghiri M and Hardie AG, 2019. Single and competitive adsorption isotherms of some heavy metals onto a light textured calcareous soil amended with agricultural wastes-biochars. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65(3): 360-373.
- Cao XD, Ma LN, Gao B and Harris W, 2009. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine. *Environmental Science and Technology* 43:3285–3291.
- Chen D, Liu X, Bian R, Cheng K, Zhang X, Zheng, J, Joseph S, Crowley D, Pan G and Li L, 2018. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals–A meta-analysis. *Journal of Environmental Management* 222:76-85.
- Dai Y, Liang Y, Xu X, Zhao L and Cao X, 2018. An integrated approach for simultaneous immobilization of lead in both contaminated soil and groundwater: Laboratory test and numerical modeling. *Journal of Hazardous Materials* 342: 107-113.
- Dianat Maharluei Z, Yasrebi J, Sepehri M and Ghasemi R, 2018. Effect of rice husk biochar and *Piriformospora indica* endophytic fungus on corn yeild in Zn contaminated soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 8(3): 61-78. (In Persian with English absteract)
- Fathianpour A, Taheriyoun M and Soleimani M, 2018. Lead and zinc stabilization of soil using sewage sludge biochar: optimization through response surface methodology. *Clean - Soil, Air, Water* 46(5):170429.
- Feng W, Zhang S, Zhong Q, Wang G, Pan X, Xu X, Zhou W, Li T, Luo L and Zhang Y, 2020. Soil washing remediation of heavy metal from contaminated soil with EDTMP and PAA: Properties, optimization, and risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 381, 120997.
- Gao X, Peng Y, Zhou Y, Adeel M and Chen Q, 2019. Effects of magnesium ferrite biochar on the cadmium passivation in acidic soil and bioavailability for packoi (*Brassica chinensis* L.). *Journal of Environmental Management* 251, 109610.
- Gholami L and Rahimi G, 2020. The effect of carrot pulp derived biochar on the adsorption of cadmium and lead in an acidic soil, *Journal of Water and Soil Conservation* 27(2):1-23. (In Persian with English absteract)
- Guo Y, Tang W, Wu J, Huang Z and Dai J, 2014. Mechanism of Cu (II) adsorption inhibition on biochar by its aging process. *Journal of Environmental Science* 26 (10): 2123-2130.
- Haji Najafi O, Momayezi MR and Sheibani HA, 2016. Effect biochar on the absorption of lead in phytoremediation of contaminated soils by maize (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Dynamic Agriculture* 13(2): 107-115. (In Persian with English absteract)
- Hamzenejad R, Sepehr E, Samadi A, Rasouli-Sadaghiani M and Khodaverdiloo H, 2018. Effect of apple pruning residue biochar on chemical forms, mobility factor index (MF) and reduced partition index (IR) of heavy metals in a contaminated soil. *Water and Soil Science* 28(3): 65-78. (In Persian with English absteract)
- Hamzenejad R and Sepehr E, 2018. Heavy metals immobilization in contaminated soil by grape-pruning-residue biochar. *Archives of Agronomy and Soil Science* 64(8): 1041-1052.
- Harvey OR, Herbert BE, Rhue RD and Kuo LJ, 2011. Metal interactions at the biochar-water interface: energetics and structure-sorption relationships elucidated by flow adsorption microcalorimetry. *Environmental Science & Technology* 45(13): 5550-5556.

- He J, Yang Y, Christakos G, Liu Y and Yang X, 2019. Assessment of soil heavy metal pollution using stochastic site indicators. *Geoderma* 337: 359-367.
- Hu S, Wu Y, Yi N, Zhang S, Zhang Y, Xin XJES and Research P, 2017. Chemical properties of dissolved organic matter derived from sugarcane rind and the impacts on copper adsorption onto red soil. *Environmental Science and Pollution Research* 24 (27): 21750-21760.
- Jafari M, Moameri M, Jahantab E and Zargham N, 2017. Effects of municipal solid waste compost and biochar on the phytoremediation potential of *Bromus tomentellus* Boiss. in greenhouse conditions. *Rangeland* 11(2): 194-206. (In Persian with English abstract)
- Kabiri P and Hosseinpour A, 2018. Phytoremediation potential of Maize (*Zea mays* L.) using biochars produced from walnut leaves in a contaminated soil. *Journal of Water and Soil Conservation* 25(4): 133-152. (In Persian with English abstract)
- Kaihaneyjad R and Amirinejad A, 2018. Investigating the effect of zeolite, sunflowers biochar and activated carbon on Pb stabilization in soils with different characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(3): 573-581. (In Persian with English abstract)
- Karimi F, Rahimi G, Kolahchi Z and Nezhad AKJ, 2020. Using industrial sewage sludge-derived biochar to immobilize selected heavy metals in a contaminated calcareous soil. *Waste and Biomass Valorization* 11(6): 2825-2836.
- Kaur R, Bhatti SS, Singh S, Singh J and Singh S, 2018. Phytoremediation of heavy metals using cotton plant: a field analysis. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 101(5):637-643.
- Kelley K and Preacher KJ, 2012. On effect size. *Psychological Methods* 17 (2): 137-152.
- Kim HS, Kim KR, Kim HJ, Yoon JH, Yang JE, Ok YS, Owens G and Kim KH, 2015. Effect of biochar on heavy metal immobilization and uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) in agricultural soil. *Environmental Earth Sciences* 74(2): 1249-1259.
- Li H, Lu X, Xu Y and Liu H, 2019. How close is artificial biochar aging to natural biochar aging in fields? A meta-analysis. *Geoderma* 352: 96-103.
- Liu BY, Zhao X, Li SS, Zhang XZ, Virk AL, Qi JY, Kan ZR, Wang X, Ma ST and Zhang HL, 2020. Meta-analysis of management-induced changes in nitrogen use efficiency of winter wheat in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production* 251: 119632.
- Moher D, Shamseer L, Clarke M, Ghersi D, Liberati A, Petticrew M and Stewart LA, 2015. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews* 4(1): 1-9.
- O'Connor D, Peng T, Zhang J, Tsang DC, Alessi DS, Shen Z, Bolan NS and Hou D, 2018. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: a review of in situ field trials. *Science of the Total Environment* 619:815-826.
- Rahimi T, Moezzi A and Hojati S, 2018. The Effects of different levels of cow manure and its biochar on the kinetics of nickel adsorption in a calcareous soil. *Journal of Soil and Water Sciences* 22 (1): 199-209. (In Persian with English abstract)
- Rahimi T, Moezzi A and Hojati S, 2019. Effect of biochar and nickel levels on concentration of nickel and some micronutrients in corn. *Iranian Journal of Soil Research* 32(4): 527-536. (In Persian with English abstract)
- Roohi R, Jafari M, Jahantab E, Aman MS, Moameri M and Zare S, 2020. Application of artificial neural network model for the identification the effect of municipal waste compost and biochar on phytoremediation of contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration* 208: e106399.
- Saffari M, 2018. Chemical stabilization of some heavy metals in an artificially multi-elements contaminated soil, using rice husk biochar and coal fly ash. *Pollution* 4(4): 547-562.
- Saffari M, 2019. Evaluation of cadmium behavior in a calcareous soil as affected by Walnut-Shell residues biochars coated by nanoscale zero-valent iron. *Iran Soil and Water Research* 50(6): 1437-1451. (In Persian with English abstract)
- Sefidgar Shahkolaie S, Barani Motlagh M, Khormali F and Dordipour E, 2018. Immobilization of lead in a calcareous contaminated soil using organic and inorganic amendments. *Water and Soil* 32(1): 127-142. (In Persian with English abstract)
- Sefidgar Shahkolaie S, Baranimotlagh M, Khormali F and Dordipour E, 2019. Effects of some organic and inorganic amendments on the bioavailability and distribution of different fractions of lead and cadmium

- in a calcareous contaminated soil. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization* 41(4): 15-29. (In Persian with English absteract)
- Sefidgar Shahkolaie S, Baranimotlagh M, Khormali F and Dordipour E, 2020. Evaluation of the effect of organic and inorganic amendments on lead and cadmium bioavailability in calcareous soils. *Iranian Journal of Research in Environmental Health* 6(1):70-82. (In Persian with English absteract)
- Shah V and Daverey A, 2020. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation* 18: e100774.
- Shen Z, Zhang Y, McMillan O, Jin F and Al-Tabbaa A, 2017. Characteristics and mechanisms of nickel adsorption on biochars produced from wheat straw pellets and rice husk. *Environmental Science and Pollution Research* 24: 12809–12819.
- Soleimani M, Hajabbasi MA, Afyuni M, Akbar S, Jensen JK, Holm PE and Borggaard OK, 2010. Comparison of natural humic substances and synthetic ethylenediaminetetraacetic acid and nitrilotriacetic acid as washing agents of a heavy metal–polluted soil. *Journal of Environmental Quality* 39(3): 855-862.
- Tavili A, Jahantab E, Jafari M, Motasherzadeh B and Zargham NA, 2018. Remediation of contaminated soils with heavy metal of Pb using rangelands plants in the greenhouse condition. *Journal of Plant Research* 31(3): 663-675. (In Persian with English absteract)
- Tian X, Wang D, Chai G, Zhang J and Zhao X, 2021. Does biochar inhibit the bioavailability and bioaccumulation of As and Cd in co-contaminated soils? A meta-analysis. *Science of the Total Environment* 762: e143117.
- Tomczyk A, Sokołowska Z and Boguta P, 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 19: 191-215.
- Trakal L, Bingöl D, Pohořelý M, Hruška M and Komárek M, 2014. Geochemical and spectroscopic investigations of Cd and Pb sorption mechanisms on contrasting biochars: Engineering implications. *Bioresource Technology* 171: 442-451.
- Valizadeh Ghale Beig A, Nemati H, Emami H and Aroie H, 2020. The effect of cutflower-rose waste biochar on morphological traits and heavy metals in lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Syaho). *Journal of Soil and Plant Interactions* 10 (4): 21-35. (In Persian with English absteract)
- Wang J, Xiong Z and Kuz'yakov Y, 2016. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy* 8(3): 512-523.
- Xia Y, Liu H, Guo Y, Liu Z and Jiao W, 2019. Immobilization of heavy metals in contaminated soils by modified hydrochar: Efficiency, risk assessment and potential mechanisms. *Science of the Total Environment* 685: 1201-1208.
- Xu C, Chen H, Xiang Q, Zhu H, Wang S, Zhu Q, Huang D and Zhu Y, 2018. Effect of peanut shell and wheat straw biochar on the availability of Cd and Pb in a soil–rice (*Oryza sativa* L.) system. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 1147-1156.
- Yuan C, Gao B, Peng Y, Gao X, Fan B and Chen Q, 2020. A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: importance of soil and biochar properties. *Science of the Total Environment* e144058.
- Yuan JH, Xu RK and Zhang H, 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource technology* 102(3): 3488-3497.
- Zahedifar M, 2018. Iron fractionation in the calcareous soils of different land uses as influenced by biochar. *Waste and Biomass Valorization* 11(5):1-10.
- Zama EF, Reid BJ, Arp HPH, Sun GX, Yuan HY and Zhu YG, 2018. Advances in research on the use of biochar in soil for remediation: a review. *Journal of Soils and Sediments* 18 (7): 2433-2450.
- Zand AD, Tabrizi AM and Heir AV, 2020. Incorporation of biochar and nanomaterials to assist remediation of heavy metals in soil using plant species. *Environmental Technology & Innovation* 20: e101134.
- Zhang J, Hua P and Krebs P, 2017. Influences of land use and antecedent dry-weather period on pollution level and ecological risk of heavy metals in road-deposited sediment. *Environmental Pollution* 228: 158–168.
- Zhou T, Li L, Zhang X, Zheng J, Joseph S and Pan G, 2016. Changes in organic carbon and nitrogen in soil with metal pollution by Cd, Cu, Pb and Zn: a meta-analysis. *European Journal of Soil Science* 67(2): 237-246.