



فصل نامه علوم و مهندسی گرمسار

Journal Homepage: <https://journal.fmgarmsar.ac.ir/>



دانشگاه گرمسار

مقاله کامل پژوهشی

مروری کوتاه بر آلودگی فلزات سنگین

میلاد شیدایی^{*}، استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار

چکیده

افزایش تولید آلاینده‌ها محیط زیست را با مشکلات جدی مواجه کرده است. می‌توان گفت فلزات سنگین یکی از مضرترین آلاینده‌ها هستند زیرا به دلیل تجمع و عدم تجزیه زیستی خطرات جبران ناپذیری را به همراه دارند. آنها با آلوده کردن آب و خاک در گیاهان و جانوران تجمع می‌یابند و از این طریق وارد زنجیره غذایی می‌شوند و اثرات جبران ناپذیری بر سلامت انسان می‌گذارند. ماهیت آنها سمی است، بنابراین حتی مقادیر کمی از آنها مشکلات جدی ایجاد می‌کند. دفع نامناسب زباله‌ها، فاضلاب‌ها، کودهای کشاورزی، سموم دفع آفات، معادن زغال سنگ و نیروگاه‌های حرارتی را می‌توان از عوامل رها سازی آنها دانست. متأسفانه می‌توان گفت که اکثر روش‌های حذف آنها زمان‌بر و پرهزینه است، بنابراین مدیریت منابعی که مسئول انتشار آنها هستند از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، آلودگی فلزات سنگین در آب، خاک و گرد و غبار و همچنین روش گیاه‌پالایی برای حذف فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

کلیدواژه‌ها:

سمیت،

محیط زیست،

گیاه‌پالایی.

عهده‌دار مکاتبات: میلاد شیدایی

نشانی: ایران، استان سمنان، شهرستان گرمسار، دانشگاه گرمسار

پیام نگار: md.sheydaei@fmgarmsar.ac.ir

۱- مقدمه

با صنعتی شدن چالش‌های زیادی از جمله بیماری‌ها و تغییرات آب و هوایی در بسیاری از کشورها دیده می‌شود که تأثیرات گسترده‌ای بر فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی داشته است [۱]. بهره‌برداری بی‌رویه از منابع سبب ایجاد مشکلات جدی می‌شود [۲]. هم‌چنین، پیشرفت صنعت افزایش تولید آلاینده‌ها را به همراه داشته است که محیط زیست را به‌طور جدی در معرض آلودگی قرار داده است [۳]. در این میان، چند دهه‌ای است که یک تهدید جدی برای حیات تمام موجودات پدید آمده است و آن آلودگی فلزات سنگین^۱ است و می‌توان گفت به یک موضوع جهانی تبدیل شده است [۴]. آنها توانایی زیادی در آسیب رساندن به محیط زیست و انسان دارند که این را

می‌توان به دلیل تجمع و عدم تجزیه زیستی آنها دانست [۵]. به‌طور معمول آنها از طریق استنشاق، تماس با پوست و بلع که می‌تواند به‌طور مستقیم و یا با مصرف محصولات آلوده به آنها باشد، وارد بدن انسان و سایر موجودات شوند [۶-۸]. به‌طور کلی فلزاتی که چگالی، جرم اتمی یا عدد اتمی بالایی داشته باشند فلز سنگین می‌گویند [۹]. اگرچه تعریف ساده‌ای که اغلب از آنها می‌شود عبارتند از: فلزاتی با چگالی بیشتر از پنج گرم بر سانتی‌متر مکعب [۱۰]. اساساً آرسنیک^۲، کادمیوم^۳، کروم^۴، جیوه^۵ و سرب^۶ به‌عنوان رایج‌ترین، خطرناک‌ترین و ماندگارترین فلزات سنگین شناخته می‌شوند [۱۱-۱۳]. هر یک از این فلزات سنگین توانایی متفاوتی در تأثیرگذاری بر سلامت انسان دارند که به‌طور مختصر در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- اثرات منفی برخی از فلزات سنگین بر انسان [۱۶-۱۴].

فلز سنگین	بیماری
آرسنیک	آسیب به سیستم گردش خون، بیماری‌های قلبی عروقی، برونشیت مزمن، آسیب به کبد و کلیه.
کادمیوم	آسیب به سیستم اسکلتی عضلانی، بیماری‌های قلبی عروقی، تأثیر منفی بر آنزیم‌ها، آسیب به کلیه.
کروم	آسیب به کبد و کلیه، آسیب به سیستم گردش خون،
جیوه	آسیب به کلیه‌ها، بیماری‌های قلبی عروقی، آسیب به سیستم عصبی، اختلال در عملکرد تولید مثل.
سرب	آسیب به مغز، سیستم عصبی، گلبول‌های قرمز، سیستم تولید مثل و کلیه.

فلزات سنگین توانایی آلوده کردن هر چیزی مانند آب، گرد و غبار و خاک را دارند. هم‌چنین تمام محصولات که با آب، هوا و خاک آلوده در تماس باشد فلزات سنگین در آنها یافت می‌شود، به‌عنوان مثال سبزیجاتی که در خاک آلوده کشت می‌شوند و یا مصرف ماهی که از آب آلوده تهیه شده باشد [۱۷]. در انتشار فلزات سنگین، منابع طبیعی و انسانی ایفای نقش می‌کنند، اما متأسفانه مانند همیشه،

منابع انسانی نقش اصلی را به‌عهده دارد [۱۸]. فرآیندهای پدوژنیک^۷ و آتشفشان‌ها نمونه‌هایی از فعالیت‌های طبیعی هستند که سبب انتشار فلزات سنگین می‌شوند [۱۹]. در مناطقی که فعالیت‌های آتشفشانی مکرر وجود دارد، فلات‌های آتشفشانی تشکیل می‌شود که یکی از اجزای آنها

^۱ Heavy metals^۲ Arsenic^۳ Cadmium^۴ Chromium^۵ Mercury^۶ Lead^۷ Pedogenic

لندفرم‌ها^۱ و اپیکلاست‌ها^۲ می‌باشند [۲۰]. درحقیقت آنها رسوبات حاصل از هوازدگی سنگ‌های آتشفشانی هستند که درنهایت به خاک تبدیل می‌شوند و از این طریق فلزات سنگین از این طریق آزاد می‌شوند [۲۱]. فولادسازی، معادن زغال‌سنگ و نیروگاه‌های حرارتی را می‌توان به‌عنوان منابع طبیعی و مسببان اصلی انتشار فلزات سنگین دانست [۲۲]. استفاده بیش از حد از کودها و آفت‌کش‌ها هم باعث انتشار فلزات سنگین است، از سوی دیگر، شهرنشینی سریع و افزایش تقاضا برای تاسیسات صنعتی هم یکی دیگر از عاملان اصلی انتشار این آلاینده‌ها هستند [۲۳]. بزرگراه‌ها و جاده‌ها به‌وفور حاوی فلزات سنگین می‌باشند چون از سایش لاستیک‌ها، ترمزها و احتراق سوخت‌های فسیلی آنها انتشار می‌یابند [۲۴]. علاوه بر این، بسیاری از بازدارنده‌های مورد استفاده برای جلوگیری از خوردگی در فلزات، حاوی عناصر سنگین هستند [۲۵]. علاوه بر تمام موارد اشاره شده، هم‌چنان بسیاری از عوامل هست که می‌توان به آنها اشاره کرد مانند دفع نادرست زباله‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی متعاقب آن مانند شیرابه زباله‌ها که نگرانی بسیار جدی است [۲۶]. در این بررسی، منابع انتشار فلزات سنگین و ایجاد آلودگی برخی از آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. هم‌چنین روش گیاه‌پالایی^۳ را که برای حذف فلزات سنگین استفاده می‌شود بررسی شده است.

۲- بررسی آلودگی فلزات سنگین در آب، خاک و گرد و غبار

آب یکی از حیاتی‌ترین پایه‌های یک اکوسیستم است بنابراین حفظ منابع آب و تلاش برای سالم و پاکیزه نگه داشتن آنها بسیار حائز اهمیت است. آلوده شدن منابع آبی به فلزات سنگین خطرات بسیار زیادی دارد چون آنها می‌توانند برای مدت طولانی در رسوبات و آب وجود داشته باشند [۱۱]. یون‌های فلزی توانایی تولید هیدروکسید را دارند و هم‌چنین

می‌توانند با یون‌های معدنی واکنش داده و کمپلکس‌های مختلفی تشکیل دهند و چون حلالیت، دوام و تجمع کم دارند به راحتی می‌توانند در رسوبات نفوذ کنند [۱۱-۱۳]. در رودخانه‌ها رسوبات دائماً در حال حرکت هستند و می‌توانند از طریق نفوذ و روان‌آب سطحی وارد رودخانه‌های دیگر شوند و به این ترتیب آلودگی گسترش می‌یابد. همان‌طورکه پیشتر اشاره شد فلزات سنگین قابلیت تجمع دارند، بنابراین آنها به سادگی در موجودات زنده آبری تجمع پیدا می‌کنند و با مصرف میگو و ماهی آلوده به سادگی وارد بدن انسان می‌شوند. به‌طور معمول، ماهی را می‌توان جزء اصلی رژیم غذایی در نظر گرفت زیرا دارای پروتئین، امگا ۳^۴ ویتامین‌ها و هم‌چنین کلسترول پایین است، بنابراین، نظارت برای ارزیابی کیفیت ماهی بسیار مهم است [۱۱]. در اکثر کشورها ماهی‌ها به‌عنوان شاخصی برای سطوح آلودگی فلزات سنگین شناخته می‌شوند، زیرا سطوح فلزات موجود در آنها معمولاً سطوح موجود در محیط آبی را منعکس می‌کند، در واقع ماهی را می‌توان نشانگر زیستی در نظر گرفت [۲۷]. متأسفانه در بعضی از کشورها (به‌ویژه در کشورهای کمتر توسعه یافته) رودخانه‌ها به شدت آلوده شده‌اند چون در مناطق شهری تخلیه زباله‌های خانگی و صنعتی تصفیه نشده به داخل رودخانه‌ها رایج شده است. آب حاوی فلزات سنگین توانایی آلوده کردن خاک را دارد. سالم بودن خاک بسیار اهمیت دارد چون کشاورزی به آن وابسته است. می‌توان گفت خاک از سه طریق آلوده می‌شود، استفاده بیش از حد مواد شیمیایی (در کشاورزی)، انتشار آلاینده‌های صنعتی و آب آلوده [۱۱]. آلودگی خاک بسیار نگران‌کننده است زیرا حذف آلودگی پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. به‌طور معمول از کودهای آلی برای افزایش تولید محصولات زراعی استفاده می‌شود، اما استفاده بیش از حد باعث آلودگی خاک می‌شود. در بسیاری از مطالعات، وجود فلزات سنگین و

¹ Landforms

² Epiclasts

³ Phytoremediation

⁴ Omega 3

راحتی به آب و خاک مناطق دوردست منتقل می‌شوند [۳۱]. این آلودگی می‌تواند سال‌ها در ۳۰ سانتی‌متر بالای خاک باقی بماند [۳۲]. زمین‌های بازی و پارک‌های شهری مکان‌هایی هستند که معمولاً کودکان و افراد مسن در آن حضور دارند و گرد و غبار حاوی فلزات سنگین می‌تواند به راحتی از طریق بلع، استنشاق و تماس پوستی وارد بدن آنها شود [۱۱]. بنابراین می‌توان گفت ارزیابی غلظت فلزات سنگین‌ها در مدارس، مهدکودک‌ها و زمین‌های بازی شهرهای صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا گروه سنی افراد حاضر در این مکان‌ها عمدتاً آسیب‌پذیرتر هستند.

۳- گیاه‌پالایی

آلودگی خاک در حال تبدیل شدن به یک چالش جهانی است. در این میان فلزات سنگین به دلیل ماندگاری و تجمع زیستی یکی از مشکلات جدی هستند. بنابراین حذف آنها از خاک بسیار اهمیت دارد. روش مورد استفاده باید دارای چندین ویژگی باشد، از جمله سازگاری با محیط زیست، کوتاه‌مدت و مقرون به صرفه بودن. اگرچه این ویژگی‌ها بسیار آرمان‌گرایانه به نظر می‌رسند، اما با پیشرفت علم در نهایت اجرایی خواهند شد. برای پاک‌سازی خاک از فرایندهای مختلفی مانند فیزیکی، شیمیایی، اصلاح میکروبی و گیاه‌پالایی استفاده می‌شود [۳۳]. می‌توان گفت گیاه‌پالایی روشی امیدوارکننده برای استخراج و حذف فلزات سنگین است. این روش مبتنی بر توانایی ریشه گیاهان در جذب ترکیبات یونی است [۳۴]. این روش دارای مزایای بسیاری از جمله مقرون به صرفه بودن، مدیریت ساده، سازگار با محیط زیست، کاربرد در مقیاس بزرگ، جلوگیری از فرسایش و شسته شدن فلزات و حاصل‌خیزی خاک (از طریق انتشار مواد آلی) است [۳۵]. برای استفاده از این روش فاکتورهای زیادی مانند بافت خاک، pH خاک، یون‌های موجود در خاک، ظرفیت تبادل

هیدروکربن‌های نفتی در کودهای آلی گزارش شده است [۱۴]. همچنین، لجن فاضلاب و کود حیوانی نیز می‌توانند خاک‌های کشاورزی را آلوده کنند، زیرا ممکن است حاوی مقادیر زیادی از فلزات سنگین باشند [۲۸]. با رشد جمعیت و توسعه صنعت، تولید لجن فاضلاب نیز رو به افزایش است، در واقع لجن فاضلاب محصول فرعی فرایندهای تصفیه فاضلاب است [۲۹]. لجن فاضلاب حاوی ترکیبات مفیدی برای رشد گیاهان است، اما می‌تواند حاوی عوامل بیماری‌زا، مواد سمی و همانطور که قبلاً ذکر شد حاوی فلزات سنگین باشد. در واقع مدیریت صحیح سیستم‌های تصفیه و پایش دقیق ترکیبات از مهم‌ترین عوامل استفاده از لجن فاضلاب می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که کیفیت زمین‌های کشاورزی در دهه‌های گذشته کاهش یافته است و فلزات سنگین یکی از دلایل این کاهش هستند و به دلیل شباهت با برخی ریزمغذی‌های ضروری از طریق ریشه جذب گیاهان می‌شوند [۳۰]. می‌توان گفت که آلوده‌ترین خاک‌ها معمولاً در کنار کوره‌های آجرپزی، کارگاه‌های ساختمانی، کارخانه‌های ذوب فلزات، معادن زغال سنگ و نیروگاه‌های حرارتی است [۱۱]. فلزات سنگین پس از ورود به خاک (به دلیل عدم تخریب شیمیایی یا بیولوژیکی) پایدار می‌باشند و زمانی که محتوای آنها از حد بحرانی فراتر رود برای موجودات زنده بسیار مضر هستند. همان‌طور که پیشتر اشاره شد یکی از دلایل مهم افزایش آلودگی، شهرنشینی و توسعه سریع شهرها است. می‌توان گفت گرد و غبار به عنوان حامل آلاینده‌های مختلف عمل می‌کند و به راحتی می‌تواند با هر چیزی که تماس پیدا کند سبب آلودگی آن شود. گرد و غبار جاده‌ها حاوی فلزات سنگین می‌باشند که می‌تواند در خاک اطراف جاده رسوب کند. اگرچه این آلودگی می‌تواند به مسافت‌های طولانی هم سرایت کند [۱۴]. در حقیقت، اندازه ذرات است که توانایی آنها را برای معلق شدن در جو تعیین می‌کند. فلزات سنگین با ابعاد کمتر از ۶۳ میکرومتر قابلیت معلق شدن در جو را دارند و در روزهای بارانی به

^۱ Wastewater sludge

کاتیونی، سرعت رشد گیاه، ویژگی های ریشه گیاه (تراوشات ریشه، عمق ریشه و مدل رشد ریشه)، میکروارگانسیم ها و آب و هوای منطقه موردنظر باید توجه شود [۳۶]. راهبردهایی که در این روش قابل اجرا هستند شامل استفاده از گیاهانی است که از تثبیت گیاهی^۱، استخراج گیاهی^۲، تبخیر سازی گیاهی^۳ و فیلتراسیون گیاهی^۴ برای حذف فلزات سنگین استفاده می کنند (جدول های ۲ و ۳ مشاهده گردد) [۱۱].

جدول ۲. شرح مختصری از راهبردهای کاربردی در گیاهپالایی [۱۱].

شرح مختصر	روش
استفاده از گونه های گیاهی برای تثبیت فلزات سنگین در خاک که منجر به عدم مهاجرت آنها به اکوسیستم غذایی می شود.	تثبیت گیاهی
استفاده از گونه های گیاهی برای جذب فلزات سنگین از خاک یا آب و انتقال و انباشت آنها در زیست توده های بالای زمین.	استخراج گیاهی
استفاده از گونه های گیاهی برای جذب فلزات سنگین از خاک و تبدیل آنها به اشکال فرار، کمتر سمی و متعاقباً رهاسازی آنها در جو.	تبخیرسازی گیاهی
استفاده از گونه های گیاهی برای جذب فلزات سنگین از آب های سطحی از طریق ریشه ها، شاخساره ها یا نهال های گیاه.	فیلتراسیون گیاهی

به طور معمول گیاهان ظرفیت های متفاوتی برای جذب فلزات سنگین دارند و توانایی جذب همه آلاینده ها را ندارند که برخی از آنها در جدول ۳ ذکر شده است. اگرچه اخیراً محققان موفق به بهبود تحمل و تجمع فلزات سنگین در برخی گونه های گیاهی از طریق اصلاح ژنتیک شده اند [۳۷]. اصلاح گیاهان در واقع مهندسی ژنتیک، صفات مطلوبی را برای گیاه پالایی (رشد سریع، تحمل بالا و توانایی تجمع

بیشتر فلزات سنگین) در زمان بسیار کمتری فراهم می کند. همچنین با این روش می توان گونه های گیاهی ناسازگار را اصلاح و برای حذف فلزات سنگین استفاده کرد. مطالعات زیادی در مورد استفاده از علف های هرز برای گیاه پالایی انجام شده است و گزارش شده است که علف های هرز به دلیل سرعت رشد سریع و سیستم ریشه طولانی می توانند فلزات سنگین را در محیط سم زدایی کنند [۳۸].

جدول ۳- فهرست برخی از گیاهان مورد استفاده در گیاه پالایی.

گونه های گیاهی	فلز هدف	تجمع فلز (میلی گرم/کیلوگرم) - قسمت انباشته شده گیاه	مرجع
<i>Calendula calypso</i>	کادمیوم	۱۶۵ - ریشه	[۳۹]
<i>Brassica juncea</i>	کادمیوم	۹۶۰۲ - ریشه	[۴۰]
<i>Glycine max</i>	کادمیوم	۷۴/۸ - برگ	[۴۱]
<i>Helichrysum italicum</i>	سرب	۳۴۶ - ریشه	[۳۹]
<i>Brassica juncea</i>	روی	۳۰۵۵۰ - ریشه	[۴۲]
<i>Pterocypsela laciniata</i>	کادمیوم	۲۰۷/۹۷ - ساقه	[۴۳]
<i>Desmostachya</i>	کادمیوم	۳۱۲ - ساقه	[۴۴]

از طرف دیگر، میکروارگانسیم ها (باکتری ها، قارچ ها، مخمرها و جلبک ها) که در بیشتر مکان ها در طبیعت وجود دارند، توانایی منحصربه فردی در پاک سازی زیستی فلزات سنگین دارند [۴۵]. اگرچه در انتخاب میکروارگانسیم ها

¹ Phytostabilization

² Phytoextraction

³ Phytovolatilization

⁴ Phytofiltration

در قارچ‌ها با ترکیب فلزات در میسلیم^۱ و هاگ‌ها^۲ جذب می‌شوند [۴۸]. گزارش شده است که ظرفیت جذب باکتری‌ها معمولاً بین ۱ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در گرم است [۴۵]. به‌طور کلی عوامل زیادی در فرآیند حذف فلزات سنگین دخیل هستند که مهم‌ترین آنها در جدول ۴ ذکر شده است. در حقیقت، میکروارگانیسم‌ها را می‌توان به‌عنوان کمک مفیدی برای روش گیاه‌پالایی در نظر گرفت.

باید دقت شود زیرا آنها می‌توانند در غلظت محدودی از فلزات سنگین زنده بمانند، بنابراین استفاده از گروه‌های مختلف از آنها موثرتر خواهد بود و می‌توانند فلزات سنگین را به‌اشکال غیرسمی تبدیل کنند [۴۶]. هم‌چنین می‌توانند تحرک آنها را در محیط‌های آبی و خاکی تا حد زیادی کاهش دهند [۴۷]. روش‌های حذف فلزات سنگین در میکروارگانیسم‌ها متفاوت است. به‌طور مثال در باکتری‌ها، فلزات سنگین معمولاً توسط گروه‌های عاملی روی سطح یا

جدول ۴- عوامل موثر در روند حذف فلزات سنگین [۱۴].

عوامل	شرح مختصر
دما	- دمای بهینه تجزیه‌زیستی برای هر فلز متفاوت است. - دمای مطلوب معمولاً بین ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. - دمای بالای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به پروتئین‌های جذب‌کننده فلز در میکروارگانیسم آسیب می‌رساند و فرآیند جذب فلز را کاهش می‌دهد.
pH	- رشد میکروارگانیسم‌ها در pH نامطلوب، سرعت متابولیسم میکروبی را کاهش می‌دهد. - تغییر در مقدار pH باعث تغییر تحرک و هیدراتاسیون فلز می‌شود. - معمولاً مقدار مطلوب pH بین ۲٫۵ تا ۶ است.
نوع بستر	- نوع خاک و نوع افزودنی‌های خاک بر کارایی مکانیسم جذب تاثیر دارد. - جذب بین خاک و فلزات سنگین ممکن است تحرک فلزات سنگین را کاهش دهد، بنابراین جذب میکروبی را کاهش می‌دهد.
غلظت زیست‌توده ^۴	- معمولاً افزایش زیست‌توده باعث افزایش برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی بین جاذب و جاذب می‌شود. - غلظت اولیه بالای یون‌های فلزی باعث افزایش جذب زیستی آنها در زیست‌توده میکروبی می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

فسیلی و افزایش استفاده از انرژی‌های پاک، تصفیه فاضلاب و مدیریت صحیح پسماند می‌تواند در کاهش انتشار فلزات سنگین بسیار موثر باشد.

مراجع

- [1] T.T. Hordofa, S. Liying, N. Mughal, A. Arif, H.M. Vu, P. Kaur, Natural resources rents and economic performance: post-COVID-19 era for G7 countries, *Resour Policy*. 75 (2022) 102441.

فلزات سنگین به راحتی می‌توانند باعث آلودگی محیط زیست شوند. آنها به دلیل توانایی در تجمع سریع و عدم تجزیه‌پذیری زیستی باعث آلودگی خاک، آب و در نهایت مواد غذایی می‌شوند و به این ترتیب سلامت انسان به خطر می‌افتد. هم‌چنین، آنها به راحتی از طریق بلع، استنشاق و تماس با پوست وارد بدن انسان شوند. آگاهی زیست‌محیطی عمومی و مدیریت صحیح منابع انتشار فلزات سنگین از عوامل بسیار مهم است. کاهش استفاده از سوخت‌های

¹ Mycelium

² Spores

³ Hydration

⁴ Biomass concentration

- [2] R. Ulucak, M.A. Baloch, An empirical approach to the nexus between natural resources and environmental pollution: do economic policy and environmental-related technologies make any difference?, *Resour Policy*. 81 (2023) 103361.
- [3] P. Ghiasvandnia, M. Sheydaei, M. Edraki, Evaluation of toxic metals content and microbial contamination of parsley (*Petroselinum crispum*) prepared from local farms in Kushal and Layalestan regions (Lahijan city, north of Iran), *Gıda Bilimi ve Mühendisliği Araştırmaları* 2 (2023) 23-27.
- [4] P. Ghiasvandnia, M. Sheydaei, M. Edraki, Evaluation of microbial contamination and toxic metals content of parsley (*petroselinum crispum*) obtained in kuh boneh region (Lahijan City, North of Iran), *Asian J. Green Chem*. 7 (2023) 17-24.
- [5] P. Ghiasvandnia, M. Edraki, F. Shahimi, M. Sheydaei, Evaluation of concentration of heavy metals and microbial contamination in parsley (*Petroselinum crispum*) vegetable, *Chem. Res. Technol*. 1 (2024) 2-7.
- [6] M. Sheydaei, P. Ghiasvandnia, M. Edraki, M. Sheidaie, Investigation of toxic metals content of parsley (*petroselinum crispum*) obtained from local farms in Baz Kia Gorab region (Lahijan city, north of Iran), *J. Chem. Lett*. 3 (2022) 114-118.
- [7] C. Campillo-Cora, A. Rodríguez-Seijo, P. Pérez-Rodríguez, D. Fernández-Calviño, V. Santás-Miguel, Effect of heavy metal pollution on soil microorganisms: Influence of soil physicochemical properties. A systematic review, *Eur. J. Soil Biol*. 124 (2025) 103706.
- [8] Y. Yan, Y. Yang, Revealing the synergistic spatial effects in soil heavy metal pollution with explainable machine learning models, *J. Hazard. Mater*. 482 (2025) 136578.
- [9] A.B. Fulke, S. Ratanpal, S. Sonker, Understanding heavy metal toxicity: Implications on human health, marine ecosystems and bioremediation strategies, *Mar. Pollut. Bull*. 206 (2024) 116707.
- [10] K.H.H. Aziz, F.S. Mustafa, Advanced oxidation processes for the decontamination of heavy metal complexes in aquatic systems: A review, *Case Stud. Chem. Environ. Eng*. 9 (2024) 100567.
- [11] M. Sheydaei, Investigation of Heavy Metals Pollution and Their Removal Methods: A Review, *Geomicrobiol. J*. 41 (2024) 213-230.
- [12] M. Sheydaei, E. Alinia-Ahandani, Z. Selamoglu, Z. Alizadeh-Terepoei, A. Some Heavy Metals in Different Parts of Consumed Chickens in Lahijan City, Iran; Health Risk Assessment, *Op. Acc. J. Bi.o Sci. & Res*. 6 (2020) 1-4.
- [13] E. Alinia-Ahandani, M. Sheydaei, M. Akram, Z. Selamoglu, Z. Alizadeh-Terepoei, M. Alinia-Ahandani, Heavy Metals Concentrations in Some Roadsides with Different Traffic Volumes in Rasht City-Iran, *Op. Acc. J. Bi.o Sci. & Res*. 7 (2021) 1-4.
- [14] M. Sheydaei, Heavy metals contamination in soil and rice and their removal processes: a brief review, *Geomicrobiol. J*. 41 (2024) 721-731.
- [15] M. Sheydaei, E. Alinia-Ahandani, Breast cancer and the role of polymer-carriers in treatment, *Biomed. J. Sci. Tech. Res*. 34 (2021) 27057-27061.
- [16] M. Sheydaei, E. Alinia-Ahandani, P. Ghiasvandnia, Cancer and The Role of Polymer-Carriers in Drug Delivery, *J. Genet. Cell Biol*. 4 (2020) 217-220.
- [17] H. Koyama, T. Kamogashira, T. Yamasoba, Heavy metal exposure: molecular pathways, clinical implications, and protective strategies, *Antioxidants*, 13 (2024) 76.
- [18] D.A. Ayejoto, J.C. Egbueri, Human health risk assessment of nitrate and heavy metals in urban groundwater in Southeast Nigeria, *Ecolog. Front*. 44 (2024) 60-72.
- [19] C.C. Tsai, Y.F. Chang, C.H. Lee, Using the pedogenic oxide ratio in distinguishing volcanic soil weathering intensity in subtropical region, *Geoderma Reg*. 38 (2024) e00836.

- [20] H.Z. Hum, W.S. Huang, Z.Y. Hseu, Pedogenic characterization of rare earth elements in humid subtropical soils on volcanic plateaus, *CATENA*. 244 (2024) 108256.
- [21] V.M. Zobin, R. Arámbula, M. Bretón, Z. León, Explosive multiples preceding the growth of a new lava dome: Volcán de Colima, México, January–February 2016, *J. Volcanol Geotherm Res.* 433 (2023) 107736.
- [22] Y. Hou, S. Dai, V.P. Nechaev, R.B. Finkelman, H. Wang, S. Zhang, S. Di, Mineral matter in the Pennsylvanian coal from the Yangquan Mining District, northeastern Qinshui Basin, China: enrichment of critical elements and a Se-Mo-Pb-Hg assemblage, *Int. J. Coal Geol.* 266 (2023) 104178.
- [23] Z. Izakovičová, F. Petrovič, E. Pauditsová, The impacts of urbanisation on landscape and environment: the case of Slovakia, *Sustainability*, 14 (2021) 60.
- [24] K. Isinkaralar, O. Isinkaralar, E.P. Bayraktar, Ecological and health risk assessment in road dust samples from various land use of Düzce City Center: Towards the sustainable urban development, *Water Air Soil Pollut.* 235 (2024) 84.
- [25] M. Sheydaei, The Use of Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors: A Review, *Surfaces* 7 (2024) 380-403.
- [26] H. Haghazadeh, M. Pourakbar, M. Mahdavianpour, E. Aghayani, Spatial distribution and risk assessment of agricultural soil pollution by hazardous elements in a transboundary river basin, *Environ. Monit. Assess.* 193 (2021) 158.
- [27] M. Kumar, S. Singh, A. Jain, S. Yadav, A. Dubey, S.P. Trivedi, A review on heavy metal-induced toxicity in fishes: Bioaccumulation, antioxidant defense system, histopathological manifestations, and transcriptional profiling of genes, *J. Trace Elem. Med. Biol.* 83 (2024) 127377.
- [28] P. Zandi, J. Yang, A. Darma, E. Bloem, X. Xia, Y. Wang, Q. Li, E. Schnug, Iron plaque formation, characteristics, and its role as a barrier and/or facilitator to heavy metal uptake in hydrophyte rice (*Oryza sativa* L.), *Environ. Geochem. Health.* 45 (2023) 525-559.
- [29] K. Barčauskaitė, O. Anne, I. Mockevičienė, R. Repšienė, G. Šiaudinis, D. Karčauskienė, Determination of heavy metals immobilization by chemical fractions in contaminated soil amended with biochar, *Sustainability* 15 (2023) 8677.
- [30] N. Rodríguez-Eugenio, M. McLaughlin, D. Pennock, La contaminación del suelo: una realidad oculta. Turrialba, Costa Rica: FAO, 2018.
- [31] W. Chen, X. Zhang, J. Zhang, N. Duan, X. Gong, S. Liu, C. Zhan, W. Chen, X. Xing, Characteristics, sources and health risk of heavy metals in road dust in the typical county town, Central China, *Appl Sci.* 12 (2022) 12958.
- [32] C. Men, Y. Wang, R. Liu, Q. Wang, Y. Miao, L. Jiao, M. Shoaib, Z. Shen, Temporal variations of levels and sources of health risk associated with heavy metals in road dust in Beijing from May 2016 to April 2018, *Chemosphere*, 270 (2021) 129434.
- [33] S.A. Bhat, Q. Bashir, S.A. Haq, T. Amin, A. Rafiq, M. Ali, J.H. Américo-Pinheiro, F. Sher, Phytoremediation of heavy metals in soil and water: an eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach, *Chemosphere* 303 (2022) 134788.
- [34] I. Lobzenko, M. Burachevskaya, I. Zamulina, A. Barakhov, T. Bauer, S. Mandzhieva, S. Sushkova, T. Minkina, A. Tereschenko, V. Kalinichenko, et al, Development of a unique technology for the pyrolysis of rice husk biochar for promising heavy metal remediation, *Agriculture*, 12 (2022) 1689.
- [35] A.S. Haq, A.A. Bhatti, Z.A. Dar, S.A. Bhat, Phytoremediation of heavy metals: an eco-friendly and sustainable approach, *Bioremed Biotechnol.* (2020) 215-231.

- [36] D.K. Patra, C. Pradhan, H.K. Patra, Toxic metal decontamination by phytoremediation approach: concept, challenges, opportunities and future perspectives, *Environ. Technol. Innovation*. 18 (2020) 100672.
- [37] R. Yadav, P. Arora, S. Kumar, A. Chaudhury, Perspectives for genetic engineering of poplars for enhanced phytoremediation abilities, *Ecotoxicology*, 19 (2010) 1574-1588.
- [38] B.M. Herath, C. Bamunuarachchige, S.L. Stephenson, A.M. Elgorban, S. Asad, J. Kumla, N. Suwannarach, S.C. Karunarathna, P.N. Yapa, Soil heavy metal absorption potential of *Azolla pinnata* and *Lemna gibba* with arbuscular mycorrhizal fungi in rice (*Oryza sativa* L.) farming, *Sustainability*, 15 (2023) 4320.
- [39] A. Farooq, M. Nadeem, G. Abbas, A. Shabbir, M.S. Khalid, H.M.R. Javeed, M.F. Saeed, A. Akram, A. Younis, G. Akhtar, Cadmium partitioning, physiological and oxidative stress responses in Marigold (*Calendula calypso*) grown on contaminated soil: Implications for phytoremediation, *Bull Environ Contam Toxicol*. 105 (2020) 270-276.
- [40] S. Goswami, S. Das, A study on cadmium phytoremediation potential of Indian mustard, *Brassica Juncea*, *Int J Phytoremediation*. 17 (2015) 583-588.
- [41] J.K. Guo, J. Zhao, X.H. Ren, H.L. Jia, H. Muhammad, X. Lv, T. Wei, L. Hua, Effects of *Burkholderia* sp. D54 on growth and cadmium uptake of tomato, ryegrass and soybean plants, *Int J Environ Sci Technol*. 17 (2020) 1149-1158.
- [42] A. Singh, M.H. Fulekar, Phytoremediation of heavy metals by *Brassica juncea* in aquatic and terrestrial environment. In: The plant family Brassicaceae: contribution towards phytoremediation, *Springer: Dordrecht*. (2012) 153-169.
- [43] L. Zhong, L. Lin, M.A. Liao, J. Wang, Y. Tang, G. Sun, D. Liang, H. Xia, X. Wang, H. Zhang, et al., Phytoremediation potential of *Pterocypsela laciniata* as a cadmium hyperaccumulator, *Environ Sci Pollut Res Int*. 26 (2019) 13311-13319.
- [44] S. Ullah, T. Mahmood, Z. Iqbal, A. Naeem, R. Ali, S. Mahmood, Phytoremediative potential of salt-tolerant grass species for cadmium and lead under contaminated nutrient solution, *Int J Phytoremediation*. 21 (2019) 1012-1018.
- [45] M. Thakare, H. Sarma, S. Datar, A. Roy, P. Pawar, K. Gupta, S. R. Pandit, Understanding the holistic approach to plant-microbe remediation technologies for removing heavy metals and radionuclides from soil, *Curr Res Biotechnol*. 3 (2021) 84-98.
- [46] S. Verma, A. Kuila, Bioremediation of heavy metals by microbial process, *Environ Technol Innovation*. 14 (2019) 100369.
- [47] S. Verma, P. Bhatt, A. Verma, H. Mudila, P. Prasher, E.R. Rene, Microbial technologies for heavy metal remediation: effect of process conditions and current practices, *Clean Techn Environ Policy*. 25 (2023): 1485-1507.
- [48] M.I. Abo-Alkasem, N.M. Hassan, M.M. Abo Elsoud, Microbial bioremediation as a tool for the removal of heavy metals, *Bull Natl Res Cent*. 47 (2023) 31.

