

فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۵۸، پاییز ۱۴۰۰، صص ۱۸۹-۱۹۹

## سازوکارهای ناپویاسازی فلزهای سنگین در خاک‌ها

رامین سلماسی<sup>۱</sup>

[raminsalmasi@yahoo.com](mailto:raminsalmasi@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

### چکیده

**زمینه و هدف:** افزایش فعالیت‌های کشاورزی به رها سازی آلاینده‌های گوناگون از سامانه‌های کشاورزی منجر می‌گردد که به عنوان یکی از عوامل افت کیفیت خاک و آب، مطرح می‌باشد. از شیوه‌های پاک‌سازی گوناگون از جمله کاربرد اصلاح گرهای شیمیایی برای کاهش زیان‌های مرتبط با این آلاینده‌ها بهره‌گیری می‌شود. در این مقاله پیرامون کاربردی‌ترین اصلاح گرهای شیمیایی جهت غیرفعال سازی فلزات سنگین، سازوکارهای این غیرفعال سازی‌ها و جنبه‌های زیست محیطی کاربرد این اصلاح گرها بحث فشرده‌ای می‌شود.

**مواد و روش‌ها:** اصلاح گرهای شیمیایی که بصورت متداول جهت غیر فعال سازی آلاینده‌ها کاربرد دارند در رده‌های فرآورده‌های آهن، کلسیم و آلومینیوم دار قرار می‌گیرند. ترکیبات فسفردار و رس‌های سیلیکاته، سایر فرآورده‌ها را تشکیل می‌دهند.

**نتایج:** سازو کارهای غیرفعال سازی آلاینده‌ها شامل یک یا ترکیبی از موارد زیر می‌باشد: تشکیل رسوب سطحی، جذب بر روی سطوح کانی، رسوب به صورت نمک و هم‌رسوبی. بررسی جنبه‌های زیست محیطی نشان می‌دهد که وجود مواد ناخواسته مانند فلزات سنگین، فلورید، سولفات، جامدات محلول و مواد پرتوزا در زایدات و باطله‌های صنعتی می‌توانند به آب‌های زیرزمینی آبتوی یابند و یا از طریق رواناب وارد آب‌های سطحی شوند.

**بحث و نتیجه‌گیری:** اسیدیته یا قلیائیت که با برخی از این زایدات همراه می‌باشد، می‌تواند زیان زیست محیطی جدی را به همراه داشته باشد. اصلاح گرهای شیمیایی عناصری را دارند که با تاثیر بر فعالیت برخی میکروب‌ها، می‌توانند بر روی فرآیندهای ژئوشیمیایی حیاتی مانند انحلال و تشکیل کانی، هوادیدگی و معدنی شدن مواد آلی تاثیر گذار باشند.

**واژگان کلیدی:** سازوکارهای غیرفعال سازی آلاینده‌ها، فلزات سنگین، سامانه‌های کشاورزی

## Mechanisms of Heavy Metals Immobility in Soils

Ramin Salmasi<sup>1</sup>

[raminsalmasi@yahoo.com](mailto:raminsalmasi@yahoo.com)

Received: October 13, 2021

Accepted: December 15, 2021

### Abstract:

**Background and Objectives:** Pollutant discharge from agricultural systems as a result of agricultural activities, is one of the factors for soil and water quality. Various soil and water remediation techniques including the use of chemical amendments have been applied to reduce the risks associated with these contaminants. This paper reviews the use of chemical amendments for immobilizing chemical amendments, the chemistry of contaminant immobilization, and environmental concerns associated with the use of these products. Total Contents of heavy metal in the soils of polluted villages of Hashtrood city and determining the relationships of these metals and soil properties are the goals of this research.

**Material and Methodology:** The commonly used chemical amendments were grouped into aluminum-, calcium-, and iron-containing products. Other products of interest include phosphorus-containing compounds and silicate clays.

**Results:** Mechanisms of contaminant immobilization include one or a combination of the following: surface precipitation, adsorption to mineral surfaces (ion exchange and formation of stable complexes), precipitation as salts, and co-precipitation. Reviews of environmental implications revealed that undesirable substances such as trace elements, fluoride, sulfate, total dissolved solids, as well as radioactive materials associated with some industrial wastes used as amendment could be leached to ground water or lost through run off to receiving water bodies.

**Discussion and Conclusion:** The acidity or alkalinity associated with some of the industrial-waste amendments could also constitute a substantial environmental hazard. Chemical amendments have elements capable of affecting the activities of certain microbes that could influence geochemical processes such as mineral dissolution and formation, weathering, and organic matter mineralization.

**Keywords:** Contaminant-Immobilization Mechanisms, Heavy Metals, Agricultural Systems

---

1- Assistant Professor, Research and Education Center, Agricultural and Natural Resources of East Azarbayjan, Tabriz – Iran

## مقدمه

بررسی نموده اند (۱۲ و ۱۳ و ۱۴). آلوم یا سولفات آلومینیوم  $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O]$  سدیم آلومینات  $(Na_2Al_2O_4)$ ، آلومینیوم کلراید  $(AlCl_3)$  و فرآورده های صنعتی فرعی مانند فرآورده بوکسیت از صنایع پالایش آلومینیوم، فرآورده های عمده حاوی آلومینیوم بشمار می روند (۱۵). یافته های مکرر و همکاران (۱۶) بعد از افزودن بوکسیت به خاک آلوده نشان داد که کاهش ۷۰، ۸۹ و ۷۴ درصدی برای عناصر به ترتیب کادمیوم، روی و نیکل قابل عصاره گیری مشاهده شد. گزارش شده است باقیمانده های بوکسیتی دارای بیشترین ظرفیت جذب  $19/72$ ،  $12/59$ ،  $10/95$ ،  $10/57$  میلی گرم بر گرم برای فلزات به ترتیب مس، روی، و نیکل و کادمیوم می باشند (۱۷).

## فرآورده های آهن دار

عمده ترین فرآورده های حاوی آهن جهت بی تحرک سازی آلاینده ها، اکسیدهای آهن، سولفات ها و کلریدهای فرو و فریک، و فری هیدرات ها می باشند. همچنین صنایع تولید اکسید تیتانیوم و بوکسیت منجر به تولید فرآورده های فرعی آهن دار می گردند (۱۸ و ۱۹). کاربرد اصلاح گرهای آهن دار برای بی تحرک سازی مس، روی، سرب و آرسنیک به اثبات رسیده است (۲۰ و ۲۱). در یک خاک که به آن فلزات سنگین افزوده شده بود، تیمار بوکسیتی باعث کاهش فراهمی عناصر کادمیوم، روی، سرب و آرسنیک به میزان ۹۱، ۹۴، ۸۱ و ۹۳ درصد گردید (۲۲). افزودن نمک های آهن سه ظرفیتی به نسبت ۱:۱۰۰ به نه خاک آلوده به آرسنیک، باعث کاهش ۵۰ درصدی زیست فراهمی آرسنیک گردید (۲۳). یافته های مشابهی نیز توسط سایر پژوهشگران بدست آمده است (۲۴ و ۲۵). ثابت شده است که افزودن سولفات آهن به خاک های کشاورزی آلوده به آرسنیک کاهش میزان قابل عصاره گیری این شبه فلز سمی را باعث شده است (۲۶).

## فرآورده های کلسیم دار

اصلاح گرهای کلسیم دار گوناگون مانند گچ  $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ ،

افزایش فعالیت های کشاورزی که جهت برآورد کردن نیازهای افزایش جمعیتی می باشد، رها سازی آلاینده ها از سامانه های کشاورزی را باعث می گردد که به عنوان یکی از عوامل افت کیفیت خاک و آب، مطرح می باشد (۱). جهت مهار این تخریب های زیست محیطی از شیوه های بهسازی منابع آب و خاک به منظور کاهش خطرات آلاینده ها بهره گیری می شود (۲). یکی از این شیوه ها، کاربرد اصلاح گرهای شیمیایی جهت غیرفعال سازی یا بی تحرک سازی آلاینده ها می باشد (۳). کارساز بودن برخی از فرآورده های شیمیایی برای بی تحرک کردن آلاینده هایی مانند فسفر، ازت، فلزات سنگین و کربن آلی توسط پژوهشگران ارزیابی شده است (۴ و ۵ و ۶). گزینش اصلاح گرهای شیمیایی به فراهمی، نوع آلاینده و به قیمت آن وابسته است (۸). با در نظر گیری قیمت به عنوان عامل اصلی، به کارگیری مواد فرعی صنعتی یا زایدات صنعتی که از کارخانه های منطقه ای هم هستند، گزینه مناسبی می باشد. کاربرد این زایدات صنعتی برای اهداف پالایش این بهره را نیز دارد که موجب کاهش مواد دربرگیرنده این آلاینده ها می گردد (۹). فرآورده های گوناگون آهن، کلسیم و آلومینیوم دار جهت بی تحرک سازی آلاینده هایی مانند فسفر، کربن آلی و فلزات سنگین و نیز جهت پایدار کردن خاک و بهبود وضعیت تغذیه ای کاربرد دارند (۱۰ و ۱۱). نوشتار حاضر با هدف درک بهتر از شیوه های بهسازی منابع آب و خاک به وسیله اصلاح گرهای شیمیایی تهیه شده است و در این راستا، پس از بررسی فشرده کاربردی ترین اصلاح گرهای شیمیایی جهت غیرفعال سازی فلزات سنگین، پیرامون سازوکارهای این غیرفعال سازی ها و جنبه های زیست محیطی کاربرد این اصلاح گرها بحث می شود.

## فرآورده های آلومینیوم دار

جهت بی تحرک سازی آلاینده ها در سامانه های کشاورزی

بنتونیت طبیعی را در جذب سرب و کادمیوم موجود در خاک های آلوده نشان دادند (۳۹). یافته های پژوهش کوویریل و همکاران در رابطه با نقش تثبیت کنندگی بالای عناصر به وسیله زئولیت (۴۰)، نشان داد این کانی تاثیر به سزایی در کاهش آبشویی عناصر کادمیوم، مس، نیکل و روی داشته است.

توانایی خاکستر آتشفشانی، که از باقیمانده های سوخت زغال سنگ می باشد و سرشار از عناصری مانند کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، آهن، آلومینیوم، روی و سیلیسیم است، برای بی تحرک کردن آلاینده ها به میزان  $CaO$ ،  $Al_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$  این ماده بستگی دارد. یافته های پژوهشی براون و همکاران (۴۲) نشان داد اصلاح گره های سوپرفسفات تریپل، بوکسیت، آهک و جامدات زیستی این توانایی را دارند که از زیست فراهمی و تحرک عناصر کادمیوم، سرب و روی موجود در خاکرخ<sup>۱</sup> بکاهند. در بین این اصلاح گرها، فسفری که بصورت سوپر فسفات تریپل به خاک اضافه شده بود، بیشینه کارایی را در افزایش رشد گیاه و کاهش غلظت فلزات در بافت گیاهی (کاهش تحرک) داشت.

فرایندهای شیمیایی مرتبط با غیر فعال سازی آلاینده ها در سامانه های خاک و آب، یکی یا ترکیبی از موارد زیر می باشد: تشکیل رسوب در سطح، جذب بر روی سطوح کانی ها (تشکیل کمپلکس های پایدار و تبادل یونی)، تشکیل رسوب به صورت نمک ها و هم رسوبی (۴۳). اسیدیته خاک، پتانسیل ریداکس، کانی های رسی، و مواد آلی عواملی هستند که توانایی کنترل فرایندهای غیر فعال سازی را دارند (۴۴).

در اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، آلومینیم و منگنز بعضی کاتیون های فلزات سنگین قدرت جایگزین کنندگی بیشتری با دیگر کاتیون ها دارا می باشند و می توانند بر روی محل های جذبی، بطور شیمیایی جذب

### شیمی غیرفعال سازی آلاینده ها

شوند. به عنوان مثال، واکنش تشکیل کمپلکس سطحی کادمیوم

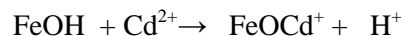
آهک زنده ( $CaO$ )، کلسیت ( $CaCO_3$ )، دولومیت [ $CaMg(CaCO_3)_2$ ]، فسفات کلسیم [ $Ca_3(PO_4)_2$ ]، فسفو جیپسوم ( $CaSO_4.H_2O + P_2O_5$ ) به صورت ناخالصی و زایدات بوکسیتی (که دارای مقادیر قابل توجهی اکسید کلسیم می باشد) جهت غیر فعال سازی آلاینده ها در سامانه های کشاورزی کاربرد دارند (۲۷ و ۲۸ و ۲۹). بیشتر فرآورده های کلسیم دار مانند گچ اغلب در ترکیب با فرآورده های آهن و آلومینیوم دار می باشند. کاربرد برخی اصلاح گره های کلسیم دار مانند گچ و آهک زنده این سود اضافی را دارند که اسیدیته را کاهش می دهند، ساختمان و وضعیت تغذیه ای خاک را بهبود می بخشند و می توانند جهت بهسازی خاک های اسیدی به فرآورده های آهن و آلومینیوم دار ترجیح داده شوند.

زمانی که به یک خاک آلوده به مس کانسنگ دولومیت (سنگ معدن حاوی کلسیم و منیزیم) اضافه گردید، کاهش قابل ملاحظه ای در تحرک مس موجود در خاک دیده شد (۳۰). تمایل بالای آهک برای جذب برخی فلزات سنگین مانند کادمیوم و روی نیز به اثبات رسیده است (۳۱). اصلاح گره های کلسیم دار علاوه بر پیشگیری از تحرک آلاینده ها، تاثیر به سزایی روی بهبود نفوذپذیری خاک، کاهش کدورت رواناب و بهسازی خاک های سدیمی دارند (۳۲).

### سایر فرآورده ها

مواد فسفردار مانند سنگ فسفات، دی آمونیوم فسفات، آپاتیت، هیدروکسیل آپاتیت، اسید فسفریک و نمک های فسفات دار، توانایی بالایی در غیرفعال سازی سرب، مس و روی از خود نشان داده اند (۳۳). سایر اکسیدها نیز مانند اکسید منگنز نیز جهت آرسنیک موثر هستند (۳۴). کانی های رسی نیز برای بی تحرک سازی فلزات در خاک ها کاربرد دارند (۳۵ و ۳۶). نشان داده شده است که کانی سیپولیت برای غیرفعال سازی روی و کادمیوم و کانی پاله گورسکیت برای روی کادمیوم، سرب و مس موثر هستند (۳۷). بنتونیت باعث کاهش ۵۰ درصدی آب شویی آرسنیک در خاک ها شده است (۳۸). اخوت و همکاران نقش معنی دار

با اکسیدهای آهن بصورت زیر می باشد (۴۵):

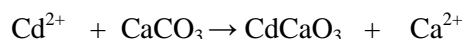


اصلاح گرهای آهن دار (ترکیبی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن بی شکل) آرسنیک محلول خاک را غیر فعال می سازند که انجام این سازوکار از طریق تبادل لیگاندی گونه های آرسنیک برای گروه  $\text{OH}^-$  روی سطح هیدروکسید آهن و به دنبال آن تشکیل کمپلکس های درون کره ای انجام می گیرد. همچنین تشکیل آرسنات آهن  $(\text{FeAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$  یا سکورودیت  $(\text{FeAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$  منجر به کاهش فعالیت آرسنیک می گردد. در pH پایین و شرایط اکسایش بالا، رسوب سکورودیت مشاهده می شود در حالی که در pH حدود ۵ و اکسایش متوسط، ترکیب غیر محلول  $\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2$  تشکیل می گردد غیر فعال سازی آرسنیک توسط ترکیبات منگنز از طریق هم رسوبی آرسنیک بصورت یا کانی غیر محلول گزارش شده است (۴۶). تحرک مس در خاک، وابستگی زیادی به اسیدیته محلول دارد و از طریق جذب شیمیایی توسط کربنات ها، رس ها و ترکیبات فسفات دار می تواند بی تحرک گردد. بی تحرک شدن مس می تواند توسط تبادل یونی و تشکیل کمپلکس های سه گانه بر روی سطوح اکسی-هیدروکسید های آهن و آلومینیوم رخ دهد. افزوده شدن pH در اثر کاربرد باقیمانده های بوکسیتی به خاک های آلوده، موجب گردید فلزات کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس غیر فعال گردند (۴۷).

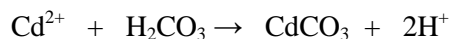
توانایی کربنات کلسیم در غیرفعال سازی فلزات که در ارتباط با تغییر در pH می باشد به سه شیوه انجام می گیرد (۴۸): نخست، افزایش pH در خاک های با بار متغیر موجب افزایش بار سطح منفی می گردد و در نتیجه افزایش جذب کاتیونی را باعث می گردد؛ دوم، افزایش pH خاک به تشکیل گونه های هیدروکسی آپاتیت کاتیون های فلزی (مانند  $\text{CdOH}^+$ ) می شود که نسبت به خود کاتیون فلزی تمایل بیشتری برای جذب بر روی مکان های جذبی دارند و سوم، فلز به صورت هیدروکسید در pH بازی رسوب می کند (مانند  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ). همچنین سطح

کربنات کلسیم می تواند با جذب شیمیایی برخی از عناصر سنگین، مکانیسم جذب و نگهداری فلز را فراهم آورده، سبب کاهش فعالیت فرم محلول این عناصر گردد (۴۹). بی تحرک شدن مس توسط فرآورده های کلسیم دار مانند باقیمانده های دولومیتی در اثر رسوب مس به صورت کربنات مس انجام می گیرد. همچنین موقعی که مواد حاوی کلسیم و منیزیم به خاک آلوده با مس اضافه شدند، میزان پیوندهای بین رس (یا اکسید فلز) و مواد آلی افزایش می یابد. از آن جایی که مس بیشتر به وسیله مواد آلی کمپلکس تشکیل می دهد، افزایش تشکیل پیوند رس-مواد آلی که در به وسیله کلسیم و منیزیم انجام می گیرد، به نوبه خود موجب غیر فعال شدن این فلز می گردد (۵۰).

در غلظت های پایین فلز سنگین، جذب بصورت شیمیایی صورت می گیرد که طی آن فلز جانشین  $\text{Ca}^{2+}$  در سطوح کریستالی آهک می گردد. به عنوان مثال برای کادمیوم واکنش به شکل زیر است:



و تغییری در pH صورت نمی گیرد. در غلظت های بیشتر، رسوب ایجاد می گردد که بدین وسیله باعث کاهش pH می گردد (۵۱):



والن و همکاران (۵۲) نشان دادند که افزودن آهک به خاک های آلوده به آرسنیک، به تشکیل رسوبات  $\text{Ca}(\text{AsO}_4)_2$  و  $\text{CaHAsO}_3$  می انجامد که بدین وسیله از تحرک این عنصر سمی در خاک کاسته می شود.

سازو کارهای تثبیت و در نتیجه غیر فعال سازی فلزات توسط ترکیبات فسفات شامل موارد زیر می باشد: فرایند تبادل کاتیونی، تشکیل کمپلکس در سطح، انحلال سنگ های فسفات اولیه، رسوب فسفات های فلزی جدید و هم رسوبی (جابجینی کلسیم موجود در فسفات بوسیله سایر فلزات طی کریستالی شدن مجدد). زمانی که کودهای فسفره کم محلول مانند سنگ فسفات به خاک اضافه می شوند، انحلال آن ها موجب می شود که فلزات

آلومینا منجر به تشکیل کمپلکس های درون کره ای می شود در حالی که این واکنش با مونتموریلونیت به تشکیل کمپلکس های برون کره ای می انجامد (۵۶).

اصلاح گره های شیمیایی همچنین جهت غیرفعال سازی و یا تخریب عوامل بیماری زای عفونی در کودهای دامی و جامدات زیستی کاربرد دارند. اصلاح گره های آهن، آلومینیوم و کلسیم دار با اسیدیته بالا منجر به از بین رفتن کلیفرم ها به وسیله تولید اشکال سمی اکسیژن مانند یون های هیدروکسیل در pH بالا می گردند که به غشا سیتوپلاسمی بیشتر میکروب ها آسیب وارد می کند. فلزات سنگینی موجود در اصلاح گره ها بوسیله ایجاد پیوند با غشاهای سلولی شان و پیشگیری از فعالیت های فیزیولوژیکی و زیست شیمیایی می توانند از فعالیت باکتری ها بکاهند (۵۷و۵۸).

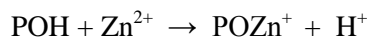
#### جنبه های زیست محیطی

اصلاح گره های شیمیایی گوناگون جهت بی تحرک سازی آلاینده های ناشی از سامانه های کشاورزی به کار گرفته می شوند. می توان با کاربرد ضایعات صنعتی گوناگون از تحرک و حلالیت آلاینده های فلزی سنگین کاست و بدین وسیله آثار زیست محیطی نامطلوب آن ها کاهش می یابد.

با این وجود، افزودن مداوم بیشتر این اصلاح گره ها و ناخالصی های همراه آن ها اثر مخربی بر روی کیفیت آب و خاک دارد. یافته های پژوهشی (۵۹) نشان داد کاربرد لجن آلوم در خاک، میزان محصول گیاهان آن را کاهش داد در حالی که این کاهش محصول به سمیت حاصل از آلومینیوم در سیستم ریشه ربط داشت. افزوده شدن آلوم به کود مایع دامی منجر به تولید گاز اسید سولفور (H<sub>2</sub>S) گردید که ناشی از استفاده ریزجانداران از سولفات برای تنفس و بنابراین کاهش (احیا) آن به (H<sub>2</sub>S) می باشد (۶۰). کاربرد فسفوجیپسوم در زمین های کشاورزی جنبه مهم دیگری به همراه دارد. ناخالصی های موجود در آن مانند فلزات سنگین، فلور و نمک های محلول به سادگی به آب های زیرزمینی آب شویی پیدا می کنند و یا از طریق رواناب های سطحی در آب

از طریق تشکیل رسوب به صورت فسفات فلز، کم تحرک گردند. در خاک، سنگ فسفات با مصرف اسید مطابق واکنش زیر، حل می شود:

و با تشکیل فسفات فلز، از تحرک آن می کاهد. رسوبی که به این وسیله تشکیل می گردد، ساز و کار اصلی غیرفعال سازی فلزاتی مانند سرب، روی و کادمیوم بشمار می رود. طبق گزارش آرنیخ و همکاران (۵۳) نیز رسوب فلوروپیرومورفیت (Pb<sub>10</sub> (PO<sub>4</sub>) [6F<sub>2</sub>] ساز و کار اساسی غیر فعال سازی سرب می باشد، در حالیکه جذب سطحی یا تشکیل کمپلکس درصد کمتری را به خود اختصاص می دهند. بنابراین می توان با افزودن سنگ فسفات به خاک های آلوده به سرب از تحرک این فلز سنگین توسط تبادل یونی و رسوب - که حلالیت و زیست فراهمی پابینی دارند- کاست و به دین وسیله خطر سمیت سرب را در محیط زیست کاهش داد. زمانی که که روی با سنگ فسفات مخلوط می گردد، بر روی سطح سنگ فسفات کمپلکس تشکیل می شود که با جای گزینی یون های H<sup>+</sup> منجر به کاهش pH خاک می گردد مطابق واکنش زیر:



در پژوهشی که در مورد بازدهی ترکیبات طبیعی و مصنوعی اصلاح گره های فسفات برای غیرفعال سازی کبالت و نیکل در خاک های اطراف فعالیت های معدن کاری انجام گرفت (۵۴)، تشکیل کمپلکس های فلزات سنگین بر روی سطح دانه های فسفات، انحلال جزئی اصلاح گره ها و رسوب فسفات های حاوی فلزات سنگین، سازوکارهای اصلی این دو اصلاح گر جهت غیرفعال سازی دو عنصر برشمرده شدند.

روی و بیشتر فلزات سنگین با جذب بر روی سطوح کانی ها، کمپلکس های درون یا برون کره ای تشکیل می دهند (۵۵). کمپلکس های درون کره ای زمانی تشکیل می شوند که لایه آبگیری شده اولیه طی جذب سطحی، آب خود را از دست بدهد، در حالی که کمپلکس های برون کره ای آب خود را نگه داشته اند. واکنش روی با کانی های گیبسیت، گوئتیت، فری هیدرات، و

### نتیجه‌گیری

آلودگی های ناشی از کشاورزی به دلیل تاثیر آن بر روی منابع آب، هوا و زمین رو به ازدیاد می باشد. آلاینده های اصلی کشاورزی که بر کیفیت خاک و اب تاثیر گذارند شامل نیتروژن، فسفر، فلزات سنگین، کربن آلی و پاتوزن ها می باشند. نزولات اتمسفری، پساب ها، کودهای معدنی و آهک، کمپوست ها، ضایعات صنعتی و آب آبیاری منابع عمده آلاینده های یاد شده را تشکیل می دهند. فرآورده های آهن، آلومینیوم و کلسیم دار و ضایعات صنعتی گوناگونی هستند که توانایی بی تحرک سازی فلزات سنگین را در سامانه های کشاورزی دارند. ثابت شده است که مواد فسفر دار مانند سنگ فسفات، دی آمونیوم فسفات و نمک های فسفات دار این توانایی را دارند که سرب را غیر فعال سازند و اثر نسبتا خوبی روی کاهش تحرک روی و مس داشته باشند. کانی های رسی مانند پاله گورسکیت و سپیولیت می توانند کادمیوم و روی خاک ها را بی تحرک سازند. همچنین بنتونیت در کاهش آبشویی آرسنیک خاک ها موثر بوده است. اصلاح گره های دارای آهن، آلومینیوم و کلسیم (مانند باقیمانده های بوکسیتی) مرگ کالی فرم های کودهای حیوانی و جامدات زیستی - که منبع اصلی پاتوزن های عفونی هستند - را باعث می گردند.

ساز و کارهای بی تحرک سازی آلاینده های کشاورزی در سیستم های خاک و آب، یک یا ترکیبی از این سازوکارهای می باشد: تشکیل رسوب در سطح، جذب سطحی بر روی سطوح کانی، رسوب بصورت نمک ها و هم رسوبی. تشکیل رسوب به وسیله کربنات ها (مس و روی)، هیدروکسیدها (روی)، فسفات (سرب) و نیز تشکیل کمپلکس به وسیله اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم (روی، مس و آرسنیک)، رس ها (مس) و لیگاندهای آلی (روی و مس). درک بهتر از شیوه صحیح کاربرد اصلاح گرها زمانی است که با لحاظ جنبه های زیست محیطی همراه باشد. ناخالصی هایی مانند فلزات سنگین، فلور و نمکهای محلول که در ضایعات صنعتی مانند فسفو جیپسوم و زایدات بوکسیتی دیده می شوند، می توانند به سادگی وارد آب های زیرزمینی گردند و یا از

های پذیرنده رها می شوند. وجود عناصر رادیو اکتیو نیز که از جنبه سمیت رادیویی شان از اهمیت زیست محیطی زیادی برخوردارند نیز در فسفوجیپسوم به اثبات رسیده است. احتمال ورود بخارات رادون از خاک های فسفوجیپسوم داده شده به منازل مسکونی گزارش شده است (۶۱). اسیدپته ناشی از کاربرد فسفوجیپسوم اگر کنترل نشود می تواند برای محیط زیست آسیب زایی زیادی داشته باشد. کاربرد ضایعات بوکسیت جهت پاک سازی فسفر و بوکسیت با افزایش pH و ترکیبات سدیمی همراه است که می تواند با ایجاد پخشیدگی، موجب تخریب ساختمان خاک گردد (۶۲). موقعی که ضایعات بوکسیتی (دارای قلیائیت و سدیم بالا) به خاک های حاوی کود دامی افزوده شدند، خاک پخشیدگی پیدا کرد و آب عصاره گیری شده از این خاک، کدورت بالایی نشان داد. بسته به منشاء و سن، ضایعات بوکسیتی می توانند مقادیر بالایی عناصر نادر مانند آرسنیک، کادمیوم و کروم داشته باشند. گرچه بر اساس مطالعات با وجود سطح بالای این عناصر، جزء زیست فراهم این عناصر معمولا پایین می باشد. رادیونوکلئیدهای طبیعی مانند رادیوم-۲۲۶ و توریم-۲۳۲ نیز در نمونه های بوکسیت و آلومینا مشاهده شده اند. بنابراین، کاربرد این مواد می تواند آسیب های رادیواکتیو جدی به همراه داشته باشد. کاربرد خاکستر آتشفشانی می تواند با افزودن عناصر سمی مانند کادمیوم، کبالت، کروم، مس، مولیبدن، سرب، نیکل، سلنیم، وانادیم و روی به خاک همراه باشد (۶۳). کاربرد اصلاح گره های شیمیایی می تواند اثر معنی داری روی تنوع ژنتیکی جمعیت میکروبی خاک داشته باشد. میکروب های اکسایش گر آهن مانند تیوباسیلوس فراکسیدانس می توانند از آهن به عنوان منبع انرژی در شرایط هوازی و غیر هوازی بهره مند شوند. فعالیت این میکروب های اکسایش یا کاهش گر اثر چشمگیری روی ژئوشیمی خاک و رسوب دارد. غنی سازی با آهن می تواند سازگاری ریزجانداران حساس به آهن را بالا ببرد که بر فرایندهای ژئوشیمیایی مانند انحلال و تشکیل کانی، هواپدگی و معدنی شدن مواد آلی تاثیر گذارست.

- fathead minnows: A field study. *Environmental Science & Technology* Vol.49, 9037-9047.
- 8- Bouwer, H., 1989. Agricultural contamination: problems and solutions. *Water Environ Technol.*, Vol. 1(2), pp. 292-7.
- 9- Udeigwe TK, Wang JJ, Zhang H. Predicting runoff of suspended solids and particulate phosphorus for selected Louisiana soils using simple soil tests. *J Environ Qual* 2007;36:1310-7.
- 10- USEPA., 2002. National Water Quality Inventory: 2000 Report. Rep. no.841R02001. Washington, DC, pp. 468.
- 11- Yu, J., Lei, T., Shainberg, I., Mamedov, A. & Levy, G., 2003. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum. *Soil Sci Soc Am J.*, Vol. 67, pp. 630-636.
- 12- Zhu, B., & Alva, A., 1993. Trace metal and cation transport in a sandy soil with various amendments. *Soil Sci Soc Am J.*, Vol. 57, pp. 723-727.
- 13- Summers, RN., Guise, NR., Smirk, DD. & Summers KJ. 1996. Bauxite residue (red mud) improves pasture growth on sandy soils in Western Australia. *Aust J Soil Res.*, Vol. 34, pp. 569-81.
- 14- Sims, J. & Luka-McCafferty, N., 2002. On-farm evaluation of aluminum sulfate (alum) as a poultry litter amendment: effects on litter properties. *J Environ Qual.*, Vol. 31, pp. 2066-2073.
- 15- Udeigwe, TK., Wang, JJ. & Zhang, H., 2009. Effectiveness of bauxite residues in immobilizing contaminants in manure-  
طریق هرز آب در آب های پذیرنده رها شوند. وجود عناصر پرتوزای گوناگون در فسفو جیپسوم و زایدات بوکسیتی شناسایی شده اند. اسیدپته و قلبائیت ناشی از به ترتیب فسفوجیپسوم و زایدات بوکسیتی در صورتی که مهار نشوند، زیان های زیست محیطی به همراه خواهند داشت. کاربرد اصلاح گرهای شیمیایی مانند ترکیبات آهن در خاک تاثیر معنی داری بر روی تنوع ژنتیکی میکرووب های اکسایش گر یا کاهش گر آهن دارد و به نوبه خود بر روی ژئوشیمی خاک و رسوب تاثیر گذار خواهند بود.
- مراجع**
- 1- USEPA. National Water Quality Inventory [Online]., 2003. Available at <http://www.epa.gov/305b/2000report/2003> (verified 14 Nov. 2003). USEPA, Washington, D.C.
- 2- Adriano, DC., 2001. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer-Verlag.
- 3- Kabata-Pendias, A., and Pendias, H., 1992. Trace elements in soils and plants, CRC Press.
- 4- Alloway, BJ. 2018. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer Science Business Media Dordrecht.
- 5- Sanchez, PA., 2019. Properties and Management of Soils in the Tropics. Cambridge CB2 8BS, United Kingdom.
- 6- Osborne, L.R., L.L. Baker, and D.G. Strawn. 2015. Lead Immobilization and Phosphorus Availability in phosphate-amended, mine-contaminated soils. *J Environ Qual.*, 44:183-190.
- 7- Zhang, Y., R.G. Krysl, J.M. Ali, D.D. Snow, S.L. Bartelt-Hunt, and A.S. Kolok. 2015. Impact of sediment on agrichemical fate and bioavailability to adult female



- 24- Vandecasteele, C., Dutré, V., Geysen, D., Wauter, G., 2002. Solidification/stabilization of arsenic bearing fly ash from metallurgical industry. Immobilization mechanism of arsenic. *Waste Manage.* 22, 143–146.
- 25- Wenzel, W.W., Kirchbaumer, N., Prohask, T., Stingeder, G., Lombi, E., Adriano, D.C., 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Anal. Chim. Acta* 436, 309–323.
- 26- Mench, M., Vangronsveld, J., Beckx, C., Ruttens, A., 2006. Progress in assisted natural remediation of arsenic contaminated soil. *Environ. Pollut.* 144, 51–61.
- 27- Narwal, R.P., Singh, B.R., Salbu, B., 1999. Association of cadmium, zinc, copper, and nickel with components in naturally heavy metal-rich soils studied by parallel and sequential extractions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30, 1209–1230.
- 28- Hinojosa, M.B., Carreira, J.A., García-Ruíz, R., Dick, R.P., 2004. Soil moisture pretreatment effects on enzyme calcium as indicators of heavy metal-contaminated and reclaimed soils. *Soil Biol. Biochem.* 36, 1559–1568.
- 29- Hinojosa, M.B., Carreira, J.A., Rodríguez-Maroto, J.M., García-Ruíz, R., 2008. Effects of pyrite sludge pollution on soil calcium activities: ecological dose–response model. *Sci. Total Environ.* 396, 89–99.
- 30- ISO 11466, 1995. Soil Quality — Extraction of Trace Elements Soluble in Aqua Regia. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.
- amended soils. *Soil Sci*, Vol. 174, pp. 676–687.
- 16- Sparks, D., 2003. Environmental soil chemistry. California: Academic Press.
- 17- McBride, M., Sauve, S. & Hendershot, W., 2005. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *Eur J Soil Sci*, Vol. 48, pp. 337–46.
- 18- McConchie, D., Clark, MW. & Davies-McConchie, F., 2002. New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud). Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Alumina Quality Workshop. Australia: Brisbane; pp. 8-13.
- 19- Sawyer, C., McCarty, P. & Parkin, G., 2002. Chemistry for environmental engineering and science. New Jersey: McGraw-Hill.
- 20- Gier, S. & Johns, W., 2000. Heavy metal-adsorption on micas and clay minerals studied by X-ray photoelectron spectroscopy. *Appl Clay Sci.*, Vol. 16, pp. 289–99.
- 21- Dyer J, Trivedi P, Scrivner N, & Sparks, D., 2004. Surface complexation modeling of zinc sorption onto ferrihydrite. *J Colloid Interface Sci.*, Vol . 270, pp. 56–65.
- 22- Jain A, Raven KP, Loeppert RH. 1999. Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: surface charge reduction and net OH<sup>-</sup> release stoichiometry. *Environ Sci Technol* Vol . 33, pp. 1179–84.
- 23- Sang-Hwan Lee A., Eui Young Kim A, Hyun Park B, Jihoon Yun C, Jeong-Gyu Kim, In situ stabilization of arsenic and metal-contaminated agricultural soil using industrial by-products, *Geoderma* 161 (2011) 1–7

- 38- Kaggwa, R., Mulalelo, C., Denny, P. & Okurut, T., 2001. The impact of alum discharges on a natural tropical wetland in Uganda. *Water Res.*, Vol. 35, pp.795–807.
- 39- Okhoovat, M., Dadeny, P., & Eradat, S., 1994. A mechanistic description of Cd and Pb sorption on montmorillonite. *J. Con. Hyd.*, Vol. 14, pp.57-63.
- 40- Kuvirel, J., Lagerkvist, A. & Maurice, C., 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—a review. *Waste Manage.* Vol. 28 pp. 215–225.
- 41- Jala, S., & Goyal, D., 2005. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production—a review. *Bioresour Technol.*, Vol. 97, pp. 1136–47.
- 42- Brown, S., Christensen, B., Lombi, E., McLaughlin, M., McGrath, S. & Colpaert, J., 2005. An interlaboratory study to test the ability of amendments to reduce the availability of Cd, Pb, and Zn in situ. *Environ Pollut.* Vol. 138, pp. 34–45.
- 43- Sharpley A. 2000. Agriculture and phosphorus management: the Chesapeake Bay. CRC.
- 44- Khare, N., Hesterberg, D. & Martin, JD., 2005. XANES investigation of phosphate sorption in single and binary systems of iron and aluminum oxide minerals. *Environ Sci Technol.* Vol. 39, pp. 2152–60.
- 45- McBride, MB., 1981. Chemisorption of Cd on calcite surfaces. *SSSAJ*, Vol. 44, 26-28.
- 46- Saha, JK., 2017. Soil Pollution - An Emerging Threat to Agriculture, Springer.
- 31- Hartley, W. & Lepp, N. 2008. Remediation of arsenic contaminated soils by CaO application, evaluated in terms of plant productivity, arsenic and phytotoxic metal uptake. *Sci Total Environ.*, Vol. 390, pp. 35–44.
- 32- Hartley, W., Edwards, R. & Lepp, N., 2004. Arsenic and heavy metal mobility in calcite amended contaminated soils as evaluated by short- and long-term leaching tests. *Environ Pollut.*, Vol. 131, pp. 495–504.
- 33- Han FX, Kingery WL, Selim HM, Gerard PD. Accumulation of heavy metals in a longterm poultry waste-amended soil. *Soil Sci* 2000;165:260–8.
- 34- Hao, X., Larney, F., Chang, C., Travis, G., Nichol, C. & Bremer E. 2005. The effect of phosphogypsum on greenhouse gas emissions during cattle manure composting. *J Environ Qual.*, Vol. 34, pp. 774–81.
- 35- Harmel, R., Smith, D., Haney, R. & Dozier M. 2009. Nitrogen and phosphorus runoff from cropland and pasture fields fertilized with poultry litter. *J Soil Water Conserv* Vol. 64, pp. 400–12.
- 36- Hartley, W. & Lepp, N. 2008. Remediation of arsenic contaminated soils by bentonite application, evaluated in terms of plant productivity, arsenic and phytotoxic metal uptake. *Sci Total Environ.*, Vol. 390, pp.35–44.
- 37- Chiu, VQ. & Hering, JG., 2000. Arsenic adsorption and oxidation at manganite surfaces. 1. Method for simultaneous determination of adsorbed and dissolved arsenic species. *Environ Sci Technol.*, Vol 34, pp. 2029–34.

- 57- Pearson, HW., Mara, DD., & Bartone, CR., 1987. Guidelines for the minimum evaluation of the performance of full-scale wastes stabilization pond systems. *Water Res.*, Vol. 21, pp. 1067–75.
- 58- Kaggwa, R., Mulalelo, C., Denny, P., & Okurut, T., 2001. The impact of alum discharges on a natural tropical wetland in Uganda. *Water Res.* Vol. 35, pp.795–807.
- 59- Strawn, DG., Bohn, H., O Conner, GA., 2020. *Soil Chemistry*. Wiley publishers.
- 60- McCarty, LB. 2016. *Applied Soil Physical Properties, Drainage, and Irrigation Strategies*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.
- 61- Smith, D., Moore, Jr., Griffis, C., Daniel, T., Edwards, D. & Boothe, D. 2001. Effects of alum and aluminum chloride on phosphorus runoff from swine manure. *J Environ Qual*; Vol. 30, pp. 992–8.
- 62- Rutherford, P., Dudas, M. & Samek, R., 1994. Environmental impacts of phosphogypsum. *Sci Total Environ.*, Vol. 149, pp.1-38.
- 63- McConchie, D., Clark, MW. & Davies-McConchie F., 2002. New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud). *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Alumina Quality Workshop*. Australia: Brisbane;. pp. 8-13.
- 47- Panpatte, DG., 2019. *Soil Fertility Management for Sustainable Development*. Springer.
- 48- Yu J, Lei T, Shainberg I, Mamedov A, Levy G. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum. *Soil Sci Soc Am J* 2003;67:630–6.
- 49- Zachara, J., 1992. Cadmium sorption to soil separates, *SSSA*, 56:1074-1084.
- 50- Havlin, JL., 2017. *Soil fertility and fertilizers*. Pearson India Education Services.
- 51- *Intelligent Soil Management for Sustainable Agriculture*. 2019. Calicut, Kerala, India.
- 52- Whalen J. Calcium co-amendments modify extractable orthophosphate levels in fresh and composted cattle manure. *Water Air Soil Pollut* 2002;141:105–24.
- 53- Arnich N, Lanhers MC, Laurensot F, Podor R, Montiel A, Burnel D. In vitro and in vivo studies of lead immobilization by synthetic hydroxyapatite. *Environ Pollut* 2003;124:139–49.
- 54- Hartley W, Edwards R, Lepp N. Arsenic and heavy metal mobility in iron oxideamended contaminated soils as evaluated by short- and long-term leaching tests. *Environ Pollut* 2004;131:495–504.
- 55- Dyer J, Trivedi P, Scrivner N, Sparks D. Surface complexation modeling of zinc sorption onto zeolite. *J Colloid Interface Sci* 2004;270:56–65.
- 56- Domek MJ, LeChevallier MW, Cameron SC, McFeters GA. Evidence for the role of copper in the injury process of coliform bacteria in drinking water. *Appl Environ Microbiol* 1984;48:289–93.