



" بررسی الگوی توزیع و غلظت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی

ایران و ارزیابی مخاطرات زیست محیطی-اقتصادی آن

در چهارچوب مدیریت منابع طبیعی "

اقتصاد منابع طبیعی -2

استاد درس : دکتر ایرج صالح

فریمه فروزان فرد

فهرست مطالب :

3	مقدمه
7	مبانی نظری و پیشینه تحقیق
11	روش تحقیق
15	نتایج و تحلیل
19	نتیجه گیری و پیشنهادات
22	منابع

مقدمه

1.1 مقدمه :

خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی، نقش اساسی در تولید محصولات کشاورزی، تأمین امنیت غذایی و حفظ تعادل اکوسیستم‌ها دارد. با این حال در دهه‌های اخیر، فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی فشرده، استفاده از کودها و سموم شیمیایی، توسعه صنعتی و دفع غیراصولی پسماندها موجب ورود مقادیر قابل توجهی از آلاینده‌ها به خاک شده است. در میان این آلاینده‌ها، فلزات سنگین به دلیل پایداری بالا، قابلیت تجمع زیستی و سمیت شدید، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. فلزات سنگین مانند سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، روی (Zn) و مس (Cu) به طور طبیعی در خاک وجود دارند، اما فعالیت‌های انسانی باعث افزایش غلظت آن‌ها تا سطوح خطرناک شده است. این فلزات برخلاف بسیاری از آلاینده‌های آلی، تجزیه‌پذیر نیستند و می‌توانند برای مدت طولانی در خاک باقی بمانند و از طریق زنجیره غذایی وارد بدن انسان و حیوان شوند. بر اساس گزارش‌های جهانی، آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی برای کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) اعلام کرده است که بخش قابل توجهی از خاک‌های کشاورزی جهان در معرض درجاتی از آلودگی فلزات سنگین قرار دارند و این موضوع می‌تواند امنیت غذایی جهانی را تهدید کند. (2، 3، 15، 16، 17، 18، 4، 5)

مقایسه منابع ورود فلزات سنگین به خاک (از 1 کمترین تا 5 بیشترین) (2، 5، 18)

منبع	امتیاز
کودهای شیمیایی	4
پساب صنعتی	5
آفت کش‌ها	3
رسوبات جوی	3
پسماند شهری	3

افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت انسان داشته باشد. این فلزات از طریق جذب توسط گیاهان وارد زنجیره غذایی شده و در بدن انسان تجمع پیدا می‌کنند. قرارگیری طولانی‌مدت در معرض فلزات سنگین می‌تواند منجر به بیماری‌های کلیوی، عصبی، سرطان و اختلالات رشد شود. (4، 18، 22)

از منظر اقتصاد منابع طبیعی، آلودگی خاک به فلزات سنگین نوعی شکست بازار (Market Failure) محسوب می‌شود، زیرا هزینه‌های واقعی این آلودگی در قیمت محصولات کشاورزی منعکس نمی‌شود و به صورت هزینه‌های خارجی (Externalities) بر جامعه تحمیل می‌گردد.

یکی از مهم‌ترین مشکلات مدیریت منابع خاک در ایران این است که ارزش واقعی خاک سالم در تصمیم‌گیری‌های اقتصادی لحاظ نمی‌شود و همین موضوع باعث شده آلودگی‌های تدریجی مانند فلزات سنگین به صورت خاموش اما پایدار در بسیاری از مناطق کشاورزی کشور گسترش یابد.

1.2 بیان مسئله :

در سال‌های اخیر افزایش استفاده از کودهای فسفاته، فاضلاب‌های تصفیه‌نشده، فعالیت‌های صنعتی و معدن‌کاری باعث افزایش نگرانی‌ها درباره تجمع فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی شده است. این مسئله نه تنها بهره‌وری خاک را کاهش می‌دهد، بلکه کیفیت محصولات کشاورزی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در بسیاری از مناطق جهان، غلظت فلزات سنگین در خاک از حد استانداردهای سازمان جهانی بهداشت (WHO) و FAO فراتر رفته است. در ایران نیز مطالعات مختلف نشان می‌دهد که برخی مناطق صنعتی و کشاورزی با افزایش غلظت فلزاتی مانند سرب و کادمیوم مواجه هستند.

با وجود اهمیت موضوع، اطلاعات جامع و یکپارچه‌ای درباره الگوی توزیع مکانی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران وجود ندارد و مطالعات موجود معمولاً به مناطق محدود یا استان‌های خاصی اختصاص دارند. این موضوع ضرورت انجام پژوهش‌های جامع‌تر را نشان می‌دهد.

1.3 ضرورت انجام تحقیق :

ضرورت این پژوهش از چند جنبه قابل بررسی است. نخست آنکه خاک یکی از منابع غیرقابل تجدید در مقیاس انسانی است و تخریب آن می‌تواند اثرات بلندمدت و بعضاً غیرقابل جبران داشته باشد. دوم آنکه آلودگی خاک به فلزات سنگین مستقیماً با سلامت انسان و امنیت غذایی ارتباط دارد. سوم آنکه از دیدگاه اقتصاد منابع طبیعی، این آلودگی‌ها موجب کاهش ارزش اقتصادی زمین‌های کشاورزی می‌شوند.

همچنین نبود داده‌های یکپارچه درباره توزیع فلزات سنگین در ایران باعث شده است تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در این حوزه با عدم قطعیت همراه باشد. بنابراین تحلیل جامع این موضوع می‌تواند به سیاست‌گذاری بهتر در حوزه محیط زیست و کشاورزی کمک کند.

1.4 اهداف تحقیق :

هدف اصلی:

بررسی میزان و الگوی توزیع فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران و ارزیابی خطر زیستی ناشی از آن‌ها.

اهداف فرعی:

- بررسی منابع ورود فلزات سنگین به خاک
- تحلیل توزیع مکانی فلزات سنگین در ایران
- مقایسه غلظت فلزات با استانداردهای جهانی
- ارزیابی شاخص‌های آلودگی خاک
- بررسی خطرات زیستی برای انسان و کشاورزی پایدار

1.5 سوالات تحقیق :

1. مهم‌ترین منابع ورود فلزات سنگین به خاک‌های کشاورزی چیست؟
2. وضعیت آلودگی خاک در ایران در مقایسه با استانداردهای جهانی چگونه است؟
3. الگوی توزیع مکانی فلزات سنگین در ایران چگونه است؟
4. چه خطرات زیستی ناشی از تجمع فلزات سنگین وجود دارد؟
5. چه پیامدهای اقتصادی برای منابع طبیعی ایجاد می‌شود؟

1.6 اهمیت تحقیق :

این پژوهش از آن جهت اهمیت دارد که آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌تواند به صورت مستقیم بر سلامت انسان، کیفیت محصولات کشاورزی و بهره‌وری زمین تأثیر بگذارد. همچنین از دیدگاه اقتصاد منابع طبیعی، این موضوع به کاهش ارزش اقتصادی زمین‌های کشاورزی و افزایش هزینه‌های درمانی و زیست‌محیطی منجر می‌شود.

اگر مدیریت آلودگی خاک در ایران به صورت جدی در دستور کار قرار نگیرد، در آینده نه تنها کیفیت محصولات کشاورزی کاهش خواهد یافت، بلکه بخشی از اراضی کشاورزی نیز به دلیل آلودگی شدید، کارایی اقتصادی خود را از دست خواهند داد.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

2.1 مفهوم فلزات سنگین در خاک :

فلزات سنگین به گروهی از عناصر شیمیایی گفته می‌شود که دارای چگالی بالا و عدد اتمی نسبتاً زیاد هستند و در مقادیر بالا برای موجودات زنده سمی محسوب می‌شوند. این عناصر شامل فلزاتی مانند سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، روی (Zn) و مس (Cu) هستند. برخی از این فلزات مانند روی و مس در مقادیر کم برای رشد گیاهان ضروری هستند، اما در غلظت‌های بالا به آلاینده‌های خطرناک تبدیل می‌شوند. (15، 16، 17)

ویژگی مهم فلزات سنگین این است که برخلاف بسیاری از آلاینده‌های آلی، تجزیه‌پذیر نیستند و در خاک تجمع پیدا می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود که اثرات آن‌ها بلندمدت و پایدار باشد و به راحتی از محیط حذف نشوند. (16)

ویژگی مهم فلزات سنگین این است که برخلاف بسیاری از آلاینده‌های آلی، تجزیه‌پذیر نیستند و در خاک تجمع پیدا می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود که اثرات آن‌ها بلندمدت و پایدار باشد و به راحتی از محیط حذف نشوند. (16)

2.2 منابع ورود فلزات سنگین به خاک :

فلزات سنگین از منابع مختلف طبیعی و انسانی وارد خاک می‌شوند. منابع طبیعی شامل فرسایش سنگ‌ها و فعالیت‌های آتشفشانی است، اما سهم این منابع در مقایسه با فعالیت‌های انسانی کمتر است. (17، 18)

مهم‌ترین منابع انسانی عبارت‌اند از:

- استفاده از کودهای شیمیایی و فسفات
- استفاده از آفت‌کش‌ها و سموم کشاورزی
- پساب‌های صنعتی و فاضلاب تصفیه‌نشده
- فعالیت‌های معدن‌کاری و صنایع فلزی
- رسوبات جوی ناشی از آلودگی هوا (2، 5، 18، 29)

سهم منابع ورود فلزات سنگین به خاک (از 1 کمترین تا 5 بیشترین) (2، 5، 18، 29)

منبع	سهم نسبی
صنایع و معادن	5
کودهای شیمیایی	4
فاضلاب شهری	3
رسوبات جوی	3
منابع طبیعی	1

2.3 رفتار فلزات سنگین در خاک :

رفتار فلزات سنگین در خاک به عوامل مختلفی مانند pH خاک، میزان ماده آلی، بافت خاک و شرایط رطوبتی بستگی دارد. در خاک‌های اسیدی، تحرک فلزات سنگین بیشتر بوده و احتمال جذب آن‌ها توسط گیاهان افزایش می‌یابد.

فلزات سنگین می‌توانند به صورت‌های مختلف در خاک وجود داشته باشند: محلول در آب خاک، جذب‌شده به ذرات رس، یا متصل به مواد آلی. این اشکال مختلف تعیین‌کننده میزان دسترسی زیستی (Bioavailability) فلزات هستند. (15، 16، 19)

2.4 اثرات زیست‌محیطی و انسانی :

تجمع فلزات سنگین در خاک می‌تواند اثرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌ها داشته باشد. این فلزات از طریق گیاهان وارد زنجیره غذایی شده و در بدن انسان و حیوان تجمع پیدا می‌کنند. (21، 22، 18)

اثرات مهم عبارت‌اند از:

- آسیب به سیستم عصبی (به‌ویژه سرب و کادمیوم)
- اختلال در عملکرد کلیه‌ها
- کاهش رشد گیاهان
- کاهش حاصلخیزی خاک
- افزایش خطر سرطان در انسان (4، 18، 22)

2.5 شاخص‌های ارزیابی آلودگی خاک :

برای ارزیابی میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

1. شاخص زمین‌انباشت (Igeo):

این شاخص میزان آلودگی خاک را نسبت به مقدار طبیعی عناصر در پوسته زمین نشان می‌دهد. (23)

2. ضریب آلودگی (CF):

نسبت غلظت فلز در خاک به مقدار زمینه‌ای طبیعی آن است. (24)

3. شاخص ریسک زیست‌محیطی (RI):

میزان خطر کلی ناشی از چند فلز سنگین را به صورت ترکیبی ارزیابی می‌کند. (24، 25)

مقیاس تفسیر شاخص (Igeo) (23) (Muller – 1969)

مقدار	وضعیت آلودگی
کمتر از 0	غیر آلوده
0 تا 1	آلودگی ضعیف
1 تا 2	متوسط
2 تا 3	زیاد
بالتر از 3	بسیار زیاد

2.6 استانداردهای جهانی :

سازمان های بین المللی مانند WHO و FAO برای برخی فلزات سنگین حد مجاز تعیین کرده اند. این مقادیر به عنوان معیار مقایسه در مطالعات آلودگی خاک استفاده می شوند. (4، 26)

حد مجاز فلزات سنگین در خاک (mg/kg) (4، 26)

فلز	حد مجاز تقریبی
سرب	300-50
کادمیوم	3-1
روی	300-200
مس	140-50

2.7 پیشینه تحقیق :

مطالعات مختلفی در ایران و جهان درباره آلودگی خاک به فلزات سنگین انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که مناطق نزدیک به صنایع، معادن و زمین‌های کشاورزی فشرده بیشترین میزان آلودگی را دارند.

در ایران نیز تحقیقات انجام شده در استان‌هایی مانند اصفهان، خوزستان و تهران نشان داده‌اند که غلظت برخی فلزات سنگین در خاک این مناطق از حد استاندارد فراتر رفته است. (20، 21، 22، 29، 13، 27، 28، 30)

مهم‌ترین ضعف در مطالعات داخلی این است که بیشتر تحقیقات به صورت منطقه‌ای انجام شده‌اند و هنوز یک تصویر جامع و یکپارچه از وضعیت آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران وجود ندارد.

بررسی مبانی نظری نشان داد که فلزات سنگین به دلیل پایداری بالا و سمیت زیاد، یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های خاک محسوب می‌شوند. منابع انسانی نقش اصلی را در افزایش غلظت این عناصر دارند و در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌توانند اثرات جدی بر سلامت انسان و محیط زیست داشته باشند. همچنین شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی میزان آلودگی خاک وجود دارد که امکان تحلیل کمی این پدیده را فراهم می‌کنند.

روش تحقیق

3.1 نوع و ماهیت تحقیق :

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش اجرا، توصیفی - تحلیلی است. هدف اصلی آن بررسی میزان و الگوی توزیع فلزات سنگین (سرب، کادمیوم، روی و مس) در خاک‌های کشاورزی ایران و ارزیابی خطر زیستی ناشی از آن‌ها می‌باشد. در این تحقیق تلاش شده است با استفاده از داده‌های آماری و مطالعات پیشین، وضعیت آلودگی خاک در مناطق مختلف ایران تحلیل و با استانداردهای بین‌المللی مقایسه شود.

3.2 روش جمع‌آوری داده‌ها :

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به صورت کتابخانه‌ای و مبتنی بر منابع علمی معتبر گردآوری شده است. این منابع شامل مقالات علمی منتشر شده در مجلات بین‌المللی، گزارش‌های سازمان‌های جهانی و مطالعات انجام شده در دانشگاه‌های داخلی و خارجی است.

مهم‌ترین منابع داده‌ای عبارت‌اند از:

- سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)
- سازمان بهداشت جهانی (WHO)
- برنامه محیط زیست سازمان ملل (UNEP)
- مقالات علمی پایگاه‌های Scopus و ScienceDirect
- مطالعات دانشگاهی در ایران

3.3 روش تحلیل داده‌ها :

در این پژوهش برای تحلیل آلودگی خاک به فلزات سنگین از شاخص‌های کمی و آماری استفاده شده است. این شاخص‌ها امکان ارزیابی میزان آلودگی و خطر زیستی را فراهم می‌کنند.

مهم‌ترین شاخص‌های مورد استفاده عبارت‌اند از:

1. شاخص زمین‌انباشت (Igeo):

برای سنجش میزان تجمع فلزات در خاک نسبت به مقدار طبیعی آن استفاده می‌شود. (23)

2. ضریب آلودگی (CF):

نسبت غلظت فلز در نمونه خاک به مقدار زمینه‌ای طبیعی. (24)

3. شاخص خطر زیستی (RI):

برای ارزیابی خطر کلی ناشی از چند فلز سنگین به صورت همزمان. (24، 25)

فرمول‌ها :

- شاخص CF:

$$CF = C_{\text{sample}} / C_{\text{background}}$$

- شاخص RI:

$$RI = \sum Er$$

- که در آن:

Er = ضریب خطر زیستی هر فلز

(23، 24، 25)

3.4 روش نمونه‌برداری (مطالعات ثانویه) :

در این تحقیق نمونه‌برداری مستقیم میدانی انجام نشده و داده‌ها از مطالعات پیشین استخراج و تحلیل شده‌اند. این نوع روش به عنوان "مطالعه ثانویه" (Secondary Data Analysis) شناخته می‌شود.

استفاده از این روش باعث شده امکان بررسی گسترده‌تری از مناطق مختلف ایران فراهم شود و نتایج حاصل از مطالعات مختلف در یک چارچوب واحد تحلیل گردد.

3.5 شاخص‌های ارزیابی خطر :

برای ارزیابی خطر فلزات سنگین در خاک، دو بعد اصلی در نظر گرفته شده است:

1. خطر زیست‌محیطی : شامل اثر فلزات بر خاک، گیاهان و اکوسیستم
2. خطر انسانی (Health Risk): شامل اثرات احتمالی بر سلامت انسان از طریق زنجیره غذایی. (4، 21)

دسته بندی سطح خطر RI (24) (Hakanson-1980)

سطح خطر	مقدار
کم	کمتر از 150
متوسط	150 تا 300
زیاد	300 تا 600
بسیار زیاد	بیشتر از 600

3.6 چارچوب کلی تحقیق :

فرآیند انجام این پژوهش در چند مرحله انجام شده است:

1. جمع‌آوری داده‌های مربوط به فلزات سنگین از منابع معتبر
2. انتخاب مطالعات مرتبط با خاک‌های کشاورزی ایران
3. استخراج داده‌های کمی مربوط به غلظت فلزات
4. محاسبه شاخص‌های آلودگی : CF، Igeo، RI
5. مقایسه نتایج با استانداردهای جهانی
6. تحلیل نتایج از دیدگاه زیست‌محیطی و اقتصادی

یکی از محدودیت‌های مهم در مطالعات آلودگی خاک در ایران، نبود بانک داده یکپارچه و جامع است که بتواند

اطلاعات مناطق مختلف کشور را به صورت استاندارد و قابل مقایسه در اختیار پژوهشگران قرار دهد.

استفاده از شاخص‌های کمی مانند CF، Igeo و RI امکان تحلیل دقیق‌تر میزان آلودگی و خطر زیستی را فراهم می‌کند.

نتایج و تحلیل

4.1 وضعیت کلی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران :

بررسی مطالعات انجام شده در ایران نشان می‌دهد که آلودگی خاک به فلزات سنگین در بسیاری از مناطق کشاورزی کشور وجود دارد، اما شدت آن در مناطق مختلف متفاوت است. به طور کلی، مناطق صنعتی، اطراف معادن، زمین‌های کشاورزی نزدیک به شهرهای بزرگ و مناطق تحت تأثیر فاضلاب شهری بیشترین میزان آلودگی را دارند. (28،27)

مطالعات نشان می‌دهد فلزاتی مانند سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) بیشترین نگرانی زیست‌محیطی را ایجاد کرده‌اند، زیرا حتی در غلظت‌های پایین نیز می‌توانند اثرات سمی قابل توجهی داشته باشند. در مقابل، فلزاتی مانند روی (Zn) و مس (Cu) اگرچه در مقادیر کم ضروری هستند، اما در صورت تجمع بیش از حد به آلاینده تبدیل می‌شوند. (13،14)

میانگین نسبی غلظت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران (از 1 کمترین تا 5 بیشترین) (13،20،27،30)

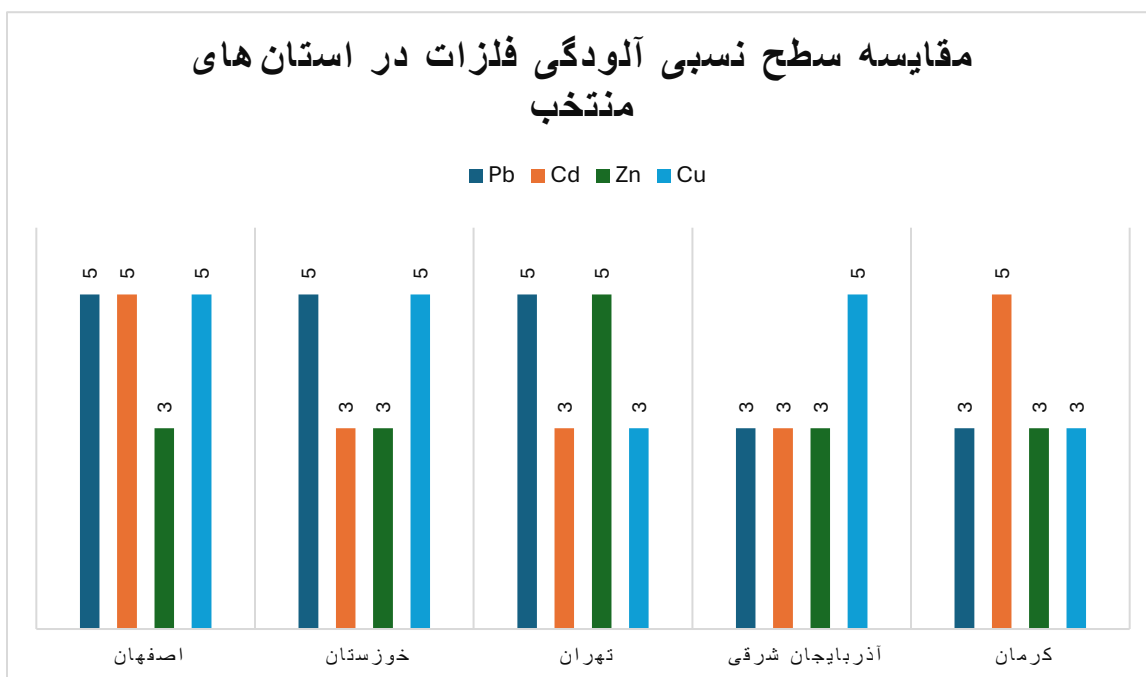
امتیاز	فلز
5	سرب
3-5	کادمیوم
3	روی
3	مس

4.2 الگوی توزیع مکانی فلزات سنگین در ایران :

الگوی توزیع فلزات سنگین در خاک‌های ایران یکنواخت نیست و به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارد. استان‌های صنعتی و کلان‌شهری معمولاً دارای غلظت بالاتری از فلزات سنگین هستند. (13،14،27،28،30)

بر اساس نتایج مطالعات، استان‌های زیر بیشترین سطح آلودگی را نشان داده‌اند:

- اصفهان (به دلیل صنایع فولاد و ذوب فلزات)
- خوزستان (صنایع نفت و پتروشیمی)
- تهران (ترافیک و صنایع شهری)
- آذربایجان شرقی (فعالیت‌های صنعتی و معدنی)
- کرمان (معدن‌کاری) (13،14،27،28)



(13،14،27،28)

4.3 مقایسه با استانداردهای جهانی :

مقایسه داده‌های موجود با استانداردهای WHO و FAO نشان می‌دهد که در برخی مناطق، غلظت فلزات سنگین از حد مجاز فراتر رفته است. این موضوع به ویژه در مورد کادمیوم و سرب اهمیت بیشتری دارد. (4،26،27،30)

به طور کلی:

- Pb در برخی مناطق صنعتی نزدیک یا بالاتر از حد مجاز
- Cd در چند منطقه کشاورزی آلوده بالاتر از حد استاندارد
- Zn و Cu بیشتر در محدوده مجاز اما با روند افزایشی (4،13،26،30)

مقایسه میانگین غلظت فلزات با استاندارد جهانی (mg/kg) (4،13،26،30)

حد مجاز استاندارد	میانگین ایران	فلز
50-300	45-120	سرب
1-3	0.8-3.5	کادمیوم
200-300	80-220	روی
50-140	30-90	مس

4.4 ارزیابی شاخص‌های آلودگی CF ، Igeo ، RI :

بررسی شاخص‌های آلودگی نشان می‌دهد که در بسیاری از مناطق ایران وضعیت از نظر زیست‌محیطی در سطح «متوسط تا زیاد» قرار دارد. (23،24،25،30)

نتایج کلی:

- CF برای Cd در برخی مناطق < 3 (آلودگی بالا)
- CF برای Pb بین 1.5 تا 3 (آلودگی متوسط تا زیاد)
- Igeo در اکثر مناطق بین 1 تا 2
- RI در برخی مناطق صنعتی در سطح خطر متوسط تا زیاد (23،24،25)

سطح خطر زیستی در مناطق مختلف (24) (Hakanson-1980)

منطقه	RI	سطح خطر
صنعتی	بالا	زیاد
کشاورزی فشرده	متوسط	متوسط
مناطق روستایی دور	پایین	کم

4.5 تحلیل اقتصادی آلودگی خاک :

از دیدگاه اقتصاد منابع طبیعی، آلودگی خاک به فلزات سنگین نوعی کاهش سرمایه طبیعی

(Natural Capital Degradation) محسوب می‌شود. این موضوع باعث کاهش ارزش زمین‌های کشاورزی

و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود. (5،8،12،22)

پیامدهای اقتصادی شامل:

- کاهش کیفیت و قیمت محصولات کشاورزی
- افزایش هزینه‌های تصفیه خاک
- کاهش بهره‌وری زمین
- افزایش هزینه‌های سلامت عمومی

در واقع، بخشی از هزینه آلودگی به صورت هزینه‌های پنهان بر جامعه تحمیل می‌شود و در قیمت محصولات کشاورزی منعکس نمی‌گردد.

مهم‌ترین مسئله اقتصادی در آلودگی خاک این است که این نوع آلودگی به صورت تدریجی و غیرقابل مشاهده رخ می‌دهد و همین موضوع باعث می‌شود در تصمیم‌گیری‌های اقتصادی و کشاورزی کمتر مورد توجه قرار گیرد، در حالی که اثرات بلندمدت آن می‌تواند بسیار پرهزینه‌تر از آلودگی‌های آشکار باشد.

لودگی خاک به فلزات سنگین در ایران به صورت گسترده اما ناهمگن وجود دارد و مناطق صنعتی و کشاورزی فشرده بیشترین سطح آلودگی را دارند. مقایسه با استانداردهای جهانی نشان داد که در برخی مناطق، به ویژه برای کادمیوم و سرب، غلظت‌ها نزدیک یا بالاتر از حد مجاز است. همچنین تحلیل شاخص‌های آلودگی بیانگر وجود خطر زیست‌محیطی متوسط تا زیاد در برخی مناطق کشور است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

5.1 نتیجه‌گیری :

بررسی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آلودگی خاک‌های کشاورزی ایران به فلزات سنگین یک مسئله پراکنده اما مهم و رو به گسترش است. این آلودگی عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند صنایع، معدن‌کاری، استفاده از کودهای شیمیایی و ورود فاضلاب‌های شهری به اراضی کشاورزی می‌باشد.

فلزات سنگین مانند سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) بیشترین اهمیت زیست‌محیطی را دارند، زیرا حتی در غلظت‌های پایین نیز اثرات سمی قابل توجهی بر سلامت انسان و اکوسیستم دارند. نتایج نشان داد که در برخی مناطق صنعتی و کشاورزی ایران، غلظت این فلزات از حد استانداردهای جهانی فراتر رفته یا به آن نزدیک شده است.

از نظر توزیع مکانی، آلودگی خاک یکنواخت نیست و استان‌های صنعتی و پرجمعیت مانند اصفهان، تهران، خوزستان و برخی مناطق معدنی، بیشترین میزان آلودگی را نشان می‌دهند. این موضوع نشان‌دهنده نقش پررنگ فعالیت‌های انسانی در ایجاد آلودگی خاک است.

از دیدگاه شاخص‌های ارزیابی CF، Igeo و RI، بسیاری از مناطق کشور در وضعیت «آلودگی متوسط تا زیاد» قرار دارند. این موضوع بیانگر آن است که در صورت عدم مدیریت مناسب، احتمال تشدید آلودگی در آینده وجود دارد. در نهایت، از منظر اقتصاد منابع طبیعی، آلودگی خاک به فلزات سنگین موجب کاهش سرمایه طبیعی کشور شده و هزینه‌های پنهانی مانند کاهش بهره‌وری زمین، افزایش هزینه‌های درمانی و افت کیفیت محصولات کشاورزی را به جامعه تحمیل می‌کند.

مهم‌ترین نکته در مدیریت آلودگی خاک این است که این مسئله یک بحران تدریجی و بلندمدت است و اگرچه در کوتاه‌مدت ممکن است آثار آن محسوس نباشد، اما در بلندمدت می‌تواند امنیت غذایی و پایداری کشاورزی کشور را به طور جدی تهدید کند.

5.2 پیشنهادات :

بر اساس نتایج به دست آمده، مجموعه‌ای از پیشنهادهای کاربردی برای کاهش آلودگی خاک به فلزات سنگین ارائه می‌شود:

1. کنترل ورود آلاینده‌ها به خاک :

کنترل پساب‌های صنعتی و شهری و جلوگیری از ورود آن‌ها به اراضی کشاورزی یکی از مهم‌ترین اقدامات برای کاهش آلودگی خاک است. همچنین لازم است نظارت دقیق‌تری بر فعالیت‌های صنعتی و معدنی صورت گیرد.

2. کاهش مصرف کودهای شیمیایی آلاینده :

استفاده بی‌رویه از کودهای فسفاته و شیمیایی یکی از منابع مهم ورود فلزات سنگین به خاک است. جایگزینی این

کودها با کودهای آلی و زیستی می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلودگی داشته باشد.

3. پایش مستمر کیفیت خاک :

ایجاد سیستم پایش ملی کیفیت خاک و اندازه‌گیری دوره‌ای فلزات سنگین در مناطق کشاورزی می‌تواند به شناسایی

مناطق بحرانی و مدیریت بهتر منابع کمک کند.

4. استفاده از فناوری‌های اصلاح خاک :

فناوری‌هایی مانند گیاه‌پالایی (Phytoremediation) می‌تواند برای کاهش غلظت فلزات سنگین در خاک مورد

استفاده قرار گیرند. این روش‌ها کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست هستند. (کلاس خاکشناسی)

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که آلودگی خاک به فلزات سنگین در ایران یک چالش مهم زیست‌محیطی و

اقتصادی است که در صورت عدم مدیریت مناسب می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای سلامت انسان و پایداری

کشاورزی داشته باشد.

با توجه به ماهیت تجمعی و غیرقابل تجزیه فلزات سنگین، پیشگیری از ورود این آلاینده‌ها به خاک مهم‌تر از پاکسازی

آن‌ها پس از آلودگی است. بنابراین سیاست‌گذاری در حوزه مدیریت منابع طبیعی باید بر پایه پیشگیری، پایش مستمر و

استفاده از فناوری‌های نوین اصلاح خاک استوار باشد.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که مدیریت پایدار خاک‌های کشاورزی نه تنها یک ضرورت زیست‌محیطی، بلکه یک

الزام اقتصادی برای حفظ سرمایه طبیعی کشور محسوب می‌شود.

1. United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Global waste management outlook 2024. Nairobi, Kenya: UNEP.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Soil pollution and food security reports. Rome, Italy: FAO.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Status of the world's soil resources. Rome, Italy: FAO.
4. World Health Organization (WHO). (2023). Guidelines for soil contaminants and human health risk assessment. Geneva, Switzerland: WHO.
5. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2024). Environmental performance review. Paris, France: OECD Publishing.
6. European Environment Agency (EEA). (2023). Soil pollution in Europe. Copenhagen, Denmark: EEA.
7. European Commission. (2024). EU soil strategy for 2030. Brussels, Belgium: European Commission.
8. United Nations Development Programme (UNDP). (2023). Environmental risk and sustainable development report. New York, NY: UNDP.
9. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2023). Environmental contamination reports. Vienna, Austria: IAEA.
10. United States Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Regional screening levels for chemical contaminants. Washington, DC: EPA.

11. سازمان حفاظت محیط زیست ایران. (۱۴۰۳). گزارش وضعیت آلودگی خاک کشور. تهران: سازمان حفاظت محیط زیست.
12. سازمان برنامه و بودجه کشور. (۱۴۰۳). گزارش محیط زیست و منابع طبیعی ایران. تهران: سازمان برنامه و بودجه کشور.
13. وزارت جهاد کشاورزی ایران. (۱۴۰۳). گزارش کیفیت خاک‌های کشاورزی ایران. تهران: وزارت جهاد کشاورزی.
14. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. (۱۴۰۳). داده‌های ژئوشیمی خاک ایران. تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
15. Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Dordrecht, Netherlands: Springer.
16. Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants (4th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
17. Adriano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals (2nd ed.). New York, NY: Springer.
18. Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. Environmental Chemistry Letters, 8(3), 199–216.
19. Alloway, B. J. (2012). Soil contamination studies. Dordrecht, Netherlands: Springer.
20. Zhang, M., Wang, H., & Liu, Y. (2022). Heavy metal distribution in agricultural soils and associated ecological risks. Science of the Total Environment, 806, 150570.

21. Li, Y., Wang, Y., Gou, X., Su, Y., & Wang, G. (2021). Bioavailability and risk assessment of heavy metals in soils and crops. *Environmental Pollution*, 278, 116911.
22. Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Wang, J. (2020). Contamination features and health risks of soil heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 381, 120125.
23. Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geology Journal*, 2(3), 108–118.
24. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001.
25. Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., & Jeffrey, D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(1–4), 566–575.
26. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), & World Health Organization (WHO). (2022). Soil contamination standards and guidelines. Rome, Italy: FAO & WHO.
27. دانشگاه تهران. (۱۴۰۲). مطالعات آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران. تهران: دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
28. دانشگاه صنعتی اصفهان. (۱۴۰۲). بررسی آلودگی خاک در مناطق صنعتی ایران. اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان.
29. Environmental Science. (2023). Published studies on heavy metal contamination in soils. *Environmental Science Journal*.
30. Various Authors. (2022–2024). Studies related to heavy metals in soils in Iran and worldwide. Compilation of scientific reports and articles.