

## بررسی میزان فلزات سنگین در نمونه‌های خاک قبل از کشت و بعد از برداشت برنج در استان مازندران؛ مطالعه شاخص‌های پتانسیل ریسک اکولوژیک و آلودگی یکپارچه

محبوبه نوذری<sup>۱</sup>، عباس اسماعیلی ساری<sup>۲\*</sup>، علی ماشینیان مرادی<sup>۳</sup>، نادر بهرامی فر<sup>۲</sup>، لعبت تقوی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup>گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup>گروه علوم دریایی و شیلات، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،

ایران

<sup>۴</sup>گروه محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،

ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۶

### چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین، موضوعی جدی در سراسر جهان است. این فلزات سنگین هم از منابع طبیعی و هم از منابع انسانی به‌خصوص فعالیت‌های کشاورزی در محیط منتشر می‌شود. از این رو، در این مطالعه به بررسی میزان فلزات سنگین و شاخص‌های پتانسیل ریسک اکولوژیک و آلودگی یکپارچه در نمونه‌های خاک مراحل برداری قبل از کشت و بعد از برداشت برنج در استان مازندران پرداخته شده است. جهت هضم شیمیایی نمونه‌های خاک از مخلوط اسید نیتریک، اسید هیدروفلوئوریک و اسید پرکلریک استفاده گردید و به‌منظور سنجش میزان فلزات سنگین در نمونه‌های خاک از دستگاه ICP-MS استفاده شد. نتایج مقایسه میزان کروم، روی، نیکل و سرب در خاک قبل از کشت و بعد از برداشت برنج با استانداردهای ملی و بین‌المللی نشان می‌دهد که میزان این فلزات در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه بالاتر از حد استاندارد داخلی و بین‌المللی است. نتایج میزان شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک در نمونه‌های خاک نشان داد که میزان این شاخص در تمام ایستگاه‌ها و مراحل برداری در محدوده ریسک اکولوژیک پایین (زیر ۱۵۰) است. همچنین نتایج نشان داد که میزان شاخص PI برای عناصر آرسنیک، کروم، کادمیوم، مس، نیکل، روی و جیوه در تمام ایستگاه‌ها در نمونه‌های خاک قبل از کشت و بعد از برداشت برنج در محدوده میزان آلودگی پایین قرار دارد، اما میزان این شاخص برای عنصر سرب در تمام ایستگاه‌ها و مراحل نمونه برداری در محدوده میزان آلودگی متوسط به‌دست آمد. همچنین نتایج میزان شاخص آلودگی تجمعی (IPI) برای تمام ایستگاه‌ها و مراحل نمونه برداری در محدوده میزان آلودگی پایین به‌دست آمد. به‌طور کلی حضور فلزات سنگین در محیط خاکی و در پی آن تجمع فلزات سنگین در مواد غذایی، اثرات مضر و جبران‌ناپذیری بر جوامع بشری و امنیت غذایی دارد، بنابراین اقدامات احتیاطی بیشتری برای کاهش چنین اثراتی مورد نیاز است.

**کلید واژگان:** فلزات سنگین، ریسک اکولوژیک، آلودگی خاک، آلودگی تجمعی

## مقدمه

خاک مخزن اصلی تجمع فلزات سنگین در محیط از طریق فعالیت‌های انسانی است. بسیاری از فلزات سنگین، بر خلاف آلاینده‌های آلی، اکسیداسیون میکروبی یا شیمیایی روی آن‌ها تأثیری ندارد، بنابراین تجمع کلی آن‌ها در خاک برای مدت طولانی پس از رهاسازی ادامه می‌یابد (Wuana et al., 2011). فلزات سنگین برای سلامت انسان و محیط زیست خطرناک هستند (Keshavarzi et al., 2021; Brevik et al., 2020). وجود این فلزات در خاک بسیار نگران کننده است زیرا تمایل به تجمع زیستی و خاصیت عدم تجزیه پذیری زیستی آن‌ها باعث می‌شود که گیاهان، میکروارگانیسم‌ها و دام‌ها به مدت طولانی در معرض این فلزات قرار گرفته و همچنین آسیب احتمالی به انسان و حیوانات از طریق زنجیره غذایی وارد گردد (Colak et al., 2021; Elbehiry et al., 2020; Keshavarzi et al., 2011). این موضوع تعادل اکولوژیک خاک را مختل می‌کند، که به نوبه خود می‌تواند بر بهره‌وری مزرعه تأثیر بگذارد، کیفیت مواد غذایی (ایمنی و عرضه به بازار) را به‌علاوه مسمومیت گیاهی کاهش دهد و قابلیت استفاده از زمین را برای تولیدات کشاورزی کاهش دهد که در نهایت باعث ناامنی غذایی می‌شود (Wuana et al., 2011). قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین می‌تواند از طریق بلع مستقیم یا تعامل با خاک آلوده، با عبور فلزات از زنجیره غذایی (خاک-گیاه-انسان) و از طریق استفاده از آب آلوده رخ دهد (Steffan et al., 2018; Elbehiry et al., 2020).

خاک‌های کشاورزی دارای ارزش بسیار بالایی برای انسان‌ها هستند، با این حال فعالیت‌های انسانی تأثیر زیادی در آلودگی خاک‌های کشاورزی دارد (Ahmadi et al., 2016). آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین، موضوعی جدی در سراسر جهان است و این فلزات سنگین هم از منابع طبیعی و هم از منابع انسانی در محیط منتشر می‌شود (Keshavarzi et al., 2021). افزایش بی وقفه فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی به دلیل اعمال ناپایدار کشاورزی بر سلامت انسان

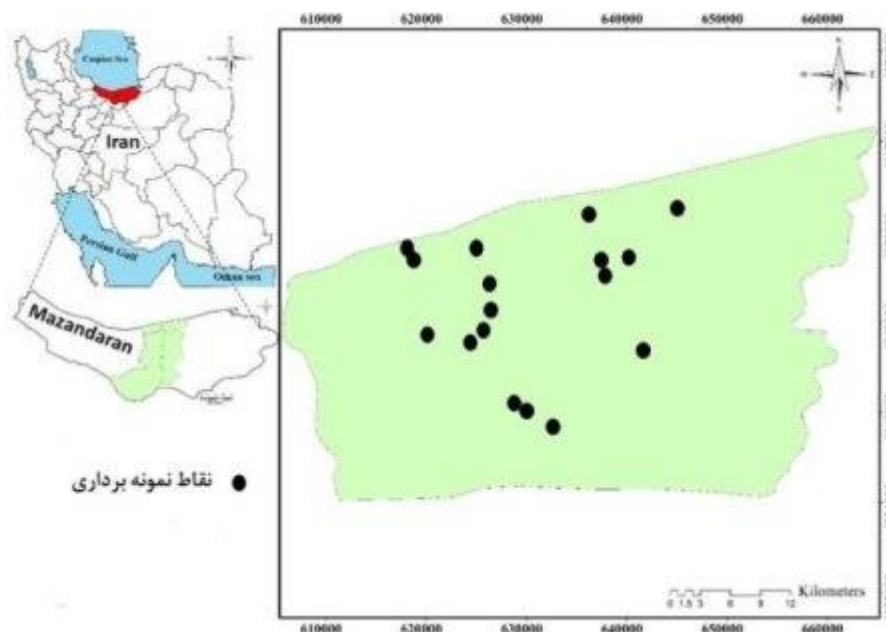
تأثیر منفی می‌گذارد. منابع اصلی آلودگی فلزات سنگین در مزارع کشاورزی شامل افزودن کودها و سموم دفع آفات، کود دامی و کمپوست نامرغوب، فعالیت‌های صنعتی و سایر فعالیت‌های انسانی است (Keshavarzi et al., 2019).

استان‌های شمالی کشور ایران از مهمترین مناطق حاصلخیز کشور محسوب می‌شوند که بخش زیاد برنج‌کاری در این مناطق انجام می‌شود. در کشت برنج، از سموم و کودهای شیمیایی مختلف استفاده می‌شود و این سموم باعث آلودگی خاک‌های کشاورزی این مناطق شده است (Kalantary et al., 2006; Shokrzadeh et al., 2017; Sharafati Chaleshtori et al., 2013). از این‌رو، در این مطالعه به بررسی میزان فلزات سنگین در نمونه‌های خاک قبل از کشت و بعد از برداشت برنج در شهرستان محمودآباد، آمل، فریدونکنار، بابل و بابلسر استان مازندران پرداخته شده است. همچنین خاک‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه از لحاظ شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک و آلودگی یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

**نقاط نمونه برداری:** در این مطالعه نمونه‌برداری از خاک قبل از کشت و بعد از برداشت برنج پنج شهرستان محمودآباد، آمل، فریدونکنار، بابل و بابلسر استان مازندران انجام شد. استان مازندران با دارا بودن اقلیم مناسب و منابع آب نسبتاً کافی، حدود ۳۷ درصد برنج کشور را تولید می‌کند که نشان‌دهنده نقش محوری این استان در تأمین برنج مصرفی داخل کشور است. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری از خاک نشان داده شده است.

**نمونه‌برداری:** تعداد ۱۷ عدد نمونه خاک در دوره‌های زمانی قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری خاک از عمق ۱۰ cm خاک صورت گرفت که لایه اصلی در بحث اکسیداسیون خاک محسوب می‌شود. از هر ایستگاه حداقل ۵ نمونه خاک به صورت ترکیبی برداشت شد. به منظور آنالیز فلزات سمی نمونه‌ها در داخل پلاستیک



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری از خاک

در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تا زمان هضم کامل در دستگاه هضم‌کننده قرار داده شد. بعد از هضم نمونه‌ها، محلول داخل آن با استفاده از کاغذ صافی، صاف شد. نمونه صاف شده به ظروف ۵۰ میلی‌لیتری منتقل گردید و به حجم رسانده شد و میزان فلزات سنگین آن به کمک دستگاه ICP-MS با مشخصات مدل HP-۴۵۰۰ اندازه‌گیری شدند (MS, 2013, D4698-92). میزان حد تشخیص دستگاه برای روی، مس، کروم، آرسنیک، جیوه، سرب، کادمیوم و نیکل به ترتیب ۴/۲۸، ۰/۲۹، ۴/۴۱، ۰/۳۲، ۱، ۰/۲۳، ۰/۳۷ و ۰/۸۸ میکروگرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. همچنین هدایت الکتریکی، مواد آلی و pH نمونه‌ها بر اساس روش‌های استاندارد آنالیز و محاسبه گردید.

**ارزیابی ریسک اکولوژیک<sup>۲</sup>:** هاکنسن برای اولین بار به منظور بررسی و ارزیابی ریسک آلودگی رسوبات و خاک به وسیله عناصر سنگین از شاخص ارزیابی ریسک اکولوژیک استفاده کرد (Hakanson, 1980). در این مطالعه نیز به منظور بررسی ریسک آلودگی خاک، شاخص سمیت و پتانسیل ریسک اکولوژیک عناصر سنگین در مناطق مورد مطالعه محاسبه شد. ضریب تجمع عناصر

قرار داده شدند و سپس نمونه‌ها در جعبه‌های حاوی یخ خشک در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های خاک بعد از انتقال به آزمایشگاه در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد تا قبل از آنالیز نگهداری گردید (Fu et al., 2015; Trinh et al., 2018).

**مواد مورد استفاده:** تمام مواد مورد استفاده شامل اسید پرکلریک ۷۰ درصد، اسید نیتریک ۶۵ درصد و اسید هیدروفلوئوریک در مطالعه حاضر از شرکت مرک آلمان و شارلو تهیه گردید. آب مورد استفاده در تمام مراحل مطالعه از آب دیونیزه ( $EC < 0.05 \mu S.m^{-1}$ ) استفاده شد.

**سنجش فلزات سنگین در نمونه‌های خاک به روش ASTM<sup>۱</sup>:** نمونه‌های خاک به روش ASTM به شماره D ۳۹۷۶ صورت گرفت. نمونه‌ها در ابتدا در دستگاه خشک کن انجمادی، خشک و سپس با الک مش ۱۰۰ (۱۵۰ میکرون) تمامی نمونه‌ها الک شدند. در ادامه، ۰/۵ گرم نمونه با ۶ میلی‌لیتر اسید نیتریک، ۶ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوئوریک و ۲ میلی‌لیتر اسید پرکلریک در داخل لوله‌های تفلونی ریخته شده و سپس در دستگاه هضم‌کننده با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه قرار داده شد. در انتها نمونه‌ها

<sup>2</sup>Ecological Risk Assessment

<sup>1</sup>American Society for Testing and Materials

جدول ۱- طبقه‌بندی ریسک اکولوژیک (Bissen et al., 2003)

طبقه‌بندی ریسک اکولوژیک	
IR < ۱۵۰	ریسک اکولوژیک پایین
۱۵۰ ≤ IR < ۳۰۰	ریسک اکولوژیک متوسط
۳۰۰ ≤ IR < ۶۰۰	ریسک اکولوژیک بالا
IR ≥ ۶۰۰	ریسک اکولوژیک خیلی بالا

می‌باشد (Ravankhah et al., 2016). در این پژوهش برای عناصر سرب، نیکل، مس، جیوه، روی، آرسنیک، کادمیم و کروم به ترتیب ۵، ۵، ۴۰، ۱، ۱۰، ۳۰ و ۲ مورد استفاده قرار گرفت (Hakanson, 1980).

رابطه ۳

$$RI = \sum_{i=1}^n Er$$

RI: شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک برای کل عناصر سنگین که حساسیت ایستگاه‌های مورد مطالعه را به آلودگی عناصر سنگین و پتانسیل خطر اکولوژیک و واکنش محیط را نشان می‌دهد (Rostami et al., 2021). در جدول ۱ کلاس‌های استاندارد شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک آورده شده است.

**شاخص آلودگی یکپارچه IPI:** شاخص آلودگی (PI) و شاخص آلودگی یکپارچه (IPI) معمولاً برای ارزیابی کیفیت محیطی استفاده می‌شود همچنین برای ارزیابی میزان آلودگی خاک پیشنهاد شده است. که در این شاخص PI به عنوان نسبت غلظت فلزات سنگین (C<sub>i</sub>) به میانگین غلظت پس زمینه (S<sub>i</sub>) تعریف می‌شود که براساس رابطه ۴ به دست می‌آید (Chen et al., 2005; Rostami et al., 2021):

رابطه ۴

$$PI = \frac{C_i}{S_i}$$

همچنین شاخص آلودگی یکپارچه IPI به عنوان مقادیر میانگین برای همه مقادیر PI تمام فلزات در نظر گرفته شده تعریف می‌شود. مقادیر PI و IPI در جدول ۲ ارائه شده است:

سنگین در خاک هر منطقه می‌تواند شرایط واقعی آلودگی و برخی اطلاعات بار آلودگی عناصر سنگین، ناشی از فرآیندهای کشاورزی و صنعتی شدن را نشان دهد. شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک برای ارزیابی آلودگی عناصر سنگین در خاک همچنین مربوط دانستن تأثیرات محیطی با سمیت‌زایی آن‌ها توسط رابطه‌های ارائه شده تعیین شد (Lu et al., 2015).

رابطه ۱

$$CF = \frac{C_i}{C_{ref}}$$

CF<sup>۳</sup>: شاخص آلودگی یک فلز سنگین. این شاخص کیفیت خاک ایستگاه‌های مورد مطالعه را بررسی می‌کند و منعکس‌کننده آلودگی یک عنصر در شاخص‌های محیطی می‌باشد.

C<sub>i</sub>: میانگین مقدار یک عنصر در نمونه خاک.

C<sub>ref</sub><sup>۴</sup>: مقادیر معیار ارزیابی و مرجع (میلی‌گرم بر کیلوگرم) که به ترتیب برای فلزات آرسنیک، کادمیم، کروم، مس، سرب، نیکل، روی و جیوه برابر با ۸/۶، ۰/۳، ۹۰، ۴۵، ۱۲/۵، ۶۸، ۹۵ و ۰/۰۸ گرفته شد.

رابطه ۳

$$Er = Tr \times CF$$

Er<sup>۵</sup>: شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک برای یک عنصر سنگین.

CF: از رابطه ۱ به دست می‌آید.

Tr: شاخص پاسخ سمیت یک عنصر سنگین (منبع) که نشان‌دهنده سطوح سمیت و حساسیت موجود زنده به آن

<sup>5</sup>Single-potential ecological risk coefficient

<sup>3</sup>Contamination Factor

<sup>4</sup>Background value

جدول ۲- طبقه بندی مقادیر PI و IPI (Boulaiche et al., 2019)

شاخص IPI		شاخص PI	
مقدار IPI	میزان آلودگی	مقدار PI	میزان آلودگی
$IPI \leq 1$	آلودگی پایین	$PI \leq 1$	آلودگی پایین
$1 < IPI \leq 2$	آلودگی متوسط	$1 < PI \leq 3$	آلودگی متوسط
$2 < IPI \leq 5$	آلودگی بالا	$PI > 3$	آلودگی خیلی بالا
$IPI > 5$	آلودگی خیلی بالا		

زیست ایران (DOE) و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) نشان داد که میزان کروم در تمام ایستگاه‌ها بالاتر از حد استاندارد این دو سازمان می‌باشد. مقایسه میزان روی نیز با استاندارد خاک سازمان محیط زیست ایران (DOE) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) نشان داد که میزان روی در ایستگاه‌های مورد مطالعه از میزان استاندارد سازمان محیط زیست ایران کمتر ولی از میزان استاندارد سازمان بهداشت جهانی بیشتر می‌باشد. مقایسه میزان نیکل همچنین با استاندارد خاک سازمان محیط زیست ایران (DOE)، سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) نشان داد که میزان نیکل در ایستگاه‌های مورد مطالعه از میزان استاندارد سازمان محیط زیست ایران کمتر ولی از میزان استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا و سازمان بهداشت جهانی در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه بالاتر می‌باشد. در مورد عنصر سرب، مقدار این عنصر از میزان سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا بالاتر ولی از میزان استاندارد خاک سازمان محیط زیست ایران (DOE) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) کمتر اندازه‌گیری شد. در خصوص دیگر عناصر شامل مس، آرسنیک، کادمیوم و جیوه میزان فلزات اندازه‌گیری شده کمتر از میزان استانداردهای مورد بررسی محاسبه شد.

در جدول ۴، نتایج مقادیر فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک بعد از برداشت برنج گزارش شده است. همان‌طور که در نتایج نمونه‌های خاک بعد از برداشت برنج نشان می‌دهد، میزان کروم در ایستگاه‌های مورد مطالعه بین

روش‌های آماری: برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این تحقیق از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ و Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد. در ابتدا برای تعیین نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیروویلک استفاده شد. پس از تأیید نتایج این آزمون مبنی بر نرمال بودن داده‌ها ( $sig > 0.05$ ) در مرحله بعد، برای مقایسه میزان فلزات با استاندارد تعیین شده از آزمون تی تک نمونه‌ای استفاده شد. همچنین به منظور بررسی همبستگی‌ها از آزمون همبستگی پیرسون استفاده گردید. سطح معنی‌داری در این مطالعه در سطح ۱ درصد و ۵ درصد بررسی شد.

## نتایج و بحث

**مقادیر میزان فلزات در خاک در مراحل مختلف کشت:**  
 آلودگی‌های فلزات سنگین در محیط‌های خاکی همچنان در کانون مطالعات محیط زیستی متعدد بوده و توجه زیادی را در سراسر جهان به خود جلب می‌کند. این امر به عدم زیست تخریب‌پذیری و ماندگاری فلزات سنگین در خاک نسبت داده می‌شود (Adriano, 2001; Qin et al., 2021). نتایج مقادیر فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت و بعد از برداشت برنج در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. براساس نتایج، میزان کروم در ایستگاه‌های مورد مطالعه بین ۳۵/۰۱ تا ۵۳/۷۷، مس بین ۱۶/۱۲ تا ۳۷/۹۶، روی بین ۳۹/۵۱ تا ۱۱۸/۰۵، نیکل بین ۳۲/۶۲ تا ۵۳/۷۶، آرسنیک بین ۵/۲۲ تا ۱۱/۹۲، کادمیوم بین ۰/۰۷ تا ۰/۲۵، جیوه بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ و سرب بین ۹/۹۹ تا ۲۶/۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. همچنین نتایج مقایسه میزان کروم استاندارد خاک سازمان محیط

جدول ۳- میزان فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cr (mg/kg)	ایستگاه
۲۳/۱۰	۰/۰۳۲	۰/۱۳	۷/۵۴	۵۰/۹۹	۱۱۸/۰۵	۳۲/۳۵	۵۳/۷۷	۱
۱۱/۲۹	۰/۰۲۳	۰/۰۹	۱۱/۹۲	۳۹/۰۹	۶۳/۶۳	۲۶/۶۵	۴۶/۶۴	۲
۱۷/۳۳	۰/۰۱۰	۰/۱۶	۶/۶۷	۴۲/۵۹	۱۰۷/۵۱	۳۷/۹۶	۴۱/۹۷	۳
۱۰/۱۹	۰/۰۱۲	۰/۱۱	۷/۴۹	۴۰/۰۶	۸۹/۷۸	۲۶/۹۲	۴۴/۴۹	۴
۱۵/۰۸	۰/۰۲۱	۰/۱۰	۸/۰۵	۳۲/۶۲	۳۹/۵۱	۱۹/۰۱	۳۵/۰۱	۵
۱۴/۴۹	۰/۰۲۵	۰/۱۰	۸/۵۹	۴۴/۵۲	۵۵/۱۱	۲۵/۵۵	۴۵/۶۶	۶
۹/۹۹	۰/۰۳۳	۰/۱۱	۶/۹۱	۳۸/۷۹	۷۳/۵۱	۱۶/۱۲	۵۲/۲۱	۷
۱۳/۸۹	۰/۰۲۲	۰/۰۷	۹/۴۸	۴۶/۳۹	۵۱/۹۸	۲۳/۰۶	۳۹/۷۵	۸
۲۶/۷۲	۰/۰۳۵	۰/۱۲	۷/۶۸	۴۹/۸۷	۹۰/۴۵	۲۷/۹۸	۵۳/۰۶	۹
۱۲/۶۶	۰/۰۳۳	۰/۱۴	۷/۸۵	۵۳/۷۶	۸۹/۱۳	۳۰/۳۴	۵۳/۰۱	۱۰
۱۸/۴۷	۰/۰۲۵	۰/۱۲	۵/۲۲	۳۸/۱۲	۸۴/۲۲	۲۷/۴۷	۴۸/۰۹	۱۱
۱۷/۵۱	۰/۰۲۱	۰/۱۲	۱۰/۹۸	۵۲/۷۸	۶۹/۱۳	۲۴/۵۶	۴۴/۳۶	۱۲
۱۶/۱۶	۰/۰۱۹	۰/۱۱	۵/۳۵	۴۴/۳۱	۶۶/۸۶	۲۶/۲۷	۴۹/۷۹	۱۳
۱۵/۸۷	۰/۰۲۲	۰/۱۰	۷/۲۸	۴۴/۱۸	۷۴/۶۶	۲۵/۰۵	۵۰/۰۶	۱۴
۱۵/۶۶	۰/۰۲۶	۰/۲۵	۹/۱۶	۴۰/۰۱	۱۰۷/۶۳	۲۶/۵۷	۵۳/۰۲	۱۵
۷۵	۷	۵	۴۰	۱۱۰	۵۰۰	۲۰۰	۲	DOE
۱۰	-	-	-	۴۰	-	۳۰	۱۰	EPA
۸۵	-	۰/۳	-	۳۵	۵۰	۳۰	-	WHO

و United States Environmental Protection Agency :EPA ؛Department of Environment Islamic Republic of Iran :DOE  
World Health Organization :WHO

ایستگاه‌های مورد مطالعه در خاک بعد از برداشت بالاتر می‌باشد. در مورد عنصر سرب میزان این عنصر از میزان سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا بالاتر ولی از میزان استاندارد خاک سازمان محیط زیست ایران و سازمان بهداشت جهانی کمتر اندازه‌گیری شد. در رابطه با دیگر عناصر شامل مس، آرسنیک، کادمیوم و جیوه میزان فلزات اندازه‌گیری شده در خاک بعد از برداشت برنج مشابه خاک قبل از کشت برنج، کمتر از میزان استانداردهای سازمان محیط زیست ایران، سازمان بهداشت جهانی و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا اندازه‌گیری شد.

خاک کشاورزی در نتیجه تخلیه و انتشار کنترل نشده از مناطق صنعتی که به سرعت در حال گسترش هستند، استخراج معادن، استفاده نادرست از کودهای شیمیایی و کاربرد زمین پساب‌های صنعتی و زباله‌های فاضلاب به‌طور گسترده‌ای آلوده شده است (Zeng et al., 2008; Lin et al., 2021). آلودگی زمین‌های کشاورزی به فلزات سنگین،

۴۰/۷۴ تا ۵۴/۳۷، مس بین ۱۸/۶۰ تا ۳۴/۹۸، روی بین ۵۶/۷۳ تا ۱۱۶/۵۷، نیکل بین ۳۸/۰۷ تا ۵۵/۵۲، آرسنیک بین ۶/۰۹ تا ۱۲/۸۲، کادمیوم بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۹، جیوه بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۶ و سرب بین ۱۲/۳۰ تا ۲۹/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. نتایج مقایسه میزان کروم در خاک بعد از برداشت برنج نیز مانند خاک قبل از کشت برنج نشان داد که میزان کروم در تمام ایستگاه‌ها بالاتر از حد استاندارد خاک سازمان محیط زیست ایران و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا می‌باشد. مقایسه میزان روی نیز با استاندارد نشان داد که میزان روی در ایستگاه‌های مورد مطالعه از میزان استاندارد سازمان محیط زیست ایران کمتر ولی از میزان استاندارد سازمان بهداشت جهانی بیشتر می‌باشد. مقایسه میزان نیکل نیز نشان داد که میزان نیکل در ایستگاه‌های مورد مطالعه از میزان استاندارد سازمان محیط زیست ایران کمتر ولی از میزان استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا و سازمان بهداشت جهانی در بیشتر

جدول ۴- میزان فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های خاک بعد از برداشت برنج (میلی گرم بر کیلوگرم)

Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cr (mg/kg)	ایستگاه
۲۹/۲۶	۰/۰۵۲	۰/۱۵	۱۲/۷۷	۴۸/۴۴	۱۰۵/۴۶	۳۱/۷۱	۵۴/۳۱	۱
۱۴/۹۸	۰/۰۴۲	۰/۱۰	۸/۸۱	۴۰/۴۲	۶۲/۳۵	۲۵/۵۴	۴۶/۱۵	۲
۲۰/۳۳	۰/۰۱۱	۰/۱۰	۸/۶۷	۴۱/۳۷	۱۰۷/۰۱	۳۴/۹۸	۴۱/۹۸	۳
۱۳/۴۰	۰/۰۱۵	۰/۰۹	۸/۵۱	۴۲/۷۵	۱۰۱/۳۱	۲۶/۱۶	۴۰/۷۴	۴
۲۳/۵۷	۰/۰۲۹	۰/۱۲	۱۲/۸۲	۵۵/۰۹	۶۵/۶۱	۲۷/۵۵	۴۸/۲۰	۵
۱۹/۰۱	۰/۰۳۵	۰/۱۳	۱۲/۸۲	۵۴/۸۶	۵۶/۷۳	۲۸/۶۱	۴۸/۳۹	۶
۱۲/۳۰	۰/۰۵۲	۰/۱۵	۹/۱۲	۳۸/۰۷	۸۱/۳۷	۱۸/۶۰	۴۸/۳۶	۷
۲۱/۹۸	۰/۰۲۸	۰/۱۳	۱۰/۲۴	۴۹/۲۵	۷۱/۹۰	۲۹/۶۷	۵۱/۵۹	۸
۲۹/۵۲	۰/۰۴۹	۰/۱۷	۹/۲۹	۵۲/۲۶	۹۶/۷۱	۳۰/۷۸	۵۴/۳۷	۹
۲۹/۰۲	۰/۰۵۷	۰/۱۷	۹/۸۵	۵۵/۵۲	۹۵/۶۳	۳۲/۱۴	۵۳/۸۵	۱۰
۱۵/۳۴	۰/۰۳۱	۰/۰۸	۱۰/۶۷	۳۹/۷۴	۱۰۴/۴۹	۲۴/۷۵	۴۳/۰۱	۱۱
۱۸/۲۱	۰/۰۳۴	۰/۱۴	۶/۶۵	۴۴/۰۳	۸۷/۰۱	۲۸/۳۷	۴۵/۲۳	۱۲
۲۲/۲۹	۰/۰۴۱	۰/۱۱	۶/۷۳	۴۴/۶۰	۶۰/۶۳	۲۵/۵۳	۴۵/۰۲	۱۳
۲۵/۱۵	۰/۰۳۹	۰/۱۱	۶/۰۹	۴۷/۷۲	۷۸/۷۰	۲۶/۴۱	۴۵/۱۲	۱۴
۱۴/۲۲	۰/۰۴۵	۰/۲۹	۷/۲۸	۴۵/۰۳	۱۱۶/۵۷	۲۲/۹۷	۴۶/۲۰	۱۵
۱۵/۳۴	۰/۰۳۸	۰/۱۱	۹/۱۰	۴۸/۰۹	۷۰/۷۱	۲۶/۹۶	۴۷/۶۱	۱۶
۱۵/۱۰	۰/۰۲۲	۰/۱۲	۱۰/۱۴	۵۴/۲۵	۸۰/۶۷	۲۷/۷۶	۴۱/۸۶	۱۷
۷۵	۷	۵	۴۰	۱۱۰	۵۰۰	۲۰۰	۲	DOE
۱۰	-	-	-	۴۰	-	۳۰	۱۰	EPA
۸۵	-	۰/۳	-	۳۵	۵۰	۳۰	-	WHO

فسفات کلسیم، سولفات آهن و سولفات مس) و در آفت‌کش‌ها (دو علف‌کش و یک چارچ‌کش) که در مزارع برنج در شمال پارک طبیعی آلبوفا (والنسیا، اسپانیا) استفاده شدند؛ بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که کود سوپر فسفات، حاوی بیشترین غلظت Cd، Co، Cu و Zn به‌عنوان ناخالصی است. کودهای سولفات مس و سولفات آهن دارای بیشترین غلظت سرب هستند و تنها کودهایی هستند که نیکل در آن‌ها شناسایی شده است. سه آفت‌کش مورد تجزیه و تحلیل نشان می‌دهند که محتوای Cd مشابهی دارند و بالاترین سطوح آهن، منگنز، روی، سرب و نیکل در علف‌کش‌ها یافت می‌شود (Gimeno-Garcia *et al.*, 1996).

نتایج همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج: به‌منظور بررسی روابط و همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج و بعد از

تهدیدی بالقوه برای تولید محصولات ایمن در ایران و سراسر جهان است (Cheng *et al.*, 2004; Ihedioha *et al.*, 2021). میزان فلزات در خاک زمین‌های کشاورزی برنج کاری شده در استان ژجیانگ از چین نشان داد که میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک به‌جز نیکل بیشتر از مقادیر پس‌زمینه فلزات در خاک بودند. با این حال، میزان فلزات به‌جز کادمیوم کمتر از مقادیر استاندارد فلزات در خاک چین بودند (Zhaho *et al.*, 2010). در مطالعه‌ی آلودگی فلزات سنگین در سیستم‌های خاک-برنج در مقیاس منطقه‌ای در شرق چین نشان داد که میانگین غلظت خاک فلزات سنگین ۰/۳۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم برای کادمیوم، ۴۷/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در کیلوگرم برای مس، ۳۱/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم در کیلوگرم برای نیکل و ۱۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم در کیلوگرم برای روی اندازه‌گیری شد (Li *et al.*, 2014). در مطالعه‌ی غلظت‌های کادمیوم، کبالت، مس، نیکل، سرب، روی، آهن و منگنز در کودهای معدنی مختلف (اوره، سوپر

جدول ۵- همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج

	EC	pH	OM	Cr	Cu	Zn	Ni	AS	Cd	Hg	Pb
EC	۱										
pH	۰/۳۰۳	۱									
OM	۰/۴۷۳	-۰/۲۰۶	۱								
Cr	۰/۲۶۶	۰/۱۴۱	۰/۲۲۴	۱							
Cu	۰/۴۷۳	-۰/۰۶۵	۰/۴۵۸	۰/۱۹۳	۱						
Zn	۰/۵۵۸*	۰/۱۷۱	۰/۱۶۱	۰/۶۱۱*	۰/۷۰۱**	۱					
Ni	۰/۳۳۴	-۰/۳۱۱	۰/۳۸۷	۰/۴۲۵	۰/۴۰۶	۰/۳۱۷	۱				
AS	-۰/۱۴۷	-۰/۲۶۴	-۰/۰۳۰	-۰/۲۱۵	-۰/۱۵۳	-۰/۲۶۷	۰/۱۵۵	۱			
Cd	-۰/۰۳۶	۰/۱۷۱	-۰/۱۲۳	۰/۴۱۶	۰/۳۷۶	۰/۶۹۱**	۰/۰۱۴	-۰/۰۶۹	۱		
Hg	۰/۱۵۵	۰/۰۳۹	۰/۱۱۲	۰/۶۵۶**	-۰/۲۳۴	۰/۱۲۲	۰/۳۵۹	۰/۰۲۸	۰/۰۶۸	۱	
Pb	۰/۵۱۶*	-۰/۱۴۶	۰/۳۴۹	۰/۲۷۵	۰/۴۱۴	۰/۴۰۰	۰/۴۱۸	-۰/۲۰۸	۰/۱۶۹	۰/۳۲۲	۱

\*معنی‌داری در سطح ۵ درصد؛ \*\*معنی‌داری در سطح یک درصد؛ بدون معنی‌داری

برداشت برنج از آزمون همبستگی پیرسون استفاده گردید. نتایج این آزمون برای بررسی همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت در جدول ۵ نشان داد که بین میزان روی و مس، کادمیوم و روی و جیوه و کروم همبستگی معنی‌دار مثبت در سطح یک درصد وجود دارد. همچنین بین هدایت الکتریکی با روی و سرب و کروم و روی با یکدیگر همبستگی معنی‌دار مثبت در سطح پنج درصد مشاهده شد. در جدول ۶ نتایج این آزمون برای بررسی همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه در نمونه خاک بعد از برداشت برنج نشان داد که بین میزان جیوه و کروم، سرب و کروم و سرب و مس همبستگی معنی‌دار مثبت در سطح یک درصد وجود دارد. همچنین بین سرب و نیکل و جیوه و کادمیوم با یکدیگر همبستگی معنی‌دار مثبت در سطح پنج درصد مشاهده شد. در بسیاری از مطالعات گزارش شده است که غلظت فلزات سنگین و پارامترهای زمین شیمیایی خاک ارتباط وجود دارد (Kotoky et al., 2003; Zarcinas et al., 2004) و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که غلظت‌های Zn، Cu، Pb و Ni رابطه معنی‌داری با pH و EC دارند. روابط فلزات در خاک و آب می‌تواند تحت تأثیر pH قرار گیرد. pH کمتر حلالیت فلزات را افزایش داده و در نتیجه باعث افزایش غلظت فلزات سنیگین می‌گردد (Colombani et al., 2020).

در این مطالعه، همبستگی مثبت معنی‌داری در سطح یک درصد، بین EC با Pb، Cd و Cr و همچنین همبستگی منفی معنی‌داری در سطح یک درصد بین pH و Pb وجود دارد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که از یک سو استفاده از کودهای شیمیایی سوپر فسفات که حاوی بیشترین غلظت از فلزات Cd، Co، Cu و Zn، به‌عنوان ناخالصی هستند و نیز استفاده از کودهای سولفات مس و سولفات آهن که دارای بیشترین غلظت سرب بوده و تنها کودهای حاوی فلز نیکل هستند و از سوی دیگر استفاده از آفت‌کش‌هایی که مقادیر زیادی از فلزات کادمیوم، آهن، منگنز، روی، سرب و نیکل در خود دارند؛ می‌تواند علت همبستگی پارامترهای مختلف فلزات و سموم در نمونه‌های خاک و برنج مورد مطالعه باشد (Gimeno-Garcia et al., 1996).

نتایج میزان شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج: میزان شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد میزان این شاخص در تمام ایستگاه‌ها مورد مطالعه زیر ۱۵۰ اندازه‌گیری شد. براساس نتایج میزان شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک در نمونه‌های خاک نشان داد که در تمام



جدول ۶- همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه در نمونه‌های خاک بعد از برداشت برنج

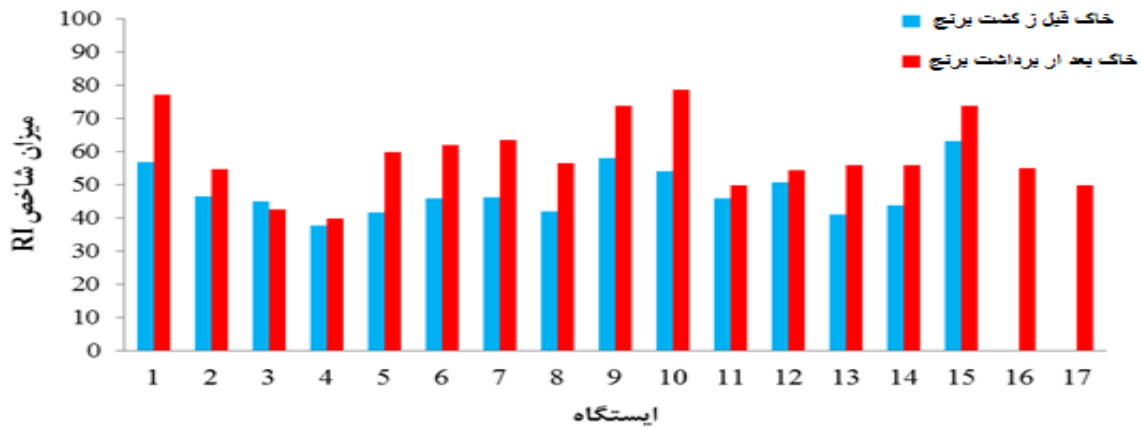
	EC	pH	OM	Cr	Cu	Zn	Ni	AS	Cd	Hg	Pb	Chlorpyrifos
EC	۱											
pH	۰/۰۵۸	۱										
OM	۰/۲۶۷	-۰/۴۵۳	۱									
Cr	۰/۰۱۵	-۰/۱۵۴	۰/۳۱۸	۱								
Cu	۰/۳۵۹	-۰/۲۴۹	۰/۲۸۰	۰/۲۸۸	۱							
Zn	۰/۴۶۶	-۰/۰۰۴	-۰/۲۶۳	-۰/۰۳۵	۰/۱۷۶	۱						
Ni	-۰/۲۶۷	-۰/۲۱۸	۰/۰۲۵	۰/۴۷۴	۰/۴۶۸	-۰/۲۵۷	۱					
AS	-۰/۰۷۳	-۰/۴۵۷	۰/۲۹۹	۰/۴۰۱	۰/۲۶۸	-۰/۱۲۶	۰/۴۷۲	۱				
Cd	-۰/۰۵۲	-۰/۰۴۹	-۰/۱۸۸	۰/۳۹۷	-۰/۱۳۸	۰/۴۰۹	۰/۱۸۲	-۰/۱۲۲	۱			
Hg	-۰/۰۱۴	۰/۰۶۲	۰/۲۱۹	۰/۷۴۳**	-۰/۱۹۳	۰/۰۳۲	۰/۱۶۱	-۰/۰۲۴	۰/۵۷۵*	۱		
Pb	۰/۲۴۱	-۰/۰۳۹	۰/۳۶۹	۰/۶۹۳**	۰/۶۶۳**	۰/۰۵۴	۰/۵۶۴*	۰/۲۱۳	۰/۰۹۶	۰/۴۰۶	۱	
Chlorpyrifos	-۰/۰۸۸	-۰/۲۰۲	-۰/۱۳۸	-۰/۳۱۳	۰/۳۵۱	-۰/۱۴۵	۰/۴۴۳	۰/۰۴۶	۰/۰۷۶	۰/۱۳۷	-۰/۲۵۸	۱

\*معنی‌داری در سطح ۵ درصد ؛ \*\*معنی‌داری در سطح یک درصد ؛ بدون معنی‌داری.

جدول‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج میزان شاخص PI و شاخص آلودگی تجمعی (IPI) برای هر ایستگاه مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج در جدول ۷ نشان می‌دهد میزان این شاخص در بیشتر ایستگاه‌ها در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج در محدوده میزان آلودگی پایین برای شاخص‌های PI و IPI محاسبه شد، فقط برای عنصر سرب در ایستگاه‌های ۱، ۳، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ و برای عنصر روی در ایستگاه‌های ۱ و ۳ و ۱۵ در محدوده میزان آلودگی متوسط برای شاخص PI محاسبه شد. نتایج میزان شاخص PI و شاخص آلودگی تجمعی (IPI) برای هر ایستگاه مورد مطالعه در نمونه‌های خاک بعد از برداشت برنج در جدول ۸ نشان می‌دهد که میزان این شاخص در بیشتر ایستگاه‌ها در نمونه‌های خاک بعد از برداشت برنج در محدوده میزان آلودگی پایین برای شاخص‌های PI و IPI محاسبه شد، فقط برای عنصر سرب در ایستگاه‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ و برای عنصر روی در ایستگاه‌های ۱، ۳، ۴، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۵ در محدوده میزان آلودگی متوسط برای شاخص PI محاسبه شد. Mirzaei و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی میزان شاخص PI و شاخص آلودگی تجمعی (IPI) در خاک‌های سطحی

ایستگاه‌های مورد مطالعه در خاک قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج میزان این شاخص در محدوده ریسک اکولوژیک پایین محاسبه شد. در مطالعه Ren و همکاران (۲۰۲۱)، مجموع ارزش‌های خطر اکولوژیک (RI) از آلودگی یکپارچه فلزات سنگین در محدوده ۶۰ تا ۶۲۴ با میانگین ۱۷۴ به دست آوردند که نشان‌دهنده خطر کلی اکولوژیک متوسط است، با در نظر گرفتن سهم هر یک از فلزات سنگین در خطرات محیط زیستی، ۰/۴۹/۷ و ۰/۲۷/۰ از خطر را می‌توان به ترتیب به آلودگی جیوه و کادمیوم نسبت داد که علت آن عوامل واکنش سمی بالا است (Ren et al., 2021).

**نتایج میزان شاخص PI و شاخص آلودگی تجمعی (IPI) در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج:** آلودگی خاک اغلب با مقایسه غلظت فلزات با دستورالعمل‌های محیط زیستی مرتبط یا با کمی کردن یک عامل تجمع (شاخص‌های آلودگی، PI) در مقایسه با مقادیر پس‌زمینه مربوطه ارزیابی می‌شود (Sun et al., 2010). میزان شاخص PI و شاخص آلودگی تجمعی (IPI) برای هر ایستگاه مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج در



شکل ۲- میزان شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج

جدول ۷- میزان شاخص آلودگی (PI) و شاخص آلودگی تجمعی (IPI) برای هر ایستگاه مورد مطالعه در نمونه‌های خاک قبل از کشت برنج

ایستگاه	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn	Hg	IPI
۱	۰/۵۸	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۷۲	۱/۸۵	۰/۷۵	۱/۲۴	۰/۴۰	۰/۸۲
۲	۰/۹۲	۰/۳۰	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۹۰	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۲۹	۰/۶۰
۳	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۸۴	۱/۳۹	۰/۶۳	۱/۱۳	۰/۱۳	۰/۷۰
۴	۰/۵۸	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۶۰	۰/۸۲	۰/۵۹	۰/۹۵	۰/۱۵	۰/۵۷
۵	۰/۶۲	۰/۳۳	۰/۳۹	۰/۴۲	۱/۲۱	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۲۶	۰/۵۲
۶	۰/۶۶	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۵۷	۱/۱۶	۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۳۱	۰/۶۰
۷	۰/۵۳	۰/۳۷	۰/۵۸	۰/۳۶	۰/۸۰	۰/۵۷	۰/۷۷	۰/۴۱	۰/۵۵
۸	۰/۷۳	۰/۲۳	۰/۴۴	۰/۵۱	۱/۱۱	۰/۶۸	۰/۵۵	۰/۲۸	۰/۵۷
۹	۰/۵۹	۰/۴۰	۰/۵۹	۰/۶۲	۲/۱۴	۰/۷۳	۰/۹۵	۰/۴۴	۰/۸۱
۱۰	۰/۶۰	۰/۴۷	۰/۵۹	۰/۶۷	۱/۰۱	۰/۷۹	۰/۹۴	۰/۴۱	۰/۶۹
۱۱	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۵۳	۰/۶۱	۱/۴۸	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۳۱	۰/۶۵
۱۲	۰/۸۴	۰/۴۰	۰/۴۹	۰/۵۵	۱/۴۰	۰/۷۸	۰/۷۳	۰/۲۶	۰/۶۸
۱۳	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۵۸	۱/۲۹	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۲۴	۰/۶۰
۱۴	۰/۵۶	۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۵۶	۱/۲۷	۰/۶۵	۰/۷۹	۰/۲۸	۰/۶۲
۱۵	۰/۷۰	۰/۸۳	۰/۵۹	۰/۵۹	۱/۲۵	۰/۵۹	۱/۱۳	۰/۳۳	۰/۷۵

\* محدوده آلودگی متوسط؛ بدون ستاره: محدوده آلودگی پایین.

استان مازندران بالاترین سطح تولید برنج را در کشور به خود اختصاص داده است. در کشت برنج از سموم و کودهای شیمیایی مختلف استفاده می‌شود و این سموم باعث آلودگی خاک‌های کشاورزی این مناطق شده است. نتایج محاسبه میزان شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک در نمونه‌های خاک در این تحقیق، نشان داد که در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه در خاک قبل از کشت برنج و بعد از برداشت برنج میزان شاخص مذکور در محدوده ریسک اکولوژیک پایین قرار دارد. ولی با توجه به نتایج به دست آمده، حضور فلزات

استان گلستان پرداختند. نتایج نشان داد که کیفیت خاک نمونه‌ها در حد متوسط اندازه‌گیری شد، آن‌ها بیان کردند علت آن، افزودن فلزات از منابع انسانی است، همچنین گزارش کردند منابع اصلی آلودگی فلزات کودهای شیمیایی و سموم هستند.

### نتیجه‌گیری

برنج پس از گندم، مهم‌ترین محصول کشاورزی بوده و نقش بسیار مهمی در تغذیه مردم جهان و نیز کشور ایران دارد.

جدول ۸- میزان شاخص آلودگی (PI) و شاخص آلودگی تجمعی (IPI) برای هر ایستگاه مورد مطالعه در نمونه‌های خاک بعد از برداشت برنج

ایستگاه	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn	Hg	IPI
۱	۰/۹۸	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۷۰	۲/۳۴	۰/۷۱	۱/۱۱	۰/۶۵	۰/۹۵
۲	۰/۶۸	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۵۷	۱/۲۰	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۵۳	۰/۶۳
۳	۰/۶۷	۰/۳۳	۰/۴۷	۰/۷۸	۱/۶۳	۰/۶۱	۱/۱۳	۰/۱۴	۰/۷۲
۴	۰/۶۵	۰/۳۰	۰/۴۵	۰/۵۸	۱/۰۷	۰/۶۳	۱/۰۷	۰/۱۹	۰/۶۲
۵	۰/۹۹	۰/۴۰	۰/۵۴	۰/۶۱	۱/۸۹	۰/۸۱	۰/۶۹	۰/۳۶	۰/۷۹
۶	۰/۹۹	۰/۴۳	۰/۵۴	۰/۶۴	۱/۵۲	۰/۸۱	۰/۶۰	۰/۴۴	۰/۷۴
۷	۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۵۴	۰/۴۱	۰/۹۸	۰/۵۶	۰/۸۶	۰/۶۵	۰/۶۵
۸	۰/۷۹	۰/۴۳	۰/۵۷	۰/۶۶	۱/۷۶	۰/۷۲	۰/۷۶	۰/۳۵	۰/۷۶
۹	۰/۷۱	۰/۵۷	۰/۶۰	۰/۶۸	۲/۳۶	۰/۷۷	۱/۰۲	۰/۶۱	۰/۹۲
۱۰	۰/۷۶	۰/۵۷	۰/۶۰	۰/۷۱	۲/۳۲	۰/۸۲	۱/۰۱	۰/۷۱	۰/۹۴
۱۱	۰/۸۲	۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۵۵	۱/۲۳	۰/۵۸	۱/۱۰	۰/۳۹	۰/۶۸
۱۲	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۵۰	۰/۶۳	۱/۴۶	۰/۶۵	۰/۹۲	۰/۴۳	۰/۶۹
۱۳	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۵۰	۰/۵۷	۱/۷۸	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۵۱	۰/۶۹
۱۴	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۵۰	۰/۵۹	۲/۰۱	۰/۷۰	۰/۸۳	۰/۴۹	۰/۷۴
۱۵	۰/۵۶	۰/۹۷	۰/۵۱	۰/۵۱	۱/۱۴	۰/۶۶	۱/۲۳	۰/۵۶	۰/۷۷
۱۶	۰/۷۰	۰/۳۷	۰/۵۳	۰/۶۰	۱/۲۳	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۴۸	۰/۶۷
۱۷	۰/۷۸	۰/۴۰	۰/۴۷	۰/۶۲	۱/۲۱	۰/۸۰	۰/۸۵	۰/۲۸	۰/۶۷

\* محدوده آلودگی متوسط؛ بدون ستاره: محدوده آلودگی پایین

احتمالی ناشی از فلزات سنگین بر محیط زیست را نادیده گرفت. بنابراین بررسی انواع آلاینده‌ها و ریسک اکولوژیک ناشی از آن‌ها به ویژه مصرف کودها و سموم که می‌توانند منشاء ورود فلزات سنگین به محیط باشند، جهت مدیریت بهتر مصرف پیشنهاد می‌گردد.

سنگین در محیط خاکی و در پی آن تجمع فلزات سنگین در مواد غذایی، اثرات مضر و جبران‌ناپذیری بر جوامع بشری و امنیت غذایی دارد، بنابراین اقدامات احتیاطی بیشتری برای کاهش چنین اثراتی مورد نیاز است. از آن جا که برخی شالیکاران در مازندران از زمین به منظور افزایش کیفیت و کمیت برنج، دو بار در سال استفاده می‌کنند؛ نباید اثرات سمی

## References

- Ahmadi Doabi, S., Karami, M., Afyuni, M., 2016. Regional-scale fluxes of zinc, copper, and nickel into and out of the agricultural soils of the Kermanshah province in western Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 188(4), 1-18.
- Adriano, D.C., 2001. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. New York, Springer, 867 p.
- Brevik, E.C., Slaughter, L., Singh, B.R., Stephen, J.J., Collier, D., Barnhart, P., Pereira, P., 2020. Soil and Human Health: Current Status and Future Needs. *Air, Soil and Water Research* 13, 1-23.
- Chen, Y., Jiang, X., Wang, Y., Zhuang, D., 2018. Spatial characteristics of heavy metal pollution and the potential ecological risk of a typical mining area: A case study in China. *Process Safety and Environmental Protection* 113, 204-219.
- Chen, T.B., Zheng, Y.M., Lei, M., Huang, Z.C., Wu, H.T., Chen, H., Fan, K.K., Yu, K., Wu, X., Tian, Q.Z., 2005. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere* 60(4), 542-551.
- Cheng, W., Zhang, G., Yao, H., Dominy, P., Wu, W., Wang, R., 2004. Possibility of predicting heavy-metal contents in rice grains based on DTPA-extracted levels in soil. *Communications in Soil Science and*

- Plant Analysis 35(19-20), 2731-2745.
- Çolak, F., Atar, N., Yazıcıoğlu, D., Olgun A., 2011. Biosorption of lead from aqueous solutions by *Bacillus* strains possessing heavy-metal resistance. *Chemical Engineering Journal* 173(2), 422-428.
- Colombani, N., Gervasio, M.P., Castaldelli, G., Mastrocicco, M., 2020. Soil conditioners effects on hydraulic properties, leaching processes and denitrification on a silty-clay soil. *Science of the Total Environment* 733, 139342.
- ASTM D4698-92, 2007. Standard Practice for Total Digestion of Sediment Samples for Chemical Analysis of Various Metals.
- Elbehiry, F., Elbasiouny, H., Ali, R., Brevik, E.C., 2020. Enhanced immobilization and phytoremediation of heavy metals in landfill contaminated soils. *Water, Air and Soil Pollution* 231(5), 1-20.
- Fu, Y., Liu, F., Zhao, C., Zhao, Y., Liu, Y., Zhu, G., 2015. Distribution of chlorpyrifos in rice paddy environment and its potential dietary risk. *Journal of Environmental Sciences* 35, 101-107.
- Gimeno-García, E., Andreu, V., Boluda, R., 1996. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. *Environmental Pollution* 92(1), 19-25.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research* 14(8), 975-1001.
- Ihedioha, J.N., Abugu, H.O., Ujam, O.T., Ekere, N.R., 2021. Ecological and human health risk evaluation of potential toxic metals in paddy soil, rice plants, and rice grains (*Oryza sativa*) of Omor Rice Field, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment* 193(9), 1-17.
- Kalantari, M.R., Shokrzadeh, M., Ebadi, A.G., Mohammadzadeh, C., Choudhary, M.I., Rahman, A., 2006. Soil pollution by heavy metals and remediation (Mazandaran-Iran). *Applied Sciences* 6, 2110-2116.
- Keshavarzi, A., Kumar, V., 2019. Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of Northeastern Iran. *International Journal of Environmental Health Research* 29(5), 544560.
- Keshavarzi, A., Kumar, V., Ertunç, G., Brevik, E.C., 2021. Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals contamination: an appraisal based on the Tellus soil survey. *Environmental Geochemistry and Health* 43(5), 2121-2142.
- Kotoky, P., Bora, B.J., Baruah, N.K., Baruah, P., Baruah, J., Borah, G.C., 2003. Chemical fractionation of heavy metals in soils around oil installations, Assam. *Chemical Speciation and Bioavailability* 15, 115-126.
- Li, W., Xu, B., Song, Q., Liu, X., Xu, J., Brookes, P.C., 2014. The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil-rice systems at a regional scale in eastern China. *Science of the Total Environment* 472, 407-420.
- Li, T., Yuan, X., Song, Y., Chen, H., Liu, Q., Hu, S., 2016. Influence of heavy metals and nutrient concentrations on selenium geochemical behavior in soil-rice system. *Polish Journal of Environmental Studies* 25, 185-193.
- Lin, J., Sun, D., Zhang, Z., Duan, Z., Dong, J., 2021. Heavy metals and health risk of rice sampled in Yangtze River Delta, China. *Food Additives and Contaminants Part B* 14(2), 133-140.
- Lu, S., Teng, Y., Wang, Y., Wu, J., Wang, J., 2015. Research on the ecological risk of heavy metals in the soil around a Pb-Zn mine in the Huize County, China. *Chinese Journal of Geochemistry* 34(4), 540-549.
- Mirzaei, R., Ghorbani, H., Moghaddas, N.H., Martín, J.A.R., 2014. Ecological risk of heavy metal hotspots in topsoils in the Province of Golestan, Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 147, 268-276.
- Qin, G., Niu, Z., Yu, J., Li, Z., Ma, J., Xiang, P., 2021. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. *Chemosphere* 267, 129205.
- Ravankhah, N., Mirzaei, R., Masoum, S., 2016. Spatial eco-risk assessment of heavy metals in the surface soils of industrial city of Aran-o-Bidgol, Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 96(4), 516-523.
- Ren, Y., Lin, M., Liu, Q., Zhang, Z., Fei, X., Xiao, R., Xiaonan, L.V., 2021. Contamination assessment, health risk evaluation, and source identification of heavy metals in the soil-rice system of typical agricultural regions on the southeast coast of China. *Environmental Science and Pollution Research* 28(10), 12870-12880.

- Rezapour, S., Golmohammad, H., Ramezanzpour, H., 2014. Impact of parent rock and topography aspect on the distribution of soil trace metals in natural ecosystems. *International Journal of Environmental Science and Technology* 11(7), 2075-2086.
- Rostami, S., Kamani, H., Shahsavani, S., Hoseini, M., 2021. Environmental monitoring and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 27(2), 392-404.
- Sharafati Chaleshtori, F., Rafieian Kopaei, M., Sharafati Chaleshtori, R., 2017. A review of heavy metals in rice (*Oryza sativa*) of Iran. *Toxin Reviews* 36(2), 147-153.
- Shokrzadeh, M., Rokni, M.A., 2013. Lead, cadmium, and chromium concentrations in irrigation supply of/and tarom rice in central cities of Mazandaran Province-Iran. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences* 23(98), 234-242.
- Steffan, J.J., Brevik, E.C., Burgess, L.C., Cerdà, A., 2018. The effect of soil on human health: an overview. *European Journal of Soil Science* 69(1), 159-171.
- Sun, Y., Zhou, Q., Xie, X., Liu, R., 2010. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China. *Journal of Hazardous Materials* 174(1-3), 455-462.
- Trinh, H.T., Duong, H.T., Le, G.T., Marcussen, H., Strobel, B.W., 2018. Pesticide and element release from a paddy soil in central Vietnam: Role of DOC and oxidation state during flooding. *Geoderma* 310, 209-217.
- Wuana, R.A., Okieimen, F.E., 2011. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Network*. 2011.
- Zarcinas, B.A., Ishak, C.F., McLaughlin, M.J., Cozens, G., 2004. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. 1. Peninsular Malaysia. *Environmental Geochemistry and Health* 26, 343-357.
- Zeng, F., Mao, Y., Cheng, W., Wu, F., Zhang, G., 2008. Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice. *Environmental Pollution*. 153(2), 309-314.
- Zhao, K., Liu, X., Xu, J., Selim, H.M., 2010. Heavy metal contaminations in a soil-rice system: identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields. *Journal of Hazardous Materials* 181(1-3), 778-787.

## Investigation of heavy metals in soil samples before rice planting and after rice harvesting in Mazandaran province; Study of ecological risk potential and integrated pollution indexes

Mahboubeh Nozari<sup>1</sup>, Abbas Esmaili Sari<sup>\*2</sup>, Ali Mashinchian Moradi<sup>3</sup>, Nader Bahramifar<sup>2</sup>, Lobat Taghavi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Department of Marine Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\*Corresponding author: [esmaili@modares.ac.ir](mailto:esmaili@modares.ac.ir)

### Abstract

Soil contamination with heavy metals is a serious issue in all the world, and these heavy metals are released from both natural and human resources, especially agricultural activities in the environment. Therefore, in this study, the amount of heavy metals and the indicators of ecological risk potential and integrated pollution in soil samples before rice planting and after rice harvesting in Mazandaran province have been investigated. A mixture of nitric acid, hydrofluoric acid and perchloric acid was used for chemical digestion of soil samples and ICP-MS was used to measure the amount of heavy metals in soil samples. The results of comparing the levels of chromium, zinc, nickel and lead in the soil before rice planting and after rice harvesting with the national and international soil standard show that the levels of these metals in most stations are higher than Domestic and international standard limits were measured. Based on the results, the amount of ecological risk potential index in soil samples showed that in all studied stations and sampling stages, the amount of this index was calculated in the range of low ecological risk (below 150). Also, the results of PI pollution index and integrated pollution index (IPI) for each studied station in soil samples before rice planting and after rice harvesting show the PI index for arsenic, chromium, cadmium, copper, nickel, zinc and mercury. In all stations in soil samples before rice planting and after rice harvesting in the range of low contamination was calculated, only the amount of this index for lead in all stations and sampling stages, in the range of moderate contamination was obtained. Also, the results of IPI for all studied stations in all stations and sampling stages, show that the level of this index was determined in the low pollution range. In general, the presence of heavy metals in the soil environment, followed by the accumulation of heavy metals in food, has detrimental and irreversible effects on human societies and food security, so more precautions are needed to reduce such effects.

**Keywords:** Heavy Metals, Ecological risk, Soil pollution, Integrated pollution