

ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات با استفاده از شاخص آلودگی نمره

علی علی یاری^۱؛ جواد وروانی^{۲*}؛ حمید ترنج زرع^۳؛ رامین زارع^۳؛ امیرحسین بقایی^۳

۱ - دانشجوی دکتری گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

۲ - دانشیار گروه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

۳ - استادیار گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، اراک، ایران

(تاریخ دریافت ۰۰/۰۴/۱۷ - تاریخ پذیرش ۰۰/۰۷/۱۰)

چکیده:

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی وضعیت آلودگی فلزات با استفاده از شاخص آلودگی نمره^۲ (NIPI) در باغ‌های انگور شهرستان ملایر صورت گرفت. براساس روش سیستماتیک تصادفی، ۲۸۶ نمونه خاک یک کیلوگرمی (همراه با ثبت محل دقیق هر یک از نمونه‌ها با دستگاه GPS) از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری و سطح ۲۰×۲۰ سانتی‌متری برداشت و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی ذخیره شد و برای بررسی‌های بعدی به آزمایشگاه انتقال یافت. غلظت فلزات منگنز، روی، مس، نیکل، کروم، آرسنیک و جیوه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. میانگین غلظت فلزات منگنز، روی، مس، نیکل، کروم، آرسنیک و جیوه به ترتیب ۵۹۷، ۱۰۹، ۸۷/۸۶، ۸۴/۳۲، ۶۷/۱۲، ۴۷/۱ و ۰/۳۴۴ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. این مقادیر کمتر از مقادیر شاخص NIPI برای این فلزات بود. این یافته وضعیت نسبی غیرآلوده منطقه پژوهش را نشان می‌دهد. ارزیابی نقشه منطقه‌بندی آلودگی مبتنی بر NIPI و مقادیر کم غلظت فلزات در خاک منطقه و نقشه کم‌وبیش همگن از توزیع غلظت فلزات موجود در آنها نشان می‌دهد که غلظت فلزات در منطقه توسط فرایندهای زمین‌شناسی کنترل می‌شود. توزیع ناهمگن غلظت فلزات در قسمت‌های کوچک منطقه، تأثیرات انسانی را نشان می‌دهد.

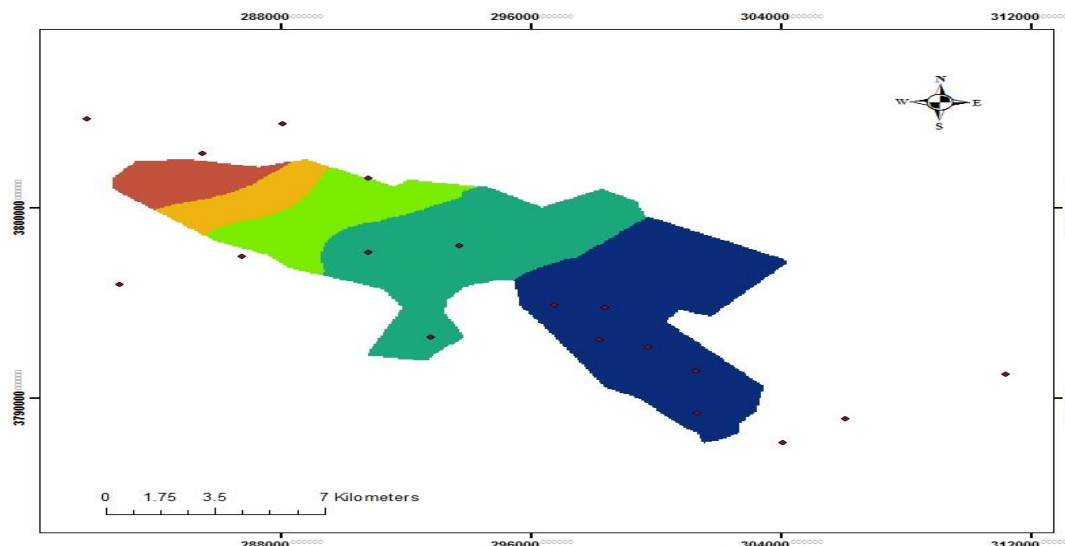
کلید واژگان: ارزیابی وضعیت آلودگی، انگور، خطر زیست‌محیطی، شاخص آلودگی نمره، ملایر، وزن‌دهی عکس فاصله

۱. مقدمه

آلودگی محیط زیست از مهم‌ترین چالش‌های بشر در جامعه امروز است. فلزات سنگین، بارش اسیدی و مواد آلی از مهم‌ترین آلاینده‌های خاک به شمار می‌رود. از این بین، فلزات در سالیان اخیر به دلیل خصوصیات آلاینده‌گی در خاک به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند (Baidourela et al. 2021)؛ چراکه این عناصر به دلیل خصوصیات همچون ثبات شیمیایی، تجزیه پذیری ضعیف و قدرت تجمع زیستی در سطوح مختلف زنجیره غذایی موجب آسیب‌ها و خطرهای اکولوژیکی فراوانی برای موجودات زنده می‌شوند (Haghshenas et al. 2017). از آنجا که این فلزات توسط گیاه و میوه جذب و به انسان منتقل می‌شوند، این مسئله در مورد خاک‌های زراعی و باغی جدی‌تر است (Solgi and Solgi, 2018). فلزات منابع طبیعی و انسانی دارند. مهم‌ترین منابع انسانی، فعالیت‌های صنعتی- معدنی، استخراج نفت، حمل‌ونقل، فاضلاب‌های شهری و فعالیت‌های کشاورزی (کودها و سموم شیمیایی، کودهای حیوانی و کمپوست) است (Wei and Yang, 2010). خاک‌های کشاورزی، مستعد آلودگی بیش از حد به آلودگی فلزات هستند. فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاری، استخراج فلزات و ذوب و در نتیجه استفاده گسترده از آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها (Wang et al. 2019)، آلودگی فلزات را به محیط اضافه می‌کند و سبب تجمع آلودگی فلزات در داخل خاک (بریفا و همکاران ۲۰۲۰) می‌شود. تجمع بیش از حد فلزات در خاک‌های کشاورزی، گذشته از آلودگی محیط زیست، سبب افزایش جذب فلزات توسط گیاهان را می‌شود و در نتیجه کیفیت و امنیت غذایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Li et al. 2014). این

فلزات به صورت محلول در آب، به خاک وارد شده و موجب آلودگی آب‌های سطحی، زیرزمینی و خاک و بر هم زدن تعادل اکولوژیک اکوسیستم‌هایی که به آنها راه می‌یابند می‌شوند (Carballeira et al. 2000). یکی از مسائل مهم در بررسی این نوع آلودگی، منبع آلودگی فلزات و در نتیجه عوامل دخیل در توزیع مکانی آنهاست (Ben Salah et al. 2021). در دهه‌های اخیر، افزایش آلودگی فلزات به دلیل پایداری محیطی آنها در خاک توجه محققان را به خود جلب کرده است (Bowen, 1979). منابع آلودگی با توجه به چگونگی غلظت آنها در خاک، به دو گروه آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای تقسیم می‌شوند (Kourakos et al. 2012). در حال حاضر، منابع آلاینده‌های غیرنقطه‌ای، مهم‌ترین آلاینده‌های آب و خاک در مقیاس جهانی (فعالیت‌های انسانی) در نظر گرفته می‌شوند (Mateo-Sagasta et al. 2017). آلودگی ناشی از این فلزات، گذشته از تأثیر مستقیم بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کاهش فعالیت بیولوژیکی خاک، با ورود به داخل خاک به صورت کودهای آلی و نفوذ به آب‌های زیرزمینی، خطرهای زیادی برای سلامت انسان در پی دارد. (Facchinelli et al. 2003).

تأثیر مواد مادری مختلف در غلظت طبیعی فلزات در خاک و آب در بسیاری از تحقیقات بررسی شده است. این فلزات به دلیل تأثیرات زیست‌محیطی زیانبار، از موضوعات اصلی در تحقیقات زیست‌محیطی به شمار می‌روند (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). ارزیابی شاخص‌های آلودگی، معیاری برای مدیریت محیط زیست و شناسایی و کاهش عوامل محیطی بالقوه زیانبار است (Lemley and Richardson, 1997). استفاده از شاخص‌های



Legend

Idw_shp96_Clip

<VALUE>

- 44.19523239 - 59.81367238
- 59.81367239 - 72.4665858

- 72.46658581 - 83.34018326
- 83.34018327 - 90.25974528
- 90.25974529 - 94.60918427

شکل ۱- پراکنش نقاط نمونه برداری در منطقه پژوهش واقع در قسمتی از دشت ملایر

جدول ۱- استانداردهای درجه بندی شده برای NIPI

کلاس	مقادیر کیفی
$PI < 0.7$	غیرآلوده
$0.7 \leq PI_i < 1$	به نسبت غیرآلوده
$1 \leq PI_i < 2$	آلودگی کم
$2 \leq PI_i < 3$	آلودگی متوسط
$3 \leq PI_i$	آلودگی زیاد

خاک‌های زیر کشت اجرا کردند و به نتایج ارزشمندی دست یافتند. در بسیاری از تحقیقات در زمینه آلودگی محیط زیست، گذشته از اهمیت پهنه بندی و تعیین غلظت آلاینده‌ها، به تهیه نقشه‌های احتمال برای مقادیر بیشتر از حد آستانه نیز توجه ویژه‌ای شده است.

به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS) در پهنه بندی آلاینده‌های زیست محیطی، نخستین گام

آلودگی برای ارزیابی این فلزات، خطر زیست محیطی اکوسیستم‌ها را تعیین می‌کند (Suter, 2007). یکی از شاخص‌های پرکاربرد در ارزیابی آلودگی فلزات در خاک‌های زراعی، شاخص آلودگی یکپارچه نمره (NIPI) است (Shaheen et al. 2019; Zhang et al. 2020). Shaheen و همکاران (۲۰۱۹) از NIPI برای ارزیابی و مدل سازی آلودگی فلزات کروم، کادمیوم و سرب استفاده کردند. Chai و همکاران (۲۰۲۱) NIPI را برای ارزیابی آلودگی فلزات در

²Geographic Information System (GIS)

جدول ۲- نتایج بررسی آزمون نرمال بودن داده‌ها

عناصر	کولموگروف-اسمیرنوف		شاپیرو-ویلک	
	آماره	درجه آزادی	سطح معنی داری	درجه آزادی
مس	۰/۲۴	۲۸۶	۰/۰۰۲	۲۸۶
منگنز	۰/۱۸	۲۸۶	۰/۰۰۱	۲۸۶
روی	۰/۳۳	۲۸۶	۰/۰۰۲	۲۸۶
کروم	۰/۳۱	۲۸۶	۰/۰۰۴	۲۸۶
آرسنیک	۰/۱۹	۲۸۶	۰/۰۰۱	۲۸۶
نیکل	۰/۲۸	۲۸۶	۰/۰۰۵	۲۸۶
جیوه	۰/۴۷	۲۸۶	۰/۰۳۱	۲۸۶
pH	۰/۷۴	۲۸۶	۰/۰۱۲	۲۸۶
EC	۰/۳۶	۲۸۶	۰/۰۱۸	۲۸۶

جدول ۳- خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های منطقه

مشخصه/خصوصیت	رس	سیلت	شن	pH	EC
متوسط	۳۶	۴۴/۸۶	۷/۵۰	۷/۶۷	۵۶۲
حداقل	۱۴	۱۸	۱۹/۱	۷/۴۰	۳۱۲
حداکثر	۵۸	۶۵	۱۳۲	۷/۹۰	۸۷۰
واریانس	۱۴۲	۸۳	۵۶	۰/۲۵	۳۹۹۵
چولگی	-۰/۳۷	-۰/۵۹	۰/۲۳	-۰/۰۴	۰/۲۸
کشیدگی	۰/۲۴	-۰/۲۳	-۰/۴۷	-۰/۹۳	-۱/۳۱

EC: هدایت الکتریکی

در شناسایی شدت آلودگی و مشخص کردن توزیع مکانی آلودگی فلزات است (Shaheen et al. 2019). از نقشه‌های احتمالی نشان‌دهنده خطر آلودگی، می‌توان به‌عنوان اطلاعات اولیه برای ارزیابی خطر آلودگی خاک، آب و دیگر اجزای اکوسیستم برای سلامت انسان و محیط زیست استفاده کرد (Zhang et al. 2020).

امروزه بیشتر تحقیقات درباره آلودگی فلزات، بر خاک‌های اطراف مناطق معدن‌کاری (Xiao et al. 2017)، خاک‌های آبیاری‌شده با فاضلاب‌های صنعتی (Huang et al. 2016)، خاک‌های شهری و زمین‌های زراعی (Liu et al. 2016; Chai et al. 2021) متمرکز است. تحقیق درباره آلودگی خاک‌های زیر کشت دارای اولویت است. قابلیت

شهرستان ملایر برای تولیدات کشاورزی (به‌ویژه باغ‌های انگور) و در نتیجه، تأثیر فعالیت‌های کشاورزی مانند کاربرد کودهای شیمیایی مختلف بر کیفیت خاک، گیاه و در نهایت سلامت انسان، لزوم اجرای این پژوهش را به‌منظور بررسی مقدار تجمع فلزات به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مهم ناشی از این‌گونه فعالیت‌ها در خاک سطحی، بیش از پیش آشکار می‌سازد. با توجه به این مهم، این تحقیق با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی وضعیت آلودگی فلزات در باغ‌های انگور شهرستان ملایر با استفاده از شاخص آلودگی نمره صورت گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

دشت ملایر با وسعت ۵۳۶ کیلومترمربع تأمین‌کننده آب شرب، کشاورزی و صنعت شهرستان ملایر است.

جدول ۴- نتایج آمار توصیفی متغیرهای اندازه‌گیری شده در خاک باغ‌های انگور

	Cu	S.N	As	S.N	Zn	S.N	Cr	S.N	Hg	S.N	Mn	S.N	Ni	S.N
متوسط	۸۷/۸۶		۴/۷۱۱		۱۰۹		۶۷/۱۲		۰/۳۴۳۹		۵۹۷		۸۴/۳۲	
حداقل	۴۳/۴۰	۱	۰/۴۸۶۳	۶	۳۲	۵	۴۵	۱۳	۰/۱۰۳۲	۲	۰	۱۴	۷۴	۲
حداکثر	۹۶/۷۷	۱۵	۱۱/۷۸	۱۵	۱۵۶	۱۳	۸۸/۳۰	۱۵	۰/۳۵۶۴	۷	۹۷۴	۷	۹۰	۱۵
واریانس	۱۷۵		۱۷۱۰۰۳		۱۱۴۷		۱۰۲		۵۸۴۱۴۰		۷۶۳۶۳		۲۰/۹۶	
چولگی	-۳/۰۶		۰/۳۷۴		-۰/۸۲		۰/۳۲۶		۱/۹۳		-۰/۴۱		-۱/۲۹	
کشیدگی	۱۰/۳۲		-۱/۳۶		۰/۸۲		۱/۸۸		۲/۸۷		-۰/۱۳		۱/۴۵	
NIPI	۹۲/۴۳		۸۹/۷۴		۱۳/۷۱		۷۸/۴۳		۲۷/۹۹		۸۲۱/۱۲		۸۶/۹۸	

S.N : شماره نمونه

جدول ۵- مقادیر متوسط برخی از فلزات سنگین در واحد وزن خشک (mg/kg) در خاک‌های سطحی برخی از کشورها

کشور	Cu	As	Zn	Cr	Hg	Mn	Ni	مرجع
ایران	۲۰۰	۲۰	۵۰۰	۶۵	۰/۵	-	-	Garavand et al. 2013
آلمان	۲۰۰	۵۰	۶۰۰	۵۰۰	۵	-	۲۰۰	EEA 2007
هلند	۱۹۰	۷۶	۷۲۰	۱۸۰	۳۶	-	۱۰۰	EEA 2007
چین	۵۰-۲۰۰	۲۰-۴۰	۲۰۰-۳۰۰	۱۵۰-۳۰۰	۰/۳-۱	-	۴۰-۶۰	EPMC 2015
کانادا	۱۵۰	۲۰	۵۰۰	۲۵۰	۰/۸	-	۱۰۰	CME 2009
استرالیا	۱۰۰	۲۰	۲۰۰	۵۰	۱	-	۶۰	EPAA 2012
آمریکا	۲۷۰	۰/۱۱	۱۱۰۰	۱۱	۱	۸۵۰	۷۲	US EPA 2002

برای نمونه‌برداری سیستماتیک تصادفی خاک، ابتدا منطقه به شبکه‌های ۵×۵ کیلومتری تقسیم شد. در مناطقی که شدت استفاده از زمین زیاد بود، فاصله شبکه‌ها ۲/۵ × ۲/۵ کیلومتر و در مناطقی که شدت استفاده از زمین کمتر بود، فاصله شبکه‌ها ۱۰×۱۰ کیلومتر و محل تلاقی شبکه‌ها به‌عنوان موقعیت نقاط نمونه‌برداری انتخاب شد (Solgi and Solgi, 2016). از مجموع ۲۸۶ نمونه جمع‌آوری شده، ۱۵۷ نمونه در اراضی کشاورزی (باغ و زمین کشاورزی) و ۱۲۹ نمونه در عرصه‌های طبیعی (مراتع و زمین‌های بایر) واقع شدند. نمونه‌ها از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری و از سطح ۲۰×۲۰ سانتی‌متری به مقدار تقریبی یک کیلوگرم خاک برداشت و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی ذخیره شدند (Solgi and Solgi, 2016). نمونه‌ها پس از جمع‌آوری برای تجزیه شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شدند. شایان ذکر است که محل دقیق هر یک از نمونه‌ها توسط دستگاه GPS ثبت شد (شکل ۱).

بارش سالانه در این ناحیه به‌طور متوسط ۳۱۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد است. منطقه براساس طبقه‌بندی آمبرژه در بخش اقلیمی نیمه‌خشک سرد واقع شده است. در تحقیق حاضر، منطقه پژوهش بخشی از باغ‌های انگور در دشت ملایر است که در بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۹۲ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۳ دقیقه قرار دارد (زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۹۱). موقعیت شهرستان ملایر در استان همدان و ایران در شکل ۱ ارائه شده است. براساس بازدیدهای میدانی در این منطقه محصول غالب کشت شده انگور است. مساحت منطقه نمونه‌برداری شده در حدود ۱۴ کیلومتر مربع است.

۱-۲. نمونه‌برداری خاک و آنالیز نمونه‌های خاک

جدول ۶- خواص آماری شاخص NIPI فلزات سنگین در خاک‌های تحت بررسی

	Cu	As	Zn	Cr	Hg	Mn	Ni
Min	0.49	0.10	0.29	0.92	0.59	0.55	0.87
Max	1.1	2.26	1.39	1.31	2.068	1.54	1.06
Mean	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

$$NIPI = \sqrt{\frac{(P_{i\text{ave}})^2 + (P_{i\text{max}})^2}{2}} \quad (\text{رابطه } 1)$$

در این رابطه NIPI شاخص آلودگی نمرو، $P_{i\text{ave}}$: میانگین شاخص آلودگی عنصر i و $P_{i\text{max}}$: بیشترین مقدار شاخص آلودگی عنصر i است. مقدار آلودگی نیز براساس مقدار شاخص محاسبه شده در پنج طبقه آلودگی (جدول ۱) به صورت زیر قرار می‌گیرد: $0.7 \leq PI_i < 1$ (به نسبت غیرآلوده)، $1 \leq PI_i < 2$ (کمی آلوده)، $2 \leq PI_i < 3$ (آلودگی متوسط) و $3 \leq PI_i$ (آلودگی شدید).

مزیت این شاخص نسبت به شاخص‌های دیگر این است که در آن، ریسک آلودگی همه فلزات تحت بررسی در منطقه مشخص می‌شود (Loska et al. 2004). این شاخص انعکاسی از وضعیت آلاینده‌های فلزی است و بزرگ‌ترین آلاینده‌ها را در محیط مشخص می‌کند (Chai et al. 2021).

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای SPSS نسخه ۲۳ و اکسل استفاده شد. بخش آماری توصیفی برای فلزات در منطقه پژوهش محاسبه شد. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیروف و شاپیرو-ویلک در جدول ۲ نشان داد که غلظت فلزات و پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک در منطقه پژوهش از توزیع نرمال برخوردارند. همچنین برای بررسی ارتباط بین غلظت فلزات و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد.

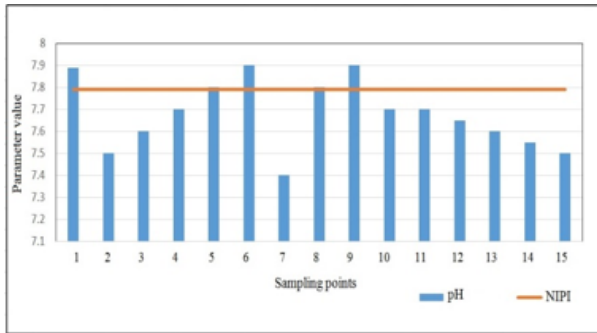
۳-۲. آنالیز زمین آماری

نمونه‌های خاک ابتدا به مدت یک هفته در معرض دمای اتاق هواخشک شده و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. عصاره‌گیری برای تعیین غلظت کل فلزات خاک (منگنز، روی، مس، نیکل، کروم، آرسنیک و جیوه) با استفاده از دستگاه ماکروویو و روش هضم با هیدروکلریدریک اسید ۳۲ درصد و اسید نیتریک ۶۵ درصد صورت گرفت (Cao et al. 1984). غلظت کل فلزات به وسیله دستگاه پلاسمای جفت شده القایی^۳ (ICP-MS) اندازه‌گیری شد (Carter, 1993). بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1951)، ماده آلی به روش والکی-بلک (Nelson and Sommers, 1982)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Black et al. 1965)، ظرفیت تبادل کاتیونی و قابلیت هدایت الکتریکی توسط الکتروود دستگاه شوری‌سنج در عصاره اشباع (Burt, 2004) در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. pH نمونه‌ها توسط دستگاه pH متر و EC توسط دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد.

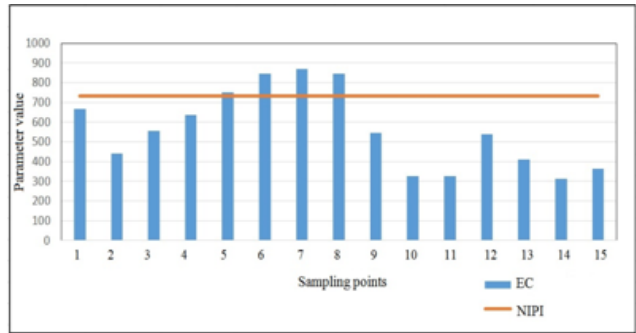
۲-۲. ارزیابی آلودگی خاک

در این پژوهش از شاخص جامع آلودگی نمرو برای بررسی سنجش میزان آلودگی خاک به فلزات استفاده شد. شاخص آلودگی نمرو براساس معادله ۱ و برای هر ایستگاه نمونه‌برداری محاسبه می‌شود (Yong et al. 2015):

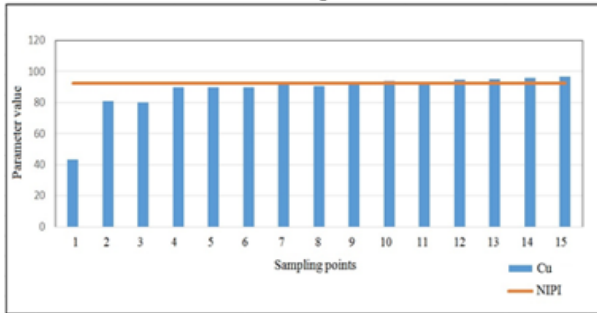
³Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)



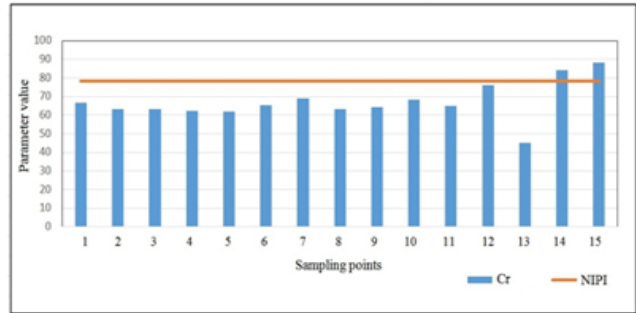
a- NIPI and pH values



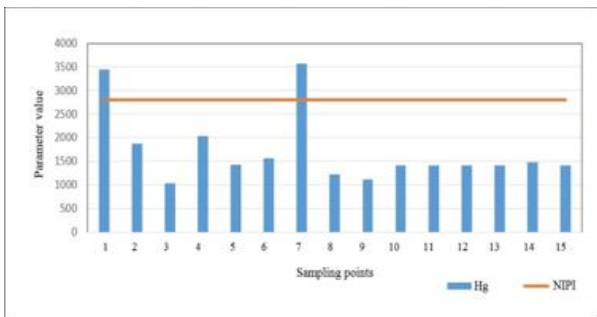
b- NIPI and EC values



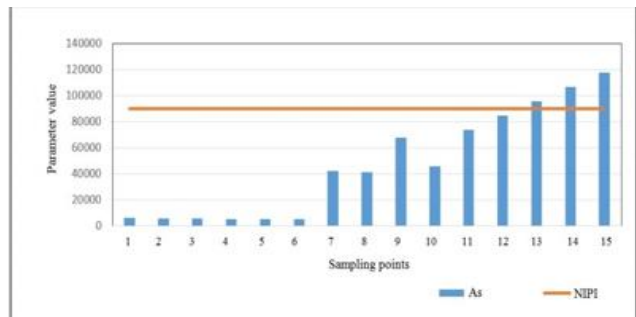
c- NIPI and Cu values



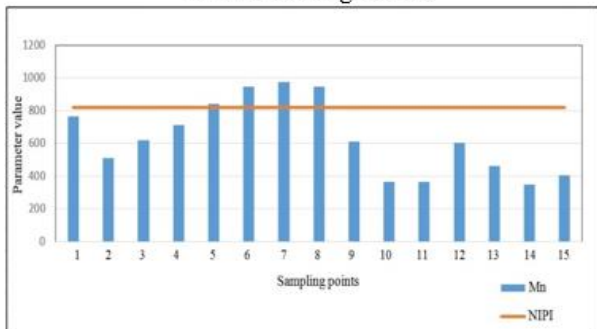
d- NIPI and Cr values



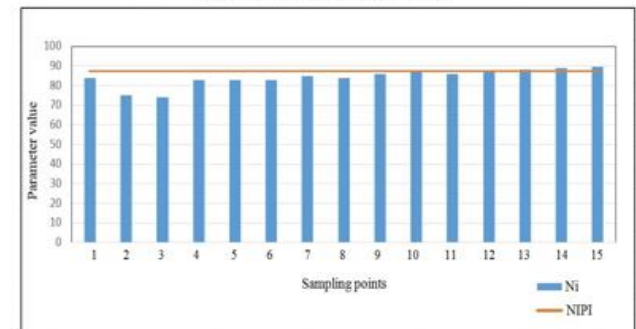
e- NIPI and Hg values



f- NIPI and As values



g- NIPI and Mn values



h- NIPI and Ni values

شکل ۲- مقادیر شاخص نمره و شاخص‌های آلودگی در منطقه پژوهش

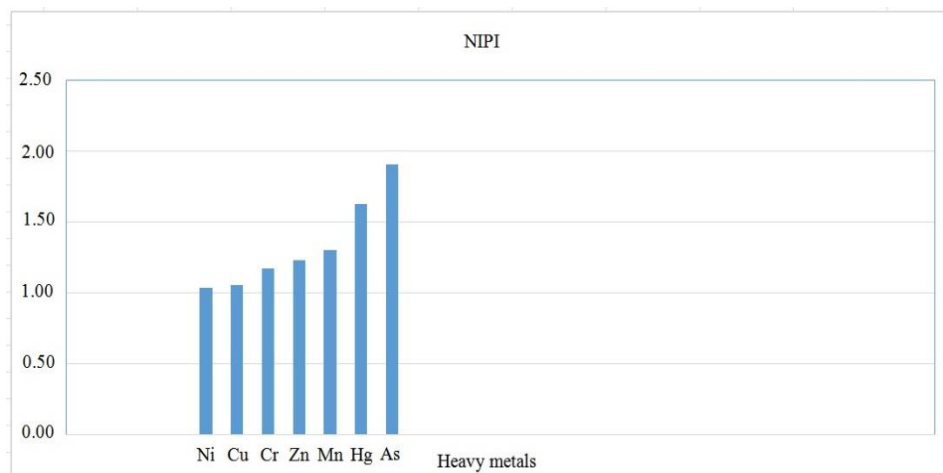
خطای برآورد (RMSE^۶) محاسبه شد. برای شناسایی بهتر مناطق آلوده یا قرار گرفتن در معرض فلزات، نقشه‌های توزیع عامل آلودگی (نقشه منطقه‌بندی آلودگی مبتنی بر NIPI) تهیه شد. برای

دقت روش زمین‌آماري روش میان‌یابی کریجینگ با استفاده از میانگین خطای مطلق (MAE^۴)، میانگین خطای بایاس (MBE^۵) و ریشه میانگین مربعات

^۶ Root Mean Square Error

^۴ Mean Absoluter Error

^۵ Mean Basis Error



شکل ۳- شاخص نرمال شده NIPI عناصر سنگین در منطقه پژوهش

روی، مس، نیکل، کروم، آرسنیک و جیوه (mg/kg) به ترتیب ۵۹۷، ۱۰۹، ۸۷/۸۶، ۸۴/۳۲، ۶۷/۱۲، ۴۷/۱۱ و ۰/۳۴۴ است. مطابق جدول ۳، مقادیر ذکر شده (به جز جیوه) کمتر از مقادیر شاخص NIPI برای این فلزات هستند (Yobouet et al. 2010).

جدول ۵ مقادیر متوسط برخی از فلزات را در خاک‌های سطحی برخی از کشورهای نشان می‌دهد. براساس داده‌های جدول ۵، خاک حاصل از تاکستان‌های ملایر از نظر مقادیر مس، روی، جیوه و تا حدی نیکل با خاک همه کشورهای یاد شده در جدول، از نظر کروم با خاک چین و کانادا، از نظر منگنز با خاک آمریکا و از نظر آرسنیک نیز تا حدی با خاک چین قابل مقایسه است. تحقیق درباره غلظت عناصر در منطقه نیز نشان داد که غلظت آن عناصر کمتر از استانداردهای نظارتی کشورهای دیگر است.

۲-۳. برآورد شاخص NIPI فلزات در اراضی

تحت بررسی

در این پژوهش، برای بررسی کمیت ریسک آلودگی و آگاهی از پتانسیل آلودگی در منطقه، از شاخص جامع ترکیب شده نمره استفاده شد (جدول ۶). در اراضی تحت مطالعه، شاخص آلودگی همه فلزات ۱ است که

این کار، مقادیر حاصل از شاخص جامع نمره با استفاده از روش وزن دهی عکس فاصله (IDW) در محیط ArcGIS 10.3 با دقت زیاد و قابل قبولی (MAE = 0.004, RMSE = 0.005) و (MBE = 0.0006) پهنه‌بندی شد.

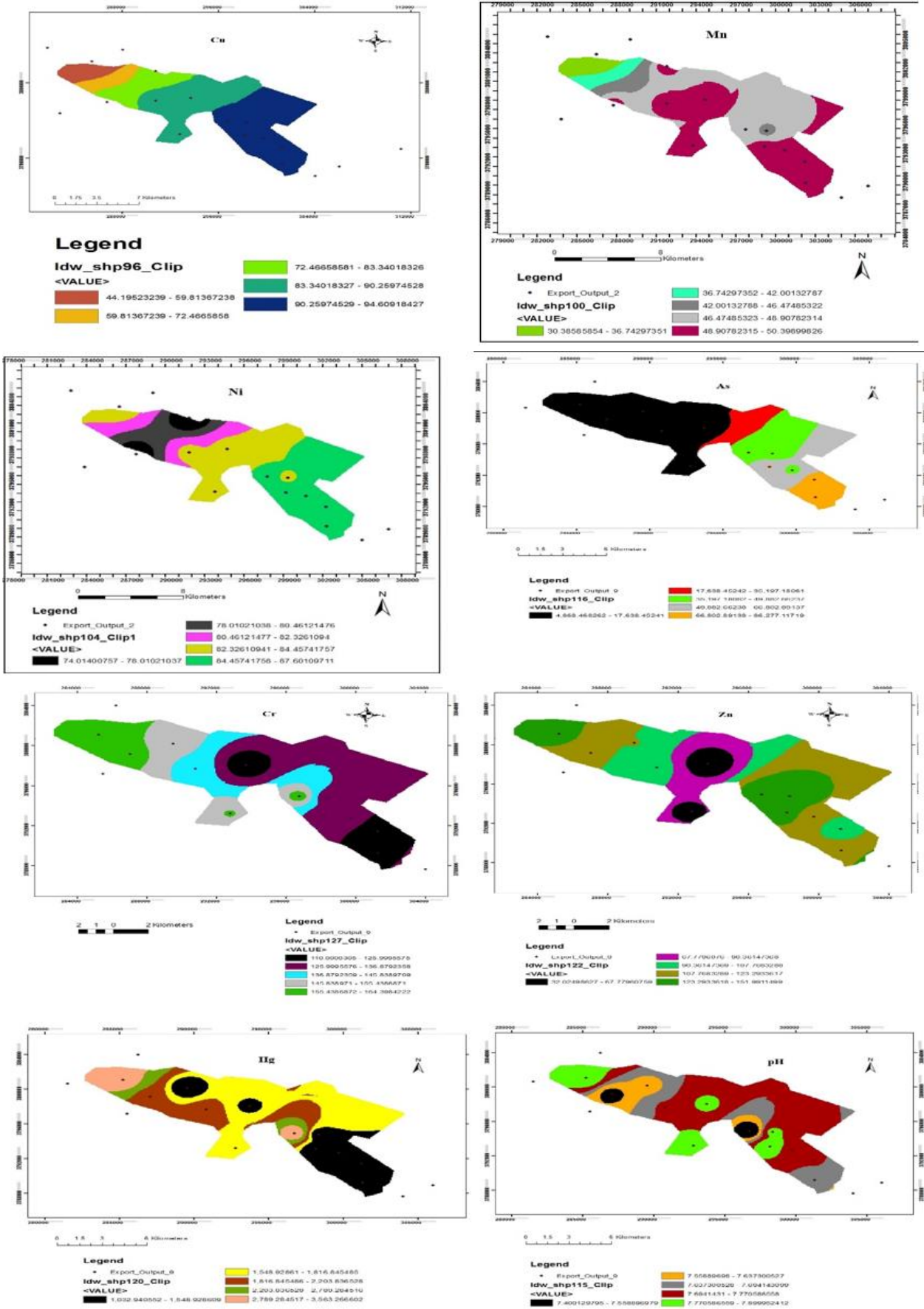
۳. نتایج

۳-۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌ها

نتایج خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های منطقه در جدول ۳ ارائه شده است. طبق این جدول، میانگین pH و EC به ترتیب ۷/۶۷ و ۵۶۲ (μm/cm) است که نشان می‌دهد خاک منطقه تا حدی قلیایی است. میانگین نرخ رس، سیلت و ماسه نیز به ترتیب ۴۴/۸۶، ۷/۵۰ (درصد) است که نشان می‌دهد بیشتر خاک‌های منطقه بافت متوسط تا سنگین دارند. مقدار ماده آلی خاک‌ها کمتر از ۳/۷ درصد است. آهک نمونه‌ها بین ۱۵/۵ تا ۲۴/۴ درصد است.

جدول ۴ نتایج آمار توصیفی متغیرهای اندازه‌گیری شده در خاک باغ‌های انگور (همراه با مقادیر شاخص NIPI نرمال شده) برخی از عناصر را نشان می‌دهد. میانگین غلظت عناصر سنگین منگنز،

⁷ Inverse Distance Weight



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی آلودگی عناصر براساس شاخص نمر

جدول ۷- ماتریس مقادیر همبستگی چند متغیره پیرسون (r) پارامترهای شیمیایی و فلزات نمونه‌های خاک

	EC	pH	Cu	Mn	Zn	Cr	As	Ni	Hg	Clay	Sand	Silt
EC	۱											
pH	۰/۳۳	۱										
Cu	-۰/۲۳	-۰/۳۳	۱									
Mn	-۰/۲۶	-۰/۳۶	۰/۸۹۳**	۱								
Zn	-۰/۶۳	۰/۲۳	۰/۶۶**	۰/۲۴	۱							
Cr	-۰/۲۵	-۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۲۲	-۰/۲۵	۱						
As	*	-۰/۳۶	۰/۵۴*	-۰/۶*	۰/۳۰	۰/۴۳	۱					
	-۰/۵۹											
Ni	۰/۲۷	۰/۱۲	۰/۳۹۵	-۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۳۷	**	۱				
							۰/۷۸					
Hg	۰/۳۹	-۰/۱۶	-۰/۵۷۷*	۰/۴۱	۰/۲۶	۰/۲۰	-۰/۲۹	-۰/۰۲	۱			
Clay	۰/۲۴	-۰/۳**	۰/۳۳**	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۱۷	-۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۲۱	۱		
Sand	۰/۲۰	-۰/۱۷	-۰/۴۵**	۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۱	۰/۱۱	-۰/۴**	۰/۱۵	-۰/۷**	۱	
Silt	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۳۳*	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۴۱**	۰/۲۴	۰/۱۶	-۰/۸**	۱

* و ** معناداری همبستگی به ترتیب در سطح ۵ و ۱ درصد

ArcGIS 10.3 با دقت زیاد و قابل قبولی پهنه‌بندی شدند. نقشه‌های توزیع فاکتور آلودگی در فلزات مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. بیشترین غلظت عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) مس (۹۶/۷۷)، منگنز (۹۷۴) و کروم (۸۸/۳۰) در غرب منطقه، بیشترین غلظت عناصر روی (۱۵۶)، آرسنیک (۱۱/۷۸۰) و کروم (۹۰) در جنوب شرقی منطقه و بیشترین غلظت جیوه (۳/۵۶) در شمال غربی منطقه است.

۳-۴. همبستگی بین عناصر

یافته‌های حاصل از تجزیه و تحلیل همبستگی (جدول ۷) نشان داد که چهار فلز منگنز، آرسنیک، مس و روی همبستگی زیاد و معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد دارند. این یافته منشأ مشترک آنها را نشان می‌دهد (De Temmerman et al.; Facchinelli et al. 2001). هیچ ارتباط معنی‌داری بین pH و فلزات وجود نداشت. این امر به دامنه کم تغییرات pH (Manta et al. 2002;) نسبت داده می‌شود (Rodriguez Martin et al. 2006). بین رس و

مطابق با جدول ۱ نشان‌دهنده وضعیت به نسبت غیرآلوده منطقه از این نظر است. استثنائاً فلزات آرسنیک (نمونه‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵) و جیوه (نمونه‌های ۱ و ۷) در محدوده آلودگی متوسط قرار می‌گیرند. فلزات منگنز (نمونه‌های ۵، ۶، ۷ و ۸) و روی (نمونه‌های ۱، ۷، ۸ و ۱۳) نیز در محدوده آلودگی کم قرار می‌گیرند.

شکل ۲ خصوصیات آماری شاخص NIPI فلزات مس، روی، جیوه، منیزیم، کروم، نیکل و آرسنیک را در خاک‌های تحت بررسی نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز شاخص نرمال شده NIPI این فلزات را نشان می‌دهد.

۳-۳. نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت فلزات

برای شناسایی بهتر مناطق آلوده یا قرار گرفتن در معرض فلزات، نقشه‌های توزیع عامل آلودگی (نقشه منطقه‌بندی آلودگی مبتنی بر NIPI) تهیه شد. برای این کار مقادیر حاصل از شاخص NIPI با استفاده از روش وزن‌دهی عکس فاصله^۸ (IDW) در محیط

^۸Inverse distance weighting

فلزات ممکن است از خاصیت تجمع‌پذیری در گیاه انگور برخوردار باشند، باید دربارهٔ افزایش بی‌رویهٔ آنها در خاک نگران بود. از طرفی برآورد شاخص NIPI نرمال‌شده نشان داد که غلظت همهٔ این عناصر (به‌جز جیوه) دارای نرخ یکسان ۱ است که نشان می‌دهد این منطقه از نظر فلزات، به‌نسبت غیرآلوده است.

نتایج آنالیز همبستگی بین غلظت عناصر سنگین و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک نشان داد که بین مس و منگنز، مس و روی، مس و آرسنیک و نیز آرسنیک و نیکل همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. بین مس و جیوه، آرسنیک و EC و آرسنیک و منگنز نیز همبستگی منفی و معنی‌داری وجود دارد. این ارتباط ممکن است به‌دلیل خصوصیات ژئوشیمیایی مشابه باشد. بنابراین نتایج نشان می‌دهند که پتانسیل آلودگی اندک برخی از فلزات در محدودهٔ پژوهش به لیتولوژی و دگرسانی‌های ناشی از توده‌های نفوذی مربوط است و منبع زمین‌زاد عامل اصلی تمرکز و غنی‌شدگی فلزات یادشده در خاک است. Solgi و Solgi (۲۰۱۶) دریافتند که بین مس و روی، مس و سرب، سرب و روی و نیز بین اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. آنها استفاده از کودهای حیوانی را دلیل احتمالی همبستگی میان مس و روی دانستند.

در نتیجه‌گیری نهایی می‌توان گفت که منشأ احتمالی ورود فلزات به خاک مناطق بررسی‌شده تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و طبیعی است. در بخش انسانی با توجه به ضریب همبستگی زیاد بین مس و روی از یک طرف و همچنین همبستگی این دو با سرب احتمال می‌رود که این دو فلز تحت تأثیر کودهای حیوانی و شیمیایی قرار دارند. با توجه به

مس رابطهٔ مثبت و ضعیفی وجود داشت ($r=0/3$)، که نشان‌دهندهٔ تأثیر ذرات رس خاک بر جذب فلز مس است. در پژوهش Rodriguez Martin و همکاران (۲۰۰۶)، نیکل رابطه‌ای قوی با خاک رس داشت، درحالی که کروم با کربنات خاک همبستگی داشت. پژوهش Chen و همکاران (۱۹۹۹) نشان داد که مقدار خاک رس در خاک عامل مهمی در کنترل توزیع و غلظت فلزات است. در پژوهش حاضر، بین درصد سیلت خاک با فلزات نیکل ($r=0/41$) و مس ($r=0/33$) نیز همبستگی مستقیمی وجود داشت که در مورد خاک‌های شنی، این موضوع اغلب به کمبود بار سطحی و سطوح تبادل و بنابراین به ناتوانی ذرات شن و ماسه در خیساندن و حفظ عناصر خاک نسبت داده می‌شود (Alloway, 1990). در پژوهش Acosta و همکاران (۲۰۰۹)، نیکل و کروم همبستگی غیرمستقیم قوی با نسبت ماسه و همبستگی مستقیم با نسبت سیلت داشتند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شاخص NIPI برای تحقیق دربارهٔ نحوهٔ توزیع غلظت عناصر سنگین به‌کار گرفته شد. فراوانی میانگین غلظت این عناصر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) اندازه‌گیری‌شده در این خاک‌ها به‌شرح زیر کاهش می‌یابد: $Mn > Zn > Cu > Ni > As > Hg$. غلظت این عناصر از مقادیر شاخص NIPI برای این فلزات پیروی می‌کنند. این نتایج تأییدکننده یافته‌های Uboet و همکاران (۲۰۱۰) است. توزیع ناهمگن غلظت فلزات در قسمت‌های کوچک منطقه، تأثیرات انسانی را نشان می‌دهد. بنابراین در حال حاضر این خاک‌ها از نظر آلودگی خاک به فلزات در معرض خطر جدی نیستند. از سویی، از آنجا که این

بنابراین باید برنامه‌ریزی یک سیستم پایش پیوسته انجام پذیرد. نتایج به‌دست‌آمده برای فلزات، تنها ناشی از زمین‌شناسی منطقه است و در نتیجه خاک این منطقه از نظر فلزات تحت بررسی، برای کشاورزی مناسب است. ارزیابی آلودگی در این پژوهش بر پایه GIS دارای برتری بر تحقیقات پیشین است. همچنین ارائه شاخص‌های آلودگی به‌صورت نقشه به‌همراه موقعیت منابع آلاینده احتمالی سبب می‌شود که با قطعیت بیشتری درباره آلودگی و منابع آن در منطقه صحبت کرد. نکته آخر اینکه نقشه شاخص‌های آلودگی نیز می‌تواند مبنایی کاربردی برای دیگر پژوهش‌های خاک باشد.

References

Baidourela, A., Liu, L., Zhayimu, K., Pan, C., Manglike, R., Peng, X., Abudukadeer, M., 2021. Distribution characteristics and correlation of heavy metals in soil and total suspended particles of Urumqi City. *International Journal of Environmental Science* 69.

Ben Salah, Y., Oudadesse, H., Lefevre, B., Tounsi, S., El Feki, H., 2021. Purified mono ammonium phosphate fertilizer promotes the yield and reduces heavy metals accumulation in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *International Journal of Environmental Science* 19(3), 1753-1764.

Carballeira, A., Carral, E., Puente, X., Villares, R., 2000. Regional scale monitoring of coastal contamination. Nutrients and heavy metals in estuarine sediments and organisms on the coast of Galicia (Northwest Spain). *International Journal of Environment and Pollution* 13, 534-572.

Chai, L., Wang, Y., Wang, X., Ma, L., Cheng, Z., Su, L., 2021. Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China. *Ecological Indicators* 125, 107507.

Facchinelli, A., Sacchi, E., Mallen, L. 2003. Multivariate statistical and GIS based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution* 114(3), 313-324.

مقادیر کم غلظت مس به نظر می‌رسد که قارچ‌کش‌های مسی در این منطقه کمتر شده‌اند یا استفاده از آنها به‌تازگی شروع شده است، چراکه استفاده طولانی‌مدت از آنها سبب تجمع در لایه سطحی خاک می‌شود. همچنین به‌دلیل نبود کارخانه‌های صنعتی (نبود منابع انسانی فلزات) در منطقه، غلظت فلزات مس، منگنز، روی، کروم، آرسنیک، نیکل و جیوه در خاک کمتر از حد شاخص NPI است. مصرف سموم کشاورزی و کودهای شیمیایی به‌تدریج موجب ورود و انباشت کم و تدریجی فلزات در خاک و در پی آن کیفیت محیط زیست و بهداشت ساکنان اطراف آن خواهد شد؛

Garavand, M., Ghasemi, H., Hafezi Moghddas, N., 2013. Geochemical and Environmental Assessment of the Heavy Metals in the Soils Derived from the Gorgan Schists. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 22(86), 35-46.

Haghshenas, A., Hatami-manesh, M., Mirzaei, M., Mir Sanjari, M.M., Hossein Khezri, P., 2017. Measurement and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Pars Special Economic Energy Zone. *Iranian South Medical Journal* 20(5), 448-469. (In Persian).

He, Z., Shentu, J., Yang, X., Baligar, V.C., Zhang, T., Stoffella, P.J., 2015. Heavy Metal Contamination of Soils: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators* 9, 17-18.

Kourakos, G., Klein, F., Cortis, A., Harter, T., 2012. A groundwater nonpoint source pollution modeling framework to evaluate long-term dynamics of pollutant exceedance probabilities in wells and other discharge locations. *Water Resources Research* 48(6), 1-19.

Lemly, A.D., Richardson, C.J., 1997. Guidelines for risk assessment in wetlands. *Environmental Monitoring and Assessment* 47, 117-134.

Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T.J., Yuan, Z.,

- Huang, L.A., 2014. Review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment* 468-469, 843-53.
- Liu, W., Zhao, J., Ouyang, Z., Söderlund, L., Liu, G., 2005. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing china. *Environmental International* 31, 805-812.
- Loska, K, Wiechuła, D, & Korus, I. 2004. Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International* 30(2), 159-65.
- Mateo-Sagasta, J., Marjani Zadeh, S., Turrall, H., 2017. Water pollution from agriculture: a global review. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Water Management Institute on behalf of the Water Land and Ecosystems Research Program.
- Shaheen, A., Iqbal, J., Hussain, S. 2019. Adaptive geospatial modeling of soil contamination by selected heavy metals in the industrial area of Sheikhpura, Pakistan. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16, 4447-4464.
- Solgi, I., Solgi, M., 2016. Investigating of heavy metals concentration Vineyard soils in the agricultural ecosystems of Malayer. *Journal of Plant Ecosystem and Conservation* 3(7), 99-111 (In Persian).
- Suter, G.W., 2007. *Ecological Risk Assessment*. 2nd edition. CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Fla. 680 p.
- Wang, S., Cai, L., Wen, H., Luo, J., Wang, Q., Liu, X., 2019. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China. *Science of the Total Environment*, 655, 92-101.
- Wei, B., Yang, L., 2010. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal* 94(2), 99-107.
- Yobouet, Y.A., Adouby, K., Trokourey, A., & Yao, B. 2010. Cadmium, Copper, Lead and Zinc speciation in contaminated soils. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(5), 802-812.
- Yong, L., Huifeng, W., Xiaoting, L., Jinchang, L., 2015. Heavy metal contamination of agricultural soils in Taiyuan, China. *Pedosphere* 25, 901-909.
- Zare Abianeh, H., Bayat Varkeshi, M., Marofi, S., 2012. Investigating Water Table Depth Fluctuations in the Malayer Plain. *Water and Soil Science* 22(2), 173-190.
- Zhang, Y., Wu, D., Wang, C., Fu, X., Wu, G., 2020. Impact of coal power generation on the characteristics and risk of heavy metal pollution in nearby soil. *Ecosyst Health Sustainability* 6(1), 1787092.