

بررسی شاخص آلودگی روی و نیکل در خاک‌های اطراف لندفیل سردهات زنجان

فرهاد مهدیلو^{۱*}، محمد بابا اکبری ساری^۱، اکبر حسینی^۱، مهدی تفویضی^۱، حسن اوجاقلو^۲

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی farhad.m@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

DOI: 10.30470/jsp.2026.735655

چکیده

لندفیل سردهات جعفری از سال ۱۳۹۹ محل دفن پسماندهای معدنی شهرک تخصصی روی زنجان است. با توجه به مسائل زیست محیطی و براساس قانون حفاظت خاک پایش غلظت عناصر سنگین در اطراف این لندفیل ضروری است. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر لندفیل سردهات زنجان بر میزان آلوده شدن خاک‌های اطراف منطقه لندفیل به عناصر روی و نیکل بود. بر همین اساس، غلظت کل و قابل دسترس عناصر روی و نیکل و همچنین برخی از شاخص‌های آلودگی شامل ضریب آلودگی (CF)، درجه آلودگی (Cdeg)، بار آلودگی (PLI)، نسبت قابل جذب (AR) و زمین انباشت (Igeo) بررسی شد. براساس روش‌های استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست، در مجموع ۱۵۰ نمونه خاک انتخاب و از محدوده اطراف لندفیل در فاصله ۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری جمع‌آوری شد. نمونه خاک‌های شاهد در فاصله ۳ کیلومتری خارج از لندفیل قرار داشت. برای پهنه‌بندی فاکتورهای اندازه‌گیری شده از روش وزندهی معکوس استفاده شد. بیشترین غلظت کل روی و نیکل خاک به ترتیب ۱۵۵ و ۱۰/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. ضریب آلودگی (CF) برای هر دو عنصر ۱ و درجه آلودگی (Cdeg) و بار آلودگی (PLI) به ترتیب برابر با ۲ و ۰/۹۸ و زمین انباشت (Igeo) برای عنصر روی و نیکل به ترتیب ۰/۶۲- و ۰/۷۶- بود. نتایج نشان داد که غلظت کل و قابل جذب روی و نیکل کمتر از حد مجاز گزارش شده توسط سازمان محیط زیست ایران بود و فعالیت سه ساله لندفیل بر غلظت کل و قابل جذب و شاخص‌های آلودگی خاک تأثیر معنی‌داری نداشت.

واژه‌های کلیدی: بار آلودگی، درجه آلودگی، زمین انباشت، قابل جذب، لندفیل

Investigating the index of zinc and nickel pollution in the soils around the Sardehat landfill in Zanjan

F .Mehdiloo^{1*}, M. Babaakbari sari¹, A. Hassani¹, M. Tafvizi¹, H. Ojaghloou²

1. Department of soil science, faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

* Corresponding Author, Email: farhad.m@znu.ac.ir

Received: October 2024 Accepted: December 2026

DOI: 10.30470/jsp.2026.735655

Abstract

Sardehat Jafari Landfill has been the burial place of the mineral wastes of Roy Zanjan since 2019. According to the environmental issues and according to the soil protection law, it is necessary to monitor the concentration of heavy elements around this landfill. The purpose of this study was to investigate the effect of Sardehat Zanjan landfill on the contamination of the soils around the landfill area with zinc and nickel elements. Based on this, the total and accessible concentration of zinc and nickel elements as well as some pollution indicators including pollution coefficient (CF), Degree of contamination (Cdeg), PLI load, Available Ratio (AR) and Geo-accumulation Index (Igeo) . Based on the standard methods of the Environmental Protection Organization, a total of 150 soil samples were selected and collected from the area around the landfill at a distance of 0, 250, 500 and 1000 meters. The reference soil sample was located 3 km away from the landfill. Inverse weighting method was used for zoning the measured factors. The highest concentration of total soil zinc and nickel was 155 and 10.58 mg/kg, respectively. The pollution factor (CF) for both elements is 1 and the degree of pollution (Cdeg) and PLI load) are equal to 0.2 and 0.98, respectively, and the Geo-accumulation Index (Igeo) for zinc and nickel elements are -0.62 and -0.76, respectively. The results showed that the total and absorbable concentration of zinc and nickel was lower than the permissible limit reported by Iran's environmental organization, and the 3-year activity of Sardehat landfill had no significant effect on the total and absorbable concentration and soil pollution indicators.

Keywords: Available ratio, degree of contamination, geo-accumulation index, landfill, pollution load index.

مقدمه

مختلف اشاره نمود (Alloway, 2012).

به‌ویژه، اکثر خاک‌های اطراف شهرک‌های صنعتی و معادن، تحت تأثیر جریان یافتن شیرابه‌ها و همچنین شستشو یافتن پسماندها در اثر بارش باران، آلوده به فلزات سنگین می‌شوند (Lucho-Constantino et al., 2005).

امروزه صنعت استخراج فلزات از خاک معادن از اهمیت بالایی برخوردار است و به عنوان یک صنعت مادر در تولید شمش‌ها و سایر عناصر معدنی، کاربرد فراوانی دارد (Teplica et al., 2021). با این وجود، استخراج کانی‌ها از معادن اثرات جبران ناپذیری بر محیط زیست وارد می‌کند (Hubert et al., 2019). همچنین، عملیات معدن‌کاوی و استخراج بی‌رویه تسطیح اراضی و حفر گودال‌ها، باعث از بین رفتن کیفیت مطلوب خاک و فقیر شدن آن از لحاظ حاصلخیزی می‌شود (Sahu and Dash., 2011).

در گذشته دفن پسماندها به صورت تلنبارهای پسماند شهری و صنعتی انجام می‌شد. با گذشت زمان و افزایش توجه به بحث حفاظت از محیط زیست، قوانین دفن پسماند بسیار سختگیرانه‌تر صورت گرفت، به طوری که امروزه لندفیل^۱ (محل دفن پسماند) به عنوان یک سیستم کاملاً مهندسی شده به منظور محصورسازی پسماندها و جلوگیری از نفوذ آلاینده‌ها به درون محیط خارج از آن اعم از خاک، آب و هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو نوع لندفیل باز و بسته وجود دارد که هر دو باید به صورت مهندسی شده از نظر بستربندی و نوع پوشش مناسب (کاور) روی آن‌ها انجام گیرد (Manyuchi et al., 2017). قبل از دفن پسماندها، به منظور جلوگیری از نفوذ شیرابه به آب‌های زیرزمینی و سطحی بستر محل دفن خاک‌کوبی می‌شود همچنین، برای جلوگیری از ایجاد گرد و غبار حاصل از پسماندها، بعد از هر لایه دفن پسماند مجدد روی پسماند خاک‌کوبی صورت می‌گیرد. در پژوهشی که توسط (Aird, 2017) روی بررسی تأثیر

از دیدگاه جهانی، خاک به عنوان یکی از ارکان اصلی محیط زیست و بستر اصلی تولید غذا، همواره در معرض خطر آلودگی ناشی از فلزات سنگین قرار دارد. ورود این عناصر غیرقابل تجزیه به خاک نه تنها حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی را کاهش می‌دهد، بلکه به دلیل جذب توسط گیاهان و ورود به زنجیره غذایی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و امنیت غذایی محسوب می‌شود. در این میان، فعالیت‌های صنعتی و استقرار واحدهای تولیدی در مجاورت اراضی کشاورزی، نقش بسزایی در افزایش غلظت فلزاتی نظیر سرب، کادمیوم و نیکل در خاک ایفا می‌کند، امری که پایش مستمر و ارائه راهکارهای اصلاحی را ضروری می‌سازد (Crane, 2013).

فلزات سنگین، پایدارترین و پیچیده‌ترین آلاینده‌ها از نظر پایش در طبیعت هستند که نه تنها کیفیت اتمسفر، پیکره‌های آبی و محصولات غذایی را کاهش می‌دهند، بلکه سلامت انسان‌ها را نیز به خطر می‌اندازند. از سوی دیگر بر خلاف اکثر ترکیبات آلی، فلزات سنگین به دلیل عدم تجزیه متابولیکی، در بافت‌های موجودات زنده انباشت می‌شوند. در بین فلزات سنگین، عناصر روی، نیکل، کبالت سمیت نسبتاً بیشتری را برای گیاهان ایجاد می‌کنند، در مقابل، سمیت عناصر کادمیوم، سرب، کروم، آرسنیک و جیوه بیشتر بر حیوانات اثرگذار می‌باشند (McBride, 1994).

فلزات سنگین از طریق فرایندهای پدوژنیکی (طبیعی) و همچنین فعالیت‌های انسانی به محیط خاک اضافه می‌گردند. از منابع انسانی ورود فلزات سنگین به خاک می‌توان به: فعالیت مناطق صنعتی، پسماندهای معادن، دفع زباله‌های حاوی مقادیر بالای فلز، کاربرد کودهای شیمیایی و دامی، لجن فاضلاب، آفت‌کش‌ها، آبیاری با پساب، بقایای احتراق زغال سنگ، نشن فرآورده‌های پتروشیمی و نهشته‌های اتمسفری حاصل از منابع

¹ Landfill

در بنگلادش آنالیز انجام شده از شیرابه حاصل از دفن پسماندها نشان داد که فلزات سنگین موجود در شیرابه‌ها باعث آلودگی خاک و آب منطقه شده است. همانطور که بیان شد، این امکان وجود دارد که لندفیل‌ها، خاک مناطق دفن و اطراف منطقه را تحت تأثیر قرار دهند و موجب بروز آلودگی خاک‌ها به برخی از عناصر سنگین شوند. بنابراین، بررسی خاک‌های اطراف لندفیل می‌تواند حائز اهمیت باشد. روی و نیکل هر دو از عناصر مهم به شمار می‌روند، زیرا روی برای گیاهان و حیوانات در غلظت‌های کم لازم و ضروری است و در بسیاری از آنزیم‌های گیاهان وجود دارد ولی در غلظت‌های بالا بسیار سمی است (Alloway, 2012). نیکل نیز یک عنصر بالقوه سمی است، آلودگی نیکل می‌تواند از طریق هوا و خاک به طور مستقیم به آب‌های سطحی انتقال و همچنین از طریق رسوب و رواناب از خاک یا به طور غیرمستقیم از طریق شستشو وارد آب‌های زیرزمینی گردد.

در طی چند دهه‌ی اخیر، استخراج‌های بی‌رویه از معادن کشور و استفاده ناصحیح از پسماندها موجب گردید تا پسماندها و شیرابه‌های حاصل از پسماندها اثر سوء بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها، گیاهان، سلامت انسان و بطور کلی کیفیت زندگی موجودات زنده داشته باشند. وجود لندفیل‌ها و دفع صحیح پسماندها می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر بهتر شدن کیفیت زندگی موجودات زنده بخصوص انسان‌ها داشته باشد. لذا، آگاهی از اثرات لندفیل بر خاک‌های اطراف منطقه می‌تواند اهمیت بالایی داشته باشد. بر همین اساس، در این تحقیق سعی بر این بوده که تا احتمال آلوده شدن خاک به عناصر روی و نیکل تحت تأثیر لندفیل سردهات (واقع در استان زنجان) مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، غلظت و برخی شاخص‌های آلودگی خاک برای عناصر روی و نیکل اندازه‌گیری و ارزیابی شد.

گازهای خارج شده از لندفیل بر ساکنان نزدیک و دور از لندفیل شد، مشاهده شد که عمدتاً اختلاف معنی‌داری در علائم تنفسی و بیماری‌هایی ریوی و آسم بین خانواده‌هایی که نزدیک لندفیل هستند با خانواده‌هایی که دور از لندفیل زندگی می‌کنند، وجود داشت. همچنین محققین بررسی‌های مختلفی در رابطه با تأثیر لندفیل‌ها بر خاک‌های اطراف محدوده‌ی لندفیل انجام داده‌اند. آدلپو و همکاران (Adelopo et al., 2018) با بررسی غلظت فلزات سنگین در آب، خاک و گیاه در اطراف محل دفن پسماند در بنگلادش گزارش دادند که غلظت فلزات مختلف مانند آهن، روی، مس، منگنز، سرب و کادمیوم بیش از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت (WHO¹) بود. مرزوقی و همکاران (Marzougui et al., 2017) نیز طی بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک لندفیل کشور تونس دریافتند که بیشترین غلظت عناصر مربوط به نیکل و کروم و کمترین غلظت مربوط به عناصر سرب و مس بود، همچنین بیان کردند که بالا بودن مقدار رس در خاک منطقه مانع رسیدن فلزات به اعماق بیشتر خاک شد و طی بررسی کلاس ارزیابی فاکتور آلودگی، نشان دادند که نمونه‌ها دارای آلودگی متوسط به فلزات سنگین بودند. همین‌طور طی آزمایشی که توسط آیدی (Aydi, 2015) انجام گرفت بیشترین آلودگی در خاک لندفیل واقع در مالزی، مربوط به فلز سرب بود. در پژوهشی دیگر، خانلری و همکاران (Khanlari et al., 2013) تأثیر شیرابه‌های محل دفن زباله در همدان را بر آب‌های زیرزمینی مورد ارزیابی قرار دادند که لندفیل موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی شد و دلیل آن را طراحی نامناسب محل دفن زباله و عدم وجود پوشش مناسب بستر محل دفن عنوان نمودند و همچنین با بررسی غلظت برخی عناصر در خاک مشخص شد که غلظت عناصر آهن و منگنز بیش از حد استاندارد بود. در پژوهش انجام شده توسط پروین و طارق (Parvin and Tareq, 2021)

¹ World Health Organization

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

استان زنجان با تولید ۸۰ درصد شمش روی کشور، اولین و بزرگترین تولیدکننده شمش روی خاورمیانه بوده و شمش روی، عمده محصول صادراتی این استان است. لندفیل سردهات با موقعیت جغرافیایی (زون شمالی غربی) در نزدیکی روستای سردهات بیات جعفری واقع شده است.

نقاط نمونه برداری و آماده‌سازی نمونه‌های خاک

به طور کلی ۱۵۰ نمونه خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر جمع‌آوری گردید. روش نمونه‌برداری به صورت شبکه منظم از فاصله‌های ۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ متری اطراف محدوده لندفیل انجام شد (شکل ۲). نمونه‌های خاک شاهد از مناطق واقع در فاصله سه کیلومتری از لندفیل جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های خاک از قبیل: بافت خاک، به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (Walkley and Black, 1934)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH در عصاره گل اشباع (Burt, 2004) اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری غلظت قابل جذب و کل عناصر روی و نیکل به ترتیب از روش‌های DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) و اسید نیتریک غلیظ و اسید هیدروکلریک غلیظ (EPA, 1694) استفاده گردید. غلظت عناصر در عصاره‌ها با استفاده از دستگاه جذباتمی (مدل واریان) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری شاخص‌های آلودگی

به منظور بررسی احتمال آلودگی روی و نیکل در خاک‌های اطراف منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر لندفیل، برخی شاخص‌های آلودگی مورد ارزیابی قرار گرفت. در بسیاری از مطالعات در کشورهای مختلف جهان، برای

تخمین سطوح آلودگی از این شاخص‌ها استفاده شده است (Kim ; Gong et al., 2010; Liu et al., 2005 et al., 2005)

ضریب آلودگی یا فاکتور آلودگی PI^۱

ضریب آلودگی برای بیان آلودگی خاک به یک عنصر برای بیان می‌شود (Hakanson, 1980).

$$PI = \frac{Cn}{Cr} \quad \text{رابطه ۱}$$

CF: ضریب آلودگی، C_n و C_r به ترتیب غلظت فلز در نمونه مورد بررسی و نمونه مرجع (غلظت زمینه) می‌باشد. که غلظت زمینه در عمق یک تا دو متری منطقه غیرآلوده با همان ویژگی‌های خاکی منطقه آلوده بیان می‌شود. کلاس‌های آلودگی شامل: آلودگی کم (CF < ۱)، آلودگی متوسط (۱ ≤ CF < ۳)، آلودگی زیاد (۳ ≤ CF < ۶) و آلودگی بسیار زیاد (CF ≥ ۶) است.

درجه آلودگی Cdeg^۲

مجموع ضرایب آلودگی همه عناصر در یک محیط (رابطه ۲)، درجه آلودگی محیط را نشان می‌دهد (Hakanson, 1980) که به چهار کلاس ۸ < Cdeg، ۸-۱۶، ۱۶-۳۲ و Cdeg > 32 تقسیم می‌شود که به ترتیب درجه آلودگی کم، آلودگی متوسط، آلودگی زیاد و آلودگی بسیار زیاد کلاس‌بندی می‌شود:

$$Cdeg = \sum_{i=1}^n Cf \quad \text{رابطه ۲}$$

Cf: ضریب آلودگی، n: تعداد فلزات مورد بررسی است.

شاخص بار آلودگی (PLI^۳)

این شاخص نیز برای ارزیابی کل درجه آلودگی در خاک، استفاده می‌شود (رابطه ۳). این شاخص راه آسانی برای اثبات تخریب خاک در اثر انباشت فلزات سنگین را فراهم می‌سازد. شاخص بار آلودگی از رابطه زیر به دست می‌آید (Kowalska et al., 2018).

$$PLI = \sqrt[n]{PI1 \times PI2 \times PI3 \times \dots \times PIn} \quad \text{رابطه ۳}$$

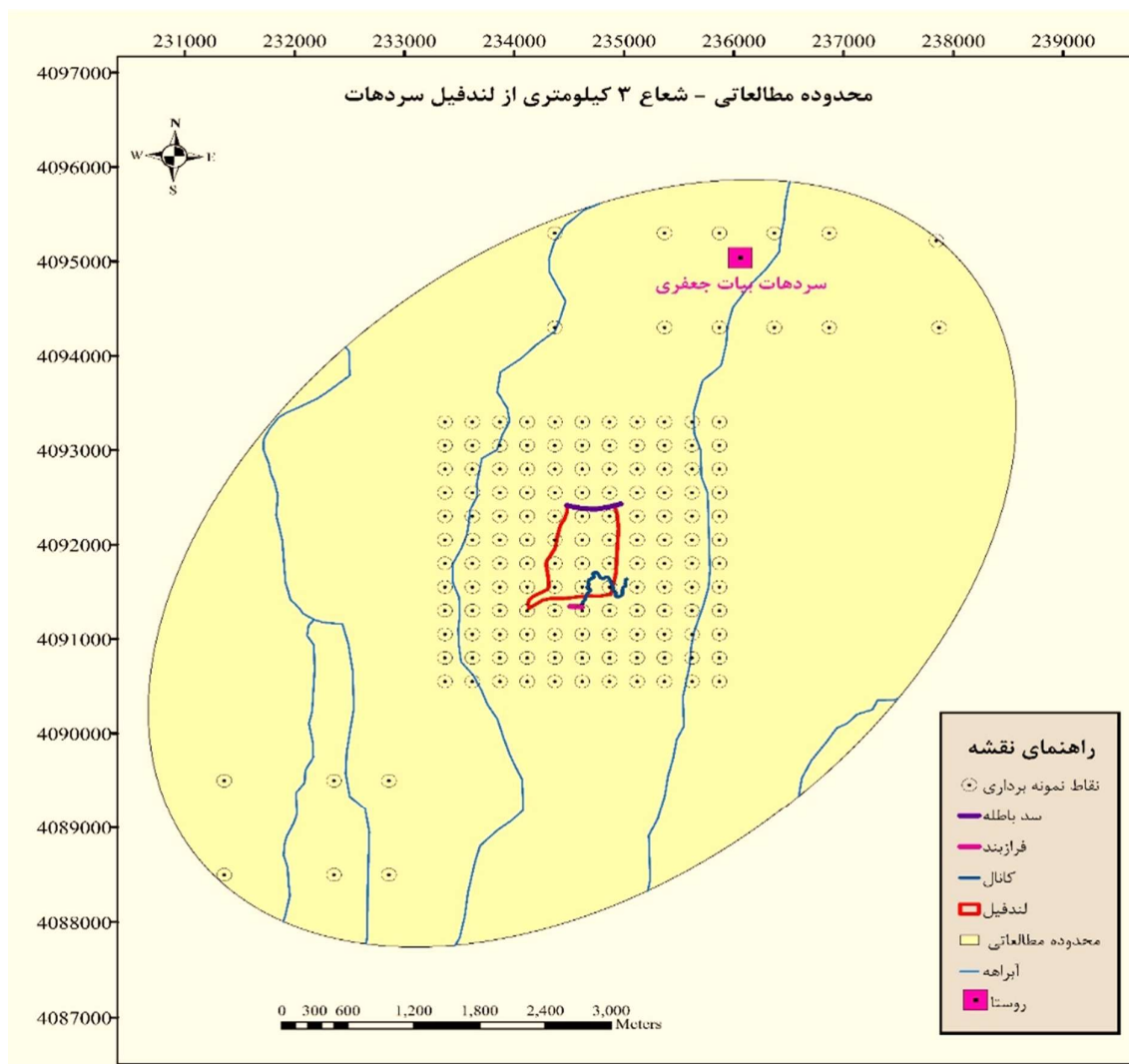
³ Pollution Load Index

¹ Pollution index

² Degree of contamination

شامل $PLI < 1$ ، $PLI = 1$ و $PLI > 1$ که به ترتیب نشان‌دهنده کلاس بدون آلودگی، آلودگی متوسط و آلودگی زیاد است.

n: تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه و PLI شاخص آلودگی است. کلاس آلودگی خاک براساس این شاخص



شکل ۱- نقاط نمونه برداری

غلظت زمینه فلز مورد نظر است (Massas et al., 2013).

شاخص زمین انباشت (I_{geo}^2)

شاخص زمین انباشتگی (Muller, 1969) از دیگر معیارهای ژئوشیمیایی ارزیابی آلودگی عناصر سنگین در خاک می‌باشد

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{Ci}{1/5Cri} \right) \quad \text{رابطه ۵}$$

شاخص نسبت قابل جذب (AR^1)

برحسب تعریف، مقادیر AR عبارتند از شاخص‌های قابلیت جذب فلزات که براساس غلظت‌های کل هر فلز نرمال‌سازی شده‌اند و در نتیجه درصد قابل جذب از مقدار غلظت کل هر فلز را در خاک نشان می‌دهند.

$$10^2 AR = \left(\frac{Ci}{Cri} \right) \times \quad \text{رابطه ۴}$$

AR : نسبت قابل جذب، Ci : غلظت قابل جذب فلز و Cri :

² Geo-accumulation Index

¹ Available Ratio

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad \text{رابطه ۷}$$

$Z^*(xi)$: مقدار برآورد شده‌ی متغیر مورد نظر؛ $Z(xi)$: مقدار اندازه‌گیری شده‌ی متغیر مورد نظر؛ N : تعداد داده‌ها؛ MAE : میانگین مطلق خطا و MBE : میانگین خطای انحراف می‌باشد.

هر اندازه دو معیار MAE و MBE به صفر نزدیک‌تر نشان‌دهنده اختلاف کمتر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای است. در این مطالعه مقایسه بر اساس معیار اصلی MAE صورت گرفته است و در شرایطی که نتوان به کمک MAE قضاوت کرد، از معیار MBE به عنوان معیار کمکی استفاده شده است.

نتایج و بحث

در جدول ۱ برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک ارائه شده است. براساس نتایج بدست آمده، مقدار pH در نمونه‌های خاک در محدوده بین $7/3$ تا $8/5$ بود که نشان‌دهنده وجود خاصیت قلیایی در خاک‌های اطراف منطقه مطالعه شده است. با توجه به اینکه، pH خاک، داده‌ای تبدیل شده و لگاریتمی از تغییرات pH است، لذا در مقایسه با سایر ویژگی‌های خاک، همواره کمترین پراکندگی و انحراف معیار را دارد. بررسی هدایت الکتریکی نمونه‌ها نیز نشان داد که میزان شوری در اغلب نمونه‌های خاک کمتر از حد مجاز برای شور بودن خاک بود. به طوری که، میانگین هدایت الکتریکی در نمونه‌ها برابر با 976 میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود. در بین نمونه‌های بررسی شده، بیشترین مقدار هدایت الکتریکی برابر با 8678 میکروزیمنس بر متر بود که دلیل بالا بودن آن در برخی نقاط احتمالاً می‌تواند مربوط به کاربرد کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی باشد. نتایج اندازه‌گیری بافت خاک نیز نشان داد که در محدوده اطراف لندفیل، مقدار شن در

I_{geo} : شاخص انباشت ژئوشیمیایی، C_i : غلظت فلز سنگین در خاک و C_{ri} : غلظت زمینه می‌باشد. ضریب $1/5$ ضریب تصحیح می‌باشد که به منظور کمینه کردن اثر تغییر احتمالی در غلظت‌های زمینه که عموماً به تغییرات سنگ‌شناسی خاک و تأثیر عوامل انسانی نسبت داده می‌شود، اعمال شده است (Muller, 1969).

شاخص زمین انباشت شامل شش کلاس آلودگی است که به ترتیب آلودگی عبارتند از کلاس بدون آلودگی $I_{geo} \leq 0$ ، بدون آلودگی تا نسبتاً آلوده $1-0$ ، نسبتاً آلوده $2-1$ ، نسبتاً آلوده تا آلودگی زیاد $3-2$ ، آلودگی زیاد $4-3$ و آلودگی زیاد تا آلودگی بسیار زیاد $5-4$ (Muller, 196).

روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

توصیف آماری داده‌های به دست آمده شامل بررسی نرمال بودن توزیع هرکدام از متغیرها، میانگین، میانه، حداقل، حداکثر و واریانس با استفاده از نرم افزار SPSS 14.0 مورد بررسی قرار گرفت. داده‌هایی که فاقد توزیع نرمال بودند در صورت امکان با استفاده از تبدیل‌گر باکس کاکس، نرمال شدند و سپس بررسی‌های زمین‌آماری روی آن‌ها انجام شد. در مرحله بعد، از روش‌های کریجینگ معمولی (توابع دایره‌ای، کروی، گوسی، نمایی و درجه دو منطقی)، روش وزن‌دهی فاصله معکوس و روش توابع پایه شعاعی برای تحلیل مکانی داده‌ها و رسم نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده شد که با توجه به بررسی انجام شده بهترین روش برای بررسی زمین‌آماری عنصر روی و نیکل از روش وزن‌دهی معکوس استفاده شد. برای انجام این پژوهش نرم‌افزارهای EXCEL، ArcGIS 10.2، GS+، SPSS مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق از دو معیار دقت (MAE^1) و انحراف (MBE^2) استفاده شده است. روش محاسبه این روش‌ها به شرح زیر است:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad \text{رابطه ۶}$$

² Mean Bias Error

¹ Mean Absolute Error

مقایسه با ذرات رس و سیلت بیشتر بود که نشان می‌دهد بافت اغلب خاک‌ها سبک است.

جدول ۱- آمار توصیفی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک

ویژگی خاک	میانگین	میان	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
پهش	۷/۹۷	۷/۹۵	۰/۱۹	۷/۳۰	۸/۵۲
هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	۹۷۶	۶۴۲	۹۸۰	۳۴۵	۸۶۷۸
کربن آلی (گرم بر کیلوگرم)	۸/۱۳	۷/۴۲	۲/۲۳	۴/۸۴	۱۸/۴
شن (گرم بر کیلوگرم)	۶۲۰	۶۳۷	۹۸/۲	۲۲۵	۸۵۰
سیلت (گرم بر کیلوگرم)	۲۸۸	۲۷۵	۷۹/۹	۷۵	۵۷۵
رس (گرم بر کیلوگرم)	۹۱	۲۷۵	۳۰/۵	۲۵	۲۷۵
روی کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۶۸/۱۱	۶۱/۵۰	۳۲/۸۱	۱۹	۱۵۵
روی قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱/۴۲	۱/۰۱	۱/۲۶	۶/۶۹	۰/۴۸
نیکل کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۲۳/۸۵	۲۴/۰۰	۴/۸۷	۳۸/۰۰	۱۰/۵۸
نیکل قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۲۸

روی کل و قابل جذب

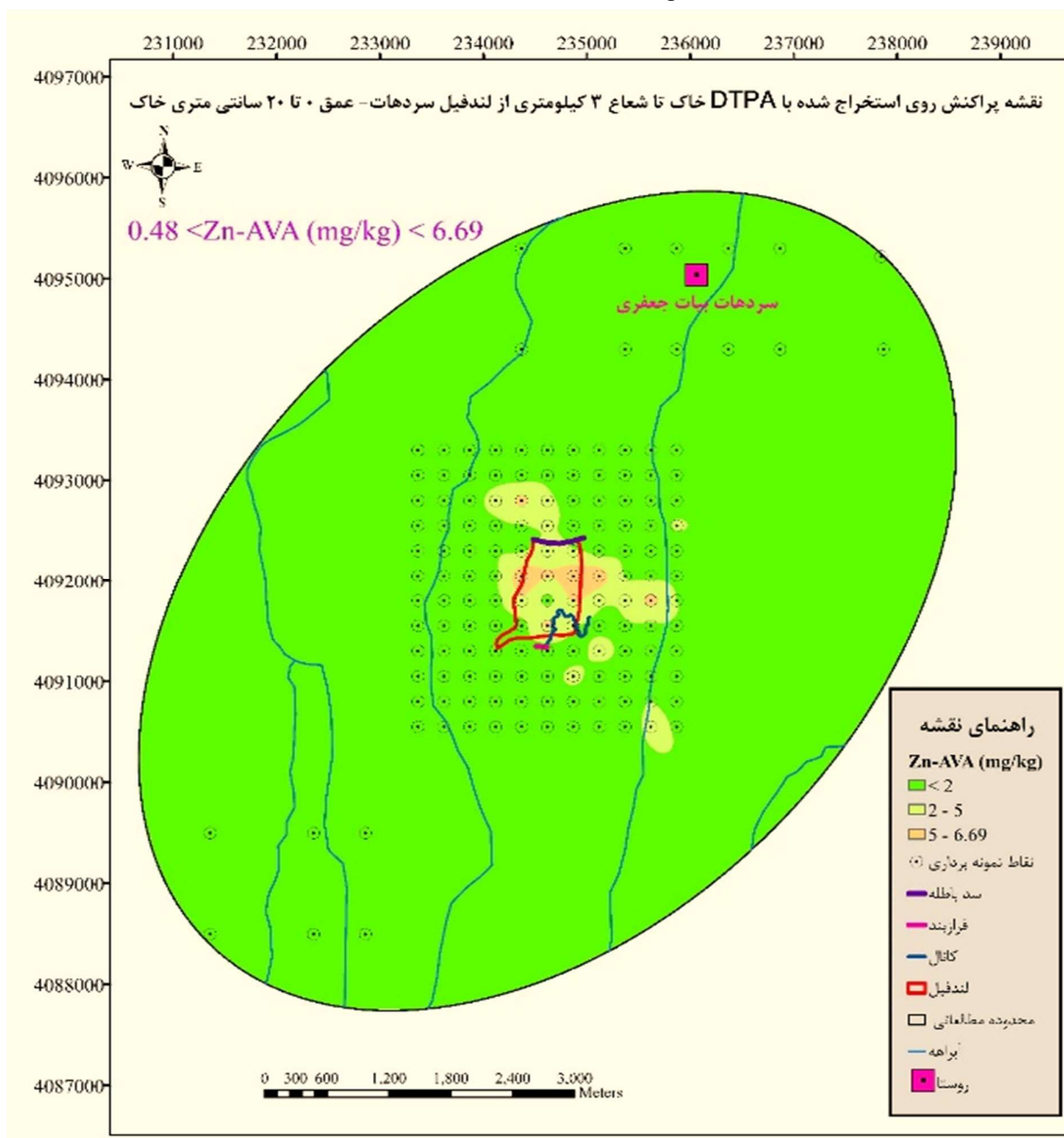
نمونه‌های خاک کمتر از حد مجاز بود (شکل ۴). بیشترین غلظت روی کل در محدوده جنوب و شمال غربی لندفیل با دامنه ۱۰۰ تا ۱۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک دیده شد. غلظت روی قابل جذب در خاک‌ها بین ۱/۲۶ تا ۶/۶۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و میانگین غلظت آن ۱/۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. برای روی قابل جذب هیچ‌گونه استاندارد بین المللی و یا منطقه‌ای به عنوان حد مجاز وجود ندارد، اما در برخی منابع حد مجاز آن ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تعیین شده است (Kaur and Rani, 2006) بر اساس نقشه تهیه شده برای روی قابل جذب (شکل ۳) دیده می‌شود که در همه نمونه‌های خاک، مقدار روی قابل جذب کمتر از حد مجاز است. بیشترین غلظت روی قابل جذب در محدوده مرکزی داخل لندفیل با دامنه ۵ تا ۶/۶۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک دیده شد.

جدول ۲- حد مجاز کل و قابل جذب عنصر نیکل و روی

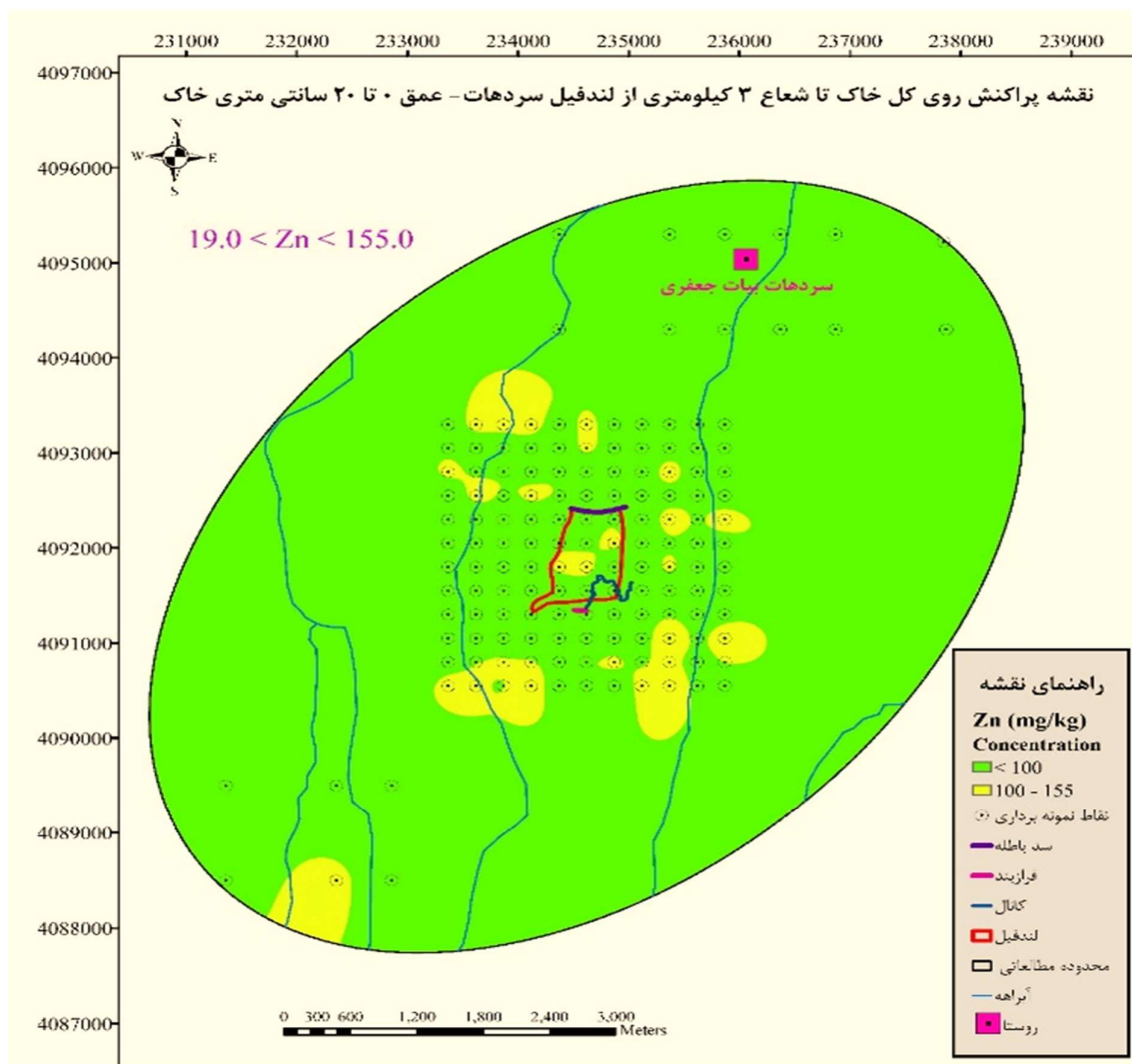
عنصر	نماد	حد مجاز کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	منبع	حد مجاز قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	منبع
روی	Zn	۵۰۰	محیط زیست ایران	۱	(Yang et al., 2018)
نیکل	Ni	۱۱۰	محیط زیست ایران	۱	(Yang et al., 2018)

همكاران (Borah et al., 2020) هم خواني داشت و آلودگي روي كل و قابل جذب در منطقه مورد مطالعه کمتر از حد استاندارد بود و ميزان شاخص‌هاي آلودگي اندازه‌گيري شده در منطقه از قبيل ضريب آلودگي، درجه آلودگي، بارآلودگي، قابل دسترس و زمين انباشت کمتر بود.

نتايج غلظت روي كل نشان داد كه در تمام نقاط نمونه برداري شده اطراف لندفيل غلظت عنصر تغيير معني‌داري نداشت و از نظر آماري با نتايج نقاط شاهد در محدوده‌ي سه كيلومتری تفاوت نداشت. غلظت روي كل در تمام نقاط کمتر از حد مجاز در کاربري كشاورزي و منابع طبيعي بود و در کاربري صنعتي نيز غلظت كل عنصر روي کمتر از حد مجاز بود، كه با نتايج بوره و



شكل ۲- نقشه روي قابل جذب



شکل ۳- نقشه روی کل خاک

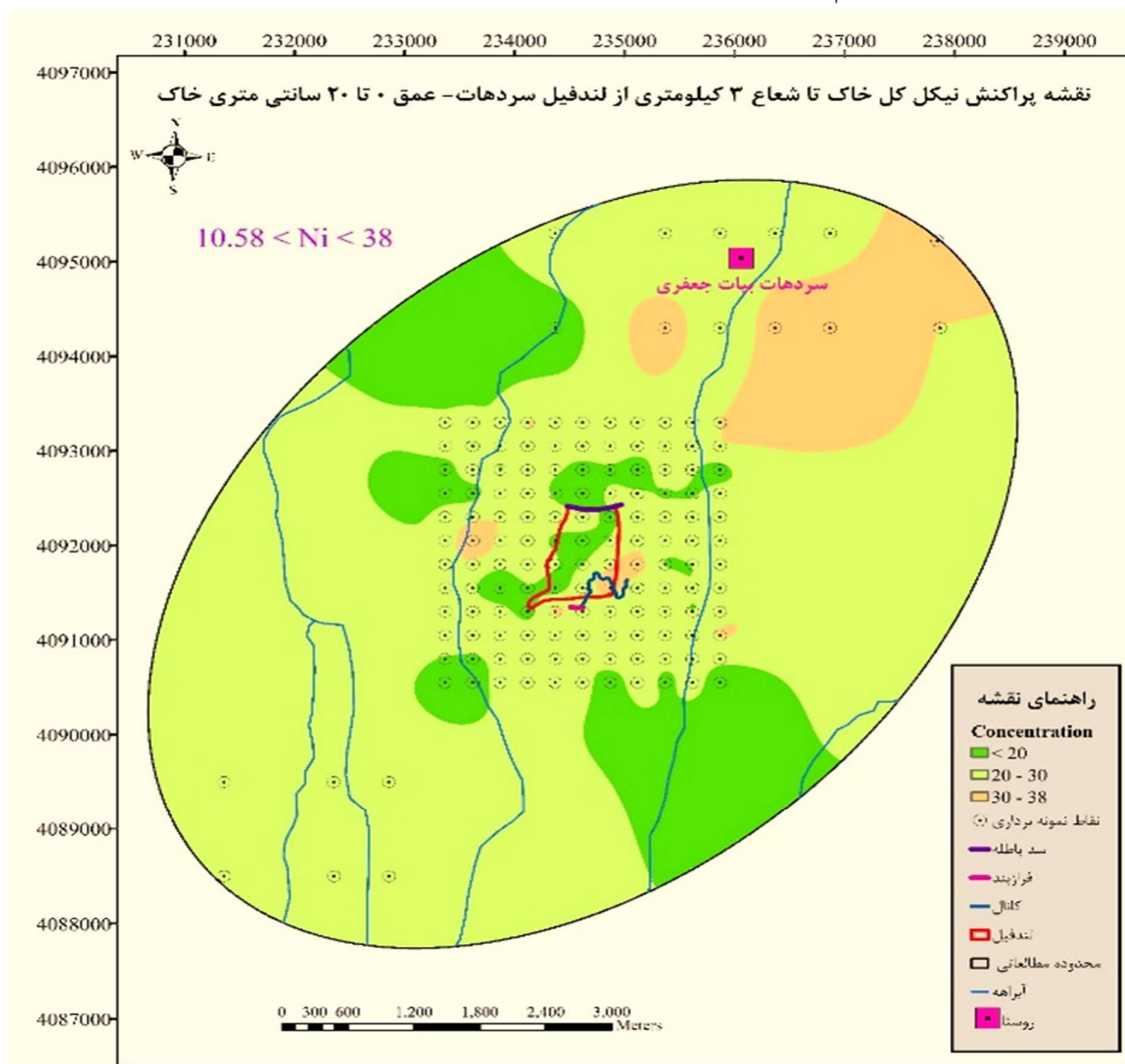
نیکل کل و قابل جذب

نتایج به دست آمده نشان داد که غلظت نیکل کل در خاکهای اطراف لندفیل بین ۱۰/۵۸ تا ۲۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و میانگین غلظت آن ۲۳/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مطابق با جدول ۲ و با در نظر گرفتن حد مجاز نیکل کل در خاکها (۱۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مشاهده گردید که در غلظت نیکل کل در خاکهای منطقه مطالعه شده، کمتر از حد مجاز است (شکل ۵). بیشترین غلظت نیکل کل در محدوده شمال شرقی خارج از محدوده لندفیل با دامنه ۳۰ تا ۲۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. در شکل ۵ غلظت نیکل قابل جذب ارائه شده است، نتایج نشان داد

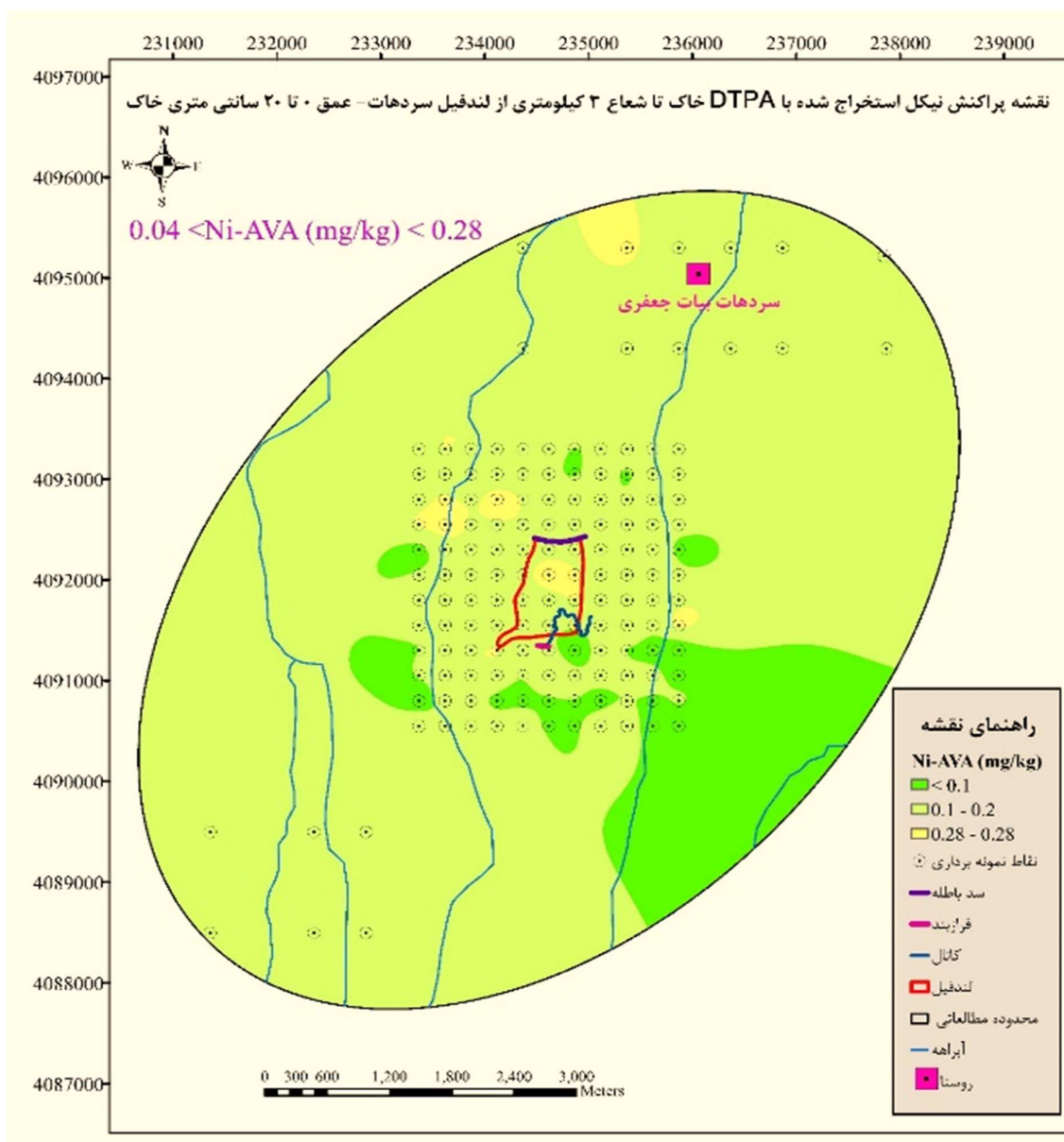
که غلظت نیکل قابل جذب در نمونه‌ها بین ۰/۰۴ تا ۰/۲۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تغییر بود و میانگین غلظت آن ۰/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. برای نیکل قابل جذب نیکل استاندارد بین المللی و یا منطقه‌ای وجود ندارد ولی برخی پژوهشگران برای آن پیشنهاداتی ارائه کرده اند. یانگ و همکاران (Yang et al., 2018) غلظت یک میلی‌گرم بر کیلوگرم را برای نیکل قابل جذب و همچنین روی قابل جذب در خاک غیر آلوده به عنوان حد مجاز مشخص نموده‌اند. در صورتی که حد مجاز نیکل قابل جذب در خاکها، یک میلی‌گرم بر کیلوگرم در نظر

مجاز در کاربری کشاورزی و منابع طبیعی بود و در کاربری صنعتی نیز غلظت کل نیکل کمتر از حد مجاز بود. شاخص‌های آلودگی در منطقه از قبیل ضریب آلودگی، درجه آلودگی، شاخص قابل دسترس و زمین انباشت در کلاس بدون آلودگی و بار آلودگی در کلاس آلودگی کم بود. نتایج غلظت نیکل کل و قابل جذب نشان داد که در تمام نقاط نمونه‌برداری شده اطراف لندفیل غلظت عنصر تغییر معنی داری نداشت که با نتایج اولورانت و کوماراس (Agboola et al., 2020; Kumara, 2010) مطابقت دارد.

گرفته شد. براساس نقشه تهیه شده برای نیکل قابل جذب (شکل ۶) دیده می‌شود که در همه خاک‌های منطقه مطالعاتی مقدار نیکل قابل جذب کمتر از حد مجاز است. بیشترین غلظت نیکل قابل جذب در محدوده مرکزی داخل لندفیل و شمال غربی خارج از لندفیل با دامنه ۰/۲۰ تا ۰/۲۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک دیده شد. نتایج غلظت نیکل کل نشان داد که در تمام نقاط نمونه‌برداری شده اطراف لندفیل غلظت عنصر تغییر معنی داری نداشت و از نظر آماری با نتایج نقاط شاهد در محدوده ۳ کیلومتری تفاوت نداشت. غلظت نیکل کل در تمام نقاط کمتر از حد



شکل ۴- نقشه نیکل کل خاک



شکل ۵- نقشه نیکل قابل جذب

نشان دهنده آلودگی کم تا متوسط می باشد.

شاخص درجه آلودگی (Cdeg)

این شاخص در همه نقاط به دست آمده کمتر از ۸ بود که

بیانگر آلودگی کم می باشد (Hakanson, 1980). درجه

آلودگی ۲ به دست آمد.

شاخص بار آلودگی (PLI¹)

بررسی شاخص های آلودگی برای عنصر روی و نیکل

شاخص آلودگی CF

این شاخص در خاکها برای دو عنصر روی و نیکل برابر

۱ است. بر اساس نتایج به دست آمده شاخص Cf برای

هر دو عنصر در اغلب نقاط کمتر از ۲ به دست آمد که

¹ Pollution Load Index

داشت (Massas et al., 2013).

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که فعالیت‌های دفن پسماندها در لندفیل سردهات جعفری تأثیر معنی‌داری بر غلظت کل و قابل استخراج با DTPA عناصر روی و نیکل نداشت و همچنین شاخص‌های محاسبه شده ضریب آلودگی، درجه آلودگی، بار آلودگی و زمین انباشت و نسبت قابل جذب در کلاس بدون آلودگی تا آلودگی کم قرار داشت. احتمالاً با توجه به انتقال و دفن پسماندهای معدنی در حدود سه سال قبل از پایش و همچنین استفاده از کامیون‌های سربسته انتقال پسماند در این لندفیل و آسفالت بودن جاده منتهی به لندفیل از دلایل اصلی عدم تغییر غلظت این دو عنصر نسبت به مناطق شاهد است اما با توجه به اهمیت موضوع لازم است این پایش و بررسی شاخص‌های آلودگی خاک به ویژه در اطراف مسیرهای حمل و نقل و مسیل‌های پائین دست انجام شود.

با توجه به شاخص بار آلودگی بدست آمده (۰/۹۸) که تقریباً برابر با ۱ است در کلاس آلودگی کم قرار دارد (Kowalska et al., 2018) که با نتایج بهونیا و همکاران در سال ۲۰۱۰ همخوانی دارد.

شاخص زمین انباشت (Igeo)

شاخص زمین انباشت محاسبه شده به وسیله فرمول برای روی و نیکل به ترتیب $0/62$ و $0/76$ محاسبه شد با توجه به کلاس بندی مولر 1969 و $I_{geo} \leq 0$ در کلاس بدون آلودگی قرار دارند. که با نتایج کرباسی و همکاران (Karbasi et al., 2017) و بهویان و همکاران (Bhuiyan et al., 2010) همخوانی دارد.

شاخص نسبت قابل جذب (AR)

شاخص نسبت قابل جذب محاسبه شده دو عنصر نیکل و روی به ترتیب برابر $0/98$ و $1/64$ درصد محاسبه شد. که نسبت قابل جذب روی بیشتر از نیکل بدست آمد و نسب قابل جذب هر دو عنصر در کلاس آلودگی کم قرار

REFERENCES

- Adelopo, A. O., Haris, P. I., Alo, B. I., Huddersman, K., & Jenkins, R. O. (2018). Multivariate analysis of the effects of age, particle size and landfill depth on heavy metals pollution content of closed and active landfill precursors. *Waste Management*, 78, 227-237.
- Agboola, O., Babatunde, D. E., Fayomi, O. S. I., Sadiku, E. R., Popoola, P., Moropeng, L. & Mamudu, O. A. (2020). A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management. *Results in Engineering*, 8, 100-181.
- Aird, J. (2017). Challenges at MSW landfill sites. *Erosion Control*, May 2017.
- Alloway, B. J. (Ed.). (2012). Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Aydi, A. (2015). Assessment of heavy metal contamination risk in soils of landfill of Bizerte (Tunisia) with a focus on application of pollution indicators. *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3011-3021.
- Bhuiyan, M. A., Parvez, L., Islam, M. A., Dampare, S. B. & Suzuki, S. (2010). Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of hazardous materials*, 173(1-3), 384-392.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465.
- Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods a review. *International journal of food microbiology*, 94(3), 223-253.
- Crane, R. (2013). Concentrations of metals and metalloids in soils that have the potential to lead to exceedance of maximum limit concentrations of contaminants in food and feed. *Soil Use and Management*, 29(S1), 1-19.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, 14(8), 975-1001.
- Hubert, H., Akimpaya, B., & Bazimenyea, J. (2019). Evulation of soil contamination in mining area of

- RWANDA. *American Journal of Water Science and Engineering*, 5(1), 9-15.
- Karbasi, A., Lak, R., & Sanaei, M. (2017). Study on environmental geochemistry of toxic elements in the west area of Khoy city to the Razi border. *Journal of Environmental Science Studies*, 1(3), 57-66.
- Kaur, R., & Rani, R. (2006). Spatial characterization and prioritization of heavy metal contaminated soil-water resources in peri-urban areas of National Capital Territory (NCT), Delhi. *Environmental Monitoring and Assessment*, 123(1), 233-247.
- Khanlari, G., Taleb Beidokhti, A., Momeni, A. & Ahmadi, H. (2013). The effect of leachate of Hamedan landfill site on ground water. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 5, 81-92. (In Persian)
- Kowalska, J. B., Mazurek, R., Gąsiorek, M. & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination a review. *Environmental geochemistry and health*, 40, 2395-2420.
- Kumara, K. S., & Belagali, S. L. (2010). A Study on the Coliform Bacterial Density and Heavy Metal Concentration of Tumkur City Sewage. *Nature, Environment and Pollution Technology*, 9(2), 235-240.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Lucho-Constantino, C. A., Álvarez-Suárez, M., Beltrán-Hernández, R. I., Prieto-García, F., & Poggi-Varaldo, H. M. (2005). A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. *Environment international*, 31(3), 313-323.
- Manyuchi, M. M., Mbohwa, C., & Muzenda, E. (2017). Design considerations for an engineered landfill. In T. Issa, T. Issa, P. Isaias & A. Hol (Eds.), *Proceedings of the IADIS International Conference* (pp. 66-72). IADIS Press.
- Marzougui, A., & Ben Mammou, A. (2006). Impacts of the dumping site on the environment: Case of the Henchir El Yahoudia Site, Tunis, Tunisia. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(16), 1176-1183.
- Massas, I., Kalivas, D., Ehaliotis, C., & Gasparatos, D. (2013). Total and available heavy metal concentrations in soils of the Thriassio plain (Greece) and assessment of soil pollution indexes. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 6751-6766.
- McBride, M. B. (1994). *Environmental Chemistry of Soils* Oxford Press. New York.
- Muller, G. M. M. G. M. G. P. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- Parvin, F., & Tareq, S. M. (2021). Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: a systematic review and possible public health risks assessment. *Applied water science*, 11(6), 100.
- Qian, Y., Zheng, M., Gao, L., Zhang, B., Liu, W., Jiao, W., Zhao, X., & Xiao, K. (2005). Heavy metal contamination and its environmental risk assessment in surface sediments from Lake Dongting, People's Republic of China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 75(1), 204-210
- Sahu, H B., & Dash, S. (2011). Land Degradation due to Mining in India and its Mitigation Measures. Second International Conference on Environmental Science and Technology, February 26-28, 2011, Singapore.
- Teplica, D., Kovich, G., Srock, J., Whitaker, R., Jeffers, E., & Wagstaff, D. A. (2021). Newly identified gross human anatomy: eight paired vestigial breast mounds run along the embryological mammary ridges in lean adults. *Plastic and Reconstructive Surgery Global Open*, 9(10).
- USEPA, IRIS 1694. United States, Environmental Protection Agency, Integrated Risk Information System. [http](http://www.epa.gov/iris).
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Yang, Z., Jing, F., Chen, X., Liu, W., Guo, B., Lin, G., & Liu, W. (2018). Spatial distribution and sources of seven available heavy metals in the paddy soil of red region in Hunan Province of China. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-10.