



Research paper

(Received 10 Jun. 2026

Accepted 1 Sep. 2026)

Spatial distribution and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of the Chadegan-Aligudarz region

Artimes Ghassemi Dehnavi*

Assistant Professor, Department of Geology, Lorestan University

Abstract

Soil contamination with heavy metals is one of the major environmental challenges in areas with industrial and mining activities. This study aimed to evaluate and compare heavy metal contamination in the soils of Chadegan County (Isfahan Province) and Aligudarz County (Lorestan Province) both located in the Sanandaj-Sirjan structural zone. In this regard, 128 samples from Chadegan and 100 samples from Aligudarz were taken from a depth of 30 cm and chemically analyzed using ICP-MS. Geochemical indices of geoaccumulation (Igeo), contamination factor (Cf), contamination load index (PLI) and enrichment factor (EF), were calculated based on the global shale average, and the data were analyzed using Pearson correlation analysis, cluster analysis, and spatial processing using the Kriging method in ArcGIS software. The results showed that in Chadegan, the PLI index for all elements was less than one, and the contamination was at a low to moderate level. In contrast, Aligudarz shows significant contamination in five elements: nickel (PLI=6.04), chromium (PLI=4.45), scandium (PLI=4.37), cobalt (PLI=3.33) and lead (PLI=2.36). Chromium has the highest concentration in both regions (Chadegan: 184 and Aligudarz: 239 ppm), and the exceptional enrichment factor of zinc in Aligudarz (EF=60.09) is attributed to the activity of the lead and zinc mine in Golzard. The main source of contamination in Aligudarz was identified as mining activities and hydrothermal alteration of metamorphic rocks, while in Chadegan, it was a stone crushing plant without a filtration system. These findings confirm the need for continuous monitoring and the installation of pollution control equipment in both regions.

Keywords: Soil contamination, heavy metals, geo-accumulation index (Igeo), pollution load index (PLI), enrichment factor (EF).

*Corresponding Author: Artimes Ghassemi Dehnavi

Email: Ghassemi.a@lu.ac.ir

Phone: 09122308161



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۷/۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۲۰

توزیع مکانی و ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه چادگان - الیگودرز

آرتیمس قاسمی دهنوی*

استادیار گروه زمین شناسی دانشگاه لرستان

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم در مناطق دارای فعالیت‌های صنعتی و معدنی است. این پژوهش با هدف ارزیابی و مقایسه آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های شهرستان چادگان (استان اصفهان) و شهرستان الیگودرز (استان لرستان)، که هر دو در پهنه ساختاری سنج-سیرجان قرار دارند، انجام شده است. در این راستا، ۱۲۸ نمونه از چادگان و ۱۰۰ نمونه از الیگودرز از عمق ۳۰ سانتی‌متری برداشت و با روش ICP-MS تجزیه شیمیایی شد. شاخص‌های ژئوشیمیایی زمین‌انباشت (Igeo)، ضریب آلودگی (Cf)، شاخص بار آلودگی (PLI) و ضریب غنی‌شدگی (EF) بر مبنای میانگین شیل جهانی محاسبه شد و داده‌ها با تحلیل همبستگی پیرسون، تحلیل خوشه‌ای و پردازش مکانی به روش کریجینگ در نرم‌افزار ArcGIS بررسی شدند. نتایج نشان داد که در چادگان شاخص PLI برای همه عناصر کمتر از یک بوده و آلودگی در سطح پایین تا متوسط قرار دارد. در مقابل، الیگودرز آلودگی معناداری در پنج عنصر نیکل (PLI=6/04)، کروم (PLI=4/45)، اسکندیم (PLI=4/37)، کبالت (PLI=3/333) و سرب (PLI=2/36) نشان می‌دهد. کروم در هر دو منطقه بیشترین غلظت را داشته (چادگان: ۱۸۴ و الیگودرز: ۲۳۹) پی پی ام و ضریب غنی‌شدگی استثنایی روی در الیگودرز (EF=60/09) به فعالیت معدن سرب و روی گل‌زرد نسبت داده می‌شود. منشأ اصلی آلودگی در الیگودرز فعالیت‌های معدنی و دگرسانی هیدروترمال سنگ‌های دگرگونی، و در چادگان کارخانه سنگ‌شکن فاقد سیستم فیلتراسیون شناسایی شد. این یافته‌ها لزوم پایش مستمر و نصب تجهیزات کنترل آلودگی در هر دو منطقه را تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: آلودگی خاک، فلزات سنگین، شاخص زمین‌انباشت (Igeo)، شاخص بار آلودگی (PLI)، ضریب غنی‌شدگی (EF)

۱- مقدمه

آلودگی خاک به عنوان بخشی از تخریب زمین، ناشی از حضور مواد شیمیایی مصنوعی یا سایر تغییرات در محیط خاک است. فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه بودن، ماندگاری طولانی در محیط زیست و اثرات فیزیولوژیکی بر موجودات زنده، از خطرناک‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی به شمار می‌آیند [۱]. این فلزات پس از ورود به خاک، پیوندهای مستحکمی با ذرات خاک برقرار کرده و پاک‌سازی آن‌ها هزینه‌های بسیار زیادی را تحمیل می‌کند [۲]. مواجهه طولانی‌مدت انسان با فلزات سنگین از طریق زنجیره غذایی، آب آشامیدنی و استنشاق ذرات خاک با بیماری‌های سرطانی، اختلالات عصبی و نارسایی کلیوی مرتبط است [۳]. منابع آلودگی خاک به فلزات سنگین دارای دو منشأ اصلی است: (الف) منشأ زمین‌زاد شامل سازندهای زمین‌شناسی، معادن طبیعی و چشمه‌های معدنی؛ و (ب) منشأ انسان‌زاد شامل فعالیت‌های صنعتی، حمل و نقل، کاربرد کودها و آفت‌کش‌های کشاورزی و فعالیت‌های معدن‌کاری [۴]. با توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع، نگرانی قابل ملاحظه‌ای در مورد آلودگی خاک‌های شهری و منطقه‌ای وجود دارد [۵]. معدن‌کاری در مناطق کوهستانی ایران یکی از مهم‌ترین عوامل تغییر ترکیب شیمیایی خاک به شمار می‌رود [۶]. در دهه‌های اخیر مطالعات متعددی در مورد آلودگی خاک به فلزات سنگین در مناطق معدنی و صنعتی ایران انجام شده است. رضایی و همکاران [۷] آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معادن مس کرمان را بررسی کردند و نشان دادند که PLI مس و مولیبدن به بیش از ۵ می‌رسد. سلطانی و همکاران [۸] در مطالعه خاک‌های اطراف معادن سرب و روی استان همدان، غلظت‌های بالای سرب، روی و کادمیوم را گزارش کردند. بیدهندی و همکاران [۹] در بررسی منطقه انگوران استان زنجان، ضریب غنی‌شدگی روی بالای ۱۰۰ را یافتند که مؤید نقش تعیین‌کننده فعالیت معدنی است. در سطح جهانی، مطالعات Fu و همکاران [۱۰] در چین، گیو و همکاران [۱۱] در ناحیه $Pb-Zn$ ، و زاو و همکاران [۱۲] در مناطق صنعتی نشان داده‌اند که شاخص‌های ترکیبی مانند PLI و EF ابزارهای مناسبی برای ارزیابی وضعیت آلودگی هستند. پهنه ساختاری سنج-سیرجان، که هر دو منطقه مورد مطالعه در آن واقع شده‌اند، از نظر زمین‌شناسی منطقه‌ای با پتانسیل بالای معدنی بوده و دارای کانی‌سازی‌های متعدد سرب، روی، مس و کروم است [۱۳]. این ویژگی ذاتی باعث می‌شود که غلظت زمینه طبیعی فلزات سنگین در این زون بالاتر از میانگین پوسته زمین باشد و ارزیابی آلودگی انسانی نیازمند جداسازی دقیق سهم زمین‌زاد و انسان‌زاد باشد [۱۴]. با این حال، تا کنون مطالعه دقیقی بر روی آلودگی خاک در طول این زون ساختاری از شمال غرب اصفهان (چادگان) تا شرق لرستان (الیگودرز) انجام نشده است. این پژوهش با هدف تحلیل وضعیت آلودگی خاک به فلزات سنگین در دو منطقه شهرستان چادگان در استان اصفهان و شهرستان الیگودرز در استان لرستان انجام شده است. اهداف اصلی این مطالعه عبارتند از: (۱) مقایسه سطح و الگوی آلودگی فلزات سنگین در دو منطقه با استفاده از شاخص‌های چندگانه؛ (۲) شناسایی و تفکیک منابع زمین‌زاد و انسان‌زاد آلودگی؛ (۳) ارزیابی نقش ویژگی‌های زمین‌شناسی مشترک (زون سنج-سیرجان) در شکل‌گیری الگوی آلودگی؛ و (۴) ارائه توصیه‌های مدیریتی برای کاهش ریسک سلامت جمعیت منطقه.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی مناطق مطالعاتی

شهرستان چادگان با مختصات $32^{\circ}32'$ تا $32^{\circ}58'$ عرض شمالی و $50^{\circ}13'$ تا $50^{\circ}51'$ طول شرقی در شمال غرب استان اصفهان واقع شده است. از شمال و شرق با شهرستان تیران و کرون، از شمال غرب با شهرستان فریدن، از غرب با شهرستان فریدون‌شهر و از جنوب با استان چهارمحال و بختیاری هم‌مرز است. از نظر زمین‌شناسی، تشکیلات چادگان عمدتاً متشکل از آهک، دولومیت، شیل و ماسه‌سنگ‌های دوره دوم و رسوبات آبرفتی دوره چهارم است. قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه، سنگ‌های دگرگونی هستند که به پرکامبرین نسبت داده شده‌اند. از نظر زمین‌ساختی، محور کلی تاقدیس و ناودیس‌های موجود با روند شمال غرب به جنوب شرق، تبعیت از روند عمومی زون سنج-سیرجان دارند. شهرستان الیگودرز در شرق استان لرستان بین 49° درجه و 42° دقیقه طول شرقی و 33° درجه و 24° دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این شهرستان در ناحیه کوهستانی زاگرس مرکزی قرار گرفته و از نظر زمین‌شناسی، قسمتی از این شهرستان در زون آذرین-دگرگونی سنج-سیرجان و قسمت جنوبی در زون رسوبی زاگرس واقع شده است. زون سنج-سیرجان در این ناحیه شامل سنگ‌های گرانیتوئیدی و دگرگونی (مجاوری و ناحیه‌ای) است. رسوبات منطقه شامل توالی یکنواختی از فیلیت، کوارتز فیلیت و اسلیت متناوب با ماسه‌سنگ‌های ناخالص دگرگون‌شده می‌باشد. هر دو منطقه در پهنه ساختاری سنج-سیرجان قرار گرفته‌اند.

که فعال ترین زون ماگمایی و دگرگونی ایران محسوب می شود. با این حال، تفاوت مهمی نیز وجود دارد: الیگودرز علاوه بر زون سنندج-سیرجان، در بخش جنوبی خود وارد زون رسوبی زاگرس می شود. همچنین وجود معدن فعال سرب و روی گل زرد در الیگودرز عاملی است که این منطقه را از چادگان متمایز می کند. در چادگان، سازندهای پرکامبرین و واحدهای آهکی مزوزوئیک بیشتر در معرض هوازدگی قرار دارند.

۲-۲- نمونه برداری و آنالیز شیمیایی

در منطقه چادگان تعداد ۱۲۸ و در منطقه الیگودرز نیز ۱۰۰ نمونه خاک از عمق ۳۰ سانتی متری (دسترسی به اثرات سنگ مادر و استاندارد بودن برای ارزیابی ریسک اکولوژیکی) با روش برداشت تصادفی از رسوبات منطقه برداشت گردید. موقعیت جغرافیایی نمونه ها در هر دو منطقه با دستگاه GPS ثبت و نمونه ها کدگذاری شدند. در هر دو مطالعه از روش ICP-MS (طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی) با دستگاه Agilent Series 4500 ساخت آمریکا استفاده شده است. نمونه ها ابتدا تا ابعاد کمتر از ۴ میلی متر خردایش و سپس تا سایز ۷۵ میکرون پودر شدند. عملیات دایجست ۴ اسید (هیدروکلریدریک، پرکلریدریک، نیتریک و کلریدریک) در لوله های تفلونی انجام گردید.

۲-۳- شاخص های آلودگی

در هر دو مطالعه از چهار شاخص آلودگی استفاده شده است: (الف) شاخص زمین انباشت (Igeo) که توسط مولر [۱۵] پیشنهاد شد؛ (ب) ضریب آلودگی (Cf) بر اساس روش هاکنسون [۱۶]؛ (ج) شاخص بار آلودگی (PLI) که توسط تاملینسون و همکاران [۱۷] معرفی شد؛ و (د) ضریب غنی شدگی (EF) که با استفاده از عنصر اسکاندیم به عنوان عنصر هنجارکننده محاسبه گردید. در هر دو پژوهش از میانگین شیل جهانی به عنوان مرجع زمینه استفاده شده است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- غلظت فلزات سنگین

جدول ۱ مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک های دو منطقه را نشان می دهد. در چادگان روند تغییرات غلظت به صورت $Ba > Cr > Sr > Ni > Zn > B > Cu > Y > Pb > Sc > Co$ بوده که باریم بالاترین و کبالت پایین ترین غلظت را دارند. در الیگودرز روند تغییرات به صورت $Cr > Sr > V > Ni > Zn > Cu > Pb > Sc > Co$ است که کروم بالاترین ۲۳۹ ppm و کبالت پایین ترین ۲۶ ppm غلظت را دارند.

جدول ۱- مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک دو منطقه (ppm)

عنصر	Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Cu	Cr	Co
چادگان (ppm)	۷۸/۹۵	۱۵۹/۶۰	۲۰/۰۴	۲۷/۵۲	۸۲/۹۱	۴۴/۱۱	۱۸۴/۱۷	۲۶/۲۶
الیگودرز (ppm)	۷۷/۹۷	۱۶۷/۲۳	۲۵/۹۵	۳۱/۱۴	۹۲/۲۰	۳۷/۱۲	۲۳۹/۸۴	۲۵/۸۱
شیل جهانی	۹۵	۳۰۰	۱۴	۲۰	۶۸	۴۵	۹۰	۱۹

۲-۳- شاخص زمین انباشت (Igeo)

نتایج شاخص زمین انباشت نشان می دهد که وضعیت آلودگی دو منطقه تفاوت معناداری دارد. در چادگان میزان میانگین Igeo همه عناصر بین ۱،۵- تا ۳،۴+ است و تمامی عناصر در گروه صفر و یک (بدون آلودگی تا آلودگی کم) قرار می گیرند. در الیگودرز اما عنصر

کروم در ۳۰ ایستگاه، اسکاندیم در ۷ ایستگاه و سرب در ۲ ایستگاه در محدوده آلودگی متوسط قرار می‌گیرند.

جدول ۲- مقایسه میانگین شاخص زمین‌انباشت (Igeo) در دو منطقه

منطقه	وضعیت کلی	Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Cu	Cr	Co
چادگان	بدون آلودگی تا کم	-۰/۸۸	-۰/۷۵	-۰/۰۷	-۰/۲۰	-۰/۰۵	-۰/۶۹	۰/۳۴	-۰/۱۷
الیگودرز	آلودگی در Cr, Sc, Pb	-۰/۹۱	-۰/۶۷	۰/۳۰	-۰/۰۰۷	-۰/۱۹	-۰/۹۰	۰/۷۳	-۰/۱۶

۳-۳- ضریب آلودگی (Cf)

در چادگان، باریم، بور، ایتیریم، استرانسیم و اسکاندیم در تمامی نقاط نمونه‌برداری دارای آلودگی کم ($Cf < 2$) هستند. کروم با میانگین Cf برابر ۲/۰۴ در مرز آلودگی متوسط قرار می‌گیرد. در الیگودرز وضعیت جدی‌تر است: کروم با میانگین Cf برابر ۲/۶۶ در محدوده آلودگی زیاد تا متوسط، و سرب و اسکاندیم در بعضی ایستگاه‌ها Cf بالاتر از ۶ را نشان می‌دهند.

۳-۴- شاخص بار آلودگی (PLI)

این شاخص مهم‌ترین تفاوت کیفی بین دو منطقه را آشکار می‌کند. در چادگان، PLI همه عناصر کمتر از یک است. اما در الیگودرز، PLI پنج عنصر کبالت (۳/۳۳)، کروم (۴/۴۵)، نیکل (۶/۰۴)، سرب (۲/۳۶) و اسکاندیم (۴/۳۷) بالاتر از یک است.

جدول ۳- مقایسه شاخص بار آلودگی (PLI) در دو منطقه

منطقه / عنصر	وضعیت کلی	Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Cu	Cr	Co
چادگان (PLI)	فاقد آلودگی ($PLI < 1$)	۰/۴۶	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۷۱	۰/۲۵	۰/۵۷
الیگودرز (PLI)	آلودگی در Co, Cr, Ni, Pb, Sc	۰/۱۳۲	۰/۱۶۴	۴/۳۷	۲/۳۶	۶/۰۴	۰/۲۵۴	۴/۴۵	۳/۳۳

۳-۵- ضریب غنی‌شدگی (EF)

در هر دو مطالعه از عنصر اسکاندیم به عنوان هنجارکننده استفاده شده است. در چادگان، میانگین EF برای اکثر عناصر کمتر از ۲ (زمین‌زاد) است؛ با این حال کبالت، کروم، مس و نیکل در بعضی ایستگاه‌ها EF بین ۲ تا ۵ دارند. در الیگودرز، نکته جالب مقدار بسیار بالای EF روی (میانگین ۶۰/۹) است که احتمالاً به وجود معدن سرب و روی ارتباط دارد.

جدول ۴- مقایسه میانگین ضریب غنی‌شدگی (EF) در دو منطقه

منطقه / عنصر	منشأ غالب	Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Cu	Cr	Co
چادگان (EF میانگین)	عمدتاً زمین‌زاد	۰/۶۷	۱	۱/۱۸	۰/۷۱	۱/۲۳	۰/۷۶	۱/۵۰	۱/۰۷
الیگودرز (EF میانگین)	Cr, Pb انسان‌زاد	۶۰/۹*	۰/۵۷	۱	۰/۹۲	۰/۷۸	۰/۴۸	۱/۴۸	۰/۷۸

۳-۶- ژئوشیمی زیست محیطی و منشأ عناصر خاک های منطقه

یکی از چالش های اساسی در مطالعات آلودگی خاک، تفکیک سهم زمین زاد (ژئوژنیک) از سهم انسان زاد (آنتروپوژنیک) است. در مناطق واقع در زون سندنجد-سیرجان، غلظت زمینه طبیعی بسیاری از فلزات سنگین نظیر کروم، نیکل و کبالت به طور ذاتی بالاتر از میانگین پوخته زمین است [۱۴]. این امر ناشی از فراوانی سنگ های بازی و اولترابازی در این زون است که سرشار از این عناصر هستند. برای تفکیک دقیق تر منشأ آلودگی، از روش مثلی نسبت های عنصری استفاده شد. نسبت Cr/Ni در خاک های چادگان (میانگین ۲/۲۲) و الیگودرز (میانگین ۲/۶۰) با ترکیب شیمیایی سنگ های اولترامافیک منطقه (نسبت Cr/Ni حدود ۲,۰ تا ۳,۰) همخوانی دارد که مؤید سهم بالای منشأ زمین زاد است. با این حال، نسبت Pb/Sc در الیگودرز (میانگین ۱/۲۰) در مقایسه با چادگان (میانگین ۱/۳۱) و مرجع شیل جهانی (۱/۴۳) کمی پایین تر است که نشان می دهد سرب در الیگودرز نیز تا حدی از منابع زمین زاد تأمین می شود، اما غنی شدگی معدنی آن را برجسته تر می کند. جدول ۵ نسبت های کلیدی عنصری در هر دو منطقه و مقایسه آن ها با مرجع جهانی را نشان می دهد. نسبت های بالاتر از ۱/۵ برابر مرجع، نشانه ای از دخالت منابع انسانی تلقی می شود.

جدول ۵- مقایسه نسبت های عنصری در دو منطقه

نسبت عنصری	تفسیر	الیگودرز	چادگان	شیل جهانی
Cr/Ni	منشأ اولترابازی	۲/۶۰	۲/۲۲	۱/۳۲
Ni/Co	منشأ مافیک	۳/۵۷	۳/۱۶	۳/۵۸
Pb/Sc	منشأ ترکیبی	۱/۲۰	۱/۳۱	۱/۴۳
Zn/Sc	غنی شدگی معدنی Zn	۳/۰۰	۳/۷۵	۶/۷۹
Cu/Ni	منشأ سولفیدی	۰/۴۰	۰/۵۳	۰/۶۶

۳-۷- تحرک پذیری عناصر در منطقه مورد مطالعه

تحرک پذیری فلزات سنگین در خاک به pH، پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh)، محتوای ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و نوع کانی های رسی بستگی دارد [۴]. در خاک های مناطق کوهستانی زاگرس مرکزی و زون سندنجد-سیرجان که pH اغلب قلیایی (۷/۵-۸/۵) است، تحرک پذیری سرب و کروم کاهش می یابد و این عناصر به صورت کمپلکس های کربناتی و هیدروکسیدی در خاک تثبیت می شوند. کروم در شرایط اکسیداسیون به شکل Cr(VI) (کرومات) تبدیل می شود که بسیار متحرک تر و سمی تر از Cr(III) است. در الیگودرز، وجود سنگ های اولترامافیک اکسید شده در کنار معدن کاری، احتمال تشکیل Cr(VI) را افزایش می دهد. نیکل در محیط های قلیایی به صورت Ni(OH)_2 رسوب می کند، اما در pH پایین تر یا در حضور اسیدهای آلی، تحرک آن افزایش می یابد. روی با EF استثنایی (۶۰/۹) در الیگودرز، به ویژه در نزدیکی معدن گل زرد، می تواند به صورت Zn^{+2} آزاد در آب های زیرزمینی وارد شود. جدول ۶ درجه تحرک پذیری نسبی هر عنصر را در شرایط pH قلیایی (غالب در هر دو منطقه) و ریسک انتقال به آب های زیرزمینی نشان می دهد.

جدول ۶- تحرک پذیری ژئوشیمیایی فلزات سنگین در شرایط pH قلیایی

عنصر	ریسک انتقال به آب	پذیری تحرک	شکل غالب در pH > ۷,۵
Cr(III)	پایین	کم	Cr(OH)_3 , CrOOH
Cr(VI)	بالا	زیاد	CrO_4^{2-}
Ni	متوسط	متوسط	Ni(OH)_2 , NiCO_3
Co	پایین	کم	Co(OH)_2 , CoCO_3
Pb	پایین	کم	PbCO_3 , Pb(OH)_2

Zn	متوسط-بالا	متوسط-زیاد	ود
Cu	پایین	کم	$\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2$
Sc	پایین	کم	$\text{Sc}(\text{OH})_3$

۳-۸- فرآیندهای هوازدگی و کنترل ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه

هوازدگی سنگ‌های اولترامافیک در زون سنندج-سیرجان فرآیند اصلی آزاد شدن کروم، نیکل و کبالت به محیط خاک است. این فرآیند به نام سرپانتینیزاسیون شناخته می‌شود و طی آن کانی‌های اولیه مانند الیوین و پیروکسن تجزیه شده و کروم آزاد شده در قالب کانی‌های اکسیدی نظیر کرومیت (FeCr_2O_4) و گوتیت (FeOOH) تجمع می‌یابد [۴]. شدت هوازدگی در مناطق کوهستانی با بارش بالا (الیگودرز) نسبت به مناطق نیمه‌خشک‌تر (چادگان) بیشتر است که توضیح می‌دهد چرا غلظت کروم در الیگودرز (239ppm) بیشتر از چادگان (184 ppm) است. در چادگان، کارخانه سنگ‌شکن بدون سیستم فیلتراسیون مناسب، ذرات ریز سنگ‌های آهکی و شیلی را در فاصله چند کیلومتری پراکنده می‌کند. این ذرات حاوی عناصری چون کروم، نیکل و کبالت هستند که با انحلال تدریجی در اثر بارش، وارد خاک می‌شوند. پراکنش باد این ذرات را به خاک‌های جنوب غرب منطقه که بیشترین غلظت عناصر را دارند منتقل کرده است.

۳-۹- بررسی ارتباط ژئوشیمیایی با سازندهای زمین‌شناسی

تحلیل تطابق مکانی بین غلظت فلزات سنگین و واحدهای زمین‌شناسی نشان می‌دهد که بالاترین غلظت‌های Cr، Ni و Co در هر دو منطقه با پراکنش سنگ‌های بازی-اولترابازی منطبق است. در الیگودرز، میانگین Cr در نمونه‌های برداشت‌شده از زون اولترابازی (325ppm) نسبت به نمونه‌های برداشت‌شده از زون رسوبی (142ppm) بیش از دو برابر است. این تفاوت چشمگیر نقش تعیین‌کننده زمین‌شناسی زیرین را در کنترل غلظت زمینه فلزات سنگین تأیید می‌کند. در چادگان، تطابق مکانی خوبی بین غلظت بالای Sr و Ba با سازندهای آهکی-دولومیتی مشاهده می‌شود. این عناصر قلیایی خاکی معمولاً در شبکه کانی‌های کربناتی جانشین می‌شوند و در اثر هوازدگی آهسته آزاد می‌گردند. باریم که بالاترین غلظت در چادگان را دارد (بیشترین مقدار در بین عناصر پایش‌شده)، نشانه‌ای از نقش رسوبات دریایی کربناته در تأمین این عنصر است [14].

۳-۱۰- تحلیل‌های آماری

تحلیل آماری جامع از داده‌های ژئوشیمیایی با هدف شناسایی الگوهای توزیع، روابط بین‌عنصری و منشأیابی آلاینده‌ها انجام شد. در این بخش نتایج آمار توصیفی، تحلیل همبستگی، تحلیل خوشه‌ای، تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) و مدل‌سازی ارائه شده است.

۳-۱۰-۱- آمار توصیفی

جدول ۷ آمار توصیفی اصلی برای فلزات سنگین در هر دو منطقه را نشان می‌دهد. ضریب تغییرات (CV) بالا برای روی در الیگودرز ($\text{CV}=187\%$) نشان‌دهنده توزیع فضایی ناهمگن این عنصر است که تحت تأثیر فعالیت معدنی موضعی قرار دارد. در مقابل، ضریب تغییرات کروم در هر دو منطقه نسبتاً پایین (چادگان $\text{CV}=38\%$ ؛ الیگودرز $\text{CV}=45\%$) است که نشان‌دهنده پراکنش یکنواخت‌تر این عنصر و نقش غالب منشأ زمین‌شناسی است.

جدول ۷- آمار توصیفی فلزات سنگین در دو منطقه (ppm)

عنصر	%CV (الیگودرز)	انحراف معیار (الیگودرز)	میانگین (الیگودرز)	%CV (چادگان)	انحراف معیار (چادگان)	میانگین (چادگان)
Co	۳۵	۹/۱۴	۲۵/۸۱	۳۲	۸/۴۱	۲۶/۲۶
Cr	۴۵	۱۰۷/۹۳	۲۳۹/۸۴	۳۸	۷۰/۳۸	۱۸۴/۱۷
Cu	۴۵	۱۶/۸۵	۳۷/۱۲	۴۴	۱۹/۲۴	۴۴/۱۱
Ni	۴۵	۴۱/۴۹	۹۲/۲۰	۴۲	۳۵/۰۶	۸۲/۹۱
Pb	۶۰	۱۸/۷۳	۳۱/۱۴	۵۲	۱۴/۱۸	۲۷/۵۲
Sc	۴۵	۱۱/۶۸	۲۵/۹۵	۳۷	۷/۸۳	۲۱/۰۴
Sr	۴۳	۷۲/۱۰	۱۶۷/۲۳	۴۳	۶۸/۲۴	۱۵۹/۶۰
Zn	۱۸۷	۱۴۵/۸۱	۷۷/۹۷	۳۹	۳۰/۴۷	۷۸/۹۵

آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها (Kolmogorov-Smirnov) نشان داد که در چادگان، اکثر عناصر از توزیع نرمال پیروی می‌کنند ($p > 0/05$) به جز روی و سرب که توزیع لوگ-نرمال دارند. در الیگودرز، روی به دلیل CV بسیار بالا، توزیع چوله راست شدیدی نشان می‌دهد (چولگی = $۳/۸۴$) که مؤید تمرکز موضعی ناشی از فعالیت معدنی است.

۳-۱۰-۲- تحلیل همبستگی پیرسون

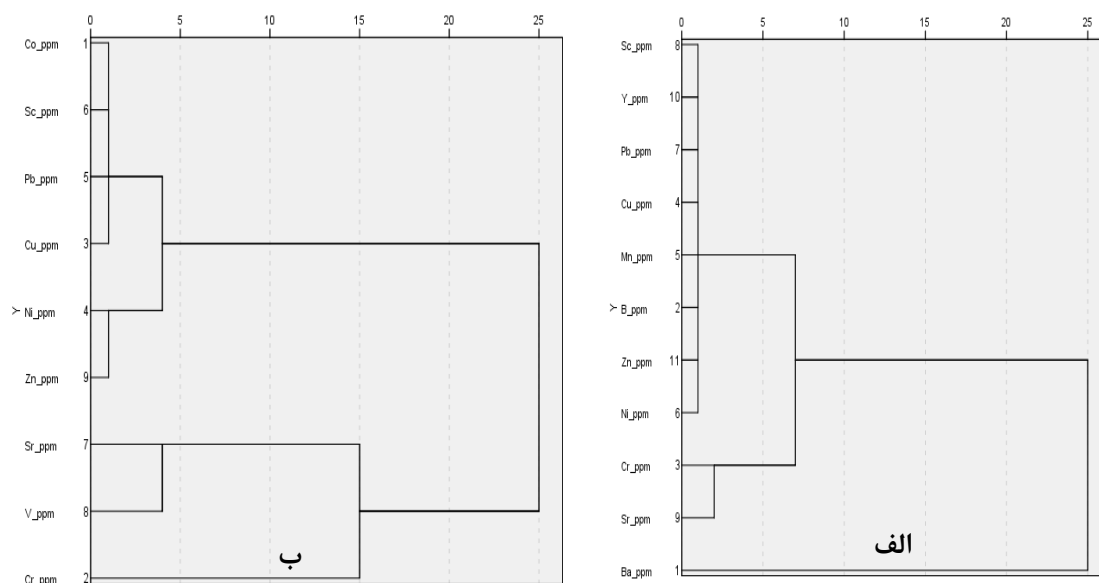
ماتریس همبستگی پیرسون برای فلزات سنگین در هر دو منطقه محاسبه شد. در چادگان، بالاترین ضرایب همبستگی مثبت بین زوج‌های عنصری Co-Ni ($r=86$, $p<0/01$)، Cr-Ni ($r=71$, $p<0/01$) و Co-Cu ($r=66$, $p<0/01$) مشاهده شد. این همبستگی‌های قوی نشان‌دهنده منشأ مشترک این عناصر از سنگ‌های بازی و اولترابازی هستند. در الیگودرز، همبستگی Co-Ni ($r=62$, $p<0/01$) و Ni-Cr ($r=48$, $p<0/01$) تأیید می‌کند که بخشی از این عناصر منشأ مشترک زمین‌شناسی دارند. اما نکته برجسته، همبستگی ضعیف و غیرمعنادار روی با سایر عناصر (به‌ویژه Zn-Cr: $r=0/09$ ؛ Zn-Ni: $r=0/12$) است که نشان می‌دهد این عنصر منشأ متفاوت (فعالیت معدنی) دارد.

جدول ۸- ماتریس همبستگی پیرسون فلزات سنگین در منطقه الیگودرز (مقادیر معنادار در $p<0.05$ با * علامت گذاری شده‌اند)

عنصر	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sc	Sr	Zn
Co	۱	*۰/۴۱	*۰/۳۸	*۰/۶۲	*۰/۲۹	*۰/۴۵	*۰/۲۲	۰/۱۱
Cr	-	۱	*۰/۲۷	*۰/۴۸	۰/۱۸	*۰/۵۳	*۰/۳۱	۰/۰۹
Cu	-	-	۱	*۰/۴۴	*۰/۵۵	*۰/۳۱	۰/۱۹	*۰/۲۲
Ni	-	-	-	۱	*۰/۳۳	*۰/۴۹	*۰/۲۷	۰/۱۲
Pb	-	-	-	-	۱	*۰/۲۴	۰/۱۵	*۰/۴۷
Sc	-	-	-	-	-	۱	*۰/۳۸	۰/۰۸
Sr	-	-	-	-	-	-	۱	۰/۰۶
Zn	-	-	-	-	-	-	-	۱

۳-۱۰-۳- تحلیل خوشه‌ای (Cluster Analysis)

تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) با روش پیوند وارد (Ward's Linkage) و فاصله اقلیدسی استاندارد شده روی ماتریس داده‌های هر دو منطقه اجرا شد. در چادگان، عناصر در دو خوشه اصلی گروه‌بندی شدند: خوشه ۱ (منشأ اولترابازی): Cu, Ni, Cr, Co - این عناصر با سنگ‌های بازی و اولترابازی مرتبطند. خوشه ۲ (منشأ رسوبی-کربناته): Y, B, Sr, Ba - این عناصر با سازندهای آهکی و دولومیتی ارتباط دارند. در الیگودرز، چهار خوشه مجزا شناسایی شد: خوشه ۱ (منشأ اولترابازی): Cu, Ni, Cr, V, Sc - با سنگ‌های مافیک-اولترامافیک مرتبط. خوشه ۲ (منشأ رسوبی): Ba, Sr - با سازندهای کربناته مرتبط. خوشه ۳ (منشأ معدنی-سولفیدی): Pb, Cu, Zn - نشانه‌ای از فعالیت معدن سرب-روی گل‌زرد. خوشه ۴ (مستقل/چندمنشایی): B, Sc - با هر دو منشأ زمین‌زاد و انسان‌زاد ارتباط دارند. تعدد خوشه‌ها در الیگودرز (۴ در مقابل ۲) نشان‌دهنده منابع آلودگی متنوع‌تر و پیچیده‌تر در این منطقه است.



شکل ۱: نمودار خوشه‌ای عناصر منطقه مورد مطالعه - چادگان (الف) و الیگودرز (ب)

۳-۱۰-۴- تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

تحلیل مؤلفه اصلی با استفاده از ماتریس همبستگی (داده‌های استاندارد شده Z-score) برای هر دو منطقه اجرا شد. در چادگان، دو مؤلفه اصلی ۶۸/۴ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند. در الیگودرز، سه مؤلفه لازم است تا ۷۱/۲ درصد از واریانس تبیین شود.

جدول ۹- نتایج تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) در دو منطقه

مؤلفه	تفسیر	عناصر با بارگذاری بالا	واریانس تبیین شده الیگودرز (%)	واریانس تبیین شده چادگان (%)
PC _۱	منشأ اولترابازی	Cr, Ni, Co, Cu	۳۸/۷	۴۴/۲
PC _۲	منشأ رسوبی-کربناته	Ba, Sr, B, Y	۲۱/۵	۲۴/۲
PC _۳	منشأ معدنی-سولفیدی	Pb, Zn, Cu	۱۱	-
جمع	-	-	۷۱/۲	۶۸/۴

در PC₁ (مؤلفه اول) هر دو منطقه، بارگذاری مثبت و قوی عناصر Cr, Ni, Co منشأ اولترابازی-مافیک آلودگی را تأیید می‌کند.

این عناصر در سنگ‌های دگرگونی و ماگمایی زون سنندج-سیرجان طبیعتاً غنی هستند. وجود PC3 مستقل در الیگودرز با بارگذاری بالای Cu و Zn، Pb شواهد کمی قوی دیگری برای دخالت فعالیت معدنی در آلودگی این منطقه است که در چادگان وجود ندارد.

۳-۱۰-۵- آمار فضایی و تحلیل واریوگرام

برای تعیین ساختار مکانی پراکنش فلزات سنگین، واریوگرام تجربی برای هر عنصر در هر دو منطقه برازش شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل کروی بهترین برازش را برای اکثر عناصر دارد. دامنه همبستگی مکانی برای کروم در چادگان بیشتر از الیگودرز است که نشان می‌دهد پراکنش کروم در چادگان از منابع پراکنده‌تری (نظیر هوازدگی سنگ‌های مافیک) تأمین می‌شود. نسبت ناگت به سیل برای روی در الیگودرز (۰/۶۸) بسیار بالاتر از سایر عناصر است که نشان‌دهنده واریابیلیتی کوچک مقیاس زیاد و احتمالاً آلودگی نقطه‌ای مرتبط با معدن گل‌زرد است. در مقابل، این نسبت برای کروم در هر دو منطقه پایین ۰/۳-۰/۲ است که مؤید همبستگی مکانی قوی و منشأ یکپارچه زمین‌شناسی آن است.

جدول ۱۰- پارامترهای واریوگرام برای عناصر منتخب در دو منطقه

عناصر	N/S ratio (Oli)	دامنه km (Oli)	مدل برازش (Oli)	N/S ratio (Cha)	دامنه km (Cha)	مدل برازش (Cha)
Cr	۰/۲۸	۳/۲	کروی	۰/۲۳	۴/۵	کروی
Ni	۰/۳۵	۲/۹	کروی	۰/۳۱	۳/۸	کروی
Pb	۰/۵۲	۱/۷	نمایی	۰/۴۴	۲/۱	نمایی
Zn	۰/۶۸	۱/۲	گاوسی	۰/۳۸	۳/۲	کروی
Co	۰/۳۰	۳/۶	کروی	۰/۲۵	۴/۱	کروی

۳-۱۰-۶- آزمون مقایسه میانگین‌ها

برای مقایسه معنادار آماری غلظت‌های فلزات سنگین بین دو منطقه، از آزمون t مستقل (برای عناصر با توزیع نرمال) و آزمون ناپارامتری Mann-Whitney U (برای عناصر با توزیع غیرنرمال) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که تفاوت غلظت کروم ($p=0/003$)، اسکاندیم ($p=0/012$) بین دو منطقه از نظر آماری معنادار است. این تفاوت‌های معنادار مؤید وجود عوامل آلودگی متمایز در الیگودرز است. تفاوت غلظت باقی عناصر (Sr, Pb, Cu, Ni, Co) بین دو منطقه از نظر آماری معنادار نیست ($p>0/05$)، که مؤید منشأ مشترک زمین‌شناسی آن‌ها در هر دو منطقه است.

۳-۱۱- مقایسه سطح کلی آلودگی

مقایسه جامع دو منطقه نشان می‌دهد که آلودگی خاک در الیگودرز به‌طور معناداری بیشتر از چادگان است. این تفاوت در هر چهار شاخص به‌وضوح مشاهده می‌شود. در حالی که شاخص PLI چادگان برای همه عناصر زیر یک است، در الیگودرز پنج عنصر PLI بالاتر از یک دارند. این یافته با مطالعات مشابه در مناطق معدنی ایران مطابقت دارد؛ سلطانی و همکاران [۸] در معادن سرب و روی همدان PLI نیکل و کروم را بین ۳ تا ۷ گزارش کردند. به‌طور مشابه، Fu و همکاران [۱۰] در مناطق معدنی چین نشان دادند که PLI عناصر مرتبط با کانی‌سازی سولفیدی (نیکل، کروم، سرب) می‌تواند از ۵ نیز فراتر رود.

جدول ۱۱- جدول مقایسه ای سطح کلی آلودگی دو منطقه مورد مطالعه

معیار مقایسه	الیگودرز (لرستان)	چادگان (اصفهان)
موقعیت جغرافیایی	شرق لرستان - زون سنندج-سیرجان و زاگرس رسوبی	شمال غرب اصفهان - زون سنندج-سیرجان
تعداد نمونه	۱۰۰ نمونه	۱۲۸ نمونه
روش تجزیه	ICP-MS (Agilent ۴۵۰۰)	ICP-MS (Agilent ۴۵۰۰)
غالبترین عنصر آلوده	کروم (Cr) - میانگین ۲۳۹ ppm	کروم (Cr) - میانگین ۱۸۴ ppm
شاخص Igeo	Pb و Cr, Sc دارای آلودگی متوسط	بدون آلودگی تا کم ($I_{geo} < 1$)
شاخص PLI	Co, Cr, Ni, Pb, Sc آلوده ($PLI > 1$)	فاقد آلودگی ($PLI < 1$)
ضریب EF	Cr و Pb: EF=۶۰,۹, ۵-۲	Co, Cr, Ni, Cu در بعضی ایستگاه‌ها: EF بین ۵-۲
منشأ اصلی آلودگی	معادن سرب و روی گل‌زرد + سنگ‌های دگرگونی	کارخانه سنگ‌شکن بدون فیلتراسیون
شدت آلودگی کلی	متوسط تا بالا	پایین تا متوسط

۳-۱۲- نقش زمین‌شناسی در منطقه

هر دو منطقه در زون سنندج-سیرجان قرار دارند که دارای سنگ‌های دگرگونی و آذرین است. این زون به دلیل فعالیت‌های ماگمایی و دگرسانی (آلتراسیون)، ذاتاً زمینه بالاتری از فلزات سنگین دارد [۱۳]. غلظت بالای کروم و نیکل در هر دو منطقه با ترکیب شیمیایی سنگ‌های مافیک و اولترامافیک این زون ارتباط مستقیم دارد. ریمن و دکاریتات [۱۴] تأکید کرده‌اند که در ارزیابی آلودگی مناطق با زمینه زمین‌شناسی بالا، استفاده از میانگین شیل جهانی به عنوان مرجع می‌تواند منجر به برآورد بیش از حد آلودگی انسان‌زاد شود. از این رو، تفسیر نتایج شاخص‌ها در هر دو منطقه باید با در نظر گرفتن این زمینه طبیعی بالا انجام گیرد. مهم‌ترین شباهت زمین‌شناسی دو منطقه، روند تغییرات عناصر است: در هر دو منطقه کروم بالاترین و کبالت پایین‌ترین غلظت را دارند. این موضوع با مطالعات چن و همکاران [۵] که نشان دادند کروم و نیکل در خاک‌های مناطق دگرگونی همواره غلظت‌های بالاتری دارند، همخوانی دارد. همچنین همبستگی بالا بین Co-Ni و Cr-Ni در هر دو منطقه مؤید منشأ مشترک از سنگ‌های بازی و اولترابازی است [4].

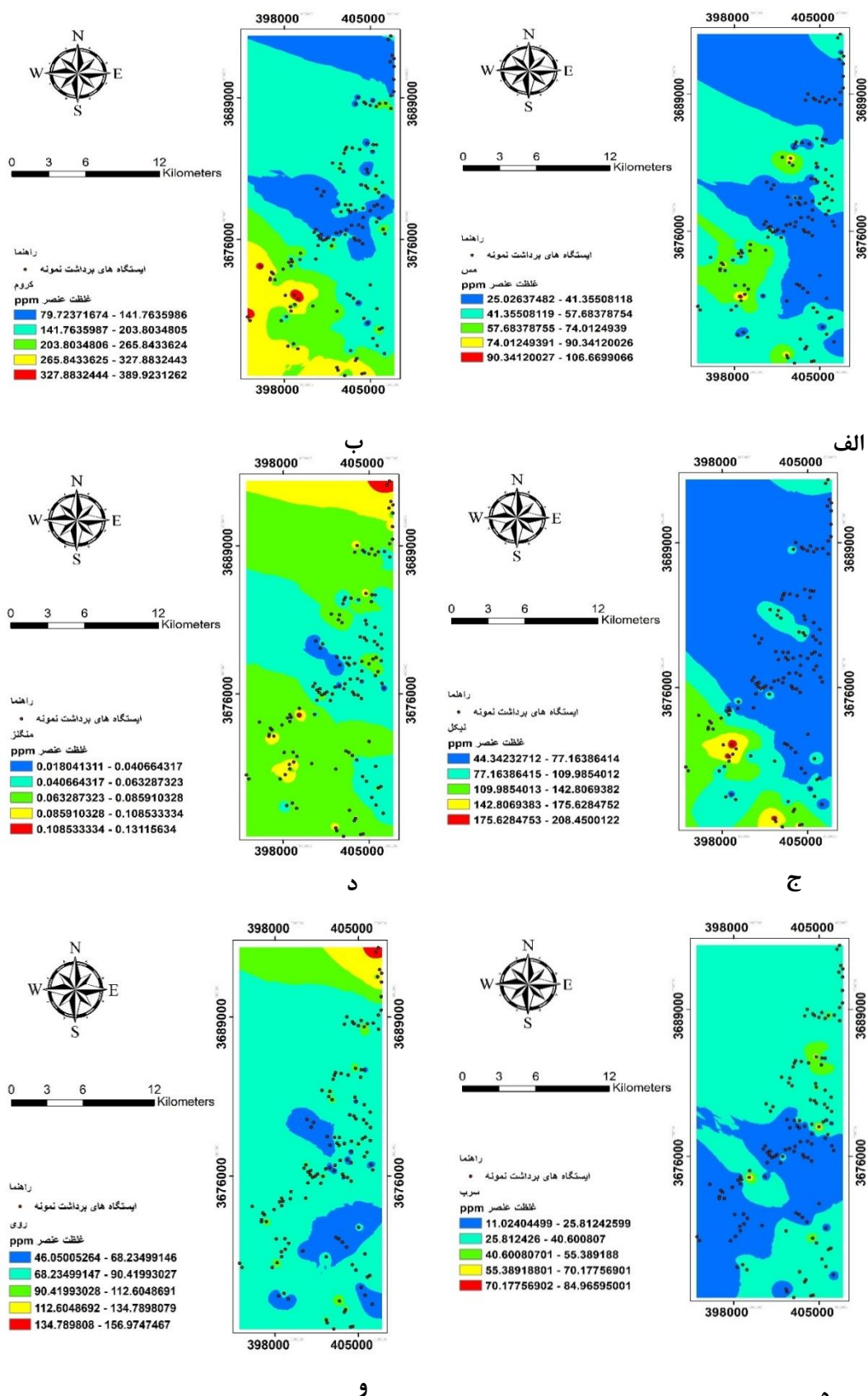
۳-۱۳- نقش فعالیت‌های انسانی

در الیگودرز، فعالیت معدن‌کاری سرب و روی (معادن گل‌زرد) و همچنین صنایع فرآوری سنگ‌های تزئینی، عوامل انسانی اصلی آلودگی هستند. ضریب غنی‌شدگی EF بالای ۲ برای کروم و سرب تأیید می‌کند که آلودگی این عناصر ماهیت انسان‌زاد دارد. مقدار استثنایی EF روی (۶۰/۹) در الیگودرز با یافته‌های بیدهندی و همکاران [۹] در منطقه انگوران مقایسه‌پذیر است. این محققان نشان دادند که در مناطق مجاور معادن سرب-روی، EF روی می‌تواند از ۵۰ نیز فراتر رفته و به خوبی منشأ انسان‌زاد آلودگی را آشکار سازد. در چادگان، کارخانه سنگ‌شکن بدون فیلتراسیون که در نزدیکی منطقه حفاظت‌شده دالانکوه واقع است، عامل اصلی آلودگی است. افزایش غلظت کبالت، کروم، مس و نیکل در جنوب غرب این منطقه با موقعیت این کارخانه همخوانی دارد. این الگو با یافته‌های هرناوند و همکاران [۱۸] در جنگل‌های فرانسه مطابقت دارد، جایی که نشان داده شد فعالیت‌های صنعتی حتی در فاصله چند کیلومتری می‌توانند الگوی توزیع مکانی فلزات سنگین خاک را به شکل معناداری تغییر دهند.

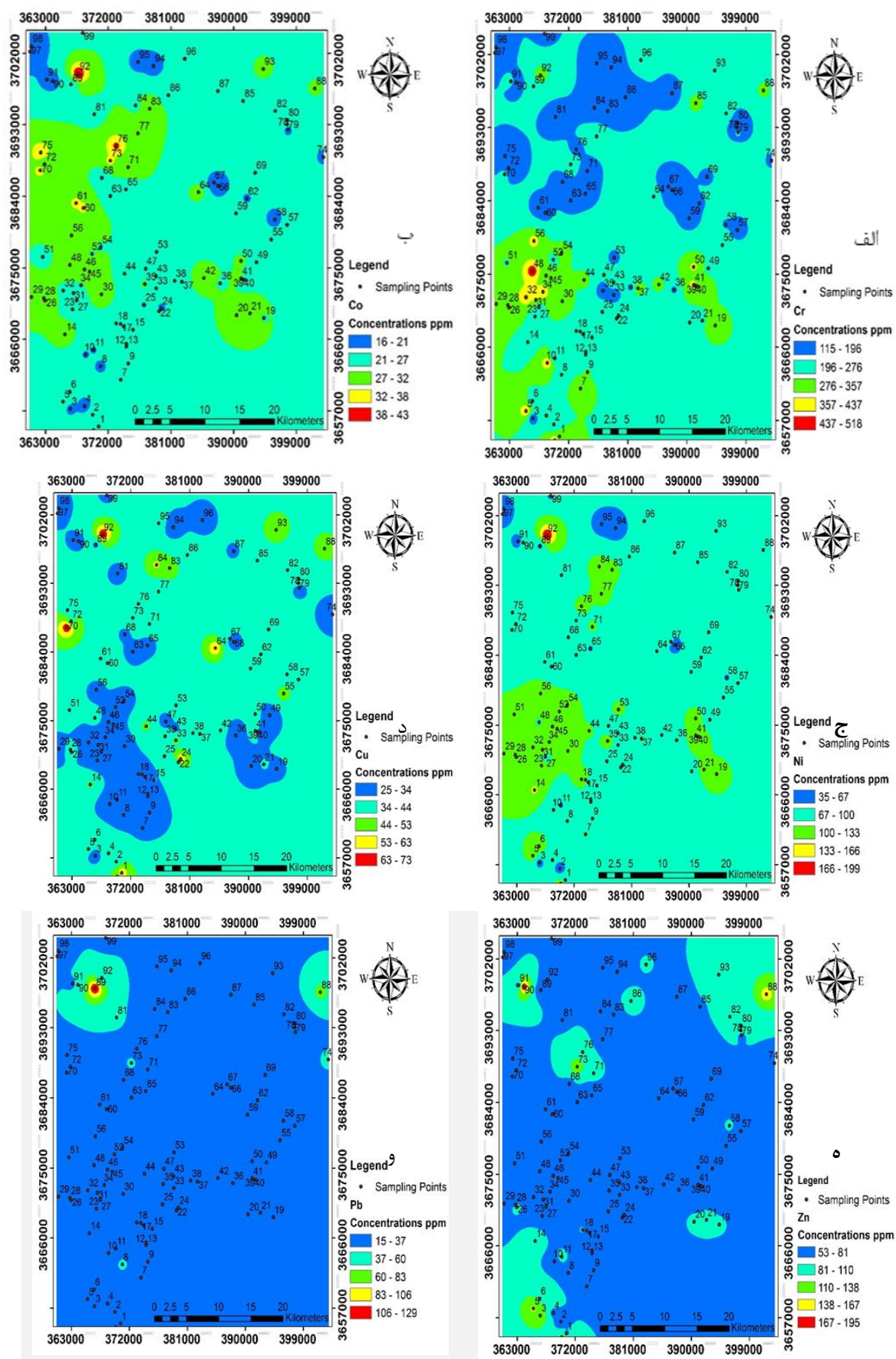
۳-۱۴- توزیع مکانی آلودگی

در هر دو منطقه، توزیع مکانی آلودگی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و روش کریجینگ تهیه شده است. در چادگان، عناصر کبالت، کروم، نیکل، مس و استرانسیم در جنوب غرب نقشه‌ها بیشترین مقدار را دارند. در الیگودرز، دو خوشه مکانی مجزا وجود دارد: خوشه اول شامل کبالت، مس، نیکل، سرب و روی و خوشه دوم شامل کروم، استرانسیم، اسکاندیم و وانادیم است. این دوگانگی توزیع مکانی در الیگودرز احتمالاً ناشی از دو منشأ متفاوت آلودگی (زمین‌زاد و انسان‌زاد) است که با روش وبستر و بورگس [۱۹] برای درون‌یابی مکانی

و کریجینگ بهینه تأیید می‌شود.



شکل ۲: تعیین توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین در خاک محدوده چادگان



شکل ۳: تعیین توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین در خاک محدوده الیگودرز

۳-۱۵- تحلیل همبستگی و منشأیابی

در چادگان، همبستگی بالا بین کبالت-نیکل ($r=0/86$)، کروم-نیکل ($r=0/71$) و کبالت-مس ($r=0/66$) نشان‌دهنده منشأ مشترک این عناصر از سنگ‌های بازی و اولترابازی است. در الیگودرز، همبستگی بالا بین کبالت-نیکل ($r=0/62$) و نیکل-کروم ($r=0/48$) نیز این موضوع را تأیید می‌کند. اما همبستگی ضعیف سرب و روی با سایر عناصر در الیگودرز نشان می‌دهد که این دو عنصر منشأ متفاوتی دارند که همان فعالیت‌های معدنی است. این الگو با نتایج جیو و همکاران [۱۱] در مناطق معدنی سرب-روی چین کاملاً مطابقت دارد که نشان دادند همبستگی ضعیف Pb-Zn با سایر فلزات سنگین اغلب به منشأ معدنی متمایز این دو عنصر دلالت دارد. در تحلیل خوشه‌ای، عناصر در چادگان در دو خوشه اصلی گروه‌بندی می‌شوند، در حالی که در الیگودرز چهار خوشه مجزا وجود دارد. تعدد خوشه‌ها در الیگودرز نشان‌دهنده منابع آلودگی متنوع‌تر و پیچیده‌تر است. این تفاوت با یافته‌های زاو و همکاران [۱۲] در مناطق صنعتی چند منشأیی مطابقت دارد که نشان دادند تعدد خوشه‌های حاصل از تحلیل خوشه‌ای با تعدد منابع آلودگی ارتباط مستقیم دارد.

۳-۱۶- ارزیابی ریسک بهداشتی

با توجه به PLI بالای نیکل ($6/04$) و کروم ($4/45$) در الیگودرز، ارزیابی ریسک بهداشتی برای جمعیت منطقه ضروری است. نیکل و کروم به‌ویژه نوع شش‌ظرفیتی کروم (Cr VI) از آلاینده‌های سرطان‌زای شناخته‌شده خاک هستند [۳]. مسیرهای اصلی مواجهه شامل بلع مستقیم خاک (به‌ویژه در کودکان)، استنشاق ذرات معلق و جذب از طریق محصولات کشاورزی است. Li و همکاران [۲] نشان داده‌اند که در مناطق مجاور معادن فعال، غلظت فلزات سنگین در سبزیجات قابل کشت می‌تواند از حدود مجاز سازمان بهداشت جهانی (WHO) فراتر رود. در چادگان، اگرچه PLI همه عناصر زیر یک است، نزدیکی کارخانه سنگ‌شکن به منطقه حفاظت‌شده دالانکوه و پتانسیل آلودگی تدریجی، پایش مستمر را ضروری می‌سازد.

۴- نتیجه‌گیری

مقایسه آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های شهرستان‌های چادگان و الیگودرز نشان داد که اگرچه هر دو منطقه در زون زمین‌شناسی ساندچ-سیرجان قرار دارند و از نظر طبیعی مستعد غلظت‌های نسبتاً بالای برخی فلزات سنگین هستند، اما شدت و الگوی آلودگی در آن‌ها تفاوت قابل توجهی دارد. نتایج شاخص بار آلودگی (PLI) بیانگر آن است که خاک‌های الیگودرز از وضعیت آلودگی نامطلوب‌تری نسبت به چادگان برخوردارند؛ به‌طوری‌که در الیگودرز پنج عنصر شامل کبالت (Co)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، سرب (Pb) و اسکاندیم (Sc) دارای مقادیر PLI بیش از یک بوده و بیانگر آلودگی قابل توجه این عناصر هستند، در حالی که در چادگان مقدار PLI تمامی عناصر کمتر از یک بوده و نشان‌دهنده وضعیت نسبتاً مناسب‌تر خاک از نظر آلودگی است. کروم در هر دو منطقه بیشترین غلظت و بالاترین سطح آلودگی را به خود اختصاص داده است. این موضوع علاوه بر تأثیر فعالیت‌های انسانی، ریشه در ویژگی‌های زمین‌شناسی مشترک دو منطقه و حضور سنگ‌های غنی از عناصر فلزی در زون ساندچ-سیرجان دارد. از این‌رو، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین، تفکیک سهم منشأ طبیعی از منابع انسان‌زاد و استفاده از مقادیر زمینه زمین‌شناسی، امری ضروری برای دستیابی به نتایج دقیق و قابل استناد است. بررسی منشأ آلودگی نیز تفاوت آشکاری میان دو منطقه نشان داد. در الیگودرز، فعالیت‌های معدنی به‌ویژه معدن گل‌زرد، همراه با فرآیندهای دگرسانی سنگ‌ها، مهم‌ترین عوامل افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک محسوب می‌شوند. در مقابل، در چادگان اگرچه شدت آلودگی پایین‌تر است، اما فعالیت کارخانه سنگ‌شکن فاقد سیستم فیلتراسیون مناسب به‌عنوان مهم‌ترین منبع انسان‌زاد انتشار ذرات آلوده و افزایش غلظت برخی فلزات سنگین شناخته شد. تحلیل الگوی توزیع مکانی نیز بیانگر تفاوت در منابع و نحوه گسترش آلودگی است. وجود دو خوشه مجزای آلودگی در الیگودرز نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان چندین منبع آلاینده و پیچیدگی فرآیندهای انتقال فلزات سنگین در این منطقه است، در حالی که در چادگان تمرکز آلودگی عمدتاً در بخش جنوب‌غربی منطقه مشاهده شد که با موقعیت کارخانه سنگ‌شکن و جهت انتشار آلاینده‌ها همخوانی دارد. از دیدگاه مدیریتی و زیست‌محیطی، نتایج این پژوهش ضرورت اتخاذ اقدامات کنترلی و پایش مستمر را در هر دو منطقه آشکار می‌سازد. مقدار بسیار بالای شاخص PLI نیکل در الیگودرز ($6/04$) نشان‌دهنده ضرورت اجرای برنامه‌های منظم پایش محیط‌زیستی، ارزیابی خطر سلامت انسان و بررسی انتقال این عنصر به محصولات کشاورزی و منابع آب است. همچنین در چادگان، نصب و بهره‌برداری از سیستم‌های فیلتراسیون و کنترل گردوغبار در کارخانه سنگ‌شکن، همراه با پایش دوره‌ای خاک، می‌تواند از تشدید آلودگی و گسترش آن در آینده جلوگیری

کند. به طور کلی، این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق مطالعات زمین‌شناسی، شاخص‌های آلودگی و تحلیل‌های مکانی، رویکردی کارآمد برای شناسایی منشأ، شدت و پراکنش فلزات سنگین در خاک است و می‌تواند مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی، حفاظت از منابع خاک، کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و ارتقای سلامت عمومی در مناطق معدنی و صنعتی کشور فراهم آورد.

۵- تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچگونه تضاد منافع در این پژوهش وجود ندارد.

۶- تأییدیه اخلاقی

این مقاله شامل هیچگونه مطالعه‌ای بر روی انسان یا حیوان نیست که نیاز به اخذ مجوز اخلاقی داشته باشد.

۷- دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش بنا به درخواست منطقی از نویسنده مسئول قابل دسترسی است.

۸- منابع

1. Alloway, B.J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (3rd ed) Springer, Dordrecht.
2. Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T.J., Yuan, Z., & Huang, L. (2014) A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. Science of the Total Environment, 468, 843-853
3. Järup, L. (2003) Hazards of heavy metal contamination. British Medical Bulletin, 68(1) 167-182.
4. Kabata-Pendias, A. (2011) Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). CRC Press, Boca Raton.
5. Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Wang, J. (2018). Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. Science of the Total Environment, 512, 143-153
۶. عظیم‌زاده، ب. و خادمی، ح. (۱۳۹۲). تخمین غلظت زمینه برای ارزیابی آلودگی برخی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی بخشی از استان مازندران. نشریه آب و خاک، ۲۷(۳)، ۵۴۸-۵۵۹.
7. Rezaee, A., Akbari, A., Eslami, A., & Khataee, A. (2020) Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in soils around the copper mining area of Sarcheshmeh, Iran. Environmental Earth Sciences 79(5), 1-12.
8. Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Tavakol, M., Lahijanzadeh, A.R., Jaafarzadeh, N. Kermani, M. (2015) Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran. Science of the Total Environment, 505, 712-723
9. Nabi Bidhendi, G., Karbassi, A.R., Nasrabadi, T., & Hoveidi, H. (2019) Influence of zinc mine on river water quality and metallic elements pollution. Environmental Monitoring and Assessment, 155(1-4), 175-183.
10. Fu, J., Zhao, C., Luo, Y., Liu, C., Kyzas, G.Z., Luo, Y., et al. (2014) Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: their relations to environmental factors. Journal of Hazardous Materials, 270, 102-109.
11. Guo, G., Wu, F., Xie, F., & Zhang, R. (2012) Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China. Journal of Environmental Sciences, 24(3), 410-

418.

12. Zhao, K., Fu, W., Ye, Z., & Zhang, C. (2015) Contamination and spatial variation of heavy metals in the soil-rice system in Nanxun County, Southeastern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 12(2) 1577-1594 .
۱۳. آقانباتی، س.ع.، ۱۳۸۵، زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
14. Reimann, C., & de Caritat, P (2005) Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, 337(1-3), 91-107
15. Muller, G. (1969). Index of Geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2(3), 108-118
16. Hakanson, L. (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. *Water Res.* 14(8), 975-1001.
17. Tomlinson, D.L. et al. (1980) Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgol. Mar. Res.*, 33(1), 566-575.
18. Hernandez, L., Probst, A., Probst, J.L. (2003) Heavy metal distribution in some French forest soil. *Sci. Total Environ.*, 312, 195-219
19. Webster, R. and Burges, T.M. (2002) Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. *J. Soil Sci* 3 1, 505-524 .
20. Mohammad, A.H. et al. (2010). Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *J. Hazard. Mater.*, 173(1-3), 384-392.