

مطالعه مکانی میزان آلودگی خاک ها و رسوبات آبرفتی پارک های شهری شیراز توسط فلزات سنگین: کاربرد شاخص های آلودگی و GIS

عاطفه نیمروزی*؛ کارشناس سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی زمین شناسی جنوب کشور، شیراز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱

چکیده :

آلودگی خاک ها و رسوبات آبرفتی پارک های شهری به فلزات سنگین یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی در شهرهای بزرگ است که می تواند سلامت شهروندان، به ویژه کودکان را تهدید کند. این مطالعه به بررسی کمی و مکانی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی ۱۳ پارک شیراز می پردازد. نمونه های خاک از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر جمع آوری شده و غلظت فلزات As، Cr، Ni، Cu، Zn، Cd، Pb با دستگاه ICP-MS اندازه گیری گردید. برای ارزیابی آلودگی، شاخص های ضریب آلودگی (CF)، شاخص زمین انباشتی (Igeo)، ضریب غنی سازی (EF) و شاخص آلودگی یکپارچه (IPI) محاسبه شدند. نتایج نشان داد که فلزات کادمیوم و آرسنیک در برخی پارک ها مانند باهنر، حدیث و باران در سطوح آلودگی شدید تا بسیار شدید قرار دارند، در حالی که سایر عناصر عمدتاً در محدوده آلودگی کم تا متوسط گزارش شدند. اختلاف سطح آلودگی میان عناصر مختلف به تفاوت در منشاء و رفتار ژئوشیمیایی آنها مربوط است. در حالی که غلظت بالای As و Cd بیشتر از فعالیت های انسانی نظیر ترافیک و صنایع ناشی می شود، سایر فلزات مانند Ni، Cr و Zn غالباً منشاء طبیعی تر داشته و در محدوده آلودگی کم تا متوسط باقی مانده اند. این مطالعه بر اهمیت پایش مستمر کیفیت خاک و مدیریت آلودگی در فضاهای سبز شهری تأکید می کند تا سلامت عمومی حفظ شود.

واژه های کلیدی: فلزات سنگین، شاخص آلودگی، CF، EF، Igeo، پارک شهری، خاک، شیراز.

مقدمه

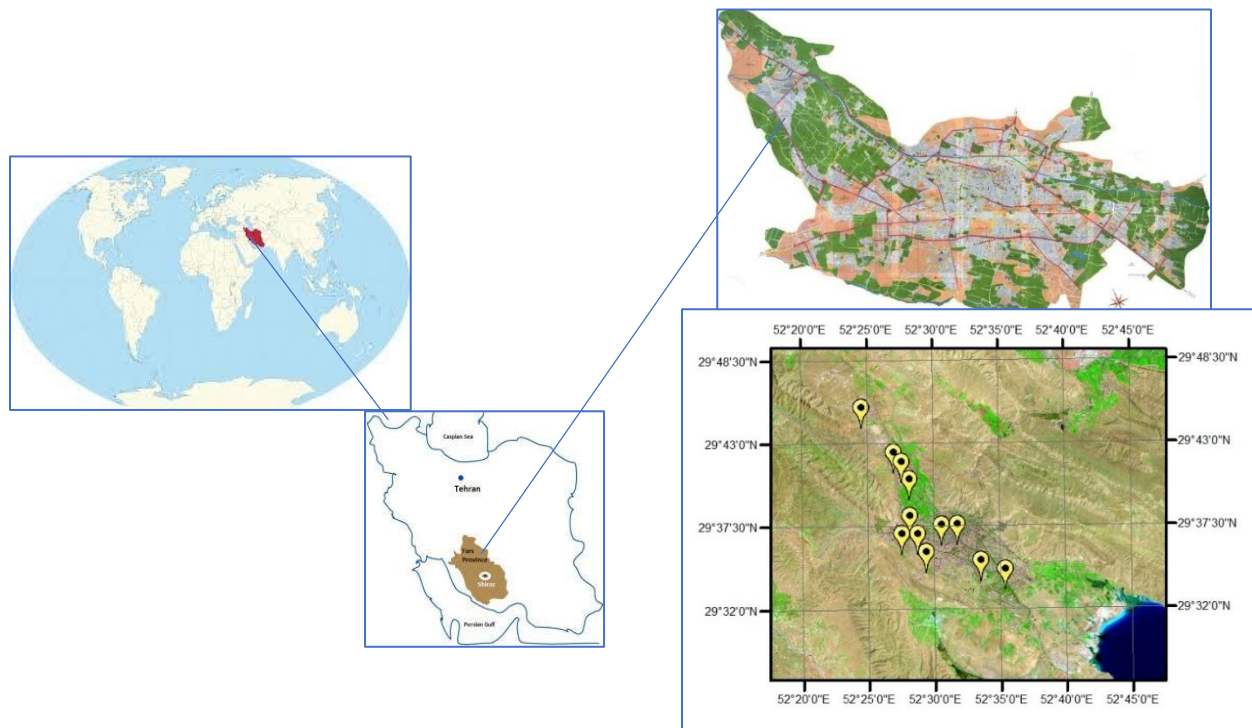
پارک‌ها و فضاهای سبز شهری از عناصر اساسی شهرهای مدرن‌اند که با بهبود کیفیت زیست‌محیطی، ارتقای سلامت روانی و جسمی و افزایش رفاه اجتماعی، نقشی کلیدی در پایداری شهری ایفا می‌کنند (Tzoulas et al., 2007; Kabisch et al., 2015). این فضاها علاوه بر تقویت تعاملات اجتماعی و ارتباط با طبیعت، برای گروه‌های حساس مانند کودکان، سالمندان و بیماران مزمن اهمیت ویژه‌ای دارند (Hartig et al., 2014; Li et al., 2021). با این حال، توسعه بی‌رویه و غیرقابل کنترل شهرنشینی، افزایش وسایل نقلیه موتوری، فعالیت‌های صنعتی، و افزایش حجم زباله‌های شهری، چالش‌های جدی را برای حفظ سلامت این فضاها ایجاد کرده است (Wei & Yang, 2010; Islam et al., 2015). یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های زیست‌محیطی در پارک‌ها، آلودگی خاک آن‌ها به فلزات سنگین است. این فلزات که شامل سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، آرسنیک (As) و دیگر عناصر سنگین می‌شوند، به دلیل مقاومت بالا در برابر تجزیه زیستی و قابلیت تجمع در زنجیره غذایی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های شهری محسوب می‌گردند (Chen et al., 2019; Banerjee, 2003). منابع آلودگی فلزات سنگین بسیار متنوع بوده و عمدتاً شامل انتشار ناشی از حمل‌ونقل، فعالیت‌های صنعتی، آلودگی ناشی از دفع زباله‌های شهری و استفاده از کودها و سموم شیمیایی در فضای سبز می‌باشند (Facchinelli et al., 2001; Liu et al., 2005). کودکان به دلیل رفتارهای خاصی مانند بازی و تماس مستقیم با خاک، استنشاق گرد و غبار معلق و بلع غیرارادی ذرات آلوده، در معرض بالاترین ریسک مواجهه با این آلاینده‌ها قرار دارند که می‌تواند عواقب جدی در سلامت آنان ایجاد نماید (Zheng et al., 2010; Lu et al., 2015). مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی به بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک پارک‌ها پرداخته‌اند. به عنوان مثال، در مادرید اسپانیا، De Miguel و همکاران (۲۰۰۷) گزارش داده‌اند که خاک زمین‌های بازی کودکان دارای غلظت بالایی از فلزات سنگین بوده که این مسئله نگرانی‌های بهداشتی قابل توجهی ایجاد می‌کند. در چین، تحقیقات Wang و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که منابع عمده آلودگی خاک پارک‌ها، انتشارهای ترافیکی و فعالیت‌های صنعتی هستند که موجب تهدید سلامت عمومی می‌گردند. همچنین، Sartor و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی پارک‌های شهری شیکاگو به تجمع معنادار فلزات سنگین در خاک این مناطق و ریسک بالقوه برای کودکان اشاره کرده‌اند. پژوهش‌های مشابه در مناطق شهری دیگر مانند Xi'an (Zhao et al., 2014) و جنوب اروپا (Mico et al., 2006) نیز بر اهمیت پایش مستمر و مدیریت دقیق منابع آلودگی تأکید دارند. استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی مانند ضریب آلودگی (CF)، شاخص غنی‌سازی (EF) و شاخص پتانسیل آلودگی (IPI) به همراه تحلیل‌های آماری چندمتغیره نظیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌ای (HCA)، به شناسایی منابع آلودگی و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی کمک شایانی می‌کند (Müller, 1969; Hakanson, 1980; Facchinelli et al., 2001; Zhao et al., 2014). گرچه مطالعاتی در زمینه آلودگی فلزات سنگین در خاک فضاهای سبز شهری انجام شده است، اما اغلب این مطالعات به شهرهای تهران، مشهد و اراک محدود بوده‌اند. این تحقیقات نشان می‌دهند که در برخی مناطق، غلظت فلزات سنگین از حد مجاز فراتر رفته و تهدیدی جدی برای سلامت شهروندان به‌ویژه کودکان محسوب می‌شود (Pourang et al., 2014; Mohammadi et al., 2019; Saffari et al., 2016). با بیش از ۵۰۰ پارک و فضای سبز، داده‌های جامع و سیستماتیک درباره وضعیت آلودگی خاک فضاهای سبز کمتر موجود است (Karimi et al., 2020). موقعیت جغرافیایی و اقلیمی خاص شیراز، افزایش تراکم جمعیت و گسترش شهرنشینی، و همچنین قرارگیری پارک‌ها در نزدیکی جاده‌های پرتردد و مناطق صنعتی، شرایط مناسبی برای افزایش بار آلودگی‌های فلزی ایجاد کرده است (Zarei et al., 2020; Bagheri et al., 2018).

علاوه بر چالش‌های مذکور، فقدان سیستم‌های پایش منظم و سیاست‌های مدیریتی هدفمند برای کنترل کیفیت خاک در پارک‌های شهری شیراز، ضرورت انجام مطالعات جامع و دقیق در زمینه ارزیابی آلودگی‌های فلزات سنگین را دوجندان کرده است. استفاده از شاخص‌های ارزیابی کیفیت خاک مانند ضریب آلودگی (CF)، شاخص غنی‌سازی (EF)، شاخص غلظت ژئوشیمیایی (Igeo) و شاخص پتانسیل آلودگی (IPI)، در کنار تحلیل‌های آماری پیشرفته چندمتغیره از جمله تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌ای (HCA)، می‌تواند در شناسایی دقیق‌تر منابع آلودگی، میزان تأثیرگذاری هر منبع و در نهایت راهکارهای کاهش ریسک مؤثر باشد. (Müller, 1969; Hakanson, 1980; Facchinelli et al., 2001; Chen et al., 2005)

با توجه به اهمیت سلامت عمومی و حساسیت ویژه کودکان به آلاینده‌های زیست‌محیطی، به ویژه در فضاهای سبز شهری که محل بازی و تفریح آنان است، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی جامع میزان آلودگی فلزات سنگین در خاک پارک‌های شیراز و شناسایی منابع احتمالی این آلاینده‌ها انجام می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند علاوه بر فراهم آوردن داده‌های علمی دقیق و معتبر برای مدیران شهری و زیست‌محیطی، چارچوبی برای تدوین سیاست‌های مدیریتی و حفاظت از سلامت جامعه، به ویژه کودکان، فراهم آورد و به ارتقاء کیفیت زیست محیطی فضاهای سبز شهری کمک کند.

منطقه مورد مطالعه

شهر شیراز، مرکز استان فارس در جنوب غربی ایران، یکی از مهم‌ترین شهرهای تاریخی، فرهنگی و گردشگری کشور به شمار می‌رود. این شهر با مختصات جغرافیایی ۲۹.۵۹۱۸ درجه شمالی و ۵۲.۵۸۳۶ درجه شرقی و ارتفاعی حدود ۱۵۰۰ متر از سطح دریا، در دامنه‌های زاگرس جنوبی واقع شده است. شیراز با آب‌وهوایی معتدل و مطبوع، باغ‌های تاریخی همچون باغ‌های ارم و جهان‌نما، اماکن فرهنگی و تاریخی مهم مانند تخت جمشید، حافظیه و سعدیه، سالانه میزبان گردشگران فراوانی است که جذب جلوه‌های طبیعی و فرهنگی این شهر می‌شوند (Jafari et al., 2021). همچنین فضای سبز گسترده و متنوعی شامل پارک‌های شهری و بوستان‌های متعدد در سطح شهر وجود دارد که نقش کلیدی در بهبود کیفیت زیست‌محیطی، کاهش آلودگی هوا و افزایش رفاه و سلامت روانی شهروندان ایفا می‌کنند (Kabisch et al., 2017). با این حال، روند سریع شهرنشینی، توسعه صنعتی و افزایش جمعیت و ترافیک شهری، فشار زیادی بر منابع طبیعی و محیط زیست شیراز وارد کرده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی شهرهای کلان همچون شیراز، آلودگی خاک مناطق شهری به ویژه در فضاهای سبز است که می‌تواند منجر به مخاطرات جدی برای سلامت عمومی شود. (Li et al., 2022) پارک‌ها به عنوان محیط‌هایی که معمولاً باید از نظر زیست‌محیطی پاک و ایمن باشند، به دلیل قرارگیری در مناطق پرتردد و مجاورت با منابع آلاینده همچون جاده‌ها، صنایع و مراکز خدماتی، در معرض آلودگی به فلزات سنگین قرار دارند (Zhao et al., 2019).



شکل ۱: موقعیت شهر شیراز در کشور ایران و نقشه جهان به همراه نقاط نمونه برداری در شهر شیراز

مواد و روش های تحقیق

در این مطالعه، نمونه برداری از خاک سطحی ۱۳ پارک مهم شیراز انجام شده است: پارک قصرالدشت، بوستان حدیث، باهنر، استقلال، گلدشت، جوان، لاله، باران، ایرانیان، آزادی، خلدبرین، جنت، و جماران. این پارکها در نقاط مختلف شهری با شرایط متفاوت ترافیکی، صنعتی و کاربری اراضی اطراف انتخاب شده اند تا نماینده وضعیت آلودگی در مناطق مرکزی، حاشیه ای و پرتدد باشند (جدول ۱، شکل ۱). نمونه های خاک از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر به صورت سیستماتیک و تصادفی با رعایت تکرار سه گانه جهت کاهش خطای نمونه گیری جمع آوری شده اند. زمان نمونه برداری یک ماه پس از کود دهی نیمه دوم سال، در صبح زود و پیش از آغاز ترافیک به منظور کاهش آلودگی های لحظه ای ناشی از وسایل نقلیه انتخاب گردید (Zhou et al., 2016; Wang et al., 2020).

نمونه ها پس از خشک شدن در دمای محیط و الک شدن، تحت هضم اسیدی ($\text{HNO}_3\text{-HCl-HF}$) در سیستم هضم مایکروویو بر اساس روش USEPA 3052 آماده سازی شده اند (USEPA, 2002) اندازه گیری فلزات سنگین Pb , Cd , Zn , Cu , Ni و Cr با طیف سنج ICP-MS در آزمایشگاه شیمی سازمان زمین شناسی انجام شده (جدول ۱) و دقت داده ها با استفاده از نمونه های شاهد CRM و نمونه های تکراری کنترل گردیده است (Wang et al., 2020). در این مطالعه، تنها تحلیل شیمیایی فلزات سنگین با استفاده از ICP-MS انجام شد و کانی شناسی رسوبات یا خاکها بررسی نگردید. دلیل این امر تمرکز پژوهش بر ارزیابی کمی و مکانی آلودگی فلزات بالقوه سمی و شاخص های آلودگی بوده است و هدف اصلی، شناسایی شدت و پراکنش فلزات سنگین در سطح پارکها بود.

انجام کانی شناسی می توانست اطلاعات تکمیلی در مورد فرم های معدنی عناصر فراهم کند، اما به دلیل محدودیت منابع و تمرکز مطالعه بر ارزیابی آلودگی خاک و رسوبات برای مدیریت شهری از آن صرف نظر شد.

برای ارزیابی شدت و ماهیت آلودگی خاک، از شاخص های ژئوشیمیایی مختلف استفاده شد که هر یک ابعاد متفاوتی از آلودگی و خطرات زیست محیطی را نشان می دهند. شاخص ضریب آلودگی (Contamination Factor, CF) میزان افزایش غلظت فلز نسبت به مقدار طبیعی زمینه ای را اندازه گیری می کند (Hakanson, 1980). شاخص زمین انباشتگی (Igeo) با استفاده از لگاریتم غلظت نمونه نسبت به پس زمینه، شدت آلودگی را طبقه بندی می کند (Müller, 1969) ضریب غنی سازی (Enrichment Factor, EF) برای شناسایی منشأ طبیعی یا انسانی آلاینده ها کاربرد دارد و بر اساس مقایسه نسبت عنصر به عنصر مرجع (معمولاً اسکاندیوم یا آلومینیوم) محاسبه می شود (Sutherland, 2000). شاخص ریسک زیست محیطی پتانسیل (Potential Ecological Risk Index, RI) شدت و خطر بالقوه آلاینده ها را با توجه به سمیت و غلظت آن ها برآورد می کند (Hakanson, 1980). شاخص آلودگی یکپارچه (Integrated Pollution Index, IPI) و شاخص نمرود (Nemerow Pollution Index, NPI) برای ارزیابی کلی کیفیت خاک و تجمع آلاینده ها به کار می روند و کاربرد گسترده ای در مطالعات ارزیابی آلودگی دارند (Zhang et al., 2009; Nemerow, 1985).

نتایج این پژوهش می تواند اطلاعات حیاتی برای مدیریت فضاهای سبز شهری و کاهش ریسک مواجهه شهروندان، به ویژه کودکان، با فلزات سنگین فراهم آورد و به سیاست گذاران در تدوین برنامه های پایدار شهری کمک نماید. ضرورت پایش مستمر، بهبود کیفیت خاک و آموزش عمومی در این زمینه از اهمیت ویژه ای برخوردار است (Li et al., 2021; Wei & Yang, 2010). جدول ۲، مهم ترین شاخص های ارزیابی آلودگی رسوبات را همراه با فرمول های مربوط، توضیح عملکرد هر شاخص، مراجع معتبر و کاربردهای کلیدی آن ها ارائه می دهد. با استفاده از این شاخص ها می توان شدت آلودگی، منبع آلودگی و ریسک زیست محیطی عناصر بالقوه سمی را به طور دقیق تحلیل و مدیریت کرد.

در این مطالعه، به منظور نمایش الگوی پراکندگی مکانی آلودگی فلزات سنگین در پارک های شهری، از فناوری سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته شد. با استفاده از این ابزار، موقعیت دقیق نقاط نمونه برداری بر روی نقشه شهری مشخص گردید و شدت آلودگی هر عنصر با دایره هایی با اندازه متناسب با مقدار آلودگی در هر نقطه نمایش داده شد. این روش امکان درک بصری و سریع تر از میزان و گستره آلودگی را فراهم کرده و به تصمیم گیرندگان شهری کمک می کند تا مناطق با اولویت بیشتر برای مدیریت و پایش زیست محیطی را شناسایی نمایند. استفاده از GIS در چنین مطالعاتی، بر اساس پژوهش های بین المللی نیز توصیه شده است. برای مثال، پژوهشگران مانند Zhou et al. (2022) و Wang et al. (2021) در بررسی آلودگی خاک های شهری در چین، نشان داده اند که ترکیب داده های تحلیلی با GIS موجب افزایش دقت در شناسایی نواحی با خطر بالا شده و برای مدیریت محیط زیستی شهری بسیار راه گشا بوده است. همچنین، Al-Anzi et al. (2020) با بررسی فلزات سنگین در پارک های شهری کویت، تأکید کرده اند که تحلیل مکانی داده ها در محیط GIS در سیاست گذاری های محیط زیستی و اولویت بندی مداخلات پاک سازی نقش کلیدی ایفا می کند.

یافته ها

در این پژوهش، با هدف بررسی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی، ۱۳ نقطه نمونه برداری از پارک‌های مختلف در سطح شهر انجام شد. برای هر نمونه، غلظت ۸ عنصر بالقوه سمی شامل آرسنیک (As)، کادمیوم (Cd)، کروم (Cr)، کبالت (Co)، نیکل (Ni)، سرب (Pb)، قلع (Sn) و روی (Zn) اندازه‌گیری گردید (شکل ۳). با استفاده از مقادیر زمینه‌ای (UCC) و عنصر مرجع اسکاندیم (Sc)، شاخص‌های آلودگی شامل شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)، ضریب آلودگی (CF)، ضریب غنی‌شدگی (EF) و شاخص پتانسیل آلودگی (IPI) محاسبه شدند. نتایج این محاسبات در جدول ۳ به تفکیک هر پارک ارائه شد. بررسی شاخص‌های آلودگی در پارک‌های حدیث و قصرالدشت نشان می‌دهد که پارک حدیث در وضعیت آلودگی قرار دارد، به‌ویژه برای عناصر آرسنیک (As) با $CF=11.39$ و $Igeo=2.9$ و کادمیوم (Cd) با $CF=16.63$ و $Igeo=3.47$ که هر دو نشان‌دهنده آلودگی شدید و غنی‌شدگی بالا هستند. همچنین عناصر نیکل (Ni) و قلع (Sn) نیز با EF بالا و Igeo بیش از ۱.۳ دارای سطح آلودگی متوسط تا بالا هستند. در مقابل، پارک قصرالدشت از نظر آلودگی As در وضعیت بسیار کم قرار دارد ($Igeo=-1.02$)، اما همچنان Cd با $Igeo=3.18$ در آستانه آلودگی شدید است. عناصر Ni و Sn نیز در این پارک دارای آلودگی متوسط هستند، اما سایر عناصر مانند Cr، Pb و Zn در هر دو پارک عمدتاً در محدوده آلودگی کم یا بدون آلودگی قرار دارند.

بررسی شاخص‌های آلودگی در پارک‌های گل‌دشت، استقلال و باهنر (جدول ۳) نشان می‌دهد که در پارک گل‌دشت عناصر آرسنیک (As)، کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni) و قلع (Sn) دارای میزان آلودگی بالا تا شدید هستند و این پارک از نظر تجمع آلاینده‌ها در وضعیت نگران‌کننده‌تری قرار دارد. در پارک استقلال تنها عنصر کادمیوم (Cd) آلودگی شدید نشان می‌دهد، در حالی که سایر عناصر در محدوده آلودگی کم تا متوسط قرار دارند. پارک باهنر نیز از نظر آلودگی به عناصر As و Cd در وضعیت بحرانی قرار دارد و شاخص‌های EF و Igeo برای این دو عنصر در محدوده غنی‌شدگی و آلودگی شدید قرار گرفته‌اند. همچنین عناصر Ni و Sn نیز در این پارک دارای سطوح متوسط تا بالا از آلودگی هستند. بررسی شاخص‌های آلودگی در پارک‌های ایرانیان، باران، لاله و جوان (جدول ۴) نشان می‌دهد که در پارک ایرانیان، به‌جز عنصر Cd با $CF=5.61$ و $Igeo=1.90$ که نشان‌دهنده آلودگی نسبتاً بالا است، سایر عناصر در محدوده آلودگی کم تا متوسط قرار دارند، و As نیز فاقد آلودگی است. در مقابل، پارک باران دارای سطوح بالایی از آلودگی به عناصر As ($CF=12.64$)، $Igeo=3.07$ و $CF=9.39$ ، Cd ($Igeo=2.64$) بوده و هر دو عنصر نشان‌دهنده آلودگی شدید و غنی‌شدگی بالا هستند. همچنین عنصر Ni نیز با EF بیش از ۱۲ و $Igeo=1.44$ نشان‌دهنده آلودگی متوسط تا قابل توجه است. پارک لاله نیز در وضعیت مشابهی قرار دارد؛ As و Cd با Igeo بیش از ۲.۶ و EF بالا در سطح آلودگی شدید هستند و عنصر Ni نیز آلودگی متوسط نشان می‌دهد. در پارک جوان، عنصر As با $Igeo=2.04$ و Cd با $Igeo=2.79$ دارای آلودگی شدید هستند، و عناصر Ni و Sn نیز در این پارک با EF بالا و Igeo حدود ۱.۵ دارای سطح آلودگی قابل توجهی می‌باشند.

جدول ۱: موقعیت جغرافیایی پارک های هدف در شهر شیراز همراه با داده های ژئوشیمیایی mg/kg

پارک ها	lat	lon	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sc	Sn	Zn
قصرالدشت	29.67	52.47	1.33	1.33	13.59	173.05	27.91	536.77	150.44	3.00	7.78	3.16	48.37
حدیث	29.63	52.47	20.49	1.63	13.80	145.45	31.15	551.66	146.79	3.00	7.91	3.35	68.95
باهنر	29.70	52.45	34.53	1.15	20.10	175.90	36.83	562.23	158.48	8.02	9.62	3.90	57.94
استقلال	29.75	52.41	1.00	1.30	16.13	168.87	34.55	566.63	185.47	9.17	9.64	4.03	87.43
گلدشت	29.69	52.46	11.85	0.64	18.11	139.46	34.23	555.21	147.29	12.31	8.57	3.25	68.55
جوان	29.58	52.56	11.07	1.02	16.89	148.57	37.48	560.19	171.22	50.52	9.15	3.86	67.99
لاله	29.58	52.56	25.72	0.91	12.53	148.51	39.29	531.11	156.25	31.91	8.18	3.71	72.74
باران	29.57	52.59	22.75	0.92	19.53	153.21	30.70	558.99	154.53	7.50	9.07	3.71	101.03
ایرانیان	29.59	52.49	1.00	0.55	13.28	157.06	33.43	515.02	111.62	2.56	8.06	2.50	61.62
آزادی	29.62	52.53	1.00	1.12	15.28	171.93	91.96	575.49	156.78	31.52	8.70	3.32	109.07
خلدبرین	29.62	52.51	1.00	0.43	11.69	116.78	33.20	457.52	134.52	3.00	8.01	3.83	57.62
جنت	29.61	52.48	12.47	1.15	16.44	113.16	26.87	438.71	91.41	3.00	7.01	2.21	76.23
جماران	29.61	52.46	13.59	1.35	11.92	120.19	21.06	407.14	161.19	6.37	6.19	3.80	38.87

بررسی شاخص‌های آلودگی در پارک‌های جماران، جنت، خلدبرین و آزادی (جدول ۵) نشان می‌دهد که در پارک جماران، عناصر آرسنیک (As) و کادمیوم (Cd) دارای آلودگی شدید با EF بالا و Igeo بیش از ۲ هستند که نشان‌دهنده آلودگی بسیار خطرناک این دو عنصر است. در پارک جنت نیز همین الگو تکرار شده و Cd و As بیشترین آلودگی را دارند. به‌ویژه Cd با $EF=37.12$ و $Igeo=2.97$ ، که گویای غنی‌شدگی بسیار بالا و آلودگی شدید است. اما در پارک خلدبرین، غلظت این عناصر به‌مراتب پایین‌تر بوده، به‌طوری‌که تنها Cd با $CF=4.39$ در وضعیت نسبتاً قابل توجه قرار دارد و سایر عناصر در محدوده آلودگی کم تا متوسط هستند. در پارک آزادی نیز، Cd با $EF=28.9$ و $Igeo=2.93$ دارای سطح آلودگی شدید است، در حالی‌که سایر عناصر در سطح کم تا متوسط قرار دارند و As با Igeo منفی، بدون آلودگی خاصی است. نتایج شاخص آلودگی پتانسیل تجمعی (IPI) در پارک‌های شهری مورد مطالعه نشان داد (جدول ۶) که اغلب نمونه‌ها در محدوده آلودگی کم تا متوسط قرار دارند. با این حال، برخی از نمونه‌ها، به‌ویژه در پارک قصرالدشت و پارک حدیث، دارای مقادیر بالاتری از IPI بودند که نشان‌دهنده تأثیر احتمالی منابع آلاینده شهری همچون ترافیک، فعالیت‌های انسانی و نزدیکی به خیابان‌های پرتردد است. این تفاوت‌ها در مقادیر IPI بیانگر ناهمگونی توزیع آلاینده‌ها در سطح پارک‌ها و اهمیت موقعیت مکانی، کاربری زمین‌های اطراف و شرایط ژئومورفولوژیکی است. تفاوت آشکار در سطح آلودگی میان فلزات مختلف، به ویژه غلظت‌های بالای آرسنیک (As) و کادمیوم (Cd) در مقایسه با سایر عناصر، نشان‌دهنده نقش غالب منابع انسانی در آلودگی خاک پارک‌هاست. به نظر می‌رسد تمرکز بالای این دو عنصر در پارک‌هایی نظیر باهنر، حدیث، باران و لاله ناشی از تأثیر ترافیک سنگین، صنایع مجاور، سوخت‌های فسیلی، و ورود پساب‌ها و ذرات معلق شهری باشد. رفتار ژئوشیمیایی این عناصر، از جمله تحرک‌پذیری زیاد و تمایل بالا به جذب بر ذرات رس و مواد آلی نیز سبب شده تا در خاک‌های سطحی تجمع بیشتری پیدا کنند. در مقابل، عناصری مانند نیکل (Ni)، کروم (Cr) و روی (Zn) عمدتاً منشأ زمین‌زاد داشته و در نتیجه، میزان تغییرپذیری و آلودگی آن‌ها در محدوده‌ی کم تا متوسط باقی مانده است. این تفاوت‌ها بیانگر تأثیر ترکیبی عوامل انسانی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در کنترل پراکنش و شدت آلودگی فلزات سنگین در فضاهای سبز شهری شیراز است.

تحلیل داده‌ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) نشان داد که توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین در رسوبات پارک‌های شهری شیراز یکنواخت نیست و الگوی پراکندگی آن‌ها به‌طور محسوسی تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی، کاربری‌های پیرامونی، و تراکم ترافیک قرار دارد. نقشه‌های تولیدشده با GIS نشان دادند که عناصر کادمیوم (Cd) و آرسنیک (As) بیشترین غلظت را عمدتاً در پارک‌های مجاور خیابان‌های پرتردد و نواحی صنعتی دارند، در حالی‌که غلظت فلزاتی مانند کروم (Cr) و نیکل (Ni) در بخش‌های مرکزی شهر کمتر است. همچنین، نمایش شدت آلودگی به‌صورت دایره‌های نسبی بر روی نقشه موجب شناسایی واضح نقاط داغ (Hotspots) شد که این مناطق به‌عنوان نواحی بحرانی آلودگی قابل توجه‌اند.

جدول ۲: معرفی شاخص‌های مختلف ارزیابی آلودگی رسوبات، نحوه محاسبه، کاربرد و مرجع

کاربرد و توضیحات کاربردی	مرجع / نویسنده	توضیح فرمول	فرمول	شاخص
سنجش میزان آلودگی یک عنصر نسبت به مقدار طبیعی؛ ساده و اولیه برای تعیین شدت آلودگی	Hakanson (1980)	به مقدار (CnC_n) نسبت غلظت عنصر در نمونه پس‌زمینه طبیعی آن (BnB_n)	CF=CnBn	CF (Contamination Factor)
تفکیک منبع آلودگی؛ مقادیر بالاتر از ۱.۵ معمولاً نشان‌دهنده فعالیت انسانی و آلودگی غنی شده است	Sutherland (2000)	نرمال‌سازی غلظت عنصر به وسیله یک عنصر مرجع برای تشخیص منبع آلودگی (Sc یا Fe معمولاً) (طبیعی یا انسانی)	EF=(Cn/Cref) sample(Bn/Bref)background	EF (Enrichment Factor)
تعیین درجه آلودگی با طبقه‌بندی از غیر آلوده تا بسیار آلوده؛ شناخته‌شده و رایج‌ترین شاخص در ارزیابی آلودگی رسوبات	Müller (1969)	مقایسه غلظت نمونه با مقدار پس‌زمینه با ضریب تصحیح ۱.۵ برای جبران تغییرات طبیعی	Igeo=log ₁₀ (Cn/1.5×Bn)	Igeo (Geoaccumulation Index)
شاخص کلی برای ارزیابی میزان آلودگی چندعنصری در یک نمونه؛ کمک به تصمیم‌گیری درباره شدت و گستردگی آلودگی	Tomlinson et al. (1980)	تمام عناصر تحت (CF) میانگین ضرایب آلودگی بررسی	IPI=ln∑ _{i=1} ⁿ lnCF _i	IPI (Integrated Pollution Index)

جدول ۳: بررسی شاخص های آلودگی در دو پارک قصرالدشت و حدیث

عنصر	پارک حدیث			پارک قصرالدشت		
	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo
As	11.39	31.91	2.9	0.739	2.09	-1.02
Cd	16.63	46.55	3.47	13.57	38.28	3.18
Co	1.25	3.54	-0.26	1.236	3.48	-0.28
Cr	1.58	4.41	0.07	1.88	5.33	0.32
Ni	3.86	10.96	1.37	3.96	11.24	1.40
Pb	0.15	0.42	-3.32	0.15	0.43	-3.32
Sn	3.95	11	1.40	3.89	11	1.37
Zn	1.03	2.53	-0.54	0.72	1.92	-1.06

جدول ۳: بررسی شاخص های آلودگی در پارک های با هنر، استقلال و گلدهشت

عنصر	پارک گلدهشت			پارک استقلال			پارک با هنر		
	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo
As	6.58	17.8	2.13	0.56	1.26	-1.43	19.18	41.9	3.68
Cd	6.53	16.8	2.12	13.27	30.34	3.15	11.73	27.1	3
Co	1.65	5.06	0.14	1.47	3.36	-0.04	1.83	4.18	0.28
Cr	1.52	4.12	0.01	1.84	5.22	0.29	1.91	5.52	0.35
Ni	3.87	10	1.37	4.88	14.42	1.7	4.17	12.5	1.47
Pb	0.62	1.58	-1.28	0.46	1.04	-1.7	0.40	0.92	1.9
Sn	4.29	11	1.52	4.82	11	1.69	4.81	11	1.68
Zn	1.02	2.63	-0.55	1.30	2.98	-0.2	0.86	2.03	0.79

جدول ۴: بررسی شاخص های آلودگی در پارک های جوان، لاله، باران و ایرانیان

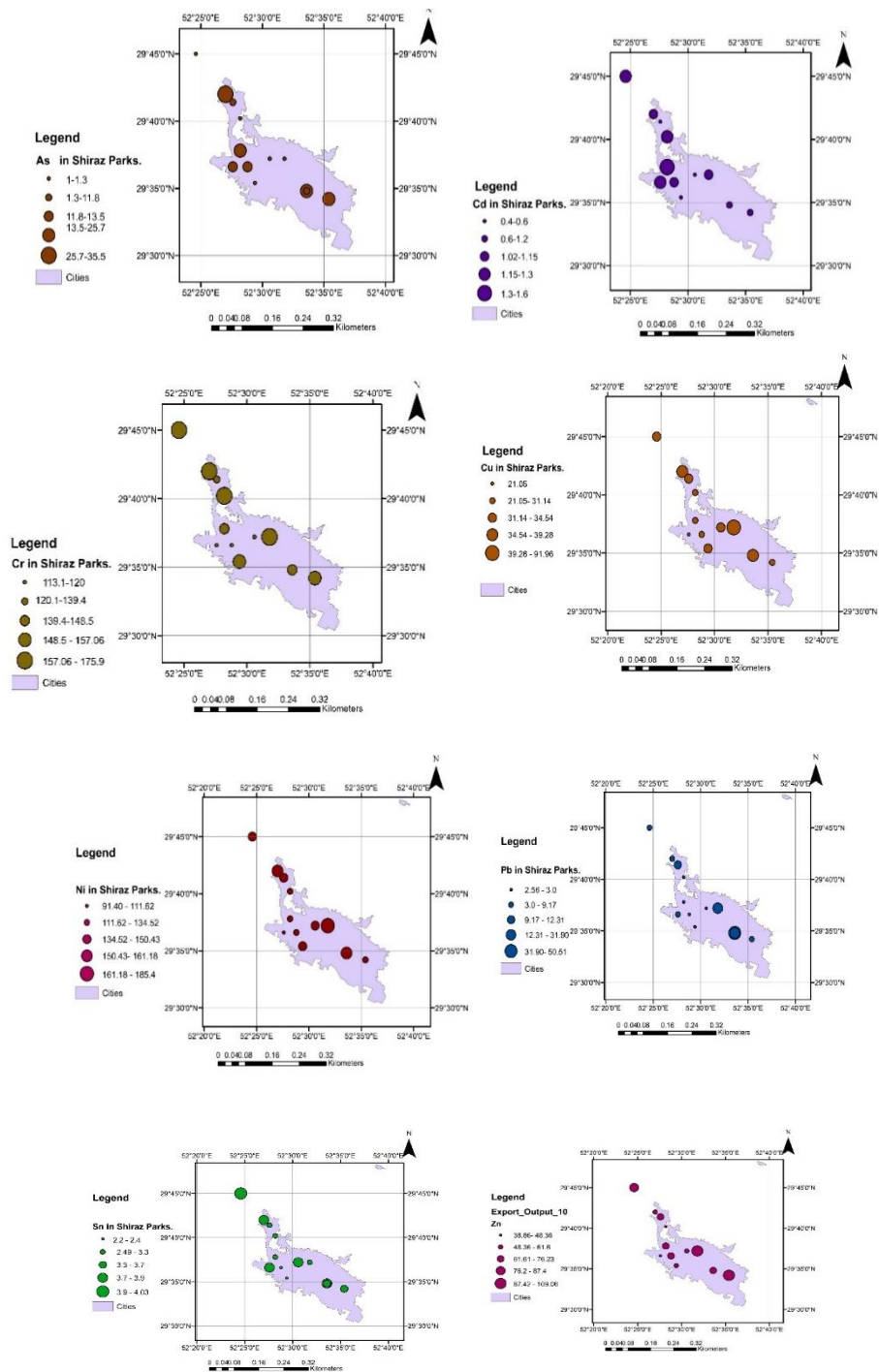
عنصر	پارک ایرانیان			پارک باران			پارک لاله			پارک جوان		
	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo
As	0.56	1.52	-1.43	12.64	30.52	3.07	14.29	38.4	3.25	6.15	14.9	2.04
Cd	5.61	15.4	1.90	9.39	22.87	2.64	9.29	25.2	2.63	10.41	25.4	2.79
Co	1.65	4.5	-0.31	2.15	5.26	0.24	1.14	3.01	-0.4	1.54	3.63	0.04
Cr	1.00	2.77	0.19	1.00	2.66	0.15	1.00	3.00	0.11	1.61	3.83	0.10
Ni	3.34	9.13	0.97	5.04	12.19	1.44	3.98	10.6	1.45	4.51	10.85	1.59
Pb	1.00	2.73	-3.55	1.00	2.43	-2	1.00	4.27	0.09	2.53	6.08	0.75
Sn	1.00	2.73	1.43	1.00	2.43	1.60	1.00	2.69	1.45	4.58	11	1.61
Zn	1.84	5.03	-0.7	3.29	7.98	0.01	1.00	3.00	0.47	1.01	2.44	-0.5

جدول ۵: بررسی شاخص های آلودگی در پارک های جماران، جنت، خلدبرین و آزادی

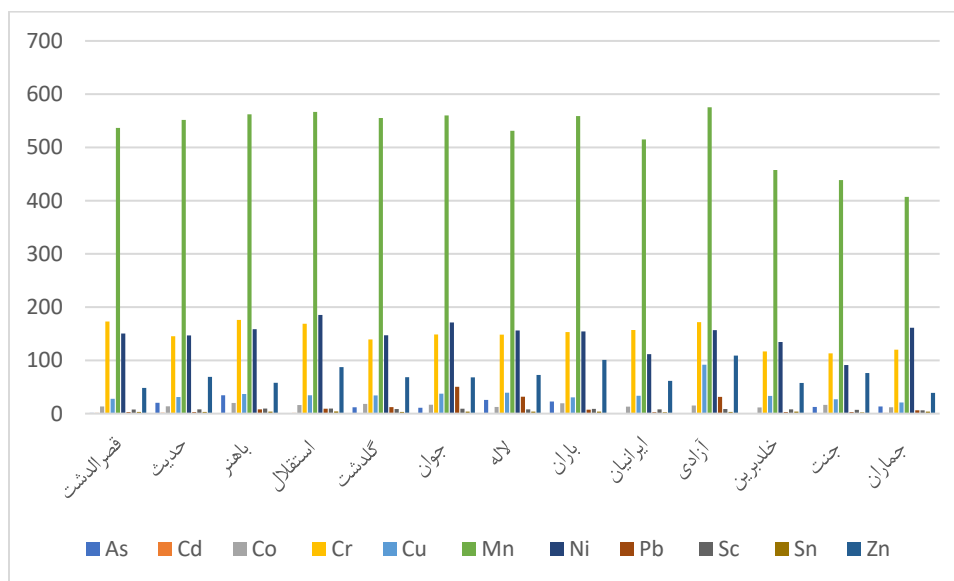
عنصر	پارک جماران			پارک جنت			پارک خلدبرین			پارک آزادی		
	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo	CF	EF	Igeo
As	7.55	30.89	2.33	6.93	21.71	2.21	0.56	1.53	1.43	0.56	1.46	-1.43
Cd	13.78	49.02	3.20	11.73	37.12	2.97	4.39	2	1.55	11.43	28.9	2.93
Co	1.92	6.71	-0.47	2.35	5.83	-0.01	1.46	4	-0.5	1.76	4.42	-0.12
Cr	1.00	2.29	-0.20	1.00	2.34	-0.29	1.00	2.41	0.24	1.00	2.53	0.31
Ni	1.85	6.55	-0.55	3.40	10.72	0.68	4.05	11.18	1.24	1.70	4.11	1.46
Pb	1.00	2.29	-2.24	1.00	2.36	-3.32	1.00	2.75	-3.32	1.00	2.53	0.07
Sn	1.00	2.29	1.05	1.00	2.36	1.22	1.00	2.75	1.42	1.00	2.53	1.54
Zn	1.85	6.55	-1.37	2.84	8.96	-0.40	1.74	4.81	-0.8	1.19	3.01	0.11

جدول ۶: نتایج شاخص آلودگی پتانسیل تجمعی (IPI) در پارک‌های شهری

رتبه آلودگی	نام پارک	IPI
بسیار شدید	پارک باهنر	5.61
شدید	پارک حدیث	4.98
شدید	پارک باران	4.44
شدید	پارک لاله	4.08
شدید	پارک جوان	4.04
متوسط	پارک جنت	3.78
متوسط	پارک استقلال	3.58
متوسط	پارک قصرالدشت	3.27
متوسط	پارک گلدشت	3.26
متوسط	پارک جماران	3.00
کم	پارک آزادی	2.58
کم	پارک ایرانیان	2.00
بسیار کم	پارک خلدیرین	1.90



شکل ۲: داده‌های GIS جهت نشان دادن توزیع مکانی غلظت فلزات در خاک پارک های شهر شیراز



شکل ۳: نمودار ستونی غلظت عناصر بالقوه سمی (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sc, Sn, Zn) در نمونه‌های خاک

پارک‌های مختلف شهر شیراز

نتیجه گیری:

مطالعه حاضر، با ارزیابی کمی و مکانی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی ۱۳ پارک شهری شیراز، نشان داد که این فضاهای سبز شهری به میزان‌های متفاوتی از آلودگی عناصر بالقوه سمی متأثر از فعالیت‌های انسانی و منابع شهری آلوده شده‌اند. شاخص‌های ژئوشیمیایی ضریب آلودگی (CF)، ضریب غنی‌سازی (EF)، شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) و شاخص آلودگی یکپارچه (IPI) بیانگر پراکندگی ناهمگون و شدت متغیر آلودگی در پارک‌ها بود. پارک‌های باهنر، حدیث، باران، لاله و جوان بیشترین میزان آلودگی را داشتند؛ به‌ویژه غلظت بالای عناصر آرسنیک (As) و کادمیوم (Cd) با شاخص‌های CF و EF بسیار بالا و Igeo در رده آلودگی شدید تا بسیار شدید، نمایانگر تأثیر شدید منابع آلاینده انسانی مانند ترافیک، صنایع اطراف و فعالیت‌های شهری است. همچنین وجود غلظت‌های قابل توجه نیکل (Ni) و قلع (Sn) در این پارک‌ها نشان از آلودگی چندعنصری و پیچیدگی منشاء آلودگی‌ها دارد. در مقابل، پارک‌های ایرانیان، آزادی و خلدبرین از نظر سطح آلودگی در وضعیت بهتری قرار داشتند و شاخص‌های فلزات سنگین در آن‌ها عمدتاً در محدوده آلودگی کم تا متوسط گزارش شد. این تفاوت‌ها بیانگر تأثیر شرایط موقعیتی، نوع کاربری اراضی پیرامون پارک‌ها، میزان تردد و ساختار شهری بر توزیع و شدت آلودگی‌هاست. شاخص آلودگی یکپارچه (IPI) نیز تایید کرد که بیشتر پارک‌های مذکور با درجات مختلف آلودگی مواجه‌اند که ممکن است سلامت عمومی، به ویژه کودکان که بیشترین تماس با خاک دارند، را در معرض خطر قرار دهد. از آنجا که پارک‌ها به عنوان محیط‌های باز و پررفت‌وآمد شهری نقش مهمی در بهبود کیفیت زندگی ایفا می‌کنند، آلودگی شدید خاک آن‌ها یک زنگ هشدار مهم برای مسئولان شهری و زیست‌محیطی است. تحلیل داده‌های GIS نشان داد که توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین

در رسوبات پارک‌های شهری یکنواخت نبوده و الگوی پراکندگی آن‌ها به شدت متأثر از موقعیت جغرافیایی، کاربری‌های پیرامونی، تراکم ترافیک و فعالیت‌های انسانی است. نقشه‌های تولیدشده با GIS مشخص کرد که عناصر Cd و As بیشترین غلظت را عمدتاً در پارک‌های مجاور خیابان‌های پرتردد و نواحی صنعتی دارند، در حالی که غلظت فلزاتی مانند Ni و Cr در برخی نقاط مرکزی شهر کمتر است. همچنین، با تجسم شدت آلودگی به صورت دایره‌های نسبی روی نقشه، نقاط داغ (Hotspots) به وضوح شناسایی شدند که در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی جهت پایش آلودگی و مداخلات زیست‌محیطی بسیار مؤثر است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از GIS علاوه بر ارائه درک مکانی از داده‌ها، امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای پراکنش و شناسایی عوامل مؤثر بر آلودگی را فراهم می‌کند.

پیشنهادات

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل فلزات سنگین در رسوبات پارک‌های شهری و شناسایی عناصر دارای خطر بالقوه زیست‌محیطی، پیشنهادهای زیر جهت مدیریت و کاهش آلودگی ارائه می‌شود:

مدیریت مصرف کودها و سموم شیمیایی: ضروری است استفاده از کودهای آلی و زیستی به‌جای کودهای شیمیایی حاوی فلزات سنگین مورد توجه شهرداری و مدیریت فضای سبز قرار گیرد. همچنین اجرای برنامه‌های آموزشی برای کارکنان فضای سبز در خصوص انتخاب و مصرف کودها می‌تواند مؤثر باشد.

پایش منظم آلودگی رسوبات و خاک: برنامه‌ریزی برای نمونه‌برداری‌های دوره‌ای از رسوبات پارک‌ها با هدف پایش تغییرات غلظت فلزات سنگین در بازه‌های زمانی مختلف، به مدیریت محیط‌زیست شهری کمک خواهد کرد.

کاربرد فناوری‌های پاکسازی خاک: استفاده از روش‌های زیستی (Bio-remediation) مانند گیاه‌پالایی (Phytoremediation) برای حذف یا کاهش تجمع فلزات در خاک‌های آلوده، گزینه‌ای کارآمد و اقتصادی محسوب می‌شود. تحقیقات تکمیلی با رویکرد چندرشته‌ای: ترکیب داده‌های زمین‌شناسی، کاربری زمین، و الگوهای شهری با آنالیزهای آماری پیشرفته (PCA و HCA) به درک بهتر از منابع آلودگی و پیشنهاد سیاست‌های کنترلی کمک می‌کند.

توسعه زیرساخت‌های سبز: افزایش پوشش گیاهی بومی و مقاوم به آلودگی، کمک به جذب برخی فلزات سنگین و بهبود سلامت خاک خواهد کرد.

بازنگری در محل احداث برخی پارک‌ها: در مواردی که پارک‌ها در مجاورت منابع صنعتی یا پرترافیک قرار دارند، بازنگری در طرح‌های توسعه فضای سبز و اجرای نوارهای حائل سبز توصیه می‌شود.

References

- Bagheri S., et al. (2018). Heavy metal contamination assessment in urban soils of Shiraz. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 16, 45–56.
- Banerjee A. D. K. (2003). Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India. *Environmental Pollution*, 123, 95–105.
- Chen T., et al. (2005). Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing. *Chinese Journal of Geochemistry*, 24, 71–79.
- Chen Z., et al. (2022). Multivariate statistical analysis of heavy metal pollution and risk assessment in urban soils: Case study from Wuhan City, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234, 113342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113342>
- Cicchella D., De Vivo B., Lima A. (2008). Background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 98, 91–105.
- Facchinelli A., Sacchi E., Mallen L. (2001). Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution*, 114, 313–324.
- Hakanson L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14, 975–1001.
- Islam M. S., Ahmed M. K., Habibullah-Al-Mamun M., Masunaga S. (2015). Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 512–513, 94–102.
- Jafari M., et al. (2021). Urban green space and public health: A study on Shiraz City, Iran. *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, 127087.
- Kabisch N., et al. (2017). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecological Indicators*, 79, 34–39.
- Karimi S., et al. (2020). Urban green spaces in Shiraz: Distribution and environmental status. *Journal of Urban Ecology*, 6(1), 1–12.
- Li X., et al. (2021). Urban green spaces and their role in environmental sustainability. *Environmental Research Letters*, 16, 034034.
- Liu W. H., Zhao J. Z., Ouyang Z. Y., Soderlund L., Liu G. H. (2005). Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China. *Environment International*, 31, 805–812.
- Loska K., Cebula J., Pelczar J., Wiechuła D., Kwapuliński J. (1997). Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik Water Reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 93, 347–365.
- Mico C., Recatalá L., Peris M., Sánchez J. (2006). Assessing heavy metal sources in agricultural soils of a European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere*, 65, 863–872.
- Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geological Journal*, 2, 108–118.
- Nemerow N. L. (1985). *Industrial Waste Treatment: Contemporary Practice and Vision for the Future*. McGraw-Hill.
- Pourang N., et al. (2014). Heavy metals contamination assessment in Tehran urban soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 3341–3353.
- Rajaram B. S., Das A. (2008). Assessment of heavy metal contamination in soils around Jharia coalfield, India. *Environmental Geology*, 54, 761–770.
- Reimann C., et al. (2008). *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. Wiley.
- Saffari M., et al. (2016). Heavy metals pollution in soils of Mashhad urban parks. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 23456–23465.
- Sartor K., et al. (2020). Heavy metals contamination in urban park soils of Chicago, USA. *Journal of Environmental Quality*, 49, 456–466.
- Shi G. T., et al. (2010). Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in urban topsoil in the Yangtze River Delta. *Environmental Earth Sciences*, 60, 1681–1691.
- Sutherland R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39, 611–627.
- Tomlinson D. L., Wilson J. G., Harris C. R., Jeffrey D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Marine Research*, 33, 566–575.
- USEPA (2002). *Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, OSWER 9355.4–24.
- Wang Y., et al. (2020). Assessment of heavy metals pollution in urban park soils of Guangzhou, South China: Implications for human health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(9), 591.
- 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, 99–107.
- Zarei M., et al. (2020). Environmental challenges and green space distribution in Shiraz. *Urban Forestry & Urban*

Greening, 54, 126752.

Zhang L., et al. (2009). Integrated Pollution Index (IPI) assessment of heavy metals contamination in surface soils of Tianjin, China. *Journal of Hazardous Materials*, 172, 770–775.

Zhao H. M., et al. (2014). Source identification and potential ecological risk assessment of heavy metals in urban river sediments: A case study of Xi'an, China. *Ecological Indicators*, 36, 282–291.

Zhou Q., et al. (2016). Seasonal variations of heavy metal concentrations in urban road dust and its pollution assessment in Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 11887–11897.