



Spatial distribution and health risk assessment of six phthalate esters in surface soils with different land uses in Hamedan city

Atena Bayati¹ | Nasrin Hassanzadeh²

1. Environmental Science and Engineering Department, Faculty of Natural Resources & Environment, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: a_bayati@stu.malayeru.ac.ir

2. Corresponding Author, Environmental Science and Engineering Department, Faculty of Natural Resources & Environment, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: n.hassanzadeh@malayeru.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 03 Nov 2025

Received in revised form 6
May 2026

Accepted 16 May 2026

Keywords:

Health risk,

Land use,

Plasticizer,

Spatial distribution.

ABSTRACT

Phthalates (PAEs) are synthetic compounds and polymer plasticizers that are known as environmental pollutants. Due to their widespread use in industries and consumer products, these compounds are released into the environment and have potential effects on human health and ecosystems. The aim of this study was to investigate the spatial distribution of six phthalate compounds including di(2-ethylhexyl) phthalate, dibutyl phthalate, diisodecyl phthalate, diisobutyl phthalate, dimethyl phthalate and diethyl phthalate (DEHP, DBP, DINP, DIDP, DMP and DEP) in surface soils with agricultural, industrial and residential uses in Hamadan city and to assess the health risk arising from them. In this study, 100 soil samples were collected and analyzed using a gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) device. Interpolation maps were drawn using GIS software to determine the spatial distribution of the compounds. The results showed that the average DEHP and DBP compounds, di(2-ethylhexyl) phthalate and dibutyl phthalate, had the highest values of 274.86 and 106.16 ($\mu\text{g/kg}$), respectively, in all soil samples. The highest average of these two compounds was recorded in agricultural land. Based on statistical tests, there was no significant correlation between the concentration of PAEs and soil parameters, but there was a significant relationship between six phthalate esters ($\Sigma 6\text{PAEs}$), indicating a common release source. Health risk assessment showed that children are at greater risk than adults, however, non-carcinogenic risks in both groups were in the low risk range ($\text{HI} < 1$) and carcinogenic risk was in the acceptable range due to DEHP less than 6-10. The results of spatial interpolation indicate higher density and concentration of phthalates in agricultural areas of the northeast, southeast and southwest regions and in industrial areas of the south, southeast and east of Hamadan city. Application of the results of this study can be used in soil pollution reduction planning, development of control policies and improvement of environmental health in Hamadan city.

Cite this article: Bayati, A., & Hassanzadeh, N. (2026). The effects of soil disturbance caused by timber skidding operations on the herbaceous vegetation of Hyrcanian forests (case study: Kheyroud educational and research forest). *Journal of Natural Environment*, 79 (2), 321-339. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.405546.2859>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Phthalate esters (PAEs) are synthetic plasticizers widely used in industrial and consumer products, yet they are not chemically bound to polymer matrices, facilitating their release into the environment. These compounds are recognized as endocrine-disrupting chemicals with potential adverse effects on reproductive health, development, and endocrine function. Despite their environmental significance, comprehensive research on PAEs in Iranian soils—particularly urban and agricultural systems—remains limited, with most studies focusing on aquatic environments. Hamadan city, characterized by adjacent agricultural, industrial, and residential land uses, provides an ideal setting for investigating soil PAE contamination. This study addresses knowledge gaps by examining six PAE compounds (DMP, DEP, DIBP, DBP, DIDP, and DEHP) across 100 soil samples, aiming to: (1) determine PAE concentrations in different land uses; (2) analyze spatial distribution patterns; (3) examine relationships between soil quality parameters and PAE levels; and (4) conduct comprehensive health risk assessments for children and adults through multiple exposure pathways.

Material and Methods

The study was conducted in Hamadan city. A total of 100 composite soil samples were collected from 0–20 cm depth across three land-use categories: 65 residential, 20 agricultural, and 15 industrial sites, selected using GPS-guided random sampling. PAE extraction followed Wei et al.'s (2020) method: 5 g soil was ultrasonicated with hexane-dichloromethane, centrifuged, and cleaned using a column packed with sodium sulfate, neutral alumina, and silica gel. Extracts were concentrated under nitrogen and analyzed by GC-MS using a DB₅ capillary column. Quantification employed external calibration with six-point curves using Sigma-Aldrich standards (99.99% purity). Soil quality parameters (pH, EC, organic matter, calcium carbonate equivalent, and texture) were determined using standard methods. Quality assurance included glassware avoidance of plastics, HPLC-grade solvents, and surrogate (diallyl phthalate) and internal (benzyl benzoate) standards. Recovery rates ranged from 89.01% to 100.04% (mean: 95.81%, RSD: 2.9%), with LOD values of 0.002–0.006 µg/g. Spatial distribution maps were generated using ArcGIS with IDW interpolation. Statistical analyses employed SPSS 27 and Excel 2016, using Kolmogorov-Smirnov, Kruskal-Wallis, Mann-Whitney U, and Spearman correlation tests ($P < 0.05$). Health risk assessment followed USEPA guidelines, calculating ADD through ingestion, inhalation, and dermal contact, with HI for non-carcinogenic and CR for carcinogenic risks.

Results

Mean concentrations of $\Sigma 6$ PAEs followed the order: DEHP (274.86 ± 193.13 µg/kg) > DBP (106.16 ± 89.53 µg/kg) > DINP (6.29 ± 4.97 µg/kg) > DIDP (2.23 ± 1.51 µg/kg) > DEP (2.66 ± 1.30 µg/kg) > DMP (1.94 ± 0.85 µg/kg). DEHP and DBP dominated across all land uses. Agricultural soils exhibited the highest contamination (DEHP: 754.98 ± 510.50 ; DBP: 269.52 ± 226.44 µg/kg), followed by industrial (DEHP: 246.06 ± 315.67 ; DBP: 189.63 ± 175.72 µg/kg), and residential areas (DEHP: 138.39 ± 71.62 ; DBP: 36.63 ± 29.31 µg/kg). Kruskal-Wallis analysis confirmed significant differences in $\Sigma 6$ PAEs across land uses ($P < 0.05$). Mann-Whitney tests revealed significant differences between agricultural-residential and industrial-residential comparisons ($P < 0.05$), while agricultural-industrial differences were non-significant ($P > 0.05$). Spearman correlation showed no significant relationships between PAEs and soil parameters (pH, EC, CCE, OM), but significant inter-PAE correlations suggested common pollution sources. Spatial interpolation maps identified contamination hotspots in northeastern, southeastern, and southwestern agricultural zones, as well as southern, southeastern, and eastern industrial areas. Health risk assessment indicated children face higher exposure risks than adults. For DEHP, ADD through inhalation was higher in adults (3.22×10^{-6} – 0.0022 mg/kg/day), while ingestion dominated in children (5.59×10^{-6} – 3.87×10^{-3} mg/kg/day). Non-carcinogenic HI values remained below 1.0 for all compounds in both age groups (adult HI: 0.041; children HI: 0.035 for DEHP+DBP), indicating acceptable risk. Cancer risk (CR) for DEHP ranged from 10^{-6} to 10^{-5} , signifying moderate risk levels warranting continued surveillance.

Discussion

The predominance of DEHP and DBP as dominant contaminants aligns with global findings and reflects their extensive applications and environmental persistence. Elevated agricultural concentrations likely result from plastic mulching, greenhouse covers, irrigation systems, sewage sludge, fertilizers, and pesticides. Industrial sources include manufacturing emissions, waste disposal, and combustion, while residential sources encompass personal care products, cleaning agents, and plastic packaging. The absence of significant PAE-soil parameter correlations indicates anthropogenic activities exert stronger control over PAE distribution than intrinsic soil properties. Spatial patterns confirm agricultural and industrial activities as major PAE sources, with hotspots correlating with intensive land-use practices. The significant inter-PAE correlations suggest common release sources, necessitating integrated pollution management. Despite HI values indicating acceptable non-carcinogenic risks (<1.0) and CR in moderate range, children demonstrate greater vulnerability due to higher exposure rates and susceptibility. DEHP (IARC Group B2) potential carcinogenicity emphasizes the need for precautionary measures. Limitations include restricted sampling scope, limited consideration of environmental variability, and incomplete risk parameters. Nonetheless, this study provides valuable baseline data for PAE monitoring in Iranian urban soils, supporting evidence-based policies for pollution control and public health protection. Continuous monitoring, source identification, and reduction strategies remain essential to safeguard soil quality, ecosystem health, and human well-being in Hamadan city.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

توزیع مکانی و ارزیابی خطر سلامت شش فتالات استر در خاک‌های سطحی با کاربری‌های متفاوت شهر همدان

آتنا بیاتی^۱ | نسرين حسن زاده^۲✉

۱. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: a_bayati@stu.malayeru.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: n.hassanzadeh@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶ کلیدواژه‌ها: پراکنش فضایی، روان کننده، ریسک سلامت، کاربری اراضی.	فتالات‌ها PAEs ترکیبات سنتزی و نرم کننده‌های پلیمری هستند که به عنوان آلاینده‌های محیطی شناخته می‌شوند. به دلیل کاربرد گسترده در صنایع و محصولات مصرفی، این ترکیبات در محیط زیست منتشر شده و اثرات بالقوه‌ای بر سلامت انسان و اکوسیستم دارند. هدف این پژوهش، بررسی توزیع مکانی شش ترکیب فتالات شامل، دی (۲- اتیل هگزیل) فتالات، دی بوتیل فتالات، دی ایزو دسیل فتالات، دی ایزو نوتیل فتالات، دی متیل فتالات و دی اتیل فتالات DEHP، DBP، DMP، DNP، DIDP در خاک‌های سطحی با کاربری‌های کشاورزی، صنعتی و مسکونی شهر همدان و ارزیابی ریسک سلامت ناشی از آنها بود. در این مطالعه، ۱۰۰ نمونه خاک جمع‌آوری و با دستگاه GC-MS کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجش جرمی آنالیز شدند. نقشه‌های درون‌یابی با استفاده از نرم افزار GIS سامانه اطلاعات جغرافیایی ترسیم شد تا پراکنش فضایی ترکیبات مشخص گردد. نتایج نشان داد که میانگین ترکیبات DEHP و DBP دی (۲- اتیل هگزیل) فتالات و دی بوتیل فتالات به ترتیب ۲۷۴/۸۶ و ۱۰۶/۱۶ میکروگرم بر کیلوگرم بیشترین مقادیر را در تمامی نمونه‌های خاک داشتند. بیشترین میانگین این دو ترکیب در کاربری کشاورزی ثبت شد. براساس آزمون‌های آماری، همبستگی معنی‌داری میان غلظت PAEs و پارامترهای خاک مشاهده نشد، اما میان $\sum 6\text{PAEs}$ شش فتالات استر ارتباط معنی‌دار وجود داشت که بیانگر منبع رهاسازی مشترک است. ارزیابی ریسک سلامت نشان داد کودکان در معرض خطر بیشتری نسبت به بزرگسالان قرار دارند، با این حال، خطرات غیرسرطان‌زایی در هر دو گروه در محدوده کم خطر ($HI < 1$) و ریسک سرطان‌زایی در محدوده قابل قبول ناشی از DEHP کمتر از 10^{-6} برآورد شد. نتایج درون‌یابی مکانی بیانگر تراکم و غلظت بیشتر فتالات‌ها در مناطق کشاورزی نواحی شمال شرقی، جنوب شرقی و جنوب غربی و در مناطق صنعتی بخش‌های جنوب، جنوب شرق و شرق شهر همدان است. کاربرد نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کاهش آلودگی خاک، تدوین سیاست‌های کنترل و بهبود سلامت محیط زیست شهر همدان مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: بیاتی، آتنا؛ و حسن‌زاده، نسرين (۱۴۰۵). توزیع مکانی و ارزیابی خطر سلامت شش فتالات استر در خاک‌های سطحی با کاربری‌های متفاوت شهر همدان.

محیط زیست طبیعی، ۷۹ (۲)، ۳۳۹-۳۲۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.405546.2859>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

فتالات‌ها (Phthalate Acid Esters (PAEs ترکیبات سنتزی هستند که به‌عنوان افزودنی‌های پلیمری در لاستیک‌ها، پلی‌استایرن، پلی‌سلولز و صنایع مختلف مانند لوازم‌آرایشی، اسباب‌بازی، بسته‌بندی مواد غذایی، رنگ‌ها و تجهیزات پزشکی کاربرد دارند (Czogate et al., 2021). این ترکیبات عمدتاً شفاف، بی‌رنگ و در مواد آلی محلول بوده و استحکام و انعطاف‌پذیری پلیمرها را افزایش می‌دهند، اما به‌دلیل نبود پیوند شیمیایی پایدار، به‌راحتی از محصولات جدا و وارد محیط‌زیست می‌شوند. خاک به‌عنوان مخزن اصلی PAEs شناخته می‌شود و مسیرهای ورود آن شامل آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی (Han et al., 2023; Viljoen et al., 2025)، آبیاری با فاضلاب، کاربرد فیلم‌های پلاستیکی و تخلیهٔ پساب‌های صنعتی و شهری است (Boll et al., 2020; Han et al., 2025). این ترکیبات پس از ورود به خاک، توسط گیاه جذب شده و از طریق زنجیرهٔ غذایی سلامت انسان را تهدید می‌کنند (Perestrelo et al., 2021; Wang et al., 2021; Li X. et al., 2022; Amini et al., 2024). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مواجهه کوتاه‌مدت با فتالات کم‌خطر است، اما مواجهه بلندمدت می‌تواند منجر به اختلالات غدد درون‌ریز (Wang et al., 2021)، مشکلات رشد کودکان (Perestrelo et al., 2021)، ناباروری و سقط‌جنین (Marlatt et al., 2022)، بیماری‌های تنفسی مانند آسم (Abdolahnejd et al., 2019) و افزایش ریسک سرطان شود (Li X et al., 2022). علاوه بر مخاطرات سلامت انسانی، آلودگی خاک توسط فتالات‌ها باعث کاهش کیفیت خاک، تغییر pH، کاهش رشد گیاهان و اثر منفی بر میکروارگانیسم‌ها می‌شود. تجزیهٔ PAEs تحت تأثیر نور خورشید، دما، رطوبت و فعالیت میکروبی قرار می‌گیرد (Kasonga et al., 2021). مطالعات Amini و همکاران (۲۰۲۴)، Han و همکاران (۲۰۲۵)، Li و همکاران (۲۰۲۲)، Wang و همکاران (۲۰۲۱) و Wei و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که DEHP، DBP، آلاینده‌های غالب فتالات در خاک‌های کشاورزی و شهری هستند و پراکنش آنها در خاک به نوع کاربری اراضی و فاصله از منابع آلودگی وابسته است. با وجود اهمیت پایش مداوم منابع آلودگی فتالات‌ها، تحقیقات مرتبط با فتالات‌استرها در خاک ایران نسبت به منابع آبی محدود است (Amini et al., 2024). با وجود اهمیت پایش مداوم منابع آلودگی فتالات‌استرها، تحقیقات جامع درباره حضور و توزیع (Σ PAEs) در خاک ایران، به‌ویژه خاک‌های شهری و کشاورزی، نسبت به منابع آبی محدود است (Amini et al., 2024).

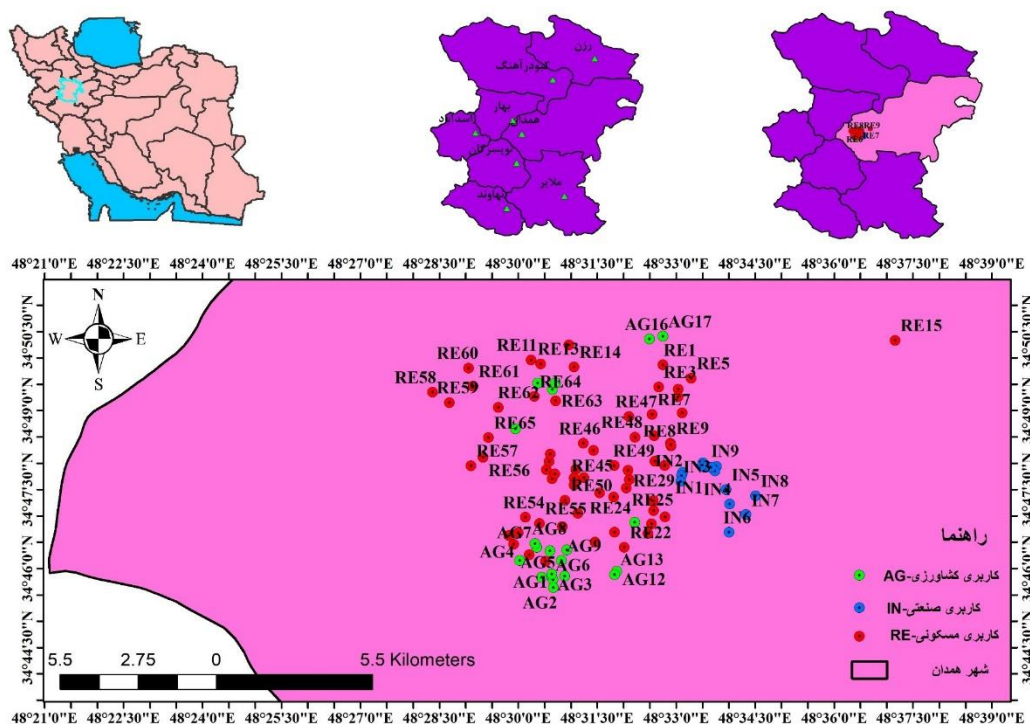
شهر همدان به‌دلیل همجواری با کاربری‌های کشاورزی، صنعتی و مسکونی منطقه‌ای مناسب برای بررسی آلودگی خاک به PAEs است، اما توسعهٔ صنعتی و تغییرات کاربری‌های غیرمجاز، کیفیت خاک و عملکرد اکوسیستم را تهدید می‌کند. اگرچه مطالعات پیشین به بررسی فتالات‌ها، شاخص‌های کیفیت خاک و ریسک سلامت پرداخته‌اند، تمرکز آنها بر تعداد محدودی از ترکیبات و حجم نمونه کمتر بوده است؛ از این‌رو، انجام تحلیلی جامع‌تر ضروری به‌نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر، شش ترکیب فتالات در ۱۰۰ نمونه خاک بررسی شد که با افزایش تعداد ترکیبات و حجم نمونه، دقت تحلیل و برآورد ریسک سلامت انسان را ارتقا می‌دهد. بنابراین، اهداف پژوهش حاضر شامل: ۱) بررسی حضور شش ترکیب فتالات (DEHP، DBP، DIDP، DEP، DMP) در خاک‌های کشاورزی، صنعتی و مسکونی همدان؛ ۲) تحلیل الگوی توزیع این ترکیبات؛ ۳) بررسی رابطهٔ بین پارامترهای کیفیت خاک (مانند کربن آلی) و غلظت فتالات‌ها و ۴) محاسبهٔ ریسک سلامت ناشی از حضور این ترکیبات است. این مطالعه می‌تواند گامی مهم در پایش و شناسایی PAEs در خاک‌های شهری ایران و تکمیل مطالعات پیشین مورد استفاده قرار گیرد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقهٔ مورد مطالعه: شهر همدان، مرکز استان همدان، یکی از کهن‌ترین شهرهای ایران است که در ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا، با مختصات جغرافیایی $34^{\circ}48'$ عرض شمالی و $48^{\circ}23'$ طول شرقی واقع شده است. از مجموع اراضی کشاورزی استان، حدود ۷۰۰ هزار هکتار زیر کشت است که ۲۰۰ هزار هکتار آن آبی و بقیه دیم می‌باشد. طی شش دههٔ گذشته، حدود ۴۰۰ هکتار از این اراضی به کاربری صنعتی و مسکونی تبدیل شده است (Ardakani et al., 2013).

انتخاب ایستگاه‌ها و روش نمونه‌برداری: پس از تحلیل نقشه‌های کاربری اراضی و تصاویر ماهواره‌ای شهر همدان، نقاط نمونه‌برداری با استفاده از GPS به‌صورت تصادفی از کاربری‌های مسکونی، کشاورزی و صنعتی انتخاب گردید. در مجموع ۱۰۰ نمونه مرکب شامل ۶۵ نمونه از مناطق مسکونی، ۲۰ نمونه از مناطق کشاورزی و ۱۵ نمونه از مناطق صنعتی برداشت شد.

نمونه‌برداری خاک از عمق (۲۰-۰ سانتی‌متر) انجام شد. پس از جداسازی ناخالصی‌ها، نمونه‌ها در هوای آزاد خشک و توسط الک ۲ میلی‌متری غربال و برای آنالیز به آزمایشگاه منتقل شدند. شکل ۱ نقشه پراکندگی ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک در کاربری‌های مختلف شهر همدان را نشان می‌دهد.

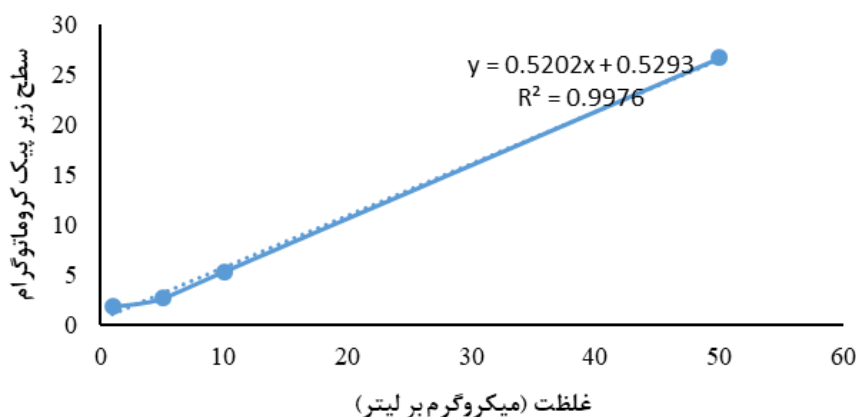


شکل ۱- موقعیت دقیق جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری خاک در سه نوع کاربری مختلف در شهر همدان

Figure 1. Geographical location of soil sampling points in three different land uses in Hamadan city

روش استخراج شیمیایی نمونه‌های خاک: استخراج PAEs از خاک براساس روش Wei و همکاران (۲۰۲۰) انجام گردید. در این روش، ۵ گرم نمونه خاک با ۲۰ میلی‌لیتر مخلوط هگزان و دی‌کلرومتان (۱:۱ v/v) ترکیب و به مدت ۶۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک قرار گرفت. نمونه‌ها با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند و پس از جداسازی فاز بالایی مرحله استخراج مجدد انجام و دو محلول ترکیب شدند. پاکسازی نمونه‌ها با ستون از بالا به پایین با ۱۲ گرم سیلیکاژل، ۶ گرم آلومینای خنثی و ۲ گرم سولفات سدیم انجام شد و نمونه‌ها با مخلوط استون-هگزان (۱:۴ v/v) شسته شد. محلول نهایی با گاز نیتروژن تغلیظ گردید. برای شناسایی PAEs از استانداردهای DMP، DEP، DBP، DEHP، DINP و DIDP (شکل ۲) با خلوص ۹۹.۹۹٪ تولید شرکت سیگما آلد ریج استفاده شد (St. Louis, Missouri, USA).

منحنی کالیبراسیون استاندارد فتالات استر



شکل ۲- منحنی کالیبراسیون استانداردهای فتالات

Figure 2. Phthalate Standards Calibration Curve

آنالیز نمونه‌ها با دستگاه کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنج جرمی (GC-MS Agilent) انجام شد. جداسازی ترکیبات بر روی ستون مویینه DB-5 (۳۰ متر × ۰/۲۵ میلی‌متر، ضخامت فیلم ۰/۲۵ میکرومتر) صورت گرفت. دمای ابتدایی آون بر روی ۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد و سپس با یک نرخ ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه به دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد رسید. در ادامه، با رمپ حرارتی ۲ درجه سانتی‌گراد در دقیقه، دما تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و در نهایت به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید. از گاز هلیوم با جریان ۱ میلی‌لیتر در دقیقه به عنوان گاز حامل استفاده شد. همچنین، دمای اینجکتور و دتکتور به ترتیب برابر با ۲۸۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. کمی‌سازی ب اساس روش کالیبراسیون خارجی و منحنی کالیبراسیون شش نقطه‌ای انجام شد. **سنجش پارامترهای کیفی خاک:** برای تعیین بافت خاک از روش هیدرومتری استفاده شد (Bouyoucos, 1962). pH خاک با استفاده از دستگاه‌های pH متر مدل ۷۴۴ Metrohm اندازه‌گیری گردید (Thomas, 1996). برای اندازه‌گیری کربن آلی، با روش والکی-بلک ارزیابی شد (Rowell, 1994).

کنترل کیفیت: جهت جلوگیری آلودگی فتالات‌ها، نمونه‌برداری و استخراج بدون استفاده از ظروف و تجهیزات پلاستیکی انجام گردید و حلال‌های آلی مصرفی با خلوص HPLC به کار گرفته شدند. دی‌آلیل فتالات (D4) به عنوان ساروگیت و بنزیل بنزوات به عنوان استاندارد داخلی استفاده شد. درصد بازیابی شش ترکیب فتالات استر در محدوده ۸۹/۰۱ تا ۱۰۰/۰۴ درصد با میانگین ۹۵/۸۱ درصد و میانگین ^۱(RSD) ۹/۲ درصد محاسبه گردید و حد تشخیص (LOD) ترکیبات مورد مطالعه در بازه ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۶ میکروگرم بر گرم تعیین شد.

نقشه‌های درون‌یابی توزیع فتالات استرها: برای ترسیم نقشه‌های درون‌یابی توزیع فتالات از نرم‌افزار GIS^۲ و مدل وزن‌دهی معکوس فاصله IDW^۳ استفاده شده است. این روش به دلیل سادگی، عدم نیاز به فرضیات پیچیده آماری، نمایش مناسب الگوهای لکه‌ای آلودگی و مقایسه‌پذیری با مطالعات مشابه نسبت به Kriging مناسب‌تر بود.

محاسبات آماری: جهت تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SPSS 27 و Excel 2016 استفاده شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها، آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) به کار رفت و برای مقایسه میانگین ترکیبات در کاربری‌های مختلف، از آزمون ناپارامتریک کروسکال-والیس (Kruskal-Wallis) در سطح معنی داری ۹۵ درصد استفاده شد. همچنین برای مقایسه دو به دو میانگین ترکیبات، آزمون من-ویتنی (Man-Whitney) به منظور ارزیابی همبستگی میان نمونه‌های خاک، آزمون

^۱Relative Standard Deviation^۲Geographic Information System^۳Inverse Distance Weighting

همبستگی اسپیرمن (Spearman) مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، توزیع فضایی ($\sum 6$ PAEs) با بهره‌گیری از روش درونیابی (IDW) مورد تحلیل قرار گرفت.

ارزیابی ریسک سلامت: خطرات غیرسرطانی و سرطان‌زایی ناشی از مواجهه با PAEs در انسان با استفاده از روش‌های پیشنهادی USEPA محاسبه گردید (Li et al., 2021). در این مطالعه، ریسک بالقوه سلامت برای بزرگسالان و کودکان از طریق مسیرهای مواجهه ناشی از تماس‌های غیررژیمی (تماس پوستی، استنشاق و بلع) برآورد گردید. برای گروه سنی، بزرگسالان و کودکان ارزیابی شدند. شاخص HQ نشان‌دهنده ریسک غیرسرطان‌زایی و CR بیانگر ریسک سرطان‌زایی است؛ به‌طوری که اگر $HQ < 1$ باشد، اثر غیرسرطان‌زا و در صورتی که مقدار $CR > 10^{-6}$ باشد، احتمال بروز سرطان‌زایی وجود دارد. براساس شاخص CR، میزان ریسک سرطان‌زایی در پنج سطح بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد ارزیابی می‌شود. میانگین دوز روزانه ADD بر حسب mg/kg در روز از طریق مسیرهای غیرغذایی یاد شده محاسبه گردید. فرمول محاسبه مدل به شرح زیر است:

(۱)

$$ADD_{ing} = \frac{C \times IRS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

(۲)

$$ADD_{inh} = \frac{C \times Ij \times EF \times ED}{PET \times PEF} \times 10^3$$

(۳)

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

(۴)

$$HQ = \frac{ADD_{ingest} + ADD_{dermal} + ADD_{inhale}}{RFD}$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (۵)$$

$$CR = (ADD_{ingest} + ADD_{dermal}) \times CFS \quad (۶)$$

میانگین دوز روزانه (ADD) براساس غلظت اندازه‌گیری شده هر PAE در خاک محاسبه شد. شاخص خطر (HQ) جهت ارزیابی اثرات غیرسرطان‌زا و ریسک سرطان‌زایی (CR) برای برآورد احتمال بروز سرطان به کار رفت. مقادیر $HQ < 1$ نشان‌دهنده ریسک غیرسرطان‌زایی قابل قبول و $CR > 10^{-6}$ بیانگر ریسک بالقوه سرطان‌زایی است. سطوح ریسک سرطان‌زایی براساس شاخص CR، در پنج سطح بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد ارزیابی شد و سایر پارامترهای مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- عوامل مؤثر در محاسبه ارزیابی ریسک سلامت فتالات استرها

Table 1. Factors influencing phthalate ester health risk assessment calculation

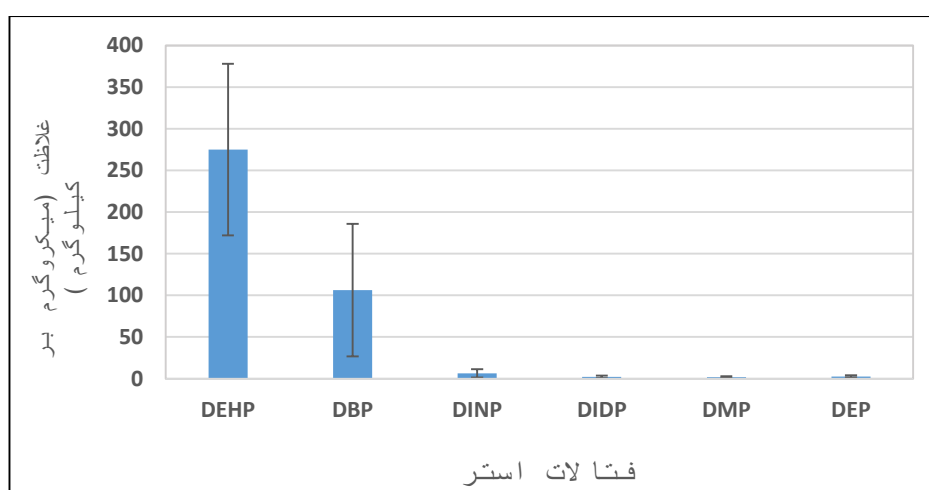
پارامتر	معنی	واحد	بزرگسالان	کودکان
IRS	میزان بلع خاک	mg/d	100	200
EF	فراوانی مواجهه	d/a	350	
ED	مدت مواجهه	a	24	6
BW	وزن بدن	kg	70	15
AT	میانگین طول عمر	a		سرطان: 25550 غیرسرطان: 365 × ED
CF	ضریب تبدیل	kg/mg	10 ⁻⁶	
SA	سطح تماس پوستی	Cm ² /d	57000	28000
AF	ضریب چسبندگی خاک	mg/cm ²	0.07	0.2
ABS	درصد آلاینده جذب شده از خاک	-	0.1	
I _j	نرخ تنفس	m ³ /d	13.5	
PET	ضریب انتشار ذرات معلق	m ³ /kg	1.36×10 ⁹	
RfD	حداکثر مجاز آلاینده	mg/(kg.d)	DBP: 0.1 BBP: 0.2 DOP: 0.04 DEHP: 0.02	
CFS	ضریب شیب سرطان‌زایی	mg/(kg.d)	BBP: 0.0019	

یافته‌های پژوهش

غلظت PAEs در خاک: جدول ۲ آمار توصیفی PAEs اندازه‌گیری شده و فاکتورهای کیفیت خاک را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، غلظت شش ترکیب فتالات استر در نمونه‌های خاک از بیشترین به کمترین به ترتیب $DEHP > DBP > DINP > DIDP > DEP > DMP$ می‌باشد. دو ترکیب DEHP و DBP در تمام کاربری‌ها مورد بررسی غالب بودند. شکل ۳، میانگین کلی 6PAEs Σ را در تمام کاربری‌های خاک نشان می‌دهد، که در آن بیشترین مقدار فتالات مربوط به DEHP و کمترین مقدار مربوط به DMP می‌باشد.

جدول ۲- آمار توصیفی 6PAEs Σ و کیفیت خاک اندازه‌گیری شده در شهر همدانTable 2 - Descriptive statistics of Σ 6PAEs and measured soil quality in Hamadan City

میانگین $\pm$ انحراف معیار (PAEs)	کمترین	بیشترین	میان
$\mu\text{g/kg}$			
DEHP	193.13±274.86	2.35	1626.50
DBP	89.53±106.16	0.37	760.12
DINP	4.97±6.29	0	41.84
DIDP	1.51±2.23	0	21.93
DMP	0.85±1.94	0	10.44
DEP	1.30±2.66	0	19.31
PH	0.50±7.68	6.37	9.19
EC	409.96±435.32	85.00	1899.00
CCE	12.99±15.73	0	240.50
OM	0.88±1.55	0.30	4.63



شکل ۳- میانگین غلظت کلی $\Sigma 6\text{PAEs}$ در نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده در شهر همدان

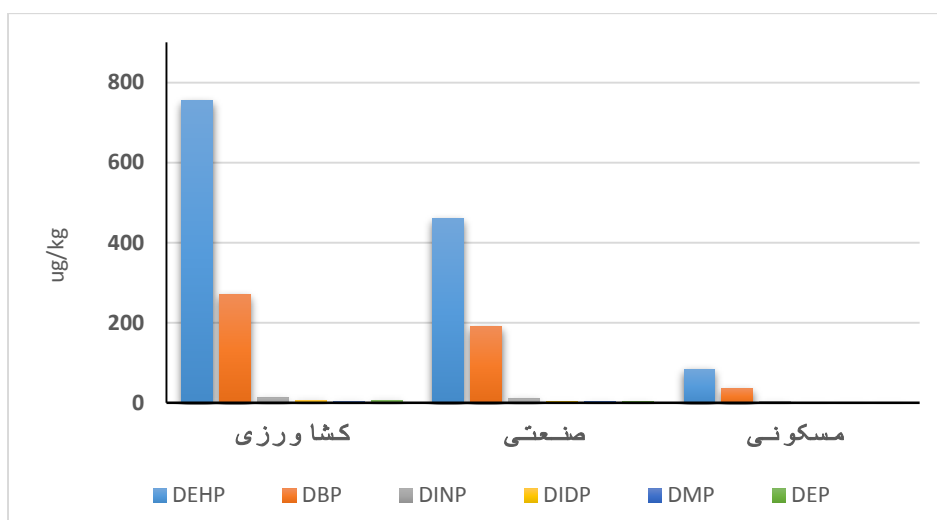
Figure 3. Average concentration of total $\Sigma 6\text{PAEs}$ in soil samples collected in Hamadan city

غلظت $\Sigma 6\text{PAEs}$ اندازه‌گیری شده خاک به تفکیک در کاربری‌های مختلف شهر همدان: جدول ۳ نتایج بررسی تأثیر کاربری‌های مختلف بر میزان تجمع فتالات در خاک را نشان می‌دهد میانگین غلظت DBP و DEHP در کاربری‌ها به صورت کشاورزی < صنعتی < مسکونی مشاهده شد. سایر ترکیبات در تمام کاربری‌ها غلظت کمی داشتند. نتایج آزمون کرومکال-والیس نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین $\Sigma 6\text{PAEs}$ در کاربری‌های مختلف خاک وجود دارد ($P < 0.05$). شکل ۴ میانگین مقادیر $\Sigma 6\text{PAEs}$ را به تفکیک در کاربری‌های مختلف ارائه می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه میانگین $\Sigma 6\text{PAEs}$ اندازه‌گیری شده در خاک کاربری‌های مختلف در شهر همدان

Table 3 - Comparison of mean $\Sigma 6\text{PAEs}$ measured in different land uses in Hamadan City

میانگین کل	مسکونی	صنعتی	کشاورزی	(PAEs)
274.86±193.13	84.39±71.62	460.06 ± 315.67	754.98±510.50	DEHP
106.16±89.53	36.63±29.31	189.63±175.72	269.52±226.44	DBP
6.29±4.97	3.59±2.65	9.73±8.61	12.47±10.29	DINP
2.23±1.51	0.62±0.43	3.04±2.14	6.86±5.90	DIDP
1.94±0.85	0.95±0.82	3.46 ± 2.06	4.00±3.80	DMP
2.66±1.30	1.18±0.93	3.33±3.29	6.99±4.20	DEP
7.68±0.50	7.71±0.55	7.69±0.41	7.59±0.42	PH
435.32±409.96	467.79±449.97	488.44±443.37	293.20±159.77	EC
15.73±12.99	19.10±16.11	11.70±8.17	7.82±4.5	CCE
1.55±0.88	1.31±0.49	0.95± 0.54	2.79±0.96	OM



شکل ۴- میانگین مقادیر $\Sigma 6$ PAEs در خاک کاربری‌های مختلف در شهر همدان

Figure 4. Average concentrations of $\Sigma 6$ PAEs in soils of different land uses in Hamadan city

نتایج آزمون کروسکال-والیس نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین $\Sigma 6$ PAEs در کاربری‌های مختلف خاک وجود دارد (جدول ۴، $P < 0.05$).

جدول ۴- مقایسه میانگین $\Sigma 6$ PAEs اندازه‌گیری شده در خاک کاربری‌های مختلف در شهر همدان با استفاده از آزمون کروسکال-والیس

Table 4 - Comparison of mean $\Sigma 6$ PAEs measured in soils of different land uses in Hamadan City using the Kruskal-Wallis test

P-value	درجه آزادی	آماره آزمون	(PAEs)
0.001<	2	55.40	DEHP
0.001<	2	36.70	DBP
0.006	2	10.10	DINP
0.001<	2	16.48	DIDP
0.002	2	12.12	DMP
0.001<	2	29.84	DEP

مقایسه میانگین $\Sigma 6$ PAEs با استفاده از آزمون من-ویتنی در کاربری‌های مختلف در شهر همدان: نتایج آزمون من-ویتنی (جدول ۵) نشان داد که بین کاربری‌های کشاورزی-مسکونی و صنعتی-مسکونی تفاوت معنی‌دار آماری وجود دارد ($P < 0.05$)، در حالی که بین کاربری‌های کشاورزی، صنعتی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ($P > 0.05$).

جدول ۵- مقایسه میانگین $\Sigma 6$ PAEs با استفاده از آزمون من-ویتنی در کاربری‌های مختلف در شهر همدان
Table 5. Comparison of mean $\Sigma 6$ PAE6 using Mann-Whitney test across different land uses in Hamadan City

P-value						گروه‌ها
DEP	DMP	DIDP	DINP	DBP	DEHP	کشاورزی-صنعتی
0.093	0.780	0.158	0.831	0.169	0.099	کشاورزی-مسکونی
0.001	0.003	0.001	0.013	0.001	0.001	صنعتی-مسکونی
0.001	0.012	0.019	0.013	0.001	0.001	

جدول ۶- آزمون همبستگی اسپیرمن بین فتالات PAEs و پارامترهای کیفی خاک در کاربری‌های مختلف شهر همدان
Table 6 - Spearman's correlation test between PAEs (Phthalates) and soil quality parameters in different land uses of Hamadan City

OM	CCE	EC	Ph	DEP	DMP	DIDP	DINP	DBP	DEHP	PAEs
									1	DEHP
								1	0.614**	DBP
							1	0.681**	0.458**	DINP
						1	0.600**	0.442**	0.416**	DIDP
					1	0.424**	0.337**	0.258**	0.399**	DMP
				1	0.533**	0.409**	0.345**	0.433**	0.591**	DEP
			1	0.113	0.025	0.073	-0.071	-0.119	0.081	PH
		1	0.670**	-0.016	0.050	-0.043	-0.003	0.045	-0.086	EC
	1	0.223*	0.046	-0.211*	-0.218*	-0.202*	-0.286**	-0.185	-0.243*	CCE
1	-0.164	0.233*	-0.298**	0.173	0.132	0.162	0.167	0.208*	0.197*	OM

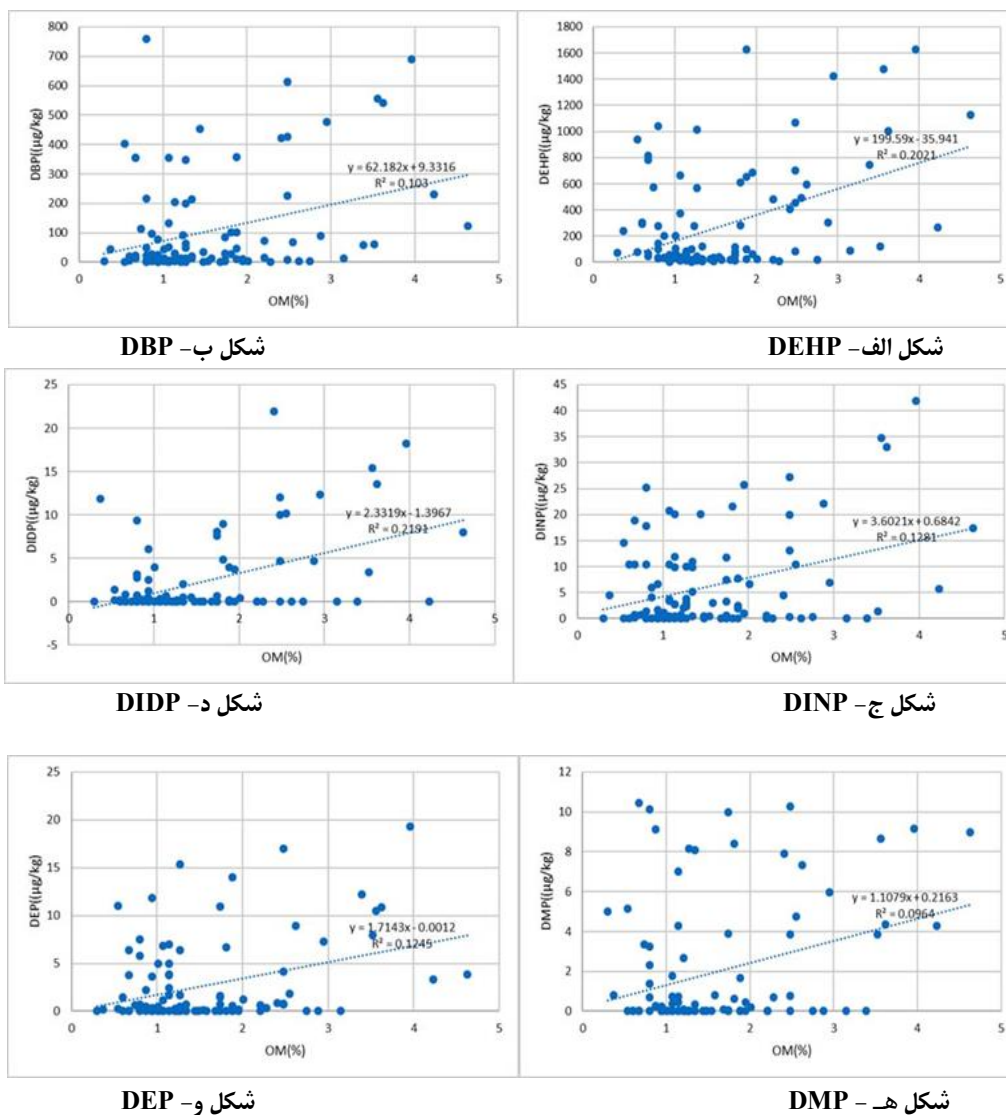
(*) سطح اطمینان در سطح ۰/۹۵ و ** سطح اطمینان در سطح ۰/۹۹

آزمون همبستگی اسپیرمن بین $\Sigma 6\text{PAEs}$ و پارامترهای کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف خاک در شهر همدان: نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن (جدول ۶) نشان داد که بین $\Sigma 6\text{PAEs}$ و پارامترهای کیفیت خاک pH, EC, CCE همبستگی معنی‌داری مشاهده نشد ($P > 0/05$)، در حالی که با ماده آلی خاک (OM) همبستگی مثبت و معنی‌دارتری را نشان می‌دهد ($P < 0/05$). همچنین، بین غلظت $\Sigma 6\text{PAEs}$ همبستگی معنی‌داری در سطح ($P < 0/01$) مشاهده شد که نشان‌دهنده وجود منبع رهاسازی مشترک است.

رابطه خطی بین ترکیبات $\Sigma 6\text{PAEs}$ با درصد ماده آلی: رگرسیون شش ترکیب فتالات شامل DEHP, DBP, DINP, DMP, DIDP و DEP با درصد ماده آلی خاک در کاربری‌های مختلف شهر همدان با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد. نتایج نشان داد که هیچ یک از این ترکیبات با درصد ماده آلی خاک رابطه خطی معنی‌داری نداشتند ($P > 0/05$). رابطه خطی مربوط به هر ترکیب در شکل ۵ ارائه شده است.

نتایج ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی PAEs در گروه‌های سنی مختلف در نمونه خاک کاربری‌های شهر همدان: در این مطالعه، شاخص‌های HI و CR به ترتیب برای سنجش خطرات غیرسرطان‌زا و سرطان‌زا برای ترکیبات DEHP, DEP, DINP, DIDP, DMP و DBP در کاربری‌های مختلف محاسبه شدند (جدول ۷). به دلیل عدم دسترسی به مقادیر Reference Dose (RFD)، تنها HI برای DEHP و DBP محاسبه شد. با این حال، ADD از سه مسیر مواجهه (استنشاق، بلع، تماس پوستی) برای هر شش فتالات و دو گروه سنی تعیین گردید. میانگین دوز روزانه ADD ترکیبات DEHP و DBP از طریق استنشاق در بزرگسالان بیشتر از کودکان بود، در حالی که در کودکان بیشترین و کمترین میزان ADD به ترتیب از مسیر بلع و تماس پوستی مشاهده شد. استنشاق و بلع مهم‌ترین مسیرهای مواجهه با PAEs در خاک برای هر دو گروه سنی بودند. محاسبه شاخص HI (جدول ۷ و شکل ۶) نشان داد که خطر غیرسرطان‌زا در دو گروه سنی ($HI < 1$) است مقادیر CR در محدوده 10^{-6} تا 10^{-5} قرار داشت که نشان‌دهنده شرایط متوسط است (شکل ۶)، بنابراین عدم کنترل منابع مواجهه، به ویژه برای کودکان، در بلندمدت ممکن است ریسک حضور این ترکیبات را افزایش دهد.

نتایج درون‌یابی و نقشه‌های توزیع ترکیبات فتالات‌ها در خاک کاربری‌های مختلف شهر همدان: براساس نقشه‌های توزیع مکانی فتالات‌ها (شکل ۸ الف تا و)، بیشترین غلظت‌ها در نواحی صنعتی و کشاورزی و کمترین مقادیر در مناطق مسکونی مشاهده شد. به طور کلی، الگوی پراکندگی نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی بر افزایش غلظت فتالات‌ها در خاک سطحی شهر همدان است.

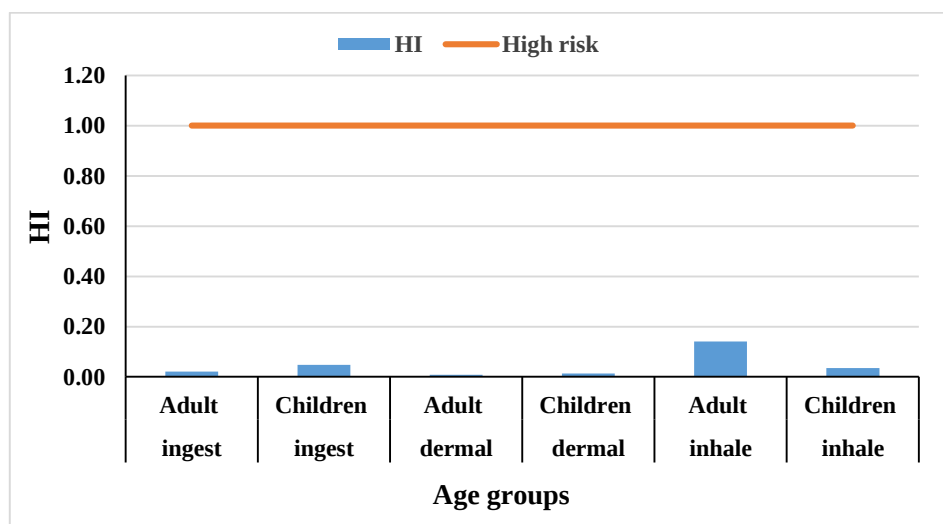


شکل ۵- روابط خطی بین غلظت ترکیبات $\Sigma 6\text{PAEs}$ و ماده آلی خاک (OM)

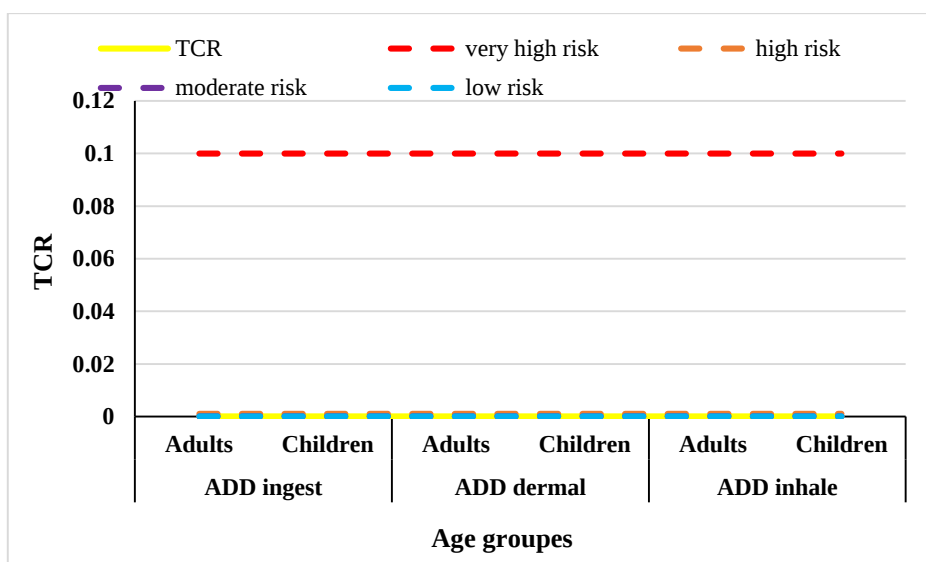
Figure 5. Linear relationships between the concentration of $\Sigma 6\text{PAEs}$ compounds and soil organic matter (OM)

جدول ۷- ارزیابی ریسک سلامت $\Sigma 6\text{PAEs}$ در نمونه خاک کاربری های همدان
 Table 7. Health assessment of $\Sigma 6\text{PAEs}$ in soil samples from Hamedan land uses

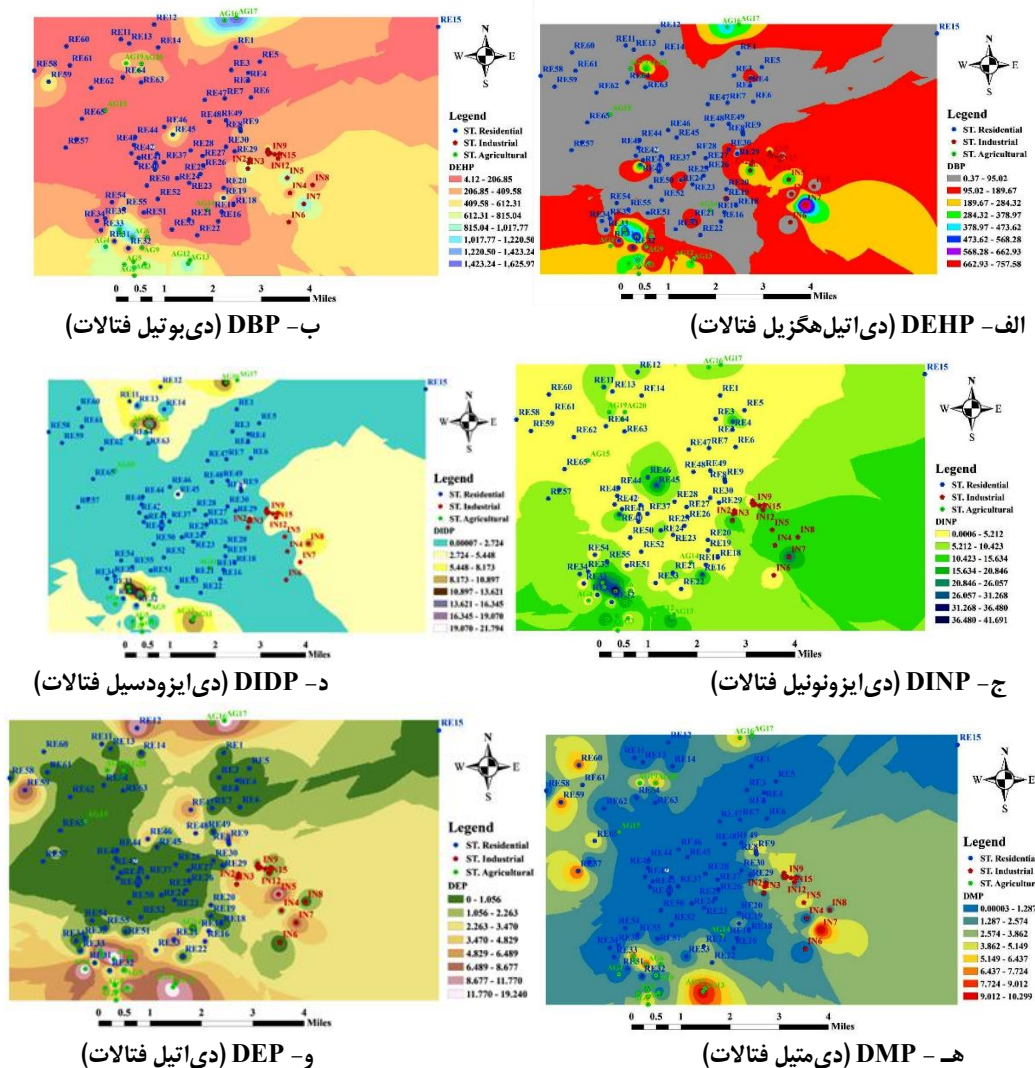
	پارامتر	انسان	دوز روزانه استنشاقی			دوز روزانه پوستی			دوز روزانه بلع		
		حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	
خطر غیر سرطان زایی	DEHP	بزرگسالان	3.22E-06	0.002228	0.000379	1.28E-06	0.000889	0.00015	2.24E-05	0.015482	0.002616
		کودکان	7.51E-06	0.005199	0.000885	2.1E-06	0.001456	0.000246	5.59E-06	3.87E-03	6.54E-04
	DBP	بزرگسالان	5.07E-07	0.001041	0.000147	2.02E-07	0.000415	5.8E-05	3.52E-06	0.007235	0.00101
		کودکان	1.18E-06	0.00243	0.000343	3.31E-07	0.00068	9.5E-05	8.80E-07	1.81E-03	2.53E-04
	DINP	بزرگسالان	0	5.73E-05	8.71E-06	0	2.29E-05	3.44E-06	0	0.000398	5.99E-05
		کودکان	0	0.000134	2.03E-05	0	3.74E-05	5.63E-06	0	9.96E-05	1.50E-05
	DIDP	بزرگسالان	0	3E-05	3.09E-06	0	1.2E-05	1.22E-06	0	0.000209	2.13E-05
		کودکان	0	7.01E-05	7.21E-06	0	1.96E-05	2E-06	0	5.22E-05	5.32E-06
خطر سرطان زایی	DMP	بزرگسالان	0	1.43E-05	2.62E-06	0	5.71E-06	1.06E-06	0	9.94E-05	1.85E-05
		کودکان	0	3.34E-05	6.11E-06	0	9.34E-06	1.74E-06	0	2.48E-05	4.62E-06
	DEP	بزرگسالان	0	2.65E-05	3.69E-06	0	1.06E-05	1.46E-06	0	0.000184	2.54E-05
		کودکان	0	6.17E-05	8.61E-06	0	1.73E-05	2.39E-06	0	4.6E-05	6.35E-06
	DEHP	بزرگسالان	1.1E-06	0.000764	0.000129	4.40E-07	3.05E-04	5.15E-05	7.67E-06	5.31E-03	8.97E-04
		کودکان	2.58E-06	0.001782	0.000301	7.21E-07	0.000499	8.43E-05	1.92E-06	0.001327	2.24E-04
	DBP	بزرگسالان	1.74E-07	0.000357	4.99E-05	6.93E-08	1.42E-04	1.99E-05	1.21E-06	0.002481	0.000346
		کودکان	4.05E-07	8.33E-04	1.16E-04	1.14E-07	2.33E-04	3.26E-05	3.02E-07	0.00062	8.66E-05
HI											
HI= ∑HQ DEHP & DBP		بزرگسالان		2.04E-02			8.09E-03			1.41E-01	
		کودکان		4.77E-02			1.32E-02			3.52E-02	
CR											
CR= (∑ADD) * CFS		بزرگسالان		1.81E-06			7.21E-07			1.26E-05	
		کودکان		4.22E-06			1.18E-06			3.14E-06	



شکل ۶- نتایج ارزیابی ریسک غیر سرطان زایی (HI) ترکیبات فتالات های مورد مطالعه در خاک کاربری های مختلف شهر همدان
 Figure 6. Results of non-carcinogenic risk assessment (HI) of studied phthalate compounds in soil of different land uses in Hamedan city



شکل ۷- نتایج ارزیابی ریسک سرطان‌زایی (CR) ترکیبات فتالات‌های مورد مطالعه در خاک کاربری‌های مختلف شهر همدان
Figure 7- Results of the carcinogenic risk (CR) assessment of the studied phthalate compounds in soil of different land uses in Hamedan city



شکل ۸- توزیع مکانی غلظت $\Sigma 6PAEs$ در خاک کاربری‌های مختلف (مسکونی، صنعتی و کشاورزی) شهر همدان
Figure 8- Spatial distribution of $\Sigma 6PAEs$ concentration in soil of different land uses (residential, industrial and agricultural) in Hamedan city

بحث

این مطالعه به بررسی خطر شش ترکیب فتالات (PAEs) شامل DEHP، DBP، DINP، DIDP و DEP در خاک‌های سطحی با کاربری کشاورزی، صنعتی و مسکونی شهر همدان پرداخته است. بیشترین تا کمترین غلظت به ترتیب $DEHP > DBP > DINP > DIDP > DEP$ بود و $DEHP > DBP$ به عنوان آلاینده‌های غالب در تمام کاربری‌ها شناسایی شدند و بیشترین میانگین غلظت این دو ترکیب به ترتیب $۷۵۴/۹۸$ و $۲۹۶/۵۲$ میکروگرم بر کیلوگرم در خاک‌های کشاورزی مشاهده شد. پایداری این ترکیبات DEHP و DBP به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آنها از جمله زنجیره آلکیلی بلند، وزن مولکولی بالا و حلالیت پایین است (Wang et al., 2021; Amini et al., 2024). تحلیل آماری نشان داد که غلظت PAEs در کاربری‌های مختلف خاک تفاوت معنی‌داری دارد. در کاربری کشاورزی این تفاوت ناشی از استفاده گسترده از پلاستیک‌ها، سیستم‌های آبیاری، لجن فاضلاب، افزودنی‌های شیمیایی، آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی مربوط می‌شود (Han et al., 2025). در کاربری‌های صنعتی و مسکونی نیز فاضلاب، محصولات آرایشی و بهداشتی، شوینده‌ها، بسته‌بندی‌های پلاستیکی، زباله‌ها و احتراق پلاستیک‌ها در انتشار PAEs نقش دارند (Brodskiy et al., 2019; Zhang et al., 2023). به‌طور کلی، ترکیبات DEHP و DBP به عنوان آلاینده‌های غالب در خاک‌های کشاورزی، صنعتی و مسکونی شهر همدان شناسایی شدند. این موضوع ضرورت توجه ویژه به مدیریت منابع انتشار و کاهش مصرف این ترکیبات در محصولات پلاستیکی و صنایع مختلف را برجسته می‌سازد. نتایج مطالعات جهانی نیز با یافته‌های این پژوهش همخوانی دارد. Li و همکاران (۲۰۲۲) وجود آن را در خاک‌های کشاورزی و Han و همکاران (۲۰۲۵) منابع انتشار و اثرات محیط‌زیستی آن را گزارش کرده‌اند. در تمامی این مطالعات، ترکیبات DEHP و DBP به عنوان آلاینده‌های غالب شناسایی شده‌اند. علاوه بر این، Wei و همکاران (۲۰۲۰) آلودگی PAEs در خاک شهری، و Wang و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر فیلم‌های کشاورزی را بررسی کرده و DEHP را آلاینده اصلی معرفی نمودند. Han و همکاران (۲۰۲۵) نیز نشان دادند که پراکندگی PAEs تحت تأثیر ویژگی‌های خاک، نوع محصولات و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. همچنین Li و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که PAEs به راحتی از محصولات پلاستیکی جدا شده و از طریق فرایندهای هیدرولیز، فتولیز و اکسیداسیون وارد خاک می‌شوند و سپس با جذب توسط گیاهان وارد زنجیره غذایی شده و سلامت انسان را تهدید می‌کنند. آزمون اسپیرمن برای بررسی رابطه بین شش PAEs و پارامترهای کیفیت خاک EC، CCE، OM و pH انجام شد که نتایج نشان داد تفاوت آماری بین مقادیر فتالات استرها و پارامترهای کیفیت خاک به صورت معنی‌دار وجود ندارد. این موضوع احتمالاً ناشی از تفاوت‌های خاک و تأثیر عوامل محیطی و انسانی در کاربری‌های مختلف است (Wang et al., 2021; Li et al., 2022). با این حال، بین مقادیر $\Sigma 6PAEs$ همبستگی مشاهده شد که با یافته‌های Amini و همکاران (۲۰۲۴) و Wang و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. نتایج ارزیابی نشان داد که ریسک غیر سرطان‌زایی در هر دو گروه کودکان و بزرگسالان در محدوده کم خطر و ریسک سرطان‌زایی در سطح قابل قبول بود. اگر چه بزرگسالان به دلیل مواجهه از طریق استنشاق ذرات معلق و محصولات مصرفی ریسک بالاتری دارند (Zhang et al., 2023; Li et al., 2023). مطالعه Wei و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داد که مصرف سبزیجات گلخانه‌ای یکی از مسیرهای اصلی دریافت کودکان به PAEs است و کودکان به دلیل مصرف بیشتر و حساسیت بالاتر، در معرض خطرات غیرسرطانی بیشتری قرار دارند. در این مطالعه، DEHP بیشترین میزان ریسک را داشت. Li و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که تماس پوستی یکی از مسیرهای اصلی مواجهه با آلاینده‌هاست. اگرچه خطرات غیرسرطانی پایین است. ترکیبات DEHP و DBP پتانسیل سرطان‌زایی بالاتری نسبت به سایر ایزومرها دارند، اما سطح خطر ناچیز است. طبق یافته‌های Tao و همکاران (۲۰۲۰)، در مسیرهای غیرسرطان‌زایی، مصرف غذایی DEHP بیشترین سهم را دارد و در مسیر سرطان‌زایی، رژیم غذایی به‌ویژه مصرف سبزیجات مهم‌ترین تهدید برای سلامت ساکنان شناخته شد. پژوهش Wang و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که فتالات‌ها (PAEs)، به‌ویژه DEHP و DBP، عمدتاً از طریق رژیم غذایی بر سلامت انسان اثر می‌گذارند. اگر چه خطرات غیرسرطان‌زایی در هر دو گروه سنی کمتر از یک گزارش شد اما DEHP پتانسیل سرطان‌زایی قابل‌توجهی دارد؛ بنابراین، پایش مداوم و کاهش مواجهه انسانی با این ترکیبات ضروری است. همچنین Li و همکاران (۲۰۲۴) وجود DEHP را در خاک مزارع چای گزارش کردند که می‌تواند از طریق محصولات کشاورزی به انسان منتقل شود. هرچند خطر سرطان‌زایی پایین ارزیابی شد، اما این ترکیب همچنان

تهدیدی برای سلامت و اکوسیستم محسوب می‌شود. نتایج Wang و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داد که مواجهه با PAEs از طریق گرد و غبار نسبت به خاک شهری، خطر غیرسرطان‌زایی بیشتری برای کودکان دارد، در حالی که ریسک سرطان‌زایی در محدوده قابل قبول باقی مانده است. همچنین، مسیرهای بلع، استنشاق و تماس پوستی سهم بیشتری در مواجهه کودکان نسبت به بزرگسالان دارند. یافته‌های Amini و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان داد که کودکان بیشتر از طریق بلع و تماس پوستی و بزرگسالان از طریق استنشاق در معرض فتالات قرار دارند هرچند، ریسک سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی در هر دو گروه پایین ارزیابی شد. طبق گزارش WHO (۲۰۱۸) براساس طبقه‌بندی IARC، ترکیب DEHP در گروه B2 قرار دارد و احتمال سرطان‌زایی آن در انسان وجود دارد، بنابراین، اجرای اقدامات نظارتی و مدیریتی برای کاهش مواجهه در گروه‌های حساس، به‌ویژه کودکان و زنان باردار، ضروری است. محدودیت‌های این مطالعه شامل نمونه‌برداری محدود، تنوع محیطی خاک و بررسی تنها برخی پارامترهای PAEs و کیفیت خاک بود، و محاسبات HI و CR ممکن است تفاوت‌های فردی یا شرایط محلی را به‌طور کامل منعکس نکند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که PAEs در خاک‌های سطحی شهر همدان وجود دارند و مقدار آنها بسته به نوع کاربری زمین متفاوت است. DEHP و DBP با غلظت‌های ۷۵۴/۹۸ و ۲۶۹/۵۲ میکروگرم بر کیلوگرم در خاک‌های کشاورزی غالب بودند. نقشه‌های درون‌یابی فضایی PAEs نشان دادند که برخی مناطق دارای مقداری از آلودگی هستند، که این اطلاعات می‌تواند برای برنامه‌ریزی مدیریتی و پایش محیط‌زیستی مورد استفاده قرار گیرد. باتوجه به ورود PAEs از مسیرهای مختلف (خاک، آب، محصولات کشاورزی و صنعتی و هوا)، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، پراکنش PAEs و اثرات آنها بر محیط‌زیست و سلامت انسان بررسی شود و اقدامات پیشگیرانه و مدیریتی، مانند کنترل تولید و مصرف، جایگزینی مواد کم‌خطر، پایش مستمر اجرا شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه ملایر انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرات ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Abdollahnejad, A., Gheisari, L., Karimi, M., Norastehfar, N., Ebrahimpour, K., Mohammadi, A., Ghanbari, R., Ebrahimi, A., Jafari, N., 2019. Monitoring and health risk assessment of phthalate esters in household's drinking water of Isfahan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16(11), 7409-7416.

- Ahmadi-Vand, M., Zamani Bab-Gaheri, J., Shekofteh, H., Abbasi-Zadeh Afshar, F., 2023. Effect of land use on some physical and chemical properties of soil. *Environmental Erosion Research* 13(2), 210-234.
- Amini, Z., Hassanzadeh, N., 2024. Presence, distribution, and health risk assessment of phthalate esters (PAEs) in soils of different land uses in Malayer, Iran. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 48(4), 1558-1576.
- Ardakani, S., Shirzadi, A., Sahraei, R., 2013. Efficiency of ammonia removal using carbon nanotube adsorbent. *Health and Development Quarterly* 1(2), 20-28.
- Arfaeinia, L., Dobaradaran, S., Nasrzadeh, F., Shamsi, S., Poureshgh, Y., Arfaeinia, H., 2020. Phthalate acid esters (PAEs) in highly acidic juice packaged in polyethylene terephthalate (PET) container: occurrence, migration and estrogenic activity-associated risk assessment. *Microchemical Journal* 155, 104719.
- Boll, M., Geiger, R., Junghare, M., Schink, B., 2020. Microbial degradation of phthalates: Biochemistry and environmental implications. *Environmental Microbiology Reports* 12(1), 3-15.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal* 54(5), 464-465.
- Brodskiy, E.S., Shelephchikov, A.A., Agapkina, G.I., Tikhonova, M.O., Paramonova, T.A., Lipatov, D.N., 2019. Phthalate esters' content in soils of Moscow. *Moscow University Soil Science Bulletin* 74(2), 88-92.
- Czogala, J., Pankalla, E., Turczyn, R., 2021. Recent attempts in the design of efficient PVC plasticizers with reduced migration. *Materials* 14(4), 844.
- Han, J., Jian, Z., Li, P., Wang, J., Zhou, X., 2025. Contamination of phthalic acid esters in China's agricultural soils: Sources, risk, and control strategies. *Agronomy* 15, 433.
- Kasonga, T., Coetzee, M., Kamika, I., Ngole-Jeme, V., Benteke Momba, M., 2021. Endocrine-disruptive chemicals as contaminants of emerging concern in wastewater and surface water: a review. *Journal of Environmental Management* 277, 111485.
- Li, J., Han, S., Xu, R., Zhan, X., Liang, J., Wang, M., Han, B., 2024. Insight into the effect of geographic location and intercropping on contamination characteristics and exposure risk of phthalate esters (PAEs) in tea plantation soils. *Journal of Integrative Agriculture* 23(10), 1016-1026.
- Li, X., Li, N., Wang, C., Wang, A., Kong, W., Song, P., Wang, J., 2022. Occurrence of phthalate acid esters (PAEs) in protected agriculture soils and implications for human health exposure. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 109(3), 548-555.
- Li, X., Wang, Q., Jiang, N., Lv, H., Liang, C., Yang, H., Yao, X., Wang, J., 2023. Occurrence, source, ecological risk, and mitigation of phthalates (PAEs) in agricultural soils and the environment: A review. *Environmental Research* 220, 115196.
- Li, X., Zhang, W., Lv, J., Liu, W., Sun, S., Guo, C., Xu, J., 2021b. Distribution, source apportionment, and health risk assessment of phthalate esters in indoor dust samples across China. *Environmental Sciences Europe* 33(1), 1,14.
- Marlatt, V.L., Bayen, S., Castaneda-Cortès, D., et al., 2022. Impacts of endocrine disrupting chemicals on reproduction in wildlife and humans. *Environmental Research* 208, 112584.
- Perestrelo, R., Silva, C.L., Algarra, M., Câmara, J.S., 2021. Evaluation of the occurrence of phthalates in plastic materials used in food packaging. *Applied Sciences* 11(5), 2130.
- Rowell, D.L., 1994. The preparation of saturation extracts and the analysis of soil salinity and sodicity. In: *Soil Science: Methods and Applications*, pp. 161-176. Harlow, UK: Longman Group.
- Tao, H., Wang, Y., Liang, H., Zhang, X., Liu, X., Li, J., 2020. Pollution characteristics of phthalate acid esters in agricultural soil of Yinchuan, northwest China, and health risk assessment. *Environmental Geochemistry and Health* 42(12), 4313-4326.
- Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods*, pp. 475-490. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Viljoen, S.J., Brailsford, F.L., Murphy, D.V., Hoyle, F.C., Chadwick, D.R., Jones, D.L., 2023. Leaching of phthalate acid esters from plastic mulch films and their degradation in response to UV irradiation and contrasting soil conditions. *Journal of Hazardous Materials* 443, 130256.

- Wang, H., Liang, H., Gao, D.W., 2017. Occurrence and risk assessment of phthalate esters (PAEs) in agricultural soils of the Sanjiang Plain, northeast China. *Environmental Science and Pollution Research* 24(24), 19723-19732.
- Wang, L., Liu, M., Tao, W., et al., 2018. Pollution characteristics and health risk assessment of phthalate esters in urban soil in the typical semi-arid city of Xi'an, Northwest China. *Chemosphere* 191, 467-476.
- Wang, Y., Wang, F., Xiang, L., Gu, C., Gordon, M.R., Sheng, H., Wang, Z., Fu, Y., Bia, Y., Jiang, X., 2021. Risk assessment of agricultural plastic films based on release kinetics of phthalate acid esters. *Environmental Science & Technology* 55(6), 3676-3685.
- Wei, L., Li, Z., Sun, J., Zhu, L., 2020. Pollution characteristics and health risk assessment of phthalate esters in agricultural soil and vegetables in the Yangtze River Delta of China. *Science of the Total Environment* 137978.
- WHO, 2018. More than 90% of the world's children breathe toxic air every day. Geneva: World Health Organization.
- Zhang, Y., Gao, Y., Xi, B., Yuan, Y., Tan, W., 2023. Influence of leachate microenvironment on the occurrence of phthalate esters in landfills. *Chemosphere* 343,140278.