



# Human Health Risk Assessment of PAHs from Anzali Wetland

Rahil Nozarpour<sup>1</sup>, Alireza Riyahi Bakhtiari<sup>2\*</sup>, Ali Azimi<sup>3</sup>

1. Postdoctoral Researcher, Dept. of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran
2. Prof., Dept. of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran (Corresponding Author) [riahi@modares.ac.ir](mailto:riahi@modares.ac.ir)
3. PhD. Graduated, Dept. of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.525270.3495>

Original Paper

## Abstract

Anzali Wetland, as an internationally protected area under the Ramsar Convention, has been exposed to increasing concentrations of PAHs due to various factors such as transportation bridges, military facilities, urban sewage systems, gas stations, fishing boats, tourism, and fishing activities. PAHs emissions pose significant health risks to local populations who depend heavily on the wetland ecosystem, leading to the transfer and accumulation of pollutants in biological tissues through the food chain and dermal contact with sediments. Accordingly, the concentration of 16 priority PAH compounds, as identified by USEPA, was assessed in sediments from two regions: the central-northern area with high PAH emissions and the southern area of the wetland with lower emissions. PAH compounds in sediment samples were extracted using a Soxhlet apparatus. The extracted samples were then analyzed using column chromatography and gas spectrometry to identify and quantify the 16 PAH compounds present. To compare PAH concentrations between the northern-central and southern regions of Anzali Wetland, PERMANOVA was performed. Human health risks associated with PAH ingestion and dermal exposure were assessed using ILCR approach and  $TEQ_{BaP}$ . The findings indicated that the total PAH concentration in sediments from the northern and central regions ranged from 2168.87 to 11403.56 ng/g dry weight, with an average of 6897.60 ng/g dry weight. In contrast, the total PAH concentration in the southern region was between 48.02 and 276.03 ng/g dry weight, averaging a dry weight of 132 ng/g. PERMANOVA results indicated a significant difference in PAH concentrations between different wetland regions (Pseudo-F=127.05, p=0.001). Furthermore,  $TEQ_{BaP}$  levels in the northern-central region (166.43) were considerably higher than in the southern region (26.67). Based on  $ILCR_{ingestion}$  assessments, the cancer risk due to sediment ingestion in the wetland was evaluated as negligible at  $7 \times 10^{-7}$ . However,  $ILCR_{dermal}$  values obtained in the wetland at  $1 \times 10^{-3}$  indicate a high carcinogenic risk from dermal exposure to PAH compounds in these sediments. Given that Anzali Wetland is classified as contaminated and the total incremental cancer risk is estimated at  $1 \times 10^{-3}$ , this indicates a high carcinogenic risk for local residents. The elevated cancer risk in Anzali Wetland-particularly in the northern-central region, which constitutes a large portion of the wetland-is strongly associated with high concentrations of petroleum derivatives and methylation. Among the 16 PAH compounds measured, naphthalene exhibited the highest concentrations in more polluted locations. To mitigate pollution impacts, replacing asphalt with permeable pavement in areas surrounding the wetland is recommended, as this can help reduce runoff during rainfall. Additionally, reducing traffic by relocating parking areas farther away is advised to prevent pollutants from entering the wetland environment.

## Keywords:

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Protected Area, Cancerogenic Risk, Sediment Pollution, Wetland.



Received: Oct. 23, 2024  
Revised: Nov. 24, 2024  
Accepted: Dec. 21, 2024

## To cite this article:

Nozarpour, R., Riyahi Bakhtiari, A., Azimi, A., 2025. Human health risk assessment of PAHs from Anzali Wetland. *Water and Wastewater*, 35(5), 88-103.  
<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.525270.3495>.

© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Use your device to scan and read the article online



## 1. Introduction

The widespread use of fossil fuels and discharge of industrial and municipal wastewater has led to the release of significant amounts of persistent organic pollutants<sup>1</sup> into the environment (Qiu et al., 2021). Among these, polycyclic aromatic hydrocarbons<sup>2</sup> are particularly concerning due to their toxic, lipophilic, and semi-volatile nature, enabling them to accumulate in aquatic organisms and persist in marine sediments. PAHs have been associated with various adverse health effects in humans, including respiratory and neurological disorders, congenital abnormalities, genetic mutations, and cancer (Adeniji et al., 2023; González-Gaya et al., 2019; Kumar et al., 2021).

Anzali Wetland, a vital freshwater ecosystem in northern Iran, is increasingly contaminated with petroleum-based compounds from urban runoff, Caspian Sea hydrocarbons, fuel consumption, and aquaculture activities. These pollutants threaten both biodiversity and human health, as local populations consume fish, shellfish, and birds that may bioaccumulate PAHs from sediments. Additionally, direct dermal contact with contaminated sediments poses another exposure pathway (Nozarpour et al., 2025).

Sixteen PAHs have been identified by the U.S. EPA as priority pollutants, many of which are carcinogenic or mutagenic, as classified by the International Agency for Research on Cancer<sup>3</sup>. High molecular weight PAHs are considered more toxic, with BaP (benzo[a]pyrene) listed in Group 1 for sufficient evidence of carcinogenicity in humans (World Health Organization, 2003).

Given their lipid solubility, PAHs can infiltrate cellular membranes, disrupting DNA via cytochrome P450-mediated metabolism and promoting carcinogenesis (Gaber et al., 2021). In Anzali Wetland, vehicular sources such as tires and asphalt contribute significantly to PAH pollution. Integrated data modeling and ecological monitoring suggest population growth, agricultural activities, industrial expansion, and urbanization as key drivers of ecosystem degradation (Azimi et al., 2018; Nozarpour et al., 2025).

Despite growing concerns, there remains a lack of comprehensive studies assessing cancer risk from PAH exposure via ingestion and dermal contact in surface sediments of Anzali Wetland. This study aims to fill that gap by evaluating

carcinogenic risk across northern-central and southern regions of the wetland along the southern Caspian Sea.

## 2. Methodology

### 2.1. Sediment sampling

A total of 49 surface sediment samples (0–3 cm) were collected from 24 stations in the northern-central region and 25 stations in the southern region of the Anzali Wetland using a Van Veen grab sampler deployed from a boat. Sampling sites were selected based on pollutant distribution and anthropogenic activity to provide a representative overview of environmental conditions. Samples were preserved in aluminum foil, transported in dry ice to the central laboratory of the Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, and stored at  $-20^{\circ}\text{C}$  until processing (USEPA, 1996).

### 2.2. Sample preparation and instrumental analysis

All glassware and tools were pre-cleaned with detergent, followed by ethanol, acetone, and n-hexane, then oven-dried at  $105^{\circ}\text{C}$  for 24 h to eliminate any residual organics. Sixteen priority PAHs-including naphthalene, acenaphthene, phenanthrene, pyrene, BaP, among others-were targeted for concentration and source analysis. Quality assurance was maintained using an internal standard (P-terphenyl-d14), four surrogate standards (Nap-d8, Ant-d10, Pry-d12, Chr-d12), and a laboratory blank for each batch. Gas Chromatography-Mass Spectrometry<sup>4</sup> was employed for PAH quantification (USEPA, 1996).

### 2.3. Sediment sample extraction protocol

Freeze-dried and homogenized sediment samples were weighed (10 g) and subjected to Soxhlet extraction with 80 mL dichloromethane over 10 hours. Sulfur interference was removed using acid-activated copper granules. Extracts were concentrated to 2 mL under gentle nitrogen flow, followed by primary column chromatography with 20 mL dichloromethane/hexane (3:1 v/v) and 5% deactivated silica gel. A second chromatographic step further purified PAHs using an additional 14 mL of the same solvent mixture, and samples were dried and spiked with 100  $\mu\text{L}$  of internal standard prior to GC-MS injection (Zakaria et al., 2002).

<sup>1</sup> Persistent Organic Pollutants (POPs)

<sup>2</sup> Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)

<sup>3</sup> International Agency for Research on Cancer (IARC)

<sup>4</sup> Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)



## 2.4. Human health risk assessment

The Incremental Lifetime Cancer Risk<sup>1</sup> was calculated to assess carcinogenic potential via two exposure pathways: sediment ingestion and dermal contact (Akpan et al., 2022; Di Duca et al., 2023). Toxicity equivalency (TEQ<sub>BaP</sub>) was computed relative to benzo[a]pyrene using EPA-specified Toxic Equivalency Factors<sup>2</sup>. Daily exposure doses (via ingestion and dermal routes) were estimated using standard USEPA equations and physiological parameters (USEPA, 2004). Cancer risk indices (ILCR<sub>ingestion</sub> and ILCR<sub>dermal</sub>) were then derived based on compound-specific cancer slope factors, bioavailability, and contact surface area.

## 2.5. Statistical analysis

To determine significant differences in PAH concentrations between the two regions, one-way PERMANOVA was performed based on Bray–Curtis similarity with 999 permutations using PRIMER v7 software (PRIMER-E Ltd, UK). Pseudo-F values and p-values were examined to assess the statistical validity of regional contamination patterns (Legendre and Gallagher, 2001; Clarke et al., 2014).

## 3. Results and discussion

This study investigated the distribution and carcinogenic potential of 16 priority polycyclic aromatic hydrocarbons<sup>3</sup> in surface sediments across the northern-central and southern regions of Anzali Wetland. PAH concentrations in the northern-central stations ranged from 2168.87 to 11403.56 ng/g dry weight, notably higher than values reported in other coastal regions such as Gorgan Bay and the South China Sea (Araghi et al., 2014; Huang et al., 2012). In contrast, concentrations in the southern zone ranged from 48.02 to 276.03 ng/g. Statistical analysis via PERMANOVA confirmed significant spatial differences (Pseudo-F = 127.05, p = 0.001), highlighting the influence of regional urbanization and industrial activities.

<sup>1</sup> Incremental Lifetime Cancer Risk (ILCR)

<sup>2</sup> Toxic Equivalency Factors (TEFs)

<sup>3</sup> Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)

Naphthalene was identified as the most abundant PAH compound, especially near urban hubs adjacent to Bandar Anzali. Its prevalence is attributed to petroleum leakage, urban runoff, and maritime fuel discharge, exacerbated by infrastructure such as docks and asphalt roads that promote sediment trapping (USEPA, 2017). According to NOAA pollution thresholds, northern-central sediment contamination fell into the “very high” category (>5000 ng/g), while the southern region was “moderate” (100–1000 ng/g). Contributing factors include high traffic density, seasonal tourism peaks, and localized urban development, with the southern region showing lower pollution due to predominant agricultural use (Bakhtiari et al., 2018).

Human health risk assessment revealed elevated values of PAH ingestion (Dose<sub>ingestion</sub>:  $\sim 2 \times 10^{-7}$  mg/g/day) and dermal absorption (Dose<sub>dermal</sub>:  $\sim 3 \times 10^{-8}$  mg/g/day) in the northern-central region. Toxic Equivalency Quotient for benzo[a]pyrene (TEQ<sub>BaP</sub>) was significantly higher in the northern-central region (166.43 ng/g) compared to the southern region (26.67 ng/g). Carcinogenic risk values (ILCR<sub>ingestion</sub>:  $\sim 6 \times 10^{-7}$ ; ILCR<sub>dermal</sub>:  $\sim 1 \times 10^{-3}$ ) demonstrated greater risk from dermal contact, exceeding USEPA thresholds for significant concern. In comparison to other global estuarine sites, such as northeastern China and southern Italy, Anzali Wetland exhibited heightened dermal risk levels, reinforcing its classification as a hotspot of carcinogenic exposure (Cheng et al., 2022; Di Duca et al., 2023).

## 4. Conclusion

Findings surpass expectations for an internationally protected wetland and emphasize the need for sustained environmental management. Elevated naphthalene levels pose a critical threat, necessitating continuous cancer risk evaluation—especially via dermal exposure. Practical mitigation strategies include replacing hydrocarbon-rich asphalt with permeable, non-toxic pavement; relocating parking facilities and fuel stations away from wetland boundaries; improving wastewater infrastructure; and regulating docking stations to minimize direct pollutant discharge. These interventions are essential to safeguarding human health and preserving the ecological integrity of the Anzali Wetland.





## ارزیابی ریسک سلامت انسان در مواجهه با ترکیبات PAH در تالاب انزلی

راحیل نوذریپور<sup>۱</sup>، علیرضا ریاحی بختیاری<sup>۲\*</sup>، علی عظیمی<sup>۳</sup>

۱- پژوهشگر پسادکتر، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران  
۲- استاد، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران (نویسنده مسئول) [riahi@modares.ac.ir](mailto:riahi@modares.ac.ir)  
۳- دانش‌آموخته دکتر، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران



<https://doi.org/10.22093/wj.2025.525270.3495>

مقاله پژوهشی

### چکیده

واژه‌های کلیدی:  
ترکیبات هیدروکربنی  
حلقوی، منطقه حفاظت  
شده، ریسک سرطان،  
آلودگی رسوبات، تالاب

تالاب انزلی، منطقه حفاظت شده بین‌المللی تحت کنوانسیون رامسر، به دلیل پل‌های عبور و مرور، تأسیسات نظامی، سیستم‌های فاضلاب شهری، پمپ‌بنزین‌ها، قایق‌های ماهیگیری، فعالیت‌های گردشگری و ماهیگیری، در معرض افزایش غلظت ترکیبات PAH قرار گرفته است. انتشار ترکیبات PAH برای جمعیت محلی که وابستگی زیادی به زیست‌بوم تالاب دارند، منجر به انتقال و تجمع آلاینده‌ها در بافت‌های زیستی از طریق زنجیره غذایی و تماس پوستی با رسوبات می‌شود. در این پژوهش غلظت ۱۶ ترکیب اولویت‌دار PAH، مطابق با دستورالعمل آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده، در رسوبات دو منطقه شمالی-مرکزی که دارای انتشار زیاد PAH است و منطقه جنوبی تالاب که انتشار کمتری دارد، ارزیابی شد. ترکیبات PAH موجود در نمونه‌های رسوب با استفاده از دستگاه سوکسله استخراج شدند. سپس، برای شناسایی و تعیین کمی ۱۶ ترکیب PAH موجود در نمونه‌ها، با استفاده از کروماتوگرافی ستونی و طیف‌سنجی گازی ارزیابی شدند. برای مقایسه غلظت PAH بین مناطق شمالی-مرکزی و جنوبی تالاب انزلی، از آزمون یک‌طرفه پرماتوا استفاده شد. ریسک سلامت انسان ناشی از بلع و تماس پوستی با ترکیبات PAH با استفاده از رویکرد ارزیابی خطر ابتلا به سرطان و شاخص سمیت کل ترکیبات PAH نسبت به بنزو[a]پایرن (TEQ<sub>BaP</sub>) بررسی شد. غلظت کل ۱۶ ترکیب PAH در منطقه شمالی-مرکزی تالاب بین ۲۱۶۸/۸۷ ng/g و وزن خشک و ۱۱۴۰۳/۵۶ ng/g متغیر بود و میانگین آن ۶۸۹۷/۶۰ ng/g گزارش شد. در منطقه جنوبی تالاب، این مقدار بین ۴۸/۰۲ ng/g و وزن خشک و ۲۷۶/۰۳ ng/g در نوسان بود و میانگین آن ۱۳۲ ng/g ثبت شد. نتایج آزمون پرماتوا نشان داد که غلظت ترکیبات PAH در رسوبات تالاب میان مناطق مختلف تفاوت معناداری دارد (Pseudo-F = 127.05, p = 0.001). علاوه بر این، میزان TEQ<sub>BaP</sub> در منطقه شمالی-مرکزی تالاب انزلی (۱۶۶/۴۳) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از منطقه جنوبی (۲۶/۶۷) تعیین شد. بر اساس ارزیابی ILCR<sub>ingestion</sub>، خطر ابتلا به سرطان ناشی از بلع رسوبات تالاب (۷ × ۱۰<sup>-۷</sup>) فاقد خطر ارزیابی شد. با این حال، مقدار به‌دست آمده از ILCR<sub>dermal</sub> در تالاب (۱ × ۱۰<sup>-۳</sup>) نشان‌دهنده خطر زیاد سرطان‌زایی ناشی از تماس پوستی با ترکیبات PAH موجود در این رسوبات بود. تالاب انزلی به‌عنوان منطقه آلوده شناخته شد و ریسک سرطان در این تالاب ۱ × ۱۰<sup>-۳</sup> ارزیابی شد که نشان‌دهنده خطر زیاد سرطان‌زایی برای افراد بومی محسوب می‌شود. خطر سرطان‌زایی، به‌ویژه در مناطق مرکزی-شمالی تالاب که بخش گسترده‌ای از تالاب را شامل می‌شود، ارتباط مستقیمی با غلظت زیاد مشتقات نفتی و متیلاسیون دارد. در میان ۱۶ ترکیب PAH اندازه‌گیری شده، نفتالین بیشترین غلظت را در مکان‌های آلوده‌تر نشان داده است. به‌منظور کاهش تأثیرات آلودگی، جایگزینی آسفالت با روسازی نفوذپذیر در مناطق مجاور تالاب، به کاهش رواناب هنگام بارندگی کمک می‌کند. همچنین، کاهش ترافیک از طریق جابه‌جایی پارکینگ‌ها به نقاط دورتر توصیه می‌شود تا از ورود آلاینده‌ها به محیط تالاب جلوگیری شود.



دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲

اصلاح: ۱۴۰۳/۹/۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

نوذریپور، ر.، ریاحی بختیاری، ع.، عظیمی، ع.، ۱۴۰۳، ارزیابی ریسک سلامت انسان در مواجهه با ترکیبات PAH در تالاب انزلی. آب و فاضلاب، ۳۵(۵)، ۸۸-۱۰۳.

<https://doi.org/10.22093/wj.2025.525270.3495>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



## ۱- مقدمه

مصرف می‌کنند. از آنجاکه ماهیان، صدف‌ها و پرندگان از رسوبات تغذیه می‌کنند، آلاینده‌های موجود در رسوبات می‌توانند در بافت آن‌ها تجمع یابند و متعاقباً از طریق این منابع غذایی به انسان منتقل شوند (Zamani et al., 2015). علاوه بر انتقال این آلاینده‌ها از طریق زنجیره غذایی، تماس پوستی افراد بومی با رسوبات آلوده نیز می‌تواند عاملی در ورود PAH به بدن انسان باشد (Di Duca et al., 2023, Nozarpour et al., 2025). برخی از این ترکیبات به‌عنوان ترکیبات سرطان‌زا و جهش‌زا شناخته شده‌اند، به همین دلیل آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده<sup>۵</sup>، ۱۶ ترکیب PAH را به‌عنوان آلاینده‌های با سطح خطر بالا در اولویت قرار داده است. این ترکیبات شامل: نفتالین<sup>۶</sup>، آسنفتالن<sup>۷</sup>، آسنفتن<sup>۸</sup>، فلورن<sup>۹</sup>، فنانترن<sup>۱۰</sup>، آنتراسن<sup>۱۱</sup>، فلورانترین<sup>۱۲</sup>، پیرن<sup>۱۳</sup>، بنزو [a] آنتراسن<sup>۱۴</sup>، کرایسن<sup>۱۵</sup>، بنزو b فلورانتن<sup>۱۶</sup>، بنزو [k] فلورانتن<sup>۱۷</sup>، بنزو [a] پیرن<sup>۱۸</sup>، ایندنو [1,2,3-1 cd] پیرن<sup>۱۹</sup>، دی بنزو ah آنتراسن<sup>۲۰</sup>، بنزو [ghi] پیریلن<sup>۲۱</sup> هستند (Keith, 2015, Omores et al., 2017, Soltani et al., 2015).

آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان<sup>۲۲</sup> ترکیبات PAH را بر اساس میزان سرطان‌زایی به چهار گروه طبقه‌بندی کرده است: سرطان‌زا (گروه ۱)، جهش‌زا (گروه 2A)، جهش‌زای احتمالی (گروه 2B) و غیر سرطان‌زا (گروه ۳) (World Health Organization, 2000). ترکیبات PAH با وزن مولکولی بالا که دارای ۴ تا ۶ حلقه هستند، در مقایسه با ترکیبات دارای وزن مولکولی کمتر (۲ تا ۳ حلقه)، سمی‌تر محسوب می‌شوند (Rocha et al., 2017). طبق

استفاده از سوخت‌های فسیلی و فاضلاب‌های صنعتی و شهری مقدار قابل توجهی از آلاینده‌های آلی پایدار<sup>۱</sup> را به محیط زیست وارد می‌کنند (Qiu et al., 2021). این آلاینده‌ها سمی هستند و به دلیل خاصیت نیمه فرار یا پایداری بالا، در محیط باقی می‌مانند؛ بنابراین، به‌واسطه تجمع بالای آلاینده‌های آلی پایدار، آثار زیان‌باری به لحاظ اکولوژیکی و بهداشت و سلامت آزیان و انسان در محیط بر جای می‌گذارند (Dachs et al., 2002). یکی از مشکل‌سازترین آلاینده‌های آلی پایدار در سطوح گسترده، ترکیبات PAH<sup>۲</sup> هستند (Sun et al., 2021). ترکیبات PAH از مواد شیمیایی آلی سمی که از ۲ تا ۷ حلقه بنزن<sup>۳</sup> متصل شده به یکدیگر با آرایش‌های متفاوت، تشکیل شده‌اند. این ترکیبات آب‌گریز و چربی‌دوست بوده و تمایل زیادی به تجمع در بافت‌های چرب موجودات آبی دارند. ترکیبات PAH اثرات نامطلوبی بر سیستم تنفسی و عصبی انسان دارند و سبب بروز ناهنجاری جنینی، سرطان و جهش‌های ژنی می‌شوند (Adeniji et al., 2023, González-Gaya et al., 2019, Kumar et al., 2021). ترکیبات PAH در زیست‌بوم‌های دریایی به مواد اسید هیومیک<sup>۴</sup>، کربن سیاه و ذرات رسوب جذب شده و در نهایت در رسوبات دریا تجمع می‌یابند، جایی که پایداری آن‌ها نیز افزایش می‌یابد (Awe et al., 2020, Nasrabadi et al., 2022).

تالاب انزلی یکی از مهم‌ترین تالاب‌های آب شیرین برای تأمین اقتصاد منطقه و ایجاد زیستگاه‌های مناسب برای تغذیه و رشد گونه‌های جانوری و گیاهی است (Nasrabadi et al., 2022)؛ اما امروزه، ترکیبات نفتی فراوانی به تالاب انزلی وارد می‌شوند. این ترکیبات از طریق منابع هیدروکربن‌های نفتی در دریای خزر، رواناب‌های شهری، مصارف بنزین و گازوئیل در منطقه، سوخت قایق‌ها و کشتی‌ها و استخرهای پرورش ماهی وارد تالاب می‌شوند (Bakhtiari et al., 2018). افراد بومی بندر انزلی طیف گسترده‌ای از منابع غذایی، شامل ماهی سفید، اردک‌ماهی، شمشیر ماهی، سیم ماهی و دیگر گونه‌های ماهیان، صدف‌ها، پرندگان و تخم پرندگان را

<sup>5</sup> United States Environmental Protection Agency (USEPA)

<sup>6</sup> Naphthalene (Nap)

<sup>7</sup> Acenaphthylene (Acy)

<sup>8</sup> Acenaphthene (Ace)

<sup>9</sup> Fluorene (Flu)

<sup>10</sup> Phenanthrene (Phe)

<sup>11</sup> Anthracene (Ant)

<sup>12</sup> Fluoranthene (Fla)

<sup>13</sup> Pyrene (Pyr)

<sup>14</sup> Benzo [a] Anthracene (BaA)

<sup>15</sup> Chrysene (Chr)

<sup>16</sup> Benzo [b] Fluoranthene (BbF)

<sup>17</sup> Benzo [k] Fluoranthene (BkF)

<sup>18</sup> Benzo [a] Pyrene (BaP)

<sup>19</sup> Indeno [1,2,3-cd] Pyrene (Ind)

<sup>20</sup> Dibenz [a,h] Anthracene (DahA)

<sup>21</sup> Benzo [ghi] Perylene (BghiP)

<sup>22</sup> International Agency for Research on Cancer (IARC)

<sup>1</sup> Persistent Organic Pollutants (POP)

<sup>2</sup> Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)

<sup>3</sup> Benzene

<sup>4</sup> Humic Acid



هیدروکربن بستگی به مدت زمان در معرض قرار گرفتن انسان به‌طور روزانه دارد. مواد شیمیایی از طریق مسیرهای انتقال آلودگی مانند استنشاق، بلع و تماس پوستی به درون بدن راه می‌یابند (Health Canada, 2013, Li et al., 2021, Nozarpour et al., 2025). تاکنون، پژوهش‌هایی در خصوص ارزیابی آلودگی بر اساس ارزیابی ریسک سلامت انسان ناشی از بلع و تماس پوستی با ترکیبات PAH موجود در رسوبات سطحی تالاب انزلی انجام نشده است. این پژوهش به ارزیابی خطر سرطان‌زایی ناشی از بلع و تماس پوستی با ترکیبات PAH در رسوبات تالاب انزلی، در دو منطقه مرکزی- شمالی و جنوبی تالاب، به‌عنوان مهم‌ترین تالاب در امتداد جنوب دریای خزر، اختصاص داشت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- نمونه‌برداری

نمونه‌های رسوب در ۲۴ ایستگاه در بخش شمالی- مرکزی تالاب که بخش اصلی تالاب را تشکیل داده و دارای بیشترین میزان آلودگی است و ۲۵ ایستگاه در بخش جنوبی تالاب که میزان آلودگی و تأثیرات انسانی در آن کمتر است، با استفاده از گرب ون وین از روی قایق برداشت شدند (شکل ۱). انتخاب ایستگاه‌های نمونه‌برداری بر اساس انتشار آلاینده‌ها و فعالیت‌های انسانی انجام شد و به‌گونه‌ای طراحی شد که نمای جامعی از وضعیت منطقه را ارائه دهد. برای آماده‌سازی و آنالیز ترکیبات PAH، رسوبات سطحی (صفر تا ۳ سانتی‌متر) که بیشترین تماس را با آب تالاب دارند جداسازی و درون فویل آلومینیومی نگهداری شدند. در مجموع ۴۹ نمونه رسوب در بخش‌های شمالی- مرکزی و جنوبی تالاب انزلی جمع‌آوری شدند. انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه مرکزی دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از کلمن محتوی یخ خشک انجام شدند و در سردخانه با دمای ۲۰- درجه سلسیوس تا شروع فرایند آماده‌سازی نگهداری شدند (USEPA, 1996).

### ۲-۲- استخراج نمونه‌ها و آنالیز دستگاهی

ابتدا همه ظرف‌ها و وسایل مورد استفاده با آب و مایع ظرف‌شویی و پس از آن به ترتیب با حلال‌های اتانول، استون و هگزان نرمال، سه مرتبه با هر حلال شستشو داده شدند. همه ظرف‌های شسته شده با

گزارش سازمان بهداشت جهانی<sup>۱</sup>، BaP یکی از مضرترین ترکیبات برای سلامت انسان محسوب می‌شود و در گروه ۱ با شواهد کافی مبنی بر سرطان‌زایی در انسان طبقه‌بندی شده است. علاوه بر این، DahA به‌عنوان یک ترکیب جهش‌زا برای انسان در گروه 2A طبقه‌بندی شده است. ترکیبات BaA, BbF, BkF, Chr, IcdP<sup>۲</sup> در گروه 2B به‌عنوان جهش‌زای احتمالی در انسان قرار گرفته‌اند (World Health Organization, 2003).

حلالیت زیاد ترکیبات PAH در چربی به آن‌ها امکان عبور از غشای سلولی و نفوذ به فضای داخلی سلول‌ها و بافت‌ها را می‌دهد. این ترکیبات درون بافت، با تغییر عملکرد آنزیم سیتوکروم P450، موجب اختلال و جهش در مولکول DNA شده و از این طریق باعث بروز سرطان می‌شوند. آنزیم سیتوکروم P450 ترکیب BaP را به یک عامل فعال تبدیل می‌کند که می‌تواند فعالیت سلولی را به سمت سرطانی شدن سوق دهد. این ترکیبات با اتصال به مولکول DNA موجب ایجاد اختلال در فرایند تکثیر ژن می‌شوند. در نتیجه، تکثیر غیرطبیعی ژن جهش‌یافته می‌تواند به رشد سلول‌های سرطانی منجر شود (Gaber et al., 2021).

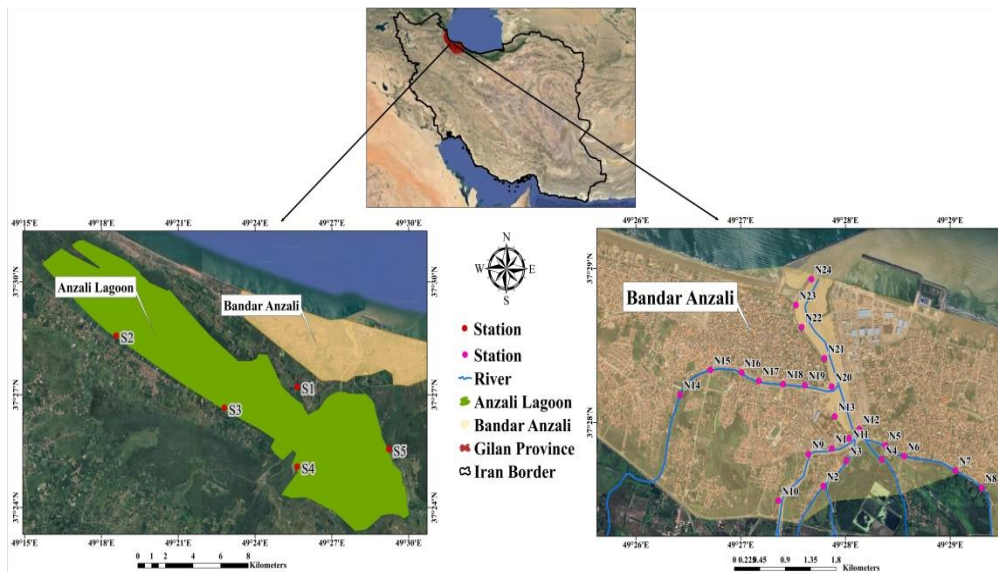
تعیین سهم آلودگی‌های هیدروکربن‌های حلقوی در تالاب انزلی نشان داد که لاستیک وسایل نقلیه و آسفالت، بیشترین سهم در آلودگی‌های نفتی را در منطقه داشتند (Azimi et al., 2020). روش مدیریتی بر اساس پایش زیستی و مدل‌سازی داده‌ها از تالاب انزلی پیشنهاد داد که میزان رشد جمعیت، تأثیرات کشاورزی بر منطقه، افزایش شهرسازی و صنعت عامل‌های اصلی هستند که منجر به تغییرات مهم در اکوسیستم شدند. نتایج پژوهش نشان داد که با پایش کردن محیط و کسب اطلاعات بیشتر از شرایط محیط و ارتباط آن با عوامل انسانی می‌توان روش مناسب برای مدیریت پایدار از تالاب ارائه داد (Sadeghi Pasvisheh et al., 2021). همچنین، ارزیابی ریسک اکولوژیک در تالاب انزلی نشانگر وجود مخاطرات قابل توجه برای زیست بوم بوده و بر احتمال انتقال آلودگی به انسان دلالت دارد (Nozarpour et al., 2025).

ارزیابی ریسک سلامت انسان، برای برآورد میزان خطر ابتلا به سرطان در طول دوره مواجهه با آلودگی‌های شیمیایی کاربرد دارد. میزان خطر ابتلا به سرطان برای هر یک از ترکیبات

<sup>1</sup> World Health Organization (WHO)

<sup>2</sup> Indeno [1,2,3-cd] Pyrene (IcdP)





**Fig. 1.** Sampling stations include the central-northern region of Anzali Wetland (N1-N24) and the southern region of the Wetland (S1-S5)

شکل ۱- ایستگاه‌های نمونه‌برداری شامل منطقه شمالی- مرکزی تالاب انزلی (N1-N24) و منطقه جنوبی تالاب (S1-S5)

## ۲-۲-۲- روش آماده‌سازی نمونه‌های رسوب

ابتدا نمونه‌های رسوب توسط دستگاه خشک‌کننده انجمادی به وزن ثابت رسیدند و سپس هموژن شدند. حدود ۱۰ گرم از نمونه رسوب به‌طور دقیق با ترازو توزین شدند. استخراج مواد آلی با استفاده از دستگاه سوکسله با ۸۰ میلی‌لیتر دی‌کلرو متان به مدت ۱۰ ساعت انجام شد. به‌منظور حذف گوگرد از نمونه‌ها از چند قطعه مس فعال شده با اسید کلریدریک استفاده شد. سپس با استفاده از دستگاه تبخیرکننده دوار و جریان ملایم گاز نیتروژن نمونه‌ها تا میزان ۲ میلی‌لیتر تغلیظ و طی کروماتوگرافی ستونی مرحله اول هیدروکربن‌ها با استفاده از ۲۰ میلی‌لیتر مخلوط دی‌کلرو متان/هگزان به نسبت حجمی ۳:۱ جدا شدند. در این مرحله از سیلیکاژل ۵ درصد غیرفعال شده با آب استفاده شد. به‌منظور کروماتوگرافی ستونی مرحله دوم، نمونه‌های حاصل از کروماتوگرافی ستونی مرحله اول با استفاده از دستگاه تبخیرکننده دوار و جریان ملایم گاز نیتروژن تا ۲ میلی‌لیتر تغلیظ شدند. در ادامه، برای جداسازی ترکیبات PAH از ۱۴ میلی‌لیتر مخلوط دی‌کلرو متان/هگزان به نسبت حجمی ۳:۱ استفاده شد. در نهایت نمونه‌ها به کمک جریان ملایم گاز نیتروژن کاملاً خشک شدند و بلافاصله قبل از تزریق به دستگاه GC-MS به آن‌ها ۱۰۰

پوشش آلومینیومی مناسب در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا اثر هر گونه ماده آلی محتمل از سطوح ظرف‌ها پاک شود.

## ۲-۲-۱- نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها برای تعیین غلظت ترکیبات PAH

۱۶ ترکیب از خانواده ترکیبات PAH شامل Naphthalene, Fluorine, Phenanthrene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Benzo(A), Pyrene, Anthracene, Chrysene, Fluoranthene, Benzo(B), Benzo (K) Fluoranthene, Anthracene, Indeno (1,2,3-, Benzo(Ghi) Perylene, Fluoranthene, Dibenz (A,H) Anthracene, Benzo (A) Pyrene, Cd)Pyrene برای تعیین غلظت و منشأ هیدروکربن‌ها در نمونه‌های رسوبات بررسی شدند. استاندارد داخلی (P-terphenyl-d<sub>14</sub>) و چهار ساروگیت<sup>۱</sup> (Nap-d<sub>8</sub>, Ant-d<sub>10</sub>, Pry-d<sub>12</sub>, and Chr-d<sub>12</sub>) همراه با بلنک<sup>۲</sup> در هر ست آزمایشگاهی به‌عنوان روش‌های کنترل کیفی استفاده شدند. برای تعیین غلظت ترکیبات PAH از دستگاه GC-MS<sup>۳</sup> استفاده شد (USEPA, 1996).

<sup>1</sup> Surrogates

<sup>2</sup> Blank

<sup>3</sup> Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)



فرض اینکه فقط دست‌ها در معرض آلاینده‌ها قرار دارند.  $SL_h$  (g/cm<sup>2</sup>) میزان تجمع ذرات رسوب روی سطح پوست در تماس مستقیم با آلاینده‌ها و  $RAF_{derm}$  ضریب جذب نسبی آلاینده‌ها توسط پوست است. پارامترهای  $AT$ ،  $BW$  و  $ED$  بر اساس راهنمای USEPA استخراج شدند. برای بررسی میزان سمیت هر یک از ترکیبات PAH از معادله ۳ استفاده شد

$$TEQ = \sum_{i=1}^n C_i \times TEF_i \quad (۳)$$

که در آن

$TEQ_i$  (ng/g) نشان‌دهنده میزان سمیت هر یک از ترکیبات PAH است و بر اساس ترکیب BaP محاسبه می‌شود.  $TEQ_{BaP}$  (ng/g) نشان‌دهنده غلظت سمیت کل ۱۶ ترکیب PAH است و بر اساس ترکیب BaP محاسبه شد.  $TEF_i$ <sup>۳</sup>، سمیت هر یک از ترکیبات PAH است. TEF برای ۱۶ ترکیب PAH که توسط EPA مشخص شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است.

علاوه بر تخمین دوز آلاینده‌های جذب شده توسط گیرنده‌های انسانی، ریسک ابتلا به سرطان در طول عمر از طریق بلع ( $ILCR_{ingestion}$ ) و تماس پوستی ( $ILCR_{dermal}$ ) با استفاده از معادلات ۴ و ۵ ارزیابی شده است (USEPA, 2004)

(۴)

$$ILCR_{ingestion} = \frac{C_S \times \left( CSF_{ingestion} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \right) \times IR_{ingestion} \times EF \times ED}{(BW \times AT \times 10^6)}$$

(۵)

$$ILCR_{dermal} = \frac{C_S \times \left( CSF_{dermal} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \right) \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{(BW \times AT \times 10^6)}$$

که در آن‌ها

$CSF_{ingestion}$ <sup>۴</sup> (1/ (mg/kg/day)) شاخص ریسک سرطان از طریق بلع بر اساس ترکیب BaP و  $CSF_{dermal}$  (1/ (mg/kg/day)) شاخص

میکرولیتر استاندارد داخلی P-therphenyle-d<sub>14</sub> اضافه شد (Zakaria et al., 2002).

### ۳-۲- ارزیابی ریسک سلامت انسان

ارزیابی ریسک سلامت انسان نقش مهمی در تشخیص اثرات نامطلوب ناشی از قرارگیری در معرض ترکیبات PAH در یک دوز مشخص دارد و می‌تواند میزان احتمال ابتلا به سرطان در اثر مواجهه با این ترکیبات را بررسی و ارزیابی کند (Akpan et al., 2022, Di Duca et al., 2023).<sup>۱</sup> به‌منظور ارزیابی اثرات سرطان‌زایی ترکیبات PAH ناشی از رسوبات آلوده که از طریق بلع و تماس پوستی با رسوبات وارد بدن انسان می‌شوند، استفاده شد. این ارزیابی، میزان اثرگذاری ترکیبات PAH را از طریق سمیت آن‌ها نسبت به بنزو [a] پیرن<sup>۲</sup> اندازه‌گیری کرده و امکان برآورد دقیق خطرات سرطان‌زایی این ترکیبات را فراهم کرده است. ابتدا، دوزهای آلاینده‌های جذب شده توسط گیرنده‌های انسانی از طریق دو مسیر مواجهه متفاوت در نظر گرفته شده با استفاده از معادلات ۱ و ۲ ارزیابی شدند

(۱)

$$Dose_{ingestion} = \frac{(C_S \times IR_{ingestion} \times RAF_{ing} \times EF \times ED)}{(BW \times AT \times 10^6)}$$

(۲)

$$Dose_{dermal} = \frac{(C_S \times SA_h \times SL_h \times RAF_{derm} \times EF \times ED)}{(BW \times AT \times 10^6)}$$

که در آن‌ها

$CS$  (ng/g) معادل  $TEQ_i$  یا  $TEQ_{BaP}$ ،  $IR_{ingestion}$  (g/day) میزان جذب آلودگی از رسوب از طریق بلع،  $RAF_{ing}$  ضریب جذب نسبی آلاینده‌ها توسط بلع،  $EF$  (day/years) میزان دفعات در معرض خطر آلودگی انسان،  $ED$  (year) طول عمر متوسط انسان به سال،  $BW$  (kg) میانگین وزن بدن انسان و  $AT$  (days) طول عمر متوسط انسان به روز است.  $SA_h$  (cm<sup>2</sup>) سطح پوست دست‌ها با

<sup>3</sup> Toxicity Effect Factor (TEF<sub>i</sub>)

<sup>4</sup> Cancer Slope Factor (CSF)

<sup>1</sup> Incremental Lifetime Cancer Risk (ILCR)

<sup>2</sup> Toxic Equivalence Quotients Relative to Benzo [a] Pyrene (TEQ<sub>BaP</sub>)



### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- میزان ترکیبات PAH در رسوبات منطقه شمالی-مرکزی و جنوبی تالاب انزلی

غلظت ۱۶ ترکیب PAH اولویت‌دار در USEPA که در رسوبات منطقه‌های شمالی-مرکزی و جنوبی تالاب انزلی بررسی شدند، در جدول ۳ ارائه شده است. میزان کلی غلظت این ترکیبات در ۲۴ ایستگاه منطقه شمالی-مرکزی بین ۸۷/۲۱۶۸ ng/g و ۵۶/۱۱۴۰۳ ng/g (ایستگاه N22) متغیر است. این مقدار در مقایسه با غلظت‌های گزارش شده در سایر مناطق ساحلی، از جمله خلیج گرگان در دریای خزر (۸۷/۱۰۷ تا ۱۸/۵۱۶ ng/g (وزن خشک) (Araghi et al., 2014)، خلیج Shandong در چین (۹/۸۱ تا ۸ ng/g (وزن خشک) (Li et al., 2023)، دریای شرق چین (۵۸/۳۸ تا ۰۶/۱۳۷۱ ng/g (وزن خشک) (Wang et al., 2020)، دریای جنوب چین (۷۲/۲۱ تا ۶۱/۳۱۹ ng/g (وزن خشک) (Huang et al., 2012) و دریای Aegean (۱۹/۰ تا ۸۱/۱ ng/g (وزن خشک) (Darilmaz et al., 2019) بیشتر است. این تفاوت در میزان غلظت‌های گزارش شده احتمالاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی و شهری است که منجر به افزایش آلودگی PAH در تالاب انزلی شده‌اند.

در منطقه جنوبی تالاب انزلی، غلظت کل ۱۶ ترکیب EPA PAH که در رسوبات ۲۵ ایستگاه نمونه‌برداری شده بررسی شدند، بین ۰۲/۴۸ ng/g (وزن خشک) (ایستگاه S2) تا ۰۳/۲۷۶ ng/g (وزن خشک) (ایستگاه S5) متغیر است. این مقدار به‌طور قابل توجهی کمتر از غلظت‌های مشاهده شده در مناطق شمالی-مرکزی تالاب است. نتایج آزمون پرمانوا نشان داد که غلظت ترکیبات PAH در رسوبات مناطق مختلف تالاب تفاوت معناداری دارد (Pseudo-F = 127.05, p = 0.001). این تفاوت بیانگر تأثیر عوامل محیطی خاص هر منطقه بر غلظت PAH است.

میزان زیاد آلودگی در منطقه شمالی-مرکزی تالاب انزلی، به‌ویژه در ایستگاه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۴ که در مجاورت شهر انزلی قرار دارند، عمدتاً به غلظت زیاد نفتالین مرتبط است. در میان ۱۶ ترکیب PAH اندازه‌گیری شده، نفتالین بیشترین غلظت را در مناطق آلوده‌تر نشان داده است (جدول ۳).

ریسک سرطان از طریق تماس پوست بر اساس ترکیب BaP است. همچنین SA ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ ) بیانگر سطح تماس پوست با رسوبات، AF ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) بیانگر ضریب جذب پوستی رسوبات و ABS ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) بیانگر ضریب جذب پوستی آلاینده‌ها است. پارامترهای استفاده شده در ارزیابی شاخص‌های ریسک سرطان‌زایی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- فاکتور اثر سمیت (TEF) ۱۶ ترکیب PAH برای ارزیابی

(USEPA, 2010) TEQ<sub>BaP</sub>

**Table 1.** List of PAH contaminants along with their TEF used in TEQ<sub>BaP</sub> assessment (USEPA, 2010)

PAH contaminants	TEF
Naphthalene	0.001
Acenaphthylene	0.001
Acenaphthene	0.001
Fluorene	0.001
Phenanthrene	0.001
Anthracene	0.01
Fluoranthene	0.001
Pyrene	0.001
Benzo [a] anthracene	0.1
Chrysene	0.01
Benzo [b] fluoranthene	0.1
Benzo [k] fluoranthene	0.1
Benzo [a] pyrene	1
Ideno-[1,2,3-c d] pyrene	0.1
Dibenzo [a,h] anthracene	1
Benzo [g,i,h] perylene	0.01

#### ۲-۴- تحلیل آماری

برای مقایسه غلظت PAH میان مناطق شمالی-مرکزی و جنوبی تالاب انزلی از آزمون یک‌طرفه PERMANOVA<sup>۱</sup> بر پایه Bray-Curtis با ۹۹۹ تکرار استفاده شد (Legendre and Gallagher, 2001) مقدار Pseudo-F و p-value بررسی شدند تا مشخص شود که تفاوت غلظت ترکیبات PAH بین این دو منطقه از نظر آماری معنی‌دار است. آزمون آماری با استفاده از برنامه PRIMER v.7 (PRIMER-E Ltd, Plymouth, UK) (Clarke et al., 2014) انجام شد.

<sup>1</sup> Permutational Multivariate Analysis of Variance



جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی شاخص‌های  $Dose_{dermal}$ ،  $Dose_{ingestion}$ ،  $ILCR_{dermal}$  و  $ILCR_{ingestion}$  (Di Duca et al., 2023; Haghazar et al., 2024; Massachusetts Department, 2002; Miletić et al., 2024; Onjia, 2024; Trajković et al., 2025; USEPA, 2014, 1989)

**Table 2.** Parameters utilized in the computation of  $Dose_{ingestion}$ ،  $Dose_{dermal}$ ،  $ILCR_{ingestion}$ ، and  $ILCR_{dermal}$  (Di Duca et al., 2023; Haghazar et al., 2024; Massachusetts Department, 2002; Miletić et al., 2024; Onjia, 2024; Trajković et al., 2025; USEPA, 2014, 1989)

Factors	Abbreviation	Value	Unit
CS	CS	$\sum 16 TEQ_{BaP}$	ng/g
Sediment ingestion rate	$IR_{ingestion}$	0.1	g/day
Ingestion relative absorption factor	$RAF_{ing}$	1	-
Dermal relative absorption factor	$RAF_{der}$	0.148	-
Ingestion cancer slope factor	$CSF_{ing}$	7.3	1/ (mg/kg/d)
Dermal cancer slope factor	$CSF_{der}$	25	1/ (mg/kg/d)
Body weight	BW	70	kg
Exposure frequency	EF	365	day/years
Exposure duration	ED	70	years
Average life span	AT	25550	days
Surface area of the hands	$SA_h$	890	cm <sup>2</sup>
Sediment load rate on hand skin	$SL_h$	0.0001	g/cm <sup>2</sup>
Dermal surface area	SA	5700	cm <sup>2</sup> /day
Dermal adherence factor	AF	0.07	mg/cm <sup>2</sup>
Dermal adsorption fraction	ABS	0.13	-

(۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانوگرم در گرم) و بسیار زیاد (<۵۰۰۰ نانوگرم در گرم) (Abdulla et al., 2023, Tepe and Tastekin, 2022). طبق این طبقه‌بندی، آلودگی ناشی از غلظت PAH در رسوبات مناطق شمالی- مرکزی تالاب انزلی در دسته بسیار زیاد قرار می‌گیرد، در حالی که آلودگی در رسوبات جنوب تالاب انزلی در دسته متوسط جای می‌گیرد.

پایش رسوبات در ایستگاه‌های واقع در مناطق شمالی- مرکزی نشان‌دهنده سطح بالاتری از آلودگی نسبت به مناطق جنوبی است. این موضوع حاکی از آن است که وجود ۸ پل روی تالاب منجر به ورود مستقیم رواناب‌های شهری می‌شوند و آسفالت مجاور تالاب منجر به ایجاد ترافیک و حمل‌ونقل بیشتر در مجاورت تالاب شده است. اسکله واقع در تالاب نیز باعث انتشار نفت و بنزین بیشتری از کشتی‌ها و قایق‌های موتوری در قسمت‌های مرکزی و شمالی تالاب می‌شود، چون اسکله‌های دست‌ساخت باعث ته‌نشینی بیشتر هیدروکربن‌های با وزن مولکولی زیاد می‌شوند (Azimi et al., 2018) علاوه بر این، میزان گردشگر در بندر انزلی به‌ویژه در فصل تابستان زیاد است طوری که در این فصل گاهی

انتشار این ترکیب دو حلقه‌ای در رسوبات دریایی در بیشتر مناطق شمالی- مرکزی تالاب احتمالاً ناشی از نشت نفت در دماهای کمتر است که با رواناب شهری و تخلیه سوخت و نفت حاصل از کشتی‌ها و قایق‌ها در دریای خزر و بندر انزلی ترکیب می‌شود (Ganiyu et al., 2024).

در اکوسیستم‌های دریایی، PAHها عمدتاً از نشت نفت، انتقال از اتمسفر و آلودگی‌های زمینی ناشی از رواناب سرچشمه می‌گیرند، به‌ویژه در مناطق ساحلی شهری که غلظت زیاد PAH رایج است (Shi et al., 2022). این ترکیبات دارای خاصیت آب‌گریزی هستند و حلالیت محدودی در آب دارند. هنگامی که وارد محیط‌های آبی یا رسوبات می‌شوند، به‌شدت به ذرات رسوبی و مواد آلی متصل شده و در طول زمان به آرامی تجزیه می‌شوند (USEPA, 2017).

بر اساس دستورالعمل‌های NOAA<sup>1</sup>، آلودگی ناشی از غلظت PAH در رسوبات به چهار دسته تقسیم می‌شود: کم (صفر تا ۱۰۰ نانوگرم در گرم)، متوسط (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ نانوگرم در گرم)، زیاد

<sup>1</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)



جدول ۳- غلظت ترکیبات PAH (ng/g) اندازه‌گیری شده در رسوبات مناطق مرکزی- شمالی و جنوبی تالاب انزلی.  $\Sigma$  EPA (16 PAHs) بیانگر

مجموع غلظت ۱۶ ترکیب PAH اندازه‌گیری شده است، Max: Maximum, Min: Minimum, CV: Coefficient of variation

**Table 3.** Measured concentrations of PAH compounds (ng/g) in sediments from the central-northern and southern regions of Anzali Wetland.  $\Sigma$  EPA (16 PAHs) represents the total concentration of 16 measured PAH compounds. Max: Maximum, Min: Minimum, CV: Coefficient of variation

PAH contaminants	Anzali Wetland							
	Central-northern region				Southern region			
	Min	Max	Mean	CV	Min	Max	Mean	CV
Naphthalene	678.62	7781.22	4036.89	46.08	1.36	9.01	3.95	47.47
Acenaphthylene	2.33	117.57	52.53	57.79	0.63	7.08	3.10	55.92
Acenaphthene	0.41	19.56	8.75	68.73	0.32	1.89	0.90	45.56
Fluorene	12.79	110.30	43.85	60.66	0.11	1.82	0.55	85.82
Phenanthrene	710.12	3234.38	1839.62	33.95	4.34	23.08	12.24	50.30
Anthracene	56.08	283.50	124.48	48.65	0.42	2.47	1.15	52.71
Fluoranthene	12.89	121.02	42.11	53.73	1.96	10.29	5.24	46.08
Pyrene	46.96	220.06	115.34	43.30	3.04	19.36	9.67	47.40
Benzo [a] anthracene	10.54	64.22	24.89	49.05	0.28	7.95	1.84	110.56
Chrysene	24.90	270.52	88.27	68.72	1.51	20.82	6.18	84.59
Benzo [b] fluoranthene	0.86	44.21	14.64	87.08	0.53	33.02	8.15	112.55
Benzo [k] fluoranthene	59.01	1051.05	219.27	90.08	10.93	96.93	43.78	57.79
Benzo [a] pyrene	17.92	195.14	90.33	49.60	0.79	48.55	18.13	83.02
Ideno-[1,2,3-cd] pyrene	33.87	318.02	144.97	52.20	0.44	7.31	2.85	68.88
Dibenzo[a,h] anthracene	5.15	214.87	29.72	148.32	0.10	4.42	1.46	79.48
Benzo [g,i,h] Perylene	10.55	116.66	42.08	67.95	2.98	31.64	13.07	54.93
$\Sigma$ EPA (16 PAHs)	2168.87	11403.56	6897.60	37.34	48.02	276.03	132.00	54.02

کنند (Tarafdar and Sinha, 2017).

به‌منظور ارزیابی خطر سرطان‌زایی ناشی از قرارگیری در معرض ترکیبات PAH موجود در رسوبات مناطق شمالی- مرکزی و جنوبی تالاب انزلی، میزان آلاینده‌های جذب شده توسط گیرنده‌های انسانی از طریق مسیرهای مختلف مواجهه بررسی شد. در این ارزیابی، میزان ترکیبات PAH جذب شده از طریق بلع و تماس پوستی در هر دو منطقه تعیین شد. بر این اساس، میزان جذب ناشی از بلع PAH از رسوبات (Dose<sub>ingestion</sub>) در منطقه شمالی- مرکزی  $10^{-7} \times 2$  میلی‌گرم بر گرم در روز و در منطقه جنوبی  $10^{-8} \times 4$  میلی‌گرم بر گرم در روز برآورد شد. همچنین، میزان ترکیبات PAH جذب شده از طریق تماس پوستی با رسوبات (Dose<sub>dermal</sub>) به ترتیب در منطقه شمالی- مرکزی  $10^{-8} \times 3$  و در منطقه جنوبی  $10^{-8} \times 1$  میلی‌گرم بر گرم در روز اندازه‌گیری شد (جدول ۴). علاوه بر این، به‌منظور ارزیابی سمیت هر یک از ترکیبات PAH

جمعیت گردشگران از جمعیت افراد بومی بیشتر می‌شود. در حالی که جنوب تالاب انزلی بیشتر به فعالیت‌های کشاورزی اختصاص داده شده است و میزان انتشار آلودگی به تالاب در قسمت جنوبی به مراتب کمتر از ترافیک و حمل‌ونقل و قایق‌های موتوری موجود در مرکز و شمال تالاب انزلی است (Bakhtiari et al., 2018).

### ۳-۲- ارزیابی ریسک سرطان‌زایی ترکیبات PAH موجود در رسوبات از طریق بلع و تماس پوستی و تأثیرات آن بر سلامت انسان

ترکیبات PAH از آلاینده‌های مهمی هستند که به‌طور بالقوه در زنجیره غذایی انسان وارد می‌شوند، زیرا امکان انتقال آن‌ها از طریق مصرف مواد غذایی و تماس پوستی وجود دارد. این ترکیبات در انسان می‌توانند خطرات جدی برای سلامت از جمله افزایش ریسک ابتلا به سرطان و مشکلات مرتبط با سیستم تولیدمثل ایجاد



جدول ۴- میانگین میزان دریافت PAH موجود از رسوبات تالاب انزلی از طریق بلع ( $Dose_{ingestion}$ ) و تماس پوستی ( $Dose_{dermal}$ ), همراه با میزان سمیت کل ترکیبات PAH نسبت به بنزو [a] پیرن ( $TEQ_{BaP}$ ) در مناطق شمالی- مرکزی و جنوبی تالاب انزلی

**Table 4.** Average PAH intake from Wetland sediments via ingestion ( $Dose_{ingestion}$ ), and dermal contact ( $Dose_{dermal}$ ), along with the total toxicity equivalence of PAHs relative to benzo [a] pyrene ( $TEQ_{BaP}$ ) in the central-northern and southern regions of the wetland

Anzali Wetland	$Dose_{ingestion}$ ( $mg\ g^{-1}/day$ )	$Dose_{dermal}$ ( $mg\ g^{-1}/day$ )	$TEQ_{BaP}$ ( $mg\ g^{-1}\ dw$ )
Central-Northern region	$2 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-8}$	166.43
Southern region	$4 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-8}$	26.67
Total	$3 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-8}$	193.10

جدول ۵- میانگین ارزیابی خطر سرطان‌زایی ترکیبات PAH موجود در رسوبات تالاب انزلی از طریق بلع ( $ILCR_{ingestion}$ ) و تماس پوستی ( $ILCR_{dermal}$ ) در مناطق شمالی- مرکزی و جنوبی تالاب انزلی

**Table 5.** Average carcinogenic risk assessment of PAH compounds in Anzali Wetland sediments via ingestion ( $ILCR_{ingestion}$ ) and dermal contact ( $ILCR_{dermal}$ ) in the central-northern and southern regions of the wetland

Anzali Wetland	$ILCR_{ingestion}$ ( $mg\ g^{-1}/day$ )	$ILCR_{dermal}$ ( $mg\ g^{-1}/day$ )	Carcinogenic risk
Central-Northern region	$6 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-3}$	$ILCR > 10^{-4}$ : High risk
Southern region	$9 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-4}$	$10^{-6} < ILCR < 10^{-4}$ : Medium risk
Total	$7 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-3}$	$ILCR < 10^{-6}$ : Low risk

$ILCR_{dermal}$  بود که نشان می‌دهد خطر ابتلا به سرطان مرتبط با قرار گرفتن در معرض تماس پوستی PAH های موجود در رسوبات تالاب بیشتر از خطر ابتلا به سرطان مرتبط با بلع رسوبات است. بر اساس دستورالعمل‌های USEPA، مقدار  $ILCR$  بیشتر از  $10^{-4}$  نشان‌دهنده خطر قابل توجه سرطان‌زایی برای انسان است، در حالی که مقدار بین  $10^{-4}$  و  $10^{-6}$  بیانگر ریسک متوسط سرطان‌زایی محسوب می‌شود. مقدار کمتر از  $10^{-6}$  فاقد خطر قابل توجه هستند (USEPA, 2004); بنابراین، خطر ابتلا به سرطان ناشی از قرار گرفتن در معرض ترکیبات PAH از طریق بلع رسوبات تالاب ( $ILCR_{ingestion}$ )، در تمامی محل‌های نمونه‌برداری ( $7 \times 10^{-7}$ )، فاقد خطر ارزیابی شد. با این حال، بر اساس مقدار به‌دست‌آمده از  $ILCR_{dermal}$ ، خطر سرطان‌زایی مرتبط با تماس پوستی با ترکیبات PAH موجود در رسوبات ( $1 \times 10^{-3}$ ) در محدوده خطر زیاد قرار داشت (جدول ۵). این مقدار در مقایسه با ارزیابی‌های گزارش شده از  $ILCR_{ingestion}$  و  $ILCR_{dermal}$  در سایر

نسبت به BaP، به‌عنوان سمی‌ترین ترکیب PAH، میانگین سمیت کل ترکیبات PAH ( $TEQ_{BaP}$ ) محاسبه شد. میزان  $TEQ_{BaP}$  در منطقه شمالی- مرکزی تالاب انزلی (۱۶۶/۴۳) به‌مراتب بیشتر از منطقه جنوبی (۲۶/۶۷) به دست آمد (جدول ۴). برای ارزیابی اثرات سرطان‌زایی ترکیبات PAH موجود در رسوبات آلوده، از رویکرد  $ILCR$  استفاده شد. این روش میزان خطر انتقال این آلاینده‌ها به بدن انسان از طریق بلع ( $ILCR_{ingestion}$ ) و تماس پوستی ( $ILCR_{dermal}$ ) را بررسی می‌کند (Akpan et al., 2022, Di Duca et al., 2023). نتایج این ارزیابی که در جدول ۵ ارائه شده است، نشان می‌دهد که مقدار به‌دست‌آمده از  $ILCR_{ingestion}$  در منطقه شمالی- مرکزی تالاب انزلی ( $6 \times 10^{-7}$ ) بیش از منطقه جنوبی تالاب ( $9 \times 10^{-8}$ ) است. همچنین، مقدار به‌دست‌آمده از  $ILCR_{dermal}$  در منطقه شمالی- مرکزی تالاب انزلی ( $1 \times 10^{-3}$ ) بیشتر از منطقه جنوبی تالاب ( $2 \times 10^{-4}$ ) است. مقدار  $ILCR_{ingestion}$  به دست آمده از رسوبات تالاب بسیار کمتر از



بررسی آلودگی تالاب انزلی در دریای خزر دارد. خطر سرطان‌زایی زیاد در تالاب انزلی به‌ویژه در مناطق مرکزی- شمالی تالاب که بخش گسترده‌ای از تالاب را شامل می‌شود، به غلظت بالای مشتقات نفتی و متیلاسیون مرتبط است. در میان ۱۶ ترکیب PAH اندازه‌گیری شده، نفتالین بیشترین غلظت را در مکان‌های آلوده‌تر نشان داده و تهدیدی جدی برای منطقه حفاظت شده محسوب می‌شود. این یافته‌ها ضرورت ارزیابی مستمر خطرات سرطان‌زایی ناشی از مواجهه مستقیم انسان با این آلاینده‌ها، به‌ویژه از طریق تماس پوستی را مورد تأکید قرار می‌دهد. برای کاهش ورود ترکیبات سرطان‌زای PAH به تالاب، جایگزینی آسفالت با روسازی‌های نفوذپذیر بدون منشأ هیدروکربنی در مناطق مجاور تالاب می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش رواناب ناشی از بارندگی داشته باشد. علاوه بر این، انتقال پارکینگ‌ها به مناطق دورتر می‌تواند باعث کاهش ترافیک و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌ها شود. مدیریت فاضلاب‌های شهری، ساماندهی ایستگاه‌های پهلویی کشتی‌ها و انتقال پمپ‌بنزین‌ها به نقاط دورتر از تالاب، از دیگر اقدامات مؤثر برای جلوگیری از ورود مستقیم آلاینده‌های سرطان‌زا به اکوسیستم است.

#### ۵- قدردانی

این پژوهش تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره "۴۰۳۰۶۸۳" انجام شده است.

مناطق ساحلی، از جمله رسوبات مصب شمال شرق چین (به ترتیب  $10^{-8}$  و  $10^{-9}$  mg g<sup>-1</sup>/day) (Cheng et al., 2022) و رسوبات مصب در جنوب ایتالیا (به ترتیب  $10^{-13}$  و  $10^{-6}$  mg g<sup>-1</sup>/day) (Di Duca et al., 2023). در پژوهش انجام شده در شمال شرق چین، خطر سرطان‌زایی در هر دو سطح بلع و تماس پوستی در محدوده کم ارزیابی شد، در حالی‌که در جنوب ایتالیا، میزان خطر در سطح بلع کم و در سطح تماس پوستی متوسط گزارش شد.

بنابراین، با توجه به اینکه این مناطق به‌عنوان نواحی آلوده شناخته شده‌اند و در مجموع ریسک افزایشی سرطان در بندر انزلی  $10^{-3}$  ارزیابی شده است، نشان‌دهنده خطر زیاد سرطان‌زایی برای افراد بومی بندر انزلی محسوب می‌شود. از این‌رو، نظارت مستمر بر آلاینده‌های بالقوه و اجرای اقدامات کنترلی و حفاظتی به‌منظور تضمین سلامت عمومی و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی امری اجتناب‌ناپذیر است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش فراتر از انتظارات برای یک تالاب حفاظت شده بین‌المللی بود و نشان‌دهنده ضرورت مدیریت بلندمدت برای کاهش آلودگی در تالاب انزلی است. این پژوهش، به‌عنوان نخستین بررسی جامع در زمینه ارزیابی خطر سرطان‌زایی ناشی از بلع و تماس پوستی با ترکیبات PAH موجود در رسوبات، نقش مهمی در

## References

- Abdulla, M. A., Castillo, A. B., Collins, C. and Sizmur, T., 2023. Ecological indicators and source diagnostic ratios of aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in marine sediments of Qatar. *Regional Studies in Marine Science*, 64, 103042. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103042>.
- Adeniji, A. O., Okaiyeto, K., George, M. J., Tanor, E. B., Semerjian, L. and Okoh, A. I., 2023. A systematic assessment of research trends on polycyclic aromatic hydrocarbons in different environmental compartments using bibliometric parameters. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(5), 1289-1309. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01353-2>.
- Akpan, A. D., Okori, B. S. U. and Ekpechi, D. C., 2022. Human health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water samples around Eket Metropolis, Akwa Ibom State, Nigeria. *Asian Journal Environmental Science*, 19, 58-71. <https://doi.org/10.9734/AJEE/2022/v19i4419>.
- Araghi, P. E., Bastami, K. D. and Rahmanpoor, S., 2014. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments of Gorgan Bay, Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 89(1-2), 494-498. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.001>.
- Awe, A. A., Opeolu, B. O., Olatunji, O. S., Fatoki, O. S., Jackson, V. A. and Snyman, R., 2020. Occurrence and



- probabilistic risk assessment of PAHs in water and sediment samples of the Diep River, South Africa. *Heliyon*, 6(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04306>.
- Azimi, A., Bakhtiari, A. R. and Tauler, R., 2018. Chemometrics analysis of petroleum hydrocarbons sources in the street dust, runoff and sediment of urban rivers in Anzali port-South of Caspian Sea. *Environmental Pollution*, 243, 374-382. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.073>.
- Azimi, A., Riahi Bakhtiari, A. and Tauler, R., 2020. Polycyclic aromatic hydrocarbon source fingerprints in the environmental samples of Anzali-South of Caspian Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 32719-32731. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09588-1>.
- Bakhtiari, A. R., Javedankherad, I., Mohammadi, J. and Taghizadeh, R., 2018. Distribution of linear alkylbenzenes as a domestic sewage molecular marker in surface sediments of International Anzali Wetland in the southwest of the Caspian Sea, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 20920-20929. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1942-1>.
- Cheng, J., Wang, X., Zheng, B., Zhang, X. and Han, J., 2022. Evaluation of distribution characteristics and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments: from the perspective of land-ocean coordination. *Journal of Hydrology*, 607, 127514. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127514>.
- Clarke, K. R., Gorley, R. N., Somerfield, P. J. and Warwick, R. M., 2014. *Change in Marine Communities: an Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. 3<sup>rd</sup> Edition, Primer-E, Plymouth. [Link].
- Dachs, J., Lohmann, R., Ockenden, W. A., Méjanelle, L., Eisenreich, S. J. and Jones, K. C., 2002. Oceanic biogeochemical controls on global dynamics of persistent organic pollutants. *Environmental Science and Technology*, 36(20), 4229-4237. <https://doi.org/10.1021/es025724k>.
- Darilmaz, E., Alyuruk, H., Kontas, A., Altay, O., Uluturhan, E. and Bilgin, M., 2019. Distributions and sources of PAHs and OCPs in surficial sediments of Edremit Bay (Aegean Sea). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77, 237-248. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00619-8>.
- Di Duca, F., Montuori, P., Trama, U., Masucci, A., Borrelli, G. M. and Triassi, M., 2023. Health risk assessment of PAHs from estuarine sediments in the South of Italy. *Toxics*, 11(2), 172. <https://doi.org/10.3390/toxics11020172>.
- Gaber, M., Sequely, A. Al, Monem, N. A. and Balbaa, M., 2021. Effect of polyaromatic hydrocarbons on cellular cytochrome P450 1A induction. *Ocean and Coastal Research*, 69, e21026. <https://doi.org/10.1590/2675-2824069.21026mg>.
- Ganiyu, S. A., Komolafe, A. E., Basheeru, K. A., Lasisi, R. A. and Adeyemi, A. A., 2024. Levels, distribution, origins, and human health risk evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater around a petroleum depot wastewater discharge point. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 303-314. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.07.004>.
- González-Gaya, B., Martínez-Varela, A., Vila-Costa, M., Casal, P., Cerro-Gálvez, E., Berrojalbiz, N. et al., 2019. Biodegradation as an important sink of aromatic hydrocarbons in the oceans. *Nature Geoscience*, 12(2), 119-125. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0285-3>.
- Haghnazar, H., Abbasi, Y., Morovati, R., Johannesson, K. H., Somma, R., Pourakbar, M. et al., 2024. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surficial sediments of the Abadan freshwater resources-Northwest of the Persian Gulf. *Journal of Geochemical Exploration*, 258, 107390. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107390>.
- Health Canada, 2013. Interim Guidance on Human Health Risk Assessment for Short-Term Exposure to Carcinogens at Contaminated Sites. *Federal Contaminated Sites Risk Assessment in Canada*. [Link].
- Huang, W., Wang, Z. and Yan, W., 2012. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Zhanjiang Bay and Leizhou Bay, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 64(9), 1962-1969. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.023>.



- Keith, L. H., 2015. The source of US EPA's sixteen PAH priority pollutants. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 35(2-4), 147-160. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.892886>.
- Kumar, M., Bolan, N. S., Hoang, S. A., Sawarkar, A. D., Jasemizad, T., Gao, B. et al., 2021. Remediation of soils and sediments polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons: to immobilize, mobilize, or degrade? *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126534. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126534>.
- Legendre, P. and Gallagher, E. D., 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129(2), 271-280. <https://doi.org/10.1007/s004420100716>.
- Li, W., Zhang, Z., Zhang, R., Sun, A., Lu, Y., Chen, J. et al., 2021. Spatiotemporal occurrence, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in a typical mariculture ecosystem. *Water Research*, 204, 117632. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117632>.
- Li, Z., Qi, R., Miao, J., Li, Y., Wang, Q., Lei, F. et al., 2023. A comprehensive assessment framework for the risk and source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using two weight of evidence (WOE) approaches in bays of Shandong Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 429, 139572. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139572>.
- Massachusetts Department, 2002. *Technical Update: Calculation of Enhanced Soil Ingestion Rate*. Boston, MA, USA. [Link].
- Miletić, A., Vesković, J., Lučić, M. and Onjia, A., 2024. Monte Carlo simulation of source-specific risks of soil at an abandoned lead-acid battery recycling site. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(8), 3313-3329. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02747-7>.
- Nasrabadi, T., Vosough, A., Tajziehchi, S., Marefat, A., Abbasimaedeh, P., Ghorashi, M. et al., 2022. Comprehensive scheme for evaluation of potentially toxic elements (PTEs) pollution in surface sediments of wetlands, case study: Anzali Wetland. *International Journal of Environmental Research*, 16(5), 96. <https://doi.org/10.1007/s41742-022-00478-7>.
- Nozarpour, R., Riyahi, A., Ghanbari, F. and Azimi, A., 2025. Assessing ecological and health risks of PAH compounds in Anzali Wetland: a weight of evidence perspective. *Marine Pollution Bulletin*, 220, 118428. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118428>.
- Omores, R. A., Wewers, F., Ikhide, P. O., Farrar, T. and Giwa, A., 2017. Spatio-temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils in Cape Town, South Africa. *International Journal of Environmental Research*, 11, 189-196. <https://doi.org/10.1007/s41742-017-0018-2>.
- Onjia, A., 2024. Concentration unit mistakes in health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil, sediment, and indoor/road dust. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1370397. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1370397>.
- Qiu, M., Hu, B., Chen, Z., Yang, H., Zhuang, L. and Wang, X., 2021. Challenges of organic pollutant photocatalysis by biochar-based catalysts. *Biochar*, 3(2), 117-123. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00098-y>.
- Rocha, M. J., Dores-Sousa, J. L., Cruzeiro, C. and Rocha, E., 2017. PAHs in water and surface sediments from Douro River estuary and Porto Atlantic coast (Portugal)-impacts on human health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6137-6>.
- Sadeghi Pasvisheh, R., Eurie Forio, M. A., Ho, L. T. and Goethals, P. L. M., 2021. Evidence-based management of the Anzali Wetland system (Northern Iran) based on innovative monitoring and modeling methods. *Sustainability*, 13(10), 5503. <https://doi.org/10.3390/su13105503>.
- Shi, W., Xu, M., Liu, Q. and Xie, S., 2022. Polycyclic aromatic hydrocarbons in seawater, surface sediment, and marine organisms of Haizhou Bay in Yellow Sea, China: distribution, source apportionment and health risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113280. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113280>.
- Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Tavakol, T., Lahijanzadeh, A. R., Jaafarzadeh, N. et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.097>.
- Sun, K., Song, Y., He, F., Jing, M., Tang, J. and Liu, R., 2021. A review of human and animals exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: health risk and adverse effects, photo-induced toxicity and regulating effect of microplastics. *Science of The Total Environment*, 773, 145403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145403>.
- Tarafdar, A. and Sinha, A., 2017. Cancer risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils and sediments of India: a meta-analysis. *Environmental Management*, 60(4), 784-795. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0920-6>.
- Tepe, Y. and Taştekin, Ö., 2022. Spatiotemporal PAH levels in the coastal sediment of Samsun, a metropolis between Turkey's two largest deltas. *Marine Pollution Bulletin*, 181, 113907. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113907>.
- Trajković, I., Sentić, M., Miletić, A., Vesković, J., Lučić, M. and Onjia, A., 2025. Source apportionment and probabilistic health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment from an urban shallow lake. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36119-7>.
- USEPA, 1989. *Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I, Human Health Evaluation Manual (Part A), Interim Final*. EPA, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. [[Link](#)].
- USEPA, 1996. *Method 3540C. Soxhlet Extraction*. USEPA: Washington, DC, USA. [[Link](#)].
- USEPA, 2004. *Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Final*. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation USEPA, Washington, DC, 11989. [[Link](#)].
- USEPA, 2010. *Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites*. Regional Screening Table. User's Guide. United States Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA. [[Link](#)].
- USEPA, 2014. *Human Health Evaluation Manual, Supplemental Guidance: Update of Standard Default Exposure Factors*. U.S. Environmental Protection Agency, OSWER Directive 9200 1-120. [[Link](#)].
- USEPA, 2017. *IRIS Toxicological Review of Benzo [a] Pyrene (Final Report)*. US Environmental Protection Agency, Washington, DC. [[Link](#)].
- Wang, S., Ji, Y., Zhao, J., Lin, Y. and Lin, Z., 2020. Source apportionment and toxicity assessment of PM<sub>2.5</sub>-bound PAHs in a typical iron-steel industry city in northeast China by PMF-ILCR. *Science of The Total Environment*, 713, 136428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136428>.
- World Health Organization, 2000. Regional office for Europe. Air quality guidelines for Europe. 2<sup>nd</sup> Edition. *WHO Regional Publications, European Series*, (23). [[Link](#)].
- World Health Organization, 2003. Health risks of persistent organic pollutants from long-range transboundary air pollution. *Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution, WHO*. Europe. [[Link](#)].
- Zakaria, M. P., Takada, H., Tsutsumi, S., Ohno, K., Yamada, J., Kouno, E. et al., 2002. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rivers and estuaries in Malaysia: a widespread input of petrogenic PAHs. *Environmental Science and Technology*, 36(9), 1907-1918. <https://doi.org/10.1021/es011278>.
- Zamani, M., Khorasani, N., Bakhtiari, A. R. and Rezaei, K., 2015. Source identification of perylene in surface sediments and waterbird eggs in the Anzali Wetland, Iran. *Environmental Pollution*, 205, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.05.007>.

