JEHE Journal of Environmental Health Engineering , 2026; 14(1):31-44 Original Article
Alborz University of Medical Sciences

Evaluation of the bioaccumulation index of polycyclic aromatic hydrocarbons in eucalyptus leaves (Eucalyptus microtheca) of Khuzestan Steel Plant, Ahvaz city

Received: 11 February 2026, Accepted: 20 May 2026

Fatemeh Jafarian[1], Khoshnaz Payandeh[2*], Ahad Nazarpour[3], Ali Gholami[4], Kamran Mohsenifar[1]

[1] *Department of Soil Sciences, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran*
[2] *Research Group of Artificial Intelligence Application Development in Agriculture, Environment and Medicine, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran*
[3] *Department of Geology, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran*
[4] *Water Studies Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran*

***Corresponding Author:**
khpayandeh@iau.ac.ir

How to Cite This Article:
Jafarian F, Payandeh K, Nazarpour A, Gholami A, Mohsenifar K. Evaluation of the bioaccumulation index of polycyclic aromatic hydrocarbons in eucalyptus leaves (Eucalyptus microtheca) of Khuzestan Steel Plant, Ahvaz city. Journal of Environmental Health Engineering. 2026;14(1):31-44.

DOI:
10.66224/jehe.14.1.31

ABSTRACT

Background: Polycyclic aromatic hydrocarbons are toxic and carcinogenic compounds for humans that often enter the environment due to human activities, increasing urbanization, and industrial development. This study aimed to measure and determine the concentration of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds of the leaves (*Eucalyptus microtheca*) in the industrial area of the Khuzestan Steel Company in Ahvaz in 2022.

Materials and Methods: In this study, 50 leaf samples were collected from 50 points in the Khuzestan Steel Company in the summer with three replicates. To measure polycyclic aromatic compounds in the leaves, gas chromatography-mass spectrometry GC/MS was performed using a Thermo Fisher Scientific device made in the United States.

Results: The skewness and kurtosis values of aromatic hydrocarbon compounds showed that the concentrations of these compounds in the leaves were within the range of -2 and 2, indicating a normal distribution. The average concentrations of Ant and Ace compounds in the leaves were 55.42 and 47.90 ng g^{-1}, respectively, which were higher than those of the other polycyclic aromatic hydrocarbons ($P<0.05$). The highest bioaccumulation index of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in the leaves was obtained for Ace and Nap, with values of 0.054 and 0.049, respectively.

Conclusion: In general, Eucalyptus species cannot be considered as bio-tracer plants for polycyclic aromatic hydrocarbon compounds, because the bioaccumulation index of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in eucalyptus leaves was lower than 1, so this tree species does not have an acceptable and suitable ability to absorb and transfer these types of pollutants from the soil.

Keywords: Polycyclic aromatic hydrocarbons, Biological index, *Eucalyptus microtheca*, Leaves, Ahvaz Steel Company

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

Copyright © 2026 The Authors.
Published by Alborz University of Medical Sciences
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).Non-commercial uses of the work are permitted,provided the original work is properly cited.

JEHE
Alborz University of Medical Sciences
مجله مهندسی بهداشت محیط، دوره ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۳۱ تا ۴۴
مقاله پژوهشی

ارزیابی شاخص تجمع زیستی هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه ای در برگ درختان اوکالیپتوس (Eucalyptus microtheca) کارخانه فولاد خوزستان، شهر اهواز

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

فاطمه جعفریان[۱]، خوشناز پاینده[2]*، احد نظرپور[3]، علی غلامی[۴]، کامران محسنی‌فر[۱]

[۱] گروه خاک‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[2] گروه پژوهشی توسعه کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی، محیط زیست و پزشکی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[3] گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[4] مرکز تحقیقات مطالعات آب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

چکیده

زمینه و هدف: هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای ترکیبات سمی و سرطان‌زا برای انسان می‌باشند که اغلب به‌دلیل فعالیت‌های انسانی، افزایش شهرنشینی و پیشرفت صنایع وارد محیط‌زیست می‌شوند. این تحقیق با هدف اندازه‌گیری و تعیین غلظت ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در برگ درخت اوکالیپتوس (*Eucalyptus microtheca*) ناحیه صنعتی کارخانه فولاد خوزستان شهر اهواز در سال ۱۴۰۱ انجام شد.

مواد و روش ها: در این تحقیق ۵۰ نمونه برگ درخت اوکالیپتوس محوطه کارخانه فولاد خوزستان شهر اهواز در فصل تابستان از ۵۰ نقطه نمونه‌برداری شد. برای سنجش ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای در نمونه‌های خاک و برگ از روش کروماتوگرافی گازی ـ طیف سنجی جرمی GC/MS به وسیله دستگاه Thermo Fisher Scientific ساخت کشور آمریکا انجام شد.

یافته ها: مقادیر چولگی و کشیدگی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک نشان داد که غلظت این ترکیبات در نمونه‌های خاک و برگ درخت اوکالیپتوس در بازه ۲- و ۲ به دست آمد که نرمال بودند. میانگین غلظت ترکیبات Ant و Ace در برگ درخت اوکالیپتوس به ترتیب ۵۵/۴۲ و ۴۷/۹۰ نانوگرم بر گرم به دست آمد که نسبت به سایر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای بالاتر به دست آمد ($P<0/05$). بالاترین شاخص تجمع زیستی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس مربوط Ace و Nap به ترتیب ۰/۰۵۴ و ۰/۰۴۹ به دست آمد.

نتیجه گیری: به طور کلی نمی‌توان گونه اوکالیپتوس را برای ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را جزء گیاهان زیست ردیاب در نظر گرفت، زیرا شاخص تجمع زیستی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس پایین تر از ۱ به دست آمد، بنابراین این گونه درختی توانایی قابل قبول و مناسب برای جذب و انتقال این نوع آلاینده ها را از خاک ندارد.

واژه های کلیدی: هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، شاخص زیستی، درخت اوکالیپتوس، برگ کارخانه فولاد اهواز

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول:**
khpayandeh@iau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:
Jafarian F, Payandeh K, Nazarpour A, Gholami A, Mohsenifar K. Evaluation of the bioaccumulation index of polycyclic aromatic hydrocarbons in eucalyptus leaves (Eucalyptus microtheca) of Khuzestan Steel Plant, Ahvaz city. Journal of Environmental Health Engineering. 2026;14(1):31-44.

DOI:
10.66224/jehe.14.1.31

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

مقدمه

هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)[1] ترکیبات آلی با ساختارهای مختلف و سمیت متفاوت پایدار هستند و از طریق مکانیسم‌های مختلف اثرات سمی بر موجودات زنده دارند و از مسیرهای مختلف وارد محیط‌زیست می شوند[1]. مهمترین وسیله پراکندگی و گسترش هیدروکربن-های آروماتیک چندحلقه‌ای هوا و جو می‌باشد که بخش عمده‌ای از بار محیطی هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه-ای را دریافت می کند و در نتیجه این ترکیبات در همه جا در محیط وجود دارند[2]. هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای عمدتاً از احتراق ناقص مواد آلی به صورت طبیعی یا انسانی به جو منتشر می شوند. منابع طبیعی شامل آتشفشان‌ها و آتش‌سوزی‌های جنگلی است. در حالی که منابع انسانی انتشار این ترکیبات، دود ناشی از اگزوز وسایل نقلیه، آتش‌سوزی‌های شهری و کشاورزی، نیروگاه‌ها، کارخانه‌ها فولادسازی، ریخته‌گری و سایر منابع صنعتی هستند[3]. هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای مواد شیمیایی آلی آبگریز با فشار بخار کم، نسبت به مواد شیمیایی با فشار بخار بالاتر، مانند بنزن، راحت‌تر به ذرات معلق موجود در جو وارد می شوند. تغییر در فشار بخار ترکیبات مختلف هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای باعث می شود که این ترکیبات در غلظت های مختلف در بخار و سایر فازهای محلول توزیع شوند[4]. هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای اتمسفری به طور مداوم توسط فرآیندهای رسوب خشک یا مرطوب به زمین فرونشست می کنند. هنگامی که هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای روی سطح زمین رسوب می کنند، می توانند متحرک شوند. از آنجایی که اکثر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در خاک به ذرات خاک متصل می شوند، مهمترین عوامل مؤثر بر تحرک این ترکیبات، اندازه ذرات جاذب و اندازه تخلخل نفوذپذیری خاک‌ها خواهد بود[5].

ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای به‌عنوان یکی از گروه‌های سمی گزارش شدند که می‌توانند اثرات نامطلوب سلامت بر روی انسان داشته باشند، به طوری که آژانس بین المللی تحقیقات سرطان برخی از این ترکیبات را به عنوان عامل سرطان‌زا و جهش‌زا برای انسان طبقه‌بندی کردند[6]. از جمله این ترکیبات سرطان‌زا بنزوپیرن[2]، نفتالین[3]، کریسن[4] بنز آنتراسن[5]، بنزوفلورانتن[6] و بنزوفلورانتن[7] می-باشند. قرار گرفتن در معرض هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای به صورت طولانی مدت یا کوتاه مدت می‌تواند اثرات مزمن یا حاد ایجاد کند. مسیر اصلی قرار گرفتن در معرض هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در انسان از پوست، دستگاه گوارش و سیستم تنفسی بوده که تنفس هوای آلوده به این ترکیبات سبب اختلالات بیوشیمیایی و آسیب سلولی منجر به جهش، مشکلات قلبی و ریوی، ناهنجاری‌های رشدی، تومورها و سرطان در انسان می‌شود[7,8].

پایش زیستی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه-ای به دلیل انتشار گسترده آن‌ها و ارتباط سم‌شناختی مورد توجه بوده، زیرا ابتدا به گیاهان منتقل و سپس وارد زنجیره غذایی انسان می‌شوند. در تحقیقی بر روی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در برخی سبزیجات و درختان اوکالیپتوس[8] و کنار[9] شهر بغداد در کشور عراق ترکیب نفتالین در همه نمونه‌ها وجود داشت و بالاترین غلظت در نمونه برگ‌های اکالیپتوس گزارش شد[4]. در بررسی دیگری در برگ درختان *Sambucus nigra* و *Acacia melanoxylon* در کشور اکوادور اثبات شد که برگ این دو گونه توانایی جذب و انباشت غلظت هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را دارند که نشان‌دهنده تأثیرپذیری در مناطقی است که جمعیت‌های مستعد آلودگی هوا در آنها

1.Polycyclic aromatic hydrocarbon
2.Benzopyrene
3.Naphthalene
4.Chysene
5.Benz anthracene
6. Benzofluoranthene
7.Benzofluoranthene
8.Eucalyptus leaves
9.Ziziphus spina Christi

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

رفت و آمد دارند[۷]. در یک مطالعه بر روی سه گیاه اسطوخودوس[۱]، جعفری[۲] و نعناع[۳] در کشور لهستان، پژوهشگران گزارش کردند که سطح و مشخصات آلودگی گیاهان به هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای به گونه و محل کشت گیاهان بستگی دارد[۹]. همچنین گزارش شده است که برگ‌ها و پوست درخت *Sambucus nigra* برای نظارت بر کیفیت هوای شهری یک روش تحلیلی مناسب ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای می باشد[۱۰].

پژوهشگران گزارش کردند که شهر اهواز به دلیل قرارگیری صنایع بالادستی و پایین دستی نفت، گاز و پتروشیمی شدیداً تحت تاثیر این فرایندها به لحاظ نوع و ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای می باشد[۱۱] که پتانسیل بالای خطر سرطان‌زایی در کودکان و بزرگسالان را نسبت به این نوع آلاینده در منطقه صنعتی کلانشهر اهواز نشان می دهد[۱۲]. همچنین در تحقیق دیگری گزارش شده است که در این شهر بزرگ صنعتی، منشا دقیق و مشخصی در کاربری‌های صنعتی، مسکونی، پارک‌ها و پرترافیک برای هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای وجود نداشت[۱۳].

صنعت فولادسازی یکی از صنایع آلاینده محیط‌زیست می‌باشد که به دلیل عوامل متعدد منجربه آلودگی آب، خاک و هوا می‌شود. مطالعات و تحقیقات متعددی در ارتباط با آلودگی فلزات سنگین در خاک و گیاهان اطراف شرکت فولاد خوزستان ارائه شده است، اما از برگ درختان و گیاهان به عنوان یک شاخص زیستی برای پایش ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، استفاده نشده است، بنابراین با توجه به اهمیت موضوع این نوع آلاینده‌ها، تحقیق حاضر با هدف اندازه‌گیری و تعیین غلظت ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در برگ درخت اوکالیپتوس در ناحیه صنعتی کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز انجام شد.

روش کار

محدود مورد مطالعه

کارخانه فولاد خوزستان دومین قطب مهم تولید فولاد خام و میانی و بزرگترین عرضه کننده شمش فولاد در کشور می‌باشد که در شهر اهواز، مرکز استان خوزستان در جنوب غربی کشور واقع شده است. کارخانه فولاد خوزستان در موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۷ دقیقه طول جغرافیایی و ۴۸ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۴ دقیقه عرض جغرافیایی قرار دارد. در این تحقیق منطقه نمونه‌برداری برگ درختان اوکالیپتوس اطراف کارخانه فولاد خوزستان در محدوده مختصات جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه و ۳۳ ثانیه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه و ۲۱ ثانیه طول شرقی در شهر اهواز بود (شکل ۱).

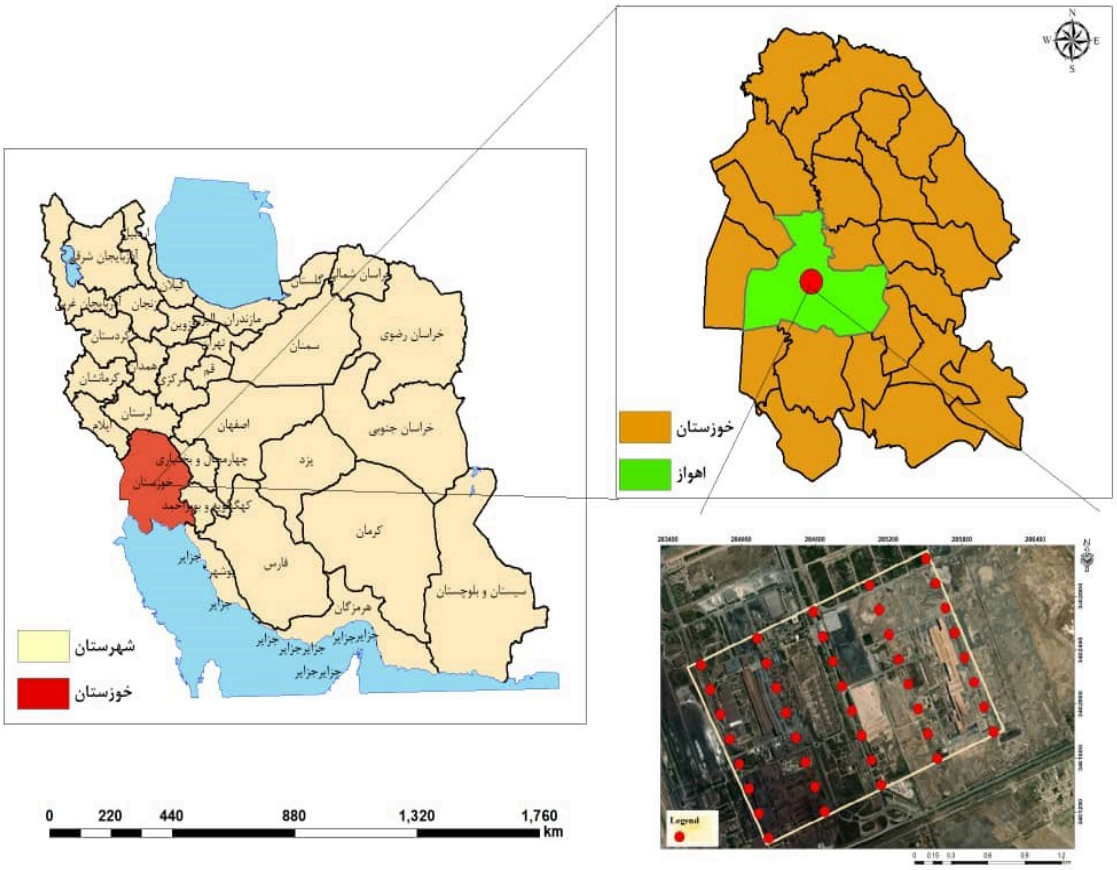
نمونه برداری برگ درختان

برگ درختان اوکالیپتوس در فصل تابستان سال ۱۴۰۱، از ۵۰ نقطه در محدوده کارخانه فولاد خوزستان جمع آوری شدند. برای جمع آوری نمونه‌ها، برگ های با طول یکسان و بدون هیچ نشانه‌ای از کلروز یا نکروز، به طور تصادفی با دست از شاخه‌های درختان به وسیله دستکش‌های وینیل بدون پودر جدا شدند و درون پاکت های کاغذی به آزمایشگاه منتقل شدند[۱۴].

1.Lavendula angustifolia
2.Petroselinum crispum
3.Mentha spp

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محل نمونه برداری برگ درخت اوکالیپتوس اطراف کارخانه فولاد خوزستان شهر اهواز

آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق قبل از استخراج، نمونه‌ها در دسیکاتور یخ‌زدایی شدند. سپس ۲ گرم برگ بدون تماس دست و به‌وسیله دستکش‌های وینیل بدون پودر با دقت برای به حداقل رساندن تماس با سطح برگ در شش بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری وزن شدند. برای جلوگیری از آلودگی متقاطع از دستکش‌های وینیل بدون پودر استفاده شد (یک جفت دستکش جدید بین هر وزن‌کشی). برای ارزیابی عملکرد روش درصد بازیابی ۰/۳ میلی‌لیتر از مخلوط استاندارد تایید شده ۱۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر از ۱۶ ترکیب آروماتیک در استونیتریل (سیگماآلدریچ، خریداری شده از سوپلکو، اکوادور) به سه تا از شش بشر حاوی برگ درختان اضافه شد (غلظت نهایی ۱/۵ میکروگرم بر گرم). این امر امکان تعیین بازیابی‌ها با روش سنبله ماتریسی را در سه تکرار فراهم می‌کند، که روشی پرکاربرد برای ارزیابی عملکرد یک روش در غیاب ماده مرجع است[۱۴].

استخراج نمونه‌ها

برای فرآیند استخراج جهت بازیابی نمونه های هدف، از حمام اولتراسونیک استفاده شد. مقدار ۲۰ میلی‌لیتر از مخلوط دی‌کلرومتان/هگزان (۱:۱ حجمی/حجمی) به هر یک از بشرها که در مرحله قبل تهیه شده بود، اضافه شد. بالای بشرها با فویل آلومینیومی پوشانده شده و به مدت ۱۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک ۴۲۰ وات غوطه‌ور شدند. این فرآیند دو بار دیگر با استفاده از مخلوط حلال تازه تکرار شد، در مجموع ۳۰ دقیقه استخراج و ۶۰ میلی‌لیتر مخلوط دی‌کلرومتان/هگزان برای هر نمونه. سه عصاره از هر نمونه در یک بالن ته گرد (۱۰۰ میلی‌لیتر) ترکیب شده و در دستگاه تبخیر چرخشی در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و با فشار بین

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

۵۵۰ میلی‌بار و ۱۷۰ میلی‌بار، تا حجم تقریبی ۱ میلی‌لیتر تبخیر و سپس بیشتر تمیز شدند[۱۵،۱۶].

سنجش ترکیبات آروماتیک

برای پاکسازی از کارتریج‌های آلومینای ۶ سی‌سی، ۱ گرم آب استفاده شد. ابتدا کارتریج‌ها در یک منیفولد خلاء Waters SPE قرار داده شدند و با عبور ۱۰ میلی‌لیتر از مخلوط دی‌کلرومتان/هگزان از بستر با سرعت جریان تقریباً ۱.۴ قطره در ثانیه که با تنظیم خلاء به دست آمد، آماده‌سازی شدند. مخلوط در یک لوله آزمایش جمع‌آوری و دور ریخته شد. سپس، ستون با عصاره پر شد و ۱۰ میلی‌لیتر دیگر از مخلوط دی‌کلرومتان/هگزان اضافه شد تا امکان شستشوی نمونه ها با همان سرعت جریان ۱/۴ قطره در ثانیه فراهم شود که در یک لوله آزمایش تمیز جمع‌آوری شدند. در نهایت، ۵ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان اضافه شد. عصاره شسته شده به یک بالن ته گرد (۱۰۰ میلی‌لیتر) منتقل شد تا دوباره تحت همان شرایط ذکر شده در بالا به حجم تقریباً ۱ میلی‌لیتر تبخیر شد. پس از آن، عصاره به ۲ میلی‌لیتر اپندورف منتقل و با استفاده از یک تغلیظ‌کننده سانتریفیوژ Genevac miVac در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه تا خشک شدن تغلیظ گردید. در نهایت، نمونه‌ها در ۱ میلی‌لیتر استونیتریل رقیق، تکان داده شدند، با استفاده از یک فیلتر ۰/۲۲ میکرومتر متصل به یک سرنگ ۳ میلی‌لیتری فیلتر شدند و به ویال شیشه‌ای کهربایی ۲ میلی‌لیتری منتقل شدند. این فیلتراسیون نهایی قبل از آنالیز شیمیایی انجام شد تا از انسداد ستون به دلیل وجود هرگونه ذره جلوگیری شود[۱۰]. برای سنجش ترکیبات آروماتیک چندحلقه ای از روش GC/MS[1] استفاده شد. دستگاه مورد نظر یک کروماتوگراف فوق‌گاز به نام Thermo Fisher Scientific ساخت کشور آمریکا مجهز به یک انژکتور شکاف‌دار بود. ستون مویرگی یک سیلیس ذوب شده مدل SPB-5 fused silica با ویژگی ۳۰ متر، ۰/۲۵ میکرومتر، ضخامت فیلم ۰/۲۵ میکرومتر با هلیوم (خلوص ۹۹/۹۹ درصد، Sol spa ساخت ایتالیا) به عنوان گاز حامل (سرعت جریان ۱ میلی لیتر در دقیقه) بود. دمای خط انتقال ۳۰۰ درجه سانتیگراد بود، در حالی که انژکتور (حالت بدون تقسیم) در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد نگه داشته شد. برنامه دمای فر ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ دقیقه نگه داشته شد. طیف‌سنج جرمی در حالت یون مثبت ضربه الکترونی با دمای منبع یونی روی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. انرژی الکترون ۷۰ eV و جریان رشته ۱۵۰ میکروآمپر بود[۱۷].

اعتبارسنجی روش سنجش

منحنی‌های کالیبراسیون استاندارد با استفاده از استاندارد تأیید شده در یازده سطح مختلف در محدوده غلظت ۲/۵ تا ۲۵۰۰ میکروگرم در لیتر به دست آمدند. خطی بودن هر ترکیب آروماتیک چندحلقه‌ای به عنوان ضرایب تعیین با استفاده از تحلیل رگرسیون ارزیابی شد. حد تشخیص (LOD)[2] و حد کمی‌سازی (LOQ)[3] دستگاه به ترتیب طبق رابطه های ۱ و ۲ محاسبه شدند[18] که در آن IC شیب منحنی کالیبراسیون و σ انحراف معیار تقاطع منحنی کالیبراسیون با محور y است. تکرارپذیری دستگاهی (دقت) به صورت درصد انحراف معیار نسبی (RSD٪) از سه تزریق متوالی محلول استاندارد در غلظت ۱۰۰ میکروگرم در لیتر مورد مطالعه قرار گرفت، در حالی که تکرارپذیری روش به صورت RSD٪ از غلظت‌های تعیین‌شده در نمونه‌های تکراری بیان شد[۱۰].

رابطه ۱:

$$LOD = \frac{3.3\sigma}{IC}$$

رابطه ۲:

$$LOQ = \frac{10\sigma}{IC}$$

شاخص تجمع زیستی

شاخص تجمع زیستی از نسبت آلاینده در برگ گیاه به نسبت ترکیبات آروماتیک چندحلقه ای موجود در خاک اطراف گیاه (رابطه ۱) محاسبه شد. اگر مقدار این شاخص کمتر از ۰/۱

1.Gas chromatography-mass spectrometry
2.limit of detection
3.limit of quantification

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

باشد غیرانباشتگر، اگر مقدار این شاخص بین ۰/۱ و ۱ باشد متوسط انباشتگر و اگر مقدار این شاخص بیشتر از ۱ باشد نشان دهنده بیش انباشتگر است. در رابطه ۱ غلظت آلاینده در گیاه C_P و غلظت آلاینده در خاک C_S می‌باشند[۱۹].

رابطه ۳:

$$BAF = \frac{C_P\ (mg\ kg^{-1})}{C_S\ (mg\ kg^{-1})}$$

تحلیل آماری

برای انجام تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزارهای آماری SPSS نسخه ۲۵، استفاده گردید. مقایسه آماری ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای به کمک روش تحلیل واریانس یکطرفه (ANOVA) انجام شد. محاسبه شاخص انباشت زیستی ترکیبات مورد مطالعه و رسم جدول های بخش نتایج به کمک نرم افزار اکسل نسخه ۲۰۰۷ صورت پذیرفت.

یافته‌ها

بر اساس تجزیه و تحلیل آماری و توصیفی داده ها، میانگین، انحراف معیار، واریانس، چولگی و کشیدگی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک خاک‌های اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز در جدول ۱ ارائه شده است. میانگین غلظت هیدروکربن BbF ۴۶۰۸/۷۴ نانوگرم بر گرم به دست آمد که بالاتر از سایر ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک بود ($P<0/05$). مقادیر چولگی و کشیدگی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک نشان داد که غلظت این ترکیبات در بازه ۲- و ۲ به دست آمد که نرمال بودند.

جدول ۱. پارامترهای توصیفی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک (نانوگرم بر گرم) خاک‌های اطراف کارخانه فولاد خوزستان شهر اهواز

نوع ترکیبات	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	کشیدگی
Nap	۸۷۴/۶۶	۵۰۵/۴۹	۲۵۵۵۲۲/۱۰۰	۰/۸۲۰	-۲/۰۹۲
Acy	۸۳۳/۷۱	۲۷۳/۳۹	۷۴۷۴۵/۱۹۹	۰/۸۷۲	-۱/۸۱۸
Ace	۸۷۹/۸۷	۴۹۷/۰۳	۲۴۷۰۳۹/۰۰۱	۱/۸۲۷	۱/۷۵۱
Flu	۱۴۱۶/۳۰	۷۳۶/۶۳	۵۴۲۶۳۷/۴۵۳	۱/۱۹۷	۱/۳۷۸
Phe	۱۰۶۳/۰۳	۵۰۹/۹۶۶۵۳	۲۶۰۰۶۵/۸۶۰	-۰/۶۶۶	-۲/۶۸۸
Ant	۳۰۲۳/۰۷	۲۲۵۶/۳۳	۵۰۹۱۰۵۴/۳۰۵	-۰/۳۲۱	-۲/۷۸۱
Fla	۶۱۵/۴۵	۷۶۶/۰۴	۵۸۶۸۲۳/۱۰۹	۱/۵۳۳	۱/۸۷۷
BaA	۲۸۲۵/۹۱	۹۴۱/۳۸	۸۸۶۲۰۹/۷۷۷	۱/۷۳۷	۱/۱۹۱
Chr	۶۷۳/۷۵	۱۵/۶۱	۲۴۳/۹۰۲	-۱/۰۲۳	۱/۳۶۸
BbF	۴۶۰۸/۷۴	۹۴۳/۶۸	۸۹۰۵۴۱/۷۲۲	۱/۶۶۷	۱/۵۵۰
BkF	۲۸۶۶/۴۱	۳۸۱/۸۲	۱۴۵۷۹۲/۵۰۶	-۰/۶۵۹	۱/۱۳۴
BaP	۱۲۰۱/۶۵	۴۰۷/۹۴	۱۶۶۴۲۱/۴۲۴	۰/۵۰۰	-۱/۱۳۹
Ind	۵۴۷/۷۵	۱۰۵/۳۶	۱۱۱۰۰/۷۵۶	-۰/۴۹۰	۱/۱۱۹
DahA	۹۱۳/۳۶	۴۳۲/۷۲	۱۸۷۲۵۱/۷۵۹	۱/۱۱۵	۱/۵۴۸
BghiP	۸۲۴/۳۰	۲۲۵/۴۶	۵۰۸۳۳/۸۸۸	۰/۴۶۶	-۱/۱۱۹

تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای توصیفی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس اطراف شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز شامل کمینه، بیشینه، میانگین، انحراف معیار، خطای استاندارد، واریانس، چولگی و کشیدگی در جدول ۲ ارائه شده است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

جدول ۲. تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای توصیفی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (نانوگرم بر گرم) برگ درختان اوکالیپتوس اطراف شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز

نوع ترکیبات	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندارد	واریانس	چولگی	کشیدگی
Nap	۳۱/۷۱	۵۹/۰۱	۴۳/۳۱	۱۲/۰۱	۵/۳۶	۱۴۴/۱۴	۰/۵۳۹	-۲/۲۷۷
Acy	۹	۷۶/۷۰	۳۱/۴۰	۲۸/۳۷	۱۲/۶۸	۸۰۴/۹۲	۱/۲۸۳	۱/۱۱۹
Ace	۴۳/۶۳	۵۱/۸۵	۴۷/۹۰	۳/۰۳	۱/۳۵	۹/۱۹	-۰/۲۱۳	۰/۶۰۷
Flu	۹	۱۹/۸۱	۱۲/۶۹	۴/۴۱	۱/۹۷	۱۹/۵۱	۱/۲۵۲	۱/۶۲۹
Phe	۲۵/۴۶	۶۴/۶۷	۴۳/۱۸	۱۴/۹۶	۶/۶۹	۲۲۴/۰۵	۰/۵۳۹	-۰/۱۰۹
Ant	۳۹/۵۴	۷۱/۱۵	۵۵/۴۲	۱۲/۶۸	۵/۶۷	۱۶۰/۸۲	۰/۰۲۰	-۱/۴۶۷
Fla	۱۴/۵۳	۲۰/۸۱	۱۷/۸۶	۷/۸۷	۵/۷۸	۴۲/۳۵	۱/۶۵۲	-۰/۲۷۵
BaA	<۱۰	<۱۰	<۱۰	–	–	–	–	–
Chr	<۱۰	<۱۰	<۱۰	–	–	–	–	–
BbF	<۱۰	<۱۰	<۱۰	–	–	–	–	–
BkF	<۱۰	<۱۰	<۱۰	–	–	–	–	–
BaP	۹	۱۸/۰۹	۱۲/۷۷	۳/۸۵	۱/۷۲	۱۴/۸۵	۰/۷۰۹	-۱/۷۴۵
Ind	۹	۱۶/۹۷	۱۲/۵۳	۳/۴۹	۱/۵۶	۱۲/۲۳	۰/۰۷۰	-۲/۰۳۸
DahA	<۱۰	<۱۰	<۱۰	–	–	–	–	–
BghiP	<۱۰	<۱۰	<۱۰	–	–	–	–	–

مقادیر چولگی و کشیدگی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک در برگ درختان اکالیپتوس در بازه ۲- و ۲ قرار داشتند که نشان دهنده نرمال بودن داده ها بود. تحلیل واریانس ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس نیز نشان داد که غلظت آن‌ها در برگ درختان ایستگاه های مورد مطالعه دارای اختلاف معنی داری بودند ($P<۰/۰۵$)، فقط Fla اختلاف معنی داری نداشت ($P>۰/۰۵$) (جدول ۳).

جدول ۳. تجزیه و تحلیل توصیفی غلظت ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس اطراف شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز

نوع ترکیبات	آماره F	درجه آزادی	Sig
Nap	۳/۸۶۹	۴۹	۰/۰۱۸
Acy	۶/۸۱۹	۴۹	۰/۰۰۲
Ace	۳/۹۵۸	۴۹	۰/۰۱۷
Flu	۴/۲۹۹	۴۹	۰/۰۱۳
Phe	۴/۶۶۱	۴۹	۰/۰۱۰
Ant	۲/۹۹۶	۴۹	۰/۰۴۰
Fla	۱/۷۹۶	۴۹	۰/۱۴۷
BaA	۶/۷۱۲	۴۹	۰/۰۰۳
Chr	۹۶/۴۶۷	۴۹	۰/۰۰

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

BbF	۱۰/۹۲۰	۴۹	۰/۰۰
BkF	۱۶/۷۸۶	۴۹	۰/۰۰
BaP	۶/۵۸۷	۴۹	۰/۰۰۳
Ind	۱۱/۶۲۵	۴۹	۰/۰۰
DahA	۴/۷۲۰	۴۹	۰/۰۰۹
BghiP	۸/۱۷۵	۴۹	۰/۰۰۱

بالاترین شاخص تجمع زیستی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس اطراف شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز مربوط Ace و Nap به ترتیب ۰/۰۵۴ و ۰/۰۴۹ به دست آمد. شاخص تجمع زیستی ترکیبات BaA، Chr، BbF، BkF، DahA و BghiP مشخص نبود، زیرا غلظت این ترکیبات در حد غیرقابل سنجش بود (جدول ۴).

جدول ۴. شاخص تجمع زیستی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس اطراف شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز

نوع ترکیبات	خاک	برگ درخت	شاخص تجمع زیستی
Nap	۸۷۴/۶۶	۴۳/۳۱	۰/۰۴۹
Acy	۸۳۳/۷۱	۳۱/۴۰	۰/۰۳۷
Ace	۸۷۹/۸۷	۴۷/۹۰	۰/۰۵۴
Flu	۱۴۱۶/۳۰	۱۲/۶۹	۰/۰۰۸
Phe	۱۰۶۳/۰۳	۴۳/۱۸	۰/۰۴۰
Ant	۳۰۲۳/۰۷	۵۵/۴۲	۰/۰۱۸
Fla	۶۱۵/۴۵	۱۷/۸۶	۰/۰۲۹
BaA	۲۸۲۵/۹۱	<۱۰	–
Chr	۶۷۳/۷۵	<۱۰	–
BbF	۴۶۰۸/۷۴	<۱۰	–
BkF	۲۸۶۶/۴۱	<۱۰	–
BaP	۱۲۰۱/۶۵	۱۲/۷۷	۰/۰۱۰
Ind	۵۴۷/۷۵	۱۲/۵۳	۰/۰۲۲
DahA	۹۱۳/۳۶	<۱۰	–
BghiP	۸۲۴/۳۰	<۱۰	–

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

بحث

در این تحقیق شاخص تجمع زیستی ترکیبات هیدروکربن-های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس پایین-تر از ۱ به دست آمد. برگ‌های درختان و درختچه‌ها می‌توانند آلاینده‌های جوی مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را جذب کنند و ظرفیت جذب آن‌ها به ویژگی‌های برگ بستگی دارد[۲۰]. گیاهان ترکیبات شیمیایی مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را تجمع می‌دهند، بنابراین به عنوان شاخص‌های زیستی برای شناسایی تغییرات محیطی استفاده می‌شوند[۴]. غلظت هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در دو گونه *Eucalyptus camaldulensis* و *phragmites australis* در مناطق اطراف پل دیاله بغداد کشور عراق به ترتیب ۳/۹۳ و ۲/۱۶ نانوگرم بر گرم گزارش شده است[۲۱]. پژوهشگران در تحقیقات دیگر توانایی سه گونه *Eucalyptus rostrata*، *Pinus radiata* و *Populus hybridus* در مجاورت کارخانه آلومینیوم در کشور آرژانتین[۲۲] و گونه *Sambucus nigra* در محیط شهری کیتو در کشور اکوادور[۱۰] برای جذب ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را گزارش کردند. میانگین غلظت هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ‌های گیاه اکالیپتوس در پالایشگاه نفت کرکوک عراق ۳۷/۱ و ۱۶۵/۲ میکروگرم بر کیلوگرم گزارش شد که نشان دهنده آلودگی مشتقات نفتی بوده است[۲۳]. مطالعات متعددی تفاوت در میزان جذب و انباشت هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را در برگ درختان به دلیل مورفولوژی عمومی برگ، تبادل گاز برگ، فراساختار سطح برگ؛ ویژگی‌های فیزیکی کوتیکول و ترکیب شیمیایی کوتیکول اعلام کردند[۲۴]. با توجه به اینکه شاخص زیستی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس پایین‌تر از ۱ بوده، چنین به نظر می‌رسد که برگ این درختان این آلاینده‌ها را از خاک جذب نکرده و این مقادیر کم ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای را از آلودگی هوا انباشت کردند. با توجه به اینکه شاخص تجمع زیستی پایین تر از ۱ بوده این گونه گیاهی قابلیت استفاده در فرایند استخراج و گیاه‌پالایی فلزات سنگین محیط و خاک را ندارد. درختان می‌توانند هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای را از جو حذف کنند[۴،۲۰]، زیرا عمدتاً برگ‌ها ظرفیت گیاهان برای جذب ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای را دارند[۲۵]. ویژگی‌های اکولوژیکی برگ تا حد زیادی توسط شرایط و منابع موجود در محیط آن‌ها تعیین می‌شوند و پاسخ‌های تطبیقی نشان می‌دهند[۲۶]. گزارشات متعددی درخصوص انباشت آلاینده ها در برگ گونه‌های مختلف درخت اوکالیپتوس گزارش شده است[۴،۲۱،۲۷،۲۸]، زیرا گونه‌های درختی اوکالیپتوس دارای برگ همیشه سبز و رشد سریع می باشد[۲۹]. از طرف دیگر ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای جوی و فاز گازی به عنوان آئروسل از طریق فرآیندهای رسوب خشک یا مرطوب در آب، خاک و گیاهان در فاز ذرات ته‌نشین می‌شوند[۳۰].

غلظت ترکیبات Nap، Acy، Ace، Flu، Phe، Ant و Fla در برگ درخت اوکالیپتوس تعیین شد، اما ترکیبات BaA، Chr، BbF، BkF، DahA و BghiP از حد تشخیص کمتر بود و مقادیر آن ها شناسایی نشد. آسنافتیلن، آسنافتن، فلورن، فنانترن و آنتراسن، فلورانتن، پیرن، بنزو، پیرن، بنزو، آنتراسن، بنزو، فلورانتن، بنزو و آنتراسن بنزو ترکیبات مؤثر و مهم هستند[۳۱]. وجود بالای فلورانتن در نمونه‌ها که یک آروماتیک چندحلقه‌ای مربوط به احتراق زغال سنگ و سوزاندن زیست توده است و بنزوآپیرن، که اثر سرطان‌زایی دارد، شناسایی شدند[۱۰]. بنزوآپیرن عمدتاً به انتشار گازهای خروجی بنزین نسبت داده می‌شود که به عنوان عامل انتشار بیشتر بنزوآپیرن نسبت به موتورهای دیزلی شناخته می‌شوند[۳۲]. علاوه بر این، بنزوآپیرن با فعالیت‌های شتاب‌گیری و ترمزگیری وسایل نقلیه مرتبط است، یعنی با وجود دستگاه‌های تغییر سرعت مانند چراغ‌های راهنمایی، میدان‌ها، تقاطع‌ها، پیچ‌ها و سرعت‌گیرها نیز مرتبط می باشد[۳۳]. یکی از آلاینده‌های کارخانه‌های فولادسازی دود ناشی از سوخت های فسیلی

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

می باشد. منابع انتشار انسانی، عوامل اصلی تعیین‌کننده آلودگی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای هستند که به چهار نوع منابع انتشار صنعتی، سیار، خانگی و کشاورزی تقسیم می‌شوند. احتراق ناقص منبع اصلی انتشار ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای از طریق فعالیت‌های صنعتی مختلف مانند سوزاندن زباله، تولید آهن و فولاد، تولید آلومینیوم، تولید سیمان، تولید قیر قطران زغال سنگ، تولید رنگ، صنایع آسفالت، تولید لاستیک، تولید قارچ‌کش و حشره‌کش، اگزوز پالایشگاه‌ها و تولید برق است. سایر منابع انتشار صنعتی عبارتند از گازسازی زغال سنگ، کوره قوس الکتریکی، کوره اکسیژن، موتور دیزل و موتورهای بنزینی ماشین‌آلات بزرگ. منابع انتشار سیار شامل اگزوز بسیاری از وسایل نقلیه مانند هواپیما، کشتی، قطار و وسایل نقلیه سنگین و سبک خارج از جاده است. منابع انتشار خانگی شامل فعالیت‌های خانگی مانند سوزاندن زباله، کک‌سازی زغال سنگ، سوزاندن چوب، پخت و پز روی مشعل‌های نفتی و گازی و اجاق‌های نفت سفید و چوبی و سایر وسایل گرمایشی مسکونی است[۲، ۱۲، ۳۴].

پژوهشگران در مطالعات و تحقیقات خود گزارش کردند که ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای در برگ درختان نیز همانند خاک و آب تجمع می‌یابند و برگ درختان توانایی انباشت زیستی این نوع آلاینده‌های نفتی را دارند[۳۵، ۳۶، ۳۷]. در تحقیقی بر روی برگ درختان نخل بادبزنی، شاهپسند، ختمی چینی، شیشه شور، برهان، درخت توت، ناترک، کنوکارپوس، زیتون، انجیرمعابد، کهور، خرزهره، کنار، گل کاغذی، اکالیپتوس و سپستان در شهر اهواز دامنه غلظت ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای بین ۳/۳ تا ۱۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم گزارش شد و همچنین بیشترین و کمترین مقدار تجمعی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای سرطان زا موجود بر روی برگ گونه های گیاهی مختلف، به ترتیب ۵۳۰ و ۵/۱۳۲ میکروگرم بر کیلوگرم تعیین گردید[۱۳]. در مطالعه دیگری سطح کل ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای از ۱۱۹/۶۵ تا ۱۹۶۹/۹۸ نانوگرم بر گرم گزارش شده است که نفتالین (Naph)، فلورانتن (Flt)، پیرن (Pyr)، کریزن (Chry) و بنزوآپیرن (BaP) در همه نمونه‌ها غالب بودند. نتایج نشان می‌دهد که برگ گونه‌های درختی مورد مطالعه، بر اساس وزن مولکولی خود، توانایی‌های خاصی برای تجمع زیستی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای دارند. برگ‌های درخت *Sambucus nigra* بیشترین توانایی را در تجمع ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای که عمدتاً آن‌هایی که وزن مولکولی بالا و متوسط داشتند، نشان داد[۸]. برگ‌های درختان نارنج در شهر سویل در جنوب اسپانیا نیز تجمع زیستی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای را نشان دادند. بالاترین غلظت میانگین مربوط به BaA، Phen، Pyr و Flt بود. غلظت‌ها در خیابان‌های با ترافیک بالا مشابه خیابان‌های با ترافیک کم بود. غلظت‌های پایین‌تر در برگ‌های پارک‌ها یافت شد و بر اساس نتایج گزارش شده، به نظر می‌رسد برگ‌های درختان نارنج، یک نمونه‌بردار غیرفعال ارزان و امیدوارکننده و مناسب برای نمونه‌برداری گسترده در زمان و مکان هستند که می‌توانند برای ارزیابی ریسک جمعیت شهری در برابر آلودگی هوای ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای به کار روند[۱۶]. در مطالعه دیگری هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در برگ درختان *Eucalyptus rostrata* و *Pinus radiata* نمونه‌برداری شده در مجاورت یک مرکز بزرگ تولید آلومینیوم در پاتاگونیا کشور آرژانتین نشان‌دهنده شیب آلودگی شدید ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای در منطقه مورد مطالعه مرتبط با صنعت آلومینیوم گزارش شده است[۲۲]. همچنین پژوهشگران بیان کردند که مقایسه محتوی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای هفت گونه درخت پهن‌برگ و چهار گونه درخت مخروطی در یک باغ گیاه‌شناسی در جنوب غربی سوئد نشان داده که برگ‌های سوزنی درختان مخروطی، تجمع‌دهنده‌های قوی‌تری نسبت به برگ‌های درختان پهن‌برگ بودند. در حقیقت گونه‌های همیشه سبز، مانند اکثر مخروطیان و گونه های اوکالیپتوس، در اصل ممکن است به تجمع ترکیبات آلی نیمه‌فرار در طول چندین سال ادامه دهند[۳۸]. آلاینده‌ها ممکن است از طریق تقسیم

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

تعادل گازی بین پوشش گیاهی و هوای اطراف و از طریق رسوب ذرات خشک یا مرطوب روی برگ‌ها (مسیر اولیه) به بافت گیاه نفوذ کنند[39]. با این حال، به طور کلی برگ مسیر اصلی جذب گیاه از هوا است. لایه لیپیدی که سطح برگ‌ها را می‌پوشاند، امکان تجمع ترکیبات آبگریز را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، روزنه‌های موجود در برگ‌ها و همچنین در شاخه‌ها و ساقه‌ها، مسئول انتشار مولکول‌های گازی هستند[40]. بنابراین استفاده از برگ درختان به عنوان نمونه‌گیر زیستی می‌تواند مزایای متعددی نسبت به نمونه‌گیرهای فعال و غیرفعال داشته باشد. به عنوان مثال، درختانی که به طور گسترده در مناطق شهری پراکنده شده‌اند، نه تنها می‌توانند اطلاعاتی در مورد رویدادهای آلودگی غیرمنتظره ارائه دهند، بلکه می‌توانند اطلاعاتی در مورد مناسب‌ترین مکان‌ها برای قرار دادن نمونه‌گیرهای فعال یا غیرفعال نیز ارائه دهند[13,22,41].

نتیجه‌گیری

شاخص تجمع زیستی ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان اوکالیپتوس نشان داد که این گونه درختی توانایی قابل قبول و مناسب برای جذب و انتقال این نوع آلاینده ها را از خاک ندارد، بنابراین نمی‌توان گونه اوکالیپتوس را برای ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را جزء گیاهان زیست ردیاب در نظر گرفت. با توجه به نتایج این تحقیق چنین به نظر می‌رسد که جذب ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای توسط برگ‌های درختان تحت تأثیر شرایط محیطی قرار دارد. بنابراین پیشنهاد می شود برای مطالعات تکمیلی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای برگ درختان، شرایط آب و هوایی، سرعت و جهت باد، فصل گرم و سرد سال و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک پای درختان نیز درنظر گرفته شود. همچنین صفات برگ درختان نظیر سطح برگ، ضخامت برگ، نوع برگ و جهت آن و مساحت سطح روزنه برگ در بررسی مورد مطالعه قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله از بخشی از پایان‌نامه‌ی دکتری تخصصی گروه مهندسی خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی (کد پایان‌نامه ۱۰۶۴۸۱۷۵۳۷۰۱۷۰۸۱۴۰۰۱۶۲۴۵۸۴۸۱) مربوط به دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز استخراج شده است.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی

نویسندگان مقاله اعلام می‌نمایند که این تحقیق پشتیبان مالی نداشته است.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان مقررات مربوط اخلاق پژوهش شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

طراحی روش تحقیق: خوشناز پاینده، فاطمه جعفریان، احد نظرپور، علی غلامی، کامران محسنی‌فر

مراحل میدانی و آزمایشگاهی: فاطمه جعفریان

نگارش مقاله: خوشناز پاینده، فاطمه جعفریان

تجزیه و تحلیل داده ها: خوشناز پاینده، فاطمه جعفریان، احد نظرپور، علی غلامی، کامران محسنی‌فر

ویرایش نهایی مقاله: خوشناز پاینده، فاطمه جعفریان

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

References

1. Lim KJ, Lee YH, Shin HS. Evaluation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Content and Risk Assessment of Tea Products in South Korea. Foods. 2025; 14(9):1530.
2. Mohamadi B, Akbari-Adergani B, Mazaheri Y, Akbari N, Basaran B, Sadighara P. A systematic study of the assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in green houses and farms."A review". International Journal of Vegetable Science. 2025;31(1):135-49.
3. Ahmadi S, Talebi-Ghane E, Naderifar H. Evaluation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in various teas: A meta-analysis study, systematic review, and health risk assessment. Journal of Food Composition and Analysis. 2024; 133:106402.
4. Ali WS, Salman SA, Ali A, Mohammed S. Detection and Determination of Poly Aromatic Hydrocarbons in Vegetable and Tree Leaves, Baghdad City, Iraq. International journal of health sciences. 2022; 6(S6):956-976.
5. Franklin IR, Nlemolisa OR, Baridakara SC, Nnadozie CF. Accumulation of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in soils around the industrial area of Aba, Nigeria. EQA-International Journal of Environmental Quality. 2023; 55:1-1.
6. Yang M, Liu Q, Tian S, Yang Z, Yang Y, Shao P, Liu Y. Occurrences of Deposited Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Wax of Plant Leaves Using Laser Scanning Microscopy and Gas Chromatography–Mass Spectrometry. Atmosphere. 2024;15(10):1165.
7. Said TO, Awwad NS, El Amri FA, Idris AM, Alalmie AY. Quantification and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from functional areas of Khamis-Mushait, Saudi Arabia. Blue Economy. 2023;1(1):4.
8. Alexandrino K, Sánchez NE, Viteri F. Levels and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) near hospitals and schools using leaves and barks of Sambucus nigra and Acacia melanoxylon. Environmental Geochemistry and Health. 2024;46(2):32.
9. Wozniak M, Hoppe K, Drzewiecka K. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbon content in garden herbal plants using liquid chromatographic analysis (HPLC-FL). Plants. 2023; 12(3): 551.
10. Viteri F, Sanchez NE, Alexandrino K. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in leaf and bark samples of Sambucus nigra using high-performance liquid chromatography (HPLC). Methods and Protocols. 2023; 6(1):17.
11. Zarasvandi A, Rastmanesh F, Banitamim F, Mokhtari B, Saed M. Investigation Evaluation and Determination of Possible Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Street Dust of Ahvaz City Medical Chemistry Concerning. J. Ilam Uni. Med. Sci. 2017; 25 (1): 121-137. [In Persian].
12. Ghorbani M, Ghanavati N, Babaenejad T, Nazarpour A, Payande K. Investigating the status, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soils of Ahvaz oil field. Journal of Natural Environment. 2021; 73(4): 759-773. [In Persian].
13. Khalili Moghadam B, Siadat A, Yusefi A. Investigation of the Amount and Possible Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Dust Deposited on the Leaves of Trees in Ahvaz. Journal of water and soil science. 2021; 25 (1): 295-308. [In Persian].
14. Dugay A, Herrenknecht C, Czok M, Guyon F, Pages N. New procedure for selective extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants for gas chromatographic–mass spectrometric analysis. Journal of Chromatography A. 2002;958(1-2):1-7.
15. Yang M, Tian S, Liu Q, Yang Z, Yang Y, Shao P, Liu Y. Determination of 31 polycyclic aromatic hydrocarbons in plant leaves using internal standard method with ultrasonic extraction–gas chromatography–mass spectrometry. Toxics. 2022; 10(11):634.
16. Fasani D, Fermo P, Barroso PJ, Martín J, Santos JL, Aparicio I, Alonso E. Analytical method for biomonitoring of PAH using leaves of bitter orange trees (Citrus aurantium): a case study in South Spain. Water, Air, & Soil Pollution. 2016; 227(10):360.
17. Aresta AM, Zambonin C. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coffee samples by DI-SPME-GC/MS. Food Analytical Methods. 2023; 16(6):1009-16.
18. Lee YN, Lee S, Kim JS, Patra JK, Shin HS. Chemical analysis techniques and investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons in fruit, vegetables and meats and their products. Food chemistry. 2019;277:156-61.
19. Zacchini M, Pietrini F, Scarascia Mugnozza G, Iori V, Pietrosanti L, Massacci A. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. Water, air, and soil pollution. 2009;197(1):23-34.
20. Giraldez P, Vázquez-Arias A, De Nicola F, Fernandez JA, Aboal JR. Leaf ecological traits (morphology and gas exchange) and polycyclic aromatic hydrocarbons concentrations in shrubs and trees: A meta-analysis approach. Environmental Pollution. 2025;364:125337.
21. Aswad OA. Evaluation some Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Eucalyptus Camaldulensis and Phragmites Australis Plants Around the Diyala-Baghdad Bridge. Al-Mustansiriyah Journal of Science. 2022;33(2):14-8.
22. Rodriguez JH, Wannaz ED, Salazar MJ, Pignata ML, Fangmeier A, Franzaring J. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the tree foliage of Eucalyptus rostrata, Pinus radiata and Populus hybridus in the vicinity of a large aluminum smelter in Argentina. Atmospheric Environment. 2012;55:35-42.
23. Al-Dabbas MA, Ali LA, Afaj AH. Determination of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in soil and in the leaves of plant (Eucalyptus) of selected locations at Kirkuk—Iraq. Arabian Journal of Geosciences. 2015;8(6):3743-53.
24. Giraldez P, Vazquez-Arias A, De Nicola F, Fernandez JA, Aboal JR. Leaf ecological traits (morphology and gas exchange) and polycyclic aromatic hydrocarbons concentrations in shrubs and trees: A meta-analysis approach. Environmental Pollution. 2025;364:125337.
25. Giráldez P, Aboal JR, Fernández JA, Di Guardo A, Terzaghi E. Plant-air partition coefficients for thirteen urban conifer tree species: Estimating the best gas and particulate matter associated PAH removers. Environmental Pollution. 2022;315:120409.
26. Prigioniero A, Zuzolo D, Niinemets U, Postiglione A, Mercurio M, Izzo F, Trifuoggi M, Toscanesi M, Scarano P, Tartaglia M, Sciarrillo R. Particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon uptake in relation to leaf surface functional traits in Mediterranean evergreens: Potentials for air phytoremediation. Journal of Hazardous Materials. 2022;435:129029.
27. Talkhoncheh AG, Rouzbahani MM. Pb heavy metal monitoring using biological indicators, Prosopis

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]

juliflora, Eucalyptus microtheca and Ziziphus spina-christi in Ahvaz city (Iran). Anthropogenic Pollution. 2024;8(1).
28. Pour Gholam Khabaz A, Mohammadi Rouzbahani M. The study of the traceability of lead heavy metal in the leaves of eucalyptus (Eucalyptus microtheca) and Burhan (Albizia lebbeck) trees in Shush city. Journal of Research in Environmental Health. 2024;9(4):403-16. [In Persian]
29. Fine P, Rathod PH, Beriozkin A, Mingelgrin U. Uptake of cadmium by hydroponically grown, mature Eucalyptus camaldulensis saplings and the effect of organic ligands. International journal of phytoremediation. 2013;15(6):585-601.
30. 30 Abdel-Shafy HI, Mansour MS. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation. Egyptian journal of petroleum. 2016;25(1):107-23.
31. Patel KS, Ramteke S, Naik Y, Sahu BL, Sharma S, Lintelmann J, Georg M. Contamination of environment with polycyclic aromatic hydrocarbons in India. Journal of Environmental Protection. 2015; 6(11):1268-78.
32. Pulster EL, Johnson G, Hollander D, McCluskey J, Harbison R. Levels and sources of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons surrounding an oil refinery in Curaçao. Journal of Environmental Protection. 2019;10(03):431.
33. Alexandrino K, Sánchez NE, Zalakeviciute R, Acuña W, Viteri F. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Araucaria heterophylla needles in urban areas: evaluation of sources and road characteristics. Plants. 2022;11(15):1948.
34. Patel AB, Shaikh S, Jain KR, Desai C, Madamwar D. Polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, toxicity, and remediation approaches. Frontiers in microbiology. 2020;11:562813.
35. Alfani A, Maisto G, Prati M.V, Baldantoni D. Leaves of Quercus ilex L. as biomonitors of PAHs in the air of Naples (Italy). Atmospheric Environment. 2001; 35: 3553–3559.
36. Eck-Varanka B, Hubai K, Kováts N. et al. Biomonitoring polycyclic aromatic hydrocarbon levels in domestic kitchens using commonly grown culinary herbs. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2024; 22: 295–303.
37. Barroso P.J, Martín J, Santos, J.L, Aparicio I, Alonso E. Evaluation of the airborne pollution by emerging contaminants using bitter orange (*Citrus aurantium*) tree leaves as biosamplers. Science of The Total Environment. 2019; 677: 484-492.
38. Pleijel H, Klingberg J, Strandberg B, Sjoman H, Tarvainen L, Wallin G. Differences in accumulation of polycyclic aromatic compounds (PACs) among eleven broadleaved and conifer tree species. Ecological Indicators. 2022; 145: 109681.
39. Garcia-Meléndez L, Santos-Vasquez N, Campos-Campos N.H. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in tissue of mangrove Rhizophora mangle from the Colombian Caribbean. Environment Monitoring Assessment. 2026; 198: 227.
40. Onyena A.P, Manohar C.S, Suneel V, Nkwoji, J.A, Chukwu L.O. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on oxidative responses in mangrove plants from Escravos Estuary and adjoining creeks, Nigeria. Marine Pollution Bulletin. 2026; 223: 118939.
41. Aparna Dhara, Ratna Dutta, Biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) distribution in wetlands: A case study using Alternanthera ficoidea (L.) plant in West Bengal, India. Marine Pollution Bulletin. 2026; 222 (Part 1): 118663.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/jehe.14.1.31]