دو فصلنامه کواترنری ایران (علمی-پژوهشی)، دوره ۹، شمارهٔ ٤ و ۳، پائیز و زمستان ۱٤۰۲
ص٣٦٦ تا ۳۸۲

برآورد سطح آلودگی و ارزیابی ریسک زیست محیطی خاک به ترکیبات آروماتیک چند حلقه ای در محدوده میدان نفتی اهواز با استفاده از شاخص ERL، ERM و TEF

علی کاظمی؛ دانشجوی دکترای مدیریت محیط زیست، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران
حسین پرورش* ؛ استادیار گروه محیط زیست، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران
محسن دهقانی قناتغستانی؛ دانشیار گروه محیط زیست، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران
صابر قاسمی؛ استادیار گروه محیط زیست، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۰/ ۰۷ /۱٤۰۲ **تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۱۲/۲۹**

چکیده:
آلودگی خاک به ترکیبات نفتی در محدوده مناطق نفت‌خیز یک چالش مهم زیست محیطی محسوب می شود. تحقیق حاضر با هدف برآورد سطح آلودگی و ارزیابی ریسک زیست شناختی خاک به ترکیبات آروماتیک چندحلقه ای در محدوده میدان نفتی اهواز با استفاده از شاخص ERL، ERM و TEF در سال ۱٤۰۲ انجام شده است. منطقه مورد مطالعه شامل خاک محدوده ٤ مرکز نفتی و محدوده کنترل در محدوده میدان نفتی اهواز بود. تعداد ۲۰ نمونه خاک برداشت شد. برای اندازه گیری ترکیبات آروماتیک در خاک محدوده تاسیسات نفتی از روش HPLC استفاده شد. بنابر نتایج آروماتیک حلقوی Indene[1,2,3-cd]pyrene (IndPy) با ۱۳.٤۷ کم ترین میانگین PAH و آروماتیک حلقوی Phenanthrene (Phen) با ۷۲۱.٥٤ میکروگرم بر کیلوگرم بیشترین میانگین PAH را در منطقه مورد مطالعه داشتند. نیز آروماتیک حلقوی Fluoranthene (Flu) بیشترین و Acenaphthene (Ace) کم‌ترین میزان ERM و آروماتیک حلقوی Anthracene(Ant) بیشترین و Acenaphthene (Ace)کم‌ترین میزان ERL را در محدوده مورد مطالعه دارا بودند. حضور ترکیبات آروماتیک چندحلقه ای در قسمت های سطحی و عمقی خاک و ته نشینی آن ها در محیط های پذیرنده علاوه بر اینکه باعث بروز اثرات مخرب محیط زیستی و بهداشتی می شود؛ بازسازی و احیای این محیط ها نیازمند صرف زمان، هزینه و انرژی بسیار است.

واژگان کلیدی: آلودگی خاک، ترکیبات نفتی، هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه ای (PAHs)، ERM، ERL، TEF.

*رایانامهٔ نویسندهٔ مسئول: parvaresh163@gmail.com

مقدمه

نگرانی های بسیاری در مورد پیامدهای مربوط به تهدید زندگی بشر؛ همگام با با پیشرفت شتابان صنعت و تکنولوژی رقم خورده است که در صورت عدم چاره اندیشی می تواند نسل حاضر و آینده را با مشکلات فراوان دست به گریبان سازد. آلودگی محیط زیست از جمله خاک از مشکلات امروز جهان در مواجهه با صنعتی شدن است (هو[1] و همکاران، ۲۰۱۹). آلودگی خاک از طریق تماس مستقیم با خاک آلوده، مصرف آب های زیرزمینی، تجمع در رسوبات و آلودگی آبزیان در طول زنجیره غذایی، به انسان منتقل می شود (لی[2] و همکاران، ۲۰۲۳). احداث پالایشگاه ها از جمله فعالیت هایی است که از طریق آلودگی خاک به مواد نفتی باعث ورود فلزات سنگین به خاک می شود. علاوه بر این امکان آلودگی خاک به هیدروکربن های نفتی طی فرایندهای جابجایی و تصفیه نفت وجود دارد. این ترکیبات نیز به عنوان آلاینده های آلی اثرات منفی زیست محیطی دارند و برخی از آن ها پتانسیل سرطان زایی برای انسان و موجودات زنده را دارا هستند(محسن زاده و همکاران، ۱۴۰۱). یکی از جدی ترین نگرانی‌های جهانی وجود پالایشگاه نفت به عنوان یکی از ۱۰ منبع اصلی آزادکننده مواد سمی به محیط زیست است (ورجانی و آپاسانی[3]، ۲۰۱۶). از بین آلودگی‌های هیدروکربن‌های نفتی، ۱۶ هیدروکربن آروماتیک چند حلقه ای PAHs[4] به دلیل پایدار بودن در محیط، به‌عنوان آلوده کنندگان مهم شناخته شده اند (ورجانی و آپاسانی[5]، ۲۰۱۷).

با افزایش تعداد حلقه ها در ساختار مولکولی حلالیت آبی آن ها کاهش می‌یابد. ضریب تفکیک بالای این ترکیبات می‌تواند باعث جذب شدید این ترکیبات به سطح ذرات خاک شده و در محیط خاک ته نشین شوند(شین[6] و همکاران، ۲۰۰۶). دو گروه از بزرگترین معضلات زیست محیطی مناطق نفتی در کشور، وجود گِل حفاری و خاک بسیار آلوده و همچنین وجود پساب آلوده پالایشگاه های نفت و گاز می باشد. هیدروکربن‌های نفتی به چهار شاخه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند: الف) ترکیبات سیرشده (یا آلکان ها)، ب) ترکیبات آروماتیک، از قبیل بنزن، تولوئن، اتیل بنزن، زایلن‌ها و هیدروکربن‌های چند حلقه‌ای، ج) رزین‌ها، شامل ترکیباتی هستند که دارای نیتروژن، سولفور و اکسیژن بوده و در نفت حل می‌شوند و د) آسفالت‌ها، مولکول های پیچیده و درشتی که به‌صورت کلوئیدی در نفت خام پراکنده اند (ابدل–شفی و منصور[7]، ۲۰۱۶).

آلودگی خاک به ترکیبات آروماتیک حلقوی (PAHs) یکی از مشکلات زیست محیطی جدی است که به دلیل پایداری بالا و خاصیت سرطان زایی این ترکیبات، اهمیت زیادی دارد(لوودو و همکاران، ۲۰۱۵). این ترکیبات به طور عمده از منابع انسانی مانند سوختن ناقص مواد آلی، فعالیت های صنعتی و احتراق سوخت های فسیلی به محیط زیست وارد می شوند. فعالیت‌های صنعتی مانند صنایع شیمیایی، پتروشیمی و تولید محصولات نفتی، همچنین آتش سوزی ها و پساب های صنعتی نیز از دیگر منابع اصلی تولید PAHs هستند. این ترکیبات به دلیل پایداری شیمیایی و توانایی انتقال به زنجیره غذایی، می‌توانند در محیط باقی بمانند و به ارگان های زنده آسیب برسانند، به طوری که بسیاری از PAHs به عنوان مواد

1- Hu

2- Liu

3- Varjani and Upasani

4- Polycyclic Aromatic Hydrocarbon

5- Varjani and Upasani

6- Shin

7- Abdel-Shafy and Mansour

سرطان زا شناخته شده و می توانند باعث ایجاد تومورهای سرطانی در انسان و حیوانات شوند(دای۸ و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر سرطان زایی، این ترکیبات می‌توانند به سیستم های زیستی مختلف آسیب برسانند، باعث کاهش تنوع زیستی شوند و از طریق نفوذ به خاک، به منابع آب سطحی و زیرزمینی راه پیدا کرده و کیفیت آب را کاهش دهند. برای مقابله با آلودگی خاک به PAHs ، روش های مختلفی مانند تصفیه زیستی با استفاده از میکروارگانیسم ها، استفاده از مواد شیمیایی برای اکسیداسیون و تجزیه PAHs ، روش های فیزیکی مانند استخراج با استفاده از حلال ها و یا شستشوی خاک و پایدارسازی و تثبیت با استفاده از مواد افزودنی به کار گرفته می‌شوند تا قابلیت دسترسی زیستی PAHs کاهش یابد و از انتشار آن ها جلوگیری شود(سویی۹ و همکاران، ۲۰۲۰). برای جلوگیری از آلودگی خاک به PAHs ، اقدامات پیشگیرانه ای مانند بهبود فرآیندهای صنعتی، کاهش مصرف سوخت های فسیلی، مدیریت صحیح پساب ها و ارتقاء آگاهی عمومی در مورد تاثیرات منفی این ترکیبات ضروری است(کو۱۰ و همکاران، ۲۰۲۰). معمولاً پخش نفت اثر منفی روی تنوع زیستی خاک دارد. بیشتر خاک های محتوی باکتری که می‌توانند مقادیر بالای هیدروکربن‌ها را جذب کنند ممکن است توانایی کاهش هیدروکربن‌های آلیفاتیک و آروماتیک را داشته باشند (اجیبا۱۱ و همکاران، ۲۰۱۶). پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که خاک حاوی ۲ تا ۳ درصد نفت خام بالاترین تعداد میکروارگانیسم‌ها را در مقایسه با خاک‌های معمولی دارا می‌باشد. همچنین در یک تحقیق گزارش شده است که ۸ ماه پس از آلودگی خاک به نفت، باکتری‌های تجزیه کننده نفت به میزان ۱۰ برابر رشد کرده‌اند و حدود ۵٪ از جمعیت میکروبی خاک را به خود اختصاص داده‌اند (الکعبی۱۲ و همکاران، ۲۰۲۰). ورود هیدروکربن‌های نفتی به خاک منجر به بروز تغییرات عمده‌ای در خواص فیزیکو شیمیایی و بیولوژیک آن می‌شود. به‌عنوان مثال با ورود پساب معمولاً TDS خاک افزایش یافته که این عامل خود منجر به کاهش باروری و حاصلخیزی خاک می‌شود. بنا به گفته آنیاگور و همکاران آلودگی نفتی بیش از صدسال در خاک باقی می‌ماند. آلودگی خاک به مواد نفتی از جمله معضلات محیط زیستی جهان به شمار می‌رود (آنیاگور۱۳ و همکاران، ۲۰۲۲). تجمع آلاینده های نفتی در محیط‌زیست سبب بروز مشکلات زیادی شده است زیرا خاک آلوده به این ترکیبات برای اهداف کشاورزی، صنعتی یا مراکز تفریحی غیرقابل استفاده است و همچنین منبع بالقوه‌ای برای آلوده ساختن آب‌های سطحی و زیرزمینی به شمار می‌رود(خو۱۴ و همکاران، ۲۰۱۸).

فرایند بهبود و بازیابی خاک آلوده به هیدروکربن های نفتی طولانی و هزینه بر است. با نفوذ مواد نفتی به درون خاک احتمال آلوده شدن آب های زیرزمینی نیز وجود دارد. میزان و گسترش این نفوذ به خاصیت و ویژگی خاک (تخلخل، نفوذپذیری و مقدار رطوبت) و همچنین به ماهیت و کمیت مواد آلاینده بستگی دارد. بعد از اینکه هیدروکربن های نفتی وارد خاک می شوند با آب و هوا برای جایگزینی در حفره ها رقابت می کنند (ایبگبولم۱۵ و همکاران ، ۲۰۱۶). تاکنون

8- Dai
9- Cui
10- Qu
11- Ejiba
12- Al-Kaabi
13- Aniagor
14- Xu
15- Ibegbulem
16- Sari

تحقیقات متعددی پیرامون آلودگی خاک به هیدروکربن های نفتی انجام شده است. از آن جمله می توان به تحقیقات ساری۱۶ و همکاران (۲۰۱۸) که مطالعه‌ای تحت عنوان آلودگی هیدروکربن‌های نفتی در خاک و آب های سطحی توسط میادین نفتی عمومی در منطقه فرعی Wonocolo، اندونزی انجام دادند؛ اشاره کرد. دوازده نمونه خاک مرکب از مکان های آلوده چاه قدیمی (OW)، خط حمل و نقل (T) و منطقه پالایشگاه (R) در اعماق ۰–۳۰ سانتی‌متر، ۳۰–۶۰ سانتی‌متر و ۶۰–۹۰ سانتی متر جمع آوری شد. نمونه کامپوزیت آب سطحی از دو نقطه با فواصل مختلف از سمت رودخانه به دست آمد. نتایج نشان داد که خاک سطحی با ۲۱۱.۰۲۵.۷۳ میکروگرم در لیتر آلوده می‌باشد. این غلظت ها از استاندارد کیفیت خاک TPH فراتر رفته و به عنوان گروه A برای خطر انسانی طبقه بندی می شوند. یافته های این مطالعه نشان داد که خطرات سلامتی قابل توجهی وجود دارد که بطور بالقوه برای انسان در منطقه سمی هستند. هیدروکربن های حلقوی معطر (PAHs) گروهی از ترکیبات آلی پیچیده هستند که به دلیل فعالیت های نفتی و صنعتی به طور گسترده ای در محیط زیست پراکنده می‌شوند. این ترکیبات از تجزیه ناقص مواد آلی در دماهای بالا تولید می شوند و به دلیل ساختار آروماتیک خود، بسیار پایدار و مقاوم در برابر تجزیه شیمیایی و بیولوژیکی هستند. نتایج حاصل از اندازه گیری و منشایابی هیدروکربن های نفتی در سه محیط آب، خاک و رسوب تحقیقات محمودی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که منطقه ی مطالعاتی آلوده به نفت و آلودگی نفتی از نوع پتروژنیک می باشد که بخش بزرگ این آلودگی مربوط به ریزش های نفتی از پالایشگاه تهران و بخش دیگری از آن مربوط به کانال های جمع آوری رواناب های سطح شهری است که آلوده به ترکیب های نفتی پتروژنیک بوده که به جنوب تهران منتهی می شوند. محسن زاده و همکاران (۱۴۰۲) از روش گیاه پالایی وتیور برای حذف و اصلاح خاک آلوده به هیدروکربن های نفتی استفاده کردند. آنان بیان کردند گیاه وتیور توانایی رشد و زنده مانی در انواع شرایط آلودگی نفتی، مانند خاک آلوده پالایشگاه ها را دارا می باشد و پس از یک سال اثر گیاه وتیور میزان آلودگی هیدروکربن های نفتی کل و هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای حدود شش و نه برابر به ترتیب کاهش یافت. البته در مدت زمان بیشتر از یکسال تیمار با ریشه وتیور (منطقه ریزوسفر خاک نزدیک ریشه) می تواند مقدار هیدروکربن های نفتی کل و هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای را بیشتر کاهش دهد. در بررسی منشا آلاینده ها در تحقیق جادری و همکاران (۱۴۰۲) نشان داده شد که در شمال رودخانه کارون آلودگی بیشتر منشاء سوختی داشت ولی در مرکز و جنوب این رودخانه هر دو منشاء سوختی و نفتی مشاهده شد. این نتایج نشان داد که آلودگی های هوایی اثر بیشتری بر افزایش غلظت هیدروکربن ها در رسوبات این رودخانه داشته است. همچنین سوخت قایق های موتوری و شناورهای موجود در بازه ی اهواز تا آبادان نیز می تواند عامل مهمی در افزایش آلودگی هیدروکربنی با منشاء سوختی باشد. بنابراین گرچه آلودگی هیدروکربنی در این رودخانه مشاهده شد، ولی از نظر غلظت در حد بحرانی نبود. بنابراین این تحقیق با هدف برآورد سطح آلودگی و ارزیابی ریسک زیست شناختی خاک به ترکیبات آروماتیک چند حلقه ای در محدوده میدان نفتی اهواز با استفاده از شاخص ERL، ERM و TEF انجام شده است.

مواد و روش ها

پژوهش حاضر توصیفی-کاربردی و در سال ۱۴۰۲ انجام شده است. منطقه مورد مطالعه شامل خاک محدوده ۴ مرکز نفتی (یک بهره برداری نفت، یک واحد نمکزدایی، یک دکل نفتی و یک تلمبه خانه نفت) در جنوب غرب ایران است. نمونه برداری از ۲۰ ایستگاه در محدوده ۴ مرکز نفتی (تعداد ۵ نمونه در محدوده هر مرکز نفتی) با سه تکرار انجام شد. بدین منظور خاک سطحی از ۲۰ ایستگاه در منطقه مورد مطالعه با عمق آب ۵۰ سانتی متر و با استفاده از دستگاه گرب ون وین با سطح مقطع ۰/۱ متر مربع به کمک ابزار وینچ از عمق ۱۰ تا ۱۴ سانتیمتر برداشت شد. در جدول ۱ مشخصات نقاط نمونه برداری و در شکل ۱ محدوده ی نمونه گیری خاک ها نشان داده شده است.

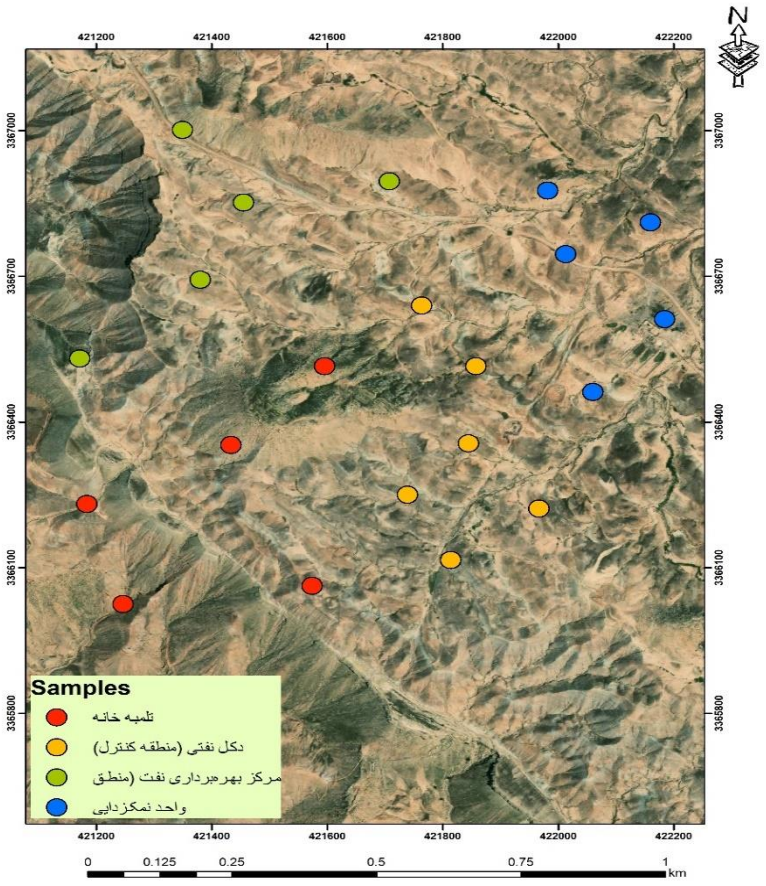
جدول۱: مشخصات محل و مختصات جغرافیایی نمونه های برداشت شده

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام منطقه
S1	۱۸ ۸۵ ۳۹.۰۵۳۸	۳۷ ۳۱ ۶۸۴.۶۰۶	مرکز بهره‌برداری نفت (منطقه کنترل)
S2	۱۸ ۸۶ ۷۳.۰۰۱۶	۳۷ ۳۱ ۴۰۱.۱۷۶	مرکز بهره‌برداری نفت (منطقه کنترل)
S3	۱۸ ۸۴ ۲۶.۹۹۸۵	۳۷ ۳۱ ۱۷۴.۵۰۹	مرکز بهره‌برداری نفت (منطقه کنترل)
S4	۱۸ ۸۲ ۶۲.۷۸۵۱	۳۷ ۳۰ ۶۹۱.۴۸۲	مرکز بهره‌برداری نفت (منطقه کنترل)
S5	۱۸ ۷۹ ۳۰.۹۵۹۹	۳۷ ۳۰ ۴۳۵.۹۰۸	مرکز بهره‌برداری نفت (منطقه کنترل)
S6	۱۸ ۷۸ ۳۹.۱۸۹	۳۷ ۳۰ ۷۱۱.۶۳	واحد نمکزدایی
S7	۱۸ ۷۹ ۸۱.۱۲۹	۳۷ ۳۰ ۹۹۸.۷۵۹	واحد نمکزدایی
S8	۱۸ ۷۵ ۰۷.۰۶۴۹	۳۷ ۳۰ ۲۸۴.۸۳	واحد نمکزدایی
S9	۱۸ ۷۳ ۶۹.۹۸۴۴	۳۷ ۳۰ ۷۶۹.۷۱۳	واحد نمکزدایی
S10	۱۸ ۷۵ ۴۷.۱۵۷۹	۳۷ ۳۱ ۰۲۵.۶۰۳	واحد نمکزدایی
S11	۱۸ ۷۸ ۰۰.۱۳۸۴	۳۷ ۳۱ ۳۰۲.۷۶۳	دکل نفتی (منطقه کنترل)
S12	۱۸ ۸۱ ۱۲.۴۷۷۴	۳۷ ۳۱ ۷۷۴.۶۱۲	دکل نفتی (منطقه کنترل)
S13	۱۸ ۸۱ ۳۷.۹۹۲	۳۷ ۳۱ ۴۱۸.۵۹۷	دکل نفتی (منطقه کنترل)
S14	۱۸ ۷۷ ۵۳.۱۱۲۷	۳۷ ۳۱ ۸۱۱.۷۰۳	دکل نفتی (منطقه کنترل)
S15	۱۸ ۷۴ ۴۶.۶۳۴۲	۳۷ ۳۱ ۶۸۲.۱۷۳	دکل نفتی (منطقه کنترل)
S16	۱۸ ۷۱ ۶۵.۴۲۰۲	۳۷ ۳۱ ۱۹۰.۲۹۶	تلمبه خانه
S17	۱۸ ۷۱ ۰۰.۵۸۴۸	۳۷ ۳۰ ۳۴۲.۵۰۶	تلمبه خانه
S18	۱۸ ۷۱ ۰۸.۷۴۹۵	۳۷ ۳۰ ۷۵۴.۵۰۹	تلمبه خانه
S19	۱۸ ۷۱ ۶۶.۰۷۱	۳۷ ۳۲ ۰۲۱.۱۵۸	تلمبه خانه
S20	۱۸ ۶۸ ۸۲.۷۹۷۵	۳۷ ۳۱ ۱۴۲.۴۵۶	تلمبه خانه

اندازه گیری ترکیبات آروماتیک چندحلقه ای

برای اندازه گیری ترکیبات آروماتیک در خاک محدوده تاسیسات نفتی از روش HPLC استفاده شد. نمونه های خاک به مدت ۷۲ ساعت در دستگاه خشک کن قرار داده شد. پس از غربال نمونه های خاک با مش ۲۰۰ میکرون، ۲ گرم از نمونه های خاک خشک شده وزن و به تیوب سانتریفوژ ۵۰ میلی متری انتقال داده شدند. عمل استخراج ترکیبات آروماتیک چندحلقوی توسط ۱۰ میلی لیتر حلال متانول به مدت ۱۲ دقیقه در حمام آبی اولتراسونیک انجام شد. نمونه های استخراج

شده به مدت ۵ دقیقه با دور ۳۵۰۰ rpm سانتریفوژ گردیدند. در این مرحله و پس از سانتریفوژ، ۶ میلی لیتر از مرحله بالایی تیوب (آلی) برداشته و به یک بالن حجم سنجی
۱۰ میلی لیتری انتقال و ۰.۵ میلی لیتر هگزان نرمال به آن اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه هم زده شد. سپس ۴ میلی لیتر آب مقطر دیونیزه به آن اضافه گردید. با اضافه کردن آب به مخلوط متانول هگزان و در نتیجه حل شدن متانول در آب، فاز آلی هگزان، حاوی آنالیت های استخراج شده، به صورت یک مرحله ی معلق در سطح آبی با استفاده از یک سرنگ همیلتون جمع آوری شد. در نهایت به کمک گاز نیتروژن تا نزدیک خشک شدن تبخیر و با ۵۰۰ میکرولیتر استونیتریل دوباره حل شده و به دستگاه HPLC تزریق گردید(سرپه۱۷ و همکاران، ۲۰۱۰) .



شکل ۱: موقعیت نقاط نمونه برداری شده در منطقه مورد مطالعه

در نهایت غلظت ترکیبات به دست آمده با استاندارد کیفیت رسوب آمریکا (لانگ۱۸ و همکاران، ۲۰۱۲) مقایسه شدند. در این استاندارد، دو دسته خطرERL۱۹ و ERM۲۰ برای آلودگی خاک در نظر گرفته شده است. در دسته ی ERL، محدوده

17- Serpeh
18- Long
19- Effect Range Low
20- Effects Range Median

خطر شامل حداکثر ۱۰ درصد جوامع زیست شناختی می باشد؛ در حالی که دسته ی ERM محدوده خطر شامل حداکثر ۵۰ درصد جوامع زیست شناختی است. همچنین برای بررسی غلظت PAHs برای مرگ و میر ۵۰ درصد آبزیان (LC 50) ۱۰ میلی گرم بر لیتر (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم آب) مد نظر قرار گرفت.

شاخص هم ارز سمناکی

شاخص هم ارز سمناکی۲۱(TEF) برای ارزیابی ترکیبات مرتبط به هم از لحاظ ساختاری که مکانیزم های مشترک دارند (مانند ترکیباتPAH) به کار می‌رود. این شاخص برای ارزیابی سمناکی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای در رسوبات به شکل مناسبی توسعه یافته است و سمیت آن ها نسبت به ترکیب BaP، به عنوان استاندارد مرجع بیان شده است(دلیستراتی۲۲، ۱۹۹۷؛ سپرووویری۲۳ و همکاران، ۲۰۰۷). در این مطالعه، معادله سمیت(TEQ۲۴) برای ترکیبات PAH با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$TEQ = Cn * TEFn$$ معادله ۱)

در این رابطه، Cn بیانگر غلظت ترکیب خاص PAH و TEFn شاخص هم ارز سمناکی مربوط به آن است. مقدار TEFn (نیسبت و لاگوی۲۵، ۱۹۹۲) برای PAHs در (جدول۲) ارائه شده است.

دستورالعمل‌های کیفیت رسوب۲۶(SQGs) از آزمون سمیت بیولوژیکی محیط بنتونیک تهیه شده است (آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا۲۷، ۲۰۰۵). این مجموعه‌ها به صورت (۱) محدوده اثر پایین (ERL) .محدوده اثر متوسط (ERM) و (۲) محدوده اثر آستانه۲۸ (TEL). محدوده اثر احتمال۲۹(PEL) تعریف می‌شوند. ERL و TEL به غلظت هایی پایینی مربوط می‌شوند که ممکن است بر روی جانوران شناور در آب اثرات نامطلوب داشته باشد و به ندرت اثر گذار هستند. در مقابل، اثرات نامطلوب بیشتر زمانی رخ می‌دهد که غلظت آلودگی ها بالاتر از حد ERM و PEL باشد (لانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

یافته های پژوهش

غلظت PAH در نمونه‌های خاک

نتایج خلاصه آماری PAHs در نمونه‌های رسوب در جدول ۲ نشان داده شده است. غلظت کل PAHs در خاک های محدوده میدان نفتی اهواز(بهره برداری نفت، واحد نمکزدایی، دکل نفتی و تلمبه خانه نفت) گستره وسیعی را نشان می‌دهد. میزان کل PAHs در بین ایستگاه های نمونه برداری از محدوده ۹.۸۷ تا ۲۶۳۲.۶۸۸ میکروگرم بر کیلوگرم، با میانگین

21- Toxic Equivalency Factor
22- Delistraty
23- Sprovieri
24- Toxic Equation
25- Nisbet and LaGoy
26- Sediment Quality Guidelines
27- United States Environmental Protection Agency
28- Threshold Effect Limit
29- Probability Effect Limit

۲۳۷۳.۴۴ میکروگرم بر کیلوگرم متغیر است. میانگین غلظت ترکیبات با وزن مولکولی پایین (LMW۳۰ و تا سه حلقه) ۳۴۷.۱۵۲ میکروگرم بر کیلوگرم و میانگین غلظت ترکیبات با وزن مولکولی بالا (HMW۳۱چهار تا شش حلقه) ۶۰.۲۴ میکروگرم بر کیلوگرم است. به طور کلی طبقه بندی براساس غلظت کل برای PAHs در رسوبات شامل ۳ گروه است: اگر غلظت کل بیشتر از ۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم باشد به عنوان بسیار آلوده، غلظت کل بین ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم آلودگی متوسط و اگر غلظت کمتر از ۲۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم باشد آلودگی ناچیز است. راهنمای اثرات کیفی نیز برای همبستگی بین اثرات و غلظت های شیمیایی کل و تکی PAH استفاده می‌شود (لیته۳۲ و همکاران، ۲۰۱۱). بر این اساس ۳۰.۴ درصد از ایستگاه ها آلودگی بسیار بالا، ۱۵.۱۷ درصد از ایستگاه ها آلودگی متوسط و بقیه ایستگاه ها سطح آلودگی پایین داشتند.

طبق نتایج حاصل از جدول ۲ مشخص شد آروماتیک حلقوی(IndPy) Indene[1,2,3-cd]pyrene با ۱۳.۴۷ کم‌ترین میانگین PAH و آروماتیک حلقوی (Phen) Phenanthrene با ۷۲۱.۵۴ میکروگرم بر کیلوگرم بیشترین میانگین PAH را در منطقه مورد مطالعه دارا می باشند. مراکز نفتی به دلیل فرآیندهای مختلف استخراج، پالایش و حمل‌ونقل نفت، می‌توانند مقدار زیادی پلی آروماتیک های هیدروکربنی (PAH) و ترکیبات آروماتیک حلقوی مانند بنزو [ghi]؛ پریلین (BghiP)را تولید می کنند. بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۲ شاخص محدوده اثر متوسط(ERM) برای آروماتیک های حلقوی در منطقه مورد مطالعه بدست آمد. مطابق این شاخص مشخص شد به ترتیب آروماتیک های حلقوی از الگوی زیر پیروی می‌کنند:

Fluoranthene (Flu)> Chrysene (Chr)> Pyrene(Pyr)> Naphthalene (Np)> Benzo[a]anthracene (BaA)> Benzo[a]pyrene (BaP)> Phenanthrene (Phen)> Anthracene (Ant)> Fluorene (Fl)> Acenaphthene (Ace) > Dibenzo[ah]anthracene (DiBA)

مطابق این شاخص مشخص شد آروماتیک حلقوی Fluoranthene (Flu) بیشترین و Acenaphthene (Ace) کم‌ترین میزان ERM را دارا می‌باشند. لازم به ذکر است برای بقیهٔ آروماتیک‌های حلقوی شاخص ERM قابل محاسبه نبود.

بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۳ شاخص محدوده اثر پایین(ERL) برای آروماتیک های حلقوی در منطقه مورد مطالعه بدست آمد. مطابق این شاخص مشخص شد به ترتیب آروماتیک های حلقوی از الگوی زیر پیروی می‌کنند:

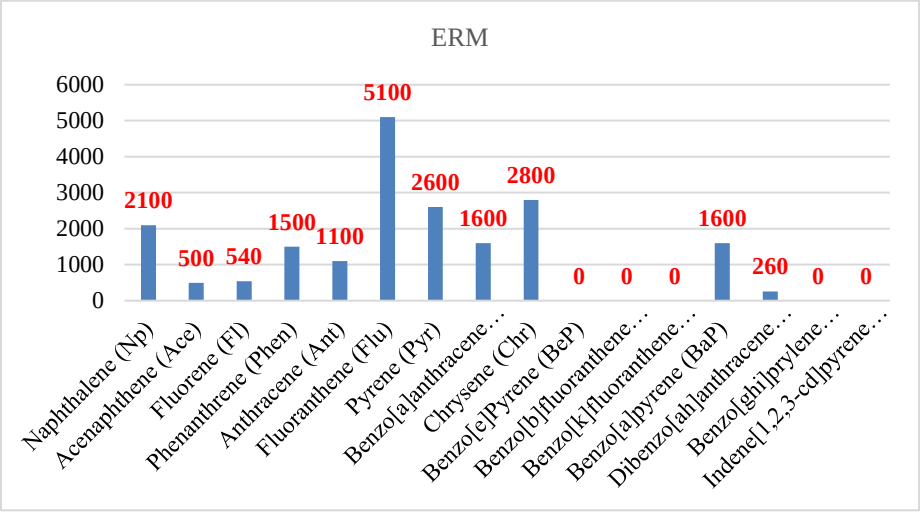
Anthracene(Ant)> Pyrene(Pyr)> Fluoranthene(Flu)> Benzo[a]pyrene (BaP) >Chrysene(Chr)> Benzo[a]anthracene (BaA)> Phenanthrene (Phen)> Naphthalene (Np)> Dibenzo[ah]anthracene (DiBA)> Fluorene (Fl)> Acenaphthene (Ace)

مطابق این شاخص مشخص شد آروماتیک حلقوی Anthracene(Ant) بیشترین و(Ace) Acenaphthene کم‌ترین میزان ERL را دارا می‌باشند. لازم به ذکر است برای بقیهٔ آروماتیک‌های حلقوی شاخص ERL قابل محاسبه نبود. بنابر نتایج؛ غلظت PAHها بیانگر محدوده اثر ERM بالای Np، Ace، Fl، Phen وDiBA بود. همچنین نتایج نشان داد حداقل یکی از ترکیبات PAH با اثرات منفی بیولوژیکی از محدوده اثر ERL بالاتر بودند که با نتایج پژوهش حاضر بصورت نسبی در یک راستا می‌باشد.

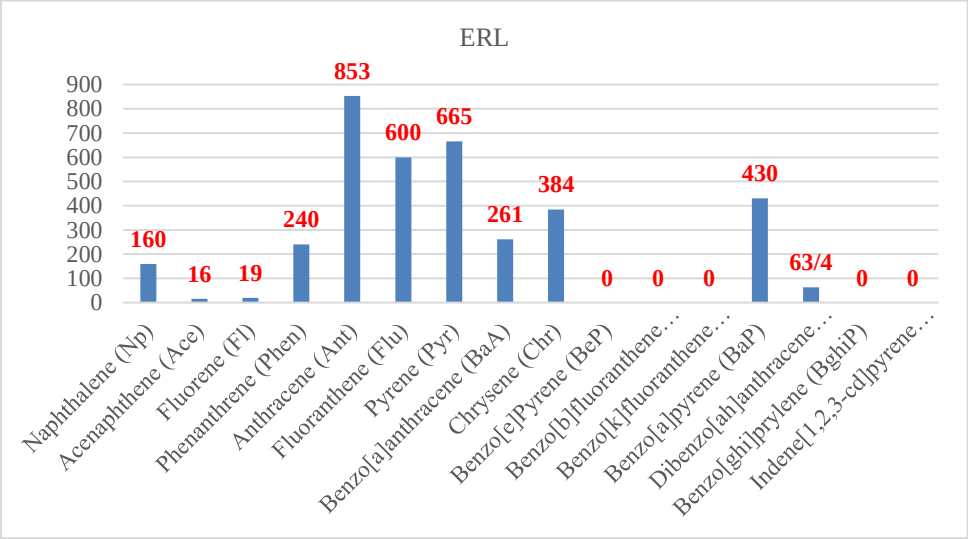
29- Probability Effect Limit
30- Low Molecular Weight
31- High Molecular weight
32- Leite

جدول۲: تجزیه و تحلیل آماری PAH خاک های محدوده میدان نفتی اهواز و مقادیر استاندارد ERL، ERM و TEF

ترکیبات	تعداد حلقه	TEF		بیشینه	کمینه	ERL	ERM
Naphthalene (Np)		۰.۰۰۱		۴۱۰۰	۰.۲		۲۱۰۰
Acenaphthene (Ace)		۰.۰۰۱	۳۱۱.۴	۵۱۰۰	۰.۲		۵۰۰
Fluorene (Fl)		۰.۰۰۱	۴۰۸.۷۱	۹۱۲۵	۰.۴		۵۴۰
Phenanthrene (Phen)		۰.۰۰۱			۰.۹	۲۴۰	۱۵۰۰
Anthracene (Ant)			۶۹.۱۱	۱۲۶۴	۰.۰۷	۸۵۳	۱۱۰۰
Fluoranthene (Flu)		۰.۰۰۱	۵۲.۷۲		۰.۲۹		۵۱۰۰
Pyrene (Pyr)		۰.۰۰۱		۱۵۴۱	۰.۳۹		۲۶۰۰
Benzo[a]anthracene (BaA)			۹۱.۲۷	۱۴۷۲	۰.۱		۱۶۰۰
Chrysene (Chr)			۲۰۱.۴۷	۲۶۴۰	۰.۳	۳۸۴	۲۸۰۰
Benzo[e]Pyrene (BeP)		–	۴۱.۸۹		۰.۲۹	–	–
Benzo[b]fluoranthene (BbF)			۱۷.۹۸		۰.۳	–	–
Benzo[k]fluoranthene (BkF)				۱۲۴۱	۰.۴۱	–	–
Benzo[a]pyrene (BaP)					۰.۰۵	۴۳۰	۱۶۰۰
Dibenzo[ah]anthracene (DiBA)					۰.۹۹	/	
Benzo[ghi]prylene (BghiP)	۶					–	–
Indene[1,2,3-cd]pyrene (IndPy)	۶		۱۳.۴۷			–	–
∑ PAHs	–		۲۳۷۳.۴۴		۹.۸۷	۴۰۰۰	

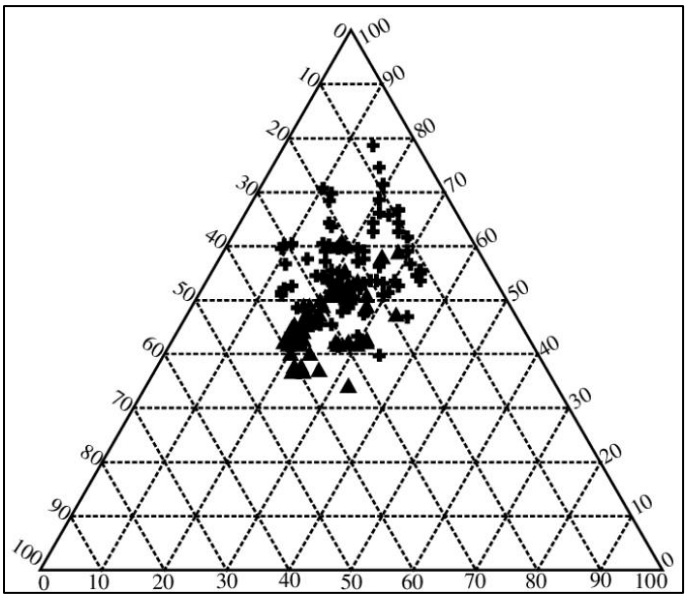


شکل ۲: نتایج حاصل از پارامتر ERM برای آروماتیک‌های حلقوی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۳: نتایج حاصل از پارامتر ERL برای آروماتیک‌های حلقوی در منطقه مورد مطالعه.

یکی از راه های بررسی ترکیبات PAH رتبه‌بندی آنها بر اساس تعداد حلقه های آنها است. بر این اساس می‌توان آن ها را در سه دسته دو و سه حلقه‌ای (ترکیبات PAH با وزن مولکولی کم)، چهار حلقه‌ای (ترکیبات PAH با وزن مولکولی متوسط) و پنج و شش حلقه‌ای (هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه‌ای با وزن مولکولی زیاد) رتبه‌بندی کرد. شکل ۴ دسته بندی هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای در منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. بطور کلی خاک های منطقه مورد مطالعه بیشتر به مرکز و بیشتر رأس هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه‌ای دو و سه حلقه‌ای نزدیک می‌باشند. ترکیبات PAH دو و سه حلقه‌ای بیشتر در اثر عوامل نفت زاد و ترکیبات PAH چهار حلقه توسط عوامل احتراق زاد به وجود می آیند.



شکل ٤: نمودار سه وجهی برای ترکیبات PAH در خاک منطقه مورد مطالعه

بحث

مطالعه حاضر به بررسی غلظت کل ترکیبات آروماتیک حلقوی (PAHs) در رسوبات نزدیک به مراکز نفتی در ۲۰ ایستگاه پرداخته است و نتایج آن نکات مهمی درباره وضعیت و توزیع این ترکیبات در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. این تحقیق نشان می دهد که رسوبات منطقه مذکور دارای غلظت‌های قابل توجهی از PAHs هستند و این رسوبات به عنوان یکی از مکان های اصلی ذخیره و تجمع این ترکیبات شیمیایی به حساب می‌آیند. این وضعیت به ویژه در شرایطی که بارش های سنگین و سیلاب های شهری رخ می‌دهد، می تواند به انتشار گسترده تر این ترکیبات به محیط های پذیرنده، مانند زمین‌های کشاورزی و اکوسیستم های پایین دست، منجر شود. چنین انتقالی می‌تواند اثرات زیست محیطی و بهداشتی گسترده ای داشته باشد، زیرا PAHs به دلیل پایداری بالای خود در محیط زیست و خاصیت سرطان زایی، خطرات جدی برای سلامت انسان‌ها و اکوسیستم ها ایجاد می‌کنند (ژاو۳۳ و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج مطالعه نشان داد که خاک های منطقه مورد بررسی به طور عمده به هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) با دو و سه حلقه نزدیک تر هستند و ترکیبات PAHs با چهار حلقه در مقادیر کمتری مشاهده می‌شود. این الگو به وضوح بیانگر این است که ترکیبات PAHs با دو و سه حلقه، که عمدتاً از منابع نفتی نشأت می‌گیرند، در مقادیر بالاتری در خاک های منطقه تجمع یافته‌اند، در حالی که PAHs با چهار حلقه، که معمولاً از فرآیندهای احتراق ناقص مواد آلی به وجود می‌آیند، به طور نسبی کمترند. این تفاوت به این معناست که ترکیبات با دو و سه حلقه به دلیل ساختار ساده تر و پایداری کمتر، به راحتی به خاک منتقل شده و در آنجا تجمع می‌یابند(رن۳۴ و همکاران، ۲۰۲۱). در عوض، ترکیبات با چهار حلقه به دلیل ساختار پیچیده تر و پایداری

33- Zhao
34- Ren

بالاتر، معمولاً در مراحل پیشرفته تر آلودگی و پس از تغییرات شیمیایی و بیولوژیکی در خاک موجود هستند(جیا[35] و همکاران، ۲۰۲۱). این وضعیت تأکید بر نیاز به مدیریت مؤثر و تخصصی برای کاهش و حذف PAHs از خاک، به ویژه برای ترکیبات با چهار حلقه که می‌تواند اثرات زیست محیطی و بهداشتی طولانی مدت داشته باشند، دارد. پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های نظارتی و پاکسازی به گونه ای طراحی شوند که شامل شناسایی دقیق منابع آلودگی، توسعه روش‌های مؤثر برای حذف PAHs از خاک و ارزیابی تأثیرات زیست محیطی این ترکیبات در مراحل مختلف آلودگی باشد(تیومبانه[36] و همکاران، ۲۰۱۹).

تحلیل نتایج نشان داد که میانگین غلظت ترکیب آروماتیک Indene[1,2,3-cd]pyrene (IndPy) با ۱۳.۴۷ میکروگرم بر کیلوگرم کم‌ترین میانگین PAHs در منطقه مورد مطالعه را دارد، در حالی که ترکیب آروماتیک Phenanthrene (Phen)با ۷۲۱.۵۴ میکروگرم بر کیلوگرم بالاترین میانگین را به خود اختصاص داده است. این اختلاف قابل توجه در غلظت میانگین PAHs می‌تواند به تفاوت در منابع انتشار، فرایندهای انتشار و ویژگی های شیمیایی و فیزیکی مختلف این ترکیبات مربوط باشد(جیانگ[37] و همکاران، ۲۰۲۴).

براساس شاخص محدوده اثر متوسط(ERM) ، ترکیب Fluoranthene (Flu) بالاترین میزان ERM را دارا می باشد، به این معنی که این ترکیب در مقایسه با دیگر PAHs بیشتر احتمال دارد که تاثیرات منفی زیست محیطی را ایجاد کند. در مقابل، Acenaphthene (Ace)کم‌ترین میزان ERM را دارد و بنابراین تاثیرات زیستم حیطی آن نسبت به دیگر PAHsکمتر است. این اطلاعات می‌تواند به اولویت بندی در برنامه های مدیریت و تصفیه آلودگی کمک کند، به طوری که ترکیبات با ERM بالا نیاز به توجه و کنترل بیشتری داشته باشند.

از سوی دیگر، بر اساس شاخص محدوده اثر پایین(ERL) ترکیب Anthracene (Ant) بیشترین و Acenaphthene (Ace)کم‌ترین میزان ERL را دارا هستند. این یافته ها نشان می دهد که ترکیبات با ERL بالا به‌طور معمول در مقادیر کم تر نیز می‌توانند تاثیرات زیست محیطی منفی قابل توجهی داشته باشد و باید به دقت تحت نظر قرار گیرد. رتبه‌بندی PAHsبر اساس تعداد حلقه‌های آن ها نشان داد که ترکیبات PAH در رسوبات مورد مطالعه عمدتاً به هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه‌ای دو و سه حلقه‌ای نزدیک هستند این الگو به این معناست که ترکیبات با تعداد حلقه های بیشتر، که معمولاً پایدارتر و سمی تر هستند، در رسوبات منطقه حضور بیشتری دارند. این ویژگی ها می‌تواند به درک بهتر از رفتار و انتقال این ترکیبات در محیط و همچنین بهبود روش‌های مدیریت و پاکسازی کمک کند.

غلظت بالای PAHs در خاک می‌تواند اثرات مخربی بر محیط زیست و سلامت انسان داشته باشد. این ترکیبات به دلیل خاصیت لیپوفیلیکی خود، به راحتی در بافت های چربی انباشته شده و از طریق زنجیره غذایی به موجودات زنده منتقل می شوند. مطالعات نشان داده‌اند که برخی از PAHs می‌توانند سرطان زا باشند و با ایجاد تغییرات ژنتیکی در سلول‌ها، خطر ابتلا به انواع مختلف سرطان را افزایش دهند. علاوه بر این، حضور PAHs در محیط‌های آبی می‌تواند به کاهش کیفیت آب و خاک منجر شود و با تأثیر بر فرآیندهای زیستی مانند فتوسنتز و تنفس سلولی، حیات آبزیان را تحت تأثیر قرار دهد(آی هونو[38] و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به مقدار زیاد میانگین آروماتیک حلقوی(بنزو و پریلین) دلایل اصلی غلظت بالای

35- Jia
36- Thiombane
37- Jiang
38- Ihunwo

آن در مراکز نفتی مورد مطالعه عبارتند از: ۱) احتراق ناقص در فرآیندهای پالایش؛ در پالایشگاه‌های نفت، فرآیندهای مختلفی مانند کراکینگ حرارتی و کاتالیستی انجام می‌شود که در طی آن‌ها احتراق ناقص هیدروکربن‌ها رخ می‌دهد. این امر منجر به تولید PAH ها می‌شود. ۲) نشت و ریزش نفت خام و فرآورده‌های نفتی؛ نشت نفت خام و فرآورده‌های نفتی در طی مراحل استخراج، انتقال و ذخیره سازی می‌تواند موجب انتشار PAH ها به محیط زیست شود. این ترکیبات به‌ویژه در صورت نشت به خاک و آب‌های سطحی می‌توانند آلودگی قابل توجهی ایجاد کنند. ۳) شعله‌ور کردن گازهای همراه: در بسیاری از مراکز نفتی، گازهای همراه با نفت که ارزش اقتصادی کمی دارند، سوزانده می‌شوند. این فرایند نیز می‌تواند منجر به تولید و انتشار PAH ها به هوا شود. ۴) آتش‌سوزی‌ها و حوادث صنعتی: حوادث صنعتی مانند انفجارها و آتش‌سوزی‌ها در مراکز نفتی می‌تواند منجر به انتشار ناگهانی و زیاد PAH ها شود. ۵) فعالیت‌های حمل‌ونقل: حمل و نقل نفت و فرآورده های نفتی از طریق لوله‌ها، تانکرها و کشتی‌ها می‌تواند منجر به نشت و ریزش این مواد شود که در نتیجه PAHها به محیط زیست وارد می‌شوند.

با قرار گرفتن نمونه‌ها در قسمت ترکیبات PAH دو و سه حلقه‌ای مشخص شد عوامل نفت زایی در منطقه مورد مطالعه به صورت مستقیم یا غیرمستقیم باعث تولید هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای دو و سه حلقه‌ای می‌شوند. فرآیندهای نفت زایی مانند تخریب نفت، خوردگی طبیعی سنگ‌های نفت زا، و فعالیت‌های صنعتی از جمله استخراج و پردازش نفت، می‌توانند به طور مستقیم هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را در منطقه مورد مطالعه می‌کنند. این فرآیندها منجر به تجزیه و تخریب مولکول های نفتی مانند هیدروکربن‌های اشباع شده می‌شوند، که در نتیجه آن، هیدروکربن‌های آروماتیک با ساختارهای چندحلقه‌ای شکل می‌گیرند. همچنین، تخریب نفت و نشت‌های نفتی می‌توانند به تجزیه مولکول های نفتی در محیط زیست منجر شده و این مولکول‌ها را به ساختارهای هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه‌ای تبدیل کنند. در نتیجه، عوامل نفت زایی به عنوان منابع اصلی تولید هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در محیط زیست عمل می‌کنند و می‌توانند به آلودگی محیط زیست و اثرات بر سلامتی انسان‌ها منجر شوند.

حسنی مقدم و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهش خود دست یافتند که بیشتر ترکیبات PAHs مربوط به رسوبات ترکیبات ۳ و ۴ حلقه‌ای شامل آس نفتلین، آس نفتن، فلورن، فنانترن، آنتراسن، فلئورانتن، پایرن و کرایزن تشکیل می‌دهد. در این بین کرایزن، فلئورانتن و پایرن در اغلب نمونه‌ها نسبت به سایر هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی فراوان‌تر بودند که نتایج این پژوهش هم راستا با پژوهش حاضر می‌باشد. حاجی آدینه و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهش خود دست یافتند که مهم‌ترین PAH منتشر شده در رسوبات شهر تهران بنزو الفا پیرن بود و با توجه به سرطان زا بودن آن ضروری است منابع تولید آن در کنترل قرار گیرد. نتایج این پژوهش منطبق با پژوهش حاضر می‌باشد. رستگاری مهر و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعهٔ خود دست یافتند که بر اساس شاخص هم ارز سمناکی و مقایسه غلظت PAHها با محدوده اثر پایین (ERL) بیانگر وضعیت نامناسب رسوبات مورد مطالعه بود.

نتیجه گیری:

بنابراین حضور ترکیبات آروماتیک چندحلقه ای در قسمت های سطحی و عمقی خاک و ته نشینی آن ها در محیط های پذیرنده علاوه بر اینکه باعث بروز اثرات مخرب محیط زیستی و بهداشتی می شود؛ بازسازی و احیای این محیط ها نیازمند صرف زمان، هزینه و انرژی بسیار است. پس باتوجه به دسترسی زیستی و خطرات بالقوه PAHs با وزن مولکولی کم و غلظت قابل توجه آن ها در خاک ها، کنترل و پایش رواناب ها و رسوبات حاصل از آن ها در محیط های شهری ضروری

است. در نهایت، مدیریت مؤثر و پایدار منابع نفتی و صنعتی و کاهش انتشار PAHs نیازمند همکاری بین المللی و اجرای قوانین زیست محیطی سخت گیرانه است. این اقدامات می‌تواند به حفاظت از اکوسیستم های حساس و سلامت عمومی کمک کند و از بروز مشکلات زیست محیطی و بهداشتی جدی در آینده جلوگیری نمایند.

با توجه به نتایج این مطالعه، پیشنهادات کاربردی و پژوهشی زیر می‌تواند به بهبود مدیریت و کاهش آلودگی خاک به ترکیبات PAHs کمک کند:

مدیریت و تصفیه منابع آلودگی:

استفاده از فناوری‌های تصفیه: برای کاهش انتشار PAHs از منابع صنعتی و نفتی، استفاده از فناوری های پیشرفته تصفیه مانند سیستم های تصفیه بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی پیشنهاد می‌شود. به ویژه، فناوری هایی که قادر به حذف PAHs با تعداد حلقه های بیشتر هستند، باید مورد توجه قرار گیرند.

کنترل و محدود کردن انتشار: برنامه های نظارتی و کنترلی برای کاهش انتشار PAHs از منابع صنعتی و حمل و نقل باید تقویت شود. این شامل بهبود فرآیندهای احتراق و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود.

پیشگیری از انتقال آلودگی:

مدیریت سیلاب‌ها و بارش‌ها: طراحی و پیاده سازی سیستم های کنترل سیلاب برای جلوگیری از انتقال خاک های آلوده به محیط های پذیرنده، مانند زمین های کشاورزی و منابع آب، اهمیت دارد. این سیستم ها باید قادر به جمع‌آوری و تصفیه آب های سطحی آلوده باشند.

استفاده از پوشش‌های حفاظتی: در مناطقی که خطر انتقال PAHs بالاست، استفاده از پوشش های حفاظتی بر روی رسوبات آلوده می‌تواند به کاهش انتشار این ترکیبات کمک کند.

آگاهی و آموزش عمومی:

آموزش جوامع محلی: آموزش جوامع محلی درباره خطرات PAHs و روش های پیشگیری از آلودگی می‌تواند به افزایش آگاهی و همکاری در حفاظت از محیط زیست کمک کند.

در نتیجه، مطالعه حاضر به وضوح اهمیت نظارت و مدیریت بر روی آلودگی های PAHs را در مناطق نزدیک به مراکز نفتی روشن می‌کند. نتایج این تحقیق می‌تواند به سیاست‌گذاران، کارشناسان محیط‌زیست و مدیران منابع طبیعی در اتخاذ تصمیمات مناسب برای کاهش خطرات زیست محیطی و بهداشتی ناشی از PAHs کمک کند. مدیریت صحیح منابع آلودگی، بهبود فرآیندهای تصفیه و پیشگیری از انتقال این ترکیبات به محیط های پذیرنده، نیازمند برنامه ریزی دقیق و استراتژی های مؤثر است تا به کاهش تاثیرات منفی آن‌ها بر سلامت انسان‌ها و اکوسیستم ها منجر شود.

منابع:

جادری، ه.، جهانی، د.، پیروان، ح.، کهنسال قدیم وند، ن. (۱۴۰۲). ارزیابی ریسک آلودگی هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای رسوبات در بازه شهرستان دزفول تا خلیج فارس، مجله محیط زیست و توسعه فرابخشی، ۸(۸۱): ۱۸-۱.

حاجی آدینه، ح.، محمدی روزبهانی، م.، پاینده، خ.، قنواتی، ن. (۱۳۹۹). بررسی میزان غلظت ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) در هوای بیرونی و داخلی محیط‌های شهری (مطالعه موردی: شهر تهران، ۱۳۹۷-۱۳۹۶)، مجله مهندسی بهداشت محیط، ۸ (۱): ۱۷-۳۰.

حسنی مقدم، ا.، هاشمی، ح.، قدیری، ع. (۱۳۹۹). هیدروکربن‌های حلقوی معطر (PAHs) در رسوبات رواناب شهری (مطالعه موردی شهر تهران)، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۲(۱۱): ۲۷۱۳-۲۷۲۶.

رستگاری مهر، م.، دشه ئی، ع.، شاکری، ع. (۱۳۹۷). بررسی آلودگی و منشأ فلزات سنگین و هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه ای (PAHs) در رسوبات سطحی رودخانه قره سو شهرستان کرمانشاه، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۹(۲): ۱۶۷-۱۵۶

محسن زاده، س.، کشت ورز، م.، محسن زاده، م.، نظری، م.، پورباقری، م.، آتش دهقان، ع. (۱۴۰۱). اصلاح خاک آلوده به هیدروکربن های نفتی با گیاه پالایی وتیور، مطالعات علوم محیط زیست، ۸(۱): ۶۰۹۱-۶۰۸۴.

محمودی، م.، هاشمی، ح.، سالمی، ا. (۱۳۹۸). منشایابی آلودگی هیدروکربنی در منبع های آب، خاک و رسوب در جنوب تهران، فصلنامه علوم محیطی، ۱۷(۳): ۱۴-۱.

Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. Egypt J Pet, 25(1):107-123. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011

AlKaabi, N., Al-Ghouti, M. A., Jaoua, S., & Zouari, N. (2020). Potential for native hydrocarbon-degrading bacteria to remediate highly weathered oil-polluted soils in Qatar through self-purification and bioaugmentation in biopiles. Biotechnology Reports, 28, e00543.

Aniagor, C. O., Ejimofor, M. I., Oba, S. N., & Menkiti, M. C. (2022). Application of artificial intelligence in the mapping and measurement of soil pollution, In Current Trends and Advances in Computer-Aided Intelligent Environmental Data Engineering (pp. 297-318). Academic Press.

Cui, S., Zhang, Z., Fu, Q., Hough, R., Yates, K., Osprey, M., ... & Coull, M. (2020). Long-term spatial and temporal patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Scottish soils over 20 years (1990–2009): A national picture. Geoderma, 361:114135.

Dai, C., Han, Y., Duan, Y., Lai, X., Fu, R., Liu, S., ... & Zhou, L. (2022). Review on the contamination and remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal soil and sediments. Environmental research, 205: 112423. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112423

Delistraty, D. (1997). Toxic equivalency factor approach for risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons, Toxicological & environmental chemistry, 64(1-4):81-108. https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X

Delistraty, D., (1997). Toxic equivalency factor approach for risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons, Toxicological & environmental chemistry, 64(1-4):81-108. https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X

Ejiba, I. V., Onya, S. C., & Adams, O. K. (2016). Impact of oil pollution on livelihood: evidence from the Niger Delta region of Nigeria و Journal of Scientific Research and Reports, 12(5):1-12. https://doi.org/10.9734/JSRR/2016/26633

Environmental Protection Agency (EPA). (2005). Predicting toxicity to amphipods from sediment chemistry, EPA/600/R–04/030, Washington DC.

Hu, Zh., Li, J. W., Wang, H., & Ye, Zh. (2019). Soil Contamination with Heavy Metals and Its Impact on Food Security in China, Journal of Geoscience and Environment Protection 07(05):168-183. https://doi.org/ 10.4236/gep.2019.75015

Ibegbulem, C. O., Amadi, B. A., Onyeike, E. N., & Ayalogu, E. O. (2016). Impacts of Crude Oil Pollution on Body Water Balance, Derivable Energy and Metabolic Water from Freshwater Fishes, Futo Journal Series (FUTOJNLS), 2(1):218-226.

Ihunwo, O. C., Ibezim-Ezeani, M. U., & DelValls, T. A. (2021). Human health and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment of Woji creek in the Niger Delta region of Nigeria. Marine Pollution Bulletin, 162:111903.

Jia, T., Guo, W., Xing, Y., Lei, R., Wu, X., Sun, S., ... & Liu, W. (2021). Spatial distributions and sources of PAHs in soil in chemical industry parks in the Yangtze River Delta, China. Environmental Pollution, 283:117121.

Jiang, Y., Wang, X., Li, M., Liang, Y., Liu, Z., Chen, J., ... & Wang, W. (2024). Comprehensive understanding on sources of high levels of fine particulate nitro-aromatic compounds at a coastal rural area in northern China. journal of environmental sciences, 135:483-494.

Lang, Y., Wang, N., Gao, H. & Bai, J., (2012). Distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydro - carbons (PAHs) from Liaohe estuarine wetland soils, Environmental Monitoring and Assessment, 184(9):5545-52. https://doi.org/ 10.1007/s10661-011-2360-8

Leite, N. F., Peralta-Zamora, P., & Grassi, M. T. (2011). Distribution and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from an urban river basin at the Metropolitan Region of Curitiba, Brazil, Journal of Environmental Sciences(China), 23(6):904-911. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60496-2

Liu, Y. R., Van der Heijden, G. A., Riedo, J., Sanz-Lazaro, C., Eldridge, D. J., Bastida, F., Moreno-Jiménez, E., …& Delgado-Baquerizo, M. (2023). Soil contamination in nearby natural areas mirrors that in urban greenspaces worldwide, Nature Communications, 14(1):1706. doi: https://doi.org/10.1038/s41467-023-37428-6.

Louvado, A., Gomes, N. C. M., Simoes, M. M. Q., Almeida, A., Cleary, D. F. R., & Cunha, A. (2015). Polycyclic aromatic hydrocarbons in deep sea sediments: Microbe-pollutant interactions in a remote environment, Sci Total Environ, 526(1):312-328. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.048

Nisbet, I. C., & Lagoy, P. K. (1992). Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Regulatory toxicology and pharmacology, 16(3):290-300. https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X

Qu, Y., Gong, Y., Ma, J., Wei, H., Liu, Q., Liu, L., ... & Chen, Y. (2020). Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China. Environmental Pollution, 260:114016.

Ren, K., Wei, Y., Li, J., Han, C., Deng, Y., & Su, G. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (oxygenated PAHs, azaarenes, and sulfur/oxygen-containing heterocyclic PAHs) in surface soils from a typical city, south China. Chemosphere, 283: 131190.

Sari, G. L., Trihadiningrum, Y., & Ni'matuzahroh, N. (2018). Petroleum hydrocarbon pollution in soil and surface water by public oil fields in Wonocolo sub-district, Indonesia, Journal of Ecological Engineering, 19(2):184-193. https://doi.org/10.12911/22998993/82800

Serpe, F. P., Esposito, M., Gallo, P., & Serpe, L. (2010). Optimisation and validation of an HPLC method for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mussels, Food Chemistry, 122(3):920-925. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.062

Shin, K. H., Kim, K. W., & Ahn, Y. (2006). Use of biosurfactant to remediate phenanthrene-contaminated soil by the combined solubilization–biodegradation process, J Hazard Mater, 137(3):1831-1837. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.025

Sprovieri, M., Feo, M. L., Prevedello, L., Manta, D. S., Sammartino, S., Tamburrino, S., & Marsella, E. (2007). Heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Naples harbour (southern Italy), Chemosphere, 67(5):998-1009. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.055

Thiombane, M., Albanese, S., Di Bonito, M., Lima, A., Zuzolo, D., Rolandi, R., ... & De Vivo, B. (2019). Source patterns and contamination level of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban and rural areas of Southern Italian soils. Environmental geochemistry and health, 41:507-528.

Varjani, S. J., & Upasani, V. N. (2016). Carbon spectrum utilization by an indigenous strain of Pseudomonas aeruginosa NCIM 5514: Production, characterization and surface active properties of biosurfactant, Bioresour Technol, 221(1):510-516. https://doi.org/ 10.1016/j.biortech.2016.09.080

Varjani, S. J., & Upasani, V. N. (2017). A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants, Int Biodeterior Biodegradation, 120(1):71-83. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.006

Xu, X., Liu, W., Tian, S., Wang, W., Qi, Q., Jiang, P., ... & Yu, H. (2018). Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: a perspective analysis, Frontiers in microbiology, 9:2885. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885

Zhao, L., Lyu, C., & Li, Y. (2021). Analysis of factors influencing plant–microbe combined remediation of soil contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons. Sustainability, 13(19):10695. https://doi.org/10.3390/su131910695