

## پراکنش مکانی و ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی کل، در رسوبات دریایی استان‌های بوشهر و خوزستان، شمال غرب خلیج فارس

محمدصدیق مرتضوی<sup>۱\*</sup>، سیده لیلی محبی نوذر<sup>۱</sup>، سنا شریفیان<sup>۱</sup>، هادی کوهکن<sup>۱</sup>، خسرو آیین جمشید<sup>۲</sup>، محسن مزرعاوی<sup>۳</sup>  
<sup>۱</sup> پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، هرمزگان  
<sup>۲</sup> پژوهشکده میگوی کشور، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، بوشهر  
<sup>۳</sup> پژوهشکده آبری پروری جنوب کشور، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، خوزستان

### چکیده

در این مطالعه، ارزیابی جامع وقوع و توزیع مکانی فلزات سنگین شامل نیکل، سرب، روی، مس، کادمیوم و کروم، هم‌چنین هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات سطحی نواحی ساحلی و دور از ساحل خلیج فارس در دو استان بوشهر و خوزستان، به منظور تشخیص منابع احتمالی آلودگی رسوبات، و تعیین درجه آلودگی، انجام شد. جهت ارزیابی کیفیت رسوبات از نظر آلودگی فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی از هشت شاخص آلودگی، استفاده شد. مناطق مورد بررسی، توسط درجه قابل‌توجهی از آلودگی فلزات سنگین نیکل، کادمیوم و روی، قابل تشخیص بودند. غلظت‌های بالای نیکل و روی در ایستگاه‌های اطراف نخلو، بوشهر مشاهده شد. مقایسه متوسط شاخص‌های آلودگی بین مناطق، نشان داد که هر دو استان بوشهر و خوزستان، به ترتیب، با متوسط درجه آلودگی (CD) (۲۰۲۵ و ۲۲۰۱۱)، درجه تغییر آلودگی (MCD) (۳۰۳۸ و ۳۰۶۹)، شاخص بارگذاری آلودگی (PLI) (۳۱۰۷ و ۵۷۰۵۷)، و شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI) (۳۵۳۰۵۴ و ۳۴۹۰۳۹)، دارای درجه و ریسک قابل توجهی از آلودگی نیکل و کادمیوم، به خصوص در منطقه نخلو بوشهر، هستند. بررسی نوسانات مکانی غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در دو استان، روند افزایشی از بوشهر به سمت خوزستان را نشان داد. با این حال، سواحل در منطقه بندگی عدم آلودگی یا آلودگی ناچیز قرار داشتند. استراتژی‌های جامع و چشم‌گیر در جهت کنترل و کاهش این آلودگی‌ها، خصوصاً در مناطق آلوده، باید در نظر گرفته شود، تا منابع این آلودگی‌ها مدیریت شوند.

### نوع مقاله

#### مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۵

تاریخ چاپ الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

\*نویسنده مسول:  
mseddiq1@yahoo.com

**کلید واژه‌ها:** شاخص‌های اکولوژیکی، غلظت فلزات سنگین، ناهمگنی محیطی، آلودگی رسوبات

### مقدمه

خلیج فارس، در سال‌های اخیر شاهد استقرار صنایع مختلف در نوار ساحلی و دریایی بوده است (۱) محیط دریایی نیمه‌بسته خلیج فارس، یکی از اکوسیستم‌های پر استرس از نظر فیزیولوژیکی می‌باشد (۲،۳)، که از مشخصه‌های آن تغییرات زیاد فصلی دمای آب، شوری بالا در مصب‌های کم‌عمق جدا شده از خلیج فارس، و رطوبت بالا می‌باشد (۳). هم‌چنین دوره چرخش طولانی آب (بین ۳ و ۵ سال) موجب تأثیرپذیری خلیج فارس نسبت به فعالیت‌های انسانی متعدد، شده است (۳). در سال‌های اخیر، خلیج فارس با آلودگی‌های ناشی از استقرار صنایع مختلف نظیر، استخراج نفت و گاز، واحدهای تولید انرژی و پتروشیمی، فعالیت‌های بندری، تردد کشتی‌های تجاری و نفت کش‌ها، انتقال آلاینده‌ها از طریق رودخانه‌های فصلی و دائمی، مواجه شده است (۴،۵) در سواحل شمالی و غربی خلیج فارس، آلودگی‌های فلزات سنگین بصورت رواناب‌های سطحی یا تخلیه‌های صنعتی از ایران و عراق، از طریق رودخانه به درون خلیج فارس جریان می‌یابند و یا اینکه بدون واسطه رودخانه‌ها، بصورت مستقیم، وارد می‌شوند (۶). فلزات سنگین یکی از آلوده‌کننده‌های مهم در اکوسیستم آبی می‌باشد که از منابع طبیعی و انسانی همانند فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، خانگی وارد اکوسیستم‌های آبی می‌شود (۷). تجمع فلزات سنگین در رسوبات، تأثیرات اکولوژیکی منفی روی موجودات دریایی و سلامتی انسان از طریق زنجیره غذایی دارد (۸). محیط آبریزان ممکن هست با ورود پیوسته فلزات از منابع طبیعی و انسانی با تهدید مواجه شود. مقاومت طولانی‌مدت، تجمع، بزرگ‌نمایی زیستی و سمیت فلزات سنگین در زنجیره غذایی ممکن هست ایجادکننده خطرات سلامتی جدی باشد (۹). آلودگی فلزات کمیاب، به تدریج در حال تبدیل شدن به یک بحران جهانی می‌باشد، از آنجایی که آب دریا در برابر تخلیه فزاینده آلاینده‌ها به ورودی دریا، تقریباً

در هر ساحلی در سرتاسر جهان آسیب‌پذیر هست (۱۰). این آلاینده‌های دریایی و مصبی مقاوم، می‌توانند مشکلات سم‌شناختی اکولوژیکی متعددی برای سلامتی انسان ایجاد کنند (۲،۱۱). برخی فلزات همانند مس، آهن و روی جهت حفظ عملکرد صحیح سلول، ضروری هستند، در حالی که دیگر فلزات همانند کادمیوم، سرب و جیوه، غیرضروری هستند و بسیار سمی برای فرایندهای سلولی می‌باشند (۱۲،۱۳). با این حال دیگر فلزات همانند آرسنیک، کروم و نیکل در سطوح متوسط سمیت قرار دارند، از آن جایی که جهت عملکرد برخی موجودات ضروری هستند، با این حال، تولیدکننده اثرات سمی در موجودات دیگر می‌باشند (۱۱).

اخیراً، مطالعات متعددی درباره توزیع فلزات سنگین در رسوبات، و ارزیابی ریسک‌های اکولوژیکی آن‌ها، از خلیج فارس انجام شده است (۲۴-۱۲،۱۴). فعالیت‌های انسانی، به‌عنوان فشارهای ناشی از منابع انسانی روی مصب‌های واقع در جنوب ایران گزارش شده است (۳۰-۲۵). علاوه بر آن، فعالیت‌های شامل صید، آلودگی نفتی، پساب‌های فاضلاب، لایروبی و احیا، عبور تانکرهای نفتی، و تخلیه آب‌های فوق‌شور از آب‌شیرین‌کن‌ها، به‌عنوان سایر عوامل تنش‌های انسانی در خلیج فارس، گزارش شده است (۳۱، ۲۷، ۲۲-۲۲، ۱۵، ۱۲). اخیراً مزارع پرورش میگو، در برخی از نواحی با آلودگی کم‌تر خلیج فارس نظیر سایت‌های سایه خوش و مقام در استان هرمزگان توسعه داده شده است (۳۲، ۲۹، ۲۷).

در مطالعه اخیر، ارزیابی جامع توزیع مکانی و زمانی غلظت فلزات سنگین شامل کادمیوم، سرب، نیکل، مس، کروم و روی، هم‌چنین ارزیابی ریسک‌های اکولوژیکی‌شان در رسوبات نواحی ساحلی و دریایی از دو استان بوشهر و خوزستان در غرب خلیج فارس، انجام شد. الگوی توزیع مکانی فلزات سنگین، تعیین درجه آلودگی‌شان، ارزیابی ریسک‌های اکولوژیکی آن‌ها و ارزیابی کیفیت رسوبات با استفاده از شاخص ریسک اکولوژیکی شامل فاکتور آلودگی (CF)<sup>۱</sup>، درجه آلودگی (CD)<sup>۲</sup>، درجه تغییر آلودگی (MCD)<sup>۳</sup>، شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)<sup>۴</sup>، شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI) و شاخص تجمع-زمینی (Igeo)، اهداف اصلی این مطالعه بودند.

## مواد و روش‌ها

در راستای اهداف مورد نظر، نمونه برداری از ایستگاه‌های تعیین شده از رسوبات با استفاده از شناور فردوس ۱ از استان‌های بوشهر و خوزستان، در زمستان سال ۱۳۹۹ انجام شد. نمونه‌برداری از شمال غرب خلیج فارس در ۱۰ ایستگاه از استان‌های بوشهر (۵ ایستگاه نمونه‌برداری) و خوزستان (۵ ایستگاه نمونه‌برداری) انجام گردید (شکل ۱). نمونه‌های رسوب سطحی شامل حدود ۱۰۰ گرم با استفاده از غرب جمع‌آوری شد.

<sup>1</sup> Contamination Factor

<sup>2</sup> Contamination Degree

<sup>3</sup> Modified Contamination Degree

<sup>4</sup> Pollution Load Index



شکل ۱. نقشه ایستگاه های نمونه برداری رسوبات بسترخلیج فارس واقع در استان های بوشهر و خوزستان، خلیج فارس، سال ۱۳۹۹.

## آنالیز شیمیایی نمونه ها

### الف: فلزات سنگین

نمونه ها به آزمایشگاه منتقل و تا زمان سنجش در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد نگهداری شدند. بعد از جمع آوری نمونه ها در آزمایشگاه، نمونه ها هرکدام جداگانه کدگذاری شدند. بمنظور خشک شدن، نمونه ها را درون دستگاه فریز درایر با دمای ۴۰- درجه سانتی گراد بمدت ۸ ساعت قرارگرفت پس از اتمام زمان فوق و اطمینان از خشک شدن کامل رسوبات، نمونه ها از دستگاه خارج و با یک هاون چینی آزمایشگاهی پودر گردیدند. سپس مقدار ۱ گرم از رسوب نمونه خشک شده را بوسیله ترازوی سارتوریوس با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن و به ویال دستگاه میکروویو آزمایشگاهی مدل Ethos1 منتقل گردید. جهت هضم نمونه های رسوب، از اسیدنیتریک و اسیدکلریدریک استفاده شد. بعد از هضم اسیدی، نمونه ها از دستگاه خارج و پس از صاف کردن با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی لیتر رسانده شدند.

غلظت های فلزات سنگین با استفاده از اسپکتروفتومتر جذب اتمی شعله و کوره، طبق دستورالعمل منطقه ای محدوده خلیج فارس و دریای عمان (MOOPAM2011)، تعیین شد. فلزات مس و نیکل، توسط دستگاه جذب اتمی شعله ای وسایر فلزات به کمک دستگاه جذب اتمی کوره ای اندازه گیری گردید. آنالیز ماده مرجع تائید شده، جهت دقت و کنترل کیفیت فرایند، به کار رفت.

شش شاخص آلودگی فلزات سنگین، شامل فاکتور آلودگی (CF)، درجه آلودگی (CD)، درجه تغییر لودگی (MCD)، شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)، شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI) و شاخص تجمع-زمینی (Igeo)، جهت ارزیابی کیفیت رسوبات، در ایستگاه های مورد مطالعه، استفاده شد. در جدول ۱، الگوریتم، تشریحات و واژه شناسی شاخص های آلودگی فلزات سنگین، به صورت کامل، بیان شده است (جدول ۱).

جدول ۱. الگوریتم، تشریحات و واژه‌شناسی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین

الگوریتم	تشریح	واژه‌شناسی
$CF = \frac{CH}{CB}$	n: شمار فلزات سنگین CF: فاکتور آلودگی $C_H$ : غلظت فلزات سنگین $C_B$ : غلظت مرجع فلزات سنگین (Cu=26, Ni=31, Zn=64, Pb=10, Cd=0.16, Cr=67.3)	آلودگی پایین: $CF < 1$ آلودگی متوسط: $1 < CF < 3$ آلودگی قابل توجه: $3 < CF < 6$ آلودگی بسیار بالا: $CF > 6$
$CD = \sum_{i=1}^n CF$	مجموع فاکتور آلودگی CD:	درجه پایین آلودگی: $CD < 6$ درجه متوسط آلودگی: $6 < CD < 12$ درجه قابل توجه آلودگی: $12 < CD < 24$ درجه بالا آلودگی: $CD > 24$
$MCD = \frac{\sum_{i=1}^n CF}{n}$	CF: فاکتور آلودگی n: شمار پارامترهای مورد مطالعه	آلودگی خیلی پایین: $mCd \leq 1.5$ آلودگی پایین: $1.5 \leq mCd \leq 2$ آلودگی متوسط: $2 \leq mCd \leq 4$ آلودگی بالا: $4 \leq mCd \leq 8$ آلودگی خیلی بالا: $8 \leq mCd \leq 16$ آلودگی بی‌نهایت بالا: $16 \leq mCd \leq 32$ آلودگی مافوق بالا: $mCd \geq 32$
$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$	CF: فاکتور آلودگی n: شمار پارامترهای مورد مطالعه	آلودگی فلز وجود دارد: $PLI > 1$ هیچ آلودگی فلز وجود ندارد: $PLI < 1$
$PERI = \sum_{i=1}^n (Tr \times CF)$	Tr: ضریب سمیت (Zn = 1, Cu = Pb = 5, Cd = 30, Cr = 2)	ریسک اکولوژیکی بالقوه پایین: $PERI < 95$ ریسک اکولوژیکی متوسط: $95 < PERI < 190$ ریسک اکولوژیکی قابل توجه: $190 < PERI < 380$ ریسک اکولوژیکی خیلی بالا: $PERI > 380$
$Igeo = \log_2 \frac{C_n}{1.5 \times B_n}$	$C_n$ : غلظت اندازه‌گیری شده فلز در نمونه $B_n$ : غلظت مرجع فلز به منظور به حداقل رساندن اثر 1.5 فاکتور نوسانات احتمالی مقدار مرجع، استفاده می‌شود.	غیرآلوده: $Igeo \leq 0$ غیرآلوده تا آلودگی متوسط: $0 < Igeo \leq 1$ آلودگی متوسط: $1 < Igeo \leq 2$ آلودگی متوسط تا زیاد: $2 < Igeo \leq 3$ آلودگی شدید: $3 < Igeo \leq 4$ آلودگی جدی تا شدید: $4 < Igeo \leq 5$ آلودگی شدید: $Igeo > 5$

## ب: هیدروکربن‌های نفتی کل

۲۰ گرم از رسوبات خشک و عبور داده شده از الک ۲۵۰ میکرون را با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن کرده و درون ظروف مخصوص دستگاه میکروویو به نام ویال ریخته شد و سپس به هر یک از آنها ۴۰ میلی لیتر مخلوطی از حلال‌های هگزان و دی کلرومتان (نسبت ۵۰/۵۰) اضافه گردید و در دستگاه میکروویو (مدل Ethos Plus) قرار داده شد. پس از سرد شدن کامل نمونه‌ها و رسیدن به دمای محیط، آنها را از کاغذ صافی عبور داده و درون ظروف شیشه‌ای ریخته شد. رسوبات باقی مانده در ویال با ۱۰ میلی لیتر هگزان شستشو داده شد و سپس به ظروف شیشه‌ای منتقل گردید. قبل از مرحله اندازه‌گیری، همه نمونه‌ها تا حجم حدوداً ۲۰ میلی لیتر با استفاده از دستگاه تبخیرکننده چرخان کاهش داده شدند. تعیین غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل توسط دستگاه فلورئورسانس اشعه ماورای بنفش (UVF) و با سه بار تکرار انجام شد. غلظت نهایی هیدروکربن‌های نفتی کل موجود در نمونه‌های رسوب بر اساس واحد میکروگرم بر کیلوگرم وزن خشک با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (معادله ۱):

$$A = \frac{V \times C}{W} \quad \text{معادله ۱}$$

که در آن  $A$  غلظت هیدروکربن‌های نفتی در نمونه‌های اصلی (نانوگرم بر گرم)،  $V$  حجم نمونه (میلی لیتر)،  $C$  غلظت هیدروکربن‌های نفتی قرائت شده توسط دستگاه (بر حسب نانوگرم بر میلی لیتر) و  $W$  وزن رسوب استفاده شده (بر حسب گرم) است (۳۳).

ارزیابی شدت و خطر زیست‌محیطی هیدروکربن‌های نفتی کل با استفاده از دو شاخص دستورالعمل‌های استانداردهای کیفیت رسوب (SQGs) و فاکتور آلودگی (CF) مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۲، جزئیات و دسته‌بندی شاخص‌های هیدروکربن‌های نفتی کل، نشان داده شده است (جدول ۲).

جدول ۲. جزئیات و واژه‌شناسی شاخص‌های ارزیابی آلودگی هیدروکربن‌های نفتی کل طبق (۳۴) و (۳۵).

الگوریتم	واژه شناسی	تشریح
$PELq = (C/P)$	مقدار سمیت هیدروکربن‌های نفتی $PELq =$ غلظت هیدروکربن‌های نفتی $C =$ مقدار $PEL (\mu g/g)$ $P =$	$PELq < 0.1$ : فاقد اثر $0.1 < PELq < 0.5$ : اثر کم $0.5 < PELq < 1$ : اثر متوسط $PELq > 1$ : اثر شدید
$C_f = C_0 - 1 / C_n$	ضریب آلودگی $C_f =$ میانگین غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل $C_0 - 1 =$ غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات طبیعی $C_n =$	$CF < 1$ : آلودگی کم $1 < CF < 3$ : آلودگی متوسط $3 < CF < 6$ : آلودگی قابل توجه $CF > 6$ : آلودگی زیاد

## آنالیزهای آماری

غلظت‌های فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی کل جهت نرمال‌بودن با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، تست شدند. غلظت‌های تمامی فلزات توزیع نرمال را نشان داد. متعاقباً، از آزمون پارامتریک t-test جهت معنادار بودن تفاوت‌های مکانی غلظت فلزات سنگین بین دو استان بوشهر و خوزستان، و آزمون One way ANOVA جهت معنادار بودن غلظت‌های فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی کل بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، استفاده شد. جهت آنالیز همبستگی بین فلزات، از ضریب همبستگی پیرسون (Pearson) جهت آنالیز روابط همبستگی بین متغیرهای پارامتریک، استفاده شد. تمامی آنالیزهای مربوطه در نرم افزار IBM SPSS 26، انجام شد. روش وزن‌بندی مسافت معکوس (IDW) در نرم افزار ArcGIS، جهت نقشه توزیع مکانی فلزات سنگین و دسته‌بندی ایستگاه‌ها از لحاظ شدت آلودگی، استفاده شد. این نرم‌افزار هم‌چنین جهت ترسیم نقشه ایستگاه‌های نمونه‌برداری، استفاده گردید. نتایج بصورت میانگین همراه با خطای استاندارد ارایه گردید.

## نتایج

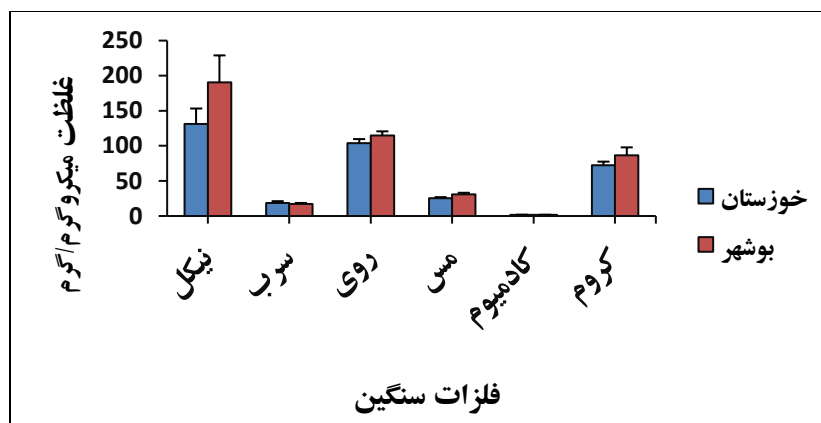
مقایسه نوسانات مکانی در غلظت فلزات سنگین بین دو استان بوشهر و خوزستان در سال ۱۳۹۹ نشان داد که، تفاوت معنی‌داری در غلظت هیچ‌کدام از فلزات سنگین بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری وجود ندارد ( $P > 0.05$ ). بررسی ارتباط بین غلظت فلزات سنگین نشان‌دهنده همبستگی چشم‌گیر بین فلزات نیکل، مس و کروم بود ( $P < 0.01$ )، با این حال فلزات سرب، روی و کادمیوم، ارتباط معنی‌دار با هیچ‌کدام از فلزات نشان ندادند ( $P > 0.05$ ). (جدول ۲).

جدول ۲. همبستگی پیرسون نشان‌دهنده روابط معنادار بین غلظت فلزات در رسوبات از دو استان بوشهر و خوزستان، سال ۱۳۹۹.

فلز	نیکل	سرب	روی	مس	کادمیوم	کروم
نیکل	1					
سرب	0.591	1				
روی	0.234	0.411	1			
مس	.890**	0.524	0.406	1		
کادمیوم	-0.287	-0.111	0.374	-0.253	1	
کروم	.897**	0.595	0.137	.783**	-0.314	1

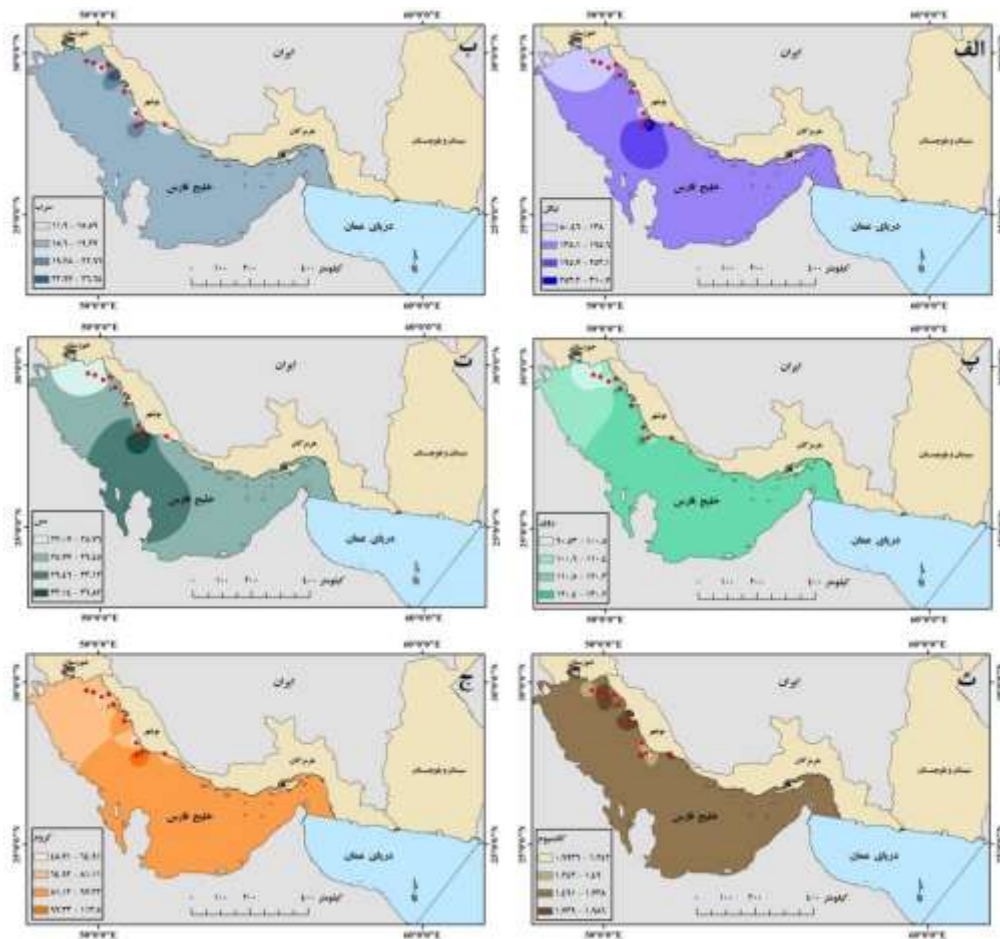
\*\*همبستگی چشم‌گیر در سطح ۰.۰۱

شکل ۲، توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین به تفکیک استان‌های بوشهر و خوزستان، در سال ۱۳۹۹ را نشان می‌دهد. طبق شکل ۲، استان بوشهر، بالاترین میانگین غلظت فلزات نیکل ( $۱۹۰.۴۶ \pm ۳۸.۴۵$  میکروگرم/گرم)، روی ( $۱۱۵.۰۰ \pm ۵۶۷$  میکروگرم/گرم)، مس ( $۲۰۴۰ \pm ۳۰۰.۷۲$  میکروگرم/گرم) و کروم ( $۸۶.۵۳ \pm ۱۱.۳۱$  میکروگرم/گرم) را نشان داد (شکل ۲). بالاترین میانگین غلظت سرب ( $۱۷۰.۸ \pm ۱.۴۹$  میکروگرم/گرم) و کادمیوم ( $۱۶۸ \pm ۰.۱۵$  میکروگرم/گرم) در خوزستان، مشاهده شد (شکل ۲).



شکل ۲. میانگین غلظت (همراه با خطای استاندارد) فلزات سنگین نیکل، سرب، روی، مس، کادمیوم و کروم به تفکیک استان‌های خوزستان و بوشهر، سال ۱۳۹۹.

الگوی پراکنش مکانی غلظت فلزات سنگین در سال ۱۳۹۹، به تفکیک هر فلز در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس الگوی پراکنش غلظت نیکل، غلظت‌های بالای این فلز در نواحی شرقی بوشهر قابل مشاهده بود (شکل ۳ الف)، و به سمت استان خوزستان، غلظت فلز رو به کاهش بود (شکل ۳ الف). طبق پراکنش مکانی فلز سرب، این فلز غلظت‌های بالایی را به سمت استان خوزستان نشان داد (شکل ۳ ب). غلظت‌های بالای روی در نواحی مرکزی استان بوشهر، قابل مشاهده بود و در شدت کم‌تری در استان خوزستان مشاهده شد (شکل ۳ پ). بر اساس الگوی پراکنش فلز مس، غلظت‌های بالای آن در نواحی مرکزی استان بوشهر، مشاهده شد و به سمت خوزستان، غلظت آن با کاهش محسوس همراه بود (شکل ۳ ت). فلز کادمیوم، توزیع همگنی بین دو استان نشان داد (شکل ۳ ث) و غلظت‌های بالای آن در دو استان مشاهده شد (شکل ۳ ج). حداکثر غلظت کروم در نواحی شرقی استان بوشهر ثبت شد و روند کاهشی در غلظت آن به سمت استان خوزستان مشاهده گردید (شکل ۳ ج).



شکل ۳. الگوی پراکنش مکانی غلظت فلزات سنگین (الف نیکل، ب سرب، پ روی، ت مس، ث کادمیوم و ج کروم، در خلیج فارس، سال ۱۳۹۹ (توجه شود که تنها الگوی پراکنش مکانی در اطراف ایستگاه‌های نمونه‌برداری مد نظر می‌باشد).

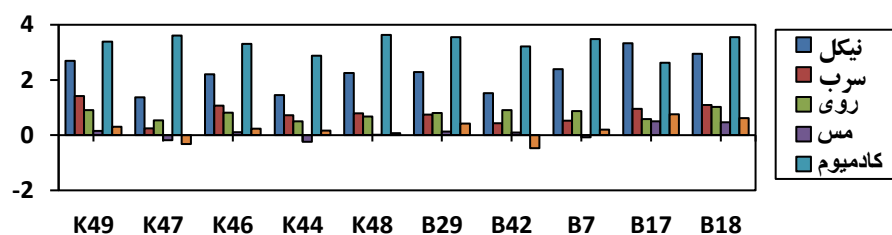
در جدول ۳، نتایج بدست‌آمده شاخص‌های اکولوژیکی شامل فاکتور آلودگی (CF) برای هر فلز، درجه آلودگی (CD)، درجه تغییر آلودگی (MCD)، شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)، و شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI) در سال ۱۳۹۹، به تفکیک ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان داده شده است (جدول ۳). فاکتور آلودگی (CF) برای نیکل از ۲.۵۸ در ایستگاه K47 تا ۱۰.۰۵ در ایستگاه B17 متغیر بود (جدول ۳). حداقل (۱.۰۸) و حداکثر (۲.۶۷) فاکتور آلودگی (CF) سرب در ایستگاه‌های K47 و K49 مشاهده شد (جدول ۳). فاکتور آلودگی (CF) برای روی بین ۱/۴۱ در ایستگاه K44 تا ۲/۰۴ در ایستگاه B18 متغیر بود (جدول ۳). پایین‌ترین (۰.۸۵) و بالاترین (۱/۴۲) فاکتور آلودگی برای مس در ایستگاه‌های K44 و B17 مشاهده شد (جدول ۳). برای کادمیوم، مقدار فاکتور آلودگی بین ۶/۱۷ در ایستگاه B17 تا ۱۲/۴۲ در ایستگاه K48 متغیر بود (جدول ۳). فاکتور آلودگی (CF) برای کروم از ۰/۷۲ در ایستگاه B42 تا ۱/۶۹ در ایستگاه B17 متغیر بود (جدول ۳). از نظر درجه آلودگی (CD)، این شاخص بین ۱۵/۱۴ در ایستگاه K44 تا ۲۶/۵۰ در ایستگاه B18 متغیر بود (جدول ۳). طبق شاخص درجه تغییر آلودگی (MCD)، حداقل (۲/۵۲) در ایستگاه K44 و حداکثر آن (۴/۴۲) در ایستگاه B18 مشاهده شد (جدول ۳). بر اساس شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)، حداقل (۶/۳۳) و حداکثر آن (۱۳۸/۹۶) در ایستگاه‌های K47 و B18 به ترتیب مشاهده شد (جدول ۳). طبق شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI)، این شاخص از ۲۵۱.۰۶ در ایستگاه K44 تا ۴۱۳/۷۰ در ایستگاه K48 نوسان داشت (جدول ۳). مرور جدول ۳ نشان می‌دهد مقدار حداقلی اکثر شاخص‌ها در ایستگاه‌های K47 و K44 از استان خوزستان، و مقدار حداقلی حداکثر این شاخص‌ها در ایستگاه‌های B17 و B18 از بوشهر، قابل مشاهده بود (جدول ۳).



جدول ۳. نتایج شاخص‌های اکولوژیکی شامل فاکتور آلودگی (CF)، درجه آلودگی (CD)، درجه تغییر آلودگی (MCD)، شاخص بارگذاری آلودگی (PLI) و شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI)، به تفکیک ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سال ۱۳۹۹.

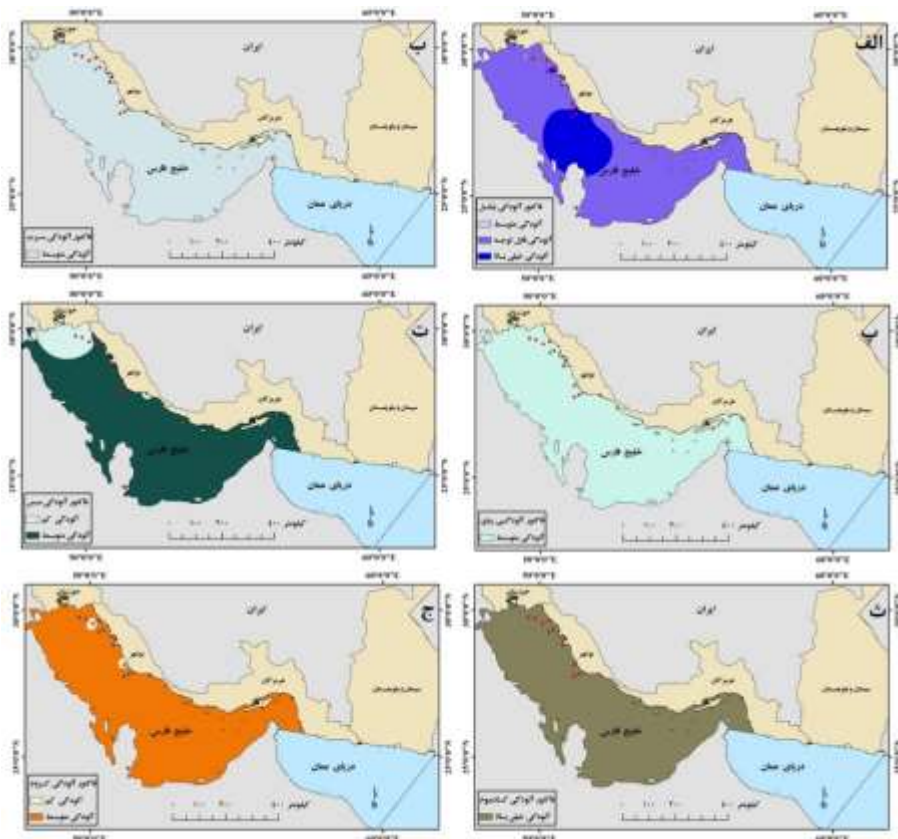
استان	ایستگاه	CF نیکل	CF سرب	CF روی	CF مس	CF کادمیوم	CF کروم	CD	MCD	PLI	PERI
خوزستان	K49	6.44	2.67	1.88	1.11	10.50	1.24	23.84	3.97	77.63	370.44
	K47	2.58	1.18	1.45	0.88	12.19	0.80	19.08	3.18	6.33	391.89
	K46	4.60	2.11	1.77	1.08	9.92	1.18	20.65	3.44	35.89	340.61
	K44	2.74	1.65	1.41	0.85	7.38	1.12	15.14	2.52	7.42	251.06
	K48	4.76	1.72	1.60	1.00	12.42	1.05	22.56	3.76	28.56	413.70
بوشهر	B29	4.87	1.68	1.74	1.09	11.69	1.33	22.40	3.73	40.44	393.24
	B42	2.88	1.35	1.88	1.07	9.28	0.72	17.17	2.86	8.63	308.19
	B7	5.24	1.44	1.83	0.95	11.13	1.15	21.72	3.62	27.81	375.99
	B17	10.05	1.94	1.50	1.42	6.17	1.69	22.77	3.79	71.99	256.98
	B18	7.69	2.14	2.04	1.38	11.71	1.54	26.50	4.42	138.96	412.54

در شکل ۵ نتایج شاخص تجمع-زمینی (Igeo) به تفکیک هر فلز و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سال ۱۳۹۹، نشان داده شده است. این شاخص برای نیکل بین ۱/۳۷ در ایستگاه K47 تا ۳/۳۳ در ایستگاه B17 متغیر بود (شکل ۵). حداقل (۰/۲۴) و حداکثر (۱/۴۱) این شاخص برای سرب در ایستگاه K47 و K49 مشاهده شد (شکل ۵). شاخص تجمع-زمینی (Igeo) برای فلز روی بین ۰/۵۰ در ایستگاه K44 تا ۱/۰۳ در ایستگاه B18 متغیر بود (شکل ۵). برای فلز مس، حداقل (۰/۲۴-) و حداکثر شاخص (۰/۵۰-) در ایستگاه K44 و B17 مشاهده شد (شکل ۴۵). حداقل (۲/۶۲) و حداکثر (۳/۶۳) این شاخص برای کادمیوم در ایستگاه‌های B17 و K48 مشاهده شد (شکل ۵). این شاخص برای فلز کروم بین ۰/۴۷- در ایستگاه B42 تا ۰/۷۶ در ایستگاه B17 متغیر بود (شکل ۵). مرور شکل ۵ نشان می‌دهد مقدار حداکثری این شاخص برای فلزات نیکل، مس و کروم در ایستگاه B17 از بوشهر، می‌باشد (شکل ۵).



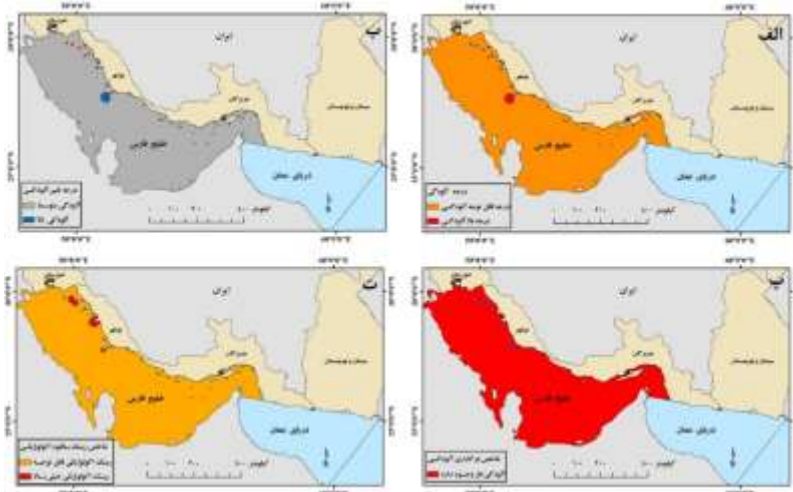
شکل ۵. شاخص تجمع-زمینی (Igeo) به تفکیک ایستگاه‌های نمونه‌برداری برای هر فلز در خلیج فارس، سال ۱۳۹۹ (برچسب‌های K و B، به ترتیب استان‌های خوزستان و بوشهر را نشان می‌دهند).

در شکل ۶، تقسیم‌بندی مناطق بر اساس شاخص فاکتور آلودگی (CF) به تفکیک هر فلز در سال ۱۳۹۹، نشان داده شده است (شکل ۶). طبق فاکتور آلودگی نیکل، نواحی مرکزی اطراف بوشهر آلودگی خیلی بالا نیکل را نشان دادند، و در سایر نقاط، آلودگی قابل توجه نیکل وجود داشت (شکل ۶ الف). از لحاظ فلز سرب، تمامی نواحی اطراف بوشهر و خوزستان، آلودگی متوسط سرب را نشان دادند (شکل ۶ ب). طبق نقشه پراکنش شاخص برای فلز روی، همانند سرب، آلودگی متوسط روی در تمامی ایستگاه‌ها مشاهده شد (شکل ۶ پ). از لحاظ فلز مس، ایستگاه‌های واقع در بوشهر، آلودگی متوسط و در خوزستان آلودگی کم به مس را نشان دادند (شکل ۶ ت). طبق فاکتور آلودگی کادمیوم، تمامی ایستگاه‌های بوشهر و خوزستان، آلودگی خیلی بالا از کادمیوم را نشان دادند (شکل ۶ ث). از لحاظ کروم، تمامی ایستگاه‌های دو استان، آلودگی متوسط کروم را نشان دادند، و تنها در دو ایستگاه واقع در نواحی مرکز و غرب بوشهر، آلودگی کم کروم، مشاهده شد (شکل ۶ ج).



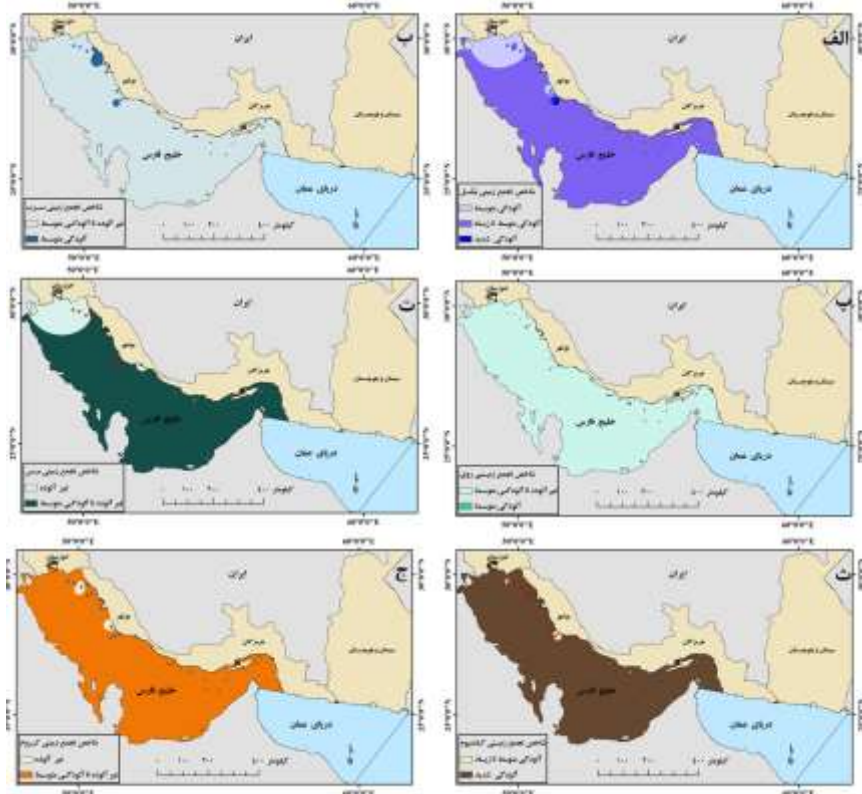
شکل ۶. الگوی پراکنش مکانی فاکتور آلودگی (CF) فلزات سنگین (الف نیکل، ب سرب، پ روی، ت مس، ث کادمیوم و ج کروم، خلیج فارس، سال ۱۳۹۹) (توجه شود که تنها الگوی پراکنش مکانی در اطراف ایستگاه‌های نمونه‌برداری مد نظر می‌باشد).

شکل ۷ تقسیم‌بندی مناطق از نظر آلودگی با استفاده از شاخص‌های اکولوژیکی درجه آلودگی (CD)، درجه تغییر آلودگی (MCD)، شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)، و شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI) در سال ۱۳۹۹ را نشان می‌دهد (شکل ۷). از لحاظ درجه آلودگی (CD)، در سال ۱۳۹۹، اکثر ایستگاه‌ها در مجاورت بوشهر و خوزستان، درجه قابل توجه آلودگی را نشان دادند و تنها در یک ایستگاه واقع در نواحی مرکزی اطراف بوشهر درجه بالا آلودگی مشاهده شد (شکل ۷ الف). از لحاظ شاخص درجه تغییر آلودگی (MCD)، این شاخص الگوی همانند شاخص قبلی (درجه آلودگی) را نشان داد و در اکثر ایستگاه‌های واقع در اطراف دو استان، آلودگی متوسط و تنها در ایستگاه واقع در نواحی اطراف مرکز بوشهر، آلودگی بالا مشاهده شد (شکل ۷ ب). از لحاظ شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)، در تمامی نواحی دریایی مرتبط با بوشهر و خوزستان آلودگی فلزی وجود داشت (شکل ۷ پ). از لحاظ شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI)، اکثر ایستگاه‌های بوشهر و خوزستان، ریسک اکولوژیکی قابل توجه از فلزات سنگین را نشان دادند، و در چهار ایستگاه واقع در نواحی اطراف مرکز و غرب بوشهر و شرق خوزستان، ریسک اکولوژیکی خیلی بالا از فلزات سنگین مشاهده شد (شکل ۷ ت).



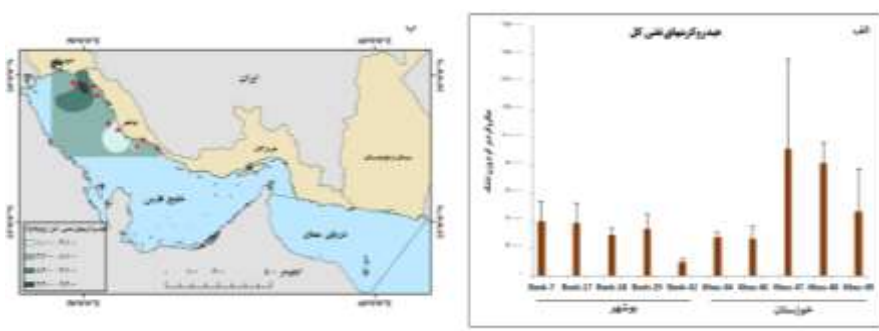
شکل ۷. الگوی پراکنش مکانی الف) درجه آلودگی (CD)، ب) درجه تغییر آلودگی (MCD)، پ) شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)، و ت) شاخص ریسک بالقوه اکولوژیکی (PERI)، خلیج فارس، سال ۱۳۹۹ (توجه شود که تنها الگوی پراکنش مکانی در اطراف ایستگاه‌های نمونه برداری مد نظر می‌باشد).

از لحاظ شاخص تجمع زیستی (Igeo) فلزات سنگین در سال ۱۳۹۹، این شاخص در مورد تجمع زیستی نیکل نشان داد که ایستگاه دریایی مرتبط با مرکز بوشهر، آلودگی شدید نیکل و سایر بخش‌های دو استان آلودگی متوسط تا زیاد نیکل را نشان دادند (شکل ۸ الف). از لحاظ سرب، در نواحی دریایی واقع در مرکز و غرب بوشهر، آلودگی متوسط سرب وجود داشت و در سایر نقاط غیر آلوده به سرب بودند (شکل ۸ ب). از لحاظ روی، تنها ایستگاه واقع در اطراف مرکز بوشهر، آلودگی متوسط روی را نشان داد و سایر ایستگاه‌ها غیر آلوده به روی بودند (شکل ۸ پ). از لحاظ فلز مس، اکثر نواحی آلودگی متوسط به روی را نشان دادند و تنها در خوزستان و انتهای شرقی بوشهر، نواحی غیر آلوده به مس بودند (شکل ۸ ت). از لحاظ فلز کادمیوم، تمامی ایستگاه‌های پیرامون دو استان، آلودگی شدید کادمیوم را نشان دادند، و تنها در دو ایستگاه واقع در اطراف نواحی مرکزی بوشهر و شرق خوزستان، آلودگی متوسط تا زیاد کادمیوم مشاهده شد (شکل ۸ ث). از لحاظ کروم، اکثر ایستگاه‌ها، آلودگی متوسط کروم را نشان دادند و تنها در دو ایستگاه واقع در اطراف مرکز بوشهر و انتهای غربی این استان، غیر آلوده به کروم بودند (شکل ۸ ج).



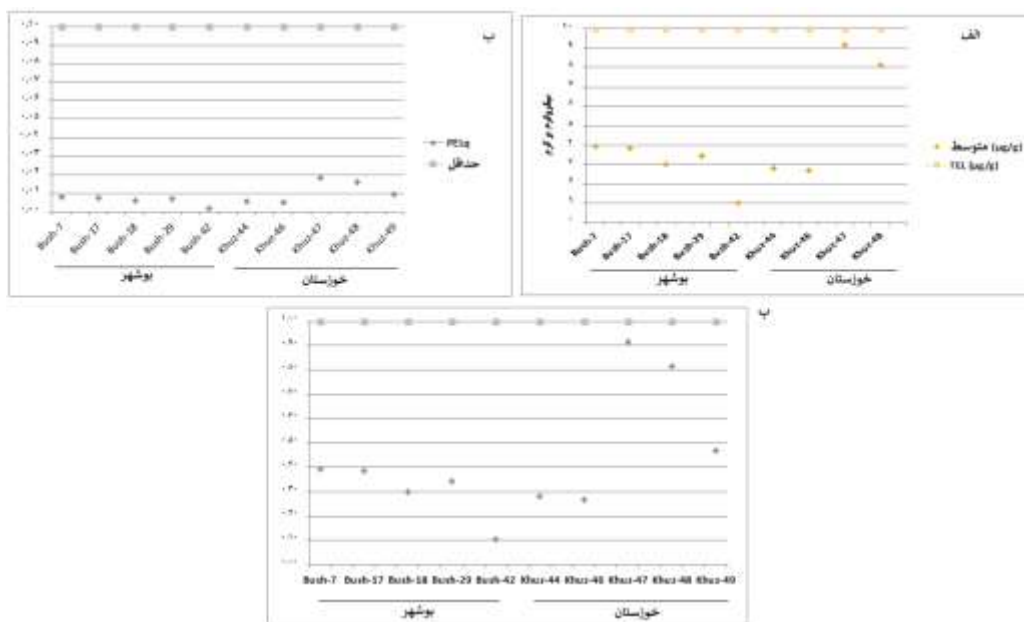
شکل ۸. الگوی پراکنش مکانی شاخص تجمع زیستی (Igeo) فلزات سنگین (الف نیکل، ب سرب، پ روی، ت مس، ث کادمیوم و ج کروم، خلیج-فارس، سال ۱۳۹۹) توجه شود که تنها الگوی پراکنش مکانی در اطراف ایستگاه‌های نمونه‌برداری مد نظر می‌باشد.

رسوبات در استان خوزستان در مقایسه با بوشهر دارای غلظت بیشتری از هیدروکربن‌های نفتی کل بود (شکل ۹ الف و ب)، بطوریکه بیشترین غلظت با مقدار  $9173/23 \pm 6478/25$  میکروگرم بر کیلوگرم وزن خشک در ایستگاه Khuz-47 مشاهده گردید (شکل ۹ الف) و استان بوشهر در برگیرنده حداقل غلظت با مقدار  $1040/79 \pm 215/20$  در ایستگاه Bush-42 بود (شکل ۹ الف). در شکل ۹ ب، الگوی پراکنش مکانی هیدروکربن‌های نفتی کل نشان داده شده است که نشان دهنده شدت آلودگی از بوشهر به سمت استان خوزستان می‌باشد.



شکل ۹. الف) توزیع هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات خلیج فارس به تفکیک استان، ب) الگوی پراکنش مکانی غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل

بررسی شاخص های اکولوژیکی هیدروکربن های نفتی کل نشان داد، رسوبات نواحی مورد بررسی در سال ۱۳۹۹، در طبقه بندی غیر آلوده تا آلودگی ناچیز قرار می گیرند و بالاترین غلظت ها به حد آستانه در رسوبات استان خوزستان مشاهده گردید (شکل ۱۰ الف). بررسی شاخص سمیت (PELq) در تمامی مناطق نشان داد که، مقادیر ناشی از هیدروکربن های نفتی کل در رسوبات خلیج فارس بسیار پایین تر از حد ۰/۱ می باشد که نشان دهنده عدم اثرات بیولوژیکی نامطلوب هست (شکل ۱۰ ب). دامنه تغییرات ضریب آلودگی (CF) در سال ۱۳۹۹، ۰/۹۲ - ۰/۱ بود که نشان دهنده عدم آلودگی یا آلودگی بسیار پایین به هیدروکربن های نفتی کل می باشد (شکل ۱۰ پ). با این حال مقدار ضریب آلودگی به سمت استان خوزستان روند افزایشی را نشان داد (شکل ۱۰ پ).



شکل ۱۰. الف) مقایسه پراکندگی میانگین غلظت های هیدروکربن های نفتی کل در رسوبات خلیج فارس با مقادیر استاندارد، ب) شاخص سمیت (PELq) در رسوبات خلیج فارس، پ) ضریب آلودگی (CF) ترکیبات نفتی در رسوبات خلیج فارس در سال ۱۳۹۹.

### بحث

در این مطالعه، ارزیابی جامع میزان فلزات سنگین و در رسوبات سطحی نواحی ساحلی و دور از ساحل جهت تشخیص منابع احتمالی آلودگی رسوبات، و تعیین درجه آلودگی در این مناطق، انجام شد، که به عنوان یکی از اهداف اولیه در تحقیقات محیطی، شناخته می شود. علاوه بر غلظت فلزات سنگین، پراکنش مکانی هیدروکربن های نفتی کل نیز در طول سواحل خلیج فارس از بوشهر تا خوزستان در سال ۱۳۹۹ مورد بررسی قرار گرفت. نواحی مورد مطالعه، از لحاظ آلودگی فلزات سنگین و هیدروکربن های نفتی کل در رسوبات، قابل تفکیک و متمایز بودند. مقادیرهای متفاوت فلزات سنگین در ایستگاه های مختلف، می تواند به خاطر تنوع در منابع آلوده کننده باشد (۲۷، ۳۶). از جمله عوامل مؤثر در توزیع هیدروکربن ها در محیط دریایی می توان، نزدیکی به منابع آلوده کننده، انرژی امواج، نوع رسوب و میزان ذرات معلق را نام برد (۳۷). غلظت های بالای فلزات در هر منطقه نشان دهنده جذب و تجمع بالا این فلزات در رسوبات این مناطق می باشد. همبستگی بالا بین فلزات کروم، مس و نیکل در رسوبات مشاهده شد که نشان دهنده منشأ مشترک این سه فلز هست و در توافق با یافته های (۱۸) در مطالعه روی ریف های جزایر مرجانی خلیج فارس و (۶) در مطالعه رسوبات ساحلی غرب بندرعباس می باشد.

مناطق دو استان بوشهر و خوزستان توسط درجه قابل توجهی از نیکل، روی و کادمیوم آلوده بودند. ایستگاه‌های واقع در اطراف نخیلو در ناحیه حفاظت‌شده مند، بوشهر، غلظت‌های بالایی از نیکل را داشتند. غلظت‌های بالای نیکل در این مطالعه در توافق با یافته‌های (۱۲،۲۲) از بوشهر، (۲۹) از تنگه خوران، (۱۵،۱۶) از خور موسی، خوزستان و (۱۸) از ریف‌های مرجانی خلیج‌فارس می‌باشد. در بین فلزات سنگین گزارش شده از خلیج‌فارس، کروم، نیکل و وانادیم، به‌عنوان عناصر غالب در رسوبات، در مقایسه با دیگر فلزات، دسته‌بندی شده‌اند (۲۹،۳۸). نیکل به‌عنوان عامل اصلی ریسک اکولوژیکی در خلیج‌فارس، در بسیاری از گزارشات پیشین، عنوان شده است، که نه‌تنها به صورت فراوان در رسوبات سطحی یافت می‌شود (۱۲،۱۵،۱۶،۲۲،۲۹)، بلکه هم‌چنین در رسوبات آب‌های عمیق، به‌طور غالب مشاهده شده است (۱۸). فعالیت‌های بالا صنایع گاز و پتروشیمی در خلیج‌فارس نشأت‌های نفتی، به‌عنوان منابع احتمالی تجمع بالا نیکل در این منطقه، گزارش شده است (۱۲،۲۲،۳۹،۴۰).

غلظت‌های بالایی از روی در ایستگاه‌های اطراف نخیلو، بوشهر، وجود داشت. در مطالعه‌ای توسط (۲۱)، هم‌چنین غلظت‌های نسبتاً بالایی از روی در این منطقه، به‌عنوان منطقه شهری (نخیلو، بوشهر) مشاهده شد. روی به‌عنوان یک عنصر ضروری برای حیات آبزیان شناخته می‌شود. با این حال، غلظت‌های بیش از حد روی می‌تواند برای موجودات زنده سمی باشد. فلز روی در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی، کشاورزی و خوراک، از جمله خوراک میگو استفاده می‌شود (۲۷). سنتز مواد زینتی، باتری‌ها، و بسته‌بندی ضایعات و دفعی به‌عنوان منابع احتمالی تجمع روی، گزارش شده است (۴۱). تخلیه‌های متنوع زباله‌ها و پساب‌های آلوده از صنایع مختلف به سواحل، به‌عنوان دلایل احتمالی تجمع بالا روی در رسوبات خلیج‌فارس، در گزارشات پیشین، نشان داده شده است (۱۲،۲۱). علاوه بر پساب‌های شهری و صنعتی، مزارع پرورش میگو (۲۷)، سایش مکانیکی قطعات وسایل نقلیه (۲۱) فعالیت‌های معدنی، رواناب و پساب‌های خانگی (۱۸،۱۹،۲۹،۴۲) به‌عنوان منابع بالقوه روی در خلیج‌فارس گزارش شده است.

غلظت‌های بالایی از کادمیوم در در اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری مشاهده شد. ایستگاه حوالی اسکله بحرکان در خوزستان، حداکثر غلظت کادمیوم را نشان داد. برخی ویژگی‌های کادمیوم شامل تحرک بالا در محیط رسوبی، و در نتیجه تجمع بالا در موجودات آبی، و پتانسیل برای سمیت مزمن، حتی در غلظت‌های پایین، آن را به فلزی با بیش‌ترین نگرانی تبدیل کرده است (۲۰،۴۳). منابع انسانی مختلفی برای کادمیوم گزارش شده است که شامل استخراج و پالایش فلزات غیر آهنی، صید، پوشش‌های ضد رسوب، تولید کودهای فسفاته و دفع زباله (۲۹،۴۴،۴۵) می‌باشد. کادمیوم عموماً در آبکاری‌ها، رنگدانه‌ها، تثبیت‌کننده‌های پلاستیکی، و باتری‌های نیکل-کادمیوم استفاده می‌شوند و از طریق ایستگاه‌های برق، سیستم‌های گرمایشی، صنایع فلزکاری یا ترافیک شهری، به محیط رهاسازی می‌شود (۴۶). مشابه این مطالعه غلظت‌های بالایی از کادمیوم در منطقه نخیلو بوشهر (۲۱)، منطقه خلیج چابهار (۴۷)، جزایر ریف‌های مرجانی خلیج‌فارس (۱۸)، خور خمیر و تیاب (۲۷)، مانگروه‌های حرا قشم و خمیر (۳۲)، و خور آذینی (۳۲) مشاهده شد که نشان‌دهنده غلظت‌های بالای کادمیوم در اکثر مطالعات در محدوده خلیج‌فارس و دریای عمان هست و می‌تواند هشدار دهنده باشد. با توجه پراکندگی غلظت کادمیوم در دو استان و بالا بودن غلظت آن در اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری، منابع انسانی مختلفی برای این آلاینده در این مطالعه می‌توان در نظر گرفت که احتمالاً ورود فاضلاب‌های شهری و صنعتی، پوشش‌های ضد رسوب، ایستگاه‌های برق، سیستم‌های گرمایشی و ترافیک شهری باشد. غلظت‌های بالاتری از هیدروکربن‌های نفتی کل هم‌چنین در استان خوزستان نسبت به بوشهر مشاهده شد. به‌طور کلی تأسیسات ساحلی مانند اسکله‌های صیادی و تجاری، تأسیسات شناسایی و استخراج نفت و گاز و هم‌چنین تردد شناورهای صیادی و تجاری کوچک و بزرگ از منابع افزایش غلظت هیدروکربن‌های نفتی می‌باشد (۴۸). مطالعه جامع روی توزیع مکانی-زمانی هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات خلیج‌فارس از سواحل عراق، ایران، کویت، عربستان سعودی، بحرین، قطر، امارات متحده عربی و عمان نشان داد که دامنه تغییرات آن از ۰/۱۳۴ تا ۴۸۰۱۸ میکروگرم بر گرم وزن تر می‌باشد که در پاره‌ای از موارد غلظت به‌طور قابل توجهی بالاتر از حدود استاندارد بود. بیشتر مکان‌هایی که سطح آلودگی بالایی داشتند، نزدیک منابع نقطه‌ای مانند تأسیسات و بنادر نفتی بوده‌اند (۴۸). بررسی شاخص‌های اکولوژیکی هیدروکربن‌های نفتی کل در سال ۱۳۹۹ نشان داد که نواحی ساحلی بوشهر و خوزستان در محدوده آلودگی کم و ایمن از اثرات زیستی نامطلوب ناشی از این هیدروکربن‌ها، هستند. به‌طور کلی علی‌رغم وجود منابع متعدد ایجاد آلودگی نفتی در خلیج

فارس، چندین عامل به احتمال زیاد موجب کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در منطقه مورد مطالعه شده است که از جمله می‌توان به شرایط آب و هوایی (دمای زیاد منطقه و در نتیجه افزایش تجزیه مواد نفتی توسط میکروارگانیسم‌ها) و انرژی هیدرودینامیکی قوی جریان‌های آبی اشاره کرد (۵۱-۴۹). درصد زیاد ذرات ماسه و همچنین مقدار کم ماده آلی موجود در رسوبات نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل اصلی کاهش بار آلودگی نفتی در رسوبات مورد مطالعه باشد.

### نتیجه‌گیری

مناطق مورد بررسی در این مطالعه، می‌تواند یک انتخاب مناسب جهت بررسی ارزیابی ریسک سلامت اکولوژیکی فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی کل، با استفاده از شاخص‌های شیمیایی آلودگی، در جهت ناهمگنی محیطی در مقیاس مکانی باشند و اطلاعات مفید و زمانی درباره سطح آلودگی بیان کند. متوسط شاخص‌های آلودگی در دو استان بوشهر و خوزستان، مقدارهای نزدیک به هم را نشان داد و این دو استان دارای درجه و ریسک قابل توجهی از آلودگی نیکل و کادمیوم، به خصوص در منطقه نخیلو بوشهر بودند. با این حال، مقدار غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل، نشان‌دهنده عدم اثرات زیستی نامطلوب آن بود. استراتژی‌های جامع و چشم‌گیر جهت کنترل و کاهش این آلودگی‌ها، خصوصاً در مناطق آلوده، نیاز هست در نظر گرفته شود، تا منابع این آلودگی‌ها شناسایی، و مدیریت شوند. اطلاعات فراهم‌شده در این مطالعه، می‌تواند توسط سازمان‌های دولتی و حفاظت محیط زیست، استفاده شود، تا به صورت پیوسته اکوسیستم خلیج فارس و دریای عمان روی مقیاس مکانی بزرگ، خصوصاً در نواحی مجاور به تخلیه‌های کشاورزی و صنعتی، پایش و مدیریت شود.

**تشکر و قدردانی:** از کارشناسان بخش اکولوژی پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، هم‌چنین کارشناسان پژوهشکده میگو کشور و پژوهشکده آبی پروری جنوب کشور جهت کمک برای نمونه‌برداری و جمع‌آوری اطلاعات، قدردانی می‌گردد.

**تأییدیه‌های اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**سهم نویسندگان:** محمد صدیق مرتضوی و سیده لیلی محبی نوذر: روش‌شناسی، طراحی فرضیات تحقیق، تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله، سنا شریفیان: آنالیز داده‌ها، نگارش مقاله و طراحی نقشه‌ها؛ هادی کوهکن: آنالیزهای آزمایشگاهی؛ خسرو آیین‌جمشید و محسن مزرعاوی: کمک در جمع‌آوری نمونه.

**منابع مالی/حمایت‌ها:** این مطالعه تحت حمایت مالی موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور به‌عنوان بخشی از طرح پژوهشی مصوب این موسسه می‌باشد.

### منابع

1. Ravanbakhsh M, Zare Javid A, Hadi M, Jaafarzadeh Haghghi Fard N. Heavy metals risk assessment in fish species (*Johnius Belangerii* (C) and *Cynoglossus Arel*) in Musa Estuary, Persian Gulf. *Environ Res* [Internet]. 2020;188(C):109560. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109560>
2. Gholami S, Aghanajafizadeh S, Naderi M. Measurement the heavy metals content (Cd, Ni and Pb) in the muscle tissue of *Psettodes erumei* and *Psettodes erumei* of the Qeshm Island (Persian Gulf) TT -. *ijaah* [Internet]. 2016 Nov 1;2(2):25–33. Available from: <http://ijaah.ir/article-1-120-en.html>
3. Sheppard C, Al-Husiani M, Al-Jamali F, Al-Yamani F, Baldwin R, Bishop J, et al. The Gulf: a young sea in decline. *Mar Pollut Bull*. 2010 Jan;60(1):13–38.
4. Cunningham PA, Sullivan EE, Everett KH, Kovach SS, Rajan A, Barber MC. Assessment of metal contamination in Arabian/Persian Gulf fish: A review. *Mar Pollut Bull*. 2019;143:264–83.
5. Mohebbi-Nozar SL, Zakaria MP, Ismail WR, Mortazawi MS, Salimizadeh M, Momeni M, et al. Total petroleum hydrocarbons in sediments from the coastline and mangroves of the northern Persian Gulf. *Mar Pollut Bull*. 2015 Jun;95(1):407–11.
6. Mortazavi MS, Sharifian S, Mohebbi SL, Saraji F, Akbar zadeh GA. The spatial distribution and ecological risks of heavy metals in the North of Persian Gulf. *Int J Environ Sci Technol*. 2022;Accepted.
7. Idris AM, Eltayeb MAH, Potgieter-Vermaak SS, Van Grieken R, Potgieter JH. Assessment of heavy metals

- pollution in Sudanese harbours along the Red Sea Coast. *Microchem J.* 2007;87(2):104–12.
8. Peng J, Song Y, Yuan P, Cui X, Qiu G. The remediation of heavy metals contaminated sediment. *J Hazard Mater* [Internet]. 2009;161(2):633–40. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408006122>
  9. Papagiannis I, Kagalou I, Leonardos J, Petridis D, Kalfakakou V. Copper and zinc in four freshwater fish species from Lake Pamvotis (Greece). *Environ Int* [Internet]. 2004;30(3):357–62. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412003001879>
  10. Ahmed MK, Baki MA, Islam MS, Kundu GK, Habibullah-Al-Mamun M, Sarkar SK, et al. Human health risk assessment of heavy metals in tropical fish and shellfish collected from the river Buriganga, Bangladesh. *Environ Sci Pollut Res.* 2015;22(20):15880–90.
  11. Chiarelli R, Roccheri M. Marine Invertebrates as Bioindicators of Heavy Metal Pollution. *Open J Met.* 2014 Jan 1;04:93–106.
  12. Bibak M, Sattari M, Tahmasebi S, Kafaei R, Sorial GA, Ramavandi B. Trace and Major Elements Concentration in Fish and Associated Sediment–Seawater, Northern Shores of the Persian Gulf. *Biol Trace Elem Res.* 2021;199(7):2717–29.
  13. Keshavarzi B, Hassanaghaei M, Moore F, Rastegari Mehr M, Soltanian S, Lahijanzadeh AR, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment in three commercial fish species in the Persian Gulf. *Mar Pollut Bull.* 2018;129(1):245–52.
  14. Rezaei M, Mehdinia A, Saleh A, Modabberi S, Mansouri Daneshvar MR. Environmental assessment of heavy metal concentration and pollution in the Persian Gulf. *Model Earth Syst Environ* [Internet]. 2021;7(2):983–1003. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00913-8>
  15. Rastegari Mehr M, Keshavarzi B, Moore F, Fooladivanda S, Sorooshian A, Biester H. Spatial distribution, environmental risk and sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments-northwest of Persian Gulf. *Cont Shelf Res* [Internet]. 2020;193:104036. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.104036>
  16. Lahijanzadeh AR, Rouzbahani MM, Sabzalipour S, Nabavi SMB. Ecological risk of potentially toxic elements (PTEs) in sediments, seawater, wastewater, and benthic macroinvertebrates, Persian Gulf. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2019;145(May):377–89. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.030>
  17. Faraji Ghasemi F, Dobaradaran S, Saeedi R, Nabipour I, Nazmara S, Ranjbar Vakil Abadi D, et al. Levels and ecological and health risk assessment of PM2.5-bound heavy metals in the northern part of the Persian Gulf. *Environ Sci Pollut Res.* 2020;27(5):5305–13.
  18. Ranjbar Jafarabadi A, Mitra S, Raudonytė-Svirbutavičienė E, Riyahi Bakhtiari A. Large-scale evaluation of deposition, bioavailability and ecological risks of the potentially toxic metals in the sediment cores of the hotspot coral reef ecosystems (Persian Gulf, Iran). *J Hazard Mater.* 2020;400.
  19. Ranjbar Jafarabadi A, Riyahi Bakhtiari A, Spanò N, Cappello T. First report of geochemical fractionation distribution, bioavailability and risk assessment of potentially toxic inorganic elements in sediments of coral reef Islands of the Persian Gulf, Iran. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2018;137(September):185–97. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.052>
  20. Mirzaei M, Hatamimanesh M, Haghshenas A, Moghaddam SM, Ozunu A, Azadi H. Spatial-seasonal variations and ecological risk of heavy metals in Persian gulf coastal region: Case study of Iran 05 Environmental Sciences 0502 Environmental Science and Management 04 Earth Sciences 0402 Geochemistry. *J Environ Heal Sci Eng.* 2020;18(1):91–105.
  21. Arfaeinia H, Dobaradaran S, Moradi M, Pasalari H, Mehrizi EA, Taghizadeh F, et al. The effect of land use configurations on concentration, spatial distribution, and ecological risk of heavy metals in coastal sediments of northern part along the Persian Gulf. *Sci Total Environ* [Internet]. 2019;653:783–91. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.009>
  22. Haghshenas V, Kafaei R, Tahmasebi R, Dobaradaran S, Hashemi S, Sahebi S, et al. Potential of green/brown algae for monitoring of metal(loid)s pollution in the coastal seawater and sediments of the Persian Gulf: ecological and health risk assessment. *Environ Sci Pollut Res.* 2020;27(7):7463–75.
  23. Souri A, Niyogi S, Naji A. Distribution, source apportionment, bioavailability and ecological risks of metals in reef sediments and corals of the Persian Gulf (Iran): Khark Island, Chirouyeh, and Hendorabi Island. *Mar Pollut Bull.* 2019;149:110654.
  24. Souri A, Masoodi M, Niyogi S, Naji A. Speciation and risk assessment of selected trace metals in bottom sediment of coral reef ecosystems of the Persian Gulf. *Environ Sci Pollut Res.* 2020;27(17):21416–28.
  25. Dehghani M. Study of fish mangrove communities and comparison of traditional fisheries methods in Hara Biosphere Reserve. *Mar Biodivers Rec* [Internet]. 2014/09/29. 2014;7:e107. Available from:



- <https://www.cambridge.org/core/article/study-of-fish-mangrove-communities-and-comparison-of-traditional-fisheries-methods-in-hara-biosphere-reserve/1B4DE795F799EBAD48927CE469FCDCE1>
26. Kamrani E, Sharifinia M, Hashemi SH. Analyses of fish community structure changes in three subtropical estuaries from the Iranian coastal waters. *Mar Biodivers* [Internet]. 2016;46(3):561–77. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12526-015-0398-5>
  27. Sharifinia M, Taherizadeh M, Namin JI, Kamrani E. Ecological risk assessment of trace metals in the surface sediments of the Persian Gulf and Gulf of Oman: Evidence from subtropical estuaries of the Iranian coastal waters. *Chemosphere*. 2018;191:485–93.
  28. Dehghani M, Sharifian S, Taherizadeh MR, Nabavi M. Tracing the heavy metals zinc, lead and nickel in banana shrimp (*Penaeus merguensis*) from the Persian Gulf and human health risk assessment. *Environ Sci Pollut Res* [Internet]. 2021; Available from: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13063-w>
  29. Mirza R, Moeinaddini M, Pourebrahim S, Zahed MA. Contamination, ecological risk and source identification of metals by multivariate analysis in surface sediments of the khouran Straits, the Persian Gulf. *Mar Pollut Bull*. 2019;145:526–35.
  30. Sharifian, S., Taherizadeh MR, Dehghani M, Nabavi M. Food safety of the green tiger shrimp *Penaeus semiculcatus* from the Persian Gulf. *Environ Sci Pollut Res*. 2022;29:23861–23870.
  31. Mirza R, Mohammadi M, Faghiri I, Abedi E, Fakhri A, Azimi A, et al. Source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment samples from the northern part of the Persian Gulf, Iran. *Environ Monit Assess* [Internet]. 2014;186(11):7387–98. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3935-y>
  32. Ghasemi S, Moghaddam SS, Rahimi A, Damalas CA, Naji A. RETRACTED: Ecological risk assessment of coastal ecosystems: The case of mangrove forests in Hormozgan Province, Iran. *Chemosphere* [Internet]. 2018;191:417–26. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517316272>
  33. MOOPAM. Manual of Oceanographic Observation and Pollutant Analyses Methods. Regional Organization for the Protection of the Marine Environment, Kuwait (ROPME). 2010. 1–54 p.
  34. Monazami Tehrani, G.H., Hshim R, Sulaiman AH, Tavakoly SB, Sany RKJ, Tehrani ZM. Assessment of Contamination by Petroleum Hydrocarbons in Sediments of Musa Bay, Northwest of the Persian Gulf-Iran. *Int Conf ofEn Environ Energy Biotechnol IPCBEE*. 2012;33:75–80.
  35. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Res* [Internet]. 1980;14(8):975–1001. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135480901438>
  36. Wade TL, Sweet ST, Klein AG. Assessment of sediment contamination in Casco Bay, Maine, USA. *Environ Pollut* [Internet]. 2008;152(3):505–21. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749107003685>
  37. Silva CS, Moreira ITA, de Oliveira OMC, Queiroz AFS, Garcia KS, Falcão BA, et al. Spatial distribution and concentration assessment of total petroleum hydrocarbons in the intertidal zone surface sediment of Todos os Santos Bay, Brazil. *Environ Monit Assess*. 2014 Feb;186(2):1271–80.
  38. Neyestani MR, Bastami KD, Esmailzadeh M, Shemirani F, Khazaali A, Molamohyeddin N, et al. Geochemical speciation and ecological risk assessment of selected metals in the surface sediments of the northern Persian Gulf. *Mar Pollut Bull*. 2016 Aug;109(1):603–11.
  39. Pourang N, Nikouyan A, Dennis JH. Trace Element Concentrations in Fish, Surficial Sediments and Water from Northern Part of the Persian Gulf. *Environ Monit Assess*. 2005;109(1):293–316.
  40. Kafaei R, Rezaei M, Ahmadi M, Tahmasebi R, Dobaradaran S, Omidvar M, et al. Metal(loid)s urinary level among workers of gas refinery and petrochemical companies: Health risk assessment of metal(loid)s in drinking water and dust. *J trace Elem Med Biol organ Soc Miner Trace Elem*. 2019 Jul;54:183–90.
  41. Chen X, Lu X. Contamination characteristics and source apportionment of heavy metals in topsoil from an area in Xi'an city, China. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2018 Apr;151:153–60.
  42. Ranjbar Jafarabadi A, Riyahi Bakhtiyari A, Shadmehri Toosi A, Jadot C. Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran. *Chemosphere* [Internet]. 2017;185:1090–111. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517311633>
  43. Wilson MJ, Bell N. Acid deposition and heavy metal mobilization. *Appl Geochemistry* [Internet]. 1996;11(1):133–7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0883292795000887>
  44. Hou D, He J, Lü C, Ren L, Fan Q, Wang J, et al. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2013 Jul;93:135–44.
  45. Obasi PN. Occurrence and distribution of heavy metal in arable soils around lead–zinc mining sites of

- Abakaliki, Southeast Nigeria. *Model Earth Syst Environ* [Internet]. 2020;6(3):1887–99. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00800-2>
46. Jumbe A, Nandini N. Impact assessment of heavy metals pollution of Vartur lake, Bangalore. *J Appl Nat Sci*. 2009 Jun 1;1:53–61.
47. Agah H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment, fish, and human hair from Chabahar Bay, Makoran, Iran. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2021;169:112345. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X21003799>
48. Uddin S, Fowler SW, Saeed T, Jupp B, Faizuddin M. Petroleum hydrocarbon pollution in sediments from the Gulf and Omani waters: Status and review. *Mar Pollut Bull*. 2021 Dec;173(Pt A):112913.
49. Ololade I, Lajide L, Amoo I. Spatial trends of petroleum hydrocarbons in water and sediments. 2009;7(1):83–9. Available from: <https://doi.org/10.2478/s11532-008-0086-4>
50. Li Y, Zhao Y, Peng S, Zhou Q, Ma LQ. Temporal and spatial trends of total petroleum hydrocarbons in the seawater of Bohai Bay, China from 1996 to 2005. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2010;60(2):238–43. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X09004020>
51. Tehrani GM, Tavakoly Sany SB, Hashim R, Salleh A. Predictive environmental impact assessment of total petroleum hydrocarbons in petrochemical wastewater effluent and surface sediment. *Environ Earth Sci* [Internet]. 2016;75(2):177. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4918-1>

## Spatial distribution and ecological risk of heavy metals and Total Petroleum Hydrocarbon (TPHs) in marine sediments of Bushehr and Khuzestan Provinces, Northwestern Persian Gulf

Mohammad Seddiq Mortazavi<sup>1\*</sup>, Seyede Laili Mohebbi Nozar<sup>1</sup>, Sana Sharifian<sup>1</sup>, Hadi Koohkan<sup>1</sup>, Khosrow Aein Jamshid<sup>2</sup>, Mohsen Mazravai<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Persian Gulf and Oman Sea Ecological Research Center, Iranian Fisheries Sciences Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Bandar Abbas, Hormozgan

<sup>2</sup>Iranian Fisheries Sciences Research Center, Iranian Fisheries Sciences Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr

<sup>3</sup>South Iran Aquaculture Research Institute, Iranian Fisheries Sciences Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Khuzestan

### ABSTRACT

In this study, a comprehensive assessment of the occurrence and spatial distribution of heavy metals including Nickel, Lead, Zinc, Copper, Cadmium and Chromium, as well as, TPHs in the surface sediments of the coastal areas and far from the coast of the Persian Gulf in Bushehr and Khuzestan provinces were performed to identify the possible sources of sediment contamination and determining the degree of pollution. Eight pollution indices were used to evaluate the quality of sediments in terms of heavy metal and TPH pollution. The investigated areas could be distinguished by a significant degree of heavy metal pollution of Nickel, Cadmium and Zinc. High concentrations of Nickel and Zinc were observed in stations around Nakhiloo, Bushehr. The comparison of average pollution indices between regions showed that both Bushehr and Khuzestan provinces, respectively, with the average of contamination degree (CD) (20.25 and 22.11), modified contamination degree (MCD) (3.38 and 3.69), pollution load index (PLI) (31.17 and 57.57), potential ecological risk index (PERI) (353.54 and 349.39) have a significant degree and risk of Nickel and Cadmium pollution, especially in Nakhiloo area, Bushehr. Investigating the spatial fluctuations of the concentration of TPHs in two provinces showed an increasing trend from Bushehr to Khuzestan. However, areas were located in no pollution or low pollution zonation and were safe from the adverse biological effects of TPHs. Comprehensive and impressive strategies to control and reduce these pollutions, especially in polluted areas, should be considered, so that the sources of these pollutions be managed.

**KEYWORDS:** Ecological indicators, Heavy metal concentration, Environmental heterogeneity, Sediment pollution

### ARTICLE TYPE

Original Research

### ARTICLE HISTORY

Received: 12 oct 2023

Accepted: 4 Feb 2024

ePublished: 20 Feb 2024

\* Corresponding Author: Mohammad Seddiq Mortazavi

Email address: mseddiq1@yahoo.com

Tel: +989171614049

© Published by Tarbiat Modares University

ISSN: 2322-5513