اکوهیدرولوژی
دورهٔ ۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۰، ص ۴۲۹-۴۱۱

سنجش و ارزیابی خطر آلودگی آب و رسوبات ساحلی در مصب خورهای شهر بندرعباس

احمد نوحه‌گر[1*]، سمانه حبیبی[2]، محمود بهروزی[3]

۱. استاد ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ محیط زیست، دانشگاه تهران

۲. دکتری تخصصی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

۳. دکتری تخصصی آب‌وهواشناسی- مخاطرات محیطی، دانشگاه ملایر

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۰/۰۳، تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۲/۲۲)

چکیده

امروزه یکی از مشکلاتی که اکولوژی ساحلی را تهدید می‌کند، ورود پساب‌های شهری از طریق خورها به دریا است. تخلیهٔ پساب‌ها به خورهای چهارگانهٔ بندرعباس، سبب آلودگی سواحل خلیج فارس می‌شود که برای تدوین راهبردهای مدیریت در کاهش ریسک خطر آلودگی، پایش آلاینده‌ها در اولویت است. به این منظور و برای دستیابی به این رهیافت، پژوهش حاضر پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب و فلزات سنگین در رسوبات خورهای چهارگانهٔ بندرعباس شامل خور سورو، گورسوزان، شیلات و نخل ناخدا را طی چهار فصل در سال ۱۳۹۸ پایش کرده و با شاخص‌های آلودگی ارزیابی کرد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد غلظت DO، BOD، COD، TSS، Cd، Zn، NO_3، PO_4، دترجنت و چربی‌ها در چهار خور بندرعباس، بیشتر از حد استاندارد محیط زیست بود. اختلاف توزیع زمانی و مکانی آلاینده‌های کیفی آب در سطح ۹۵ درصد معنادار بود و بیشینهٔ آن در خور گورسوزان و از لحاظ زمانی نیز به‌ترتیب در تابستان، بهار، پاییز و زمستان بود. الگوی متوسط غلظت فلزات سنگین در رسوبات Zn>Cu>Pb>Cd بود که به‌ترتیب میانگین غلظت آنها ۱۰۳/۲۰، ۵۲/۵۵، ۱۹/۹۵ و ۰/۶۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری شد. بیشینهٔ غلظت فلزات سنگین در خور گورسوزان بود و ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات با شاخص‌های I_{geo}، CF، mdc و PLI نشان داد کادمیوم، مس و سرب در چهار خور بندرعباس، در طبقهٔ آلودگی متوسط تا شدید قرار دارند. غلظت زیاد فلزات سنگین بیانگر تأثیر فعالیت‌های انسانی شامل تخلیهٔ پساب‌های شهری به کانال خور است. نتایج پایش کیفی نشان‌دهندهٔ شدت زیاد آلودگی در ساحل بندرعباس است که اکوسیستم آبزیان را با خطر انقراض تهدید می‌کند.

کلیدواژگان: اکسیژن محلول، پساب شهری، خور گورسوزان، شاخص بار آلودگی، فلزات سنگین.

* نویسندهٔ مسئول

Email: nohegar@ut.ac.ir

مقدمه

خورها در منطقهٔ حساس و برهم‌کنش زمین و دریا قرار گرفته‌اند و در معرض آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی و طبیعی به‌خصوص فلزات سنگین هستند که اکوسیستم‌های ساحل- خور را با خطر انقراض مواجه می‌سازند [۱]. فلزات سنگین به عنوان منابع اصلی آلودگی در محیط‌های آبی در نظر گرفته می‌شوند که به دلیل سمیت زیاد، تجمع زیستی، خطر محیط زیستی، ماندگاری و عدم تخریب‌پذیری در محیط، نگرانی‌های گسترده‌ای را در سراسر جهان به‌ویژه در محیط‌ها و اکوسیستم‌های آبی به خود جلب کرده‌اند [۲]. این مسائل می‌تواند به عنوان تهدیدهای احتمالی شناخته شود که اکوسیستم‌ها و سلامت انسان را به خطر می‌اندازد. با توسعهٔ سریع اقتصادی- صنعتی، آلودگی فلزات سنگین طی سال‌های اخیر در اکوسیستم‌های آبی افزایش یافته و به یکی از مشکلات محیط زیستی برای حل و فصل آن تبدیل شده است [۳]. فلزات سنگین و دیگر عناصر آلودگی از راه منابع مختلف شامل رواناب‌های سطحی، بارش، فعالیت‌های انسانی ازجمله تخلیهٔ فاضلاب‌ها و دفع فاضلاب‌های صنعتی وارد محیط‌های خور و نواحی ساحلی می‌شوند [۴]. در این میان، فعالیت‌های انسانی به منبع اصلی آلودگی در بسیاری از مصب‌ها و مناطق ساحلی تبدیل شده و موجب افزایش محتوای فلزات سنگین در رسوبات سطحی خورها شده است [۵].

تخلیهٔ فاضلاب خانگی- صنعتی به خورها موجب افزایش چند برابری غلظت آلاینده‌های آبی می‌شود که کیفیت آب نواحی ساحلی و سلامت محیط آبزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۶ و ۷]. پساب‌های شهری حاوی مواد شوینده، چربی و روغن و فلزات سنگین هستند که در مصب خور، وارد دریا شده و بیشتر در رسوبات دهانهٔ خور انباشته می‌شوند [۸]. فعالیت‌های صنعتی و پالایشگاه‌ها، منجر به تولید پساب شده که در مناطق ساحلی، از طریق خورها وارد دریا می‌شوند. این پساب‌ها حاوی فلزات سنگین، چربی، روغن و مواد نفتی هستند که اکوسیستم آبی را با خطر انقراض مواجه می‌سازند [۹]. براساس استانداردهای سازمان بهداشت جهانی، تخلیهٔ فاضلاب‌ها به منابع آب‌های سطحی باید براساس استانداردهایی باشد که به صورت حداکثر غلظت آلاینده‌ها بیان می‌شود و رعایت این استانداردها تحت نظارت سازمان حفاظت محیط زیست است [۱۰]. در صورتی که غلظت پارامترهای آلودگی بیشتر از حد استاندارد آن باشد، اکوسیستم‌های نواحی ساحلی و آبی را با خطر مواجه می‌سازد [۱۱]. اکسیژن محلول (DO[1]) یکی از پارامترهای مهم کیفیت آب است که حیات موجودات آبزی به آن بستگی دارد و در صورت کاهش آن در آب، حیات آبزیان به خطر می‌افتد. با افزایش غلظت آلودگی آب، شاخص اکسیژن محلول در آب کاهش می‌یابد که حد استاندارد آن در آب‌های سطحی، ۲ میلی‌گرم در لیتر است [۱۲]. پارامترهای BOD[2] و COD[3] معیار مهمی در تعیین سطح آلودگی آب هستند [۱۳] و غلظت مواد آلوده‌کنندهٔ آلی در آب توسط اندازه‌گیری این پارامترها تعیین می‌شود که زیاد بودن غلظت این دو پارامتر، بیانگر شدت زیاد آلودگی آب است [۱۴] و حد استاندارد BOD و COD در اندازه‌گیری لحظه‌ای در آب‌های سطحی به‌ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. فلزات سنگین نیز یکی دیگر از پارامترهای کیفیت آب بوده که بیشتر شدن آن از حد استاندارد، بیانگر تهدید خطر آلودگی محیط آبزیان است. دترجنت‌ها، چربی و روغن نیز از پارامترهای کیفیت آب هستند که افزایش آنها از ۱/۵ میلی‌گرم در آب‌های سطحی، موجب آلودگی آب می‌شود [۱۵ و ۱۶]. مواد دفعی، استفاده از آب در زندگی شهری، مواد شوینده و سایر فعالیت‌های شهری- صنعتی مقدار زیادی نیتروژن و فسفر را به اکوسیستم‌های آبی وارد می‌کند. افزایش غلظت آنها از حد استاندارد (۵۰ و ۶ میلی‌گرم در لیتر) در آب، اثر منفی بر محیط آبزیان دارد و این غنی‌شدگی توسط مواد مغذی و یوترفیکاسیون منابع آبی می‌تواند روی ساختار و عملکرد اکوسیستم اثر بگذارد و علاوه بر آسیب به تنوع زیستی، پایداری و تعادل آن اکوسیستم را نیز مختل کند [۱۷].

خورهای سورو، گورسوزان، شیلات و نخل ناخدا از مناطق شمالی شهر بندرعباس سرچشمه می‌گیرند و با دریافت پساب‌های صنعتی- شهری با مسیر شمالی- جنوبی به خلیج فارس می‌ریزند. آلودگی ظاهری این خورها، بیانگر حجم غلظت زیاد آلاینده‌ها است که منجر به بوی نامطبوع در ساحل و شهر بندرعباس می‌شود. فلزات سنگین نیز بخشی از آلودگی خورهای بندرعباس است که اکوسیستم آبی خلیج فارس در نوار ساحلی را با خطر انقراض مواجه ساخته است. تا

1. Dissolved Oxygen
2. Biochemical Oxygen Demand
3. Chemical Oxygen Demand

کنون مطالعهٔ جامعی در این بخش صورت نگرفته است، به همین دلیل پژوهش حاضر سعی در سنجش و پایش غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب و فلزات سنگین در آب و رسوبات مصب خورهای شهر بندرعباس دارد. سؤال‌هایی در این پژوهش مطرح می‌شود که کدام یک از خورهای شهر بندرعباس، نقش بیشتری در آلوده کردن اکوسیستم‌های آبی بندرعباس دارد؟ یا اینکه آلودگی مصب خورهای بندرعباس از لحاظ شاخص‌های آلودگی در کدام طبقه قرار می‌گیرد؟ با توجه به مشاهدات میدانی و مطالعهٔ پژوهشگران، خور گورسوزان بیشترین نقش را در آلودگی اکوسیستم آبی بندرعباس دارد و در طبقهٔ آلودگی شدید قرار می‌گیرد.

پیشینهٔ پژوهش

پژوهشگران متعددی به بررسی و ارزیابی پارامترهای کیفی آب و رسوبات مصب ساحلی خورها پرداخته‌اند. فعالیت‌های صنعتی منطقهٔ ویژهٔ اقتصادی انرژی پارس موجب انتشار فلزات سنگین می‌شود که پژوهشگران برای ارزیابی خطر اکولوژیکی این فلزات، از رسوبات دریایی و دهانهٔ خورهای منطقه نمونه‌برداری کردند که الگوی فلزات سنگین در این رسوبات Fe>Zn>Cu>Ni>Cr>Pb>Cd>Hg بود. شاخص‌های آلودگی بیانگر وضعیت آلودگی کم و تا حدودی متوسط در منطقه بود (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶). در بررسی آلودگی خلیج گرگان، بیشترین غلظت فلزات سنگین در آب و رسوبات خلیج گرگان و مصب رودخانهٔ گرگان‌رود در مصب رودخانهٔ گرگان‌رود قره‌سو است. کمترین غلظت نیز در آب و رسوب ساحل گلوگاه و کانال خزینی مشاهده شد. در بین فلزات، سرب بیشترین مقدار را در آب و فلز روی بیشترین مقدار را در رسوب داشت [۱۸]. در رسوبات سطحی خور ریو د لاپلاتا[1] در منطقهٔ شهری مونته ویدئو در کشور اروگوئه، الگوی غلظت فلزات سنگین Zn>Cr>Cu>Pb>Ni>As>Sc>Cd است که در ۱۸ سایت از این خور، غلظت فلزات سنگین در طبقهٔ آلودگی کم تا متوسط قرار دارد [۱۹]. الگوی فلزات سنگین در بندرگاه‌های خلیج دوربان و ریچاردز[2] آفریقا، در بافت اندام خرچنگ دریایی Cu>Zn>Pb، در رسوبات ساحلی Zn> Cu> Pb> Cd و در آب خلیج نیز Cu> Zn> Pb> Cd بود. غلظت فلزات سنگین در رسوبات و آب خلیج بیش از حد مجاز بود، ولی غلظت آن در بافت اندام خرچنگ کمتر از حد استاندارد بود [۲۰]. در رودخانهٔ کلانتان[3] در مالزی که از طریق خور به دریا می‌ریزد، غلظت TOC[4] در رسوبات خور به حداقل می‌رسد؛ سرب در رسوبات خور به حداکثر خود رسیده است؛ کروم در رسوبات خور دیده شد، اما دیگر فلزات سنگین کمتر از حد استاندارد بود. اگرچه غلظت فلزات سنگین در رسوبات خور اندک بود، اما کاهش پارامتر TOC می‌تواند موجب غنی‌شدگی فلزات سنگین در خور شود. در خورهای بندر خمیر، تیاب و جگین در استان هرمزگان، پساب ناشی از پرورش میگو موجب افزایش غلظت روی، سرب، مس و کادمیوم در رسوبات مصب خور شده و اختلاف آنها با سواحل بکر معنادار است. از لحاظ ارزیابی خطر اکولوژیکی نیز آلودگی خورهای مطالعه‌شده در حد آلودگی متوسط تا زیاد است [۲۱]. در خور کوالا سلانگور[5] کشور مالزی، آلودگی فلزات سنگین در رسوبات جنگل‌های مانگرو بیشتر از حد استاندارد آن است و منطقه در خطر آلودگی اکولوژیکی قرار دارد؛ اما تراکم گونه‌های گیاهی حرا موجب تثبیت و تجمع فلزات سنگین در اندام گیاهی آن شده است و یک سیستم گیاه‌پالایی طبیعی در تصفیهٔ آلودگی خور به شمار می‌رود (El-Turk *et al.*, 2018). در خور کلانگ[6] شاخص‌های آلودگی رسوبات مانگرو بیانگر این بود که غلظت سرب در رسوبات از حد آستانه فراتر بوده و دارای آلودگی شدیدی است، منگنز و مس از لحاظ خطر زیست‌محیطی در طبقهٔ آلودگی متوسط قرار دارند [۲۲]. رودخانهٔ گنگا[7] در هندوستان، سالانه حجم زیادی از فاضلاب شهری-صنعتی را از طریق خور وارد اقیانوس هند می‌کند و غلظت ذرات معلق آب در خور بیشتر از مناطق بالادستی رودخانه است که این تفاوت از ورود فاضلاب‌های خام به خور نشئت می‌گیرد [۲۳]. در مصب خور رودخانهٔ شیانگ[8] در شمال شرقی کشور چین، غلظت پارامترهای آلودگی افزایش می‌یابد. ارزیابی فلزات سنگین در آب خور بیانگر میزان آلودگی از آلودگی بوده و الگوی فلزات سنگین در آن Zn>Cr>Cu|>Pb>As>Cd>Hg است؛ اما تجمع آنها در رسوبات ساحلی خور، موجب فراتر

1. Rio de La plata
2. Durban & Richards
3. Kelantan
4. Total Organic Carbon
5. Kuala Selangor
6. Klang
7. Ganga
8. Sheyang

رفتن غلظت فلزات از غلظت زمینه‌ای آنها می‌شود [۲۴]. پژوهشگران نشان دادند رسوبات کشاورزی، صنعتی و فاضلاب شهری عامل اصلی آلودگی خور دریای زرد هستند و بیشینهٔ آن طی فصل زمستان اتفاق می‌افتد؛ به گونه‌ای که الگوی غلظت فلزات سنگین در آب‌های سطحی خور Pb>Hg>Cu>Zn>Cd>As بوده و ارزیابی آلودگی آن بیانگر درجهٔ آلودگی شدید این خور است. غلظت مس و روی با دما و ذرات معلق در آب خور ارتباط معناداری داشتند. غلظت کادمیوم نیز با دما، ذرات معلق، COD و DO ارتباط معناداری دارد [۲۵]. پژوهشگران از ۲۰ نقطهٔ خلیج رودخانهٔ یانگ تسه در شرق کشور چین نمونه‌برداری کرده و غلظت فلزات سنگین را در آن اندازه‌گیری کردند که در مصب خور بیشترین غلظت مشاهده شد و با فاصله از آن، آلاینده‌ها کاهش می‌یابند (Li *et al.*, 2019). الگوی فلزات سنگین در آب خور انور[1] در جنوب شبه‌قارهٔ هند (دماغهٔ جنوبی کشور هند) Ni>Pb>Cu>Cr>Cd، در رسوبات Cr>Pb>Cu>Ni>Cd، در خرچنگ، صدف و پلی کت Cu>Cr>Pb>Ni>Cd و در ماهی‌ها Pb>Cr>Ni>Cu>Cd که تفاوت در ارگانیسم آبزیان ناشی از تفاوت در زیستگاه آنها بود [۲۶]. پژوهشگران غلظت فلزات سنگین در خور رودخانهٔ مقنا[2] در بنگلادش را با شاخص‌های اکولوژیکی بررسی کردند و نتایج پژوهش آنها بیانگر آلودگی کم فلزات سنگین در خور است [۲۷]. در خور داسون[3] در اندونزی، غلظت فلزات سنگین شامل کادمیوم، سرب و کروم اندازه‌گیری شد که شاخص BCF بیانگر این بود که کادمیوم آلودگی اکولوژیکی دارد که با توجه به تراکم زیاد گونهٔ گیاهی *Ipomoea pes-caprae* در مصب خور، اغلب کادمیوم در رسوبات و اندام گیاهی آن انباشته شده است [۲۸]. از لحاظ اکولوژیکی بیشترین خطری که خلیج باهیا بلانکا[4] در جنوب غربی اقیانوس اطلس (ساحل شرقی شهر باهیا بلانکای آرژانتین) را تهدید می‌کند، فلز سرب است که در بافت خرچنگ‌های آن به‌شدت انباشته شده و این آبزی را با خطر انقراض مواجه ساخته است [۲۹]. در خلیج فودو[5] کشور چین، غلظت فلزات سنگین ارزیابی شده و نتایج آن بیانگر این است که کادمیوم آلایندهٔ اصلی با خطر زیست‌محیطی متوسط است؛ کروم نیز ممکن است آثار بیولوژیکی منفی ایجاد کند که این آلودگی‌ها ناشی از پساب فعالیت‌های صنعتی و پرورش آبزیان در نوار ساحلی باشد (Wang *et al.*, 2020).

روش کار (مواد و روش‌ها)

شهر بندرعباس مرکز سیاسی- اداری استان هرمزگان در منتهی‌الیه جنوب ایران در ۲۶ درجه و ۵۸ دقیقهٔ عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۸۸ دقیقهٔ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. محدودهٔ شهر براساس طرح جامع حدود ۵۳۲۳/۵ هکتار مساحت دارد. ارتفاع متوسط شهر از سطح دریا حدود ۰/۶ تا ۴۰ متر است. جمعیت شهر بندرعباس در سال ۱۳۹۵حدود ۵۸۸ هزار نفر بوده است. شهر بندرعباس از جنوب به دریا، از شمال به ارتفاعات پولادین، از شرق به منطقهٔ نظامی و شهرک مسکونی نیروی هوایی و از غرب به شهرک مسکونی نیروی دریایی و اسکلهٔ تجاری و نظامی شهید باهنر محدود است. به دلیل وجود ارتفاعات شمالی شهر، شیب عمومی به صورت طبیعی از شمال به سوی جنوب و دریا و حدود ۳ تا ۴ درصد است. چهار خور در بندرعباس وجود دارد که جهت شمالی- جنوبی دارند و به دریا می‌ریزند.

خور سورو با طول تقریبی ۴/۴ کیلومتر، در غرب بندرعباس است و از شهرک مسکونی نیروی دریایی و اسکلهٔ باهنر نشئت می‌گیرد. خور گورسوزان با طول ۴ کیلومتر از تصفیه‌خانهٔ فاضلاب در شمال شهر شروع می‌شود و با عبور از مرکز شهر بندرعباس و دریافت پساب‌های شهری، به دریا می‌ریزد.

خور شیلات که از رواناب‌های ارتفاعات شمالی سرچشمه می‌گیرد و با مسیر انحنایی شمال- جنوب به دریا می‌ریزد، دارای طول تقریبی ۶ کیلومتر است.

خور نخل ناخدا نیز با طول تقریبی ۶/۴ کیلومتر از رواناب‌های شمالی سرچشمه گرفته است و با مسیر منحنی شمال- جنوب و دریافت پساب‌های شهری، در شرقی‌ترین نقطهٔ شهر بندرعباس و انتهای بلوار خلیج فارس، به دریا می‌ریزد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی خورهای مطالعه‌شده در شهر بندرعباس ارائه شده است که در آن نقاط آبی‌رنگ در نقشهٔ بندرعباس، بیانگر مصب خور در دریای خلیج فارس است که با وضوح بیشتر، دهانهٔ خورها به‌ترتیب از راست به چپ آورده شده است.

1. Ennore
2. Maghna
3. Dasun
4. Bahía Blanca
5. Fudo

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی خورهای شهر بندرعباس (به‌ترتیب نقطه‌گذاری روی نقشهٔ شهر بندرعباس: از راست به چپ: خور نخل ناخدا، خور شیلات، خور گورسوزان، خور سورو)

در راستای پایش و ارزیابی آلودگی خورهای بندرعباس، پژوهش حاضر در مقیاس فصلی، طی چهار فصل از سال ۱۳۹۸ انجام شد. چهار خور سورو، گورسوزان، شیلات و نخل ناخدا، جامعهٔ آزمایش را تشکیل داد و برای سنجش پارامترهای فیزیکوشیمیایی از آب و رسوبات مصب خورها نمونه‌برداری مقطعی انجام شد. در هر فصل، به صورت تصادفی ۱۰ بار عمل نمونه‌برداری از آب خورها (مصب خور در ورودی به دریای خلیج فارس) و در بین ساعت‌های ۱۰ـ ۱۲ ظهر (پیک حجم آب) انجام گرفت. نمونه‌های آب با توجه به استانداردهای نمونه‌برداری، با ظروف آزمایشگاهی انجام شده و به‌سرعت به آزمایشگاه آب و فاضلاب شهر بندرعباس انتقال داده شد و آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی و فلزات سنگین در نمونه‌های آب انجام شد. پس از هر بار نمونه‌برداری، ظروف کاملاً شسته و تمیز شد تا در نمونه‌برداری مرحلهٔ بعدی، خطایی رخ ندهد. به منظور اندازه‌گیری پارامترهای مختلف فیزیکوشیمیایی آب، در هر نقطه از چندین ظرف استفاده شد که شامل یک بطری و درپوش شیشه‌ای با حجم ۳۰۰ میلی‌متری برای سنجش DO، یک بطری شیشه‌ای با حجم هزار میلی‌متری برای سنجش BOD، دو بطری هزار میلی‌متری برای سنجش فلزات سنگین و یک بطری پلاستیکی هزار میلی‌متری برای چربی-روغن، دترجنت و کلی فرم‌های کل استفاده شد. نمونه‌های آب از مرکز خورها برداشت شد و در شرایط عدم دسترسی مستقیم، از طناب استفاده شد.

هنگام نمونه‌برداری از آب، از رسوبات سطحی مصب خورها (۰ - ۱۰ سانتی‌متر سطحی رسوبات) نیز نمونه‌برداری شده و برای سنجش غلظت فلزات سنگین، به آزمایشگاه انتقال داده شد. غلظت فلزات سنگین شامل کادمیوم (Cd)، روی (Zn)، سرب (Pb) و مس (Cu) در نمونهٔ خاک با روش هضم و جذب اتمی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد.

غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی و فلزات سنگین در آب و رسوبات سطحی مصب خورهای بندرعباس در مقیاس فصلی بررسی شد و اختلاف فصل‌ها با تحلیل واریانس یک‌طرفه و آزمون مقایسهٔ میانگین توکی بررسی شد. سپس، به منظور ارتباط بین پارامترهای کیفی آب، از همبستگی پیرسون در سطح معناداری ۰/۰۵ استفاده شد. پس از سنجش غلظت فلزات سنگین در رسوبات سطحی مصب خورهای بندرعباس، به منظور ارزیابی آن از شاخص‌های آلودگی استفاده شد.

شاخص آلودگی زمین‌انباشت (I_{geo}[1])

شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) طبق معادلهٔ ۱ آلودگی به فلزات سنگین را با توجه به نسبت غلظت هر فلز سنگین در نمونهٔ بررسی‌شده به غلظت زمینه‌ای آن فلز در پوستهٔ زمین محاسبه می‌کند:

$$I_{geo} = \log2 \left(Cn \ / \ 1.5\, Bn\right) \qquad (۱)$$

1. Geoaccumulation Index

که در آن، I_{geo} معرف شاخص زمین انباشتگی، Cn غلظت اندازه‌گیری‌شدهٔ فلز سنگین در نمونه و Bn غلظت زمینه‌ای همان فلز سنگین در پوستهٔ زمین است (جدول ۱). ضریب ۱/۵ نیز برای کمینه کردن تغییرات احتمالی در غلظت‌های زمینه‌ای ناشی از فعالیت‌های زمین شناسی اعمال می‌شود. مولر ۷ ردهٔ مختلف را برای این شاخص مشخص کرد که در آن، بالاترین رده مقادیر عناصر حداقل ۱۰۰ برابر مقادیر مرجع است [۳۰] (جدول ۲).

جدول ۱. غلظت زمینه‌ای عناصر در میانگین شیل (برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم)

آهن	کروم	مس	وناديوم	کبالت	نیکل	روی	سرب	کادمیوم	جیوه
۴۷۰۰	۹۰	۴۵	۱۳۰	۱۹	۵۰	۹۵	۲۰	۰/۳۸	۰/۴

جدول ۲. درجه‌بندی سطح آلودگی رسوبات براساس شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر (۱۹۶۹)

آلودگی	شاخص I_{geo} یا درجهٔ آلودگی	عدد به‌دست‌آمده برای شاخص تجمع ژئوشیمیایی
کاملاً غیرآلوده	۰	۰
غیرآلوده تا آلودگی متوسط	۱	۰ـ ۱
متوسط آلودگی	۲	۱ـ ۲
آلودگی متوسط تا شدید	۳	۲ـ ۳
آلودگی شدید	۴	۳ـ ۴
آلودگی شدید تا بسیار شدید	۵	۴ـ ۵
آلودگی بسیار شدید	۶	۵

فاکتور آلودگی CF[1]

اصولاً مقادیر ضریب آلودگی و درجهٔ آلودگی به‌ترتیب می‌توانند توصیفی از آلودگی مربوط به عنصر سنگین بررسی‌شده و آلودگی محیط رسوب را ارائه دهد، ضریب آلودگی از تقسیم کردن غلظت عنصر در نمونهٔ برداشت‌شده به غلظت همان عنصر رد نمونهٔ زمینه به دست می‌آید (جدول ۳). ضریب آلودگی هاکنسون از رابطهٔ ۲ به دست می‌آید [۳۱]:

$$CF = C_i / C_n \qquad (۲)$$

در این رابطه، C_i غلظت عنصر در نمونه و C_n غلظت همان فلز در مادهٔ مرجع (میانگین شیل) است.

جدول ۳. رده‌بندی هاکنسون برمبنای ضریب آلودگی (CF) رسوبات

ضریب آلودگی CF	ضریب آلودگی رسوب
کوچک‌تر از ۱	آلودگی کم
۱ تا ۳	آلودگی متوسط
۳ تا ۶	آلودگی قابل توجه
بزرگ‌تر مساوی ۶	آلودگی بسیار زیاد

شاخص آلودگی اصلاح‌شده mCd[2]

به دلیل وجود محدودیت‌هایی که در شاخص درجهٔ آلودگی توسط هاکنسون ارائه شده بود، رابطهٔ اصلاح‌شدهٔ ۳ براساس شاخص درجهٔ آلودگی ارائه شد:

$$mCd = \frac{\sum_{i=1}^{8} C_f^i}{n} \qquad (۳)$$

در این رابطه، CF فاکتور آلودگی و n تعداد پارامترهای بررسی‌شده است. این رابطه این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان تعداد متنوعی از فلزات سنگین را بدون محدودیت بررسی کرد. دسته‌بندی سطح آلودگی رسوبات براساس مقادیر کمی شاخص اصلاح‌شده درجهٔ آلودگی به صورت جدول ۴ ارائه شد (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶).

جدول ۴. درجه‌بندی سطح آلودگی رسوبات برمبنای شاخص آلودگی اصلاح‌شده mCd

محدودهٔ شاخص mCd	وضعیت آلودگی رسوب
۰ـ ۱/۵	درجهٔ بسیار کم از آلودگی
۱/۵ـ ۲	درجهٔ کم از آلودگی
۲ـ ۴	درجهٔ متوسط از آلودگی
۴ـ ۸	درجهٔ زیاد از آلودگی
۸ـ ۱۶	درجهٔ بسیار زیاد از آلودگی
۱۶ـ ۳۲	به‌شدت بسیار زیاد آلوده
بزرگ‌تر از ۳۲	آلودگی با درجهٔ مافوق زیاد

1. Contamination Factor
2. Modified Degree of Contamination

شاخص بار آلودگی (PLI[1])

این شاخص برای تعیین سطح آلودگی ارائه شده است و می‌توان تخمینی از سطح آلودگی فلزات را در اختیار ما قرار دهد. این شاخص از طریق حاصل ضرب شاخص‌های آلودگی فلزات به صورت فرمول ۴ قابل محاسبه است:

$$PLI = \sqrt[4]{CF_{cd} \times CF_{zn} \times CF_{pb} \times CF_{cu}} \quad (۴)$$

مقادیر شاخص بار آلودگی از صفر (غیرآلوده) تا ۱۰ بسیار آلوده تغییر می‌کند که به طور معمول، مقادیر کوچک تر از ۱ نشان‌دهندهٔ عدم آلودگی و مقادیر بزرگ‌تر از ۱ نشان‌دهندهٔ آلودگی نسبت به فلزات سنگین است [۳۲].

یافته‌ها

سنجش پارامترهای کیفی خور سورو در چهار فصل سال ۱۳۹۸ نشان داد بیشینهٔ غلظت آلاینده‌ها به‌ترتیب در تابستان، بهار، پاییز و زمستان است که در نیمهٔ گرمِ سال بیشتر از نیمهٔ سرد سال است. در فصول بهار و تابستان، غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب به‌جز کلیفرم‌ها، بیشتر از حد استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست است. پارامتر اکسیژن محلول (DO) یکی از عناصر مهم برای حیات آبزیان است که کاهش آن موجب مرگ گونه‌های آبزی می‌شود که در مصب خور سورو در غرب بندرعباس، غلظت آن کمتر از حد استاندارد است و اکوسیستم آبی آن منطقه را با خطر انقراض مواجه می‌سازد. حد استاندارد غلظت TSS در شرایط لحظه‌ای، ۶۰ میلی‌گرم در لیتر است که میانگین سالانهٔ آن در خور سورو ۷۶/۵ میلی‌گرم در لیتر است (جدول ۵). افزایش غلظت مواد معلق در آب موجب کدورت آب و کاهش نور دریافتی می‌شود و حیات آبزیان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیشینهٔ غلظت فلزات سنگین در تابستان بوده و از حد استاندارد آن فراتر است که تجمع زیستی فلزات در ارگانیسم موجودات آبزی، موجب آلودگی شده که سلامت آبزیان و انسان که از منابع دریایی استفاده می‌کنند را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

خور گورسوزان که از تصفیه‌خانهٔ فاضلاب در شمال شهر بندرعباس سرچشمه می‌گیرد و با دریافت فاضلاب خام شهری به دریا می‌ریزد، دارای آلودگی شدیدی است. در این خور نیز بیشینهٔ غلظت آلاینده‌ها به‌ترتیب در تابستان، بهار، پاییز و زمستان است. به‌جز غلظت کلیفرم‌ها، غلظت دیگر پارامترهای فیزیکوشیمیایی طی تابستان و بهار بیشتر از حد مجاز آن است. در پاییز و زمستان نیز به‌جز عنصر سرب (Pb) و کلی‌فرم‌ها، غلظت دیگر پارامترها بیشتر از حد مجاز آن است. حد استاندارد اکسیژن محلول (DO) در خروجی تصفیه‌خانه و ورود آن به منابع آب‌های سطحی، حداقل ۲ میلی‌گرم در لیتر است که کاهش آن حیات آبزیان را مختل می‌کند، اما میانگین سالانهٔ آن در خور گورسوزان ۰/۵۴ میلی‌گرم در لیتر است که یک مشکل زیست‌محیطی برای حیات آبزیان است (جدول ۶). پارامترهای BOD و COD نیز از پارامترهای مهم کیفی آب هستند که حد استاندارد آنها به‌ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط لحظه‌ای است، اما میانگین سالانهٔ آنها در مصب خور گورسوزان به‌ترتیب ۴۳۱ و ۲۳۱ میلی‌گرم در لیتر بوده که بیانگر کاهش فعالیت باکتری‌های هوازی برای تجزیهٔ مواد آلی است و درنهایت، موجب گندیدن آب و انتشار بوی تعفن از آب می‌شود. غلظت فلزات سنگین نیز در آب خور اندازه‌گیری شد که به‌جز عنصر سرب، غلظت روی و کادمیوم بیش از حد مجاز آن است و بیشینهٔ غلظت آنها در تابستان است. چربی و روغن با آب ترکیب نمی‌شوند و در سطح آب باقی می‌مانند و موجب کدورت آب و تجمع در ارگانیسم آبزیان شده که درنهایت، منجر به مرگ آبزیان می‌شود. غلظت چربی‌ها و دترجنت در آب‌های خور گورسوزان بیشتر از حد مجاز آن است؛ به گونه‌ای که استاندارد آنها حداکثر ۱۰ و ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر است که میانگین سالانهٔ آنها در خور گورسوزان به‌ترتیب ۲۰/۱ و ۲/۴ میلی‌گرم در لیتر است که می‌تواند ناشی از فاضلاب خام ورودی به خور و روغن کارگاه‌های شهری باشد.

خور شیلات با مسیر شمالی- جنوبی از میان شهر بندرعباس عبور کرده و با دریافت فاضلاب خام شهری، به دریای خلیج فارس می‌ریزد. غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب در دهانهٔ خور طی چهار فصل سال اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد بیشینهٔ غلظت آلاینده‌ها به‌ترتیب در تابستان، بهار، پاییز و زمستان است. به‌جز عنصر سرب و کلیفرم‌های آب، غلظت دیگر پارامترها در

1. Pollutant Load Index

همهٔ فصول بیشتر از حد استاندارد بود که بیانگر شدت آلودگی زیاد در دهانهٔ ورودی خور به دریا است. غلظت اکسیژن محلول (DO) کمتر از یک چهارم حد استاندارد آن است؛ حداکثر غلظت BOD و COD به‌ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر است که میانگین سالانهٔ آنها در خور شیلات به‌ترتیب ۱۶۷ و ۳۲۱ است که بیش از سه برابر حد استاندارد آن بود. غلظت کادمیوم دو برابر حد استاندارد آن بود؛ حداکثر غلظت استاندارد فسفات و نیترات به‌ترتیب ۶ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر است که میانگین سالانهٔ آنها در دهانهٔ خور شیلات بیش از دو برابر بود (جدول ۷)؛ چربی، روغن و دترجنت‌ها نیز بیشتر از حد استاندارد بوده که این پارامترها بیانگر آلودگی زیاد خور شیلات است که حیات اکوسیستم دریایی در دهانهٔ خور را با مشکل آلودگی تهدید می‌کند.

جدول ۵. غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی در مصب خور سورو

پارامتر	واحد	حد استاندارد	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	میانگین و انحراف معیار
pH	SU	۸/۵ – ۶/۵	۶/۳	۶/۱	۵/۶	۶/۱	۶ ± ۰/۲۹
DO	Mg/l	۲	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۶۵	۰/۵۵ ± ۰/۰۷
BOD	Mg/l	۵۰ لحظه‌ای	۱۲۹	۲۳۵	۱۵۱	۱۴۴	۱۶۴ ± ۴۷
COD	Mg/l	۱۰۰ لحظه‌ای	۲۳۶	۴۵۱	۳۱۱	۲۱۹	۳۰۴ ± ۱۰۵
Cd	Mg/l	۰/۱	۰/۲۳۵	۰/۴۱۴	۰/۲۱۹	۰/۲۱۳	۰/۲۷ ± ۰/۰۹
Pb	Mg/l	۱	۰/۳	۱/۲	۰/۵	۰/۵	۰/۵۵ ± ۰/۲۵
Zn	Mg/l	۲	۲/۹	۶/۵	۳/۹	۳/۲	۴/۱ ± ۱/۶
TSS	Mg/l	۶۰ لحظه‌ای	۷۴	۹۵	۷۱	۶۶	۷۶/۵ ± ۱۲/۷
NO_3	Mg/l	۵۰	۱۶۶	۱۷۷	۱۴۲	۱۳۶	۱۵۵/۲ ± ۱۹/۴
PO_4	Mg/l	۶	۱۵	۱۹	۶	۶	۱۳ ± ۵/۴
Coliforms	MPN/100ml	۱۰۰۰	۴۵۲	۷۸۸	۳۲۶	۳۳۹	۴۷۶ ± ۲۱۵
Detergent	Mg/l	۱/۵	۲/۶	۲/۹	۱/۹	۱/۷	۲/۲۷ ± ۰/۵۶
Oil	Mg/l	۱۰	۱۳	۲۲	۱۳	۱۲	۱۵ ± ۴/۶

جدول ۶. غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی در مصب خور گورسوزان

پارامتر	واحد	حد استاندارد	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	میانگین و انحراف معیار
pH	SU	۸/۵ – ۶/۵	۶/۵	۶/۶	۵/۸	۵/۶	۶/۱۲ ± ۰/۴۹
DO	Mg/l	۲	۰/۵۹	۰/۵۰	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۵۴ ± ۰/۰۳
BOD	Mg/l	۵۰ لحظه‌ای	۲۴۴	۲۶۷	۲۱۱	۲۰۵	۲۳۱ ± ۲۹
COD	Mg/l	۱۰۰ لحظه‌ای	۴۱۲	۵۳۱	۳۹۶	۳۸۵	۴۳۱ ± ۶۷
Cd	Mg/l	۰/۱	۰/۱۹۵	۰/۳۹۶	۰/۱۶۵	۰/۱۵۲	۰/۲۲ ± ۰/۱۱
Pb	Mg/l	۱	۰/۷	۱/۲	۰/۹	۰/۵	۰/۸۲ ± ۰/۲۹
Zn	Mg/l	۲	۵/۹	۷/۴	۴/۴	۴/۲	۷/۴ ± ۱/۴
TSS	Mg/l	۶۰ لحظه‌ای	۷۳	۱۰۸	۹۵	۹۳	۹۲/۲ ± ۱۴/۴
NO_3	Mg/l	۵۰	۱۵۵	۱۷۹	۱۳۲	۱۲۸	۱۴۸/۵ ± ۲۳/۵
PO_4	Mg/l	۶	۱۹	۲۳	۱۴	۱۵	۱۷/۷ ± ۴/۱
Coliforms	MPN/100ml	۱۰۰۰	۳۵۴	۶۵۲	۲۴۴	۲۹۶	۳۸۶ ± ۱۸۲
Detergent	Mg/l	۱/۵	۲/۳	۳/۴	۲/۱	۱/۹	۲/۴ ± ۰/۶
Oil	Mg/l	۱۰	۱۵	۳۶	۱۷	۱۲/۷	۲۰/۱ ± ۱۰/۶

جدول ۷. غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی در مصب خور شیلات

پارامتر	واحد	حد استاندارد	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	میانگین و انحراف معیار
pH	SU	۸/۵ – ۶/۵	۷/۳	۶/۸	۶/۵	۶/۴	۶/۷ ± ۰/۴
DO	Mg/l	۲	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۵۴ ± ۰/۰۳
BOD	Mg/l	۵۰ لحظه‌ای	۱۵۵	۲۳۶	۱۴۴	۱۳۶	۱۶۷ ± ۴۶
COD	Mg/l	۱۰۰ لحظه‌ای	۳۱۱	۴۶۱	۲۷۴	۲۳۹	۳۲۱ ± ۹۷
Cd	Mg/l	۰/۱	۰/۱۴۱	۰/۲۶۳	۰/۲۱۱	۰/۱۹۵	۰/۲۰ ± ۰/۰۵
Pb	Mg/l	۱	۰/۶	۰/۹	۰/۳	۰/۳	۰/۵۲ ± ۰/۲۸
Zn	Mg/l	۲	۲/۶	۳/۹	۲/۴	۲/۲	۲/۷ ± ۰/۷
TSS	Mg/l	۶۰ لحظه‌ای	۶۶	۸۹	۵۹	۶۱	۶۸ ± ۱۳
NO_3	Mg/l	۵۰	۱۶۳	۱۷۷	۱۵۲	۱۴۵	۱۵۹ ± ۱۳/۹
PO_4	Mg/l	۶	۱۳	۱۷	۱۵	۱۴	۱۴/۷ ± ۱/۷
Coliforms	MPN/100ml	۱۰۰۰	۳۴۵	۴۹۶	۳۳۶	۳۱۲	۳۷۲ ± ۸۳
Detergent	Mg/l	۱/۵	۱/۹۷	۲/۶	۱/۸	۱/۶	۱/۹ ± ۰/۴
Oil	Mg/l	۱۰	۱۴	۲۲/۶	۱۵/۶	۱۵/۹	۱۷ ± ۳/۸

غلظت آلاینده‌ها در شرقی‌ترین خور بندرعباس (خور نخل ناخدا) نیز اندازه‌گیری شد که نتایج نشان داد بیشینهٔ غلظت آلاینده‌ها به‌ترتیب در فصول تابستان، بهار، پاییز و زمستان است. در تابستان و بهار، به‌جز عنصر سرب و کلیفرم‌ها، غلظت دیگر پارامترها بیشتر از حد مجاز آن بود؛ اما در زمستان غلظت عناصر سرب، روی و کلیفرم‌ها کمتر از حد استاندارد بوده و دیگر پارامترها بیشتر از حد مجاز بود (جدول ۸). اکسیژن محلول (DO) در بهار به کمترین حد خود می‌رسد و تأثیرات آن بر آبزیان شدید خواهد بود، چون در این فصل که دمای هوا تعدیل می‌شود و آبزیان شروع به تخم‌گذاری می‌کنند و فعالیت خود را افزایش می‌دهند، نیاز به اکسیژن دارد که کاهش آن به وسیلهٔ آلاینده‌های موجود در آب خور، موجب اختلال در چرخهٔ فنولوژی آنها می‌شود. میانگین سالانهٔ کادمیوم و روی بیشتر از حد مجاز است که تجمع آن در ارگانیسم آبزیان، سلامت آنها را به خطر می‌اندازد. چربی، روغن، دترجنت و مواد معلق در آب نیز بیشتر از حد مجاز است که با قرارگیری در سطح آب و دریافت نور، موجب کاهش نور مورد نیاز برای آبزیان می‌شود.

جدول ۸. غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی در مصب خور نخل ناخدا

پارامتر	واحد	حد استاندارد	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	میانگین و انحراف معیار
pH	SU	۸/۵ – ۶/۵	۶/۱	۵/۹	۶/۳	۵/۸	۶ ± ۰/۲
DO	Mg/l	۲	۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۵۵ ± ۰/۰۵
BOD	Mg/l	۵۰ لحظه‌ای	۱۵۹	۲۴۱	۱۶۵	۱۵۲	۱۷۹ ± ۴۱
COD	Mg/l	۱۰۰ لحظه‌ای	۳۲۵	۴۳۸	۲۶۸	۲۷۸	۳۲۷ ± ۷۷
Cd	Mg/l	۰/۱	۰/۱۹۵	۰/۲۳۱	۰/۱۵۵	۰/۱۱۴	۰/۱۷ ± ۰/۰۵
Pb	Mg/l	۱	۰/۱	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۴۲ ± ۰/۲۲
Zn	Mg/l	۲	۳/۱	۵/۴	۲/۴	۱/۶	۳/۱۲ ± ۱/۶۳
TSS	Mg/l	۶۰ لحظه‌ای	۵۷	۸۷	۶۳	۶۲	۶۷ ± ۱۳
NO_3	Mg/l	۵۰	۱۵۱	۱۶۲	۱۵۵	۱۵۲	۱۵۵ ± ۴
PO_4	Mg/l	۶	۲۱	۲۶	۱۷	۱۷	۲۰/۲ ± ۴/۲
Coliforms	MPN/100ml	۱۰۰۰	۴۱۴	۸۵۴	۳۸۷	۴۴۵	۵۲۵ ± ۲۲۰
Detergent	Mg/l	۱/۵	۱/۷۷	۲/۱۳	۱/۹	۱/۹	۱/۸۲ ± ۰/۲۶
Oil	Mg/l	۱۰	۱۳/۲	۲۱/۴	۱۱/۶	۱۲	۱۴/۵ ± ۴/۶

پس از سنجش فصلی غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب، توزیع مکانی آلاینده‌ها نیز در مقیاس سالانه بررسی شد و نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه و آزمون مقایسهٔ میانگین توکی نشان داد برای پارامترهای BOD، COD، Pb، Zn، TSS و کلیفرم‌ها، اختلاف مکانی وجود دارد که مربوط به اختلاف خور گورسوزان با دیگر خورها است که بیشترین غلظت آلاینده‌های آب را دارد. دیگر خورها نیز در طبقهٔ دوم قرار گرفت و اختلاف بین آنها در سطح ۹۵ درصد معنادار نبود (جدول ۹).

اما غلظت پارامترهای آلودگی در دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس، دارای اختلاف زمانی بوده و طی فصول مختلف سال، غلظت پارامترها متفاوت بود و به‌جز پارامتر Ph و DO، غلظت زمانی دیگر پارامترها طی مقیاس فصلی در سطح ۹۵ درصد معنادار بود. بررسی‌ها نشان داد در پارامتر BOD، COD، Cd، Pb، کلیفرم‌ها و چربی‌ها، تابستان با دیگر فصول اختلاف معناداری داشت و در طبقهٔ بیشینه قرار گرفت و دیگر فصول در یک طبقه قرار گرفتند و اختلافی با هم نداشتند (جدول ۱۰). بنابراین، اختلاف‌ها مربوط به افزایش غلظت آلاینده‌ها و پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب در تابستان است که با همهٔ فصول متفاوت بود و شدت آلودگی در این فصل بسیار است و بیشترین تأثیر آلودگی خور بر حیات آبزیان در این فصل اتفاق می‌افتد.

جدول ۹. نتایج اختلاف مکانی غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب در دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس

پارامتر	واحد	حد استاندارد	خور سورو	خور گورسوزان	خور شیلات	خور نخل ناخدا	سطح معناداری
pH	SU	۸/۵ – ۶/۵	۶/۰۲	۶/۱۲	۶/۷	۶/۰۲	۰/۰۷۱ *ns*
DO	Mg/l	۲	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۸۸۳ *ns*
BOD	Mg/l	۵۰ لحظه‌ای	۱۶۴ *b*	۲۳۱ *a*	۱۶۷*b*	۱۷۹ *b*	۰/۰۳ *
COD	Mg/l	۱۰۰ لحظه‌ای	۳۰۴ *b*	۴۳۱ *a*	۳۲۱ *b*	۳۲۷ *b*	۰/۰۱۴ *
Cd	Mg/l	۰/۱	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۱۷	۰/۳۸۹ *ns*
Pb	Mg/l	۱	۰/۵۹ *b*	۰/۸۷ *a*	۰/۵۶ *b*	۰/۴۵ *b*	۰/۰۳۱ *
Zn	Mg/l	۲	۴/۲ *ab*	۵/۵ *a*	۲/۸ *b*	۳/۱ *b*	۰/۰۱۶ *
TSS	Mg/l	۶۰ لحظه‌ای	۷۶/۵ *b*	۹۲/۲ *a*	۶۸/۷ *b*	۶۷/۲ *b*	۰/۰۴۲ *
NO_3	Mg/l	۵۰	۱۵۵	۱۴۸	۱۵۹	۱۵۵	۰/۸۰۷ *ns*
PO_4	Mg/l	۶	۱۳	۱۷	۱۴	۲۰	۰/۱۱۳ *ns*
Coliforms	MPN/100ml	۱۰۰۰	۴۷۶ *ab*	۳۸۶ *b*	۳۷۲ *b*	۵۲۵ *a*	۰/۰۲۹ *
Detergent	Mg/l	۱/۵	۲/۲	۲/۴	۱/۹	۱/۸	۰/۳۵۶ *ns*
Oil	Mg/l	۱۰	۱۵	۲۰	۱۷	۱۴	۰/۶۳۰ *ns*

جدول ۱۰. نتایج اختلاف زمانی غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب در دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس

پارامتر	واحد	حد استاندارد	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سطح معناداری
pH	SU	۸/۵ – ۶/۵	۶/۵	۶/۳	۶	۵/۹	۰/۲۸۸ *ns*
DO	Mg/l	۲	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۳۸۷ *ns*
BOD	Mg/l	۵۰ لحظه‌ای	۱۷۱ *b*	۲۴۴ *a*	۱۶۷ *b*	۱۵۹ *b*	۰/۰۱۳*
COD	Mg/l	۱۰۰ لحظه‌ای	۳۲۱ *b*	۴۷۰ *a*	۳۱۲ *b*	۲۸۰ *b*	۰/۰۰۵**
Cd	Mg/l	۰/۱	۰/۱۸۷ *b*	۰/۳۲۲ *a*	۰/۱۸۲ *b*	۰/۱۶۵ *b*	۰/۰۰۶ **
Pb	Mg/l	۱	۰/۴۶ *b*	۰/۹۵۲ *a*	۰/۵۶ *b*	۰/۴۷ *b*	۰/۰۳۷*
Zn	Mg/l	۲	۳/۶۶ *ab*	۵/۸۶ *a*	۳/۲۹ *ab*	۲/۸۳ *b*	۰/۰۳۰*
TSS	Mg/l	۶۰ لحظه‌ای	۶۷/۵ *b*	۹۴/۷ *a*	۷۲ *ab*	۷۰/۵ *ab*	۰/۰۳۷*
NO_3	Mg/l	۵۰	۱۵۸ *ab*	۱۷۳ *a*	۱۴۵ *b*	۱۴۰ *b*	۰/۰۰۱**
PO_4	Mg/l	۶	۱۷ *ab*	۲۱ *a*	۱۳ *b*	۱۴/۵ *ab*	۰/۰۴۵*
Coliforms	MPN/100ml	۱۰۰۰	۳۹۱ *b*	۶۹۷ *a*	۳۲۳ *b*	۳۴۸ *b*	۰/۰۰۰ **
Detergent	Mg/l	۱/۵	۲/۱۹ *ab*	۲/۸ *a*	۱/۹۳ *b*	۱/۶۹ *b*	۰/۰۰۵**
Oil	Mg/l	۱۰	۱۳/۸ *b*	۲۵/۷ *a*	۱۴/۲ *b*	۱۳/۱ *b*	۰/۰۰۲**

نتایج حاصل از همبستگی پارامترهای کیفی آب در دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس نشان داد BOD و COD در سطح ۹۹ درصد رابطهٔ مثبت و معناداری دارند. همچنین، BOD با پارامترهای DO، TSS، PO_4، کلیفرم‌ها، دترجنت، چربی و فلزات سنگین رابطهٔ مثبت و معناداری دارد. COD نیز به‌جز Ph و NO_3با دیگر پارامترها رابطهٔ مثبت دارد، ولی رابطهٔ آن با DO منفی است، چون با افزایش COD، غلظت DO کاهش می‌یابد. رابطهٔ بین فلزات سنگین با هم در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد مثبت و معنادار بود؛ چربی به غیر از PH و DO با دیگر پارامترها رابطه مثبت و معناداری داشت، دترجنت نیز به غیر از PH و DO و همچنین، PO_4با دیگر پارامترها رابطهٔ مثبت و معناداری داشت (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. رابطهٔ بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب در دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس با همبستگی پیرسون

	PH	DO	BOD	COD	TSS	NO_3	PO_4	Coliform	Detergent	Oil	Cd	Zn	Pb
PH	۱												
DO	-۰/۰۹	۱											
BOD	۰/۰۴	-۰/۸۷ **	۱										
COD	۰/۰۷	-۰/۸۳**	۰/۹۶ **	۱									
TSS	-۰/۱۱	-۰/۲۲	۰/۸۲ **	۰/۸۴ **	۱								
NO_3	۰/۵۸ *	-۰/۲۸	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۳۰	۱							
PO_4	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۶۲*	۰/۵۸*	۰/۳۵	۰/۵۲*	۱						
Coliform	۰/۰۱	-۰/۱۳	۰/۵۷*	۰/۵۷*	۰/۴۷	۰/۷۱**	۰/۷۲*	۱					
Detergent	۰/۲۹	-۰/۲۶	۰/۶۹**	۰/۷۴*	۰/۷۷**	۰/۷۴**	۰/۴۲	۰/۵۹*	۱				
Oil	۰/۲۷	-۰/۳۱	۰/۷۴**	۰/۸۰**	۰/۷۴**	۰/۶۵*	۰/۵۶*	۰/۶۳**	۰/۸۲**	۱			
Cd	۰/۱۴	-۰/۲۱	۰/۵۵*	۰/۶۰*	۰/۶۱*	۰/۶۷*	۰/۳۷	۰/۶۸**	۰/۸۵**	۰/۷۹**	۱		
Zn	-۰/۰۴	-۰/۱۳	۰/۸۸**	۰/۸۶**	۰/۸۲**	۰/۳۹	۰/۴۸	۰/۵۸*	۰/۷۹**	۰/۷۵**	۰/۷۵**	۱	
Pb	۰/۱۸	-۰/۰۹	۰/۸۱**	۰/۸۰**	۰/۸۳**	۰/۴۴	۰/۲۶	۰/۴۰	۰/۷۴**	۰/۷۷**	۰/۵۷*	۰/۷۴**	۱

فلزات سنگین در رسوبات

غلظت فلزات سنگین در رسوبات سطحی دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس نیز اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد الگوی فلزات سنگین Zn>Cu>Pb>Cd بود. بیشینهٔ غلظت کادمیوم به‌ترتیب در رسوبات خورهای گورسوزان، سورو، شیلات و نخل ناخدا بود. بیشینهٔ غلظت سرب به‌ترتیب در رسوبات خورهای گورسوزان، نخل ناخدا، سورو و شیلات بود؛ برای فلز روی الگوی بیشینه به‌ترتیب در خورهای گورسوزان، نخل ناخدا، شیلات و سورو و برای فلز مس نیز بیشینهٔ آن به‌ترتیب در رسوبات سطحی گورسوزان، نخل ناخدا، سورو و شیلات بود (جدول ۱۲).

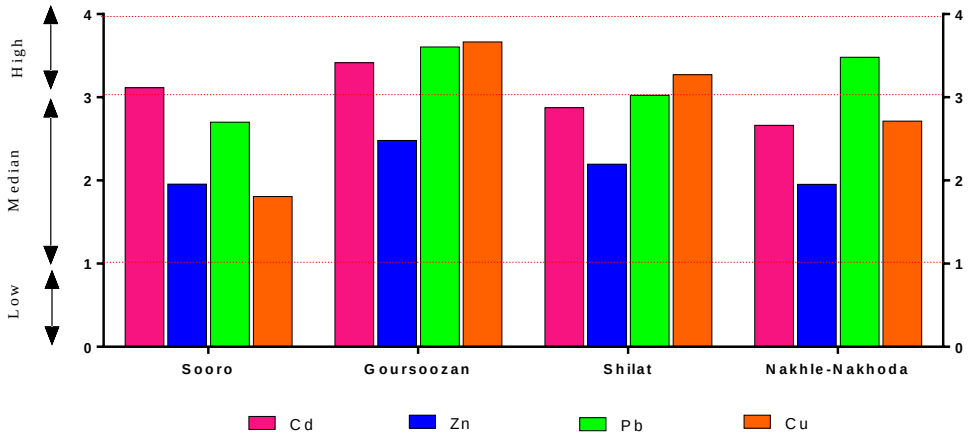
در این بخش از پژوهش، آلودگی فلزات سنگین در رسوبات دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس سنجش شده و با شاخص‌های آلودگی ارزیابی شد. شاخص انباشتگی ژئوشیمیایی فلزات سنگین (I_{geo}) بیانگر این است که برای فلز کادمیوم، خورهای سورو و گورسوزان در طبقهٔ آلودگی شدید و خورهای شیلات و نخل ناخدا در طبقهٔ میانه قرار گرفتند. برای فلز روی، همهٔ خورها در طبقهٔ آلودگی میانه قرار گرفتند. برای فلز سرب و مس، خورهای گورسوزان و نخل ناخدا در طبقهٔ آلودگی شدید و خورهای سورو و شیلات در طبقهٔ میانه قرار گرفتند (شکل ۲). همچنین، میزان عددی شاخص یادشده برای هر فلز سنگین در هر ایستگاه محاسبه و در جدول ۱۳ ارائه شد و در ستون میانگین، متوسط شاخص هر فلز برای کل خورهای بندرعباس به دست آمد. به طورکلی، میانگین عددی برای فلز کادمیوم و سرب بیانگر آلودگی شدید خورهای بندرعباس و برای روی و مس بیانگر آلودگی متوسط تا شدید خورهای بندرعباس است.

جدول ۱۲. غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی در رسوبات مصب خورهای بندرعباس

پارامتر	واحد	سورو	گورسوزان	شیلات	نخل ناخدا	میانگین
Cd	Mg/kg	۰/۵۷۱	۰/۸۳۵	۰/۵۲۸	۰/۵۱۱	۰/۶۱۱
Pb	Mg/kg	۱۸/۹۸	۲۲/۷۶	۱۸/۳۶	۱۹/۶۸	۱۹/۹۵
Zn	Mg/kg	۹۰	۱۲۴/۵	۹۸/۵	۹۹/۸	۱۰۳/۲۰
Cu	Mg/kg	۴۷/۴	۶۰/۷	۴۴/۷	۵۷/۳	۵۲/۵۵

جدول ۱۳. مقادیر شاخص Igeo برای فلزات سنگین در رسوبات خورهای بندرعباس

پارامتر	واحد	خور				میانگین	سطح آلودگی
		سورو	گورسوزان	شیلات	نخل ناخدا		
Cd	Igeo	۳/۱	۳/۴	۲/۸	۲/۶	۳	آلودگی شدید
Pb	Igeo	۲/۷	۳/۶	۳	۳/۴	۳/۲	آلودگی شدید
Zn	Igeo	۱/۹	۲/۴	۲/۱	۱/۹	۲/۱	آلودگی متوسط تا شدید
Cu	Igeo	۱/۸	۳/۶	۳/۲	۲/۷	۲/۸	آلودگی متوسط تا شدید



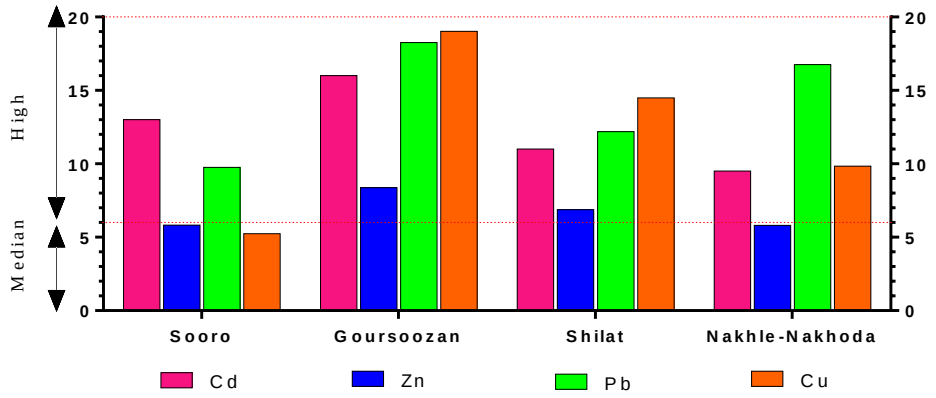
شکل ۲. مقادیر شاخص انباشت ژئوشیمیایی آلودگی (Igeo) در رسوبات سطحی دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس

نتایج بررسی فاکتور آلودگی (CF) بیانگر این است که برای فلزات کادمیوم و سرب همهٔ خورها در طبقهٔ آلودگی شدید قرار گرفتند. برای فلز مس خور سورو در طبقهٔ آلودگی متوسط و خورهای گورسوزان، شیلات و نخل ناخدا در طبقهٔ آلودگی شدید بودند. برای فلز روی نیز خور سورو و نخل ناخدا در طبقهٔ آلودگی متوسط و خور گورسوزان و شیلات در طبقهٔ آلودگی شدید قرار گرفتند (شکل ۳). همچنین، شاخص عددی CF در جدول ۱۴ ارائه شد که میانگین هر فلز برای خورها محاسبه شد که در آن از لحاظ همهٔ فلزات سنگین، خورهای شهر بندرعباس در طبقهٔ آلودگی بسیار زیاد قرار دارند.

نتایج حاصل از بررسی شاخص اصلاح‌شدهٔ آلودگی (mCd) نشان داد برای کادمیوم، همهٔ خورها در طبقهٔ آلودگی متوسط قرار گرفتند؛ اما برای فلز روی خورهای سورو، شیلات و نخل ناخدا در طبقهٔ آلودگی پایین و خور گورسوزان در طبقهٔ آلودگی متوسط قرار گرفت. برای فلز سرب، خور گورسوزان در طبقهٔ آلودگی شدید و خورهای سورو، شیلات و نخل ناخدا در آلودگی متوسط قرار گرفتند. درنهایت، برای فلز مس نیز خور گورسوزان در آلودگی شدید، خورهای شیلات و نخل ناخدا در طبقهٔ آلودگی متوسط و خور سورو در آلودگی کم قرار گرفت (شکل ۴). از لحاظ شاخص عددی mCd، فلزات کادمیوم و سرب در درجهٔ متوسط، فلز روی در درجهٔ کم و مس در درجهٔ متوسط از آلودگی هستند (جدول ۱۵).

جدول ۱۴. مقادیر شاخص CF برای فلزات سنگین در رسوبات خورهای بندرعباس

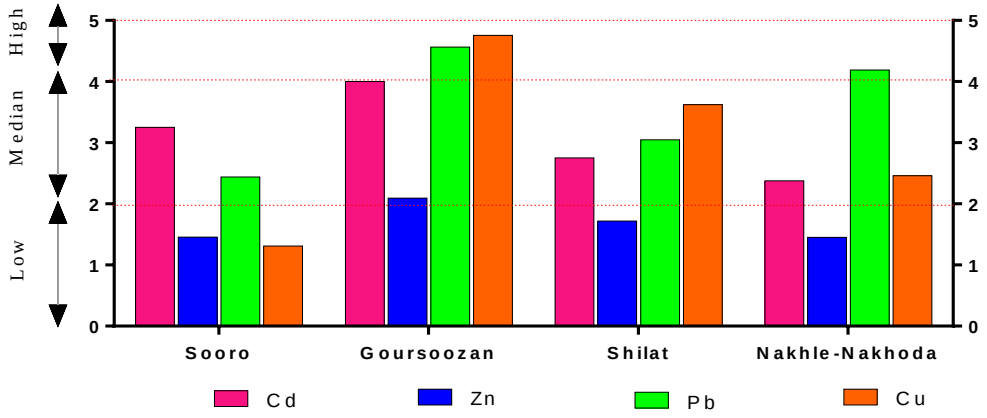
پارامتر	واحد	خور				میانگین	سطح آلودگی
		سورو	گورسوزان	شیلات	نخل ناخدا		
Cd	CF	۱۳	۱۶	۱۱	۹/۵	۱۲/۳	آلودگی بسیار زیاد
Pb	CF	۹/۷	۱۸/۲	۱۲/۲	۱۶/۷	۱۴/۲	آلودگی بسیار زیاد
Zn	CF	۵/۸	۸/۳	۶/۸	۵/۸	۶/۷	آلودگی بسیار زیاد
Cu	CF	۵/۲	۱۹	۱۴/۴	۹/۸	۱۲/۱	آلودگی بسیار زیاد



شکل ۳. مقادیر شاخص فاکتور آلودگی (CF) در رسوبات سطحی دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس

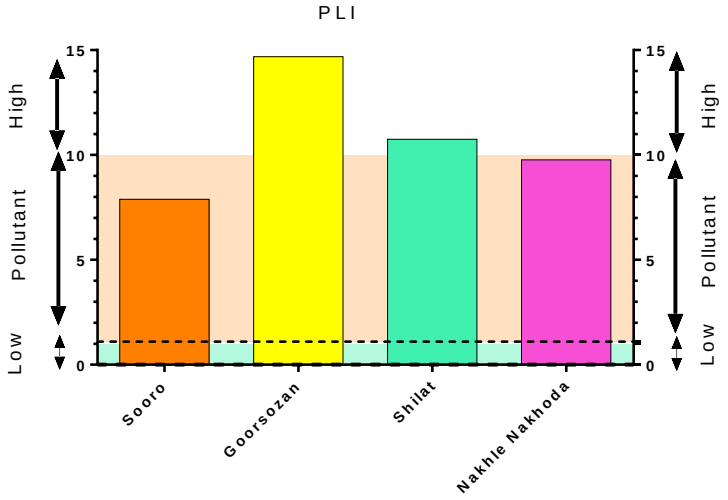
جدول ۱۵. مقادیر شاخص mCd برای فلزات سنگین در رسوبات خورهای بندرعباس

پارامتر	واحد	خور				میانگین	سطح آلودگی
		سورو	گورسوزان	شیلات	نخل ناخدا		
Cd	mCd	۳/۲	۴	۲/۷	۲/۳	۳	درجهٔ متوسط از آلودگی
Pb	mCd	۲/۴	۴/۵	۳	۴/۱	۳/۵	درجهٔ متوسط از آلودگی
Zn	mCd	۱/۴	۲	۱/۷	۱/۴	۱/۶	درجهٔ کم از آلودگی
Cu	mCd	۱/۳	۴/۷	۳/۶	۲/۴	۳	درجهٔ متوسط از آلودگی



شکل ۴. مقادیر شاخص آلودگی اصلاح‌شده (mCd) در رسوبات سطحی دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس

درنهایت، به منظور بررسی و ارزیابی بار آلودگی در رسوبات دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس، از شاخص PLI استفاده شد که از تجمع فلزات اندازه‌گیری‌شده محاسبه می‌شود. همان‌طور که گفته شد، اگر میزان عددی این شاخص کمتر از یک باشد، نشان‌دهندهٔ عدم آلودگی و اگر از یک تا ۱۰ باشد، بیانگر آلودگی است و در صورتی که بیشتر از ۱۰ باشد، بیانگر آلودگی شدید است. نتایج این شاخص نشان داد تجمع فلزات در رسوبات خورهای بندرعباس زیاد است و تمام خورها در طبقهٔ آلودگی قرار دارند. بیشینهٔ شاخص بار آلودگی در خور گورسوزان بود که حتی شاخص PLI در آن بیشتر از ۱۰ محاسبه شد؛ خورهای دیگر نیز در طبقهٔ آلودگی (یک تا ۱۰) بوده که کمینهٔ شاخص در خور سورو محاسبه شد (شکل ۵).



شکل ۵. مقادیر شاخص بار آلودگی (PLI) در رسوبات سطحی دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس

بحث

نیاز بیوشیمیایی اکسیژن (BOD) یکی از پارامترهای مهم در بررسی آلودگی آب است که منجر به کاهش اکسیژن محلول در آب می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد رابطهٔ آن‌ها منفی و معنادار بود و از حد استاندارد خود به‌ویژه در تابستان در آب فراتر رفته و بیانگر آلودگی شدید خورهای شهر بندرعباس است که با نتایج Nergis و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت داشت [۳۳]. تخلیهٔ فاضلاب خام به منابع آبی که حاوی آمونیوم، نیترات، نیتریت، فسفات و میکروارگانیسم‌ها هستند، موجب کاهش اکسیژن محلول در آب می‌شود [۳۴ و ۳۵]. کاهش اکسیژن محلول در آب نه تنها موجب کاهش اهمیت اکوسیستمی و غذایی آب برای موجودات زنده شده، بلکه موجب انتشار بوی بد و اختلال در رشد متابولیکی آبزیان نیز می‌شود. اگرچه استاندارد اکسیژن محلول آب حدود ۲ میلی‌گرم در لیتر است، اما بعضی از ماهی‌ها نیاز به ۷ تا ۹ میلی‌گرم در لیتر دارند [۳۶]، اما در خورهای شهر بندرعباس غلظت سالانهٔ آن کمتر از ۱ میلی‌گرم در لیتر بود. بنابراین، کاهش شدید اکسیژن محلول در دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس موجب مرگ و انقراض گونه‌های آبزی در ساحل می‌شود. غلظت نیاز شیمیایی اکسیژن (COD) و نیاز بیوشیمیایی اکسیژن (BOD) در آب خورهای شهر بندرعباس طی فصول مختلف سال بیشتر از حد استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست بود؛ به گونه‌ای که بیشینهٔ آن از لحاظ زمانی در تابستان و از لحاظ مکانی در خور گورسوزان مشاهده شد که دلیل اصلی آن تخلیهٔ فاضلاب خام شهری به کانال خور گورسوزان است؛ چون فاضلاب خام که حاوی چربی و روغن، درجنت، مواد ریزمغذی و عناصر فراوانی هستند، موجب افزایش پارامترهای BOD و COD در آب می‌شوند.

با گسترش و توسعهٔ فیزیکی- کالبدی شهر بندرعباس طی دو دههٔ اخیر، آلودگی خورهایی که پساب تصفیه‌شده، خام و رواناب‌های سطحی شهر بندرعباس را به دریا تخلیه می‌کنند نیز بیشتر شده است. فلزات سنگین مهم‌ترین پارامتر آلودگی اکولوژیکی آبزیان به شمار می‌روند که تجمع آنها در ارگانیسم آبزیان، سلامت آنها و انسان را به خطر می‌اندازد [۳۷]. واحدهای صنعتی در غرب شهر بندرعباس، فاضلاب خود را به خور سورو وارد می‌کنند و در ترکیب با فاضلاب خام شهری، به دریای کم‌عمق ساحلی خلیج فارس می‌ریزند. تصفیه‌خانهٔ فاضلاب در شمال شهر بندرعباس قرار گرفته است و بخشی از فاضلاب شهری را تصفیه می‌کند و از طریق خور گورسوزان، پساب را به دریا می‌ریزد، اما در میانهٔ راه، فاضلاب‌های خام شهری به کانال خور متصل می‌شود و آب کانال با رنگی تیره به دریا می‌ریزد. خورهای شیلات و نخل ناخدا نیز با دریافت فاضلاب خام شهری به دریا می‌ریزند. بنابراین، علت اصلی آلودگی خورهای شهر بندرعباس، فاضلاب خام

شهری است که حاوی فلزات سنگینی است که حیات آبزیان را به‌شدت تخریب می‌کند و سلامت آنها را به خطر می‌اندازد. صنایع نیز یکی دیگر از منابع اصلی انتشار فلزات سنگین هستند که می‌توان به کارخانه‌های نساجی، تولید فولاد و ذوب آهن، پالایشگاه و پتروشیمی و صنایع معدنی اشاره کرد که طی روند تولید، پساب خود را از طریق کانال‌هایی وارد دریا می‌کنند. این پساب‌ها حاوی فلزات سنگین از جمله مس، سرب، کادمیوم، کروم، روی و جیوه هستند [۳۸]. مس و سرب تأثیر شدیدی بر حیات گونه‌های گیاهی و جانوری دریایی می‌گذارد.

بیشتر عامل اصلی آلودگی اکوسیستم‌های ساحلی، فعالیت‌های انسانی است که از راه‌های مختلفی سواحل را آلوده می‌کنند. ریختن زباله و نخاله‌های ساختمانی، دفن پسماند در نزدیکی ساحل، تخلیهٔ پساب‌های صنعتی، انتشار آلاینده‌ها از صنایع مستقر در ساحل، نفوذ مواد نفتی از طریق پالایشگاه و شرکت‌های نفتی به آب‌های ساحلی و همچنین، تخلیهٔ پساب‌های صنعتی و شهری از طریق کانال و خور به دریا، اکوسیستم‌های ساحلی را آلوده می‌کند و موجب مرگ انواع گونه‌های آبزی در ساحل می‌شود [۳۹]. به این‌ترتیب، ارزیابی شرایط آلودگی در این اکوسیستم‌ها برای پیشگیری، کنترل و هشدار به جوامع انسانی اهمیت زیادی داشته که بررسی و آنالیز رسوبات ساحلی نقش مهمی در شناخت وضعیت آلودگی ساحل دارد. نوار ساحلی خلیج فارس به‌ویژه در بندرعباس، دارای عمق کم و پهنای زیادی است که گردشگران در زمان جزر، عرض ۱۰۰ متری ساحل را طی می‌کنند و به آب نزدیک می‌شوند و هنگام مد، آب دریا به ساحل بندرعباس می‌رسد و حتی موجب پس‌زدگی آب درون خورها می‌شود که موجب انباشت آلاینده‌ها در مجاورت دیوارهٔ کانال خورها می‌شود و این شرایط موجب انتشار بوی تعفن در شهر بندرعباس نیز می‌شود؛ اما عمق آب در ساحل پهناور بندرعباس تا عرض ۱۰۰ متری، حتی کمتر از یک متر است. این شرایط موجب کاهش سرعت آب ساحلی و درنتیجه، ته‌نشین شدن آلاینده‌ها در رسوبات ساحلی می‌شود. بنابراین، نمونه‌برداری از رسوبات ساحلی بندرعباس گویای وضعیت آلودگی در اکوسیستم ساحلی آن است. الگوی فلزات سنگینی که در این پژوهش در رسوبات ساحلی بندرعباس اندازه‌گیری شد، Zn>Cu>Pb>Cd بود. در رسوبات ساحلی بوشهر الگوی فلزات سنگین Fe>Zn>Cu>Ni>Cr>Pb>Cd>Hg بوده که البته فلزات بیشتری اندازه‌گیری شده بود و غلظت فلزات پژوهش حاضر در مقایسه با فلزات ساحلی بوشهر همسان بود (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶). در رسوبات خور ریودو لاپلاتا در منطقهٔ شهری مونته ویدئو در کشور اروگوئه، الگوی فلزات سنگین Zn>Cr>Cu>Pb>Ni>As>Sc>Cd بود (Muniz *et al.*, 2019). بندرگاه‌های خلیج دوربان و ریچاردز از مهم‌ترین مسیرهای حمل‌ونقل دریایی آفریقا هستند که الگوی فلزات سنگین در بافت اندام خرچنگ دریایی Cu>Zn>Pb، در رسوبات ساحلی Zn> Cu> Pb> Cd و در آب خلیج نیز Cu> Zn> Pb> Cd است (Adeleke *et al.*, 2020). رودخانهٔ شیانگ در شمال شرقی کشور چین، از شهر یانچنگ[1] عبور می‌کند و با دریافت پساب‌های شهری به دریای زرد می‌ریزد که در مصب خور این رودخانه الگوی فلزات سنگین در رسوبات آن Zn>Cr>Cu|>Pb>As>Cd>Hg است (Zhao *et al.*, 2018). پژوهشگران نشان دادند رسوبات کشاورزی، صنعتی و فاضلاب شهری دلیل عمدهٔ آلودگی خور زرد هستند و بیشینهٔ آن طی فصل زمستان اتفاق می‌افتد؛ به گونه‌ای که الگوی غلظت فلزات سنگین در آب‌های سطحی خور Pb>Hg>Cu>Zn>Cd>As بوده و ارزیابی آلودگی آن بیانگر درجهٔ آلودگی شدید این خور است (Wang *et al.*, 2018). خور انور در جنوب شبه‌قارهٔ هند (دماغهٔ جنوبی کشور هند) قرار دارد که پژوهشگران غلظت فلزات سنگین در آب، رسوبات و ارگانیسم آبزیان آن را در پنج نقطه اندازه‌گیری کردند و الگوی فلزات سنگین در آب خور Ni>Pb>Cu>Cr>Cd، در رسوبات Cr>Pb>Cu>Ni>Cd، در خرچنگ، صدف و پلی کت Cu>Cr>Pb>Ni>Cd و در ماهی‌ها Pb>Cr>Ni>Cu>Cd که تفاوت در ارگانیسم آبزیان ناشی از تفاوت در زیستگاه آنها بود (Karthikeyan *et al.*, 2020). فلز مس اغلب در ترکیب رنگ استفاده‌شده در صنایع وجود دارد که رنگ کاری و شرکت‌های تولید رنگ در ساحل منجر به انتشار آن می‌شوند [۴۰]. پساب‌های شهری و خانگی حاوی فلز مس است که دلیل اصلی وجود غلظت زیاد این فلز در رسوبات ساحلی، پساب خانگی است [۴۱]. فلز سرب ناشی از ورود فاضلاب‌های نفتی، صنعتی و

1. Yancheng

شهری به دریا است که پژوهشگران، فعالیت صنایع نفتی-فلزی را عامل اصلی انتشار این فلز نامیده‌اند [۴۲]؛ اما در پژوهش حاضر نتایج نشان داد اگرچه خور سورو، فاضلاب صنعتی را به وارد دریا می‌کند، اما خور گورسوزان که بیشتر از فاضلاب شهری تشکیل شده است، غلظت سرب بیشتری نسبت به دیگر خورها دارد. بنابراین، پساب شهری نیز یکی دیگر از دلایل اصلی انتشار فلز سرب در رسوبات ساحلی است. فراوانی کادمیوم در طبیعت کم است و بیشتر منشأ انسانی دارد. انتشار آلاینده‌های جامد از فعالیت‌های انسانی-شهری و رسوب آن بر سطح خیابان‌های شهری، موجب افزایش غلظت کادمیوم می‌شود که پس از وقوع بارندگی، توسط رواناب‌ها و شبکهٔ زهکشی وارد دریا می‌شود (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶). فاضلاب شهری نیز حاوی فلز کادمیوم است که موجب افزایش غلظت آن در رسوبات ساحلی می‌شود. در پژوهش حاضر نیز بیشینهٔ غلظت کادمیوم در رسوبات خور گورسوزان بود.

فلز روی بیست و پنجمین عنصر فراوان در پوستهٔ زمین است که بین ۰/۰۰۰۵ و ۰/۰۲ درصد پوستهٔ زمین را تشکیل می‌دهد. فلز روی می‌تواند به صورت ZnCO3 رسوب کند. اصولاً غلظت زیاد آن بیانگر فعالیت‌های انسانی و میزان زیاد رسوب‌گذاری است. از آنجا که فاضلاب خام شهری مستقیم وارد خور و دریا می‌شود، غلظت روی نیز در رسوبات افزایش می‌یابد و پژوهشگران دلیل اصلی غلظت زیاد روی در رسوبات ساحلی را فاضلاب خانگی و صنعتی عنوان کرده‌اند [۴۳].

پژوهشگران به منظور ارزیابی آلودگی اکوسیستم ساحلی، از شاخص‌های آلودگی شامل انباشتگی ژئوشیمیایی (I_{geo})، فاکتور آلودگی (CF)، شاخص آلودگی اصلاح‌شده (mdc)، فاکتور غنی‌شدگی (EF)، شاخص بار آلودگی (PLI) و پاسخ اکولوژیکی به آلودگی (RI) و دیگر شاخص‌ها استفاده کرده و نتایج مطلوبی گرفته‌اند. در پژوهش حاضر نیز از چهار شاخص I_{geo}، CF، mdc و PLI برای ارزیابی آلودگی رسوبات ساحلی بندرعباس استفاده شد. در خور انور در ساحل شرقی هندوستان، برای فلزات کادمیوم، سرب و کادمیوم، شاخص‌های I_{geo}، CF، mdc بیانگر آلودگی متوسط بود (Karthikeyan *et al*., 2020). در خور کوالا در مالزی، ارزیابی آلودگی رسوبات با شاخص‌های I_{geo}، CF، mdc، BCF، RAC و CD انجام شد که نتایج نشان‌دهندهٔ آلودگی ضعیف خور برای فلزات کادمیوم و روی بود (ElTurk et al., 2018)، اما برای این فلزات، خورهای شهر بندرعباس در طبقهٔ آلودگی متوسط تا شدید قرار گرفتند. فلزات سنگین در رسوبات ساحلی بندر خمیر، بندر تیاب و بندر جاسک در استان هرمزگان توسط Sharifinia و همکاران (۲۰۱۷) ارزیابی شد که شاخص I_{geo} برای کادمیوم شبیه به نتایج پژوهش حاضر بود؛ اما برای فلزات مس، سرب و روی کمتر از نتایج این پژوهش بود.

شاخص بار آلودگی به عنوان یک شاخص استاندارد برای تشخیص آلودگی است که مقایسهٔ میزان آلودگی میان مکان‌های مختلف و در زمان‌های مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد. این شاخص امکان ارزیابی کلی از وضعیت سمیت ناشی از سهم چند فلز را در یک نمونهٔ رسوب به پژوهشگر می‌دهد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد در خورهای سورو، گورسوزان، شیلات و نخل ناخدا، مقادیر PLI به‌ترتیب ۷/۸، ۱۴/۶، ۱۰/۷ و ۹/۷ به دست آمد که بیانگر آلودگی شدید خورهای شهر بندرعباس است؛ اما در سواحل بوشهر، میزان این شاخص کمتر از یک بود که نشان‌دهندهٔ آلودگی بسیار کم منطقه به فلزات سنگین است (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶). در خور کلانتان مالزی نیز مقادیر شاخص PLI کمتر از ۱ بود (Wang et al., 2017). در سواحل ایرانی دریای عمان، مقادیر شاخص PLI بیشتر از یک بود و نشان‌دهندهٔ آلودگی زیاد این ساحل است.

نتیجه‌گیری

خورها مدخل اصلی ورود رواناب‌های سطحی و پساب‌های شهری به دریا است که به دلیل شرایط حساس محیط زیستی آن، حفاظت از اکوسیستم‌های آبی به‌ویژه در دهانهٔ ورودی آن به دریا، یک نیاز ضروری است. اگرچه رودخانه‌ها با آب شیرین حاوی مواد غذایی مناسبی وارد خور می‌کند و موجب تقویت حیات آبزیان ساحلی می‌شود، اما در صورت ورود پساب‌های صنعتی و شهری به خور، اکوسیستم‌های آبی با خطر آلودگی و انقراض تهدید می‌شوند. بندرعباس در سواحل شمالی تنگهٔ هرمز گسترش یافته است که چهار خور از شمال و مرکز شهر عبور می‌کنند و با دریافت پساب‌های خام شهری و صنعتی به دریا می‌ریزند. شدت آلودگی این خورها از شکل ظاهری و انتشار بوی متعفن آنها نمایان است که موجب شیوع انواع بیماری‌های میکروبی در

اکولوژی شهری- دریایی بندرعباس شده‌اند. گردشگرانی که وارد شهر توریستی بندرعباس و به‌ویژه گردشگران خارجی که برای استراحت به هتل هرمز در مجاورت خور گورسوزان مراجعه می‌کنند، از آلودگی و بوی بد این خور گله‌مند هستند. به منظور برنامه‌ریزی برای کنترل آلودگی خورهای شهر بندرعباس، پایش و سنجش پارامترهای کیفی این خورها در اولویت قرار دارد که پژوهش حاضر غلظت آلاینده‌های فیزیکوشیمیایی آنها را در توزیع زمانی- مکانی بررسی کرد. نتایج پژوهش حاضر نشان‌دهندهٔ غلظت زیاد آلاینده‌ها در خور گورسوزان به‌ویژه در فصل تابستان است که میزان دریافت پساب خام شهری در این خور بیشتر از دیگر خورهای شهر بندرعباس است. غلظت اکسیژن محلول در دهانهٔ خورهای بندرعباس کمتر از حد استاندارد و نیاز ماهی‌ها، میگوها و دیگر آبزیان است که موجب مرگ‌ومیر آنها می‌شود. غلظت زیاد BOD، COD، TSS، فلزات سنگین و انواع چربی‌ها و دترجنت در دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس، اکوسیستم دریایی را با خطر آلودگی مواجه می‌سازد که بررسی‌ها بیانگر این بود که فاضلاب خام شهری دلیل اصلی غلظت زیاد پارامترهای آلودگی در خورهای شهر بندرعباس است. رسوبات ساحلی در دهانهٔ خور نیز یکی دیگر از فاکتورهای ارزیابی آلودگی است که در این پژوهش از رسوبات دهانهٔ خورها نمونه‌برداری شد و نتایج ارزیابی آن با شاخص‌های آلودگی نشان داد از لحاظ فلزات سنگین، میزان آلودگی دهانهٔ خورهای شهر بندرعباس در طبقهٔ متوسط تا آلودگی شدید قرار دارد. بنابراین، نتایج این پژوهش می‌تواند در اختیار سازمان بهداشت و درمان و همچنین، سازمان حفاظت محیط زیست قرار بگیرد و برای کنترل آن از راهکارهای مدیریتی استفاده کنند.

منابع

[1].Wang P, Zhang L, Lin X, Yan J, Zhang P, Zhao B, Zhang C, Yu Y. Spatial distribution, control factors and sources of heavy metal in the surface sediments of Fudu Estuary waters, East Liaodong Bay, China. Marine Pollution Bulletin. 2020 Jul 1; 156:111279.

[2].Zhang L, Qin YW, Ma YQ, Zhao Y, Shi Y. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the tidal reach and its adjacent sea estuary of Daliaohe area, China. Huan jing ke xue= Huanjing kexue. 2014 Sep 1;35(9):3336-45.

[3].Wang AJ, Bong CW, Xu YH, Hassan MH, Ye X, Bakar AF, Li YH, Lai ZK, Xu J, Loh KH. Assessment of heavy metal pollution in surficial sediments from a tropical river-estuary-shelf system: A case study of Kelantan River, Malaysia. Marine Pollution Bulletin. 2017 Dec 15;125(1-2):492-500.

[4].Dasar KN, AHMAD A, Mushrifah I, SHUHAIMI-OTHMAN MO. Water quality and heavy metal concentrations in sediment of Sungai Kelantan, Kelantan, Malaysia: a baseline study. Sains Malaysiana. 2009;38(4):435-42.

[5].Hashim R, Song TH, Muslim NZ, Yen TP. Determination of heavy metal levels in fishes from the lower reach of the Kelantan River, Kelantan, Malaysia. Tropical life sciences research. 2014 Dec;25(2):21.

[6].Xu G, Liu J, Pei S, Gao M, Kong X. Transport pathway and depocenter of anthropogenic heavy metals off the Shandong Peninsula, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2016 Oct 5; 180:168-78.

[7].ELTurk M, Abdullah R, Rozainah MZ, Bakar NK. Evaluation of heavy metals and environmental risk assessment in the Mangrove Forest of Kuala Selangor estuary, Malaysia. Marine pollution bulletin. 2018 Nov 1; 136:1-9.

[8].Xie Z, Zhang H, Zhao X, Du Z, Xiang L, Wang W. Assessment of heavy metal contamination and wetland management in a newly created coastal natural reserve, China. Journal of Coastal Research. 2016 Mar;32(2):374-86.

[9].Haghshenas A, Hatami-manesh M, Mirzaei M, Mir Sanjari M, Hossein Khezri P. Measurement and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Pars Special Economic Energy Zone. ISMJ. 2017 Nov 10;20(5):448-69 [In Persian].

[10]. Li L, Jiang M, Liu Y, Shen X. Heavy metals inter-annual variability and distribution in the Yangtze River estuary sediment, China. Marine pollution bulletin. 2019 Apr 1; 141:514-20.

[11]. Liu R, Guo L, Men C, Wang Q, Miao Y, Shen Z. Spatial-temporal variation of heavy metals' sources in the surface sediments of the Yangtze River Estuary. Marine pollution bulletin. 2019 Jan 1; 138:526-33.

[12]. Kazi TG, Arain MB, Jamali MK, Jalbani N, Afridi HI, Sarfraz RA, Baig JA, Shah AQ. Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. Ecotoxicology and environmental safety. 2009 Feb 1;72(2):301-9.

[13]. Kengnal P, Megeri MN, Giriyappanavar BS, Patil RR. Multivariate analysis for the water quality assessment in rural and urban vicinity of Krishna River (India). Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2015 Jan 1;12(2):73-80.

[14]. Matta G, Kumar R, Kumar A, Kumar A. Effect of industrial effluent on ground water quality with special reference to DO, BOD and COD. Journal of Sustainable Environmental Research. 2014;3(2):183-6.

[15]. Polat N, Akkan T. Assessment of heavy metal and detergent pollution in Giresun coastal zone, Turkey. Fresenius Environmental Bulletin. 2016 Jan 1;25(8):2884-90.

[16]. Bhatnagar A, Kaczala F, Hogland W, Marques M, Paraskeva CA, Papadakis VG, Sillanpää M. Valorization of solid waste products from olive oil industry as potential adsorbents for water pollution control—a review. Environmental Science and Pollution Research. 2014 Jan 1;21(1):268-98.

[17]. Tanjung RH, Hamuna B. Assessment of water quality and pollution index in coastal waters of Mimika, Indonesia. Journal of Ecological Engineering. 2019;20(2).

[18]. Rajaee GH, Hassanpour M, Mehdinejad MH. Investigation of concentrations of heavy metals zinc, lead, chromium and cadmium in water and sediment of Gorgan Bay and estuary of Gorganrood river, Journal of Health System Research. 2012: 8(5): 748-756 [in Persian].

[19]. Muniz P, Marrero A, Brugnoli E, Kandratavicius N, Rodríguez M, Bueno C, Venturini N, Figueira RC. Heavy metals and as in surface sediments of the north coast of the Río de la Plata estuary: Spatial variations in pollution status and adverse biological risk. Regional Studies in Marine Science. 2019 Apr 1; 28:100625.

[20]. Adeleke B, Robertson-Andersson D, Moodley G. Comparative analysis of trace metal levels in the crab Dotilla fenestrata, sediments and water in Durban Bay harbour, Richards Bay harbour and Mlalazi estuary, Kwazulu-Natal, South Africa. Heliyon. 2020 Aug 1;6(8): e04725.

[21]. 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 Jan 1; 191:485-93.

[22]. ELTurk M, Abdullah R, Zakaria RM, Bakar NK. Heavy metal contamination in mangrove sediments in Klang estuary, Malaysia: Implication of risk assessment. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2019 Oct 15; 226:106266.

[23]. Samanta S, Dalai TK. Massive production of heavy metals in the Ganga (Hooghly) River estuary, India: Global importance of solute-particle interaction and enhanced metal fluxes to the oceans. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2018 May 1; 228:243-58.

[24]. Zhao Y, Xu M, Liu Q, Wang Z, Zhao L, Chen Y. Study of heavy metal pollution, ecological risk and source apportionment in the surface water and sediments of the Jiangsu coastal region, China: a case study of the Sheyang Estuary. Marine pollution bulletin. 2018 Dec 1; 137:601-9.

[25]. Wang X, Zhao L, Xu H, Zhang X. Spatial and seasonal characteristics of dissolved heavy metals in the surface seawater of the Yellow River Estuary, China. Marine pollution bulletin. 2018 Dec 1; 137:465-73.

[26]. Karthikeyan P, Marigoudar SR, Mohan D, Nagarjuna A, Sharma KV. Ecological risk from heavy metals in Ennore estuary, South East coast of India. Environmental Chemistry and Ecotoxicology. 2020 Jan 1; 2:182-93.

[27]. Siddique MA, Rahman M, Rahman SM, Hassan MR, Fardous Z, Chowdhury MA, Hossain MB. Assessment of heavy metal contamination in the surficial sediments from the lower Meghna River estuary, Noakhali coast, Bangladesh. International Journal of Sediment Research. 2020 Nov 8.

[28]. Cordova MR. A preliminary study on heavy metal pollutants chrome (Cr), cadmium (Cd), and lead (Pb) in sediments and beach morning glory vegetation (Ipomoea pes-caprae) from Dasun Estuary, Rembang, Indonesia. Marine Pollution Bulletin. 2020 Nov 14:111819.

[29]. Truchet DM, Buzzi NS, Negro CL, Mora MC, Marcovecchio JE. Integrative assessment of the ecological risk of heavy metals in a South American estuary under human pressures. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2020 Oct 20; 208:111498.

[30]. Rahman SH, Khanam D, Adyel TM, Islam MS, Ahsan MA, Akbor MA. Assessment of heavy metal contamination of agricultural soil around Dhaka Export Processing Zone (DEPZ), Bangladesh: implication of seasonal variation

and indices. Applied sciences. 2012 Sep;2(3):584-601.

[31]. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. Water research. 1980 Jan 1;14(8):975-1001.

[32]. Mohiuddin KM, Zakir HM, Otomo K, Sharmin S, Shikazono N. Geochemical distribution of trace metal pollutants in water and sediments of downstream of an urban river. International Journal of Environmental Science & Technology. 2010 Dec 1;7(1):17-28.

[33]. Nergis Y, Sharif M, Choudhry AF, Hussain A, Butt JA. Impact of industrial and sewage effluents on Karachi coastal water and sediment quality. Middle-East Journal of Scientific Research. 2012;11(10):1443-54.

[34]. Rivett MO, Buss SR, Morgan P, Smith JW, Bemment CD. Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes. Water research. 2008 Oct 1;42(16):4215-32.

[35]. Ren LF, Chen R, Zhang X, Shao J, He Y. Phenol biodegradation and microbial community dynamics in extractive membrane bioreactor (EMBR) for phenol-laden saline wastewater. Bioresource technology. 2017 Nov 1; 244:1121-8.

[36]. Das P, Mandal SC, Bhagabati SK, Akhtar MS, Singh SK. Important live food organisms and their role in aquaculture. Frontiers in aquaculture. 2012;5(4):69-86.

[37]. Duarte B, Silva G, Costa JL, Medeiros JP, Azeda C, Sá E, Metelo I, Costa MJ, Caçador I. Heavy metal distribution and partitioning in the vicinity of the discharge areas of Lisbon drainage basins (Tagus Estuary, Portugal). Journal of sea research. 2014 Oct 1; 93:101-11.

[38]. Al Hakim S, Jaber S, Eddine NZ, Baalbaki A, Ghauch A. Degradation of theophylline in a UV254/PS system: Matrix effect and application to a factory effluent. Chemical Engineering Journal. 2020 Jan 15; 380:122478.

[39]. Chunkao K, Nimpee C, Duangmal K. The King's initiatives using water hyacinth to remove heavy metals and plant nutrients from wastewater through Bueng Makkasan in Bangkok, Thailand. Ecological Engineering. 2012 Feb 1; 39:40-52.

[40]. Jafari N. Review of pollution sources and controls in Caspian Sea region. Journal of Ecology and the Natural Environment. 2010 Feb 28;2(2):025-9.

[41]. Yakout AA, El-Sokkary RH, Shreadah MA, Hamid OG. Removal of Cd (II) and Pb (II) from wastewater by using triethylenetetramine functionalized grafted cellulose acetate-manganese dioxide composite. Carbohydrate Polymers. 2016 Sep 5; 148:406-14.

[42]. Khosravi M, Rakhshaee R. Biosorption of Pb, Cd, Cu and Zn from the wastewater by treated Azolla filiculoides with H 2 O 2/MgCl 2. International Journal of Environmental Science & Technology. 2005 Dec 1;1(4):265-71.

[43]. Deycard VN, Schäfer J, Blanc G, Coynel A, Petit JC, Lanceleur L, Dutruch L, Bossy C, Ventura A. Contributions and potential impacts of seven priority substances (As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, and Zn) to a major European Estuary (Gironde Estuary, France) from urban wastewater. Marine Chemistry. 2014 Dec 20; 167:123-34.