





Original Article



Investigation and comparison of concentration and Accumulation of Heavy Metals (Hg, Pb, Ni, V) in Raw and Treated Wastewater from Amir Kabir Petrochemical Company in Bandar Imam Khomeini and Sediments of Shadegan Wetland

Mohammad Kamasi¹ , SeyedMasoud Monavari^{1*} , Fariba Zamani Hargalani¹ , Shahram Baikpour^{1,2} 

1. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.
2. Medical Geology Research Center, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Article history:

Received: 19 November 2024
Revised: 21 November 2025
Accepted: 24 November 2025
ePublished: 24 November 2025

***Corresponding author:**
SeyedMasoud Monavari,
Department of Environmental
Sciences, Faculty of Natural
Resources and Environment,
Islamic Azad University, Science
and Research Branch, Tehran, Iran.

E-mail:
monavarisedmasoud4@gmail.com

Abstract

Industrial wastewater from petrochemical industries, due to the presence of various organic and inorganic compounds, poses a significant threat to the health of aquatic ecosystems. This study aimed to measure the concentration and investigate the distribution pattern of heavy metals (mercury, lead, nickel, and vanadium) in the wastewater units of the Amir Kabir petrochemical complex, as well as to assess their accumulation in the sediments of the international Shadegan wetland. In this research, 15 raw wastewater samples, 15 treated effluent samples, and 15 surface sediment samples were collected from 4 strategic stations. Metal concentrations were measured following sample preparation and acid digestion according to standard methods using an ICP-OES 730-ES model. The results revealed that the metal concentrations in the incoming wastewater exhibited a wide range of variations due to the diversity of processes in the operational units, with mercury ranging from 0.02 to 6.09, lead from 0.02 to 2.23, nickel from 0.76 to 26.88, and vanadium from 6.54 to 20.13 micrograms per liter. The highest pollution load was observed in the olefin unit, while the lowest was found in the butene-1 unit ($P < 0.05$). The treatment process led to a significant reduction in the concentrations of all metals in the effluent ($P < 0.05$). However, metal concentrations in the wetland sediments (mercury: 1.56–6.17, lead: 0.92–5.06, nickel: 19.55–59.42, and vanadium: 30.65–68.05 micrograms per gram) were significantly higher than in the liquid phase. The pollutant accumulation pattern identified was sediment > incoming wastewater > treated effluent, indicating the role of sediments as the final sink for persistent pollutants. A significant positive correlation between metals in the sediment and organic matter, as well as a strong relationship between nickel and vanadium, confirms their common oil and catalytic origin. Comparison with EPA and NOAA standards showed that metal concentrations in the sediments of stations near the wastewater discharge site exceeded the permissible thresholds, requiring urgent environmental management.

Keywords: Heavy metals, Industrial wastewater, Activated sludge, Sediments, Shadegan wetland.

Please cite this article as follows: Kamasi M., Monavari S. M., Hargalani F. Z., Baikpour S. Investigation and comparison of concentration and Accumulation of Heavy Metals (Hg, Pb, Ni, V) in Raw and Treated Wastewater from Amir Kabir Petrochemical Company in Bandar Imam Khomeini and Sediments of Shadegan Wetland. J Mar Bio, 2025; 17(3): 81–93. DOI:



مقاله اصلی

بررسی و مقایسه میزان غلظت و پراکنش فلزات سنگین (جیوه، سرب، نیکل و وانادیوم) در پساب خام و تصفیه شده پتروشیمی امیر کبیر بندر امام خمینی و رسوبات تالاب شادگان

محمد کماسی^۱، سیدمسعود منوری^{۱*}، فریبا زمانی هرگلانی^۱، شهرام بیک‌پور^۱،^۲id

۱. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲. مرکز تحقیقات زمین‌شناسی پزشکی، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

پساب‌های صنایع پتروشیمی به دلیل دارا بودن ترکیبات متعدد آلی و معدنی، تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم‌های آبی محسوب می‌شوند. این پژوهش با هدف سنجش غلظت و بررسی الگوی پراکنش فلزات سنگین (جیوه، سرب، نیکل و وانادیوم) در واحدهای مختلف پتروشیمی امیرکبیر و ارزیابی میزان انباشت آن‌ها در رسوبات تالاب بین‌المللی شادگان انجام شد. در این مطالعه، ۱۵ نمونه پساب خام، ۱۵ نمونه پساب خروجی و ۱۵ نمونه رسوب سطحی از ۴ ایستگاه استراتژیک جمع‌آوری گردید. سنجش غلظت فلزات پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی مطابق روش استاندارد، توسط دستگاه ICP-OES مدل ES-۷۳۰ انجام شد. نتایج نشان داد که در پساب ورودی، غلظت فلزات به دلیل تنوع فرآیندی در واحدهای عملیاتی دارای دامنه تغییرات گسترده‌ای بود؛ به‌طوری‌که جیوه بین ۰/۰۲ تا ۶/۰۹ سرب بین ۰/۰۲ تا ۲/۲۳، نیکل بین ۰/۷۶ تا ۲۶/۸۸ و وانادیوم بین ۶/۵۴ تا ۲۰/۱۳ میکروگرم بر لیتر متغیر بود. بیشترین بار آلودگی در واحد الفین و کمترین آن در واحد بوتن-۱ مشاهده شد ($P < 0.05$). فرآیند تصفیه منجر به کاهش معنی‌دار غلظت تمامی فلزات در پساب خروجی گردید ($P < 0.05$). با این حال، غلظت فلزات در رسوبات تالاب (جیوه: ۱/۵۶-۶/۱۷ سرب: ۰/۹۲-۵/۰۶، نیکل: ۱۹/۵۵-۵۹/۴۲ و وانادیوم: ۳۰/۶۵-۶۸/۰۵ میکروگرم بر گرم) به‌طور معنی‌داری بالاتر از فاز مایع بود. الگوی تجمع آلاینده‌ها به‌صورت رسوب < پساب ورودی < پساب خروجی شناسایی شد که بیانگر نقش رسوبات به عنوان مخزن نهایی آلاینده‌های پایدار است. همبستگی مثبت معنی‌دار بین فلزات در رسوب با مواد آلی و همچنین ارتباط قوی بین نیکل و وانادیوم، منشأ مشترک نفتی و کاتالیزوری آن‌ها را تأیید می‌کند. مقایسه با استانداردهای EPA و NOAA نشان داد که غلظت فلزات در رسوبات ایستگاه‌های نزدیک به محل تخلیه پساب، از آستانه‌های مجاز فراتر رفته و نیازمند مدیریت فوری زیست‌محیطی است.

واژگان کلیدی: فلزات سنگین، پساب صنعتی، لجن فعال، رسوبات، تالاب شادگان.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۸/۲۹

تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۴/۸/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۹/۳

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۹/۳

تمامی حقوق برای دانشگاه آزاد اهواز محفوظ است.

* نویسنده مسئول: سیدمسعود منوری، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

ایمیل:

monavarisedmasoud4@gmail.com

استناد: کماسی، محمد؛ منوری، سیدمسعود؛ زمانی هرگلانی، فریبا؛ بیک‌پور، شهرام. بررسی و مقایسه میزان غلظت و پراکنش فلزات سنگین (جیوه، سرب، نیکل و وانادیوم)

در پساب خام و تصفیه شده پتروشیمی امیرکبیر بندر امام خمینی و رسوبات تالاب شادگان. مجله زیست‌شناسی دریا، پاییز ۱۴۰۴؛ ۱۷(۳): ۸۱-۹۳

مقدمه

در دهه گذشته ورود آلاینده‌ها با منشاء انسانی مانند فلزات سنگین به داخل اکوسیستم‌های مختلف آبی و خشکی به مقدار زیادی افزایش یافته است که به عنوان یک خطر جدی برای حیات این اکوسیستم‌ها بشمار می‌آیند (رحیمی بلوچی و ملک محمدی، ۱۳۹۳). بخش اعظم ورود این آلاینده‌ها به محیط زیست ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند تخلیه پساب‌های خانگی و صنعتی، تخلیه محصولات شیمیایی، هیدروکربن‌های نفتی و رنگی می‌باشد (Al Zarooni et al., 2006). در بین منابع تولید کننده این آلاینده‌ها، صنایع پتروشیمیایی از مهمترین مواردی است که طی سالیان اخیر سبب ورود غلظت‌های بالایی از آلاینده‌ها به محیط زیست بخصوص محیط‌های آبی شده است (Ghezali et al., 2021). صنایع مرتبط با پتروشیمی انواع مختلفی از آلاینده‌ها را تولید می‌کنند که به صورت گاز، ذرات، لجن و پساب مایع در محیط زیست منتشر می‌کنند (Jiang et al., 2018). پساب تولید شده در این صنایع مجموعه عظیمی از انواع مواد آلاینده مختلف می‌باشد که ورود هر یک به طبیعت می‌تواند به تهدیدی جدی برای سلامتی اکوسیستم تبدیل شود (واعظی و همکاران، ۱۳۹۳).

در تصفیه‌خانه‌های پتروشیمی، لجن‌ها در نتیجه فرآیندهای ترسیب فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی تولید می‌شوند. لجن پساب ماده‌ای نیمه مایع و مخلوطی از آب و مواد جامد است که حاوی ترکیبات آلی و غیرآلی پیچیده می‌باشد (Latosinska et al., 2021). این لجن‌ها از حوضچه‌های ابتدایی و نهایی تصفیه‌خانه بدست می‌آیند و حاوی آلاینده‌هایی نظیر مواد کلئیدی، چربی‌های غیرقابل تجزیه و به‌ویژه فلزات سنگین هستند (Jolanta and Przemysław, 2020). تصفیه این پساب‌ها و حذف مواد آلی و غیرآلی از مهم‌ترین مراحل قبل از انتقال به طبیعت است (ملماسی و همکاران، ۱۳۸۹). فلزات سنگین به دلیل سمیت بالا، از آلاینده‌های پرخطر در اکوسیستم‌ها شناخته می‌شوند (Praveena et al., 2015). این آلاینده‌ها برای موجودات بسیار خطرناک بوده و سمیت بالایی دارند (ولایت زاده و کوشافر، ۱۳۹۷). در فاضلاب‌های صنعتی پتروشیمی، فلزاتی مانند سرب، جیوه و نیکل بیشترین سهم را دارند (عباسی و همکاران، ۱۳۹۷). این عناصر به دلیل ماندگاری و تجمع در رسوبات، سبب تغییرات فیزیولوژیکی و ژنتیکی در جانوران می‌شوند (Zhang et al., 2017) و به دلیل خواص موتوژنی و سرطان‌زایی، سبب مرگ و میر موجودات می‌گردند (Xiao et al., 2016).

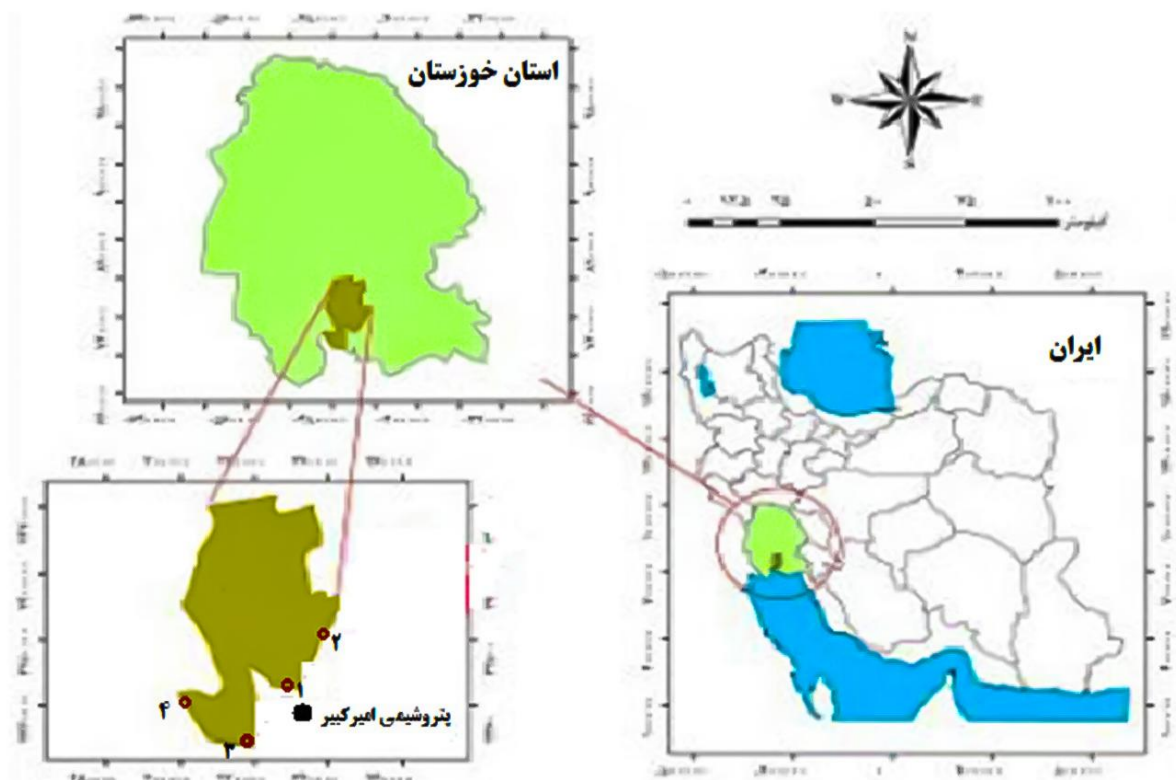
منطقه اقتصادی بندر امام خمینی یکی از مهمترین قطب‌های صنایع پتروشیمیایی در کشور است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۷). پتروشیمی امیرکبیر با داشتن واحدهای فعال نظیر الفین و پلی‌اتیلن، حجم بالایی از پساب را تولید می‌کند (عباسی و ملک زاده، ۱۳۹۹). اکوسیستم‌های آبی مثل تالاب‌ها که با ورود مزمزی از آلاینده‌ها روبرو هستند، دارای بیشترین میزان رسوبات آلوده می‌باشند (Tytła et al., 2016). تالاب شادگان به دلیل همجواری با این صنایع، محل دریافت پساب‌ها است و در معرض اثرات مخرب قرار دارد (رحیمی بلوچی و ملک محمدی، ۱۳۹۳). ضرورت این پژوهش در این است که علی‌رغم مطالعات پیشین، بررسی دقیق رفتار فلزات کاتالیزوری (نیکل و وانادیوم) در واحدهای عملیاتی مختلف و مقایسه آن با انباشت در رسوبات تالاب برای مدیریت ریسک منطقه الزامی است. هدف این مطالعه، بررسی غلظت جیوه، نیکل، سرب و وانادیوم در پساب و لجن پتروشیمی امیرکبیر و رسوبات تالاب شادگان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

بندر امام خمینی در طول جغرافیای ۴۹ درجه و ۱۳ دقیقه و عرض جغرافیای ۳۰ درجه و ۳۳ دقیقه واقع شده است (احمدپور و جوهری، ۱۳۹۰). حدود ۴۰ درصد ظرفیت تولید محصولات پتروشیمی کشور در این منطقه متمرکز است (Monazami Tehrani et al., 2012). مجتمع امیرکبیر شامل ۶ واحد تولیدی از جمله الفین، پلی‌اتیلن‌های سبک و سنگین، بوتن و بوتادین است که آلاینده‌های فلزی در طی فرآیند تولید از طریق مواد خام اولیه وارد فاضلاب آن‌ها می‌شود (عباسی و ملک زاده، ۱۳۹۹).

نمونه‌برداری بر اساس روش استاندارد شماره A 3030 در فصل پاییز انجام شد. تعداد ۱۵ نمونه پساب خام، ۱۵ نمونه پساب تصفیه شده و ۱۵ نمونه رسوب جمع‌آوری گردید.

در پتروشیمی، نمونه‌ها از خروجی واحدهای عملیاتی (الفین، پلی‌اتیلن سنگین و سبک، بوتادین و بوتن ۱) برداشت شد. در تالاب شادگان، ۴ ایستگاه بر اساس فاصله از محل تخلیه پساب انتخاب شدند؛ به طوری که ایستگاه ۱ در ورودی تالاب (نزدیک‌ترین نقطه به صنعت) و ایستگاه ۴ در دورترین نقطه قرار داشتند تا الگوی ترسیب آلاینده‌ها مشخص گردد.



شکل ۱. موقعیت پتروشیمی امیرکبیر و منطقه مورد مطالعه

نمونه‌برداری از پساب و رسوب مطابق با پروتکل‌های استاندارد انجام شد. نمونه‌های رسوب سطحی از عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری بستر تالاب با استفاده از دستگاه نمونه‌بردار رسوب‌گیر (Grab Sampler) مدل ون‌وین (Van Veen Grab) برداشت گردید. نمونه‌های رسوب بلافاصله در کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌کیپ عاری از آلودگی قرار گرفته و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های پساب نیز در بطری‌های پلی‌اتیلنی که از قبل با اسید نیتریک ۵ درصد شستشو و با آب مقطر دوبار تقطیر استریل شده بودند، ریخته و جهت تثبیت فلزات، pH آن‌ها با اسید نیتریک به کمتر از ۲ رسانیده شد.

فرآیند هضم اسیدی و سنجش: از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، جهت استخراج فلزات سنگین از روش هضم اسیدی مرجع استفاده شد. حدود ۲۰ میلی‌لیتر از نمونه پساب برداشته شد و ۱ میلی‌لیتر محلول دکاکلرو بای‌فیل با غلظت ۱۶ میکروگرم بر لیتر به عنوان استاندارد درونی به نمونه اضافه گردید (Li et al., 2019). مطابق با روش استاندارد (Standard Methods, 3030-E)، نمونه‌ها توسط اسید نیتریک ۶۵ درصد هضم شدند. جهت هضم نمونه‌های رسوب، ۵ گرم از نمونه خشک و همگن شده در یک بشر ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و پس از افزودن ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد، به مدت ۲۴ ساعت زیر هود نگهداری گردید. سپس نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در حمام بن‌ماری قرار گرفتند تا حجم آن‌ها به ۱۰ میلی‌لیتر کاهش یابد. جهت کنترل pH و تکمیل فرآیند هضم، به‌طور مرتب آب مقطر دوبار تقطیر اضافه گردید. در نهایت، عصاره حاصل توسط کاغذ صافی واتمن (شماره ۴۲) صاف و به حجم مشخص رسانیده شد.

سنجش غلظت فلزات سنگین هدف شامل جیوه (Hg)، سرب (Pb)، نیکل (Ni) و وانادیوم (V) با استفاده از دستگاه نشر نوری پلاسما کفت شده القایی (ICP-OES) مدل ES-۷۳۰ ساخت شرکت Agilent صورت گرفت (Raphael et al., 2020). جهت تأمین دقت و صحت آزمایش‌ها، از نمونه‌های شاهد و تکرارهای سه‌گانه برای هر ایستگاه استفاده شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

داده‌های حاصل پس از بررسی نرمال بودن (آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف)، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۶ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای مقایسه معنی‌دار غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های پساب و رسوب بین واحدها و ایستگاه‌های مختلف، از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) و آزمون تعقیبی دانکن (Duncan) استفاده شد. همچنین، برای بررسی ارتباط همبستگی بین فلزات در نمونه‌های لجن و رسوب، آزمون رگرسیون خطی به کار گرفته شد. تمام تحلیل‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < 0.05$) انجام پذیرفت. میزان غلظت فلزات در نمونه‌های پساب بر حسب میکروگرم بر لیتر ($\mu\text{g/L}$) و در نمونه‌های رسوب بر حسب میکروگرم بر گرم وزن خشک ($\mu\text{g/g dw}$) گزارش گردید.

نتایج

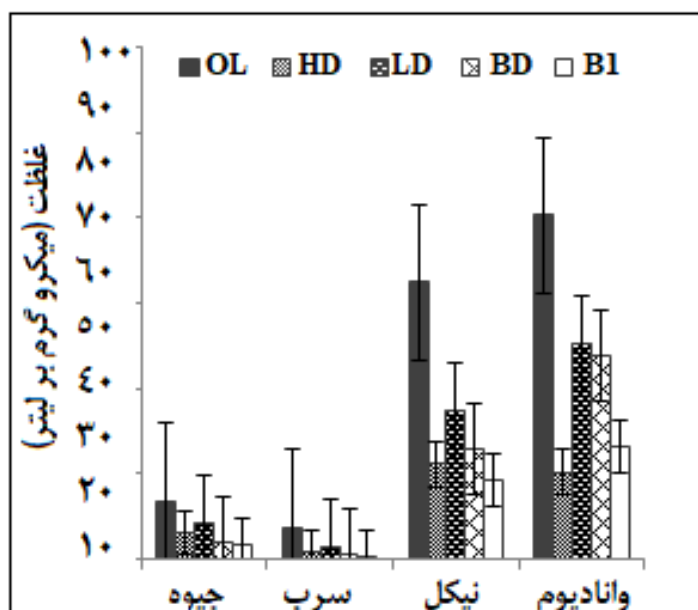
نتایج غلظت فلزات سنگین بر حسب میکروگرم بر لیتر در فاضلاب خام ورودی به تصفیه خانه‌های واحدهای مختلف تولیدی پتروشیمی امیرکبیر در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین غلظت جیوه بین $0.78 \pm 1/32$ در واحد بوتن ۱ تا $0.12 \pm 3/45$ میکروگرم بر لیتر در واحد الفین بدست آمد. همچنین حداقل و حداکثر غلظت جیوه بین $0.02 \pm 2/45$ تا $0.04 \pm 6/09$ میکروگرم بر لیتر گزارش گردید. حداقل و حداکثر غلظت سرب بین $0.02 \pm 2/56$ میکروگرم بر لیتر در واحد بوتادین تا $0.32 \pm 2/23$ میکروگرم بر لیتر در واحد الفین بدست آمد. میانگین غلظت سرب $0.78 \pm 1/08$ در واحد الفین، $0.03 \pm 0/43$ در واحد پلی اتیلن سنگین، $0.74 \pm 0/99$ در واحد پلی اتیلن سبک، $4/14 \pm 0/21$ در واحد بوتادین و $0.02 \pm 0/18$ میکروگرم بر لیتر در واحد بوتن ۱ بود. غلظت نیکل در واحد های مختلف بین $0.76 \pm 1/77$ تا $0.09 \pm 26/88$ اندازه گیری گردید. میانگین غلظت وانادیوم بین $1/44 \pm 6/54$ تا $0.32 \pm 20/13$ در واحد های مختلف و همچنین کمترین و بیشترین غلظت آن به ترتیب $0.94 \pm 7/45$ و $0.12 \pm 39/41$ میکروگرم بر لیتر بود.

غلظت فلزات سنگین در پساب خروجی (تصفیه شده) واحدهای مختلف تولیدی پتروشیمی امیرکبیر در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین غلظت جیوه بین $0.19 \pm 3/11$ در واحد بوتن ۱ تا $0.85 \pm 1/22$ میکروگرم بر لیتر در واحد الفین بدست آمد. میانگین غلظت سرب بین $0.19 \pm 1/73$ در واحد بوتادین تا $0.56 \pm 2/09$ در واحد الفین بود. میانگین غلظت نیکل بین $0.75 \pm 5/81$ تا $4/01 \pm 7/76$ اندازه گیری گردید. همچنین کمترین و بیشترین غلظت وانادیوم به ترتیب $0.88 \pm 5/09$ و $3/66 \pm 5/54$ میکروگرم بر لیتر بود. غلظت فلزات سنگین (میکروگرم بر گرم) در رسوبات تالاب شادگان در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. میانگین غلظت جیوه بین $0.39 \pm 1/56$ در واحد بوتن ۱ تا $0.45 \pm 6/17$ میکروگرم بر لیتر در واحد الفین بدست آمد. غلظت سرب بین $0.92 \pm 2/54$ در واحد بوتن ۱ تا $2/09 \pm 5/06$ در واحد الفین بود. کمترین و بیشترین غلظت نیکل $3/04 \pm 19/55$ تا $4/12 \pm 59/42$ اندازه گیری گردید. همچنین کمترین و بیشترین غلظت وانادیوم به ترتیب $0.15 \pm 30/65$ و $0.49 \pm 68/05$ میکروگرم بر لیتر بود.

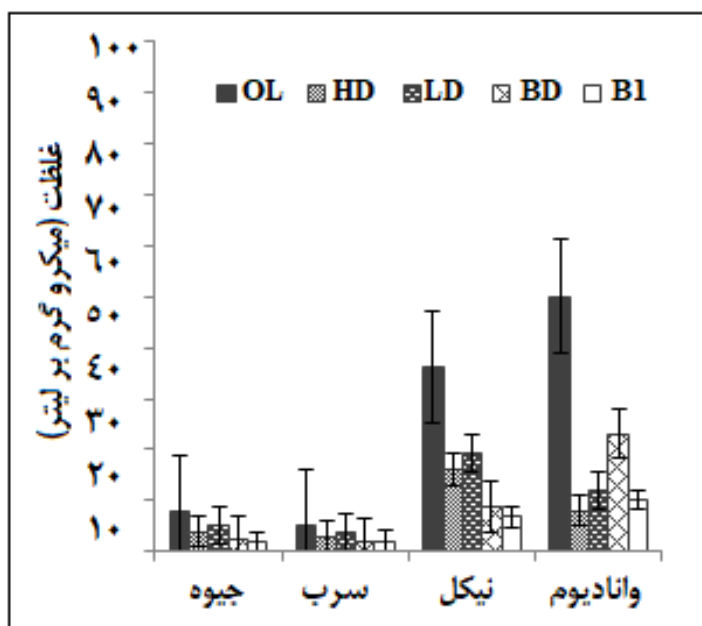
مقایسه غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های پساب ورودی به تصفیه خانه‌های واحدهای تولیدی مختلف در پتروشیمی امیرکبیر نشان داد که بین غلظت فلزات سنگین بجز سرب در واحدهای مختلف اختلاف معنی داری وجود دارد ($P < 0.05$)، ولی غلظت سرب در واحدهای مختلف اختلاف معنی داری نداشت ($P > 0.05$). بیشترین غلظت فلزات جیوه، نیکل، سرب و وانادیوم در واحد الفین و کمترین در واحد بوتن ۱ مشاهده گردید (شکل ۲).

مقایسه غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های پساب خروجی به تصفیه خانه‌های واحدهای تولیدی مختلف در پتروشیمی امیرکبیر نشان داد که بین غلظت فلزات سنگین نیکل و وانادیوم در واحدهای مختلف اختلاف معنی داری وجود دارد ($P < 0.05$)، ولی غلظت سرب و جیوه در واحدهای

مختلف اختلاف معنی داری نداشت ($P>0.05$). بیشترین و کمترین غلظت فلزات جیوه و نیکل به ترتیب در واحد الفین و بوتن ۱ مشاهده گردید. همچنین بیشترین و کمترین غلظت سرب به ترتیب در واحد الفین و بوتادین و فلز وانادیوم به ترتیب در واحد الفین و پلی اتیلن سنگین مشاهده گردید (شکل ۳).



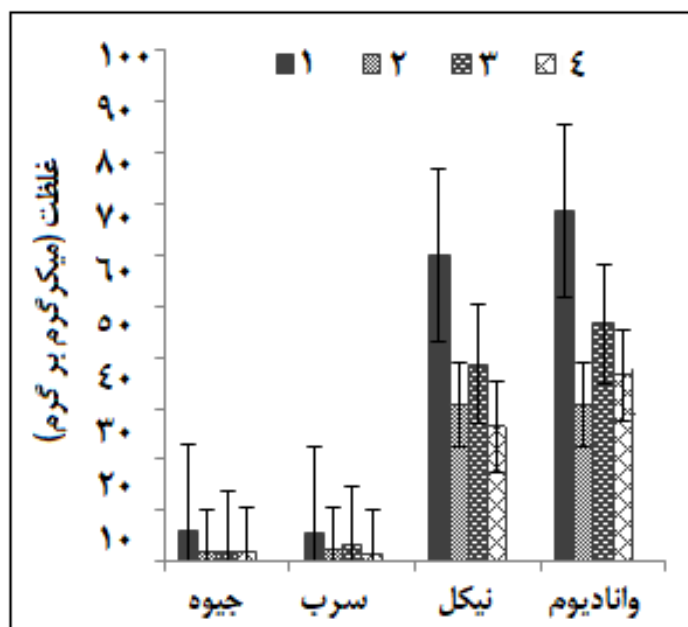
شکل ۲: مقایسه غلظت فلزات سنگین در پساب ورودی (خام) واحدهای مختلف پتروشیمی امیرکبیر



شکل ۳: مقایسه غلظت فلزات سنگین در پساب خروجی (تصفیه شده) واحدهای مختلف پتروشیمی امیرکبیر

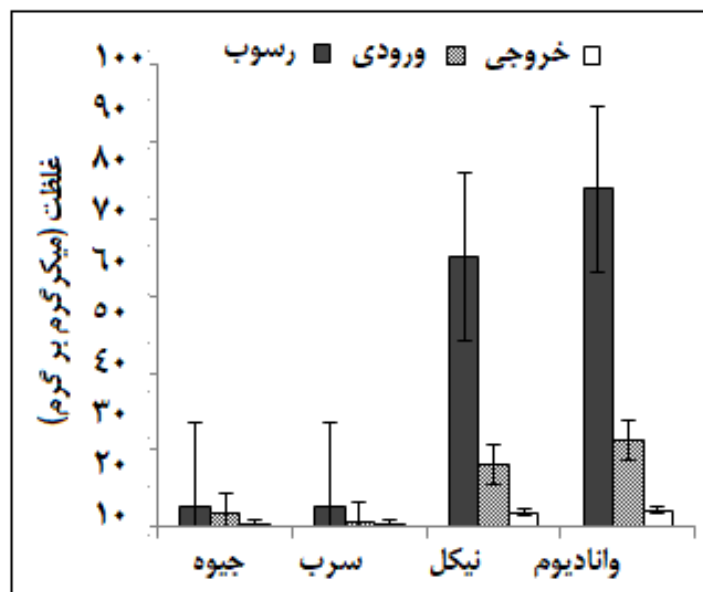
مقایسه غلظت فلزات سنگین در نمونه های رسوب ایستگاه های مختلف تالاب شادگان نشان داد که بین غلظت فلزات سنگین جیوه، سرب، نیکل و وانادیوم در واحدهای مختلف اختلاف معنی داری وجود دارد ($P<0.05$). بیشترین و کمترین غلظت فلزات جیوه، سرب و نیکل به ترتیب در

واحد الفین و بوتن ۱ مشاهده گردید ولی کمترین غلظت وانادیوم در واحد بوتادین بود. بنابراین بر اساس نتایج بدست آمده، واحد الفین دارای بیشترین غلظت فلزات و واحد بوتن ۱ دارای کمترین غلظت فلزات سنگین بود.



شکل ۴: مقایسه غلظت فلزات سنگین در رسوبات تالاب شادگان

نتایج حاصل از آنالیز رسوبات تالاب شادگان (شکل ۴) نشان داد که بیشینه غلظت عناصر مورد مطالعه در سطح ۱ (میکروگرم بر گرم) به دست آمد. در این غلظت، فلز وانادیوم با غلظت تقریبی $68/05 \pm 0/49$ میکروگرم بر گرم بالاترین میزان انباشت را نشان داد و پس از آن فلز نیکل با غلظتی در حدود $59/42 \pm 4/12$ میکروگرم بر گرم در رتبه بعدی قرار گرفت. تحلیل داده‌ها حاکی از آن است که با افزایش غلظت از ۱ به ۴ میکروگرم بر گرم، میزان تجمع فلزات سنگین در رسوب به‌ویژه در مورد وانادیوم و نیکل، روند کاهشی معنی‌داری ($P < 0.05$) را تجربه نموده است؛ این در حالی است که عناصر سرب و جیوه در تمامی غلظت‌های اعمال‌شده، کمترین میزان تجمع (کمتر از ۱۰ میکروگرم بر گرم) و بیشترین ثبات را از خود نشان دادند.



شکل ۵: مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در پساب خام و تصفیه شده واحدهای مختلف پتروشیمی امیرکبیر و رسوبات تالاب شادگان

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۵، مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری میان فازهای جامد و مایع در واحدهای پتروشیمی و رسوبات تالاب است. بیشینه غلظت در تمامی عناصر مورد بررسی، به‌ویژه در مورد وانادیوم و نیکل، در فاز رسوب (بخش جامد) مشاهده گردید که نشان‌دهنده پتانسیل بالای انباشتگی این فلزات در بستر است. الگوی توزیع فلزات در فازهای مختلف به صورت «رسوب < پساب ورودی < پساب خروجی» برآورد شد که این روند حاکی از کارایی فرآیندهای تصفیه در کاهش بار آلودگی فلزی از پساب خروجی می‌باشد. در این میان، فلزات وانادیوم و نیکل با ثبت مقادیر بیش از ۶۰ میکروگرم بر گرم در بخش رسوب، غالب‌ترین آلاینده‌ها بوده، در حالی که عناصر سرب و جیوه در هر سه فاز مورد مطالعه، کمترین میزان حضور را به خود اختصاص دادند.

همبستگی بین پارامترهای مختلف در پساب و لجن پتروشیمی امیرکبیر در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، بیشترین همبستگی بین وانادیوم با نیکل (۰/۷۵۴) و بعد از آن بین سرب با جیوه (۰/۴۰۹) بدست آمد ولی دیگر فلزات همبستگی معنی‌داری باهم نداشتند.

جدول ۱: همبستگی بین غلظت فلزات در پساب پتروشیمی امیرکبیر و رسوبات تالاب شادگان

رسوبات	پساب			
	جیوه	سرب	نیکل	وانادیوم
جیوه	۱			
سرب	۰/۶۴۳*	۱		
نیکل	۰/۱۸۳	۰/۰۰۷	۱	
وانادیوم	۰/۰۶۵	۰/۱۱۹	۰/۸۵۴*	۱
کربن آلی	۰/۹۳۴	۰/۵۴۹*	۰/۳۱۱	۰/۱۱۰

*حد معنی‌داری $P < 0.05$

نتایج آنالیز غلظت فلزات در واحد‌های مختلف پتروشیمی نشان داد که میزان پراکنش و تجمع فلزات در پساب‌ن واحد آلفین بطور معنی‌داری از دیگر واحدها بالاتر بوده و کمترین غلظت در واحد بوتن ۱ مشاهده گردید (جدول ۲). بطور کلی ترتیب افزایش غلظت فلزات در واحدها بصورت آلفین < پلی‌اتیلن سبک < پلی‌اتیلن سنگین < بوتادین < بوتن ۱ بود.

جدول ۲: مقایسه غلظت فلزات در رسوبات تالاب شادگان با استانداردهای زیست محیطی

استاندارد	جیوه	سرب	نیکل	وانادیوم	منبع
	۶/۵	۵/۰۲	۵۹/۵	۶۵	مطالعه حاضر
WQPP	۰/۵	۰/۵	۳۰	-	Latosinska (2017)
WHO	۰/۵	۰/۵	۳۰	-	WHO (2006)
NOAA	۲	۴	-	-	Latosinska (2017)
EPA	۰/۵	۰/۵	۳۰	-	EPA (2000)

WQPP; Water Quality Protection Program. WHO; World Health Organization. NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration. EPA; Environmental Protection Agency

بحث و نتیجه‌گیری

مقایسه بین غلظت فلزات سنگین در پساب پتروشیمی و رسوبات تالاب شادگان نشان داد که غلظت فلزات در رسوبات بطور معنی داری از پساب بالاتر بوده است ($P < 0.05$)، زیرا رسوبات بار آلودگی متفاوتی از منابع مختلف دریافت می‌کنند. غلظت فلزات سنگین در رسوبات تالاب شادگان ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند صنایع پتروشیمی، فولاد، کشاورزی، کشتی سازی، زباله‌های شهری و برخی دیگر به شرایط طبیعی محیط مربوط می‌شوند. از طرفی ساختار شیمیایی رسوبات و نوع ذرات رسوبی می‌تواند بر میزان جذب و تجمع فلزات تأثیر بگذارد (Hosseini and Sajjadi, 2018). عوامل محیطی مانند دما، pH و میزان اکسیژن محلول نیز در غلظت فلزات تأثیرگذار هستند. همچنین جریان‌های آبی می‌توانند ذرات آلوده را از جاهای مختلف جابجا کرده و باعث تجمع یا رقیق شدن فلزات در نقاط مختلف رسوبات ساحلی و تالابی شوند (حسینی و همکاران، ۱۳۸۹). بنابراین غلظت فلزات در رسوبات تالاب به عوامل مختلفی مرتبط است که باعث می‌شود رسوبات بار آلودگی بالایی نسبت به پساب پتروشیمی داشته باشند. غلظت بالای فلزات سنگین در رسوبات می‌تواند عواقب جدی برای اکوسیستم‌های آبی و موجودات زنده داشته باشد. این فلزات پس از ورود به آبزیان تجمع یافته و ممکن است به سطوح بالاتر غذایی منتقل شوند. بنابراین مدیریت زیست محیطی صنایع مرتبط بخصوص صنایع پتروشیمیایی، پایش مستمر کیفیت آب و رسوبات ضروری است تا از تأثیرات منفی این آلودگی‌ها بر اکوسیستم‌های آبی جلوگیری شود. تصفیه خانه واحدهای مختلف به دلیل نشست و ته نشینی پساب و تبدیل آنها به لجن دارای بار آلودگی بالایی هستند. ساختار شیمیایی لجن رسوب شده از بهترین دلایل تجمع آلاینده‌ها در پساب‌های تصفیه خانه‌های پتروشیمی است. در مطالعات مشابه نیز مشخص گردید لجن تصفیه خانه به دلیل دارا بودن بار مخالف فلزات سنگین می‌تواند فلزات را جذب و ذخیره کند (ترابیان و همکاران، ۱۳۸۲). نتایج تحقیق غالبی و همکاران (۱۳۹۱) نشان داد که غلظت فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه پتروشیمی فجر بطور معنی داری بالاتر از پساب خروجی است و همچنین غلظت آنها در پساب خام ورودی به تصفیه خانه نیز بالاتر از پساب خروجی است. حسینی و همکاران (۱۳۸۹) نشان دادند که غلظت فلزات نیکل و سرب در پساب و لجن ورودی تصفیه خانه بطور معنی داری بیشتر از پساب خروجی است. دادیان شهامت و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که غلظت فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه فاضلاب شهری گرگان بطور معنی داری بالاتر از غلظت آنها در پساب است. نتایج مطالعه Xiao و همکاران (۲۰۱۶) مشخص کرد که غلظت فلزات سنگین در پساب ورودی به تصفیه خانه بطور معنی داری از غلظت آنها در پساب خروجی بالاتر است و این تفاوت را میتوان به کیفیت پساب خام ورودی، افزودنی‌های شیمیایی، درجه خلوص مواد منعقد کننده مرتبط دانست. Pawłowski و Cao (۲۰۱۷) گزارش دادند که لجن‌های فعال تصفیه خانه پتروشیمی به دلیل ذرات ریز و دارا بودن ترکیبات آلی، توانایی بالایی در جذب فلزات سنگین و تجمع آنها دارند. Li و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که غلظت فلزات در رسوبات تالاب بطور معنی داری از پساب ورودی و خروجی بالاتر است، زیرا رسوبات دارای کربن آلی و یونهای باردار است که سبب جذب فلزات و تشکیل پیوند با آنها می‌شود. مطالعات Buonocore و همکاران

Rhafeal و همکاران (۲۰۲۰) دارای نتایج مشابهی بودند. بنابراین رسوبات به دلیل دانه ریز بودن سرشار از مواد آلی و کربن آلی و یونهای بار دار، توانایی بالایی در جذب فلزات از پساب و تجمع آنها دارد (Rodriguez et al., 2020).

مقایسه غلظت فلزات در پساب و رسوب مورد بررسی نشان که بین فلزات اختلاف معنی داری وجود دارد بطوریکه ترتیب فلزات براساس غلظت بصورت وانادیوم < نیکل < سرب < جیوه بود. باتوجه به منشا ورود آلاینده‌ها به پساب میتوان گفت منشا فلزات وانادیوم و نیکل مشتقات و ترکیبات نفتی، سوخت‌ها مانند نفت، گازوئیل و روغن می باشد که استفاده آنها در مواد خام ورودی به چرخه تولید، استفاده در ماشین آلات و دستگاه‌های مختلف واحد و همینطور وسایل نقلیه باری سبب ورود و تجمع آنها در پساب و سپس در خروجی‌های پساب می شود (Uzoekwe et al., 2011). بنابراین با توجه به مصرف مواد فوق در واحد مورد نظر، غلظت نیکل و وانادیوم نسبت به سرب و جیوه بالاتر است. از طرفی باتوجه به اینکه منبع سرب ترکیباتی مانند روغن، رنگ، کابل برق و سوخت بخصوص بنزین می‌باشد دارای غلظت بالایی در پساب پتروشیمی مورد مطالعه بود. سرب برای ساخت مواد مختلف، در صنایع مکانیکی، ساخت باطری، کابل، مواد رنگی یا رنگ دانه‌ها، گازوئیل و بنزین به کار می‌رود (Abdollahi et al., 2013). تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای فعالیت‌های حمل و نقلی و جابجایی می‌باشند، در نتیجه تردد این وسایل نقلیه و باری باعث افزایش آلاینده‌ها از جمله فلزاتی مانند مس، سرب در این مناطق می شود و غلظت این فلزات را در این ایستگاه‌ها بالا می‌برد.

غالبی و همکاران (۱۳۹۱) همبستگی بالایی بین سرب و نیکل (۰/۸۲۱) در پساب پتروشیمی فجر بندر امام خمینی گزارش دادند. دادبان شهامت و همکاران (۱۳۹۶) نیز در مطالعه مشابه همبستگی بالایی بین وانادیوم و نیکل (۰/۶۲۲) و نیکل با سرب (۰/۷۹۳) گزارش دادند. همچنین از دیگر مطالعات مشابه که نتایج مشابهی داشتند میتوان به نورانی و همکاران (۱۳۹۲)، شکراله زاده و گل محمد (۱۳۹۴) و حزه نژاد و زرین آبادی (۱۳۹۵) اشاره کرد. بر اساس مطالعات صورت گرفته، باتوجه به اینکه منشا فلزاتی همچون نیکل، وانادیوم و سرب یکسان و از منبعی مشابهی وارد پساب می شود دارای همبستگی بالایی هستند. منشا این فلزات، ترکیبات و مشتقات نفتی، رنگ و سوخت‌های فسیلی می باشد که دارای بیشترین استفاده در صنایع پتروشیمی می باشد که وارد چرخه تولید و نهایتاً پساب و محیط زیست می شود (Saghafiankhou et al., 2021).

نتایج همبستگی پیرسون بین فلزات و پارامترهایی همچون pH و EC نشان داد که همبستگی بالایی بین pH با سرب وجود دارد (۰/۵۴۹)، ولی دیگر فلزات همبستگی بالا و معنی داری با pH و EC نداشتند (جدول ۱). بنابراین تغییر در میزان pH پساب، سبب تغییر در میزان غلظت فلزات می شود بطوریکه کاهش pH سبب انحلال سرب از رسوب به پساب می گردد و سبب افزایش غلظت آن در پساب می شود (نورانی و همکاران، ۱۳۹۲). دادبان شهامت و همکاران (۱۳۹۶) گزارش دادند که همبستگی بالایی بین pH و سرب در پساب وجود دارد که در pH پایین انحلال سرب و افزایش غلظت آن می شود. Rodriguez و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که همبستگی بالایی بین pH و غلظت سرب و نیکل در پساب پتروشیمی وجود دارد و با کاهش pH انحلال فلزات در پساب بیشتر می شود. Rhafeal و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه مشابه گزارش دادند که با کاهش pH میزان جذب فلزات توسط رسوب افزایش پیدا می‌کند بنابراین بین pH و تغییر غلظت فلزات سرب و نیکل ارتباط معنی داری وجود دارد. بین میزان هدایت الکتریکی (EC) با فلزات در پساب همبستگی مشاهده نشد ولی بین هدایت الکتریکی با pH همبستگی معنی داری وجود داشت بطوریکه میتوان گفت تغییر در میزان pH سبب تغییر در میزان هدایت الکتریکی بصورت خطی می گردد. بنابراین براساس نتایج این مطالعه و مطالعات مشابه میتوان گفت همبستگی بین فلزات در پساب و رسوب به پارامترهای فیزیکوشیمیایی و همچنین منشا فلزات بستگی دارد (BidHendi et al., 2020).

واحد آلفین سالانه ۵۲۰ هزار تن گاز اتیلن و ۱۵۴ هزار تن پروپیلن، ۱۳۴ هزار تن بنزین پیرولیز، ۱۰۴ هزار تن برش چهار کربنه و ۲۳ هزار تن سوخت مایع تولید می کند (عباسی و ملک زاده، ۱۳۹۹). باتوجه به ظرفیت تولید بالای این واحد، حجم مواد خام ورودی به چرخه تولید، حجم سوخت‌های فسیلی از جمله نفت کوره، گازوئیل، بنزین و دیگر منابع آزاد کننده فلزات سنگین در این واحد بسیار بیشتر از دیگر واحدهاست. عباسی و ملک زاده (۱۳۹۹) گزارش دادند که غلظت آلاینده‌های زیست محیطی از جمله جیوه و سرب در پساب واحد آلفین بطور معنی داری از دیگر واحد

ها بیشتر است و این واحد ریسک زیست محیطی بیشتری نسبت به دیگر واحد ها دارد. واحد بوتن ۱ با تولید سالانه ۲۰ هزار تن منابع آلاینده کمتری وارد خطوط تولید و نهایتاً وارد پساب می کنند (حسینی و همکاران، ۱۳۸۹). در مطالعه عباسی و همکاران (۱۳۹۷) پساب واحد آلفین دارای غلظت بالایی از مشتقات نفتی و فلز سرب نسبت به دیگر واحد ها بود و حداقل میزان آلاینده نیز در واحد بوتن گزارش شد.

مقایسه غلظت فلزات سنگین در رسوبات تالاب شادگان با برخی از استانداردهای زیست محیطی (NOAA و EPA، WHO، FAO) در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، غلظت سرب، جیوه، نیکل در رسوبات جمع آوری شده از ایستگاه شماره یک تالاب شادگان که نزدیکترین ایستگاه به خروجی پساب های پتروشیمی است از استانداردهای بالاتر بوده است. آلوده به فلزات سنگین می باشند. همچنین در دیگر ایستگاه های مورد بررسی، غلظت جیوه در رسوبات از استانداردهای مورد بررسی بالاتر بوده است ولی دیگر فلزات غلظت کمتری از استانداردهای زیست محیطی داشتند. حزه نژاد و زرین آبادی (۱۳۹۳) نشان دادند که غلظت فلزات سنگین سرب و جیوه در پساب خروجی پالایشگاه نفت آبادان بالاتر از استانداردهای زیست محیطی است که می تواند برای محیط زیست ارون رود و زیست‌مندان آن خطرناک باشد. رحیمی بلوچی و ملک محمدی (۱۳۹۳) گزارش دادند که غلظت جیوه و نیکل در رسوبات تالاب شادگان بالاتر از استانداردهای زیست محیطی WHO بودند. حامد حسینی و همکاران (۱۳۹۲) گزارش دادند که غلظت فلزات سنگین کادمیوم و سرب در رسوبات بالاتر از استانداردهای زیست محیطی و در پساب پایین تر است. مرتضوی و صابری نسب (۱۳۹۵) نشان دادند که غلظت فلزات نیکل و روی در پساب پتروشیمی شازند بالاتر از استانداردهای زیست محیطی است و نیاز به مدیریت زیست محیطی دارد. Latosinska و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه مشابه نشان دادند که فلزات سنگین سرب، کادمیوم، کبالت و نیکل در پساب خروجی دارای غلظتی کمتر از استانداردهای زیست محیطی می باشند ولی لجن تصفیه خانه به دلیل توانایی بالا در جذب و ذخیره آلاینده ها، دارای غلظتی متجاوز از استانداردهای زیست محیطی NOAA و WHO بودند. Sajjadi و Hosseini (۲۰۱۸) نیز گزارش دادند که غلظت جیوه و سرب در رسوبات تالاب شادگان بالاتر از استانداردهای زیست محیطی WHO بودند.

نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه (جیوه، سرب، نیکل و وانادیوم) در رسوبات تالاب شادگان به‌طور معنی‌داری بالاتر از پساب ورودی و خروجی پتروشیمی امیرکبیر است. ارزیابی واحدهای مختلف تولیدی مشخص کرد که بیشترین غلظت فلزات سنگین در پساب واحد آلفین (به دلیل ظرفیت تولید و حجم مواد خام بالا) و کمترین میزان در واحد بوتن-۱ وجود دارد ($P < 0.05$). در بررسی توزیع مکانی در تالاب، بالاترین میزان انباشت فلزات در ایستگاه یک (دورق) به‌واسطه مجاورت با محل تخلیه پساب‌های صنعتی و کمترین میزان در ایستگاه چهار (خروجی تالاب) اندازه‌گیری شد. در نهایت، فراتر رفتن غلظت فلزات در رسوبات تالاب از برخی استانداردهای بین‌المللی زیست‌محیطی، لزوم بازنگری در مدیریت پسماند و پایش مستمر آلاینده‌ها را جهت حفظ تنوع زیستی این اکوسیستم حساس تأیید می‌کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پایان نامه دکتری در دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات می‌باشد. از تمام همکارانی که در اجرای این تحقیق ما را یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

References

۱. احمدپور، ا.، جوهری، م.، ۱۳۹۰. مطالعه موردی استفاده از کربن فعال در تصفیه پساب واحد پلی اتیلن سبک شرکت پتروشیمی بندر امام خمینی. دومین همایش ملی مدیریت پساب و پسماند در صنایع نفت و انرژی.
۲. تمیمی، ز.، احمدی مقدم، م.، جعفرزاده حقیقی فرد، ن.، ۱۳۹۱. بررسی میزان فلزات سنگین لجن نفتی واحد DAF تصفیه خانه فاضلاب یک واحد پالایشگاهی. اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.
۳. نغمه، س.، حسینی زارع، ن.، کمایی، ه.، روشن فکر، ق.، ۱۳۸۷. بررسی میزان آلودگی پساب صنایع پتروشیمی استان خوزستان. کنفرانس پتروشیمی ایران.

۴. نورانی، ا.، و مرادی، ح.، و محمدفام، ۱۳۹۲. اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین صنایع پتروشیمی (مطالعه موردی: پتروشیمی مهر)، سومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران.
۵. حسینی، ح.، احمدپور، ا.، شکیبی، خ.، ۱۳۸۹. بررسی انواع پسماندهای تولیدی واحدهای پلیمری شرکت‌های موجود در منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر. نخستین همایش ملی مدیریت پساب و پسماند در صنایع نفت و انرژی، تهران.
۶. حزه نژاد، ع.، زرین‌آبادی، س.، ۱۳۹۵. بررسی میزان غلظت فلزات سنگین در خروجی پساب شرکت پتروشیمی آبادان به درون رودخانه اروند و مقایسه آن با انواع استانداردهای زیست‌محیطی، دومین همایش ملی توسعه پایدار دریا محور، خرمشهر.
۷. جوزی، س.ع.، ملماسی، س.، مرندی، ر.، جعفریان مقدم، ا.، ۱۳۸۶. تجزیه و تحلیل اثرات محیط زیستی مجتمع پتروشیمی اروند بر اکوسیستم منطقه ویژه اقتصادی بندر امام خمینی به روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP). فصلنامه زمین، سال پنجم، شماره ۱: صفحات ۲۰-۱.
۸. راست منش، ف.، زراسوندی، ع.، باقری بیرگانی، آ.، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر مجتمع پتروشیمی و پالایشگاه نفت آبادان بر تمرکز فلزات سنگین و گوگرد در خاک. فصلنامه علوم محیطی، دوره ۱۴، شماره ۲: صفحات ۶۰-۴۹.
۹. رحیمی بلوچی، ل.، و ملک محمدی، ب.، ۱۳۹۳. ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی تالاب بین‌المللی شادگان بر اساس شاخص‌های عملکرد اکولوژیکی. محیط‌شناسی، شماره ۶۵، صفحات ۱۱۲-۱۰۱.
۱۰. سواری، احمد.، لاهیجان‌زاده، احمدرضا.، مهدیه، پریسا.، ۱۳۸۲. اندازه‌گیری فلزات سنگین وانادیم (V) و سرب (Pb) در فاضلاب خروجی پالایشگاه نفت آبادان و تأثیر آن بر رودخانه اروند. نشریه آب و فاضلاب، ۴۶: صفحات ۱۱۹-۱۱۲.
۱۱. شکراله زاده، س.، گل محمد، فرشته.، ۱۳۹۴. ارزیابی واحدهای تصفیه پساب در کنترل آلودگی صنعت پتروشیمی: مطالعه موردی: شرکت پتروشیمی آبادان. نشریه علوم محیطی، شماره ۲: صفحات ۹۴-۸۳.
۱۲. شکوهی، ر.، الماسی، ح.، زمانی، ف.، ۱۳۹۶. کارایی تصفیه‌خانه پساب مجتمع پتروشیمی سازند و امکان‌سنجی استفاده مجدد از پساب آن در سال ۱۳۹۴. مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان، جلد ۱۶، شماره ۱۱: صفحات ۱۰۵۲-۱۰۴۱.
۱۳. غالبی، م.، احمدی مقدم، م.، حقیقی فرد، ن.، مجدآباد، ع.، ۱۳۹۱. بررسی غلظت فلزات سنگین در لجن حاصل از تصفیه‌خانه آب پتروشیمی فجر. سومین همایش مدیریت پساب و پسماند صنعتی (در صنایع نفت و گاز)، تهران.
۱۴. عباسی، ش.، و ملک زاده، ا.، ۱۳۹۹. بررسی و ارزیابی ریسک‌های ایمنی و زیست‌محیطی پتروشیمی امیرکبیر ماهشهر با تکنیک FMEA، سومین همایش بین‌المللی توسعه فناوری در نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی، تهران.
۱۵. عباسی، آ.، باقری، ه.، پاکزاد، ح.، فلاح باران دوست، ر.، ۱۳۹۷. ارزیابی درجه آلودگی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب غنی‌شدگی و جامع آلودگی در رسوبات منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر. دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.
۱۶. کریمی، ح.، عباسی، ش.، رحمانی، ن.، ۱۳۹۰. بررسی برخی فلزات سنگین در پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ایلام و تغییرات آنها در مسیر رودخانه گدارخوش. سی‌امین گردهمایی علوم زمین.
۱۷. ملماسی، س.، جوزی، ع.، منوری، م.، و جعفریان مقدم، الهه.، ۱۳۸۹. بررسی اثرات زیست‌محیطی صنایع پتروشیمی تولیدکننده PET-PTA (مطالعه موردی: منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر). مجله علوم و تکنولوژی و مدیریت سیستم‌ها، شماره ۸: صفحات ۸۱-۷۳.
۱۸. واعظی، ع.، کرباسی، ع.، ولی‌خانی سامانی، ع.، حیدری، م.، فخرایی، م.، رحمتی، ع.، ۱۳۹۳. پهنه بندی، توزیع و منشأ هیدروکربن‌های نفتی کل (TPH) و آلاینده‌های فلزی در رسوبات خور ماهشهر، خلیج فارس. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، شماره ۱، شماره ۱۶: صفحات ۱۹-۱.
۱۹. ولایت زاده، م.، کوشافر، آ.، ۱۳۹۷. ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات تالاب ناصری خرمشهر. مجله دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقاتی بهداشتی، دوره ۱۸، شماره ۲: صفحات ۱۶۸-۱۵۷.

20. Abdollahi, S., Raoufi, Z., Faghiri, I., Savari, A., Nikpour, Y., Mansouri, A., 2013. Contamination levels and spatial distributions of heavy metals and PAHs in surface sediment of Imam Khomeini Port, Persian Gulf, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 71(1-2).
21. Al Zarooni, M., and Elshorbagy, W., 2006. Characterization and assessment of Al Ruwais refinery wastewater. *J. Hazard. Mater*, 136(3):398–405.
22. APHA, AWWA, WEF, 2002. “Standard Methods for the examination of water and wastewater” 22 th Edition, Washington D.C.
23. Buonocore, E., Mellino, S., De Angelis, G., Liu, G., Ulgiati, S., 2018. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecol. Indicat.* 94, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.047>.
24. Cao, Y., Pawłowski, A., 2017. Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: evaluating energy and greenhouse gas emissions implications. *Bioresour. Technol.* 127, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.135>.
25. EPA., 2000. Land application of sewage sludge. A guide for land applies on the requirement of the Federal standards for the use or disposal of sewage sludge, 40 CFR 503. Washington, DC: EPA. 2000.
26. Ghezali, K., Ben Tahar, N., Otmanine, G., & Guettaf, N., 2021. Environmental Assessment and Compliance of Wastewater from Arzew Oil Refinery for Future Development and Reuse. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 10(1), 18-23. [https://doi.org/10.47277/JETT/10\(1\)23](https://doi.org/10.47277/JETT/10(1)23).
27. Hosseini, M., Sajjadi, N., 2018. The comparison of selenium and lead accumulation between contaminated muddy and sandy sediments from four estuaries along the Persian Gulf: effect of grain size. *Environ Geochem Health*, 4:1645-1656.
28. Jiang, C., Hendrickson, T., and Jeanne, V., 2018. Life Cycle Water Consumption and Wastewater Generation Impacts of a Marcellus Shale Gas Well. *Environ. Sci. Technol*, 48: 1028–1041.
29. Jolanta, L., and Przemysław, C., 2020. The Ecological Risk Assessment and the Chemical Speciation of Heavy Metals in Ash after the Incineration of Municipal Sewage Sludge. *Sustainability*, 12, 6517; doi:10.3390/su12166517
30. Latosinska, J., 2017. Influence of temperature and time of sewage sludge incineration on the mobility of heavy metals. *Environ. Prot. Eng*, 43:105–122. doi: 10.37190/epe170409.
31. Latosinska, J., Kowalik, R., Gawdzik, J., 2021. Risk assessment of soil contamination with heavy metals from municipal sewage sludge. *Appl. Sci.*, 11, 548
32. Li, Y., Luo, X., Huang, X., Wang, D., Zhang, W., 2019. Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: a case study in Suzhou, China. *J. Cleaner Prod*, 57, 221–227. [10.1016/j.jclepro.2013.05.035](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.035).
33. Monazami Tehrani, G., Halim Sulaiman., Rasuli, H., Savari, A., Tavakoly Sany, B., Jafarzadeh, M.T., Khani Jazani, R., Monazami Tehrani, Z., 2012. Total Petroleum Hydrocarbon Contamination in Sediment and Wastewater from the Imam Khomeini and Razi Petrochemical Companies–Iran. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 6; 646-649.
34. Mustapha, H.I., Van Bruggen, J.J.A., and Lens, P.N.L., 2015. Vertical subsurface flow constructed wetlands for polishing secondary Kaduna refinery wastewater in Nigeria. *Ecol. Eng*, 84:588–595.
35. Nabi BidHendi, G., Rahmanzadeh, M., Hoveidi, H., Mehrdadi, N., 2020. The Life-Cycle Assessment of Urban Sewage Sludge Disposal Systems of Ekbatan Tehran Wastewater Treatment Plant. *Environmental Energy and Economic Research*, DOI 10.22097/eeer.2020.237899.1162.

36. Praveena, S.M., Ismail, S.N.S., Aris, A.Z., 2015. Health risk assessment of heavy metal exposure in urban soil from Seri Kembangan (Malaysia). *Arab. J. Geosci*, 8: 9753–9761.
37. Raphael, R., Zepon, T., Carolina, A., Almudena, H., Adisa, A., 2020. Life cycle environmental impacts of sewage sludge treatment methods for resource recovery considering ecotoxicity of heavy metals and pharmaceutical and personal care products. *Journal of Environmental Management*, 260: 109643.
38. Rodriguez, R., Espada, J., Pariente, M., Melero, J., Martínez, F., Molina R., 2020. Comparative life cycle assessment (LCA) study of heterogeneous and homogenous Fenton processes for the treatment of pharmaceutical wastewater. *J. Cleaner Prod*, 124L: 21–29. 10.1016/j.jclepro.2016.02.064.
39. Saghafiankhoo, S., Battaleb-Looie, S., Amanipoor, H., Dravishi Khatooni, J., and Ghanemi, K., 2021. Accumulation and Bioavailability of Heavy Metals (Cadmium, Chromium, Nickel, Lead and Zinc) in Water and Sediment Samples in the Musa Creek, Northwest Coasts of the Persian Gulf. *Journal of Marine Science and Technology*, 29: 666-672.
40. Tytla, M., Widzewicz, K., Zielewicz, E., 2016. Heavy metals and its chemical speciation in sewage sludge at different stages of processing. *Environ. Technol*, 37, 899–908.
41. Uzoekwe, S.A., and Oghosanine, F.A., 2011. The effect of refinery and petrochemical effluent on water quality of ubeji creek Warri, southern Nigeria. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 4:54-63.
42. World Health Organization., 2006. A compendium of standards for wastewater reuse in the Eastern Mediterranean Region
43. Xiao, Z., Yuan, X., Leng, L., Jiang, L., Chen, X., Zhibin, W., Xin, P., Jiachao, Z., Zeng, G., 2016. Risk assessment of heavy metals from combustion of pelletized municipal sewage sludge. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 23: 3934–3942.
44. Zhang, J., Tian, Y., Zhang, J., Li, N., Kong, L., Yu, M., Zuo, W., 2017. Distribution and risk assessment of heavy metals in sewage sludge after ozonation. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 24: 5118–5125.