Archive of SID

Journal of Environmental Studies
Vol. 48, No. 3, Autumn 2022

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Offering the Best Remediation Method for Cadmium Contaminated Sediment Using Hybrid FAHP and FVIKOR Models

Document Type
Research Paper

Received
September 04, 2022

Accepted
September 29, 2022

Saba Salmak[1], Melika Alishirazi[2], Toktam Shahriari[1*]

1 Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
2 Department of Environmental Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran.

DOI: 10.22059/JES.2022.348087.1008355

Abstract

These days, contamination of sediment and water resources to heavy metals, especially cadmium, cause severe human health and other organism's disorders due to its high toxicity. Remediation of cadmium-contaminated sediments is of particular importance and several studies have been carried out on various remedial techniques. Considering that the remedial actions of sediment are diverse and each of them has its own pros and cons, Choosing the suitable and proper method based on geographical, economical, and social conditions is not only challenging but also plays a key role in implementing a successful remediation action. In this study, multi-criteria decision making model and fuzzy hierarchical analysis were used to find the best approach for restoring polluted sediment. In this regard, important methods and indicators have been determined consisting literature review and experts' opinions. Based on the Weights determination by FAHP, the cost with 46% of weight, the availability of technology (39%), the potential of Pollutant recovery (9%), and time (6%) were determined as the main indicators of decision-making process. Moreover, by using VIKOR as a multi-criteria decision-making model, the best options for cadmium-contaminated sediment were identified. Ranking the options shows that the absorption method by using biological adsorbents (Q=0.002, S=0.274, R=0.205) and electrokinetic (Q=0.005, S=0.271, R=0.214) has been selected as the best possible approaches.

Keywords: Cadmium, FAHP, FVIKOR, Sediment, Water Pollution

* Corresponding Author: Email: tshshahriari@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

Extended abstract

Introduction

The estuary is one of the richest and most complex aquatic ecosystems, which contains many forms of marine life and provides a suitable environment for the breeding and growth of newly born aquatic animals. In today's world, some marine ecosystems and their species are threatened by human activities such as industrial wastewater production, consumption of fossil fuels, and the extraction of metals. The entry of contaminations to the estuaries can cause various consequences; for example, the presence of small amounts of pollutants can lead to the loss of sensitive species and plants in the media and the growth of resistant species (Bełdowski et al., 2018; Dhamodharan et al., 2019). Among all pollutants, heavy metals are considered the most harmful and threatening sources of pollution in water bodies. Heavy metals usually exist in nature and small amounts are necessary for organisms; however, in large amounts, they can affect living organisms. Cadmium is one of the heavy metals that is very toxic and has caused major problems due to its high stability and non-degradability. In this regard, cadmium is considered one of the most important sources of pollution (Zhao et al., 2018; Losada Ros et al., 2020). Cadmium a heavy metal with high mobility can be easily transferred in water and soil and one of the most common ways of human contamination with cadmium is through the food chain of contaminated products. Therefore, restoration and remediation of polluted sites are highly demanded (Xue et al., 2018).

Materials and Methods

- **Identify Criteria and Alternatives**

In this research hybrid multi-criteria decision-making techniques considering fuzzy AHP and fuzzy VIKOR approach based on triangular fuzzy sets were investigated to identify the best remediation method for cadmium-contaminated sediment. The analytic hierarchy process (AHP) is proposed based on multi-criteria decision-making problems including criteria, alternatives, and goals; (Putra et al., 2018; Wang et al., 2019; Gul, 2020; Salimi et al., 2020). In this process, an approach was used to select the most important criteria and alternatives for contaminated sediment: 1. identifying main criteria and sub-criteria based on literature review and questionnaires 2. extracting preferred remedial actions (alternatives) from analyzing questionnaires 3. Calculating the importance of each criterion by fuzzy AHP and using pairwise comparison matrix, and 4. ranking remediation techniques by fuzzy VIKOR.

- **Calculating the weights of criteria by Fuzzy-AHP**

In the first step, the comparison matrix is formed by using Saaty's nine-point ratio scale. Cost, time, technology availability, and pollution recovery potential are considered as criteria in this process; After scoring each pair of criteria (e.g. criteria i to criteria j) based on averaged preferences, the fuzzy comparison matrix is structured as shown below (Pourjavad and Mayorga, 2016). After the completion of the pairwise matrix, the consistency ratio will be checked by equations (2) and (3)

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12}^{\alpha} & \cdots & \cdots & \tilde{a}_{1n}^{\alpha} \\ \tilde{a}_{12}^{\alpha} & 1 & \cdots & \cdots & \tilde{a}_{2n}^{\alpha} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{a}_{n2}^{\alpha} & \tilde{a}_{n2}^{\alpha} & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

After checking the compatibility of pairwise comparisons, the fuzzy weight of each of the selected indicators is obtained, defuzzied, and normalized.

www.SID.ir

Archive of SID

$$NW_i = \frac{DF_i}{\sum_{i=1}^{n} DF_i} \quad (4)$$

- **Ranking remediation methods by FVIKOR**

In this research, to determine the best method of cleaning sediments contaminated with cadmium, 6 indicators have been used to prioritize 4 methods of remediation. After weighting the selected indicators, the fuzzy VIKOR method has been used to rank the remediation techniques; based on negative and positive ideal solution and normalized matrix the S, R, and Q were calculated as shown below;

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^{J} (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (5)$$

$$\tilde{R}_i = max_i (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (6)$$

$$\tilde{Q}_i = v \frac{(\tilde{S}_i \ominus \tilde{S}^*)}{S^{\circ r} - S^{*l}} \oplus (1 - v) \frac{(\tilde{R}_i \ominus \tilde{R}^*)}{R^{\circ r} - R^{*l}} \quad (7)$$

- **Ranking remediation options**

In this step, decisions are made considering R, S, and Q values for the alternatives sorted in descending order. The one with the lowest values in R, S, and Q will be the best option. On the other hand, the best option will be the one with the lowest Q and simultaneously conditions shown below should be considered;

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq \frac{1}{(m-1)} \quad (8)$$

m value is the number of alternatives

$A^{(1)}$ is the alternative with the first position in the ranking list by Q

$A^{(2)}$ is the alternative with the second position in the ranking list by Q

If the first condition is not met, the second condition will be checked;

$$Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < \frac{1}{(m-1)} \text{ for maximum M} \quad (9)$$

Discussion of Results

Based on the above-mentioned approach, S, R, and Q values were obtained. and are shown in Table **1**.

Table 1 S, R, and Q values

	Q	rank	S	rank	R	rank
Bioremediation	0.19	5	0.594	5	0.315	4
Electrokinetic	0.005	2	0.271	1	0.214	3
Washing Sediment	0.028	3	0.331	3	0.207	2
Adsorption	0.002	1	0.274	2	0.205	1
Solidification/Stabilization	0.143	4	0.487	4	0.315	4

Conclusions

www.SID.ir

Archive of SID

Pollution of estuaries and bays are rich ecosystems with great biodiversity are considered one of the most serious environmental issues. However, due to the limitations and challenges in developing countries such as Iran, choosing a method in which technology is available, does not involve high costs, needs a relatively short period, and returns some of the implementation costs by pollution recovery, is complicated. In the present study some indicators and sub-indices have been proposed, and the most important ones including Cost, time, and technology availability and pollution recovery potential were selected. The importance of each index was determined using a fuzzy analytic hierarchy process, and some practical remediation methods were selected in Iran. Finally, by using "Fuzzy VIKOR" indicators were ranked. The obtained results show that considering indicators including implementation costs, the time required for the implementation of treatment, the availability of the desired method's technology as well as the potential of pollutant recovery after cleaning, the absorption technique (especially by using bio-sorbents) and electro-kinetic can be the more practical approaches in developing countries.

www.SID.ir

Archive of SID

محیط‌شناسی، دورهٔ ٤٨، شمارهٔ ٣، پاییز ١٤٠١، صفحهٔ ٤١٩– ٤٣٧

ارائه بهترین روش‌های پالایشی جهت رسوبات آلوده به کادمیوم با استفاده از مدل ترکیبی FVIKOR و FAHP

صبا سلمک[1]، ملیکا علی شیرازی[2]، تکتم شهریاری*[1]

۱ گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲ گروه مهندسی محیط زیست، پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷

چکیده

امروزه آلودگی رسوبات و منابع آبی به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم به دلیل سمیّت بالا، صدمات شدیدی را بر سلامت انسان و سایر موجودات وارد می‌نمایند. پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و مطالعات گسترده ای بر روی انواع روش‌های پالایشی انجام گرفته است. با توجه به اینکه هریک از روش‌های پالایشی مزایا و معایب خاص خود را به همراه دارند، انتخاب تکنیک پاک‌سازی مطلوب بر اساس شرایط جغرافیایی، اقتصادی، اجتماعی و همچنین محدودیت‌های موجود، نه تنها چالش برانگیز بوده بلکه نقشی اساسی در میزان موفقیت روش پالایشی در مرحله اجرا ایفا می نماید. در پژوهش حاضر از مدل تصمیم گیری چندمعیاره و تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شده است. در این فرآیند روش‌ها و شاخص‌های مهم بر اساس ادبیات موضوع و با کمک از متخصصین درزمینه پاک‌سازی‌های زیست‌محیطی مشخص گردیده و توسط مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) وزن دهی شد. بر اساس وزن دهی‌های صورت گرفته توسط FAHP هزینه به‌عنوان مهم ترین شاخص با ۴۶٪ سهم ، در دسترس بودن تکنولوژی ۳۹٪، پتانسیل بازیابی آلاینده ۹٪ و زمان ۶٪ شاخص‌های اصلی تصمیم‌گیری تعیین شدند. همچنین، با استفاده از مدل تصمیم گیری چند شاخصه فازی ویکور (FVIKOR) برترین گزینه‌ها جهت پاکسازی رسوبات آلوده به کادمیوم مشخص گردیدند. برترین گزینه‌ها جهت پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم در ابتدا روش جذب با استفاده از جاذب‌های زیستی (R=۰،۰۲۰۵ وS=۰،۰۲۷۴ وQ=۰،۰۰۰۲) و سپس الکتروکینتیک (R=۰،۰۲۱۴ و S=۰،۰۲۷۱ و Q=۰،۰۰۰۵) به‌عنوان بهترین رویکردهای ممکن جهت پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم در نظر گرفته شدند.

کلید واژه‌ها: آلودگی آب، رسوب، کادمیوم، FVIKOR، FAHP

سرآغاز

خور از جمله غنی ترین و پیچیده ترین اکوسیستم‌های آبی است که بسیاری از اشکال حیات دریایی را در خود جای داده و محیط مناسبی را جهت پرورش و رشد آبزیان تازه متولد شده فراهم نموده است. در دنیای امروزه، برخی از اکوسیستم‌های دریایی و گونه‌های جانوری آن‌ها بواسطه فعالیت‌های انسانی نظیر ایجاد فاضلاب‌های صنعتی، مصرف سوخت‌های فسیلی و استخراج فلزات مورد تهدید قرار گرفته‌اند. ورود آلاینده به مصب‌ها و خورها می‌تواند صدمات متفاوتی را بر طبیعت اعمال نماید؛ بطور مثال وجود آلاینده‌ها به مقدار کم می‌تواند منجر به از بین رفتن جانوران و گیاهان حساس منطقه و رشد گونه‌های مقاوم گردد (Bełdowski et al., 2018; Dhamodharan et al., 2019). در میان تمامی آلاینده‌ها، فلزات سنگین به‌عنوان مضرترین و تهدید کننده ترین منابع آلوده کننده سیستم‌های آبی به شمار می روند. فلزات سنگین بطور معمول در

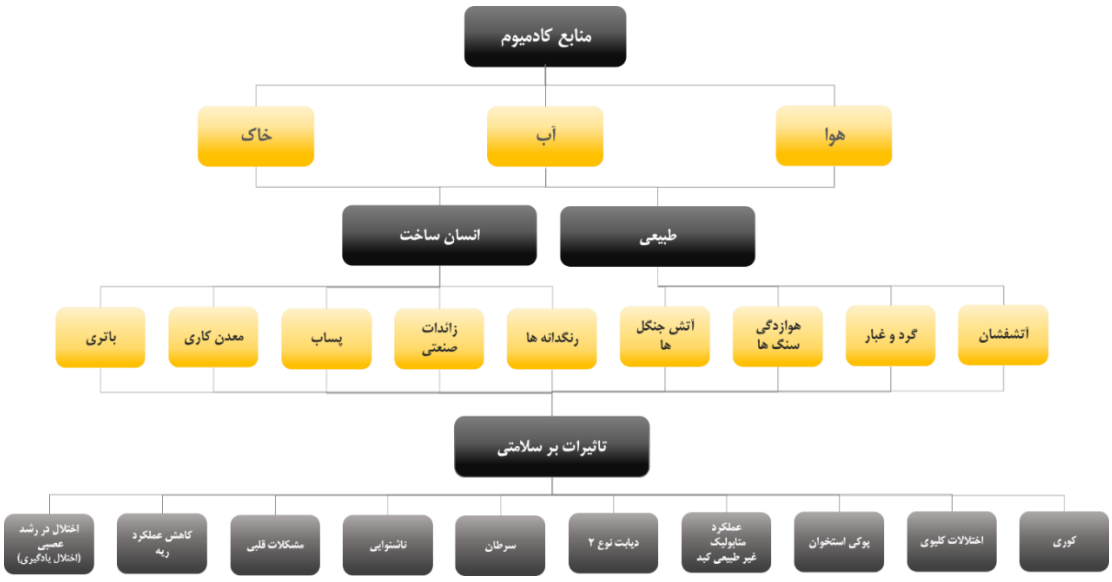
* نویسنده مسئول
Email: tshshahriari@ut.ac.ir
DOI: 10.22059/JES.2022.348087.1008355
DOR: 20.1001.1.10258620.1401.48.3.8.5

www.SID.ir

Archive of SID

طبیعت وجود داشته و حتّی در مقادیر کم برای ارگانیسم‌ها مفید می‌باشند؛ اما در مقادیر زیاد می‌توانند اثرات شدیدی بر موجودات زنده برجای گذارند. کادمیوم ازجمله فلزات سنگینی است که بسیار سمی بوده و به دلیل پایداری بالا و عدم تجزیه پذیری، مشکلات عمده ای را بوجود آورده است و یکی از مهمترین منابع آلاینده بشمار می رود (Zhao et al., 2018; Losada Ros et al., 2020).

آلودگی کادمیوم در طبیعت می‌تواند به هر دو صورت طبیعی و انسان ساخت رخ دهد؛ اما امروزه با توجه به گسترش روزافزون صنایع اغلب توسط انسان به طبیعت تحمیل می‌گردد و فهم منشاء و میزان تحرک پذیری آن‌ها در اکوسیستم‌ها اهمیت بسیار زیادی دارد (De La Luz Vázquez-Sauceda et al., 2012). کادمیوم یکی از مواد خامی است که در تولید باتری ها، آلیاژهای ترکیبی، روکش دهی فلزات، رنگ‌ها و دیگر صنایع تولید گردیده و مورداستفاده قرار می گیرند(Elanchezhiyan et al., 2021). گسترش فعالیت‌های انسانی مانند استخراج از معادن، احتراق سوخت‌های فسیلی، تخلیه پساب‌های صنعتی و انجام فعالیت کشاورزی آلودگی کادمیوم را تشدید می نماید (Cullen and Maldonado, 2013). کادمیوم ازجمله فلزات سنگینی است که تحرک پذیری بالایی داشته و به راحتی در آب و خاک قابل جابجایی می‌باشد. از رایج ترین راه‌های آلودگی انسان به کادمیوم از طریق زنجیره غذایی و مصرف محصولات آلوده بوده و به همین سبب نیاز به پاک‌سازی فوری آن‌ها به‌شدت احساس می‌گردد (Xue et al., 2018; Changsong, 2021) . منابع آلاینده کادمیوم و تاثیرات آن بر سلامت انسان بطور خلاصه در شکل ۱ ارائه گردیده است.



شکل ۱. منابع آلاینده کادمیوم و تاثیرات آن بر سلامت انسان

بواسطه خطرات رسوبات آلوده برای سلامت انسان، ارگانیسم‌ها و اکوسیستم‌های آبی، پاک‌سازی بدنه‌های آبی از رسوبات آلوده به‌ویژه در مناطق ساحلی به دلیل فعالیت‌های صنعتی، تجاری و توریستی ضروری و مهم می‌باشد. روش‌های متنوعی جهت پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم و سایر فلزات سنگین وجود دارد و هدف اصلی آن‌ها در بلند مدت کاهش ریسک ناشی از سمیت این فلزات، پاک‌سازی و یا مختل نمودن راه‌های انتقال فلزات سنگین به انسان می‌باشد. امروزه روش‌های پاک‌سازی بسیاری جهت هریک از فلزات سنگین ازجمله کادمیوم

www.SID.ir

Archive of SID

موردمطالعه و تحقیقات قرارگرفته‌اند، اما روش‌های محدودی موجود است که تحقیقات بسیار گسترده ای بر رویشان انجام شده و اجراهای موفقی در سطح تجاری و صنعتی نیز از آن‌ها بعمل آورده شده باشد. در مقابل، برخی روش‌ها کاملاً نوظهور بوده و در مرحله تحقیقات در مقیاس آزمایشگاهی قرار دارند (Libralato et al., 2018; Ting and Hsi, 2019; Eckley et al., 2020). در کشورهای در حال توسعه نظیر ایران با وجود چالش‌های اقتصادی-اجتماعی و محدودیت‌های موجود در تکنولوژی، یافتن راهکاری مناسب جهت پاک‌سازی رسوبات آلوده نه تنها برای سازمان‌های ایجاد کننده آلاینده بلکه برای بخش دولتی و متخصصین حوزه پاک‌سازی آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز موضوعی چالش برانگیز و حائز اهمیتی می‌باشد (O'Brien et al., 2021). بنابراین، یافتن روش‌های پاک‌سازی مطلوب جهت رسوبات آلوده به کادمیوم و سایر فلزات سنگین در کشورهای در حال توسعه و بر اساس فاکتورهای اساسی و محدود کننده موجود می‌تواند گامی مؤثر و ارزشمند در راستای ارزیابی، انتخاب و اجرای پالایش‌های زیست‌محیطی کارآمد در سطح ملّی باشد.

پاک‌سازی رسوبات با استفاده از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی متنوعی امکان پذیر می‌باشد که خود می‌توانند بصورت پالایش درجا و یا خارج از محل صورت گیرند. با توجه به اینکه فلزات سنگین قابلیت تجزیه زیستی نداشته و فقط می‌توانند به شکل‌های انحلال پذیر و غیر انحلال پذیر تبدیل گردند، بسیاری از روش‌های پاک‌سازی رسوبات تمرکز ویژه‌ای بر روی افزایش حلّالیت و تحرک پذیری فلزات و یا تثبیت آن‌ها دارند. یکی از روش‌های پاکسازی فرآیند بازیابی طبیعی نظارت شده می باشد که به‌عنوان پاک‌سازی طبیعی و منفعل می‌تواند میزان دسترسی زیستی آلاینده‌های موجود در رسوبات را به مرور زمان کاهش دهد. بازیابی طبیعی روشی مقرون به صرفه است که هیچگونه وقفه ای در محیط‌زیست ایجاد ننموده و اختلال در محیط‌زیست را به حداقل می رساند (Magar and Wenning, 2006). بازیابی طبیعی همراه با نظارت مناسب یکی از بهترین گزینه‌ها جهت مکان‌های صنعتی بزرگ و اکوسیستم‌های آبی دارای غلظت‌های پایین کادمیوم می‌باشد (Hsu-Kim et al., 2018). علاوه بر آن، فرآیند بازیابی طبیعی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را با هزینه کم در اختیار تصمیم گیرندگان قرار داده و همچنین در ارزیابی روش‌های چالش برانگیزتر مورداستفاده قرار گیرد (Magar and Wenning, 2006).

تثبیت و جامد سازی نیز از دیگر روش‌های پاکسازی است که یکی از پرکاربردترین روش‌های پالایش فلزات سنگین در محیط‌زیست به‌ویژه خاک و رسوبات می‌باشد. در این روش، فلزات سنگین از رسوبات آلوده حذف نمی‌گردند بلکه با استفاده از تثبیت‌کننده‌های متنوعی از حالت ناپایدار به حالت پایدار خود تبدیل می‌شوند تا از ورود آن‌ها به محیط آبی و چرخه حیات جانداران جلوگیری به عمل آید. این روش حجم کار پالایشی، هزینه، میزان اختلال در طبیعت و زمان موردنیاز را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد؛ به همین دلیل نیز، یکی از روش‌های مؤثر و اقتصادی بشمار می‌آید. در روش تثبیت و جامدسازی از مواد ارتقاء دهنده‌ای نظیر بنتونیت، بتن و بایوچار یا مواد تثبیت‌کننده زیستی نظیر گیاهان تثبیت‌کننده یا میکروارگانیسم‌های تثبیت‌کننده استفاده می‌شود. مواد ارتقاء دهنده به‌طور معمول گران‌قیمت بوده و ممکن است خطراتی را برای محیط آبی ایجاد نماید؛ به همین سبب، انتخاب تثبیت‌کننده‌ای مؤثر، مقرون‌به‌صرفه و درعین‌حال دوست دار محیط‌زیست نقش تعیین‌کننده‌ای را در این روش ایفا می‌نماید (Peng, Li, Liu, et al., 2018; Deng et al., 2020). جذب نیز یکی دیگر از روش‌های پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم می‌باشد که در آن یون‌ها به‌واسطه تبادلات یونی و جذب شیمیایی از درون آب به درون رسوب منتقل می‌گردند. جذب فلزات به درون مواد آلی و یا رس نیز به دلیل نیروی الکترومغناطیس استاتیکی می‌باشد. فلزات سنگین پس از جذب درون رس و یا

www.SID.ir

Archive of SID

کلوئیدهای هوموسی تجزیه نمی‌شوند بلکه گونه‌های آن‌ها به‌مرور زمان و براثر تغییرات در رسوبات ممکن است تغییر نماید. این روش عمدتاً جهت محیط‌های آبی آرام نظیر خورها، تالاب‌ها و دریاچه‌ها مناسب می‌باشد. همچنین، این روش پالایشی منجر به نگهداری کوتاه مدت آلاینده‌ها درون رسوبات می‌گردد (Changsong, 2021).

در مقایسه با دیگر فنّاوری‌های موجود، روش شستشوی خاک و رسوبات روشی کم‌هزینه و مؤثر جهت پاک‌سازی آلاینده‌ها می‌باشد. فاکتور بسیار مهم و تعیین‌کننده در روش شستشوی رسوبات انتخاب نوع ماده شوینده می‌باشد. تاکنون مواد شوینده‌ای نظیر اسیدها، سورفکتنت ها، عوامل کاهنده و عوامل کی لیت ساز در مطالعات مختلف نتایج مطلوبی را از خود نشان داده‌اند؛ اما بااین‌حال، بسیاری از این عوامل شوینده گران‌قیمت بوده و در ساختار رسوبات و خاک اختلال ایجاد می‌نماید. برخلاف خاک، در شستشوی رسوبات به دلیل وجود مواد آلی بیشتر و پیوند قوی‌تر میان فلزات در آن‌ها، احتمال جداسازی آلاینده‌ها از رسوبات کمتر بوده و نیاز به توجه و تخصص بیشتری می‌باشد (Zhang et al., 2019). علاوه بر آن فرآیند لایروبی نیز از دیگر روش‌های پاکسازی بصورت فیزیکی جهت حفاری و حذف رسوبات آلوده با استفاده از تکنیک‌های هیدرولیکی و یا مکانیکی می‌باشد. لایروبی روشی مؤثر جهت پاک‌سازی رسوبات دارای آلودگی بسیار بالا می‌باشد و برخلاف بسیاری از روش‌های پالایش درجا، لایروبی به‌عنوان روشی خارج از محل بر روی انواع رسوبات قابل‌اجرا می‌باشد. در این روش رسوبات آلوده فقط به‌صورت فیزیکی برداشت‌شده و به محلی دیگر انتقال می‌یابند تا با استفاده از روش‌های پاک‌سازی دیگری نظیر استخراج شیمیایی، شستشو و روش‌های ترکیبی مورد پالایش قرار گیرد (Knox and Paller, 2020; Zhang et al., 2021).

یکی دیگر از روش‌های بسیار رایج در پاک‌سازی رسوبات آلوده استفاده از فرآیند الکتروکینتیک می‌باشد. این روش به‌ویژه جهت فلزات سنگین بسیار مؤثر می‌باشد. در روش الکتروکینتیک جریان برقی مستقیم با شدت‌جریان کم به محیط آلوده اعمال می‌گردد. پس از اتصال برق ناحیه اسیدی تمایل دارد به سمت کاتد حرکت نماید و این فرآیند باعث انحلال گونه‌های فلزی و رسوب آن‌ها در کاتد می‌گردد. اگرچه در بسیاری از مطالعات از این روش به‌عنوان روشی اثربخش یاد گردیده است اما بااین‌حال عوامل مختلفی نظیر وجود آلاینده‌های آلی می‌تواند میزان اثربخشی این روش را محدود نماید و پیش از انتخاب این روش بایستی مطالعات کافی بر روی اثرات آلاینده‌های گوناگون موجود در محیط آلوده بر روی روش پالایشی انجام گردد (Fraiese et al., 2020).

امروزه علاوه بر روش‌های فوق، پالایش زیستی منوط بر مکانیسم‌های بیولوژیکی آلاینده‌ها نظیر تجزیه زیستی، سمّی زدایی، تغییرات زیستی و پتانسیل متابولیکی میکروارگانیسم‌ها نیز مورد استقبا قرار گرفته اند. اگر چه در این روش مواد آلی پس از تجزیه به مواد بی‌ضرری نظیر اکسیژن و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌گردند، اما آلاینده‌های غیرآلی تجزیه نشده و فقط میزان سمیّتشان، تحریک‌پذیری‌شان و دسترسی زیستی‌شان تأثیر می‌پذیرد (Perelo, 2010; Peng et al., 2018). در روش زیست پالایی نوع آلاینده موجود تأثیر بسزایی بر میکروارگانیسم‌ها و بازیابی رسوبات آلوده دارد و در سال‌های اخیر روش‌های زیست پالایی ترکیبی[1] موردتوجه بسیاری قرارگرفته‌اند. زیست پالایی در مقایسه با روش‌های رایج پاک‌سازی دوست دار محیط‌زیست، هم سو با پایداری زیست‌محیطی، دارای مقبولیت عمومی بالا و هزینه‌های مقرون‌به‌صرفه می‌باشد (Perelo, 2010; Sun et al., 2021). از سوی دیگر امروزه نانو مواد با توجه به ابعاد بسیار کوچک و مشخصات منحصربه‌فردی که دارند مورد استقبال ویژه‌ای قرارگرفته‌اند و در صنایع مختلفی نظیر برق و الکترونیک، حمل‌ونقل و مواد دارویی مورداستفاده قرارگرفته‌اند (Libralato et al., 2018; Liu et al., 2022). در پاک‌سازی رسوبات آلوده به

www.SID.ir

Archive of SID

کادمیوم نیز، نیاز به فنّاوری‌های پاک‌سازی مؤثر جهت تثبیت کادمیوم به‌شدت احساس می‌گردد. نانو ذرات آهن صفر یکی از نانو ذرات مهندسی‌شده‌ای است که برای پاک‌سازی بسیاری از آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین و ترکیبات کلرینه مؤثر می‌باشد(Xue et al., 2018).

در دنیای امروزه روش‌های بسیاری جهت پاک‌سازی رسوبات آلوده به انواع آلاینده‌ها ازجمله کادمیوم مورد مطالعات بسیاری قرارگرفته است؛ اما انتخاب روش پاک‌سازی مناسب جهت اجرا در مقیاس حقیقی و بر روی سایت‌های آلوده یکی از چالش‌برانگیزترین تصمیمات مهندسی می‌باشد. هزینه روش‌های پاک‌سازی اگرچه ازجمله مسائل مهم و بسیار تأثیرگذار بر انتخاب روش پالایشی است، اما تنها شاخص مهم نبوده و بایستی بسیاری از عوامل دیگر نیز مانند فنّاوری‌های موجود و محدودیت‌های آن‌ها، بازه زمانی موردنظر کارفرمایان جهت انجام پروژه، میزان پایداری زیستی روش ارائه‌شده و بسیاری موارد دیگر توأمان در نظر گرفته شود. انتخاب تکنیک پالایشی صحیح با در نظرگیری فاکتورهای تأثیرگذار نیازمند استفاده از نظرات و تجربیات متخصصین، فرآیندهای تصمیم‌گیری چند شاخصه (MCDM) و چارچوبی گام‌به‌گام جهت نیل به گزینه مناسب نهایی می‌باشد. در این مقاله هدف بر این است تا با استفاده از روش ترکیبی تصمیم‌گیری چند شاخصه شامل تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و ویکور فازی(FVikor) بهترین روش پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم در خورها و خلیج‌ها انتخاب‌شده و چارچوبی جهت ارائه بهترین روش پالایشی در رسوبات آلوده ارائه گردد.

مواد و روش‌ها

فرآیند انتخاب بهترین رویکرد پالایشی

در این پژوهش جهت ارزیابی و رتبه‌بندی روش‌های پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم روش ترکیبی تصمیم‌گیری چند شاخصه تحلیل سلسله مراتبی فازی و ویکور فازی بر اساس مجموعه‌های فازی مثلثی مورداستفاده قرارگرفته است. ویکور[۲] روشی ساده جهت حل مسائل دارای عدم قطعیت و شاخص‌های متضاد می‌باشد که می‌تواند گزینه‌های متعددی را بر اساس شاخص‌های در نظر گرفته‌شده رتبه‌بندی نماید و بهترین راه‌حل را ارائه نماید (Salimi et al., 2020)؛ اما با توجه به سطح بالای عدم قطعیت‌های موجود در این رویکرد، روش ارتقاءیافته‌ای به نام ویکور فازی ظهور نمود تا با استفاده از بیان کیفی، متغیرها را بر اساس شاخص‌ها ارزیابی نماید (Wang et al., 2021). اگرچه ویکور فازی روش مناسبی جهت ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌های مختلفی می‌باشد اما وزن دهی شاخص‌ها با استفاده از این روش امکان‌پذیر نبوده و می‌بایست از رویکردهای کمکی دیگری استفاده گردد. در این میان فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ازجمله روش‌هایی است که جهت وزن دهی شاخص‌ها رایج بوده و مورداستفاده قرار می‌گیرد. از مزایای روش AHP می‌توان به بررسی سازگاری و یا ناسازگاری شاخص‌ها و همچنین کاهش تعداد مقایسه‌ها بر اساس ساختاری سلسله مراتبی اشاره نمود. روش تحلیل سلسله مراتبی فازی نیز نسخه‌ای از AHP است که با تئوری منطق فازی توسعه‌یافته و از مقیاس مثلث فازی استفاده می‌کند و عدم قطعیت‌های موجود و داده‌های نامناسب در روش تحلیل سلسله مراتبی ساده را تا حد زیادی برطرف می‌نماید (Putra et al., 2018; Gul, 2020). بطور کلی استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی می تواند به تسهیل درک مسئله و تشکیل درخت تصمیم گیری کمک نماید. از سوی دیگر روش ویکور نیز از جمله روش هایی است که جهت متغیرهای ناهمگون مورد استفاده قرار گرفته و رویکردی مناسب برای مسائل در دنیای واقعی می باشد. اما با اینحال هردوی این روش‌ها محدودیت هایی را نیز به دنبال دارند. بطور مثال روش ویکور فاقد پیش بینی و تعیین وزن جهت معیارها می باشد و روش تحلیل سلسله مراتبی بواسطه محاسبات ریاضی و مقایسات زوجی که در بر دارد، زمان بر می‌باشد (Alsalem

www.SID.ir

Archive of SID

. (et al. 2018

فرآیند انتخاب شاخص‌ها و متغیرهای تصمیم‌گیری چند شاخصه

در این فرآیند، رویکرد ذیل جهت انتخاب مهم‌ترین شاخص‌ها جهت پالایش آلودگی کادمیوم در رسوبات اتخاذ گردیده است: ۱. شناسایی شاخص‌های اصلی و شاخص‌های فرعی بر اساس ادبیات مطالعه و پرسشنامه‌ها، ۲. استخراج اقدامات پاک‌سازی منتخب بر اساس تجزیه‌وتحلیل پرسشنامه‌های پرشده توسط متخصصین در صنعت نفت ۳. محاسبه میزان اهمیت هر یک از شاخص‌ها توسط فرآیند سلسله مراتبی فازی و مقایسه شاخص‌ها با یکدیگر و ۴. رتبه‌بندی تکنیک‌های پالایشی منتخب با استفاده از ویکور فازی.

وزن دهی شاخص‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

پس از تعیین فاکتورهای دارای ارجحیت بالا و همچنین روش‌های پالایش امکان‌پذیر و مناسب در ایران، وزن هر یک از این شاخص‌ها مشخص می‌گردد. جهت تشخیص و تعیین وزن این فاکتورها، در ابتدا ماتریس مقایسه زوجی شکل‌گرفته و شاخص‌ها با استفاده از مقیاس ۹ درجه‌ای Saaty که در جدول ۴ نیز نشان داده‌شده است مقایسه می‌گردد. در این فرآیند ارزش و ارجحیت هر جفت شاخص نسبت به یکدیگر با اعداد فازی مثلثی و با در نظرگیری پرسشنامه‌ها تعیین می‌شود. پس از امتیازدهی به هر جفت شاخص به‌طور مثال شاخص i به شاخص j ، یک مقدار متقابل در ماتریس مقایسه معکوس می‌شود (یعنی 1/aij). همچنین هنگامی‌که شاخص i برابر با j باشد، $\tilde{a}_{ij}$ برابر با ۱ خواهد بود (Pourjavad and Mayorga, 2016). ساختار ماتریس مقایسه فازی در رابطه ۱ نشان داده شده است:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12}^{\alpha} & \cdots & \cdots & \tilde{a}_{1n}^{\alpha} \\ \tilde{a}_{12}^{\alpha} & 1 & \cdots & \cdots & \tilde{a}_{2n}^{\alpha} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{a}_{n2}^{\alpha} & \tilde{a}_{n2}^{\alpha} & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$ رابطه (۱)

شاخص‌های سازگاری و ناسازگاری

یکی از مزایای مهم روش تحلیل سلسله مراتبی توانایی سنجش میزان سازگاری و یا ناسازگاری تصمیمات و نتیجه‌گیری در رابطه با قابل‌قبول و یا غیرقابل‌قبول بودن وزن‌های در نظر گرفته‌شده می‌باشد. جهت محاسبه سازگاری مقایسات زوجی، پس از تشکیل ماتریس مقایسه نسبت سازگاری با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد. نسبت سازگاری (CR) میزان سازگاری را در مقایسه با تصمیمات تصادفی نمونه‌های بزرگ تعیین می‌کند. اگر CR از ۰،۱ بیشتر شود، تصمیم ناسازگار در نظر گرفته می‌شود. ازآنجایی‌که λ_{max} می‌تواند مقادیری بزرگ‌تر و یا برابر تعداد شاخص‌ها (n) داشته باشد، تفاضل این دو نشان‌دهنده ناسازگاری ماتریس می‌باشد که وابسته به تعداد شاخص‌های موجود (n) می‌باشد. جهت رفع چنین وابستگی می‌توان از رابطه (۳) استفاده نمود. این رابطه نسبت سازگاری را نشان داده و برای به دست آوردن آن را بر شاخص تصادفی RI بایستی تقسیم نمود. مقادیر RI متناظر با تعداد شاخص‌ها بوده و در جدول ۱ نشان داده‌شده است (Taylor et al., 2007).

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - \mathrm{n}}{\mathrm{n} - ۱}$$ رابطه (۲)

$$\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}$$ رابطه (۳)

پس از بررسی سازگاری مقایسات زوجی با استفاده از رابطه (۴) وزن فازی هر یک از شاخص‌های انتخاب‌شده به دست می‌آید:

$$Wi = \frac{(\prod_{j=1}^{n} a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\Sigma(\prod_{j=1}^{n} a_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad \text{برای } i,j$$ رابطه (۴)

$$= 1,2,\dots,n$$

www.SID.ir

Archive of SID

و جهت غیر فازی کردن وزن‌های فازی از رابطه (۵) استفاده می‌گردد:

رابطه (۵)
$$DF_i = \frac{a+b+c}{3}$$

و درنهایت وزن‌های به‌دست‌آمده نرمال می‌گردند؛

رابطه (۶)
$$NW_i = \frac{DF_i}{\sum_{i=1}^{n} DF_i}$$

جدول ۱. مقادیر شاخص تصادفی RI بر اساس تعداد شاخص‌ها

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شاخص تصادفی (RI)	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵

رتبه‌بندی گزینه‌های موردنظر با استفاده از روش ویکور فازی

در این پژوهش جهت تعیین بهترین روش پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم ۶ شاخص جهت اولویت‌بندی ۴ روش پالایش استفاده گردیده است. پس از وزن دهی شاخص‌های منتخب، جهت رتبه‌بندی گزینه‌ها توسط ویکور فازی در مرحله اول متغیرهای کیفی با استفاده از اعداد فازی امتیازدهی گردیده و سپس ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود. شاخص‌ها در ستون‌ها و روش‌های پاک‌سازی موردنظر در ردیف‌ها قرارگرفته و بر اساس مقیاس هفت‌درجه‌ای روش ویکور فازی (جدول ۲) با در نظرگیری نتایج حاصل از پرسشنامه‌های متخصصین به مجموعه‌های فازی تبدیل می‌گردند. جهت به دست آوردن مجموعه‌های فازی یکپارچه و دستیابی به نتیجه‌ای واحد، میانگین مجموعه فازی یکپارچه‌شده x_{ij} برای تعداد مشخصی از متغیرها و با در نظرگیری m شاخص از تعداد مشخصی متخصص(k)محاسبه می‌گردد. مقدار x_{ij} با استفاده از رابطه (۷) به دست خواهد آمد. در این معادله $\tilde{X}_{ij}^{-K}$ به معنای ارزیابی kامین تصمیم‌گیرنده برحسب jامین شاخص از iامین متغیر می‌باشد. پس از محاسبه معادلات فوق به دست آمدن ماتریس تصمیم‌گیری فازی متغیرها (x_{ij}) برای kامین تصمیم‌گیرنده ماتریس حاصل به فرم نشان داده‌شده در رابطه (۸) به دست خواهد آمد(Wang, 2006).

رابطه (۷)
$$\tilde{X}_{ij} = \frac{\left[\tilde{x}_{ij}^{-1} \oplus \tilde{x}_{ij}^{-2} \oplus \ldots \oplus \tilde{x}_{ij}^{-K}\right]}{k}$$

$$i = \{1, 2, \ldots, m\},$$

$$j = \{1, 2, \ldots, n\}$$

جدول ۲. مقیاس هفت‌درجه‌ای روش ویکور فازی

مقیاس فازی			مقیاس	توصیف کیفی
U	M	L		
۲	۱	۰	۱	بسیار ضعیف
۳	۲	۱	۲	ضعیف
۵	۳,۵	۲	۳	تقریباً ضعیف
۶	۵	۴	۴	میانه
۸	۶,۵	۵	۵	تقریباً خوب
۹	۸	۷	۵	خوب
۱۰	۹	۸	۷	بسیار خوب

رابطه (۸)
$$\tilde{D} = \begin{pmatrix} \tilde{X}_{11} & \cdots & \tilde{X}_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{X}_{m1} & \cdots & \tilde{X}_{mn} \end{pmatrix}$$

$$W = \left[w_1, w_2, \ldots, w_n\right] \text{ و } j = \{1, 2, \ldots, n\}$$

تعیین راه‌حل ایده آل مثبت و ایده آل منفی

در این مرحله بهترین مقدار (سود) و بدترین مقدار (تأسف) هریک از شاخص‌ها از میان تمامی گزینه‌ها تعیین می‌گردد. راه‌حل ایده آل مثبت یا بهترین مقدار ($\tilde{f}^*$) را می‌توان با رابطه (۹) و جواب ایده آل منفی یا بدترین مقدار($\tilde{f}^-$) را با رابطه (۱۰) به دست آورد (Kumar and Gopal, 2021).

رابطه (۹)

$$\tilde{f}_j^* = \mathrm{Max}_i\, \tilde{f}_{ij}$$
$$\tilde{f}_j^- = \mathrm{Min}_i\, \tilde{f}_{ij}$$
$$i = \{1, 2, \ldots m\}$$

www.SID.ir

Archive of SID

رابطه (۱۰)

$$\tilde{f}_j^* = \mathrm{Min}_i\, \tilde{f}_{ij}$$
$$\tilde{f}_j^- = \mathrm{Max}_i\, \tilde{f}_{ij}$$
$$i = \{1, 2, \ldots, m\}$$

ماتریس تصمیم نرمال شده

ماتریس تصمیم نرمال شده را می‌توان همان‌طور که در رابطه (۱۱) برای راه‌حل‌های ایده آل مثبت و در رابطه (۱۲) برای راه‌حل‌های ایده آل منفی نشان داده‌شده است؛

رابطه (۱۱)

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{(\tilde{f}_j^* \ominus \tilde{f}_{ij})}{(r_j^* - l_j^\circ)}$$

رابطه (۱۲)

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{(\tilde{f}_{ij} \ominus \tilde{f}_j^*)}{(r_j^\circ - l_j^*)}$$

در جائیکه:

$$\tilde{f}_j^* = (l_j^*, m_j^*, r_j^*)\,, \tilde{f}_j^\circ = (l_j^\circ, m_j^\circ, r_j^\circ)$$

محاسبه مقادیر سودمندی $\tilde{S}_i$ و تأسف $\tilde{R}_i$

پیش از محاسبه مقادیر تأسف و سودمندی، ماتریس نرمال شده به ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده وزنی تبدیل گردیده و سپس $\tilde{S}_i$ و $\tilde{R}_i$ بر اساس رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) به دست می‌آیند (Wang, 2006).

اگر $\tilde{R}_i = (R_i^l, R_i^m, R_i^r)\ and\ \tilde{S}_i = (S_i^l, S_i^m, S_i^r)$

رابطه (۱۳)

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^{J} (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij})$$

رابطه (۱۴)

$$\tilde{R}_i = max_i (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij})$$

محاسبه شاخص ویکور

در این گام بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده در مرحله پیشین و بر اساس رابطه(15) مقادیر Q برای هر یک از گزینه‌ها محاسبه می‌گردد.

رابطه (۱۵)

$$if\ \tilde{Q}_i = \left(Q_i^l \text{و} Q_i^m \text{و} Q_i^r\right)$$
$$\tilde{Q}_i = v\frac{(\tilde{S}_i \ominus \tilde{S}^*)}{S^{\circ r} - S^{*l}} \oplus (1-v)\frac{(\tilde{R}_i \ominus \tilde{R}^*)}{R^{\circ r} - R^{*l}}$$

در جائیکه:

$$\tilde{S}^* = \min_i \tilde{S}_i$$
$$S^{\circ r} = \max_i S_i^r$$
$$\tilde{R}^* = \min_i \tilde{R}_i$$
$$R^{\circ r} = \max_i R_i^r$$

یافته‌ها

به‌منظور حذف و بازیابی رسوبات آلوده به کادمیوم در محیط‌های آبی و همچنین جلوگیری از ورود مجدد کادمیوم به چرخه طبیعت روش‌های مناسب جهت پاک‌سازی شناسایی گردید. بااین‌وجود به دلیل تنوع بالا و تعدد روش‌های پاک‌سازی و وجود شاخص‌های تأثیرگذار بسیار، در این پژوهش هدف بر این بوده است تا روش مناسب جهت انجام پاک‌سازی رسوبات آلوده به کادمیوم شناسایی شود. با توجه به چند شاخصه بودن تصمیم‌گیری و پیچیدگی در انتخاب، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه ویکور فازی و تحلیل سلسله مراتبی فازی موردمطالعه قرار گرفت. روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه به دلیل وجود اختلاف‌نظرها و عدم قطعیت‌های موجود در تصمیمات، در بسیاری از مسائل ناموفق و غیرقابل‌اعتماد بوده و نتایج درستی از آن‌ها حاصل نمی‌گردد؛ به همین سبب، روش‌های تصمیمی گیری چند شاخصه‌ی فازی جهت غلبه بر محدودیت‌های موجود ظهور کردند. در این پژوهش نیز جهت شناسایی بهترین روش پالایشی و رتبه‌بندی سایر گزینه‌های موجود از روش‌های ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و ویکور فازی(FVIKOR) با استفاده از مجموعه‌های فازی مثلثی استفاده گردید.

انتخاب شاخص‌ها و متغیرهای تصمیم‌گیری چند شاخصه

بر اساس ملاقات با کارشناسان شرکت پتروشیمی و مطالعه ادبیات موضوع، لیستی از شاخص‌های اصلی و فرعی متعدد برای طرح پرسشنامه‌ها تهیه گردید (جدول ۳). سپس پرسشنامه‌هایی استاندارد، جهت ارزیابی تجربیات علمی و عملی کارشناسان حوزه پتروشیمی در رابطه با روش‌های اصلاح و انتخاب اقدامات ترجیحی بر اساس

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج آن‌ها، تنظیم و طراحی گردید. جامعه آماری این پژوهش بندر ماهشهر بوده و پرسشنامه میان متخصصین صنعت پتروشیمی توزیع گردید.

جدول ۳. شاخص‌های اصلی و فرعی اولیه

	شاخص‌ها	شرح
شاخص‌های اصلی	آلاینده‌های نگران‌کننده	وجود آلاینده‌های ترکیبی و یا تک آلاینده در محیط
	هزینه	هزینه‌های اجرا و پاک‌سازی
	تکنولوژی	در دسترس بودن تکنولوژی پالایشی موردنظر در کشور
	سطح آلودگی	محیط دارای آلودگی بسیار، متوسط و یا کم
	خطرات ناشی از محیط آلوده	ارزیابی مبتنی بر ریسک جهت اقدامات اصلاحی
	موقعیت جغرافیایی	موقعیت مکانی و ماهیت رسوبات بر اساس آن، کاربری اراضی مناطق مجاور محیط‌های آلوده
	سایت آلوده/مشخصات محیط	ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی سایت آلوده
	زمان	زمان موردنیاز درمان جهت انجام پاک‌سازی
شاخص‌های فرعی	مقبولیت اجتماعی	پذیرش عموم مردم و داشتن احساسی مناسب نسبت به روش پالایش
	بازیابی آلاینده	بازیابی آلاینده‌ها از محیط‌های آلوده و مزایای ناشی از آن
	مقررات و سیاست‌ها	سیاست‌های اجرایی کشور، قوانین و مقررات سازمان‌ها و ...
	پایداری	تائید سهامداران و مدیران پروژه، مجموعه‌های موردتوجه جامعه و غیره
	نوع رسوب	تجزیه‌وتحلیل رسوب برای شناخت اجزای اصلی رسوبی
	نوع اقدام پالایشی	اقدام موقت، اولیه، پیش پاک‌سازی و یا پاک‌سازی اصلی بودن نوع پالایش
	منطقه متأثر	ساختار محیط آبی (دریا، دریاچه، خور، مصب و ...)
	مقررات و سیاست‌ها	همسویی روش انتخاب‌شده با سیاست‌ها و قوانین محلی آن منطقه

تحلیل پرسشنامه‌ها و انتخاب شاخص‌ها و گزینه‌ها

جامعه آماری موردنظر در این پژوهش متخصصین و مهندسین شرکت پتروشیمی بندر ماهشهر می‌باشند که درزمینه پاک‌سازی‌های زیست‌محیطی تجربه داشته و همچنین از قوانین بازدارنده، تکنولوژی‌های موجود و چالش‌های روش‌های پاک‌سازی مطلع می‌باشند. پس از طراحی و تهیه پرسشنامه‌های مرتبط با ارزیابی روش‌های پالایشی جهت رسوبات آلوده به کادمیوم، پرسشنامه‌ها میان ۳۰ نفر از این متخصصین توزیع گردید. پس از جمع‌آوری و تحلیل پرسشنامه‌های تکمیل‌شده، بر اساس نظرات متخصصین شاخص‌های دارای ارجحیت بالا و گزینه‌های پاک‌سازی دست‌یافتنی در ایران جدا گردیده و جهت وزن دهی و رتبه‌بندی مورداستفاده قرار گرفت. شاخص‌های نهایی انتخاب‌شده در این فرآیند، هزینه، زمان، تکنولوژی و پتانسیل بازیابی بوده و همچنین با توجه به نتایج حاصل از پرسشنامه‌ها ۵ روش منتخب پاک‌سازی رسوبات شامل زیست پالایی، الکتروکینتیک، جذب، شستشوی رسوبات و لایروبی جهت رتبه‌بندی و یافتن بهترین رویکرد برای رسوبات آلوده به کادمیوم انتخاب گردیدند.

وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی

پس از انتخاب شاخص‌ها بر اساس تحلیل پرسشنامه‌ها و ادبیات موضوع ۴ شاخص زمان، هزینه، تکنولوژی و امکان بازیابی آلاینده‌ها انتخاب گردیده و ماتریس مقایسات زوجی با توجه به مجموعه‌های فازی مثلثی و مقیاس ۹ درجه‌ای Saaty تشکیل گردید (جدول ۴)

$$\tilde{A}=\begin{bmatrix} (1و1و1) & (5و6و7) & (1و2و3) & (3و4و5) \\ \left(\frac{1}{7}و\frac{1}{6}و\frac{1}{5}\right) & (1و1و1) & \left(\frac{1}{8}و\frac{1}{7}و\frac{1}{6}\right) & \left(\frac{1}{3}و\frac{1}{2}و1\right) \\ \left(\frac{1}{3}و\frac{1}{2}و1\right) & (6و7و8) & (1و1و1) & (5و6و7) \\ \left(\frac{1}{5}و\frac{1}{4}و\frac{1}{3}\right) & (1و2و3) & \left(\frac{1}{7}و\frac{1}{6}و\frac{1}{5}\right) & (1و1و1) \end{bmatrix}$$

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. مقیاس ۹ درجه‌ای Saaty

متغیرهای زبانی	مقیاس مثلثی فازی	مقیاس
به یک اندازه مهم	(۱,۱,۱)	۱
ضعیف مهم	(۲,۳,۴)	۳
نسبتاً مهم	(۴,۵,۶)	۵
بسیار مهم	(۶,۷,۸)	۷
شدیداً مهم	(۹,۹,۹)	۹
مقادیر میان دو مقیاس	(۱,۲,۳)	۲
	(۳,۴,۵)	۴
	(۵,۶,۷)	۶
	(۷,۸,۹)	۸

با توجه به اینکه سیستم ارزیابی پیچیده بوده و تصمیم‌گیری‌های اتخاذشده توسط متخصصین به‌ناچار در بسیاری از موارد جانب‌دارانه می‌باشد، ممکن است میان ماتریس‌هایی که تشکیل می‌گردد عدم یکپارچگی وجود داشته باشد؛ به همین سبب، نرخ سازگاری و یکپارچگی برای اوزان به‌دست‌آمده حساب گردیده و با توجه به اینکه مقدار آن کمتر از ۰/۱ می‌باشد، وزن دهی‌های انجام‌شده قابل‌قبول است.

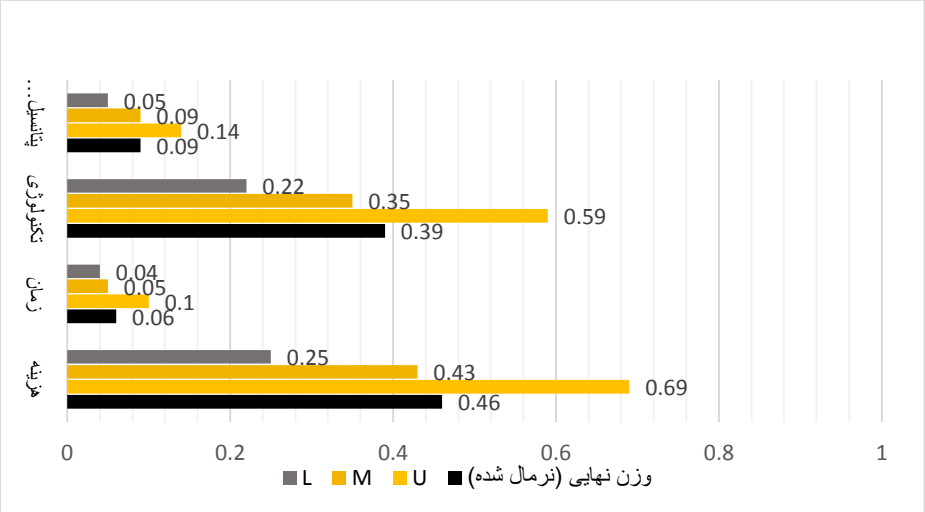
$$CR = \frac{0.083}{0.9} < 0.1$$

پس از شکل‌گیری ماتریس بر اساس مجموعه‌های فازی، مقایسات زوجی با استفاده از میانگین هندسی ادغام گردید؛

$$\begin{bmatrix} 1.97 & 2.63 & 3.2 \\ 0.28 & 0.33 & 0.43 \\ 1.78 & 2.14 & 2.74 \\ 0.41 & 0.54 & 0.67 \end{bmatrix}$$

سپس بر اساس رابطه (۴) ماتریس وزنی نهایی به دست آمد که نتایج حاصل از آن در شکل ۲ نشان داده‌شده است.

$$w_i = \begin{bmatrix} 0.28 & 0.47 & 0.72 \\ 0.04 & 0.06 & 0.1 \\ 0.25 & 0.38 & 0.62 \\ 0.06 & 0.1 & 0.15 \end{bmatrix}$$



شکل ۲. اوزان فازی و نهایی شاخص‌ها

در نهایت ماتریس وزن دهی نرمال‌سازی گردیده و ماتریس وزن نهایی شاخص‌ها به دست می‌آید.

$$w_i \text{ شده نرمال} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.43 & 0.69 \\ 0.04 & 0.05 & 0.1 \\ 0.22 & 0.35 & 0.59 \\ 0.05 & 0.09 & 0.14 \end{bmatrix}$$

تعیین مقدار V

پارامتر v جهت محاسبه مقادیر Q در گام بعدی با توجه به میزان توافق گروه تصمیم‌گیرنده که بسیار زیاد بوده است مشخص گردیده و برابر با ۰/۷ در نظر گرفته‌شده است. نحوه انتخاب مقدار v در جدول ۵ نشان داده‌شده است. تعیین مقدار پارامتر v با توجه به تاثیر مستقیمی که بر

www.SID.ir

Archive of SID

مقادیر Q در رتبه بندی می گذارد، از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

جدول ۵. مقدار پارامتر v بر اساس توافق گروهی

$v > 0.5$	$v = 0.5$	$v < 0.5$
توافق گروهی بسیار زیاد	توافق با اکثریت آرا	توافق گروهی اندک

*هرچه V بزرگ‌تر باشد بدان معناست که به نظرات گروهی بهای بیشتری داده‌شده است.
*هرچه V کوچک‌تر باشد بدان معناست که به نظرات فردی بهای بیشتری داده‌شده است.

محاسبه مقادیر S، R و Q

در این مرحله از اوزان به‌دست‌آمده در مرحله پیشین استفاده گردیده و ماتریس تصمیمی گیری را تشکیل می‌دهیم. شایان‌ذکر است که شاخص‌های هزینه‌های اجرایی و زمان اجرا شاخص‌هایی از نوع منفی و در دسترس بودن تکنولوژی و پتانسیل بازیابی آلاینده‌ها مثبت می‌باشند. در گام نخست ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس شاخص‌های و متغیرهای موردنظر تشکیل گردید. سپس ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده آن به دست آمد (جدول ۶).

جدول ۶. ماتریس تصمیم گیری نرمال شده

گزینه‌ها	شاخص‌ها			
	هزینه	زمان	در دسترس بودن تکنولوژی	پتانسیل بازیابی آلاینده
زیست پالایی	(0.2,0.6,1)	(-0.22,0,0.22)	(-0.25,0.38,1)	(0.56,0.78,1)
الکتروکینتیک	(-0.4,0,0.4)	(0.11,0.33,0.56)	(-0.25,0.38,1)	(-0.22,0,0.22)
شستشوی رسوبات	(-0.2,0.3,0.8)	(0.44,0.67,0.89)	(-0.5,0,0.5)	(0.22,0.5,0.78)
جذب	(-0.2,0.3,0.8)	(0.22,0.5,0.78)	(-0.5,0,0.5)	(-0.22,0,0.22)
تثبیت و جامدسازی	(0.2,0.6,1)	(0.56,0.78,1)	(-0.5,0,0.5)	(0.56,0.78,1)

پس از تبدیل ماتریس نرمال شده به ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده وزنی، S، R و Q با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۵) محاسبه‌شده و در جدول ۷ نشان داده‌شده است.

جدول ۷. ماتریس تصمیمی گیری نرمال شده وزنی

	فازی R	فازی S	فازی Q
زیست پالایی	(0.049,0.260,0.689)	(0.014,0.461,1.442)	(-0.626,0.192,1.000)
الکتروکینتیک	(0.004,0.132,0.589)	(-0.163,0.150,0.947)	(-0.723,0.001,0.741)
شستشوی رسوبات	(0.016,0.130,0.551)	(-0.135,0.210,1.039)	(-0.706,0.026,0.764)
جذب	(0.008,0.130,0.551)	(-0.165,0.157,0.949)	(-0.723,0.003,0.725)
تثبیت و جامدسازی	(0.049,0.260,0.689)	(-0.015,0.371,1.219)	(-0.639,0.153,0.903)

رتبه‌بندی گزینه‌های پالایش رسوبات آلوده به کادمیوم

در این مرحله پس از غیرفازی نمودن نتایج به‌دست‌آمده در مرحله پیشین، مقادیر R، S و Q بصورت نزولی مرتب می‌گردند و بهترین گزینه آن است که دارای کمترین مقدار در هر سه فاکتور باشد؛ در صورتیکه این شرایط برقرار نباشد بهترین گزینه آن است که کوچکترین Q را دارا باشد

www.SID.ir

Archive of SID

و دو شرط ذیل نیز بطور همزمان برای آن برقرار باشد (فرض بر آن است که $A^{(1)}$ بهترین گزینه باشد):

شرط ۱:

رابطه (۱۶) $$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq \frac{1}{(m-1)}$$

m: تعداد گزینه‌ها

Q: $A^{(1)}$ اولین گزینه بر اساس رنک بندی

Q: $A^{(2)}$دومین گزینه بر اساس رنک بندی

شرط ۲:

رابطه (۱۷) $$Q(A^{(m)}) - Q(A^{(1)}) \leq \frac{1}{(m-1)}$$

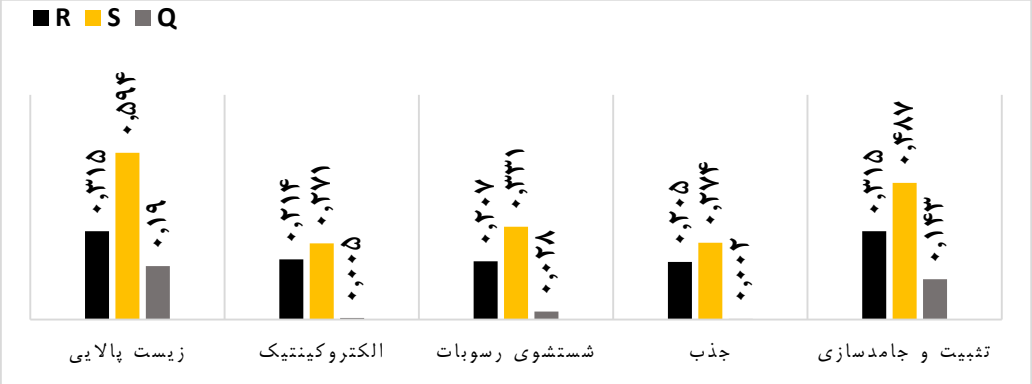
$A^{(m)}$ = آخرین گزینه بر اساس رتبه بندی

در صورتیکه شرط اول برقرا نباشد، شرط دوم را بررسی می نمائیم.

پس از بررسی شروط رتبه‌بندی نهایی به شرح ذیل مشخص گردید (جدول ۸ و شکل ۳)

جدول ۸. مقادیر R ،S و Q

	R	رتبه‌بندی	S	رتبه‌بندی	Q	رتبه‌بندی
زیست پالایی	0.315	4	0.594	5	0.19	5
الکتروکینتیک	0.214	3	0.271	1	0.005	2
شستشوی رسوبات	0.207	2	0.331	3	0.028	3
جذب	0.205	1	0.274	2	0.002	1
تثبیت و جامدسازی	0.315	4	0.487	4	0.143	4



شکل ۳. نمودار مقایسه ای مقادیر R ،S و Q

با در نظرگیری شروطی که جهت انتخاب برترین گزینه پاک‌سازی در بخش قبلی بیان گردید و با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۸، شرط اول بررسی گردیده و مشخص گردیده که پذیرفته نمی‌باشد. با توجه به اینکه شرط اول برقرار نمی‌باشد، بر اساس راه‌حل شماره ۱ برترین گزینه‌های پاک‌سازی به ترتیب جذب، الکتروکینتیک، شستشوی رسوبات در محل، تثبیت و جامدسازی و زیست پالایی می‌باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

آلودگی خورها و خلیج‌ها که اکوسیستم هایی غنی با تنوع زیستی بسیار گوناگون می‌باشند، یکی از مهمترین معضلات زیست‌محیطی بشمار می رود. فلزات سنگین به خودی خود با توجه به عدم تجزیه پذیریشان در طبیعت یکی از منابع آلاینده بسیار مهم بوده و پاک‌سازی آن‌ها موردتوجه بسیاری از مطالعات قرارگرفته است. کادمیوم نیز یکی از فلزات سنگینی است که بواسطه سمیّت بالا، تحرک پذیری زیاد و اثرات نامطلوبی که بر انسان و سایر موجودات زنده

www.SID.ir

Archive of SID

دارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. امروزه جهت پاک‌سازی کادمیوم از رسوبات آلوده درون خورها و خلیج‌ها روش‌های بسیاری ارائه گردیده است؛ اما بااین‌حال بواسطه محدودیت‌ها و چالش‌های موجود در کشورهای در حال توسعه نظیر ایران، انتخاب روشی که تکنولوژی آن در دسترس بوده، هزینه‌های بالایی را در بر نداشته باشد، در زمانی نسبتاً کوتاه انجام گرفته و آلاینده‌های پاک‌سازی شده در آن روش حتی الامکان قابل استخراج بوده و منجر به بازگشت مقدار زیادی از هزینه‌های اجرایی گردند، پیچیده می‌باشد. از همین روی، در پژوهش حاضر با کمک از متخصصین حوضه پتروشیمی که تجربیات با ارزشی درزمینه پاک‌سازی محیط‌های آلوده داشته اند، در ابتدا بر اساس نظرات متخصصین و مروری بر ادبیات موضوع برخی شاخص‌ها و شاخص‌های فرعی مطرح شد. سپس بر اساس تحلیل پرسشنامه‌ها و نظرات، مهم ترین‌ها آن‌ها از میان تمام معیارهای جانبی مطرح شده، انتخاب گردیدند که شامل هزینه، زمان، تکنولوژی موجود و پتانسیل بازیابی آلاینده می باشد. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی میزان اهمیت هر یک از شاخص‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس تحلیل نتایج از نظرات متخصصین، وزن دهی هر یک از معیارها با استفاده از مقایسات زوجی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مشخص گردید. همچنین روش‌های پاک‌سازی امکان پذیر در ایران با بررسی و تحلیل نظرسنجی‌های پر شده و مطالعات گسترده انجام گرفت؛ که این روش‌ها شامل زیست پالایی، الکتروکینتیک، شستشوی رسوبات، جذب آلاینده و تثبیت و جامدسازی می باشند. درنهایت با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چند شاخصه "ویکور فازی" روش‌های پالایشی بر اساس معیارهای منتخب رتبه‌بندی گردیدند. نتایج حاصله حاکی از آن است که با توجه به در نظرگیری شاخص‌هایی شامل هزینه‌های اجرایی، مدت زمان موردنیاز جهت اجرای پالایش، در دسترس بودن تکنولوژی روش موردنظر و همچنین پتانسیل بازیابی آلاینده پس از پاک‌سازی، تکنیک پالایشی جذب (به‌ویژه با استفاده از جاذب‌های زیستی) با مقادیر (R=۰،۲۰۵ وS=۰،۲۷۴ وQ=۰،۰۰۲) و سپس الکتروکینتیک با مقادیر (R=۰،۲۱۴ و S=۰،۲۷۱ و Q=۰،۰۰۵) می‌توانند بهترین رویکردهای ممکن در کشورهای در حال توسعه باشند.

یادداشت‌ها

1. Hybrid Bioremediation
2. VIKOR

فهرست منابع

Alsalem, M. A., Zaidan, A. A., Zaidan, B. B., Hashim, M., Albahri, O. S., Albahri, A. S., Hadi, A., Mohammed, K. I. (2018) Systematic Review of an Automated Multiclass Detection and Classification System for Acute Leukaemia in Terms of Evaluation and Benchmarking, Open Challenges, Issues and Methodological Aspects. *Journal of Medical Systems* 42(11).

Bełdowski, J., Szubska, M, Bełdowska, M., Jankowska, K., Kotlarska, E., & Graca, B. (2018) Seasonal changes of mercury speciation in the coastal sediments. *Journal of Soils and Sediments, 18(12), pp. 3424–3436. doi: 10.1007/s11368-018-1993-4.*

Changsong, Z. (2021). Remediation techniques for cadmium-contaminated dredged river sediments after land disposal. *Meitiandizhi Yu Kantan/Coal Geology and Exploration*, 49(5), pp. 200–208. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.022.

Cullen, J. T., & Maldonado, M. T. (2013) *Biogeochemistry of cadmium and its release to the environment, Metal Ions in Life Sciences*. doi: 10.1007/978-94-007-5179-8_2.

Deng, R., Huang, D., Xue, W., Lei, L., Chen, S., Zhou, C., Liu, X., Wen, X., & Li, B. (2020) Eco-friendly remediation for lead-contaminated riverine sediment by sodium lignin sulfonate stabilized nano-chlorapatite. *Chemical Engineering Journal*, 397(May). doi: 10.1016/j.cej.2020.125396.

www.SID.ir

Archive of SID

De La Luz Vázquez-Sauceda, M., Pérez-Castañeda, R., Sánchez-Martínez, J., & Aguirre-Guzmán, G. (2012) Cadmium and lead levels along the estuarine ecosystem of Tigre River-San Andres Lagoon, Tamaulipas, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 89(4): 782–85

Dhamodharan, A., Abinandan, S. & Aravind, U. (2019) Distribution of Metal Contamination and Risk Indices Assessment of Surface Sediments from Cooum River , Chennai , India. *International Journal of Environmental Research*. doi: 10.1007/s41742-019-00222-8.

Eckley, C. S., Gilmour, C. C., Janssen, S., Luxton, T. P., Randall, P. M., Whalin, L., & Austin, C. (2020) The assessment and remediation of mercury contaminated sites: A review of current approaches. *Science of the Total Environment*. 707, p. 136031. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136031.

Elanchezhiyan, S, S., Karthikeyan, P., Rathinam, K., Hasmath Farzana, M., & Park, C. M. (2021) Magnetic kaolinite immobilized chitosan beads for the removal of Pb(II) and Cd(II) ions from an aqueous environment. *Carbohydrate Polymers*, 261(October 2020), p. 117892. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.117892.

Fraiese, A., Cesaro, A., Belgiorno, V., Sanromán, M. A., Pazos, M., & Naddeo, V. (2020) Ultrasonic processes for the advanced remediation of contaminated sediments. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67(May), p. 105171. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105171.

Gul, M. (2020) Application of Pythagorean fuzzy AHP and VIKOR methods in occupational health and safety risk assessment: the case of a gun and rifle barrel external surface oxidation and colouring unit. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 26(4), pp. 705–718. doi: 10.1080/10803548.2018.1492251.

Hsu-Kim, H., Eckley, Chris S., Achá, D., Feng, X., Gilmour, C. C., Jonsson, S., & Mitchell, C. P.J. (2018) Challenges and opportunities for managing aquatic mercury pollution in altered landscapes. *Ambio*, 47(2), pp. 141–169. doi: 10.1007/s13280-017-1006-7.

Knox, A. S. & Paller, M. H. (2020) Effect of bioturbation on contaminated sediment deposited over remediated sediment. *Science of the Total Environment*, 713, p. 136537. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136537.

Libralato, G. Minetto, D., Lofrano, G., Guida, M., Carotenuto, M., Aliberti, F., Conte, B., & Notarnicola, M. (2018) Toxicity assessment within the application of in situ contaminated sediment remediation technologies: A review. *Science of the Total Environment*, 621, pp. 85–94. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.229.

Liu, Y. Chen, H., Zhu, N., Zhang, J., Li, Y., Xu, D., Gao, Y. & Zhao, J. (2022) "Detection and remediation of mercury contaminated environment by nanotechnology: Progress and challenges," *Environmental Pollution*, 293, p. 118557. doi: 10.1016/J.ENVPOL.2021.118557.

Losada Ros, M. T., Al-Enezi, E., Cesarini, E., Canonico, B., Bucci, C., Alves Martin, M. V., Papa, S., & Frontalini, F. (2020) Assessing the Cadmium Effects on the Benthic Foraminifer Ammonia cf. parkinsoniana: An Acute Toxicity Test. *Water*, pp. 1–11.

Magar, V. S. & Wenning, R. J. (2006) The role of monitored natural recovery in sediment remediation. *Integrated environmental assessment and management*, 2(1), pp. 66–74. doi: 10.1897/1551-3793(2006)2[66:TROMNR]2.0.CO;2.

O'Brien, R. M. Phelan, T. J., Smith, N. M., & Smits, K. M. (2021) Remediation in developing countries: A review of previously implemented projects and analysis of stakeholder participation efforts. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(12), pp. 1259–1280. doi: 10.1080/10643389.2020.1755203.

Peng, W., Li, X., Liu, T., Liu, Y., Ren, J., Liang, D., & Fan, W. (2018) Biostabilization of cadmium contaminated sediments using indigenous sulfate reducing bacteria: Efficiency and process. *Chemosphere*, 201, pp. 697–707. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.182.

Peng, W., Li, X., Xiao, S., & Fan, W. (2018) Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals. *Journal of Soils and Sediments*, 18(4), pp. 1701–1719. doi: 10.1007/s11368-018-1921-7.

Perelo, L. W. (2010) Review: In situ and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), pp. 81–89. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.12.090.

Pourjavad, E. & Mayorga, R. V. (2016) A Combined Fuzzy Approach to Determine Sustainable ELV Strategy A Combined Fuzzy Approach to Determine Sustainable ELV Strategy. (January).

Putra, M. S. D. Andryana, S., Fauziah., Gunaryati, A. (2018) Fuzzy analytical hierarchy process method to determine the quality of gemstones. *Advances in Fuzzy Systems*, 2018. doi: 10.1155/2018/9094380.

www.SID.ir

Archive of SID

Salimi, A. H. Noori, A., Bonakdari, H., Samakosh, J. M., Sharifi, E., Hassanvand, M., Gharabaghi, B., & Agharazi, M. (2020) Exploring the role of advertising types on improving the water consumption behavior: An application of integrated fuzzy AHP and fuzzy VIKOR method. *Sustainability (Switzerland)*. doi: 10.3390/su12031232.

Sun, W., Cheng, K., Sun, Kevin Y., & Ma, X. (2021) Microbially Mediated Remediation of Contaminated Sediments by Heavy Metals: a Critical Review. *Current Pollution Reports*, 7(2), pp. 201–212. doi: 10.1007/s40726-021-00175-7.

Taylor, P., Aya, Z. & R. G. (2007) An Analytic Network Process-Based Approach to Concept Evaluation in a New Product Development Environment. *Journal of engineering design* 18(3): 37–41.

Ting, Y. & Hsi, H. (2019) Iron Sulfide Minerals as Potential Active Capping Materials for Mercury-Contaminated Sediment Remediation : A Minireview. doi: 10.3390/su11061747.

Wang, C. N. *et al.* (2021) "A compromised decision-making approach to third-party logistics selection in sustainable supply chain using fuzzy ahp and fuzzy vikor methods," *Mathematics*, 9(8). doi: 10.3390/math9080886.

Wang, T. C., Jia L. L., & Chun Y. H. (2006) Multi-Criteria Decision Analysis by Using Fuzzy VIKOR. *Proceedings - ICSSSM'06: 2006 International Conference on Service Systems and Service Management* 2: 901–6.

Xue, W. Peng, Z., Huang, D., Zeng, G.,Wan, J., Xu, R., Cheng, M., Zhang, C., Jiang, D., & Hu, Z. (2018) Nanoremediation of cadmium contaminated river sediments: Microbial response and organic carbon changes. *Journal of Hazardous Materials*, 359(February), pp. 290–299. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.07.062.

Zhang, S. Wen, J., Hu, Y., Fang, Y., Zhang, H., Xing, L., Wang, Y., Zeng, G. (2019) Humic substances from green waste compost: An effective washing agent for heavy metal (Cd, Ni) removal from contaminated sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 366, pp. 210–218. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.103.

Zhang, Y. Labianca, C., Chen, L., De Gisi, S., Notarnicola, M., Guo, B., Sun, Jian., Ding, S., & Wang, L. (2021) Sustainable ex-situ remediation of contaminated sediment: A review. *Environmental Pollution*, 287(February), p. 117333. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117333.

Zhao, X. M. Yao, L. A., Ma, Q. L., Zhou, G. J., Wang, L., Fang, Q. L., & Xu, Z. C. (2018) Distribution and ecological risk assessment of cadmium in water and sediment in Longjiang River, China: Implication on water quality management after pollution accident. *Chemosphere*, 194, pp. 107–116. doi: 10.1016/ j.chemosphere. 2017.11.127.

www.SID.ir