

Removal of Pollutant Phenanthrene from Soil Washing Wastewater Using Mathematical Model

Melika Alishirazi* ¹; Saied Gitipour ² ; Majid Baghdadi³

*1. PhD candidate, Faculty of Environmental, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Faculty of Environmental, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Faculty of Environmental, University of Tehran, Tehran, Iran

*Email Address: melika.alishirazi@ut.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2025/09/17

Revised Date:
2025/10/10

Accepted Date:
2025/11/11

Published Date:
2025/12/06

Keywords:

Phenanthrene,
FAHP,
FVIKOR,
Water Pollution,
Soil Pollution

ABSTRACT

Nowadays, the contamination of wastewater and soil with polycyclic aromatic hydrocarbons, especially phenanthrene, causes serious problems for human and other organisms' health. The treatment of wastewater contaminated with phenanthrene is of particular importance. Choosing the optimal cleaning technique based on geographical, economic, social conditions as well as existing limitations is not only challenging but also plays an essential role in the success rate of the cleaning method in the implementation phase. The present study uses a multi-criteria decision-making model and a fuzzy analytic hierarchy process (AHP). In this process, important methods and indicators were identified based on the literature and with the help of experts in environmental cleanups and weighted by them. FAHP fuzzy hierarchical model based on the weightings determined the most important indicators as follows: cost (46%), technology availability (39%), pollutant recovery potential (9%), and time (6%), which were the main indicators of decision-making. Based on Vikor fuzzy multi-attribute decision-making model, the top choices for cleaning up wastewater contaminated with phenanthrene were first the membrane technique (reverse osmosis) with values ($R=0.205$, $S=0.274$, $Q=0.002$), and then the membrane technique using potassium salt with values ($R=0.214$, $Q=0.005$, $S=0.271$). These are the best methods for treating effluent that has phenanthrene contamination.

Cite this article: Melika Alishirazi, Saied Gitipour, Majid Baghdadi (2025). Removal of Pollutant Phenanthrene from Soil Washing Wastewater Using Mathematical Model, Journal of Environmental Sciences Studies, 10(3) , Pages 10719-10733.

EXTENDED ABSTRACT**Introduction**

Pollution of water and soil in ecosystems is considered one of the most serious environmental issues. In recent decades, the presence of stable organic substances such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) has been identified in many aquatic environments and is one of the most common water pollutions. Contamination of water with polycyclic aromatic hydrocarbons and the creation of contaminated sewage can have many consequences for humans and other organisms (Berríos-Rolón, Cotto, and Márquez 2025). Environmental pollution caused by stable organic materials such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) due to their direct and indirect releases into the environment, their high toxicity, and the contamination of water and soil and their transfer to plants and animals are serious environmental problems (Tarigholizadeh et al. 2024). Therefore, finding optimal treatment methods for wastewater contaminated with phenanthrene and other petroleum hydrocarbons in developing countries based on the existing basic and limiting factors can be an effective and valuable step in the direction of evaluation, selection and implementation of efficient environmental remediation at the national level.

Materials and methods

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 Removing PAH from Effluent in the Case of Phenanthrene. The analytic hierarchy process (AHP) is proposed based on multi-criteria decision-making problems including criteria, alternatives, and goals (Mehrparvar, Majak, and Karjust 2024). In this process, an approach was used to select the most important criteria and alternatives for wastewater contaminated: 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.

Results and discussion

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

| | R | Rank | S | Rank | Q | Rank |
|------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Method | | | | | | |
| Chemical(oxidation photocatalytic) | 0.315 | 4 | 0.594 | 5 | 0.19 | 5 |
| Membrane potassium salt)(| 0.214 | 3 | 0.271 | 1 | 0.005 | 2 |
| Chemical(chemical oxidation) | 0.207 | 2 | 0.331 | 3 | 0.028 | 3 |
| Membrane(reverse osmosis) | 0.205 | 1 | 0.274 | 2 | 0.002 | 1 |
| Biological(microorganism) | 0.315 | 4 | 0.487 | 4 | 0.143 | 4 |

Conclusion

Pollution of water and soil 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 membrane technique (reverse osmosis) and using potassium salt can be the more practical approaches in developing countries.



حذف آلاینده فناترن از پساب حاصل از خاکشویی با استفاده از مدل ریاضی

ملیکا علی شیرازی^{۱*}، سعید گیتی پور^۲، مجید بغدادی^۳

*- دانشجوی دکترا، دانشکده محیط زیست، پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران

۲- استاد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

۳- دانشیار، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

*ایمیل نویسنده مسئول: melika.alishirazi@ut.ac.ir

| چکیده | اطلاعات مقاله |
|--|--|
| <p>امروزه آلودگی خاک و پساب به هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، به‌ویژه فناترن، به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی مطرح است که پیامدهای قابل توجهی بر سلامت انسان و سایر موجودات زنده دارد. بنابراین، انتخاب و به‌کارگیری روش‌های کارآمد برای پالایش پساب آلوده به این ترکیبات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرآیند گزینش یک تکنیک مناسب برای پاکسازی، تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شرایط جغرافیایی، محدودیت‌های اقتصادی و اجتماعی و همچنین دسترسی به فناوری قرار دارد؛ به همین دلیل، تصمیم‌گیری در این زمینه می‌تواند پیچیده و چالش‌برانگیز باشد. در این پژوهش، برای شناسایی و اولویت‌بندی بهترین گزینه‌های پالایش پساب آلوده به فناترن، از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) استفاده گردید. در این چارچوب، شاخص‌های کلیدی با بهره‌گیری از منابع علمی معتبر و مشورت با متخصصان حوزه پاکسازی زیست‌محیطی تعیین و سپس وزن‌دهی شدند. نتایج حاصل نشان داد که هزینه با سهم ۴۶ درصد، در دسترس بودن فناوری با ۳۹ درصد، قابلیت بازیابی آلاینده با ۹ درصد و زمان با ۶ درصد به‌عنوان مهم‌ترین معیارهای تصمیم‌گیری معرفی شدند. همچنین به کمک مدل ویکور فازی (FVIKOR)، گزینه‌های مختلف پالایش مورد ارزیابی قرار گرفتند که در نهایت، روش غشایی (اسمز معکوس) با مقادیر $Q=0.005$، $S=0.271$، $R=0.214$ بر نمک پتاسیم با مقادیر $Q=0.002$، $S=0.274$، $R=0.205$ و سپس روش غشایی مبتنی بر نمک پتاسیم با مقادیر $Q=0.005$، $S=0.271$، $R=0.214$، بلکه به سبب قابلیت انطباق با شرایط عملیاتی متنوع، می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های پایدار برای مدیریت پساب‌های آلوده به فناترن مطرح شوند. این یافته‌ها اهمیت توجه به پارامترهای اقتصادی و دسترسی به فناوری را در طراحی و اجرای پروژه‌های پالایش نشان می‌دهد و می‌تواند به سیاست‌گذاران و مهندسان محیط زیست در انتخاب راهبردهای بهینه کمک شایانی نماید.</p> | <p>نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵</p> <p>کلید واژه ها: آلودگی خاک، شستشو خاک، هیدروکربن‌های آروماتیک، پساب، فئاترن</p> |

در میان ترکیبات شیمیایی خطرناک، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای به دلیل ماهیت سمی خود مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند (Liu et al. 2022). هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) به عنوان گروهی از آلاینده‌های آلی پایدار شناخته می‌شوند که ساختار آن‌ها شامل دو یا چند حلقه بنزن است. حضور این ترکیبات در گستره وسیعی از محیط‌ها از جمله آب، خاک، هوا و رسوبات گزارش شده است (Abdel-Shafy and Mansour 2016). ویژگی‌های بارز هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، از جمله پایداری قابل توجه و آب‌گریزی آن‌ها که با افزایش وزن مولکولی تقویت می‌گردد، موجب شده است تا خاک به عنوان مخزن اصلی و محل تجمع اولیه این آلاینده‌ها در نظر گرفته شود (Haritash and Kaushik 2009). هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) در محیط خاک به وفور یافت می‌شوند و منشأ آن‌ها می‌تواند طبیعی یا انسان‌ساخت باشد. منابع اصلی انسانی این ترکیبات شامل نفت خام، زغال‌سنگ، چوب، ترکیبات آلی با وزن مولکولی بالا و فرآورده‌های جانبی حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی است. حضور این آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های خاکی و آبی غالباً ناشی از فرآیندهایی همچون احتراق ناقص مواد آلی، فعالیت‌های معدنی، انتقال و پراکندگی زغال‌سنگ از طریق باد و رواناب در مناطق دارای پوشش گیاهی ضعیف، و نیز نفوذ پساب‌ها و لجن‌های نفتی به ویژه در خاک‌های با تراکم پایین گزارش شده است (Mizwar and Trihadiningrum 2015). فراگیر بودن این آلاینده‌ها را می‌توان یکی از معضلات اساسی آن‌ها دانست؛ چرا که نه تنها از منابع طبیعی نظیر ذخایر زغال‌سنگ و فعالیت‌های آتشفشانی منشأ می‌گیرند، بلکه در اثر فعالیت‌های انسان‌ساخت، از جمله احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی نیز تولید می‌شوند. یکی از بارزترین خصوصیات هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، پتانسیل بالای سرطان‌زایی آن‌ها در انسان و سایر جانداران است (Boström et al. 2002). بر اساس مطالعات حیوانی انجام شده مشخص گردیده است که این نوع آلاینده می‌تواند منجر به انواع سرطان‌ها شامل پوست، ریه، مثانه، کبد و گوارش گردد. علاوه بر آن، در تماس قرار گرفتن با هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای منجر به بیماری‌های قلبی عروقی نیز گردیده و رشد ناقص جنین را به همراه دارد (Kim et al. 2013). هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای از خاصیت تجمع‌زیستی برخوردارند و توانایی انتقال در مقیاس‌های جغرافیایی گسترده را دارند. این ترکیبات عموماً با اثرات سمی، سرطان‌زایی و جهش ژنی همراهند. حضور پیوندهای C-C در ساختار مولکولی آن‌ها، منجر به بروز ویژگی‌هایی همچون نقطه جوش بالا و فشار بخار قابل توجه می‌گردد. هیدروکربن‌های آروماتیک با توجه به تعداد حلقه‌های آروماتیک خود به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱) وزن مولکولی پائین با دو و یا سه حلقه آروماتیک و دارای سمیت کمتر (۲) PAHs با وزن مولکولی بالا، به‌ویژه آن‌هایی که متشکل از چهار یا تعداد بیشتری حلقه هستند، به عنوان ترکیبات سرطان‌زا شناخته می‌شوند. به همین سبب اگرچه صدها نوع PAH وجود دارد و به‌طور کلی از طرف سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (U.S.EPA) به‌عنوان آلاینده‌های ارجح جهت کنترل معرفی گردیده‌اند، اما فقط شانزده نوع از آن‌ها توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا در لیست اولویت‌ها قرار گرفته‌اند و برخی از آن‌ها نیز به‌عنوان آلاینده‌های دارای پتانسیل سرطان‌زایی مشخص گردیده‌اند (Achten and Andersson 2015). افزایش مداوم مصرف نفت به دلیل نقش آن به‌عنوان منبع کلیدی انرژی، همراه با توسعه شتابان صنایع، مشهود است. با این حال، در بسیاری از کشورها، خصوصاً کشورهای در حال توسعه، محدودیت‌های فناورانه و فقدان فناوری‌های پیشرفته در مدیریت و تصفیه پساب‌های صنعتی سبب می‌شود پسماندهای حاوی ترکیبات نفتی ناشی از فعالیت‌های پالایشگاهی نظیر استخراج، فرآوری و ذخیره‌سازی، به محیط خاک تخلیه شوند. این امر علاوه بر آلودگی مستقیم خاک، پیامدهای قابل توجهی بر تعادل و پایداری اکوسیستم به دنبال دارد (Varjani 2017). پاکسازی پساب‌های آلوده به فنانترن و هیدروکربن‌های آروماتیک از طریق رویکردهای مختلف شیمیایی و بیولوژیکی امکان‌پذیر است. در میان روش‌های شیمیایی، شستشو با سورفکتانت‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا این ترکیبات با بخش‌های آب‌گریز مولکول‌های آلاینده پیوند برقرار کرده و از طریق جذب آن‌ها، شرایط را برای جداسازی مؤثرتر فراهم می‌سازند. پالایش پساب آلوده به فنانترن توسط نمک‌های پتاسیم به عنوان سورفکتانت به خصوص K_3PO_4 موجب حذف ۹۵٪ فنانترن می‌شود. این روش با کاهش چشمگیر حجم عملیات پالایشی، هزینه‌ها، اثرات منفی بر طبیعت و زمان مورد نیاز، یکی از راهکارهای مؤثر و مقرون‌به‌صرفه در مقایسه با سایر روش‌های تصفیه محسوب می‌شود (Wu et al. 2024). صنعت پتروشیمی به‌عنوان یکی از منابع اصلی آلودگی هیدروکربنی آب شناخته می‌شود و افزایش غلظت هیدروکربن‌ها در محیط‌های آبی عمدتاً ناشی از توسعه مداوم در فرآیندهای اکتشاف و استخراج نفت است. فاضلاب حاصل از فعالیت‌های نفتی حاوی مقادیر قابل توجهی هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک است. فنانترن، که متشکل از سه حلقه بنزن می‌باشد، به دلیل وزن مولکولی بالا، پایداری شیمیایی و ماهیت آب‌گریز خود، در محیط به شکل پایدار باقی می‌ماند. یافته‌ها حاکی از آن است که فنانترن دارای اثرات سمی بر ماهی‌ها، سخت‌پوستان، گاستروپودها، صدف‌ها و دیاتوم‌های دریایی می‌باشد. در پژوهشی که توسط ایزابل گنیز و همکاران برای حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای از جمله فنانترن از چندین روش تصفیه شیمیایی مبتنی بر افزودن $NaCl$ ، $KMnO_4$ ، $FeCl_3$ از طریق تست‌های شیشه‌ای تجزیه و تحلیل محتوای نمونه‌های PAHs با گروماتوگرافی گازی انجام شد ۴۵ تا ۵۷ درصد کاهش آلاینده

فنانترن مشاهده گردید (Gutierrez-Urbano et al. 2021). در مطالعه دیگری چاهان و دیگر محققین به حذف فنانترن از منابع آب توسط روش‌های پیش تصفیه پیشرفته مانند تخریب فتوکاتالیستی با ویژگی کارایی بالا و هزینه کم با استفاده از ترکیب فلزات یا ادغام اکسیدهای دو فلزی به عنوان یک فتوکاتالیست، مناسب بودن آن را برای حذف فنانترن نشان داده است و همچنین از نانوکامپوزیت‌ها به عنوان فتوکاتالیست استفاده گردید (Chauhan et al. 2021). اسپیتس و مورنو در مطالعه‌ای به حرکت هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در محیط‌های آبی و خاکی پرداخته‌اند. انتقال این آلاینده‌ها در زیرسطح زمین تابعی از رطوبت بخش غیر اشباع و جریان آب در بخش اشباع است و هر دو توسط پارامترهای توپوگرافی و اقلیمی کنترل می‌شوند. فرآیندهای انتقال آلاینده‌های محلول در محیط متخلخل شامل مجموعه‌ای از مکانیسم‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است. از جمله فرآیندهای فیزیکی، نفوذ ملکولی، پراکنش مکانیکی و حرکت توده‌ای مطرح است که حرکت توده‌ای، همراه جریان اصلی آب، به‌عنوان اصلی‌ترین و مؤثرترین مکانیزم در جریان‌های سریع شناخته می‌شود (Farifteh, Farshad, and George 2006). در تحقیقی دیگر به ارزیابی حذف فنانترن از پساب شستشوی خاک با روش جذب کربن فعال پرداخته است، که این روش مؤثر می‌تواند باشد (Mohan and Pittman 2007). در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، با وجود چالش‌های اقتصادی و اجتماعی و محدودیت‌های فناورانه، یافتن راهکارهای مؤثر برای پاکسازی پساب، نه تنها برای سازمان‌های آلوده‌کننده، بلکه برای نهادهای دولتی و متخصصان حوزه مدیریت و پاکسازی آلودگی‌های زیست‌محیطی، مسئله‌ای پیچیده و با اهمیت است (Akbarzadeh et al. 2023). بنابراین، شناسایی و انتخاب روش‌های بهینه برای پالایش پساب آلوده به فنانترن و دیگر هیدروکربن‌های نفتی در کشورهای در حال توسعه، با توجه به محدودیت‌ها و عوامل تعیین‌کننده موجود، می‌تواند گامی مؤثر و ارزشمند در جهت ارزیابی، انتخاب و اجرای فرآیندهای پاکسازی زیست‌محیطی کارآمد در سطح ملی باشد. امروزه روش‌های متعددی برای تصفیه پساب‌های آلوده به انواع آلاینده‌ها، از جمله فنانترن، مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ با این حال، تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب روش مناسب برای اجرای واقعی در سایت‌های آلوده، یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های مهندسی محسوب می‌شود. اگرچه هزینه یکی از شاخص‌های مهم و تأثیرگذار در انتخاب روش پالایش است، اما این تنها معیار محسوب نمی‌شود و باید عوامل دیگری همچون فناوری‌های در دسترس و محدودیت‌های آن‌ها، بازه زمانی مدنظر کارفرما برای انجام پروژه، میزان پایداری زیستی روش و سایر پارامترهای مرتبط نیز در نظر گرفته شود. انتخاب تکنیک پالایشی مناسب با توجه به این عوامل نیازمند بهره‌گیری از تجربیات متخصصان، فرآیندهای تصمیم‌گیری چندشاخصه (MCDM) و چارچوبی مرحله‌ای برای رسیدن به بهترین گزینه نهایی است. در این مقاله، هدف بر این است که با استفاده از روش ترکیبی تصمیم‌گیری چند شاخصه شامل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) و ویکور فازی (FVIKOR)، بهترین روش پالایش پساب آلوده به فنانترن از میان گزینه‌های موجود انتخاب شود، با تمرکز بر شاخص‌های هزینه، زمان و فناوری، و ارائه چارچوبی جهت اجرای بهینه این فرآیند در سطح کشور.

۲- روش انجام تحقیق

• محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش، برای ارزیابی و رتبه‌بندی روش‌های حذف پساب آلوده به فنانترن، از روش ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه شامل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) و ویکور فازی (FVIKOR) با استفاده از مجموعه‌های فازی مثلثی بهره گرفته شده است. روش ویکور، روشی ساده و کاربردی برای حل مسائل دارای عدم قطعیت و شاخص‌های متضاد است که امکان رتبه‌بندی گزینه‌های متعدد بر اساس شاخص‌های در نظر گرفته شده و انتخاب بهترین راه‌حل را فراهم می‌کند (Chen and Hwang 1992). اما با توجه به سطح بالای عدم قطعیت‌های موجود در این رویکرد، روش ارتقا یافته‌ای به نام ویکور فازی ظهور نمود تا با استفاده از بیان کیفی، متغیرها را براساس شاخص‌ها ارزیابی نماید (Opricovic and Tzeng 2007). 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 (روش دلفی) استفاده گردد. در این میان فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی از جمله روش‌هایی است که جهت وزن دهی شاخص‌ها رایج بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای روش AHP می‌توان به بررسی سازگاری و یا ناسازگاری شاخص‌ها و همچنین کاهش تعداد مقایسه‌ها بر اساس ساختاری سلسله‌مراتبی اشاره نمود. روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نیز نسخه‌ای از AHP است که با تئوری منطق فازی توسعه یافته و از مقیاس مثلث فازی استفاده می‌کند و از عدم قطعیت‌های موجود و داده‌های نامناسب در روش تحلیل سلسله‌مراتبی ساده را تا حد زیادی برطرف می‌نماید (Saaty 2008). به طور کلی، استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری را ساده‌تر کرده و تشکیل درخت تصمیم را تسهیل نماید. از سوی دیگر، روش ویکور ابزاری مناسب برای تحلیل متغیرهای ناهمگون بوده و رویکرد کارآمدی برای مسائل دنیای واقعی ارائه می‌دهد. با این حال، هر دو روش محدودیت‌هایی دارند؛ به عنوان مثال، روش ویکور قادر به پیش‌بینی یا تعیین وزن معیارها نیست و روش تحلیل سلسله‌مراتبی به دلیل محاسبات ریاضی پیچیده و مقایسات زوجی، زمان‌بر می‌باشد (Opricovic and Tzeng 2004).

• فرآیند انتخاب شاخص ها و متغیرهای تصمیم گیری چند شاخصه

در این فرآیند، رویکرد ذیل جهت انتخاب مهم ترین شاخص ها جهت پالایش آلودگی فنانترون از پساب اتخاذ گردیده است: (۱) شناسایی شاخص های اصلی و فرعی براساس ادبیات مطالعه و پرسشنامه ها، (۲) استخراج اقدامات پاکسازی منتخب براساس تجزیه تحلیل پرسشنامه های پرشده توسط متخصصین در صنعت نفت (۳) محاسبه میزان اهمیت هر یک از شاخص ها توسط فرآیند سلسله مراتبی فازی و مقایسه شاخص ها با یکدیگر (۴) رتبه بندی تکنیک های پالایشی منتخب با استفاده از ویکور فازی.

• وزن دهی شاخص ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

پس از تعیین فاکتورهای دارای ارجحیت بالا و همچنین روش های پالایش امکان پذیر و مناسب در ایران، وزن هر یک از این شاخص ها مشخص می گردد. جهت تشخیص و تعیین وزن فاکتورها، در ابتدا ماتریس مقایسه زوجی شکل گرفته و شاخص ها با استفاده از مقیاس ۹ درجه ای Saaty که در جدول ۴ نیز نشان داده شده است مقایسه می گردد. در این فرآیند ارزش و ارجحیت هر جفت شاخص نسبت به یکدیگر با اعداد فازی مثلثی و با در نظرگیری پرسشنامه ها تعیین می شود. پس از امتیازدهی به هر جفت شاخص ها به طور مثال شاخص ۱ برابر \tilde{a}_{ij} باشد، برابر با ۱ خواهد بود (Saaty 2008).

ساختار ماتریس مقایسه فازی در رابطه ۱ نشان داده شده است:

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

• شاخص های سازگاری و ناسازگاری

یکی از مزایای مهم روش تحلیل سلسله مراتبی، امکان ارزیابی میزان سازگاری یا ناسازگاری تصمیم ها و تعیین قابل قبول بودن وزن های اختصاص یافته به شاخص ها است. برای محاسبه سازگاری مقایسات زوجی، پس از ایجاد ماتریس مقایسه، نسبت سازگاری (CR) با استفاده از رابطه (۲) تعیین می شود. نسبت سازگاری CR میزان انطباق مقایسات را در مقایسه با تصمیمات تصادفی نمونه های بزرگ نشان می دهد و در صورتی که CR بین ۰ و ۱ بیشتر باشد، تصمیم غیرسازگار تلقی می شود. از آنجا که مقدار λ_{max} می تواند بزرگ تر یا مساوی تعداد شاخص ها (n) باشد، تفاضل این دو نشان دهنده ناسازگاری ماتریس است که به تعداد شاخص های موجود وابسته است. برای رفع این وابستگی، می توان از رابطه (۳) استفاده کرد. این رابطه نسبت سازگاری را نشان داده و برای محاسبه آن، مقدار به دست آمده باید بر شاخص تصادفی RI تقسیم شود. مقادیر RI متناظر با تعداد شاخص ها بوده و در جدول ۱ ارائه شده است (Zhang et al. 2025).

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

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

پس از بررسی سازگاری مقایسات زوجی با استفاده از رابطه (۴) وزن فازی هر یک از شاخص های انتخاب شده به دست می آید:

$$Wi = \frac{(\pi_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{j=1}^n (\pi_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad \text{برای } i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

و جهت غیرفازی کردن وزن های فازی از رابطه (۵) استفاده می گردد.

$$DF_i = \frac{a + b + c}{3} \quad (5)$$

و در نهایت وزن های بدست آمده نرمال می گردند:

$$NW_i = \frac{DF_i}{\sum_{i=1}^n DF_i} \quad (6)$$

| | | | | | | | | | |
|------------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| n | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
| (RI) شاخص تصادفی | ۰ | ۰ | ۰,۵۸ | ۰,۹۰ | ۱,۱۲ | ۱,۲۴ | ۱,۳۲ | ۱,۳۴ | ۱,۴۵ |

• رتبه بندی گزینه های مورد نظر با استفاده از روش ویکور فازی

در این پژوهش، به منظور تعیین بهترین روش پاکسازی پساب آلوده به فنانترن، از پنج روش پالایش بر اساس شاخص های ارائه شده در جدول ۳ مقاله برای اولویت بندی استفاده شده است. پس از تعیین وزن شاخص های منتخب، برای رتبه بندی گزینه ها با استفاده از روش ویکور فازی، ابتدا متغیرهای کیفی با بهره گیری از اعداد فازی امتیازدهی شده و سپس ماتریس تصمیم گیری ایجاد می شود. در این ماتریس، شاخص ها در ستون ها و روش های پاکسازی در ردیف ها قرار می گیرند و با استفاده از مقیاس هفت درجه ای ویکور فازی (جدول ۲) و با در نظر گرفتن نتایج حاصل از پرسشنامه متخصصان، به مجموعه های فازی تبدیل می شوند. جهت بدست آوردن مجموعه های فازی یکپارچه و دستیابی به نتیجه ای واحد، میانگین مجموعه ای فازی یکپارچه شده \tilde{X}_{ij} برای تعداد مشخصی از متغیرها با در نظرگیری m شاخص از تعداد مشخصی متخصص k محاسبه می گردد. مقدار \tilde{X}_{ij} با استفاده از رابطه (۷) به دست خواهد آمد. در این معادله \tilde{X}_{ij}^{-k} به معنای ارزیابی k امین تصمیم گیرنده بر حسب j امین شاخص از i امین متغیر می باشد. پس از محاسبه معادلات فوق به دست آمدن ماتریس تصمیم گیری فازی متغیرها \tilde{X}_{ij} برای k امین تصمیم گیرنده ماتریس حاصل به فرم نشان داده شده در رابطه ۸ به دست خواهد آمد (Chang 1996).

(۷)

$$\tilde{X}_{ij} = \frac{[\tilde{X}_{ij}^{-1} \oplus \tilde{X}_{ij}^{-2} \oplus \dots \oplus \tilde{X}_{ij}^{-k}]}{k}$$

برای $i=\{1,2,\dots,m\}$, $j=\{1,2,\dots,n\}$

جدول ۲. مقیاس هفت درجه ای روش ویکور فازی

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

$$\tilde{D} = \begin{matrix} W=[w_1, w_2, \dots, w_n], j=\{1, 2, \dots, n\} \\ \begin{pmatrix} \tilde{X}_{11} & \dots & \tilde{X}_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{X}_{m1} & \dots & \tilde{X}_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (۸)$$

• تعیین راه حل ایده آل مثبت و ایده آل منفی

در این مرحله بهترین (سود) و بدترین مقدار (تاسف) هر یک از شاخص ها از میان تمامی گزینه ها تعیین می گردد. راه حل ایده آل مثبت یا بهترین مقدار (\tilde{f}^*) را می توان با رابطه (۹) و جواب ایده آل منفی یا بدترین مقدار \tilde{f}^- را با رابطه (۱۰) به دست آورد (Chatterjee and Chakraborty 2016).

$$\tilde{f}_j^- = \text{Min}_i \tilde{f}_{ij} \quad \tilde{f}_j^* = \text{Min}_i \tilde{f}_{ij} \quad i=\{1, 2, \dots, m\}$$

• ماتریس تصمیم نرمال شده

ماتریس تصمیم نرمال شده را می توان همان طور که در رابطه (۱۱) برای راه حل ایده آل مثبت و در رابطه (۱۲) برای راه حل ایده آل منفی نشان داده شده است؛

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{(\tilde{f}_j^* \ominus \tilde{f}_{ij})}{(r_j^* - l_j^0)} \quad (11)$$

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{(\tilde{f}_{ij} \ominus \tilde{f}_j^*)}{(r_j^0 - l_j^*)} \quad \tilde{f}_j^* = (l_j^*, m_j^*, r_j^*), \tilde{f}_j^0 = (l_j^0, m_j^0, r_j^0) \quad (12)$$

• محاسبه مقادیر سودمندی \tilde{S}_i و تاسف \tilde{R}_i

پیش از محاسبه مقادیر تاسف و سودمندی، ماتریس نرمال شده به ماتریس تصمیم گیری نرمال شده وزنی تبدیل گردیده و سپس \tilde{S}_i و \tilde{R}_i بر اساس رابطه های (۱۳) و (۱۴) به دست می آیند (Ashraf and Idrees 2024).

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^J (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (13)$$

$$\tilde{R}_i = \max_j (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (14)$$

• محاسبه شاخص ویکور

در این گام بر اساس مقادیر به دست آمده در مرحله پیشین و براساس رابطه (۱۵) مقادیر Q برای هر یک از گزینه ها محاسبه می گردد.

$$\tilde{Q}_i = v \frac{(\tilde{S}_i \ominus \tilde{S}^*)}{S^{or} - S^{*1}} \oplus (1 - v) \frac{(\tilde{R}_i \ominus \tilde{R}^*)}{R^{or} - R^{*1}} \quad (15)$$

$$R^{or} = \max_i R_i^r \quad \tilde{R}^* = \min_i \tilde{R}_i \quad \tilde{S}^* = \min_i \tilde{S}_i$$

۳- نتایج

برای حذف و پالایش پساب آلوده به فنانترین در محیط های آبی و خاک و جلوگیری از بازگشت آن به چرخه طبیعت، روش های مختلفی شناسایی شده اند. با این حال، به دلیل تنوع بالای روش ها و تعدد شاخص های مؤثر، هدف این پژوهش تعیین مناسب ترین روش برای پاکسازی پساب آلوده به فنانترین بوده است. با توجه به چندشاخصه بودن فرآیند تصمیم گیری و پیچیدگی انتخاب، در این مطالعه از مدل های تصمیم گیری چندشاخصه شامل تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و ویکور فازی (FVIKOR) استفاده شده است. روش های سنتی تصمیم گیری چندشاخصه به دلیل وجود اختلاف نظر و عدم قطعیت در تصمیمات، در بسیاری از مسائل با محدودیت مواجه بوده و نتایج قابل اعتمادی ارائه نمی دهند؛ از این رو، روش های فازی در این حوزه به منظور غلبه بر این محدودیت ها توسعه یافته اند. در این پژوهش، برای شناسایی بهترین روش پالایشی و رتبه بندی سایر گزینه های موجود، از ترکیب FAHP و FVIKOR با بهره گیری از مجموعه های فازی مثلثی استفاده گردید.

• انتخاب شاخص ها و متغیرهای تصمیم گیری چند شاخصه

بر اساس جلسات با کارشناسان شرکت نفت و مرور ادبیات مرتبط، فهرستی از شاخص های اصلی و فرعی برای تهیه پرسشنامه ها تدوین شد (جدول ۳). سپس پرسشنامه هایی استاندارد طراحی گردید تا تجربیات علمی و عملی کارشناسان نفت در زمینه روش های اصلاحی و اولویت بندی اقدامات مبتنی بر نتایج آن ها مورد ارزیابی قرار گیرد. جامعه آماری این پژوهش شامل ساکنین اطراف اراضی کشاورزی شهری بوده و پرسشنامه ها میان متخصصین نفت توزیع شد.

جدول ۳. شاخص های اصلی و فرعی

| شرح | شاخص ها | |
|---|---------------------------------|---------------|
| وجود آلاینده های ترکیبی و یا تک آلاینده در محیط | آلاینده های نگران کننده در محیط | شاخص های اصلی |
| هزینه های اجرا و پاکسازی | هزینه | |
| در دسترس بودن تکنولوژی پالایشی مورد نظر در کشور | تکنولوژی | |
| محیط دارای آلودگی بسیار، متوسط و یا کم | سطح آلودگی | |
| ارزیابی مبتنی بر ریسک جهت اقدامات اصلاحی | خطرات ناشی از محیط آلوده | |
| موقعیت مکانی، کاربری اراضی مناطق مجاور محیط های آلوده | موقعیت جغرافیایی | |
| ویژگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی سایت آلوده | سایت آلوده/مشخصات محیط | |
| زمان مورد نیاز جهت انجام پاکسازی | زمان | |
| | | |
| پذیرش عموم مردم و داشتن احساس مناسب نسبت به روش پالایش | مقبولیت اجتماعی | |
| بازیابی آلاینده ها از محیط های آلوده و مزایای ناشی از آن | بازیابی آلاینده | شاخص های فرعی |
| سیاست های اجرای کشور، قوانین و مقررات سازمان ها و ... | مقررات و سیاست ها | |
| تایید سهامداران و مدیران پروژه، مجموعه های مورد توجه جامعه و غیره | پایداری | |
| تجزیه و تحلیل خاک و پساب برای شناخت اجزای اصلی آنها | نوع خاک و پساب | |
| اقدام موقت، اولیه، پیش پاکسازی و یا پاکسازی اصلی بودن نوع پالایش | نوع اقدام پالایشی | |
| ساختار محیط آبی | منطقه متاثر | |
| همسویی روش انتخاب شده با سیاست ها و قوانین محلی آن منطقه | مقررات و سیاست ها | |
| | | |

• تحلیل پرسشنامه ها و انتخاب شاخص ها و گزینه ها

جامعه آماری این پژوهش شامل متخصصان و مهندسين پالایشگاه نفت تهران است که دارای تجربه در زمینه پاکسازی زیست محیطی بوده و با قوانین بازدارنده، فناوری های موجود و چالش های مرتبط با روش های پاکسازی آشنایی دارند. پس از طراحی و تهیه پرسشنامه های مرتبط با ارزیابی روش های پالایشی جهت پساب آلوده به فنانترن، پرسشنامه ها میان ۳۰ نفر از این متخصصین توزیع گردید. پس از جمع آوری و تحلیل پرسشنامه های تکمیل شده، بر اساس نظرات متخصصین شاخص های دارای ارجحیت بالا و گزینه های پاکسازی دست یافتنی در ایران جدا گردیده و جهت وزن دهی و رتبه بندی مورد استفاده قرار گرفت. شاخص های نهایی انتخاب شده در این فرآیند، هزینه، زمان، تکنولوژی و پتانسیل بازیابی بوده و همچنین با توجه به نتایج حاصل از پرسشنامه ها ۵ روش منتخب پاکسازی پساب شامل: غشایی (استخراج از مایع توسط نمک های پتاسیم)، روش غشایی (اسمز معکوس)، روش شیمیایی (اکسایش شیمیایی)، روش شیمیایی (اکسایش فتوکاتالیستی)، روش بیولوژیکی (تخریب بیولوژیکی توسط میکروارگانیسم ها) جهت رتبه بندی و یافتن بهترین رویکرد برای پساب آلوده به فنانترن انتخاب گردید.

• وزن دهی شاخص ها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی

پس از شناسایی شاخص ها بر اساس تحلیل پرسشنامه ها و مرور ادبیات موضوع، چهار شاخص شامل زمان، هزینه، فناوری و قابلیت بازیابی آلاینده ها انتخاب شد و ماتریس مقایسات زوجی با استفاده از مجموعه های فازی مثلثی و مقیاس ۹ درجه ای تهیه گردید (جدول ۴).

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (5,6,7) & (1,2,3) & (3,4,5) \\ \left(\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}\right) & (1,1,1) & \left(\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}\right) & \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\right) \\ \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\right) & (6,7,8) & (1,1,1) & (5,6,7) \\ \left(\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}\right) & (1,2,3) & \left(\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}\right) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

ماتریس مقایسات زوجی

جدول ۴. مقیاس ۹ درجه ای Saaty

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

با توجه به پیچیدگی سیستم ارزیابی و احتمال جانب‌داری تصمیم‌گیری‌های متخصصان، ممکن است در ماتریس‌های تشکیل شده عدم یکپارچگی مشاهده شود. به همین دلیل، نرخ سازگاری و یکپارچگی اوزان محاسبه گردید و با توجه به اینکه مقدار آن کمتر از ۰,۱ است، وزن‌دهی‌های انجام شده قابل قبول ارزیابی شد.

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

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

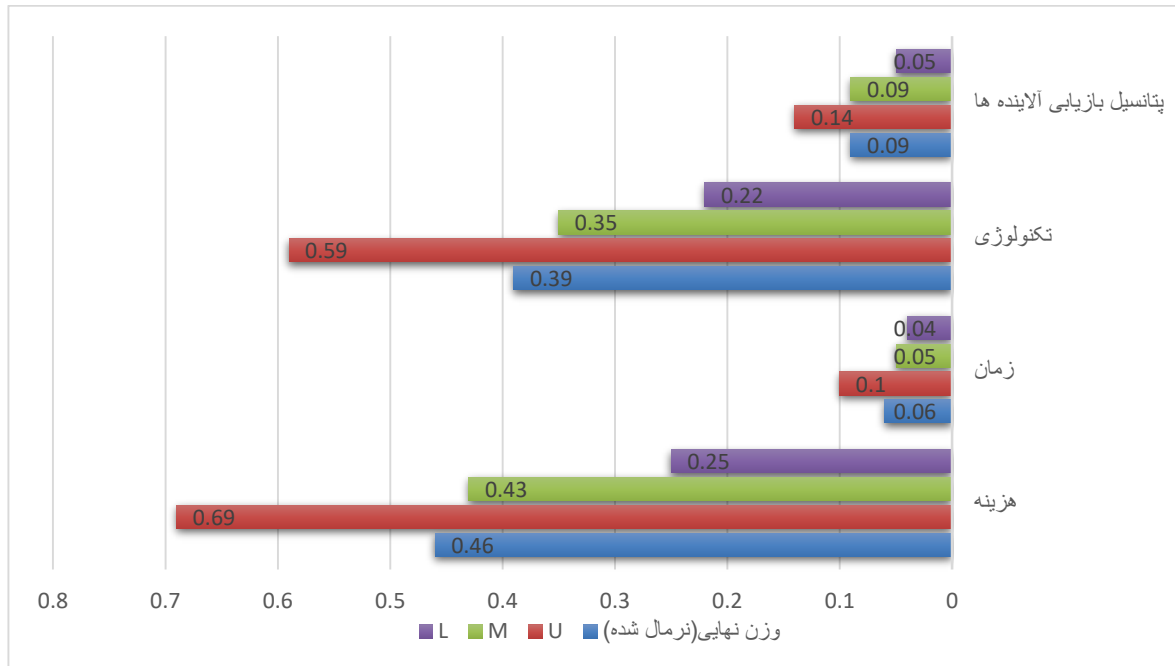
$$\begin{bmatrix} 1.98 & 2.63 & 3.20 \\ 0.28 & 0.33 & 0.43 \\ 1.78 & 2.14 & 2.74 \\ 0.41 & 0.54 & 0.67 \end{bmatrix}$$

ماتریس مقایسات زوجی

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

$$W_i = \begin{bmatrix} 0.28 & 0.47 & 0.72 \\ 0.04 & 0.06 & 0.10 \\ 0.25 & 0.38 & 0.62 \\ 0.06 & 0.10 & 0.15 \end{bmatrix}$$

ماتریس وزنی نهایی



شکل ۲. اوزان فازی و نهایی شاخص ها

در نهایت ماتریس وزن دهی نرمال سازی گردیده و ماتریس وزن نهایی شاخص ها بدست می آید.

$$W_i = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.43 & 0.69 \\ 0.04 & 0.05 & 0.10 \\ 0.22 & 0.35 & 0.59 \\ 0.05 & 0.09 & 0.14 \end{bmatrix}$$

ماتریس وزن دهی نرمال سازی

• تعیین مقدار V

پارامتر V جهت محاسبه مقادیر Q در گام بعدی با توجه به میزان توافق گروه تصمیم گیرنده که بسیار زیاد بوده است مشخص گردیده و برابر با ۰,۷ در نظر گرفته شده است. نحوه انتخاب مقدار V در جدول ۵ نشان داده شده است. تعیین مقدار پارامتر V با توجه به تاثیر مستقیمی که بر مقادیر Q در رتبه بندی می گذارد، 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 اندک | توافق با اکثریت آرا | توافق گروهی بسیار زیاد |

* هر چه V بزرگتر باشد بدان معناست که به نظرات گروهی بهای بیشتری داده شده است.

* هر چه V کوچکتر باشد بدان معناست که به نظرات فردی بهای بیشتری داده شده است.

• محاسبه مقادیر Q, S, R

در این مرحله از اوزان بدست آمده در مرحله پیشین استفاده گردیده و ماتریس تصمیم گیری تشکیل می گردد. شایان ذکر است که شاخص های هزینه های اجرایی و زمان اجرا شاخص هایی از نوع منفی و در دسترس بودن تکنولوژی و پتانسیل بازیابی آلاینده ها مثبت می باشند. در گام نخست ماتریس تصمیم گیری براساس شاخص های و متغیرهای مورد نظر تشکیل گردید. سپس ماتریس تصمیم گیری نرمال شده آن به دست می آمد (جدول ۶).

جدول ۶. ماتریس تصمیم گیری نرمال شده

| شاخص ها | | | | |
|------------------------------------|----------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| گزینه ها | هزینه | زمان | در دسترس بودن تکنولوژی | پتانسیل بازیابی آلاینده |
| روش شیمیایی (اکسایش فتو کاتالیستی) | (۰,۲,۰,۶,۱) | (-۰,۲۲,۰,۰,۲۲) | (-۰,۲۵,۰,۳۸,۱) | (۰,۵۶,۰,۷۸,۱) |
| غشایی (توسط نمک پتاسیم) | (-۰,۴,۰,۰,۴) | (۰,۱۱,۰,۳۳,۰,۵۶) | (-۰,۲۵,۰,۳۸,۱) | (-۰,۲۲,۰,۰,۲۲) |
| روش شیمیایی (اکسایش شیمیایی) | (-۰,۲,۰,۳,۰,۸) | (۰,۴۴,۰,۶۷,۰,۸۹) | (-۰,۵,۰,۰,۵) | (۰,۲۲,۰,۵۰,۷۸) |
| روش غشایی (اسمز معکوس و س) | (-۰,۲,۰,۳,۰,۸) | (۰,۲۲,۰,۵۰,۷۸) | (-۰,۵,۰,۰,۵) | (-۰,۲۲,۰,۰,۲۲) |
| روش بیولوژیکی (توسط میکروارگانیسم) | (۰,۲,۰,۶,۱) | (۰,۵۶,۰,۷۸,۱) | (-۰,۵,۰,۰,۵) | (۰,۵۶,۰,۷۸,۱) |

پس از تبدیل ماتریس نرمال شده به ماتریس روابط (۱۳) تا (۱۵) محاسبه شده و در جدول ۷ نشان تصمیم گیری نرمال شده وزنی، R ، S و Q با استفاده از داده شده است.

جدول ۷. ماتریس تصمیم گیری نرمال شده وزنی

| فازی R | فازی S | فازی Q | |
|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|
| (۰,۰۴۹,۰,۲۶۰,۰,۶۸۹) | (۰,۰۱۴,۰,۴۶۱,۰,۴۴۲) | (-۰,۶۲۶,۰,۱۹۲,۱,۰۰۰) | روش شیمیایی (اکسایش فتو کاتالیستی) |
| (۰,۰۰۴,۰,۱۳۲,۰,۵۸۹) | (-۰,۱۶۳,۰,۱۵۰,۰,۹۴۷) | (-۰,۷۲۳,۰,۰۰۱,۰,۷۴۱) | غشایی (توسط نمک پتاسیم) |
| (۰,۰۱۶,۰,۱۳۰,۰,۵۵۱) | (-۰,۱۳۵,۰,۲۱۰,۰,۰۳۹) | (-۰,۷۰۶,۰,۰۲۶,۰,۷۶۴) | روش شیمیایی (اکسایش شیمیایی) |
| (۰,۰۰۸,۰,۱۳۰,۰,۵۵۱) | (-۰,۱۶۵,۰,۱۵۷,۰,۹۴۹) | (-۰,۷۲۳,۰,۰۰۳,۰,۷۲۵) | روش غشایی (اسمز معکوس) |
| (۰,۰۴۹,۰,۲۶۰,۰,۶۸۹) | (-۰,۰۱۵,۰,۳۷۱,۰,۲۱۹) | (-۰,۶۳۹,۰,۱۵۳,۰,۹۰۳) | روش بیولوژیکی (توسط میکروارگانیسم) |

• رتبه بندی گزینه های پالایش پساب آلوده به فانترن

در این مرحله پس از غیر فازی نمودن نتایج به دست آمده در مرحله پیشین، مقادیر R ، S و Q بصورت نزولی مرتب می گردند 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 و دو شرط ذیل نیز بطور همزمان برای آن برقرار باشد (فرض بر آن است که $A^{(1)}$ بهترین گزینه باشد):

شرط ۱:

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq \frac{1}{(m-1)} \quad (16)$$

m: تعداد گزینه ها

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

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

شرط ۲:

$$Q(A^{(m)}) - Q(A^{(1)}) \geq \frac{1}{(m-1)} \quad (17)$$

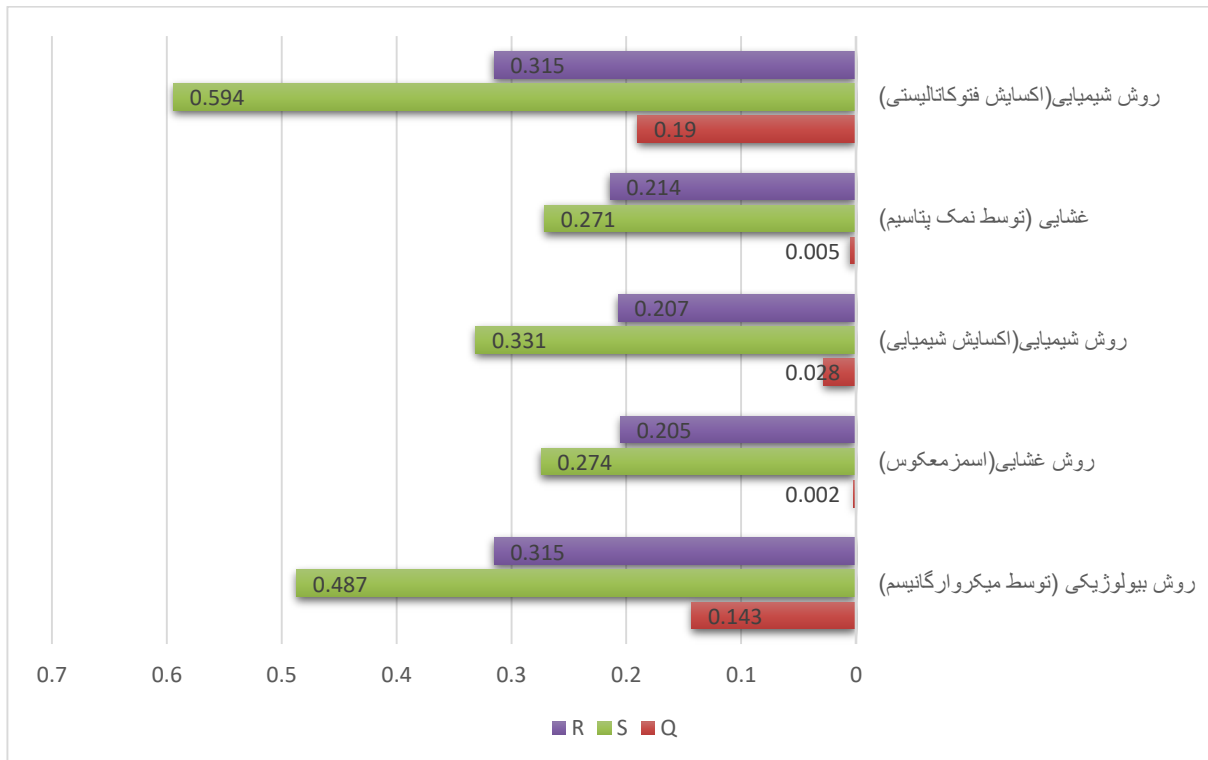
$A^{(m)}$: آخرین گزینه براساس رتبه بندی

در صورتیکه شرط اول برقرار نباشد، شرط دوم را بررسی می‌نمائیم.

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

جدول ۸. مقادیر S، R و Q

| رتبه بندی | Q | رتبه بندی | S | رتبه بندی | R | |
|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|------------------------------------|
| ۵ | ۰,۱۹۰ | ۵ | ۰,۵۹۴ | ۴ | ۰,۳۱۵ | روش شیمیایی (اکسایش فتوکاتالیستی) |
| ۲ | ۰,۰۰۵ | ۱ | ۰,۲۷۱ | ۳ | ۰,۲۱۴ | غشایی (توسط نمک پتاسیم) |
| ۳ | ۰,۰۲۸ | ۳ | ۰,۳۳۱ | ۲ | ۰,۲۰۷ | روش شیمیایی (اکسایش شیمیایی) |
| ۱ | ۰,۰۰۲ | ۲ | ۰,۲۷۴ | ۱ | ۰,۲۰۵ | روش غشایی (اسمز معکوس) |
| ۴ | ۰,۱۴۳ | ۴ | ۰,۴۸۷ | ۴ | ۰,۳۱۵ | روش بیولوژیکی (توسط میکروارگانیسم) |



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

با توجه به شروط تعیین شده برای انتخاب بهترین گزینه پالایش و مقادیر به دست آمده در جدول 8، شرط اول مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که برقرار نیست. از آنجا که شرط اول برقرار نمی‌باشد، بر اساس راه حل شماره 1، رتبه‌بندی بهترین گزینه‌های پالایش به ترتیب عبارت است از: روش غشایی (اسمز معکوس)، روش غشایی (استخراج با نمک پتاسیم)، روش شیمیایی (اکسایش شیمیایی)، روش بیولوژیکی (توسط میکروارگانسیم‌ها) و روش شیمیایی (اکسایش فتوکاتالیستی).

۴- نتیجه‌گیری

آلودگی پساب به هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، از جمله فنانترن، پیامدهای زیست‌محیطی و سلامت قابل توجهی برای انسان و سایر موجودات زنده دارد. این آلاینده‌ها به دلیل انتشار مستقیم و غیرمستقیم در محیط، سمیت بالا، آلوده سازی آب و خاک و انتقال به گیاهان و جانداران، از جمله مسائل جدی زیست‌محیطی محسوب می‌شوند. امروزه روش‌های متعددی برای پالایش پساب آلوده به فنانترن ارائه شده است؛ با این حال، در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، انتخاب روشی که فناوری آن در دسترس بوده، هزینه اجرایی قابل قبول داشته باشد، در زمان کوتاه قابل اجرا باشد و آلاینده‌های پاک‌سازی شده قابلیت بازیابی داشته باشند، امری پیچیده و چالش برانگیز است. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از تجربیات ارزشمند متخصصین حوزه نفت، ابتدا مروری بر ادبیات موضوع انجام شد و شاخص‌ها و شاخص‌های فرعی مرتبط شناسایی گردیدند. سپس بر اساس تحلیل پرسشنامه‌ها و نظرات کارشناسان، مهم‌ترین شاخص‌ها انتخاب شدند که شامل هزینه، زمان، فناوری موجود و پتانسیل بازیابی آلاینده‌ها هستند. اهمیت هر یک از شاخص‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و مقایسات زوجی تعیین شد. در ادامه، روش‌های پالایش قابل اجرا در ایران با بررسی و تحلیل نتایج پرسشنامه‌ها و مطالعات موجود مشخص شدند که شامل: روش غشایی (اسمز معکوس)، روش غشایی (استخراج با نمک پتاسیم)، روش شیمیایی (اکسایش شیمیایی)، روش بیولوژیکی (تخریب توسط میکروارگانسیم‌ها) و روش شیمیایی (اکسایش فتوکاتالیستی) می‌باشند. نهایتاً با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندشاخصه ویکور فازی، این روش‌ها بر اساس شاخص‌های منتخب رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به معیارهایی شامل هزینه‌های اجرایی، مدت زمان اجرای پالایش، در دسترس بودن فناوری و پتانسیل بازیابی آلاینده، روش غشایی (اسمز معکوس) با مقادیر $(R=0.205, S=0.274, Q=0.002)$ و سپس روش غشایی (استخراج با نمک پتاسیم) با مقادیر $(R=0.214, S=0.271, Q=0.005)$ به عنوان بهترین رویکردهای ممکن برای کشورهای در حال توسعه معرفی می‌شوند.

منابع

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), P. 107-123. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2014.11.005>
- Achten, C., & Andersson, J. T. (2015). Overview of polycyclic aromatic compounds (PAC). *Polycyclic Aromatic Compounds*, 35(2-4), P. 177-186. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.994071>
- Akbarzadeh, A., Valipour, A., Meshkati, S. M. H., & Hamnabard, N. (2023). Municipal wastewater treatment in Iran: Current situation, barriers and future policies. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 11(1), P. 60-71. https://jaehr.muk.ac.ir/article_152962.html
- Ashraf, T., & Idrees, N. (2024). Topological indices based VIKOR assisted multi-criteria decision technique for lung disorders. *Frontiers in Chemistry*, 12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1407911>
- Berríos-Rolón, P. J., Cotto, M. C., & Márquez, F. (2025). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in freshwater systems: A comprehensive review of sources, distribution, and ecotoxicological impacts. *Toxics*, 13(4), P. 321. <https://doi.org/10.3390/toxics13040321>
- Boström, C.-E., et al. (2002). Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air. *Environmental Health Perspectives*, 110(Suppl 3), P. 451-488. <https://doi.org/10.1289/ehp.110-1241197>
- Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), P. 649-655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Chatterjee, P., & Chakraborty, S. (2016). A comparative analysis of VIKOR method and its variants. *Decision Science Letters*, 5, P. 469-486.
- Chauhan, H. A., et al. (2021). Metal-based nanocomposite materials for efficient photocatalytic degradation of phenanthrene from aqueous solutions. *Polymers*, 13(14), 2374. <https://doi.org/10.3390/polym131422374>
- Chen, S.-J., & Hwang, C.-L. (1992). Fuzzy multiple attribute decision making methods. In *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* (Vol. 461), P. 289-486. (Springer) https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4_5

- Farifteh, J., Farshad, A., & George, R. J. (2006). Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics. *Geoderma*, 130(3-4), P.191-206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.011>
- Gutierrez-Urbano, I., Villen-Guzman, M., Perez-Recuerda, R., & Rodriguez-Maroto, J. M. (2021). Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in conventional drinking water treatment processes. *Journal of Contaminant Hydrology*, 243, 103888. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103888>
- Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. (2009). Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), P. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>
- Kim, K.-H., Jahan, S. A., Kabir, E., & Brown, R. J. C. (2013). A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment International*, 60, P. 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.019>
- Liu, Y., et al. (2022). Detection and remediation of mercury contaminated environment by nanotechnology: Progress and challenges. *Environmental Pollution*, 293,118557. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118557>
- Mehrparvar, M., Majak, J., & Karjust, K. (2024). A comparative analysis of fuzzy AHP and fuzzy VIKOR methods for prioritization of the risk criteria of an autonomous vehicle system. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 73(2), P. 116.
- Mizwar, A., & Trihadiningrum, Y. (2015). PAH contamination in soils adjacent to a coal-transporting facility in Tapin District, South Kalimantan, Indonesia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69(1), P. 62-68. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0141-z>
- Mohan, D., & Pittman, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), P. 1-53. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.046>
- Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), P. 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00200-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00200-2)
- Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, 178(2), P. 514-529. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.0555>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), P. 83-98.
- Tarigholizadeh, S., et al. (2024). Transfer and degradation of PAHs in the soil–plant system: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(1), P. 46-64. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c05589>
- Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223,P. 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.014>
- Wu, L., et al. (2024). Mechanisms, applications, and risk analysis of surfactant-enhanced remediation of hydrophobic organic contaminated soil. *Water*, 16(15), P. 2093. <https://doi.org/10.3390/w16152093>
- Zhang, W., et al. (2025). Mapping spatial interconnections with distances for evaluating the development value of eco-tourism resources. *Sustainability*, 17(14), P. 6430. <https://doi.org/10.3390/su17146430>