



Assessment and Selection of an Appropriate Oil Spill Response Method in Gulf of Oman

Saeed Karimi^{a*}, Ehsan Talebi^a, Mahnaz Jadidi^a

^aDepartment of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding author: Karimis@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0002-8465-6052>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The Gulf of Oman is one of the most important marine areas in southern Iran, with considerable economic and environmental significance due to its fisheries resources, maritime transportation capacities, trade, and tourism potential. However, extensive vessel traffic, particularly by commercial vessels and oil tankers, increases the risk of oil pollution and its associated consequences. Oil spills and petroleum products can have extensive adverse effects on marine ecosystems, coastal areas, aquatic organisms, fisheries, and tourism activities. Therefore, selecting an appropriate and effective method for responding to oil spills, considering the environmental conditions of the region, is of particular importance. The aim of this study was to determine and prioritize the most appropriate method for responding to oil spills in the Gulf of Oman using the Analytic Hierarchy Process based on the physical characteristics of seawater. In this study, six criteria, including temperature, salinity, turbidity, water-current velocity, depth, and dissolved oxygen, were considered as decision-making criteria. First, a pairwise comparison matrix was constructed to determine the relative importance of the criteria and calculate their weights. The consistency of the pairwise comparisons was also evaluated using the Consistency Ratio. Subsequently, based on the criterion with the highest relative weight, different oil-spill response methods were compared and prioritized according to the selected criterion. The results showed that temperature, with a weight of 0.40, had the highest relative importance among the criteria considered. The Consistency Ratio of the pairwise comparison matrix was 0.0416, indicating an acceptable level of consistency. Furthermore, based on temperature as the dominant criterion, adsorption, with a weight of 0.354, ranked first among the oil-spill response methods, followed by chemical dispersants (0.271), mechanical methods (0.209), in situ burning (0.113), and bioremediation (0.057). The findings indicate that the Analytic Hierarchy Process can provide a systematic framework for weighting environmental criteria and prioritizing oil-spill response methods in the Gulf of Oman.
Article history: Received: 2026/05/04 Received in revised form: 2026/05/14 Accepted: 2026/06/09 Available online: 2026/06/15	
Keywords: Oil pollution, Oman Sea, Adsorption method, Decision support system, Analytical Hierarchy Process (AHP).	

Introduction

The coastal zone of the Gulf of Oman, extending from Gwadar Bay to the eastern shores of Bandar Abbas, is an ecologically and economically important marine region that supports fisheries, maritime transportation, trade, tourism, and other marine-based activities. Intensive maritime traffic, particularly the movement of commercial vessels and oil tankers, increases the risk of oil spills and their associated environmental and economic consequences. Oil pollution can adversely affect marine ecosystems, coastal areas, aquatic organisms, fisheries, and tourism activities. Therefore, selecting an appropriate response method that is compatible with the environmental conditions of the study area is essential for effective oil-spill management.

Various methods have been developed to respond to oil spills, including mechanical recovery, in-situ burning, chemical dispersants, bioremediation, and adsorption. The effectiveness of these methods can vary depending on environmental conditions and the characteristics of the spilled oil. Consequently, selecting an appropriate response method is a multi-criteria decision-making problem that requires systematic evaluation of relevant environmental parameters. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is a widely used multi-criteria decision-making technique that enables the relative importance of decision criteria and alternatives to be determined through pairwise comparisons. Accordingly, the present study aimed to determine and prioritize an appropriate oil-spill response method for the Gulf of Oman using AHP and considering the physical characteristics of seawater. Six physical parameters, including temperature, salinity, turbidity, current velocity, water depth, and dissolved oxygen, were considered as decision-making criteria. The study further sought to identify the criterion with the highest relative importance and subsequently prioritize available oil-spill response methods based on that criterion.

Method

A multi-criteria decision-making framework based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) was employed. First, a pairwise comparison matrix was developed for six physical seawater parameters, including temperature, salinity, turbidity, current velocity, depth, and dissolved oxygen. Pairwise comparisons were performed using the fundamental AHP scale from 1 to 9. The relative weight of each criterion was then calculated based on the pairwise comparison matrix. To assess the consistency of the judgments, the Consistency Ratio (CR) was calculated using the Consistency Index (CI) and Random Index (RI). The obtained CR value was also used to determine whether the pairwise comparisons had an acceptable level of consistency.

After identifying the criterion with the highest relative weight, a second pairwise comparison was conducted among five oil-spill response methods, including adsorption, chemical dispersants, mechanical recovery, in-situ burning, and bioremediation. Importantly, the ranking of these response methods was performed based on the dominant criterion identified in the first stage, rather than through an integrated weighting of all six physical parameters. Thus, the second stage of the analysis was specifically designed to determine the priority of response methods under the dominant environmental criterion identified by the AHP framework.

Results

The AHP results showed that temperature had the highest relative weight among the six physical seawater parameters, with a weight of 0.40, followed by salinity (0.25), turbidity (0.15), current velocity (0.08), depth (0.07), and dissolved oxygen (0.05). The Consistency Ratio of the pairwise comparison matrix was calculated as 0.0416, which is below the commonly accepted threshold of 0.10 and indicates an acceptable level of consistency in the pairwise judgments. Although the Gulf of Oman is not necessarily among the warmest marine regions, the relatively high weight assigned to temperature in this study does not indicate that the region has the highest absolute seawater temperature. Rather, the weight represents the relative importance of temperature within the decision-making structure of the present AHP

model. Temperature can influence several processes relevant to the fate and behavior of oil spills, including changes in oil viscosity and evaporation of volatile components. It may also affect the performance of certain oil-spill response methods and biological processes involved in hydrocarbon degradation. Therefore, the relatively high weight of temperature can be interpreted in terms of its potential influence on oil-spill behavior and response effectiveness rather than simply its absolute value. Based on temperature as the dominant criterion, adsorption obtained the highest priority among the evaluated response methods, with a weight of 0.354. Chemical dispersants ranked second (0.271), followed by mechanical recovery (0.209), in-situ burning (0.113), and bioremediation (0.057). Thus, within the decision-making structure of this study and specifically under the temperature criterion, adsorption was identified as the highest-priority response method. The results indicate that the ranking presented in this study should be interpreted within the defined AHP framework. In particular, the ranking of response methods reflects their priority according to the dominant criterion identified in the first stage and does not represent an overall ranking obtained by simultaneously aggregating all six physical seawater criteria.

Conclusions

The present study employed the Analytic Hierarchy Process (AHP) to systematically evaluate the relative importance of physical seawater parameters and prioritize oil-spill response methods in the Gulf of Oman. Among the six physical parameters considered, temperature received the highest relative weight (0.40), indicating its dominant position within the decision-making structure of the study. The Consistency Ratio (CR = 0.0416) confirmed the acceptable consistency of the pairwise comparisons. Based on the dominant temperature criterion, adsorption achieved the highest priority (0.354) among the evaluated oil-spill response methods, followed by chemical dispersants, mechanical recovery, in-situ burning, and bioremediation. The results suggest that adsorption can be considered a high-priority response option under the decision conditions defined in this study. However, this finding should not be interpreted as a universal superiority of adsorption over other response methods, since the ranking was derived specifically from the dominant temperature criterion identified through the AHP procedure. Overall, the findings demonstrate that AHP can provide a systematic framework for incorporating environmental considerations into oil-spill response decision-making. The proposed approach can assist environmental managers in prioritizing response options under specific environmental conditions in the Gulf of Oman. Future studies may improve the framework by incorporating additional environmental and operational criteria, performing sensitivity analysis, and validating the AHP results using field observations and real oil-spill response data.



ارزیابی و انتخاب روش مناسب مقابله با لکه های نفتی در دریای عمان

سعید کریمی^{a*}، احسان طالبی^a، مهناز جدیدی^a

^a گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: سعید کریمی karimis@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	دریای عمان یکی از مهم ترین پهنه های دریایی جنوب ایران است که به دلیل برخورداری از منابع شیلاتی، ظرفیت های حمل و نقل دریایی، تجارت و گردشگری، از اهمیت اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی برخوردار است. با این حال، تردد گسترده شناورها و نفتکش ها، احتمال وقوع آلودگی های نفتی و پیامدهای ناشی از آن را افزایش داده است. انتخاب روش مناسب برای مقابله با لکه های نفتی مستلزم توجه به شرایط محیطی و ویژگی های فیزیکی آب دریا است. از این رو، هدف پژوهش حاضر، تعیین و اولویت بندی مناسب ترین روش مقابله با لکه های نفتی در دریای عمان با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با در نظر گرفتن معیارهای فیزیکی آب دریا است. در این پژوهش، شش معیار شامل دما، شوری، کدورت، سرعت جریان، عمق و اکسیژن محلول به عنوان معیارهای تصمیم گیری در نظر گرفته شدند. ابتدا با تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، اهمیت نسبی معیارها تعیین و وزن هر یک محاسبه شد. سپس، با توجه به معیار دارای بیشترین وزن، گزینه های مختلف مقابله با آلودگی نفتی بر اساس معیار منتخب مورد مقایسه و اولویت بندی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که دما با وزن ۰/۴۰ بیشترین اهمیت نسبی را در میان معیارهای مورد بررسی دارد. همچنین، در رتبه بندی گزینه ها بر اساس معیار دما، روش جذب سطحی با وزن ۰/۳۵۴ در رتبه نخست قرار گرفت و پس از آن پخش کننده های شیمیایی با وزن ۰/۲۷۱، روش های مکانیکی با وزن ۰/۲۰۹، سوزاندن درجا با وزن ۰/۱۱۳ و زیست پالایی با وزن ۰/۰۵۷ در رتبه های بعدی قرار گرفتند. بر اساس نتایج، استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می تواند چارچوبی نظام مند برای وزن دهی معیارهای محیطی و اولویت بندی روش های مقابله با آلودگی نفتی در دریای عمان فراهم کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵	
کلیدواژه ها: آلودگی نفتی، دریای عمان، روش جذب سطحی، سیستم پشتیبان تصمیم گیری، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP).	

مقدمه

دریای عمان، به‌عنوان یکی از پهنه‌های مهم آبی جنوب ایران، از نظر جغرافیایی در محدوده‌ای از خلیج گواتر تا سواحل شرقی بندرعباس امتداد دارد و با طولی در حدود ۵۴۵ کیلومتر، از ظرفیت‌های قابل توجه اقتصادی، زیست‌محیطی و گردشگری کشور برخوردار است. وجود منابع شیلاتی، ظرفیت‌های بالقوه گردشگری و امکان توسعه فعالیت‌های مرتبط با ورزش‌های آبی، به‌ویژه در فصول سرد سال، بر اهمیت اقتصادی و اجتماعی این پهنه آبی افزوده است (Al-Shidhani et al., 2026). با این همه بروز آلودگی نفتی حاصل از حمل‌ونقل کشتی‌ها و همچنین آب توازن می‌تواند از جمله عوامل آسیب‌رسان مطرح باشد (AlKaabi et al., 2020; Haridharan et al., 2022; Ratchagar & Hemalatha, 2013). چراکه علاوه بر اثرات مخرب بر بوم‌سازگان و بروز آلودگی منظر می‌تواند موجبات مشکلات اقتصادی را فراهم سازد. بنابراین در زمان بروز آلودگی نفتی ناگزیر می‌بایست در جهت پاسخ به‌موقع اقدام نمود چراکه رسیدن لکه نفتی به ساحل و بروز تاربال^۱ شرایط را بغرنج می‌نماید. در زمینه مقابله با آلودگی نفتی روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های بیولوژیکی فیزیکی و شیمیایی اشاره نمود که در میان آن‌ها روش مکانیکی به لحاظ پاسخ به‌موقع در شرایط اضطراری دارای مرتبه بالاتری است. با این حال انتخاب روش بهینه پاسخ قطعی به لکه نفتی همیشه با چالش‌هایی روبه‌رو می‌باشد (Chitrakar et al., 2019; Nabavi et al., 2021; Wang et al., 2015).

امروزه روش‌هایی مثل سوزاندن درجا که زمانی تنها برای لکه‌های نفتی دور از ساحل مورد استفاده قرار می‌گرفتند تحت شرایطی خاص به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در زمینه سوزاندن درجا روش‌هایی مانند پایروبووم^۲ که عملکرد خود را در پاسخ به لکه نفتی دیپ واتر هاریزون^۳ در خلیج مکزیک به اثبات رسانده‌اند دارای کارایی منحصر به فردی می‌باشند و تنها ابزاری است که کارایی خود از قطب تا مناطق گرمسیری به اثبات رسانده‌است. یا از دیگر روش‌های مقابله با آلودگی نفتی زیست‌پالایی است که در این روش می‌توان نفت را با استفاده از میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده نفت به ترکیباتی با خطر کمتر تبدیل کرد (Bôto et al., 2021; Kabyl et al., 2022; Mabile, 2018). براساس تحقیقات انجام شده باکتری‌هایی چون *Alcanivorax* و *Marinobacter* در پالایش آلودگی‌های نفتی نقش دارند. مواد پخش‌کننده شیمیایی از دیگر روش‌های مقابله با آلودگی نفتی هستند. این مواد شامل بر حلال‌ها و سورفاکتانت‌ها هستند، در این میان حلال‌ها کمک می‌کنند مواد شیمیایی مخلوط شده و در نفت حل شود و سورفاکتانت‌ها روند ترکیب نفت و آب با یکدیگر را تسهیل می‌کنند (Baqar, 2024; Lessard & DeMarco, 2000; Macaulay & Rees, 2014).

روش دیگر در مقابله با لکه نفتی استفاده از جاذب‌ها است که در این میان مواد نانو حفره‌ای به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد خود کاربرد فوق‌العاده‌ای در این زمینه دارند. با این همه انتخاب روش مناسب از میان روش‌های مذکور کاری مشکل به نظر می‌رسد. چرا که علاوه بر اینکه هر روش کارایی خود را دارد شرایط محیطی در دریای عمان نیز ویژگی‌های خاص خود را دارا می‌باشد. تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) از روش‌های کارآمد در زمینه وزن‌دهی و انتخاب گزینه‌های بهینه است که در این تحقیق، جهت انتخاب بهترین روش جهت مقابله با آلودگی نفتی در دریای عمان مورد استفاده قرار گرفته‌است. در ادامه به تعدادی پژوهش‌های صورت‌گرفته با این روش که دال بر اهمیت و کارایی آن دارد اشاره خواهد شد (Guidi et al., 2016; Ha, 2018; Khodadoust et al., 2026).

برخی مطالعات صورت‌گرفته با استفاده از روش AHP

^۱ - Tarball

^۲ - PyroBoom

^۳ - Deepwater Horizon

روش AHP دارای کارایی منحصر به فردی در تصمیم سازی در زمینه های مختلف ایمنی بهداشت و محیط زیست است. در زمینه تحقیقات انجام شده با استفاده از این روش (Moradirad et al., 2019) با هدف انتخاب بهترین روش کنترل صدا در یک پالایشگاه، از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی FAHP استفاده کردند. آن ها ابتدا منابع اصلی تولید صدا در پالایشگاه را شناسایی نموده، سپس با استفاده از پرسشنامه و روش دلفی ۵ معیار و ۱۰ روش کنترل صدا را تعیین نمودند و در ادامه با کمک روش FAHP وزن هر معیار و امتیاز هر روش کنترل را محاسبه نمودند. نهایتاً نتایج نشان داد که کارایی مهم ترین معیار برای انتخاب روش کنترل صدا است. (Tarkian et al., 2014) در مطالعه ای در پژوهشگاه صنعت نفت با هدف انتخاب مناسب ترین روش تصفیه فاضلاب، از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP و نرم افزار Expert Choice استفاده نمودند. در این مقاله چهار گزینه شامل بر MBR، SBR ثابت، MBR چرخان و لجن فعال با هوادهی گسترده را بر اساس معیارهای زیست محیطی، اقتصادی، فنی و مدیریتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که MBR چرخان مناسب ترین گزینه بوده است و درجه ناسازگاری ۰/۰۷ نشان دهنده سازگاری خوب مقایسه ها بوده است. (Chompook et al., 2023) در پژوهشی به انتخاب روش بهینه فناوری تصفیه فاضلاب با استفاده از روش AHP در چارچوب تصمیم گیری چند معیاره پرداختند. در این مقاله تمرکز اصلی ایشان بر روی بهینه سازی فرآیند تصفیه فاضلاب در شهرداری دجران در مقدونیه شمالی بوده است. در این مقاله سه راهکار مختلف برای بهبود ظرفیت تصفیه فاضلاب بررسی شدند که معیارهای انتخاب شامل بر تحلیل وضعیت سیستم در فصل گردشگری و غیر از آن ارزیابی عملکرد تصفیه خانه فعلی و ترکیب آن با یک تصفیه خانه جدید، کارایی تصفیه با فناوری های مختلف، فضای مورد نیاز و پارامترهای مالی است. در این مقاله کاربرد روش AHP نشان می دهد که فناوری راکتور بیوفیلمی بستر متحرک MBBR¹ به عنوان یک راهکار مدرن و موثر برای تصفیه فاضلاب با قابلیت حذف مواد آلی، فسفر و نیتروژن و با فضا و مشکلات کمتر نسبت به سیستم های سنتی، انتخاب مناسبی است (Ćetković et al., 2023). (Nabavi et al., 2021) در مطالعه ای با هدف انتخاب بهترین روش برای تصفیه شیرابه حاصل از ضایعات مزارع تره بار، از فرآیند تحلیل AHP استفاده کردند. آن ها با بررسی معیارهایی مانند BOD، COD، TSS، TDS، PH، TOC و زمان روش های مختلف تصفیه را ارزیابی و مقایسه نمودند. نتایج نشان داد در صورت بی اهمیت بودن زمان، روش های زیستی عملکرد بهتری دارند. اما زمانی که سرعت تصفیه اهمیت دارد. روش های شیمیایی به ویژه ازن بعلاوه GAC و ازن به علاوه H₂O₂ موثرتر هستند. این مطالعه نشان می دهد که استفاده از AHP می تواند تصمیم گیری بهینه در انتخاب روش های تصفیه شیرابه را تسهیل نماید.

با توجه به تأثیر شرایط محیطی بر رفتار لکه های نفتی و کارایی روش های مختلف مقابله با آلودگی، انتخاب روش مناسب برای مقابله با لکه های نفتی در دریای عمان نیازمند رویکردی نظام مند و چندمعیاره است. از این رو، هدف اصلی پژوهش حاضر، تعیین و اولویت بندی مناسب ترین روش مقابله با لکه های نفتی در دریای عمان با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی آب دریا است. در این راستا، معیارهای فیزیکی آب دریا شامل دما، شوری، کدورت، سرعت جریان، عمق و اکسیژن محلول مورد ارزیابی قرار گرفته و اهمیت نسبی هر یک از معیارها تعیین می شود. سپس، روش های مختلف مقابله با آلودگی نفتی بر اساس معیار دارای بیشترین اهمیت اولویت بندی می شوند. همچنین، به منظور بررسی رابطه میان پارامترهای فیزیکی آب دریا و وزن های محاسبه شده و ارزیابی قابلیت پیش بینی وزن ها بر اساس این پارامترها، از آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی استفاده می شود. در نهایت، پژوهش حاضر با هدف ارائه چارچوبی نظام مند برای انتخاب روش مناسب مقابله با آلودگی نفتی متناسب با شرایط محیطی دریای عمان انجام شده است.

¹ - Moving Bed Biofilm Reactor

روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر، به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین روش مقابله با آلودگی نفتی در دریای عمان، از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تحلیل‌های آماری استفاده شد. در این راستا، ابتدا معیارهای فیزیکی مؤثر بر شرایط محیط دریایی شناسایی و سپس اهمیت نسبی آن‌ها و تأثیرشان بر انتخاب روش مقابله با آلودگی نفتی مورد ارزیابی قرار گرفت. مراحل اجرای پژوهش به شرح زیر است. با توجه به اهمیت شرایط محیطی در رفتار لکه نفتی و کارایی روش‌های مقابله با آلودگی، شش معیار فیزیکی شامل دما، شوری، کدورت، سرعت جریان، عمق و اکسیژن محلول به‌عنوان معیارهای مؤثر در فرآیند تصمیم‌گیری در نظر گرفته شدند. انتخاب این معیارها بر اساس اهمیت آن‌ها در تعیین شرایط فیزیکی محیط دریایی و تأثیر احتمالی آن‌ها بر انتشار، جابه‌جایی و کنترل لکه نفتی انجام شد.

در مرحله نخست، ماتریس مقایسه زوجی معیارهای فیزیکی تشکیل شد. در این ماتریس، اهمیت نسبی هر یک از معیارها در مقایسه با سایر معیارها تعیین گردید. برای انجام مقایسه‌های زوجی از مقیاس نه‌درجه‌ای AHP، در دامنه ۱ تا ۹، استفاده شد (Tayebi & Fetanat, 2023). در این مقیاس، عدد ۱ بیانگر اهمیت یکسان دو معیار و اعداد بالاتر نشان‌دهنده افزایش اهمیت نسبی یک معیار نسبت به معیار دیگر هستند. پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، وزن نسبی معیارهای فیزیکی محاسبه شد. این وزن‌ها بیانگر میزان اهمیت هر یک از پارامترهای محیطی در فرآیند تصمیم‌گیری برای مقابله با آلودگی نفتی هستند. در ادامه، با استفاده از تحلیل مبتنی بر هوش مصنوعی، رابطه میان معیارهای فیزیکی و وزن‌های محاسبه‌شده مورد بررسی قرار گرفت و معیار دارای بیشترین اهمیت به‌عنوان معیار ارجح برای مرحله انتخاب روش مقابله با آلودگی نفتی تعیین شد.

پس از تعیین معیار دارای بیشترین وزن، روش‌های مختلف مقابله با آلودگی نفتی بر اساس معیار منتخب مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این مرحله، ماتریس مقایسه زوجی مربوط به گزینه‌های مقابله با آلودگی نفتی تشکیل شد و گزینه‌های موجود بر اساس میزان انطباق با شرایط محیطی و معیار منتخب با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت، وزن و اولویت هر یک از روش‌ها محاسبه و مناسب‌ترین روش برای مقابله با لکه نفتی در شرایط مورد مطالعه تعیین شد.

به‌منظور بررسی روابط بین معیارهای فیزیکی آب دریا و وزن‌های محاسبه‌شده، تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام گرفت. ابتدا آزمون همبستگی پیرسون به‌منظور تعیین شدت و جهت رابطه بین متغیرهای مورد مطالعه به کار گرفته شد. سپس، با استفاده از رگرسیون خطی، قابلیت پیش‌بینی وزن‌های محاسبه‌شده بر اساس متغیرهای فیزیکی آب دریا ارزیابی شد. در تحلیل رگرسیون، میزان ارتباط متغیرهای مستقل با متغیر وابسته و توان مدل در پیش‌بینی تغییرات متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در کنار نتایج حاصل از AHP، به‌منظور ارزیابی نقش معیارهای فیزیکی در انتخاب روش مناسب مقابله با آلودگی نفتی مورد استفاده قرار گرفتند (Hung et al., 2018; Vafai et al., 2013).

یافته‌ها و بحث

مشخصات ماتریس زوجی برای متغیرهای فیزیکی آب دریا از قبیل اکسیژن محلول، عمق آب، سرعت جریان آب دریا، کدورت آب، شوری و دما به شکل زیر محاسبه شد.

جدول ۱. ماتریس مقایسات زوجی معیارهای فیزیکی آب دریا در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

Table 1. Pairwise Comparison Matrix of Seawater Physical Parameters in the Analytical Hierarchy Process (AHP)

متغیر	دما	شوری	کدورت	سرعت جریان	عمق	اکسیژن
دما	۱	۳	۵	۷	۵	۹

شوری	۱/۳	۱	۳	۵	۳	۷
کدورت	۱/۵	۱/۳	۱	۳	۱	۵
سرعت جریان	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۱	۱/۳	۳
عمق	۱/۵	۱/۳	۱	۳	۱	۵
اکسیژن	۱/۹	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۱/۵	۱

به منظور ارزیابی سازگاری قضاوت های انجام شده در ماتریس مقایسه زوجی، نرخ ناسازگاری^۱ (CR) محاسبه شد. ابتدا بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی برابر با ۲۵۷۸/۶ به دست آمد. سپس، شاخص سازگاری^۲ (CI) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

که در آن، $(\lambda_{\max})$ بزرگترین مقدار ویژه ماتریس و (n) تعداد معیارها است. با توجه به شش معیار مورد بررسی، مقدار CI برابر با ۰/۵۱۶/۰ محاسبه شد. سپس با در نظر گرفتن مقدار شاخص تصادفی سازگاری (RI) برابر با ۲۴/۱ برای ماتریس شش معیاره، نرخ ناسازگاری از رابطه زیر به دست آمد:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

بر این اساس، مقدار نرخ ناسازگاری برابر با ۰/۰۴۱۶ (۴/۱۶ درصد) به دست آمد. از آنجا که مقدار CR کمتر از ۰/۱۰ است، میزان سازگاری مقایسه های زوجی قابل قبول ارزیابی شد. وزن های محاسبه شده برای متغیرهای فیزیکی آب به قرار زیر می باشد که پارامتر دما دارای بیشترین وزن تعیین شده می باشد.

جدول ۲. وزن نهایی متغیرهای فیزیکی آب دریا بر اساس فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

Table 2. Final weight of seawater physical variables based on the Analytic Hierarchy Process (AHP)

وزن	معیار
۰/۴۵۷	دما
۰/۲۴۲	شوری
۰/۱۱۱	کدورت
۰/۱۱۱	سرعت جریان
۰/۰۵۱	عمق
۰/۰۲۷	اکسیژن محلول

اگرچه دریای عمان از نظر میانگین دمای سالانه لزوماً گرمترین پهنه دریایی محسوب نمی شود و دمای آب آن در محدوده تقریبی ۲۵ تا ۲۷ درجه سانتی گراد قرار دارد، اهمیت معیار دما در پژوهش حاضر به مقدار مطلق دمای منطقه یا مقایسه آن با سایر مناطق جغرافیایی محدود نمی شود. در چارچوب فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، وزن هر معیار بیانگر اهمیت نسبی آن در مسئله تصمیم گیری مورد مطالعه است. بنابراین، وزن ۴۰ درصدی دما حاصل مقایسه های زوجی معیارهای مورد بررسی و نشان دهنده اهمیت نسبی این پارامتر در انتخاب روش مقابله با آلودگی نفتی است.

¹ - Consistency Ratio

² - Consistency Index

از نظر فرآیندهای مرتبط با سرنوشت لکه نفتی، دما می‌تواند از طریق تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نفت، از جمله ویسکوزیته و نرخ تبخیر ترکیبات فرار، بر رفتار و پراکنش لکه نفتی اثرگذار باشد. همچنین، تغییرات دما می‌تواند بر کارایی برخی روش‌های مقابله با آلودگی نفتی، از جمله جذب سطحی، پراکنش شیمیایی و زیست‌پالایی، تأثیر بگذارد. به‌ویژه در روش زیست‌پالایی، دما یکی از عوامل مؤثر بر فعالیت و رشد میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن‌ها محسوب می‌شود. از این منظر، اهمیت بالاتر دما در مدل حاضر را می‌توان ناشی از نقش چندوجهی آن در فرآیندهای مؤثر بر سرنوشت و کنترل آلودگی نفتی دانست، نه صرفاً بالا بودن دمای آب دریای عمان. با این حال، وزن ۴۰ درصدی دما باید به‌عنوان یک نتیجه وابسته به ساختار مقایسه‌های زوجی و چارچوب تصمیم‌گیری این پژوهش تفسیر شود و نمی‌توان آن را به‌صورت یک رابطه عمومی و مستقل از شرایط محیطی به همه مناطق دریایی تعمیم داد. با توجه به نتایج حاصل از وزن‌دهی معیارهای فیزیکی، دما با وزن ۰/۴۰ به‌عنوان معیار دارای بیشترین اهمیت نسبی تعیین شد. بنابراین، در مرحله دوم فرآیند تصمیم‌گیری، گزینه‌های مختلف مقابله با لکه نفتی بر اساس معیار دما مورد مقایسه و اولویت‌بندی قرار گرفتند. در نتیجه، رتبه‌بندی ارائه‌شده در جدول ۳ حاصل مقایسه گزینه‌ها بر مبنای معیار دما است و نشان‌دهنده رتبه‌بندی تلفیقی گزینه‌ها بر اساس هر شش معیار فیزیکی آب دریا نیست.

جدول ۳. اوزان نهایی روش‌های مقابله با لکه نفتی در دریای عمان بر اساس معیار دما و روش (AHP)

Table 3. Final weights of oil spill response methods in the Sea of Oman based on temperature and AHP criteria

روش	وزن نهایی
جذب سطحی	۰/۳۵۴
پخش‌کننده‌های شیمیایی	۰/۲۷۱
روش‌های مکانیکی	۰/۲۰۹
سوزاندن	۰/۱۱۳
زیست‌پالایی	۰/۰۵۷

بر این اساس، روش جذب سطحی با وزن ۰/۳۵۴ در رتبه نخست، پخش‌کننده‌های شیمیایی با وزن ۰/۲۷۱ در رتبه دوم، روش‌های مکانیکی با وزن ۰/۲۰۹ در رتبه سوم، سوزاندن با وزن ۰/۱۱۳ در رتبه چهارم و زیست‌پالایی با وزن ۰/۰۵۷ در رتبه پنجم قرار گرفتند. بنابراین، بر اساس ساختار تصمیم‌گیری این پژوهش و با در نظر گرفتن دما به‌عنوان معیار منتخب، روش جذب سطحی بالاترین اولویت را برای مقابله با لکه نفتی نشان داد. لازم به ذکر است که رتبه‌بندی ارائه‌شده در جدول ۳ بر اساس معیار دما به‌عنوان معیار غالب انتخاب‌شده در مرحله نخست انجام شده است و نباید به‌عنوان رتبه‌بندی تلفیقی گزینه‌ها بر اساس تمامی شش معیار فیزیکی تفسیر شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP به‌عنوان رویکردی چندمعیاره برای وزن‌دهی به متغیرهای فیزیکی آب دریای عمان و اولویت‌بندی روش‌های مقابله با آلودگی نفتی، نتایج مهمی را ارائه نمود. نتایج ماتریس زوجی پارامترهای فیزیکی نشان داد که دما به‌عنوان پارامتری کلیدی بیشترین وزن را در ساختار تصمیم‌گیری به خود اختصاص داده‌است (Hung et al., 2018; Vafai et al., 2013). این امر با توجه به نقش دما در تغییر خصوصیات ترمودینامیکی نفت و فرآیندهای انتقال جرم در محیط آبی از جمله انحلال، تبخیر و فرآیندهای بیوشیمیایی وابسته به دما کاملاً توجیه‌پذیر است. از سوی دیگر در ارزیابی روش‌های مقابله با آلودگی نفتی، روش جذب سطحی یا Adsorption از نظر معیار دما بیشترین اولویت را کسب کرده‌است. این یافته با توجه به توانایی بالای روش جذب سطحی در حذف ترکیبات نفتی با توجه به وابستگی فرآیند جذب به شرایط دمایی، حاکی از برتری این روش نسبت

به سایر روش‌ها مانند استفاده از پخش‌کننده‌های شیمیایی، جمع‌آوری مکانیکی، سوزاندن و زیست‌پالایی است. این موضوع تأکیدی است بر ضرورت تطبیق روش مقابله‌ای با شرایط محیطی متغیر به‌ویژه پارامتر دما که می‌تواند کارایی فرآیندهای مهار آلودگی را تحت‌تأثیر قرار دهد (Askari et al., 2025; Tian et al., 2025). در این مقاله همچنین تحلیل همبستگی بین وزن‌های تخصیص‌یافته به پارامترهای فیزیکی و روش‌های مقابله با آلودگی نفتی با نرم‌افزار SPSS26 انجام شد. نشان‌دهنده وجود رابطه معنی‌دار آماری $P\text{-value} < 0/05$ بین این دو مجموعه متغیر است. این همبستگی بیانگر آن است که وزن‌های تعیین‌شده برای هر روش مقابله‌ای قابلیت پیش‌بینی قابل اتکایی براساس متغیرهای فیزیکی آب داشته و در واقع می‌توان از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌عنوان ابزاری جامع برای تطبیق بهینه روش‌های مهار آلودگی با شرایط محیطی بهره برد (Hazar et al., 2025; Hung et al., 2018; Vafai et al., 2013). در این مقاله یافته‌ها بر اهمیت ارزیابی جامع پارامترهای فیزیکی آب و تأثیرات متقابل آن‌ها بر روی کارایی روش‌های مقابله با آلودگی نفتی تأکید دارد. همچنین نتایج حاکی از این است که توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری براساس AHP به همراه تحلیل آماری می‌تواند نقش موثری در بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت آلودگی دریایی به‌ویژه در اکوسیستم‌های حساس و متغیر مانند دریای عمان ایفا نماید (Hazar et al., 2025; Lee et al., 2023; Luan et al., 2019; Wang et al., 2023; Wei et al., 2014).

References

- Al-Shidhani, M., Al-Masroori, H., & Dutta, S. (2026). Socio-economic and environmental assessment of marine recreational fishing in the Sultanate of Oman. *Discover Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02537-3>
- AlKaabi, N., Al-Ghouti, M. A., Jaoua, S., & Zouari, N. (2020). Potential for native hydrocarbon-degrading bacteria to remediate highly weathered oil-polluted soils in Qatar through self-purification and bioaugmentation in biopiles. *Biotechnology Reports*, 28, e00543. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00543>
- Askari, E., Alipour, V., & Rahmanian, O. (2025). Synthesis and Application of Adsorbent Pads for Removal of Oil Pollutants from Water. *Heliyon*, 11, e42885. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42885>
- Baqar, M. (2024). Circumstances of Oil Spills in Libyan Coastal Waters: Recent Advancement for Cleanup Techniques. 5(10), 13-23.
- Bôto, M. L., Magalhães, C., Perdigão, R., Alexandrino, D. A., Fernandes, J. P., Bernabeu, A. M., Ramos, S., Carvalho, M. F., Semedo, M., & LaRoche, J. (2021). Harnessing the potential of native microbial communities for bioremediation of oil spills in the Iberian Peninsula NW coast. *Frontiers in microbiology*, 12, 633-659. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.633659>
- Ćetković, J., Knežević, M., Vujadinović, R., Tombarević, E., & Grujić, M. (2023). Selection of wastewater treatment technology: AHP method in multi-criteria decision making. *Water*, 15(9), 1645. <https://doi.org/10.3390/w15091645>
- Chitrakar, P., Baawain, M. S., Sana, A., & Al-Mamun, A. (2019). Current status of marine pollution and mitigation strategies in arid region: a detailed review. *Ocean Science Journal*, 54(3), 317-348. <https://doi.org/10.1007/s12601-019-0027-5>
- Chompook, P., Roemmontri, J., & Ketsakorn, A. (2023). The application of analytic hierarchy process (AHP) for selecting community problems: Multicriteria decision-making approach on environmental health aspects. *Journal of Sustainability Science and Management*, 18(10), 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107619>
- Guidi, G., Sliskovic, M., Violante, A. C., & Vukic, L. (2016). Best available techniques (BATs) for oil spill response in the Mediterranean Sea: calm sea and presence of economic activities. *Environmental science and pollution research*, 23(2), 1944-1953. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5543-y>
- Ha, M.-J. (2018). Modeling for the allocation of oil spill recovery capacity considering environmental and economic factors. *Marine pollution bulletin*, 126, 184-190. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.006>

- Haridharan, N., Sundar, D., Kurrupasamy, L., Anandan, S., Liu, C. H., & Wu, J. J. (2022). Oil spills adsorption and cleanup by polymeric materials: A review. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(5), 1353-1384. <https://doi.org/10.1002/pat.5636>
- Hazar, C., Mollaoglu, M., & Töz, A. C. (2025). Fuzzy-Based Evaluation of the Air Bubble Barrier as an Alternative Oil Spill Response Equipment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(8), 485. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08115-7>
- Hung, P. V., Kim, K.-S., Tien, L. Q., & Cuong, N. M. (2018). Distribution of oil spill response capability through considering probable incident, environmental sensitivity and geographical weather in Vietnamese waters. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 2(1), 31-41. <https://doi.org/10.1080/25725084.2018.1511240>
- Kabyl, A., Yang, M., Shah, D., & Ahmad, A. (2022). Bibliometric analysis of accidental oil spills in ice-infested waters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 15190. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215190>
- Khodadoust, H., Vafaie, F., & Hadipour, V. (2026). Evaluating shoreline vulnerability to oil spills using multi-criteria approaches: The case of Bushehr Province, Iran. *Marine pollution bulletin*, 222, 118865. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118865>
- Lee, J., Piao, L., & Park, H. (2023). Characterization of the physical and weathering properties of low sulfur fuel oil (LSFO) and its spreading on water surface. *Journal of hazardous materials*, 453, 131444. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131444>
- Lessard, R. R., & DeMarco, G. (2000). The significance of oil spill dispersants. *Spill Science & Technology Bulletin*, 6(1), 59-68. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(99\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(99)00061-4)
- Luan, G., Chu, S., Li, X., & Ma, G. (2019). Comprehensive Evaluation of Oil Sorbent Based on AHP Method. *International Conference on Sustainable Development of Water and Environment, Environmental Science and Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16729-5_12
- Mabile, N. (2018). In-Situ Burning Operations during the Deepwater Horizon Spill. In *In-Situ Burning for Oil Spill Countermeasures* (pp. 247-284). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429506376-4>
- Macaulay, B. M., & Rees, D. (2014). Bioremediation of oil spills: a review of challenges for research advancement. *Annals of environmental Science*, 8, 9-37.
- Moradirad, R., Haghighat, M., Yazdanirad, S., Hajizadeh, R., Shabgard, Z., & Mousavi, S. M. (2019). Selection of the most suitable sound control method using fuzzy hierarchical technique. *J Health Saf Work*, 8 (4) :371-382. <http://jhs.w.tums.ac.ir/article-1-5960-en.html>
- Nabavi, E., Sabour, M., & Dezvareh, G. A. (2021). Selection of the best leachate treatment method for the waste of leek fields using Analytic Hierarchy Process (AHP). *Advances in Environmental Technology*, 7(3), 153-170. <https://doi.org/10.22104/aet.2021.4967.1339>
- Ratchagar, N. P., & Hemalatha, S. (2013). Study of Oil Spill on the Sea Surface in the Presence of Thermal and Concentration Buoyancy Effects. *International Journal of Mathematical Modelling & Computations*, 3(3), 157-168. (in persian). <https://civilica.com/doc/1590142>
- Tarkian, F., Ghaderi, S., Isfahani, M., Sharifi, A., & Mashhoon, F. (2014). Selection of the best wastewater treatment alternative for RIPI based on analytical hierarchy process (AHP) and expert choice software. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 25(2), 114-121. (in persian). https://www.wwjjournal.ir/article_4565.html?lang=en
- Tayebi, M., & Fetanat, A. (2023). Sustainability and capability-based assessment of marine oil spill response technologies using a decision support system under decomposed fuzzy set. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(12), 1455. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.229>
- Tian, L., Zhang, Y., Liu, Y., & Zhang, S. (2025). Polyimide nanofiber aerogel with hierarchical porosity: a novel platform in high-temperature oil absorption. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 114, 287-295. <https://doi.org/10.1007/s10971-025-06694-9>
- Vafai, F., Hadipour, V., & Hadipour, A. (2013). Determination of shoreline sensitivity to oil spills by use of GIS and fuzzy model. Case study–The coastal areas of Caspian Sea in north of Iran. *Ocean & Coastal Management*, 71, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.10.001>

- Wang, H., Ren, J., Yang, J., & Wang, J. (2015). Evaluating the effectiveness of ERS for vessel oil spills using fuzzy evidential reasoning. *Ocean Systems Engineering–An International Journal*, 5(3), 161-179. <https://doi.org/10.12989/ose.2015.5.3.161>
- Wang, Y., Tang, C., Du, P., Liu, B., Li, Y., & Chen, C. (2023). Spatial Differentiation Assessment of the Vulnerability of Marine Protected Areas to Oil Spill Stress in the Bohai Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1877. <https://doi.org/10.3390/jmse11101877>
- Wei, D. M., Zheng, H. B., & Zhang, S. S. (2014). The capacities evaluation of oil absorption materials. *Applied Mechanics and Materials*, 535, 666-670. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.535.666>