

Mathematical modeling of oil-water separation using textile-based filters

M. Jamali¹, M. Shayannejad^{2*} and S. M. Hejazi³

Extended Abstract

Introduction:

Water scarcity and pollution have emerged as critical global issues, driven by population growth, resource overexploitation, climate change, and escalating environmental threats. Among various water pollutants, crude oil and its derivatives pose significant hazards to both ecosystems and human health. Accidental oil spills during extraction, transportation, or refining processes can result in long-lasting damage to aquatic environments and severely impact biodiversity. To mitigate such risks, numerous oil removal methods have been developed, with sorbent-based approaches gaining attention for their simplicity and efficiency. Sorbent materials can selectively absorb oil from oil–water mixtures through surface and capillary interactions. Among these, technical textiles—particularly nonwoven fabrics made from polyester (PET), polypropylene (PP), and bi-component (BC) blends—have shown great potential due to their high porosity, low density, scalability, and mechanical durability. While prior research has explored their structural and surface characteristics, their dynamic behavior under varying operational conditions remains under-investigated. Mathematical modeling provides a valuable tool to simulate and predict filtration performance over time. By modeling the oil absorption process, key factors such as initial oil concentration, textile type, and flow dynamics can be quantitatively analyzed. This study designs a simple textile-based filtration system using PET, PP, and BC fabrics, aiming to model oil separation performance and evaluate each material's behavior under different concentration levels.

Methods:

A custom-made filtration system was developed to evaluate the oil absorption performance of three nonwoven technical textiles: polyester (PET), polypropylene (PP), and bi-component (BC) fabrics. The filter body was constructed using 3 mm thick polyethylene-based plastic sheets, known for their high chemical resistance. The filter had a rectangular shape (10 × 10 × 20 cm), with a 3 cm thick textile layer placed at the bottom to serve as the sorbent medium. Three oil–water mixtures with crude oil concentrations of 10%, 20%, and 30% by weight were prepared using tap water. Each mixture was passed through the filter, and the oil concentration in the effluent was measured at regular time intervals to monitor separation efficiency. To analyze the oil absorption behavior, a mathematical model based on the mass balance principle was developed, assuming first-order kinetics for oil sorption. The governing equation was calibrated using experimental data, and key parameters, including the rate coefficient (λ) and pollutant load (W), were estimated via curve-fitting. Model accuracy was evaluated using the coefficient of determination (R^2) and normalized root mean square error (NRMSE). The validated model was then employed to predict effluent oil concentrations under various conditions, providing valuable insights into the filtration performance of the different textiles.

Results:

The proposed mass balance model effectively simulated the release of oil from textiles at different initial concentrations (10%, 20%, and 30%) for BC, PET, and PP fabrics. The pollutant load (W) and the transfer coefficient (λ) were used to evaluate the dynamics of oil transfer. The results showed that oil release varied significantly based on both textile type and concentration. BC fabrics released the highest amount of oil at all concentrations, indicating a greater tendency for oil desorption, while PP exhibited the lowest release. PET showed intermediate behavior. The model accurately estimated the pollutant load for all textile types, with R^2

1- M.Sc. Graduate, Water Science and Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Professor, Water Science and Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Associate Professor, Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* Corresponding Author: shayannejad@iut.ac.ir

Received: 2025/04/27

Accepted: 2025/05/29

values between 0.84 and 0.98, indicating a strong fit between observed and predicted values. The NRMSE ranged from 2.1% to 12.9%, confirming high model accuracy. Interestingly, the transfer coefficient (λ) decreased with increasing oil concentration for BC and PET, suggesting a saturation or resistance effect at higher loads. In contrast, PP showed an increasing λ trend, potentially due to differences in surface properties or oil interaction mechanisms. These patterns highlight the model's capability to capture the distinct release behaviors of each fabric type under varying conditions. Overall, the study demonstrates the reliability and applicability of the proposed model in predicting oil release from textiles, offering valuable insight for environmental pollution modeling and textile waste management strategies.

Conclusion:

The results of this study demonstrated that technical textiles can serve as an effective and economical method for removing oil from aqueous mixtures. Among the three fabric types examined, the BC composite fabric, due to its high porosity and suitable structural composition, exhibited the highest absorption efficiency and model accuracy under most conditions. The developed mathematical model, based on the mass balance principle and assuming first-order reaction kinetics, successfully captured the dynamic behavior of oil absorption, particularly at low and medium oil concentrations. However, at higher contamination levels and with specific fabrics such as PP, the model's accuracy decreased, indicating the need for further refinement and enhancement of the model under these conditions. Statistical analyses and comparative plots confirmed that kinetic modeling is a reliable tool for predicting the performance of oil-absorbing filters. Moreover, the findings can inform the design and optimization of industrial filters for treating water contaminated with oil and other organic pollutants. Ultimately, this study lays the groundwork for developing more advanced modeling approaches and the application of environmentally friendly technologies in managing oil pollution.

Keywords: Oil pollution, Oil sorption, Textile filtration, Kinetic modeling, Technical textile.

Citation: Jamali, M., Shayannejad, M. and Hejazi, S. M., 2025. Mathematical modeling of oil-water separation using textile-based filters. *Iranian Water Research Journal*. 57(2). Pp. 91-106. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15187.2678>



مدل سازی ریاضی جداسازی نفت از آب با استفاده از فیلترهای ساخته شده از منسوجات

محمد جمالی^۱، محمد شایان نژاد^{۲*} و سید مهدی حجازی^۳

چکیده

آلودگی نفتی منابع آبی از مهم ترین معضلات زیست محیطی عصر حاضر است که پیامدهای جبران ناپذیری بر اکوسیستم های آبی، منابع آب و سلامت انسان دارد. در این مطالعه، عملکرد سه نوع منسوج فنی شامل پلی استر (PET)، پلی پروپیلن (PP) و منسوج ترکیبی پلی استر و پلی پروپیلن (BC) در جذب نفت از مخلوط آب و نفت بررسی شد. یک سامانه ساده و کم هزینه برای فیلتراسیون طراحی و آزمایش ها در غلظت های مختلف نفت خام (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی) انجام شد. به منظور تحلیل فرایند جذب، از مدلی مبتنی بر قانون بقای جرم و رفتار سینتیکی مرتبه اول استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی، به ویژه در غلظت های پایین و متوسط، توانایی بالایی در بازنمایی رفتار دینامیکی جذب دارد. در منسوج BC، ضریب تعیین (R^2) بین ۰/۹۱ تا ۰/۹۶ و NRMSE کمتر از ۸ درصد بود. برای PET، بهترین نتایج در غلظت ۲۰ درصد با R^2 و NRMSE به ترتیب برابر ۰/۹۴ و ۲/۳۸ درصد به دست آمد. در غلظت ۳۰ درصد، عملکرد مدل کاهش یافت، به طوری که مقادیر R^2 و NRMSE به ترتیب به ۰/۰۳ و ۷/۴۰ درصد رسید. در مجموع، منسوج BC به دلیل ساختار متخلخل خود، بیشترین ظرفیت جذب و بهترین تطابق با داده های تجربی را داشت. نمودار تیلور نیز برتری مدل برای PET و BC نسبت به PP را تأیید کرد. نمودار تیلور نشان داد که برای منسوج های BC و PET در غلظت های ۱۰ و ۲۰ درصد، ضریب همبستگی بیش از ۰/۹ و RMSE پایین بود، اما برای PP در ۳۰ درصد، ضریب همبستگی حدود ۰/۷ و RMSE بالاتر گزارش شد که بیانگر کاهش دقت مدل در غلظت بالا است. این یافته ها می توانند در طراحی فیلترهای نوین جذب نفت کاربرد مؤثری داشته باشند.

واژه های کلیدی: آلودگی نفتی، جذب نفت، فیلتراسیون آب، مدل سازی سینتیکی، منسوج فنی.

ارجاع: محمد جمالی، م.، شایان نژاد، م. و حجازی، س. م. ۱۴۰۴. مدل سازی ریاضی جداسازی نفت از آب با استفاده از فیلترهای ساخته شده از منسوجات. مجله پژوهش آب ایران. ۵۷ (۲). صص ۹۱-۱۰۶. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15187.2678>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲- استاد تمام، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول: shavannejad@iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷

مقدمه

امروزه آب، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که با گذر زمان و تحت تأثیر عواملی همچون رشد جمعیت، بهره‌برداری نادرست و بیش‌از‌حد از منابع آبی، تغییرات اقلیمی و دیگر تهدیدهای محیط‌زیستی، نه تنها بر مشکلات مربوط به آب افزوده خواهد شد، بلکه ارزش و اهمیت آن نیز روزبه‌روز بیشتر نمایان خواهد شد (Jamali et al., 2025). آلودگی منابع آبی ناشی از ورود ترکیبات نفتی، به‌ویژه نفت خام و مشتقات آن، یکی از معضلات مهم زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر به شمار می‌رود. گسترش فعالیت‌های نفتی، از جمله استخراج، پالایش، انتقال و حمل‌ونقل دریایی نفت، سبب شده است تا احتمال نشت و انتشار نفت در محیط‌های آبی به‌صورت چشم‌گیری افزایش یابد. ورود نفت به منابع آبی نه تنها باعث ایجاد اختلال در اکوسیستم‌های دریایی و کاهش تنوع زیستی می‌شود، بلکه سلامت انسان‌ها و سایر جانداران را نیز به طور مستقیم یا غیرمستقیم تهدید می‌کند (Onyena & Sam, 2020; Thiagarajan & Devarajan, 2025). بر همین اساس، توسعه راهکارهایی برای حذف سریع، مؤثر و اقتصادی آلاینده‌های نفتی از محیط‌های آبی، به یک اولویت جهانی تبدیل شده است (Bashir et al., 2020; Landrigan et al., 2020).

در این میان، استفاده از جاذب‌های نفتی یکی از کارآمدترین روش‌های حذف آلودگی‌های نفتی به شمار می‌آید. جاذب‌ها با بهره‌گیری از خاصیت جذب سطحی، می‌توانند فاز آلی موجود در مخلوط آب و نفت را به‌صورت انتخابی جذب کرده و از محیط جدا کنند. جاذب‌های متنوعی برای این منظور توسعه یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به مواد طبیعی مانند خاک اره و پرکاه، جاذب‌های معدنی نظیر زئولیت و پرلیت، و جاذب‌های مصنوعی مانند پلیمرهای آبدوست و آگریز اشاره کرد (Al-Jammal & Juzsakova, 2017; Asadpour et al., 2013; Gote et al., 2023). در این میان منسوجات فنی، به‌ویژه منسوجات بی‌بافت تهیه‌شده از الیاف پلی‌استر (PET)، پلی‌پروپیلن (PP) و ترکیب دو جزئی پلی‌استر و پلی‌پروپیلن (BC)، به دلیل تخلخل بالا، وزن کم، قابلیت تولید در مقیاس بالا و خواص مکانیکی مناسب، جایگاه ویژه‌ای در طراحی سامانه‌های جذب و فیلتراسیون یافته‌اند (Seddighi & Hejazi, 2015).

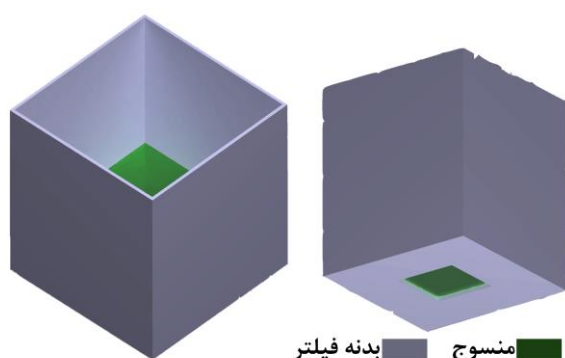
مطالعات متعددی به بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منسوجات در فرآیند جذب نفت پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه،

پژوهش صورت گرفته توسط Song et al. (2020) نشان داد که ساختار سطحی و میزان آبدوستی/آبگریزی الیاف نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان و نرخ جذب آلاینده‌های نفتی دارند. همچنین، تغییراتی در ساختار فیزیکی الیاف، از جمله استفاده از الیاف دوترکیبی (Bi-component) یا الیاف دارای سطح اصلاح‌شده، می‌تواند موجب افزایش راندمان جداسازی و ظرفیت جذب شود. با این حال، علیرغم پیشرفت‌های حاصل در زمینه طراحی جاذب‌های کارآمد، درک دقیق رفتار دینامیکی این مواد در مواجهه با فاز آلی، به‌ویژه در شرایط واقعی محیطی، همچنان چالشی جدی باقی مانده است.

مدل‌سازی فرآیند جذب و خروج آلاینده‌های نفتی از طریق جاذب‌ها، روشی مؤثر برای تحلیل و پیش‌بینی عملکرد این مواد در شرایط مختلف است. مدل‌های ریاضی با شبیه‌سازی رفتار سامانه در طول زمان، امکان بررسی تأثیر متغیرهای کلیدی نظیر غلظت اولیه، ساختار منسوج، نرخ جریان، و خواص فیزیکی آلاینده را فراهم می‌کنند (Condurache et al., 2022; Oliveira et al., 2021). مدل‌های سینتیکی متعددی برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله پرکاربردترین آن‌ها مدل جذب مرتبه اول، مدل‌های انتشار نفوذی و مدل‌های انتقال جرم مبتنی بر قانون بقای جرم هستند (Hamedi et al., 2023; Hart et al., 2023).

در این تحقیق، با هدف بررسی عملکرد سه نوع منسوج فنی شامل پلی‌استر (PET)، پلی‌پروپیلن (PP) و منسوج ترکیبی (BC) در جداسازی نفت از مخلوط‌های آب و نفت، یک سامانه فیلتراسیون ساده و کم‌هزینه طراحی و در محیط کنترل‌شده آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان و با استفاده از نفت خام در سه سطح غلظتی مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی) انجام شدند. در این فرآیند، مخلوط‌های آب و نفت از طریق منسوجات عبور داده و تغییرات غلظت نفت در خروجی در طول زمان اندازه‌گیری شد. برای تحلیل نتایج، یک مدل سینتیکی بر پایه قانون بقای جرم توسعه داده شد که در آن فرض شد نرخ خروج غلظت نفت از سامانه تابعی نمایی از زمان و غلظت اولیه باشد. با استفاده از داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های واسنجی و صحت‌سنجی، پارامترهای مدل شامل ضریب λ و بار آلاینده افقی (W) محاسبه شدند و میزان دقت مدل با استفاده از شاخص‌های R^2 و NRMSE ارزیابی گردید. از آن‌جا که درک عمیق رفتار جذب در منسوجات و توسعه مدل‌های دقیق پیش‌بینی‌کننده می‌تواند نقش کلیدی در طراحی و بهینه‌سازی فیلترهای صنعتی ایفا کند، نتایج این تحقیق می‌تواند زمینه‌ساز

بدون نیاز به ابزار تخصصی و در عین حال دارا بودن استحکام کافی برای استفاده به عنوان بدنه فیلتر اشاره کرد. در شکل ۱ شماتیک فیلتر ساخته شده در این پژوهش نمایش داده شده است. بدنه فیلتر به شکل مکعب مستطیل با ابعاد $10 \times 10 \times 20$ سانتی متر و از جنس ورقه پلی اتیلن شفاف با چگالی کم ساخته شد. سپس جاذب به ضخامت ۳ سانتی متر در کف فیلتر قرار گرفت. در این تحقیق، از سه نوع منسوج فنی Polyester (PET)، Bi-Component (BC) و Polypropylene (PP) به عنوان جاذب استفاده شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است (Jamali Jeze et al., 2021).



شکل ۱- شماتیک فیلتر ساخته شده در این پژوهش

توسعه سامانه‌های کارآمدتر در حوزه تصفیه و بازیابی آب‌های آلوده به نفت باشد. همچنین، این مدل قابلیت تعمیم به سایر انواع آلاینده‌های آلی و سیستم‌های فیلتراسیون مشابه را نیز دارد و از این منظر، سهم مهمی در ارتقای فناوری‌های سبز در حوزه محیط زیست ایفا می‌کند.

مواد و روش‌ها

ساخت و طراحی فیلتر

ساخت فیلتر در دو مرحله و در پاییز سال ۱۳۹۸ در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد: ابتدا بدنه فیلتر طراحی و ساخته شد و سپس منسوجات درون آن قرار داده شدند. برای ساخت بدنه از صفحات موسوم به «کارتن پلاست» استفاده شد که از جنس پلی اتیلن با چگالی پایین بوده و در برابر تماس با آب و فراآورده‌های نفتی از مقاومت مطلوبی برخوردارند. این صفحات در ضخامت‌های مختلفی در بازار موجود هستند که در این مطالعه، نوع ۳ میلی متری آن استفاده شد. از جمله مزایای این صفحات می‌توان به قابلیت برش آسان

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی منسوجات فنی به کاررفته در ساخت فیلتر (Jamali Jeze et al., 2021)

شماره	کد منسوج	جنس منسوج	نوع منسوج	ضخامت منسوجات (mm)	چگالی منسوجات $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	چگالی الیاف $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	تخلخل (درصد)
۱	BC	پلی استر و پلی پروپیلن	بی‌بافت سوزنی شده	۳۰	۰/۰۱۸	۱/۱۴۵	۹۸
۲	PET	پلی استر	بی‌بافت سوزنی شده	۲/۰۴	۰/۱۴۷	۱/۳۸	۸۹
۳	PP	پلی پروپیلن	بی‌بافت سوزنی شده	۲/۰۱	۰/۱۴۹	۰/۹۱	۷۷

$$n = \frac{V_e - V_a}{V_e} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه ۱، V_a حجم واقعی منسوجات، V_e حجم ظاهری منسوجات و n تخلخل است.

تهیه مخلوط آب و نفت

در این پژوهش، نفت خام مورد استفاده از شرکت ملی پالایش و پخش فراآورده‌های نفتی (پالایشگاه اصفهان) تأمین شد. بنا بر گزارش ارائه شده از سوی شرکت تأمین کننده، چگالی متوسط نفت خام در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برابر با ۸۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب و گرانشی آن ۱۸/۷ میلی پاسکال ثانیه گزارش شده است. در ادامه، مخلوط آب و نفت در سه غلظت

منسوج PET از جنس پلی استر با تخلخل ۸۹ درصد و منسوج PP از جنس پلی پروپیلن با تخلخل ۷۷ درصد تهیه شده‌اند. منسوج BC، ترکیبی از دو ماده پلی استر و پلی پروپیلن، دارای بالاترین تخلخل در میان نمونه‌ها، یعنی ۹۸ درصد است. در واقع، منسوج BC تلفیقی از ویژگی‌های دو منسوج PET و PP محسوب می‌شود. چگالی منسوجات مورد بررسی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است که توضیح کامل آن در پژوهش (Jamali Jeze et al., 2021) ارائه شده است. به منظور تأیید میزان تخلخل منسوجات، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM) استفاده شد (Jamali Jeze et al., 2021).

$$\frac{dC}{dt} + \lambda C = \frac{W}{V} \quad (۶)$$

در رابطه ۶، λ و W به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\lambda = \frac{Q_{out}}{V} + K + \frac{Q_{in} - Q_{out}}{V} \quad (۷)$$

$$W = Q_{in} C_{in} \quad (۸)$$

در رابطه ۷، W بار آلاینده افقی است. اگر در رابطه ۵، λ نسبت به زمان ثابت باشد، این رابطه حل تحلیلی به صورت رابطه زیر خواهد داشت:

$$C = \frac{W}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (۹)$$

برای تعیین مقدار λ لازم است رابطه ۹ واسنجی شود. در این پژوهش، داده‌های مربوط به هر غلظت به دو بخش تقسیم شدند: بخش نخست برای واسنجی و بخش دوم برای صحت‌سنجی معادله. در مرحله واسنجی، مقدار λ به گونه‌ای انتخاب شد که اختلاف میان غلظت‌های خروجی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به حداقل برسد. برای این منظور، از شاخص‌های ارزیابی معرفی شده در بخش بعدی استفاده شد. پس از تعیین مقدار λ از طریق واسنجی، می‌توان از رابطه ۹ برای پیش‌بینی غلظت نفت خروجی از فیلتر در غلظت‌ها و زمان‌های مختلف بهره برد.

شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی دقت مدل‌سازی از دو شاخص ضریب تعیین (R^2) ^۱ و جذر میانگین مربع خطاهای نرمال شده $(NRMSE)$ ^۲ استفاده شد.

الف. ضریب تعیین (R^2) :

فرمول محاسبه ضریب تعیین بصورت زیر است:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (C_{O_i} - \bar{C}_O)(C_{m_i} - \bar{C}_m)]^2}{\sum_{i=1}^n (C_{O_i} - \bar{C}_O)^2 \times \sum_{i=1}^n (C_{m_i} - \bar{C}_m)^2} \times 100 \quad (۱۰)$$

در رابطه ۱۰، C_{O_i} مقدار غلظت مشاهداتی (اندازه‌گیری شده) خروجی از فیلتر در زمان‌های مختلف، C_{m_i} مقدار غلظت محاسبه شده از طریق مدل‌سازی، $\bar{C}_O$ میانگین غلظت نفت مشاهداتی، $\bar{C}_m$ میانگین غلظت نفت مدل‌سازی و R^2 ضریب تعیین است. این ضریب در محدوده صفر تا ۱۰۰ متغیر است که هرچه مقدار آن به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، دقت بالای مدل‌سازی را نشان می‌دهد (Kajjumba et al., 2018).

ب. جذر میانگین مربع خطاهای نرمال شده $(NRMSE)$: این شاخص، میزان اختلاف بین غلظت نفت مشاهده شده و غلظت نفت پیش‌بینی شده توسط مدل را به صورت درصد بیان

متفاوت نفت مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول ۲ تهیه و بررسی شد.

جدول ۲- مشخصات مخلوط آب و نفت استفاده شده در این

شماره	کد	پژوهش		
		حجم آب	حجم نفت	حجم کل
	غلظت	(ml)	(ml)	(ml)
۱	C10	۹۰	۱۰	۱۰۰
۲	C20	۸۰	۲۰	۱۰۰
۳	C30	۷۰	۳۰	۱۰۰

پس از آماده‌سازی مخلوط آب و نفت با هم‌زدن دستی ملایم (به‌منظور تشکیل یک مخلوط ناپایدار و غیرامولسیون)، این مخلوط از بخش بالایی به درون فیلتر ساخته شده از منسوج مورد نظر ریخته شد. سپس مقادیر آب و نفت خروجی از زهکش فیلتر اندازه‌گیری و ثبت گردید.

مدل‌سازی نفت خارج شده از منسوجات

در این پژوهش، یک مدل ساده بر پایه قانون بقای جرم توسعه داده شد. دلیل انتخاب مدل سینتیکی مرتبه اول، سادگی ساختار ریاضی و قابلیت کالیبراسیون آسان است. دبی مخلوط آب و نفت ورودی به فیلتر با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

$$Q_{in} = \frac{V_{Tin}}{t} \quad (۲)$$

در این رابطه Q_{in} دبی ورودی مخلوط آب و نفت، V_{Tin} حجم کل (حجم آب و نفت) ورودی و t مدت زمان آزمایش است.

سینتیک جذب نفت توسط الیاف، به صورت یک واکنش مرتبه اول در نظر گرفته شده است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dC}{dt} = -K \quad (۳)$$

که در این رابطه، K ضریب واکنش مرتبه اول و C غلظت نفت خروجی است (Qiu et al., 2009).

بنابراین می‌توان قانون بقای جرم را به صورت زیر نوشت:

$$Q_{in} C_{in} - KCV - Q_{out} C = \frac{d(CV)}{dt} \quad (۴)$$

$$V = V_t n \quad (۵)$$

که در دو رابطه ۴ و ۵، C_{in} غلظت نفت در آب ورودی، Q_{out} دبی خروجی، V_t حجم کل منسوجات، V حجم فضای خالی و n تخلخل منسوجات است (Cheu et al., 2016).

براین اساس رابطه ۴ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

^۱ Coefficient of determination

^۲ Normalized Root Mean Square Error

و ۳۰ درصد انجام شد. برای این منظور، در گام نخست ضریب λ برای هر غلظت به صورت مجزا و با استفاده از رابطه ۹ و بر پایه مجموعه‌ای از داده‌های مربوط به حجم نفت خروجی در مراحل ابتدایی آزمایش تعیین شد. هدف از این مرحله، یافتن مقدار بهینه λ به گونه‌ای بود که R^2 حداکثر و NRMSE حداقل شود.

حجم کل سیال عبوری برای هر منسوج برابر با ۰/۳ لیتر در نظر گرفته شد. با ضرب این مقدار در میزان تخلخل منسوج، حجم فضای خالی (قابل نفوذ) مربوط به هر نمونه محاسبه شد. در ادامه، نتایج حاصل از مدل سازی برای هر یک از سه منسوج مورد بررسی، ارائه می‌شود:

نتایج مدل سازی نفت خارج شده از منسوج BC:

در جدول ۳، مقادیر پارامترهای λ ، W ، R^2 و NRMSE برای سه غلظت نفت (C10، C20 و C30) برای سه منسوج BC، PET و PP ارائه شده است.

می‌کند. NRMSE به عنوان یک معیار مناسب برای مقایسه دقت پیش‌بینی مدل در مجموعه‌ای از داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{m_i} - C_{o_i})^2}{N}} \times \frac{100}{\bar{C}_o} \quad (11)$$

$\bar{C}_o$ مقدار NRMSE کمتر از ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقت بالای نتایج مدل سازی و مقادیر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیانگر عملکرد قابل قبول مدل است. چنانچه مقدار NRMSE در بازه ۲۰ تا ۳۰ درصد قرار گیرد، نتایج مدل نسبتاً مناسب ارزیابی می‌شود. با این حال، مقادیر بیش از ۳۰ درصد حاکی از عملکرد ضعیف مدل و نیاز به بهبود آن است (Kajjumba et al., 2018).

نتایج و بحث

مدل سازی روند خروج نفت از منسوجات در سه غلظت ۱۰، ۲۰

جدول ۳- نتایج مدل سازی نفت خروجی از منسوجات مورد مطالعه

منسوج	مرحله	غلظت	$W \left(\frac{mg}{min} \right)$	$\lambda \left(\frac{1}{min} \right)$	$R^2 (\%)$	NRMSE (%)
BC	واسنجی	C10	۶۰۱/۲	۰/۰۱۸۲	۰/۹۲	۱/۳
	صحت‌سنجی	C10	۶۰۱/۲		۰/۷۲	۰/۵۸
	واسنجی	C20	۱۰۶۸/۸	۰/۰۰۸	۰/۹۵	۷/۸۹
	صحت‌سنجی	C20	۱۰۰۲		۰/۸۶	۵/۳۵
	واسنجی	C30	۵۰۱	۰/۰۰۲	۰/۹۶	۳/۳۷
	صحت‌سنجی	C30	۱۴۰۲/۸		۰/۹۱	۲/۸
PET	واسنجی	C10	۶۲۵/۲۵	۰/۰۲۳	۰/۴۶	۰/۵
	صحت‌سنجی	C10	۶۲۵/۲۵		۰/۳۷	۰/۱۷
	واسنجی	C20	۱۰۳۹/۱۱	۰/۰۱۵	۰/۹۴	۲/۳۸
	صحت‌سنجی	C20	۱۰۳۹/۱۱		۰/۵۳	۱/۱۸
	واسنجی	C30	۱۵۵۸/۶۷	۰/۰۰۵	۰/۶۲	۱۱/۸۱
	صحت‌سنجی	C30	۱۵۵۸/۶۷		۰/۰۳	۷/۴۰
PP	واسنجی	C10	۷۵۱/۵	۰/۰۴۶	۰/۴۲	۴/۸۲
	صحت‌سنجی	C10	۷۵۱/۵		۰/۸۶	۱۶/۲۵
	واسنجی	C20	۱۱۱۳/۳۳	۰/۰۱۶	۰/۴۴	۴/۲۵
	صحت‌سنجی	C20	۱۱۱۳/۳۳		۰/۱۲	۳/۶۶
	واسنجی	C30	۱۳۶۳/۸۳	۰/۰۰۶	۰/۷۷	۷/۷۹
	صحت‌سنجی	C30	۱۴۵۰		۰/۲۱	۳/۹۴

NRMSE، به درک بهتر رفتار مدل در شرایط مختلف کمک می‌کند.

در غلظت C10، عملکرد مدل بسیار رضایت‌بخش بود. مقدار R^2 در مرحله واسنجی برابر با ۰/۹۲ و در صحت‌سنجی ۰/۷۲ به دست آمد. همچنین مقدار NRMSE از ۱/۳ درصد در واسنجی

نتایج حاصل از مدل سازی فرآیند جذب نفت توسط منسوج BC در سه غلظت مختلف (C10، C20 و C30) در دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی، اطلاعات ارزشمندی درباره دقت و کارایی مدل ارائه می‌دهد (جدول ۳). بررسی شاخص‌های مدل سازی شامل بار آلاینده افقی W ، ضریب λ ، R^2 و

این غلظت (به‌ویژه در مرحله صحت‌سنجی با مقدار ۰/۵۸ درصد) نیز مؤید دقت بالای مدل در بازتولید فرآیند جذب نفت است. در غلظت متوسط (C20)، عملکرد مدل نسبت به C10 با افت نسبی همراه بوده است. در مرحله واسنجی، اگرچه مدل توانسته روند کلی تغییرات را پیش‌بینی کند، اما تفاوت‌هایی میان داده‌های مدل و داده‌های تجربی به‌ویژه در مقادیر میانی مشاهده می‌شود. در مرحله صحت‌سنجی نیز، پراکندگی داده‌های مشاهداتی نسبت به مقادیر مدل‌سازی شده بیشتر است. با این وجود، مدل همچنان روند کلی و رفتار افزایشی غلظت نفت را با دقت قابل‌قبولی بازسازی کرده است. این کاهش دقت در غلظت‌های میانی می‌تواند ناشی از پیچیدگی بیشتر برهم‌کنش بین فازهای نفت و منسوجات در حضور غلظت متوسط باشد که باعث کاهش یکنواختی فرآیند جذب می‌شود.

در غلظت بالا (C30)، مدل بار دیگر عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده است. داده‌های مدل‌سازی شده به‌خوبی با داده‌های مشاهداتی هم‌راستا بوده و انطباق بین آن‌ها، چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله صحت‌سنجی، در سطح بالایی قرار دارد. مقدار پایین NRMSE در این مرحله نیز مؤید این موضوع است که مدل در بازنمایی رفتار سیستم در شرایط غلظت بالای نفت موفق بوده است. این دقت بالا احتمالاً به افزایش نرخ انتقال جرم و برجسته‌تر شدن تفاوت غلظت بین فاز نفت و منسوج مرتبط است، که جذب را تسهیل کرده و فرآیند را برای مدل‌سازی ساده‌تر و دقیق‌تر کرده است.

به‌طور کلی، مدل توسعه‌یافته بر پایه قانون بقای جرم، توانسته عملکرد مناسبی در بازتولید رفتار جذب نفت توسط منسوج BC در تمامی غلظت‌ها داشته باشد. دقت مدل در غلظت‌های پایین و بالا بیش از سایر شرایط بوده و در غلظت متوسط نیز عملکرد قابل‌قبولی داشته است. تطابق میان داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده در اغلب موارد بیانگر کارایی مدل در پیش‌بینی رفتار دینامیکی سامانه و اعتبار آن برای تحلیل و طراحی فرایندهای مشابه در مقیاس‌های بزرگ‌تر است.

نتایج مدل‌سازی غلظت نفت خروجی از منسوج PET

نتایج سه غلظت مختلف (C10، C20 و C30) که در جدول ۳ گزارش شده‌اند، گویای عملکرد متغیر مدل در شرایط مختلف غلظتی است. در غلظت پایین (C10)، مدل توانسته با دقت نسبتاً خوبی فرآیند جذب و جداسازی نفت را بازنمایی کند. مقدار R^2 در مرحله واسنجی برابر با ۰/۴۶ بوده که نشان‌دهنده سطح متوسطی از برازش مدل با داده‌های تجربی است. با این حال، مقدار NRMSE پایین (۰/۵) درصد در واسنجی و ۰/۱۷

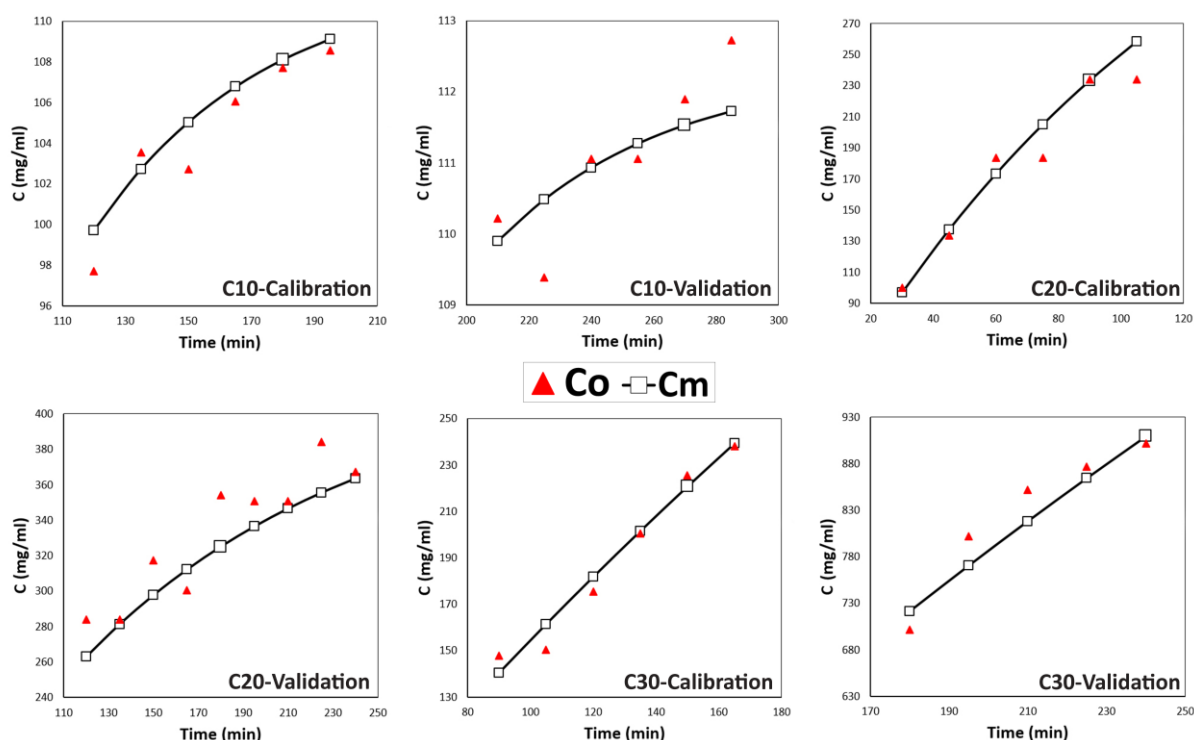
به ۰/۵۸ درصد در صحت‌سنجی کاهش یافت که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه دقت مدل در پیش‌بینی داده‌ها در مرحله صحت‌سنجی است. ثبات مقدار W برابر ۶۰۱/۲ نیز حاکی از پایداری فرآیند جذب در این غلظت پایین نفت است.

در غلظت C20، مقدار R^2 در واسنجی افزایش یافته و به ۰/۹۵ رسید، در حالی که در مرحله صحت‌سنجی به ۰/۸۶ کاهش یافت. با این حال، کاهش NRMSE از ۷/۸۹ درصد به ۵/۳۵ درصد نشان‌دهنده بهبود نسبی مدل است، هرچند که خطای باقی‌مانده در این غلظت نسبت به C10 بیشتر است. این موضوع می‌تواند به دلیل پیچیدگی‌های جذب در غلظت‌های میانی و تغییر رفتار فیزیکی منسوج در مواجهه با مقدار بالاتر نفت باشد. همچنین کاهش W از ۱۰۶۸/۸ به ۱۰۰۲ mg/min نشان می‌دهد که در مرحله صحت‌سنجی، مقدار نفت جذب‌شده به‌طور نسبی کاهش یافته است.

در غلظت C30، عملکرد مدل در هر دو مرحله بسیار خوب ارزیابی شد. R^2 در واسنجی برابر با ۰/۹۶ و در صحت‌سنجی ۰/۹۱ بود. مقدار NRMSE نیز از ۳/۳۷ درصد به ۲/۸ درصد کاهش یافت. با وجود افزایش قابل توجه W از ۵۰۱ به ۱۴۰۲/۸ mg/min در مرحله صحت‌سنجی، مدل دقت بالایی در پیش‌بینی رفتار منسوج در شرایط وجود غلظت بالای آلاینده داشت. افزایش W در این مرحله ممکن است ناشی از افزایش ظرفیت جذب منسوج در شرایط غلظت بالای نفت و افزایش انتقال جرم باشد. در غلظت C30، اختلاف قابل توجه بین مقادیر W در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مشاهده شد. این اختلاف می‌تواند ناشی از پیچیدگی‌های رفتاری سیستم در غلظت‌های بالا، تغییر ویژگی‌های فیزیکی مخلوط و محدودیت مدل مرتبه اول در شبیه‌سازی دقیق نرخ جذب در شرایط غیرخطی باشد. شکل ۲ نشان‌دهنده مقایسه بین غلظت‌های مشاهداتی (Co) و مدل‌سازی شده (Cm) در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای سه غلظت مختلف نفت (C10، C20 و C30) است. بر اساس نتایج حاصل از شکل ارائه‌شده، مدل‌سازی انجام‌گرفته توانسته است به‌طور مؤثری رفتار جذب و جداسازی نفت توسط منسوج BC را در سه غلظت مختلف (C10، C20 و C30) شبیه‌سازی کند. در غلظت پایین (C10)، هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله صحت‌سنجی، داده‌های مدل‌سازی شده (Cm) انطباق بسیار خوبی با داده‌های مشاهداتی (Co) داشته‌اند. روند تغییرات غلظت نفت در طول زمان به‌خوبی توسط مدل پیش‌بینی شده و نوسانات میان داده‌های واقعی و مدل‌سازی شده حداقل است. مقدار پایین شاخص NRMSE در

واقعی است. مقدار NRMSE نیز در هر دو مرحله در سطح پایین باقی مانده (۲/۳۸ درصد در واسنجی و ۱/۱۸ درصد در صحت سنجی) و این امر دلالت بر توانایی مدل در پیش بینی دقیق تغییرات غلظت نفت در این شرایط دارد. این نتایج، کارایی بالای مدل را در شرایط میانی نشان می دهد که می تواند ناشی از پایداری دینامیک جذب در این سطح از آلودگی باشد.

درصد در صحت سنجی) نشان می دهد که خطای مدل بسیار محدود بوده و پیش بینی های انجام شده از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. همچنین ثابت ماندن مقدار بار آلاینده افقی (W) در دو مرحله، پایداری مدل را تأیید می کند. در غلظت متوسط (C20)، مدل عملکرد بسیار بهتری داشته است. مقدار R^2 در مرحله واسنجی برابر با ۰/۹۴ است که بیانگر همبستگی بسیار بالا بین داده های مدل سازی شده و داده های

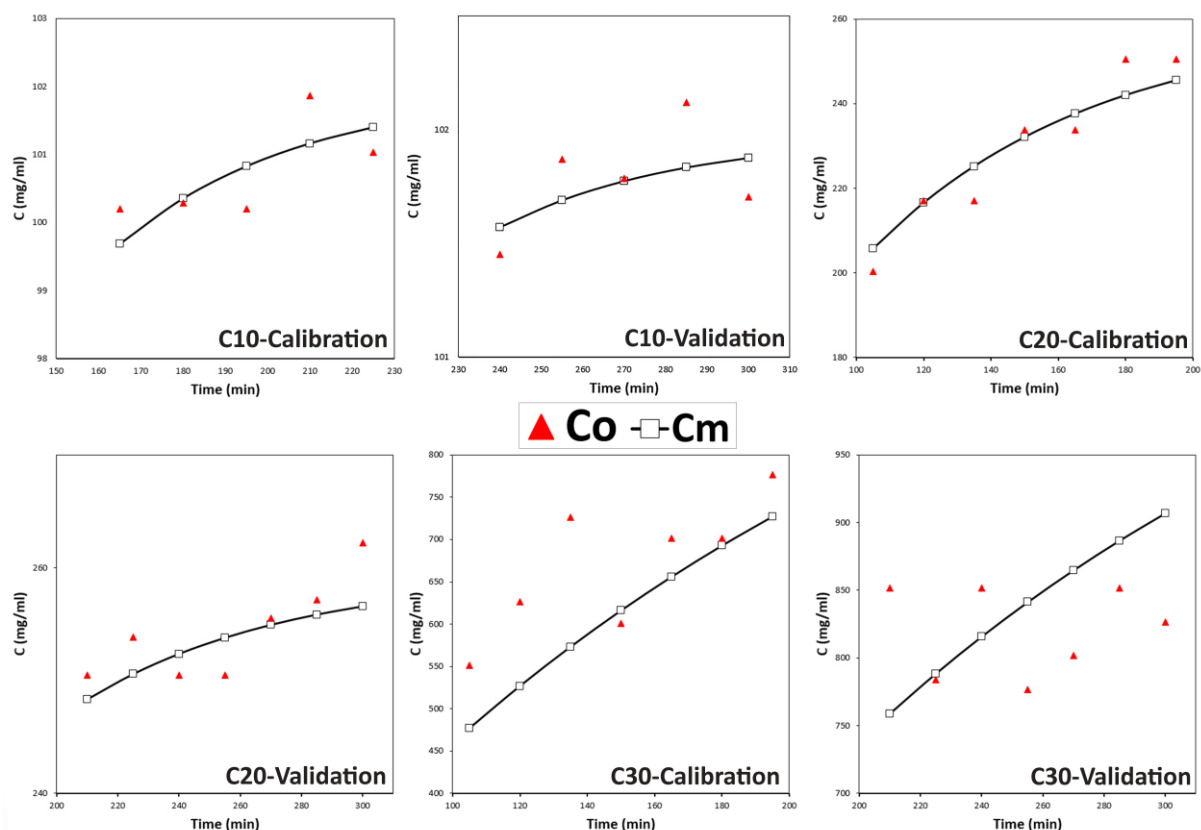


شکل ۲- مقایسه غلظت مشاهداتی (Co) و مدل سازی شده (Cm) نفت خروجی از منسوج BC در مراحل واسنجی و صحت سنجی برای سه غلظت مختلف

کاهش مقدار λ در این غلظت (به ۰/۰۰۵ در واسنجی) می تواند نشان دهنده کندی در نرخ تغییر غلظت نفت و کاهش کارایی منسوج در شرایط غلظت بالا باشد.

شکل ۳ تطابق بین داده های تجربی (Co) و داده های مدل سازی شده (Cm) را برای منسوج PET در شرایط مختلف غلظتی نشان می دهد. بررسی این نمودارها بیانگر عملکرد متغیر مدل در پیش بینی رفتار جذب نفت در سه سطح غلظت مختلف است. در شرایط غلظت پایین (C10)، مدل توانسته است با دقت مناسبی تغییرات غلظت را در طول زمان بازسازی کند. فاصله بین داده های تجربی و مدل سازی شده در این حالت نسبتاً کم است و روند تغییرات نیز همخوانی قابل قبولی دارد.

در غلظت بالا (C30)، کاهش چشمگیری در عملکرد مدل مشاهده می شود. مقدار R^2 در مرحله واسنجی برابر با ۰/۶۲ و در مرحله صحت سنجی به مقدار بسیار پایین ۰/۰۳ کاهش یافته است، که نشان دهنده ضعف مدل در تطابق با داده های واقعی در این شرایط است. همچنین، مقدار NRMSE به شدت افزایش یافته و در مرحله صحت سنجی به ۷/۴۰ درصد رسیده که از مرز قابل قبول فراتر رفته و بیانگر عملکرد ضعیف مدل در پیش بینی غلظت نفت خروجی در غلظت های بالا است. این افت عملکرد می تواند ناشی از پیچیدگی های موجود در رفتار منسوج PET در مواجهه با حجم بالای نفت و احتمال اشباع سریع الیاف باشد که موجب ناپایداری در فرآیند جذب شده است. همچنین



شکل ۳- مقایسه غلظت مشاهداتی و مدل سازی شده نفت خروجی از منسوج PET در مراحل واسنجی و صحت سنجی برای سه غلظت مختلف

داده های Co و Cm به وضوح کاهش یافته و پراکندگی قابل توجهی بین نقاط مشاهده می شود. این موضوع نشان می دهد که در غلظت های بالا، پدیده های پیچیده تری همچون اشباع سریع الیاف، کاهش راندمان انتقال جرم یا حتی تغییر رفتار فیزیکی منسوج رخ داده است که توسط مدل در نظر گرفته نشده اند. مقدار بسیار پایین R^2 در صحت سنجی ($0/03$) این مسأله را تأیید می کند و بیانگر ضعف مدل در پیش بینی رفتار سیستم در این شرایط است. همچنین افزایش مقدار NRMSE نیز حاکی از بالا رفتن خطای پیش بینی در این حالت است.

به طور کلی، نتایج نشان می دهند که مدل مورد استفاده در این مطالعه برای غلظت های پایین و متوسط از دقت مناسبی برخوردار است، اما در مواجهه با شرایط غلظت بالا عملکرد آن به شدت کاهش می یابد. این موضوع اهمیت بررسی بیشتر پدیده های غیرخطی و احتمالی در رفتار سیستم در شرایط شدید آلودگی و همچنین ضرورت ارتقاء مدل با استفاده از مدل های پیچیده تر را برجسته می سازد.

نتایج مدل سازی نفت خارج شده از منسوج PP

نتایج مدل سازی نفت خروجی از منسوج PP در سه سطح مختلف غلظت اولیه (C10، C20 و C30) در جدول ۳ آورده

با این حال، در مرحله صحت سنجی نسبت به واسنجی پراکندگی بیشتری بین نقاط دیده می شود که احتمالاً ناشی از تأثیر خطاهای آزمایشگاهی یا اثرات ثانویه ای است که مدل لحاظ نشده است. این موضوع با مقادیر نسبتاً پایین R^2 ($0/46$) در واسنجی و $0/37$ در صحت سنجی) نیز همخوانی دارد، ولی در مجموع به دلیل مقدار پایین NRMSE، مدل هنوز قابل اعتماد ارزیابی می شود.

در غلظت متوسط (C20)، مدل عملکرد بهتری از خود نشان داده است. در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی، داده های مدل سازی شده به خوبی روند صعودی داده های تجربی را دنبال می کنند. پراکندگی داده ها نیز کمتر از حالت C10 بوده و مسیر کلی نقاط به وضوح هماهنگ است. این مشاهدات با مقدار بالای R^2 در مرحله واسنجی ($0/94$) تقویت می شود که حاکی از برازش بسیار مناسب مدل با داده های واقعی در این سطح از غلظت است. به نظر می رسد منسوج PET در این سطح غلظت رفتاری نسبتاً پایدار و قابل پیش بینی از خود نشان می دهد که موجب افزایش دقت مدل شده است.

در غلظت بالا (C30)، افت محسوسی در عملکرد مدل دیده می شود. هرچند در مرحله واسنجی، مدل توانسته روند کلی غلظت نفت را بازسازی کند، اما در صحت سنجی تطابق بین

سه سطح غلظت اولیه C10، C20 و C30 طی دو مرحله واسنجی و صحت سنجی مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل این نمودارها نشان می دهد که کیفیت برازش مدل در سطوح مختلف غلظت متفاوت بوده و عملکرد مدل با افزایش غلظت بهبود یافته است.

در غلظت C10، مدل در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی عملکرد بسیار ضعیفی داشته است. نمودارها نشان می دهند که مقادیر مدل شده غلظت (Cm) تقریباً ثابت باقی مانده و تغییرات بسیار ناچیزی داشته اند، در حالی که داده های واقعی (Co) دارای نوسانات قابل توجهی بوده اند. این موضوع بیانگر آن است که مدل نتوانسته روند واقعی تغییرات غلظت را در این سطح شناسایی کند. علت این ضعف ممکن است به حساسیت کم مدل نسبت به مقادیر پایین غلظت یا ناکافی بودن اطلاعات برای استخراج الگوی مناسب در این دامنه مربوط باشد. نتایج عددی نیز این موضوع را تأیید می کنند؛ مقدار ضریب تعیین (R^2) در واسنجی پایین بوده و خطای NRMSE در صحت سنجی بسیار بالا (۱۶/۲۵ درصد) گزارش شده است.

در غلظت متوسط C20، وضعیت مدل سازی تا حدی بهبود یافته و مدل توانسته است روند کلی تغییرات غلظت را با دقت بیشتری دنبال کند. در نمودارهای مربوط به این سطح، فاصله بین نقاط واقعی و مدل شده کاهش یافته، اما همچنان در برخی زمان ها، مدل از داده های واقعی فاصله گرفته است. با این حال، مقادیر R^2 و NRMSE در این سطح نسبت به C10 نشان دهنده بهبود عملکرد مدل هستند، به ویژه در صحت سنجی که میزان خطا به ۳/۶۶ درصد کاهش یافته است. این موضوع نشان می دهد که مدل در شرایط غلظت میانی، توانایی بهتری در شبیه سازی رفتار سیستم دارد.

در غلظت بالا (C30)، مدل بهترین عملکرد خود را نشان داده است. همان گونه که در نمودارها مشاهده می شود، داده های مدل شده به خوبی داده های واقعی را دنبال کرده و فاصله میان آن ها به حداقل رسیده است. روند تغییرات در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی همخوانی بالایی با مقادیر مشاهده شده دارد. این عملکرد مطلوب را می توان به تشدید رفتار جذب و آشکارتر شدن الگوهای تغییرات در غلظت های بالا نسبت داد، که سبب شده مدل بتواند بهتر این رفتار را شناسایی و پیش بینی کند. مقادیر R^2 بالا (۰/۷۷ در واسنجی) و خطای نرمال شده نسبتاً پایین (۳/۹۴ درصد در صحت سنجی) نیز مؤید دقت مناسب مدل در این سطح غلظت است.

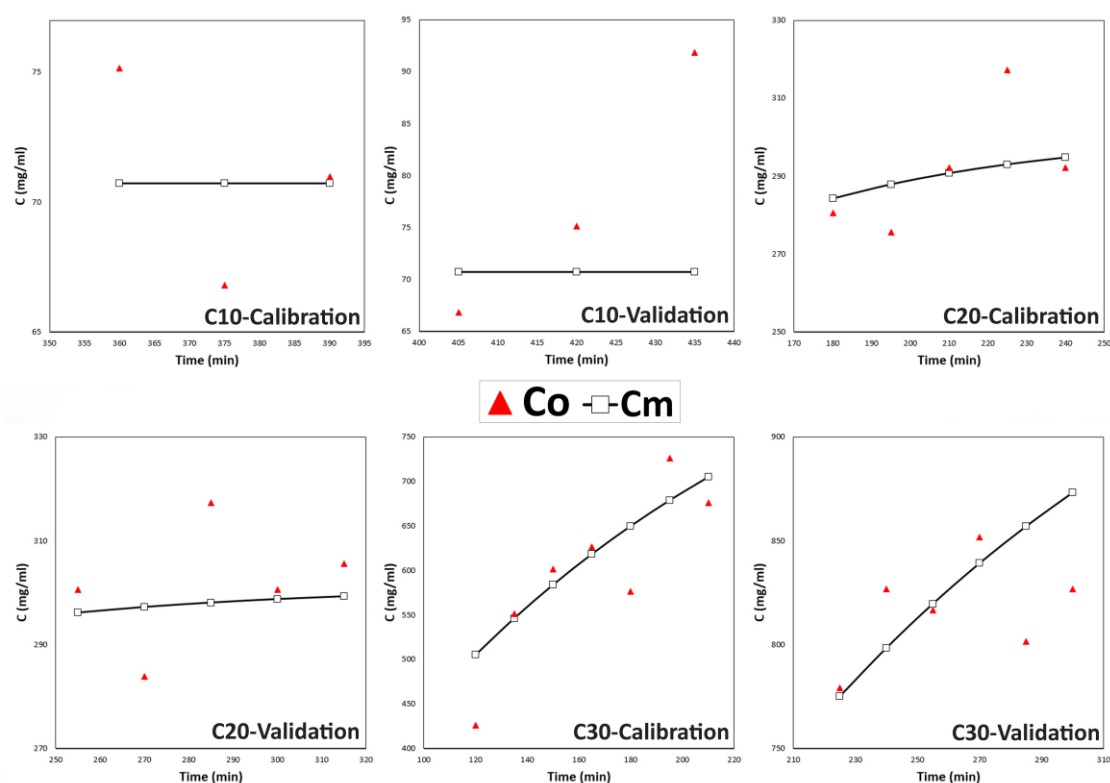
شده است. نتایج نشان دهنده عملکرد متغیر مدل در شرایط مختلف آلودگی هستند. شاخص های W ، λ ، R^2 و NRMSE برای ارزیابی دقت مدل در هر مرحله ارائه شده اند.

در سطح غلظت پایین (C10)، مدل در مرحله واسنجی عملکرد متوسطی از خود نشان داده است. مقدار R^2 برابر با ۰/۴۲ بوده که بیانگر برازش نسبتاً ضعیف مدل است. با این حال، در مرحله صحت سنجی مقدار R^2 به طور قابل توجهی به ۰/۸۶ افزایش یافته و نشان از بهبود چشمگیر تطابق مدل با داده های واقعی دارد. از طرفی، مقدار بالای NRMSE در صحت سنجی (۱۶/۲۵ درصد) نشان می دهد که علیرغم ضریب تعیین نسبتاً بالا، اختلاف عددی قابل ملاحظه ای بین داده های مدل سازی شده و مشاهداتی وجود دارد. این تناقض می تواند ناشی از پیش بینی صحیح روند کلی توسط مدل، اما با دقت پایین باشد.

در سطح غلظت متوسط (C20)، عملکرد مدل نسبتاً ثابت اما در سطح متوسط باقی مانده است. مقدار R^2 در هر دو مرحله واسنجی (۰/۴۴) و صحت سنجی (۰/۱۲) پایین بوده و حاکی از ضعف مدل در بازسازی دقیق رفتار جذب در این شرایط است. همچنین، با وجود کاهش نسبی NRMSE در صحت سنجی (۳/۶۶ درصد)، نمی توان به عملکرد دقیق مدل در این سطح غلظت اطمینان داشت. احتمالاً در این مرحله، پیچیدگی های فیزیکی و شیمیایی فرآیند جذب در منسوج PP به درستی توسط مدل درک نشده و نیاز به اصلاح ساختار مدل یا افزودن پارامترهای جدید احساس می شود.

در غلظت بالا (C30)، مدل در مرحله واسنجی عملکرد نسبتاً خوبی از خود نشان داده و مقدار R^2 برابر با ۰/۷۷ گزارش شده است. این عدد نشان دهنده توانایی مدل در برازش داده ها در مرحله کالیبراسیون است. با این حال، در مرحله صحت سنجی، عملکرد مدل به طور قابل توجهی افت کرده و مقدار R^2 به ۰/۲۱ کاهش یافته است. همچنین مقدار NRMSE در صحت سنجی برابر با ۳/۹۴ درصد بوده که علی رغم افت ضریب تعیین، هنوز نسبت به غلظت های پایین تر عملکرد عددی بهتری نشان می دهد.

از دیدگاه λ ، با افزایش غلظت نفت، مقدار λ کاهش یافته است (از ۰/۰۴۶ در C10 به ۰/۰۰۶ در C30)، که این موضوع احتمالاً به اشباع تدریجی منسوج PP و کاهش تدریجی گرادیان غلظت مؤثر مربوط می شود. همچنین مقدار W (بار آلودگی افقی) نیز با افزایش غلظت نفت، افزایش یافته که نشان دهنده افزایش ورود جرم آلاینده به سیستم است. در شکل ۴، نتایج مدل سازی غلظت نفت خروجی از منسوج پلی پروپیلن (PP) در



شکل ۴- مقایسه غلظت مشاهداتی و مدل سازی شده نفت خروجی از منسوج PP در مراحل واسنجی و صحت سنجی برای سه غلظت مختلف

از افزایش مقادیر غلظت واقعی و در نتیجه افزایش مخرج در محاسبه NRMSE است که موجب کوچک تر شدن مقدار نهایی می شود، حتی اگر خطای مطلق زیاد باشد. از طرفی، در غلظت های بالا، فرایند جذب پیچیده تر و رفتار دینامیکی سیال-منسوج از حالت خطی فاصله می گیرد که ممکن است منجر به کاهش دقت مدل در بازنمایی واقعیت شود. بنابراین کاهش عددی NRMSE در C30 لزوماً به معنای بهبود عملکرد مدل نیست و باید با سایر شاخص ها مانند R^2 و نمودار تیلور به صورت تلفیقی تفسیر شود.

تحلیل ترکیبی عملکرد مدل با استفاده از شاخص های آماری و نمودار تیلور

برای ارائه یک ارزیابی جامع از دقت مدل در پیش بینی غلظت نفت خروجی از منسوج های BC، PET و PP، ابتدا شاخص های عددی شامل R^2 ، NRMSE و λ محاسبه شدند و سپس با استفاده از نمودار تیلور، همبستگی، انحراف معیار و RMSE به صورت هم زمان مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). نتایج عددی نشان داد که در غلظت های پایین تر (C10 و C20)، مدل بیشترین دقت را در منسوج PET و BC از خود نشان داد. برای مثال در C20، PET با $R^2=0.94$ و NRMSE=2.38% بهترین تطابق میان مقادیر پیش بینی و

در منسوج PP، اختلاف معنی داری میان مقادیر R^2 و NRMSE در مراحل واسنجی و صحت سنجی، به ویژه در غلظت های C20 و C30 مشاهده شد. این تفاوت می تواند ناشی از حساسیت بالای رفتار جذب PP به تغییرات اولیه غلظت نفت، ساختار غیرمتخلخل این منسوج و همچنین ظرفیت جذب پایین تر آن نسبت به PET و BC باشد. به علاوه، عملکرد بهتر مدل در مرحله واسنجی نسبت به صحت سنجی در برخی غلظت ها (مانند C30) ممکن است به دلیل تطابق بالای مدل با داده های آموزش و محدودیت در تعمیم آن به داده های جدید باشد. در غلظت C30، احتمال اشباع سریع بستر PP و تغییرات نرخ جذب، دقت مدل را در صحت سنجی کاهش داده است. چنین اختلاف هایی بین مراحل واسنجی و صحت سنجی در مدل سازی تجربی جذب، به ویژه در غلظت های بالا، امری رایج است و نیازمند بهبود پارامترسازی یا استفاده از مدل های پیشرفته تر در شرایط مشابه می باشد.

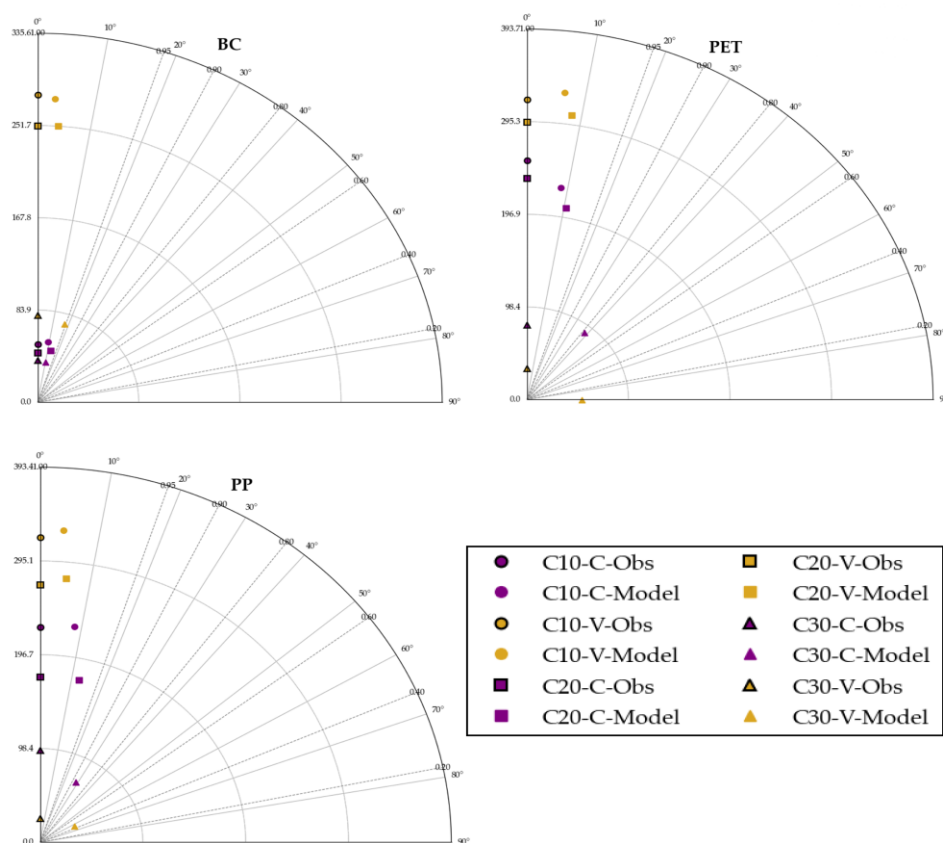
در مقایسه مقادیر NRMSE، مشاهده شد که مدل در غلظت های پایین و میانی (C10 و C20) عملکرد مناسبی داشته و خطای مدل به طور نسبی کم باقی مانده است. اما در غلظت C30، به رغم افزایش داده های تجربی، مقدار NRMSE در برخی موارد کاهش یافته است. این کاهش ظاهری خطا ناشی

C30، زاویه بزرگتر و فاصله بیشتر از نقطه مرجع بیانگر همبستگی کمتر و RMSE بالاتر بود. به طور کلی، پوشش نزدیک مدل های کالیبراسیون و اعتبارسنجی در نمودار بیانگر قابلیت تعمیم مدل در داده های جدید است، اگرچه در شرایط غلظت بالا نیاز به اصلاح پارامترها یا به کارگیری روش های غیرخطی احساس می شود.

این تحلیل ترکیبی نشان می دهد که مدل پیشنهادی در محدوده های غلظت پایین و میانی عملکرد بسیار خوبی دارد و از طریق نمودار تیلور نیز اعتبار آن تأیید می شود، اما برای غلظت های بالا (C30) و بسترهای پیچیده تر مانند PP، بهینه سازی های بیشتر یا مدل های تکمیلی برای بهبود دقت پیش بینی ضرورت دارد.

مشاهده شده را داشت؛ در حالی که PP در همین غلظت $R^2=0.44$ و $NRMSE=4.25\%$ را نشان داد. با افزایش غلظت تا C30، مقدار R^2 برای همه منسوج ها کاهش یافت (BC: 0.62, PET: 0.77, PP: 0.77) و NRMSE بالاتر رفت که حاکی از افزایش پیچیدگی فرایند جذب در شرایط آلودگی بالا و نیاز به بهبود مدل در این محدوده است.

مقدار λ نیز در PP در $\lambda=0.006$ کمترین مقدار را داشت و نشان داد آزادسازی نفت از این بستر نسبتاً کند اتفاق می افتد. نمودار تیلور، هماهنگی این نتایج را تأیید کرد. نقاط مربوط به PET و BC در غلظت های C10 و C20 نزدیک به نقطه مرجع (Observed) قرار گرفته و زاویه های کوچک (همبستگی بالا) و شعاع های تقریباً برابر (انحراف معیار مشابه) مدل را ایده آل نشان می دهد. در حالی که برای PP به ویژه در



شکل ۵- نمودار تیلور برای سه منسوج استفاده شده در پژوهش در مراحل واسنجی و صحت سنجی برای سه غلظت مختلف

نتیجه گیری

نشان داد. مدل ریاضی توسعه یافته بر پایه قانون بقای جرم و فرض واکنش مرتبه اول، توانست رفتار دینامیکی جذب را با دقت مناسبی بازنمایی کند، به ویژه در غلظت های پایین و متوسط. هرچند در مواجهه با شرایط آلودگی بالا و منسوجات خاص مانند PP، دقت مدل کاهش یافت که بیانگر نیاز به بهبود و ارتقاء ساختار مدل در این شرایط است.

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از منسوجات فنی می تواند روشی مؤثر و اقتصادی برای حذف نفت از مخلوط های آبی باشد. در میان سه نوع منسوج مورد بررسی، منسوج ترکیبی BC با دارا بودن بیشترین تخلخل و ترکیب ساختاری مناسب، بالاترین راندمان جذب و دقت مدل سازی را در اغلب شرایط

- 1- Al-Jammal, N., & Juzsakova, T. (2017). Review on the effectiveness of adsorbent materials in oil spills clean up. *Sea*, 25(36), 131-138.
- 2- Asadpour, R., Sapari, N. B., Tuan, Z. Z., Jusoh, H., Riahi, A., & Uka, O. K. (2013). Application of Sorbent materials in Oil Spill management: A review. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 2.(۲)
- 3- Bashir, I., Lone, F. A., Bhat, R. A., Mir, S. A., Dar, Z. A., & Dar, S. A. (2020). Concerns and Threats of Contamination on Aquatic Ecosystems. In K. R. Hakeem, R. A. Bhat, & H. Qadri (Eds.), *Bioremediation and Biotechnology: Sustainable Approaches to Pollution Degradation* (pp. 1-26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0_1
- 4- Cheu, S. C., Kong, H., Song, S. T., Johari, K., Saman, N., Che Yunus, M. A., & Mat, H. (2016). Separation of dissolved oil from aqueous solution by sorption onto acetylated lignocellulosic biomass—equilibrium, kinetics and mechanism studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 864-881. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.12.028>
- 5- Condurache, B. C., Cojocaru, C., Samoila, P., Ignat, M., & Harabagiu, V. (2022). Data-driven modeling and optimization of oil spill sorption by wool fibers: retention kinetics and recovery by centrifugation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(1), 367-378. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03176-7>
- 6- Gote, M., Dhila, H., & Muley, S. (2023). Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends. *Nature Environment and Pollution Technology*, 22(1), 39-61.
- 7- Hamed, H., Rezaei, N., & Zendejboudi, S. (2023). Investigation of Emulsified Oil Adsorption onto Functionalized Magnetic Nanoparticles—Kinetic and Isotherm Models. *Energies*, 16.(۲۴)
- 8- Hart, A., William, P. D., Selina, O., & Peretomode, E. (2023). Waste bone char-derived adsorbents: characteristics, adsorption mechanism and model approach. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 175-204. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2197128>
- 9- Jamali Jezeh, M., Shayannejad, M., & Hejazi, S. M. (2021). Evaluation of the Performance of Filters Made of BC, PET and PP Textiles in Removing Oil Contaminants from Water. *JSTNAR*, 24(4), 295-312. <https://doi.org/10.47176/jwss.24.4.42931>
- 10- Jamali, M., Yazdian, H., Bahman, G., & Eslamian, S. (2025). Water agriculture nexus a system dynamics approach for the next three decades. *Scientific Reports*, 15(1), 5946. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90728-3>
- 11- Kijjumba, G. W., Emik, S., Öngen, A., Özcan, H. K., & Aydın, S. (2018). Modelling of adsorption kinetic processes—errors, theory and application. *Advanced sorption process applications*, 1-19.
- 12- Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C.,

تحلیل آماری و نمودارهای مقایسه‌ای نشان دادند که مدل‌سازی سینتیکی می‌تواند به‌عنوان ابزار قابل اتکا برای پیش‌بینی عملکرد فیلترهای نفت‌گیر استفاده شود. از سوی دیگر، نتایج حاصل می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی فیلترهای صنعتی برای تصفیه آب‌های آلوده به ترکیبات نفتی و حتی دیگر آلاینده‌های آلی به کار رود. در نهایت، این پژوهش زمینه‌ای برای توسعه روش‌های پیشرفته‌تر مدل‌سازی و به‌کارگیری تکنولوژی‌های سبز در مدیریت آلودگی‌های نفتی فراهم می‌سازد. همچنین بررسی و مقایسه عملکرد مدل‌های سینتیکی پیشرفته‌تر از جمله مدل‌های مرتبه دوم و غیرخطی، می‌تواند در گام‌های بعدی برای بهبود دقت پیش‌بینی در غلظت‌های بالا و بسترهای پیچیده‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت‌های دانشگاه صنعتی اصفهان که سهم بسزایی در موفقیت این پروژه تحقیقاتی داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافع در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های مورد استفاده و یا تجزیه و تحلیل شده در طول مطالعه جاری در صورت درخواست معقول از نویسندگان مربوطه در دسترس است.

مشارکت نویسندگان

محمد جمالی: انجام آزمایش‌ها، مدل‌سازی، تحلیل نرم‌افزاری، نگارش و تهیه پیش‌نویس اصلی.

محمد شایان‌نژاد: اعتبارسنجی نتایج، مدل‌سازی، بررسی و ویرایش.

سیدمهدی حجازی: بررسی و ویرایش.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

- Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., Bottein, M. D., Demeneix, B., Depledge, M., Deheyn, D. D., Dorman, C. J., Fénichel, P., Fisher, S., Gaill, F., Galgani, F., & Rampal, P. (2020). Human Health and Ocean Pollution. *Ann Glob Health*, 86(1), 151. <https://doi.org/10.5334/aogh.2831>
- 13-Oliveira, L. M. T. M., Saleem, J., Bazargan, A., Duarte, J. L. d. S., McKay, G., & Meili, L. (2021). Sorption as a rapidly response for oil spill accidents: A material and mechanistic approach. *Journal of Hazardous Materials*, 40. ۱۲۴۸۴۲, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124842>
- 14-Onyena, A. P., & Sam, K. (2020). A review of the threat of oil exploitation to mangrove ecosystem: Insights from Niger Delta, Nigeria. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00961. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00961>
- 15- Qiu, H., Lv, L., Pan, B.-c., Zhang, Q.-j., Zhang, W.-m., & Zhang, Q.-x. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 10(5), 716-724. <https://doi.org/10.1631/jzus.A0820524>
- 16- Seddighi, M., & Hejazi, S. M. (2015). Water-oil separation performance of technical textiles used for marine pollution disasters. *Marine Pollution Bulletin*, 96(1), 286-293. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.011>
- 17-Song, Q., Kang, J., Tang, M., & Liang, Y. (2020). Separation of Water in Diesel Using Filter Media Containing Kapok Fibers. *Materials*, 13. (11)
- 18- Thiagarajan, C., & Devarajan, Y. (2025). The urgent challenge of ocean pollution: Impacts on marine biodiversity and human health. *Regional Studies in Marine Science*, 81, 103995. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103995>

