

## تولید الیاف کربن مغناطیسی با ساختار سه بعدی از اسفنج لوفاف برای جداسازی آلاینده‌های نفتی از آب

فاطمه سادات موسوی<sup>۱</sup>، کامیل نصوری<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا مرادی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه شیمی نساجی و علوم الیاف، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، اصفهان

k.nasouri@iut.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

### چکیده

نشت مواد نفتی در محیط‌های آبی یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی است. در این پژوهش، با هدف ارائه راهکاری مقرون به صرفه و پایدار، از اسفنج طبیعی لوفاف به‌عنوان پیش‌ماده برای تولید الیاف کربن مغناطیسی سه‌بعدی استفاده شد. لوفاف پس از پیش‌عملیات اسیدی با اسید فسفریک و کربونیزاسیون، در حضور نمک کبالت کلراید و طی تجزیه حرارتی در دماهای ۵۰۰°C، ۶۵۰°C و ۸۰۰°C به جاذب مغناطیسی تبدیل گردید. نتایج نشان داد ظرفیت تعادلی جذب روغن توسط این نمونه‌ها به ترتیب مقادیر ۳۲/۱۸ ± ۰/۲۱ g/g، ۳۰/۲۰ ± ۰/۳۲ g/g و ۲۰/۳۳ ± ۰/۳۹ g/g به دست آمده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که جاذب‌های تولید شده علاوه بر جذب مؤثر روغن، به دلیل خاصیت مغناطیسی امکان جداسازی و بازیابی آسان را نیز فراهم می‌کنند. در مجموع، این تحقیق روشی ساده و کم‌هزینه برای تولید جاذب‌های کارآمد از ضایعات طبیعی ارائه می‌دهد که می‌تواند در پاک‌سازی آلودگی‌های نفتی کاربرد گسترده‌ای داشته باشد.

واژگان کلیدی: اسفنج لوفاف، پسماند، الیاف کربن، جذب روغن، کبالت

## Fabrication of magnetic carbon fibers with three-dimensional structure from Luffa sponge for the separation of oily pollutants from water

Fatemeh Sadat Mousavi<sup>1</sup>, Komeil Nasouri<sup>1\*</sup>, Hamidreza Moradi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Textile chemistry and fiber science group, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Iran, Isfahan

k.nasouri@iut.ac.ir

### Abstract

Oil spills and oily pollutants in aquatic environments represent a serious global environmental challenge. In this study, a cost-effective and sustainable approach was developed to fabricate three-dimensional magnetic carbon fibers derived from natural loofah sponge. The loofah precursor was pretreated with phosphoric acid and subsequently carbonized, while magnetic properties were introduced through the thermal decomposition of cobalt chloride salt, leading to the formation of cobalt and cobalt oxide nanoparticles. Thermal treatment was carried out at 500 °C, 650 °C, and 800 °C, and the equilibrium oil sorption capacities of the resulting samples were found to be 32.18 ± 0.21 g/g, 30.20 ± 0.32 g/g, and 20.33 ± 0.39 g/g, respectively. The results demonstrate that the produced carbon fibers not only exhibit high oil sorption efficiency but also enable rapid and facile recovery due to their magnetic nature. Overall, this work presents a simple and low-cost strategy for converting loofah waste into advanced magnetic carbon adsorbents with promising applications in oil spill remediation and environmental protection.

**Keywords:** Luffa sponge, Waste, Carbon fibers, Oil sorption, Cobalt

## ۱- مقدمه

بیرونی لوفازکتر و ظریف‌ترند. استحکام کششی این الیاف بسته به منبع گیاه در محدوده ۵۰ MPa تا ۳۸۵ MPa و ازدیاد طول تا حد پارگی در بازه ۱٪ تا ۶٪ قرار دارد. قطر متوسط الیاف لوفاز بسیار بیشتر از الیاف متداول نساجی است، بنابراین برای منسوجات معمولی مناسب نیست اما در کاربردهای صنعتی عملکرد مطلوبی دارد. از نظر ترکیب شیمیایی، به دلیل محتوای بالای سلولز، خواص این الیاف مشابه الیاف طبیعی سلولزی مانند کنف است [۲].

بر اساس آمار، در سال ۲۰۰۵ حدود ۱۳/۳٪ از انرژی اولیه جهان از منابع تجدیدپذیر تأمین شد که در این میان، انرژی زیست‌توده بیشترین سهم را به خود اختصاص داد. در عین حال، جهان با مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی‌ها و گرم شدن زمین مواجه است. به همین دلیل، پژوهشگران بر استفاده از مواد سبز، زیست‌تخریب‌پذیر و بازیافت پسماندهای زیست‌توده برای حفاظت از محیط‌زیست و تقویت چرخه اقتصاد تمرکز کرده‌اند [۲، ۶]. با این حال، در بسیاری موارد پسماند های زیست‌توده بدون استفاده مناسب دور ریخته یا سوزانده می‌شوند که منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آسیب‌های زیست‌محیطی می‌گردد. جاذب‌های مبتنی بر مواد زیست‌توده به دلیل ویژگی‌های ارزان، فراوان، زیست‌تخریب‌پذیر و پایدار بودن، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۷]. بنابراین، توسعه تحقیقات برای بهینه‌سازی بازیافت این پسماندها ضروری است. در این راستا، استفاده مستقیم از محصولات خام کشاورزی به‌عنوان جاذب‌های ارزان، تجدیدپذیر و سازگار با

لوفاز گیاهی از خانواده کدوبیان است که برای رشد به دمای بالا و رطوبت زیاد نیاز دارد و به طور گسترده در آسیا و آفریقا، به‌ویژه در کشورهایی مانند چین، هند و ژاپن کشت می‌شود [۱]. میوه لوفاز استوانه‌ای شکل بوده و پس از رسیدن و خشک شدن، پوسته آن قهوه‌ای و بخش داخلی آن به ساختاری اسفنجی تبدیل می‌شود. اسفنج لوفاز الیاف طبیعی تشکیل شده و منبع غنی سلولز است؛ به طور متوسط حدود ۶۵٪ سلولز، ۲۲٪ همی‌سلولز، ۱۰٪ لیگنین و نزدیک به ۳٪ ترکیبات دیگر دارد. سایر اجزای آن شامل خاکستر، دوده و مواد روغنی است. ترکیب شیمیایی لوفاز بسته به شرایط رشد و عوامل محیطی متغیر است [۲].

اسفنج لوفاز دارای ساختار سه‌بعدی شبکه‌ای و متخلخل است و معمولاً به شکل استوانه‌ای یا لوله‌ای دیده می‌شود [۳، ۴]. این اسفنج از چهار بخش اصلی شامل لایه بیرونی، بخش میانی، لایه داخلی و هسته تشکیل شده است. بر اساس دسته‌بندی چن<sup>۱</sup> و همکاران [۵]، لوفاز به دو نوع با چگالی پایین و بالا تقسیم می‌شود. در نمونه‌های با چگالی پایین، قطر متوسط الیاف به ترتیب در لایه بیرونی  $353/3 \mu\text{m}$ ، میانی  $288/7 \mu\text{m}$ ، داخلی  $451/3 \mu\text{m}$  و هسته  $481/3 \mu\text{m}$  است. در حالی که در لوفاز با چگالی بالا این مقادیر به ترتیب  $550/3 \mu\text{m}$ ،  $457 \mu\text{m}$ ،  $634/3 \mu\text{m}$  و  $535/3 \mu\text{m}$  است. این داده‌ها نشان می‌دهد قطر الیاف در هسته لوفاز پُرچگال بیشتر از نوع کم‌چگال است. الیاف لایه

<sup>۱</sup> Chen

محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این منابع، اسفنج لופا است که اغلب به عنوان پسماند کشاورزی دور ریخته می شود. به جای کاربرد سنتی آن به عنوان لیف حمام، می توان از ساختار سلولزی لופا برای تولید کربن با ارزش افزوده بالا بهره گرفت و آن را راهکاری مؤثر برای استفاده مجدد از این ضایعات دانست [۸، ۹].

آلودگی آب های اقیانوس ها و دریاها با مواد نفتی یکی از نگرانی های جدی زیست محیطی در جهان است. این آلودگی ها ناشی از اکتشاف و تولید نفت، فعالیت پالایشگاه ها، چاه های نفتی و تأسیسات ساحلی بوده و خسارات زیادی به زیست بوم های دریایی وارد می کند [۱۰]. فاضلاب های نفتی در صورت عدم تصفیه مناسب، سلامت انسان را تهدید کرده و آلودگی شدید نفتی در منابع آبی مانند اقیانوس ها، دریاچه ها و رودخانه ها اثرات منفی بر موجودات آبی، اقتصاد و حتی گردشگری دارد [۱۱]. برای حذف نفت از آب، روش های مختلفی شامل فیزیکی، مکانیکی، بیولوژیکی، شیمیایی و فتوشیمیایی پیشنهاد شده است. این روش ها می توانند به صورت جداگانه یا ترکیبی به کار روند [۱۲، ۱۳]. روش های فیزیکی و مکانیکی شامل روغن روب ها، جداسازی گرانشی، میکروفیلتراسیون و غشاها هستند، در حالی که روش های بیولوژیکی از میکروارگانیسم ها برای تجزیه استفاده می کنند [۱۴]. همچنین روش های شیمیایی مانند لخته سازی، انعقاد الکتریکی و شناورسازی نیز کاربرد دارند [۱۵]. در میان این روش ها، استفاده از جاذب ها به ویژه جاذب های طبیعی به

دلیل کارایی بالا، هزینه کم و عدم نیاز به مواد شیمیایی اضافی، بیشترین توجه را به خود جلب کرده است [۱۰]. بالاترین مقادیر جذب در روغن هنگامی که از موادی مانند نانوکامپوزیت های مغناطیسی و الیاف طبیعی اصلاح شده استفاده شد، به دست آمده است [۱۶].

مواد کربنی مانند کربن فعال، نانولوله های کربنی، الیاف کربن، اکسید گرافن، گرافن، گرافیت، فوم های کربنی و نانوذرات کربن به دلیل سطح ویژه بالا، تخلخل، خواص مکانیکی و الکتریکی مناسب و چگالی کم، ظرفیت بالایی در حذف روغن نشان داده و از نظر پایداری شیمیایی نیز بر بسیاری از جاذب های مرسوم برتری دارند [۱۷]. این مواد در اشکال مهندسی شده سه بعدی، دوبعدی و تک بعدی به طور گسترده برای جداسازی روغن از آب بررسی شده اند. در سال های اخیر، استفاده از زیست کربن ها که از منابع طبیعی تجدیدپذیر به دست می آیند، رشد چشمگیری داشته است. این منابع علاوه بر دسترسی آسان، به دلیل ترکیب شیمیایی غنی از کربن، پیش ماده مناسبی برای تولید جاذب های زیست کربنی هستند. زیست کربن ها به طور طبیعی خاصیت آب گریزی دارند و بدون نیاز به اصلاح سطحی می توانند برای جداسازی روغن از آب استفاده شوند؛ موضوعی که موجب کاهش هزینه، صرفه جویی در زمان و کاهش آلودگی های زیست محیطی می شود [۱۸]. ماهیت زیست توده اولیه نقش مهمی در ظرفیت جذب زیست کربن ها دارد. بیشتر این الیاف به صورت توخالی هستند و امکان نفوذ و به دام افتادن روغن درون ساختار

<sup>1</sup> Oil Skimmer

متخلخل آن‌ها وجود دارد. این ویژگی باعث می‌شود چنین جاذب‌هایی مقدار بیشتری از روغن را جذب و در منافذ خود نگهداری کنند [۱۹].

وانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۲۰] با استفاده از پنبه موفق به تولید الیاف کربن توخالی شدند که توانستند ۳۲ تا ۷۷ برابر وزن خود روغن جذب کنند. یانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۲۱] نیز از بامبو الیاف کربن آبروژل ساختند که ظرفیت جذب روغن آن‌ها ۱۲۹ برابر وزن نمونه بود. همچنین لیو<sup>۳</sup> و همکاران [۲۲] از الیاف سیسال کربن آبروژل سبک، منعطف و فوق آبریز تولید کردند که توانستند ۹۰ برابر وزن خود روغن جذب کنند. به‌طور کلی، برای کاربردهای زیست‌محیطی در مقیاس بزرگ مانند جداسازی نفت از آب دریا، قابلیت بازیابی و سازگاری با محیط‌زیست مهم‌ترین معیار جاذب‌های کربنی است. از آنجا که در این فرآیند باید حجم زیادی روغن با سرعت بالا جذب شود، جمع‌آوری و حذف جاذب‌های اشباع‌شده زمان‌بر خواهد بود. یکی از راهکارهای مؤثر برای رفع این مشکل، ایجاد خاصیت مغناطیسی در جاذب‌ها است. در حضور میدان مغناطیسی، بازیابی جاذب‌های اشباع‌شده بسیار سریع‌تر و آسان‌تر انجام می‌شود و کارایی کل فرآیند افزایش می‌یابد [۲۳]. نانوذرات مغناطیسی خواص منحصر به فردی دارند که سبب کاربرد روز افزون آنها در محیط زیست، میکروالکترونیک و سایر زمینه‌ها می‌شود. از مزایای این ترکیبات می‌توان داشتن مساحت سطح بزرگ، گروه فعال زیاد و خواص مغناطیسی را نام برد. این خواص منجر به بازده زیاد، سرعت زیاد جذب

آلاینده‌ها، اقتصادی شدن فرایند و راحتی جداسازی به وسیله میدان مغناطیسی می‌شود [۲۴، ۲۵]. به‌طور معمول، خاصیت مغناطیسی با افزودن نانوذراتی مانند مگنتیت<sup>۴</sup> به بستر جاذب ایجاد می‌شود که امکان کنترل از راه دور و جداسازی آسان جاذب از محیط آبی را فراهم می‌کند [۲۶، ۲۷]. مواد مغناطیسی باید زیست سازگار باشند تا از آلودگی ثانویه جلوگیری شود، علاوه بر این، مقرون‌به‌صرفه بودن و سهولت استفاده از اهمیت بالایی برخوردار است. در مجموع، جاذب‌های کربنی مغناطیسی به‌عنوان جاذب‌های سریع و کارآمد روغن شناخته می‌شوند و می‌توانند تحولی چشمگیر در پاکسازی آلودگی‌های نفتی از دریاها ایجاد کنند [۲۳]. بنابراین با ایجاد خاصیت مغناطیسی در جاذب‌های زیست کربنی تحول شگرفی در فرآیند حذف مواد نفتی و روغنی از سطح دریاها صورت می‌گیرد که همواره نظر جهانیان را به خود جلب می‌کند. فرآیند جداسازی از محلول را با مغناطیسی کردن ذرات با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی کاملاً اقتصادی کنند. یکی از جنبه‌های تحقیقاتی جدید در حوزه مواد کربنی در سال‌های اخیر، استفاده از این مواد در جذب مواد نفتی از آب است. دلیل اصلی استفاده از کربن در جذب مواد نفتی به دلیل طبیعت فوق آب‌گریز / فوق روغن دوستی آن است. از جمله مزایای کربن در جذب مواد نفتی می‌توان به مواردی همچون ظرفیت جذب بالا، سینتیک جذب سریع، قابلیت جذب انواع مواد نفتی و روغنی اشاره نمود. یکی از برتری‌های کربن نسبت به جاذب‌های متداول در روش‌های

<sup>3</sup> Liu<sup>4</sup> Magnetite<sup>1</sup> Wang<sup>2</sup> Yang

و حفاظت از محیط زیست بسیار ارزشمند می‌سازد. به طور کلی، این پژوهش افق‌های تازه‌ای را در زمینه تولید جاذب‌های نوین، پایدار و کارآمد برای رفع آلودگی‌های نفتی می‌گشاید و می‌تواند الهام‌بخش تحقیقات گسترده‌تر در حوزه مواد پیشرفته و فناوری‌های زیست‌محیطی باشد.

## ۲- تجربیات

### ۲-۱- مواد

در این تحقیق اسفنج خشک شده حاصل از میوه لوف که پوسته رویه آن کنده شده است از مزارع شمال ایران تهیه گردید. اسفنج‌های خشک شده به شکل استوانه‌ای بوده و دارای ناخالصی‌هایی همچون گرد و غبار بوده‌اند. مواد شیمیایی اصلی مورد استفاده در این مطالعه شامل اسید فسفریک ( $H_3PO_4$ ) با خلوص ۸۵٪ و کبالت (II) کلراید ۶ آبه ( $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ) بوده که از درجه آزمایشگاهی انتخاب شده و عملیات شیمیایی اضافه بر روی آن‌ها صورت نگرفته است. همچنین از گاز نیتروژن خلوص بالاتر از ۹۹/۹۹٪. حین فرایند تولید نمونه‌ها استفاده شده است. از روغن موتور با گرانشی 10w40 جهت تمامی آزمون‌های اصلی جذب مواد نفتی استفاده گردید.

### ۲-۲- مشخصه یابی

ساختار سطحی نمونه‌های تولید شده توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) مدل QUANTA FEG 450 FEI ساخت کشور آمریکا مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و تصاویر حاصل شده ثبت شدند. همچنین تجزیه و تحلیل عنصری نمونه‌های

بازیابی بسیار ساده همچون سوزاندن و نیز قابلیت استفاده مجدد آن در سیکل‌های نامحدود است. در سال‌های اخیر استفاده از مواد سه‌بعدی در جذب مواد نفتی همچون بی‌بافت‌های پلی‌پروپیلن، اسفنج‌های سه‌بعدی پلیمری، آبروژل کربن و آبروژل گرافن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق قبلی [۲۸] از ساختار کربنی سه بعدی مشتق شده از اسفنج لوف برای جذب روغن استفاده شد. مطالعه حاضر به بررسی تولید و طراحی ساختارهای سه‌بعدی الیاف کربن مغناطیسی پرداخته است که از لوف به‌عنوان یک منبع با استفاده از نانوذرات کبالت اصلاح شده‌اند. تاکنون چنین ترکیبی در تحقیقات علمی به‌طور مستقیم مورد بررسی قرار نگرفته و همین موضوع، نوآوری و اهمیت ویژه این پژوهش را برجسته می‌سازد. در این فرآیند، اسفنج لوف به‌عنوان یک چارچوب طبیعی و متخلخل انتخاب شد و پس از اصلاح و کربونیزاسیون، با نانوذرات کبالت پوشش داده شد تا خاصیت مغناطیسی به ساختار نهایی بخشیده شود. نتیجه این فرایند، تولید الیاف کربن با وزن پایین، پایدار و دارای قابلیت بازیابی مغناطیسی است که می‌تواند در حوزه‌های مختلف کاربرد داشته باشد. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های نوآوانه این تحقیق، بررسی توانایی این الیاف در جذب مواد نفتی و آلاینده‌های هیدروکربنی از محیط‌های آبی است. آزمایش‌ها نشان دادند که این ساختارها نه تنها ظرفیت بالایی در جذب مواد نفتی دارند، بلکه به دلیل خاصیت مغناطیسی، امکان جداسازی سریع و آسان آن‌ها از محیط آبی نیز فراهم می‌شود. این ویژگی، استفاده از آن‌ها را در پاک‌سازی آلودگی‌های نفتی

غوطه‌ور شدن در روغن اندازه‌گیری شد. وزن خشک اولیه اسفنج کربنی لوفاف به عنوان ( $m_0$ ) در نظر گرفته شد و وزن نمونه‌ها بعد از هر یک زمان‌های غوطه‌وری در روغن تحت عنوان ( $m_t$ ) ثبت شد. سپس ظرفیت جذب روغن برای هر یک از نمونه‌ها که با ( $Q_t$ ) گزارش شده است مطابق با رابطه (۱) محاسبه شد [۲۹، ۳۰]:

$$Q_t(g/g) = \frac{m_t - m_0}{m_0} \quad (1)$$

### ۳-۲- تولید ماده کربنی مغناطیسی از اسفنج لوفاف

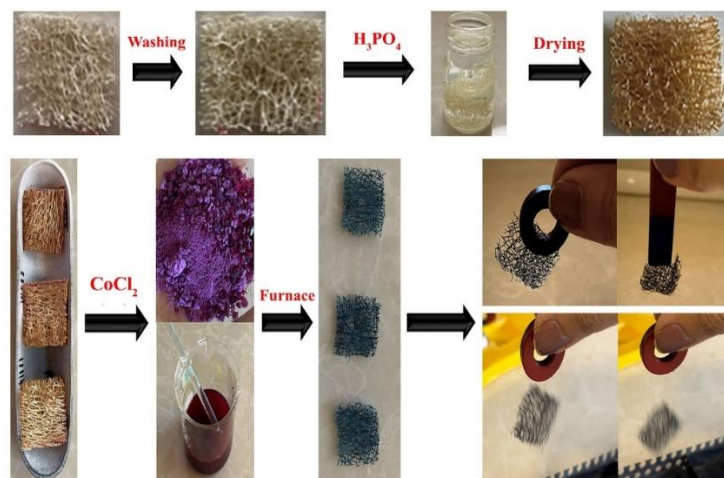
در ابتدا اسفنج لوفاف خشک با رنگ قهوه‌ای به منظور جداسازی ناخالصی از آن به مدت ۳۰ دقیقه در مخلوط آب جوش و صابون بر روی هیتر با دمای  $60^\circ\text{C}$  شست و شو داده شد و در نهایت با آب مقطر آبکشی شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط خشک شد و اسفنج لوفاف سفید حاصل شد. نمونه‌های مربعی کوچکتر با ابعاد  $\text{cm}^2$   $2 \times 2$  و وزن اولیه نمونه‌های خشک اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها جهت انجام پیش عملیات اسیدی در محلول حاوی  $\text{H}_3\text{PO}_4$  با نسبت آغشته سازی اسید:اسفنج لوفاف برابر با ۱:۴ به مدت ۲۰ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند، سپس نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت خشک و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. براساس پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه ایجاد خاصیت مغناطیسی در نمونه‌های مورد نظر محلول آبی نمک کبالت (II) کلراید با غلظت ۱ مولار تهیه و آغشته سازی نمونه‌های اسیدی شده در این محلول به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط صورت گرفت [۳۱، ۳۲]. سپس نمونه‌ها از محلول

ذکر شده توسط دستگاه طیف سنجی پراش پرتو ایکس (EDS) مدل Octane Elite از شرکت AMETEK ساخت کشور انگلیس صورت گرفت. تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس جهت بررسی ریزساختار نمونه‌های تولید شده توسط دستگاه (XRD) مدل Inel EQUINOX-3000 انجام گرفت و منحنی‌های حاصل از این بررسی رسم شدند. جهت تحلیل نتایج XRD و فازبندی کیفی و کمی نمونه‌ها از نرم افزار XPert استفاده گردید. تجزیه و تحلیل مغناطیسی نمونه‌ها تحت عنوان مغناطیس سنج ارتعاشی (VSM) اصلی‌ترین روش برای مطالعه خواص مغناطیسی مواد است؛ بنابراین خواص مغناطیسی نمونه‌ها توسط دستگاه VSM مدل MDKB از شرکت مغناطیس کویر کاشان در میدان مغناطیسی ۱ تسلا مورد بررسی قرار گرفت. وزن نمونه‌ها در هر مرحله با ترازوی چهار رقم اعشار مدل Nano Pajouhan Raga اندازه‌گیری شد.

در این تحقیق جهت بررسی و کنترل عملکرد جذب روغن توسط نمونه‌ها از روغن موتور با گراندرویی 10w40 استفاده شد. روش انجام آزمون جذب روغن به این صورت بود که مقدار تقریبی از نمونه‌های کربن مغناطیسی شده از اسفنج لوفاف در یک بشر با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر حاوی ۵۰ میلی‌لیتر از روغن‌های ذکر شده طی مدت زمان‌های (۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ ثانیه) غوطه‌ور شدند. لازم به ذکر است با انجام آزمون‌های متعدد جذب روغن و بررسی رفتار نمونه‌ها در سطوح مختلف زمانی اعداد ذکر شده جهت انتخاب بازه زمانی در نظر گرفته شدند. بعد از هر یک از زمان‌های ذکر شده وزن نمونه کربنی بعد از

۲۰۰ mL/min قرار گرفتند [۳۳]. کوره با نرخ  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ۲۰ تا دمای محیط سرد شد. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌های کربن مغناطیسی از اسفنج لופا بدون تغییر در ساختار اولیه خود از کوره خارج شدند. نمونه‌ها چندین بار تحت آبکشی قرار گرفتند و با محلول ۱٪ سدیم هیدرواکسید خنثی شدند و همچنین دوباره آبکشی و در دمای محیط خشک شدند. وزن نمونه‌ها مجدداً اندازه‌گیری شد و همچنین بر اساس دمای کربونیزاسیون به صورت MCF-500، MCF-650 و MCF-800 نام‌گذاری شدند. روش کلی تولید نمونه‌های کربن مغناطیسی از پیش‌ماده اسفنج لופا در شکل ۱ نشان داده شده است.

حاوی نمک مغناطیسی خارج شدند و در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت خشک و در نهایت وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. پس از بررسی‌های اولیه مشخص گردید در دماهای کربونیزاسیون کمتر از  $500^{\circ}\text{C}$  ساختار مغناطیسی در نمونه‌ها به وجود نمی‌آید. از طرف دیگر در دماهای بالاتر از  $800^{\circ}\text{C}$  نیز بازده کربنی به شدت کاهش پیدا کرده و ساختار نمونه‌ها به سمت حالت شکننده پیش خواهد رفت. بنابراین در این تحقیق کربونیزاسیون نمونه‌ها در کوره تیوپی تحت دماهای مختلف  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $650^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  با نرخ افزایش دما از دمای محیط تا دمای نهایی به میزان  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  صورت گرفت. نمونه‌ها در این شرایط به مدت ۱ ساعت تحت گاز نیتروژن با دبی جریان



شکل ۱- نمای کلی از تولید الیاف کربن مغناطیسی از اسفنج لופا

دمای کربونیزاسیون  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $650^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  تصاویر حاصل از آزمون FESEM در بزرگ‌نمایی کم و زیاد انجام گردید. شکل ۲ (a)، (b) و (c) به ترتیب تصاویر ساختار سطحی نمونه‌های MCF-500، MCF-650 و MCF-800 را در بزرگ‌نمایی کم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ساختار لیفی شکل الیاف اسفنج لופا طی

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ساختار سطحی الیاف زیست کربن مغناطیسی

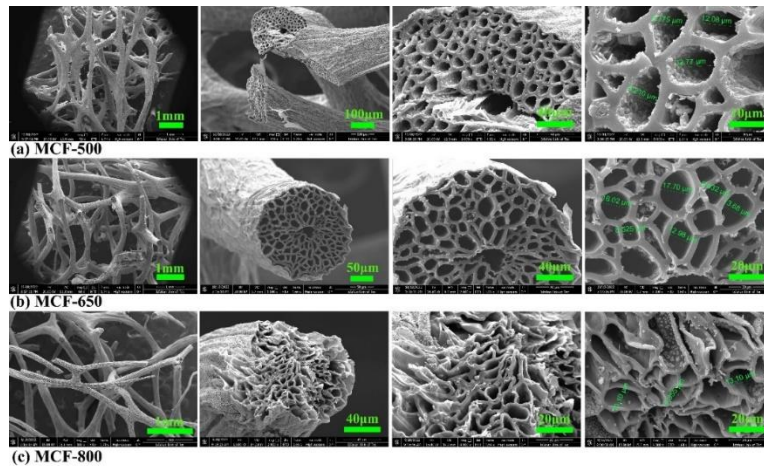
##### اسفنج لופا

جهت بررسی ساختار سطحی نمونه‌های الیاف کربن اسفنج لופا مغناطیسی شده با ذرات کبالت (II) کلراید تحت سه

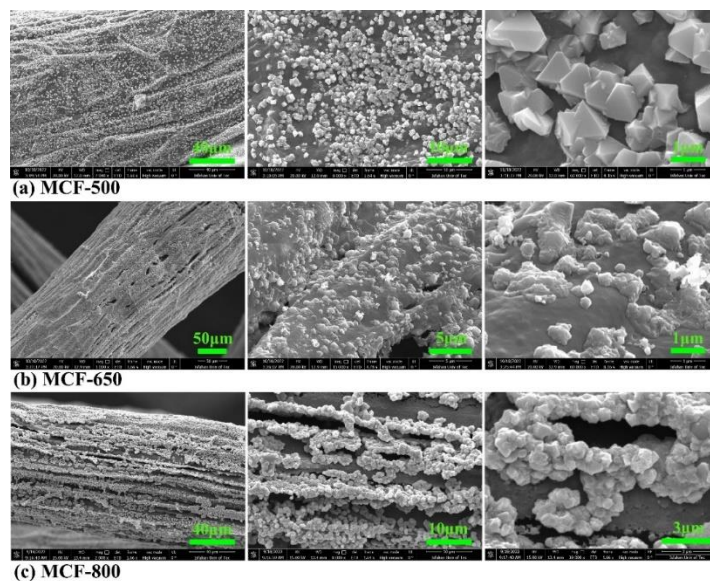
پیش‌عملیات اسیدی و عملیات مغناطیسی شدن و در نهایت کربونیزاسیون همچنان پایدار مانده است. با این حال شکستگی‌های اندکی در ساختار لیفی شکل مشاهده می‌شود. میزان شکستگی‌ها در ساختار لیفی شکل الیاف کربن مغناطیسی در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  بسیار کمتر است و با افزایش دمای کربونیزاسیون از  $500^{\circ}\text{C}$  به  $800^{\circ}\text{C}$  میزان شکستگی و بهم خوردگی در ساختار شبکه‌ای اسفنج لופا افزایش می‌یابد. با این حال فرم سه بعدی و شبکه‌ای الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا حتی بعد از عملیات در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  حفظ شده است که نشان دهنده پایداری بسیار عالی الیاف اسفنج لופا است. علاوه بر این شکل‌گیری کانال‌های موازی و توخالی در هر یک از الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا به خوبی قابل مشاهده است. نتایج حاصل از تحقیق قبلی [۲۸] و همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد که شکل‌گیری کانال‌های توخالی مربوط به پیش‌عملیات اسیدی است. چنین مشاهداتی توسط چن<sup>۱</sup> و همکارانش [۳۴] هنگامی که کربن مغناطیسی شده بر پایه چوب تولید کردند نیز مشاهده شده است. کانال‌های موازی و توخالی در قطرها و اندازه‌های مختلف شکل گرفته‌اند و ساختار لانه زنبوری متداول در مواد کربنی را ایجاد کرده‌اند. این کلنال‌ها می‌توانند مکان‌های مناسبی جهت نگهداری آلاینده‌های نفتی باشند. باتوجه به تصاویر واضح است که کانال‌ها و حفرات ایجاد شده در هر یک از الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا با افزایش دمای

کربونیزاسیون از  $500^{\circ}\text{C}$  به  $800^{\circ}\text{C}$  به مقدار زیادی دچار جمع‌شدگی شده است و کلنال‌های موازی در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  کاملاً در هم فرو رفته‌اند. با نگاه دقیق‌تر به تصاویر مشاهده می‌شود که مقداری از نانوذرات کبالت در داخل منافذ و کانال‌های هریک از الیاف حضور دارند و مقداری از آن‌ها نیز بر روی سطح الیاف کربن مغناطیسی قرار گرفته‌اند. بنابراین تصاویر به دست آمده حضور ذرات مغناطیسی شده کبالت در همه نمونه‌ها را تایید می‌کند. تصاویر حاصل از آزمون FESEM برای نمونه‌های MCF-500، MCF-650 و MCF-800 با بزرگ‌نمایی بیشتر در شکل ۳ ارائه شده است. باتوجه به تصاویر، نقاط سفید رنگ که به طور یکنواخت بر روی سطح الیاف کربن اسفنج لופا قرار گرفته‌اند مربوط به حضور ذرات مغناطیسی کبالت بر روی سطح الیاف کربن اسفنج لופا است و این ذرات در اندازه و شکل‌های متفاوت بر روی سطح و داخل کانال‌های توخالی هر یک از الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا شکل گرفته‌اند. چنین مشاهداتی در تحقیقات دیگر به طور مشابه برای الیاف کربن مغناطیسی شده توسط محققان صورت گرفته است [۲۶، ۲۷، ۳۵]. بنابراین تصاویر FESEM شکل‌گیری و حضور ذرات مغناطیسی شده کبالت در نمونه‌های MCF تحت سه دمای کربونیزاسیون مختلف را تایید می‌کند و ایجاد خاصیت مغناطیسی در الیاف کربن اسفنج لופا می‌تواند موجب افزایش سرعت جذب مواد نفتی از محیط آبی شود.

<sup>۱</sup> Chen



شکل ۲- تصاویر FESEM الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا با بزرگ‌نمایی کم: (a) MCF-500، (b) MCF-650 و (c) MCF-800



شکل ۳- تصاویر FESEM الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا با بزرگ‌نمایی زیاد: (a) MCF-500، (b) MCF-650 و (c) MCF-800

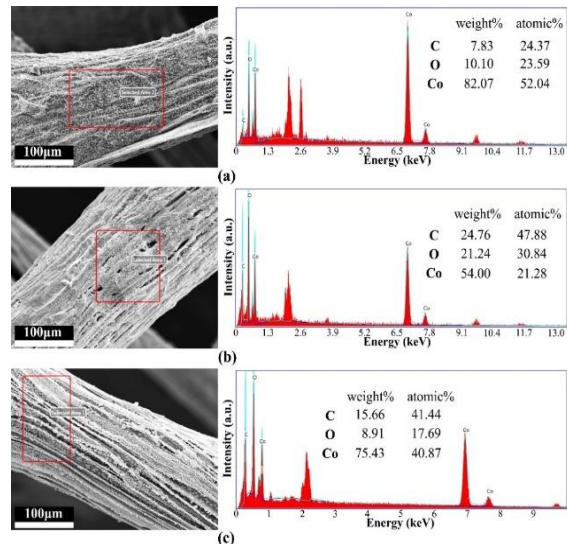
یافته است که این مسئله نشان دهنده نحوه تجزیه نمک کبالت کلرید در اثر دماست که در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  منجر به تولید اکسیدهای کبالت خواهد شد. همچنین در دمای کربونیزاسیون  $800^{\circ}\text{C}$ ، دوباره درصد وزنی کبالت افزایش یافته و درصد وزنی اکسیژن کاهش یافته است. بنابراین انتظار می‌رود که در نمونه‌ها در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  مقدار نانوذرات کبالت بیشتری سنتز شده باشد و دمای  $650^{\circ}\text{C}$  منجر به تولید نانوذرات اکسید کبالت شود.

در شکل ۴ نتایج حاصل از آنالیز عنصری از سطح نمونه‌ها به روش EDS نشان داده شده است. تصاویر سمت چپ نشان‌دهنده تصاویر FESEM و ناحیه انتخاب شده جهت آنالیز عنصری است و تصاویر سمت راست نشان‌دهنده طیف‌های EDS به همراه درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در نمونه‌هاست. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش دمای کربونیزاسیون از  $500^{\circ}\text{C}$  به  $650^{\circ}\text{C}$  درصد وزنی کبالت کاهش یافته و درصد وزنی اکسیژن افزایش

روش پالایش ریتولد مقدار کمی هر یک از مواد فلزی تولید شده در اثر تجزیه حرارتی نمک کبالت (II) کلراید مشخص شد.

باتوجه به نتایج حاصل از شناسایی فاز و الگو XRD که در شکل ۵ نشان داده شده است برای نمونه MCF-500 پیک‌های مشخصه، مربوط به پراش اشعه ایکس از صفحات (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱) و (۱۱۰) شبکه بلوری هگزاگونال فلز کبالت است (کد مرجع: ۸۴۹۳-۹۰۰-۹۶) که تولید و

تشکیل نانو ذرات فلزی  $\text{Co}_2$  به میزان ۳۰/۷٪ در نمونه MCF-500 را نشان می‌دهد. همچنین در نمونه MCF-500 پیک‌های مشخصه مربوط به پراش اشعه ایکس از صفحات (۱۱۱)، (۱۱۰)، (۰۲۰)، (۰۲۲)، (۱۳۱) و (۲۲۲) فلز کبالت با ساختار بلور مکعبی را نشان می‌دهد (کد مرجع: ۹۶-۹۰۰-۸۶۱۹) که مربوط به تشکیل نانو ذرات اکسید کبالت با فرمول شیمیایی  $\text{Co}_4\text{O}_4$  به میزان ۶۹/۳٪ در نمونه MCF-500 است. با توجه به نتایج حاصل شده برای نمونه MCF-650 دو پیک مشخصه مربوط به تفرق اشعه ایکس از صفحات (۱۰۰) و (۱۰۱) شبکه هگزاگونال کبالت مشاهده می‌شود که تولید و تشکیل نانو ذرات  $\text{Co}_2$  به میزان ۱۱/۹٪ را تأیید می‌کند. همچنین سه پیک مشخصه مربوط به پراش اشعه ایکس از صفحات (۱۱۱)، (۰۲۰) و (۰۲۲) کبالت مکعبی (کد مرجع: ۸۴۶-۹۰۰-۹۶)، نشان می‌دهد که بلور  $\text{Co}_4$  به میزان ۳۵/۲٪ در نمونه MCF-650 در اثر تجزیه حرارتی نمک کبالت (II) کلراید شکل گرفته است. علاوه بر این پیک‌های مشخصه از صفحات (۱۱۱)، (۰۲۰)، (۰۲۲)، (۱۳۱) و (۲۲۲) کبالت مکعبی مشاهده



شکل ۴- نتایج EDS از الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لوف:

MCF-500(a)، MCF-650(b) و MCF-800(c)

### ۳-۲- بررسی ریزساختار الیاف کربن مغناطیسی

#### اسفنج لوف

بر اساس مطالعات صورت گرفته در زمینه تولید نانو ذرات مغناطیسی بر روی سطح جاذب نتایج حاصل شده نشان داده که یکی از راه‌های تولید نانو ذرات کبالت خالص و همچنین اکسید کبالت بر روی سطح جاذب کربنی، روش تجزیه حرارتی نمک کبالت است [۳۶، ۳۷]. بنابراین در این تحقیق از طریق تجزیه حرارتی نمک کبالت (II) کلراید در حضور گاز نیتروژن تحت سه دمای مختلف  $500^\circ\text{C}$ ،  $650^\circ\text{C}$  و  $800^\circ\text{C}$  تولید نانوذرات کبالت و اکسید کبالت بر روی سطح الیاف کربن اسفنج لوف انجام شد که به منظور شناسایی فاز و مواد معدنی تولید شده و همچنین بررسی مقدار کمی هر یک فلزهای تولید شده در نمونه‌های کربنی، الگوهای XRD برای نمونه‌های MCF-500، MCF-650 و MCF-800 توسط نرم افزار Xpert با استفاده از پایگاه داده ۲۰۱۵ بررسی شد و با استفاده از

ذرات اکسید کبالت نیز در همه نمونه‌ها مشاهده می‌شود. می‌توان بیان کرد با توجه به اینکه در این تحقیق از نمک کبالت (II) کلراید استفاده شده است احتمالاً در اثر واکنش‌های ناخواسته آنیون کلراید، نانو ذرات اکسید کبالت در نمونه‌ها شکل گرفته است. بر اساس مقادیر ذکر شده برای مواد فلزی تولید شده در هر یک از نمونه‌ها، نمونه MCF-650 دارای نانو ذرات  $Co_2$  و  $Co_4$  است که می‌توان بیان نمود در این نمونه کبالت خالص بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر تولید شده است. همچنین با افزایش دمای تجزیه حرارتی از  $650^\circ C$  به  $800^\circ C$  میزان اکسید کبالت شکل گرفته در نمونه MCF-800 نسبت به دو نمونه دیگر بیشتر است. هر یک از تحلیل‌های صورت گرفته در رابطه با نانو ذرات فلزی تولید شده در نمونه‌ها می‌تواند تاثیر بسزایی در خاصیت مغناطیسی نمونه‌های الیاف کربن تولید شده از اسفنج لופا داشته باشد.

### ۳-۳- خواص مغناطیسی الیاف کربن مغناطیسی

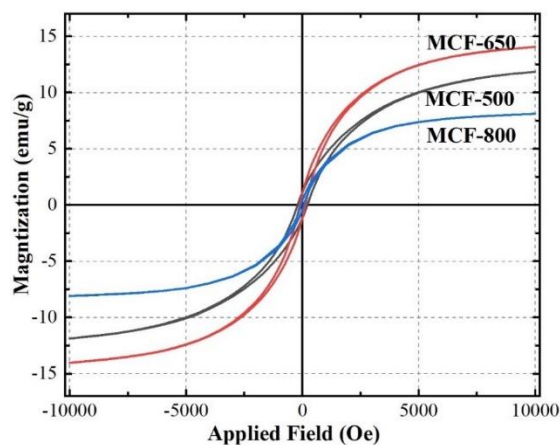
#### اسفنج لופا

خواص مغناطیسی نمونه‌های MCF-500، MCF-650 و MCF-800 به کمک دستگاه مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی و با رسم منحنی پسماند که در شکل ۶ ارائه شده است، قابل اندازه‌گیری است. در هر سه نمونه حلقه پسماند به شکل S در بازه میدانی  $10 \pm kOe$  اشباع شده است. با توجه به نتایج حاصل شده مقدار مغناطیس اشباع برای نمونه‌های MCF-500، MCF-650 و MCF-800 به ترتیب  $11/84 \text{ emu/g}$ ،  $14/06 \text{ emu/g}$  و  $8/11 \text{ emu/g}$  به

می‌شود که حضور اکسید کبالت ( $Co_4O_4$ ) به میزان  $52/19\%$  در نمونه MCF-650 را تأیید می‌کند. الگو XRD برای نمونه MCF-800 نشان می‌دهد که پیک‌های مشخصه مربوط به بلور  $Co_2$  حذف شده است. پیک‌های مربوط به  $Co_4$  در این نمونه مشاهده می‌شود و آنالیز کمی نشان داد که به میزان  $31/2\%$  بلور  $Co_4$  در نمونه MCF-800 وجود دارد. همچنین پیک‌های مشخصه مربوط به اکسید کبالت ( $Co_4O_4$ ) ظاهر شده است و به مقدار  $42/9\%$  نانو ذرات اکسید کبالت ( $Co_4O_4$ ) در نمونه MCF-800 وجود دارد. علاوه بر دو ماده فلزی تولید شده در این نمونه، پیک‌های مربوط به پراش اشعه ایکس از صفحات  $(022)$ ،  $(151)$  و  $(044)$  کبالت مکعبی (کد مرجع: ۵۸۸۸-۹۶-۹۰) نیز مشاهده می‌شود که بیانگر تولید نانو ذرات فلزی اکسید کبالت با فرمول شیمیایی ( $Co_{24}O_{32}$ ) به میزان  $25/8\%$  در نمونه MCF-800 است.

با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان بیان کرد که در اثر تجزیه حرارتی نمک کبالت (II) کلراید تحت سه دمای مختلف، چهار نوع ماده فلزی ( $Co_2$ ،  $Co_4$ ،  $Co_4O_4$  و  $Co_{24}O_{32}$ ) در نمونه‌های الیاف کربن اسفنج لופا تولید شده است که وجود این نانو ذرات در هر یک از نمونه‌ها باعث ایجاد خاصیت مغناطیسی در آن‌ها می‌شود. بطور کلی هدف از تجزیه حرارتی نمک کبالت، تولید نانو ذرات کبالت خالص بر روی نمونه است که این امر بستگی به نمک کبالت مورد استفاده دارد. همانطور که از نتایج به دست آمد، علاوه بر تولید نانو ذرات کبالت خالص به شکل‌های  $Co_4$  و  $Co_2$  در نمونه‌های MCF-500 و MCF-650، نانو

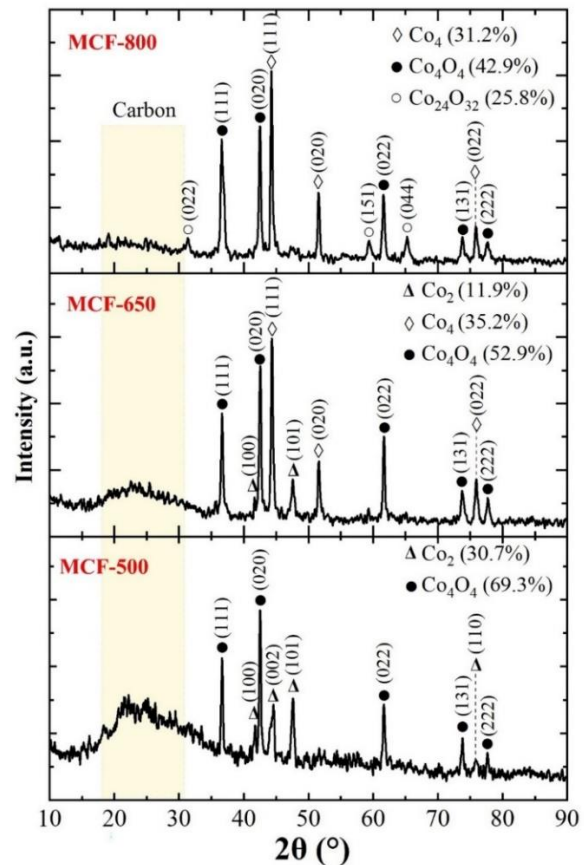
شده است میزان اکسید کبالت در نمونه افزایش یابد و منجر به کاهش خاصیت مغناطیسی در نمونه MCF-800 شود. بیشترین مقدار خاصیت مغناطیسی مربوط به نمونه MCF-650 است. همانطور که در تحلیل XRD ذکر شد نمونه MCF-650 دارای نانو ذرات کبالت خالص به فرم های  $\text{Co}_2\text{O}_3$  و  $\text{Co}_3\text{O}_4$  است که باعث می شود خاصیت مغناطیسی بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر داشته باشد.



شکل ۶- نتایج VSM الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا برای نمونه های مختلف: MCF-800، MCF-650، MCF-500

بنابراین، می توان بیان نمود که جهت تولید الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا با استفاده از تجزیه حرارتی نمک کبالت (II) کلراید دمای مناسب تر و بهینه برای تولید نانو ذرات کبالت خالص بر روی سطح ماده کربنی و دستیابی به بیشترین و مطلوب ترین خاصیت مغناطیسی انجام عملیات حرارتی تحت دمای  $650^\circ\text{C}$  است. به طور کلی استفاده از کبالت (II) کلراید جهت تولید نانو ذرات کبالت طی عملیات تجزیه حرارتی در فرایند کربونیزاسیون به منظور ایجاد خاصیت مغناطیسی در الیاف کربن اسفنج لופا نتایج مطلوب و خواص مغناطیسی قابل قبولی را از خود نشان داد که در نهایت می توان عملیات جذب مواد

دست آمد. اعداد گزارش شده نشان می دهند که نمونه های الیاف کربن اسفنج لופا به خوبی توسط نانو ذرات فلزی کبالت و اکسیدهای آن تثبیت شده در ساختار آن ها مغناطیسی شده اند.



شکل ۵- الگو XRD الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا برای نمونه های مختلف: MCF-800، MCF-650، MCF-500

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات مختلف هرچه مقدار اکسید کبالت در نمونه مغناطیسی شده بیشتر باشد در نتیجه خاصیت مغناطیسی کمتری حاصل می شود [۳۸]. بنابراین با توجه به نتایج آزمون XRD برای نمونه های الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لופا و همچنین منحنی های پسماند حاصل از آزمون VSM مشاهده می شود که نمونه MCF-800 دارای کمترین مقدار مغناطش اشباع است و افزایش دمای کربونیزاسیون از  $650^\circ\text{C}$  به  $800^\circ\text{C}$  باعث

از الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لوفامی شود و علاوه بر این کربونیزاسیون در دماهای بالا باعث کاهش جرم بسیار زیاد در نمونه کربن مغناطیسی نهایی می‌شود همچنین ساختار نهایی نمونه کربنی در دماهای بالا بسیار شکننده‌تر و ناپایدارتر است. به طور کلی عوامل ذکر شده باعث می‌شود که نمونه MCF-800 که تحت دمای  $800^{\circ}\text{C}$  کربونیزه شده است مقدار ظرفیت جذب روغن موتور کمتری نسبت به دو نمونه دیگر از خود نشان دهد. تحلیل انجام شده در این زمینه با نتایج به دست آمده از عملکرد جذب ماده کربن مغناطیسی تولید شده توسط دای<sup>۱</sup> و همکارانش [۳۹] نیز مطابقت خوبی دارد. با این حال هر سه نمونه الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لوفا با توجه به خاصیت فوق آبریزی و وجود کلنال‌های توخالی در هر یک از الیاف کربن اسفنج لوفا که در اثر پیش‌عملیات اسیدی تشکیل شده‌اند و در نهایت با توجه به خاصیت مغناطیسی ایجاد شده در آن‌ها، ظرفیت جذب روغن موتور قابل قبول و مطلوبی را از خود نشان داده‌اند. با مشاهده نمودارهای به دست آمده هر سه نمونه طی مدت زمان حدود ۱۲۰ ثانیه به حالت تعادلی جذب رسیده‌اند که جذب سریع روغن توسط نمونه‌های MCF را به خوبی نشان می‌دهد. در این حالت اگرچه ساختار اسفنجی و شبکه‌ای الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لوفا ممکن است تحت دماهای بالا کربونیزاسیون دچار مشکل شود و نقص ساختاری در آن‌ها ایجاد شود اما وجود خاصیت مغناطیسی در هر یک از نمونه‌ها کمک می‌کند تا جاذب کربن

نفی از بسترهای آبی را به شدت تسریع بخشید و بازیابی جاذب کربنی اسفنج لوفا از این طریق بسیار آسان و بهینه است.

### ۳-۴- بررسی جذب روغن توسط الیاف کربن

#### مغناطیسی اسفنج لوفا

جهت بررسی میزان جذب تعادلی روغن توسط نمونه‌های الیاف کربن مغناطیسی شده با استفاده از نمک کبالت (II) کلراید که تحت سه دمای مختلف کربونیزه شده‌اند، نتایج حاصل از آزمون جذب روغن برای نمونه‌های MCF-500، MCF-650 و MCF-800 طی مدت زمان تماس ۲۰ دقیقه به صورت گراف‌های رسم شده در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ثبت شده مقدار جذب تعادلی و حداکثر میزان جذب روغن موتور پس از گذشت مدت زمان ۲۰ دقیقه برای نمونه MCF-500 برابر با  $0.21 \text{ g/g}$ ،  $0.32/18 \pm$  برای نمونه MCF-650 برابر با  $0.32 \text{ g/g}$  و  $0.39/20 \pm$  برای نمونه MCF-800 برابر با  $0.39 \text{ g/g}$  به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده نمونه MCF-800 ظرفیت جذب روغن کمتری نسبت به دو نمونه دیگر از خود نشان داده است و نمونه MCF-500 دارای بیشترین ظرفیت جذب روغن موتور است. بر مبنای نتایج حاصل از مطالعات مختلف و همچنین با توجه به تصاویر FESEM از نمونه‌های الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لوفا، انجام عملیات حرارتی در دماهای بالا باعث افزایش حجم جمع‌شدگی ساختار کانال‌های توخالی موجود در هر یک

<sup>۱</sup> Dai

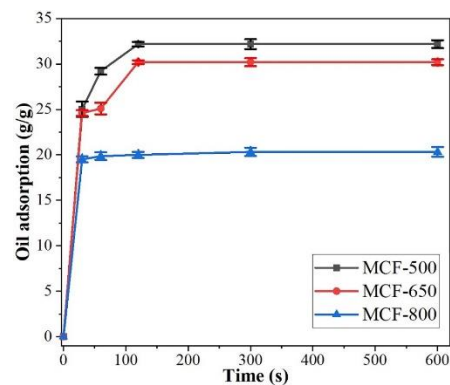
بین رفتن ساختار سه بعدی و شبکه‌ای اسفنج لوف کربنی  
حین فرآیند جذب روغن، می‌توان با ایجاد خاصیت  
مغناطیسی در آن همواره فرآیند جذب را به خوبی ادامه  
داد و حتی می‌توان سرعت بازیابی جاذب را نسبت به قبل  
به شدت افزایش داد.



شکل ۸- تصاویر قطره آب بر روی سطح جاذب کربن  
مغناطیسی اسفنج لوف و جذب آن توسط آهن‌ربا

در شکل ۹ فرآیند جذب لکه روغن موجود در سطح آب  
توسط الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لوف که به شکل پودر  
در آمده‌اند، مشاهده می‌شود. در نهایت به علت خاصیت  
مغناطیسی موجود در الیاف کربن اسفنج لوف، جاذب  
کربنی بعد از جذب روغن موجود در سطح آب توسط  
آهن‌ربا از محیط آبی جدا می‌شود. همانطور که در شکل ۹  
(a) مشاهده می‌شود در ابتدا روغن رنگ شده به شکل یک  
لایه فیلم مانند روی سطح آب قرار گرفته است. تصویر ۹  
(b) نشان می‌دهد که الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لوف  
پس از پودر شدن روی سطح لایه روغن قرار می‌گیرند و  
داخل آب نفوذ نمی‌کند که نشان دهنده خاصیت فوق  
آبگریزی / فوق روغن دوستی این ساختارهاست. باتوجه به  
تصویر ۹ (c) بعد از مدت زمان کوتاهی مشاهده می‌شود

مغناطیسی به وسیله آهن‌ربا از محیط روغنی به راحتی  
جدا شده و فرآیند جذب روغن با مشکل مواجه نشود.



شکل ۷- ظرفیت جذب روغن توسط الیاف کربن مغناطیسی  
اسفنج لوف در دمای مختلف کربونیزاسیون: MCF-500،  
MCF-650 و MCF-800

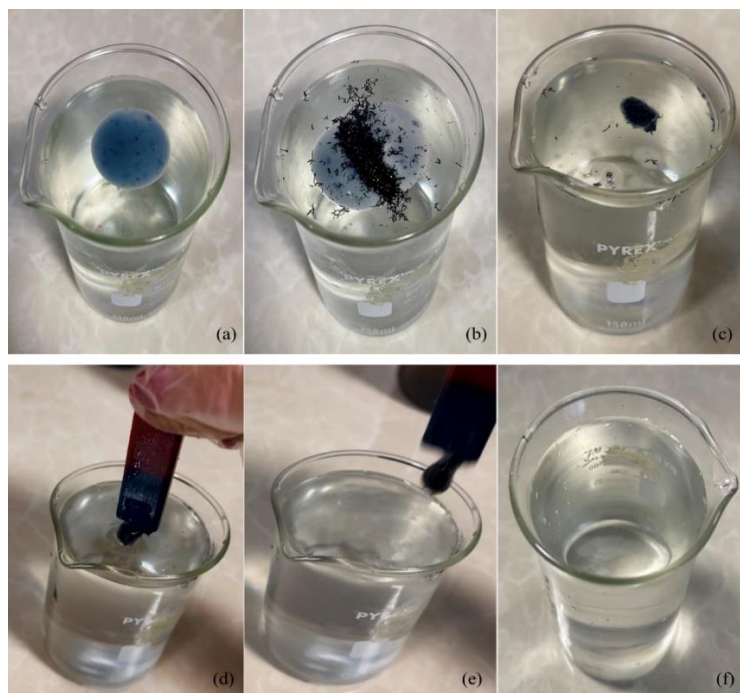
### ۳-۵- جداسازی روغن از آب توسط الیاف کربن

#### مغناطیسی اسفنج لوف

شکل ۸ نمایانگر خاصیت فوق آبگریزی الیاف کربن  
مغناطیسی شده اسفنج لوف است. همانطور که در تصاویر  
واضح است قطره آب پس از چکیده شدن بر روی سطح  
نمونه پودر شده از الیاف کربن مغناطیسی اسفنج لوف به  
شکل کاملاً کروی قرار گرفته است که ماهیت فوق آبگریز  
بودن و فوق روغن دوست بودن نمونه را به خوبی تایید  
می‌کند. علاوه بر این نمونه الیاف کربن مغناطیسی اسفنج  
لوف که به شکل پودر شده در آمدند به خوبی توسط  
آهن‌ربا جذب شده‌اند. وجود خاصیت مغناطیسی در کنار  
خاصیت فوق آبگریزی و همچنین ظرفیت جذب تعادلی  
مناسب و قابل قبول باعث می‌شود الیاف کربن مغناطیسی  
اسفنج لوف که در این تحقیق تولید شدند به یک جاذب  
کارآمد و ویژه جهت حذف مواد نفتی از بسترهای آبی  
تبدیل شوند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهند در صورت از

کربن مغناطیسی شده اسفنج لופا صورت گرفته است. تصاویر ثبت شده و بررسی نتایج نشان می‌دهد که جاذب کربنی تولید شده در این تحقیق بعد از جذب مواد نفتی از محیط آبی با ایجاد خاصیت مغناطیسی در آن و اعمال میدان مغناطیسی می‌تواند به راحتی از محیط جدا شده و بازیابی شود. همچنین زمانی که غلظت آلاینده‌های نفتی در محیط آبی زیاد باشد پودر جاذب کربن مغناطیسی شده اسفنج لופا می‌تواند طی مدت زمان کوتاهی بستر نفتی و روغنی را از روی سطح آب جمع کند و در نهایت به سرعت توسط میدان مغناطیسی از محیط جدا شود.

که الیاف کربن مغناطیسی پودر شده، به علت ماهیت فوق روغن دوستی خود لکه روغن را از روی سطح آب جمع کرده و به شکل یک گلوله در آمده است. در نهایت، کل لایه‌ی روغن توسط جاذب کربنی مغناطیسی حاصل از پودر اسفنج لופا جمع‌آوری شد، همان‌طور که در تصاویر ۹ (d) و ۹ (e) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ (f) مشخص است جاذب کربنی اسفنج لופا بعد از جذب کامل لکه روغن به علت خاصیت مغناطیسی موجود در آن به راحتی توسط آهن ربا از سطح آب جدا شده و هیچ گونه اثری از آن باقی نمانده است. در نتیجه پاک‌سازی آب از لکه روغن به راحتی و با سرعت ایده‌آل توسط الیاف



شکل ۹- فرآیند جداسازی لکه روغن از سطح آب توسط جاذب کربن مغناطیسی اسفنج لופا

شده می‌توان دریافت جاذب تولید شده در این تحقیق برای انواع روغن‌ها ظرفیت جذب بیشتری نسبت به نمونه‌های گزارش شده در منابع قبلی نشان داده است، این موضوع بیانگر بهبود کارایی و توانایی بالاتر در حذف آلاینده‌های

مقایسه‌ای از قابلیت جذب روغن چندین جاذب بر پایه اسفنج لופا در تحقیقات مختلف با الیاف کربن مغناطیسی شده اسفنج لופا تولید شده در تحقیق حاضر در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به جمع‌بندی نتایج حاصل

محیط آبی را فراهم کرده است. این ویژگی در مقایسه با برخی جاذب‌های قبلی که فاقد خاصیت مغناطیسی بودند، یک مزیت کلیدی محسوب می‌شود. پژوهش حاضر نشان داده که جاذب تولیدی می‌تواند برای انواع مختلف روغن‌ها و آلاینده‌های نفتی به کار رود، در حالی که برخی مطالعات گذشته فقط روی یک نوع روغن خاص تمرکز داشتند. ساختار منحصر به فرد سه بعدی اسفنج لופا تا پایان مراحل جذب به خوبی پایدار است و به عملکرد جذب بهتر روغن کمک کرده است. همچنین الیاف کربن مغناطیسی تولید شده به دلیل خاصیت مغناطیسی به راحتی با یک میدان مغناطیسی خارجی از آب خارج شده و موجب آلودگی ثانویه نمی‌شود.

نفی است. در کارهای گذشته بیشتر از جاذب‌های مغناطیسی متداول مانند  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  یا ترکیبات مشابه استفاده شده بود. پژوهش‌های لופا/گرافن بیشتر بر افزایش سطح ویژه و رسانایی تمرکز داشتند، اما هزینه بالا و بازیابی دشوار محدودیت اصلی آن‌هاست. پژوهش‌های لופا/اکسیدهای فلزی توانستند پایداری و فعالیت شیمیایی را بهبود دهند، اما خاصیت مغناطیسی قوی برای جداسازی سریع نداشتند. در این پژوهش، استفاده از لופا به‌عنوان یک چارچوب طبیعی و زیست‌پایه، علاوه بر کاهش هزینه، باعث ایجاد ساختار متخلخل و سبک شده که ظرفیت جذب را افزایش داده است. افزودن کبالت خاصیت مغناطیسی قوی‌تری ایجاد کرده و امکان جداسازی سریع جاذب از

جدول ۱- مقایسه نتایج جذب روغن نمونه‌های مبتنی بر اسفنج لופا با نمونه‌های کربن مغناطیسی تولید شده

مرجع	ظرفیت جذب (g/g)	ماده جذب شونده	جاذب تولید شده از اسفنج لופا
[40]	5 - 50	روغن موتور	ایروزل کربن
[28]	23.1	روغن موتور	الیاف کربن اسفنجی
[41]	47.6 - 86.8	روغن پمپ، گازوئیل، تلوئین، اتانول، هگزان، استون (ترکیبات با گرانشی پایین)	اسفنج لופا/ گرافن / نانوذرات $\text{CuFe}_2\text{O}_4$
[42]	6 - 13	تری کلرومتان، اتیل استات، کلروفرم، پارافین، روغن زیتون	اسفنج لופا پوشش دهی شده با متیل تری کلروسیلان
[43]	11.92	نفت خام	اسفنج لופا/ گرافن
[44]	12 - 15	روغن موتور، روغن گیاهی	اسفنج لופا/ استتاریک اسید
تحقیق حاضر	$32.18 \pm 0.21$	روغن موتور	الیاف کربن مغناطیسی

$80^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به جاذب مغناطیسی تبدیل گردید. انتخاب لופا به دلیل ساختار شبکه‌ای و متخلخل آن، علاوه بر کاهش هزینه و استفاده از ضایعات طبیعی، امکان ایجاد جاذب‌هایی با سطح ویژه بالا و قابلیت بازیابی آسان را فراهم می‌کند. اهمیت این روش در آن است که می‌تواند راهکاری پایدار و کارآمد برای مقابله با نشت مواد نفتی در

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از اسفنج طبیعی لופا به‌عنوان یک پیش‌ماده زیستی و مقرون‌به‌صرفه برای تولید الیاف کربن مغناطیسی سه بعدی استفاده شد. لופا پس از پیش عملیات اسیدی با اسید فسفریک و کربونیزاسیون، در حضور نمک کبالت کلراید و طی تجزیه حرارتی در دماهای  $50^\circ\text{C}$ ،  $65^\circ\text{C}$  و

در کنار خاصیت فوق آب‌گریزی، امکان جذب مؤثر مواد نفتی از سطح آب و بازیابی سریع و آسان جاذب را پس از فرآیند جذب فراهم ساخت. بررسی‌ها نشان داد افزایش دمای تجزیه حرارتی موجب افزایش تشکیل اکسید کبالت و در نتیجه کاهش خاصیت مغناطیسی می‌شود؛ بنابراین دمای  $650^{\circ}\text{C}$  به‌عنوان شرایط بهینه برای دستیابی به بهترین خاصیت مغناطیسی تعیین گردید.

#### ۵- مراجع

- [1] Adeyanju, C. A., Ogunniyi, S., Ighalo, J. O., Adeniyi, A. G., and Abdulkareem, S. A., A review on Luffa fibres and their polymer composites. *Journal of Materials Science*, 56 (4), pp. 2797-2813, 2021, doi: 10.1007/s10853-020-05432-6.
- [2] Kamran, M. J., Jayamani, E., Heng, S. K., and Wong, Y. C., A review: Surface treatments, production techniques, mechanical properties and characteristics of Luffa cylindrica bio composites. *Journal of Industrial Textiles*, 51 (1\_suppl), pp. 215S-245S, 2022, doi: 10.1177/1528083720984094.
- [3] Song, D., Wang, Q., Han, H., Lou, Z., and Li, Y., Biomass-derived carbon heterostructure composites modified with magnetic iron oxide for excellent EMW-absorbing materials. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 697, pp. 134370, 2024, doi: 10.1016/j.colsurfa.2024.134370.
- [4] Duraisamy, N., Shenniagirivalasu Kandasamy, K., Dhandapani, E., Kandiah, K., Panchu, S. J., and Swart, H. C., 3D Porous Activated Carbon Network Derived from Luffa Sponge for Sustainable High-Performance Supercapacitors. *ChemNanoMat*, 11 (7), pp. e202500147, 2025, doi: 10.1002/cnma.202500147.
- [5] Chen, Y. et al., In-depth analysis of the structure and properties of two varieties of natural luffa sponge fibers. *Materials*, 10 (5), pp. 479, 2017, doi: 10.3390/ma10050479.
- [6] Thomas, S. A., Cherusseri, J., and Rajendran, D. N., Loofah sponge: a sustainable material for wastewater desalination. *RSC*

محیط‌های آبی به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی ارائه دهد. نتایج نشان داد شکل سه‌بعدی منحصر به فرد اسفنج لوفاف پس از پیش عملیات اسیدی و کربونیزاسیون به‌خوبی حفظ شد و نمونه‌ها دچار جمع‌شدگی قابل‌توجهی نشدند. همچنین، تجزیه حرارتی نمک کبالت (II) کلراید منجر به تشکیل نانوذرات خالص کبالت ( $\text{Co}_2$  و  $\text{Co}_3$ ) و اکسید کبالت در سطح الیاف کربنی شد که خاصیت مغناطیسی مطلوبی ایجاد کرد. این ویژگی

Sustainability, pp, 2025, doi: 10.1039/D5SU00043B.

[7] Ouyang, D., Lei, X., and Zheng, H., Recent advances in biomass-based materials for oil spill cleanup. *Nanomaterials*, 13 (3), pp. 620, 2023, doi: 10.3390/nano13030620.

[8] Xu, R. et al., Abundant porous biochar derived from luffa vine for removal of methylene blue: Selective adsorption and mechanistic studies. *Industrial Crops and Products*, 219, pp. 119114, 2024, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.119114.

[9] Chidambaram, B., Sengodan, P., Jeon, S., and Srituravanich, W., Utilizing luffa sponge-derived porous activated carbon as a sustainable environmental bio-mass for renewable energy storage applications. *Biomass and Bioenergy*, 194, pp. 107667, 2025, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.107667.

[10] Wahi, R., Chuah, L. A., Choong, T. S. Y., Ngaini, Z., and Nourouzi, M. M., Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview. *Separation and Purification Technology*, 113, pp. 51-63, 2013, doi: 10.1016/j.seppur.2013.04.015.

[11] Santander, M., Rodrigues, R., and Rubio, J., Modified jet flotation in oil (petroleum) emulsion/water separations. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 375 (1-3), pp. 237-244, 2011, doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.12.027.

[12] Chen, L. et al., Microorganisms immobilized hydroxyethyl cellulose/luffa composite sponge for selective adsorption and biodegradation of oils in wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, pp. 133477, 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133477.

- [13] Al-Najar, J. A. et al., Cost-effective natural adsorbents for remediation of oil-contaminated water. *Water*, 15 (6), pp. 1186, 2023, doi: 10.3390/w15061186.
- [14] Srinivasan, A. and Viraraghavan, T., Oil removal from water using biomaterials. *Bioresource technology*, 101 (17), pp. 6594-6600, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.079.
- [15] Bhatia, S., Othman, Z., and Ahmad, A. L., Coagulation-flocculation process for POME treatment using *Moringa oleifera* seeds extract: optimization studies. *Chemical Engineering Journal*, 133 (1-3), pp. 205-212, 2007, doi: 10.1016/j.cej.2007.01.034.
- [16] Emenike, E. C. et al., Extraction of Various Crude Oil Fractions from Water by Sorption: An Overview. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236 (9), pp. 608, 2025, doi: 10.1007/s11270-025-08236-z.
- [17] Zaed, M., Cherusseri, J., Saidur, R., Tan, K., and Pandey, A., Synthesis and characterization of hierarchical Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene/graphitic-carbon nitride/activated carbon@ luffa sponge composite for enhanced water desalination. *Open Ceramics*, 19, pp. 100645, 2024, doi: 10.1016/j.oceram.2024.100645.
- [18] Sankaranarayanan, S., Lakshmi, D. S., Vivekanandhan, S., and Ngamcharussrivichai, C., Biocarbons as emerging and sustainable hydrophobic/oleophilic sorbent materials for oil/water separation. *Sustainable Materials and Technologies*, 28, pp. e00268, 2021, doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00268.
- [19] Dan, H. et al., Graphene-wrapped loofah sponge with tunable surface wettability for solar-driven oil and freshwater recovery. *Separation and Purification Technology*, pp. 133365, 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2025.133365.
- [20] Wang, B., Karthikeyan, R., Lu, X.-Y., Xuan, J., and Leung, M. K., Hollow carbon fibers derived from natural cotton as effective sorbents for oil spill cleanup. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52 (51), pp. 18251-18261, 2013, doi: 10.1021/ie402371n.
- [21] Yang, S., Chen, L., Mu, L., Hao, B., and Ma, P.-C., Low cost carbon fiber aerogel derived from bamboo for the adsorption of oils and organic solvents with excellent performances. *RSC Advances*, 5 (48), pp. 38470-38478, 2015, doi: 10.1039/c5ra03701h.
- [22] Liu, Y., Peng, Y., Zhang, T., Qiu, F., and Yuan, D., Superhydrophobic, ultralight and flexible biomass carbon aerogels derived from sisal fibers for highly efficient oil-water separation. *Cellulose*, 25 (5), pp. 3067-3078, 2018, doi: 10.1007/s10570-018-1774-7.
- [23] Raj, K. G. and Joy, P. A., Coconut shell based activated carbon-iron oxide magnetic nanocomposite for fast and efficient removal of oil spills. *Journal of environmental chemical engineering*, 3 (3), pp. 2068-2075, 2015, doi: 10.1016/j.jece.2015.04.028.
- [24] Mahmoodi, N., Basic Dyes Removal from Aqueous Media by Nickel-Zinc Ferrite Magnetic Nanoparticles. *Journal of Textile Science and Technology*, 3 (1), pp. 29-36, 2013, doi: 20.1001.1.21517162.1392.3.1.5.7.
- [25] Zaersabet, H., Valipour, P., and Tayebi, H.-A., Adsorption of Reactive Red 198 on Silicate Magnetic Nano Structure: Adsorption Studies and Modeling. *Journal of Textile Science and Technology*, 11 (3), pp. 1-17, 2022, doi: 20.1001.1.21517162.1401.11.3.1.7.
- [26] He, S. et al., Design of stable superhydrophobic/super-oleophilic 3D carbon fiber felt decorated with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles: Facial strategy, magnetic drive and continuous oil/water separation in harsh environments. *Applied Surface Science*, 494, pp. 1072-1082, 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.07.258.
- [27] Shokry, H., Elkady, M., and Salama, E., Eco-friendly magnetic activated carbon nano-hybrid for facile oil spills separation. *Scientific Reports*, 10 (1), pp. 10265, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-67231-y.
- [28] Mousavi, F. S. and Nasouri, K., Novel 3D carbon fibers derived from Luffa wastes for oil/water separation. *Environmental Pollution*, 320, pp. 121093, 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121093.
- [29] Liu, J. et al., A high-efficiency oil/water emulsion separation sponge based on sodium alginate-loofah composite gels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 306, pp. 141395, 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.141395.
- [30] Zhang, Z., Liu, H., and Qiao, W., Reduced graphene-based superhydrophobic sponges modified by hexadecyltrimethoxysilane for oil adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 589, pp. 124433, 2020, doi: 10.1016/j.colsurfa.2020.124433.
- [31] Ranjithkumar, V., Sangeetha, S., and Vairam, S., Synthesis of magnetic activated carbon/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite and its

- application in the removal of acid yellow 17 dye from water. *Journal of hazardous materials*, 273, pp. 127-135, 2014, doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.03.034.
- [32] Zhang, S., Zhong, L., Yang, H., Tang, A., and Zuo, X., Magnetic carbon-coated palygorskite loaded with cobalt nanoparticles for Congo Red removal from waters. *Applied Clay Science*, 198, pp. 105856, 2020, doi: 10.1016/j.clay.2020.105856.
- [33] Xiong, W. et al., Metal-organic frameworks derived magnetic carbon- $\alpha$ Fe/Fe<sub>3</sub>C composites as a highly effective adsorbent for tetracycline removal from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 374, pp. 91-99, 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.05.164.
- [34] Chen, C. et al., Single-step synthesis of eucalyptus sawdust magnetic activated carbon and its adsorption behavior for methylene blue. *RSC advances*, 9 (39), pp. 22248-22262, 2019, doi: 10.1039/c9ra03490k.
- [35] Mohan, D., Sarswat, A., Singh, V. K., Alexandre-Franco, M., and Pittman Jr, C. U., Development of magnetic activated carbon from almond shells for trinitrophenol removal from water. *Chemical Engineering Journal*, 172 (2-3), pp. 1111-1125, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.06.054.
- [36] Salavati-Niasari, M., Davar, F., Mazaheri, M., and Shaterian, M., Preparation of cobalt nanoparticles from [bis (salicylidene) cobalt (II)]-oleylamine complex by thermal decomposition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320 (3-4), pp. 575-578, 2008, doi: 10.1016/j.jmmm.2007.07.020.
- [37] Kobayashi, Y., Horie, M., Konno, M., Rodríguez-González, B., and Liz-Marzán, L. M., Preparation and properties of silica-coated cobalt nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107 (30), pp. 7420-7425, 2003, doi: 10.1021/jp027759c.
- [38] Kahani, S. A. and Khedmati, M., Mechanochemical preparation of cobalt nanoparticles through a novel intramolecular reaction in cobalt (II) complexes. *Journal of Nanomaterials*, 2015 (1), pp. 246254, 2015, doi: 10.1155/2015/246254.
- [39] Dai, J. et al., 3D macroscopic superhydrophobic magnetic porous carbon aerogel converted from biorenewable popcorn for selective oil-water separation. *Materials & Design*, 139, pp. 122-131, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.001.
- [40] Yang, H., Sun, J., Zhang, Y., Xue, Q., and Xia, S., Preparation of hydrophobic carbon aerogel using cellulose extracted from luffa sponge for adsorption of diesel oil. *Ceramics International*, 47 (23), pp. 33827-33834, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.08.294.
- [41] Liu, Z., Gao, B., Zhao, P., Fu, H., and Kamali, A. R., Magnetic luffa/graphene/CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> sponge for efficient oil/water separation. *Separation and Purification Technology*, 337, pp. 126347, 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2024.126347.
- [42] Zhang, F., Wang, C., Zhou, J., Wu, J., Gu, H., and Lin, W., Hydrophobic sponge derived from natural loofah for efficient oil/water separation. *Separation and Purification Technology*, 330, pp. 125519, 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2023.125519.
- [43] Heidari, M. K., Fouladi, M., Sooreh, H. A., and Tavakoli, O., Superhydrophobic and super-oleophilic natural sponge sorbent for crude oil/water separation. *Journal of Water Process Engineering*, 48, pp. 102783, 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102783.
- [44] Alvarado-Gómez, E., Tapia, J. I., and Encinas, A., A sustainable hydrophobic luffa sponge for efficient removal of oils from water. *Sustainable Materials and Technologies*, 28, pp. e00273, 2021, doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00273.