



Investigation of oil spill adsorption capacity from water by modified cotton-based mesoporous adsorbents using BJH analysis

Saeed Zibaei¹ | Seyed Mostafa Tabatabaei Ghomsheh^{2✉} |
Masoumeh Mirzaei Ghale Ghobadi³ | Alireza Azimi⁴

1. Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran. E-mail: s.zibaei@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran. E-mail: sm.tabatabeeghomsheh@gmail.com
3. Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran. E-mail: mirzaei_fateme@yahoo.com
4. Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran. E-mail: alireza_azimi550@yahoo.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 19 December 2024

Received in revised form

22 March 2025

Accepted 18 April 2025

Published online 11 October 2025

Keywords:

Bentonite

Charcoal

Oil pollutants

Water purification

ABSTRACT

Sustainable chemistry and green chemistry are now integral components of environmentally-friendly materials science, pollution adsorption studies, and particularly research on oil pollutants. Mesoporous materials currently play a significant role in water purification, and extensive research is being conducted to analyze and characterize these materials' pore size distribution, from laboratory experiments to industrial applications. The Barrett-Joyner-Halenda (BJH) method is one of the most widely used approaches for this purpose. In this study, we investigated cotton-based sorbents modified with charcoal and bentonite. The results revealed that these sorbents have mesoporous characteristics, and their pore size distribution is significantly correlated with the actual sample's oil contaminant removal efficiency in an aqueous environment. These findings provide valuable insights into the design and optimization of mesoporous sorbents for practical applications. Moreover, the BJH analysis serves as an accurate criterion for oil contaminant adsorption in such systems. This study marks an important step towards the development of cost-effective, eco-friendly methods for oil pollutant purification from water using green mesoporous materials.

Cite this article: Zibaei, S., Tabatabaei Ghomsheh, S. M., Mirzaei Ghale Ghobadi, M., & Azimi, A. (2025). Investigation of oil spill adsorption capacity from water by modified cotton-based mesoporous adsorbents using BJH analysis. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (2), 253-263. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387263.1194>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387263.1194>

Publisher: University of Tehran Press.



بررسی ظرفیت جذب لکه‌های نفتی از آب توسط جاذب‌های مزومتخلخل بر پایه پنبه اصلاح‌شده با تحلیل آنالیز BJH

سعید زیبایی^۱ | سید مصطفی طباطبایی قمشه^۲ | معصومه میرزایی قلعه قبادی^۳ | علیرضا عظیمی^۴

۱. گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه: s.zibaei@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه: sm.tabatabeeghomsheh@gmail.com

۳. گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه: mirzaei_fateme@yahoo.com

۴. گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه: alireza_azimi550@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	پایداری و شیمی سبز اکنون بخش جدایی‌ناپذیری از شیمی محیط زیست، علوم مواد و جاذب‌های آلودگی به‌ویژه آلودگی‌های نفتی هستند. امروزه مواد مزوپوری سهم مهمی در تصفیه آب دارند و مطالعات روش‌های بررسی آن‌ها و ایجاد رابطه میان این مطالعات در آزمایشگاه تا کاربرد در صنعت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آنالیزهای مربوط به سطح و حفره نقش بسیار مهمی در درک خواص مواد به‌عنوان جاذب دارند. در این میان برای مواد مزوپور ایزوترم بی‌جی‌اچ یکی از روش‌های متداول برای تحلیل و تعیین توزیع اندازه منافذ مواد مزومتخلخل است. این روش برای تعیین ویژگی‌های مواد براساس فرایند جذب و دفع گاز در ساختارهای تخلخلی استفاده می‌شود. در این پژوهش که در راستای تحقیقات قبل است، جاذب‌هایی بر پایه پنبه که با چارکل و بنتونیت اصلاح سطحی شده‌اند مورد بررسی قرار گرفتند. ایزوترم‌های این جاذب‌ها نشان داد که در درجه اول خواص حفرات به مواد مزومتخلخل تعلق دارد و در درجه دوم اندازه منافذ کاملاً با میزان حذف نمونه حقیقی آلودگی نفتی در محیط آبی در تعامل است. یافته‌های ما بینش‌های ارزشمندی در زمینه طراحی و بهینه‌سازی جاذب‌های مزومتخلخل برای کاربردهای عملی ارائه می‌دهند و نشان می‌دهند در این سیستم‌ها می‌توان از آنالیز بی‌جی‌اچ به‌عنوان یک معیار دقیق برای جذب آلاینده‌های نفتی استفاده کرد. این مطالعه گامی مهم به سوی توسعه روش‌های مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط زیست برای پاک‌سازی آلودگی از آب با استفاده از مواد مزومتخلخل سبز است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۰۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹	
کلیدواژه‌ها:	
بنتونیت	
چارکل	
آلاینده‌های نفتی	
تصفیه آب	

استناد: زیبایی، سعید؛ طباطبایی قمشه، سید مصطفی؛ میرزایی قلعه قبادی، معصومه و عظیمی، علیرضا (۱۴۰۴). بررسی ظرفیت جذب لکه‌های نفتی از آب توسط جاذب‌های مزومتخلخل بر پایه پنبه اصلاح‌شده با تحلیل آنالیز BJH. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۵ (۲)، ۲۶۳-۲۵۳.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387263.1194>



۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین نقش‌های شیمی در مقابله با چالش پایداری در جامعه مدرن، پیشرفت در روش‌های پایدار در هر دو بخش تحقیقات و تولیدات صنعتی است. این حوزه که به‌عنوان "شیمی سبز" یا "شیمی پایدار" شناخته می‌شود، تلاش‌های چشم‌گیری برای ایجاد آینده‌ای کم‌تر سمی و خطرناک در این زمینه انجام داده است. اهداف شیمی سبز شامل بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش پسماندها و تولید محصولات نوآورانه با مصرف کم‌تر منابع طبیعی است. با طراحی فرایندها و مسیرهای واکنشی جایگزین و توسعه مواد جدید، شیمی سبز تلاش می‌کند تا نیازهای کنونی را با اولویت‌دادن به رفاه نسل‌های آینده تأمین کند (Eilks et al., 2012). انتخاب جاذب‌ها براساس چندین عامل حیاتی انجام می‌شود که شامل دسترسی‌پذیری، هزینه، ظرفیت و سرعت جذب بالا، آب‌گریزی، نگهداری طولانی‌مدت، سهولت در بازیابی روغن، قابلیت استفاده مجدد، قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی، و مقاومت است. این معیارها به‌منظور اطمینان از کارایی و پایداری جاذب‌ها در فرایندهای مختلف، به‌ویژه در حوزه‌های صنعتی و محیط زیستی، در نظر گرفته می‌شوند (Hakeim et al., 2022). به‌تازگی، جاذب‌های مبتنی بر پنبه با تمرکز بر پایداری توسعه یافته‌اند که به‌دلیل ویژگی‌های مطلوب آن‌ها مانند هزینه پایین، سهولت در اصلاح سطح، و منشأ طبیعی موردتوجه قرار گرفته‌اند. این ویژگی‌ها، پنبه را به گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده در کاربردهای مختلف از جمله جذب مواد آلاینده تبدیل کرده و همچنین به‌عنوان یک راه‌کار پایدار در مقایسه با جاذب‌های مصنوعی مطرح می‌کند (Czech et al., 2020; Beleño Cabarcas et al., 2024).

مطالعات نشان داده‌اند که ساقه‌های پنبه، جاذب‌های بسیار مؤثری برای حذف فلزات سنگین هستند. در پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۴)، ویژگی‌های جذب ساقه‌های پنبه اصلاح‌شده با آمونیاک بررسی شد و پتانسیل آن‌ها در جذب فلزات سنگین از محلول‌های آبی تأیید گردید. آن‌ها گزارش دادند که ظرفیت جذب این ساقه‌های پنبه اصلاح‌شده برای نیکل ۱/۲۹ میلی‌گرم بر گرم و برای مس ۲/۸ میلی‌گرم بر گرم است. به‌طور مشابه، کاهرامان و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که استفاده از ساقه‌های پنبه به‌عنوان جاذب می‌تواند نرخ حذف مس را تا حدود ۸۰ درصد افزایش دهد، که در این آزمایش از دوز ۱/۰ گرم و غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد (Kahraman et al., 2008). علاوه بر این، مطالعه‌ای از ما و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که بیوچار^۱ مغناطیسی حاصل از ساقه‌های پنبه دارای ظرفیت جذب حداکثری ۲۰/۰۵ میلی‌گرم بر گرم برای کروم (VI) است. در پژوهش‌های اخیر، نگی و همکاران (۲۰۲۳) نیز ظرفیت‌های حداکثری جذب برای کادمیوم، سرب، و روی را به‌ترتیب ۲/۶۷، ۲/۸۸ و ۲/۱۹ میلی‌گرم بر گرم گزارش کرده‌اند (Nagy et al., 2024). این یافته‌ها، پتانسیل بالای ساقه‌های پنبه را به‌عنوان جاذب‌های مؤثر برای حذف مس و سایر فلزات سنگین از محلول‌های آبی نشان می‌دهند. همچنین، چندین گزارش بر استفاده گسترده از پنبه، زغال‌سنگ و بنتونیت^۲ به‌عنوان جاذب‌های مؤثر برای آلودگی‌های نفتی تأکید دارند. به‌عنوان مثال، میرزایی و همکاران (۲۰۱۶) از الیاف پنبه‌ای که با پودر کربن فعال تیمار شده بودند، استفاده کردند و به ظرفیت جذب چشم‌گیر ۴۰/۲ گرم بر گرم دست یافتند و پس از پنج بار استفاده مجدد، ۹۰ درصد کارایی خود را حفظ کردند (Mirzaei et al., 2021). به‌طور مشابه، لو و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که اتصال ذرات اکسید سیلیسیم^۳ به الیاف پنبه از طریق روش سل-ژل^۴ و سپس اصلاح آن‌ها با تری کلروسیلان اکتادسیل^۵، منجر به تولید یک جاذب فوق‌آب‌گریز برای جذب روغن شد که حتی پس از ده چرخه، ظرفیت جذب بالای خود را حفظ کرد و شش برابر بیش‌تر از پنبه خام روغن جذب کرد (Gupta et al., 2022).

این یافته‌ها نشان می‌دهند که اصلاحات ساده می‌توانند جاذب‌های دوستدار محیط‌زیست تولید کنند که به‌عنوان جایگزین‌های قابل‌قبول برای الیاف مصنوعی و سایر روش‌های پرهزینه پاک‌سازی نشأت روغن عمل کنند. این نوع جاذب‌ها نه‌تنها هزینه‌های مربوط به پاک‌سازی را کاهش می‌دهند، بلکه به کاهش تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از

استفاده از مواد شیمیایی مضر نیز کمک می‌کنند (Silva et al., 2023; Periyasamy et al., 2022). علاوه بر این، بنتونیت و زغال سنگ به‌خاطر ظرفیت‌های بالای جذب، در دسترس بودن و هزینه مؤثرشان به‌عنوان گزینه‌های محبوب برای پاک‌سازی محیط زیست شناخته می‌شوند (Mohammadi et al., 2018). واهب و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که یک ترکیب کم‌هزینه بر پایه فیبروئین ابریشم و بنتونیت به‌طور مؤثری فلزات سنگین مانند سرب^۶، کادمیوم^۷، جیوه^۸ و کروم^۹ را جذب می‌کند. این مطالعه بر قابلیت‌های جاذب‌های طبیعی و ترکیبی، در حذف آلاینده‌های خطرناک تأکید دارد و نشان می‌دهد که این مواد می‌توانند به‌عنوان راه‌کارهای اقتصادی و کارآمد در تصفیه محیط مورد استفاده قرار گیرند (Zia et al., 2019). بنتونیت ارگانوکلاها در جذب روغن از آب عملکرد فوق‌العاده‌ای نشان داده‌اند و و توانسته‌اند به تعادل در کمتر از یک ساعت دست یابند (Emam, 2013). به‌عنوان مثال، دادا و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که از بنتونیت ارگانو برای حذف روغن استفاده کرده و به ظرفیت جذب حداکثری ۹۸ میلی‌گرم بر گرم دست یافته‌اند. زغال‌چوب فعال، که برای اصلاح سطوح پنبه به‌منظور جذب روغن استفاده می‌شود، عملکرد قابل‌قبولی را در شرایط مختلف محیطی نشان داده و تغییرات pH و شوری تأثیر کمی بر آن دارند (Motawie et al., 2014). مواد مزومتخلخل^{۱۰} پتانسیل زیادی برای جذب آلاینده‌ها دارند. جاذب‌های مختلفی از جمله جامدات مزومتخلخل برای حذف روغن باقی‌مانده از آب‌های تولیدشده به‌کار می‌روند. این جاذب‌ها به‌دلیل ساختار تخلخلی خود می‌توانند حجم زیادی از آلاینده‌ها را جذب کنند و در نتیجه به بهبود کیفیت آب و کاهش آلودگی‌های محیطی کمک کنند (Motawie et al., 2012). به‌عنوان مثال، حسین و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که جاذب اکسید هافنیم مزومتخلخل ساخته‌شده از طریق روش سل-ژل، بیش از ۹۹ درصد جذب نفت خام را در غلظت ۳ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر نشان می‌دهد. سرامیک ام اچ او^{۱۱} تهیه‌شده پس از حذف نفت خام با کلسینه کردن در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت شرایط محیطی بازیابی شد (Hussain et al., 2020).

از زمان کشف مواد مزومتخلخل در سال ۱۹۹۲، این مواد توجه زیادی را به خود جلب کرده و به‌طور گسترده‌ای برای کاربردهایی مانند جاذب‌ها، حامل‌ها و کاتالیست‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که ساختار تخلخل این مواد، توانایی بالایی در جذب آلاینده‌ها و ارائه عملکرد بهتر در واکنش‌های کاتالیستی دارد (Kresge et al., 1992; Beck et al., 1992; Mbaraka et al., 2006; Huang et al., 2003; Drese et al., 2009). با این حال، توسعه این مواد به‌طور عمده به ساختارهای مبتنی بر سیلیکا وابسته بوده است که می‌تواند پیشرفت آن‌ها را محدود کند. علاوه بر این، شرایط خاص ساخت و تهیه مورد نیاز برای برخی از مواد مزومتخلخل ممکن است با اهداف پایداری تضاد داشته باشد. بنابراین، گسترش توسعه ترکیب‌هایی با ویژگی‌های مزومتخلخل با استفاده از مواد ساده و شرایط غیرخشن می‌تواند راه‌حلی مقیاس‌پذیر و عملی برای کاربردهای مختلف فراهم کند. ایزوترم بی‌جی‌اچ^{۱۲} یکی از روش‌های متداول برای تحلیل و تعیین توزیع اندازه منافذ مواد مزومتخلخل است. این روش برای تعیین ویژگی‌های مواد براساس فرایند جذب و دفع گاز در ساختارهای تخلخلی استفاده می‌شود و به‌ویژه برای مواد مزوپور با اندازه منافذ بین دو تا ۵۰ نانومتر، مناسب است. ایزوترم بی‌جی‌اچ در دهه ۱۹۵۰ توسط بارت، جوینر و هالندا توسعه یافت و به‌دلیل توانایی آن در محاسبه اندازه و توزیع منافذ در مواد مزومتخلخل، به سرعت مورد توجه قرار گرفت. در ابتدا، این روش بیش‌تر برای تحلیل کاتالیست‌ها و مواد معدنی استفاده می‌شد، اما امروزه در زمینه‌های گسترده‌تری مانند نانوذرات، ژئولیت‌ها و چارچوب‌های فلزی-آلی^{۱۳} کاربرد دارد. هم‌چنین در گزارش‌های به‌روز زیادی از آن برای تخمین و تحلیل رفتار جاذب استفاده شده است (Hasish et al., 2025). به‌عنوان مثال، چارچوب‌های فلزی-آلی مس ترفتالات که با استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق مبتنی بر سوربیتول و کولین کلرید برای حذف متیلن‌بلو سنتز شده و به‌کار گرفته شدند، با این آنالیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Mertsoy et al., 2025). گستردگی استفاده از این آنالیز در مورد انواع مواد جالب توجه است و آن را به تکنیک

مشخصه‌یابی عمومی برای رفتار جاذب تبدیل می‌کند. استفاده از آن برای جاذب‌هایی مبتنی بر پوست برخی میوه‌های طبیعی از آن جمله است (Tolkou et al., 2024).

همان‌گونه که تست‌های مشخصه‌یابی پراش پرتو ایکس^{۱۴}، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^{۱۵}، تجزیه و تحلیل حرارتی^{۱۶} و طیف‌سنجی اشعه ایکس پراکنده انرژی^{۱۷} در پژوهش قبلی ما نشان داد، پنبه‌های پوشش داده‌شده با چارکل^{۱۸} و بنتونایت با موفقیت سنتز شد. همچنین مطالعات سینتیکی جذب نشان دادند برای پنبه چارکل ۷/۷۶ درصد و برای پنبه بدون پوشش، ۵/۴۹ درصد افزایش جذب لکه‌های نفتی را بعد از ۲۰ دقیقه نشان داد. همچنین سینتیک جذب برای پنبه از نفوذ درون ذره‌ای با R^2 معادل ۰/۹۸۷۴، برای پنبه بنتونیت شبه مرتبه دوم R^2 معادل ۰/۹۸۹۴ و برای پنبه چارکل مدل شبه مرتبه اول با R^2 معادل ۰/۹۶۱۱ را نشان داد (Zibaei et al., 2024). این نشان می‌دهد هر مرحله از پوشش‌ها می‌تواند در مکانیسم و راندمان جذب تا مقدار زیادی تفاوت ایجاد کند و همچنین می‌تواند سیستم‌های طبیعی بر پایه شیمی سبز برای حذف آلاینده‌های نفتی ایجاد کند. به‌طور مشخص در ادامه روند پژوهش‌های خود در این پژوهش با آنالیز اختصاصی بی‌جی‌اچ همبستگی نتایج عملی را با این آنالیز نشان دادیم. این وابستگی نشان‌دهنده کارآمد بودن آنالیز بی‌جی‌اچ در این سیستم است و با پتانسیل جذب نمونه رابطه مستقیم دارد.

۲. مواد و روش‌ها

مقدار جرمی یکسان از نمونه‌های از پیش تهیه‌شده پنبه، پنبه‌چارکل و پنبه بنتونیت طبق روش قبلی ما آماده شد. طیف‌های فرابنفش - مرئی^{۱۹} با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر بیوتک سینرژی اچ چهار^{۲۰} برای به‌دست‌آوردن درصد حذف آلودگی نفتی ثبت شد. تعیین توزیع و اندازه منافذ با استفاده از روش بی‌جی‌اچ و دستگاه بی‌ای ال لیزورپ مینی ۲ ساخت ژاپن^{۲۱} انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. راندمان حذف

مقدار ۱ گرم از هر سه جاذب به ظرف آبی حاوی ۴/۶۴ میلی‌گرم در لیتر آلودگی نفتی اضافه شد و تحت چرخش قرار گرفت. این مقادیر ۲۰ برابر به نسبت بهینه‌سازی‌های قبلی بیش‌تر شد. سپس مانند پژوهش قبل، در فواصل پنج دقیقه‌ای تا حداکثر ۲۰ دقیقه، درصد غلظت جذب‌شده با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$\%R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، C_0 و C_t به‌ترتیب نشان‌دهنده مقدار اولیه و نهایی روغن هستند.

همچنین حداکثر جذب در ۳۹۳ نانومتر اندازه‌گیری شد. تفاوت نسبت کاهش شدت طیف یو وی^{۲۲} با مقدار آلودگی نفتی حذف‌شده از محیط آبی میزان ماده جذب‌شده را نشان می‌دهد. موم پنبه ماده مهمی است که ممکن است تعامل غیرقطبی با ترکیبات آلی مانند هیدروکربن‌ها را تسهیل کند. در الیاف پنبه خام، جزء اصلی سلولز است که ۹۰ تا ۹۵ درصد وزن الیاف خشک را تشکیل می‌دهد. اجزای باقیمانده ناخالصی‌هایی مانند مواد پروتئینی، ۳/۱-۰ درصد موم، ۷/۲-۰ درصد پکتین و مقادیر کمی اسیدهای آلی و مواد معدنی مولد خاکستر هستند (Carmody et al., 2007).

با این‌حال، پنبه‌های پوشش داده‌شده به‌دلیل افزایش برهم‌کنش‌های آبریز به نسبت پنبه خام، میل بیش‌تری به جذب نمونه‌ها نشان دادند. این مقدار با درصد زیادی تشابه برای پنبه ۷۳/۱۲ درصد، پنبه‌چارکل ۹۴/۸۷ درصد و برای پنبه‌بنتونیت ۴/۵۹ درصد گزارش شد. تشابه داده‌های این آزمایش در ابعاد بالاتر تکرارپذیری سیستم را نشان می‌دهد که

پتانسیل قابل توجهی را برای افزایش مقیاس ارائه می‌دهد. این مقادیر جذب، راندمان حذف خوبی را از خود نشان می‌دهند. این مقادیر برای جاذب برتر یعنی پنبه چارکل به خوبی با سایر گزارش‌های به روز قابل مقایسه است. شین و همکاران در مطالعه‌ای که الیاف پنبه را با سی هجده^{۲۳} پوشش داده بودند، توانستند ۴۹ درصد میزان جذب پنبه را افزایش دهند (Shin et al., 2020). هم‌چنین چن و همکاران در گزارش دیگری که سطح پنبه را با نانوذرات سیلیس اصلاح کرده بودند، توانستند جذب را از ۴۲ درصد به ۷۱ درصد برسانند. مقادیر به دست آمده نشان می‌دهد چارکل و حتی بنتونیت پوشش‌های قابل قبولی برای بهبود جذب آلودگی نفتی به حساب می‌آیند (Chen et al., 2020).

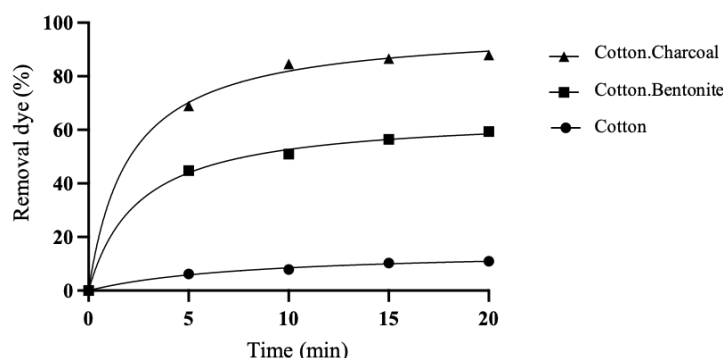


Figure 1. Oil contaminant adsorption percentage over time

۲.۲. ارزیابی BJH

روش بی‌جی‌اچ براساس تئوری تراکم و تخلیه موئینگی^{۲۴} عمل می‌کند. به عبارت دیگر، این روش از تغییرات فشار بخار و حجم جذب شده در فرایند جذب و دفع گاز استفاده می‌کند تا ویژگی‌های منافذ را محاسبه کند. این روش به طور خاص، برای بررسی منافذ در محدوده مزوپورها کاربرد دارد، اما برای منافذ میکروپور و ماکروپور ممکن است دقت کم‌تری داشته باشد. در فرایند تراکم موئینگی، گاز نیتروژن در دمای بسیار پایین وارد ماده شده و درون منافذ تراکم می‌یابد. این تراکم در فشارهای نسبی مختلف اتفاق می‌افتد و حجم جذب شده در هر فشار نسبی ثبت می‌شود پس از تراکم گاز درون منافذ، فرایند تخلیه یا دفع آغاز می‌شود. با کاهش فشار، گاز از درون منافذ تخلیه می‌شود و این تغییرات حجم گاز باعث به دست آوردن اطلاعاتی درباره اندازه و توزیع منافذ می‌شود (Villarroel-Rocha et al., 2014; Hayati-Ashtiani, 2011). ایزوترم بی‌جی‌اچ از معادله کلوین (رابطه ۲) برای محاسبه اندازه منافذ استفاده می‌کند. این معادله رابطه بین فشار نسبی و اندازه منافذ را تعیین می‌کند.

$$r = \frac{2\gamma V}{RT \ln\left(\frac{P_0}{P}\right)} + t \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه، P فشار نسبی گاز جذب شده، P_0 فشار بخار اشباع گاز، T دما، R ثابت گازها، V حجم مولی گاز، γ کشش سطحی گاز نیتروژن، t ضخامت لایه جذب شده و r شعاع موئینگی یا شعاع منفذ می‌باشد (Bardestani et al., 2019). داده‌های دیگر نیز با شعاع منافذ قابل محاسبه هستند. برای انجام تست، ابتدا نمونه‌ای از ماده موردنظر در خلأ و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد کاملاً خشک و آماده شد. سپس نمونه‌ها در دستگاه قرار داده شد و گاز نیتروژن به طور کنترل شده‌ای وارد سیستم شد. سپس حجم گاز جذب شده و دفع شده در فشارهای مختلف ثبت شد. با استفاده از داده‌های جذب و دفع، نمودارهای زیر به دست آمد که رابطه بین فشار نسبی و حجم گاز جذب شده را نشان می‌دهند. هم‌چنین مقادیر مربوط به شعاع، مساحت سطح و حجم منافذ در جدول زیر خلاصه شده‌اند.

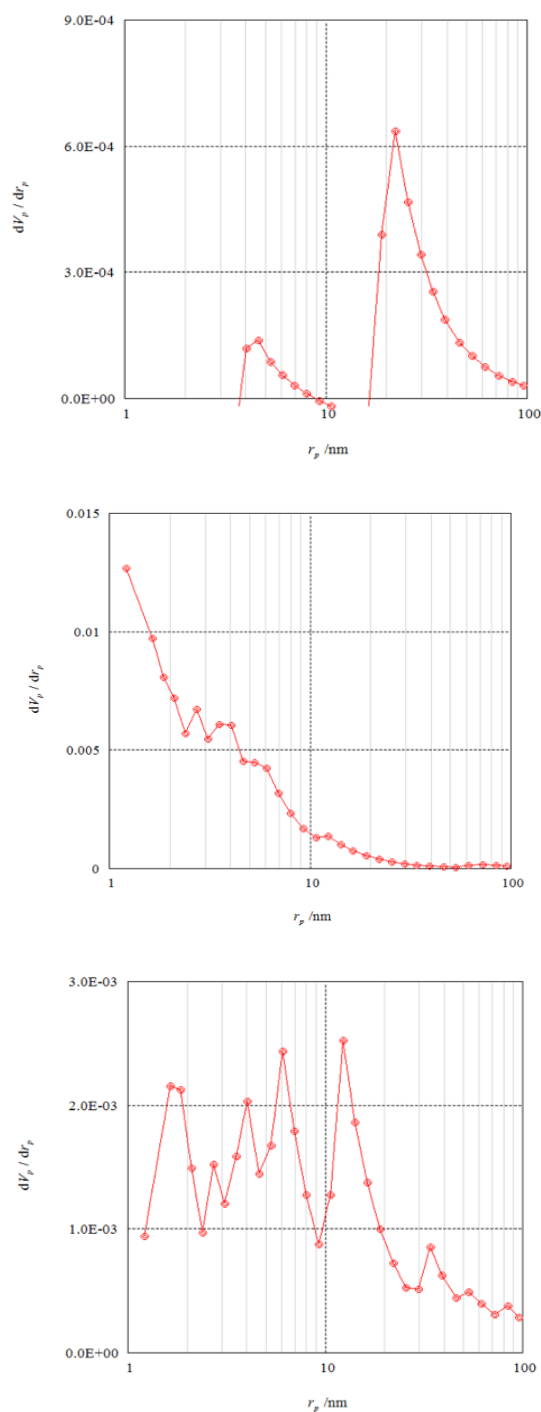


Figure 2. Pore size distribution plots based on the BJH method

Table 1. BJH analysis values for cotton, cotton.bentonite, and cotton.charcoal

Pore-related quantities	Cotton	Cotton .bentonite	Cotton .charcoal
Volume [cm ³ g ⁻¹]	1.2288E-02	6.5948E-02	6.5575E-02
Radius [nm]	22.07	1.21	12.24
Surface area [m ² g ⁻¹]	0.4494	35.368	10.896

محور عمودی نمودارها نشان می‌دهد در هر بازه شعاع مشخص، چه حجمی از منافذ وجود دارد. محور افقی نیز اندازه منافذ را از کوچک به بزرگ نشان می‌دهد. آنچه از این توضیحات بر می‌آید مشخص می‌کند که با افزودن چارکل به سطح پنبه، پراکندگی منافذ کوچک‌تر در نمونه بیش‌تر می‌شود و گستره‌ای از اندازه‌های مختلف را شامل می‌شود. در صورتی که برای پنبه بدون پوشش به‌طور واضح این پراکندگی مشخص نیست. نمودار برای بنتونیت نشان می‌دهد که توزیع اندازه منافذ در نمونه، گسترده و نامتمرکز است و هیچ اندازه مشخصی از منافذ غالب نیست. هم‌چنین شکل سهمی کاهشی نشان‌دهنده توزیع یکنواخت و پراکنده منافذ است. در این حالت، تعداد منافذ به تدریج با افزایش شعاع منفذ کاهش می‌یابد، و منافذ بزرگ‌تر نسبت به منافذ کوچک‌تر کم‌تر هستند. به علاوه، شروع نمودار از مقادیر کوچک شعاع تا ۵۰ نانومتر، می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که نمونه به‌طور عمده میکروپوری است و فقط تعداد کمی منفذ بزرگ‌تر در آن وجود دارد. این امر از روی داده‌های جدول به‌خوبی قابل استنتاج است. همان‌طور که مشخص است، شعاع نمونه پوشش داده‌شده با بنتونیت به سمت میکروپور تمایل دارد، در صورتی که شعاع پنبه و پنبه-چارکل در محدوده مواد مزوپور قرار می‌گیرد. اگرچه مساحت سطح پنبه-بنتونیت مقدار بیش‌تری را شامل می‌شود و حجم حفراتی تقریباً مشابه حجم حفرات پنبه-بنتونیت دارد، اما شعاع کوچک حفرات مانع از ورود مولکول‌های نسبتاً بزرگ آلودگی‌های نفتی می‌گردد که این برداشت، کاملاً با واقعیت مطابقت دارد. نمودار چندقلمه‌ای پنبه چارکل، بیانگر وجود گستره‌ای از حفره‌ها تا شعاع ۱۰۰ نانومتر می‌گردد که نشانگر مزوپور بودن این سیستم می‌باشد. به‌طور کلی، پوشش چارکل روی پنبه منجر به ایجاد ساختاری با حفرات مزو می‌گردد که با توجه به اندازه شعاع و مساحت حفرات مناسب، آن را به جاذب قابل‌قبولی برای آلودگی‌های نفتی تبدیل می‌کند.

به جهت مقایسه نتایج این پژوهش با سایر پژوهش‌ها، در تحقیقی نشان داده شد که درصد حجم مزوپور در بایوچار از ۹۵/۲ درصد به ۳۴/۸ درصد در طی فرایند اصلاح با KOH کاهش یافته است. اگرچه الگوی بی‌جی‌اچ یکسان قبل و بعد از مودیفای به چشم می‌خورد، اما درصد کاهش حجم مزوپور قابل‌توجه است. این در حالی است که این درصد کاهش در پژوهش پیش رو به چشم نمی‌خورد (Lamei et al., 2025). هم‌چنین عملکرد جاذب در برابر نمونه واقعی برای نمونه پوشش داده‌شده با چارکل در مقایسه با طراحی‌های سطحی دیگر مانند استفاده از چارچوب‌های فلز-آلی از ظرفیت جذب بالاتری برخوردار است (Dalapati et al., 2021). این در صورتی است که پوشش چارکل ظرفیت جذب بالاتری را به جای SiO₂ بر پایه پنبه از خود نشان می‌دهد (Wang et al., 2015). این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نه‌تنها چارکل و بنتونیت عوامل طراحی خوبی برای پنبه به‌حساب می‌آیند بلکه تخمین بی‌جی‌اچ از عملکرد جاذب دقیق و جالب توجه است.

تخمین عملکرد جاذب در برابر نمونه واقعی همیشه نمی‌تواند پیش‌بینی دقیقی را ارائه دهد. به‌نظر می‌رسد همواره درصدی خطا در این مدل‌سازی را باید در نظر گرفت. یکی از این محدودیت‌ها که استفاده صرف از آنالیز بی‌جی‌اچ را با مشکل مواجه می‌کند فرض مکانیسمی آن است. این روش بر پایه ایزوترم واجذب است و فرض می‌کند که تخلیه مایع از حفرات مشابه پر شدن آن‌ها در فرایند جذب است، اما در برخی موارد (مانند مواد هیدروفوب یا دارای ساختار پیچیده) این فرض صحیح نیست. علاوه بر این، گاهی انسداد حفرات و همگن نبودن توزیع و اندازه آن‌ها نیز می‌تواند در تخمین رفتار جاذب خطا ایجاد کند. به همین دلیل روش‌های سنتز و آماده‌سازی در این آنالیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با تمام محدودیت‌هایی که ذکر شد بی‌جی‌اچ در برخی مواقع می‌تواند تخمین خوبی از رفتار جاذب در محیط واقعی را نشان دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش سه جاذب از پیش تهیه‌شده پنبه، پنبه-بنتونیت و پنبه-چارکل برای حذف آلودگی نفتی از آب استفاده شدند. بهترین میزان حذف برای پنبه-چارکل با درصد ۸۷/۹۴ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد خوب این جاذب

در مقابل آلودگی نفتی می‌باشد. استفاده از روش بی‌جی‌اچ که ابزاری قدرتمند در تحلیل ساختارهای مزومتخلخل است (با استفاده اندازه، توزیع و حجم منافذ)، نشان داد این جاذب دارای حفرات مزو بیش‌تری می‌باشد. همچنین این آزمون نشان داد جاذب‌هایی با اندازه‌های مزو، در جذب آلودگی نفتی، به نسبت جاذب با اندازه منافذ میکرو (پنبه، بنتونیت) عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. استفاده از جاذب‌های سبز و ارزان، و همچنین توسعه آزمون‌های استاندارد برای آن‌ها می‌تواند منجر به استفاده گسترده‌تر و راحت‌تری از این گونه مواد در صنعت گردد.

۵. پی‌نوشت

1. Biochar
2. Bentonite
3. SiO₂
4. Sol-gel
5. Octadecyltrichlorosilane
6. Pb (II)
7. Cd (II)
8. Hg (II)
9. Cr (VI)
10. Mesoporous materials
11. MHO
12. Barrett-Joyner-Halenda (BJH)
13. Metal-organic frameworks (MOFs)
14. X-ray Diffraction (XRD)
15. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
16. Thermogravimetric analysis (TGA)
17. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
18. Charcoal
19. UV-visible
20. BioTek Synergy H4
21. BEL Belsorp-mini II
22. UV
23. C18
24. Capillary condensation and evaporation

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Bardestani, R., Patience, G. S., & Kaliaguine, S. (2019). Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements—BET, BJH, and DFT. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(11), 2781-2791.
- Beck, J. S., Vartuli, J. C., Roth, W. J., Leonowicz, M. E., Kresge, C. T., Schmitt, K. D., ... & Schlenker, J. (1992). A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates. *Journal of the American Chemical Society*, 114(27), 10834-10843.
- Beleño Cabarcas, M. T., Torres Ramos, R., Valdez Salas, B., González Mendoza, D., Mendoza Gómez, A., Curiel Álvarez, M. A., & Castillo Sáenz, J. R. (2024). Application of Cotton Stalk as an Adsorbent for Copper (II) Ions in Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability*, 16(10), 4291.
- Carmody, O., Frost, R., Xi, Y., & Kokot, S. (2007). Surface characterisation of selected sorbent materials for common hydrocarbon fuels. *Surface Science*, 601(9), 2066-2076.

- Chen, C. H., Saleemi, S., Liu, X. H., Qiu, Y. P., & Xu, F. J. (2020). Hydrophobic lipophilic modified cotton fabric for oil absorption applications. *Journal of natural fibers*.
- Chowdhury, Z. Z., Zain, S. M., Khan, R. A., Arami-Niya, A., & Khalid, K. (2012). Process variables optimization for preparation and characterization of novel adsorbent from lignocellulosic waste. *BioResources*, 7(3).
- Czech, B., Shirvanimoghaddam, K., & Trojanowska, E. (2020). Sorption of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) onto a sustainable cotton based adsorbent. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 18, 100324.
- Dalapati, R., Nandi, S., Gogoi, C., Shome, A., & Biswas, S. (2021). Metal–organic framework (MOF) derived recyclable, superhydrophobic composite of cotton fabrics for the facile removal of oil spills. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(7), 8563-8573.
- Drese, J. H., Choi, S., Lively, R. P., Koros, W. J., Fauth, D. J., Gray, M. L., & Jones, C. W. (2009). Synthesis–structure–property relationships for hyperbranched aminosilica CO₂ adsorbents. *Advanced Functional Materials*, 19(23), 3821-3832.
- Eilks, I., & Rauch, F. (2012). Sustainable development and green chemistry in chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(2), 57-58.
- Emam, E. A. (2013). Modified activated carbon and bentonite used to adsorb petroleum hydrocarbons emulsified in aqueous solution. *American journal of environmental protection*, 2(6), 161-169.
- Gupta, V., Jose, S., Kadam, V., & Shakyawar, D. B. (2022). Sol gel synthesis and application of silica and titania nano particles for the dyeing and UV protection of cotton fabric with madder. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5566-5576.
- Hakeim, O. A., Abdelghaffar, F., & El-Gabry, L. K. (2022). Investigation of Egyptian Chorisia spp. fiber as a natural sorbent for oil spill cleanup. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102134.
- Hashish, S. A., Kishar, E. A., Ahmed, D. A., Ragei, S. M., & Ebrahim, A. A. M. (2025). Development of moringa seed powder-modified slag geopolymers for enhanced mechanical properties and effective dye removal. *Scientific Reports*, 15(1), 9017.
- Hayati-Ashtiani, M. (2011). Characterization of nano-porous bentonite (montmorillonite) particles using FTIR and BET-BJH analyses. *Particle & Particle Systems Characterization*, 28(3-4), 71-76.
- Huang, H. Y., Yang, R. T., Chinn, D., & Munson, C. L. (2003). Amine-grafted MCM-48 and silica xerogel as superior sorbents for acidic gas removal from natural gas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(12), 2427-2433.
- Hussain, F. A., Zamora, J., Ferrer, I. M., Kinyua, M., & Velázquez, J. M. (2020). Adsorption of crude oil from crude oil–water emulsion by mesoporous hafnium oxide ceramics. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(8), 2035-2042.
- Kahraman, S., Dogan, N., & Erdemoglu, S. (2008). Use of various agricultural wastes for the removal of heavy metal ions. *International Journal of Environment and Pollution*, 34(1-4), 275-284.
- Kresge, A. C., Leonowicz, M. E., Roth, W. J., Vartuli, J. C., & Beck, J. S. (1992). Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *Nature*, 359(6397), 710-712.
- Lamei, H. R., & Khoshbouy, R. (2025). Synthesis of effective potassium-based-modified bio-carbon from date palm seed for oil spill removal. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-16.
- Mbaraka, I. K., & Shanks, B. H. (2006). Conversion of oils and fats using advanced mesoporous heterogeneous catalysts. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83, 79-91.
- Mirzaei, M. (2021). Separation of oily pollution from water and wastewater by low cost and reusable composite based on natural fibers. *Advances in Environmental Technology*, 7(2), 91-99.
- Mohammadi, A., & Ebadi, T. (2018). Effect of bentonite addition on geotechnical properties of oil-contaminated sandy soil. *Journal of Civil Engineering and Construction*, 7(4), 153-162.
- Motawie, A. M., Madany, M. M., El-Dakrory, A. Z., Osman, H. M., Ismail, E. A., Badr, M. M., ... & Abulyazied, D. E. (2014). Physico-chemical characteristics of nano-organo bentonite prepared using different organo-modifiers. *Egyptian journal of petroleum*, 23(3), 331-338.
- Nagy, H., Fawzy, M., Hafez, E., & Mahmoud, A. E. D. (2024). Potentials of mono-and multi-metal ion removal from water with cotton stalks and date palm stone residuals. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(28), 39849-39865.
- Periyasamy, T., Asrafali, S. P., Haldhar, R., Madhappan, S., Vanaraj, R., Raorane, C. J., & Kim, S. C. (2022). Modified cotton sponge with bio-based polybenzoxazine for plasticizer absorption and oil–water separation. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(2), 950-959.

- Shin, Y., Han, K. S., Arey, B. W., & Bonheyo, G. T. (2020). Cotton fiber-based sorbents for treating crude oil spills. *ACS omega*, 5(23), 13894-13901.
- Silva, M. S., Frety, R., & Vidal, R. R. L. (2023). Cotton linter as biosorbent: removal study of highly diluted crude oil-in-saline water emulsion. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 2111-2126.
- Tolkou, A. K., Tsoutsas, E. K., Kyzas, G. Z., & Katsoyiannis, I. A. (2024). Sustainable use of low-cost adsorbents prepared from waste fruit peels for the removal of selected reactive and basic dyes found in wastewaters. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(10), 14662-14689.
- Villarroel-Rocha, J., Barrera, D., & Sapag, K. (2014). Introducing a self-consistent test and the corresponding modification in the Barrett, Joyner and Halenda method for pore-size determination. *Microporous and Mesoporous Materials*, 200, 68-78.
- Wang, J., Geng, G., Wang, A., Liu, X., Du, J., Zou, Z., ... & Han, F. (2015). Double biomimetic fabrication of robustly superhydrophobic cotton fiber and its application in oil spill cleanup. *Industrial Crops and Products*, 77, 36-43.
- Yilmaz Mertsoy, E. (2025). Energy-Efficient Synthesis of Copper Terephthalate Metal–Organic Frameworks Using Sorbitol and Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvents for Methylene Blue Removal. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-14.
- Zia, Q., Tabassum, M., Gong, H., & Li, J. (2019). A review on chitosan for the removal of heavy metals ions. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 12(3), 103-128.
- Zibaei, S., Tabatabaei Ghomsheh, S. M., Mirzaei, M., & Azimi, A. (2024). Modified Cotton Sorbent for Removing Crude Oil Pollution From Water: Sorption Kinetic Study. *Remediation Journal*, 34(4), e21787.