Economic evaluation of industrial production of nano biocarbon adsorbent from biowaste for ultra-fast and ultra-efficient phenol removal

F. s. Keshmiri[1], H. G. Gilani[2*], M. S. Kazemi[3]

1- Department of Chemistry and Chemical Engineering, Ra. C., Islamic Azad University, Rasht, Iran
2- Department of Chemical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
3- Department of Chemistry, Boj. C., Islamic Azad University, Bojnord, Iran
E-mail: hggilani@guilan.ac.ir

Abstract

Phenolic industrial wastewaters and their release into the environment are environmental problems. Among the various methods for separating phenol from wastewater, the adsorption process is a widely used method. The aim of this study is economic evaluation of industrial production of nano biocarbon adsorbent prepared from peanut shell. The unique capability of this adsorbent, having three features simultaneously, ultra-fast and complete removal of phenol, and high adsorption capacity, has made it a practical and competitive product. Based on the economic evaluation, the production of this adsorbent using the method presented in this study is economically profitable and costs 1440 thousand rials per kilogram of final product. The payback period for different discount rates is 3.3 to 5.9 years. The internal rate of return is 40% for ten years from the time of implementation of the production plant, which is higher than the common bank discount rate (23%) and indicates the profitability of the project.

Keywords: Peanut shell, Nano biocarbon adsorbent, Economic evaluation, Industrial production, Net present value, Internal rate of return

[*] Department of Chemical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
e-mail: hggilani@guilan.ac.ir

ارزیابی اقتصادی تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پسماند زیستی برای حذف سریع و کامل فنل

فهیمه سادات کشمیری[۱]، حسین قنادزاده گیلانی[۲*]، ملیحه صمدی کاظمی[۳]

۱- گروه شیمی و مهندسی شیمی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- گروه شیمی، واحد بجنورد، دانشگاه آزاد اسلامی، بجنورد، ایران.

پیام‌نگار: hggilani@guilan.com

چکیده

پساب‌های فنلی صنایع و رهاسازی آن‌ها به محیط زیست از مشکلات زیست‌محیطی هستند. در بین روش‌های مختلف جداسازی فنل از پساب، فرایند جذب سطحی، روشی پرکاربرد است. هدف از این پژوهش، ارزیابی اقتصادی تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب‌کربنی تهیه شده از پوسته بادام زمینی می‌باشد. قابلیت منحصربه‌فرد این جاذب، یعنی دارابودن همزمان سه ویژگیِ حذف فوق‌العاده سریع و کامل فنل و ظرفیت جذب بالا، آن را به یک محصول کاربردی و رقابت‌پذیر تبدیل کرده است. بر اساس ارزیابی اقتصادی انجام شده، تولید این محصول با روش ارائه‌شده در این پژوهش، از نظر اقتصادی سودآور است و ۱۴۴۰ هزار ریال به ازای هر کیلوگرم محصول نهایی هزینه دارد. مدت زمان بازگشت سرمایه برای نرخ‌های تنزیل مختلف ۳/۳ الی ۵/۹ سال می‌باشد. نرخ بازده داخلی ۴۰ درصد برای ده سال از زمان اجرای طرح تولید می‌باشد که بالاتر از نرخ تنزیل رایج بانکی (۲۳ درصد) است و نشان از سودآور بودن پروژه می‌باشد.

کلمات کلیدی: پوسته بادام زمینی، نانوزیست‌جاذب کربنی، ارزیابی اقتصادی، تولید صنعتی، ارزش فعلی خالص، نرخ بازده داخلی

* گروه مهندسی شیمی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

پیام‌نگار: hggilani@guilan.ac.ir

۱. مقدمه

رشد سریع صنایع و فناوری، ارتقای استانداردهای زندگی و لزوم رفع نیازهای عصر مدرن، موجب آسیب‌های جدی زیست محیطی شده‌است. با مدرن شدن صنایع و پیشرفت آن‌ها، حضور آلاینده-های گوناگون در آب‌های زیرزمینی و سطحی به چالش بزرگی تبدیل شده‌است [۱]. صنایع همواره مقادیر زیادی از مواد زائد سمی را به شکل‌های جامد، مایع و گاز در زیست‌بوم رها می‌کنند. این مواد زائد حاوی فلزات سنگین، متالوئیدها و آلاینده‌های آلی هستند که موجب ایجاد آسیب‌های جدی در سامانه آب و خاک می‌شوند [۲].

در میان آلاینده‌هایی که در اکثر پساب‌های صنعتی وجود دارند، فنل و مشتقات آن بسیار اهمیت دارند [۳, ۴]. در انواع هیدروکربن‌ها، فنل به عنوان یک آلاینده اولیه طبقه بندی می شود [۵].

فنل در بسیاری از فاضلاب‌های صنعتی مانند صنایع رنگ، رزین، داروسازی، نفت، پتروشیمی، فولاد، مواد شوینده، نساجی و چرم یافت می شود. چنین صنایعی اغلب مشتقات فنل را به شیوه‌ای ناسالم و با آلوده کردن منابع آب، دفع می کنند [۶, ۷].

به دلیل سمیت بالای فنل، سازمان حفاظت محیط زیست امریکا[۱]، این ترکیب را به عنوان آلاینده با اولویت بالا در نظر گرفته [۵] و به منظور حفاظت محیط زیست، حد مجاز فنل را در پساب خروجی صنایع برای تخلیه به منابع آبی، معادل ۱ میلی‌گرم بر لیتر تعیین نموده است [۸]. سازمان بهداشت جهانی[۲] حد مجاز فنل در آب آشامیدنی را ۰/۰۰۱ میلی‌گرم بر لیتر تعیین نموده است [۹].

روش‌های زیادی برای حذف فنل از پساب صنعتی پیشنهاد شده‌است، که در بین آن‌ها فرآیند جذب سطحی به دلیل هزینه کم، عملکرد آسان، کارایی بالا و سازگاری با محیط زیست به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است [۱۳-۱۰].

یکی از جاذب‌های پرکاربرد در فرایندهای جذب سطحی، کربن فعال است که در تماس با ترکیبات آلی محلول در آب، تمایل زیادی برای جذب این ترکیبات دارد [۱۴]. کربن‌های فعال مواد کربنی بسیار متخلخل با سطح داخلی ویژه بالا هستند و معمولا به عنوان ماده جاذب در کاربردهای مختلف جداسازی و خالص سازی صنعتی استفاده می شوند [۱۵].

موضوع دیگری که قابل‌تأمل و بررسی است جنبه اقتصادی و تجاری کربن فعال در بازارهای روز جهان است. آینده صنعت کربن فعال روبه‌رشد پیش‌بینی‌شده و انتظار می‌رود بازار جهانی کربن فعال در سال‌های آینده رشد قابل توجهی داشته باشد [۱۶]. در ایران نیز، نیاز به کربن فعال افزایش‌یافته است چرا که با افزایش سطح آگاهی اجتماعی به‌منظور حفظ محیط‌زیست و سلامتی در کشور، مراقبت‌های ویژه‌ای چه در سطح صنعتی و چه در سطح اجتماعی شکل‌گرفته است. همین مسئله باعث افزایش استفاده از تصفیه‌کننده‌ها به‌منظور حذف آلاینده‌های آب و هوا شده‌است.

با توجه به نازل‌بودن قیمت کربن فعال تولید ایران نسبت به قیمت کربن فعال وارداتی از یک سو و رشد چشمگیر فروش کربن فعال ایرانی در بازارهای داخلی و خارجی و توانایی تولیدکنندگان کربن فعال ایرانی در صادرات کالاهای خود به کشورهای مختلف از سوی دیگر، انجام ارزیابی اقتصادی[۳] برای تولید صنعتی انواع جاذب کربنی در داخل کشور، ضروری به نظر می‌رسد؛ به‌ویژه این که بتوان جاذب را از پسماندهای کشاورزی تولید کرد که این کار علاوه بر مزیت ارزان‌بودن مواد اولیه، کاهش معضلات زیست‌محیطی را نیز در پی دارد.

عدم موفقیت پژوهش‌های گذشته در دستیابی به هدف جذب کامل فنل از محیط آبی و موفقیت گروه پژوهشگران حاضر در مطالعه اخیر آن‌ها [۱۴] در دستیابی به شرایط بهینه برای حذف کامل (۱۰۰%) و فوق‌العاده سریع (در مدت ۵ دقیقه) فنل با ظرفیت جذب بالا (۲۵۰ میلی‌گرم بر گرم) از محیط آبی توسط این نانوزیست‌جاذب کربنی، پژوهشگران را بر آن داشت تا جهت بهره‌برداری اقتصادی

---

[۱] Environmental Protection Agency (EPA)

[۲] World Health Organization (WHO)

[3] Economic evaluation

از این جاذب نیز مطالعات و بررسی‌های مورد نیاز را انجام دهند. در صورت سودآور بودن این پروژه می‌توان علاوه بر کمک به حل چالش زیست‌محیطی، به ایجاد ارزش افزوده برای پسماندهای کشاورزی تولید شده در کشور، کمک به افزایش تولید داخل و اشتغال‌زایی نیز دست یافت. همچنین لازم به ذکر است که قابلیت منحصربه‌فرد این جاذب، یعنی دارابودن همزمان سه ویژگیِ حذف کامل و فوق‌العاده سریع فنل و ظرفیت جذب بالا، آن را به یک محصول کاربردی تبدیل کرده است.

گزارش‌های اندکی در زمینه تجزیه‌وتحلیل هزینه‌های تولید کارخانه‌های تولید کربن فعال وجود دارد که در اینجا به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌نماییم. در پژوهشی که توسط لئون[1] و همکاران جهت ارزیابی اقتصادی طرح تولید صنعتی یک نوع کربن فعال از ضایعات خشکبار انجام شد [۱۷] نرخ بازده داخلی[2] و ارزش فعلی خالص[3] برای یک دوره ده ساله تولید به ترتیب ۲۱ درصد و ۲,۷۸۶ هزار دلار محاسبه و زمان بازگشت سرمایه، با احتساب نرخ تنزیل ۱۰ درصد، حدود ۵/۴ سال گزارش شده‌است. زین[4] و آنتونی[5] در سال ۲۰۲۲ یک تحلیل اقتصادی برای مطالعه هزینه‌های تبدیل زیست توده به کربن فعال و بررسی قابلیت تجاری‌سازی آن انجام دادند [۱۸] که زمان بازگشت سرمایه ۳ سال و نرخ بازده داخلی ۵۵ درصد به دست آمد. چوی[6] و همکاران در ارزیابی اقتصادی تولید کربن فعال از ضایعات بامبو [۱۹] مقادیر نرخ بازده داخلی را ۱۳ و ۲۰/۱ درصد تخمین زدند. استاوروپولوس[7] و همکاران ارزیابی اقتصادی فرایندهای تولید کربن فعال بر اساس مواد اولیه‌ای مانند چوب، کک نفتی، کربن سیاه و زغال سنگ را انجام دادند [۲۰] و زمان بازگشت سرمایه را ۵/۶ سال گزارش کردند. ناندیانتو[8] در سال ۲۰۱۸ با امکان سنجی اقتصادی تولید کربن فعال و ذرات سیلیس از بقایای کاه برنج، نرخ بازده داخلی را ۴۴/۰۶ درصد گزارش کرد [۲۱]. لای[9] و نگو[10] در مطالعه دو روش تولید کربن فعال مشتق‌شده از پوسته هسته خرما، قیمت محصول را ۶/۵ و ۵/۷ دلار بر کیلوگرم و دوره بازگشت سرمایه را ۲/۷۷ و ۳/۰۲ سال تخمین زدند [۲۲].

در پژوهش حاضر، ارزیابی اقتصادی تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی تهیه شده از پوسته بادام زمینی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. به‌این‌منظور ابتدا قیمت تمام شده تولید این محصول در مقیاس صنعتی برآورد شد. سپس با استفاده از روش‌های ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی، دوره بازگشت سرمایه و میزان سوددهی پروژه محاسبه گردید.

۲. شرح روش ارزیابی اقتصادی تولید صنعتی

یک طرح قابل قبول کارخانه باید نشان‌دهنده کارخانه‌ای باشد که توان تولید محصول و فروش سودآور آن را دارد. در ابتدا، سرمایه[11] کافی برای تمام جنبه‌های لازم کارخانه باید بررسی شود. از آنجایی که سود خالص[12] برابر است با درآمد کل منهای تمام هزینه‌ها[13]، ضروری است که انواع مختلف هزینه‌های مربوط به هر مرحله ساخت مشخص باشد. وجوه[14] باید برای هزینه‌های مستقیم کارخانه،

---

[1] Leon
[2] Internal return rate (IRR)
[3] Net present value (NPV)
[4] Zein
[5] Antony
[6] Choy
[7] Stavropoulos
[8] Nandiyanto
[9] Lai
[10] Ngu
[11] Investment
[12] Net profit
[13] Costs
[14] Funds

مانند هزینه‌های مواد خام[۱]، نیروی کار[۲] و آب و برق و گاز و ... (هزینه انرژی)[۳]، و برای هزینه‌های غیرمستقیم مانند حقوق اداری، هزینه‌های فروش محصول و هزینه‌های توزیع در دسترس باشد.

۲-۱ جریان نقدی

ورودی‌های سرمایه معمولاً به‌صورت وام، انتشار سهام، فروش اوراق قرضه و سایر منابع سرمایه و جریان نقدی حاصل از عملیات پروژه است. خروجی‌های سرمایه به صورت سرمایه گذاری در پروژه‌ها، سود سهام به سهامداران، بازپرداخت بدهی‌ها و سایر سرمایه گذاری‌ها می‌باشد. این ورودی‌ها و خروجی‌های سرمایه، جریان‌های نقدی گفته می‌شود.

۲-۲ کل سرمایه گذاری[۴] (TCI)

قبل از راه اندازی یک کارخانه صنعتی، باید مبلغ زیادی برای خرید و نصب ماشین‌آلات و تجهیزات مورد نیاز در دسترس باشد. زمین باید تهیه شود، امکانات خدماتی[۵] باید در دسترس باشد، و کارخانه باید با تمام لوله‌ها، کنترل‌ها و خدمات ساخته شود. به علاوه، وجوهی مورد نیاز است که با آن هزینه‌های مربوط به عملیات کارخانه قبل از در دسترس قرار گرفتن درآمد فروش، پرداخت شود.

سرمایه مورد نیاز برای تأمین امکانات تولیدی و کارخانه‌ای مورد نیاز، سرمایه گذاری ثابت[۶] نامیده می‌شود که نشان دهنده سرمایه لازم برای تجهیزات نصب شده فرایند با تمام اجزای مورد نیاز برای اجرای کامل فرایند است، در حالی که سرمایه لازم برای فعالیت کارخانه را سرمایه در گردش[۷] می‌گویند. سرمایه در گردش عبارت است از کل مقدار پول سرمایه گذاری شده در مواد خام، محصولات نهایی موجود در انبار و محصولات نیمه تمام در فرایند تولید، حساب‌های قابل دریافت، پول نقدی که برای پرداخت ماهانه هزینه‌های عملیاتی مانند حقوق، دستمزد و خرید مواد خام در دسترس است، حساب‌های قابل پرداخت و مالیات قابل پرداخت. مجموع سرمایه‌گذاری ثابت و سرمایه در گردش به عنوان کل سرمایه گذاری شناخته می‌شود.

۲-۳ کل درآمد[۸]

علاوه بر محاسبه سرمایه مورد نیاز، درآمد حاصل از بهره برداری کارخانه بسیار مهم است. درآمد از فروش محصول یا محصولات تولید شده توسط کارخانه به دست می‌آید. کل درآمد سالانه حاصل ضرب قیمت واحد هر محصول در نرخ فروش آن است (معادله ۱).

= (ریال در سال) کل درآمد سالانه[۹]

$$\sum(\text{کیلوگرم در سال، میزان فروش محصول}) \times (\text{ریال در کیلوگرم، قیمت فروش محصول}) \quad (۱)$$

۲-۴ ارزش فعلی خالص

محاسبه ارزش فعلی خالص پروژه به درک مطلوبیت یک پروژه بالقوه از نظر جریان نقدی و خطرات مربوط به نرخ تنزیل انتخاب شده کمک می‌کند. این روش شامل محاسبه خالص جریان نقدی تنزیل‌یافته است. یک NPV مثبت نشان می‌دهد که پروژه مطلوب است و می‌تواند سرمایه را بازگرداند. یک NPV منفی نشان می‌دهد که پروژه به جلو نمی‌رود و بی‌ارزش است. رابطه ریاضی محاسبه NPV در معادله ۲ نشان داده شده‌است.

---

[۱] Raw materials

[۲] Labor

[۳] Utility

[۴] Total capital investment (TCI)

[۵] Service facilities

[۶] Fixed-capital investment (FCI)

[۷] Working capital (WC)

[۸] Revenue

[۹] Annual sales revenue

$$NPV = \sum_{t=1}^{N} \frac{F_t}{(1+d)^t} - I_0 \quad (۲)$$

که در آن F_t سود خالص سالانه در سال t ام از طول عمر پروژه، و d نرخ بهره است [۱۷, ۱۸, ۲۳].

۲-۵ نرخ بازده داخلی

جهت محاسبه نرخ بازده داخلی باید ابتدا نمودار NPV بر حسب نرخ تنزیل را رسم نماییم. نقطه‌ای از این نمودار که در آن NPV = ۰ است نشان دهنده نرخ بازده داخلی خواهد بود. معادله ۳ روش محاسبه نرخ بازده داخلی را نشان می‌دهد [۱۷].

$$NPV = \sum_{t=1}^{N} \frac{F_t}{(1+d^*)^t} - I_0 = 0 \rightarrow d^* = IRR \quad (۳)$$

۳. محاسبات و روش‌ها

به منظور انجام ارزیابی اقتصادی تولید جاذب در مقیاس صنعتی، ابتدا محاسبات اقتصادی جهت برآورد میزان سرمایه گذاری موردنیاز در دو بخش سرمایه ثابت و سرمایه در گردش انجام شد. سپس هزینه-های سالانه تولید محاسبه و قیمت تمام‌شده محصول محاسبه شد. همچنین با کمک روش‌های ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی به بررسی میزان سوددهی پروژه طی دوره ده‌ساله پرداخته شد. اما پیش از ورود به محاسبات اقتصادی، ابتدا مختصری درباره روش ساخت[۱]، مشخصات فیزیکی و شیمیایی این نانوزیست‌جاذب کربنی و نتایج بررسی عملکرد آن در حذف سریع و کامل فنل توضیح داده می‌شود.

۳-۱ روش ساخت، مشخصات و عملکرد نانوزیست‌جاذب کربنی

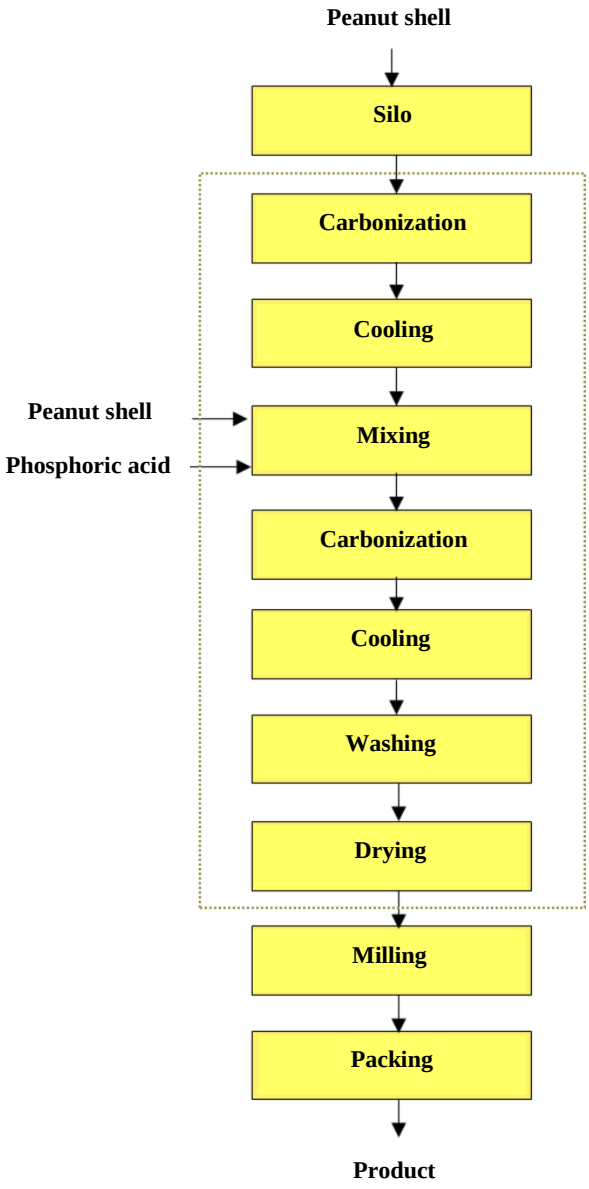
ابتدا پوسته‌های بادام زمینی شسته، خشک و خرد شدند تا پیش ماده تولید کربن فعال آماده شود. برای کربن کردن، پیش ماده به مدت ۳ ساعت در کوره قرار داده شد و پس از خنک سازی، به طور یکنواخت با پودر پوسته بادام زمینی و فسفریک اسید ۵۰% کسر جرمی مخلوط شد. مخلوط پس از ماندن در دمای اتاق، مخلوط به مدت ۳ ساعت در کوره قرار داده شده، و سپس سرد، خرد، شسته و در آون[۲] خشک شد تا نانوزیست‌جاذب کربنی به دست آید.

مشخصات نانوزیست‌جاذب کربنی با انجام آنالیزهای FTIR، XRD، TEM و BET مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آنالیز FTIR جاذب، پیش و پس از انجام فرایند جذب، حاکی از فعال‌شدن سطح جاذب طی فرایند ساخت و نیز تشکیل پیوندهای π-π بین مولکول‌های فنل و سطح جاذب پس از انجام فرایند جذب بود. آنالیزهای XRD و TEM نشان دادند که جاذب ساختاری بی‌شکل با متوسط اندازه ذرات ۳/۴ نانومتر دارد. ازآنالیز BET نانوزیست‌جاذب کربنی مقادیر سطح ویژه، حجم کل حفرات و متوسط اندازه حفرات به ترتیب ۱۳۷۳/۳۳ مترمربع بر گرم، ۰/۷۴۱۶ سانتی‌مترمکعب بر گرم و ۲/۱۶ نانومتر به دست آمد. جاذب با متوسط اندازه حفرات حدود ۲ نانومتر برای حذف فنل مناسب است زیرا منافذ با این اندازه، برای به دام انداختن مولکول‌های فنل ایده آل هستند؛ چرا که اندازه مولکول فنل ۰/۵۷ نانومتر است [۲۴].

شکل ۱ به صورت طرحواره[۳] فرایند تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی را نشان می‌دهد. این فرایند با توجه به روش ساخت جاذب که در ابتدای بخش ۳-۱ توضیح داده شد، طراحی شده‌است.

---

[1] Synthesis
[2] Oven
[۳] Schematic



شکل ۱. طرحواره فرایند تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

Figure 1. Schematic of the industrial production process of nano biocarbon adsorbent from peanut shell.

۲-۳ برآورد کل سرمایه گذاری طرح

کل سرمایه گذاری طرح عبارت است از مجموع سرمایه ثابت و سرمایه در گردش و هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده به میزان ۱۵% از مجموع سرمایه ثابت و سرمایه در گردش.

میزان سرمایه ثابت مورد نیاز را باید بر اساس مجموع هزینه‌های مستقیم طرح و مجموع هزینه‌های غیر مستقیم طرح محاسبه نمود. سرمایه در گردش معادل هزینه تولید برای۳ ماه از سال می‌باشد.

۳-۳ برآورد کل هزینه‌های سالانه محصول[1] و قیمت محصول

جهت برآورد هزینه‌های کل تولید باید هزینه‌های مستقیم تولید، هزینه‌های غیرمستقیم تولید، هزینه‌های کلی کارخانه و هزینه‌های عمومی را محاسبه کرد.

قیمت تولید محصول یا قیمت تمام شده تولید محصول عبارت است از هزینه‌های سالانه تولید به ازای یک کیلوگرم از محصول که با تقسیم کل هزینه‌های سالانه تولید بر ظرفیت تولید (بر حسب کیلوگرم در سال) می‌توان آن را محاسبه کرد.

۴-۳ زمان بازگشت سرمایه

جهت محاسبه مدت زمان بازگشت سرمایه باید نمودار جریان نقدی تنزیل‌یافته تجمعی[2] برحسب مدت زمان اجرای طرح را با فرض عدم ورود جریان نقدی بیرونی، رسم کرد تا از محل برخورد نمودار با محور افقی (خط ۰ = CDCF) زمان بازگشت سرمایه به دست آید.

۵-۳ نرخ بازده داخلی (IRR)

از رسم نمودار NPV بر حسب نرخ تنزیل و یافتن مقدار نرخ تنزیل در محل ۰ = NPV، می‌توان مقدار نرخ بازده داخلی را محاسبه کرد.

۴. نتایج و بحث

۱-۴ کل سرمایه گذاری

همان طور که قبلا در بخش ۲-۲ توضیح داده شد، مجموع سرمایه ثابت و سرمایه در گردش به عنوان کل سرمایه گذاری شناخته می‌شود. برای محاسبه مقادیر عددی این هزینه‌ها ابتدا باید هزینه تجهیزات مورد نیاز جهت تولید صنعتی جاذب را محاسبه نماییم. بر اساس شکل ۱ که فرایند تولید صنعتی جاذب را به صورت طرحواره نشان می‌دهد، تجهیزات مورد نیاز فرایند و هزینه هر یک در جدول ۱ آمده‌اند. اکنون می‌توان سایر ردیف‌های مربوط به سرمایه ثابت را محاسبه نمود. نتیجه‌ی این محاسبات در جدول ۲ آمده‌است.

جهت محاسبه سرمایه در گردش ابتدا باید هزینه‌های مواد اولیه و نیروی انسانی مورد نیاز را محاسبه کرد. با مشخص شدن این هزینه‌ها می‌توان جدول قیمت تمام شده (جدول ۳) و جدول سود و زیان (جدول ۴) را تکمیل کرد. مبلغ کالای فروش رفته (کل درآمد سالانه) در بند اول جدول ۴ با توجه به معادله ۱ و با احتساب قیمت فروش ۲۲۰۰ هزار ریال به ازای هر کیلوگرم محصول محاسبه شده‌است. لازم به ذکر است که قیمت‌های درج شده مربوط به مهر ۱۴۰۳ و نرخ دلار در آن زمان ۵۰۲ هزار ریال بوده است.

جدول ۱. هزینه تجهیزات فرایند تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

Table 1. Cost of equipments for the industrial production process of carbon nanobiosorbent from peanut shell.

Item NO.	Main process equipments	Capacity	Unit	Costs (million rials)
1	Silo (2)	50	ton	4,000
2	Vibrating screen	500	kg/hr	300
3	Rotary pyrolysis kiln	6000	ton	11,000

[1] Total annual product cost

[2] Cumulative discounted cash-flow (CDCF)

4	Activated carbon cooler	700	kg	2,000
5	Cooling water tank	100	m^3	3,000
6	Mixing tank	5	m^3	3,340
7	Chemical washing tank	5	m^3	10,000
8	Boiler	40	m^3/hr	2,000
9	Dryer	300	ton	8,000
10	Conveyor	3	#	2,400
11	Mill	350	kg/hr	400
12	Packing machine	50	kg/min	1,200
13	Industrial water purifier	25	m^3/day	3,000
14	TOTAL MAIN EQUIPMENT COST (C1)			50,640
15	AUXILIARY EQUIPMENT COST (C1 × 0.1)			5,064
16	TOTAL MAIN + AUXILIARY EQUIPMENT COST (C1 × 1.1)			55,704

جدول ۲. محاسبه سرمایه ثابت برای تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

Table 2. Calculation of fixed-capital investment for industrial production of nano biocarbon adsorbent from peanut shell.

Item NO.	Item	%	Description	Million rials
1	Delivered main equipment (includes auxiliary equipment)	100	Total main equipment cost × 1.1	55,704
2	Purchased-equipment installation	39		21,725
3	Instrumentation and controls (installed)	26		14,483
4	Piping (installed)	31		17,268
5	Electrical (installed)	10		5,570
6	Buildings (including services)	70		38,993
7	Yard improvements	12		6,684
8	Service facilities (installed)	55		30,637
9	Land	60		33,422
10	TOTAL DIRECT PLANT COST		A1 = 1 to 9	224,487
11	Engineering and supervision	32		17,825
12	Construction expenses	34		18,939
13	Legal expenses	4		2,228
14	Contractor’s fee	19		10,584
15	TOTAL INDIRECT PLANT COST		A2 = 11 to 14	49,577
16	FIXED CAPITAL INVESTMENT (FCI)		A = A1 + A2	274,064

جدول ۳. محاسبه قیمت تمام شده تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

Table 3. Calculation of the total product cost of industrial production of nano biocarbon adsorbent from peanut shell.

Item NO.	Item	Description	Million rials
1	Row materials	Calculated	132,936
2	Operating labor	Production part labor	13,136

3	Depreciation	10% of FCI	24,064
4	Utilities		20,000
5	Maintenance and repairs	6% of FCI	16,444
6	Operating supplies	15% of 5	2,467
7	Other costs	10% of 3+4+5+6	6,297
8	Plant overhead costs	3 to 7	69,272
9	Total product cost (annual)	1+2+8	215,346

جدول ۴. محاسبات سود و زیان برای تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

Table 4. Profit and loss calculations for the industrial production of nano biocarbon adsorbent from peanut shell.

Item NO.	Item	Description	Million rials
1	Annual sales revenue		396,000
2	Total product cost (annual)	From Table 3	215,346
3	Gross profit	1 minus 2	180,654
4	Administrative costs		18,626
5	Distribution and selling costs	5% of 2	10,767
6	Research and development costs	5% of 2	10,767
7	Other costs	10% of 4+5+6	4,016
8	Gross profit before taxes	3 – (4+5+6+7)	136,478
9	Taxes	25% of 8	34,120
10	Net profit	8 minus 9	102,359

با احتساب ردیف‌های هزینه‌ای ۴ الی ۷ در جدول ۴ و افزودن این موارد به قیمت تمام شده، قیمت تمام شده نهایی به ازای هر کیلوگرم محصول عبارت است از:

= قیمت تمام شده نهایی (ریال بر کیلوگرم)

۱,۴۴۰,۰۰۰= ۱۸۰,۰۰۰ ÷ ۱۰^۶ × ((۴,۰۱۶+ ۱۰,۷۶۷ + ۱۰,۷۶۷ + ۱۸,۶۲۶) + (۲۱۵,۳۴۶

پس از محاسبه تمام ردیف‌های هزینه‌ای، می‌توان کل سرمایه گذاری مورد نیاز را مطابق جدول ۵ محاسبه کرد.

جدول ۵. محاسبه کل سرمایه گذاری برای تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

Table 5. Calculation of total capital investment for industrial production of nano biocarbon adsorbent from peanut shell.

Item NO.	Item	Description	Million rials
1	Fixed-capital investment (FCI)	A	274,064
2	Working capital (WC)	B	58,864
3	Total capital investment (TCI)	A + B	332,928
4	Incalculable costs	(A + B) × 0.15	49,939

5	Total capital investment + Incalculable costs	(A + B) × 1.15	382,867

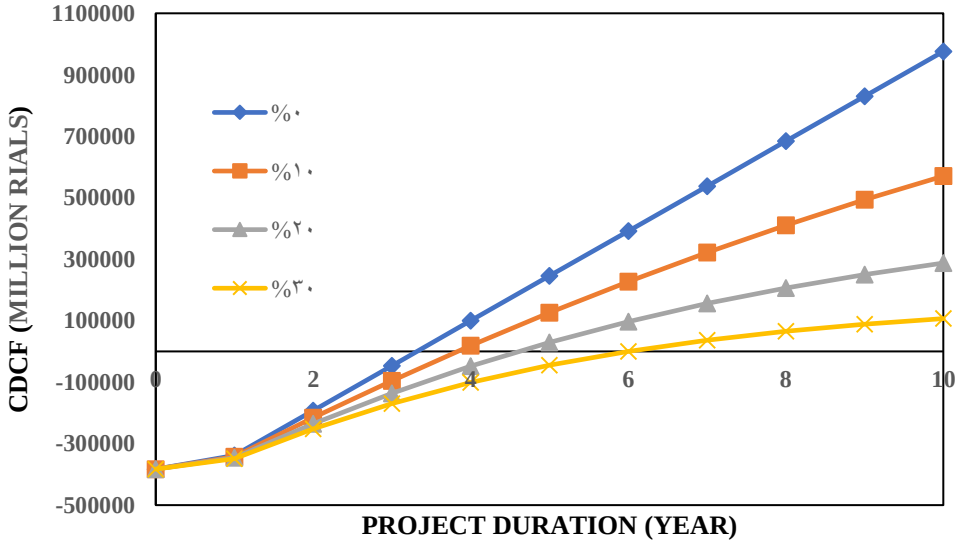
۲-۴ ارزش فعلی خالص

جهت محاسبه ارزش فعلی خالص باید نرخ تنزیل را مشخص کرد. اما ازآنجاکه نمی‌توان نرخ تنزیل در سال‌های آینده را به‌صورت دقیق مشخص نمود، محاسبات ارزش فعلی خالص در نرخ‌های تنزیل مختلف، از صفر الی ۳۰ درصد انجام شد، چرا که متوسط نرخ تورم ده ساله کشور ۲۸ درصد بوده است. با جمع‌بندی مقادیر جریان‌های نقدی تنزیل‌یافته تجمعی سالانه در جدول ۶ و سپس رسم نمودار مقادیر CDCF در نرخ‌های تنزیل صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد برای سرمایه گذاری ده ساله بر اساس این داده‌ها (شکل ۲)، می‌توان زمان بازگشت سرمایه را تخمین زد.

جدول ۶. مقادیر CDCF (میلیون ریال) در نرخ‌های تنزیل صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد برای سرمایه گذاری ده ساله در تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

Table 6. Cumulative discounted cash-flow (CDCF) calculations at different discount rates of 0%, 10%, 20%, and 30%, for the 10-year production investment for industrial production of nano biocarbon adsorbent from peanut shell.

Year	Discount rate (%)			
	0	10	20	30
0	-382,867	-382,867	-382,867	-382,867
1	-338,542	-342,572	-345,930	-348,771
2	-192,495	-215,886	-235,288	-251,474
3	-46,448	-95,532	-136,063	-169,260
4	99,599	18,375	-48,028	-101,024
5	245,646	125,819	29,409	-45,150
6	391,693	226,868	97,042	124
7	537,739	321,654	155,767	36,504
8	683,786	410,355	206,505	65,543
9	829,833	493,186	250,158	88,595
10	975,880	570,388	287,580	106,812



شکل ۲. مقادیر CDCF در نرخ‌های تنزیل صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد برای سرمایه گذاری ده ساله در تولید

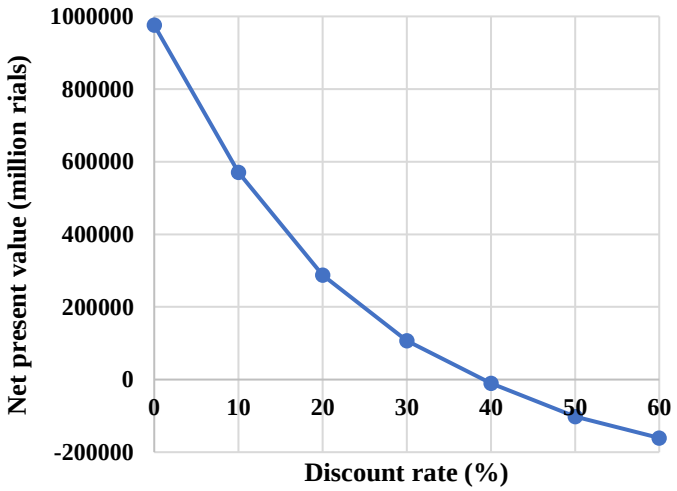
صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

Figure 2. Cumulative discounted cash-flow (CDCF) diagrams at different discount rates of 0%, 10%, 20%, and 30%, for the 10-year production investment for industrial production of nano biocarbon adsorbent from peanut shell.

مدت زمان بازگشت سرمایه برای نرخ‌های تنزیل صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۳/۳، ۳/۸، ۴/۷ و ۵/۹ سال خواهد بود.

۳-۴ نرخ بازده داخلی

با رسم نمودار NPV برحسب نرخ تنزیل (شکل ۳) می‌توان مقدار IRR که معیاری از میزان سوددهی طرح می‌باشد را به‌دست‌آورد. بر اساس شکل ۳، مقدار IRR حدود۴۰ درصد (۳۹/۲ درصد) به‌دست‌می‌آید.



شکل ۳. مقادیر NPV بر اساس نرخ‌های تنزیل مختلف برای سرمایه گذاری ده ساله در تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی از پوسته بادام زمینی.

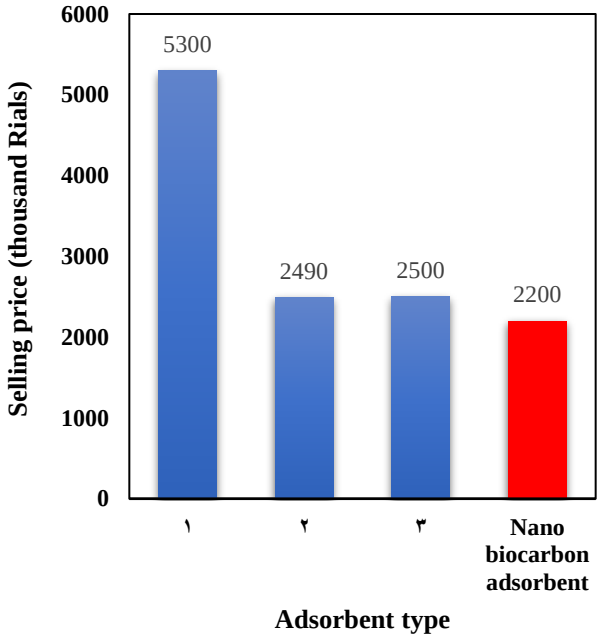
Figure 3. Net present value (NPV) of the investment project at different discount rates for the 10-year production investment for industrial production of nano biocarbon adsorbent from peanut shell.

قیمت فروش انواع کربن‌های فعال پودری موجود در بازار داخلی کشور در جدول ۷ آورده‌شده‌است. مقایسه قیمت فروش درنظرگرفته‌شده برای نانوزیست‌جاذب کربنی (۲,۲۰۰,۰۰۰ ریال به ازای هر کیلوگرم محصول نهایی) با قیمت‌های یاد شده (شکل ۴) نشان از اختلاف قیمت ۳,۱۰۰,۰۰۰ ریالی با کربن فعال پودری شماره ۱، اختلاف قیمت ۳۰۰,۰۰۰ ریالی با کربن فعال پودری شماره ۲ و اختلاف قیمت ۲۹۰,۰۰۰ ریالی با کربن فعال پودری شماره ۳ دارد. بنابر این می‌توان دریافت که این محصول توان رقابت قیمتی با محصولات موجود در بازار را دارد.

جدول ۷. قیمت فروش انواع کربن فعال پودری موجود در بازار داخلی.

Table 7. Selling prices of types of powdered activated carbon available in the domestic market.

Item NO.	Name	Selling price (thousand rials)	Seller name	Website address
1	Powdered activated carbon	5,300	Tajhizat azma	**https://semnanazma.ir**
2	Powdered activated carbon	2,490	Tamad kala	**https://tamadkala.com**
3	Powdered activated carbon	2,500	Spoota	**https://iran-tejarat.com**



شکل ۴. مقایسه قیمت فروش نانوزیست‌جاذب کربنی با قیمت فروش انواع کربن فعال پودری موجود در بازار.

Figure 4. Comparison of the selling price of nano biocarbon adsorbent with the selling price of various types of powdered activated carbon available on the market.

۵. نتیجه گیری

نتایج ارزیابی اقتصادی تولید جاذب در مقیاس صنعتی نشان داد که کل سرمایه گذاری مورد نیاز جهت تولید صنعتی این جاذب با حجم ۱۸۰ تن در سال، ۳۸۲,۸۶۷ میلیون ریال می‌باشد. مدت زمان بازگشت سرمایه برای نرخ‌های تنزیل صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۳/۳، ۳/۸، ۴/۷ و ۵/۹ سال خواهد بود. مقدار IRR، برای پروژه تولید صنعتی نانوزیست‌جاذب کربنی حدود ۴۰ درصد به‌دست‌آمد. این مقدار، به میزان قابل توجهی بالاتر از نرخ تنزیل رایج بانکی (۲۳ درصد) است که نشان از سودآور بودن پروژه می‌باشد. تولید این جاذب در مقیاس صنعتی ۱۴۴۰ هزار ریال به ازای هر کیلوگرم محصول نهایی هزینه دارد و قیمت فروش درج شده در محاسبات، ۲۲۰۰ هزار ریال به ازای هر کیلوگرم محصول نهایی است. علاوه بر قابلیت منحصربه‌فرد این جاذب، یعنی دارابودن سه ویژگیِ همزمان حذف کامل (۱۰۰%) و فوق‌العاده سریع (در مدت ۵ دقیقه) فنل و ظرفیت جذب بالا (۲۵۰ میلی‌گرم بر گرم)، مقایسه قیمت فروش این نانوزیست‌جاذب کربنی با قیمت فروش انواع کربن‌های فعال پودری موجود در بازار نشان می‌دهد که این محصول توان رقابت با محصولات موجود در بازار را دارد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از رساله دکترای تخصصی نویسنده اول در واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران می‌باشد.

مراجع

[1] Kohkanzadeh, S., Mobasherpour, I., Molaee, M. J., Salahi, E., & Pazouki, M. (2024). Studying the Effect of Adsorption Process Variables on Adsorption Capacity and Removal Percentage of Toluene from Aqueous Solutions by Magnetic Hydroxyapatite Nanoparticles. Iranian Chemical Engineering Journal, 23(134), 7-19, [In Persian].

[2] Moradizdeh, A., Malek Mohammadi, M. M., & Akhlaghian, F. (2025). Use of Turnip Peel Bioadsorbent to Remove Chromium (VI) from Water. Iranian Chemical Engineering Journal, 23(136), 35-46, [In Persian].
[3] Mohammed, B. B., Yamni, K., Tijani, N., Alrashdi, A. A., Zouihri, H., Dehmani, Y., Chung, I.-M., Kim, S.-H., Lgaz, H. (2019). Adsorptive removal of phenol using faujasite-type Y zeolite: Adsorption isotherms, kinetics and grand canonical Monte Carlo simulation studies. *Journal of Molecular Liquids* 296, 111997.
[4] Almasi, A., Mahmoudi, M., Mohammadi, M., Dargahi, A., & Biglari, H. (2019). Optimizing biological treatment of petroleum industry wastewater in a facultative stabilization pond for simultaneous removal of carbon and phenol. *Toxin Reviews*, *40*(2), 189–197.
[5] Naguib, D. M., & Badawy, N. M. (2020). Phenol removal from wastewater using waste products. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(1), 103592.
[6] Dargahi, A., Mohammadi, M., Amirian, F., Karami, A., & Almasi, A. (2017). Phenol removal from oil refinery wastewater using anaerobic stabilization pond modeling and process optimization using response surface methodology (RSM). *Desalination and water treatment*, *87*, 199-208.
[7] Bettin, F., Cousseau, F., Martins, K., Boff, N. A., Zaccaria, S., da Silveira, M. M., & Dillon, A. J. P. (2019). Phenol removal by laccases and other phenol oxidases of Pleurotus sajor-caju PS-2001 in submerged cultivations and aqueous mixtures. *Journal of environmental management*, *236*, 581-590.
[8] Veeresh, G. S., Kumar, P., & Mehrotra, I. (2005). Treatment of phenol and cresols in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) process: a review. *Water research*, *39*(1), 154-170.
[9] Senturk, H. B., Ozdes, D., Gundogdu, A., Duran, C., & Soylak, M. (2009). Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto organomodified Tirebolu bentonite: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study. *Journal of hazardous materials*, *172*(1), 353-362.
[10] Jampa, S. S. K., Unnarkat, A. P., Vanshpati, R., Pandian, S., Sinha, M. K., & Dharaskar, S. (2020). Adsorption and recyclability aspects of humic acid using nano-ZIF-8 adsorbent. *Environmental Technology & Innovation*, *19*, 100927.
[11] Shahnaz, T., Priyan, V. V., Pandian, S., & Narayanasamy, S. (2021). Use of Nanocellulose extracted from grass for adsorption abatement of Ciprofloxacin and Diclofenac removal with phyto, and fish toxicity studies. *Environmental Pollution*, *268*, 115494.
[12] Yılmaz, Ş., Zengin, A., Şahan, T., & Zorer, Ö. S. (2021). Utilization of a novel polymer–clay material for high elimination of hazardous radioactive contamination uranium (VI) from aqueous environments. *Environmental Technology & Innovation*, *23*, 101631.
[13] Yang, G., Tang, L., Zeng, G., Cai, Y., Tang, J., Pang, Y., ... & Xiong, W. (2015). Simultaneous removal of lead and phenol contamination from water by nitrogen-functionalized magnetic ordered mesoporous carbon. *Chemical Engineering Journal*, *259*, 854-864.
[14] Keshmiri, F. S., Gilani, H. G., & Kazemi, M. S. (2024). Ultra-fast and ultra-efficient phenol removal from aqueous solution using a nano biocarbon adsorbent by RSM-CCD method: parameters, isotherm, kinetic, ANOVA. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(7), 642.
[15] Danish, M., & Ahmad, T. (2018). A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application. *Renewable and sustainable energy reviews*, *87*, 1-21.
[16] https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/activated-carbon-362.html, available in september (2024).
[17] León, M., Silva, J., Carrasco, S., & Barrientos, N. (2020). Design, cost estimation and sensitivity analysis for a production process of activated carbon from waste nutshells by physical activation. *Processes*, *8*(8), 945.
[18] Zein, S. H., & Antony, A. (2022). Techno-Economic Analysis and Feasibility of Industrial-Scale Activated Carbon Production from Agricultural Pea Waste Using Microwave-Assisted Pyrolysis: A Circular Economy Approach. *Processes*, *10*(9), 1702.
[19] Choy, K. K., Barford, J. P., & McKay, G. (2005). Production of activated carbon from bamboo scaffolding waste—process design, evaluation and sensitivity analysis. *Chemical Engineering Journal*, *109*(1-3), 147-165.
[20] GStavropoulos, G. G., & Zabaniotou, A. A. (2009). Minimizing activated carbons production cost. *Fuel processing technology*, *90*(7-8), 952-957.

[21] Nandiyanto, A. B. D. (2018). Cost analysis and economic evaluation for the fabrication of activated carbon and silica particles from rice straw waste. *Journal of Engineering Science and Technology*, *13*(6), 1523-1539.
[22] Lai, J. Y., & Ngu, L. H. (2024). Techno-economic feasibility study for concurrent activated and modified palm kernel shell–derived activated carbon. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(22), 28175-28186.
[23] Ferdiawan, A. W., Imron, M., & Susanto, A. (2025, February). ANALYSIS OF PAYBACK PERIOD, NPV, IRR, PI AND ROI OF COMPUTED TOMOGRAPHY SCAN (CT-SCAN) MEDICAL EQUIPMENT (CASE STUDY OF CARUBAN REGIONAL PUBLIC HOSPITAL). In *The Fourth International Conference on Government Education Management and Tourism* (Vol. 4, pp. 081-081).
[24] E. Lorenc-Grabowska, Effect of micropore size distribution on phenol adsorption on steam activated carbons, Adsorption 22(4) (2016) 599-607.