



بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی پروسه بازیافت کاغذهای باطله با استفاده از روش

سطح پاسخ

پوهنیار نجیب‌الله بلوچ^۱، پوهنیار محمد یزدان پرست^۲، پوهنیار یما اسیل^۳، پوهنیار همایون حکیمی^۴

^۱دپارتمنت کیمیا، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون فراه، فراه، افغانستان

^۲دپارتمنت ریاضی، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون فراه، فراه، افغانستان

^{۳،۴}دپارتمنت فزیک، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون فراه، فراه، افغانستان

ایمیل: baloochnajib65@yahoo.com

چکیده

بازیافت کاغذ نقش مهمی در حفاظت از محیط‌زیست، کاهش مصرف منابع جنگلی و مدیریت پایدار پسماندها دارد. با این حال، حضور ترکیبات کیمیای مختلف، به‌ویژه جوهر چاپی، پروسه بازیافت را با چالش‌هایی مواجه می‌سازد. هدف این تحقیق بررسی پارامترهای مؤثر بر حذف جوهر و بهینه‌سازی شرایط بازیافت کاغذهای اداری بود. بدین منظور، یک مطالعه لابراتواری با استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM) طراحی و پارامترهای مؤثر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که مدل آماری به‌دست آمده معنادار بوده و قابلیت پیش‌بینی مناسبی دارد. شرایط بهینه پروسه شامل مقادیر مناسب NaOH، H₂O₂ و Tween-80 و pH=(8-9) و درجه حرارت بالا تعیین گردید. در این شرایط، میزان بازیافت تجربی به‌طور متوسط ۶۰٪ به‌دست آمد که با مقدار پیش‌بینی‌شده مدل ۶۳٪ تطابق خوبی داشت. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی پروسه بازیافت می‌تواند بازده را افزایش داده، مصرف مواد کیمیای را کاهش دهد و سازگاری بیشتری با محیط‌زیست ایجاد کند.

کلمات کلیدی: بازیافت؛ بهینه‌سازی؛ سطح پاسخ؛ سورفاکتانت؛ کاغذ باطله

Optimization of Key Parameters in Waste Paper Recycling Process Using Response Surface Methodology

Najibullah Balooch¹, Mohammad Yazdan Parast², Yama Aseel³ Homayoon Hakimi⁴

¹Department of Chemistry, Faculty of Education, Farah University, Farah, Af

²Department of Mathematics, Faculty of Education, Farah University, Farah Af

^{3,4}Department of Physics, Faculty of Education, Farah University, Farah Af

Email: baloochnajib65@yahoo.com

Abstract

Paper recycling plays an essential role in environmental protection, reducing the consumption of forest resources, and achieving sustainable waste management. However, the presence of various chemical compounds, particularly printing inks, poses significant challenges to the recycling process. This study aimed to investigate the effective parameters for ink removal and to optimize the recycling conditions of office paper. Accordingly, a laboratory study was designed using the Response Surface Methodology (RSM), and the influential parameters were systematically examined. The results of the analysis of variance (ANOVA) indicated that the obtained statistical model was significant and had good predictive capability. The optimal process conditions were determined to include appropriate levels of NaOH, H₂O₂, and Tween-80, a pH of 8-9, and elevated temperature. Under these conditions, the average experimental recycling yield was approximately 60%, which showed good agreement with the model-predicted value of 63%. These results demonstrate that optimizing the paper recycling process can enhance efficiency, reduce chemical consumption, and improve environmental compatibility.

Keywords: Optimization; Recycling; Response Surface; Surfactant; Waste Paper

ارجاع: بلوچ، ن.، یزدان پرست، م.، اسیل، ی. و حکیمی، ه. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی پروسه بازیافت کاغذهای باطله

با استفاده از روش سطح پاسخ. مجله علمی- تحقیقی علوم طبیعی پوهنتون کابل، ۸ (فوق‌العاده)، ۱۵۱-۱۶۹.

<https://doi.org/10.62810/jns.v8iSpecial Issue>

مقدمه

با افزایش تولید و مصرف کاغذ در سراسر جهان، بازیافت کاغذهای باطله به یکی از مهم‌ترین راهکارهای کاهش مصرف منابع طبیعی و آلودگی محیط‌زیست تبدیل شده است. در میان انواع کاغذهای بازیافتی، کاغذهای باطله‌ای اداری به دلیل جوهر و ترکیبات کیمیاوی مختلف، به چالشی جدی در پروسه بازیافت تبدیل شده است. سفید کردن این نوع کاغذها به منظور استفاده دوباره، نیازمند به‌کارگیری روش‌های مؤثر و پایدار می‌باشد که کمترین آسیب را به محیط‌زیست وارد کنند. در اسپانیا، سالانه ۲۴،۲ تن زباله جامد شهری تولید می‌شود که از این مقدار، ۱۷،۳ تن مربوط به بخش عضوی این زباله‌ها است (López Alvarez et al., 2009). اروپا در سال ۲۰۱۲ نرخ بازیافت ۷۲٪ را ثبت کرده است و برای سال ۲۰۲۰ نرخ ۷۴٪ تعیین کرده است. اگرچه کاغذ به طور متوسط ۵ بار قابل بازیافت است، بیشتر محصولات کاغذی عمر بسیار کوتاهی (چندروزه) دارند که ممکن است مصرف منابع برای تولید و استفاده از آن در کاربردهای کم‌ارزش را توجیه نکند (Li et al., 2018). در سال ۲۰۱۲، برای تولید محصولات کاغذی بیش از ۵ میلیون تن کاغذ (تقریباً ۱۱٪ کاغذ بازیافتی) از آمریکا، روسیه، برزیل، کانادا و غیره وارد اروپا شد (Pivnenko et al., 2015). نرخ بازیابی متوسط کاغذ ضایعاتی در اروپا حدود ۴۳٪ و در لهستان ۳۷٪ است. در سال ۲۰۰۶، مقدار کل کاغذ ضایعاتی استفاده شده در لهستان ۱۰۲۱ تن بوده است (Ishii et al., 2021). هند ۵۰٪ کاغذهای مورد استفاده خود را از کاغذهای بازیافتی تامین می‌کند (Tendulkar et al., 1995).

بازیافت معمولاً به عنوان یک جزء کلیدی از استراتژی‌ها برای دستیابی به بهره‌وری بهتر منابع و کاهش فشار محیط‌زیستی مرتبط با استفاده از منابع شناخته می‌شود. با این حال، برای حداکثر کردن مزایای خالص حاصل از بازیافت، باید اثرات سیستم‌محور جایگزینی مواد اولیه با مواد بازیافتی و چگونگی تغییر این اثرات تحت استراتژی‌های مختلف را درک کرد. انواع و منابع مواد ضایعاتی که در حاشیه استفاده می‌شوند. به‌طور مداوم تغییر می‌کنند، طوری که تأثیرات محیط‌زیستی حاصل از افزایش تقاضا برای محصولات بازیافتی بسته‌بندی تغییر می‌کند. دفن زباله هنوز در سطح جهانی رایج‌ترین گزینه برای دفع زباله‌های جامد است (Manfredi et al., 2010). نتایج نشان می‌دهند که بازیافت تأثیر مثبتی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مواد بازیافتی که در محیط زیست دفن یا رها می‌شوند، دارد. بازیافت یکی از استراتژی‌های پیشنهادی برای دستیابی به بهره‌وری بهتر منابع است. به‌طور کلی، استفاده از مواد بازیافتی نه تنها استفاده از مواد اولیه را کاهش می‌دهد، بلکه تقاضای انرژی در تولید مواد را نیز کاهش می‌دهد (Chang et al., 2019). کاغذ ساخته شده از فیبرهای بازیافتی دارای لکه‌های

جوهر مشخصی بر روی صفحات است. مصرف کنندگان کاغذ نمی خواهند کاغذی با ظاهر بازیافتی داشته باشند. بازار خواهان کاغذی با کیفیت بالا از نظر روشنایی و تمیزی است. کاغذ با کیفیت پایین ممکن است منجر به انباشت، یا گسترش غیر عمدی مواد کیمیایی مضر موجود در کاغذ شود. بر اساس نتایج تحقیقات، ۵۱ ماده به عنوان مواد بالقوه بحرانی شناسایی شدند (شامل برخی از روغن های معدنی، فتالات ها، فنول ها، پارابن ها و همچنین گروه های دیگر مواد کیمیایی) که در رابطه با بازیافت کاغذ اهمیت دارند (Pivnenko et al., 2015). در پاسخ به این نیاز، روش های فزیکیمی و کیمیایی مناسب برای تولید کاغذهای با کیفیت بالا در حال توسعه است. تولیدکنندگان همچنین روش های مختلفی از جمله پروسه های فلوتاسیون دینک کردن، شستشو دینک کردن، ترکیب فلوتاسیون و سفید کردن پس از دینک کردن و حتی پخش داغ را برای تولید خمیر ثانویه روشن تر و تمیزتر توصیه می کنند (Ciriminna et al., 2016).

یکی از مشکلات اساسی در بازیافت کاغذهای باطله اداری، باقی ماندن مواد رنگزا و سایر ناخالصی ها در الیاف سلولوزی است که بر کیفیت کاغذ بازیافتی تأثیر منفی می گذارد. روش های متداول سفید کردن اغلب به استفاده از مواد کیمیایی قوی وابسته هستند که می توانند مشکلات محیط زیستی به همراه داشته باشند. از این رو، یافتن روش های جایگزین که ضمن حفظ کیفیت، اثرات محیط زیستی کمتری داشته باشند، ضروری است. حدود ۸۰٪ از محتوای کاغذ بازیافتی معمولاً می تواند در پروسه بازیافت استفاده شود؛ اما ۲۰٪ آن نمی تواند (Li et al., 2016).

مطالعات نشان می دهند که اگر بازیافت کاغذ ۵۰٪ یا ۷۵٪ افزایش یابد، به ترتیب ۲۰۱۷۱،۷۵۰ و ۳،۲۵۷،۶۲۵ درخت قطع نمی شود (Bahrami et al., 2020). انرژی صرفه جویی شده زمانی که محصولات کاغذی استفاده شده به محصولات جدید کاغذی بازیافت می شوند، بین ۳۹۰۰۰-۱۴۰۰۰ KJ.Kg⁻¹ تخمین زده شده است (MKUJNSRKorris, 1995). در سال های اخیر، تحقیقات مختلفی برای توسعه روش های سفید کردن کاغذهای باطله ای اداری انجام شده است. برخی مطالعات بر استفاده از پروسه های اکسیدیشن؛ مانند هایدروجن پراکساید و اوزون، سورفاکتانت ها و انزیم ها که دوستار محیط زیست هستند، پرداخته اند. در حال حاضر، استفاده از کلورین (Cl₂) در پروسه سفید کردن به دلایل محیط زیستی و ممنوع است. علاوه بر این، در تولید دستمال های صحتی، هرگونه ترکیبات حاوی (Cl₂) باید حذف شوند، از جمله کلورین دای اکساید ClO₂. بنابراین، استفاده از سفیدکننده هایی با مواد اکسیجن کم فعال تر؛ مانند O₂، O₃ و H₂O₂ جایگزین شوند بهتر است. باوجود این، هنوز

چالش هایی؛ مانند هزینه بالا، بازده پایین در حذف مرکبات و تأثیرات محیط زیستی برخی روش ها، نیاز به تحقیقات بیشتر را نشان می دهد (Ishii et al., 2021).

مروری بر ادبیات

بازیافت کاغذ یکی از راهکارهای کلیدی برای کاهش مصرف منابع اولیه سلولزی و مدیریت پایدار پسماندها است. مطالعات نشان داده اند که بازیافت علاوه بر مزایای محیط زیستی، تأثیر قابل توجهی بر صرفه جویی اقتصادی و کاهش انتشار آلوده کننده ها دارد (Bahrami & Jafari, 2020; Chang et al., 2019; Morris, 1996). از جمله فلزات سنگین و جوهر چاپی، پروسه بازیافت را با چالش هایی روبه رو می سازند. یکی از مهم ترین مراحل در بازیافت، پروسه حذف جوهر است که نقش تعیین کننده ای در کیفیت نهایی محصول دارد. استفاده از سورفاکتانت ها در این زمینه به عنوان یک روش کارآمد معرفی شده است (Borchardt, 1997). همچنین، H_2O_2 به عنوان یک عامل اکساید کننده سازگار با محیط زیست، کاربرد گسترده ای در حذف جوهر از الیاف بازیافتی دارد. از نظر تکنالوژی جدید، مطالعات متعددی به تبدیل ضایعات کاغذ به محصولات با ارزش پرداخته اند؛ از جمله تولید سوخت های زیستی (Brummer et al., 2014) و جاذب های زیستی برای حذف فلزات سنگین (Li et al., 2018). این روش ها نشان می دهند که بازیافت کاغذ فراتر از تولید مجدد کاغذ بوده و می تواند به چرخه اقتصاد کمک کند. از سوی دیگر، اثرات محیط زیستی و صحت ناشی از فعالیت فابریکه های بازیافت نیز مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال، خصوصیات میکروبیولوژیکی هوای محیط فابریکه های بازیافت را بررسی کرده و بر ضرورت مدیریت نکات صحت تأکید کرده اند. همچنین، مطالعات مربوط به دفن یا سوزاندن کاغذ های زائد نشان داده اند که این روش ها می توانند اثرات منفی شدیدی بر محیط زیست داشته باشند (Manfredi et al., 2010; Méndez et al., 2009; López Alvarez et al., 2009).

در مجموع تحقیقات پیشین نشان می دهد که گرچه بازیافت کاغذ به عنوان یک پروسه سبز و اقتصادی شناخته می شود؛ اما بهینه سازی شرایط پروسه (از جمله انتخاب مواد کیمیای مناسب و شرایط عملیاتی) همچنان یک بخش کلیدی برای تحقیقات آینده است. استفاده از روش های آماری مانند RSM و طراحی پروسه های کارآمدتر و سازگارتر با محیط زیست نکته مهمی در این تحقیق است (Altunay et al., 2023).

این تحقیق با هدف بررسی پارامترهای مهم پروسه بازیافت کاغذ های اداری و اینکه کدام پارامترها در سفید کردن کاغذها تأثیر بیشتری دارند، با استفاده از طرح روش سطح پاسخ RSM بررسی و مدل های

مناسب پیشنهاد شد. در این مطالعه، پارامترهای مهم پروسه بازیافت کاغذ مانند: مقدار سودیم هایدروکساید NaOH، سورفاکتانت غیر ایونی توین ۸۰، هایدروجن پراکساید H_2O_2 ، پی اچ pH و درجه حرارت بررسی و توسط روش RSM مدل‌هایی که بیشترین اثرگذاری را دارند، برای تحقیق انتخاب گردید. با توجه به اهمیت بازیافت و استفاده مجدد از کاغذهای باطله، نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود پروسه‌های سفید کردن کاغذ و توسعه روش‌های پایدارتر و دوستار محیط‌زیست در صنعت بازیافت کمک کند.

مواد و روش‌ها

مواد

برای انجام آزمایش‌ها، محلول‌های HCl (5 mol L^{-1})، $NaOH$ (5 mol L^{-1})، سورفاکتانت غیر ایونی Tween-80 (0.008 mol L^{-1}) و H_2O_2 (5 mol L^{-1}) تهیه گردید.

وسایل

برای تنظیم pH از pH متر (BANTE 210) استفاده شد. مواد با استفاده از ترازوی آنالیتیکال (LIBROR-AEG-120) با دقت 0.1 mg وزن شدند. میکروپیپت‌های با ظرفیت قابل تنظیم (1-10 mL) از ISOLAB GmbH برای آماده‌سازی و انتقال محلول‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. برای همزدن نمونه‌ها از میکسر ورتکس پیشرفته (ZX3 Advanced Vortex, Velp Scientifica) بهره برده شد. برای کنترل و تنظیم درجه حرارت از ترمومتر سیمایی ($0-100^\circ \text{C}$) استفاده گردید.

روش ساخت نمونه‌ها

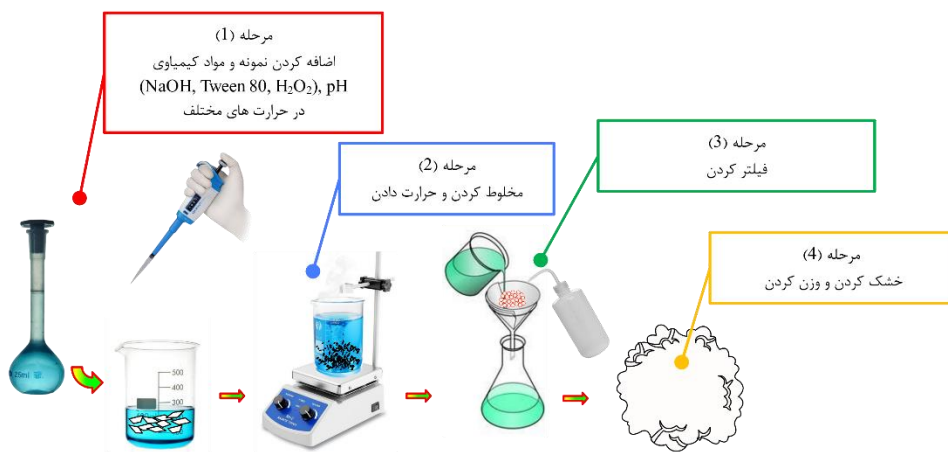
برای انجام کار طرح RSM برای ۴۶ نمونه ساخته شد. در هر نمونه دارای پنج گرام کاغذ اداری حاوی جوهر که به ذرات کوچک تبدیل شده بود، استفاده شد. پنج گرام کاغذ را در بیکر قرار داده و (50 mL) آب مقطر به آن علاوه شد. سپس، به مدت ۳۰ دقیقه در محدوده حرارت ($40-70^\circ \text{C}$) روی Hot Plate مغناطیسی توسط مگنت مخلوط شد تا ذرات کاغذ یکنواخت شوند. بعد مقدارهای پیشنهاد شده در طرح RSM از محلول‌های ساخته شده به ترتیب مرحله نخست $NaOH$ به نمونه‌ها علاوه شد تا الیاف سلولوزی تورم کنند و میزان نفوذپذیری افزایش یابد. مرحله بعد سورفاکتانت توین ۸۰ علاوه شد تا کاشش بین ذرات سلولوز و جوهر را کاهش دهد و باعث تعلیق ذرات جوهر شود. مرحله سوم H_2O_2 علاوه شد تا جوهر باقی مانده در الیاف سلولوزی را با اکسیدیشن کردن تخریب کند. برای تنظیم کردم pH محیط از محلول HCl (5 mol L^{-1}) استفاده شد.

طراحی آزمایش

برای بهینه‌سازی عوامل مؤثر بر بازیافت که پس از آزمایش‌های مقدماتی انتخاب شدند، از طراحی روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. به این ترتیب، دو مدل خطی و مکعبی برای عوامل مختلف از جمله H_2O_2 (10-50 mL)، Tween 80 (10-100 mL)، pH (5-9)، NaOH (10-50 mL) و درجه حرارت ($40-70^\circ\text{C}$) اعمال شد. در مجموع، ۴۶ آزمایش طراحی شده انجام شد. نمادها، واحدها و سطوح عوامل مؤثر در جدول (۱) ارائه شده‌اند. بهینه‌سازی عوامل بر اساس معادله درجه دوم زیر انجام شد:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2$$

که در آن Y پاسخ متغیرهای (X_1) ، (X_2) و (X_3) است، (β_{11}) ، (β_{22}) و (β_{33}) ضرایب درجه دوم، (β_1) ، (β_2) و (β_3) ضرایب خطی، (β_{12}) ، (β_{13}) و (β_{23}) ضرایب اثرات متقابل، و (β_0) یک مقدار ثابت است.



شکل ۱: نمایی از مراحل کار روی کاغذ باطله اداری

یافته‌ها

مطالعات آزمایشی اولیه

پیش از اجرای طراحی RSM مطالعات اولیه برای انتخاب پارامترهای مناسب انجام شد. سپس، اثر عواملی مانند: حجم سورفاکتانت، حجم NaOH، حجم H_2O_2 و محدوده درجه حرارت بر مقدار حذف جوهر از کاغذ اداری بررسی شد.

بهینه‌سازی مقدار عوامل مؤثر با استفاده از روش سطح پاسخ

بر اساس یافته‌های اولیه، بهینه‌سازی حجم NaOH، pH، حجم سورفاکتانت و H_2O_2 با استفاده از طراحی RSM مورد بررسی قرار گرفت. مدل مورد نظر برای عوامل مربوطه تنظیم شد و نتایج به‌دست آمده در جدول (۲) ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل واریانس

تجزیه و تحلیل واریانس برای ارزیابی آماری تأثیر عوامل بهینه‌شده بر بازیافت کاغذ انجام شد. اولین پارامتر ارزیابی‌شده بر اساس واریانس مقدار P (p-value) بود. مقادیر حاصل از مدل‌های پیشنهادشده، نشان می‌دهند که نتایج معنادار هستند؛ زیرا مقدار p-value مدل (<0.0001) کمتر از 0.05 است. همچنین، مقدار p-value باید در تعاملات خطی، دوتایی و درجه دوم معنادار باشد. همان‌طور که در جدول (۲) گزارش شده است، مشخص شد که ۱۱ مدل برای بازیافت کاغذ معنادار نبود. مقادیر F نیز برای تعیین مؤثرترین تعاملات در بازیافت بررسی شدند. همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، اثر عوامل مهم را بر بازیافت طبق معادله درجه دوم زیر توضیح می‌دهد:

$$\begin{aligned} \text{بازیافت} = & +60.00+2.44A+3.25B+3.06C+3.31D+13.56E+2.00AB+1.25AC- \\ & 0.5000AD+1.50AE+0.2500BC-0.2500BD+0.5000BE+0.0000CD- \\ & 0.7500CE+0.5000DE-1.50 A^2-1.58 B^2-0.8333 C^2-0.5000 D^2-2.33 E^2 \end{aligned}$$

معادله بر اساس عوامل کدگذاری‌شده می‌تواند برای پیش‌بینی پاسخ در سطوح مشخصی از هر عامل استفاده شود. به‌طور پیش‌فرض، سطوح بالای عوامل به‌صورت (+) و سطوح پایین به‌صورت (-) کدگذاری می‌شوند. این معادله کدگذاری‌شده برای شناسایی تأثیر نسبی عوامل از طریق مقایسه ضرایب عوامل مفید است.

جدول ۱: نتایج ارزیابی مدل‌های خطی، درجه دوم و درجه سوم در تحلیل بازیافت کاغذ

Source	Sequential p-value	Adjusted R ²	Predicted R ²	
Linear	< 0.0001	0.9398	0.9294	Suggested
2FI	0.7321	0.9346	0.8953	
Quadratic	0.0255	0.9517	0.8926	Suggested
Cubic	0.1531	0.9687	0.5542	Aliased

جدول ۲: خلاصه‌یی از پارامترهای معنی‌دار بازیافت کاغذ به‌دست‌آمده از آنالیز واریانس (ANOVA)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	3632.18	20	181.61	45.29	< 0.0001	Significant
A-NaOH	95.06	1	95.06	23.71	< 0.0001	Significant
B-Tween 80	169.00	1	169.00	42.14	< 0.0001	Significant
C-H ₂ O ₂	150.06	1	150.06	37.42	< 0.0001	Significant
D-pH	175.56	1	175.56	43.78	< 0.0001	Significant
E-Temp	2943.06	1	2943.06	733.93	< 0.0001	Significant
AB	16.00	1	16.00	3.99	0.0568	Significant
AC	6.25	1	6.25	1.56	0.2234	Not Significant
AD	1.0000	1	1.0000	0.2494	0.6219	Not Significant
AE	9.00	1	9.00	2.24	0.1466	Not Significant
BC	0.2500	1	0.2500	0.0623	0.8049	Not Significant
BD	0.2500	1	0.2500	0.0623	0.8049	Not Significant
BE	1.0000	1	1.0000	0.2494	0.6219	Not Significant
CD	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	Not Significant
CE	2.25	1	2.25	0.5611	0.4608	Not Significant
DE	1.0000	1	1.0000	0.2494	0.6219	Not Significant
A ²	19.64	1	19.64	4.90	0.0363	Significant
B ²	21.88	1	21.88	5.46	0.0278	Significant
C ²	6.06	1	6.06	1.51	0.2304	Not Significant
D ²	2.18	1	2.18	0.5441	0.4676	Not Significant
E ²	47.52	1	47.52	11.85	0.0020	Significant

مقدار F، نشان می‌دهد مدل از نظر آماری معنی‌دار است. احتمال اینکه مقدار F به این بزرگی صرفاً بر اثر نویز به وجود آمده باشد، کمتر از ۰٫۰۱٪ است. مقادیر p نشان‌دهنده این است که متغیرهای مدل معنی‌دار هستند. در این مورد A، B، C، D، E، A²، B² و E² از جمله پارامترهای معنی‌دار مدل هستند. مقادیر p بیشتر از ۰٫۱۰۰۰ نشان می‌دهند که متغیرهای مربوطه تأثیر معنی‌داری ندارند. اگر تعداد زیادی از متغیرهای مدل بی‌معنی باشند (به جز متغیرهایی که برای حفظ سلسله‌مراتب مدل لازم هستند)، کاهش مدل می‌تواند دقت مدل را بهبود بخشد.

اعتبار نتایج حاصل از مدل RSM با استفاده از پارامترهای کیفی مدل ارزیابی شد که در جدول ۲ ارائه شده است. به عنوان مثال، مقادیر R² باید به ۱ نزدیک باشند تا نتایج معنادار و قابل قبول باشند. مقدار R² (0.9731) به‌دست‌آمده از مدل ایجاد شده، یافته‌های ما را تأیید می‌کند. علاوه بر این، مقادیر R²

تعدیل شده و R^2 پیش‌بینی شده نیز باید به ۱ نزدیک باشند و تفاوت بین این دو مقدار نباید بیش از ۰,۲ باشد. جدول ۱ نتایج این موضوع را تأیید می‌کند. مقدار R^2 تعدیل شده با در نظر گرفتن تعاملاتی که به مدل‌ها کمک می‌کنند، محاسبه شد. اگر تعاملاتی که در میزان بازیافت تأثیر ندارند از مدل حذف شوند، مقدار R^2 تعدیل شده افزایش می‌یابد.

روش سطح پاسخ

تأثیر تعاملات دوتایی عوامل بهینه‌شده بر میزان بازیافت از طریق تحلیل سطح پاسخ تجسم شد. تأثیر pH و حجم NaOH، حجم Tween 80، حجم H_2O_2 و محدوده درجه حرارت بر مقدار بازیافت کاغذ در گراف‌های ارائه شده است. در pH بالاتر از ۵، مقدار اثرگذاری در تمامی حجم‌های مواد استفاده شده افزایش یافت. با افزایش pH، NaOH در ساختار سلولوزی کاغذ اثر گذاشته و باعث متورم شدن الیاف سلولوزی می‌شود که این امر میزان نفوذپذیری Tween 80 و H_2O_2 را افزایش داده و جوهر سریع‌تر از الیاف سلولوزی جدا می‌شود.

جدول ۳: نتایج پارامترهای کیفی مدل ایجاد شده

Quality parameters	Value
Std. Dev.	2.00
R^2	0.9731
Adjusted R^2	0.9517
Predicted R^2	0.8926
Adeq Precision	25.9297
Mean Recovery (%)	63

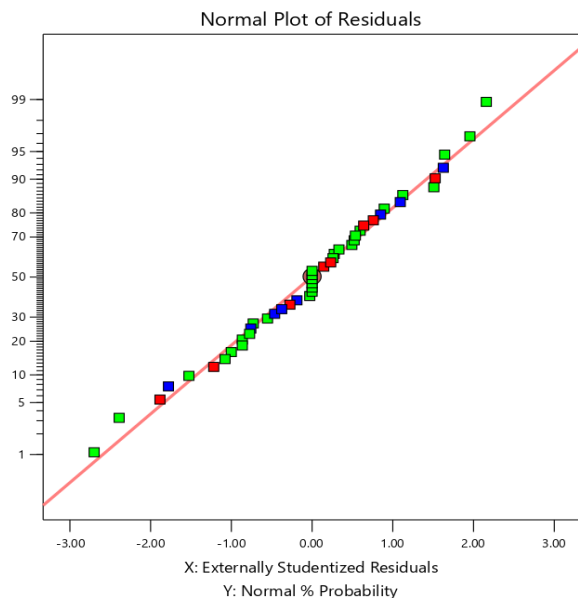
R^2 پیش‌بینی شده مقدار ۰,۸۹۲۶ دارد که با R^2 تعدیل شده برابر ۰,۹۵۱۷ در توافق قابل قبولی است؛ به این معنی که اختلاف کمتر از ۰,۲ است. دقت کافی نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند. نسبت بزرگ‌تر از ۴ مطلوب است. نسبت ۲۵,۹۳۰ نشان‌دهنده‌ی سیگنال کافی است. این مدل می‌تواند برای هدایت فضای طراحی استفاده شود (Altunay et al., 2023).

جدول ۴: برآورد ضرایب عوامل و تحلیل هم خطی چندگانه (VIF)

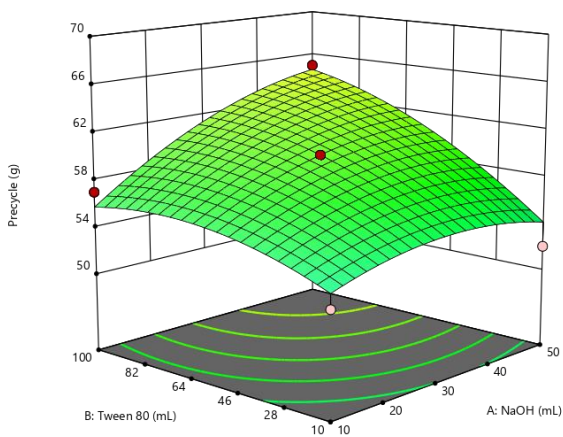
Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	60.00	1	0.8175	58.32	61.68	
A-NaOH	2.44	1	0.5006	1.41	3.47	1.0000
B-Tween 80	3.25	1	0.5006	2.22	4.28	1.0000
C-H ₂ O ₂	3.06	1	0.5006	2.03	4.09	1.0000
D-pH	3.31	1	0.5006	2.28	4.34	1.0000
E-Temp	13.56	1	0.5006	12.53	14.59	1.0000
AB	2.00	1	1.00	-0.0621	4.06	1.0000
AC	1.25	1	1.00	-0.8121	3.31	1.0000
AD	-0.5000	1	1.00	-2.56	1.56	1.0000
AE	1.50	1	1.00	-0.5621	3.56	1.0000
BC	0.2500	1	1.00	-1.81	2.31	1.0000
BD	-0.2500	1	1.00	-2.31	1.81	1.0000
BE	0.5000	1	1.00	-1.56	2.56	1.0000
CD	0.0000	1	1.00	-2.06	2.06	1.0000
CE	-0.7500	1	1.00	-2.81	1.31	1.0000
DE	0.5000	1	1.00	-1.56	2.56	1.0000
A ²	-1.50	1	0.6778	-2.90	-0.1039	1.20
B ²	-1.58	1	0.6778	-2.98	-0.1873	1.20
C ²	-0.8333	1	0.6778	-2.23	0.5627	1.20
D ²	-0.5000	1	0.6778	-1.90	0.8961	1.20
E ²	-2.33	1	0.6778	-3.73	-0.9373	1.20

برآورد ضریب، نشان دهنده تغییر مورد انتظار در پاسخ به ازای هر واحد، تغییر در مقدار یک عامل است، در حالی که سایر عوامل ثابت نگه داشته شده اند. مقدار عرض از مبدأ در یک طراحی متعامد، میانگین کلی پاسخ همه آزمایش ها را نشان می دهد. ضرایب، تنظیماتی حول آن میانگین هستند که بر اساس تنظیمات عوامل انجام می شوند. زمانی که عوامل متعامد باشند، مقدار فاکتور تورم واریانس VIF برابر ۱ است. مطابق به شکل (۲) مقدار VIF بیشتر از ۱ نشان دهنده هم خطی چندگانه است.

هرچه مقدار VIF بیشتر باشد، همبستگی بین عوامل شدیدتر خواهد بود، مطابق به جدول (۴). به عنوان یک قاعده کلی، مقدار VIF کمتر از ۱۰ قابل قبول است.



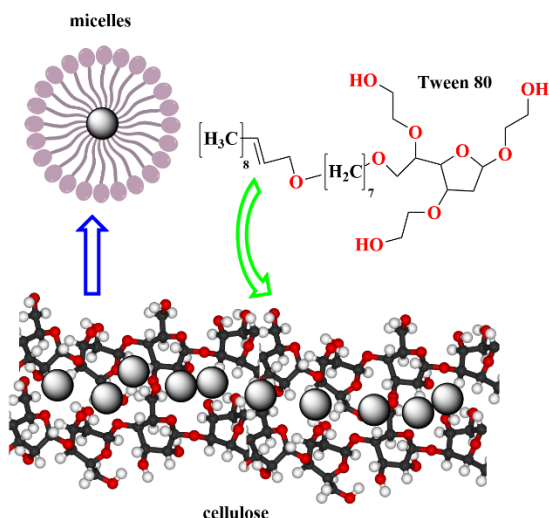
شکل ۲: گراف رگرسیون



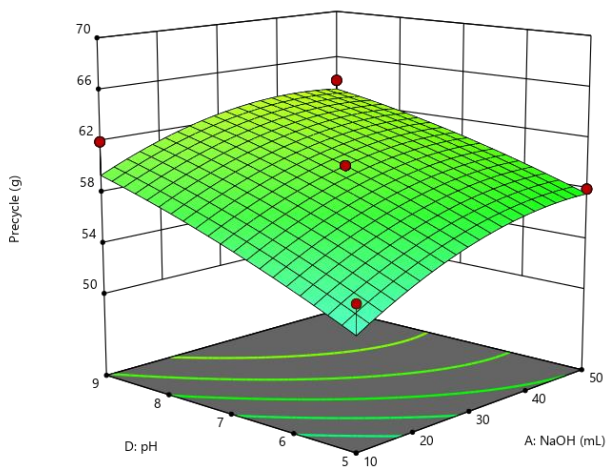
شکل ۳: تاثیر سورفاکتانت

توین ۸۰ یک سورفاکتانت غیر ایونی است که در صنایع غذایی، مواد آرایشی، داروسازی و بیوتکنالوژی استفاده دارد. این سورفاکتانت در ساختمان خود دارای یک بخش آب دوست و یک

بخش آب‌گریز است. زمانی الیاف کاغذ در موجودیت قلوئی قرار می‌گیرند، متورم شده و زنجیره آب‌گریز سورفاکتانت در الیاف سلولوز نفوذ می‌کند و می‌تواند با ذرات جوهر رابطه برقرار کنند و آنها را در محلول حل کند. در این تحقیق حجم 95 mL از سورفاکتانت تأثیر بیشتری در سفید کردن کاغذ نشان داد.

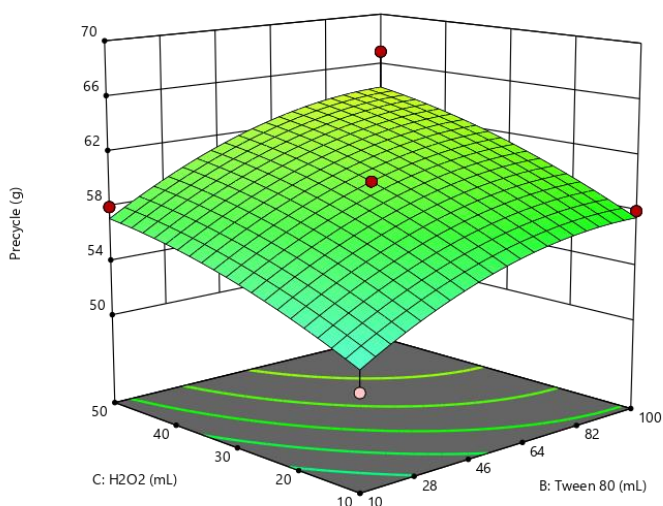


شکل ۴: تشکیل میسل از سورفاکتانت با ذرات جوهر



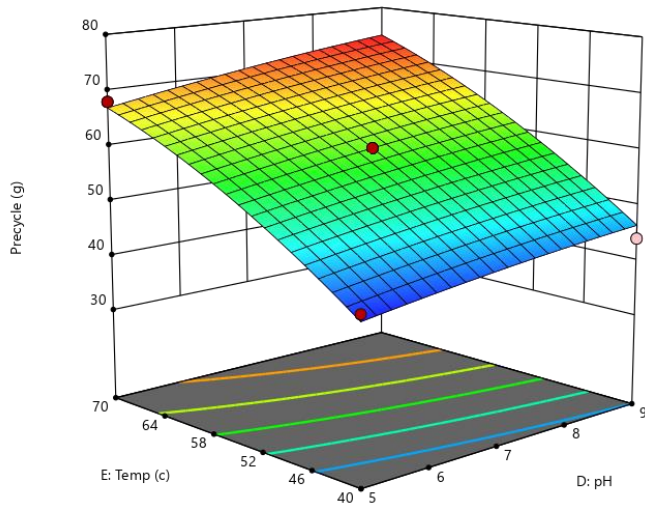
شکل ۵: تأثیر pH و قلوئی

pH یکی از مهم ترین پارامترها در تحقیقات به حساب می‌آید. مواد در محیط‌های اسیدی و قلوی از خود رفتارهای متفاوتی نشان می‌دهند. در این تحقیق نیز نقش pH کاملاً واضح است که در محیط قلیایی تأثیر عوامل سفیدکننده (H_2O_2 , Tween 80) بیشتر دیده شد. در محیط قلیایی pH=8 و موجودیت $\text{NaOH}=35 \text{ mL}$ نفوذپذیری عوامل سفیدکننده‌ی بیشتر دیده شد (Méndez et al., 2009; Tendulkar et al., 1995).

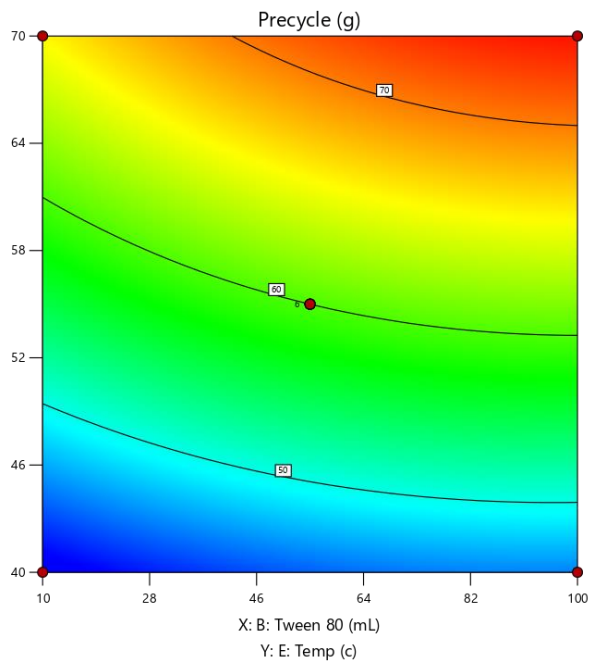


شکل ۶: تأثیر H_2O_2

هیدروجن پراکسید H_2O_2 یک ماده اکسیدکننده‌ی قوی است که در بسیاری از صنایع استفاده می‌شود و با خاصیت اسیدی pH=4.5 به خوبی می‌تواند ترکیبات عضوی را اکسیدیشن کند. این ماده یک سفیدکننده‌ی قوی است و در این تحقیق حجم 45 mL از آن تأثیر بیشتری بر سفید کردن کاغذ داشت. تعامل اثرگذاری H_2O_2 در موجودیت NaOH در زیر نشان داده شده است. ایون پرهیدروکسیل (HOO^-) که در شرایط قلیایی تولید می‌شود، یک ایون سفیدکننده‌ی مؤثر است. بنابراین، لازم است مقدار کافی از ایون‌های پرهیدروکسیل تولید شود. با این حال، مواد پرکننده، ایون‌های فلزی، باکتری‌ها و غیره که روی کاغذ حضور دارند، همواره موانعی برای پاک کردن جوهر هستند. زباله‌های کاغذی دارای مقداری زیادی از فلزات Hg و Pb و مرکبات CFC هستند که می‌توانند در پروسه حذف جوهر از الیاف سلولوزی تأثیر منفی بگذارند (Manfredi et al., 2010).



شکل ۷: تأثیر حرارت



شکل ۸: نمودار کانتور تأثیر حرارت بر پاک کردن جوهر

حرارت می‌تواند سرعت تعاملات کیمیاوی افزایش دهد. مالیکول‌ها زمانی که انرژی دریافت می‌کنند، حرکت آن‌ها در محیط افزایش می‌یابد و این امر نفوذپذیری در الیاف کاغذ را برای توین ۸۰ و H_2O_2 افزایش می‌دهد. در این تحقیق نیز در حرارت‌های بالا تأثیر بیشتری در سفید کردن کاغذ داشت (Méndez et al., 2009). مقدار الیاف باقی مانده در انتهای کار وزن شد و میانگین فیصدی آنها ۶۰٪ که به میانگین نشان داده شده در طرح، مطابق به گراف‌های بالا و جدول (۳) تحقیق انجام شده را تایید می‌کند.

بحث و مناقشه

مطالعات اولیه این تحقیق نشان داد که انتخاب و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی نقش تعیین‌کننده‌ی در پروسه حذف جوهر از کاغذهای بازیافتی دارد. بررسی اثر حجم NaOH، مقدار سورفاکتانت غیرایونی (Tween 80)، غلظت H_2O_2 ، pH و درجه حرارت نشان داد که هر یک از این عوامل به صورت مستقل و همچنین در تعامل با یکدیگر، بر میزان حذف جوهر و بهبود کیفیت فیبرهای سلولزی تأثیرگذارند. نتایج حاصل از مدل RSM و تحلیل ANOVA بیانگر آن است که pH و درجه حرارت بیشترین اثر را بر پروسه بازیافت کاغذ داشته‌اند. این یافته با مکانیزم‌های شناخته شده در ادبیات علمی مطابقت دارد؛ چرا که در محیط قلیایی، الیاف سلولزی متورم شده و امکان نفوذ سورفاکتانت و H_2O_2 افزایش می‌یابد (Méndez et al., 2009). به خصوص حضور NaOH موجب افزایش تعامل‌پذیری الیاف شده و شرایط لازم برای تشکیل رادیکل‌های فعال HOO^- از H_2O_2 را فراهم می‌سازد. این رادیکل‌ها به عنوان عوامل سفیدکننده قوی عمل کرده و تخریب انتخابی رنگدانه‌ها و مرکبات جوهر را تسهیل می‌کنند. علاوه بر این، نقش Tween 80 در پروسه حذف جوهر قابل توجه است. این سورفاکتانت با داشتن بخش‌های آب‌دوست و آب‌گریز، توانایی تشکیل میسل و تأثیر بر ذرات جوهر را داشته و به انتقال آن‌ها به محیط آبی کمک می‌کند. یافته‌های این تحقیق نشان دادند که در شرایط قلیایی، عملکرد Tween 80 به طور معناداری افزایش یافته و منجر به جداسازی مؤثرتر رنگدانه‌ها از ساختار الیاف می‌شود. عامل درجه حرارت نیز همان گونه که انتظار می‌رفت، موجب افزایش مقدار تعاملات و تسهیل پروسه حذف جوهر گردید. افزایش درجه حرارت باعث افزایش حرکت مالیکولی و نفوذپذیری مواد در بافت سلولزی شده و در نهایت موجب افزایش بازدهی پروسه گردید (Méndez et al., 2009). با وجود این، موانعی همچون وجود مواد پرکننده، ایون‌های فلزی سنگین و ترکیبات مزاحم موجود در کاغذهای باطله می‌تواند بر کارایی حذف جوهر اثر منفی بگذارد (Manfredi et al., 2010).

بنابراین، علاوه بر بهینه سازی شرایط عملیاتی، توجه به پیش تصفیه و کنترل ناخالصی ها می تواند در بهبود کیفیت نهایی پروسه مؤثر باشد.

به طور کلی، نتایج این تحقیق هم راستا با مطالعات پیشین است و نشان می دهد که بهینه سازی همزمان عوامل عملیاتی به کمک روش سطح پاسخ می تواند ابزاری قدرتمند برای ارتقای پروسه بازیافت کاغذ و حذف جوهر باشد. روش سطح پاسخ در این تحقیق نقطه متمایزی با مطالعات انجام شده روی بازیافت کاغذ است. این یافته ها نه تنها در سطح لابراتواری بلکه در مقیاس صنعتی نیز قابلیت کاربرد دارند.

نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر عوامل بهینه سازی شده بر پروسه بازیافت کاغذ بررسی شد. تحلیل ها نشان داد که مدل آماری کلی معنادار بوده و توان پیش بینی مناسبی دارد. نتایج به طور روشن بیانگر آن است که شرایط بهینه شامل pH در محدوده ۸-۹، NaOH (35 mL)، H_2O_2 (45 mL)، Tween 80 (95 mL) و درجه حرارتی $100^{\circ}C$ موجب بهبود قابل توجه بازیافت کاغذ گردید. این تحقیق نشان داد که روش بهینه شده نه تنها بازده پروسه را افزایش می دهد، بلکه به دلیل مصرف کنترل شده مواد کیمیاوی و سازگاری بیشتر با محیط زیست، نسبت به روش های متداول از مزیت های قابل توجهی برخوردار است. بنابراین، این روش می تواند به عنوان یک راهکار نوآورانه و پایدار برای مدیریت پسماندهای کاغذی مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این دستاوردها، تحقیق حاضر محدود به مقیاس لابراتواری بود و برای تعمیم نتایج به مقیاس صنعتی نیاز به مطالعات تکمیلی وجود دارد. تحقیقات آینده می تواند شامل بررسی تأثیر سایر ترکیبات کیمیاوی، در مقیاس صنعتی و مقایسه این روش با سایر رویکردهای بازیافت باشد.

سپاس گذاری

نویسندگان این تحقیق مراتب امتنان و سپاس خویش را از برگزارکنندگان محترم کنفرانس بین المللی پوهنخی محیط زیست پوهنتون کابل به خاطر فراهم سازی زمینهی ارائهی این پژوهش ابراز می دارند. همچنان از هیأت محترم بازنگر مقاله به دلیل بررسی دقیق، نقدهای علمی و پیشنهادهای سازنده که در ارتقای کیفیت این مقاله نقش مؤثر داشته است، صمیمانه قدردانی می گردد.

سه‌م نویسندگان

این تحقیق لابراتواری با همکاری مشترک چهار نویسنده انجام شده است. نویسنده‌ی اول مسئول اصلی طراحی طرح تحقیق، تعیین اهداف تحقیق، اجرای بخش عمده‌ی کار لابراتواری و جمع‌آوری داده‌ها بوده است. نویسنده‌ی دوم در آماده‌سازی مواد و تجهیزات لابراتواری، اجرای آزمایش‌ها، ثبت نتایج و همکاری در تحلیل اولیه داده‌ها نقش داشته است. نویسنده‌ی سوم مسئول تحلیل نهایی داده‌ها، تفسیر نتایج، بررسی منابع علمی مرتبط و همکاری در نگارش بخش بحث تحقیق بوده است. نویسنده‌ی چهارم نظارت علمی کلی بر روند تحقیق، ارزیابی نتایج، بازبینی و ویرایش نهایی مقاله را بر عهده داشته است. تمامی نویسندگان در نگارش مقاله مشارکت داشته و نسخه نهایی تحقیق را مطالعه و تأیید نموده‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان تصدیق می‌نمایند که این یک تحقیق لابراتواری بوده و صرفاً با هدف توسعه و ارتقای دانش علمی و بررسی تجربی موضوع مورد مطالعه انجام شده است. هیچ‌گونه منفعت طلبی شخصی، سازمانی یا مالی در مراحل طراحی تحقیق، اجرای آزمایش‌های لابراتواری، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها و یا تفسیر و انتشار نتایج این مطالعه دخالت نداشته است. این تحقیق با رعایت کامل اصول علمی، معیارهای حرفه‌یی و موازین اخلاقی پژوهش انجام شده و نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافع بالفعل یا بالقوه در ارتباط با محتوای این مقاله وجود ندارد.

- Altunay, N., Haq, H. U., & Castro-Muñoz, R. (2023). Optimization of vortex-assisted hydrophobic magnetic deep eutectic solvent-based dispersive liquid phase microextraction for quantification of niclosamide in real samples. *Food Chemistry*, 426, 136646. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136646>
- Bahrami, B., & Jafari, P. (2020). Paper recycling, directions to sustainable landscape. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 371-382. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02354-y>
- Borchardt, J. K. (1997). The use of surfactants in de-inking paper for paper recycling. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2(4), 402-408. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(97\)80084-2](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(97)80084-2)
- Brummer, V., Jurena, T., Hlavacek, V., Omelkova, J., Bebar, L., Gabriel, P., & Stehlik, P. (2014). Enzymatic hydrolysis of pretreated waste paper—Source of raw material for production of liquid biofuels. *Bioresource Technology*, 152, 543-547. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.030>
- Chang, J. C., Beach, R. H., & Olivetti, E. A. (2019). Consequential effects of increased use of recycled fiber in the United States pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118133>
- Ciriminna, R., Albanese, L., Meneguzzo, F., & Pagliaro, M. (2016). Hydrogen peroxide: a key chemical for today's sustainable development. *ChemSusChem*, 9(24), 3374-3381. DOI: 10.1002/cssc.201600895
- Conesa, J. A., Gálvez, A., & Fullana, A. (2008). Decomposition of paper wastes in presence of ceramics and cement raw material. *Chemosphere*, 72(2), 306-311. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.01.049>
- Hamoda, M. F., & Mahmoud, H. (2019). Microbiological characteristics of indoor air bioaerosols in a waste paper recycling factory. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 2601-2610. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1694-y>
- Ishii, S., Fukushima, A., Katagiri, R., Sakunaga, M., Kuribara, I., Uchida, T., ... & Imai, S. (2021). Safety evaluation of recycling process used to produce recycled pulp for adult paper diapers. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 122, 104909. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104909>
- Joshi, G., Naithani, S., Varshney, V. K., Bisht, S. S., & Rana, V. (2017). Potential use of waste paper for the synthesis of cyanoethyl cellulose: A cleaner production approach towards sustainable environment management. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3759-3768. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.089
- Li, Z., Shao, L., Ruan, Z., Hu, W., Lu, L., & Chen, Y. (2018). Converting untreated waste office paper and chitosan into aerogel adsorbent for the removal of

- heavy metal ions. *Carbohydrate Polymers*, 193, 221-227.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.003>
- Likon, M., Černec, F., Švegl, F., Saarela, J., & Zimmie, T. F. (2011). Papermill industrial waste as a sustainable source for high efficiency absorbent production. *Waste Management*, 31(6), 1350-1356.
 doi:10.1016/j.wasman.2011.01.012
- López Alvarez, J. V., Aguilar Larrucea, M., Arraiza Bermúdez, P., & León Chicote, B. (2009). Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions. *Waste Management*, 29(5), 1514-1519.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.025>
- Manfredi, S., Tonini, D., & Christensen, T. H. (2010). Contribution of individual waste fractions to the environmental impacts from landfilling of municipal solid waste. *Waste Management*, 30(3), 433-440.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.017>
- Méndez, A., Fidalgo, J. M., Guerrero, F., & Gascó, G. (2009). Characterization and pyrolysis behaviour of different paper mill waste materials. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(1), 66-73.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.04.004>
- Morris, J. (1996). Recycling versus incineration: an energy conservation analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 47(1-3), 277-293.
[https://doi.org/10.1016/0304-3894\(95\)00116-6](https://doi.org/10.1016/0304-3894(95)00116-6)
- Pivnenko, K., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2015). Waste paper for recycling: Overview and identification of potentially critical substances. *Waste Management*, 45, 134-142. doi: 10.1016/j.wasman.2015.02.028
- Tendulkar, S. R., Shinde, J. K., & Mokashi, A. G. (1995). Hydrogen Peroxide: An Ideal Chemical for Brightening of Recycled Fibres. *IPPTA*, 7, 131-136. [Link](#)