

Optimization of optical and mechanical properties of commercial CMP pulp using response surface methodology (RSM)

Ali Soleymani¹, Seyed Majid Zabihzadeh^{2*}, Ghasem Asadpour³, Seyed Hasan Sharifi⁴

1- Ph.D. Student in Pulp and Paper Industry, Department of Wood and Cellulosic Products Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resource University Sari, Iran

2- Corresponding author, Assoc. Prof. Department of Wood and Cellulosic Products Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resource University Sari, Iran. Email: m.zabihzadeh@sanru.ac.ir

3- Assoc. Prof. Department of Wood and Cellulosic Products Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resource University Sari, Iran

4- Assist. Prof. Department of Wood and Cellulosic Products Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resource University Sari, Iran

Received: December 2025

Accepted: March 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Among high-yield pulps, chemimechanical pulp (CMP) from hardwoods is widely used in the production of printing and writing papers. However, the low optical and mechanical properties of papers derived from CMP remain a major challenge for its industrial application. In this study, the optimal conditions for the application of nanocellulose, nano chitosan, optical brightening agent (OBA), and cationic polyacrylamide were investigated to improve these properties. The main objective was to achieve desirable optical and mechanical characteristics in CMP-based papers. To this end, linear analysis and evaluation of the interactive effects of the variables were employed. The findings of this study provide a scientific basis for improving the papermaking process and enhancing the quality of CMP-based papers in the paper industry.

Methodology: In this study, bleached CMP pulp was used to improve the optical and mechanical properties of paper. nano chitosan, (0.1 and 2%), cationic polyacrylamide (0, 0.5, and 1%), and optical brightening agent (OBA) (0, 0.5, and 1%) based on the dry weight of pulp were added to the pulp suspension. Experimental design was carried out using the Box–Behnken method, and response surface modeling (RSM) was performed with Design Expert V13 software. A total of 15 experiments were designed, considering nano chitosan, polyacrylamide, and OBA as independent variables, while the optical and mechanical properties of the paper were regarded as dependent variables. Laboratory handsheets with a basis weight of 60 g/m² were prepared and their properties were measured. The data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology. The results led to the development of a mathematical process model and the determination of optimal additive conditions to achieve the highest quality of optical and mechanical properties in the paper.

Results: The analysis of variance (ANOVA) indicated that the quadratic model exhibited the best fit to the experimental data (R²=91.66), demonstrating its high accuracy and predictive

capability. The results showed that the independent variables, nano chitosan and OBA, had statistically significant effects on enhancing the properties of the hand sheets. In contrast, the addition of polyacrylamide did not have a statistically significant impact on the optimal paper properties. For nano chitosan, increasing its concentration up to 1% improved the optimal properties of the paper. However, concentrations exceeding 1% led to a decline in these properties. Similarly, increasing the OBA concentration up to 0.75% resulted in a significant enhancement of the paper's properties. Beyond this level, further increases (up to 1%) caused a slight reduction in optimal properties. OBA was identified as the most influential factor in improving the response variables. These findings underscore the critical role of precise optimization of nano chitosan and OBA concentrations to achieve the highest optical and mechanical quality in the hand sheets.

Conclusion: This study aimed to investigate and optimize the effects of nano chitosan, optical brightening agent (OBA), and cationic polyacrylamide on the optical and mechanical properties of bleached CMP pulp using response surface methodology (RSM). The results indicated that OBA had the greatest positive effect, while cationic polyacrylamide showed the least impact on improving paper properties. The optimal conditions were identified as 1.21% nano chitosan, 1% OBA, and 0.2% cationic polyacrylamide, which maximized the combined index of optical and mechanical properties (1.04). Accordingly, these findings provide a practical strategy for enhancing the quality of CMP-based papers and overcoming the limitations associated with their application in the paper industry.

Keywords: Nano chitosan, Optical Brightening Agent, Response Surface Methodology, Box-Behnken Design, Cationic Polyacrylamide.

بهینه‌سازی ویژگی‌های نوری و مکانیکی خمیر کاغذ CMP تجاری با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

علی سلیمانی^۱، سید مجید ذبیح‌زاده^۲، قاسم اسدیپور^۳، سید حسن شریفی^۴

۱- دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران. رایانامه: m.zabihzadeh@sanru.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران
۴- استادیار گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران

تاریخ پذیرش: فروردین ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: دی ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: در میان خمیر کاغذهای با بازده بالا، خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی (CMP) پهن‌برگن کاربرد گسترده‌ای در تولید کاغذهای چاپ و نوشتاری دارد. با این حال، کیفیت پایین خواص نوری و مکانیکی کاغذهای حاصل از این خمیر کاغذ، چالشی اساسی در کاربرد صنعتی آن به شمار می‌رود. در این پژوهش، به منظور ارتقای این ویژگی‌ها، شرایط بهینه استفاده از نانوکیتوزان، روشن‌کننده نوری (OBA) و پلی‌اکریل‌امید بررسی شد. هدف اصلی تحقیق، دستیابی به خواص نوری و مکانیکی مطلوب در کاغذهای تولیدشده از خمیر CMP بود. برای این منظور، از تحلیل خطی و بررسی اثرات متقابل متغیرها بهره گرفته شد. نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنای علمی برای بهبود فرآیند تولید و ارتقای کیفیت کاغذ در صنایع کاغذسازی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روشها: در این پژوهش، به منظور بهبود خواص نوری و مکانیکی کاغذ، از خمیر کاغذ CMP رنگ‌بری شده استفاده شد. نانوکیتوزان (۲ و ۰،۱ درصد)، پلی‌اکریل‌امید (۱ و ۰،۵/۰) و OBA (۱ و ۰،۵/۰ درصد) بر مبنای وزن خشک خمیر به سوسپانسیون کاغذ افزوده شدند. طراحی آزمایش به روش باکس-بنکن و مدل‌سازی سطح پاسخ (RSM) با نرم‌افزار Design Expert V13 انجام گرفت. در مجموع ۱۵ آزمایش طراحی شد و نانوکیتوزان، پلی‌اکریل‌امید و OBA به عنوان متغیرهای مستقل و خواص نوری و مکانیکی کاغذ به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. کاغذهای دست‌ساز با وزن پایه ۶۰ گرم بر مترمربع تهیه و خواص آن‌ها اندازه‌گیری شد. داده‌ها با آنالیز واریانس و مدل‌سازی سطح پاسخ تحلیل گردید. نتایج منجر به ارائه مدل ریاضی فرآیند و تعیین شرایط بهینه افزودنی‌ها جهت دستیابی به بالاترین کیفیت خواص نوری و مکانیکی کاغذ گردید.

نتایج: آزمون آنالیز واریانس نشان داد که مدل درجه دوم، بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی ارائه می‌دهد ($R^2=91/66$) که بیانگر دقت و قابلیت پیش‌بینی بالای مدل است. نتایج نشان دادند که تأثیر متغیرهای مستقل یعنی نانوکیتوزان و OBA بر بهبود خواص کاغذهای دست‌ساز از نظر آماری معنی‌دار است. افزودن پلی‌اکریل‌امید تأثیر معنی‌داری بر خواص بهینه کاغذ نداشت. در بررسی تأثیر نانوکیتوزان، افزایش غلظت نانوکیتوزان تا سطح ۱ درصد منجر به بهبود خواص بهینه کاغذ شد. افزایش بیشتر از این مقدار (بیش از ۱ درصد) منجر به کاهش خواص بهینه گردید. افزایش مقدار OBA تا سطح ۰/۷۵ درصد به بهبود قابل توجه خواص کاغذ منجر می‌شود، اما افزودن بیشتر (تا سطح ۱ درصد) باعث کاهش خواص بهینه با شیب ملایمی شد. OBA مؤثرترین عامل در بهبود متغیرهای پاسخ شناسایی شد. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی دقیق مقادیر نانوکیتوزان و OBA برای دستیابی به حداکثر کیفیت خواص نوری و مکانیکی کاغذهای دست‌ساز است.

نتیجه‌گیری: این پژوهش با هدف بررسی و بهینه‌سازی اثر نانوکیتوزان، OBA و پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی بر خواص نوری و مکانیکی خمیر کاغذ CMP رنگ‌بری شده، با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ انجام شد. نتایج نشان داد OBA بیشترین و پلی‌آکریل‌آمید کمترین تأثیر را بر بهبود ویژگی‌های کاغذ داشتند. شرایط بهینه شامل ۱/۲۱ درصد نانوکیتوزان، ۱ درصد OBA و ۰/۲ درصد پلی‌آکریل‌آمید تعیین گردید که منجر به پیشینه‌سازی شاخص ترکیبی خواص نوری و مکانیکی (۱/۰۴) شد. بر این اساس، یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان راهبردی کاربردی برای ارتقای کیفیت کاغذهای تولیدی از خمیر CMP در صنایع کاغذسازی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: نانوکیتوزان، روشن‌کننده نوری، سطح پاسخ، باکس بنکن، پلی‌آکریل‌آمید.

مقدمه

با افزایش جمعیت و تقاضای روزافزون برای مصرف کاغذ و فرآورده‌های آن و از سوی دیگر، محدودیت منابع جنگل‌های تجاری، رقابت صنایع چوب و کاغذ و نگرانی‌های محیط‌زیستی، استفاده از خمیرکاغذهای با بازده بالا به‌عنوان یک راه‌حل عملی مطرح شده است [۱]. سرمایه‌گذاری اولیه کمتر و بهره‌برداری بهینه‌تر از منابع لیگنوسولولزی در مقایسه با خمیرکاغذهای شیمیایی این از دیگر دلایل افزایش تولید خمیرکاغذهای با بازده بالا می‌باشد [۲]. با وجود مقاومت مکانیکی کمتر این نوع خمیرکاغذها، پیشرفت‌های شیمیایی و مکانیکی در فرآوری آن‌ها باعث شده است که به تدریج جایگزین خمیرکاغذهای شیمیایی در تولید کاغذ شوند [۳]. در میان انواع خمیرکاغذهای با بازده بالا، خمیرکاغذ شیمیایی مکانیکی (CMP) به‌طور گسترده در تولید کاغذهای چاپ و نوشتاری کاربرد دارد [۴]. یکی از مشکلات اصلی کاغذهای تولیدشده از خمیرکاغذ CMP، ضعف در خواص نوری و مکانیکی است. تغییر رنگ این کاغذها عمدتاً به تشکیل گروه‌های رنگ‌ساز در لیگنین، به‌ویژه گروه‌های ۵-کینوئیدی مربوط می‌شود. علاوه بر این، گروه‌های کربونیل و فنوکسیل نیز نقش مهمی در این فرآیند ایفا می‌کنند. هرچند گروه‌های کربونیل مستقیماً به ایجاد گروه‌های رنگ‌ساز کمک نمی‌کنند، اما به‌عنوان گروه‌های فعال نوری عمل کرده و با جذب نور، انرژی را به دیگر گروه‌ها منتقل می‌کنند که این امر منجر به واکنش‌های برگشت درجه روشنی می‌شود [۵]. پرتو فرابنفش (UV) نیز همانند سایر پلیمرها، باعث شکست زنجیره پلیمرها و تخریب کاغذ می‌شود. بر این اساس، بهبود ویژگی‌های کاغذ، به‌ویژه خواص نوری و مکانیکی آن، چه در مرحله تولید و چه در مرحله مصرف، از موارد کلیدی در افزایش کاربردپذیری کاغذ به شمار می‌رود [۶]. روش‌های مختلفی برای جلوگیری از برگشت درجه روشنی کاغذ پیشنهاد شده است، اما نبود دانش کافی درباره ساختار لیگنین و مکانیسم‌های واقعی واکنش‌ها، توسعه راهکارهای اقتصادی و کارآمد را با چالش مواجه کرده است. یکی از روش‌های کاهش برگشت درجه

روشنی، استفاده از مواد جاذب نور است. این مواد می‌توانند از واکنش نور با لیگنین جلوگیری کنند. مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۰۹) نشان داده است که استفاده از عوامل روشن‌کننده نور می‌تواند خواص نوری کاغذهای تولیدشده از خمیرکاغذهای با بازده بالا را بهبود بخشد. آن‌ها دریافتند که درجه روشنی و میزان سفیدی کاغذ، به‌ویژه در جایگزینی ۳۰ درصدی خمیرکاغذ رنگ‌بری شده کرافت با خمیرکاغذ پر بازده، کاهش می‌یابد. با این حال، افزودن عوامل روشن‌کننده نوری و کلسیم کربنات رسوبی این افت را جبران می‌کند [۷]. Liu و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی تأثیر عوامل روشن‌کننده نوری دی‌سولفون‌دار و تتراسولفون‌دار، گزارش کردند که این عوامل به طور قابل توجهی درجه روشنی و سفیدی کاغذ را افزایش می‌دهند. نتایج نشان داد که OBA^۳ دی‌سولفون‌دار در مقادیر کم (کمتر از ۰/۶ درصد) بسیار مؤثرتر از نوع تتراسولفون‌دار می‌باشد. علاوه بر OBA، بهبود خواص مقاومتی کاغذ از طریق افزودنی‌هایی مانند پلی‌وینیل‌الکل، اوره فرمالدهید، نشاسته کاتیونی، پلی‌آکریل‌امید کاتیونی و کیتوزان نیز به‌طور گسترده‌ای بررسی شده است [۹]. یک افزودنی مناسب برای سیستم خمیرکاغذسازی باید زیست‌تخریب‌پذیر، غیرسمی و سازگار با محیط‌زیست باشد.

کیتوزان، از استیل‌زدایی کیتین که دومین زیست‌پلیمر فراوان طبیعی بعد از سلولز است، مشتق شده و از نظر ساختاری شباهت زیادی به سلولز دارد. این ماده زیست‌تخریب‌پذیر، زیست‌سازگار، ضد باکتری و ضد قارچ است و از منابع تجدیدپذیر نظیر سخت‌پوستان دریایی استخراج می‌شود. کیتوزان به‌عنوان یک آمینوپلی‌ساکارید، اتصال‌دهنده‌ای قوی برای ساختارهای الیاف سلولزی محسوب شده و کارایی آن می‌تواند تا بیش از ۴۰ درصد از نشاسته بیشتر باشد [۱۰]. این ماده علاوه بر افزایش مقاومت خشک، مقاومت‌تر کاغذ را نیز بهبود می‌بخشد. کیتوزان به دلیل داشتن دانسیته بار مثبت بالا، پیوندهای قوی‌تری بین الیاف ایجاد کرده و منجر به تولید کاغذی مقاوم‌تر می‌شود [۱۱]. تحقیق Vaysi و Yosefi (۲۰۲۰) نشان داده است که افزودن نانوکیتوزان به خمیرکاغذ شیمیایی-مکانیکی (CMP) مقاومت‌های کششی، پارگی،

¹ Chemical Pulp

² Chemimechanical Pulp

³ Optical Brightening Agent

اصلی تحقیق، دستیابی به شرایط بهینه برای استفاده از مواد افزودنی جهت بهبود خواص نوری و مکانیکی کاغذ بوده است. برای این منظور، تأثیر متغیرهای نانوکیتوزان، OBA و پلی‌آکریل‌آمید به صورت منفرد و متقابل بررسی شد. در نهایت، با استفاده از آنالیز واریانس و سطح پاسخ، مدل ریاضی فرآیند تدوین و شرایط بهینه برای دستیابی به بهترین ویژگی‌های نوری و مکانیکی کاغذهای دست‌ساز تعیین گردید.

مواد و روش‌ها

مواد

خمیر کاغذ مورد استفاده در این تحقیق، از نوع خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی (CMP) رنگ‌بری شده بود که از شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران تهیه شد. عامل روشن‌کننده نوری (OBA) از شرکت Woojin، نانوکیتوزان از شرکت نانو نوین پلیمر و پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی از شرکت Arakawa تأمین شدند.

مقدار مصرف مواد افزودنی

خمیر کاغذهای CMP تحت تیمار شیمیایی قرار گرفتند. برای این منظور، نانوکیتوزان در سه سطح (۲ و ۱/۰ درصد)، پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی در سه سطح (۱ و ۰/۵، ۰/۵ و ۰) و OBA در سه سطح (۱ و ۰/۵ و ۰ درصد) بر اساس وزن خشک خمیر کاغذ به سوسپانسیون خمیر کاغذ افزوده شدند. تیمارهای شیمیایی در مراحل ساخت کاغذهای دست‌ساز آزمایشگاهی به کار گرفته شدند.

ساخت کاغذهای دست‌ساز و ارزیابی خواص

کاغذهای دست‌ساز با جرم پایه ۶۰ گرم بر مترمربع مطابق استاندارد T 272 om-92 آئین‌نامه TAPPI ساخته شدند. برای اندازه‌گیری خواص نوری و مکانیکی کاغذهای دست‌ساز، از استانداردهای زیر استفاده شد.

ماتی: استاندارد ۰۱-T425om آئین‌نامه TAPPI

روشنی: استاندارد ۰۲-T452om آئین‌نامه TAPPI

زبری: استاندارد ۲۲-T538om آئین‌نامه TAPPI

مقاومت به پارگی: استاندارد ۰۴-T414om آئین‌نامه

TAPPI

مقاومت به کشش: استاندارد ۰۱-T494om آئین‌نامه

TAPPI

ترکیدن، طول پارگی، مقاومت به عبور هوا و برخی از ویژگی‌های رنگی کاغذ را افزایش داده و در عین حال درجه روشنی، جذب آب و فاکتور a را کاهش می‌دهد [۱۲]. Vaysi و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی تأثیر اسپری نانوکیتوزان، نانوسلولز و DTPA بر ویژگی‌های نوری کاغذ حاصل از خمیر شیمیایی-مکانیکی CMP اظهار داشتند که با افشاندن این مواد روشنی، زردی و ماتی روند افزایشی داشت. نتایج ارزیابی برگشت درجه روشنی کاغذ حاصل از خمیر کاغذ CMP نشان داد که بیشتر تیمارها منجر به کاهش نسبی برگشت درجه روشنی کاغذ شده است [۱۳]. افزون بر این، استفاده از مواد افزودنی پلیمری نظیر پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد، می‌تواند مقاومت خشک و تر کاغذ را بهبود بخشد. پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی با داشتن پلیمرهای کاتیونی قوی، افزون بر کمک به نگهداری مواد دوغاب، فرآیند آب‌گیری خمیر کاغذ را بهبود می‌دهد. این مواد معمولاً دارای وزن مولکولی بین ۱۰۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ هستند که اندازه آن‌ها به گونه‌ای طراحی شده است تا از دلمه‌ای شدن ذرات و کاهش کارایی ناشی از نفوذ به منافذ الیاف جلوگیری شود [۱۴]. پلی‌آکریل‌آمیدها که پلیمرهایی محلول در آب هستند، با گروه‌های آمیدی نوع اول موجود در ساختار خود، پیوندهای هیدروژنی قوی با مولکول‌های سلولز سطح الیاف برقرار کرده و خواص مقاومتی کاغذ را بدون تأثیر منفی بر حجم ویژه و ویژگی‌های ظاهری آن افزایش می‌دهند. استفاده از این پلیمرها می‌تواند به تولید کاغذی با خواص مطلوب منجر شود که با فرآیند پالایش معمولی قابل دستیابی نیست [۱۵]. همچنین عوامل روشن‌کننده نوری با جذب و انتشار مجدد نور فرابنفش در طیف مرئی، تأثیر بسزایی در بهبود خواص نوری خمیر کاغذ CMP دارند. این مواد می‌توانند مانع از واکنش نور با لیگنین شوند و برگشت درجه روشنی کاغذ را کاهش دهند.

در این تحقیق، تأثیر نانوکیتوزان، پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی و OBA بر بهبود خواص نوری و مکانیکی خمیر کاغذ CMP مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به پیچیدگی مسائل کاربردی که اغلب بیش از یک عامل در کیفیت و عملکرد محصول نقش دارند، از روش سطح پاسخ مبتنی بر طرح باکس بنکن برای مدل‌سازی و تحلیل اثر متغیرهای فرآیندی استفاده شده است. هدف

هم‌زمان خواص نوری و مکانیکی کاغذهای دست‌ساز، مجموع ویژگی‌ها را ارزیابی کرد. جدول ۱ مقادیر اهمیت نسبی هر یک از ویژگی‌ها را نشان می‌دهد.

پس از اندازه‌گیری خواص نوری و مکانیکی، روش وزن دهی بر اساس ارزش‌گذاری برای تعیین بهترین تیمار آزمایشی به کار گرفته شد. این روش با هدف بهبود

جدول ۱- وزن‌دهی خواص نوری و مکانیکی در محاسبه خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز

وزن (%)	خواص نوری و مکانیکی
۳۰	ماتی
۳۰	درجه روشنی
۱۵	شاخص مقاومت در برابر پاره شدن
۱۵	شاخص مقاومت در برابر کشش
۱۰	زبری
۱۰۰	مجموع

کاهش تعداد آزمایش‌ها می‌شود و امکان برآورد تمامی ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثرات متقابل بین عوامل را فراهم می‌سازد. در روش سطح پاسخ، رابطه بین متغیر وابسته (Y) و متغیرهای مستقل با استفاده از یک معادله چندجمله‌ای درجه دوم به صورت زیر بیان می‌شود.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

خطای آزمایش و محاسبه تکرارپذیری مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). در جدول ۲، متغیرهای مستقل فرآیند شامل درصدهای مختلف نانوکیتوزان، پلی‌آکریل‌آمید و OBA ارائه شده است که برای بررسی تأثیر این مواد افزودنی در بهینه‌سازی فرآیند استفاده شدند. بر اساس طراحی باکس بنکن، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز (N) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$N = k^2 + k + C_p \quad (2)$$

که k تعداد عامل‌ها و C_p تعداد تکرار نقطه‌ی میانی می‌باشد. در این مطالعه مقدار C_p سه در نظر گرفته شد که منجر به انجام ۱۵ آزمایش شد (جدول ۳).

طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری است که در بهینه‌سازی فرآیندهای پیچیده به کار می‌رود. در این روش، پاسخ موردنظر تحت تأثیر تعدادی از متغیرهای مستقل قرار می‌گیرد. استفاده از این طرح آماری موجب

در این رابطه، K بیانگر تعداد متغیرهای مستقل است [۱۶]. X_i و X_j بیانگر متغیرهای مستقل هستند. β₀ نشان دهنده ضریب ثابت، β_j و β_{ij} و β_{ijj} به ترتیب نشان دهنده ضرایب اثرهای خطی، اثرهای مربع و اثرهای متقابل می‌باشند. برازش سطوح پاسخ و بهینه‌سازی فرآیند با استفاده از طراحی Box-Behnken با نرم‌افزار Design Expert V13 انجام شد. تجزیه واریانس برای ضرایب مدل درجه دوم نیز با همین نرم‌افزار انجام گرفت. این پژوهش با استفاده از طرح کاملاً تصادفی و در قالب طراحی باکس بنکن بهینه‌سازی شد. هر فاکتور در این طرح در سه سطح (+۱، ۰، -۱) و با سه تکرار در نقطه مرکزی، برای تخمین

جدول ۲- پارامترهای مستقل و حدود تعیین شده برای آن‌ها در روش Box-Behnken

عوامل	پارامترهای مستقل	حدود متغیرها		
		حد پایین (-۱)	حد میانی (۰)	حد بالا (+۱)
A	نانوکیتوزان (درصد)	۰	۱	۲
B	OBA (درصد)	۰	۰/۵	۱
C	PAM (درصد)	۰	۰/۵	۱

جدول ۳- ماتریس طراحی آزمایش به روش Box Behnken و پاسخ‌های مربوط به آن

شماره آزمایش	NC (درصد)	OBA (درصد)	PAM (درصد)	خواص بهینه	
				واقعی	پیش‌بینی شده
۱	۲	۰/۵	۰	۰/۹۹۷	۰/۹۹۳
۲	۰	۰/۵	۱	۰/۹۸۸	۱/۰۲۴
۳	۲	۰	۰/۵	۱/۰۰۴	۰/۹۸۹
۴	۱	۰	۱	۰/۹۵۶	۱/۰۱۳
۵	۲	۱	۰/۵	۱/۰۲۵	۰/۹۸۵
۶	۱	۰/۵	۰/۵	۱/۰۲۹	۱/۰۳۴
۷	۱	۱	۰	۱/۰۲۴	۱/۰۳۲
۸	۱	۰	۰	۰/۹۷۸	۱/۰۳۴
۹	۱	۱	۱	۱/۰۲۰	۱/۰۱۶
۱۰	۰	۰	۰/۵	۰/۹۶۵	۱/۰۳۳
۱۱	۰	۰/۵	۰	۰/۹۸۴	۱/۰۴۵
۱۲	۱	۰/۵	۰/۵	۱/۰۳۵	۱/۰۳۴
۱۳	۰	۱	۰/۵	۱/۰۰۲	۱/۰۳۷
۱۴	۲	۰/۵	۱	۱/۰۱۳	۰/۹۷۸
۱۵	۱	۰/۵	۰/۵	۱/۰۴۵	۱/۰۳۴

انجام شد. جدول ۴ نتایج این آزمون‌ها را نشان می‌دهد. این تحلیل‌ها به منظور ارزیابی دقیق تأثیر عوامل مختلف بر خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز و انتخاب مدل برتر انجام شده و نشان‌دهنده توانایی مدل در پیش‌بینی و برازش مناسب داده‌های آزمایشی است.

برای بررسی میزان تأثیر مواد افزودنی و تأثیر متقابل هر یک از آن‌ها، از آنالیز واریانس استفاده شد (جدول ۵). نتایج نشان داد که پاسخ مورد نظر (خواص بهینه) به غیر از پلی‌آکریل‌آمید، تحت تأثیر سایر متغیرهای انتخاب‌شده در این پژوهش قرار دارد. مدل درجه دوم، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، دارای بیشترین مقادیر R^2 Adjusted و R^2 Predicted است. مقدار R^2 این مدل برابر ۰/۹۱۶۶

به‌دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی خواص است. به این ترتیب، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ۹۱/۶۶ درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط مدل ارائه‌شده (رابطه ۳) قابل پیش‌بینی است. این تحلیل نشان می‌دهد که مدل درجه دوم توانایی بالایی در ارزیابی تأثیر متغیرها و پیش‌بینی مقادیر دارد و می‌تواند برای بهینه‌سازی فرآیند مورد استفاده قرار گیرد.

با استفاده از تحلیل واریانس، مدل ارائه‌شده برای پاسخ مورد نظر (خواص بهینه) مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مرحله، ضرایب رگرسیون برای جملات خطی، درجه دوم و برهم‌کنش بین آن‌ها تخمین زده شد. کیفیت برازش مدل با استفاده از ضریب همگرایی (R^2) تعیین گردید. ضریب تعیین (R^2) یکی از معیارهای اصلی در تجزیه و تحلیل واریانس است که برای ارزیابی کیفیت برازش مدل به داده‌ها و شناسایی مدل برتر استفاده می‌شود. مقدار بالای (R^2) نشان‌دهنده همگرایی مطلوب داده‌ها با مدل ارائه‌شده است و می‌تواند به‌عنوان معیاری برای تأیید دقت پیش‌بینی مدل به کار رود.

نتایج و بحث

برای مطالعه و انتخاب بهترین مدل به‌منظور تعیین رابطه خواص بهینه در کاغذهای دست‌ساز ساخته‌شده از خمیر کاغذ CMP اصلاح‌شده با نانوکیتوزان، روشن‌کننده نوری و پلی‌آکریل‌آمید، سه آزمون انجام گرفت. این آزمون‌ها شامل مجموعه توان‌های دوم مدل دنباله‌ای، آزمون‌های نقطه‌ی برازش و خلاصه‌ی نتایج آماری مدل

جدول ۴- آزمون مدل‌های ارائه شده برای تخمین خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	توضیحات
مجموع توان‌های دوم مدل دنباله‌ای						
میانگین	۱۵/۱۳	۱	۱۵/۱۳			
خطی	۰/۰۰۴۸	۳	۰/۰۰۱۶	۳/۶۰	۰/۰۴۹۶	پیشنهادی
2FI	۰/۰۰۰۲	۳	۰/۰۰۰۱	۰/۱۰۲۹	۰/۹۵۶۱	
درجه ۲	۰/۰۰۳۹	۳	۰/۰۰۱۳	۸/۰۴	۰/۰۲۳۳	پیشنهادی
درجه ۳	۰/۰۰۰۷	۳	۰/۰۰۰۲	۳/۴۴	۰/۲۳۳۳	
باقیمانده	۰/۰۰۰۱	۲	۰/۰۰۰۱			
مجموع	۱۵/۱۴	۱۵	۱/۰۱			
آزمون‌های نقطه برازش						
خطی	۰/۰۰۴۷	۹	۰/۰۰۰۵	۸/۰۶	۰/۱۱۵۲	پیشنهادی
2FI	۰/۰۰۴۶	۶	۰/۰۰۰۸	۱۱/۶۳	۰/۰۸۱۳	
درجه ۲	۰/۰۰۰۷	۳	۰/۰۰۰۲	۳/۴۴	۰/۲۳۳۳	پیشنهادی
درجه ۳	۰/۰۰۰۵	۰				
خطای خالص	۰/۰۰۰۱	۲	۰/۰۰۰۱			
خلاصه نتایج آماری						
منبع	انحراف استاندارد	R2	Adjusted R2	Predicted R2	Press	توضیحات
خطی	۰/۰۲۱۰	۰/۴۹۵۴	۰/۳۵۷۸	۰/۲۴۹۱	۰/۰۰۷۲	پیشنهادی
2FI	۰/۰۲۴۲	۰/۵۱۴۲	۰/۱۴۹۸	-۰/۲۰۱۳	۰/۰۱۱۶	
درجه ۲	۰/۰۱۲۷	۰/۹۱۶۶	۰/۷۶۶۵	-۰/۱۴۸۴	۰/۰۱۱۱	پیشنهادی
درجه ۳	۰/۰۰۸۱	۰/۹۸۶۵	۰/۹۰۵۲			

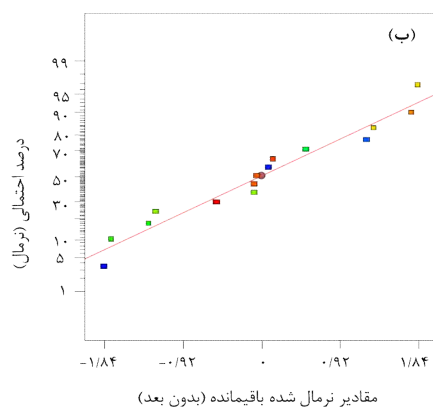
جدول ۵- آنالیز واریانس برای تعیین خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز با روش استفاده از Box-Behnken

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	معنی‌داری
مدل	۰/۰۰۸۸	۹	۰/۰۱۰	۶/۱۱	۰/۰۳۰۲	S
A: NC(%)	۰/۰۰۱۲	۱	۰/۰۰۱۲	۷/۷۶	۰/۰۳۸۶	
B: OBA(%)	۰/۰۰۳۵	۱	۰/۰۰۳۵	۲۱/۹۱	۰/۰۰۵۴	
C: PAM(%)	۴/۵۰	۱	۴/۵۰	۰/۰۲۷۹	۰/۸۷۳۸	
AB	۰/۰۰۰۱	۱	۰/۰۰۰۱	۰/۳۹۷۴	۰/۵۵۶۱	
AC	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۲۲۲۶	۰/۶۵۶۳	
BC	۰/۰۰۰۱	۱	۰/۰۰۰۱	۰/۵۰۳۰	۰/۵۰۹۹	
A2	۰/۰۰۱۲	۱	۰/۰۰۱۲	۷/۵۷	۰/۰۴۰۳	
B2	۰/۰۰۱۴	۱	۰/۰۰۱۴	۸/۴۲	۰/۰۳۳۷	
C2	۰/۰۰۱۹	۱	۰/۰۰۱۹	۱۱/۷۸	۰/۰۱۸۶	

پس از انجام آزمون تجزیه واریانس مشخص شد که عوامل A و B، همچنین اثرات درجه دوم A2 و B2 و C2 نقش قابل توجهی در تعیین خواص بهینه دارند. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، مدل نمایی نهایی برای پیش‌بینی خواص بهینه به صورت زیر استخراج گردید:

مطابق جدول ۵، تأثیر مواد افزودنی نانوکیتوزان و OBA بر خواص بهینه معنی‌دار بوده و OBA بیشترین تأثیر خطی مثبت را در میان متغیرها داشته است. این در حالی است که استفاده از پلی‌آکریل‌آمید، بر اساس مقادیر F، معنی‌دار تشخیص داده نشد.

مدل را به‌وضوح نشان می‌دهد. این نمودار اطلاعات بصری درباره میزان انطباق نتایج پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی ارائه می‌دهد. شکل ۱ (ب)، نمودار احتمال نرمال-خطای پاسخ‌ها، نحوه پراکندگی خطاها را نمایش می‌دهد. این نمودار ابزار مهمی برای ارزیابی صحت مدل است، زیرا پراکندگی تصادفی خطاها پیرامون خط نرمال، نشان‌دهنده عملکرد قابل‌اعتماد مدل است. خطاها به‌عنوان تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده تعریف می‌شوند. تحلیل پراکندگی خطاها بر اساس نمودار احتمال نرمال، معیاری از اعتبار و کفایت مدل برای پیش‌بینی رفتار فرآیند تحت شرایط مختلف فراهم می‌کند.



شکل ۱- (الف) مقادیر آزمایشگاهی در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده، (ب) نمودار احتمال نرمال-خطای پاسخ برای مدل تعیین خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز

این نتایج تأیید می‌کنند که مدل ارائه‌شده از نظر آماری معنادار بوده و پاسخ‌های پیش‌بینی‌شده با اطلاعات واقعی سازگاری دارند. نرمال بودن توزیع خطاها و نزدیکی مقادیر پیش‌بینی‌شده به داده‌های واقعی، کارایی و اعتبار مدل را در پیش‌بینی خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز تأیید می‌کند [۱۷].

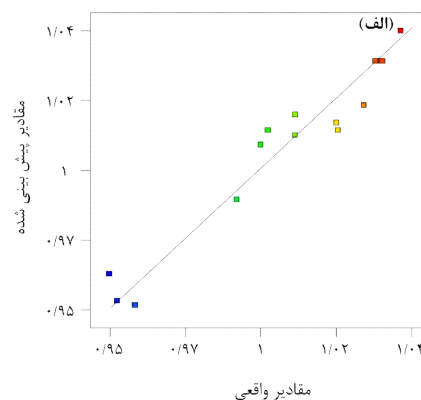
اثر متغیرهای مواد افزودنی بر خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز

شکل ۲ تأثیر عوامل اصلی شامل نانوکیتوزان (A)، روشن‌کننده نوری (B) و پلی‌آکریل‌امید (C) بر خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که دو عامل نانوکیتوزان و روشن‌کننده نوری تأثیر معنی‌داری بر بهبود خواص بهینه کاغذ دارند (شکل

$$Y\% = +0.947083 + 0.049833XA + 0.117667XB + 0.074167XC - 0.008XAXB + 0.006XAXC + 0.018XBX - 0.018167XA^2 - 0.076667XB^2 - 0.090667XC^2 \quad (۳)$$

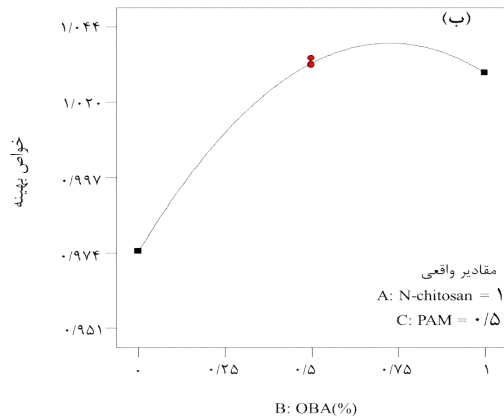
در رابطه‌ی مدل، X_i نشان دهنده مقادیر واقعی عوامل A و B است. ضرایب رگرسیون تخمین زده شده، بسته به علامت خود، نشان‌دهنده نوع تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر پاسخ می‌باشند. ضرایب مثبت، تأثیر مستقیم (افزایشی) متغیر مستقل بر پاسخ و ضرایب منفی، تأثیر غیرمستقیم (کاهشی) متغیر مستقل بر پاسخ را نشان می‌دهند. علاوه بر این، بزرگی ضرایب نشان‌دهنده شدت تأثیر هر متغیر مستقل بر پاسخ نهایی است.

شکل ۱ (الف)، نمودار خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز، بر اساس محاسبات رابطه (۲)، نتایج پیش‌بینی

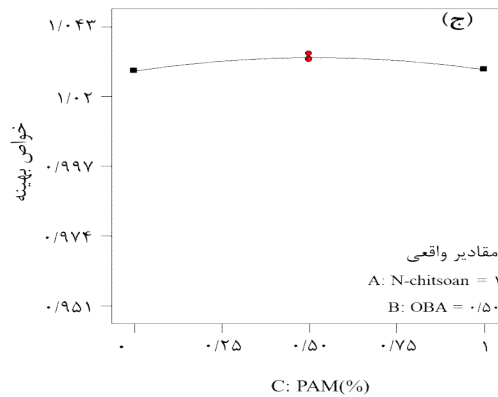
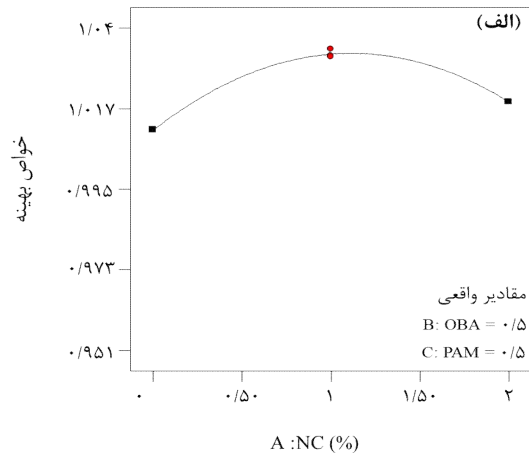


در شکل ۱ (الف)، تجمع نقاط در اطراف خط وسط نشان می‌دهد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل، همخوانی خوبی دارد. این موضوع بیانگر آن است که رابطه ارائه‌شده به‌خوبی توانسته رفتار متغیرهای مستقل را پیش‌بینی کرده و خواص بهینه را بازتاب دهد. همخوانی مطلوب بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده تأیید می‌کند که مدل ارائه‌شده نتایج را به‌صورت کامل پوشش داده است [۱۶]. نمودار احتمال نرمال-خطای پاسخ‌ها در شکل ۱ (ب)، توزیع مناسب و نرمال نقاط اطراف خط راست را نشان می‌دهد. پراکندگی نرمال خطاها دلالت بر کیفیت و کفایت مدل برای پیش‌بینی رفتار فرآیند دارد. توزیع مناسب خطاها به این معناست که خطاها به‌صورت تصادفی و بدون الگوی مشخص در اطراف خط نرمال پراکنده شده‌اند. همچنین،

معنی دار نبوده است (شکل ۲ (ج)).



۲ (الف و ب)). با این حال، افزودن پلی آکریل آمید تأثیر قابل توجهی بر خواص بهینه کاغذ نداشته و از نظر آماری



شکل ۲- تأثیر میانگین مقادیر مواد افزودنی بر خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز

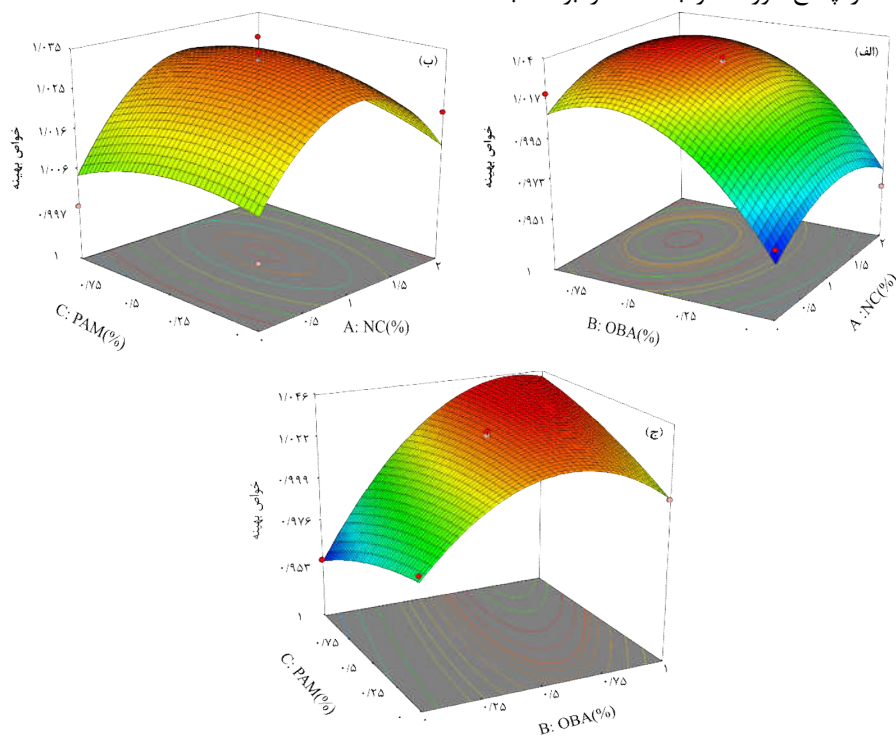
با بررسی اثر افزودن OBA مطابق با شکل ۲ (ب)، مشاهده شد که با افزایش مقدار OBA تا سطح ۰/۷۵ درصد، خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز بهبود یافت. اما با افزودن OBA تا سطح ۱ درصد، خواص بهینه با شیب ملایمی کاهش پیدا کرد. یکی از مکانیسم‌های اصلی OBA، تخریب یا توقف فعالیت نوری در کاغذ است. در این فرآیند، نور به‌عنوان یک منبع انرژی فعال با ترکیبات موجود در کاغذ واکنش می‌دهد. این ترکیبات ممکن است شامل مواد آلی، رنگ‌زاها یا زردکننده‌هایی باشند که در واکنش با نور تغییر شیمیایی می‌یابند. تحت تأثیر نور، اکسایش ترکیبات موجود در کاغذ رخ داده و ساختار شیمیایی آن تغییر می‌کند. علاوه بر این، OBA می‌تواند رادیکال‌های آزاد تولید کند که با ترکیبات زرد کننده واکنش داده و آن‌ها را تخریب می‌کند. در نتیجه این فرآیند، خواص نوری کاغذهای دست‌ساز بهبود یافته و سهم ۶۰ درصدی در خواص بهینه کاغذ به OBA

بنابراین، دو متغیر نانوکیتوزان و OBA تأثیر معنی‌داری بر خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز دارند، در حالی که افزودن پلی آکریل آمید از نظر آماری تأثیر قابل توجهی بر این خواص ندارد. در این میان، متغیر مستقل OBA بیشترین تأثیر را بر بهبود خواص بهینه کاغذ نشان داد ($F=21/94$ و $P=0/05$). با بررسی اثر نانوکیتوزان، همان‌گونه که شکل ۲ (الف) نشان می‌دهد، با افزایش مقدار نانوکیتوزان تا سطح ۱ درصد، خواص بهینه بهبود یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. این روند به دلیل نقش نانوکیتوزان در افزایش پیوندهای هیدروژنی بین فیبرها است [۱۸، ۱۹]. این نتایج با یافته‌های Hassan و همکاران (۲۰۱۳)، Vikele، (۲۰۱۳)، همکاران (۲۰۱۷) و Ghahramani و همکاران (۲۰۲۴) و Ghasemian و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد که اثر مثبت افزودن کیتوزان و نانوکیتوزان بر ویژگی‌های کاغذ را تأیید کردند [۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲].

تحلیل این نمودارها، می‌توان بهترین محدوده برای پاسخ مورد نظر را تعیین کرد [۲۵]. در این پژوهش، به‌منظور درک بهتر و بررسی اثرات جداگانه و متقابل متغیرهای مستقل، نمودارهای سطح پاسخ سه‌بعدی با ثابت نگه داشتن مقدار یک فاکتور در سطح مرکزی آن و تغییر دادن دو فاکتور دیگر در محدوده آزمایشی رسم شدند. شکل ۴ نمودارهای سطح پاسخ سه‌بعدی مربوط به اثرات متغیرها بر خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز را نشان می‌دهد. افزودن نانوکیتوزان و OBA به‌طور هم‌زمان تأثیری درجه دوم و منحنی شکل بر خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز داشته است (شکل ۴ الف). در مقابل، اثر متقابل پلی‌آکریل‌آمید با نانوکیتوزان و OBA به صورت یک منحنی خطی ظاهر شد. با این حال، مطابق با نتایج آنالیز واریانس (جدول ۵)، اثرات متقابل هیچ‌یک از فاکتورهای مورد بررسی بر خواص بهینه از نظر آماری معنی‌دار نبوده است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که اثرات مستقیم متغیرهای مستقل نقش اصلی در بهبود خواص کاغذهای دست‌ساز داشته‌اند.

اختصاص یافت [۵]. مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد که استفاده از عامل روشن‌کننده نوری می‌تواند تأثیر مثبتی در بهبود خواص نوری کاغذ داشته باشد. این پژوهش گزارش کرد که جایگزینی خمیر کاغذ با بازده بالا، به‌ویژه در سطح جایگزینی ۳۰ درصد با خمیر کاغذ رنگبری‌شده کرافت پهن‌برگ، منجر به کاهش درجه روشنی و سفیدی کاغذ شد. با افزودن عامل روشن‌کننده نوری و کلسیم‌کربنات رسوبی، این افت جبران گردید [۲۳]. همچنین Liu و همکاران (۲۰۱۴)، در بررسی برهم‌کنش لیگنین با عوامل روشن‌کننده نوری دی‌سولفون‌دار و تتراسولفون‌دار نشان دادند که این مواد می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی درجه روشنی و سفیدی کاغذ را افزایش دهند. در این مطالعه مشخص شد که OBA دی‌سولفون‌دار در مقادیر بسیار کم (کمتر از ۰/۶ درصد) کارآمدتر از OBA تتراسولفون‌دار عمل می‌کند [۲۴].

بهترین روش برای نشان دادن اثرات متغیرهای مستقل بر پاسخ مورد نظر، ترسیم نمودارهای سه‌بعدی مدل سطح پاسخ است. هدف اصلی از این نمودارها، شناسایی مقادیر بهینه متغیرهای مستقل آزمایشی است، به‌گونه‌ای که مقدار پاسخ مورد نظر به حداکثر برسد. با



شکل ۳- نمای سه‌بعدی تأثیر متقابل متغیرهای مستقل در تعیین خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز

جدول ۶- مقایسه مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده توسط رابطه ارائه شده برای تعیین خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز

شماره آزمایش	NC (درصد)	OBA (درصد)	PAM (درصد)	خواص بهینه	پیش‌بینی شده
۱	۱/۱۶	۱	۰/۲۳	۰/۹۸۶	۰/۹۶۷
۲	۱/۱۹	۱	۰/۱۸	۱/۰۱	۱/۰۱
۳	۱/۲۱	۱	۰/۲	۱/۰۴	۱/۰۱

نشان داد که متغیرهای نانوکیتوزان و OBA تأثیر معنی‌داری بر خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز داشتند، در حالی که افزودن پلی‌آکریل‌آمید تأثیر معنی‌داری از نظر آماری نداشت. OBA به‌عنوان مؤثرترین عامل بر خواص بهینه شناسایی شد. شرایط بهینه پیشنهادی برای دستیابی به بیشینه خواص نوری و مکانیکی (۱/۰۴) شامل استفاده از ۱/۲۱ درصد نانوکیتوزان، ۱ درصد OBA و ۰/۲ درصد پلی‌آکریل‌آمید تعیین گردید.

منابع

- [1] Vaysi, R., and Amani-Bishegah, N., 2023. The effect of DTPA and complementally bleaching on the optical properties of hornbeam and beech CMP pulps. *Forest and Wood Products*, 75(4): 365-375. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2022.346580.1218>. (In Persian)
- [2] Faal, A., Moezzi-pour, B., Moezzi-pour, A., and Sharari, M., 2023. Utilization of the various recycled fibers composition in producing packaging paper. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 14(1): 65-78. <https://doi.org/10.22034/ijwp.2023.2000139>. (In Persian)
- [3] Jouybari, I. R., Yoosefi, M., and Azadfallah, M., 2017. Preparation of cationic CMP and softwood long fibers as strength-enhancing additive to CMP pulp. *Bioresources*, 12(2): 3890-3904. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3890-3904>
- [4] Fang, G., and Shen, K., 2018. Wheat straw pulping for paper and paperboard production. In *Global wheat production* (pp. 223-239). London, UK: Intech Open. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77274>.
- [5] Barbosa, B. M., Gomes, F., Colodette, J., Carvalho, D., and Manfredi, M., 2013. Effect of Optical Brightening Agent (OBA) on Bleaching Process on Paper of Eucalyptus Kraft Pulp. *Natural Resources*, 4(5): 378-382. <https://doi.org/10.4236/nr.2013.45046>.
- [6] Ganicheva, S.I., Bystrova, E.S., and Lotsmanova, E.M., 2004. Influence of thermal aging conditions on the molecular characteristics of cellulose and mechanical properties of paper. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 77 (7): 1172-1177. <https://doi.org/10.1023/B:RJAC.0000044170.31238.3>

به‌منظور تأیید درستی رابطه پیش‌بینی شده، آزمایش‌هایی انجام گرفت که جدول ۶ نتایج آن‌ها نشان می‌دهد.

در مقادیر متوسط مصرف نانوکیتوزان و حداکثر مقدار مصرف OBA، خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز حاصل شد (شکل ۴). برای تأیید درستی رابطه پیش‌بینی شده، نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده به‌خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارند. این تطابق نشان‌دهنده دقت و قابلیت اعتماد مدل ارائه شده در پیش‌بینی خواص بهینه است. شرایط بهینه پیشنهادی توسط نرم‌افزار برای دستیابی به خواص بهینه کاغذهای دست‌ساز شامل افزودن ۱/۲۱ درصد نانوکیتوزان، ۱ درصد OBA و ۰/۲ درصد پلی‌آکریل‌آمید تعیین شد. این ترکیب به‌عنوان بهترین شرایط برای بهبود خواص نوری و مکانیکی کاغذهای دست‌ساز پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

خمیر کاغذ CMP رنگ‌بری شده، تحت تیمار شیمیایی با نانوکیتوزان در سطوح ۲ و ۰،۱ درصد، پلی‌آکریل‌آمید در سطوح ۱ و ۰،۰۵ درصد و OBA در سطوح ۱ و ۰،۰۵ درصد قرار گرفت. از خمیر کاغذهای اصلاح‌شده، کاغذهای دست‌ساز با وزن پایه ۶۰ گرم بر مترمربع برای اندازه‌گیری خواص نوری و مکانیکی تهیه شد. پس از اندازه‌گیری این خواص، برای تعیین بهترین ترکیب آزمایشی از نظر مجموع خواص نوری و مکانیکی، از روش وزن دهی مبتنی بر ارزش‌گذاری استفاده گردید. هدف این پژوهش بهبود خواص نوری و مکانیکی کاغذهای دست‌ساز بود که با روش سطح پاسخ و استفاده از طراحی باکس بنکن توسط نرم‌افزار Design Expert V13 تعیین شد. آزمون آنالیز واریانس نشان داد که مدل درجه دوم بهترین مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی خواص کاغذ بوده و تطابق بالایی با نتایج آزمایشگاهی داشت ($R^2=91/66$). نتایج پژوهش

- [17] Sharifi, H., Zabihzadeh, S. M., and Ghorbani, M., 2018. The application of response surface methodology on the synthesis of conductive polyaniline/cellulosic fiber nanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 194, 384–394. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.083>.
- [18] Lu, S. Y., Qian, J. Q., Zhang, G. W., Wei, D. Y., Wu, G. F., and Yi, B. P., 2009. Application of statistical method to evaluate immobilization variables of trypsin entrapped with sol-gel method. *Journal of Biochemical Technology*, 1(3): 79–84.
- [19] Hassan, E. A., Hassan, M. L., Abou-Zeid, R. E., and El-Wakil, N. A., 2016. Novel nanofibrillated cellulose/chitosan nanoparticles nanocomposites films and their use for paper coating. *Industrial Crops and Products*, 93, 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.006>.
- [20] Vikele, L., Laka, M., Sable, I., Rozenberga, L., Grinfelds, U., Zoldners, J., and Mauret, E., 2017. Effect of chitosan on properties of paper for packaging. *Cellul. Chem. Technol*, 51(1-2), 67-73.
- [21] Ghahramani, S. Hejazi, S., and Abdolkhani, A., 2024. Investigating the Application of Nano Chitosan in the Paper and Food Packaging Industry. *Scientific Journal of Packaging Science and Art*, 15(57): 61-68.
- [22] Ghasemian, A., Armand, K. h., Afra, A., Saraeian, A. R., and Salari, M., 2020. Effect of coating packing paper with polylactic acid-chitosan and polylactic acid-nano-chitosan complexes. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 34(4):507-519. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2020.128661.1585>.
- [23] Zhang, R., Ni, Y., Wong, D., Schmidt, J., Heitner, C., and Jordan, B., 2009. Interactions of optical brightening agents with high yield pulps. *Journal of wood chemistry and technology*, 29(4): 358-370. <https://doi.org/10.1080/02773810902981284>.
- [24] Liu, H., Shi, H., Wang, Y., Wu, W., and Ni, Y., 2014. Interactions of lignin with optical brightening agents and their effect on paper optical properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(8): 3091-3096. <https://doi.org/10.1021/ie4032082>.
- [25] Liu, L., Cao, J., Huang, J., Cai, Y., and Yao, J., 2010. Extraction of pectins with different degrees of esterification from mulberry branch bark. *Bioresource Technology*, 101, 3268-3273. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.062>.
- [7] Zhang, R. Ni, Y. Wong, D., Schmidt, J., Heitner, C., and Jordan, B., 2009. Interactions of Optical Brightening Agents with High Yield Pulps. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 29(4):358-370. <https://doi.org/10.1080/02773810902981284>.
- [8] Liu, H., Shi, H., Wang, Y., Wu, W., Ni, Y., 2014. Interactions of lignin with optical brightening agents and their effect on paper optical properties, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53,3091-96. <https://doi.org/10.1021/ie4032082>.
- [9] Nada, A.M.A., El-Sakhawy, M., Kamel, S., and Eid, M.A.M., 2005. Effect of Chitosan and Its Derivatives on the Mechanical and Electrical Properties of Paper Sheets. *Egyptian journal of solids*, 28 (2): 202-208. <https://doi.org/10.21608/ejs.2005.149335>.
- [10] Rahmaninia, M., Rohi, M., Ramezani, O., and Zabihzadeh, S.M., 2015. The effect of pulp suspension pH on the performance of chitosan-nanobentonite as a dry strength additive in hardwood CMP pulp, *Journal of Forest and Wood Products*, 68(2),347-357. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2015.54836>.
- [11] Vaysi, R., Behrooze, R., and Khaj-e-Ali, E., 2016. The effect of ECF bleaching on optical and mechanical properties of bagasse soda pulp. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 31 (2),349-361. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2016.105981>.
- [12] Vaysi, R., and Yousefi Glowardi, Y., 2020. The effect of chitosan and cellulose nanofiber biopolymer system on optical and resistance properties of chemical-mechanical pulp (CMP). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 35 (1), 61-75. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2020.128617.1584>. (In Persian)
- [13] Vaysi, R., Rezazadeh, E., and Ebadi, S.E., 2024. The Effect of nano-chitosan, nano-cellulose and DTPA Spray on the optical properties of paper obtained from chemimechanical pulp (CMP). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 39(1):55-71. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2024.364606.1766>. (In Persian)
- [14] Akbarpour, I., 2015. Improvement of qualitative properties of mixed recycled ONP and OMG pulps with chemical, enzymatic and ultrasonic treatments. Ph.D. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 345p.
- [15] Hamzeh, Y., and Rostampour, A., 2008. Principles of papermaking chemistry, Tehran University Press, 424 p.
- [16] Sharifi, H., and Nazarnezhad, N., 2018. Use of central composite design for optimization of ultrasonic pre-treatment parameters on chemical deinking of old newspaper, *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 33(4): 489-500. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2018.122366.1480>.