

## بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر پیش تیمار فراصوت بر جوهرزدایی شیمیایی کاغذ روزنامه باطله با روش سطح پاسخ

سید حسن شریفی<sup>۱\*</sup>، نورالدین نظرزاد<sup>۲</sup>

۱. استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

۲. دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۷)

### چکیده

در سال‌های اخیر، بازیافت کاغذ به دلایل متعددی از جمله نگرانی‌های زیست‌محیطی و صرفه اقتصادی افزایش چشمگیری یافته است. امواج فراصوت در صنعت کاغذسازی در مراحل مختلفی به کار گرفته می‌شود. جوهرزدایی تأثیر مهم و تعیین‌کننده‌ای در بازیافت کاغذ روزنامه دارد. هدف این پژوهش، جوهرزدایی با استفاده از پیش تیمار فراصوت به همراه روش شیمیایی برای بهبود خواص نوری کاغذهای روزنامه به‌عنوان ماده اولیه سلولزی است. جوهرزدایی شیمیایی با استفاده از پراکسید هیدروژن، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، پلی‌سوربات ۸۰ و DTPA انجام گرفت. تأثیر متغیرهای مهم پیش تیمار فراصوت از جمله دمای حمام فراصوت و زمان قرارگیری در معرض امواج فراصوت بر بازده جوهرزدایی با استفاده از روش سطح پاسخ بر مبنای طراحی مرکب مرکزی بررسی شد. پس از تیمار شیمیایی خمیرهای کاغذ بازیافتی حاصل، بیشترین و کمترین درصد بازده جوهرزدایی کاغذ دست‌ساز ساخته شده براساس استاندارد ۸۸-om-۲۲۰۵ با گراماژ ۶۰ گرم بر متر مربع، به ترتیب ۸۸ و ۴۵ درصد محاسبه شد. منحنی‌های سطحی و سه‌بعدی برای نشان دادن اثر متقابل متغیرهای مستقل با متغیر پاسخ (بازده جوهرزدایی) ایجاد شد. آزمون آنالیز واریانس نشان داد که مدل نمایی، بهترین مدل برای تبیین برهم‌کنش متغیرهاست. پیش تیمار فراصوت به افزایش درجه روشنایی و کاهش ماتی کاغذ روزنامه بازیافتی حاصل در مقایسه با نمونه شاهد انجامید. براساس نتایج آزمون، تأثیر هر یک از متغیرها در بازده جوهرزدایی معنی‌دار بود و زمان فراصوت، مؤثرترین عامل معرفی شد. شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین بازده جوهرزدایی (۸۶/۹۵ درصد) دمای حمام فراصوت ۴۷ درجه سانتی‌گراد و زمان فراصوت ۳۱ دقیقه تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: پیش تیمار فراصوت، جوهرزدایی، روزنامه باطله، روش سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی.

### مقدمه

آسان کاغذ بازیافت شده بدون افت کیفیت نسبت به کاغذ تازه، نبود تفاوت آنها با کاغذهای سفید از نظر بهداشتی، کاهش آلودگی زیست‌محیطی تولید کاغذ از طریق کاهش مصرف مواد شیمیایی، کاهش حجم و وزن زباله شهری و در پی آن کاهش نیاز به زمین و امکانات جمع‌آوری، حمل و دفع زباله اشاره کرد [۲، ۳].

در سال‌های اخیر علاقه به استفاده از کاغذ باطله برای تولید محصولات کاغذی گوناگون به دلایل متعدد از جمله اهمیت زیست‌محیطی افزایش یافته است [۱]. از مزایای استفاده از کاغذهای بازیافتی می‌توان به جانشین کردن

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۱۳۵۴۶۹۹۵

تولید کاغذ با الیاف بازیافتی در مقایسه با خمیر کاغذ بکر، سبب مصرف ۷۵-۲۵ درصد انرژی کمتر، ۷۵ درصد کاهش آلودگی هوا و همچنین مصرف آب فرایندی کمتر می‌شود، زیرا بخش زیادی از انرژی مصرفی به‌طور معمول در بخش کاغذسازی (خمیرسازی) استفاده می‌شود که با استفاده از الیاف بازیافتی مصرف انرژی در این بخش کاهش می‌یابد. خمیر کاغذ بازیافتی نیازمند پالایش کمتری از خمیر کاغذ بکر است. سیستم بازیافت، هم نظر حافظان محیط زیست و هم نظر اقتصاددانان را به دلیل کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و تولید تأمین می‌کند، اما در هر دو حالت، آنچه اهمیت بیشتری دارد جنبه اقتصادی است [۴، ۵].

مشکل اصلی در زمینه بازیافت کاغذ، فرایند رنگ‌بری است که تأکید آن بر تولید خمیرهای جوهرزدایی‌شده روشن‌تر است. به‌طور مرسوم، عوامل اکسیدکننده برای بهبود فرایند جوهرزدایی و رنگ‌بری خمیرهای جوهرزدایی‌شده به‌کار گرفته می‌شوند. در این میان می‌توان به هیدروژن پراکسید، ازن، دی‌اکسید کلر، هیپوکلریت و فرمامیدین سولفونیک اسید اشاره کرد [۶].

امروزه به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلفی از جمله تصفیه فاضلاب، صنایع غذایی، کاربردهای شیمیایی و صنعت ساخت مواد از امواج فراصوت استفاده می‌شود [۷]. فراصوت در صنعت کاغذسازی در مراحل مختلفی از جمله افزایش خمیرسازی، رنگ‌بری، گسستن زنجیره‌های سلولزی و فراوری کاغذهای باطله به‌کار گرفته می‌شود [۸-۱۱]. به تازگی نیز بررسی‌هایی در زمینه جوهرزدایی کاغذ باطله با استفاده از امواج فراصوت انجام گرفته است. Tatsumi و همکاران (۲۰۰۰) اثر امواج فراصوت بر کیفیت الیاف بازیافتی را بررسی کردند. در این پژوهش مخلوط خمیر الیاف بازیافتی، قبل از جوهرزدایی به روش شناورسازی مرسوم، توسط امواج فراصوت تیمار شد. آنها در این پژوهش نتیجه گرفتند کاغذهایی که الیاف آنها تیمار فراصوت شد، نسبت به کاغذهایی که الیاف آنها با امواج

فراصوت تیمار نشد، چگالی، مقاومت کششی و روشنی بیشتری دارند [۱۲]. Parker و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی تأثیر دما بر فرایند جوهرزدایی به کمک امواج فراصوت پرداختند. در این روش کاغذ کپی سفید در جوهر سیاه خیس شد. بعد از خشک کردن و رسیدن به وزن ثابت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد فرایند جوهرزدایی در شرایط عملیاتی متفاوت انجام گرفت. امواج فراصوت سبب بهبود درجه روشنی کاغذ در محدوده دمایی ۴۵-۱۵ درجه سانتی‌گراد با دمای بهینه ۳۵ درجه سانتی‌گراد شد [۶]. Xing و همکاران (۲۰۱۰) اثر عملیات فراصوت بر رنگ‌بری خمیرهای شیمیایی - مکانیکی (CMP) درخت صنوبر سفید تریپلوئید چینی را بررسی کردند. قبل از رنگ‌بری تک‌مرحله‌ای با هیدروژن پراکسید، خمیر CMP در خشکی ۱/۵ درصد و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه با دامنه نوسان ۹۰ درصد تحت عملیات فراصوت قرار گرفت. این شرایط مطلوب‌ترین اثر را در افزایش درجه روشنی به مقدار ۳/۵ درصد ایزو نشان داد که به مقدار نهایی برابر با ۸۰/۲ درصد ایزو منجر شد [۱۳].

روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل کردن و تجزیه و تحلیل مسائلی که در آن متغیر پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر مستقل است بسیار مفید بوده و هدف از آن بهینه کردن متغیرهای پاسخ است [۱۴]. در بیشتر مسائل کاربردی بیش از یک عامل در کیفیت و عملکرد یک محصول دخالت دارند که باید بررسی شوند. در بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ، متغیرهای ورودی به‌عنوان متغیرهای مستقل تعریف می‌شوند و تأثیر این متغیرها بر متغیرهای خروجی (وابسته) بررسی می‌شود. مزیت اصلی روش سطح پاسخ، کاهش تعداد تکرارهای آزمایش‌ها برای ارزیابی متغیرهای چندگانه و روابط متقابل آنهاست [۱۵].

در این تحقیق، از تیمار فراصوت به‌عنوان پیش‌تیمار

کم، هم زده شد. در ادامه از ماده فعال‌ساز سطحی پلی‌سوربات ۸۰ به میزان ۰/۱۵ درصد براساس وزن خشک خمیر کاغذ روزنامه برای تیمار نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌های خمیر کاغذ ابتدا تحت تأثیر امواج فراصوت قرار گرفتند. برای بررسی تأثیر متغیرهای مهم پیش‌تیمار فراصوت از جمله زمان قرارگیری در معرض امواج فراصوت (دقیقه) و دمای حمام فراصوت (درجه سانتی‌گراد) از روش طراحی مرکب مرکزی (جدول ۱) استفاده شد.

### تیمار شیمیایی

در مرحله بعد خمیرهای کاغذ بازیافتی حاصل تحت تیمار شیمیایی قرار گرفتند. در ابتدا به میزان ۰/۳ درصد DTPA (بر مبنای وزن خشک خمیر کاغذ) اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در  $\text{pH} = 5/5$  با همزن مکانیکی با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه هم زده شد. سپس از یک مرحله شست‌وشوی تکمیلی روی الک با مش ۲۰۰ بهره‌گیری شد. در ادامه پراکسید هیدروژن، هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به ترتیب هر کدام به مقدار ۱، ۱ و ۲ درصد بر مبنای وزن خشک خمیر به خمیر کاغذ با درصد خشکی ۳ درصد اضافه شد و سپس در کیسه پلاستیکی قرار داده و به خوبی ورز داده شد و به مدت یک ساعت در شیکر انکوباتور در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از آن نمونه‌ها با آب یون‌زدایی شده چند مرتبه روی الک با مش ۲۰۰ شست‌وشو داده شدند تا  $\text{pH}$  خنثی حاصل شود [۱۶]. از تیمارهای انجام‌گرفته، چند کاغذ دست‌ساز با گراماژ ۶۰ گرم بر متر مربع مطابق با استاندارد ۸۸-om-۲۲۰۵ TAPPI آیین‌نامه ساخته شد.

### تعیین بازده جوهرزدایی و ویژگی‌های نوری و

#### فیزیکی کاغذهای دست‌ساز

پس از ساخت کاغذ دست‌ساز، اندازه‌گیری میانگین مقدار ذرات جوهر باقی‌مانده<sup>۲</sup> در کاغذ دست‌ساز براساس

قبل از جوهرزدایی شیمیایی کاغذ روزنامه باطله استفاده شده است. برای بهینه‌سازی و بررسی اثر متغیرهای مختلف فرایندی از روش پاسخ سطح بر مبنای طرح مرکب مرکزی استفاده شد. هدف اصلی پژوهش حاضر دستیابی به شرایط بهینه به‌کارگیری پیش‌تیمار فراصوت برای داشتن بازده جوهرزدایی زیاد از طریق آنالیز خطی و تأثیر متقابل متغیرهای مؤثر دمای حمام (درجه سانتی‌گراد) و زمان فراصوت (دقیقه) است. مدل ریاضی چندجمله‌ای درجه دوم، آنالیز واریانس و آنالیز سطح پاسخ به‌منظور بیان رابطه بین متغیرهای فرایندی و بازده جوهرزدایی به‌کار گرفته شده و شرایط بهینه تبدیل تعیین شد.

### مواد و روش‌ها

#### مواد

مواد شیمیایی به‌کاررفته در این تحقیق پراکسید هیدروژن، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، پلی‌سوربات ۸۰ DTPA<sup>۱</sup> بودند که از شرکت‌های مرک و سیگما-آلدريج تهیه شدند. مقدار استفاده این مواد در هر تیمار ثابت بود. کاغذهای باطله مورد استفاده، کاغذهای روزنامه همشهری است که از دفترهای مرکزی فروش روزنامه خریداری شد. همچنین سن آنها در زمان جوهرزدایی ۵ روز بود.

#### آماده‌سازی خمیر و پیش‌تیمار با امواج فراصوت

کاغذهای روزنامه به ابعاد ۵-۲ سانتی‌متر تبدیل و به مدت ۲۴ ساعت در آب خیسانده شدند. قطعات کاغذ خیس‌خورده درون دستگاه پراکنده‌ساز به مدت ۳۰ دقیقه از هم باز شدند. در نهایت خمیر کاغذ حاوی ذرات مرکب و الیاف روی غربال با مش ۲۰۰ آبیگری شده و خمیر کاغذ حاصل درون کیسه‌های پلاستیکی برای تعیین درصد رطوبت نگهداری شد. مقدار مشخصی از خمیر کاغذ آماده شده به خشکی ۳ درصد رسانده شد و برای تهیه سوسپانسیون همگنی از خمیر کاغذ، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه با دستگاه همزن با دور

تاگوچی، روش طرح مرکب مرکزی و غیره وجود دارد [۱۴]، مهم‌ترین مسئله این تحقیق، بررسی آثار اصلی و متقابل عامل‌ها بود؛ از این‌رو طرح آماری سطح پاسخ براساس روش طرح مرکب مرکزی انتخاب شد. مدل استفاده‌شده در روش طرح مرکب مرکزی، رابطه درجه دوم است. در این روش برای هر متغیر وابسته، مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و متقابل عامل‌ها را بر هر متغیر جداگانه بیان می‌کند. مدل چندمتغیره به صورت زیر است.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3)$$

Y بیانگر پاسخ پیش‌بینی شده، k بیانگر تعداد متغیرهای مستقل (در این تحقیق برابر ۳ است) است.  $X_i$  و  $X_j$  بیانگر متغیرها هستند.  $\beta_0$  نشان‌دهنده ضریب ثابت،  $\beta_j$  و  $\beta_{ij}$  و  $\beta_{ii}$  به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب اثرات خطی، اثرات مربعی و اثرات متقابل هستند [۱۸].

در تحقیق حاضر، روش طراحی آزمایش دو عامل با دو سطح روش طرح مرکب مرکزی برای تحقیق و بررسی بر روی متغیرهای دمای حمام فراصوت و زمان فراصوت و برای پاسخ‌های مختلف به کار گرفته شد. برای بررسی اثر این دو متغیر بر بازده جوهرزدایی، ۱۳ آزمایش توسط نرم‌افزار طراحی شد. از نرم‌افزار آماری Design Expert V6 برای تجزیه و تحلیل اطلاعات و رسم نمودارهای مربوط به روش طرح مرکب مرکزی استفاده شد. در جدول ۱، متغیرهای مستقل و حدود تعیین‌شده برای آنها که در آزمایش‌های مقدماتی تعیین شد، آورده شده است.

### نتایج و بحث

آنالیز ANOVA برای بررسی حد تأثیر متغیرهای مستقل و تأثیر متقابل هر یک از عوامل تیمار به کار گرفته شد (جدول ۳). تأثیر هر یک از عامل‌های ارائه‌شده در جدول ۳ توسط مقادیر F و P بررسی شد. نتایج به روشنی نشان می‌دهند که بازده جوهرزدایی تحت تأثیر متغیرهای انتخاب‌شده برای این مطالعه است.

استاندارد ۱۵- om-۱۵۶۷ آیین‌نامه TAPPI انجام گرفت. اندازه‌گیری بازده جوهرزدایی به‌عنوان عامل کارایی مواد شیمیایی در زدودن و خروج ذرات جوهر از سطح کاغذ مطابق رابطه زیر انجام گرفت [۱۷]:

$$(\%) = \frac{N_b - N_s}{N_s} \times 100 \quad (1)$$

$N_b$  = میانگین مقادیر ذرات جوهر باقی‌مانده در کاغذهای دست‌ساز خمیرکاغذ شاهد (ppm)

$N_s$  = میانگین مقادیر ذرات جوهر باقی‌مانده در

کاغذهای دست‌ساز خمیرکاغذ جوهرزدایی‌شده (ppm)

ویژگی‌های نوری نمونه‌های منتخب و شاهد از قبیل درجه روشنی (۰۲- om-۴۵۲ T) و درجه مات (۰۱- om-۴۲۵ T) براساس دستورالعمل‌های آیین‌نامه TAPPI اندازه‌گیری شد. به‌منظور تعیین چگالی ظاهری، ضخامت ظاهری ورقه‌ها بنابر استاندارد ۹۷- om-۴۱۱ T توسط یک دستگاه میکرومتر آزمایشگاهی و وزن پایه ورقه‌ها مطابق با استاندارد ۰۲- om-۴۱۰ T اندازه‌گیری شد. رابطه زیر برای محاسبه چگالی ظاهری استفاده شد:

$$\rho_a = \frac{w}{T_a} \quad (2)$$

w معادل وزن پایه کاغذ (گرم/متر مربع) و  $T_a$  ضخامت ظاهری (میکرون) کاغذ است. چگالی ظاهری برحسب گرم بر سانتی‌متر مربع بیان می‌شود.

### طراحی آزمایش‌ها

روش پاسخ سطح مجموعه‌ای از روش‌های آماری است که در بهینه‌سازی فرایندهایی به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شمای گرافیکی مدل ریاضی سبب تعریف واژه روش سطح پاسخ شده است. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش می‌یابد و همه ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل عامل‌ها، برآوردشدنی هستند. روش‌های مختلف طراحی آزمایش، به‌عنوان مثال روش طراحی باکس بنکن، روش

جدول ۱. متغیرهای مستقل و حدود تعیین شده برای آنها در روش طراحی مرکب مرکزی

| عوامل | پارامترهای مستقل      | حدود متغیرها |           |          |
|-------|-----------------------|--------------|-----------|----------|
|       |                       | $+\alpha$    | $-\alpha$ | حد پایین |
| A     | زمان فراصوت (دقیقه)   | ۴۵           | ۵         | ۱۵       |
| B     | دمای حمام فراصوت (°C) | ۶۵           | ۲۵        | ۳۵       |

جدول ۲. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی

| شماره نمونه | زمان فراصوت (دقیقه) | دمای حمام فراصوت (°C) | بازده جوهرزدایی (%) |              |
|-------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------|
|             |                     |                       | واقعی               | پیش‌بینی شده |
| DP-۱        | ۲۵                  | ۵۵                    | ۷۸                  | ۸۲/۶         |
| DP-۲        | ۲۵                  | ۳۵                    | ۸۱                  | ۷۹/۸         |
| DP-۳        | ۴۵                  | ۶۵                    | ۶۷                  | ۶۵/۹         |
| DP-۴        | ۴۵                  | ۲۵                    | ۵۸                  | ۵۸/۴         |
| DP-۵        | ۵                   | ۶۵                    | ۵۰                  | ۴۹/۲         |
| DP-۶        | ۵                   | ۲۵                    | ۴۵                  | ۴۵/۶         |
| DP-۷        | ۱۵                  | ۴۵                    | ۷۷/۵                | ۷۸/۸         |
| DP-۸        | ۲۵                  | ۴۵                    | ۸۶                  | ۸۵/۸         |
| DP-۹        | ۳۵                  | ۴۵                    | ۸۴                  | ۸۶/۲         |
| DP-۱۰       | ۲۵                  | ۴۵                    | ۸۷                  | ۸۵/۸         |
| DP-۱۱       | ۲۵                  | ۴۵                    | ۸۶/۵                | ۸۵/۸         |
| DP-۱۲       | ۲۵                  | ۴۵                    | ۸۸                  | ۸۵/۸         |
| DP-۱۳       | ۲۵                  | ۴۵                    | ۸۷/۶                | ۸۵/۸         |

جدول ۳. آنالیز واریانس (ANOVA) برای بازده جوهرزدایی با کمک روش طراحی مرکب مرکزی

| منبع                      | مجموع مربعات | درجه آزادی | میانگین مربعات | احتمال F | احتمال P |
|---------------------------|--------------|------------|----------------|----------|----------|
| A - زمان فراصوت (دقیقه)   | ۲۴۵/۶۸       | ۱          | ۲۴۵/۶۸         | ۴۰/۵۷    | ۰/۰۰۰۴   |
| B - دمای حمام فراصوت (°C) | ۳۴/۷۲        | ۱          | ۳۴/۷۲          | ۵/۷۳     | ۰/۰۴۷۸   |
| AB                        | ۴/۰۰         | ۱          | ۴/۰۰           | ۰/۶۶     | ۰/۴۴۳۱   |
| A <sup>2</sup>            | ۴۱/۲۲        | ۱          | ۴۱/۲۲          | ۶/۸۱     | ۰/۰۳۵۰   |
| B <sup>2</sup>            | ۷۹/۰۲        | ۱          | ۷۹/۰۲          | ۱۳/۰۵    | ۰/۰۰۸۶   |

مدل نمایی نهایی استخراج شده از آزمایش‌های صورت گرفته به صورت زیر است:

$$Deinking - efficiency \% = -38.32963 + 1.88185X_A + 4.12622X_B - 0.032498X_A^2 - 0.044998X_B^2 + 2.5 \times 10^{-3}X_A X_B \quad (۴)$$

دارد. همچنین تقابل بین زمان فراصوت و دمای حمام فراصوت بر بازده جوهرزدایی معنی دار نیست (مطابق با مقادیر F). با توجه به ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) برابر با ۰/۹۸۴۵ برای مدل و با استفاده از تحلیل واریانس، مدل ریاضی چندجمله‌ای درجه دوم ارائه شده برای توصیف رفتار پاسخ در مقابل تغییرات متغیرهای ورودی مناسب است؛ بنابراین

X<sub>i</sub> نشان‌دهنده مقادیر واقعی برای عامل‌های A و B است. علامت مثبت پیش از هر یک از عبارت مورد نظر نشان‌دهنده تأثیر مثبت و علامت منفی نشان‌دهنده تأثیر منفی آن عبارت است. براساس معادله ارائه شده، تأثیر مستقل هر یک از متغیرها بر بازده معنی دار است و زمان فراصوت بیشترین تأثیر خطی مثبت را در بین متغیرها

تخریب ذرات می‌شود. از طرف دیگر دما بر اندازه ذرات جوهر تأثیر بسزایی دارد، به طوری که در تیمارهایی با دمای کم، تعداد زیادی ذره کوچک تولید شده و دماهای بیشتر سبب تولید ذرات به نسبت بزرگ‌تر می‌شود [۸، ۱۹]. در این تحقیق نیز با افزایش دما به بیشتر از ۴۵ درجه سانتی‌گراد، درهم شکستن ذرات جوهر کاهش می‌یابد و در خمیرکاغذ بازیافتی نهایی، ذرات جوهری با اندازه درشت‌تر داریم و در نتیجه پس از جوهرزدایی شیمیایی به مقدار بیشتری در ساختار کاغذ باقی می‌ماند و این امر سبب کاهش بازده جوهرزدایی در دماهای بیشتر می‌شود [۶].

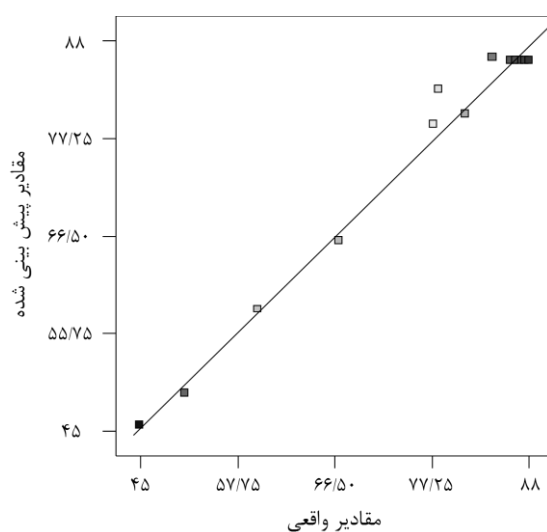
با بررسی زمان قرارگیری در معرض امواج فراصوت مطابق با شکل ۲ ب، در ابتدا با افزایش زمان تا ۲۵ دقیقه افزایش بازده جوهرزدایی با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد و در ادامه با افزایش این زمان کاهش بازده با شیب ملایم‌تری رخ می‌دهد. امواج فراصوت ذرات جوهر را تا حدی تخریب و حذف کرده و همچنین اتصال بین آنها را با سطوح الیاف ضعیف می‌کند و بدین ترتیب قدرت تأثیر روش شیمیایی را بهبود می‌بخشد. دلیل کاهش بازده با افزایش زمان تیمار از ۲۵ تا ۴۵، اختلاط دوباره ذرات جوهر با الیاف و برگشت مجدد ذرات جوهر به درون شبکه الیاف است [۶].

می‌توان با استفاده از این نتایج اثبات کرد که ۹۸/۴۵ درصد مقادیر توسط معادله ارائه شده پیش‌بینی می‌شود.

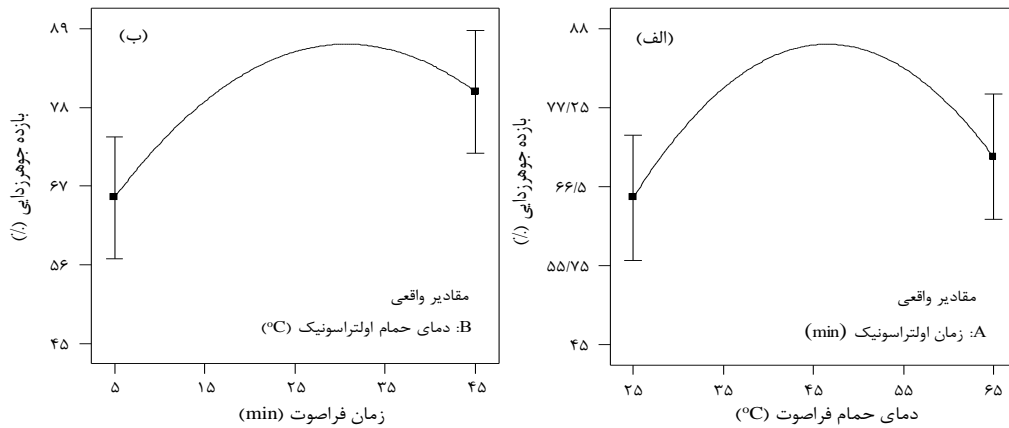
شکل ۱ نتایج بازده جوهرزدایی محاسبه شده نمونه‌ها را برحسب نتایج حاصل از معادله ۱ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تجمع نقاط در اطراف خط وسط نشان می‌دهد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از معادله همخوانی خوبی دارد و معادله ارائه شده به خوبی نتایج را پوشش می‌دهد.

بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول ۳، نمودارهای تأثیر میانگین هر یک از متغیرها در شکل ۲ آورده شده است. در این تحقیق، سیستم زمانی بهینه می‌شود که خروجی بیشترین مقدار را دارا باشد. از روی شکل به وضوح مشخص است که هر دو متغیر تأثیر مثبت بر بازده جوهرزدایی دارند. براساس نتایج آنالیز ANOVA، زمان فراصوت مؤثرترین عامل مؤثر بر بازده جوهرزدایی است با  $F=40/57$  و  $P=0/0004$ .

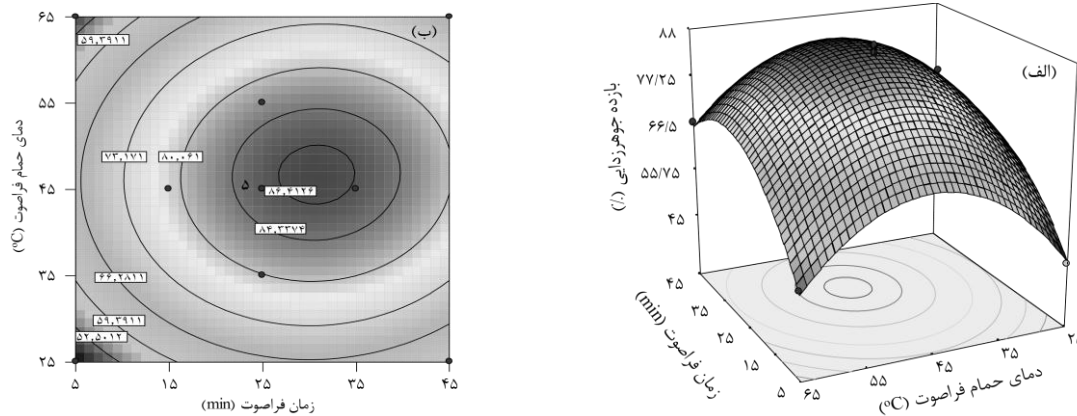
در مطالعه دمای حمام فراصوت (شکل ۲ الف)، با افزایش این دما تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد بازده جوهرزدایی نیز افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش دما تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد کاهش این متغیر مشاهده شد. افزایش دما سبب تسریع



شکل ۱. مقادیر آزمایشگاهی برحسب مقادیر مدل ارائه شده برای بازده جوهرزدایی



شکل ۲. اثر مستقل تأثیر میانگین دمای حمام فراصوت (الف) و زمان فراصوت (ب) بر بازده جوهرزدایی



شکل ۳. منحنی سطح سه‌بعدی (الف) و منحنی مسطح (ب) برای اثر متقابل زمان و دمای حمام فراصوت بر بازده جوهرزدایی

جوهرزدایی و رنگ‌بری به‌کار گرفته می‌شود [۱۳]. درجهٔ روشنایی و ماتی نمونهٔ شاهد فاقد پیش تیمار فراصوت به ترتیب ۴۲ و ۹۷ درصد است. علت ماتی زیاد نمونهٔ شاهد این است که به دلیل انجام نگرفتن تیمار، ذرات جوهر در بین الیاف حفظ شده‌اند که این عامل نیز سبب کاهش تخلخل و افزایش جذب نور می‌شود. این عوامل شدت عبور نور از سطح کاغذ را کاهش داده و سبب افزایش ماتی و کاهش درجه روشنایی شده‌اند. ماتی نمونه‌های تیمار شده در مقایسه با نمونهٔ شاهد کاهش یافته است و علت این امر ممکن است کاهش تفرق و شکست نور در بین الیاف باشد [۲۰].

از دلایل کاهش ماتی در نمونه‌های با پیش تیمار فراصوت این است که امواج فراصوت از راه ایجاد ارتعاش و قرارگیری قسمت‌های عمدهٔ الیاف در معرض این امواج، سبب شل شدن و تا حدی جدا شدن ذرات

نمای سه‌بعدی و سطحی پاسخ خروجی برای مطالعهٔ تأثیر متغیرهای تحت بررسی، بر بازده جوهرزدایی به‌کار گرفته شد (شکل ۳). در ضمن از این شکل‌ها برای مشخص کردن بهترین شرایط برای بیشینهٔ بازده جوهرزدایی نیز می‌توان استفاده کرد. در نهایت می‌توان بیان کرد که در مقادیر میانی زمان فراصوت و مقادیر میانی دمای حمام فراصوت بیشترین مقادیر بازده جوهرزدایی مشاهده می‌شود. شرایط بهینهٔ پیشنهاد شده توسط نرم افزار برای بهترین مقدار ارائه شده برای بازده جوهرزدایی (۸۶/۹۵ درصد) زمان فراصوت ۳۱ دقیقه و دمای حمام فراصوت ۴۷ درجهٔ سانتی‌گراد است.

ویژگی‌های نوری و فیزیکی نمونهٔ شاهد و نمونه‌های منتخب در جدول ۴ آورده شده است. درجهٔ روشنایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها، برای بیان کارایی

سطح کاغذ افزایش یافته و برعکس، ماتی کاهش می‌یابد [۲۰، ۲۱].

همان‌طور که ذکر شد امواج فراصوت موجب حذف بیشتر ذرات جوهر از سوسپانسیون خمیر کاغذ می‌شود؛ بنابراین با کاهش جوهر رنگی از بین الیاف خمیر، الیاف روشن‌تر خواهد شد و کاغذ ساخته شده نیز درجه روشنایی بیشتری خواهد داشت. از طرفی با توجه به ثابت بودن مقدار مصرف الیاف برای ساخت کاغذها، علت افزایش چگالی ظاهری برای نمونه‌های مختلف، افزایش اتصال بین الیاف، کاهش تخلخل و کاهش حجم کاغذ است؛ بنابراین در نمونه‌های با چگالی ظاهری بیشتر، به دلیل فشردگی بیشتر و کاهش ذرات رنگی جوهر درجه روشنایی و افزایش درجه ماتی کاهش یافته است.

جوهر از سطح الیاف شده که پس از تیمار شیمیایی سبب خروج بیشتر این ذرات از فضای بین الیافی می‌شود. این اتفاق رفتار نوری کاغذ ساخته شده از این الیاف را تغییر می‌دهد، به طوری که کاهش ذرات جوهر در بین الیاف، سبب کاهش جذب نور توسط خمیر (به دلیل کاهش نور جذب شده توسط ذرات سیاه جوهر) می‌شود و در نتیجه ماتی کاهش می‌یابد. همچنین با حذف ذرات جوهر از روی سطوح و بین الیاف، امکان تماس مستقیم الیاف با همدیگر بیشتر می‌شود و با افزایش سطح اتصال بین الیاف، فضای خالی بین الیاف کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه آن چگالی ظاهری کاغذ افزایش می‌یابد و نور بدون عبور از هوا و شکسته شدن، از فیلتر به فیلتر دیگر منتقل می‌شود و از کاغذ عبور می‌کند، در نتیجه عبور نور از

جدول ۴. ویژگی‌های نوری و فیزیکی نمونه شاهد و نمونه‌های منتخب

| شماره نمونه         | چگالی ظاهری کاغذ ( $\text{gr cm}^{-3}$ ) | درجه روشنایی (%) | درجه ماتی (%) |
|---------------------|--|------------------|---------------|
| شاهد                | ۰/۴۶۲                                    | ۴۲               | ۹۷            |
| شاهد- تیمار شیمیایی | ۰/۴۸۵                                    | ۵۲               | ۸۵            |
| DP-۹                | ۰/۵۳۸                                    | ۶۵               | ۷۸            |
| DP-۷                | ۰/۵۲۰                                    | ۵۴               | ۸۰            |
| DP-۵                | ۰/۵۰۶                                    | ۵۰               | ۸۳            |

بهینه‌سازی متغیرها به روش پاسخ سطح، نتیجه‌گیری می‌شود که مقادیر بهینه برای زمان فراصوت ۳۱ دقیقه و دمای حمام فراصوت ۴۷ درجه سانتی‌گراد است و بازده جوهرزدایی در این مقادیر ۸۶/۹۵ درصد به دست آمد. با توجه به نتایج می‌توان بیان داشت که به کارگیری پیش تیمار فراصوت، تأثیر مهمی در بهبود درجه روشنایی و چگالی ظاهری کاغذ نسبت به نمونه‌های شاهد داشت، اما درجه ماتی کاهش یافت.

#### سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی از این طرح پژوهشی (کد طرح: ۰۵-۱۳۹۶-۰۴)، تشکر و قدردانی می‌شود.

#### نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر دو متغیر کنترلی مهم در به کارگیری پیش تیمار فراصوت در روش جوهرزدایی شیمیایی کاغذ روزنامه باطله، یعنی زمان فراصوت و دمای حمام فراصوت بر بازده جوهرزدایی و ویژگی‌های نوری و فیزیکی با استفاده از روش پاسخ سطح بر مبنای طرح مرکب مرکزی انجام گرفت. مدل درجه دوم برای بیان متغیر وابسته براساس متغیرهای مستقل ارائه شد. بررسی نتایج برهم‌کنش متغیرها نشان داد که عامل‌های زمان فراصوت و دمای حمام فراصوت بر بازده جوهرزدایی نمونه‌ها تأثیر معنی‌دار دارند و زمان فراصوت در این بین عامل کنترلی مهم‌تری در مقایسه با دمای حمام فراصوت در محدوده تحت بررسی است. براساس



## References

- [1]. Nimmanterdwong, P., Boonprasop, S., Thummakul, T., Phongboonchoo, Y., Piumsomboon, P., Feng, Y., Poochinda, K., and Chalermainsuwan, B. (2016). Statistical experimental design of a novel deinking reactor based on centrifugal force under electric field concept. *International Journal of Mineral Processing*, 157: 120–127.
- [2]. Sadeghi, A., and Behrooz, R. (2012). Investigation on the optimal dosage of hydrogen peroxide and sodium hydroxide to improve flotation deinking efficiency for mixed waste papers. *Iranian Journal of Natural Resources*, 65(2): 157-168.
- [3]. Cathie, K., and Guest, D. (2001). *Guide to Waste Paper*, Translated by Mirshokraei, S. A., Aeij Press, Tehran.
- [4]. Akbarpour, I., Resalati, H., and Saraeian, A.R. (2010). Investigation on the deinkability of old newspaper. *Iranian Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 17(2): 73-87.
- [5]. Akbarpour, I., Resalati, H., and Saraeian, A.R. (2011). Investigation on the physical and mechanical properties of waste newspaper deinked pulp by cellulase enzyme compared to conventional method. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 26(2): 243-255.
- [6]. Gaquere-Parker, A.C., Ahmed, A., Isola, T., Marong, B., Shacklady, C., and Tchoua, P. (2009). Temperature effect on an ultrasound-assisted paper de-inking process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 16(5): 698–703.
- [7]. Sharifi Pajaie, H., and Taghizadeh, M. (2015). Optimization of nano-sized SAPO-34 synthesis in methanol-to-olefin reaction by response surface methodology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 24: 59–70.
- [8]. Thompson, R.C., and Manning, A. (2005). A review of ultrasound and its applications in papermaking. *Progress in Paper Recycling*, 14(2): 26-42.
- [9]. Guo, X., Jiang, Z., Li, H., and Li, W. (2015). Production of recycled cellulose fibers from waste paper via ultrasonic wave processing. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(19): 41962.
- [10]. Jiang, Q., Yang, G., Wang, Q., Sun, Q., Lucia, L.A., and Chen, J. (2016). Ultrasound-assisted xylanase treatment of chemi-mechanical poplar pulp. *BioResources*, 11(2): 4104-4112.
- [11]. Thakur, A., Khato, S.S., Singh, D., Manore, S., and Siddiqui, F. (2017). Design and fabrication of compact paper recycling machine. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(3): 70-75.
- [12]. Tatsumi, D., Higashihara, T., Kawamura, S.Y., and Matsumoto, T. (2000). Ultrasonic treatment to improve the quality of recycled pulp fiber. *Journal of Wood Science*, 46(5): 405-409.
- [13]. Xing, M., Yao, S., Zhou, S., Zhao, Q., Hang Lin, J., and Wen Pu, J. (2010). Ultrasonic bleaching of CMP. *Bioresources*, 5(3): 1353-1365.
- [14]. Clarke, G.M., and Kempson, R. E. (1997). *Introduction to the design and analysis of experiments*. Arnold, London.
- [15]. Cornell, J.A. (1990). *How to Apply Response Surface Methodology*. second ed., American Society for Quality Control, Wisconsin.
- [16]. Mehri Iraie, H., Ghasemian, A., Resalati, H., Saraeian, A., and Akbarpour, I. (2014). Investigation on bleaching of mixed old newspaper and magazine deinked pulp with hydrogen peroxide. *Iranian Journal of Forest and Wood Products*, 67(3): 503-516.
- [17]. Akbarpour, I., Resalati, H., and Saraeian, A.R. (2011). Investigation on the appearance properties of waste newspaper deinked by cellulase compared to chemical method. *Iranian Journal of Forest and Wood Products*, 63(4): 341-331.
- [18]. Montgomery, D.C. (2008). *Design and Analysis of Experiments*. 7th edition., John Wiley & Sons, New York.
- [19]. Thompson, R.C., Manning, A., and Lane, J. (2000). An investigation of the effect of temperature and exposure to ultrasound on the de-inking of mixed recoverable office waste. *Surface Coatings International*, 83(7): 322–328.
- [20]. Afra, E. (2003). *Properties of Paper: An introduction*. Agricultural Sciences Press, 392p. (Translated in Persian).
- [21]. Mirshokrai, A. (2001). *Guide to waste paper*. Tehran Aiezh Press. 2nd Edition, 140p. (Translated in Persian).

## Optimization of effective parameters on ultrasonic pre-treatment in chemical deinking of old newspaper by the Response Surface Methodology

**S.H. Sharifi\***; Assist. Prof., Wood and Paper Science Department, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I.R. Iran

**N. Nazarnezhad**; Assoc. Prof., Wood and Paper Science Department, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I.R. Iran.

(Received: 11 June 2018, Accepted: 29 August 2018)

### ABSTRACT

Recently, paper recycling has been significantly increased for several reasons such as environmental concerns and cost-saving. Ultrasound is used in the paper industry at various stages. Deinking has an important and determinant role in the recycling of newspapers. The aim of this study was to conduct the process of deinking in order to improve the optical properties of newspaper as a cellulosic material by using ultrasonic pretreatment combined with chemical method. The hydrogen peroxide, sodium hydroxide, sodium silicate, poly sorbent 80, and Diethylenetriaminepentaacetic acid were utilized for chemical deinking. Effect of important parameters of ultrasonic pretreatments such as ultrasonic bath temperature and sonication time on deinking efficiency was investigated by using response surface methodology based on central composite design. After chemical treatment of obtained recycled pulps, maximum and minimum efficiency of deinking for hand sheet papers with 60 gsm grammage according to standard T 2050m-88 were calculated about 88 and 45% respectively. Surface and 3D curves were created to show the interactions of the independent variables with response one (deinking efficiency). Based on the ANOVA test, the quadratic model presented the best explanation of variables interaction. Ultrasonic pretreatments increased brightness and decreased opacity of obtained recycled newspaper compared to the control ones. According to the statistical analysis, the effect of each variable on deinking efficiency was significant and sonication time was introduced as the most effective factor. In addition, 47 °C ultrasonic bath temperature and 31 min sonication time were determined as the optimal conditions for maximum deinking efficiency (86.95%).

**Keywords:** Central composite design, Deinking, Old newspaper, RSM, Ultrasonic pretreatment.

---

\* Corresponding Author, E-mail: h.sharifi@sanru.ac.ir, Tel: +989113546995