

Polymerization
Quarterly, 2023
Volume 13, Number 3
Pages 60-68
ISSN: 2252-0449

Stone Paper: Threats, Opportunities, and Challenges

Saeed Mahdavi^{1*}, Masoud Gerami², and Reza Pourbaba²

1. Wood and Forest Products Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
2. Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Postal Code 31587-77871, Karaj, Iran

Received: 13 July 2022, Accepted: 4 December 2022

Abstract

The production of stone paper as a product with unique characteristics such as waterproofness, resistance to bursting and appropriate rupture, as well as due to the reduction of water consumption, energy and greenhouse gas emissions during the production process, is expanding. In this article, the characteristics, production process, applications, development process and general comparison of stone paper with paper are reviewed. Due to its advantages such as very low water absorption, good printability and lower cost, this product has been proposed as a competitive product with conventional cellulose papers in the packaging, printing and publishing industries, especially labels. However, due to the different structure of paper, mixing with it can cause problems in the normal paper recycling cycle. Higher density, lower tensile strength, degradability under sunlight and ultraviolet light and the presence of polyethylene, are the main disadvantages of stone paper, which poses challenges in the application of this product. Paper stone recycling and using biodegradable polymers and UV-resistant additives and arrangements to separate it from recycled paper, will provides the possibility to replace it with some more paper products. Knowing the appropriate applications of this new product and the target markets, considering the reasonable price of its raw materials and availability in Iran and unique features of this product seems essential. The justification and success of new investments in the production of stone papers from the economic, technical, marketing and environmental terms is due to the knowledge that it reduces the risk of wasting the country's capital and problems in the paper recycling industry.

Key Words

stone paper,
calcium carbonate,
high density polyethylene,
applicable properties,
products

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: smahdavi@rifr-ac.ir

کاغذ سنگی: تهدیدها، فرصت‌ها و چالش‌ها

سعید مهدوی^{۱*}، مسعود گرامی^۲، رضا پوربابا^۲

۱- تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، بخش

تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن

۲- کرج، دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی، ۳۱۵۸۷-۷۷۸۷۱

دریافت: ۱۴۰۱/۴/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱۳

چکیده

تولید کاغذ سنگی به‌عنوان محصولی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد مانند ضدآب‌بودن، مقاومت به ترکیدن و پارگی مناسب و همچنین به‌دلیل کاهش مصرف آب، انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در حین فرایند تولید در مقایسه با کاغذهای سلولوزی و کاغذی در حال گسترش است. در این مقاله، به بررسی ویژگی‌ها، فرایند تولید، کاربردها، روند توسعه و مقایسه کاغذ سنگی با کاغذ پرداخته شده است. این محصول با برخورداری از مزایایی چون جذب آب بسیار کم، چاپ‌پذیری مناسب و قیمت تمام‌شده کمتر در صنایع بسته‌بندی، چاپ و نشر و به‌ویژه برچسب‌ها، به‌عنوان محصول قابل‌رقابت با کاغذهای سلولوزی مرسوم مطرح شده است. اما به‌دلیل ساختار متفاوت آن با کاغذ، در صورت اختلاط با آن می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی در چرخه بازیافت کاغذ شود. چگالی بیشتر، استحکام کششی کمتر، تخریب‌پذیری در معرض نور خورشید و نور فرا بنفش و وجود پلی‌اتیلن در آن، از جمله معایب اصلی کاربرد کاغذ سنگی است که استفاده از این محصول را محدود می‌کند. بازیافت کاغذ سنگی و استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و افزودنی‌های مقاوم به نور فرابنفش و به‌کارگیری روش‌هایی که در آینده نزدیک بتواند معایب کاغذ سنگی را برطرف کند، در کنار ایجاد تمهیداتی برای تفکیک آن از کاغذ بازیافتی، امکان جایگزینی با برخی از محصولات کاغذی با آن را بیشتر فراهم می‌سازد. شناخت کاربردهای مناسب این محصول جدید در ایران و بازارهای هدف، با توجه به قیمت مناسب مواد اولیه آن در کشور، دسترس‌پذیری و ویژگی‌های منحصربه‌فرد این محصول، ضروری به‌نظر می‌رسد. توجیه‌پذیری و موفقیت در سرمایه‌گذاری‌های جدید تولید کاغذ سنگی از نظر اقتصادی، فنی، بازاریابی و محیط زیست مرهون این شناخت است که از خطر هدررفت سرمایه‌های کشور و بروز مشکلاتی در صنعت بازیافت کاغذ می‌کاهد و حتی زمینه‌های صادرات آن را فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی

کاغذ سنگی،
کلسیم کرنات،
پلی‌اتیلن پرچگالی،
خواص کاربردی،
محصولات

مقدمه

فرایند تولید کاغذ که امروزه در سراسر جهان به کار گرفته می‌شود، فرایندی است که چالش‌های زیادی را از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی برای کشورهای تولیدکننده کاغذ به وجود آورده است. این صنایع با بهره‌برداری از منابع جنگلی و لیگنوسلولوزی، پدیده بیابان‌زایی را افزایش می‌دهند که به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه گاز کربن دی‌اکسید در محیط منجر می‌شود. به دنبال بهره‌برداری از این منابع، برای تبدیل این مواد به خمیر کاغذ و همچنین فرایند رنگ‌بری که به‌طور عمده با مصرف آب زیاد و مواد شیمیایی همراه است، آلودگی زیست‌محیطی ناشی از پساب، مواد جامد و انتشار گازهای گلخانه‌ای کارخانه‌ای دوچندان می‌شود. بنابراین، تولید کاغذ با کیفیت با کمترین هزینه و مشکلات زیست‌محیطی بسیار مهم است. بدین منظور، استفاده از پرکننده‌ها با هدف کاهش مصرف الیاف سلولوزی در راستای کاهش قطع درختان، هزینه تمام‌شده از طریق مصرف مواد معدنی به جای الیاف سلولوزی و کاهش انرژی مصرف‌شده به‌واسطه کم‌شدن مصرف آب و برق در حال گسترش است.

پرکننده‌ها با بهبود خواص نوری، شکل‌گیری کاغذ و کیفیت چاپ، پایداری ابعادی، بهبود کیفیت نوشتاری و جنبه‌های زیست‌محیطی، کمک شایانی به کیفیت کاغذ تولیدی از الیاف سلولوزی می‌کنند. هرچند استفاده از پرکننده‌ها به دلیل تداخل در پیوند بین الیاف، آثار منفی بر استحکام‌های مکانیکی، ایجاد سایش (روی توری آب‌گیری، تیغه‌ها و سطوح ادوات دستگاه چاپ)، اختلال در آب‌گیری (افزایش مقدار استفاده از کمک‌نگهدارنده)، افزایش اختلاف دو سطح کاغذ، کاهش سفتی، افزایش تمایل به غبارزایی (dusting)، افزایش مقدار رسوب روی دستگاه کاغذ و همچنین پیچیده‌تر شدن گردش چرخه آب سفید در کارخانه می‌شود. با این حال، صنایع کاغذسازی از این پرکننده‌ها به‌عنوان افزودنی، عمدتاً در کاغذهای چاپ و تحریر، استفاده می‌کنند. از جمله مهم‌ترین پرکننده‌های به‌کاررفته در صنایع کاغذسازی می‌توان به کائولن، تالک، کلسیم کربنات و تیتانیم دی‌اکسید اشاره کرد [۱، ۲]. استفاده از کلسیم کربنات به‌عنوان پرکننده و رنگ‌دانه پوششی در صنایع کاغذسازی به دو شکل کلسیم کربنات رسوبی (PCC) و آسیابی (GCC) بسیار رایج است. با این حال، گسترش استفاده از این ماده در شکل و اندازه متفاوت به‌عنوان پرکننده و رنگ‌دانه در صنعت کاغذسازی به تولید محصول جدیدی به نام کاغذ سنگی یا کاغذ معدنی منجر شده است.

در اواخر قرن بیستم میلادی، صنعت کاغذسازی کاغذهای

Teslin® و Polyart® را برای اهداف خاصی با ترکیب پلیمرها، افزودنی‌ها و رنگ‌دانه‌ها طراحی کرد. این کاغذهای سنتزی (شیمیایی) در مقایسه با کاغذهای سلولوزی برای کاربردهای خاص از جمله اسکناس و برچسب‌ها مناسب‌تر هستند. زیرا در این کاربردها، خواصی چون ضدآب‌بودن، مقاومت به چربی و سازگاری با بطری‌های پلاستیکی لازم است. امروزه، این کاغذها به‌طور عمده از پلی‌پروپیلن، پلی‌استر و پلی‌استیرن تولید می‌شوند. در سال ۱۹۹۸ میلادی، شرکت تایوانی Lung Meng Tech Co. (TLM) اولین کاغذ سنگی تجاری را تولید کرد [۳، ۴]. دلیل نام‌گذاری این محصول با کاغذ سنگی، مشابهت شکلی به کاغذ سلولوزی و استفاده از سنگ آهک به‌عنوان ماده اولیه برای تولید آن بود. این کاغذ تولیدی، از کاغذ سنگی پوشش‌یافته به‌کاررفته روی کاغذهای سلولوزی متمایز بود که هنرمندان در اوایل قرن نوزدهم به‌منظور جایگزینی کلیشه‌های لیتوگرافی استفاده می‌کردند. کاغذ سنگی با هدف سازگاری زیست‌محیطی، کاهش ردپای کربن، تولید بدون آب و قطع درخت، بازیافت‌پذیری، تجزیه‌پذیری و به‌حداقل‌رسانی دفن پسماند آن در محیط زیست، می‌تواند جایگزین مناسبی برای برخی از کاربردهای رایج کاغذهای سلولوزی باشد. تا به امروز، کاغذ سنگی تحت نام‌های تجاری مختلف از جمله Repap®، Karst Stone Paper™ و TerraSkin™، Parax™، RockStock™ در بازارهای بین‌المللی تولید و مصرف شده است [۵].

در سال ۱۳۹۷ هجری شمسی، دهقانی فیروزآبادی و همکاران ویژگی‌های مکانیکی و سدگری کاغذ سنگی و کاغذ گلاسه را مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند، به‌علت محدودیت منابع چوبی در برخی کشورها از جمله ایران و نیز کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاغذ سنگی با دارا بودن مزیت‌هایی از قبیل ضدآب‌بودن، مقاومت به پارگی مناسب و کاهش مصرف انرژی و آب برای تولید محصولات بسته‌بندی می‌تواند بسیار مناسب باشد [۶]. CHU و همکاران (۲۰۱۹) ساختار کاغذ سنگی را با استفاده از فناوری‌های ATR-FTIR و SEM-EDS در شرایط معمولی و پیرش با نور مرئی، نور فرابنفش و گرمایی همراه با رطوبت نسبی از نظر تخریب شیمیایی و فیزیکی در مقایسه با کاغذ بررسی کردند [۵]. نتایج آن‌ها نشان داد، کاغذ سنگی به نور فرابنفش و مرئی حساس است و تخریب آن از طریق نوراکسایش به تغییر رنگ، شکنندگی، تاب‌خوردگی و تکه‌تکه شدن آن منجر می‌شود [۵].

Indriati و همکاران (۲۰۲۰) انواع کاغذ سنگی، روش‌های تولید و میزان مصرف آب و انرژی را مطالعه و آن‌ها را با کاغذهای رایج مقایسه کردند. این مطالعه نشان داد، تولید کاغذ سنگی از نظر

تا $1/6 \text{ g/cm}^3$ بوده که معادل یا بیشتر از کاغذهای سلولوزی رایج هستند. بافت این کاغذ نیز شبیه به پوست تخم مرغ آب پز شده است [5,7].

مراحل تولید کاغذ سنگی تک لایه در شکل ۲ نمایش داده شده است. پس از طی مراحل مختلف ترکیب مواد، همه مواد به شکل دانه به دستگاه اکسترودر ارسال می شوند تا مواد به حالت مذاب درآیند. دمای اکسترودر در محدوده بیش از 150°C تا کمتر از 220°C تنظیم می شود. روش تشکیل فیلم کاغذ با استفاده از فرایند فیلم سازی دمشی انجام می شود. گرانول های ذوب شده با دو ماریچ حلزونی چرخان در اکسترودر به سمت قالب شکل گیری دارای ورودی O شکل هدایت می شود. سپس از طریق یک لوله توخالی به صورت یک فیلم قالب گیری می شود. این لوله، دمایی از 150°C تا 220°C دارد و با باد خنک ایجاد شده با خنک کن دمای آن به حدود 150°C تا 220°C می رسد. سپس، لوله با هوای تحت فشار باد می شود و فیلم ساخته شده با غلتک هدایت کننده کشیده می شود. هدف از تورم و کشیدن، کشش همزمان فیلم در دو جهت طولی و عرضی است که به ایجاد مقاومت دوجتهی در کاغذ ساخته شده منجر می شود. پس از این مرحله، فیلم به بخش تاکن کشیده و به صورت متقارن تا زده می شود. سپس، با استفاده از دستگاه برش به صورت دو کاغذ بریده می شود.

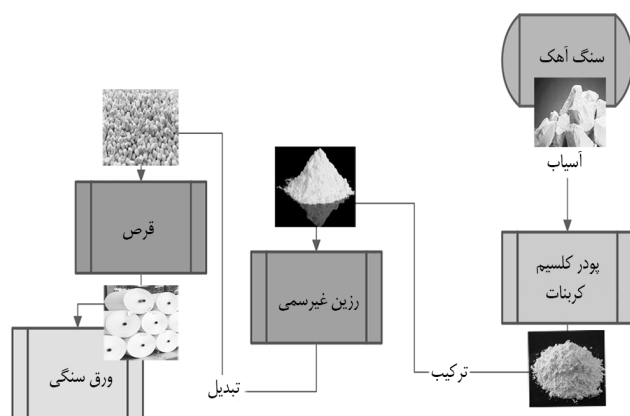
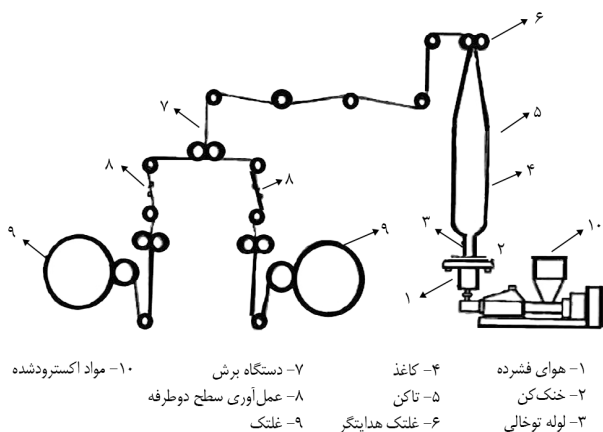
دو کاغذ تولید شده به سمت بخش پوشش دهی سطحی دوطرفه هدایت می شوند. سرعت چرخش غلتک هدایت کننده، مقدار مواد اکسترودر شده و ضخامت مورد نیاز فیلم به طور دقیق کنترل می شود. این فیلم در فاصله 20 cm تا 70 cm پس از ورودی قالب شکل گیری، حدود 3 تا 8 برابر متورم می شود. طی این تورم، چگالی فیلم کاغذ از 2 g/cm^3 (چگالی ماده اولیه) به $0/5 \text{ g/cm}^3$ کاهش می یابد. این کاهش چگالی باعث صرفه جویی 40% نسبت به

زیست محیطی، مصرف آب و انرژی کاملاً توجیه پذیر بوده و به دلیل انتشار کمتر گازهای گلخانه ای در حین تولید، دوست دار محیط زیست است [7]. لبه کاغذ سنگی انگشت را همانند کاغذهای رایج دچار جراحی نمی کند. این کاغذ به پارگی مقاوم بوده و از پایداری رنگ و پایداری نسبت به کپک زدگی بسیار زیادی برخوردار است. همچنین، قابلیت نوشتن روی آن در شرایط محیطی تر نیز وجود دارد [8].

ترکیب و ساخت کاغذ سنگی

برای نخستین بار چینی ها در ۲ هزار سال پیش، فناوری تولید کاغذ را کشف کردند. در اواخر قرن بیستم نیز چین بار دیگر محصول جدیدی را معرفی کرد که رقیب کاغذ سلولوزی رایج بود. اولین کارخانه تولید کاغذ سنگی جهان در منطقه Jiu Hua چین با استفاده از سنگ آهک آغاز به کار کرد. در این کارخانه، سنگ آهک به کاررفته پس از خرد و آسیاب کردن و تبدیل به اندازه ذرات مدنظر با پلی اتیلن پرچگالی مخلوط شده و به کاغذ سنگی تبدیل می شود. شکل ۱ مراحل تولید کاغذ سنگی را نشان می دهد.

برخلاف کاغذهای سلولوزی جزء اصلی کاغذ سنگی، کلسیم کربنات آسیابی (GCC) است که منبع آن سنگ آهک و گچ به دست آمده از معادن است. پلی اتیلن پرچگالی بکر یا بازیافتی و پوشش دهنده سطح به ترتیب برای پیونددهی مواد و افزایش قابلیت چاپ پذیری به کاغذ سنگی افزوده می شود. در نتیجه، محصول تولید شده دارای قابلیت ضد آب و پایداری فیزیکی است. معمولاً 60% تا 90% کاغذ سنگی از کلسیم کربنات و 10% تا 40% از پلی اتیلن پرچگالی تشکیل شده است. با این حال، مقدار کمی رنگ دانه و جوهر چاپ نیز بسته به نوع محصول و کارخانه تولیدکننده در این نوع کاغذها وجود دارد [7]. دامنه چگالی کاغذ سنگی از $0/5 \text{ g/cm}^3$



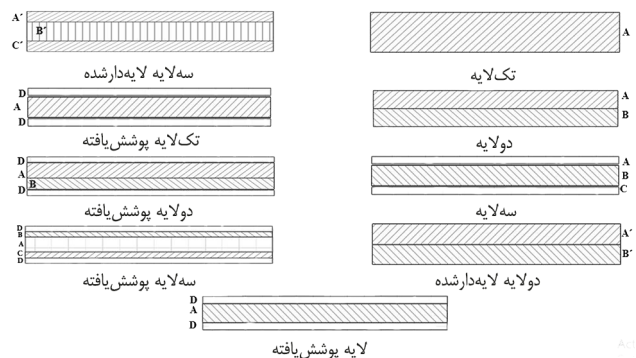
شکل ۲- مراحل تولید کاغذ سنگی تک لایه [7].

شکل ۱- مراحل تولید کاغذ سنگی [8].

ساخته می‌شود. ترکیب کاغذهای سنگی دولایه و سه‌لایه نیز تقریباً شبیه به کاغذ تک‌لایه است. تنها تفاوت آن‌ها با کاغذ تک‌لایه، به طراحی قالب دستگاه شکل‌گیری مربوط است. ورودی قالب دستگاه شکل‌گیری کاغذ دولایه و سه‌لایه با مسیرهای ورودی دوگانه و سه‌گانه جایگزین شده است. البته ترکیب لایه‌ها بسته به نوع کاغذ مورد نیاز می‌تواند متفاوت باشد. همه این نوع کاغذها برای بهبود چاپ‌پذیری می‌توانند پوشش‌دهی نیز بشوند.

به‌طور کلی، کاغذ سنگی به دو نوع S و R دسته‌بندی می‌شود. S از کلمه پایدار و R از کلمه بازیافتی گرفته شده است. این دسته‌بندی براساس مواد اولیه و نیز نوع کاربرد کاغذ سنگی است. هر دو نوع کاغذ سنگی S و R به انواع زیرمجموعه‌های گرمایی، فیلم و مقوا دسته‌بندی می‌شوند. جدول ۱، تفاوت‌های این دو نوع کاغذ را نشان می‌دهد. این دسته‌بندی براساس محصولات تولیدشده در کارخانه تایوانی Lung Meng، اولین کارخانه تولیدکننده کاغذ سنگی است. این کاغذها دارای سطحی صاف‌تر از کاغذهای رایج هستند که با چاپگرهای نوع جوهرافشان و دستگاه‌های چاپ افست، لترپرس، گراور و فلکسوگرافی سازگار هستند. اما برای چاپگرهای لیزری و دستگاه‌های فتوکپی به‌دلیل اعمال دمای بیش از ۱۳۰ °C مناسب نیستند. تغییر شکل از دمای ۶۵ °C به بالا در این کاغذها شروع می‌شود.

این نوع کاغذها برخلاف کاغذ دارای بار الکتریکی ساکن نیستند، pH آن‌ها خنثی بوده و مقاوم به نفوذ آب و روغن هستند. ارزیابی چرخه حیات (life cycle assessment, LCA) کاغذ سنگی بسته به نوع استفاده و شرایط محیطی از ۶ تا ۱۸ ماه متغیر است. نور خورشید باعث می‌شود تا کاغذ سنگی شکننده شده و ترک‌هایی



شکل ۳- انواع کاغذ سنگی یک‌لایه و چندلایه [۷].

چگالی کاغذ رایج (0.7 g/cm^3 تا 0.9 g/cm^3) می‌شود. ضخامت، پهنا و چگالی کاغذ سنگی تولیدی می‌تواند به ترتیب از $30 \mu\text{m}$ تا $150 \mu\text{m}$ ، 0.2 m تا $3/2 \text{ m}$ و 0.4 g/cm^3 تا 1 g/cm^3 متغیر باشد.

انواع کاغذ سنگی

از زمان تولید کاغذ سنگی در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی تا به امروز، فناوری تولید این محصول در حال توسعه است. این توسعه هم در بخش مواد اولیه و هم در بخش فناوری تولید بوده است. در بخش فناوری، این محصول به‌صورت تک‌لایه و چندلایه تولید می‌شود [۸]. شکل ۳، نمایی از انواع لایه‌های ترکیبی کاغذ سنگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، ترکیب کاغذ سنگی تک‌لایه ساده‌ترین ساختار را داراست که از پودر ماده معدنی به‌عنوان جزء اصلی، پلیمر سنتزی به‌عنوان اتصال‌دهنده و مقدار کمی افزودنی به‌عنوان عوامل سازگارکننده، روان‌ساز و ضدالکتریسیته ساکن

جدول ۱- انواع کاغذ سنگی براساس کاربرد [۸،۹].

نوع	متغیر	کاربرد و مشخصات
نوع S	SP	به‌جای فیلم پلاستیک با ضخامت $80 \mu\text{m}$ تا $100 \mu\text{m}$ به‌جای کاغذ، ۷۰٪ کلسیم کربنات + ۳۰٪ پلی‌اتیلن
	ST	به‌جای مقوا با ضخامت $400 \mu\text{m}$ تا $700 \mu\text{m}$ به‌جای کاغذ، ۶۰٪ کلسیم کربنات + ۴۰٪ پلی‌اتیلن
	SPN	به‌جای کاغذ، با ضخامت $60 \mu\text{m}$ تا $100 \mu\text{m}$ به‌جای کاغذ، ۷۰٪ کلسیم کربنات + ۳۰٪ پلی‌اتیلن
نوع R	RP	به‌جای کاغذ با ضخامت $100 \mu\text{m}$ تا $200 \mu\text{m}$ به‌جای کاغذ، ۸۰٪ کلسیم کربنات + ۲۰٪ پلی‌اتیلن
	RB	به‌جای مقوا، کاغذ و فیلم با ضخامت $200 \mu\text{m}$ تا $400 \mu\text{m}$ به‌جای کاغذ، ۶۰٪ کلسیم کربنات + ۴۰٪ پلی‌اتیلن



شکل ۴- برخی از محصولات تهیه شده از کاغذ سنگی.

شبهه ترک پوست تخم مرغ روی آن ایجاد شود که در نهایت باعث پودر شدن این نوع کاغذ می شود. این رفتار از روش تخریب کاغذهای سلولوزی و نیز فیلم های پلیمری متمایز است [۳]. سناریوهای آینده نشان می دهند، چرخه حیات کاغذ سنگی می تواند با تمرکز بر کاهش برق مصرفی از طریق بهبود بهره وری انرژی یا استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و نیز HDPE بازیافتی بهبود یابد [۱۰].

کاربرد کاغذ سنگی

از جمله کاربردهای کاغذ سنگی می توان به دفترچه یادداشت، کتاب، کاغذ دیواری، پاکت و پوشه، ساک دستی، کاغذهای پوستر و بنر، برچسب ها و ظروف مواد غذایی، بلیط، کارت شناسایی و غیره اشاره کرد [۳]. در حال حاضر، عمده کاربرد کاغذ سنگی برای تولید برچسب است که ۵۰٪ بازار ۷۰۰ میلیون دلاری این محصول را شامل می شود. کاغذ سنگی به دلیل صافی مناسب تر سطح و جذب آب کمتر نسبت به کاغذهای چاپ، تقریباً برای همه بسته بندی های مواد غذایی مناسب است [۱۱]. بسیاری از تولیدکنندگان کاغذ سنگی، فهرستی از کاربردهای تجاری این نوع کاغذ را ارائه داده اند (شکل ۴).

ارزیابی زیست محیطی

براساس آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) در

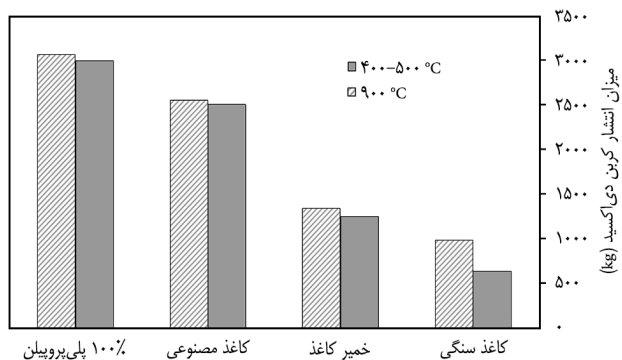
جدول ۲- ترکیب کاغذ سنگی مجموعه R [۸].

نوع محصول	کاغذ (RP)	فیلم (SP)	مقوای (RB)	کاغذ گرمایی (ST)	حبه (R (%))
کاغذ سنگی بکر	۲۰	۳۰	۸۰	۸۰	۱۰۰
کاغذ سنگی بازیافتی	۸۰	۷۰	۲۰	۲۰	۰

سال ۲۰۱۶ میلادی در حدود ۴۰۹ میلیون تن کاغذ و مقوا در جهان تولید شده که از این میزان، حدود ۵۶٪ از طریق بازیافت کاغذ تولید شده است [۱۲]. این میزان تولید کاغذ و مقوا در جهان حدود ۵٪ انرژی مصرفی در جهان را شامل می شود که صنعت کاغذسازی را در رده چهارم مصرف کننده انرژی در جهان قرار می دهد. همچنین، مقدار مصرف آب برای تولید این میزان کاغذ $3/35 \times 10^9 m^3$ آب تازه است که در حدود ۸٪ میزان مصرف آب تازه صنعتی در جهان است. برای تولید ۱ t کاغذ چاپ و تحریر از الیاف بکر حدود ۲۰ درخت، $50 m^3$ ، $200 kg$ تا $300 kg$ پرکننده و $1/5 kW.h$ انرژی مصرف می شود [۱۳]. این در حالی است که برای تولید ۱ t کاغذ سنگی، هیچ درختی قطع نمی شود، مقدار مصرف آب در حد صفر بوده و میزان مصرف انرژی آن $18000 Btu$ بوده که نصف میزان مصرف انرژی تولید کاغذ سلولوزی است [۷]. نکته مهم درباره تولید کاغذ سنگی، هزینه سرمایه گذاری آن است. هزینه سرمایه گذاری برای تجهیزات تولید کاغذ سنگی حداقل حدود ۴۰٪ کمتر از هزینه سرمایه گذاری برای ساخت کارخانه کاغذسازی از منابع لیگنوسلولوزی با ظرفیت یکسان است. دلایل اصلی آن، عدم نیاز فرایند تولید آن به آب است. این موضوع، نیاز به تأسیس تجهیزات مورد نیاز بازیابی آب و پساب در کارخانه تولید کاغذ سنگی را نیز منتفی می کند. افزون بر این، هزینه تولید کلسیم کربنات آسیابی برای تولید ۱ t کاغذ سنگی به طور میانگین حدود ۲۰۰ دلار (در ایران حدود ۳۵ دلار) بوده که بسیار کمتر از میانگین هزینه تولید خمیر کاغذ بکر سلولوزی (حدود ۷۰۰ دلار) است [۱۴]. هزینه کمتر خرید و نصب ماشین آلات تولید موجب کاهش هزینه های سرمایه گذاری می شود [۷].

کاغذ سنگی را می توان برای تولید مجدد کاغذ سنگی، بازیافت و/یا به پلاستیک بازیافتی تبدیل کرد [۷]. نسبت های تولید کاغذ سنگی از نوع بازیافتی و بکر برای تولید محصولات مختلف در جدول ۲ برای مقایسه ارائه شده است [۸].

بازیافت دوباره کاغذ سنگی به عنوان مجموعه R (مجموعه بازیافتی) که از دسته محصولات زیست محیطی است، می تواند از ۲۰٪ تا ۱۰۰٪



شکل ۵- میزان انتشار کربن دی‌اکسید در اثر سوزاندن چهار فرآورده مختلف [۷].

دی‌اکسید برای تولید ۱ t کاغذ از الیاف سلولوزی بکر ۱۵۰۰ kg، خمیر کاغذ بازیافتی ۱۴۴۱ kg و برای تولید ۱ t کاغذ سنگی ۶۱۳ kg است. یکی دیگر از نکات حائز اهمیت در تولید کاغذ سنگی، عدم لزوم استفاده از مواد رنگ‌بر برای بهبود خواص نوری آن است. این نکته از این نظر اهمیت دارد که استفاده از مواد رنگ‌بر در تولید کاغذ سلولوزی هم به افزایش هزینه تولید منجر می‌شود و هم پساب خروجی از کارخانه دارای بار آلودگی بسیار خواهد بود. ویژگی‌های منحصر به فرد کاغذ سنگی به محصول این قابلیت را می‌دهد که در مناطق دچار کمبود منابع لیگنوسلولوزی، کمبود آب و همچنین تأمین ناپایدار انرژی برای تولید صنعتی، جایگزین بالقوه‌ای برای کاغذهای سلولوزی یا سنتزی باشد [۷، ۱۲، ۱۳].

توسعه کاغذ سنگی و چالش‌ها

به‌علت ویژگی‌های خاص کاغذ سنگی از جمله دسترس‌پذیری مواد اولیه، قیمت کمتر نسبت به کاغذ سلولوزی، ضدآب بودن و قابلیت استفاده از آن در بخش‌های مختلف از جمله بسته‌بندی، چاپ و تحریر و افزایش تقاضا برای استفاده از این نوع محصول،

برای تولید کاغذ سنگی بازیافتی به‌شکل مخلوط با ۸۰٪ تا ۱۰۰٪ کاغذ سنگی بکر استفاده شود [۷]. بازیافت کاغذ سنگی را می‌توان در ۳ گروه طبقه‌بندی کرد: پس از تولید یا پس‌صنعتی (post-industrial)، پس از مصرف و پایان عمر کاغذ سنگی [۱۵]. سامانه بازیافت کاغذ پس‌صنعتی، ضایعات کارخانه‌های کاغذ سنگی را به‌شکل دانه تبدیل می‌کند. سپس با مواد اولیه تولید کاغذ سنگی بکر مخلوط کرده و فرآورده‌های مجموعه R را تولید می‌کند. سپس، رزین پلی‌اتیلن به‌دست‌آمده برای تبدیل به محصولات مجموعه R استفاده می‌شود.

در بازیافت کاغذهای پس از مصرف، کاغذ سنگی بازیافتی به‌همراه سایر پلاستیک‌های بازیافتی با ترکیب مشخصی مخلوط شده و گرم می‌شوند. سپس، رزین پلی‌اتیلن تولیدی به گرانول تبدیل شده و برای ساخت سایر محصولات بازیافتی پلاستیکی استفاده می‌شود. کاغذهای سنگی که به پایان عمر رسیده‌اند در کوره سوزانده می‌شوند. دمای احتراق کوره بر نوع خاکستر باقی‌مانده اثرگذار است. اگر دمای احتراق کوره بسیار زیاد باشد، کلسیم اکسید تشکیل می‌شود. در حالی که در دماهای کم، خاکستر باقی‌مانده کلسیم کربنات است. کلسیم اکسید و کربنات را می‌توان به‌عنوان مواد اولیه در تولید سایر فرآورده‌ها استفاده کرد. کلسیم اکسید معمولاً به‌عنوان کود یا مواد خام در سیمان به‌کار می‌رود، در حالی که کلسیم کربنات به‌عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شود. سوزاندن کاغذ سنگی در کوره باعث انتشار کربن دی‌اکسید می‌شود که به‌طور درخور توجهی کمتر از ۱۰۰٪ پلی پروپیلن و/یا کاغذ سنتزی بوده و حتی کمتر از کاغذ معمولی است (شکل ۵) [۷]. میزان مصرف انرژی تولید کاغذ سنگی در حدود ۵۰٪ کمتر از کاغذ سلولوزی بکر و میزان مصرف آب برای تولید کاغذ سنگی بسیار کم است (جدول ۳). همچنین، عدم قطع ۲۰ درخت که برای تولید ۱ t خمیر کاغذ مورد نیاز است، معادل حفظ منبع تولید اکسیژن برای ۴۰ نفر است. برآوردها نشان می‌دهد، میزان انتشار گاز کربن

جدول ۳- مقدار مصرف آب، انرژی و تولید پسماند برای تولید ۱ t کاغذ سلولوزی بکر، بازیافتی و کاغذ سنگی [۷].

نوع محصول	تعداد درختان (اصله)	پسماند (t)	آب مصرفی (m ³)	پرکننده (% ماده معدنی)	افزودنی (%)	مصرف انرژی (kW.h)
خمیر کاغذ بکر	۱۰	۰	۶۰	۲۰-۳۰	۰	۱۰/۵
خمیر کاغذ بازیافتی	۴	۲	۳۴	۲۰-۳۰	۰	۶/۴۴
کاغذ سنگی	۰	۰	۰	۸۰	۲۰	۵/۲۷

پتانسیل رشد تولید و مصرف آن رو به توسعه است. همچنین، تولید این محصول در کشورهای دچار محدودیت منابع چوبی، فرصت مناسبی را برای تأمین بخشی از نیازها از طریق تولید و استفاده از آن در صنایع مختلف ایجاد می‌کند. در این میان، کشورهای چین و هند به دلیل محدودیت‌های منابع جنگلی و افزایش میزان مصرف کاغذهای بسته‌بندی و چاپ و تحریر مورد نیاز خود و کشورهای آمریکای شمالی و اتحادیه اروپا به دلایل زیست‌محیطی، از قابلیت زیادی برای سرمایه‌گذاری در تولید کاغذ سنگی برخوردارند. ارزش بازار جهانی این محصول در سال ۲۰۱۵، ۶۹۳ میلیون دلار بود که پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۲ میلادی به حدود ۲۲ میلیارد دلار برسد [۱۱].

از زمان تولید کاغذ سنگی در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی تاکنون، تلاش‌های زیادی برای بهبود و توسعه آن انجام شده است. نوآوری و نتایج پژوهش‌های انجام‌شده به‌طور عمده به‌صورت اختراع در اکثر کشورها ثبت شده است. این پژوهش‌ها درباره مواد اولیه و فناوری تولید بوده است. هدف از انجام آن‌ها، کاهش هزینه تولید، بهبود کارایی منابع استفاده‌شده، بهبود ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی و عملکرد زیست‌محیطی فرایند تولید کاغذ سنگی بوده است.

در پژوهشی به حداقل‌سازی هزینه در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کاغذسنگی پرداخته شد. طراحی و توسعه زنجیره تأمین کاغذ سنگی برای کشور ایران که دارای ذخایر مناسب سنگ آهک است و در تولید آن به مصرف آب و قطع درختان نیازی ندارد، ضروری است. چرا که ضمن توسعه صنعتی، اشتغال و رفع نیازهای داخل کشور به افزایش صادرات و رشد اقتصادی کشور منجر می‌شود [۱۶]. سایر مواد غیرآلی که می‌توانند جایگزین کلسیم کربنات شوند، عبارتند از: پودر سیلیس سفید خالص، کلسیم سولفات، سدیم سولفات، باریم سولفات، مونت‌موریلونیت، ولاستونیت، کائولن، پودر میکا، اکسیدهای فلزی (منیزیم اکسید، کلسیم اکسید، آلومینیم اکسید، روی اکسید، تیتانیم اکسید و غیره)، هیدروکسیدهای فلزی (آلومینیم هیدروکسید، منیزیم هیدروکسید و غیره)، مخلوط تاربلورهای سیلیکون، پودر دولومیت، کلسیم سیترات، الیاف شیشه، پودر گچ، پودر تالک، بتونیت و رس. مواد معدنی به‌کاررفته می‌توانند به‌طور خالص یا ناخالص، تکلیس‌شده یا نشده باشند. همچنین، پژوهش‌هایی درباره جایگزینی سایر رزین‌ها با پلی‌اتیلن پرچگالی انجام شده است. هرچند پلی‌اتیلن پرچگالی بازیافت‌پذیر است، اما در شرایط زیستی تخریب نمی‌شود. از این رو، جایگزینی با یک ماده جدید می‌تواند از نظر زیست‌محیطی و همچنین کاهش هزینه تولید نیز مهم باشد. برخی از پلیمرهای

جایگزین عبارت از پلی‌اتیلن پرچگالی، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌لاکتیک اسید هستند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، کاغذ سنگی در اثر نور تخریب می‌شود، اما زیست‌تخریب‌پذیر نیست. برای رفع این مشکل و زیست‌تخریب‌پذیر شدن آن، استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر توصیه شده است. مثلاً استفاده از پلی‌لاکتیک اسید ساخته‌شده از نشاسته، می‌تواند جایگزین پلی‌اتیلن پرچگالی برای ساخت کاغذ سنگی زیست‌تخریب‌پذیر باشد. بهبود خواص کاغذ سنگی از قبیل مقاومت کششی، مقاومت پارگی در جهت طولی و عرضی و قابلیت تاشدگی نیز از جمله اهداف این پژوهش‌هاست [۱۷]. چالش اصلی این صنعت، قوانین زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت معادن برای استخراج کلسیم کربنات به‌عنوان ماده اصلی و همچنین افزایش تقاضا برای پلی‌اتیلن پرچگالی به‌عنوان جزء مهم تولید کاغذ سنگی در بخش‌های مختلف از جمله تولید لوله و مخازن سوخت پلی‌اتیلنی، بطری‌ها و نیز دسترس‌پذیری به این ماده به‌علت وابستگی به تولید نفت در جهان است [۱۸، ۱۱].

نتیجه‌گیری

انتخاب کاربرد محصول، میزان سرمایه‌گذاری، توجه به مسائل زیست‌محیطی، ویژگی‌های مقاومتی و نوری و بازیافت از جمله مهم‌ترین متغیرهای تولید و مصرف کاغذ سنگی در برابر کاغذ است. به‌دلیل محدودیت منابع چوبی در برخی از کشورها از جمله ایران و همچنین مصرف ناچیز آب در تولید کاغذ سنگی، می‌توان این محصول را در بخش‌هایی نظیر بسته‌بندی، واحدهای چاپ و نشر و تولید برچسب جایگزین کاغذ کرد. محدودیت‌های اصلی استفاده از کاغذ سنگی عبارت از چگالی بیشتر نسبت به کاغذ سلولوزی، زمان تخریب نسبتاً کم در اثر قرارگیری در معرض نور آفتاب، استفاده از پلیمرهای پایه‌نفتی و امکان آسیب‌رسانی در حین چاپ به دستگاه چاپگر به‌دلیل سایش بخش معدنی کاغذ سنگی است. برطرف کردن این معایب، امکان استفاده از کاغذ سنگی را برای کاربردهای بیشتر فراهم می‌کند. برای مثال، استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مثل پلی‌لاکتیک اسید، نشاسته و سایر پلیمرهای زیستی با چگالی کمتر در تولید کاغذ سنگی و نیز استفاده از عوامل ضدنور تخریب یا پوشش‌دار کردن سطح کاغذ، از جمله روش‌های رفع این معایب هستند. همچنین، محدودیت فعالیت معادن استخراج کلسیم کربنات در جهان و رقابت در مصرف پلی‌اتیلن پرچگالی در سایر بخش‌ها از جمله محدودیت‌های اصلی تولید کاغذ سنگی

شناخت کاربردهای این محصول جدید و بازارهای هدف با توجه به ویژگی‌های مختلف این محصول (ضخامت، چگالی، بازیافت و جنبه‌های زیست‌محیطی) در ایران ضروری به نظر می‌رسد. این مسئله توجه‌پذیری سرمایه‌گذاری‌های جدید در این باره را قطعاً از نظر اقتصادی، فنی، بازاریابی و محیط زیست تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.

مراجع

- Gaudreault R., Di Cesare N., Van De Ven T., and Weitz D., Structure and Strength of Floccs of Precipitated Calcium Carbonate Induced by Various Polymers Used in Papermaking, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **54**, 6234-6246, 2015.
- Tao H., He Y., and Zhao X., Preparation and Characterization of Calcium Carbonate-Titanium Dioxide Core-Shell (CaCO₃@ TiO₂) Nanoparticles and Application in the Papermaking Industry, *Powder Tech.*, **283**, 308-314, 2015.
- Affeldt C., Leung A., and Yang K., *Life Cycle Assessment of Stone Paper, Polypropylene Film, And Coated Paper For Use As Product Labels*, MSc Thesis, USA, University of Michigan, 2016.
- Hsieh Y.C., Lee K.K., and Kao C.C., Offset Printing Quality Characteristics of Rich Mineral Paper, *Appl. Mech. Mater.*, **262**, 320-323, 2013.
- Chu C. and Nel P., Characterisation and Deterioration of Mineral Papers, *AICCM Bull.*, **40**, 37-49, 2019.
- Dehghani Firoozabadi M. and Kolaei Moakhar F., Evaluation and Comparison of Mechanical and Barrier Properties of Stone Paper and Gloss Paper, *Iran. J. Wood. Paper. Ind. (Persian)*, **10**, 373-384, 2019.
- Indriati L., Nugraha M.A., and Perng Y.S., Stone Paper, an Eco-Friendly and Free-Tree Papers, the 8th International Conference of the Indonesian Chemical Society (ICICS), *AIP Conf. Proc.*, **2243**, 030010-1-030010-12, 2019.
- Taiwan Lung Meng Advanced Composite Materials Co., L., http://www.taiwanlm.Com/Page002_Eng.Php?Ab_ID=19. Available in 2020.
- 8 Unique Characteristics of Stone Paper, <https://paperontherocks.com/2016/12/02/8-Uniquecharacteristics-Stone-Paper/>. Available in 2016.
- Affeldt C., Leung A., and Yang K., *Life Cycle Assessment of Stone Paper, Polypropylene Film, and Coated Paper for Use as Product Labels*, MSc Thesis, University of Michigan, April, 2016.
- Stone Paper Market Size, Share and Trends Analysis Report by Application (Packaging Papers, Labeling Papers, Self-Adhesive Papers), by Region, and Segment Forecasts, 2020 - 2028. <https://www.grandviewresearch.com/Industry-Analysis/>, 2019. Available in 2019.
- Favero A., Thomas V.M., and Luetgen C.O., Life Cycle Analyses of Alternative Fibers for Paper, *J. Adv. Manuf. Proc.*, **1**, 1-10, 2019.
- Man Y., Han Y., Li J., and Hong M., Review of Energy Consumption Research for Papermaking Industry Based on Life Cycle Analysis, *Chinese J. Chem. Eng.*, **27**, 1543-1553, 2019.
- Stone Paper Presentation, <http://www.stoneagepack.com/Wp-Content/Uploads/2016/11/Stone-Paper-Presentation.Pdf> Available in 2020.
- Making Paper From Stone – Innovative Green Production Technology From China, <http://www.ideassonline.org/Public/Pdf/China-Ecologicalpaper-ENG.Pdf>. Available in 2021.
- Hosseini Dehshiri S.J., Amiri M., Olfat L., and Pishvae M.S., Stone Paper Closed-Loop Supply Chain Network Design Using Robust Stochastic, Possibilistic and Flexible Chance-Constrained Programming, *Indu. Manage. Perspect.*, **12**, 45-81, 2022.
- Clarke Hanan J., Composite Film Containing Polyethylene Terephthalate and Preparing Method and the Uses Thereof, *CNS20182701*, 2012.
- Jimoh O.A., Synthesis of Precipitated Calcium Carbonate: A Review, *Carbonates Evaporites*, **33**, 331-346, 2018.