در دسترس بصورت الکترونیک@ www.jscw.icrc.ac.ir

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۸، شماره ۱، (۱۳۹۷) ۲۴-۱۵

مرکب‌زدایی کاغذهای چاپ شده به روش الکتروفتوگرافی

بهاره قنبرزاده[۱]، مریم عطایی‌فرد[۲*]، سید مسعود اعتضاد[۳]، سعید مهدوی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴.

۲- دانشیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴.

۳- استادیار، گروه پژوهشی رنگ و محیط زیست، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴.

۴-دانشیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، صندوق پستی:۱۳۴۳-۳۱۵۸۵.

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۲ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۶/۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۲۶ در دسترس به‌صورت الکترونیک: ۹۷/۰۳/۰۷

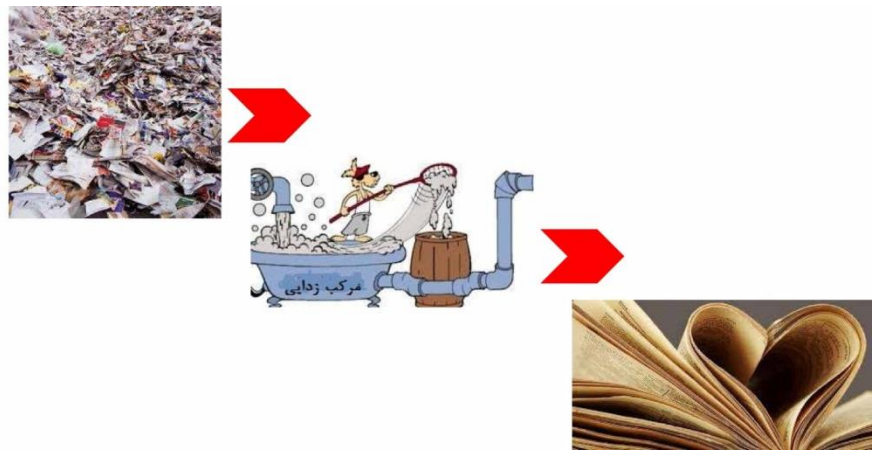
چکیده

مرکب‌زدایی کاغذهای باطله به روش‌های گوناگونی صورت می‌گیرد و تحقیقات درباره روش‌های جدیدتر نیز در حال انجام است. در چاپ به روش الکتروفتوگرافی (چاپگرهای لیزرجت و دستگاه‌های فتوکپی) به دلیل آمیخته‌شدن مرکب با بافت کاغذ در هنگام تثبیت مرکب با کمک حرارت بالا روش‌های مرکب‌زدایی سنتی بازدهی کمتری دارند و لازم است از روش‌های جدیدتر استفاده گردد. مرکب‌زدایی کاغذهای چاپ شده به روش الکتروفتوگرافی با استفاده از آنزیم‌ها، پردازش قلیایی، رادیکال‌های آزاد، پرتوفرابنفش و پردازش فراصوت صورت می‌گیرد. هدف از این مقاله مروری، توضیح این روش‌ها، مقایسه و بررسی کارایی آن‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

مرکب‌زدایی، الکتروفتوگرافی، چاپگر لیزرجت، دستگاه فتوکپی، کاغذ باطله، آنزیم.

چکیده تصویری



*نویسنده مسئول: ataeefard-m@icrc.ac.ir

Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science and Technology

Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir

Journal of Studies in Color World, Vol. 8, No. 1, (2018) 15-24

نشریه علمی ترویجی
مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

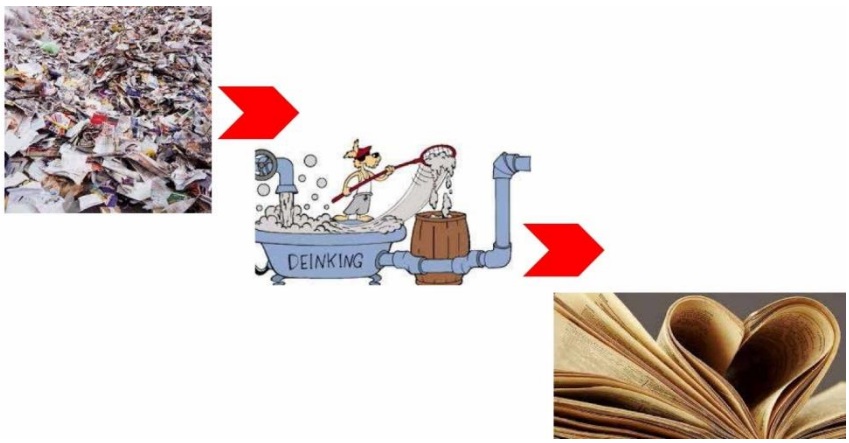
Deinking of Waste Paper Printed by Electrophotographic Method

Bahareh Ghanbarzadeh[1], Maryam AtaeeFard*[1], Masoud Etezad[2], Saeed Mahdavi[3]
1- Printing Science and Technology Department, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box:16765-654, Tehran,Iran.
2- Environmental research Department, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box:16765-654, Tehran,Iran.
3- Wood and Forest Product Division, Reasearch Institude of Forest and Rangeland, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), P. O. BOX: 31585-1343, Tehran, Iran

Abstract
Different types of pollutants contaminated waste paper and various methods are used for removing these compounds. One of the most important of these pollutants is printing ink. Deinking of waste paper is done in different ways and also the research on new methods is ongoing. Among various printing techniques, electrophotography technique (LaserJet printers and photocopiers) because of the toner mixing with paper tissue during the fixation process which is combined with high temperatures the traditional deinking methods are nor useful. Therefore, research are and are necessary to use newer. Deinking method for papers printed by electrophotography methods is done by using enzymes, alkaline process, free radicals, radiation, UV, ultrasound. The purpose of this article is to explain the methods and also their efficacy is comparable.

Keywords
Deinking, Electrophotography, Laser jet printer, Photocopy, Waste paper.

Graphical abstract



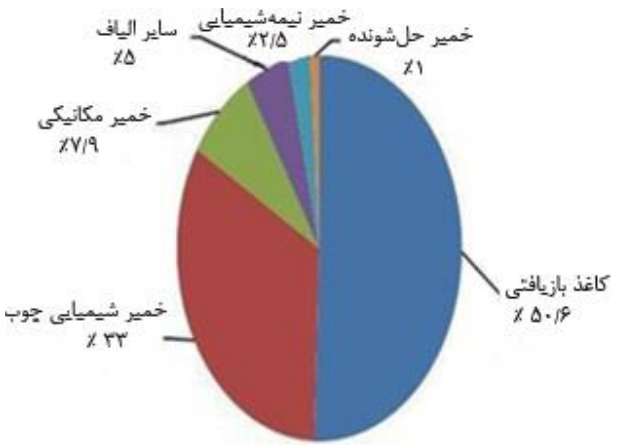
Corresponding author: ataeefard-m@icrc.ac.ir

۱- مقدمه

گردش شتابان چرخه صنعت در کشورهای مختلف از یک طرف و محدودیت منابع موجود بر روی کره خاکی از طرف دیگر سبب شده است که تامین مواد اولیه در صنایع مختلف یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها بر سر راه توسعه صنایع باشد. در سال‌های اخیر مفهوم توسعه پایدار اهمیت بسیاری را از لحاظ سیاسی و اجتماعی یافته است. یکی از جنبه‌های مهم توسعه پایدار، صنعت سبز و استفاده از مواد زیست تخریب‌پذیر و بازیافتی است که تأثیرات منفی روی محیط‌زیست و مصرف آب و انرژی را کاهش می‌دهد [۱]. صنعت چوب و کاغذ نیز از این قاعده مستثنی نبوده و این مسئله در مورد این صنعت جنبه حادتری به خود گرفته چرا که این صنعت با مشکلات گوناگونی از جمله فشارهای جهانی جهت کاهش مصرف آب ، انرژی، مواد شیمیایی و همچنین استفاده از کاغذهای بازیافتی روبرو است [۱]. همین امر موجب شده است که از مدت‌ها پیش دست اندرکاران صنعت چوب و کاغذ به چشم‌اندازهای جدیدی جهت تهیه و تامین مواد اولیه بیاندیشند.

در این راستا دو جایگزین بسیار مهم مطرح شده است که عبارتند از:۱- استفاده از الیاف لیگنوسلولزی[1] غیرچوبی همچون باگاس[2]، ساقه برنج، گندم و یا الیاف چوبی مثل الیاف درخت صنوبر، اکالیپتوس و پالونیا ۲- استفاده مجدد از کاغذهای باطله [۲]. طی سال‌های اخیر با توجه به کاهش روزافزون منابع جنگلی، بازیافت کاغذهای باطله به عنوان یکی از روش‌های تامین مواد اولیه سلولزی مناسب برای صنایع کاغذسازی به طور جدی مورد توجه قرارگرفته است. از نیمه دوم قرن بیستم در بسیاری از کشورهای دنیا به دلایل گوناگون از جمله محدودیت منابع اولیه سلولزی، مصرف روزافزون محصولات کاغذی، مشکلات زیست محیطی ناشی از برداشت جنگل‌ها و هزینه‌های زیاد مربوط به تولید کاغذ و مقوا از مواد خام سلولزی و انرژی مصرفی در فرآیند تولید کاغذ (انرژی مصرفی در بازیافت کاغذ در حدود ۲۸ تا ۶۰ درصد، کمتر از انرژی مصرفی در تولید کاغذ می‌باشد) [۳] و همچنین پیشرفت فرآیند مرکب‌زدایی ، استفاده از فناوری بازیافت را به صورت گسترده مورد توجه قرار داده است. در این زمینه تقریبا بخش قابل ملاحظه ای از کمبود مواد خام سلولزی در صنایع خمیر و کاغذ جبران شده است. نرخ بازیافت کاغذهای باطله در هر کشور به وضعیت منابع الیاف و صنایع کاغذسازی آن مربوط می‌باشد، به طوری که نرخ متوسط بازیافت کاغذ باطله در مقیاس جهانی از ۳۷ درصد به ۵۵ درصد در فاصله سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ افزایش یافته است و طبق آمار ارائه شده توسط کنفدراسیون صنعت کاغذ اروپا، نرخ بازیافت کاغذ در اروپا از ۴۰/۸ درصد در سال ۱۹۹۱ به ۷۱/۵ درصد در سال ۲۰۱۵ رسیده است [۴]. در سال۱۹۹۲ مصرف کلی خمیر و کاغذ در جهان حدود ۲۴۵/۶ میلیون تن بوده است که از این مقدار تولید تنها ۱۶۴ میلیون تن یعنی ۶۷ درصد کل تولید مربوط به تولید خمیر کاغذ بکر می‌باشد و بیشتر از ۳۳ درصد از مواد اولیه را کاغذ باطله در برداشته که در این سال مصرف کاغذ باطله به حدود ۶۴ میلیون تن رسیده است. از مقدار ۳۵۹/۳ میلیون تن خمیرکاغذ تولید شده در سال ۲۰۰۹، ۱۸۱/۶ میلیون تن آن خمیرکاغذ بازیافتی (۵۰/۶ درصد)، ۱۱۸/۷ میلیون تن خمیر شیمیایی چوب (۳۳ درصد)، ۲۸/۵ میلیون تن خمیر مکانیکی چوب (۷/۹ درصد)، ۹/۲ میلیون تن خمیر چوب نیمه شیمیایی (۲/۵ درصد)، ۳/۶ میلیون تن خمیر حل شونده (۱ درصد)، ۱۷/۸ میلیون تن خمیر الیاف دیگر (۵ درصد) تشکیل داده است[3]. شکل۱ میزان استفاده از خمیرکاغذ در سال ۲۰۰۹ در جهان را نشان می‌دهد [۵، ۶].

در ایران با توجه به مشکلات عمده‌ای که در رابطه با محدودیت سطح جنگل‌های شمال کشور و افزایش روند تخریبی آنها وجود دارد، تامین مواد اولیه مورد نیاز از این جنگل‌ها امکان‌پذیر نبوده است. لذا ضرورت دارد که راهکارهای مختلفی برای جبران این کمبود ارائه شود و در صورتی که از لحاظ فنی و اقتصادی مناسب باشند، مورد استفاده قرار گیرند. در واقع انواع مختلف کاغذهای باطله اداری، کاغذ های روزنامه و فتوکپی یک منبع رو به رشد برای بازیافت کاغذ است که مرکب‌زدایی از آنها به نوع الیاف کاغذ، مرکب و فرآیند چاپ بستگی دارد [۳]. بنابراین توجه و بررسی امکان استفاده از فرآیند بازیافت و مرکب‌زدایی کاغذهای باطله، امری بسیار ضروری است. وجود لکه‌های مرکب و کم بودن درجه روشنایی[4] در خمیرهای بازیافتی از مهم‌ترین تفاوت الیاف بازیافتی و خمیرهای بکر می‌باشد. مرکب‌زدایی[5] اصطلاحی است که برای توصیف فرآیند جداسازی و حذف مرکب‌های چاپ از الیاف جهت بهبود خواص نوری خمیر و کاغذ به کار می‌رود [۲]. مرکب‌زدایی یعنی زدودن مرکب از دوغاب الیاف با ترکیب روش‌های شیمیایی و مکانیکی که انتخاب سیستم مرکب‌زدایی به نوع کاغذ و مصرف نهایی الیاف مرکب‌زدایی شده بستگی دارد. به طورکلی مرکب‌زدایی به دو روش سنتی و آنزیمی انجام می‌شود.



شکل ۱- میزان استفاده از خمیر کاغذ در سال ۲۰۰۹[6].

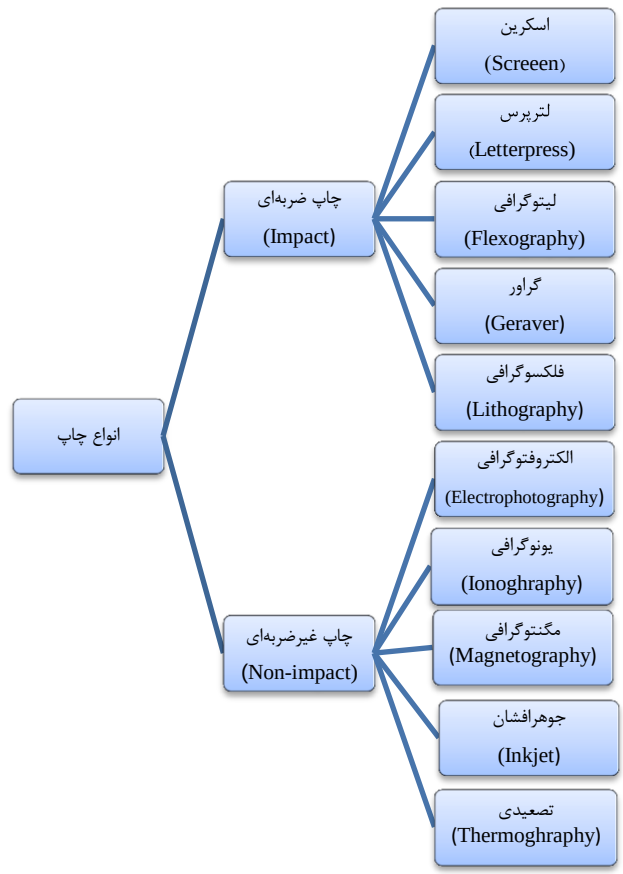
[1] Lignocellulose
[2] Bagasse

[3] آماراعلام شده توسط سازمان FAO (سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد)
[4] Brightness
[5] Deinking
[6] آماراعلام شده توسط سازمان FAO (سازمان خواربار وکشاورزی ملل متحد)

به طور خلاصه تمام روش‌ها شامل مراحل زیر است [۷]:
۱- پخت[1]: در این مرحله مرکب از الیاف جدا می‌شود.
۲-زدودن مرکب جدا شده از لیف با روش‌های شستشو، غربال‌گری، شناورسازی و غیره.

۲- روش‌های چاپ

چاپ به عنوان فرآیند انتقال جوهر بر روی کاغذ (یا بستر دیگر) ازطریق یک صفحه چاپی حامل تصویر، تعریف شده است. در طول قرن‌ها بسیاری از فناوری‌های چاپ توسعه یافته‌اند اما روش‌های چاپ را می‌توان در یک طبقه‌بندی کلی به‌صورت شکل۲ تقسیم کرد [۸، ۹].
در آغاز نیمه دوم قرن بیستم، فناوری‌های جدید چاپی بوجود آمدند که امروز به عنوان فناوری‌های چاپ غیرضربه‌ای[2] یا دیجیتال شناخته می‌شوند. با این فناوری جوهر مستقیما (بدون کلیشه و یا حامل تصویر) بر روی زیرآیند منتقل می‌شود. چاپگرهای جوهر افشان و چاپگرهایی که بر اساس تونر کار می‌کنند، در این دسته قرار می‌گیرند [۱۰]. در این چاپگرها از تونرهای گرمانرم استفاده می‌شود که شامل پلیمرهای مصنوعی پخش‌شدنی است، که به عنوان جوهر چاپ به کارمی‌روند.



شکل ۲- روش‌های عمده چاپ [۸، ۹].

[1] Pulping
[2]Non-impact printing

این جوهر در اثر حرارت بالا به صورت فیزیکی با بافت کاغذ پیوند داده و به همین دلیل درروش‌های مرکب‌زدایی سنتی، جوهر به سختی جدا شده ، فرآیند بسیار گران و بازدهی کمتری دارد و لازم است از روش‌های جدیدتر استفاده گردد [۱۱]. چاپ دیجیتال امکان چاپ سریع در تیراژ کم را فراهم آورده و امکان تغییر طرح و محتویات آن در هر برگ چاپی را در اختیار می‌گذارد. همچنین در چاپ دیجیتال صرفه جویی در نیروی انسانی و توان رو به گسترش ماشین‌های چاپ دیجیتال در بالا بردن کیفیت چاپ، پایین آمدن هزینه تمام شده چاپ هر برگ چاپی و بالارفتن شمارگان در چاپ دیجیتال به این معناست که چاپ دیجیتال در حال رقابت با چاپ سنتی و حتی پیشی گرفتن ازآن است [۱۲، ۱۳].

۲-۱- چاپ الکتروفتوگرافی

چاپگرهایی که بر پایه تونر کار می‌کنند جایگاه خاصی را در فرآیند چاپ به خود اختصاص داده‌اند و به دلیل مزایای ذکرشده، استفاده از این چاپگرها در موارد شخصی، دفتری و حتی در بسیاری از موارد صنعتی، رو به گسترش است. بسته به نوع فرآیندی که به ایجاد تصویر منجر می‌شود به سه دسته الکتروگرافی، مگنتوگرافی و آیونوگرافی تقسیم‌بندی می‌شوند که چاپ الکتروفوتوگرافی[3] یکی از پرکاربرد ترین چاپ های غیرتماسی بر پایه استفاده از برهم‌کنش مکانیکی، الکتریکی و فناوری نوری است. اصول مراحل چاپ در چاپگرهایی که بر پایه تونر کار می‌کنند یکسان بوده و تنها در نحوه ایجاد تصویر بر روی غلتک حامل تصویر تفاوت‌هایی وجود دارد [۱۰]. از آغاز فرآیند چاپ در یک چاپگر لیزری[4] یا دستگاه فتوکپی[5] تا چاپ نهایی روی زمینه، هفت مرحله وجود دارد. این مراحل شامل شارژ بار الکتریکی، آشکارسازی تصویر، ظهور، انتقال، تمیزکردن، تخلیه بار الکتریکی و تشکیل فیلم هستند [۱۴]. بعد از مرحله انتقال تونر[6](مرکب چاپ الکتروفتوگرافی)، ذرات تونر خشک به صورت موقت بر روی کاغذ چسبیده تا امکان انتقال به مرحله نهایی تشکیل فیلم برای تثبیت نهایی و دائمی را داشته باشند. انرژی اعمال شده در این مرحله باید به اندازه‌ای باشد تا امکان نرم شدن، گسترش و نفوذ تونر در کاغذ میسر شده و تصویر نهایی چاپ گردد. فرآیند تشکیل فیلم به طور کلی شامل ذوب و نرم شدن ذرات تونر، چسبیدن ذرات به یکدیگر، پخش و نفوذ به داخل زیرآیند است [۱۵]. همان‌طور که اشاره شد عامل ایجاد تصویر در چاپ الکتروفتوگرافی، تونر است. تونری که امروزه در صنعت چاپ و فتوکپی مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای ذراتی با قطر ۲۰میکرون و چگالی gr/cm^3 ۱-۱/۵ است و متشکل از رنگدانه، عامل کنترل بار الکتریکی و غالبا بسته به نوع سامانه چاپگر و رنگ تونر مقادیر متفاوتی از یک ماده مغناطیسی نظیر اکسید آهن می‌باشد که این اجزا در بستری از یک پلیمر با خواص حرارتی و شیمیایی خاص در کنار یکدیگر

[3]Electrophotography
[4]Laser jet printer
[5]Photocopy
[6]Toner

قرار می‌گیرند (رزین گرمانرم شامل کوپلیمر استایرن-اکریلات، استایرن بوتا دی ان، رزین پلی استر یا اپوکسی است)، مواد افزودنی جهت بهبود خواص جریان‌پذیری و تسهیل در جداسازی تونر از غلتک حامل تصویر به این مواد افزوده می‌شوند (جدول ۱) [۱۰]. این ترکیبات به آسانی در طی فرآیند خمیرسازی مجدد به روش متداول پراکنده نمی‌شوند و با شناورسازی و یا شستشو خارج نمی‌شوند و مرکب زدایی از این کاغذها یک چالش بزرگ است [۱۶]. به‌دلیل وجود همین مشکلات و ارزان بودن کاغذهای بازیافتی شامل ذرات تونر، روش‌های نوین مرکب‌زدایی برای این روش چاپی استفاده می‌شود.

۳- انواع روش‌های مرکب‌زدایی

۳-۱- مرکب‌زدایی به روش شستشو

شستشو[1] فرآیند هیدرولیکی است که به وسیله آن آب از دوغاب خمیر گرفته می‌شود، در این روش دوغاب محتوی الیاف و مرکب را به طور متوالی رقیق و غلیظ می‌کنند و در هر مرحله تغلیظ، الیاف توسط توری جدا شده و مرکب و سایر ذرات ریز را خارج کرده و الیاف و بخش باقی‌مانده مرکب برجای می‌ماند. در واقع این روش شامل شستشوی خمیر در حضور مواد شیمیایی پخش‌کننده و پاک‌کننده و در مرحله بعد آبگیری از آن است. بازده این روش به نوع تجهیزات و کیفیت کاغذ بستگی دارد و بین ۷۵ تا ۹۰ درصد می‌باشد [۲]. تجهیزات مختلف شستشو عبارتند از: تغلیظ‌کننده‌ها[2]، غربال‌های سایدهیل، پرس‌های پیچی و توری (شکل ۳) [۱۸].

مرکب‌زدایی با روش شستشو برای زدودن ذرات مرکب با ابعاد ۱۰μm، و در مواردی که پرکننده‌ها و مواد چسبناک وجود دارند و ابعاد ذرات بین ۰/۵ تا ۵ میکرون باشد، بسیار مفید می‌باشد. همچنین مرکب‌زدایی با روش شستشو در مورد ذرات آب‌دوست عملکرد مطلوبی دارد. روش شستشو در مورد ذرات مرکب چاپ افست و لترپرس که به خوبی پخش می‌شوند نیز مناسب است. یکی از بزرگ‌ترین معایب مرکب‌زدایی با روش شستشو کاهش کارایی و بازده آن در مواقعی است که ذرات مرکب درشت‌تر هستند.

هرچه ذرات مرکب در مرکب‌زدایی درشت‌تر باشند به مراتب بازده مرکب‌زدایی با روش شستشو نیز کاهش می‌یابد. شمایی از مراحل این روش در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۸].

مزایا و معایب مرکب‌زدایی با شستشو:

- فرآیندکم هزینه
- استفاده از واکنش‌گرهای ارزان‌قیمت
- اتلاف زیاد پرکن
- بازیابی کم
- اتلاف زیاد ریزدانه‌ها
- تصفیه پیچیده آب بازگشتی
- مناسب برای مرکب‌های پایه آبی

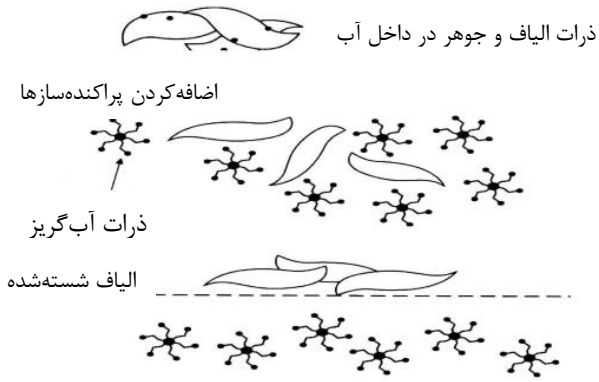
[1] Washing
[2] Thickener

۳-۲- مرکب‌زدایی به روش شناورسازی

شناورسازی بهترین روش برای زدودن ذرات آب‌گریز است که در آن ذرات خود را به حباب‌های هوا می‌چسبانند. روش کار به این صورت است که خمیر با درصد خشکی یک در صد، pH بین ۷ تا ۹ و دمای ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد وارد دستگاه می‌شود. درحضور یک ماده کف‌کننده هوا به نسبت حدود سه برابر حجم خمیر و در حال چرخش تزریق شده و یک پروانه سبب شکسته‌شدن هوای ورودی به حباب‌های ریز و اختلاط آن با دوغاب می‌شود. این حباب‌های هوا ذرات مرکب را با خود حمل کرده و به بالای حمام شناورسازی می‌برند و فاصله کف تولید شده، در این قسمت توسط یک پارو از سطح دوغاب زدوده می‌شود. چهار مرحله مکانیکی مرکب‌زدایی شامل جداسازی، رسوب مجدد، تعلیق و کف‌سازی است [۱۹]. نکته کلیدی در این فرآیند استفاده از شوینده‌های مناسب برای جداکردن مرکب از الیاف و تشکیل یک کف مناسب است که طی فرآیند شناورسازی از الیاف جدا شود.

جدول ۱- ترکیبات تشکیل‌دهنده تونر [۱۷].

ترکیبات	ماده شیمیایی	نقش و وظیفه
عوامل رنگ‌دهنده	رنگدانه یا ماده رنگزا	رنگ‌دهی
پلیمر	مخلوط مونومرها: اکریلات استایرن، پلی‌استرها، رزین‌های‌اپوکسی	پیونده
عوامل کنترل بار	نمک‌های نوع چهارم آمونیم، سولفونات‌ها، کمپلکس‌های روی	ایجاد بار الکترواستاتیک لازم برای ظهور ذرات تونر

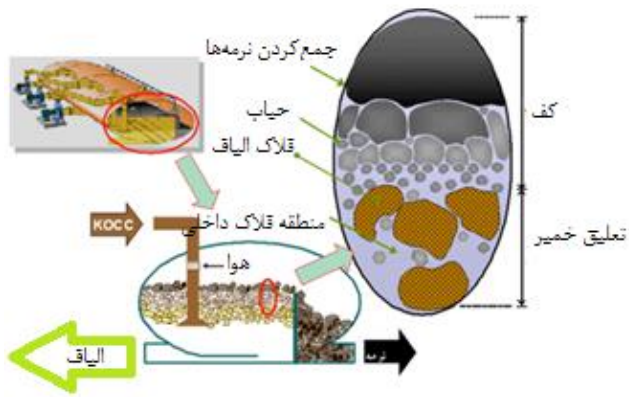


شکل ۳- فرآیند مرکب‌زدایی به روش شستشو [۱۲].

شکل ۴- شمایی از مراحل مرکب‌زدایی به روش شستشو.

در واقع شوینده خواص سطحی را تغییر می‌دهد و باعث جداشدن ذرات آب‌گریز مرکب و اتصال آن‌ها به حباب‌های هوا می‌شود. در روش‌های جدید شناورسازی ، شوینده روی سطح افشانش می‌شود، به جای اینکه از قبل با خمیر کاغذ مخلوط شود. دو روش شستشو و شناورسازی روش‌های مهمی در فرآیند مرکب‌زدایی هستندکه معمولا به دنبال هم استفاده می‌شوند در واقع قبل از شناورسازی از روش شستشو استفاده می‌شود که مواد شیمیایی که روی شناورسازی تأثیر منفی دارند جدا شوند. چون این مواد شیمیایی مانع مهاجرت طی شناورسازی می‌شوند. در روش شناورسازی، ذرات مرکب درشت‌تری نسبت به روش شستشو جداسازی می‌شوند، که معمولا دامنه ابعاد ذرات قابل جداسازی ۱۰ تا ۲۵۰ میکرومتر می‌باشند. برخی از سیستم‌های شناورسازی حتی توانایی زدودن ذراتی با قطر بالای ۵۰۰ میکرومتر را نیز دارا هستند. موثرترین عملکرد شناورسازی زمانی است که اندازه ذرات مرکب بین ۲۰ الی ۴۰ میکرون بوده و زاویه تماس بین آب و ذرات مرکب ۹۰ درجه باشد به عبارت دیگر در شناورسازی نیاز به ذرات آب‌گریز می‌باشد. ذرات مرکب‌های چاپ افست، لترپرس و گراور که آب‌گریز هستند به طور موثر و کارآمد با روش شناورسازی حذف می‌شوند. برای موفقیت شناورسازی باید ذرات مرکب لخته شوند و توده‌های بزرگ‌تری را تشکیل دهند. سطح آب‌گریز این ذرات توده شده توسط صابون‌ها یا سایر مواد فعال‌کننده سطح به صورت آب‌دوست درآمده و از الیاف کاغذ جدا می‌شوند [۲۰].

ذراتی که به صورت ذاتی آب‌دوست هستند را نمی‌توان با روش شناورسازی جدا و حذف نمود که این جزء معایب این روش می‌باشد. این گونه ذرات با داشتن سطح آب‌دوست و زاویه تماس صفر درجه با آب، به خوبی خیس شده و در این حالت در مایع خمیر باقی می‌ماند. ذرات مرکب با اندازه کوچک‌تر از ۱۰ میکرون، برخلاف جدا شدن از الیاف، به وسیله روش شناورسازی قابل حذف نیستند. زیرا به دلیل اندازه کوچک خود مجددا درون حفره‌های سلولی الیاف رسوب کرده و حذف آن‌ها در این حالت بسیار مشکل است. ثابت شده است که با کاهش اندازه مرکب، مقدار رسوب مجدد آن‌ها روی الیاف و درون حفره‌های سلولی افزایش می‌یابد (شکل ۵) [۲۰].



شکل۵- شمای فرآیند مرکب‌زدایی به روش شناورسازی [۱۹].

مزایا و معایب مرکب‌زدایی با شناورسازی :

- استفاده از واکنش‌گر گران‌قیمت
- اتلاف کم پرکن
- بازیابی بالا
- اتلاف کم ریزدانه‌ها
- تصفیه ساده آب بازگشتی
- مناسب برای مرکب‌های روغنی.

۳-۳- مرکب‌زدایی شیمیایی

مرکب‌زدایی شیمیایی[1] در pH قلیایی برای طیف گسترده‌ای از مرکب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروج ذرات مرکب در مرکب‌زدایی شیمیایی با استفاده از مواد شیمیایی، حرارت و انرژی مکانیکی صورت می‌گیرد. در pH، ۱۱-۹/۵ با توجه به تفاوت‌های فیزیکی و شیمیایی مرکب با الیاف کاغذ، می‌توان مرکب را از الیاف کاغذ جدا کرد. این روش مرکب‌زدایی شامل برداشتن مرکب از سطح کاغذ بوسیله خمیرسازی مکانیکی کاغذ در شرایط قلیایی (pH= ۱۱-۹/۵) و در حضور یک ماده فعال‌کننده سطح است. هیدروکسید سدیم الیاف سلولز را متورم ساخته و رزین‌ها را صابونی یا آبکافت می‌کند که امر مرکب‌زدایی را تسهیل می‌نماید. فعال‌کننده‌های سطح به عمل زدوده شدن ذرات واقع در سطح کمک می‌کنند. در نهایت تحت اختلاط با سرعت بالا مرکب به ذرات ریز منفصل تبدیل شده و از سطح خارج می‌شود که سهولت این انفصال، بستگی به خواص فیزیکی و شیمیایی رزین دارد [۲۰].

از معایب روش شیمیایی مصرف مواد شیمیایی زیاد از قبیل سیلیکات‌ها، هیدروکسید سدیم و غیره می‌باشد. برای مثال سیلیکات‌ها گاهی اوقات باعث ایجاد رسوب و یا ته نشست‌های نامطلوب در سیستم کاغذسازی می شوند. همچنین زرد شدن الیاف خمیرهای مکانیکی در pH بالا، کاهش روشنایی کاغذ و نیز بالا بودن قیمت مواد شیمیایی مورد استفاده در این روش از موانع آن به شمار می‌آیند. همچنین تیمار با هیدروکسید سدیم سبب تجزیه همه سلولزها و لینگنین موجود در الیاف می‌شود و در نتیجه میزان اکسیژن خواهی بیوشیمیایی[2](BOD) در سیستم پساب کارخانه افزایش می‌یابد. در نهایت استفاده بیش از اندازه از مواد فعال‌کننده سطحی سبب اختلال در عمل آهارزنی کاغذ، تشکیل اسید، خوردگی تجهیزات و کاهش عمر آنها و ایجاد کف در کاغذسازی و سیستم تیمار پساب می‌شود [۲۱].

۴- مرکب‌زدایی آنزیمی

مخلوط کاغذهای باطله اداری مشکل سازترین ماده خام برای مرکب‌زدایی می‌باشد. این کاغذها به طور عمده توسط دستگاه‌های فتوکپی و چاپگرهای لیزری که مرکب را به الیاف جوش می‌دهند، چاپ

[1]Chemical deinking
[2] Biochemical oxygen demand

شده و این امر باعث سختی زدودن مرکب از آن‌ها با روش‌های شیمیایی متداول گردیده است. در واقع کاغذهای باطله اداری منبعی از الیاف با کیفیت هستند که فرآیند چاپ روی آنها انجام شده است و اگر مرکب‌زدایی شوند، می‌توان از آن‌ها برای تولید کاغذهای با ارزش و انواع مختلف محصولات فیبری استفاده کرد. علاوه بر این زدودن مرکب‌های تونر که کوپلیمرهای استایرن و اکریلات می‌باشند، به علت اتصال قوی آنها که طی فرآیند چاپ و تحت گرما ایجاد می‌شود، حتی با به کارگیری مراحل شناورسازی و شستشوی اضافه در روش شیمیایی کارآرایی پایینی دارند. پژوهش‌های اخیر نشان داده است که آنزیم‌ها جایگزین خوبی برای مواد شیمیایی به‌منظور مرکب‌زدایی از کاغذهای باطله اداری هستند[۲۲]. در فرآیندهای مرکب‌زدایی متداول، مواد شیمیایی زیادی از جمله سدیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات، هیدروژن پراکساید و مواد شیمیایی کی‌لیت‌ساز استفاده می‌شود که استفاده از آنها به لحاظ محیط زیستی خطرناک بوده و موجب می‌شود پساب حاصل از آن آلوده بوده و هزینه زیادی صرف تصفیه پساب می‌شود [۳]. برخلاف برطرف شدن معایب مرکب‌زدایی شیمیایی، مرکب‌زدایی آنزیمی توجه‌های زیادی را به خود جلب کرده است، چرا که در این روش مصرف مواد شیمیایی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین مقدار لجن تولید شده در مرکب‌زدایی آنزیمی کمتر است و کاهش مواد غیرآلی، هزینه‌ها برای از بین بردن لجن را کاهش می‌دهد. بنابراین، این روش از لحاظ قیمت و هزینه به صرفه بوده و سازگار با محیط زیست است. این فرآیند می تواند ذرات مرکب را از الیاف، بدون آزاد کردن زیاد مواد آلاینده خارج کند، ترکیبات آنزیم می‌توانند به‌طور انتخابی لایه های بیرونی الیاف سلولزی را جهت آزاد کردن مرکب از سطح الیاف آبکافت کنند. در این روش آنزیم‌ها به خود مرکب یا به سطح الیاف حمله‌ور می‌شوند و سازوکار عمده این عمل مبتنی بر سست‌کردن اتصالات ذرات مرکب و الیاف و حذف ذرات ریز و فیبریل می‌باشد [۲۳].

تحقیقات نشان داده‌اند که آنزیم ها مقاومت کاغذ ساخته شده از الیاف بازیافتی را افزایش داده و میزان آبگیری خمیر را بهبود می‌بخشند و با کاهش زمان آبگیری در حدود ۱۱/۵ درصد ، در مقایسه با روش مرکب‌زدایی شیمیایی، بازده مرکب‌زدایی در حدود ۲۴/۶ بهبود می‌یابد و خواص فیزیکی مانند شاخص کششی[1] ، در حدود ۲/۷ درصد بهبود می‌یابد [۲۱]. از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر مرکب‌زدایی آنزیمی می‌توان به دما، pH، نوع آنزیم، مواد ورودی به سیستم، غلظت ترکیبات کاغذ، زمان واکنش و عمل مکانیکی در طی خمیرسازی نام برد [۲۳]. آنزیم‌های سلولاز مطابق با گزارش‌های منتشر شده در سال ۱۹۹۱، نشان دادند که در جداسازی مرکب‌های معمول از کاغذ های روزنامه موثر می‌باشد. همچنین تحقیقات نشان می‌دهند که آنزیم‌های میکروبی مقدار جداسازی تونر را از کاغذهای باطله افزایش می‌دهد. به عنوان مثال استفاده از مقدار کمی از آنزیم‌های سلولاز و زایلاناز در یک مخلوط‌کن در مورد کاغذهای چاپ شده فلکسوگرافی، ذرات تونر را خارج نموده و مراحل بعدی شناورسازی و شستشو را آسان‌تر کرده است. آنزیم‌ها در مقایسه با تیمار شاهدی که تنها با آب تیمار شده است، بیشتر از ۹۵ درصد ذرات تونر را از الیاف بازیافتی خارج نموده است. استفاده از آنزیم‌های سلولاز در خمیر کاغذها باید به دقت انجام شود تا از تجزیه زیاد زنجیره سلولز جلوگیری شود [۲۳]. شمایی از مراحل این روش در نمودار ۲ نشان داده شده است. در این روش آنزیم‌های متعددی چون: سلولاز[2]، رزیناناز[3]، لیپاز[4]، آمیلاز[5]، اندوگلوکاناز[6]، همی‌سلولاز[7]، زایلاناز[8]، بتازایلوزیداز[9]، و ماناناز[10] به کارگرفته می‌شوند. در جداسازی مرکب دو سازوکار و دو روش کلی در استفاده از آنزیم‌ها وجود دارد:

۱- استفاده از سلولاز، زایلاناز و پکتیناز برای آبکافت محدود سطوح بیرونی الیاف و خروج مرکب از سطح الیاف است.

۲- روش دیگر استفاده از لیپاز برای آبکافت محمل پایه روغنی مرکب است.

به طور کلی عوامل موثر بر مرکب‌زدایی عبارت است از:

۱- نوع آنزیم (مقایسه سلولاز و لیپاز)

۲- pH

۳- مدت زمان خمیرسازی

۴- شناورسازی

۵- دما [۲۲].

۵- مقایسه روش‌های مختلف مرکب‌زدایی

جدول ۲ مقایسه‌ای از روش‌های مختلف مرکب‌زدایی را نشان می‌دهد. از لحاظ مواد شیمیایی مصرفی، مرکب زدایی با روش‌های متداول نیاز به مواد شیمیایی بیشتری دارد و با استفاده از روش مرکب‌زدایی آنزیمی، استفاده از این مواد شیمیایی در جهت حفظ محیط‌زیست کاهش می‌یابد. از مزایای مرکب‌زدایی آنزیمی اقتصادی بودن آن نسبت به مرکب‌زدایی متداول شیمیایی، مقرون به صرفه بودن و کارایی بیشتر آن می‌باشد. از دیگر فواید مرکب‌زدایی آنزیمی می‌توان به بازده بیشتر، تخریب کمتر کاغذ بازیافتی و مقرون به‌صرفه بودن آن اشاره کرد. همچنین پساب حاصل از مرکب‌زدایی آنزیمی به دلیل زیست تخریب‌پذیر بودن، نسبت به روش‌های متداول از آلودگی زیست‌محیطی کمتری برخوردار است [۲۴].

[1] Tensile index

[2] Cellulase
[3] Resinanase
[4] Lipase
[5] Amylase
[6] Endoglucanase
[7] Hemicellulase
[8] Xylanase
[9] Beta xylosidase
[10] Mananas

جدول ۲- مقایسه روش‌های مختلف مرکب‌زدایی [۲۴].

روش	ویژگی	مزایا	معایب
شستشو	✓ فرآیند هیدرولیکی ✓ حذف ذرات بین ۱۵-۱۰ میکرون ✓ قابلیت استفاده برای چاپ افست و لترپرس ✓ بستگی کارایی به اندازه ذرات ✓ حذف ذرات آب‌دوست	✓ بازده ۷۵ تا ۸۵ درصد ✓ مناسب برای حذف ذرات ریز ✓ حذف آلاینده‌های کلوئیدی ✓ کاربرد دردرصد خشکی متوسط ✓ خواص نوری و مقاومتی بهتری نسبت به شناورسازی ✓ خروج مواد معدنی قابل کنترل	✓ عدم حذف ذرات درشت ✓ مصرف آب زیاد ✓ حجم زیاد پساب ✓ نیاز به تجهیزات و مکان اضافی ✓ کیفیت چاپ کمتر نسب به شناورسازی ✓ بازده کمتر نسبت به شناورسازی
شناورسازی	✓ فرآیندی است شیمیایی- مکانیکی ✓ دمیدن هوا به داخل سوسپانسیون ✓ لازم به آب‌گریزکردن ذرات مرکب ✓ حذف ذرات آب‌گریز ✓ حذف ذرات بین ۱۰- ۲۵۰ میکرون ✓ مناسب برای چاپ‌های روتوگراور، افست و لترپرس	✓ بازده ۹۰ – ۸۵ درصد ✓ قابلیت حذف ذرات درشت ✓ بیشتر بودن بازده نسبت به شستشو ✓ ارزان‌تر بودن مواد شیمیایی مصرفی ✓ مشکلات پساب کمتر ✓ مصرف آب کمتر نسبت به شستشو ✓ حساسیت کمتر به اندازه ذرات	✓ قابلیت حذف ذرات خیلی ریز را ندارد ✓ لزوم فضای بیشتری نسبت به شستشو ✓ خواص نوری و مقاومتی نسبت به شستشو کمتر ✓ مسدودشدن منافذ توری ماشین کاغذ
آنزیمی	✓ حذف مرکب با استفاده از آنزیم ✓ آنزیم با الیاف کاغذ و یا با مرکب واکنش می‌دهد ✓ مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار: pH، نوع آنزیم، مواد ورودی، غلظت ترکیبات کاغذ، زمان واکنش، عمل مکانیکی در طی خمیرسازی	✓ آلودگی بسیارکم ✓ عدم نیاز به تجهیزات و فضای اضافی ✓ قابل استفاده در خمیرساز ✓ بهبود مقاومت کاغذ و آب‌گیری از خمیر ✓ مصرف کمتر مواد شیمیایی	✓ تخریب الیاف کاغذ ✓ ریزکردن ذرات تا حدی که با شناورسازی حذف نمی‌شوند ✓ رسوب الیاف همراه با ذرات

۶- کارایی روش‌های معمول مرکب‌زدایی برای کاغذهای چاپ شده به روش الکتروفتوگرافی

در مرکب‌زدایی به روش متداول از مواد فعال کننده سطحی جهت شناور ساختن تونر و جداشدن آنها از الیاف و از درجه حرارت زیاد به‌منظور جمع‌کردن ذرات تونر و جلوگیری از پخش و پراکنش زیاد و همچنین برای کاهش اندازه ذرات آنها استفاده می‌شود. اکثر مواد شیمیایی در مرکب‌زدایی و مراحل پخش و پراکنش ذرات مرکب، پرهزینه و به مصرف انرژی زیادی نیاز دارد. مرحله پراکنش با انرژی مصرفی زیاد به لحاظ سرمایه‌گذاری و مصرف انرژی، پرهزینه است. همچنین این مرحله می‌تواند طول الیاف را نیز کاهش دهد و باعث خاکستری شدن کاغذ بازیافتی می‌شود و در نهایت روشنایی کاغذ کاهش می‌یابد. تونر از لحاظ فیزیکی به دلیل وجود حرارت بالا با الیاف امتزاج پیدا می‌کند، به طوری که حذف توسط روش‌های شیمیایی معمولی دشوار و گران‌قیمت است. بسیاری از روش‌های مرکب‌زدایی مرسوم نیاز به مقدار زیادی از مواد شیمیایی، مانند هیدروکسید سدیم، کربنات سدیم، سیلیکات سدیم، پراکسید هیدروژن و مواد فعال‌کننده‌سطحی دارد و به‌علت رعایت مقررات زیست‌محیطی نیز هزینه‌هایی جهت تصفیه پساب افزوده می‌شود. پیوندهای قوی بین تونر و الیاف پس از جدا شدن منجر به تکه‌تکه‌شدن الیاف می‌شود و در پایان ذرات مرکب مانند آلودگی دیده می‌شوند. این ذرات با توجه به اندازه کوچک و طبیعت آب‌دوست خود، جذب حباب‌های پراکنده هوا نمی‌شوند. بنابراین، شناور می مانند و احتمال جمع‌آوری آنها توسط حباب‌های هوا ضعیف است. بنابراین برای مرکب‌زدایی کاغذهای چاپ شده با این چاپ از روش‌های چندتایی کمک گرفته می‌شود [۲۵].

۱- مرکب‌زدایی آنزیمی با پردازش پرتو فرابنفش

با استفاده از تابش UV رزین های مورد استفاده در تونر تخریب‌شده و ابعاد ذرات تونر کاهش می‌یابد و در نتیجه جداسازی ذرات در مرحله شستشو و شناورسازی راحت‌تر صورت می‌گیرد [۲۱].

۲- مرکب‌زدایی آنزیمی باپردازش قلیایی قبل ازپراکنده‌سازی

خیس‌کردن کاغذ در قلیا قبل از تیمار آنزیمی باعث بهبود در پراکنده سازی ذرات و جداسازی بهتر تونر از الیاف کاغذ می‌شود [۲۱].

۳- مرکب‌زدایی آنزیمی و پردازش فراصوت

تیمار فراصوت باعث ریزترشدن ذرات تونر می‌شود اما باید توجه داشت که اگر زمان تیمار فراصوت بیش از حد باشد ذرات تونر خیلی ریز شده و روی سطح الیاف رسوب می‌کند. بازده روش های حاصل از ترکیب مرکب زدایی فراصوت و آنزیمی کمی بالاتر از بازدهی حاصل از مرکب زدایی آنزیمی است [۲۱].

۴- روش رادیکال آزاد

رادیکال‌های آزاد رادیکال مانند رادیکال هیدروکسیل ($HO^{\bullet}$)، این توانایی را دارند که شبیه به برخی آنزیم‌ها، الیاف سلولز را تخریب کنند. نتایج نشان می‌دهد تحت شرایط کنترل شده، تیمار با رادیکالهای آزاد می‌تواند بهتر از مواد شیمیایی معمولی انجام شود [۲۱].

۷- نتیجه‌گیری

امروزه استفاده مجدد از کاغذهای بازیافتی به عنوان یکی از روش‌های تامین مواد اولیه سلولزی مناسب برای صنایع خمیر و کاغذ مورد توجه جدی قرار گرفته است. به دلیل وجود آلاینده‌هایی مانند چسب‌ها و مرکب چاپ، ویژگی‌های نوری کاغذهای بازیافتی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، ولی به کمک روش مرکب‌زدایی می‌توان از افت ویژگی‌های مذکور جلوگیری کرد. در بین روش‌های مختلف چاپ، در روش الکتروفتوگرافی (چاپگرهای لیزر جت و دستگاه‌های فتوکپی) به دلیل آمیخته‌شدن مرکب با بافت کاغذ در هنگام تثبیت مرکب با کمک حرارت بالا، روش‌های مرکب‌زدایی سنتی جواب‌گو نمی‌باشند و لازم است از روش‌های جدیدتر استفاده گردد. مرکب‌زدایی کاغذهای چاپ شده به روش الکتروفتوگرافی با استفاده از آنزیم‌ها، پردازش قلیایی، رادیکال‌های آزاد، پرتو فرابنفش و پردازش فراصوت صورت می‌گیرد.

۸- مراجع

1. J. C. Cotrino, Victor Ordonez,"*Green Technology: Last Developments in Enzymes for Paper Recycling*", VH biotechnology Inc, 1630, **2011**.

۲. ح .رسالتی ، ر. ابراهیمی بریسا و م. ح. اسماعیلی،"مروری بر انواع روش‌های مرکب‌زدایی کاغذ باطله"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ ، ۴، ۲۳- ۱۳، **۱۳۹۳**.

3. A. Saxena, P. S. chauhan,"Role of Various enzymes for deinking Paper:a review", Crit Rev Biotechnol. 37, 598-612, **2017**.
4. D. E. Tatsis, D. K. Papachristos, K. A. Valta, A. G. Vlyssides , D. G Economides,"Enzymatic deinking of recycling of office waste paper", J. Environ. Chem. Eng. 5, 1744-1753, **2017**.

۵. ه. رهامین، "اهمیت بازیافت کاغذ و جایگاه آن در اقتصاد ایران وجهان"، انجمن بازیافت کاغذ و منابع سلولزی، http://anjomanebazyaft.blogfa.com، **۱۳۹۰**.

۶. م. عظیمی کهن، م. علیزاده فرخد، دومین همایش درون دانشگاهی بازیافت کاغذ و فراورده های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، **۱۳۸۹**.

7. R. A. venditti, O. J. Rojas, H. Morris, J. Tucker, K. Spence, C. Austin, L. G. Castillo,"Natural surfactant for Flotation Deinking in Paper Recycling", Tappi 8th Research Forum on Recycling **2007**.
8. H. Kipphan, "*Handbook of print media*", technologies and production methods, Springer,Germany, **2001**.
9. R. Leach,"*The Printing Ink Manual*", Blueprint, London, 4th edition, **2012**.

۱۰. ف. اندامی،"تولید تونر الکتروگرافی به روش پلیمریزاسیون تعلیقی در جا و بهینه‌سازی محصول به کمک طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه علوم و فناوری رنگ و پوشش، **۱۳۹۲**.

11. P. Pathak, N. K. Bhardwaj, A. K. Singh," optimization of chemical & enzymatic deinking of photocopier waste ppaper", Bioresources. 6, 447-463, **2011**.

۱۲. م. عبادی، م. عطایی‌فرد،"تولید تونرچاپگر لیزرجت به روش تجمع امولسیونی" . نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۲، ۴۸-۴۱، **۱۳۹۱**.

13. N.Ohta, M. Rosen, "*color desktop printer tencnology*",CRC press, New York, **2006**.

۱۴. H. AL-Rubaiey, "Toner Transfer and Fusing in Electrophotography," Graphic Arts in Finland, Vancouver, 39, **2010**.

۱۵. ف. عنابستانی، س. باستانی، م. عطایی‌فرد، "تونرهای پخت شونده با فرابنفش: روشهای تولید و تشکیل فیلم در چاپ الکتروفوتوگرافی"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۶، ۷۶ -۶۵، **۱۳۹۵**.

16. G. Marshall," Recent Progress in Toner Technologies", Springfield , 465, **1997**.
17. G. Galliford, "The anatomy of a toner", Galliford Consulting & Marketing Consultants to the Non-Impact Printing Industry, http://www.gallifordconsulting.com/, **2006**.
18. E. Fernandez, K. Hodgson,"Deinking flexographic-printed papers: Destabilization of flexographic inkdispersions with copper compounds, Progress in Paper Recycling ", TAPPI, 12, **2013**.

۱۹. ع. فاضلی، "جوهرزدایی و بازیافت کاغذ به روش فلوتاسیون"، وبلاگ مقالات زمین شناسی http://egeology.blogfa.comT،**۱۳۸۷**.

20. C.A. Costa , J. Rubio,"Deinking flotation: influence of calcium soap and surface-active substances", Miner. Eng. 18, 59-64, **2005**.
21. Y. Qian, B. Goodell ,"Deinking of laser printed copy paper with a mediated free radical system", Bioresour. Technol. 96, 913-920, **2004**.

۲۲. م .آریائی منفرد، ح. رسالتی، ع. قاسمیان، "مرکب‌زدایی آنزیمی کاغذ باطله اداری در مقایسه با روش متداول شیمیایی"، مجله پژوهشی علوم و فناوری چوب و جنگل: بخش اول- ویژگیهای ظاهری و نوری خمیرکاغذ، ۴، ۷۶-۵۹، **۱۳۹۰**.

۲۳. م. خطیب زاده ، م. بخاراییان،"جوهرزدایی آنزیمی کاغذهای چاپ شده توسط تونرها(MOW) به وسیله آنزیم های سلولاز و لیپاز"، نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ، ایران، **۱۳۸۳**.

24. T. A. M. Counsell, "Remove toner Reuse paper", Ph.D. thesis, Clare College , **2007**.
25. G. Shakourian," Enhanced De-inking and Recyclability of Laser Printed Paperby Plasma-Assisted Fiber Coating", M.S. thesis, Georgia Institute of Technology, **2006**.
26. S. Zhenying, D. Shijin, C. Xuejun, G. Yan, L. Junfeng, W. H. Sean, X. Zhang,"Combined de-inking technology applied on laser printed paper", Chem. Eng. Process. Process Intensif, 48, 587-591, **2009**.