

## عملکرد سامانه بیوپلیمری نانو الیاف سلولز و کیتوزان بر ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ بازیافتی از کارتن‌های کنگره ای کهنه (OCC)

### چکیده

استفاده از مواد افزودنی مقاومت خشک راهکاری پایدار در بهبود ویژگی‌های کاغذهای بازیافتی محسوب شده و کاربرد مواد مبتنی بر زیست‌توده از جنبه‌های مختلف فنی و زیست محیطی در این زمینه رو به گسترش و حائز برتری است. در راستای بهبود ویژگی‌های مواد، سلولز و کیتوزان به‌عنوان فراوان‌ترین بیوپلیمرهای واجد پتانسیل مزبور، به صورت طبیعی و فراوری شده مورد توجه روزافزون پژوهش‌ها قرار دادند. نتایج بررسی تأثیر منفرد و توأم بیوپلیمرهای کیتوزان و نانو الیاف سلولزی بر ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ بازیافتی نشان داد که بهبود تمامی ویژگی‌های مقاومتی و دانسیته کاغذ، آگیری و ماندگاری خمیر کاغذ به هنگام شکل‌گیری و کاهش اتلاف مواد در مقایسه با تیمار شاهد قابل‌دستیابی است. کاربرد منفرد کیتوزان بهبود معنی‌دار تمامی ویژگی‌های مقاومتی و دانسیته کاغذ، ماندگاری خمیر کاغذ به هنگام شکل‌گیری و کاهش اتلاف مواد را ایجاد نمود. آگیری از دوغاب خمیر کاغذ نیز با حضور کیتوزان بهبود چشمگیر و معنی‌داری یافته که البته با افزایش کاربرد، از میزان بهبود حاصله کاسته شد. بهبودهای ایجاد شده به ماهیت پلیمری، شباهت ساختاری و قابلیت بالای پیوندیابی کیتوزان با الیاف سلولزی تعمیم می‌یابد. نانو الیاف سلولزی نیز به صورت کاربرد منفرد منجر به افزایش ماندگاری خمیر کاغذ، دانسیته، شاخص‌های کشش و ترکیدن کاغذ؛ کاهش درجه روانی و اتلاف مواد از خمیر کاغذ و نیز افت شاخص پارگی گردید. ماهیت آنیونی، سطح ویژه بالا و واجد پتانسیل پیوندهای هیدروژنی سبب این نتایج گزارش گردید. کاربرد نانو الیاف سلولزی پس از کیتوزان به خمیر کاغذ به‌عنوان سامانه مرکب در پایانه تر کاغذسازی، نه تنها تأثیر افزایشی در شاخص‌های مقاومتی و دانسیته (به استثنای ۰/۱۵ % NFC) کاغذ بازیافتی نداشته، کاهش مقاومت‌ها را نیز در برخی موارد سبب گردیده است. در حالت مرکب، ویژگی‌های خمیر کاغذ در مقایسه با کاربرد منفرد کیتوزان دچار نوسان بوده، لیکن نسبت به کاربرد منفرد نانو الیاف سلولزی حائز برتری بوده است.

**واژگان کلیدی:** کیتوزان، نانو الیاف سلولزی، ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ بازیافتی.

حسین پور کریم دودانگه<sup>۱</sup>

حسین جلالی ترشیزی\*<sup>۲</sup>

حمیدرضا رودی<sup>۳</sup>

امید رضانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی فناوری سلولز و کاغذ، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی فناوری سلولز و کاغذ، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی فناوری سلولز و کاغذ، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۴</sup> استادیار، گروه مهندسی فناوری سلولز و کاغذ، دانشگاه شهید بهشتی

مسئول مکاتبات:

[H.Jalali@sbu.ac.ir](mailto:H.Jalali@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۰۷

## مقدمه

بازیافت کاغذ رویکردی پایدار و با اهمیت بسیار بالا در راستای کاهش نیاز به الیاف بکر و در پی آن کاهش مصرف انرژی و منابع جنگلی و نیز کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از دفن کاغذ است. نکته کلیدی در تولید کاغذ به‌ویژه از الیاف بازیافتی، توسعه روش‌هایی به‌منظور بهبود اتصال بین الیاف و افزایش ویژگی‌های مقاومتی فرآورده تولیدی است؛ بنابراین، علیرغم مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی کاربرد کاغذهای بازیافتی، بایستی توجه داشت که این نوع الیاف، ویژگی‌های کم‌وبیش متفاوتی نسبت به الیاف بکر را دارا می‌باشند. بازیافت کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC<sup>۱</sup>) جهت تولید کاغذ لاینر و کنگره‌ای مورد استفاده در کارتن‌سازی، بخش اعظم بازار بازیافت مواد را در دنیا شامل می‌گردد و بیش از بازیافت سایر انواع درجات کاغذ نیز در ایران و جهان رواج دارد [۱]. در ایالات‌متحده آمریکا سالانه ۷۰ میلیون تن انواع کاغذ و مقوا مصرف می‌شود. نرخ کاربرد الیاف باطله OCC در سال ۱۹۶۳ حدود ۲۰٪ و در سال ۲۰۰۱ حدود ۶۷٪ بوده که در سال ۲۰۱۱ به بالای ۹۱٪ افزایش یافته است [۲]. لیکن نگرانی اصلی در این رویکرد، مقاومت‌های مکانیکی پایین‌تر کاغذ بازیافتی به‌واسطه ماهیت الیاف به‌کاررفته در تولیدشان است. چراکه خمیر کاغذ مزبور متشکل از طبقه‌ای از الیاف است که به‌طور میانگین حداقل دو بار فرایندهای تولید را پشت سر گذارده‌اند. در نتیجه و در مقایسه با الیاف بکر، ضعیف‌تر، کوتاه‌تر و واجد دیواره‌ای نازک‌تر بوده و در برابر پالایش نیز دچار تخریب بالائی می‌شوند؛ بنابراین پیوندیابی بین الیافی با کیفیت موصوف، به‌طور چشمگیری ضعیف‌تر است و ویژگی‌های بسیار پائینی را به‌صورت مقاومت ترکیب، کشش و پارگی برجای می‌گذارند. از جمله راهکارهای پیشنهادی برای ارتقای پیوندیابی، می‌توان به پالایش، افزودن الیاف بکر، تشدید شرایط پرس، تیمارهای قلیایی و آبی - حرارتی و نیز استفاده از مواد افزودنی مقاومت خشک<sup>۲</sup> اشاره نمود. با عنایت به محدودیت‌های ذاتی مورد اشاره در الیاف بازیافتی، افزودن مواد شیمیایی مناسب‌ترین راهکار جهت بهبود پیوندیابی ارزیابی می‌شود و در حال حاضر صنعت کاغذسازی از عوامل مقاومت خشک تجاری موجود نظیر نشاسته کاتیونی و پلی آکریلامید برای غلبه بر نقصان مقاومتی استفاده می‌نماید. البته لازم به ذکر است که خمیر کاغذ OCC سرشار از اشغال‌های آنیونی نیز است که منجر به کاهش کارآمدی عوامل مقاومت خشک می‌گردد. با این حال، رویکردهای جدید و غیرمتداولی نظیر استفاده از نانو مواد نیز برای بهبود مقاومت‌های کاغذ مطرح است.

از طرفی امروزه تمایل گسترده به سمت جایگزینی و فراگیری مواد تجدید پذیر و دوستدار محیط‌زیست معطوف بوده و در این پژوهش نیز تمرکز بر کاربرد چسب مقاومت خشک و نانوذره تجدید پذیر بجای مواد متداول معدنی یا نفتی است [۱]. کیتوزان پلیمری کربوهیدراتی و خطی، غیر سمی، زیست سازگار و با جرم مولکولی بالا متشکل از واحدهای 2-acetamido-β(1→4)-linked 2-deoxy-B-D-glucose است که از هیدرولیز گروه‌های N-استیل بیوپلیمر کیتین به دست می‌آید (شکل ۱). کیتین پس از سلولز به‌عنوان دومین بیوپلیمر فراوان شناخته‌شده و ترکیب عمده ساختاری بسیاری از سخت‌پوستان و حشرات را تشکیل می‌دهد. پسماندهای خرچنگ و میگو منابع عمده استحصال کیتین به شمار می‌آیند [۳]. از دیرباز گزارش شده که آمینوبلی ساکارید کیتوزان پیونددهنده بسیار خوبی برای ساختارهای الیاف سلولزی بوده و می‌تواند تا بیش از ۴۰٪ کارآمدتر از نشاسته عمل نماید [۴] و علاوه بر مقاومت خشک کاغذ، مقاومت تر را نیز بهبود می‌بخشد. شباهت ساختاری زیاد کیتوزان با سلولز، واکنش و تمایل آن‌ها را با یکدیگر تقویت نموده است، چراکه تفاوت بین این دو فراوان‌ترین بیوپلیمر، در جایگزینی گروه عاملی NH<sub>2</sub> بجای گروه هیدروکسیل در کربن شماره ۲ کیتوزان است که به واکنش‌پذیری بیشتر آن به الیاف سلولزی نیز کمک می‌کند (شکل ۲).

گروه‌های آمینی مزبور در کیتوزان تحت شرایط اسیدی آماده‌سازی، پروتون‌دار گشته و در نتیجه انحلال می‌یابد. کیتوزان پروتون‌دار نشده تحت شرایط قلیایی حل نمی‌شود. به‌طور کلی جذب کیتوزان بر سلولز در شرایط اسیدی توسط واکنش‌های الکترواستاتیکی کنترل می‌شود و در شرایط قلیایی نیز پلیمر کیتوزان بر سطوح سلولزی رسوب می‌نماید. در نتیجه در pH های بالاتر میزان جذب افزایش می‌یابد [۵]. افزایش وزن مولکولی پلیمر کیتوزان و نیز افزایش درجه استیل‌زدائی از آن منجر به ارتقای کارایی آن به‌عنوان افزودنی مقاومت خشک می‌گردد. البته وزن مولکولی بالا، فلاک‌شدگی شدید و تخریب شکل‌گیری را نیز به همراه دارد [۶].

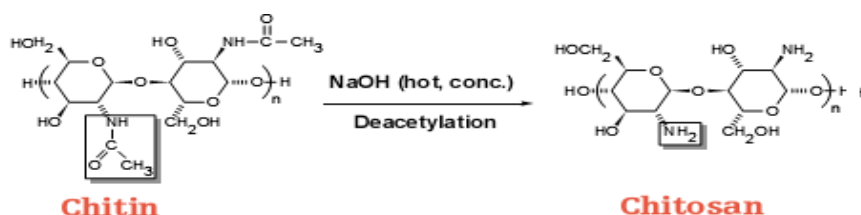
در صنعت کاغذسازی علاوه بر ویژگی‌های مقاومت‌ها و شکل‌گیری کاغذ تولیدی، قابلیت آبیگری از خمیر کاغذ و میزان ماندگاری اجزا نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چراکه تعیین‌کننده بهره‌وری تولید و نیز سلامت زیست‌محیطی فرایند تولید می‌باشند؛ بنابراین کنترل ماندگاری و آبیگری در پایانه تر کاغذسازی، بخش حائز اهمیت روزافزون شیمی کاغذسازی محسوب می‌گردد [۷ و ۸]. بدین منظور از سازوکارهای متنوعی بهره گرفته می‌شود که مکانیسم مرکب مبتنی بر نانوذرات آنیونی امروزه از اقبال وسیعی برخوردار است. تاجائیکه صنایع کاغذسازی

<sup>1</sup> Old Corrugated Containerboard

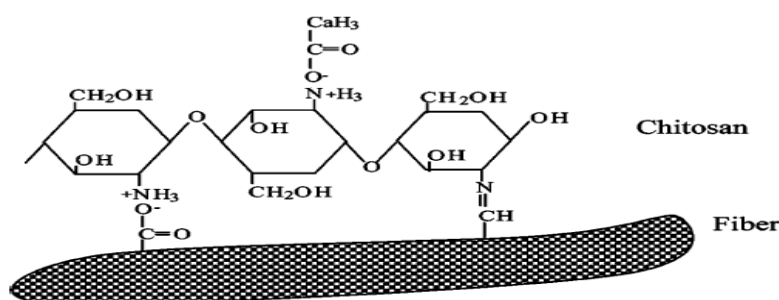
<sup>2</sup> Dry Strength Additive or agent

پلیمرهای کاتیونی، کاربرد گسترده‌ای پیدا نموده‌اند.

از جمله صنایع پرمصرف نانو مواد معرفی گشته و انواع نانوذرات معدنی در سامانه‌های کمک ماندگاری-کمک آبیگری به همراه



شکل ۱- نحوه تشکیل کایتوزان از کیتین



شکل ۲- نحوه واکنش کیتوزان با الیاف

خشکی بالاتر از ۵۵٪ موفق بوده‌اند [۱۲]. Nicu و همکاران (۲۰۰۶) ضمن تأکید بر تمایل گسترده بر به‌کارگیری بیوپلیمرها به‌عنوان گزینه‌های دوستدار محیط‌زیست جایگزین افزودنی‌های سنتزی و معدنی معمول در کاغذسازی، کارایی فلاک‌سازی اجزا توسط کیتوزان‌هایی با وزن مولکولی و چگالی بار متفاوت را در سامانه‌های ماندگاری-آبیگری با یکدیگر و نیز با افزودنی‌های متداول مربوطه (PEI و PDADMAC) را مقایسه نمودند [۱۳]. نتایج برتری تمامی کیتوزان‌ها بر دو پلیمر سنتزی مزبور را نشان داده و کارایی و تمایل کیتوزان به الیاف سلولزی بسیار بالاتر گزارش گردید. ارزیابی کاربرد کیتوزان و مشتقات آن در پایانه تر و خشک کاغذ حاصل از خمیر کاغذ رنگبری‌نشده باگاس، افزایش ویژگی‌های مقاومتی کاغذ را قبل و بعد از کهنه‌سازی نشان داد. طول پارگی و مقاومت به پارگی به ترتیب در پایانه تر و پایانه خشک کاغذسازی کارآمدتر ظاهر گردیده است [۱۴]. بررسی کاربرد کیتوزان به‌صورت اسپری و نیز افزودن در پایانه تر در pH های ۵ و ۱۰، افزایش مقاومت-های کششی، ترکیدن و اندکی پارگی را البته با کارایی‌های مختلف در سه شرایط کاربری مزبور نشان داد. بیشترین کارایی در این پژوهش به ترتیب در روش اسپری، شرایط اسیدی و درنهایت قلیایی گزارش گردید. همچنین بیشترین افزایش

در این پژوهش برای ایجاد سامانه ماندگاری-آبیگری از نانوذره غیرمعدنی نانو سلولز، در تلفیق با بیوپلیمر کاتیونی کیتوزان استفاده خواهد شد. بررسی تأثیر سامانه مرکب کیتوزان-نانوذرات نشاسته بر ویژگی‌های کاغذ OCC، افزایش حدود ۵۰٪ مقاومت‌های کشش و ترکیدن و کاهش مقاومت پارگی را نشان داده است [۹]. افزودن نانو سلولز فیبریله (NFC) به خمیر کاغذهای رنگبری‌شده اکالیپتوس برای تولید کاغذ چاپ و تحریر، حکایت از امکان کاهش پالایش بدون تأثیر منفی بر ویژگی‌های مکانیکی کاغذ را داشته و بهترین نتایج در خمیر کاغذهای اندکی پالایش‌شده حاصل گردیده است [۱۰]. ارزیابی سامانه مرکب نانو سلولز (۱ و ۲٪) /نشاسته کاتیونی (۱٪) در تلفیقی از خمیر کاغذهای بکر سوزنی‌برگ و پهن‌برگ، افزایش چشمگیر مقاومت کشش، کاهش ناچیز ضریب پخش نور و نفوذپذیری کمتر هوا را به همراه داشت. همچنین نرخ آبیگری اندکی کاهش و ماندگاری بدون تغییر گزارش گردید [۱۱]. مقایسه عملکرد بیوپلیمرهای نشاسته، کیتوزان و کربوکسی متیل سلولز (CMC) در ایجاد مقاومت در شبکه لیفی خمیر کاغذ بکر رنگبری‌شده، برتری کیتوزان را در ایجاد مقاومت در تمامی دامنه‌های خشکی ورقه کاغذ را نشان داد، درحالی‌که نشاسته کاتیونی در خشکی بالاتر از ۸۰٪ و CMC نیز در

مقاومت در برابر کشش (T494 om-01)، ترکیدن (T403 om-02)، پاره شدن (T414 om-04)، گرمای (T410 om-02) و ضخامت کاغذ (T411 om-05) انجام پذیرفته و از تقسیم گرمای بر ضخامت اندازه‌گیری شده کاغذ، دانسیته محاسبه گردید. درصد ماندگاری کل در ماشین کاغذساز آزمایشگاهی نیز از نسبت بین جرم خشک کاغذ تولیدی به جرم خشک کل مواد به‌کاررفته در تولید کاغذ (مواد لیفی و افزودنی) محاسبه گردید. لازم به ذکر است که نانو الیاف سلولز در چهار سطح صفر، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد بر اساس وزن خشک خمیر کاغذ مصرفی به‌صورت منفرد و نیز به همراه بیوپلیمر کیتوزان مورد ارزیابی قرار گرفت. کیتوزان نیز در چهار سطح صفر، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد بر اساس وزن خشک خمیر کاغذ به‌صورت منفرد و نیز به همراه نانو الیاف سلولز استفاده گردید.

### نتایج و بحث

در شکل‌های ۳ تا ۹، نتایج کاربرد منفرد هر یک از بیوپلیمرهای کیتوزان و نانو الیاف سلولزی در سطوح مورد مطالعه و نیز کاربرد توأم آن‌ها در خمیر کاغذ بازیافتی از کاغذهای کنگره‌ای کهنه (OCC) ارائه شده است. تیمار شاهد نیز در سطح صفر کیتوزان و خط روند NFC صفر درصد نمایان گشته است. بررسی روند تغییرات بوجود آمده، حاکی از تاثیر پذیرفتن ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ بازیافتی از کاربرد بیوپلیمرهای مورد مطالعه در هر دو حالت افزودن منفرد و توأم است.

### مقاومت به کشش

مقاومت به کشش از مهم‌ترین ویژگی‌های کاربردی انواع درجات کاغذ و مقواست که تحت تأثیر عواملی از جمله مقاومت ذاتی الیاف، مقاومت پیوند بین الیاف، تعداد پیوند (سطح پیوند یافته) و کیفیت توزیع اجزا و شکل‌گیری کاغذ است. از بین عوامل فوق، نوع و میزان افزودنی‌های پایانه تر کاغذسازی بر نحوه توزیع اجزای دوغاب خمیر کاغذ و در پی آن شکل‌گیری کاغذ، تعداد و مقاومت پیوندها تأثیرگذار است که به‌واسطه نقش این مواد در تشکیل دلمه‌ها، آبگیری و پیوندیابی شناخته می‌شود. افزودن کیتوزان و افزایش درصد کاربرد آن در خمیر کاغذ بازیافتی به‌طور پیوسته و چشمگیری منجر به ارتقای ویژگی مقاومت به کشش کاغذ بازیافتی (تا بیش از ۵۰ درصد) گشته است (شکل ۳). Li و همکاران (۲۰۰۴) نشان دارند که کیتوزان بر روی سطوح الیاف سلولزی و نیز نرمه‌ها و کربوهیدرات‌های کلئیدی، توسط پیوندهای هیدروژنی و نیروهای واندروالسی

مقاومت‌ها، به‌محض افزودن کیتوزان بروز نموده و پس‌از آن از شدت بهبود مقاومت‌ها کاسته شد. تأثیر افزودن ۱۰٪ نانو سلولز نیز بر مقاومت خشک و تر کاغذ، افزایش چشمگیر مقاومت‌های مزبور را موجب و به‌عنوان جایگزین منفرد پالایش معرفی گردید [۱۵]. بنابراین و با در نظر گرفتن رواج غالب و گسترده بازیافت OCC، تأثیر بیوپلیمرهای کیتوزان و نانو سلولز فیبریله‌شده به‌صورت منفرد و توأم بر ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ OCC مورد بررسی و گزارش قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

خمیر کاغذ مورد استفاده در این پژوهش از نوع OCC و از کارخانه پارس کاغذ نکا (مازندران-شهرک صنعتی نکا) تهیه گردید. خمیر کاغذ مزبور از نقطه قبل از جعبه تغذیه ماشین کاغذ و بدون هرگونه افزودنی جمع‌آوری و درجه روانی استاندارد کانادایی (CSF<sup>۱</sup>) (۳۵۰-۳۲۰، pH ~ ۸ و دمای ۱۶ °C برای تهیه کاغذهای دست‌ساز آزمایشگاهی تنظیم گردید. نانو سلولز از نوع نانو سلولز فیبریله‌شده (NFC<sup>۲</sup>) و تهیه شده به روش مکانیکی، از شرکت دانش‌بنیان نانو نوین پلیمر (پارک علم و فناوری مازندران) و به‌صورت ژل سفیدرنگ با درصد خشکی ۳/۵، متوسط قطر الیاف ۳۵ نانومتر، درصد خلوص  $\leq 99\%$  خریداری و پس از رقیق‌سازی با درصد خشکی ۰/۱٪، مورد استفاده قرار گرفت. کیتوزان مصرفی نیز از شرکت Sigma Aldrich و با ظاهر پودری کرم‌رنگ و شفاف، وزن مولکولی متوسط (۳۱۰،۰۰۰-۱۹۰،۰۰۰)، درجه استیل‌زدائی ۸۵-۷۵ درصد و درجه خلوص ۱۰۰٪ خریداری گردید. به‌منظور آماده‌سازی برای تزریق محلول کیتوزان به دوغاب خمیر کاغذ، مقدار مورد نیاز کیتوزان در محیط اسید استیک ۱٪ و به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق توسط همزن حل شد. بهنگام ساخت کاغذ دست‌ساز آزمایشگاهی، ابتدا پلیمر کیتوزان به خمیر کاغذ در حال تلاطم با شدت دورانی ۵۰۰-۳۰۰ دور بر دقیقه افزوده و پس از ۱۰-۵ ثانیه، به‌شدت دوران ۱۰۰۰-۸۰۰ رسانیده و پس از کاهش به سطح حدود ۵۰۰ دور بر دقیقه، نانوذره سلولزی اضافه گردید. در نهایت و بلافاصله دوغاب مزبور به دستگاه ساخت کاغذ دست‌ساز منتقل و کاغذ آزمایشگاهی بر اساس استاندارد TAPPI به شماره T205 sp-02 تهیه شد. در این پژوهش اندازه‌گیری تمامی ویژگی‌ها منطبق بر استانداردهای آئین‌نامه TAPPI و مشتمل بر میزان ماندگاری در دستگاه DDJ<sup>۳</sup> (T261 cm-00) و درجه روانی CSF (T227 om-04)، شاخص

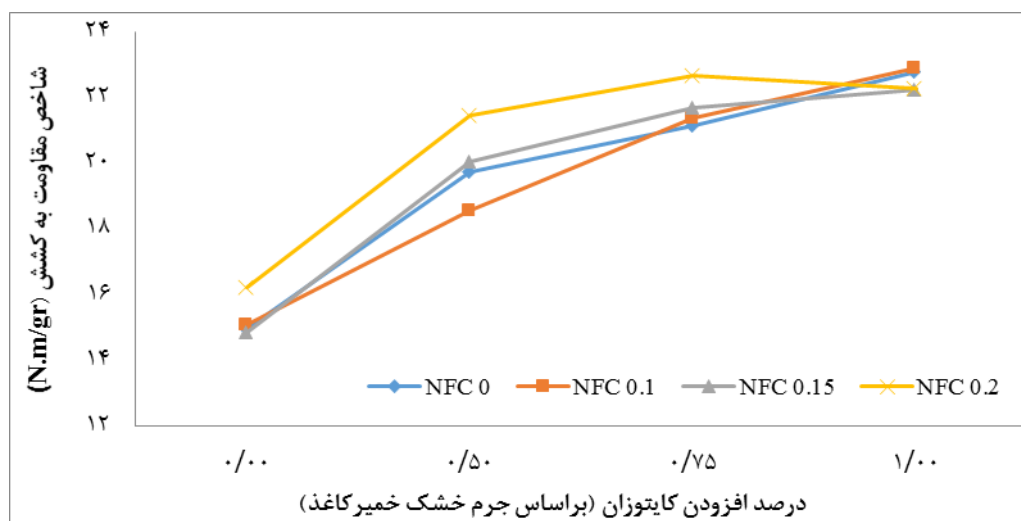
<sup>1</sup> Canadian Standard Freeness

<sup>2</sup> Nano Fibrillated Cellulose

<sup>3</sup> Dynamic Drainage Jar

توأمان نانو سلولز و کیتوزان فقط در سطح ۰/۲٪ نانو الیاف و ۰/۵٪ و ۰/۷۵٪ کیتوزان برتری معنی‌داری را نسبت به کاربرد منفرد کیتوزان نشان داده و در سایر تیمارهایی که پس از کیتوزان، نانو الیاف سلولزی به دوغاب خمیر کاغذ اضافه گشته، نه تنها بهبود معنی‌داری در مقاومت کششی کاغذ مشاهده نگردید، در برخی موارد کاهش شاخص کششی کاغذ بازیافتی را در مقایسه با کاربرد منفرد کیتوزان نیز رقم زد. به عبارتی دیگر و در مقایسه با نمونه شاهد فاقد هرگونه افزودنی، تلفیق دو بیوپلیمر منجر به افزایش چشمگیر و معنی‌دار شاخص کشش گردیده است، لیکن عمدتاً بهبود ایجادشده معطوف به نقش کیتوزان بوده است. می‌توان چنین استدلال نمود که نانو سلولز همچنان که به واسطه سطح ویژه بالا، امکان پیوندیابی بیشتر را فراهم می‌سازد؛ بار و پتانسیل زتای آنیونی سیستم را نیز تقویت نموده که در تعامل با کیتوزان کاتیونی می‌تواند کاهش کارایی آن را در پی داشته باشد. از طرف دیگری بهبودهای ایجادشده نیز ناشی از ایجاد سامانه مرکبی از نانوذره آنیونی و پلیمر کاتیونی در آن سطوح مصرفی مشخص بوده که با تشکیل فلاک‌های ریز و مستحکم‌تر؛ توزیع شبکه الیافی بهتر و قوی‌تر را موجب گردیده است. ویژگی‌های ماندگاری و آبگیری ارائه‌شده در ادامه نیز در سازگاری با این بخش است.

جذب می‌گردند [۱۶]. از آنجایی که مقاومت کششی از جمله ویژگی‌های وابسته به پیوندیابی الیاف سلولزی شناخته می‌شود؛ کیتوزان به‌عنوان ماده افزاینده مقاومت خشک که دارای ساختاری شبیه به رشته‌های سلولزی است، با استفاده از پیوندهای مزبور سبب بهبود اتصالات شبکه الیاف شده و به دنبال آن بهبود مقاومت کششی را موجب می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزودن سطوح مختلف نانو سلولز، بسته به سطح کاربرد کیتوزان تأثیرات متفاوتی را بر شاخص مقاومت به کشش داشته است. همچنین لازم به ذکر است که کاربرد منفرد نانو سلولز در سطح ۰/۲ درصد نیز حدود ۱۰٪ افزایش مقاومتی را به همراه داشته است. نانو الیاف سلولزی به دلیل سطح ویژه بالا و ایجاد درگیری فیزیکی با الیاف خمیر کاغذ، سبب افزایش تعداد پیوند هیدروژنی و افزایش سطح پیوند بین الیاف و در نتیجه استحکام بالاتر شبکه الیاف می‌گردد. Hassan و همکاران (۲۰۱۱) نیز با کاربرد سلولز میکروفیبریله در خمیر کاغذ باگاس، بهبود مقاومت خشک و تر کششی و کاهش مقاومت پارگی را گزارش نمودند [۱۷]. Hadilam و همکاران (۱۳۹۲) نیز با افزودن ۲۰ درصد نانوسلولز به خمیر کاغذ باگاس، شاهد افزایش مقاومت کششی بوده‌اند [۱۸]. در سایر سطوح پائین تر افزودن منفرد نانو الیاف، تأثیر ملموسی بر شاخص کشش مشاهده نشد، لیکن افزودن



شکل ۳- شاخص مقاومت به کشش کاغذ بازیافتی OCC

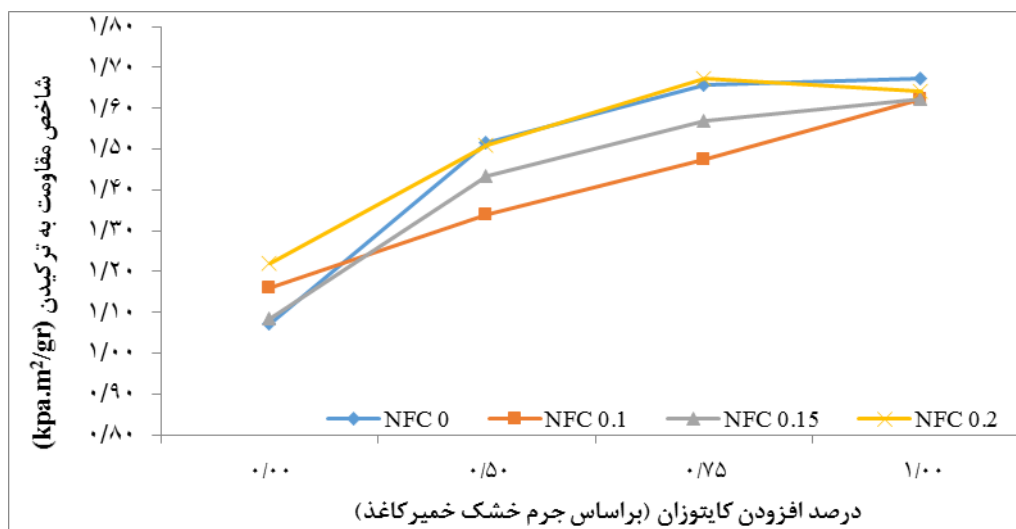
اتصال هیدروژنی، یونی و کووالانسی با سطوح الیاف سلولزی برخوردار است. از آنجایی که کیتوزان ساختاری بسیار شبیه به سلولز دارد، سازگاری و تمایل خوب و بالایی با سطح الیاف سلولزی داشته؛ در نتیجه برقراری اتصالات کووالانسی آمیدی،

### مقاومت به ترکیدن

شاخص مقاومت به ترکیدن نیز از عواملی همانند مقاومت کششی کاغذ پیروی می‌کند. کیتوزان با دارا بودن گروه‌های آمینی و نیز فراوانی گروه‌های هیدروکسیلی، از توانایی ایجاد

شاخص کشش را به همراه داشته است. کاربرد توأم بیوپلیمرهای کیتوزان و نانو الیاف سلولزی در هیچ‌یک از سطوح و تیمارهای مورد مطالعه، نه تنها تفوق و برتری نسبت به کاربرد منفرد کیتوزان به همراه نداشته است، بلکه در غالب موارد منجر به کاهش معنی‌دار تأثیر بهبوددهندگی کیتوزان کاتیونی نیز گشته است. کاهش مشاهده‌شده در مقاومت ترکیدن بر اثر افزودن سطوح نانو سلولز به خمیر کاغذ حاوی کیتوزان، بنا بر استدلال قبلی، قابل‌درک است. نکته جالب توجه، بهبود مقاومت‌های ترکیدن و کششی با افزایش سهم نانو الیاف در حضور کیتوزان است؛ در عین حالی که نهایتاً به مقادیری متناظر با کاربرد منفرد کیتوزان دست یابند. با این حال این تلفیق، همان‌گونه که در ادامه خواهد آمد، تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های خمیر کاغذ برجای گذاشته است. به نظر می‌رسد رسوب کیتوزان بر سطح الیاف و همراه شدن با سطح مناسب مصرف نانو سلولز آنیونی سبب تشکیل فلاک‌هایی مناسب و شکل‌گیری بهینه و در نتیجه بهبود ماندگاری شده باشد. بهبود ماندگاری و شکل‌گیری بر اثر افزایش حضور نانو الیاف نیز ارتقای پیوندیابی و مقاومت‌ها را در هر یک از سطوح کاربرد کیتوزان رقم زده است.

یونی و هیدروژنی تسهیل می‌گردد [۱۹]. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، شاخص مقاومت به ترکیدن با حضور کیتوزان به‌طور معنی‌دار و چشمگیری افزایش می‌یابد و ارتقایی در حدود ۵۰٪ را تجربه می‌نماید. همانند مقاومت کششی، بیشترین میزان بهبود در شاخص ترکیدن کاغذ بازیافتی، بین سطح صفر و ۵٪ مصرف کیتوزان مشاهده گردید و سطوح ۷۵٪ و ۱٪ کاربرد کیتوزان در هر دو شاخص کشش و ترکیدن، علیرغم افزایش معنی‌دار از شیب بهبود ملایم‌تری برخوردار گشته‌اند. Nada و همکاران (۲۰۰۵) نیز نتایج مشابهی را گزارش و اعلام نمودند که بیشترین افزایش در شاخص‌های مقاومتی کاغذ، به محض کاربرد کیتوزان محقق می‌گردد [۱۹]. Ashori و همکاران (۲۰۰۶) نیز گزارش نمودند که پلیمر کاتیونی کیتوزان به واسطه چگالی بار مثبت، به راحتی می‌تواند با الیاف سلولزی پیوند ایجاد کرده، سبب افزایش ماندگاری نرמה‌ها شده که در نتیجه به بهبود ویژگی‌های مقاومتی کمک نماید [۲۰]. همانند روند شاخص کششی کاغذ بازیافتی، افزودن منفرد نانو الیاف سلولز بهبود شاخص ترکیدن را سبب گردیده و در سطح کاربرد ۲٪، بیش از ۱۰٪ ارتقایی



شکل ۴- شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ بازیافتی OCC

کاغذ نیز تأثیرگذار می‌باشند. بطوریکه در خمیر کاغذهایی با قابلیت پائین پیوندیابی و تحمل پائین به پالایش نظیر خمیر کاغذهای مکانیکی، بهبود شاخص پارگی از طریق توسعه و افزایش پیوندها امکان‌پذیر است. لیکن در خمیر کاغذهای با میزان پیوندیابی زیاد، ویژگی‌های ذاتی الیاف عامل تعیین‌کننده بوده و بنابراین میانگین بلندتر طول و ضخامت بیشتر الیاف،

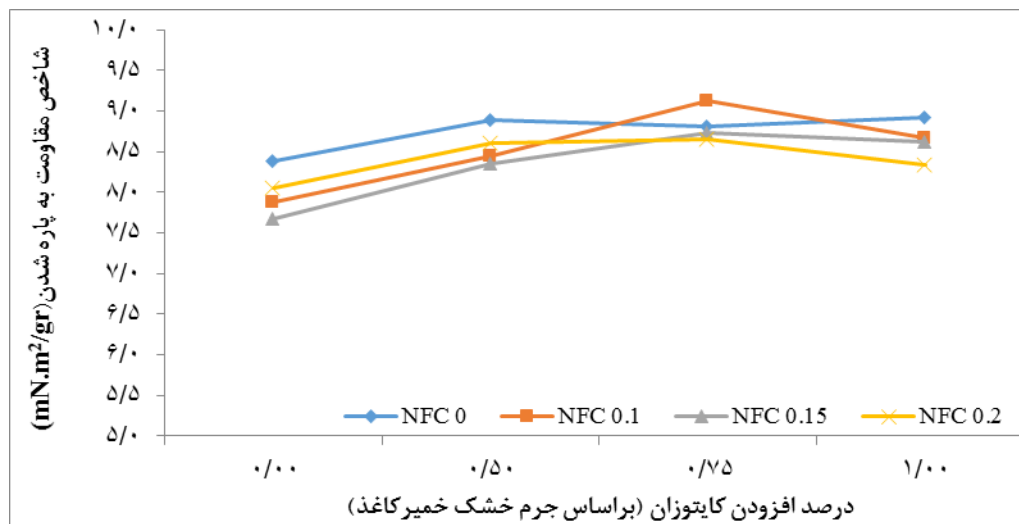
#### مقاومت به پاره شدن

این ویژگی از جمله پارامترهای مورد ارزیابی کیفی کاغذ و مقوا، به‌ویژه در کاربردهای بسته‌بندی است. عوامل اصلی تأثیرگذار در این مقاومت کاغذ شامل میانگین طول و قطر الیاف و نیز مقاومت ذاتی الیاف به‌کاررفته در تولید کاغذ است که البته میزان پیوندیابی اجزا و نیز جهت یافتگی آن‌ها در ساختار



پارگی کمتری را موجب گردیده است. در حالت کاربرد منفرد کیتوزان، افزایش حدود ۶ درصدی شاخص پارگی قابل گزارش است. با مراجعه به نتایج ماندگاری خمیر کاغذ، افزایش معنی‌دار ماندگاری در تیمارهای موصوف قابل مشاهده است که در تصور اولیه و با عنایت به حفظ مقادیر بالاتر نرمه در ساختار کاغذ، انتظار تنزل و یا تثبیت شاخص پارگی را تداعی می‌نماید. لیکن با در نظر گرفتن ماهیت خمیر کاغذهای بازیافتی در پیوندیابی ضعیف و نیز ماهیت ضعیف‌تر الیاف، چنین استدلال می‌گردد که نقش پیوندیابی بین لیفی در شاخص پارگی، پررنگ‌تر از طول و قطر الیاف ظاهر گشته و توانسته بهبود شاخص پارگی را به وجود آورد. همچنین همانند شاخص‌های کشش و ترکیدن ارائه شده، بیشترین افزایش در اولین سطح اعمال کیتوزان رخ داده و سطوح بالاتر کاربرد، تأثیر معنی‌داری بر این شاخص مقاومتی نداشته است.

مقاومت به پاره شدن مناسب‌تری را ارائه می‌دهد؛ بنابراین انتظار می‌رود که حضور الیافی با میانگین طول و ضخامت کمتر در دوغاب خمیر کاغذ، کاهش این ویژگی را به همراه داشته باشد. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در تمامی سطوح مختلف کاربرد منفرد نانو الیاف سلولز، شاخص پارگی کاغذ پائین تر از تیمار شاهد فاقد هرگونه افزودنی گزارش می‌گردد. همچنین با در نظر گرفتن نتایج ماندگاری خمیر کاغذ (شکل ۶)، مشخص می‌گردد که میزان ماندگاری نیز در تیمارهای مورد اشاره ارتقا یافته که به مفهوم حفظ بیشتر نرمه‌ها در ساختار ورقه کاغذ است؛ بنابراین حضور نانو الیاف و نیز نرمه‌های الیاف، کاهش میانگین قطر و طول الیاف را در کاغذ تولیدی در پی داشته که به صورت تنزل شاخص پارگی کاغذ نمود می‌یابد. در حضور سطوح مختلف کیتوزان نیز غالباً حضور نانو الیاف سلولزی در مقایسه با عدم حضور آن‌ها، شاخص



شکل ۵- شاخص مقاومت به پاره شدن کاغذ بازیافتی OCC

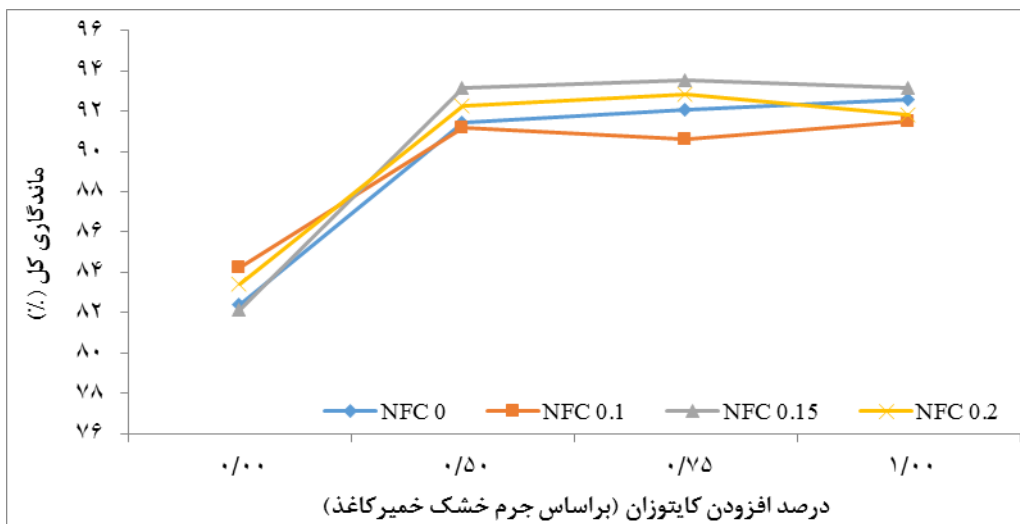
ماندگاری و بهره‌وری تولید را سبب گردیده است. کیتوزان کاتیونی به دلیل داشتن گروه‌های آمینوی با بار مثبت، سبب برقراری پیوند یونی با گروه‌های آنیونی الیاف و نرمه‌های سلولزی و حفظ آن‌ها در ساختار کاغذ شده و در نتیجه سبب افزایش ماندگاری خمیر کاغذ در حین فرایند شکل‌گیری می‌گردد. کاربرد منفرد نانو الیاف سلولز نیز افزایش ماندگاری را دربر داشته است. نانو فیبر سلولز با قرارگیری در فضای بین شبکه الیاف، افزایش اتصال و پیوندپذیری هیدروژنی و نیز تراکم و ماندگاری الیاف و نرمه‌ها را به وجود می‌آورد. در تیمارهای تلفیقی کیتوزان کاتیونی و نانو الیاف سلولزی، ماندگاری در سطح افزودن ۰/۵٪ نانو الیاف نه تنها از تأثیر مثبتی برخوردار

### ماندگاری کل خمیر کاغذ

برای اندازه‌گیری و رصد میزان حفظ الیاف و افزودنی‌های غیر لیفی در کاغذ و به عبارتی بهره‌وری تولید، از پارامتر ماندگاری کل استفاده می‌شود؛ بنابراین ماندگاری کل، معیاری از میزان کل مواد جامد باقی‌مانده شامل الیاف، نرمه‌ها و مواد افزودنی در کاغذ نهایی نسبت به وزن خشک مواد اولیه مصرف شده در ساخت کاغذ است. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، درصد ماندگاری کل با افزایش سطح کاربرد منفرد کیتوزان ارتقا یافته و همانند ویژگی‌های مقاومتی، بیشترین میزان افزایش ماندگاری با کاربرد اولین سطح کیتوزان (۰/۵٪) نسبت به عدم کاربرد آن پدید آمده و حدود ۱۱٪ بهبود

همچنین با دقت در سطوح بالاتر کاربرد نانو الیاف، این استدلال قابل توجیه است. از طرفی سطح کاربرد ۰/۲٪ نانو الیاف در مقایسه با سطح کاربرد ۰/۱۵٪ آن و در تمامی حالات حضور کیتوزان، از کارایی کمتری در بهبود ماندگاری برخوردار بوده که با در نظر گرفتن سطح ویژه و بار آنیونی بالای نانو الیاف و در پی آن افزایش بار آنیونی سوسپانسیون، قابل تفسیر است. با این حال، ایجاد سیستمی مرکب از نانو الیاف آنیونی و پلیمر کاتیونی (مشروط به کفایت و همپوشانی چگالی بارهای دو افزودنی واجد بارهای متضاد)، فلاک‌های ریزتر و متراکم‌تری را نسبت به کاربرد منفرد هر یک از آن دو تشکیل داده و باعث افزایش میزان ماندگاری اجزای سوسپانسیون خمیر کاغذ می‌گردد.

نگشته، بلکه کاهش ماندگاری را نسبت به تیمارهای متناظر منفرد کیتوزان را نیز موجب گردیده است. کاهش کارایی پلیمر در به دام انداختن و نگه‌داشتن اجزای قابل عبور از منافذ توری ماشین کاغذ ساز آزمایشگاهی و احتمالاً ناکافی بودن میزان نانوذرات برای تشکیل سامانه فلاک‌سازی مرکب تنها استدلال قابل ذکر برای این نتیجه است. چراکه، همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها اشاره گردید، پس از افزودن کیتوزان اعمال تنش برشی (هم زدن دوغاب خمیر کاغذ) منجر به شکستن فلاک‌های تشکیل یافته توسط زنجیره پلیمری کیتوزان می‌گردد. حال چنانچه نانو الیاف کافی برای پل زنی بین قطعات شکسته شده فلاک - که حامل پاره‌های زنجیره پلیمری کیتوزان هستند - موجود نباشد، اجزای از هم باز شده و پراکنده از یکدیگر؛ قابلیت گذر از منافذ توری و تنزل نرخ ماندگاری را خواهند داشت.



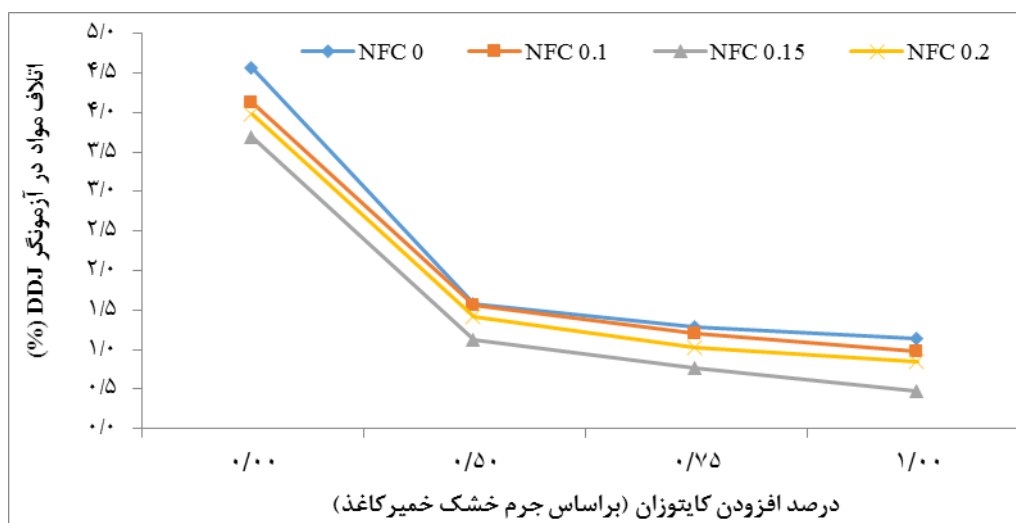
شکل ۶- درصد ماندگاری کل خمیر کاغذ باز یافتی OCC

منفرد نانو الیاف نیز از درصد عبور و اتلاف مواد کاسته و کاربرد توأمان دو بیوپلیمر مورد مطالعه در غالب موارد روندی را همانند ویژگی ماندگاری رصد شده در ماشین کاغذ ساز آزمایشگاهی رقم زده که در قالب کاهش اتلاف مواد قابل گزارش است. نکته جالب توجه برتری سطح کاربرد ۰/۱۵٪ نانو الیاف در مقایسه با سطح ۰/۱٪ آن است که همانند روند مشاهده شده (شکل ۶) در مقیاس بزرگ‌تر (کاغذ ساز)، منجر به حفظ بیشتر مواد در شبکه لیفی و عبور و اتلاف کمتر از منافذ توری دستگاه است. روند پدیده‌های قابل گزارش نیز همانند و در انطباق با بخش ماندگاری است.

### درصد اتلاف مواد در آزمونگر DDJ

با عنایت به اینکه پیگیری درصد مواد عبور یافته (درصد اتلاف مواد) از توری ماشین کاغذ آزمایشگاهی برای تحکیم استدلال‌های ارائه شده در بخش نتایج ماندگاری به راحتی میسر نیست، از شبیه‌سازی فرایند در دستگاه تحلیل گر آبیگری دینامیکی (DDJ) بهره‌گیری شد. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، کاربرد منفرد پلیمر کاتیونی کیتوزان به‌طور چشمگیر و معنی‌داری، میزان مواد عبور یافته از توری DDJ را کاهش داده که در سازگاری کامل با نتایج ماندگاری است و استدلال‌های ارائه شده در آن بخش نیز قابل تعمیم است. کاربرد



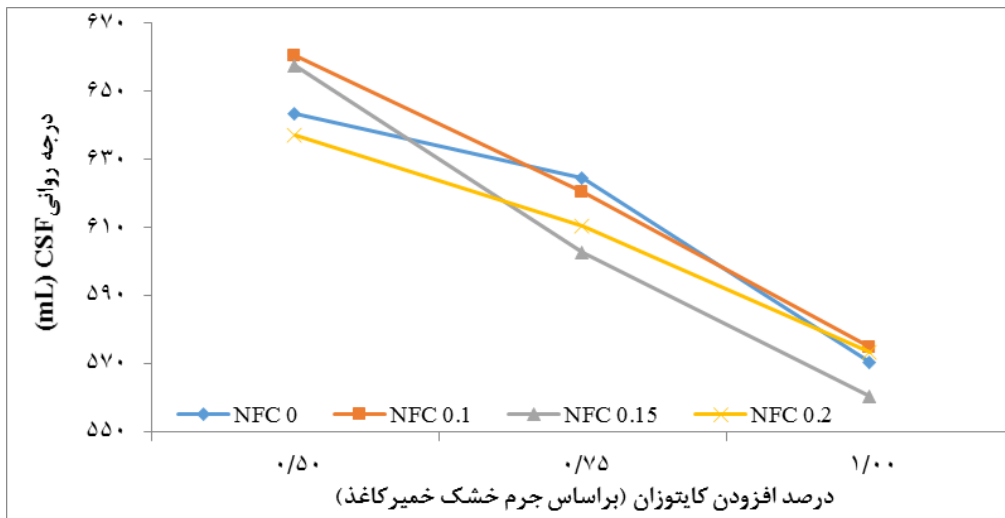


شکل ۷- درصد اتلاف مواد در دستگاه DDJ خمیر کاغذ باز یافتی OCC

### درجه روانی خمیر کاغذ

آبگیری در ماشین کاغذ سوای از ماهیت الیاف، به میزان زیادی تحت تأثیر شدت و ساختار دلمه‌های تشکیل شده بین اجزای سوسپانسیون و نیز سیستم ماندگاری است. افزایش توانایی آبگیری از خمیر کاغذ، مزایای بسیاری برای صنعت کاغذسازی به همراه دارد؛ چراکه امکان افزایش سرعت ماشین، افزایش تولید، کاهش مصرف انرژی در جعبه‌های مکشی، پرس-ها و خشک‌کن‌ها و به‌طور کلی کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری را فراهم می‌آورد. تأثیرات اعمال سامانه‌های مورد مطالعه بر کیفیت آبگیری از خمیر کاغذ، در شکل ۸ آمده که جهت ارائه بهینه و واضح نتایج و با توجه به دامنه گسترده تأثیرات ایجاد شده، به تیمارهای شاهد و حاوی نانو الیاف منفرد در شکل مزبور پرداخته نشد. کاربرد منفرد کیتوزان افزایش درجه روانی خمیر کاغذ از ۳۵۰ میلی‌لیتر در نمونه شاهد و فاقد هرگونه افزودنی به ۶۴۴ میلی‌لیتر در پایین‌ترین سطح کاربرد آن (۰/۵٪) را سبب گردیده است. تفسیر تشکیل فلاک بین اجزای دوغاب و کاهش مساحت تماس بین سطوح آب‌دوست اجزا که ماندگاری بالاتر، بهبود شکل‌گیری و مقاومت‌ها را نیز سبب گردیده بود، توسط جدایش آسان‌تر آب از سوسپانسیون و افزایش درجه روانی قابل تأیید و تعمیم است. باین‌حال افزایش

درصد کاربرد کیتوزان نه‌تنها منجر به سهولت بیشتر رهایش آب نگردید که محبوس شدن بیشتر آب و افزایش کندی خمیر کاغذ را نیز به همراه داشته و به‌طور پیوسته و معنی‌داری افت درجه روانی خمیر کاغذ به سطح ۵۷۰ میلی‌لیتر را رقم‌زده است. تشکیل فلاک‌هایی درشت و حجیم و واجد میزان بالاتری آب درگیر شده، در سطوح بالای کاربرد پلیمرها نیز گزارش گردیده است [۲۱]. کاربرد منفرد نانو الیاف نیز منجر به کاهش درجه روانی خمیر کاغذ به سطح حدودی ۳۲۵ میلی‌لیتر شده و تفاوتی نیز بین سطوح مختلف کاربرد نانو الیاف مشاهده نگردید. رفتار ژله‌ای، قابلیت جذب و نگهداری بالای آب، بالا بردن ویسکوزیته سوسپانسیون و همچنین قرارگیری نانو الیاف در حفرات شبکه الیاف سبب کاهش پیوستگی بین حفرات و کاهش درجه روانی می‌شود. همچنین احتمال گرفتگی کلی یا جزئی منافذ توری نیز قابل گزارش است. افزودن ۰/۱٪ نانو الیاف پس از کیتوزان به سوسپانسیون خمیر کاغذ، منجر به بهبود غیر معنی‌دار درجه روانی و آبگیری گشته که تشکیل فلاک‌هایی متراکم‌تر و کوچک‌تر با قابلیت نگهداشت کمتر آب نسبت به حالت پلیمری منفرد، در تفسیر آن قابل استناد است. باین‌حال افزایش کاربرد نانو الیاف از تأثیر معنی‌داری بر درجه روانی برخوردار نبوده و غالباً آبگیری را اندکی کندتر و سخت‌تر نموده است.

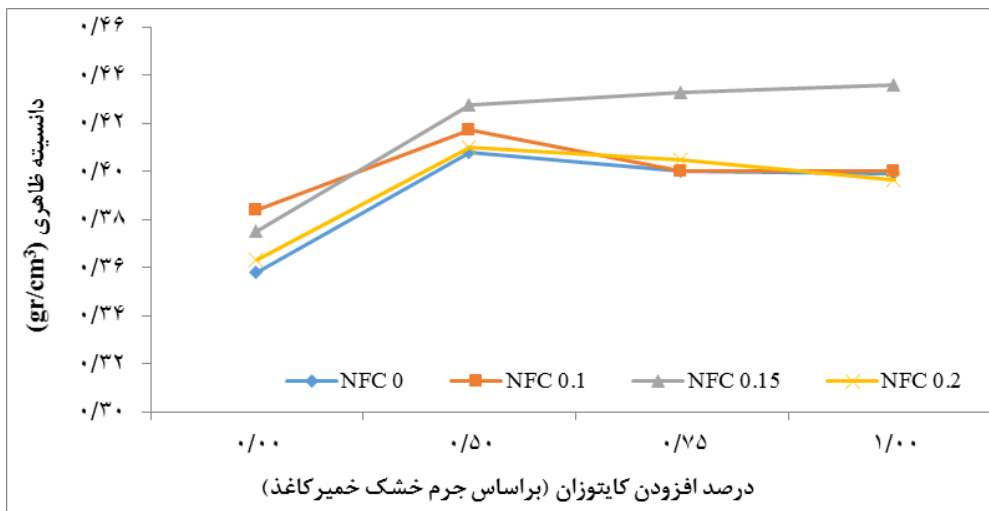


شکل ۸- درجه روانی CSF خمیر کاغذ باز یافتی OCC

می‌گردد [۲۲]. دانسیته کاغذ با پالایش و نیز افزودن مواد شیمیایی افزایش یافته که از جنبه‌های مختلف، مواد شیمیایی از برتری و رجحان برخوردار می‌باشند. همچنین افزایش ماندگاری اجزای دوغاب، به‌ویژه نرمه‌های الیاف منجر به افزایش دانسیته کاغذ تولیدی می‌گردد [۲]. لازم به ذکر است که افزایش دانسیته در ورقه در حال شکل‌گیری کاغذ، به انتقال مطلوب‌تر و بهینه حرارت در خشک‌کن نیز کمک می‌نماید [۲۲]. همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، کاربرد منفرد افزودنی کیتوزان به‌طور چشمگیر و معنی‌داری دانسیته ظاهری را ارتقا داده و افزایش مصرف آن تأثیری بر این ویژگی ساختاری کاغذ نداشته است.

#### دانسیته ظاهری کاغذ

دانسیته کاغذ از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های کاغذ به‌ویژه در کاربردهای بسته‌بندی محسوب می‌گردد. دانسیته کاغذ بر ویژگی‌های مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و فشاری کاغذ تأثیرگذار بوده و در شبکه متراکم و با دانسیته بالای کاغذ، پیچ‌خوردگی و تابیدگی الیاف کمتر بروز یافته و مقاومت کاغذ را در برابر تنش‌های خمشی نیز ارتقا می‌دهد. البته در مورد کاغذهای بسته‌بندی، دانسیته بسیار بالا نامناسب تلقی می‌گردد، چراکه منجر به کاهش سفتی خمشی گشته و در فرایندهای تبدیلی کنگره‌سازی نیز منجر به پارگی در هنگام خیس‌شدن



شکل ۹- دانسیته کاغذ باز یافتی OCC

از مواد افزودنی گردیده که تمایل به سمت افزودنی‌های بیوپلیمری شایان توجه بسیار است. استفاده از ذرات نانو هم از رویکردهای جدید در این زمینه بوده که البته در مقیاس تجاری با چالش‌هایی همچون هزینه بالاتر، قابلیت پراکندگی و ماندگاری پایین، برهمکنش‌های نامطلوب احتمالی، دانش ناکافی در رابطه با استفاده مؤثر از آن‌ها و ... نیز مواجه است. در جستجوی تأثیر بیوپلیمرهای کیتوزان و نانو الیاف سلولزی به صورت منفرد و توأم با یکدیگر بر ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ بازیافتی، نتایج نشان داد که افزودن منفرد کیتوزان بهبود معنی‌دار تمامی ویژگی‌های مقاومتی و دانسیته کاغذ، ماندگاری خمیر کاغذ بر روی توری شکل‌گیری و کاهش اتلاف مواد را موجب می‌گردد. بهبود چشمگیر و معنی‌دار آگیری نیز حاصل گردیده که البته با افزایش درصد افزودن کیتوزان، از میزان بهبود حاصله کاسته می‌شود. کاربرد منفرد نانو الیاف سلولزی نیز افزایش در ماندگاری خمیر کاغذ، دانسیته شاخص‌های کشش و ترکیدن کاغذ؛ کاهش درجه روانی و اتلاف مواد از خمیر کاغذ و نیز افت شاخص پارگی را سبب می‌گردد. کاربرد نانو الیاف سلولزی پس از کیتوزان به خمیر کاغذ، نه تنها تأثیر افزایشی در شاخص‌های مقاومتی و دانسیته (به‌استثنای NFC ۰/۱۵٪) کاغذ نداشته، بلکه گاهی کاهش مقاومت‌ها را نیز سبب گردیده است. ویژگی خمیر کاغذ نیز نوساناتی را، گاه افزایشی و گاه کاهش‌ی نسبت به کاربرد منفرد، در سطوح مختلف کاربرد هم‌زمان دو بیوپلیمر نشان داده است.

کاربرد منفرد نانو الیاف نیز ارتقای دانسیته را به همراه داشته، لیکن افزایش مصرف آن از میزان دانسیته کاسته و کاغذی حجیم‌تر را ارائه نموده که با داده‌های ماندگاری سازگار است. چراکه در روند مشابه، ماندگاری کاغذهای حاوی سطوح بالاتر کاربرد منفرد نانو الیاف؛ از میزان ماندگاری کمتری برخوردار گشته‌اند. کاربرد هم‌زمان نانو الیاف سلولزی پس از کیتوزان، غالباً افزایش تراکم و دانسیته کاغذ را به همراه داشته که حکایت از افزایش ماندگاری اجزا در شبکه شکل یافته است (شکل ۶). در این میان سطح کاربرد ۰/۱۵٪ نانو الیاف سلولزی پس از افزودن کیتوزان، بیشترین دانسیته را در پی داشته که می‌تواند به ماندگاری بالاتر اجزای دوغاب تعمیم داده شود که با نتایج ماندگاری کل (شکل ۶) و اتلاف مواد در آزمونگر DDJ (شکل ۷) در سازگاری است. همچنین تشکیل دلمه‌های اجزا و توزیع متناسب اجزای ماندگار شده نیز قابل استدلال است که با نتایج درجه روانی خمیر کاغذ (شکل ۸) نیز قابل تعمیم و تأیید است. چراکه نتایج در هم‌رفتگی و نزدیک‌تر شدن اجزای دوغاب و نیز کاهش سطح تماس با آب، نه تنها افزایش تراکم و دانسیته کاغذ، بلکه سهولت آگیری را نیز فراهم می‌آورد.

### نتیجه‌گیری

ضرورت بازیافت کاغذ از جنبه‌های مختلف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی از یک طرف و الزام به تأمین ویژگی‌های فرایند و فرآورده تولیدی از طرفی دیگر منجر به افزایش استفاده

### منابع

- [1] Jalali Torshizi, H., Mirshokraie, S. A., Faezipour, M., Hamzeh, Y. and Resalati, H., 2010. Application of galbanum gum (ferula gummosa) polysaccharide as a natural polymer to improve dry strength properties of recycled papers obtained from old corrugated cartons. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 23(4): 345-353. (In Persian).
- [2] Jalali Torshizi, H., Zare Bidoki, S., Ramezani, O. and Rudi, H., 2014. Effect of Cationic Poly Acrylamide - Nano Bentonite System on Retention, Drainage and Properties of Paper Recycled from OCC. *Iranian Journal of Wood and Paper Research*, 29(3): 474-483. (In Persian).
- [3] Muzzarelli, R. A., 1985. Chemical modified chitosan in "Chitin in nature and technology" Ed. by Muzzarelli, R. A., Jeuniaux, C. and Gooday, G. W., Plenum Press, N.Y. USA, 295 p.
- [4] Allan, G. G., Fox J. R., Crosby, G. D. and Sarkanen, K. V., 1977. Chitosan: a mediator for fibre-water interactions in papermaking, in "Fibre-Water interactions in papermaking", Transactions of the symposium held at Oxford: Sept. 1977, Technical Division of the Paper and Board Industry, London, U.K., pp.765.
- [5] Domszy, J. D., Moore, G. K. and Roberts, G. A. F., 1975. The adsorption of chitosan on cellulose, In "Cellulose and its derivatives", Ed. by Kennedy, J. J. et al, Ellis Howard Ltd. Ch. 42, pp. 463.
- [6] Lindstrom, T., Wagberg, L. and Larsson, T., 2005. On the nature of joint strength in paper: a review of dry and wet strength resins used in paper manufacturing. 13th Fundamental research symposium, Cambridge, Sept. 2005, p 457- 562.

- [7] Gullichsen, J. and Paulapuro, H., 1999. Papermaking Chemistry, Papermaking science and technology 19 series, 229 p.
- [8] Andalibian, M., Mahdavi, S., Kermanian, H. and Ramezani, O., 2013. The influence of OCC pulp refining to improve the properties of test liner board. Iranian Journal of Wood and Paper Research, 28(1): 77-88. (In Persian).
- [9] Salam, A., Lucian, A., L. and Jameel, H., 2013. Synthesis, characterization, and evaluation of chitosan-complexed starch nanoparticles on the physical properties of recycled paper furnish. ACS Applied Materials & Interfaces Journal, 5: 11029–11037.
- [10] González, I., Boufi, S., Angels Pèlach, M., Alcalà, M., Vilaseca, f. and Mutjé, P., 2012. Nanofibrillated cellulose as paper additive in eucalyptus pulps. BioResources, 7(4), 5167-5180.
- [11] Kajanto, I. and Kosonen, M., 2012. The potential use of micro- and nanofibrillated cellulose as a reinforcing element in paper. Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes, 2(6): 42-48.
- [12] Myllytie, P., Holappa, S., Paltakari, J. and Laine, J., 2009. Effect of polymers on aggregation of cellulose fibrils and its implication on strength development in wet paper web. Nordic Pulp and Paper Research, 24(2): 125-134.
- [13] Nicu, R., Bobu, A., Miranda, R. and Blanco, A., 2006. Flocculation efficiency of chitosan for papermaking applications. BioResources, 8(1): 768-784.
- [14] Nada, A. M. A., El-Sakhawy, M., Kamel, S., Eid, M. A. M. M. and Adel, A., 2006. Mechanical and electrical properties of paper sheets treated with chitosan and its derivatives. Carbohydrate Polymers, 63: 113–121.
- [15] Sehaqui, H., Zhou, Q. and Berglund, L., 2013. Nanofibrillated cellulose for enhancement of strength in high-density paper structures. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 28(2): 182-189.
- [16] Li, H., Du, Y. and Xu, Y., 2004. Interaction of cationized chitosan with components in a chemical pulp suspension. Carbohydrate Polymers, 58: 205-214.
- [17] Hassan, E. A., Hassan, M. L. and Oksman, K., 2011. Improvement of paper sheets properties of bagasse pulp with microfibrillated cellulose isolated from xylanase treated bagasse. Wood and Fiber Science, 43(1): 1-7.
- [18] Hadilam, M. M., Afra, E. and Yousefi, H., 2013. Effect of Cellulose nanofibers on the properties of bagasse paper. Journal of Forest and Wood Products, 66(3): 351-366.
- [19] Nada, A. M. A., El-Sakhawy, 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): 359-377.
- [20] Ashori, A., Harun, J., Zin, W. and Nor Mohd. Yusoff, M., 2006. Enhancing Dry-Strength Properties of and kenaf (*Hibiscus Cannabinus*) paper through chitosan. Polymer-Plastic Technology Engineering, 45:125-129.
- [21] Thorn, I. and Au, C. O., 2001, Applications of Wet-End Paper Chemistry, Springer, 232p.
- [22] Gullichsen, J. and Paulapuro, H., 1999. Paper physics, Papermaking science and technology 19 series, 196 p.

## Performance of nano fibrillated cellulose (NFC) and chitosan bio-polymeric system on recycled pulp and paper properties of old corrugated containers (OCC)

### Abstract

Application of dry strength additives is regarded as a sustainable strategy toward improvement of recycle paper properties, and utilization of bio-based materials has been enhanced in this aspect extensively, respecting to different technological and environmental issues. In order to improve products properties, researches have focused on natural and processed forms of cellulose and chitosan as the most abundant biopolymers with unique characteristics. Effects of the biopolymers, chitosan and nano fibrillated cellulose (NFC), individually and combined together, on recycled pulp and paper properties showed that density and strength indices of paper (tensile, burst and tear), pulp drainage and retention during sheet formation were improved with a reduction in the material loss compared to the blank. Chitosan addition caused significant enhancement on all of the strengths, density and pulp retention and also a reduction in material loss. Dewatering of the pulp suspension (CSF) was significantly improved by chitosan presence, with decline resulted from the higher addition level. The resulted developments were attributed to polymeric character, structural similarity and high bonding ability of chitosan with cellulosic fibers. Individual addition of NFC produced boost in the pulp retention, paper density, tensile and burst indices and fall in pulp freeness, material loss and tear index. Anionic nature, high specific surface area and hydrogen bonding ability of NFC were ascribed to these. Application of NFC just after chitosan as a complex mechanism in papermaking wet end not only had no effect in density and strength indices of recycled paper (except NFC 0.15%), but also reduced the strengths in some cases. In the complex, the pulp properties were fluctuated compared to chitosan treatment, but were prior compared to nano fibrillated cellulose.

**Key words:** chitosan, nano fibrillated cellulose, recycled pulp & paper properties.

**H. Pourkarim Dodangeh<sup>1</sup>**  
**H. Jalali Torshizi<sup>2\*</sup>**  
**H. Rudi<sup>3</sup>**  
**O. Ramezani<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> M.Sc. student, Cellulose and Paper Technology Dept., Shahid Beheshti University, Iran.

<sup>2</sup> Assist. Prof., Cellulose and Paper Technology Dept., Shahid Beheshti University, Iran

<sup>3</sup> Assist. Prof., Cellulose and Paper Technology Dept., Shahid Beheshti University, Iran

<sup>4</sup> Assist. Prof., Cellulose and Paper Technology Dept., Shahid Beheshti University, Iran

Corresponding author:  
[H\\_Jalali@sbu.ac.ir](mailto:H_Jalali@sbu.ac.ir)

Received: 2015/12/19  
Accepted: 2016/01/27

