

## تقویت مقاومت کششی لایه تر و خشک کاغذ حاصل از خمیر شیمیایی-مکانیکی با نانوالیاف

### سلولزی و PAE

محمد هادی مرادیان<sup>۱</sup>، پژمان رضایتی چرانی<sup>۲\*</sup>، سیده فائقه موسوی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، ایران

۲\*- استادیار گروه مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، ایران

۳- دانشجو دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران

\*ایمیل نویسنده مسئول: rezayati@bkatu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۱/۱۷

#### چکیده

برخی صنایع کاغذسازی برای افزایش مقاومت کششی لایه تر کاغذ جهت جلوگیری از پاره شدن حین تولید از خمیر کاغذ الیاف بلند (LFP) و یا رزین‌های مقاومت تر استفاده می‌کنند. در این تحقیق نقش پلی‌آمیدوآمین‌ایپیکلورویدرین (PAE) در صورت استفاده توأم با نانوالیاف سلولزی (NFC) در مقایسه با LFP در بهبود مقاومت کششی لایه تر و خشک کاغذ ساخته شده با گراماژ ۱۳۰ گرم بر متر مربع از خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی بررسی شد. ابتدا NFC (۳ و ۴ درصد) به همراه PAE (۰/۷ و ۱ درصد) و خمیر کاغذ الیاف بلند به سوسپانسیون خمیر کاغذ افزوده شد و سپس نمدهای دست‌ساز ساخته شد. مدت آبیگری هنگام ساخت نمدها اندازه‌گیری شد و در ادامه مقاومت کششی پس از رسیدن درصد خشکی لایه تر کاغذ به ۳۵، ۵۵، ۷۵ و هوا-خشک، هنگام خشک کردن طی ساخت کاغذ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد در درصد خشکی ۳۵ و ۵۵ نمدها، تیمار ۳ درصد NFC با ۰/۷ درصد PAE مقاومت کششی در حد ۲۰ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند ایجاد کرد و در درصد خشکی ۷۵ مقاومت کششی بیشتر به دست آمد. به طور کلی NFC به همراه PAE می‌تواند مقاومت کششی لایه تر کاغذ از خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی را تا حد خمیر کاغذ الیاف بلند یا بیشتر افزایش دهد اگر چه سرعت زهکشی آب کاهش خواهد یافت.

#### کلمات کلیدی

پلی‌آمیدوآمین‌ایپیکلورویدرین (PAE)، "خمیر کاغذ الیاف بلند"، "مقاومت کششی لایه تر کاغذ"، "نانوالیاف سلولزی".

## Strengthening tensile strength of wet and dry layer of paper from chemical-mechanical pulp by cellulose nanofibers and PAE

Mohammad Hadi Moradian<sup>1</sup>, Pejman Rezayati Charani<sup>2\*</sup>, Seyedeh Faegheh Mousavi<sup>3</sup>

1- Assistant professor, Department of Cellulose Technology Engineering, Natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

2\*-Corresponds author: Assistant professor, Department of Cellulose Technology Engineering, Natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

3- PhD student, Department of Wood and Paper Sciences, Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

\*Email Address: rezayati@bkatu.ac.ir

#### Abstract

Some paper industries use long fiber pulp (LFP) and or wet strength resins to increase resistance and prevent web breakings during production. In this study, it was investigated the role of polyamidoamine epichlorohydrin (PAE) in combination with cellulose nanofibers (CNF) compared to LFP in improving wet and dry layer of paper tensile strength of chemi-mechanical pulp (CMP) by handsheet making with grammage of 130 g/m<sup>2</sup>. First, cellulose nanofibers (3% and 4%) with PAE (0.7% and 1%) and long fiber pulp (LFP) were added to the pulp suspension and then handsheet paper was made. The dewatering period was measured when making handsheet. Then, the tensile strength was measured after drying to 35, 55, 75 and air-dried dryness (%) during drying within handsheet making. Results showed, wet layer of paper with dryness of 35 and 55% treated with 3% CNF and 7% PAE showed tensile strength close to samples with 20% LFP and in 75% dryness showed higher tensile strength than treatments with LFP. Generally, treatments with CNF and PAE had wet layer of paper tensile strength values during production the same as or more than long fiber pulp, although the water drainage rate will be decrease.

#### Keywords

"Polyamidoamine epichlorohydrin (PAE)", "Long fiber pulp", "Wet layer of paper tensile strength", "Cellulose nanofiber".

شده مربوط به ابتدای دهه ۱۹۹۰ بوده است (Siqueira et al., 2015). رزین‌های مقاومت تر عموماً توسط لیاف سلولزی از طریق جاذبه الکترواستاتیکی بین گروه‌های عاملی با بار مثبت رزین و گروه‌های با بار منفی کربوکسیل لیاف جذب می‌شوند (Ankerfors et al., 2009). گروه‌های کربوکسیل موجود در همی سلولز مثل گلوکرونیک اسید، گروه‌های عاملی اصلی در ایجاد نواحی باردار در لیاف در شرایط معمول کاغذسازی محسوب می‌شوند (Bhardwaj et al., 2004). پلی‌آمیدوآمین‌اپی‌کلروهیدرین<sup>۱</sup> (PAE) به‌عنوان یک رزین مقاومت تر محلول در آب است که در اواخر دهه ۱۹۵۰ گسترش یافت و تجاری شد که به‌دلیل خاصیت کاتیونی آن، به واسطه داشتن گروه‌های آمینی در شرایط اسیدی و گروه‌های آمونیومی کاتیونی، ویژگی‌های پلی‌الکترولیتی دارد. این رزین به‌دلیل عملکرد مناسب و ارزان قیمت بودن همچنان به‌عنوان پرستفاده‌ترین افزودنی مقاومت تر دایمی برای کاغذ گزارش شده است (Su et al., 2014). در فرآیند کاغذسازی، PAE ممکن است به‌عنوان کمک نگهدارنده نیز استفاده شود (Fukuda et al., 2005). علاوه بر PAE در ایجاد مقاومت تر دائمی، اخیراً عمل‌آوری کاغذ با پلی‌اکریل‌آمید گلی‌اکسالدار شده<sup>۲</sup> (GPAM) سنتزی نیز برای ایجاد مقاومت تر موقت گزارش شده است که ۱۶ درصد مقاومت کششی تر، ۱۰ درصد مقاومت کششی خشک، ۵ درصد مقاومت به ترکیدن و ۲۳ درصد مقدار جذب انرژي کششی بیشتری در مقایسه با PAE در کاغذ ایجاد کرده است (Hamzeh et al., 2015). کربوکسی متیل سلولز نیز گزارش شده است که می‌تواند مقاومت تر کاغذ را در درصد خشکی حدود ۵۰ به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش دهد (Myllytie, 2018). لیاف سلولزی به‌عنوان منبع اصلی تولید محصولات کاغذ محسوب می‌شود که در چند دهه اخیر با گسترش تحقیقات در خصوص استفاده از مواد در مقیاس نانو، استفاده از لیاف سلولزی نیز در این ابعاد با نام عمومی نانوالیاف سلولزی<sup>۳</sup> (CNF) همراه با مواد افزودنی متداول کاغذ مورد توجه قرار گرفته است (Salas et al., 2019, Lengowski et al., 2019, Hubbe, 2019). نانوالیاف سلولزی را می‌توان به‌طریق مختلفی از جمله مکانیکی، شیمیایی، آنزیمی، و یا ترکیبی از آنها به اجزایی در ابعاد نانو تبدیل کرد (de Campos et al., 2019). امروزه به‌دلیل ایجاد ویژگی‌های مقاومتری بهتر کاغذ علاقه فزاینده‌ای برای استفاده از این ماده در صنعت کاغذسازی وجود دارد (Ahola et al., 2008). نانوالیاف سلولزی مانند لیاف سلولزی به‌دلیل داشتن گروه‌هایی مثل کربوکسیل در سطح خود بار آنیونی دارند. معمولاً بار سطحی آنیونی مواد بر ویژگی‌های جذب سطحی پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی تاثیر می‌گذارد. در فرآیند ساخت کاغذ از انواعی از پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی برای جذب در سطح لیاف سلولزی می‌شود تا کارایی فرآیند تولید و کیفیت نهایی محصول را افزایش یابد. PAE به‌عنوان یک پلی‌الکترولیت کاتیونی و ایجاد کننده مقاومت لایه تر در فرآیند کاغذسازی با لیاف واکنش می‌دهد که این واکنش احتمالاً از طریق ایجاد پیوند بین گروه آزتیدینوم<sup>۴</sup> PAE و کربوکسیل سلولز است

تمایل گسترده‌ای همواره در صنایع کاغذسازی برای کاهش گراماژ و افزایش سرعت ماشین کاغذ برای تولید بیشتر با حفظ انرژي و منابع وجود دارد. مثلاً در صنایع تولید کاغذ بسته‌بندی توجهات به تولید کاغذ از گراماژ ۷۰ تا ۹۰ گرم بر متر مربع به جای ۱۱۰ تا ۱۳۰ گرم بر متر مربع ضمن افزایش سرعت ماشین کاغذ تا ۱۹۰۰ متر بر دقیقه می‌باشد (Müller, 2010). بیشتر کاغذها مثلاً در صنایع چوب و کاغذ ایران مثل صنایع چوب و کاغذ چوکا گیلان، چوب و کاغذ مازندران، صنایع کاغذ پارس با ماشین کاغذهایی با نواحی بدون حمایت<sup>۱</sup> در انتهای بخش شکل‌گیری و پرس و بین خشک‌کن‌ها تولید می‌شوند. معمولاً در نواحی بدون حمایت هنگام تولید، مقاومت لایه تر کاغذ یک عامل مهم در تنظیم کشش است. زیرا در این نواحی نمد کاغذ بدون هیچ حمایتگری مثل پارچه‌های پرس و یا خشک‌کن عموماً تحت تنش کششی قرار دارد و معمولاً از مهمترین نواحی پارگی لایه تر کاغذ در ماشین کاغذ محسوب می‌شود (Lindqvist et al., 2012). مقاومت لایه تر کاغذ در ماشین کاغذ معمولاً وابسته با عواملی چون درصد خشکی، طول و قطر لیاف (در درصد خشکی مورد بررسی)، میزان پالایش خمیر کاغذ، میزان فشردگی لایه تر در پرس (تنظیمات پرس ماشین کاغذ)، سطح تماس لیاف با یکدیگر، دمای آب، تاثیر مواد فعال سطحی استفاده شده برای تقویت اتصال بین لیاف (نوع افزودنی‌ها)، زبری، صافی سطح لیاف، انعطاف پذیری و درهم‌آمیختگی بین لیاف، و نیروهای مویرگی و والدروال در شبکه نمد کاغذ، شرایط شکل‌گیری روی توری ماشین کاغذ است (Belle and Odermatt, 2016, Hubbe, 2010, Wågberg and R. Grenz., 2010, Belle et al., 2014). معمولاً برای بهبود مقاومت لایه تر کاغذ می‌توان از رزین‌های مقاومت تر استفاده نمود که بیشتر در تولید محصولاتمانند کاغذهای بهداشتی، حوله‌های کاغذی، پاکت شیر، کاغذ عکاسی، پوشش مواد خوراکی، اسناد، پوشش‌های ضد آب و غیره استفاده می‌شوند (Obokata et al., 2005). عموماً کاغذ تیمار شده با رزین‌های مقاومت تر، حداقل ۱۵ درصد از مقاومت خشک خود را هنگام تر شدن با آب حفظ می‌کند. لازم به ذکر است که استفاده از این بسپارها بعضاً می‌تواند کاغذ را در برابر خمیر شدن مجدد نیز مقاوم کند مگر اینکه ترکیب صحیحی از مواد شیمیایی و انرژي مکانیکی بر آن اعمال شود (Siqueira et al., 2013). افزودنی‌های مقاومت تر شامل افزودنی‌های ویژه به خمیر کاغذ بکر، بازافتی، یا مخلوط است که از طریق تیمارهای ایجاد کننده مقاومت لایه تر کاغذ قبل از شکل‌گیری نمد فیبری اعمال می‌شوند. این مواد افزودنی اکثراً پایه رزین‌های کاتیونی دارند که به‌عنوان رزین‌های مقاومت تر از طریق نیروهای الکترواستاتیکی و والدروال جذب لیاف می‌شوند و در طی خشک شدن کاغذ، با ایجاد شبکه سه‌بعدی از طریق برقراری اتصال عرضی، مقاومت لایه تر کاغذ را افزایش می‌دهند (Israelachvili, 2011). با این وجود عملکرد دقیق این افزودنی‌ها هنوز کاملاً مشخص نیست و تنها مکانیسم پیشنهاد

۴- Cellulosic nanofibers

۵ - Azetidinium

۱ - open draw

۲ - Polyamidoamine epichlorohydrin (PAE)

۳- Glyoxalated polyacrylamide

سوسپانسیون قبل از مخلوط شدن با CMP به صورت تصادفی نمونه برداری انجام گرفت. نانوالیاف سلولزی، از خمیر کاغذ سودای باگاس رنگبری شده تولیدی در صنایع کاغذ پارس، به روش مکانیکی با استفاده از فرآیند هموژنایزر در شرکت صنعتی توسعه سپارش نانوسلولز کاسپین تهیه شد. همچنین بسیار PAE با خلوص ۱۲ درصد از شرکت کلارنت<sup>۴</sup> آلمان خریداری شد. جدول شماره ۲ انواع تیمارهای به کار رفته در این تحقیق و سطوح مواد افزودنی به خمیر کاغذ CMP را نشان می دهد.

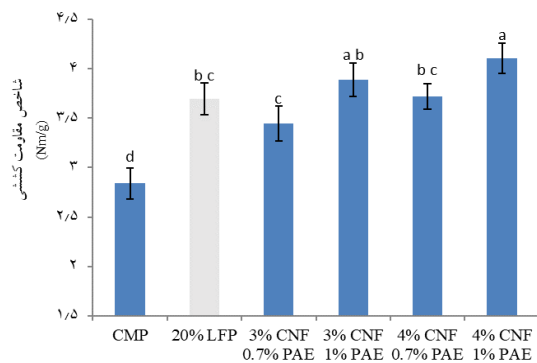
جدول ۱- ویژگی های خمیر و کاغذ الیاف بلند

شاخص	شاخص	گرمایز	انرژی	درجه	دور
مقاومت	مقاومت	(g/m <sup>2</sup> )	مصرفی	روانی	پالایشگر
کششی	پارگی		(Wh)	(ml)	(rpm)
(Nm/g)	(mNm <sup>2</sup> /g)				
۹۳/۹	۱۰/۹	۶۲/۶	۲۱۰	۴۹۰	۵۴۰۰

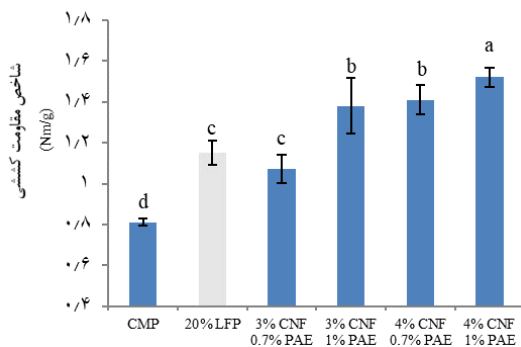
جدول ۲- انواع تیمارها و سطوح مواد افزودنی

سطوح مواد افزودنی به خمیر کاغذ CMP (درصد)				درصد خشکی نمد کاغذ حین ساخت
کربنات کلسیم	LFP	PAE	NF C	
۲۰	۰	۰	۰	۳۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۳۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۳۵
۲۰	۰	۱	۳	۳۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۳۵
۲۰	۰	۱	۴	۳۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۲۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۳	۵۵
۲۰	۰	۱	۳	۵۵
۲۰	۰	۰/۷	۴	۵۵
۲۰	۰	۱	۴	۵۵
۲۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰				

درصد خشکی، تیمار حاوی ۳ درصد CNF و ۰/۷ درصد PAE با تیمار حاوی ۲۰ درصد LFP از نظر آماری در یک گروه قرار گرفته‌اند. بنابراین این تیمار توانسته مقاومت کششی لازم را برای جایگزینی با تیمار حاوی LFP ایجاد کند. همچنین تیمار حاوی ۴ درصد CNF و ۱ درصد PAE بیشترین مقاومت کششی را ایجاد کرده و در گروه مجزایی قرار گرفته است به طوری که نسبت به تیمار CMP خالص و تیمار حاوی LFP، به ترتیب ۴۶ و ۲۴ درصد افزایش داشته است. افزودن CNF به همراه PAE باعث بهبود در شاخص مقاومت کششی لایه تر کاغذ می‌شود (Su et al., 2014) که دلیل آن می‌تواند بیشتر بودن سطح الیاف در ابعاد نانو و در نتیجه گروه‌های کربوکسیل آنیونی نسبت به الیاف در مقیاس میکرو باشد. این گروه‌های کربوکسیل آنیونی نه تنها قابلیت پیوند به الیاف را افزایش می‌دهند بلکه موجب افزایش جذب PAE و در نهایت بهبود بیشتر مقاومت کششی لایه تر کاغذ می‌شود (Xhanari et al., 2011).



شکل ۱- شاخص مقاومت کششی تیمارهای لایه تر کاغذ با ۳۵ درصد خشکی (CMP: خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی، LFP: خمیر کاغذ الیاف بلند، CNF: نانوالیاف سلولزی، PAE: پلی آمیدایی کلروهیدرین)



شکل ۲- شاخص مقاومت کششی تیمارهای لایه تر کاغذ با ۵۵ درصد خشکی (CMP: خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی، LFP: خمیر کاغذ الیاف بلند، CNF: نانوالیاف سلولزی، PAE: پلی آمیدایی کلروهیدرین)

بر اساس شکل ۲، گروه‌بندی دانکن میانگین‌های تاثیر افزودن LFP، CNF، PAE به خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی (CMP) بر مقاومت کششی در ۵۵ درصد خشکی را در چهار گروه مجزا (a,b,c,d) قرار داده است، که دلالت بر اختلاف معنی‌دار تغییرات این شاخص در

### تهیه سوسپانسیون خمیر کاغذ

با توجه به این که در اغلب کارخانه‌های مصرف کننده خمیر کاغذ شیمیایی- مکانیکی، از حدود ۲۰ درصد پرکننده کربنات کلسیم برای بهبود خواص فیزیکی کاغذ استفاده می‌شود در کلیه تیمارهای این تحقیق سوسپانسیون خمیر کاغذ با افزودن این مقدار پرکننده تهیه شد. برای ساخت کاغذهای ترکیبی ابتدا CNF و سپس PAE (این ماده علاوه بر ایجاد مقاومت لایه تر کاغذ، با داشتن بار کاتیونی کمک نگهدارنده نیز دارد (Fukuda et al., 2005)) به سوسپانسیون اضافه شد. به این منظور، ابتدا سوسپانسیون خمیر کاغذ واجد ۲۰ درصد پرکننده کربنات کلسیم با ۰/۳ درصد خشکی با دستگاه هم‌زن با ۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه هم زده شد. سپس سوسپانسیون نانوالیاف با همان درصد خشکی (۰/۳ درصد) که از قبل آماده شده بود، به مقدار لازم به سوسپانسیون خمیر کاغذ اضافه شد و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر سوسپانسیون حاصل (با همان دور) هم زده شد. در ادامه PAE با غلظت ۱۲ درصد به سوسپانسیون اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر با همان دور هم زده شد و سپس مخلوط حاصل در داخل محفظه سیستم ساخت کاغذ دست‌ساز ریخته شد تا کاغذهای ۱۳۰ gr/m<sup>2</sup> ساخته شوند.

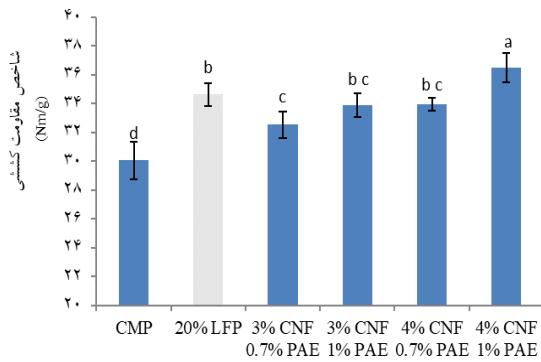
### تهیه لایه تر کاغذ هرگز خشک نشده و کاغذ هوا-خشک

برای ساخت کاغذ ۱۳۰ gr/m<sup>2</sup> مراحل کار طبق استاندارد TAPPI شماره T 205 sp-02 انجام شد. البته به دلیل کم بودن مقاومت کششی لایه تر کاغذ و کم بودن حساسیت دستگاه‌های متداول برای اندازه‌گیری آن در این تحقیق امکان تحقیق بر کاغذ با گراماژ کمتر نشد. برای تهیه لایه تر کاغذ با ۳۵ درصد خشکی (۶۵ درصد رطوبت) به جای دو مرحله پرس از یک مرحله پرس با فشار ۵۰ psi استفاده شد (در این مرحله رطوبت لایه تر کاغذ ۷۰-۶۵ درصد بود) و پس از خروج کاغذها از پرس تا رسیدن وزن مرطوب آن‌ها به ۶/۸ گرم (با توجه به سطح توری کاغذ دست‌ساز، این وزن معادل کاغذ دارای ۶۵ درصد رطوبت است) چند دقیقه صبر شد و بلافاصله در رطوبت مورد نظر تست کشش انجام شد. همچنین برای تهیه لایه تر کاغذ با ۵۵ درصد خشکی مشابه بالا عمل شد فقط از دو مرحله پرس مطابق با استاندارد مربوطه استفاده گردید. برای تهیه کاغذ با ۷۵ درصد خشکی نیز مانند کاغذ با ۵۵ درصد خشکی عمل شد فقط در مرحله دوم پرس، از دو عدد کاغذ خشک‌کن در دو طرف لایه تر کاغذ استفاده شد. تعیین خصوصیات خمیر کاغذ به‌عنوان ماده سلولزی اولیه و کاغذ دست‌ساز، درجه روانی خمیر کاغذ طبق استاندارد T 227 om-04، گراماژ طبق استاندارد T 410 om-02، شاخص مقاومت در برابر پاره شدن طبق استاندارد T 414 om-02، و شاخص مقاومت کششی بر اساس استاندارد T 494 om-01 از آیین‌نامه‌ی Tappi انجام شد.

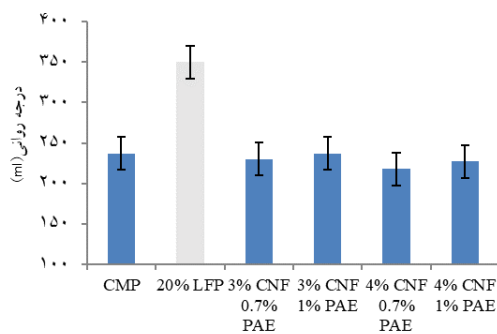
### نتایج و بحث

#### شاخص مقاومت کششی تیمارها

با توجه به شکل ۱، گروه‌بندی دانکن میانگین‌های تاثیر افزودن LFP، CNF، PAE به CMP را بر شاخص مقاومت کششی در چهار گروه مجزا (a,b,c,d) قرار داده است، که دلالت بر اختلاف معنی‌دار تغییرات این شاخص در تیمارهای مورد بررسی دارد. با توجه به شکل ۱، در ۳۵



شکل ۴- شاخص مقاومت کششی کاغذهای هوا-خشک (CMP): خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی، LFP: خمیر کاغذ الیاف بلند، CNF: نانوالیاف سلولزی، PAE: پلی آمیدایی کلروهیدرین



شکل ۵- تاثیر افزودن CNF، PAE، و LFP بر درجه روانی خمیر کاغذ (CMP): خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی، LFP: خمیر کاغذ الیاف بلند، CNF: نانوالیاف سلولزی، PAE: پلی آمیدایی کلروهیدرین

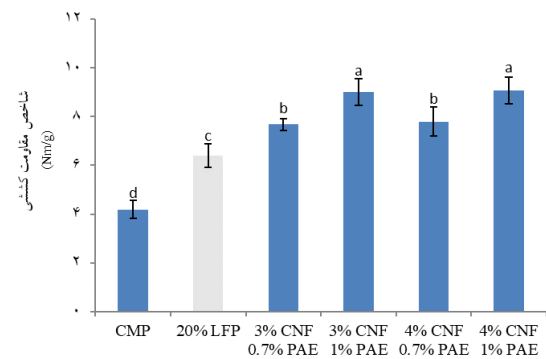
#### • درجه روانی تیمارها

شکل ۵ درجه روانی تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل بیشترین درجه روانی مربوط به تیمار حاوی ۲۰ درصد LFP و کمترین آن مربوط به تیمار حاوی ۴ درصد CNF و ۱ درصد PAE است. همانطور که مشاهده می‌شود هیچ کدام از تیمارها درجه روانی به اندازه تیمار حاوی LFP ایجاد نکرده است. توضیح اینکه طبق جدول ۱ درجه روانی LFP ۴۹۰ بود. این شاخص که معمولاً به شدت به ابعاد ذرات وابسته است در صورت استفاده از CNF، به دلیل ابعاد بسیار ریز آنها، به شدت کاهش می‌یابد با این وجود استفاده از PAE بخشی از این افت را جبران می‌کند به طوری که مطابق شکل ۵ در محدوده درجه روانی خمیر کاغذ CMP قرار گرفته است به عبارتی می‌توان انتظار شرایط آبیگری مشابه ساخت کاغذ از CMP را برای استفاده مشترک از CNF و PAE را داشت.

#### • شاخص مقاومت در برابر پارگی کاغذهای هوا-خشک

شکل ۶ شاخص مقاومت در برابر پاره شدن کاغذهای هوا-خشک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل هیچ‌یک از تیمارها مقاومت مقاومت به پارگی در حد تیمار حاوی LFP را ندارد؛ توضیح اینکه طبق جدول ۱، شاخص مقاومت به پارگی کاغذ با LFP خالص ۱۰/۹ میلی نیوتن بر متر مربع بود. اما با توجه به اینکه مقاومت به پارگی در مقایسه با مقاومت

تیمارهای مورد بررسی دارد. با توجه به شکل ۲، در ۵۵ درصد خشکی، تیمار حاوی ۳ درصد CNF و ۰/۷ درصد PAE با تیمار حاوی ۲۰ درصد خمیر کاغذ الیاف بلند از نظر آماری در یک گروه قرار گرفته است. بنابراین این تیمار توانسته مقاومت کششی لازم در حد خمیر کاغذ الیاف بلند ایجاد کند. همچنین تیمار حاوی ۴ درصد CNF و ۱ درصد PAE بیشترین مقاومت کششی را ایجاد کرده است به طوری که نسبت به تیمار با CMP خالص ۳۰ درصد افزایش و نسبت به تیمار حاوی خمیر کاغذ الیاف بلند ۱۰ درصد افزایش داشته است. همچنین با توجه به این شکل در ۵۵ درصد خشکی تیمارهای حاوی ۱ درصد PAE دارای بیشترین مقاومت کششی شده‌اند. در شکل ۳ بر اساس گروه بندی دانکن میانگین-های تاثیر افزودن LFP، CNF، PAE به CMP بر مقاومت کششی در ۷۵ درصد خشکی را مشابه کاغذ دارای ۵۵ درصد خشکی در چهار گروه مجزا (a,b,c,d) قرار گرفته است. با توجه به این شکل، در ۷۵ درصد خشکی، تیمار حاوی ۳ درصد CNF و ۰/۷ درصد PAE مقاومت کششی بیشتری نسبت به تیمار حاوی ۲۰ درصد LFP ایجاد کرده و از نظر آماری نیز در گروه مجزایی قرار گرفته است. بنابراین این تیمار به خوبی مقاومت کششی لازم برای جایگزینی با تیمار حاوی LFP را دارد. همچنین با توجه به این شکل در ۷۵ درصد خشکی تیمارهای حاوی ۱ درصد PAE دارای بیشترین مقاومت کششی شده و در گروه a قرار گرفته‌اند.



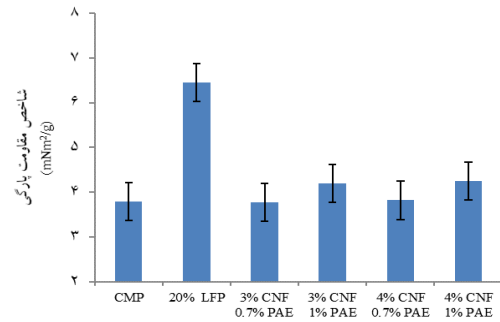
شکل ۳- شاخص مقاومت کششی تیمارهای لایه تر کاغذ با ۷۵ درصد خشکی (CMP): خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی، LFP: خمیر کاغذ الیاف بلند، CNF: نانوالیاف سلولزی، PAE: پلی آمیدایی کلروهیدرین

با توجه به شکل ۴، گروه بندی دانکن میانگین‌های تاثیر افزودن LFP، CNF، PAE به CMP بر مقاومت کششی کاغذ هوا-خشک را مشابه کاغذ دارای ۷۵ و ۵۵ درصد خشکی در چهار گروه مجزا (a,b,c,d) قرار داده است. تیمار حاوی ۳ درصد CNF و ۰/۷ درصد PAE در کاغذ هوا-خشک برخلاف کاغذ با ۷۵ درصد خشکی، مقاومت کششی لازم برای جایگزینی با تیمار حاوی ۲۰ درصد LFP را ایجاد نداشت. اما تیمار حاوی ۳ درصد CNF و ۱ درصد PAE با تیمار حاوی LFP در یک گروه قرار گرفته‌اند. توضیح اینکه طبق جدول ۱ مقدار شاخص مقاومت به کشش کاغذ حاصل از LFP خالص ۹۳/۹ نیوتن متر بر گرم بود. همچنین تیمار حاوی ۴ درصد CNF و ۱ درصد PAE بیشترین مقاومت کششی را ایجاد کرده و در گروه مجزایی قرار گرفته است به طوری که نسبت به تیمار CMP خالص، ۱۸ درصد افزایش و نسبت به تیمار حاوی LFP، ۵ درصد افزایش داشته است.



۱۰ میکرومتر، و ۵۰۰ نانومتر به ترتیب مربوط به بخش‌های a، b، c، و d از کاغذ حاوی افزودنی‌های کربنات کلسیم رسوبی، CNF و PAE را نشان می‌دهد. پراکنش دانه‌های سفید رنگ کربنات کلسیم رسوبی در همه بخش‌ها روی دیواره الیاف و فضای بین آنها به خوبی قابل دیدن است اما PAE به صورت ماده چسبناک بی‌رنگ می‌باشد که در تصویر قابل رویت نیست. همچنین در بخش d چند رشته CNF مشاهده می‌شود که یکی از آنها به قطر ۲۳ نانومتر در شکل مشخص شده است و رشته‌ای دیگر (در قسمت دایره‌ای) از یک سمت در ذره کربنات کلسیم رسوبی فرو رفته است. به نظر می‌رسد PAE به صورت چسب شفاف از طریق گروه‌های آرتیدینیوم کاتیونی و جود جاذبه بین آن با گروه‌های کربوکسیل آنیونی فراوان در سطح CNF از طریق ایجاد پل بین الیاف با مکانیزم اتصال عرضی همگن و یا اتصال عرضی دوتایی استحکام کاغذ را افزایش داده است (Au and Thorn, 2013, Ghofran, Su et al., 2014, et al., 2017).

کلشی کاغذ روزنامه ویژگی تعیین کننده نیست و تیمارهای حاوی CNF و PAE توانسته‌اند مقاومت به پارگی در حد تیمار CMP خالص ایجاد کند، بنابراین میزان شاخص مقاومت به پارگی تیمارهای حاوی CNF و PAE قابل قبول و در حد نرمال است.



شکل ۶- تاثیر افزودن CNF، PAE، و LFP بر شاخص مقاومت در برابر پاره شدن کاغذ دست‌ساز هوا-خشک (CMP: خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی، LFP: خمیر کاغذ الیاف بلند، CNF: نانوالیاف سلولزی، PAE: پلی‌آمیدایی کلروهیدرین)

• عکس‌های میکروسکوپی کاغذها-عملکرد PAE و CNF  
شکل ۷ عکس‌های میکروسکوپی FESEM با مقیاس ۲۰،۱۰۰



شکل ۷- عکس‌های FESEM کاغذهای دست‌ساز از CMP حاوی کربنات کلسیم رسوبی با افزودنی‌های CNF و PAE با بزرگنمایی مختلف (a: 100 μm، b: 20 μm، c: 10 μm، d: 500 nm)

#### ۴- نتیجه گیری

همراه PAE امکان جایگزینی با خمیر کاغذ الیاف بلند و چیران مقاومت کششی لایه تر کاغذ در حین خشک شدن را می تواند داشته باشد و بعد از صنعتی شدن تولید نانوالیاف سلولزی قابل استفاده خواهد بود.

#### سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام شده و بدین وسیله از آن و همچنین صنایع چوب و کاغذ مازندران برای در اختیار قرار دادن مواد سپاسگزاری می شود.

با توجه به اینکه نانوالیاف سلولزی به همراه PAE قابلیت بهبود مقاومت کششی لایه تر کاغذ مشابه خمیر کاغذ الیاف بلند وارداتی را دارد، این تحقیق با هدف مطالعه مقاومت کششی کاغذ در حین خشک شدن با ۳۵، ۵۵، ۷۵ درصد خشکی و هوا-خشک، با افزودنی های فوق به خمیر کاغذ شیمیایی- مکانیکی صنایع چوب و کاغذ مازندران و بررسی امکان جایگزینی با خمیر کاغذ الیاف بلند انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت افزودنی های نانوالیاف سلولزی به

#### منابع

- Ahola, S., Österberg, M. and Laine, J. 2013. Cellulose nanofibrils-adsorption with poly (amideamine) epichlorohydrin studied by QCM-D and application as a paper strength additive. Cellulose. Vol. 15(2), P. 303-314.
- Ankerfors, C., Lingström, R., Wågberg, L. and Ödberg, L. 2009. A comparison of polyelectrolyte complexes and multilayers: Their adsorption behaviour and use for enhancing tensile strength of paper. Nordic Pulp & Paper Research J. Vol. 24(1), P. 77-86.
- Au, C.O. and Thorn, I. 2013. Applications of wet-end paper chemistry. Springer Science & Business Media, New York, Springer, 200p.
- Behzadi, F., Sepidehdam, S.J., Jahan Latibari, A. and Khakifirooz, A. 2013. Investigation on the effect of using PAE and CMC dual system on dry and wet strength properties of tissue papers. J. of wood and paper science research. Vol. 28(3), P. 451-462. (In Persian).
- Belle, J., Kleemann, S. and Odermatt, J. 2014. Weighing of different impact factors on wet web strength by full-factorial design of experiments. BioResources. Vol. 9(2), P. 1830-1844.
- Belle, J. and Odermatt, J. 2016. Initial wet web strength of paper. Cellulose. Vol. 23(4), P. 2249-2272.
- Bhardwaj, N.K., Duong, T.D. and Nguyen, K.L. 2004. Pulp charge determination by different methods: effect of beating/refining. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Vol. 236(1-3), P. 39-44.
- De Campos, A., Corrêa, A.C., Claro, P.I.C., de Moraes Teixeira, E. and Marconcini, J. M. 2019. Processing, Characterization and Application of Micro and Nanocellulose Based Environmentally Friendly Polymer Composites. P:1-35. In Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites, Springer, Cham.
- Fukuda, S., Isogai, A., Kitaoka, T. and Sumikawa, N. 2005. Water-and oil-penetration resistances of handsheets prepared by internal addition of diperfluoroalkylethyl phosphate: Influence of cationic polymers co-added. Nordic Pulp and Paper Research J. Vol. 20(4), P. 496-501.
- Ghofran, R., Moradian, M.H., Saadatnia, M.A. and Rezayati Charani, P. 2017. Application of cellulose nanofibers to be replaced with the imported long-fiber pulps in papers made from bagasse, J. of Wood and Paper Industries. Vol. 7(4), P. 523-536. (In Persian).
- Hamzeh, Y., Yadollahi, R., Mahdavi, H. and Pourmousa, Sh. 2015. Effect of Application Method of Wet Strength Additives on Paper Properties. J. of forest and wood product. Vol. 68(3), P. 469-478. (In Persian).
- Hubbe, M.A. 2019. Review of the Mechanistic Roles of Nanocellulose, Cellulosic Fibers, and Hydrophilic Cellulose Derivatives in Cellulose-Based Absorbents. Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels. P. 123-153.
- Hubbe, M. A. 2006. Bonding between cellulosic fibers in the absence and presence of dry-strength agents—A review. BioResources. Vol. 1(2), P. 281-318.
- Israelachvili, J. N. 2011. Electrostatic Forces between Surfaces in Liquids. In: Intermolecular and Surface Forces (Third Edition). San Diego: Academic Press. Amsterdam, P. 213-259
- Lengowski, E.C., Júnior, E. A. B., Kumode, M. M. N., Carneiro, M.E., Satyanarayana, K. G. 2019. Nanocellulose in the Paper Making. Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites: Springer, Singapore, P. 1027-1066

- Lindqvist, H., Salminen, K., Kataja-aho, J., Retulainen, E., Fardim, P. and Sundberg, A. 2012. The effect of fibre properties, fines content and surfactant addition on dewatering, wet and dry web properties. *Nordic Pulp & Paper Research J.* Vol. 27(1), P. 104-111.
- Müller, M. 2010. Propapier PM2 GmbH—ein Gigant von Weltklasse. *Wochenblatt für Papier Fabrikation*, Vol. 138, P. 272-280.
- Obokata, T., Yanagisawa, M. and Isogai, A. 2005. Characterization of polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) resin: Roles of azetidinium groups and molecular mass of PAE in wet strength development of paper prepared with PAE. *J. of applied polymer science.* Vol. 97(6), P. 2249-2255.
- Onur, A., Ng, A., Garnier, G. and Batchelor, W. 2019. The use of cellulose nanofibres to reduce the wet strength polymer quantity for development of cleaner filters. *J. of Cleaner Production.* Vol. 215, P. 226-231.
- Myllytie, P. Holappa, S., Paltakari, J. and Laine, J. 2018. Effect of polymers on aggregation of cellulose fibrils and its implication on strength development in wet paper web. *Nordic Pulp and Paper Research J.* Vol. 24, P. 125-134.
- Pourmousa, Sh. and Yadollahi, R. 2013. Optimization of the performance of PAE resin combined with retention aid and CMC in tissue paper production using deinked pulp. *J. of wood and paper science research.* Vol. 28(3), P. 489-497. (In Persian).
- Salas, C., Hubbe, M., Rojas, O.J. 2019. Nanocellulose Applications in Papermaking. P:61-94, In: *Production of Materials from Sustainable Biomass Resources: Springer, Singapore.*
- Siqueira, E., Naoui, W., Marlin, N., Schott, S. and Mauret, E. 2013. Effect of chemical additives on the degradation of polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) films and PAE-based papers made from bleached kraft pulps. *Nordic pulp and paper research J.* Vol. 28(4), P. 529-540.
- Siqueira, E.J., Salon, M.C.B., Belgacem, M.N. and Mauret, E. 2015. Carboxymethylcellulose (CMC) as a model compound of cellulose fibers and polyamideamine epichlorohydrin (PAE)–CMC interactions as a model of PAE–fibers interactions of PAE-based wet strength papers. *J. of applied polymer science.* Vol. 132(26) P. 42144-42154.
- Su, J., Zhang, L., Batchelor, W. and Garnier, G. 2014. Paper engineered with cellulosic additives: effect of length scale. *Cellulose.* Vol. 21(4), P. 2901-2911.
- Khanari, K., Syverud, K. and Stenius, P. 2013. Emulsions stabilized by microfibrillated cellulose: the effect of hydrophobization, concentration and o/w ratio. *J. of dispersion science and technology.* Vol. 32(3), P. 447-452.
- Khanari, K., Syverud, K. and Stenius, P. 2011. Emulsions stabilized by microfibrillated cellulose: the effect of hydrophobization, concentration and o/w ratio. *J. of dispersion science and technology.* Vol. 32, P. 447-452.