



دانشگاه گواران

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و هشتم، شماره اول، ۱۴۰۰

۸۳-۹۷

<http://jwfst.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwfst.2021.18627.1901

## چاپ پلاریزان با استفاده از جوهر پلی‌وینیل‌الکل / نانوکریستال سلولز:

### تعیین اثرات غلظت جوهر و سرعت تبخیر حلال

محبوبه مهماندوست کتلا<sup>۱</sup>، مهدی مشکور<sup>۲\*</sup>، حسین یوسفی<sup>۲</sup> و مهدی تجویدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران،

<sup>۲</sup> دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران،

<sup>۳</sup> دانشیار آزمایشگاه نانومواد تجدیدپذیر، دانشگاه مین، ایالات متحده آمریکا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

#### چکیده

**سابقه و هدف:** امروزه، مطالعه پیرامون مهندسی خودآرایی نانوکریستال‌های سلولزی درون بسترهای پلیمری، با هدف گسترش دامنه کاربردی این نانو ساختارهای زیستی، به یکی از موضوعات داغ تحقیقاتی بدل شده است. به‌تازگی، پژوهشگران روشی مبتنی بر بهره‌گیری از گشتاور کشش سطح (STT) را به منظور کنترل خودآرایی نانوکریستال‌های سلولزی (CNC) درون محلول‌های پلیمری معرفی نمودند که امکان چاپ دوشکستی نانوکامپوزیتی را فراهم می‌نماید. در این مقاله، تأثیر سرعت تبخیر حلال و غلظت محلول پلی‌وینیل‌الکل (PVA) / نانوکریستال سلولز به عنوان جوهر چاپ پلاریزان، بر کیفیت چاپ سه‌بعدی نانوکامپوزیتی حاصل بررسی شده است.

**مواد و روش‌ها:** محلول‌های آبی پلی‌وینیل‌الکل (PVA) در ۳ سطح غلظت ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد، حاوی ۵ درصد وزنی نانوکریستال سلولزی استخراج‌شده از الیاف پنبه، به عنوان جوهر چاپ تهیه شدند. جهت چاپ فیلم‌های نانوکامپوزیتی نهایی، قالب‌ریزی محلول جوهر بر روی بستر مسی دارای نقوش برجسته انجام شد. با هدف کنترل سرعت خروج حلال، از دو نوع آون متداول و آون خلاء استفاده شد. کیفیت جهت‌یافتگی اجزای جوهر و چاپ پلاریزان، با میکروسکوپ نوری پلاریزان و نرم‌افزار تحلیل‌گر تصویر ارزیابی و کمی‌سازی شد.

**یافته‌ها:** تحلیل تصاویر میکروسکوپی نشان داد که با افزایش نسبت فاز حامل PVA در ترکیب جوهر، گران‌روی جوهر به میزان قابل‌توجهی افزایش یافت و با افزودن نانوذرات CNC به ترکیب به صورت معناداری از شدت افزایش گران‌روی کاسته شد. در ارزیابی کیفیت چاپ از مقایسه مقادیر سه شاخص تباین رنگ‌های تداخلی (ICC)، شاخص پیروی از الگو (PMI)، شاخص تقارن نقش (PSI) استفاده شد. افزایش غلظت جوهر در نتیجه افزایش سهم فاز حامل PVA موجب افزایش شاخص ICC گردید و تأثیر این عامل بر دو شاخص PMI و PSI الگوی مشابهی را

\* مسئول مکاتبه: mashkour@gau.ac.ir

نشان داد؛ به طوری که بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر به دست آمده برای جوهر سه‌جزئی، به ترتیب، در غلظت ۱۰ و ۵ درصد PVA به دست آمد. افزایش سرعت خروج فاز حلال، تأثیر معناداری را بر تغییرات شاخص ICC نشان نداد در حالی که مقادیر دو شاخص PMI و PSI را به صورت معنادار متأثر نمود و موجب کاهش کیفیت چاپ گردید.

**نتیجه‌گیری:** به طور خلاصه، بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر، می‌توان چنین بیان نمود که در فرایند چاپ پلاریزان، استفاده از جوهر چاپ سه‌جزئی نسبت به نوع دوجزئی در اولویت قرار دارد. هم‌چنین کاهش سرعت خروج حلال می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کیفیت چاپ داشته باشد. متناسب با ترکیب جوهر استفاده شده در این مطالعه، جهت دستیابی به کیفیت چاپ مطلوب، سطح غلظت ۵ درصد برای فاز حامل قابل توصیه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پلی‌وینیل‌الکل، جوهر نانوکریستال سلولز، چاپ پلاریزان، گشتاور کشش سطح، نانوکریستال سلولز

### مقدمه

نانوکریستال سلولز فراوان‌ترین نانوکریستال زیستی موجود در طبیعت است که به عنوان یک ماده خام مهندسی عمدتاً به روش هیدرولیز اسیدی از منابع گوناگون سلولزی استخراج می‌شود. از جمله ویژگی‌های ممتاز نانوکریستال‌های سلولزی می‌توان به دانسیته پایین، مدول و مقاومت مکانیکی بالا، ضریب انبساط حرارتی جزئی، نسبت سطح به حجم و ضریب لاغری بالا، واکنش‌پذیری سطحی زیاد و خواص پیزوالکتریک آن اشاره نمود (۶، ۱۲، ۱۶، ۱۷ و ۲۲).

توسعه روش‌های کنترل جهت‌یافتگی نانوکریستال‌های سلولزی درون ماتریس‌های پلیمری از جمله زمینه‌های مطالعاتی جذابی است که از سوی عده‌ای از پژوهشگران عمدتاً با هدف دستیابی به حداکثر قابلیت استحکام‌بخشی مکانیکی توسط این نانوذرات در ساختار نانوکامپوزیت‌ها در دست انجام است. به دلیل خاصیت هرسونایکسانی نانوکریستال‌های سلولزی، مهندسی چیدمان و خودآرایی آن‌ها یک راهبرد کلیدی در توسعه دامنه کاربرد این دسته از نانوکریستال‌های زیستی به ویژه در تولید محصولات پیشرفته مهندسی است (۶، ۱۳، ۱۸، ۲۰ و ۲۴).

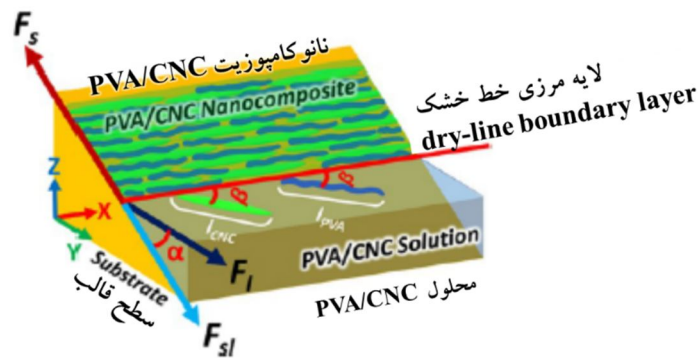
مرور منابع نشان می‌دهد طی سالیان اخیر، روش‌های گوناگونی به منظور جهت‌دهی و منظم کردن چیدمان نانوکریستال‌های سلولزی در ماتریس‌های پلیمری مورد بررسی و آزمون قرار گرفته است. عمده روش‌های گزارش شده مبتنی بر اعمال یک نیروی خارجی مانند کشش، اعمال تنش‌های برشی و یا بهره‌گیری از میدان‌های نیرومند مغناطیسی (میدان‌های ابرسانا) و الکتریکی می‌باشند (۵، ۷، ۸، ۱۱ و ۱۵). میزان موفقیت هر یک از روش‌های مذکور محدود بوده و چالش‌های متعددی در مسیر توسعه آن‌ها در مقیاس‌های فراآزمایشگاهی وجود دارد. زمان‌بر بودن فرایندهای مذکور، کارایی در مقیاس‌های کوچک متأثر از محدودیت‌های حاصل از قوانین فیزیکی حاکم بر آن‌ها، نیاز به صرف انرژی زیاد و سخت‌افزارهایی با تکنولوژی‌های انحصاری و گران‌قیمت با هزینه‌های بالای نگهداری و سرویس و نیز مخاطرات مواجهه میدان‌های نیرومند الکتریکی و مغناطیسی برای کاربران، از جمله چالش‌هایی هستند که توسعه استفاده از این روش‌ها را محدود می‌نمایند (۵، ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۵ و ۱۹). هم‌چنین تقریباً در تمامی روش‌های گزارش شده، کنترل جهت‌یافتگی و خودآرایی نانوکریستال‌های سلولزی به صورت تک‌جهته میسر می‌باشد (۱۶).

در نزدیکی لایه خشک مرزی، پیشنهاد گردید. مبنای فیزیکی این سازوکار بر پایه اثرات ترکیبی دو نیروی محرکه نزدیک لایه خشک مرزی است که عبارت‌اند از: گرادیان کشش سطحی و تبخیر سطحی. این نیروهای محرکه روی نانوکریستال‌های سلولزی نزدیک به لایه خشک مرزی اثر نموده و گشتاور حاصل، آن‌ها را حول محور عمود بر سطح مایع در محل، چرخانده و موازی با لایه خشک مرزی منظم می‌نماید. بزرگی این گشتاور ( $\tau_s$ )، به طول ذره ( $l$ )، کشش سطحی ( $F_s$ ) و زاویه لحظه‌ای بین راستای طول نانوکریستال سلولز و لایه خشک مرزی ( $\beta$ ) بستگی دارد؛ بر این اساس رابطه ۱ تدوین شده که نشان‌دهنده ارتباط این عوامل است:

$$\tau_s = l F_s \sin(\pi/2 - \beta) \quad (1)$$

مشکور و همکاران (۲۰۱۳) روشی مبتنی بر بهره‌گیری از نیروی کشش سطحی و نانوغشاورهای حاصل را جهت کنترل چیدمان نانوکریستال‌های سلولزی درون بسترهای پلیمری معرفی نمودند (۱۳). ساز و کار این روش که به سبب بهره‌گیری از گشتاور کشش سطحی به اختصار STT نامیده شده است، به شرح زیر می‌باشد:

هنگامی که محلول پلیمری حاوی نانوکریستال‌های سلولزی، قالب‌ریزی شده و تحت فرایند تبخیر سطحی، فاز حلال خارج می‌شود، اگر سطح بستر قالب نسبت به افق زاویه غیر صفر داشته باشد، نانوکریستال‌های سلولز به سبب اثر گشتاور ناشی از نیروهای کشش سطحی، در مجاورت لایه خشک مرزی، تمایل به جهت‌یافتگی موازی با آن نشان می‌دهند. برای توضیح این اثر، سازوکاری مبتنی بر گرادیان نیروی موئینگی و پدیده گشتاور کشش سطحی



شکل ۱- ساز و کار گشتاور کشش سطحی در هدایت خودآرایی نانوکریستال‌های سلولزی و زنجیره‌های پلیمری (۱۴).

Figure 1. Mechanism of surface tension torque in self-assembly of cellulose nano-crystals and polymer chains.

امکان تکرار آن بدون داشتن فرمولاسیون دقیق نانوجوهر استفاده شده، شامل نسبت ترکیبی فاز حامل و رنگدانه دوشکستی CNC، مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها و نیز عدم دسترسی به الگوی چاپ مادری می‌تواند جایگزینی برای روش‌های متداول چاپ ایمن هم‌چون جوهرهای نامرئی و فلورسنت،

در ادامه این پژوهش، مشکور و همکاران (۲۰۱۸) نوعی فرایند چاپ پلاریزان را مبتنی بر STT و جوهر پلیمری نانوکریستال‌های سلولزی، با هدف پنهان نگاری درون بسترهای پلیمری شفاف، بنیان نهادند. چاپ پلاریزان مذکور، با توجه به امتیازاتی نظیر هزینه پایین چاپ و ایمنی بالا نسبت به جعل، به دلیل عدم

در چاپ پلاریزان، در واقع از نوعی رفتار ناهمسان‌گرد نوری با عنوان رفتار دوشکستی استفاده می‌شود که در مواد بلورین با ساختار ناهمسان‌گرد و بسترهای پلیمری جهت‌دهی شده مشاهده می‌گردد. در چنین شرایطی، پرتو نور پس از برخورد با ماده، در دو راستای عمود برهم منتشر شده و از آن خارج می‌شود؛ بنابراین به این نوع مواد، دوشکستی اطلاق می‌شود. نانوکریستال سلولز، در هر دو سیستم مونوکلینیک و تری‌کلینیک، از خود رفتار نوری دوشکستی بروز می‌دهد (۵-۲، ۷ و ۱۳). در یک نانوکامپوزیت ماتریس پلیمری حاوی نانوکریستال‌های سلولزی، در صورتی که بتوان به‌صورت بهینه آرایش نانوکریستال‌های سلولزی و زنجیره‌های پلیمری فاز ماتریس را به‌صورت هم‌زمان مهندسی نمود، می‌توان به خلق نقوش دوشکستی نانوکامپوزیتی و چاپ پلاریزان دست یافت (۲ و ۱۴).

این پژوهش، به بررسی تأثیر دو عامل غلظت فاز حامل و سرعت خروج فاز حلال جوهر PVA/CNC بر کیفیت چاپ نانوکامپوزیتی پلاریزان می‌پردازد.

### مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل نانوکریستال سلولزی پنبه، پلی‌وینیل‌الکل و رزین اپوکسی‌اکریلات بود که جدول ۱ مشخصات آن‌ها را نشان می‌دهد.

تکنیک هولوگرام و کریستال‌های فوتونی با نانوساختار مهندسی شده، به‌ویژه درون بسترهای پلیمری چندلایه باشد (۱۴). چراکه استفاده از این روش‌های متداول با چالش‌های فراوانی مواجه است. این چالش‌ها به‌خصوص در مورد کریستال‌های فوتونی شامل آسیب‌پذیری نقوش چاپ‌شده بر اثر تماس‌های مکرر فیزیکی با عوامل محیطی نظیر رطوبت و سایش، چالش ایجاد حداکثر تباین نسبت به بستر شفاف میزبان در هنگام تحریک با عامل مناسب و سپس ناپدید شدن کامل تباین با حذف عامل محرک، پاسخ‌گذاری سریع و مؤثر به هنگام مواجهه و یا حذف عامل محرک، قیمت بالا و پیچیدگی فرایند سنتز این نوع کریستال‌ها و نیز سمیت و مشکلات مواجهه مکرر با آن‌ها، افت کارآمدی این نوع از چاپ در بلندمدت به‌سبب تغییرات تدریجی و مانای ناشی از تغییر در آرایش شبکه ساختاری مواد هستند (۱، ۴، ۲۱ و ۲۳). درحالی‌که در چاپ پلاریزان، آشکارسازی نقوش آنی و تنها با بهره‌گیری از روش پلاریسکوپی یا فیلترهای پلاریزان است. هم‌چنین از آن‌جایی‌که با هر بار آشکارسازی، تغییری در ریزساختار شبکه ماده ایجاد نمی‌شود، بنابراین چالشی به‌عنوان پسماند رفتار نوری معنی نداشته و عمر این چاپ عمل‌گرا تا پایان عمر مفید خود فیلم پلیمری محفوظ است (۱۴).

جدول ۱- مواد مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1. Materials used in this research.

شرکت - کشور سازنده Company	خصوصیات Specifications	نوع ماده Material
دایجونگ - کره Dae-Jung - Korea	DP ≈ 1500	پلی‌وینیل‌الکل Poly vinyl alcohol
نانو نوین پلیمر - ایران Nano Novin polymer - Iran	هیدروژل - تهیه‌شده با روش هیدرولیز اسیدی Hydro gel - by acid hydrolysis method	نانوکریستال سلولز پنبه Cotton cellulose nanocrystals
کیمیا شیمی - ایران Kimia Chemical - Iran	شفاف - نوع بیس فنل A Transparent - Bisphenol A type	رزین اپوکسی‌اکریلات Epoxy acrylate resin

انواع جوهرهای تهیه شده با استفاده از روش ویسکومتری کاپ، مطابق با استاندارد DIN 53211 اندازه گیری و ثبت شد.

**چاپ نانوکامپوزیتی پلاریزان:** در این مرحله از نقش برجسته چاپ شده بر روی بستر مسی سکه های ۱۰ میلی ژاپن به عنوان الگوی چاپ استفاده شد. پیش از فرایند قالب ریزی، ویژگی های مترولوژی و پروفیل سطح قالب با استفاده از میکروسکوپ کانفوکال لیزری و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان تعیین گردید و نتایج توسط نرم افزار VK Analyzer، نسخه ۳،۴،۰،۱ (Keyence Co., USA) تحلیل گردید. قالب ریزی محلول جوهر بر روی قالب مسی به گونه ای انجام شده که ارتفاع محلول جوهر حدود ۱۴ برابر بلندترین ارتفاع نقش برجسته قالب بود. برای خروج فاز حلال آبی و چاپ فیلم های نانوکامپوزیتی PVA/CNC، از دو فرایند خشک کردن متفاوت استفاده شد: آون آزمایشگاهی متداول و آون خلاء (مدل Finetech ssv2-502، ساخت شرکت Shine Saeng Scientific کره جنوبی) با فشار خلاء ۱ bar- در هر دو فرایند، دمای آون ها روی ۸۰ درجه سانتی گراد تنظیم گردید. فرایند خشک کردن درون آون ها تا آنجایی ادامه داشت که فاز حلال آبی کاملاً تبخیر شده و پوششی از فیلم شفاف نانوکامپوزیتی PAV/CNC به صورت خشک روی بستر قالب مسی تشکیل گردید. فیلم های نقش برجسته چاپ شده از سطح قالب جدا شده و در یک فرایند تکمیلی به عنوان لایه میانی توسط دو لایه از رزین اپوکسی اکریلات شفاف پوشش دهی شدند. برای هر پوشش دهی به میزان ۴ میلی لیتر رزین در نظر گرفته شد و برای گیرا شدن رزین اپوکسی اکریلات اعمال شده در لایه های سطحی فیلم چاپ شده، به مدت ۴۵ ثانیه از تابش UV استفاده شد. هدف از پوشش دهی سطح فیلم های نانوکامپوزیتی چاپ شده محو کردن اثر نقوش

روش انجام این پژوهش به ترتیب شامل مراحل زیر می باشد:

**آماده سازی و مشخصه یابی نانوکریستال های سلولزی پنبه:** نانو کریستال های سلولزی مورد استفاده در این پژوهش از شرکت نانو نوین پلیمر تهیه شد. نانو کریستال های مذکور، از لیتتر پنبه و با روش هیدرولیز اسیدی (64% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) استخراج شدند. با توجه به اهمیت تعیین فرم هندسی و ابعاد ذرات CNC، در این مطالعه تصویربرداری از نانوذرات با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM, Mira 3-XMU) مدل TESCAN ساخت کشور جمهوری چک، انجام شد. در روش میکروسکوپی FESEM، ابتدا محلول آبی رقیق شده نانو کریستال سلولز بر روی بستر سیلیکون قطره نشانی شده و پس از تبخیر حلال، با استفاده از طلا پوشش دهی شد. تصویر برداری FESEM با ولتاژ شتاب دهنده 5 KV و میزان بزرگنمایی ۱۰۰ هزار برابر انجام شد. میکروگراف های FESEM با استفاده از نرم افزار تحلیل گر تصویر ImageJ 1.52p مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

**آماده سازی محلول جوهر PVA/CNC:** با توجه به قطبیت، شفافیت و ضریب شکست مطلوب PVA، این ماده پلیمری با درجه پلیمر شدن (DP) ۱۵۰۰ به عنوان فاز حامل جوهر انتخاب شد. محلول آبی PVA با ۳٪ غلظت ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی (نسبت به فاز حلال) آماده شد و نانوکریستال CNC به میزان ۵ درصد وزنی (نسبت به وزن خشک PVA)، به عنوان رنگدانه دوشکستی، به محلول های PVA اضافه شد. در نهایت سه نوع محلول جوهر سه جزئی آب/PVA/CNC و سه نوع جوهر دوجزئی آب/PVA، فاقد CNC برای انجام فرایند چاپ پلاریزان آماده شد. در مرحله بعد گران روی هر یک از

فرایند چاپ، نانوکریستال‌های سلولزی و زنجیره‌های PVA محلول در جوهر، بیشتر و بهینه‌تر از گشتاور کشش سطح روی نقوش قالب متأثر شده و کیفیت چاپ بهبود یافته است.

رابطه ۳، بیانگر چگونگی ارزیابی کمی شاخص پیروی از الگوی قالب (PMI) در نمونه‌های چاپ‌شده پلاریزان می‌باشد:

$$PMI = 1 - \left( \frac{S_{Bf} + S_{Yf}}{S_{Tf}} \right) \times 100 \quad (۳)$$

که در اینجا،  $S_{Bf}$ ،  $S_{Yf}$  و  $S_{Tf}$  به ترتیب مساحت ناحیه آبی رنگ منطبق بر بخش مسطح قالب، مساحت ناحیه زرد رنگ منطبق بر بخش مسطح قالب و کل سطح مسطح قالب می‌باشند. از آنجایی که در حالت چاپ بهینه انتظار نمی‌رود در فیلم چاپ‌شده جز در بخش منطبق بر سطوح شیب‌دار قالب رنگ‌های آبی و زرد پلاریزان رؤیت شود، بنابراین افزایش شاخص PMI، به معنای افزایش پیروی از الگوی چاپ می‌باشد.

رابطه ۴، چگونگی ارزیابی کیفیت چاپ پلاریزان، منطبق بر اصل تقارن نقش را نشان می‌دهد؛ لازم به ذکر است در ارزیابی اخیر، از الگوهای متقارن موجود در قالب استفاده شد (شکل ۲).

$$PSI = 1 - |S_{Bp} - S_{Yp}| \times 100 \quad (۴)$$

که در اینجا، PSI شاخص تقارن نقش و  $S_{Bp}$  و  $S_{Yp}$  به ترتیب، مساحت ناحیه آبی رنگ و مساحت ناحیه زرد رنگ در فیلم پلاریزان چاپ‌شده منطبق بر نقش برجسته و متقارن الگوی چاپ می‌باشد. بر اساس این رابطه، هرچه میزان شاخص PSI بزرگ‌تر باشد، بیانگر افزایش کیفیت چاپ می‌باشد.

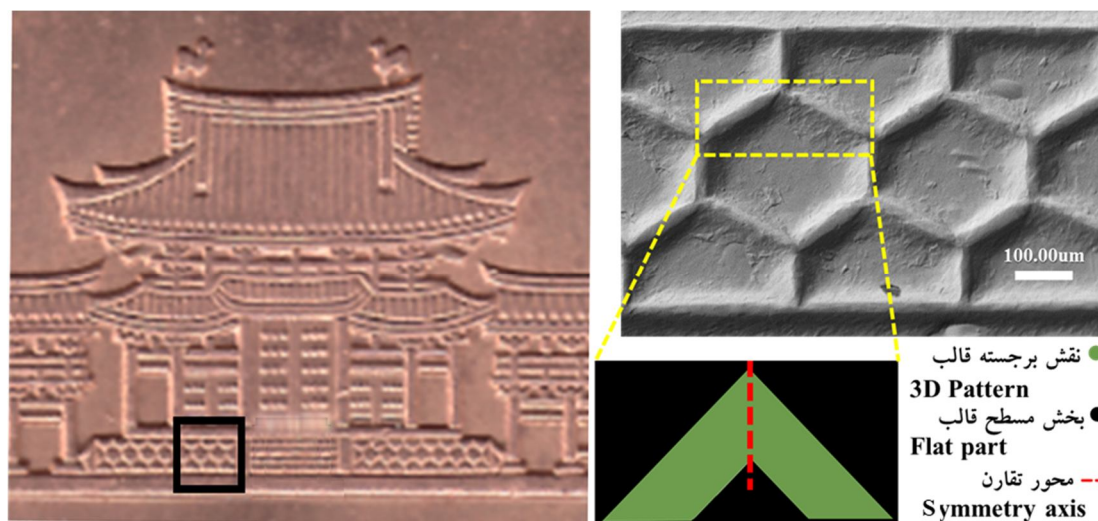
سه‌بعدی چاپ‌شده و تهیه فیلمی سه‌لایه با سطوح کاملاً صاف بود؛ به این ترتیب نقش قالب چاپ‌شده به‌صورت کامل در برابر چشم غیرمسلح غیرقابل رؤیت گردید.

**روش‌های تحلیل و بررسی:** به‌منظور ارزیابی کیفیت چاپ پلاریزان انجام شده، متأثر از عوامل فرایندی مورد بررسی، در این مطالعه از روش تصویربرداری پلاریزان با استفاده از یک دستگاه استریومیکروسکوپ (Olympus SZX16, Japan)، مجهز به فیلترهای پلاریزان و یک عدد تیغه کمکی  $\lambda/4$  استفاده شد.

تحلیل تصاویر پلاریزان به‌دست‌آمده از بررسی میکروسکوپی فیلم‌ها، با استفاده از نرم‌افزار Image Color Summarizer (Image Color Summarizer v0.76, 2006-2020, Martin Krzywinski, mkweb.bcgsc.ca) انجام گرفت (۹). با استفاده از مقادیر کمی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار تحلیل‌گر تصویر مذکور و نیز معادلات ۱، ۲ و ۳، کیفیت چاپ پلاریزان متأثر از تغییر سطوح دو عامل متغیر سهم فاز حامل (PVA) و سرعت خروج حلال جوهر از حالت کیفی به کمی تبدیل شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. رابطه ۲، نشان‌دهنده میزان تباین رنگ نقوش پلاریزان چاپ‌شده (ICC) در تصاویر حاصل از پلاریزان است:

$$ICC = \left( \frac{S_{Bp} + S_{Yp}}{S_{Tp}} \right) \times 100 \quad (۲)$$

که در اینجا،  $S_{Bp}$ ،  $S_{Yp}$  و  $S_{Tp}$  به ترتیب مساحت ناحیه آبی رنگ منطبق بر بخش شیب‌دار قالب، مساحت ناحیه زرد رنگ منطبق بر بخش شیب‌دار قالب و کل سطح شیب‌دار قالب می‌باشند. دامنه این شاخص بین صفر تا ۱۰۰ درصد است و هر چه مقدار کمی این شاخص بزرگ‌تر باشد، گویای آن است که در طول



شکل ۲- محاسبه سطح محصور به وسیله الگوی سه بعدی.

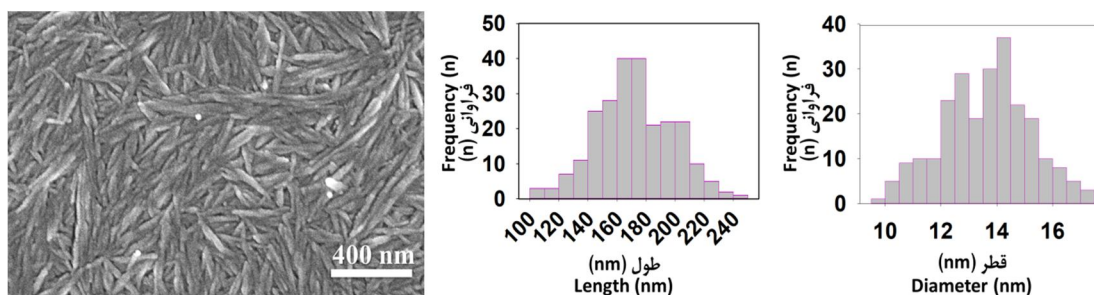
Figure 2. Calculation of surrounded surface by 3D pattern.

را نشان می‌دهد. میکروگراف‌های FESEM با استفاده از نرم‌افزار Image J تحلیل شد که نتایج به دست آمده در خصوص مشخصات ابعادی نانوذرات CNC به صورت نمودار توزیع فراوانی اندازه ذرات نمایش داده شده است. متوسط طول و قطر نانوذرات CNC، به ترتیب، حدود ۱۷۱/۹ و ۱۳/۷ نانومتر ارزیابی گردید. بدین ترتیب، رنگدانه دوشکستی CNC موجود در ترکیب جوهرهای دوجزئی، ضریب لاغری در محدوده ۱۲/۵ داشت.

نتایج کمی به دست آمده پیرامون اثر عوامل متغیر این پژوهش بر کیفیت چاپ پلاریزان در تیمارهای مختلف، با استفاده از آزمون فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سطح معناداری ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۷، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

### نتایج و بحث

شکل ۳ نتایج بررسی میکروسکوپی ذرات CNC استخراج شده از لیتر پنبه مورد استفاده در این پژوهش

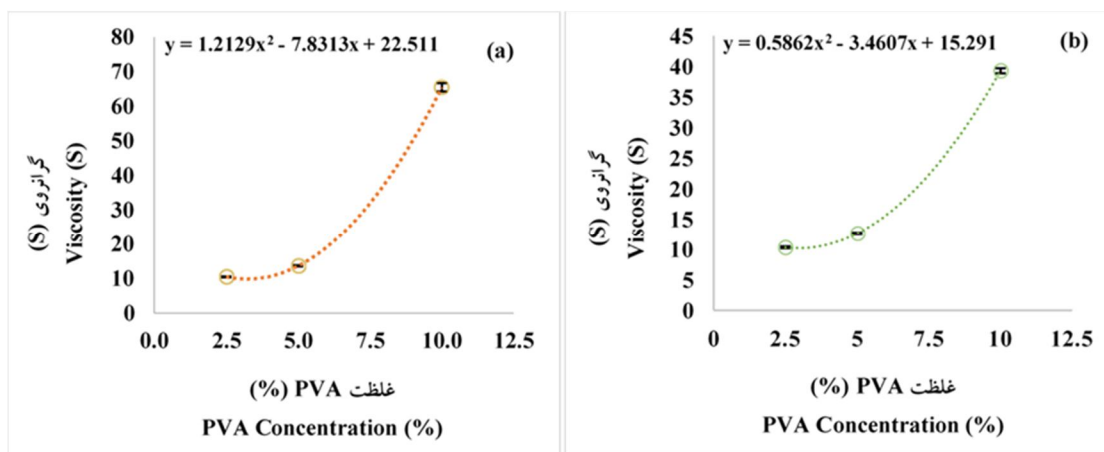


شکل ۳- ریزنگاره FESEM و نمودار توزیع فراوانی اندازه ذرات CNC استفاده شده در این پژوهش.

Figure 3. FESEM image of the CNC and their diameter distributions used in the study.

حدود ۱۶۷ درصد بیش از مقدار ثبت شده در جوهر سه‌جزئی حاوی ذرات CNC بود. به نظر می‌رسد که با افزایش سهم وزنی PVA در ترکیب جوهر، به سبب درهم‌رفتگی زنجیره‌های PVA، گرانروی محلول جوهر افزایش یافته و تأثیر آن به صورت فزاینده با افزایش غلظت محلول افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، تأثیر حضور CNC بر تغییرات میزان گرانروی در اثر افزایش سهم وزنی فاز حامل در غلظت‌های بالاتر جوهر مشهودتر می‌باشد. با افزودن نانو ذرات CNC به ترکیب جوهر و توزیع این ذرات مابین زنجیره‌های PVA، از شدت درهم‌رفتگی زنجیره‌های پلیمری کاسته شده و راحت‌تر بر روی یکدیگر می‌لغزند و در نتیجه از میزان گرانروی جوهر کاسته می‌شود (۱۳ و ۲۵).

شکل ۴ نتایج حاصل از بررسی گرانروی دو نوع جوهر چاپ پلاریزان دوجزئی و سه‌جزئی، حاوی سه سطح وزنی متفاوت از فاز حامل PVA را نشان می‌دهد. آن‌چنان که ملاحظه می‌گردد، در هر دو نوع جوهر، با افزایش مقدار سهم وزنی PVA، گرانروی افزایش یافت. همچنین در هر دو نوع جوهر، ارتباط بین افزایش مقدار سهم وزنی فاز حامل و تغییرات میزان گرانروی جوهر از تابع چندجمله‌ای درجه دو تبعیت می‌نمود؛ به طوری که با افزایش سهم PVA از ۲/۵ به ۵ درصد، چه در ترکیب جوهر دوجزئی و چه سه‌جزئی، گرانروی جوهر حدود ۳۰ درصد افزایش یافت. در مقابل افزایش سهم فاز حامل از ۵ به ۱۰ درصد وزنی، موجب افزایش قابل‌ملاحظه بزرگی گرانروی، در هر دو نوع جوهر دوجزئی و سه‌جزئی گردید. این میزان افزایش در جوهر دوجزئی به مراتب



شکل ۴- تغییرات مقدار گرانروی جوهر چاپ (a) دوجزئی و (b) سه‌جزئی متناسب با سهم وزنی فاز حامل (PVA) در جوهر.

Figure 4. Changes in the viscosity of printing ink (a) two component and (b) three component in proportion to the weight share of the carrier phase (PVA) in the ink.

کشش سطح مطرح می‌باشد. با افزایش دمای محلول جوهر قالب‌ریزی شده، تبخیر سطحی فاز حلال آغاز شده و تسریع می‌گردد و سطح جوهر متناسب با سرعت خروج حلال به تدریج پایین می‌آید تا با

آن‌چنان که در توضیح رابطه ۱ بیان شد، سرعت خروج حلال به‌عنوان یکی از پارامترهای اثرگذار بر کیفیت جهت‌یافتگی نانوکریستال‌های سلولز و زنجیره‌های پلیمری فاز حامل متأثر از نیروی گشتاور

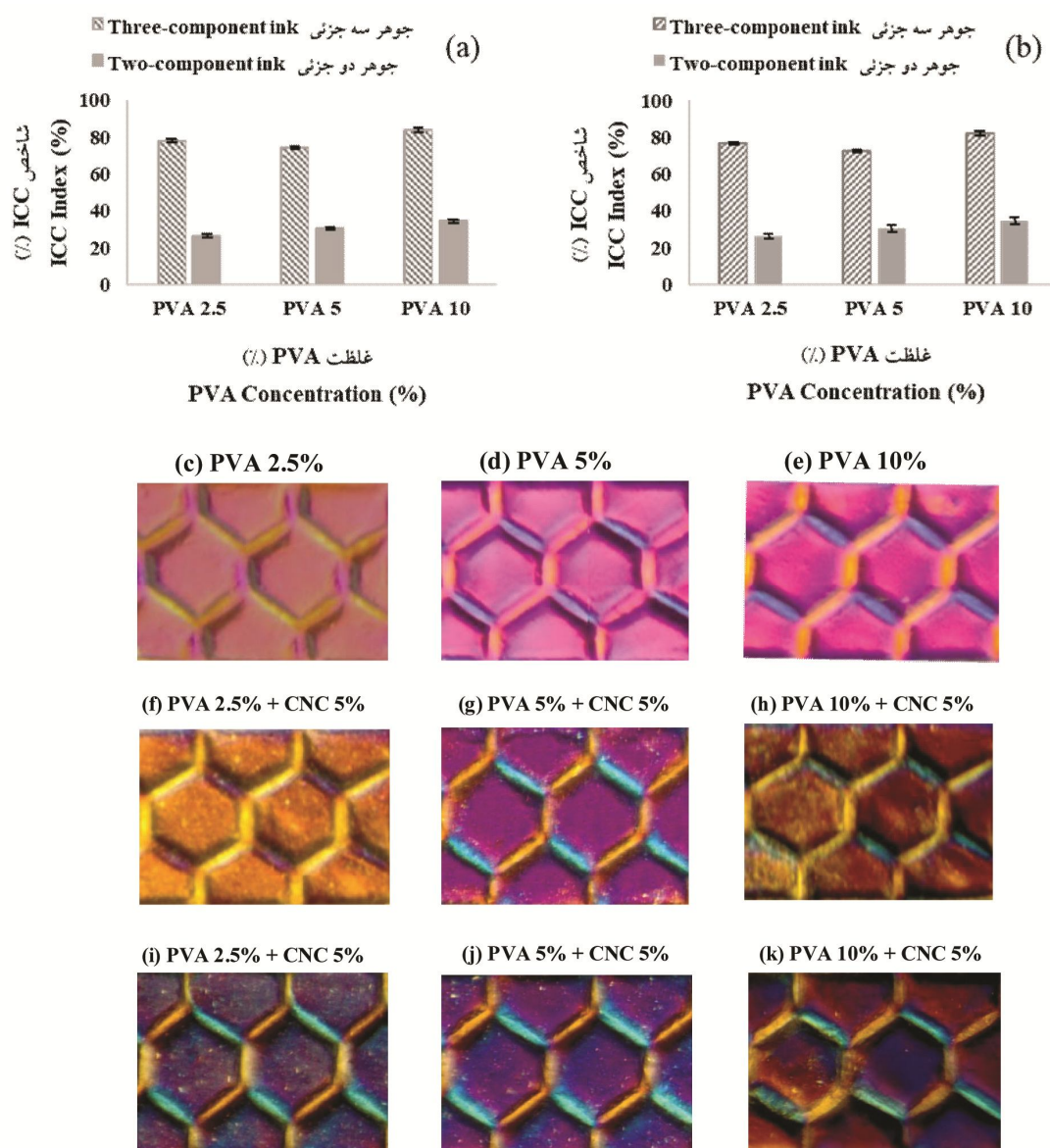


شاخص ICC گردید که تفاوت آن در میزان کیفیت چاپ در میکروگراف‌های پلاریزان شکل ۵ مشخص می‌باشد. این امر به نقش نانوذرات CNC به عنوان رنگدانه دوشکستی در جوهر سه‌جزئی و نیز تأثیر مثبت حضور آن‌ها بر بهبود کیفیت چاپ از منظر تباین رنگ‌های تداخلی اشاره دارد. در خصوص تأثیر غلظت فاز حامل PVA، بر عملکرد جوهر چاپ، مشاهده شد که با افزایش غلظت PVA، در جوهر دوجزئی، میزان شاخص ICC تا حدودی افزایش یافت که این مقدار بهبود از نظر آماری بین غلظت ۲/۵ و ۱۰ درصد PVA معنادار می‌باشد. از سوی دیگر، در جوهر سه‌جزئی، با افزایش سهم وزنی PVA در ترکیب جوهر، از ۲/۵ به ۵ درصد شاخص ICC کاهش یافته و با افزایش از ۵ به ۱۰ درصد میزان شاخص ICC افزایش می‌یابد. این سطح تغییرات برای تغییر غلظت از ۵ به ۱۰ درصد از نظر آماری معنادار است. اگرچه با توجه به نتایج اخیر، با افزایش سهم وزنی فاز حامل به سطح ۱۰ درصد وزنی در محلول جوهر، شاخص ICC افزایش یافت، ولی باید در نظر داشت که تنها تباین رنگ‌های تداخلی برای قضاوت در خصوص کیفیت چاپ کفایت ننموده و باید سایر شاخص‌ها نیز ارزیابی شده و مورد مقایسه قرار گیرند. بررسی تغییرات شاخص ICC، متأثر از تغییر در سرعت خروج حلال، از نظر آماری معنادار نشد.

توپوگرافی‌های موجود در سطح قالب سه‌بعدی برخورد کند. بر اساس مدل ارائه شده توسط مشکور و همکاران (۲۰۱۴)، در این هنگام ذرات CNC و زنجیره‌های پلیمری به سبب نیروی شناوری و نیز ناهمسان‌گردی شکل، متأثر از نیروی کشش سطح، متناسب با گشتاور اعمال‌شده بر آن‌ها در امتداد لایه خشک مرزی منظم می‌شوند. به‌صورت پیش‌فرض هرگونه عاملی که آشفتگی در محلول ایجاد نماید و یا زمان لازم برای خودآرایی نانوذرات را تحت‌تأثیر قرار دهد، می‌تواند بر کیفیت جهت‌یافتگی آن‌ها و در نتیجه کیفیت چاپ پلاریزان تأثیر بگذارد (۱۲ و ۱۳).

در این پژوهش، بر اساس پیش‌آزمون‌های انجام شده، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای تبخیر فاز حلال در نظر گرفته شد و با هدف بررسی اثر تسریع خروج حلال، فرایند چاپ پلاریزان با استفاده از دو نوع آون متداول و آون تحت خلاء اجرا شد. آن‌چنان که قابل‌پیش‌بینی است فرایند چاپ پلاریزان، به سبب تسریع خروج فاز حلال، درون آون خلاء حدود ۲/۵ برابر سرعت بیش‌تری داشت.

شکل ۵ مقایسه میزان تباین رنگ‌های تداخلی حاصل از فرایند چاپ را نشان می‌دهد. بر اساس رابطه ۱، هر چه میزان شاخص ICC عدد بزرگ‌تری باشد گواه بهبود کیفیت چاپ پلاریزان است. بر اساس نتایج حاصل، استفاده از جوهر سه‌جزئی نسبت به جوهر دوجزئی موجب افزایش قابل‌ملاحظه و معنادار



شکل ۵- تغییرات شاخص ICC در آون متداول (a, f, g, h) و آون خلاء (b, i, j, k).

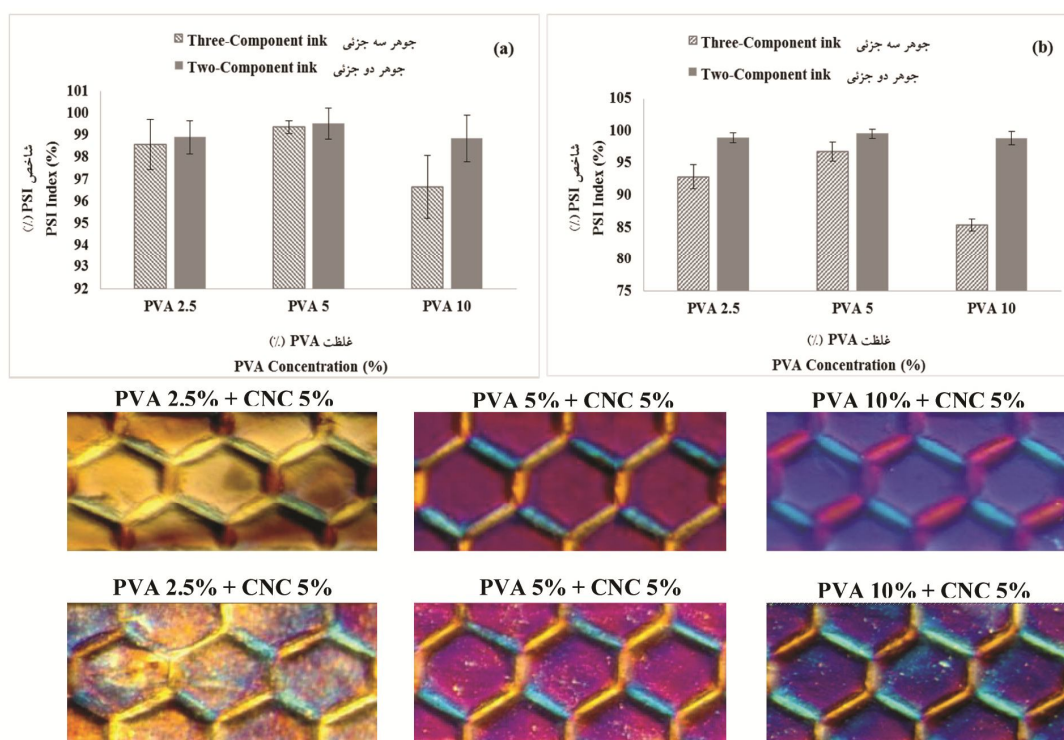
Figure 5. ICC index changes in conventional oven (a, f, g, h) and vacuum oven (b, i, j, k).

مشهودتر بود. در خصوص روند تأثیرپذیری شاخص PSI از غلظت فاز حامل، الگوی تقریباً مشابهی در هر دو سرعت خروج حلال مشاهده شد. به‌طورکلی کم‌ترین میزان شاخص PSI در سطح غلظت ۱۰ درصد PVA و بیش‌ترین میزان آن در سهم وزنی ۵ درصد PVA در محلول جوهر مشاهده شد که به مفهوم عملکرد بهتر جوهر با غلظت فاز حامل ۵ درصد می‌باشد. در توجیه مشاهدات حاصل

شکل ۶ تغییرات شاخص PSI را متناسب با تغییرات غلظت فاز حامل و نیز سرعت خروج فاز حلال، با استفاده از دو نوع جوهر دوجزئی و سه‌جزئی نشان می‌دهد. به‌طورکامل مشخص، افزایش سرعت خروج فاز حلال، در هر دو نوع جوهر دوجزئی و سه‌جزئی موجب کاهش شاخص PSI گردید. تأثیر منفی افزایش سرعت خروج حلال بر کیفیت چاپ پلاریزان با استفاده از جوهر سه‌جزئی

(۱۶-۱۲). میکروگراف‌های پلاریزان شکل ۶ به خوبی بیانگر تغییرات کیفیت چاپ پلاریزان متأثر از تغییرات شاخص PSI می‌باشند. در مقایسه، نتایج به‌دست‌آمده در نمونه‌های چاپ‌شده در آون متداول نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان شاخص PSI در فرایند چاپ با استفاده از جوهر سه‌جزئی با غلظت فاز حامل ۵ درصد به‌دست آمد، ولی مقدار این افزایش نسبت به دو سطح غلظت دیگر معنادار بود.

از آون خلاء می‌توان این‌طور بیان کرد که با افزایش سرعت تبخیر سطحی و خروج فاز حلال، جنبش ذرات و حرکت ذرات در ترکیب جوهر بیش‌تر شده که این موضوع سبب آشفته‌گی بیش‌تر در محلول جوهر می‌گردد. از آن‌جایی‌که هرگونه تلاطم اضافی در لایه سطحی منجر به عدم کارایی مناسب نیروی کشش سطح در هدایت جهت‌یافتگی اجزای ناهمسان‌گرد جوهر چاپ در امتداد لایه خشک مرزی می‌گردد، بنابراین کیفیت چاپ کاهش می‌یابد



شکل ۶- تغییرات شاخص PSI در آون متداول (a, c, d, e) و آون خلاء (b, f, g, h).

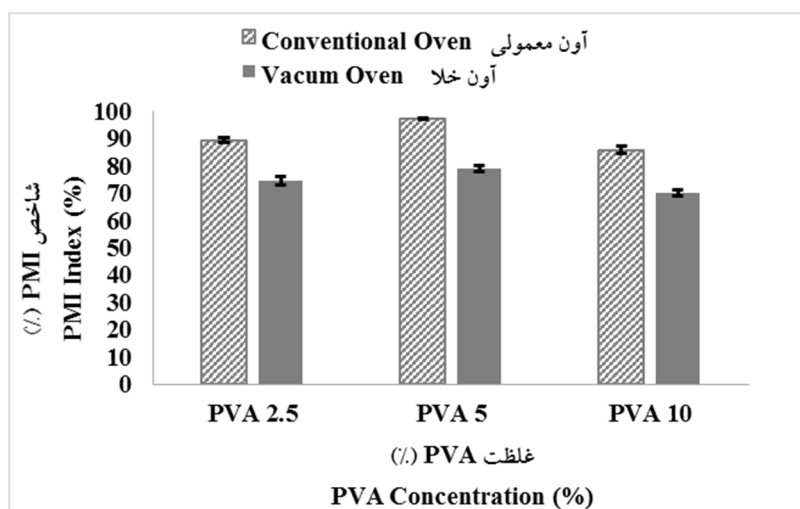
Figure 6. PSI index changes in conventional oven (a, c, d, e) and vacuum oven (b, f, g, h).

یافته‌ها نشان داد که افزایش سرعت خشک‌شدن میزان این شاخص را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد. یافته‌های حاصل از ارزیابی شاخص PMI در خصوص اثر سرعت خروج حلال بر کیفیت چاپ مشابه نتایج به‌دست آمده در بررسی شاخص PSI بود. به‌طورکلی، الگوی تغییرات شاخص PMI

شکل ۷ نتایج ارزیابی شاخص PMI را در نمونه‌های فیلم‌های پلاریزان چاپ‌شده نشان می‌دهد. آن‌چنان که بیان شد شاخص PMI بیانگر میزان تابعیت ظهور رنگ‌های تداخلی از الگوی سه‌بعدی چاپ است و انتظار می‌رود هرچه کیفیت چاپ بالاتر باشد، شاخص PMI مقدار بزرگ‌تری داشته باشد.

۵ درصد فاز حامل PVA به دست آمد. به طور خلاصه می‌توان چنین بیان نمود که کیفیت فیلم‌های چاپ شده درون آون متداول، با استفاده از جوهر سه‌جزئی حاوی ۵ درصد وزنی PVA، کیفیت چاپ به مراتب بهتری را نسبت به سایر فیلم‌ها در خصوص شاخص PMI نشان داد.

متناسب با تغییرات غلظت فاز حامل، در هر دو سرعت خروج حلال، روند نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهد. چه در نمونه‌های چاپ شده در آون متداول و چه در آون خلاء، به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار شاخص PMI در فیلم‌های پلاریزان چاپ شده با استفاده از جوهر سه‌جزئی حاوی ۱۰ درصد و



شکل ۷- نتایج ارزیابی شاخص PMI در چاپ با جوهر سه‌جزئی.

Figure 7. The results of PMI index evaluation in printing using the three-component ink.

بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار شاخص ICC در فیلم‌های چاپ شده با جوهر سه‌جزئی، در غلظت‌های ۱۰ و ۵ درصد وزنی فاز حامل مشاهده شد؛ اگرچه دامنه این تغییرات کوچک بود، اما مقدار کمی آن از نظر آماری معنادار بود. مقایسه مقادیر شاخص PSI در خصوص نمونه‌های چاپ شده با جوهر سه‌جزئی نشان داد که افزایش سرعت خروج فاز حلال، به صورت معناداری موجب کاهش کیفیت چاپ پلاریزان می‌گردد. بهترین نتیجه، از منظر شاخص PSI، در فیلم‌های پلاریزان چاپ شده با جوهر سه‌جزئی، حاوی ۵ درصد وزنی فاز حامل، خشک شده با آون متداول به دست آمد. تأثیر غلظت جوهر سه‌جزئی بر تغییرات شاخص PSI کاملاً معنادار بود. بررسی شاخص PMI نشان داد که افزایش سرعت خروج حلال جوهر، موجب کاهش

### نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر سرعت خروج حلال و غلظت فاز حامل جوهر نانوکریستال سلولز بر کیفیت چاپ پلاریزان بود. بنابراین، در این مطالعه از دو نوع جوهر دوجزئی (فاقد CNC)، به عنوان شاهد و سه‌جزئی (حاوی CNC)، به عنوان جوهر اصلی، استفاده شد. نتایج گویای آن بود که با افزایش غلظت فاز حامل PVA، گرانروی هر دو نوع جوهر دوجزئی و سه‌جزئی به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دوم افزایش یافت. حضور نانوذرات CNC در ترکیب جوهر، تأثیر معناداری را بر کاهش اثر افزایش غلظت فاز حامل بر گرانروی جوهر نشان داد. تغییرات سرعت خروج حلال تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر مقدار شاخص ICC نشان نداد.

به‌طورکلی، با استناد به یافته‌های این مطالعه می‌توان چنین بیان نمود که در صورت استفاده از جوهر سه‌جزئی (CNC/PAV/Water) به‌منظور چاپ بهینه نقوش پلاریزان، کاهش سرعت خروج فاز حلال و وجود حدود ۵ درصد وزنی فاز حامل در ترکیب جوهر قابل توصیه می‌باشد.

معنادار کیفیت چاپ می‌گردد. از نظر شاخص PMI در نمونه‌های چاپ‌شده با جوهر سه‌جزئی، بهترین و بدترین کیفیت چاپ، به‌ترتیب، به‌هنگام استفاده از جوهر حاوی ۵ درصد وزنی و ۱۰ درصد وزنی فاز حامل PVA به‌دست آمد و سطح تغییرات کاملاً معنادار بود.

### منابع

1. Abargues, R., Rodriguez-Canto, P.J., Albert, S., Suarez, I., and Martínez-Pastor, J.P. 2014. Plasmonic optical sensors printed from Ag-PVA nanoinks. *Materials Chemistry C. J. 2: 5.* 908-915.
2. Ghasemi, S., Rahimzadeh-Bajgiran, P., Tajvidi, M., and Shaler, S.M. 2020. Birefringence-based orientation mapping of cellulose nanofibrils in thin films. *Cellulose J. 27: 2.* 677-692.
3. Gladman, A.S., Matsumoto, E.A., Nuzzo, R.G., Mahadevan, L., and Lewis, J.A. 2016. Biomimetic 4D printing. *Nature Materials J. 15: 4.* 413-418.
4. Gray, D.G., and Mu, X. 2015. Chiral nematic structure of cellulose nanocrystal suspensions and films; polarized light and atomic force microscopy. *Materials J. 8: 11.* 7873-7888.
5. Habibi, Y., Heim, T., and Douillard, R. 2008. AC electric field-assisted assembly and alignment of cellulose nanocrystals. *Polymer Science Part B: Polymer Physics J. 46: 14.* 1430-1436.
6. Habibi, Y., Lucia, L.A., and Rojas, O.J. 2010. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews J. 110: 6.* 3479-3500.
7. Kim, J., Chen, Y., Kang, K.S., Park, Y.B., and Schwartz, M. 2008. Magnetic field effect for cellulose nanofiber alignment. *American Institute of Physics J. Pp: 96-104.*
8. Kimura, F., and Kimura, T. 2008. Magnetic alignment and patterning of cellulose fibers. *Science and Technology of Advanced Materials J. 9: 2.* 12242-12244.
9. Krzywinski, M. 2018. Image Color Summarizer: RGB, HSV, LCH & Lab image color statistics and clustering-simple and easy. accessed May 2019 <<http://mkweb.bcgsc.ca/color-summarizer/>>
10. Kvien, I., and Oksman, K. 2007. Orientation of cellulose nanowhiskers in polyvinyl alcohol. *Applied Physics A. J. 87: 4.* 641-643.
11. Li, D., Liu, Z., Al-Haik, M., Tehrani, M., Murray, F., Tannenbaum, R., and Garmestani, H. 2010. Magnetic alignment of cellulose nanowhiskers in an all-cellulose composite. *Polymer Bulletin J. 65: 6.* 635-642.
12. Mashkour, M., Kimura, T., Kimura, F., Mashkour, M., and Tajvidi, M. 2014. One-dimensional core-shell cellulose-akaganeite hybrid nanocrystals: synthesis, characterization, and magnetic field induced self-assembly. *RSC Advances J. 4: 94.* 52542-52549.
13. Mashkour, M., Kimura, T., Kimura, F., Mashkour, M., and Tajvidi, M. 2014. Tunable self-assembly of cellulose nanowhiskers and polyvinyl alcohol chains induced by surface tension torque. *Biomacromolecules J. 15: 1.* 60-65.
14. Mashkour, M., Kimura, T., Mashkour, M., Kimura, F., and Tajvidi, M. 2018. Printing birefringent figures by surface tension-directed self-assembly of a cellulose nanocrystal/polymer ink components. *ACS Applied Materials & Interfaces J. 11: 1.* 1538-1545.
15. Mashkour, M., Tajvidi, M., Kimura, F., Yousefi, H., and Kimura, T. 2014. Strong highly anisotropic magnetocellulose nanocomposite films made by chemical

- peeling and in situ welding at the interface using an ionic liquid. *ACS Applied Materials & Interfaces* J. 6: 11. 8165-8172.
16. Mashkour, M., Tajvidi, M., Kimura, T., Kimura, F., and Ebrahimi, G. 2011. Fabricating unidirectional magnetic papers using permanent magnets to align magnetic nanoparticle covered natural cellulose fibers. *Bioresources* J. 6: 4. 4731-4738.
  17. Moon, R.J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., and Youngblood, J. 2011. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews* J. 40: 7. 3941-3994.
  18. Mu, X., and Gray, D.G. 2014. Formation of chiral nematic films from cellulose nanocrystal suspensions is a two-stage process. *Langmuir* J. 30: 31. 9256-9260.
  19. Pullawan, T. and Wilkinson, A.N., and Eichhorn, S.J. 2012. Influence of magnetic field alignment of cellulose whiskers on the mechanics of all-cellulose nanocomposites. *Biomacromolecules* J. 13: 8. 2528-2536.
  20. Revol, J.F., Godbout, L., Dong, X.M., Gray, D.G., Chanzy, H., and Maret, G. 1994. Chiral nematic suspensions of cellulose crystallites; phase separation and magnetic field orientation. *Liquid Crystals* J. 16: 1. 127-134.
  21. Shin, H.J., Lim, M.C., Park, K., Kim, S.H., Choi, S.W., and Ok, G. 2017. Invisible security printing on photoresist polymer readable by terahertz spectroscopy. *Sensors* J. 17: 12. 2825.
  22. Ul-Islam, M., Khan, S., Khattak, W.A., Ullah, M.W., and Park, J.K., 2015. Synthesis, chemistry, and medical application of bacterial cellulose nanocomposites. In *Eco-friendly Polymer Nanocomposites* J. Springer, New Delhi. Pp: 399-437.
  23. Ye, S., Fu, Q., and Ge, J. 2014. Invisible photonic prints shown by deformation. *Advanced Functional Materials* J. 24: 41. 6430-6438.
  24. Yousefi, H., Mashkour, M., and Yousefi, R. 2015. Direct solvent nanowelding of cellulose fibers to make all-cellulose nanocomposite. *Cellulose* J. 22: 2. 1189-1200.
  25. Zhou, L., He, H., Li, M.C., Song, K., Cheng, H.N., and Wu, Q. 2016. Morphological influence of cellulose nanoparticles (CNs) from cottonseed hulls on rheological properties of polyvinyl alcohol/CN suspensions. *Carbohydrate Polymers* J. 153: 445-454.



## **Polarizing printing using a polyvinyl alcohol/cellulose nanocrystal ink: Finding the effects of ink concentration and solvent evaporation rate**

**M. Mehmandoust Katlor<sup>1</sup>, M. Mashkour<sup>\*2</sup>, H. Yousefi<sup>2</sup> and M. Tajvidi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

<sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

<sup>3</sup>Associate Prof., Laboratory of Renewable Nanomaterials, University of Maine, USA

Received: 12.28.2020; Accepted: 03.14.2021

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Self-assembly engineering of cellulose nanocrystals in polymer substrates to expand the application range of these bio-nanostructures has become one of the hot topics of research. Recently, the researchers introduced a method based on surface tension torque (STT) to control cellulose nanocrystals' self-assembly in polymer solutions to print birefringent nanocomposites. In this paper, the effect of solvent evaporation rate and concentration of polyvinyl alcohol/cellulose nanocrystal solution as polarizing printing ink on the quality of 3D nanocomposite printing was investigated.

**Materials and Methods:** Aqueous polyvinyl alcohol (PVA) solutions were prepared at three concentrations of 2.5, 5, and 10 percent, containing 5 percent of cellulose nanocrystal (CNC) by weight extracted from cotton fibers as printing ink. An embossed copper mold was used for the printing of polarizing nanocomposite films. The conventional oven and vacuum oven were used to regulate the rate of ink solvent evaporation. Evaluation and comparison of polarizing print quality were performed by microscopic imaging and quantitative analysis of the resulting micrographs.

**Results:** Analysis of microscopic images revealed that by increasing the ink carrier (PVA) ratio in the ink formulation, the ink viscosity increased significantly, whereas by adding CNC nanoparticles to the composition, the increase in viscosity was significantly reduced. Three indicators were defined and used to assess and compare the quality of printing: Interference Color Contrast (ICC) Index, Pattern Match Index (PMI) and Pattern Symmetry Index (PSI). The increased concentration of ink due to an increase in the weight fraction of the ink carrier increased the ICC index, and the effect of this factor on the PMI and PSI indices showed a similar pattern; The highest and lowest values of the PMI and PSI for three-component inks were obtained at concentrations of 10% and 5% PVA, respectively. Increasing the solvent phase's evaporation rate did not significantly affect the ICC index, while PMI and PSI values significantly affected and reduced print quality.

**Conclusion:** In summary, based on the findings of this study, it can be stated that the use of three-part printing ink takes precedence over two-part printing ink. Reducing the evaporation rate of the solvent phase was also found to have a significant positive effect on print quality. With regard to the ink composition used in this study, a concentration level of 5% is recommended for the ink carrier to achieve the desired print quality.

**Keywords:** Cellulose nanocrystal, Cellulose nanocrystal ink, Polarizing printing, Polyvinyl alcohol, Surface tension torque

---

\*Corresponding author: mashkour@gau.ac.ir

