

## Types of Primers Used in the Printing Industry: From Functional Mechanisms to Application-Oriented Objectives

Pegah Sheikh<sup>1</sup>, Pouya Jafari<sup>1,2,\*</sup>

1- R&D Group, Noavar Pooshesh Nilfam Company, Tehran, Iran

2- Color and Polymer Research Center (CPRC), Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

Primers, as functional interfacial layers, play a crucial role in enhancing print quality, improving ink adhesion, and boosting the durability of printed layers. Amid the expanding variety of printing substrates—from cellulosic materials and metallic foils to polymeric films—designing primers tailored to substrate properties and printing technologies has grown essential. This review elucidates primers' functional mechanisms, emphasizing that modifying surface characteristics like energy, wettability, roughness, and uniformity is prerequisite for high-resolution printing and long-term stability. Systematically analyzing their physical and chemical roles, primers enhance surface energy and reduce ink contact angles, form chemical bonds and intermolecular interactions, promote mechanical interlocking, and control ink absorption/penetration—key to superior adhesion and visual quality. Studies reveal primers not only optimize ink transfer and fixation but also elevate process efficiency via surface leveling and ink drying/curing regulation. Primer types—solvent-based, water-based, radiation-curable, and nanoparticle-based—are comparatively evaluated. Appropriate primer selection demands deep insight into primer-ink-substrate interactions and processing conditions. Recent trends focus on sustainable, multifunctional primers for digital and industrial inkjet printing. The future envisions smart, bio-based, recyclable systems meeting technical, economic, and environmental demands.

### Keywords

Primer, Substrate, Printing & Packaging, Adhesion

### Article history:

Received: 25-12-2025

Accepted: 31-01-2026

### Corresponding author:

\*[pouya-jafari@aut.ac.ir](mailto:pouya-jafari@aut.ac.ir)

## انواع پرایمرهای مورد استفاده در صنعت چاپ: از سازوکارهای عملکردی تا اهداف کاربردی

پگاه شیخ<sup>۱</sup>، پویا جعفری<sup>۲،\*</sup>

۱- واحد تحقیق و توسعه، شرکت نوآور پوشش نیل فام، تهران، ایران

۲- پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

پرایمرها به عنوان لایه‌های واسط عملکردی، نقش کلیدی در بهبود کیفیت چاپ، افزایش چسبندگی جوهر و ارتقای دوام لایه‌های چاپ شده ایفا می‌کنند. با تنوع زیرآیندهای صنعت چاپ از مواد سلولزی و فویل‌های فلزی تا فیلم‌های پلیمری، طراحی پرایمرهای متناسب با ماهیت زیرآیند و فناوری چاپ ضروری شده است. این مقاله مروری، سازوکارهای عملکردی پرایمرها را بررسی می‌کند و بر اصلاح ویژگی‌های سطحی مانند انرژی سطحی، ترشوندگی، زبری و یکنواختی تاکید دارد؛ این عوامل پیش‌نیاز چاپ با وضوح بالا و پایداری بلندمدت هستند. از منظر فیزیکی و شیمیایی، پرایمرها با افزایش انرژی سطحی، کاهش زاویه تماس جوهر، ایجاد پیوندهای شیمیایی و برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی، اتصال مکانیکی و کنترل جذب/نفوذ جوهر، چسبندگی و کیفیت بصری را ارتقا می‌دهند. مطالعات نشان می‌دهد پرایمرها نه تنها انتقال و تثبیت جوهر را بهبود می‌بخشند، بلکه با یکنواخت‌سازی سطح و تنظیم خشک‌شدن یا پخت جوهر، بازده فرآیند را افزایش می‌دهند. انواع پرایمرها شامل حلال‌پایه، پایه‌آب، تابش‌یز و نانوذره‌محور، به صورت تطبیقی تحلیل شده‌اند. انتخاب پرایمر مناسب نیازمند درک برهم‌کنش‌های پرایمر-جوهر-زیرآیند و شرایط فرآیندی است. تحقیقات اخیر بر پرایمرهای پایدار، چندمنظوره و سازگار با چاپ دیجیتال/جوهرافشان تمرکز دارند. چشم‌انداز آینده به سامانه‌های هوشمند، زیست‌پایه و قابل‌بازیافت معطوف است تا الزامات فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی را همزمان برآورده کنند.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۱۱

پرایمر، زیرآیند، چاپ و بسته‌بندی، چسبندگی

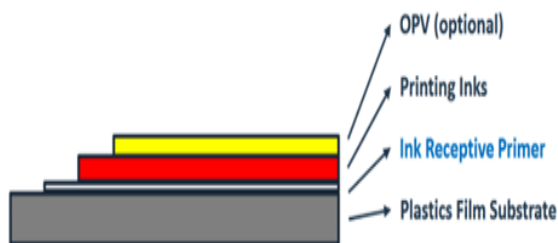
واژگان کلیدی

## ۱- مقدمه

فرار (VOC) توجه پژوهشگران و صنعتگران را به سمت توسعه پرایمرهای آب پایه و سامانه‌های تابش پز فرابنفش (UV) معطوف کرده است [۵، ۶]. این روندها نقش مهمی در جهت‌دهی تحقیقات جدید در حوزه پرایمرهای چاپ ایفا می‌کنند. با وجود کاربرد گسترده پرایمرها در صنعت چاپ، تنوع زیاد فرمولاسیون‌ها و سازوکارهای عملکردی آن‌ها باعث شده است که درک جامع و نظام‌مند از انواع پرایمرها و نقش آن‌ها همچنان یک موضوع پژوهشی فعال باقی بماند. بدیهی است که مقالات مروری می‌توانند با جمع‌بندی نتایج مطالعات پیشین، به شفاف‌سازی این حوزه کمک کنند. بر این اساس، هدف از این مقاله، ارائه دیدگاهی جامع درباره پرایمرهای مورد استفاده در صنعت چاپ، بررسی انواع، ترکیبات و کاربردهای آن‌ها و همچنین تحلیل چالش‌ها و رویکردهای نوین است، به گونه‌ای که بتواند به‌عنوان مرجعی علمی برای پژوهشگران و فعالان صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- تعریف و عملکرد پرایمرها در صنعت چاپ

پرایمر در صنعت چاپ به لایه‌ای نازک و عملکردی گفته می‌شود که پیش از اعمال جوهر معمولاً روی سطح زیرآیند قرار می‌گیرد و هدف اصلی آن بهبود برهم‌کنش فیزیکی و شیمیایی بین جوهر و بستر چاپی است. برای مثال در شکل ۱ لایه‌های مختلف پوشش داده شده بر روی یک بستر پلیمری چاپی قابل مشاهده است. در این ساختار، لایه‌ی واسط نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی چاپ و دوام آن ایفا می‌کند. در بسیاری از مراجع از پرایمر، تحت عنوان لایه‌ی پذیرنده جوهر<sup>۳</sup> نیز یاد می‌شود [۷]. برخلاف پوشش‌های تزئینی یا محافظتی، پرایمرها عمدتاً به‌منظور اصلاح ویژگی‌های سطحی زیرآیند طراحی می‌شوند و معمولاً ضخامت بسیار کمی دارند. این ویژگی باعث می‌شود که پرایمر بدون ایجاد تغییر محسوس در ظاهر یا خواص مکانیکی زیرآیند، عملکرد چاپ را بهبود بخشد.



شکل ۱. لایه‌های مختلف پوشش داده شده بر روی یک زمینه پلیمری چاپ شده.

Figure 1. Different coating layers deposited on a printed polymer substrate.

3- Ink Receptive Layer

در صنعت چاپ مدرن، دستیابی به کیفیت چاپ بالا، دوام مناسب و چسبندگی مطلوب جوهر به زیرآیند، از الزامات اساسی تولید محصولات چاپی محسوب می‌شود. در این بین، نوع زیرآیند<sup>۱</sup> نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی چاپ، انتخاب جوهر و نیاز به استفاده از پرایمر ایفا می‌کند. متداول‌ترین زیرآیندهای مصرفی شامل مواد سلولزی نظیر کاغذ و مقوا، زیرآیندهای پلیمری و فویل‌های فلزی هستند [۱، ۲]. کاغذها و مقواها به دلیل ماهیت متخلخل و انرژی سطحی نسبتاً بالا، چاپ‌پذیری مناسبی دارند، اما ویژگی‌هایی مانند پوشش سطحی و زبری می‌توانند رفتار جذب جوهر را تحت تاثیر قرار دهند. در مقابل، زیرآیندهای پلیمری نظیر پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌وینیل کلراید به‌طور گسترده در بسته‌بندی انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما به دلیل انرژی سطحی پایین و ماهیت غیرقطبی، اغلب نیازمند اصلاح سطح یا استفاده از پرایمر هستند. فویل‌های فلزی، به‌ویژه آلومینیوم، به دلیل سطح صاف و غیرجاذب، چالش‌هایی در چسبندگی جوهر ایجاد می‌کنند که با به‌کارگیری پرایمرهای مناسب قابل کنترل است [۳]. پرایمرها به‌عنوان لایه‌های میانی، نقش کلیدی در بهبود تعامل بین جوهر و سطح زیرآیند ایفا می‌کنند. این مواد با اصلاح ویژگی‌های سطحی بستر چاپی، از جمله انرژی سطحی، زبری و ترشوندگی<sup>۲</sup>، شرایط مناسب‌تری را برای انتقال و تثبیت جوهر فراهم می‌سازند. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، استفاده مستقیم از جوهر روی زیرآیند بدون به‌کارگیری پرایمر منجر به مشکلاتی نظیر چسبندگی ضعیف، پخش نامناسب جوهر، کاهش وضوح تصویر و افت مقاومت مکانیکی چاپ می‌شود و بر همین اساس پرایمرها به‌عنوان راهکاری موثر برای غلبه بر این محدودیت‌ها معرفی شده‌اند.

پیشرفت فناوری‌های چاپ، به‌ویژه چاپ دیجیتال و چاپ جوهرافشان، نیاز به توسعه پرایمرهای تخصصی با عملکردهای چندگانه را افزایش داده است. در این فناوری‌ها، کنترل جذب جوهر، جلوگیری از پخش بیش از حد قطرات و افزایش سرعت خشک‌شدن از جمله وظایف مهم پرایمرها به‌شمار می‌رود [۴]. از منظر صنعتی، انتخاب نوع پرایمر به عوامل متعددی از جمله نوع زیرآیند، فناوری چاپ، ماهیت جوهر و شرایط فرآیندی وابسته است. عدم تطابق مناسب بین این عوامل می‌تواند منجر به کاهش کیفیت چاپ و افزایش ضایعات تولید شود. در سال‌های اخیر، ملاحظات زیست‌محیطی و قوانین سخت‌گیرانه مرتبط با انتشار ترکیبات آلی

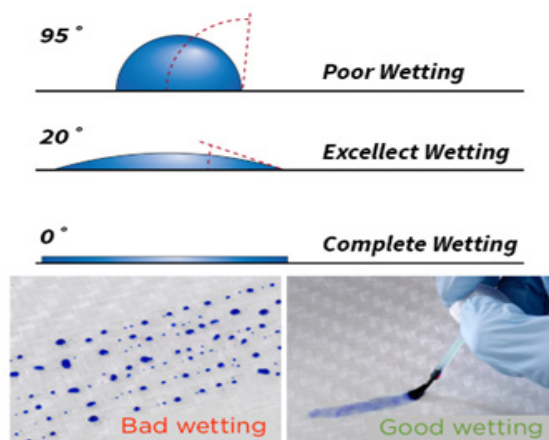
1- Substrate

2- Wetting

علاوه بر نقش پرایمرها در افزایش انرژی سطحی زیرآیند، این مواد می‌توانند از طریق ایجاد پیوندهای شیمیایی و برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی موثر با هر دو فاز جوهر و زیرآیند، استحکام چسبندگی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. این برهم‌کنش‌ها ممکن است شامل پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های قطبی-قطبی، نیروهای واندروالس و در برخی سامانه‌ها، پیوندهای کووالانسی واقعی باشند که در حین خشک‌شدن یا پخت پرایمر شکل می‌گیرند [۱۰]. وجود گروه‌های عاملی فعال در ساختار شیمیایی پرایمر، امکان برقراری این پیوندها را فراهم کرده و انتقال تنش‌های مکانیکی بین لایه جوهر و زیرآیند را تسهیل می‌کند. در این شرایط، پرایمر به‌عنوان یک لایه سازگارکننده شیمیایی عمل می‌کند که با کاهش اختلاف قطبیت و ناسازگاری شیمیایی بین جوهر و زیرآیند، از تمرکز تنش در فصل مشترک جلوگیری می‌نماید. این عملکرد به‌ویژه در چاپ روی بسترهای چندلایه یا مواد کامپوزیتی، که هر لایه دارای ماهیت شیمیایی متفاوتی است، اهمیت ویژه‌ای دارد و نقش کلیدی در افزایش دوام چاپ و مقاومت آن در برابر جادشدگی و سایش ایفا می‌کند. پرایمرها همچنین می‌توانند زبری موثر سطح را در مقیاس میکرو و نانو تنظیم کنند. افزایش کنترل‌شده زبری سطح موجب بهبود قفل‌شدگی (اتصال) مکانیکی<sup>۱</sup> جوهر شده و مقاومت چاپ در برابر سایش و خراش را افزایش می‌دهد [۱۱].

از منظر عملکردی، پرایمرها نقش مهمی در یکنواخت‌سازی سطح زیرآیند ایفا می‌کنند. وجود ناهمگنی‌های سطحی، تخلخل‌های ریز و عیوب میکروسکوپی می‌تواند منجر به توزیع غیریکنواخت جوهر، تغییرات موضعی ضخامت لایه چاپی و در نهایت افت کیفیت بصری شود؛ در این شرایط، اعمال یک لایه پرایمر با تشکیل فیلمی پیوسته، این ناهمگنی‌ها را تعدیل کرده و بستر یکنواخت‌تری برای اعمال جوهر فراهم می‌سازد. کنترل رفتار جذب جوهر یکی دیگر از وظایف اساسی پرایمرها به‌شمار می‌رود. در زیرآیندهای متخلخل، پرایمر با مسدودسازی جزئی منافذ و کاهش نفوذ بیش‌ازحد جوهر، از پخش ناخواسته جلوگیری کرده و موجب افزایش وضوح تصویر، شدت رنگ و دقت بازتولید جزئیات می‌شود. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، پس از اعمال پرایمر بر روی کاغذ CS1<sup>۲</sup>، چاپ‌پذیری و نشست جوهر بطور قابل توجهی ارتقا یافته است. کاغذ CS1 کاغذی است که تنها یک سمت آن با لایه‌ای پوششی (معمولاً شامل پیگمنت‌های معدنی مانند کائولن یا کربنات کلسیم و بایندهای پلیمری) پوشش داده می‌شود، در حالی که سمت دیگر بدون پوشش باقی می‌ماند. این کاغذ از یک زیرآیند سلولزی ساخته شده و فرآیند پوشش‌دهی معمولاً به‌صورت تیغه‌ای یا

پرایمرهای مورد استفاده در صنعت چاپ نقش‌های متفاوتی متناسب با شرایط مصرف ایفا می‌کنند؛ یکی از مهم‌ترین عملکردهای پرایمرها افزایش انرژی سطحی زیرآیند است. بسیاری از مواد مورد استفاده در صنعت چاپ، به‌ویژه پلیمرها، دارای انرژی سطحی پایینی هستند که مانع ترشوندگی مناسب جوهر می‌شود. پرایمر با اصلاح این خاصیت، پخش یکنواخت جوهر را تسهیل می‌کند [۸]. ترشوندگی مناسب سطح نقش کلیدی در چسبندگی جوهر دارد، زیرا تماس موثر بین فاز مایع جوهر و سطح جامد زیرآیند را تضمین می‌کند. در واقع پرایمرها با کاهش زاویه تماس جوهر، شرایط لازم برای نفوذ و تثبیت بهتر آن را فراهم می‌سازند (شکل ۲). این زاویه به‌صورت زاویه بین مماس بر سطح قطره مایع در نقطه تماس و سطح جامد تعریف می‌شود و تعادلی بین نیروهای بین‌سطحی جامد-مایع، جامد-گاز و مایع-گاز را منعکس می‌سازد. به‌طور کلی، زمانی که زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه باشد، سطح ترشونده تلقی می‌شود و مایع تمایل به پخش شدن روی سطح دارد، در حالی که زاویه تماس بزرگ‌تر از ۹۰ درجه نشان‌دهنده ترشوندگی ضعیف و رفتار آب‌گریز سطح است. در حالت حدی، زاویه تماس بسیار کوچک (نزدیک به صفر) بیانگر ترشوندگی کامل است که در آن مایع به‌طور یکنواخت روی سطح گسترده می‌شود. در مقابل، زاویه تماس بسیار بزرگ (بیش از ۱۵۰ درجه) به‌عنوان حالت فوق‌آب‌گریز شناخته می‌شود [۹]. در کاربردهای چاپ، کاهش زاویه تماس جوهر روی زیرآیند اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا ترشوندگی مناسب موجب افزایش سطح تماس موثر، پخش یکنواخت جوهر و در نهایت بهبود چسبندگی و کیفیت چاپ می‌شود. استفاده از پرایمر یا اصلاح سطح زیرآیند با افزایش انرژی سطحی، یکی از راهکارهای اصلی برای کاهش زاویه تماس و کنترل رفتار ترشوندگی در فرآیندهای چاپ صنعتی محسوب می‌شود.

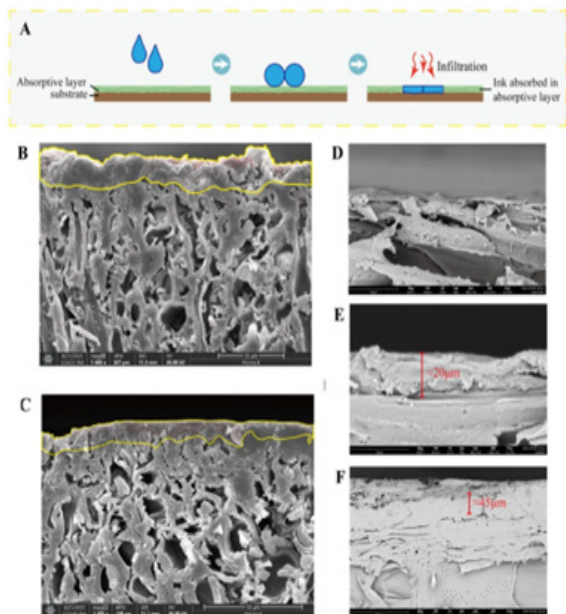


شکل ۲. شرایط زاویه تماس در دستیابی به ترشوندگی مناسب جوهر بر روی زمینه.

Figure 2. Contact angle conditions for achieving adequate ink wettability on the substrate.

- 1- Mechanical Interlocking
- 2- Coated One Side

پرایمر ایفا کرده و قابلیت رنگ‌پذیری را بهبود بخشیده است. نتایج آنالیز عنصری توزیع یکنواخت عناصر، به‌ویژه تیتانیوم، را در لایه پرایمر تایید کرد که بیانگر پخش مناسب ذرات معدنی در ساختار پوشش است. این توزیع یکنواخت، همراه با نفوذ کنترل‌شده پرایمر به لایه‌های سطحی زیرآیند، موجب بهبود چسبندگی بین پرایمر، جوهر و زیرآیند شده و نقش کلیدی در ارتقای جلوه بصری چاپ ایفا می‌کند. در مقایسه با زیرآیند بدون پوشش که به‌طور مستقیم در معرض جوهر قرار دارد، لایه پرایمر مرز مشخصی در ساختار لایه‌ای ایجاد کرده و از نفوذ بیش از حد جوهر به تخلخل‌های زیرآیند جلوگیری می‌کند. همچنین لایه جوهر آب پایه به‌خوبی با پرایمر ادغام شده و یک ساختار یکپارچه تشکیل می‌دهد. این یکپارچگی ساختاری سبب ایجاد چسبندگی موثر و مقاومت مناسب در برابر تنش‌های فیزیکی مکانیکی است.

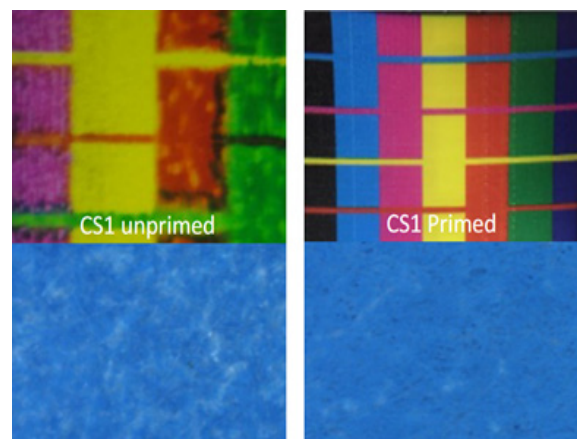


**شکل ۴.** جذب قطرات جوهر جوهرافشان بر روی پرایمر آب پایه (A)، نتایج EDS از مقطع عرضی (B و C) و تصاویر SEM از مقطع عرضی زیرآیند سلولزی (D)، نمونه پوشش‌دهنده با پرایمر آب پایه (E) و نمونه پوشش‌دهنده با پرایمر آب پایه و جوهر جوهرافشان (F).

**Figure 4.** Absorption of inkjet ink droplets on a water-based primer (A); EDS results from the cross-sectional view (B and C); and SEM images of the cross-section of the cellulosic substrate (D), the sample coated with the water-based primer (E), and the sample coated with the water-based primer and inkjet ink (F).

از منظر دوام و طول عمر عملکردی، به‌کارگیری پرایمر مناسب می‌تواند به‌طور موثری مقاومت لایه چاپ‌شده را در برابر عوامل محیطی مخرب نظیر رطوبت، تابش نور، تنش‌های حرارتی و تماس

غلتکی پس از تشکیل و خشک‌کردن کاغذ پایه انجام می‌گیرد. از نظر خواص، سطح پوشش‌دهنده دارای صافی، یکنواختی، جذب کنترل‌شده و کیفیت چاپ بالاتر است، در حالی که سمت بدون پوشش نفوذپذیری و زبری بیشتری دارد؛ اگر چه کیفیت چاپ همچنان برای بسیاری از کاربردهای چاپی نیاز است تا از طریق اعمال یک پرایمر روی این قبیل کاغذها ارتقا یابد. در زیرآیندهای غیرمتخلخل پرایمر با ایجاد یک لایه واسط با قابلیت جذب یا لنگراندازی<sup>۱</sup> مناسب، شرایط لازم برای تثبیت موثر جوهر را فراهم می‌کند. این عملکرد به‌ویژه در فناوری چاپ جوهرافشان اهمیت بالایی دارد، زیرا رفتار پخش، انعقاد و خشک‌شدن قطرات جوهر به‌شدت به خواص سطحی زیرآیند وابسته است. افزودن بر این، پرایمرها می‌توانند بر سینتیک خشک‌شدن یا پخت جوهر تاثیرگذار باشند؛ به‌طوری که برخی فرمولاسیون‌ها با تنظیم سرعت تبخیر حلال یا تسهیل واکنش‌های پخت شیمیایی، به افزایش بهره‌وری و پایداری فرآیند چاپ کمک می‌کنند [۱۲، ۱۳].



**شکل ۳.** مقایسه چاپ‌پذیری کاغذ CS1 بدون پرایمر و در حضور پرایمر.

**Figure 3.** Comparison of the printability of CS1 paper without primer and with primer present.

در پژوهشی که سانگ<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۴] به تازگی منتشر کرده‌اند ریزساختار یک پرایمر آب‌پایه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) مورد بررسی قرار گرفت تا نحوه توزیع عناصر، میزان نفوذ و برهم‌کنش پرایمر با جوهر و زیرآیند سلولزی ارزیابی شود. نتایج حاکی از آن است که استفاده از پرایمر می‌تواند با بهینه‌سازی نفوذ، توزیع و تثبیت جوهر، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود کیفیت چاپ، دوام رنگ و عملکرد بین‌سطحی در چاپ روی زیرآیندهای سلولزی ایفا کند. حضور دی‌اکسید تیتانیوم فاز روتایل به‌عنوان جزء اصلی پرایمر، نقش مهمی در قدرت پوشاندگی و پایداری شیمیایی لایه

1- Anchoring  
2- Sang

### ۳-۱- پرایمرهای حلال پایه

پرایمرهای حلال پایه از نخستین و پُرکاربردترین سامانه‌های مورد استفاده در صنعت چاپ به‌شمار می‌روند و به‌طور سنتی نقش مهمی در بهبود چسبندگی جوهر روی زیرآیندهای مختلف ایفا کرده‌اند. این پرایمرها به دلیل توانایی بالای حلال‌ها در حل کردن طیف وسیعی از رزین‌ها، تشکیل فیلم یکنواخت و ایجاد ترشوندگی مناسب، به‌ویژه برای زیرآیندهای پلیمری غیرقطبی، عملکرد قابل‌اعتمادی ارائه می‌دهند. نفوذ کنترل‌شده پرایمرهای حلالی به لایه‌های سطحی زیرآیند نیز موجب ایجاد اتصال مکانیکی و افزایش استحکام چسبندگی میان پرایمر و جوهر می‌شود، امری که در بسیاری از کاربردهای صنعتی چاپ اهمیت ویژه‌ای دارد. در پرایمرهای حلال پایه، انتخاب نوع حلال و نسبت آن در فرمولاسیون، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار رئولوژیکی، سرعت خشک‌شدن و کیفیت پوشش نهایی دارد. حلال‌هایی با فشار بخار بالا موجب تبخیر سریع و خشک‌شدن سریع‌تر می‌شوند، اما در صورت عدم کنترل مناسب می‌توانند منجر به بروز عیوب سطحی شوند. در مقابل، حلال‌های با تبخیر کندتر امکان هم‌ترازی بهتر زنجیره‌های پلیمری و تشکیل فیلم یکنواخت‌تری را فراهم می‌کنند. از این رو، در بسیاری از فرمولاسیون‌های صنعتی از مخلوط حلال‌ها برای دستیابی به تعادل مطلوب بین ترشوندگی، نفوذ و سرعت خشک‌شدن استفاده می‌شود [۱۷].

یکی از دلایل اصلی کارایی بالای پرایمرهای حلالی، تطابق مناسب کشش سطحی آن‌ها با انرژی سطحی زیرآیندهای پلیمری است. انرژی سطحی فیلم‌های پلیمری متداول در صنعت چاپ معمولاً در بازه‌های نسبتاً پایینی قرار دارد؛ به‌عنوان مثال، انرژی سطحی پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن در حدود  $31 \text{ mN/m}$  -  $30$  است، در حالی که پلی‌اتیلن ترفتالات دارای انرژی سطحی بالاتری در حدود  $44-42 \text{ mN/m}$  و پلی‌وینیل کلراید در محدوده  $40-38 \text{ mN/m}$  قرار می‌گیرد. برای دستیابی به ترشوندگی مناسب، کشش سطحی پرایمر باید کمتر یا حداکثر هم‌تراز با انرژی سطحی زیرآیند باشد. حلال‌های آلی متداول نظیر تولوئن، متیل‌اتیل‌کتون و اتیل‌استات دارای کشش سطحی نسبتاً پایین، معمولاً در بازه  $25-20 \text{ mN/m}$  هستند که این ویژگی، پخش شدن و ترشوندگی مناسب این نوع از پرایمرها را در مقابل پرایمرهای آب‌پایه (که کشش سطحی بالایی دارند) روی سطوح کم‌انرژی تسهیل می‌کند [۱۸].

خاطر نشان می‌شود که به همین دلایل تولیدکنندگان فیلم‌های پلیمری همواره می‌کوشند تا به کمک فرآیندهای جانبی نظیر اعمال کرونا این مقادیر را با هدف بهبود چاپ‌پذیری افزایش دهند. در

با مواد شیمیایی افزایش دهد. پرایمرها با تشکیل یک لایه واسط پایدار، از نفوذ رطوبت و عوامل خوردنده به فصل مشترک جوهر و زیرآیند جلوگیری کرده و از تخریب زودهنگام چسبندگی و افت خواص مکانیکی چاپ ممانعت می‌نمایند. این ویژگی در کاربردهای بسته‌بندی، به‌ویژه بسته‌بندی‌های غذایی و صنعتی که در معرض شرایط محیطی متغیر قرار دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۵]. در بسیاری از سامانه‌های چاپ صنعتی، پرایمرها به‌عنوان جایگزین یا مکمل روش‌های اصلاح سطح نظیر کرونا یا پلاسما مورد استفاده قرار می‌گیرند. این رویکرد امکان کنترل دقیق‌تر و پایدارتر خواص سطحی را فراهم ساخته و در مقایسه با اصلاح فیزیکی سطح، پایداری طولانی‌تری ارائه می‌دهد. از منظر اقتصادی نیز، استفاده بهینه از پرایمر می‌تواند با بهبود انتقال و تثبیت جوهر، منجر به کاهش مصرف جوهر، کاهش نرخ ضایعات و افزایش بازده کلی فرآیند چاپ شود؛ پیامدهایی که در نهایت به بهبود کیفیت محصول و کاهش هزینه‌های تولید منجر می‌گردند. توسعه پرایمرهای چندمنظوره که بتوانند هم‌زمان چندین عملکرد نظیر بهبود چسبندگی، یکنواخت‌سازی سطح و افزایش دوام را ارائه دهند، یکی از محورهای اصلی تحقیقات اخیر در صنعت چاپ است. در این راستا، استفاده از نانوذرات و افزودنی‌های عملکردی در فرمولاسیون پرایمرها مورد توجه قرار گرفته است [۷، ۱۶]. این مواد امکان تنظیم دقیق خواص سطحی و عملکردی پرایمر را فراهم می‌کنند. با وجود مزایای گسترده، عملکرد پرایمرها به‌شدت به شرایط فرآیندی مانند ضخامت لایه، روش اعمال و شرایط خشک‌کردن وابسته است. عدم کنترل مناسب این عوامل می‌تواند اثربخشی پرایمر را کاهش دهد. در مجموع، پرایمرها به‌عنوان اجزای کلیدی در زنجیره فرآیند چاپ، نقشی فراتر از یک لایه واسط ساده ایفا می‌کنند و درک دقیق تعریف و عملکرد آن‌ها پیش‌نیاز توسعه سامانه‌های چاپ پیشرفته و باکیفیت محسوب می‌شود.

### ۳- انواع پرایمرهای مورد استفاده در صنعت چاپ

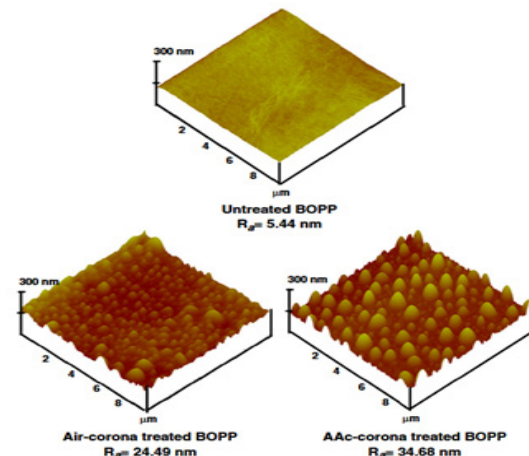
پرایمرهای مورد استفاده در صنعت چاپ را می‌توان بر اساس ماهیت شیمیایی، سامانه حلال، روش پخت و حوزه استفاده طبقه‌بندی کرد. این تنوع ناشی از گستردگی زیرآیندها، فناوری‌های چاپ و الزامات عملکردی مختلف در کاربردهای صنعتی است. لیکن یکی از رایج‌ترین دسته‌بندی‌ها در صنعت چاپ، تفکیک پرایمرها به پرایمرهای پایه حلال، آب‌پایه و تابش‌پز فرابنفش (UV) است. هر یک از این سامانه‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند که انتخاب آن‌ها را به شرایط فرآیندی وابسته می‌سازد که در ادامه به بررسی آن‌ها بصورت مجزا پرداخته می‌شود.

با وجود مزایای فنی قابل توجه، استفاده از پرایمرهای حلالی با چالش‌های زیست‌محیطی و ایمنی همراه است. انتشار ترکیبات آلی فرار، خطرات اشتعال‌پذیری و نیاز به سیستم‌های تهویه و بازیافت حلال، محدودیت‌های مهمی برای کاربرد گسترده این سامانه‌ها ایجاد کرده است. این عوامل، همراه با سخت‌گیرانه‌تر شدن قوانین زیست‌محیطی، موجب کاهش تدریجی استفاده از پرایمرهای حلال پایه در برخی کاربردها و جایگزینی آن‌ها با سامانه‌های پایه‌آب یا تابش‌پز UV شده است. با این حال، پرایمرهای حلالی همچنان در کاربردهایی که نیازمند بالاترین سطح ترشوندگی، نفوذ و چسبندگی روی زیرآیندهای بسیار کم‌انرژی هستند، جایگاه ویژه‌ای دارند. در چنین مواردی، کنترل دقیق خواص فیزیکی حلال‌ها و بهینه‌سازی فرمولاسیون می‌تواند امکان دستیابی به عملکرد بالا را فراهم سازد.

### ۳-۲- پرایمرهای پایه‌آب

پرایمرهای پایه‌آب به‌عنوان نسل جدیدی از سامانه‌های پوششی در صنعت چاپ، با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و پاسخ‌گویی به الزامات قانونی مرتبط با انتشار ترکیبات آلی فرار توسعه یافته‌اند. در این سامانه‌ها، آب به‌عنوان محیط پخش یا حلال اصلی عمل می‌کند و رزین‌ها به‌صورت امولسیون یا دیسپرسیون‌های پلیمری پایدار در آن حضور دارند. کاهش چشمگیر میزان VOC، ایمنی بالاتر در حین فرآیند و سهولت کاربری از جمله مزایای اصلی پرایمرهای پایه‌آب محسوب می‌شود که آن‌ها را به گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهای بسته‌بندی، چاپ صنعتی و مصارف حساس تبدیل کرده است. با وجود این مزایا، چالش اصلی در پرایمرهای پایه‌آب دستیابی به چسبندگی مناسب روی زیرآیندهای غیرقطبی و کم‌انرژی نظیر پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن است [۸، ۲۰]. به دلیل کشش سطحی بالاتر آب در مقایسه با بسیاری از زیرآیندهای پلیمری، ترشوندگی اولیه و پخش پرایمر روی این سطوح با محدودیت‌هایی همراه است. برای غلبه بر این مسئله، از رزین‌های اصلاح‌شده با گروه‌های عاملی فعال، مانند اکریلیک‌های اصلاح‌شده، پلی‌یورتان‌های آب‌پایه و رزین‌های هیبریدی استفاده می‌شود که توانایی برقراری برهم‌کنش‌های شیمیایی و بین‌مولکولی موثر با سطح زیرآیند را دارند [۲۱]. علاوه بر انتخاب نوع رزین، استفاده از مواد سطح‌فعال و افزودنی‌های عملکردی نقش مهمی در بهبود عملکرد پرایمرهای پایه‌آب ایفا می‌کند. این افزودنی‌ها با کاهش کشش سطحی سامانه، بهبود ترشوندگی و یکنواختی لایه پرایمر را ممکن می‌سازند و به کنترل رفتار خشک‌شدن و تشکیل فیلم کمک می‌کنند. در بسیاری از فرمولاسیون‌های پیشرفته، ترکیب افزودنی‌ها، عوامل اتصال‌دهنده

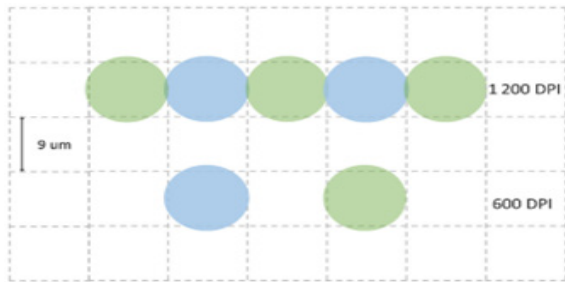
پژوهشی که توسط کالپات<sup>۱</sup> و همکارانش انجام شده [۱۹]، شرایط اعمال کرونا برای فیلم‌های پلی‌پروپیلن کشیده شده در دو جهت<sup>۲</sup> (BOPP) مورد بررسی قرار گرفته است. این قبیل فیلم‌های پلیمری که در بسته‌بندی مواد غذایی و برچسب‌ها کاربرد وسیعی دارند، از جمله سطوحی هستند که چاپ روی آنها همواره با چالش مواجه است. نتایج سه‌بعدی آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در شکل ۵ نشان می‌دهد که فیلم بدون اصلاح، دارای سطحی نسبتاً صاف و فاقد ناهمگنی‌های برجسته است (زبری سطحی پایین). پس از اعمال کرونا با هوا، تغییرات قابل توجهی در توپوگرافی سطح مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که ساختار اولیه تخریب شده و جای خود را به برجستگی‌های کروی شکل می‌دهد. این تحول با افزایش چشمگیر زبری سطح همراه است و نشان‌دهنده تاثیر انرژی بالای پلاسما بر تخریب ساختار سطحی پلیمر و ایجاد ناهمگنی‌های جدید است که می‌تواند بر خواص ترشوندگی و چسبندگی سطح تاثیرگذار باشد. در روش اصلاح سطحی کرونا با حضور اسید اکریلیک (AAC) نیز تغییرات مشابه اما با شدت بیشتر مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که ناهمواری‌های کروی درشت‌تر و زبری سطح نسبت به روش مرسوم کرونا با هوا بالاتر است. این رفتار نه تنها ناشی از تخریب سطحی پلیمر، بلکه به رسوب و پلیمریزاسیون گونه‌های حاصل از اسید اکریلیک روی سطح فیلم نسبت داده می‌شود. افزایش اندازه و تراکم این ساختارها بیانگر اصلاح هم‌زمان شیمیایی و ریزساختار سطح است که می‌تواند منجر به بهبود یا تنظیم دقیق‌تر ویژگی‌های بین‌سطحی فیلم BOPP در کاربردهای چاپ شود.



شکل ۵. تصاویر سه بعدی آزمون AFM برای فیلم BOPP خام و کرونای شده با هوا و اسید اکریلیک.

Figure 5. 3D-AFM images of the raw BOPP film and the BOPP film corona-treated with air and acrylic acid.

- 1- Kalapat
- 2- Biaxially Oriented Polypropylene



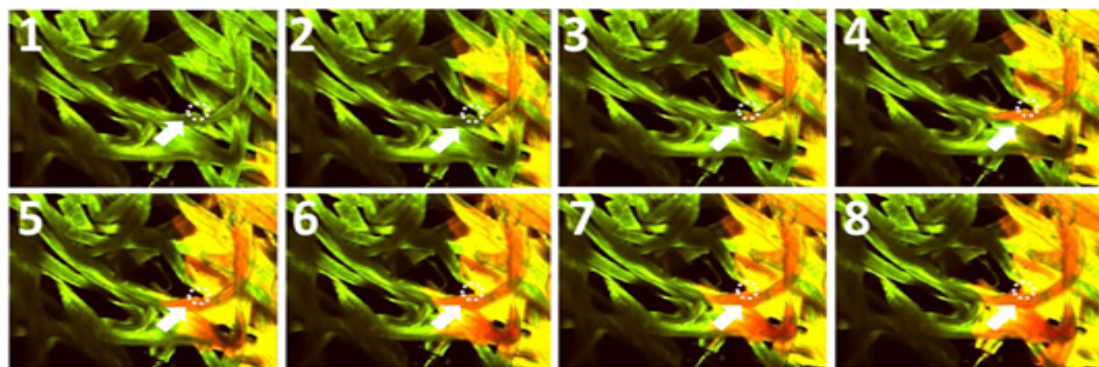
شکل ۶. فاصله‌گذاری قطرات جوهر پاشیده شده روی کاغذ برای کیفیت‌های چاپ ۶۰۰ و ۱۲۰۰ نقطه در اینچ.

Figure 6. Spacing of ink droplets jetted on paper for print resolutions of 600 and 1200 DPI.

دارای هم‌پوشانی می‌تواند نیاز به لایه پوشش ضخیم‌تر و با ظرفیت جذب بالاتر را افزایش دهد تا از انتقال جوهر به لایه الیافی کاغذ جلوگیری شود. نفوذ آب موجود در جوهر به بافت کاغذ پیامدهای نامطلوبی از منظر کیفیت چاپ به همراه دارد. الیاف سلولزی به شدت آب‌دوست هستند و به محض تماس با فاز مایع جوهر، پدیده فتیله‌ای شدن<sup>۱</sup> در امتداد سطح الیاف رخ می‌دهد که منجر به پخش ناخواسته جوهر و ایجاد الگوهای نامنظم در چاپ می‌شود (شکل ۷). علاوه بر این، جذب آب توسط الیاف موجب تورم آن‌ها و تغییر موضعی ضخامت کاغذ می‌گردد که می‌تواند مشکلات مکانیکی در فرآیند چاپ ایجاد کند. این نتایج نشان می‌دهد که پوشش باید نه تنها پیوسته و یکنواخت باشد، بلکه ضخامت آن به اندازه‌ای طراحی شود که بتواند کل فاز مایع جوهر را در خود نگه دارد. در غیر این صورت، انتقال مایع به زیرآیند اجتناب‌ناپذیر بوده و کیفیت نهایی چاپ به‌طور جدی افت خواهد کرد.

و اصلاح‌کننده‌های رئولوژیکی به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که ضمن حفظ مزایای زیست‌محیطی، عملکردی قابل‌رقابت با پرایمرهای حلال‌پایه حاصل گردد.

در حال حاضر بهترین گزینه جهت پوشش دهی سطوح سلولزی با هدف ارتقای کیفیت چاپ، پرایمرهای پایه آب است. لیکن نیاز است تا متغیرهای مختلف در طراحی، ساخت و اعمال این قبیل پوشش‌ها به دقت مورد توجه قرار گیرد. برای مثال براساس نتایج منتشر شده توسط اصلاان نژاد و همکارانش [۲۲] اگر پوشش اعمال شده بر روی کاغذ به‌اندازه کافی ضخیم و پیوسته نباشد، فاز مایع جوهر از آن عبور کرده و وارد لایه الیافی زیرآیند می‌شود؛ پدیده‌ای که باعث افت شدید کیفیت چاپ جوهرافشان می‌گردد. این پژوهش بررسی می‌کند که چگونه ضخامت، یکنواختی و ساختار لایه پرایمر بر رفتار نفوذ جوهر، پخش آن و در نهایت کیفیت چاپ تأثیر می‌گذارد. تفاوت در کیفیت چاپ با تفکیک‌پذیری ۶۰۰ DPI و ۱۲۰۰ DPI به‌وضوح نمایان است (شکل ۶). در چاپ با ۶۰۰ DPI فاصله مرکز تا مرکز قطرات جوهر نسبتاً زیاد است و هر قطره به‌صورت مجزا با لایه پرایمر برهم‌کنش می‌کند. در این شرایط، اگر ضخامت پرایمر به حداقل مقدار لازم نرسد، حجم مایع موجود در قطره می‌تواند از ظرفیت جذب پرایمر فراتر رفته و به لایه الیافی زیرین نفوذ کند. در مقابل، در چاپ با ۱۲۰۰ DPI، قطرات جوهر با فاصله کمتر و هم‌پوشانی جزئی روی سطح قرار می‌گیرند که منجر به افزایش یکنواختی تصویر و وضوح بالاتر می‌شود، اما هم‌زمان چالش جذب حجم مایع نیز تشدید می‌گردد. در این حالت، هر چند حجم تک‌قطره ثابت است، اما تجمع موضعی مایع در نواحی



شکل ۷. تصاویر لحظه‌ای میکروسکوپ لیزری از حرکت آب وارد شده به لایه الیافی کاغذ (اعداد نشان‌دهنده گام‌های زمانی هستند): آب از سمت راست وارد شده است و رنگ‌های سبز و نارنجی به ترتیب بیانگر الیاف خشک و مرطوب کاغذ بوده و رنگ زرد ناحیه اشباع میانی را نشان می‌دهد. پیکان‌ها به ناحیه‌ای با اشباع بالا در جلوی مسیر حرکت آب اشاره دارند؛ به‌طوری‌که آب ابتدا بر روی الیاف حرکت کرده و به درون آن‌ها نفوذ می‌کند و سپس فضای حفره‌ای بین الیاف را پر می‌نماید.

Figure 7. Time-resolved laser microscopy images of water transport into the fibrous layer of paper (numbers indicate time steps); water enters from the right, with green and orange representing dry and wet paper fibers, respectively, and yellow indicating the intermediate saturated region. Arrows highlight a highly saturated zone ahead of the advancing water front, showing that water initially spreads along the fibers and penetrates them before filling the pore spaces between fibers.

1- Wicking

## ۳-۳- پرایمرهای تابش‌پز

پرایمرهای تابش‌پز، به‌ویژه سامانه‌های پخت‌شونده با تابش فرابنفش (UV) و پرتو الکترونی (EB) به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌ها در صنعت چاپ مدرن مطرح شده‌اند. در این پرایمرها، فرآیند تشکیل فیلم و ایجاد چسبندگی از طریق واکنش‌های پلیمریزاسیون یا شبکه‌ای شدن سریع تحت تابش انجام می‌شود که منجر به پخت آنی و تشکیل لایه‌ای متراکم و پایدار می‌گردد. سرعت بالای پخت، مصرف انرژی کمتر در مقایسه با سامانه‌های حرارتی و عدم نیاز به حلال‌های فرار، از مهم‌ترین مزایای این نوع پرایمرها به‌شمار می‌رود و آن‌ها را به گزینه‌ای جذاب برای خطوط چاپ با سرعت بالا تبدیل کرده است [۲۳]. از منظر ترکیب شیمیایی، پرایمرهای تابش‌پز معمولاً بر پایه الیگومرها و مونومرهای واکنش‌پذیر نظیر آکریلات‌ها، اپوکسی‌آکریلات‌ها یا یورتان‌آکریلات‌ها فرموله می‌شوند و حاوی آغازگرهای نوری هستند که تحت تابش، رادیکال‌ها یا کاتیون‌های فعال تولید می‌کنند. این گونه‌های فعال، شروع‌کننده فرآیند پلیمریزاسیون بوده و به تشکیل شبکه‌ای سه‌بعدی با چگالی اتصالات بالا منجر می‌شوند. چنین ساختاری، علاوه بر افزایش چسبندگی بین پرایمر و زیرآیند، مقاومت مکانیکی و شیمیایی لایه چاپ‌شده را نیز به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد پرایمرهای تابش‌پز، دستیابی به ترشوندگی و چسبندگی مناسب روی زیرآیندهای کم‌انرژی نظیر پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن است. برای رفع این محدودیت، از اصلاح شیمیایی الیگومرها، افزودن مونومرهای با قطبیت بالاتر و افزودنی‌های مناسب می‌توان بهره برد [۲۴]. ترکیب این پرایمرها با روش‌های اصلاح سطح نظیر کرونا یا پلاسما می‌تواند منجر به بهبود قابل‌توجه برهم‌کنش بین پرایمر و سطح زیرآیند گردد و پایداری بلندمدت چسبندگی را تضمین کند. از منظر کاربردی، پرایمرهای تابش‌پز در حوزه‌هایی نظیر بسته‌بندی، لیبل‌ها، چاپ دیجیتال و الکترونیک چاپی جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. محتوای جامد صد در صد و عدم انتشار مواد فرار، امکان کنترل دقیق ضخامت لایه و سازگاری با الزامات زیست‌محیطی از جمله عواملی هستند که موجب گسترش استفاده از این سامانه‌ها شده‌اند. افزون بر این، قابلیت طراحی پرایمرهای تابش‌پز با عملکردهای چندگانه، نظیر افزایش چسبندگی، مقاومت سایشی و پایداری شیمیایی، آن‌ها را به یکی از محورهای اصلی تحقیقات نوین در صنعت چاپ تبدیل کرده است.

## ۳-۴- پرایمرهای مبتنی بر نانوذرات

پرایمرهای مبتنی بر نانوذرات به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین

در مهندسی سطوح چاپی مطرح شده‌اند و امکان ارتقای هم‌زمان چندین ویژگی عملکردی را فراهم می‌کنند. افزودن نانوذرات به فرمولاسیون پرایمر می‌تواند با تغییر ریزساختار لایه واسط، به بهبود چسبندگی، یکنواختی سطح و دوام چاپ منجر شود. به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا، نانوذرات قادرند برهم‌کنش‌های بین‌سطحی را به‌طور موثری تقویت کرده و نقش فعالی در انتقال تنش و تثبیت لایه مرکب ایفا کنند. این ویژگی‌ها، پرایمرهای نانوکامپوزیتی را به گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای پیشرفته چاپ تبدیل کرده است [۲۵]. از منظر نوع نانوذرات، مواد معدنی نظیر نانوذرات سیلیکا، دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم بیشترین کاربرد را در پرایمرهای چاپی دارند. نانوذرات سیلیکا به‌طور گسترده برای تنظیم زبری سطح، افزایش انرژی سطحی و کنترل ترشوندگی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم علاوه بر بهبود سفیدی و پوشاندگی، می‌توانند مقاومت نوری و پایداری شیمیایی لایه چاپ را افزایش دهند. توزیع یکنواخت این نانوذرات در ماتریس پلیمری پرایمر، عامل کلیدی در دستیابی به عملکرد مطلوب و جلوگیری از ایجاد عیوب سطحی است. یکی از مزایای مهم پرایمرهای مبتنی بر نانوذرات، امکان تنظیم دقیق خواص سطحی بدون افزایش قابل‌توجه ضخامت لایه پرایمر است. حضور نانوذرات می‌تواند موجب ایجاد زبری کنترل‌شده در مقیاس نانو شود که این امر به بهبود لنگراندازی مکانیکی و افزایش سطح تماس موثر بین پرایمر و مرکب منجر می‌گردد. علاوه بر این، نانوذرات می‌توانند به‌عنوان حامل گروه‌های عاملی فعال عمل کرده و از طریق برهم‌کنش‌های شیمیایی یا قطبی، چسبندگی بین‌سطحی را تقویت کنند؛ قابلیت‌هایی که به‌ویژه در چاپ روی زیرآیندهای کم‌انرژی اهمیت دارد. با وجود مزایای قابل‌توجه، چالش‌هایی نظیر تجمع نانوذرات، پایداری دیسپرسیون و تاثیر آن‌ها بر رئولوژی پرایمر همچنان مطرح است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، استفاده از نانوذرات اصلاح‌شده سطحی، عوامل پراکنش‌دهنده و روش‌های پیشرفته اختلاط مورد توجه قرار گرفته است [۲۶].

## ۴- مواد شیمیایی و فرمولاسیون پرایمرها

فرمولاسیون پرایمرهای مورد استفاده در صنعت چاپ مبتنی بر طراحی دقیق و هم‌زمان انواع رزین‌ها، بایندرهای، افزودنی‌ها و محیط‌های پخش است، به‌طوری‌که هر جزء نقش کاملاً مشخص و عملکردی در خواص نهایی لایه پرایمر ایفا می‌کند. رزین‌ها و بایندرهای، به‌عنوان ماتریس اصلی، پیوستگی مکانیکی و شیمیایی بین زیرآیند و جوهر را تضمین می‌کنند؛ رزین‌های اکریلیکی به‌طور

چاپ را افزایش دهند. اصلاح‌کننده‌های سطحی، مانند سیلان‌ها، برای ایجاد پیوندهای شیمیایی قوی‌تر بین پرایمر و زیرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به‌ویژه در چاپ روی شیشه و فلز اهمیت دارند. تعادل بین اجزای مختلف فرمولاسیون پرایمر یک چالش فنی مهم محسوب می‌شود، زیرا بهبود یک خاصیت ممکن است بر سایر خواص تأثیر منفی بگذارد. از منظر صنعتی، فرمولاسیون پرایمر باید علاوه بر عملکرد فنی، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی نیز توجیه‌پذیر باشد. این موضوع محدودیت‌هایی در انتخاب مواد اولیه ایجاد می‌کند. در نهایت، توسعه پرایمرهای کارا نیازمند درک عمیق از شیمی پلیمرها، علم سطح، رفتار رئولوژیکی، پلیمریزاسیون و الزامات فرآیندی است تا کیفیت چاپ پایدار، قابل اطمینان و سازگار با انواع زیرآیندها حاصل شود.

### ۵- جمع‌بندی و چشم‌انداز آینده

پرایمرها به‌عنوان اجزای کلیدی در زنجیره فرآیند چاپ، نقشی اساسی در بهبود چسبندگی، یکنواختی و دوام چاپ ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، افزایش تنوع زیرآیندها و فناوری‌های چاپ، نیاز به پرایمرهای تخصصی و هدفمند را بیش از پیش برجسته کرده است. دیگر نمی‌توان از یک پرایمر واحد برای تمامی کاربردها انتظار عملکرد بهینه داشت. نتایج پژوهش‌های جدید نشان می‌دهد که درک عمیق از دانش مهندسی سطح و برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی میان پرایمر، جوهر و زیرآیند، پیش‌نیاز توسعه سامانه‌های چاپ پیشرفته محسوب می‌شود. این موضوع محور اصلی بسیاری از پژوهش‌های جدید است و تلاش به سمت کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌ها همچنان ادامه دارد. در سال‌های اخیر توسعه پرایمرهای پایه‌آب اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، لیکن این پرایمرها همچنان با چالش‌هایی به ویژه در چسبندگی روی زیرآیندهای غیرقطبی مواجه هستند. استفاده از رزین‌های اصلاح‌شده و افزودنی‌های تخصصی به‌عنوان راهکاری موثر برای بهبود عملکرد پرایمرها معرفی شده است. از سوی دیگر پرایمرهای تابش‌پز همچنان یکی از گزینه‌های اصلی برای خطوط چاپ با سرعت بالا می‌باشند. سرعت پخت و استحکام لایه ایجادشده از مزایای برجسته این سامانه‌ها محسوب می‌شود. در حوزه چاپ دیجیتال، تمرکز پژوهشی در کنترل رفتار جوهر توسط پرایمرها و افزایش وضوح تصویر است. این موضوع به‌ویژه در چاپ جوهرافشان اهمیت فزاینده‌ای یافته است. یکی از روندهای نوین که در تحقیقات اخیر به آن اشاره شده است، توسعه پرایمرهای چندمنظوره با قابلیت استفاده در چند فناوری چاپ است؛ این پرایمرها می‌توانند پیچیدگی فرآیندهای صنعتی را کاهش دهند.

گسترده در فرمولاسیون پرایمرها مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا امکان تنظیم قطبیت، وزن مولکولی و خواص فیلم‌سازی را فراهم می‌کنند. این ویژگی‌ها باعث سازگاری آن‌ها با انواع مختلف جوهر می‌شود. پلی‌یورتان‌ها طبقه مهم دیگری هستند که به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و مقاومت مناسب در برابر سایش و ترک‌خوردگی، در کاربردهای بسته‌بندی و چاپ انعطاف‌پذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. رزین‌های اپوکسی به دلیل چسبندگی قوی و مقاومت شیمیایی بالا، در پرایمرهای مورد استفاده برای چاپ‌های صنعتی و کاربردهای خاص به کار می‌روند. با این حال، شکنندگی نسبی آن‌ها نیازمند اصلاح یا ترکیب با سایر رزین‌ها است [۲۶]. در پرایمرهای پایه آب، رزین‌ها معمولاً به‌صورت امولسیون یا دیسپرس شده در آب حضور دارند. پایداری این سامانه‌ها به نوع امولسیفایر و شرایط فرمولاسیون وابسته است.

علاوه بر بایندها، افزودنی‌ها نقش حیاتی در بهینه‌سازی خواص پرایمر ایفا می‌کنند. این افزودنی‌ها شامل عوامل ترکننده، پخش‌کننده‌ها، ضدکف‌ها و پایدارکننده‌ها هستند. عوامل ترکننده با کاهش کشش سطحی پرایمر، پخش یکنواخت آن روی زیرآیند را تسهیل می‌کنند. این مواد به‌ویژه در چاپ روی سطوح کم‌انرژی اهمیت زیادی دارند. پخش‌کننده‌ها برای جلوگیری از تجمع ذرات جامد و تضمین یکنواختی فرمولاسیون استفاده می‌شوند. این افزودنی‌ها نقش مهمی در پایداری و زمان انبارداری پرایمر دارند. ضدکف‌ها با کنترل تشکیل حباب در حین اختلاط و اعمال پرایمر، از ایجاد عیوب سطحی در لایه چاپ‌شده جلوگیری می‌کنند. انتخاب نوع و مقدار مناسب ضدکف اهمیت ویژه‌ای دارد. در پرایمرهای تابش‌پز، فوتوآغازگرها جزء کلیدی فرمولاسیون هستند. این مواد با جذب تابش فرابنفش، واکنش‌های پلیمریزاسیون را آغاز می‌کنند و غلظت و نوع آن‌ها بر سرعت پخت، عمق نفوذ تابش و خواص مکانیکی فیلم اثر مستقیم دارند. عدم انتخاب مناسب می‌تواند منجر به پخت ناقص یا شکنندگی لایه شود [۲۷].

حلال‌ها یا محیط‌های پخش نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار رئولوژیکی پرایمر دارند. گرانروی مناسب برای اعمال یکنواخت پرایمر در فناوری‌های مختلف چاپ ضروری است. در سامانه‌های پایه‌حلال، نوع حلال بر سرعت خشک‌شدن و ایمنی فرآیند تأثیر می‌گذارد. در مقابل، در سامانه‌های پایه‌آب، کنترل تبخیر آب و زمان خشک‌شدن اهمیت بیشتری دارد. افزودن پُرکننده‌ها و نانوذرات به فرمولاسیون پرایمر می‌تواند خواص سطحی و مکانیکی آن را بهبود بخشد. این مواد امکان تنظیم زبری سطح و انرژی سطحی را فراهم می‌کنند. نانوذرات سیلیکا و اکسیدهای فلزی از جمله افزودنی‌های پرکاربرد هستند که می‌توانند مقاومت سایشی و دوام

## ۷- مراجع

- [1] Kettle, J.; Lamminmäki, T.; Gane, P.; "A review of modified surfaces for high speed inkjet coating", *Surface and Coatings Technology.*, 204, 2103–2109, 2010.
- [2] Zheng, Y.; "Adhesion with purpose: The value of primers in sustainable flexible packaging", *TAPPI Journal.*, 24, 359–367, 2025.
- [3] Bohlmann, G. M.; "Biodegradable packaging life-cycle assessment", *Environmental Progress.*, 23, 342–350, 2004.
- [4] Hamada, H.; Bousfield, D. W.; "Effect of cationic additives on ink penetration", *Journal of Pulp and Paper Science.*, 35, 118–123, 2009.
- [5] Graindourze, M.; *UV-Curable Inkjet Inks and Their Applications in Industrial Inkjet Printing, Including Low-Migration Inks for Food Packaging*, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2022.
- [6] Mielonen, K.; Ovaska, S.-S.; Johansson, L.-S.; Österberg, M.; Backfolk, K.; "Three-layered poly-electrolyte structures as inkjet receptive coatings: Part 1. Interaction with dye-based ink", *Journal of Imaging Science and Technology.*, 60, 1–9, 2016.
- [7] Neumann, D.; Löffler, S.; Raverty, W.; Vanderhoek, N.; Andrews, P. C.; Junk, P. C.; Spiccia, L.; "Pigments for ink receptor layers—Characterisation and assessment", *Proc. Appita Annual Conference.*, 2, 383–386, 2004.
- [8] Nuntapichedkul, B.; Tantayanon, S.; Laohhasurayotin, K.; "Practical approach in surface modification of biaxially oriented polypropylene films for gravure printability", *Applied Surface Science.*, 314, 331–340, 2014.
- [9] Jothi Prakash, C. G.; Prasanth, R.; "Approaches to design a surface with tunable wettability: A review on surface properties", *Journal of Materials Science.*, 56, 108–135, 2021.
- Tokarczyk, M.; Lis, B.; Salca, E. A.; Krystofiak, [10] T.; "Adhesion of varnish coatings as a background for analogue and digital printing technologies", *Applied Sciences.*, 14, 304, 2024
- [11] Jin, M.; Thomsen, F.; Skrivanek, T.; Willers,

با این حال، نتایج نشان می‌دهد که دستیابی به عملکرد بهینه در تمامی شرایط با یک پرایمر واحد همچنان دشوار است. این مسئله نیاز به رویکردهای طراحی هوشمند و تطبیقی را مطرح می‌کند. از سوی دیگر فناوری نانو به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسیرهای آینده در توسعه پرایمرهای چاپ شناخته می‌شود. مقالات اخیر نشان داده‌اند که نانوذرات می‌توانند تنظیم دقیق خواص سطحی را ممکن سازند. با وجود مزایای بالقوه، پژوهش‌ها بر ضرورت بررسی دقیق مسائل ایمنی، پایداری و مهاجرت نانوذرات در کاربردهای بسته‌بندی، به‌ویژه بسته‌بندی مواد غذایی، تاکید دارند. استفاده از مواد زیست‌پایه و تجدیدپذیر در فرمولاسیون پرایمرها یکی دیگر از جهت‌گیری‌های مهم پژوهشی است. این روند با اهداف توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی هم‌راستا است. مطالعات جدید همچنین بر اهمیت سازگاری پرایمرها با فرآیندهای بازیافت زیرآیندهای چاپی تاکید دارند. این موضوع به‌ویژه در صنعت بسته‌بندی اهمیت روزافزونی یافته است. از منظر صنعتی، تمرکز بر لزوم ایجاد توازن میان عملکرد فنی، هزینه و سهولت در استفاده است. پرایمرهای پیشرفته تنها در صورتی موفق خواهند بود که قابلیت تجاری‌سازی داشته باشند. یکی از خالهای شناسایی شده، نبود استانداردهای یکپارچه برای ارزیابی عملکرد پرایمرها است. این مسئله مقایسه نتایج تحقیقات مختلف را دشوار می‌سازد. توسعه روش‌های آزمون استاندارد می‌تواند به تسریع انتقال نتایج علمی به کاربردهای صنعتی کمک نماید. چشم‌انداز آینده پرایمرهای چاپ به سمت سامانه‌های هوشمند و تطبیقی حرکت می‌کند؛ سامانه‌هایی که بتوانند متناسب با شرایط فرآیندی یا نوع زیرآیند، عملکرد خود را تنظیم کنند. ترکیب دانش شیمی و پلیمر، مهندسی سطح و فناوری چاپ، به‌عنوان یک رویکرد میان‌رشته‌ای، در منابع تحقیقاتی جدید به‌عنوان مسیر اصلی پیشرفت این حوزه معرفی شده است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که پرایمرها نه تنها یک جزء کمکی، بلکه عنصری راهبردی در توسعه فناوری‌های نوین چاپ محسوب می‌شوند و پژوهش‌های آینده نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای کیفیت، پایداری و کارایی صنعت چاپ خواهند داشت.

## ۶- قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از شرکت نوآور پوشش نیل فام به جهت حمایت‌های صورت گرفته اعلام می‌دارند.

- T.; "Why test inks cannot tell the whole truth about surface free energy of solids", *Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion*, Mittal, K. L., Ed.; Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2015, 419–438.
- [12] Lundberg, A.; Örtengren, J.; Alfthan, E.; Ström, G.; "Microscale droplet absorption into paper for inkjet printing", *Nordic Pulp & Paper Research Journal*., 26, 142–149, 2011.
- [13] Shaw-Klein, L.; "Effects of mordant type and placement on inkjet receiver performance", *Proc. IS&T NIP14 Int. Conf. on Digital Printing Technologies*., 129–132, 1998.
- [14] Sang, R.; Yang, F.; Fan, Z.; "The effect of water-based primer pretreatment on the performance of water-based inkjet coatings on wood surfaces", *Coatings*., 13, 1649, 2023.
- [15] Rydz, J.; Musioł, M.; Zawidlak-Węgrzyńska, B.; et al.; "Present and future of biodegradable polymers for food packaging applications", *Handbook of Food Bioengineering: Biopolymers for Food Design*, Grumezescu, A. M.; Holban, A. M., Eds.; Academic Press, Cambridge, MA, USA, 2018, 431–467.
- [16] van Leeuwen, M. L. J.; "TopBrane™: Hyperbranched polymers as additives for ink jet receptive coatings", *Japan TAPPI Journal*., 62, 1112–1116, 2008.
- [17] Scotton, R. S.; Guerrini, L. M.; Oliveira, M. P.; "Evaluation of solvent-based and UV-curing inkjet inks on the adhesion and printing quality of different aircraft surface coatings", *Progress in Organic Coatings*., 158, 106389, 2021.
- [18] Aydemir, C.; Altay, B. N.; Akyol, M.; "Surface analysis of polymer films for wettability and ink adhesion", *Color Research & Application*., 45, 1–11, 2020.
- [19] Kalapat, N.; Amornsakchai, T.; "Surface modification of biaxially oriented polypropylene (BOPP) film using acrylic acid–corona treatment: Part I. Properties and characterization of treated films", *Surface and Coatings Technology*., 207, 594–601, 2012.
- [20] Gourianova, S.; Willenbacher, N.; Kutschera, M.; "Chemical force microscopy study of adhesive properties of polypropylene films: Influence of surface polarity and medium", *Langmuir*., 21, 5429–5438, 2005.
- [21] Bao, L.; Fan, H.; Chen, Y.; Yan, J.; Yang, T.; Guo, Y.; "Effect of surface free energy and wettability on the adhesion property of waterborne polyurethane adhesive", *RSC Advances*., 6, 99346–99352, 2016.
- [22] Aslannejad, H.; Hassanizadeh, S. M.; Celia, M. A.; "Characterization of the interface between coating and fibrous layers of paper", *Transport in Porous Media*., 127, 143–155, 2019.
- [23] Jarrett, K. G.; Wilson, I. J.; Lawrence, P. W.; "Printing primer compositions and methods", U.S. Patent 12,037,512 B2, 2024.
- [24] Decker, C.; "Kinetic study and new applications of UV radiation curing", *Macromolecular Rapid Communications*., 23, 1067–1093, 2002.
- [25] Mo, L.; Guo, Z.; Yang, L.; Zhang, Q.; Fang, Y.; Xin, Z.; Chen, Z.; Hu, K.; Han, L.; Li, L.; "Silver nanoparticles based ink with moderate sintering in flexible and printed electronics", *International Journal of Molecular Sciences*., 20, 2124, 2019.
- [26] Müller, M.; "Sizing, shaping and pharmaceutical applications of polyelectrolyte complex nanoparticles", *Polyelectrolyte Complexes in the Dispersed and Solid State II*, Antonietti, M.; Voigt, A., Eds.; Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 2014, 197–260.
- [27] Allen, N. S.; "Photoinitiators for UV and visible curing of coatings: Mechanisms and properties", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*., 100, 101–107, 1996.