



مروری بر کاربرد مرکب‌های تابش‌پز در چاپ جوهرافشان

سمانه جعفری فرد^۱، سعید باستانی*^۲، آتسه سلیمانی گرگانی^۳، مرتضی گنجایی ساری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، علوم و فناوری چاپ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- دانشیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۳- استادیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۴- استادیار، گروه پژوهشی نانو فناوری، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۵- دانشیار، قطب علمی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

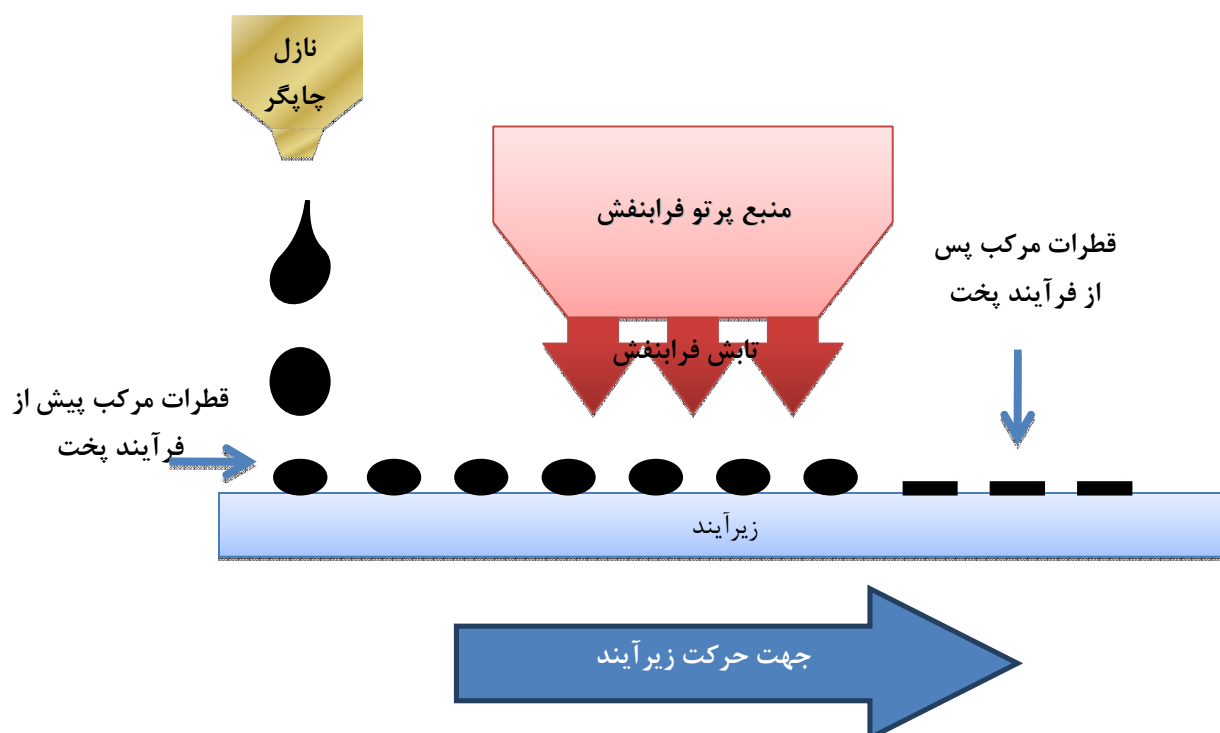
تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۲ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۲/۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۱۱ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۲/۱۱/۱۳

چکیده

مرکب‌های تابش‌پز، از انواع مرکب‌های مورد استفاده در چاپ جوهرافشان هستند. فرآیند چاپ این مرکب‌ها توسط نازل‌های پیژوالکتریک قطره در صورت نیاز صورت می‌گیرد. این نوع از مرکب‌ها مزایای فراوانی چون نبود مواد فرار در ترکیب‌بندی، تولید فیلمی با پایداری و مقاومت سایشی بالا، نیاز به انرژی و تجهیزات کمتر در فرآیند چاپ و غیره دارند. به دلیل همین مزایا این مرکب‌ها در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از این نوع مرکب می‌توان برای چاپ بر روی انواع زیرآیند استفاده کرد. در این مقاله اجزای این نوع از مرکب و مزایای آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به شرح برخی از محدودیت‌های این روش و راه حل‌های مناسب برای رفع این محدودیت‌ها مطالعه شده است.

واژه‌های کلیدی

چاپ جوهرافشان، پرتو فرابنفش، مرکب تابش‌پز، مونومر، الیگومر.



*Corresponding author: bastani@icrc.ac.ir

A review on applications of UV curable inkjet inks, S. Jafarifard, S. Bastani, A. Soleimani Gorgani, M. Ganjaee Sari

۱- مقدمه

تغییر فاز^۳ (بر پایه مذاب پلیمر) و مرکب‌های فعال (مرکب تابش‌پز) این دسته‌ها را تشکیل می‌دهند. در جدول ۱ می‌توان دسته‌بندی اجمالی از مرکب‌های مختلف و روش خشکانش آن‌ها را مشاهده نمود [۱، ۴، ۱۰].

جدول ۱- دسته‌بندی مرکب‌ها و روش‌های خشک‌شدن آن‌ها [۴].

سازوکار خشک‌شدن	نوع مرکب
جذب، نفوذ، تبخیر	پایه آبی
جذب، نفوذ	پایه روغنی
تبخیر	پایه حلالی
جامد شدن مذاب ^۴	بر پایه مذاب پلیمر
پلیمریزاسیون	تابش‌پز

در برخی از فرآیندها، از پرتو تابشی برای خشک‌شدن مرکب‌ها استفاده می‌شود. این نوع از مرکب‌ها بر اساس نوع موج تابشی به چند گروه تقسیم می‌شوند. مرکب‌هایی که با استفاده از تابش فرابنفش^۵، زیرقرمز^۶ و باریکه الکترونی^۷ می‌توانند فیلم جامد خود را تشکیل دهند این گروه‌ها را تشکیل می‌دهند [۱۰].

³ Phase- Changing Ink

⁴ Solidification

⁵ Ultra violet (UV)

⁶ Infra-red (IR)

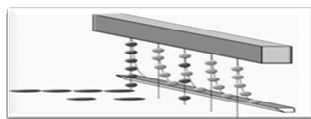
⁷ Electron beam (EB)

چاپ جوهرافشان از انواع چاپ‌های غیرتماسی^۱ است. اساس این نوع چاپ خروج قطرات مرکب از نازل در نقاط تصویری، و قرارگیری این قطرات بر روی زیرآیند است. در این نوع از چاپ، نقاط تصویری توسط دستگاه شناسایی شده و وجود این نقاط با سیگنال‌های الکتریکی برای چاپگر مشخص می‌شود. این سیگنال‌ها باعث ایجاد یک پالس حرارتی، مغناطیسی و یا فشاری در چاپگر خواهند شد. هر نوع از این پالس‌ها باعث خروج قطره از نازل، در نقاط تصویری، می‌شود. چاپگرهای جوهرافشان بر اساس سازوکار تولید قطره و نحوه خروج مرکب از نازل به چند گروه تقسیم می‌شوند. این گروه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۵-۱]. میزان هدرفت مرکب در این نوع از چاپ به خصوص در فرآیند قطره در صورت نیاز^۲ آن بسیار پایین است. همچنین این نوع فرآیند قابلیت اعمال چاپ بر هر زیرآیندی را ممکن می‌سازد. چاپ جوهرافشان امکان چاپ مستقیم اسناد از رایانه بر روی زیرآیند را فراهم می‌کند و قابلیت چاپ انواع داده‌های متنی و تصویری را با وضوح بالا دارا می‌باشد [۹-۱]. در چاپ جوهرافشان انواع مختلفی از مرکب‌ها به کار می‌روند. این مرکب‌ها را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم‌بندی کرد. مرکب‌های پایه آبی، مرکب‌های غیرآبی (پایه حلالی یا روغنی)، مرکب‌هایی با امکان

¹ Non-Impact

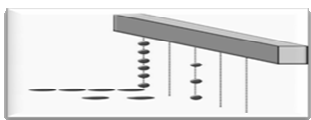
² Drop On Demand (DOD)

تقسیم بندی بر اساس سازوکار خروج قطره



قطره به صورت دائمی از نازل خارج شده و در نقاط تصویری توسط میدان مغناطیسی منحرف شده و روی زیرآیند قرار می‌گیرد.

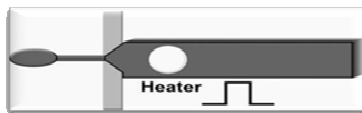
چاپگر مداوم
Continues ink jet (CIJ)



قطره تنها در نقاط تصویری از نازل خارج شده و روی زیرآیند قرار می‌گیرد.

چاپگر قطره در صورت نیاز
Drop on Demand (DOD)

تقسیم بندی بر اساس سازوکار تولید قطره



خروج قطره با استفاده از پالس حرارتی و ایجاد حباب در نازل

حرارتی



خروج قطره با ایجاد یک پالس فشاری با تغییر شکل پیزوسرامیک

پیزوالکتریک



خروج قطره با ایجاد یک پالس الکتریکی و ایجاد یک میدان الکتریکی در اثر آن

الکترواستاتیک

شکل ۱- انواع چاپگر جوهرافشان [۱۰، ۳-۱]

زمان مواد اولیه برای این نوع از مرکب متداول و در دسترس نبود، ولی در سال‌های اخیر از جمله فناوری‌های رو به پیشرفت به حساب می‌آید. سامانه‌های تابش‌پز مزایایی مانند سرعت تولید بالا، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و همچنین بهینه‌سازی فضای کارخانه را دارا می‌باشند [۱۶]. مرکب‌های تابش‌پز برای مصارف صنعتی بسیار پرکاربرد هستند. فرآیند پخت سریع آن‌ها، شرایط لازم را برای سیستم پیوسته^۳ چاپ فراهم می‌کند. این نوع از مرکب، پایداری محیطی بالا^۴ و مقاومت در برابر سایش^۵ بهتری را نسبت به مرکب‌های پایه حلالی و پایه آبی از خود نشان می‌دهد. بیشترین مصارف این نوع مرکب در جوهرافشان، کاربرد آن‌ها در چاپ صفحات بسیار بزرگ^۶ است. این صفحات بیشتر برای مصارف تبلیغاتی بر روی بنرهای بزرگ به کار می‌روند که معمولاً در محیط‌های آزاد شهری نصب می‌شوند. در این شرایط، پایداری جوی مرکب بسیار مهم بوده و به همین دلیل مرکب‌های تابش‌پز بهترین گزینه برای چاپ این صفحات به حساب می‌آیند. ایجاد وضوح بالای چاپ نیز از ویژگی‌های بارز این نوع از مرکب می‌باشد [۱۱]. طبق گزارشات موجود این فناوری، در سال‌های اخیر سهم زیادی از پیشرفت‌های تجاری موجود در چاپ دیجیتال را به خود اختصاص داده است. با توجه به این پیشرفت‌ها، پیش‌بینی می‌شود حجم سرمایه در گردش این فناوری از ۱/۴۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۰ میلادی به حدود ۳/۰۴ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۵ افزایش پیدا کند. این میزان افزایش معادل ۱۶/۴٪ افزایش در این پنج سال خواهد بود که میزان قابل توجهی است. شکل ۳ نموداری از گزارش پیشرفت تجاری مرکب تابش‌پز را در چاپ جوهر افشان نشان می‌دهد [۱۷].

محمل مرکب‌هایی که فرآیند پخت در آن‌ها با تابش پرتو فرابنفش انجام می‌شود، در حضور آغازگر نوری و در معرض پرتو فرابنفش، طی یک واکنش پلیمریزاسیون، فیلم جامدی را ایجاد می‌کنند. این واکنش با سرعت بسیار بالایی انجام می‌شود و فیلم جامد مرکب، بلافاصله پس از مجاورت با پرتو فرابنفش، تشکیل خواهد شد. این روش جایگزین خوبی برای خشک‌شدن آهسته مرکب به روش اکسیداسیون خواهد بود. محدوده طول موج پرتو فرابنفش در این فرآیند معمولاً در محدوده ۲۰۰ تا ۳۸۰ nm و در حوزه فرابنفش متوسط^۱ قرار دارد [۱۱، ۱۰]. مرکب‌هایی که فرآیند خشکانش آن‌ها با تابش باریکه الکترون صورت می‌گیرد، روندی مشابه مرکب‌های پخت‌شونده با پرتو فرابنفش را طی می‌کند. با این تفاوت که در ترکیب‌بندی آن‌ها، به علت انرژی بسیار زیاد باریکه الکترون، معمولاً نیازی به وجود آغازگر نوری نیست [۱۰، ۱۲، ۱۳]. استفاده از تابش زیرقرمز سبب ایجاد شبکه پلیمری یا واکنش شیمیایی نخواهد شد و تنها از حرارت تولیدی آن برای کمک به فرآیند نفوذ، تبخیر و شتاب‌دادن به روند اکسیداسیون مرکب‌ها استفاده می‌شود [۱۰]. در این مقاله ویژگی، مزایا و معایب مرکب‌های تابش‌پز و شرایط آن برای استفاده در چاپ جوهرافشان مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مرکب تابش‌پز در چاپ جوهرافشان

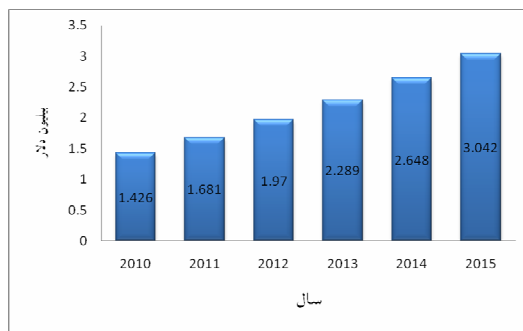
استفاده از پوشش‌های تابش‌پز از حدود ۳۰ سال پیش مورد توجه صنایع مختلفی از جمله پوشش‌های محافظتی و ظاهری^۲، مرکب‌های چاپ، چسب‌ها، لاک‌ها و دیگر صنایع مشابه قرار گرفته است [۱۴، ۱۵]. مرکب‌های تابش‌پز جوهرافشان از سال‌های ۱۹۹۰ با استفاده از چاپگرهای پیزوالکتریک در صنعت چاپ مورد توجه قرار گرفتند. در آن

^۱ Medium UV
^۲ Decorative coating

^۳ In – line processing
^۴ Durability
^۵ Abrasion resistance
^۶ Wide format printing



شکل ۲- جایگاه محدوده طول موج فرابنفش در میان امواج الکترومغناطیسی [۱۱].



شکل ۳- پیشرفت تجاری استفاده از مرکب تابش‌پز در چاپ جوهرافشان [۱۸].

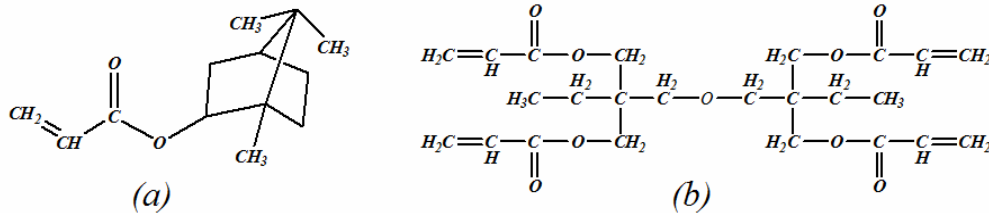
۱-۲- اجزای تشکیل دهنده مرکب تابش پز

در ترکیب بندی^۳ مرکب تابش پز، مواد و افزودنی های متفاوتی، بسته به نوع کاربرد استفاده می شوند. با این وجود، در همه ترکیب بندی های مرکب تابش پز چهار جز اصلی مونومر، الیگومر، مواد رنگزا و آغازگر نوری وجود دارد [۱، ۲۰].

۱-۱-۲- مونومر

در مرکب های تابش پز حلال با رقیق کننده های فعالی مانند مونومرها جایگزین شده است. مونومرها ۱۰۰٪ جامد می شوند و هیچ ماده فراری را آزاد نمی کنند. مونومرها می توانند چند عاملی باشند. مونومرهای چند عاملی می توانند با ایجاد پیوندهای شیمیایی بیشتر، شبکه پلیمری مستحکم تری را ایجاد کنند [۱۱]. مونومرهای آکریلیکی، تمایل زیادی برای انجام واکنش پلیمریزاسیون از خود نشان می دهند. به همین دلیل گزینه مناسبی برای استفاده در ترکیب بندی مرکب تابش پز به حساب می آیند. چرا که می توانند در مدت زمان کمی، شبکه پلیمری مورد نظر را ایجاد کنند. شکل ۴ دو نوع از مونومرهای آکریلاتی را نشان می دهد [۱۰، ۱۲]. در ترکیب بندی مرکب تابش پز، می توان با توجه به خواص مورد انتظار از مرکب، مشتقات متفاوتی از مونومرهای آکریلات را مورد استفاده قرار داد. در جدول ۲ فهرستی از چند مونومر و ویژگی های کاربردی آن ها گردآوری شده است.

³ Formulation



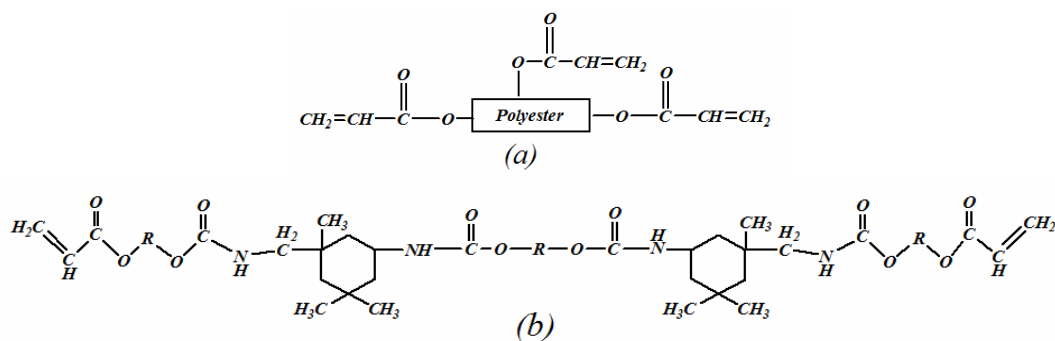
شکل ۴- مونومر آکریلاتی با تعداد عاملیت متفاوت، *a* تک عاملی، *b* چهار عاملی [۱۲]

جدول ۲- فهرستی از چند مونومر، گرانبوی و ویژگی های کاربردی آن ها [۲۱]

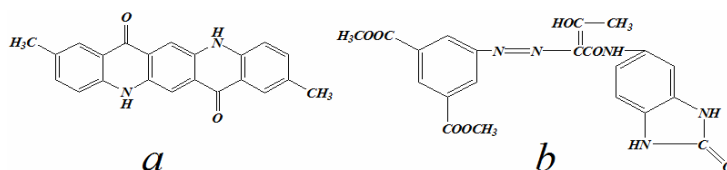
افزایش دوام فیلم	رقیق کننده ترکیب بندی	بهبود سرعت پخت	چسبندگی به پلاستیک
اتوکسی (۳) سیکلوهاگزانول دی اتانول دی آکریلات، ۵۱ cps	هگزان دی آل دی آکریلات، ۹ cps	دی-تری متیل آل پروپان تترا آکریلات، ۶۰۰ cps	۱،۳-بوتیلن گلایکول دی آکریلات ۹ cps
اتوکسی (۳) سیکلوهاگزانول دی متانول دی آکریلات، ۷۰ cps	تری پرپیلن گلایکول دی آکریلات ۱۵ cps	دی پنتا اریتریتول پنتا آکریلات ۱۲۰۰ cps	۲-(۲-اتوکسی) اتیل آکریلات ۶ cps
پروپوکسیلیت (۳) سیکلوهاگزانول دی متانول دی آکریلات، ۸۰ cps	دی پروپیلن گلایکول دی آکریلات ۱۰ cps	پروپوکسیلیت (۳) تری اتیل آل پروپان تری آکریلات ۹۰ cps	۲-فنوکسی اتیل آکریلات ۱۲ cps
	اتوکسی (۳) هگزان دی آل دی آکریلات ۲۴ cps	اتوکسیلیت (۵) پنتا اریتریتول تترا آکریلات ۱۵۰ cps	سیکلیک تری متیل آل پروپان فرمال آکریلات ۱۵ cps

ادامه جدول ۲

افزایش دوام فیلم	رفیق‌کننده ترکیب‌بندی	بهبود سرعت پخت	چسبندگی به پلاستیک
	اتوکسی (۵) هگزان دی‌آل دی آکریلات ۴۶ cps	اتوکسی (۶) تری متیل‌آل پروپان تری آکریلات ۹۵ cps	
	پروپوکسیلیت (۳) هگزان دی‌آل دی آکریلات ۲۳ cps	پروپوکسیلیت (۶) تری متیل‌آل پروپان تری آکریلات، ۱۲۵ cps	اتوکسی (۳) فنوکسی اتیل آکریلات ۲۴ cps
	پروپوکسیلیت (۲) نئوگنتیل گلابکول دی آکریلات ۱۵ cps	پروپوکسیلیت (۳) گلیسرین تری آکریلات، ۹۵ cps	



شکل ۵- مثال‌هایی از الیگومرهای آکریلاتی چند عاملی، a پلی‌استر آکریلات ۳ عاملی، b یورتان آکریلات ۲ عاملی [۱۲].



شکل ۶- ساختار شیمیایی a ساختار شیمیایی کوئینوآکریدین (Red 122) b بنزیمیدازولون (Yellow 120) [۱۰].

۲-۱-۲- الیگومر

۲-۱-۳- مواد رنگزا

مواد رنگزایی^۱ که در ترکیب‌بندی به کار می‌روند باید مقاومت نوری^۲ بالایی داشته باشند. مواد رنگزایی^۳ به علت نداشتن ثبات کافی، ایجاد مشکل در واکنش‌های رادیکالی پخت و کم‌رنگ شدن یا محوشدن در مجاورت پرتو فرابنفش در این نوع از مرکب به کار نمی‌روند [۲۳]. در مقابل، معمولاً ساختار رنگدانه‌ها^۴ به گونه‌ای است که خواص و ثبات مورد نظر را فراهم می‌کنند. کوئینوآکریدین^۵، دی‌کتوپیرولوپیرول^۶، بنزیمیدازولون^۷ و کمپلکس آزو فلزی^۸ از انواع رنگدانه‌های مورد استفاده در این سیستم هستند. دو نمونه از ساختارهای شیمیایی مواد رنگی در شکل ۶ نشان داده شده است [۱، ۱۰، ۲۳].

الیگومرها ساختار شیمیایی و خواص نهایی مرکب پخت شده را تعیین می‌کنند. معمولاً الیگومرهایی که در ترکیب‌بندی به کار می‌روند، از مشتقات آکریلات هستند. مونومرها و الیگومرهای آکریلاتی در مقایسه با متاکریلات‌ها، آلایل یا وینیل‌ها به علت واکنش‌پذیری بالاتر، بیشتر در این زمینه به کار می‌روند. برای مثال مشتقات یورتان یا پلی‌استر آکریلات از مهم‌ترین مواد به کار رفته در ترکیب‌بندی‌ها به شمار می‌روند. خواص مرکب‌های تابش‌پز مانند مقاومت شیمیایی، سختی و براقیت خوب از بالا بودن میزان پیوندهای عرضی گروه‌های آکریلات ناشی می‌شود [۱۰-۱۲، ۲۲]. الیگومرهایی که در مرکب تابش‌پز به کار می‌روند معمولاً گرانروی در محدوده ۱۰۰۰۰ - ۱۰۰۰ cp خواهند داشت. این الیگومرها معمولاً بین ۲ تا ۶ عاملیت آکریلاتی داشته و وزن مولکولی بین ۲۰۰۰۰-۵۰۰۰ g/mol را دارا می‌باشند. شکل ۵ ساختار دوتنوع الیگومر مختلف با تعداد عاملیت متفاوت را نشان می‌دهد [۱۲].

^۱ Colorant

^۲ Light Fastness

^۳ Dyes

^۴ Pigment

^۵ Quinacridone

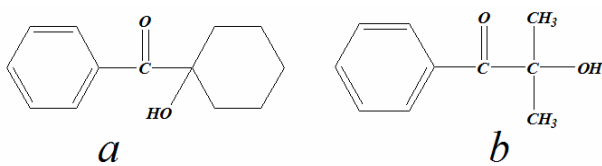
^۶ Diketopyrrolopyrrole

^۷ Benzimidazolone

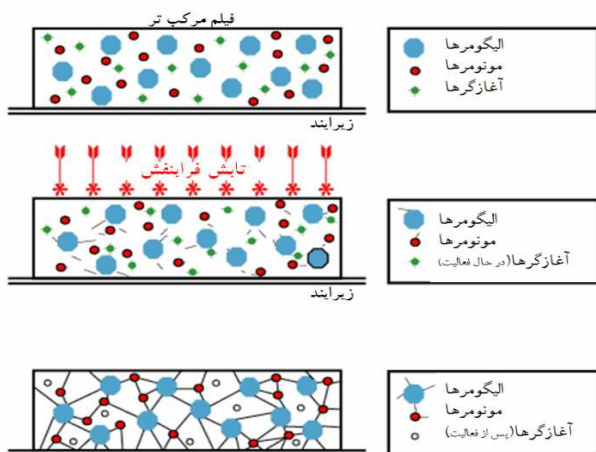
^۸ Azo-Metal-Complex

۲-۱-۴- آغازگر نوری

این مواد در ترکیب بندی با درصد کمی حضور پیدا می کنند و نقش آن ها آغاز واکنش پلیمریزاسیون در سیستم است. بر اساس عواملی مانند ضخامت فیلم، نوع منبع پرتو فرابنفش و یا نوع مرکب، مقدار آغازگر بین ۰/۵-۰/۱۵ متغیر خواهد بود. زمانی که این مواد در مجاورت پرتو فرابنفش قرار می گیرند، به چند طریق، حالت فعال پیدا کرده و در برخورد با مونومرها و الیگومرهای موجود در ترکیب بندی، واکنش شروع زنجیر را ایجاد می کنند [۱۲]. در حالت اول عامل آغازگر تجزیه شده و دو ساختار رادیکالی فعال را ایجاد می کند. بنزوین و بنزواتر، مثال هایی از این ساختارها هستند. در حالت دیگر عامل آغازگر در مجاورت پرتو فرابنفش به صورت برانگیخته درمی آید. این ساختار برانگیخته می تواند با اثرگذاری بر ماده کمک آغازگر^۱ و تبدیل آن به رادیکال، واکنش پلیمریزاسیون را آغاز کند. معمولاً ترکیبات بنزوفنون به این صورت عمل می کنند. ساختار نمونه ای از هر نوع آغازگر در شکل ۷ نشان داده شده است [۱۲]. این دو حالت در شرایطی خواهد بود که سازوکار به صورت رادیکالی پیش رود. اگر سازوکار پلیمریزاسیون از نوع کاتیونی انتخاب شود، در این صورت، آغازگرها به صورت نوعی نمک انتخاب می شوند که در مجاورت پرتو فرابنفش تجزیه شده و یون مثبت تولید می کنند. برای این سیستم معمولاً نمک های آریل سولفونیوم^۲ یا آریل یودیوم^۳ استفاده می شود [۱، ۱۰، ۱۲، ۲۴]. سازوکار رادیکالی و کاتیونی در ادامه توضیح داده خواهد شد. آغازگر نوری باید بیشترین جذب را در ناحیه تابش منبع نوری داشته باشد و همچنین ناحیه جذب آن با ترکیبات موجود در ترکیب بندی، به خصوص رنگدانه، هم پوشانی^۴ نداشته باشد [۱، ۱۱].



شکل ۷- ساختار شیمیایی آغازگرهای a نوع اول، b نوع دوم [۱۲].



شکل ۸- سازوکار پخت مرکب تابش پز و تشکیل شبکه پلیمری نهایی [۲۵].

۲-۲-۲- سازوکار کاتیونی

در این سازوکار، بیشتر از اپوکسی به جای یورتان استفاده می شود. سیکلوالیفاتیکی اپوکسی ها^۵، به علت واکنش پذیری بالاتر در مقایسه با گلیسیدیل اتر اپوکسی ها^۶ و انواع دیگر ترکیبات اپوکسی، مرسوم ترین ماده در سیستم پخت کاتیونی به شمار می رود. در این سازوکار پخت، تابش پرتو فرابنفش، منجر به تفکیک ساختار نمکی موجود در ترکیب بندی می شود. این ساختار نمکی به عنوان آغازگر در این سیستم عمل خواهد کرد. یون مثبت حاصل از تفکیک اولیه، باعث باز شدن سریع حلقه سیکلوالیفاتیکی اپوکسی و سرانجام ایجاد ساختار شبکه ای می شود. سازوکار این فرآیند در شکل ۱۰ نشان داده شده است [۱، ۱۲، ۲۷].

⁵ Cycloaliphatic epoxides

⁶ Glycidyl ether epoxies

۲-۲-۲- انواع سازوکار پخت در مرکب تابش پز

همانطور که قبلاً اشاره شد، فرآیند پخت مرکب تابش پز با ایجاد شبکه پلیمری همراه است. چگونگی ایجاد این شبکه را می توان در شکل ۸ مشاهده کرد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، تابش فرابنفش با تأثیرگذاری بر ماده آغازگر موجود در ترکیب بندی مرکب، اولین مرحله را برای ایجاد شبکه پلیمری طی می کند. آغازگر فعال شده در برهم کنش با دیگر اجزای ترکیب بندی، با ایجاد پیوندهای متعدد، شبکه پلیمری نهایی را ایجاد خواهد کرد. این فرآیند پلیمریزاسیون با دو نوع سازوکار رادیکالی و کاتیونی انجام می گیرد. نوع آغازگر به کار رفته در ترکیب بندی و همچنین نوع مونومر و الیگومر، تعیین کننده سازوکار پلیمریزاسیون خواهند بود [۱۱، ۲۲، ۲۵].

۲-۲-۱- سازوکار رادیکال آزاد

واکنش زنجیره ای رادیکال آزاد شامل چهار مرحله می شود. با تابش پرتو فرابنفش به مرکب، یک رادیکال آزاد از آغازگر تولید می شود. رادیکال آزاد با مونومر برای شروع واکنش پلیمریزاسیون زنجیری واکنش می دهد. انتشار واکنش تا اتمام مونومرها یا زمان فرارسیدن مرحله پایانی، ادامه خواهد یافت.

¹ Synergist Molecule

² Arylsulfonium

³ Aryliodonium

⁴ Overlap

- (۱) شکل‌گیری رادیکال^۱ $I \longrightarrow I$
- (۲) آغاز پلیمریزاسیون^۲ $I + R \longrightarrow IR$
- (۳) انتشار زنجیر^۳ $IR + R \longrightarrow IRR$
- (۴) انتقال زنجیر^۴ $IRR + RH \longrightarrow IRRH+R$
- (۵) اختتام زنجیر^۵ $IRR + IRR \longrightarrow IRRRI$

شکل ۹- سازوکار پخت رادیکال آزاد [۱، ۱۲].

در جدول ۳ مقایسه‌ای میان ویژگی‌ها، مزایا و معایب هر دو سازوکار به عمل آمده است.

۳- چالش‌های موجود در مرکب تابش‌پز

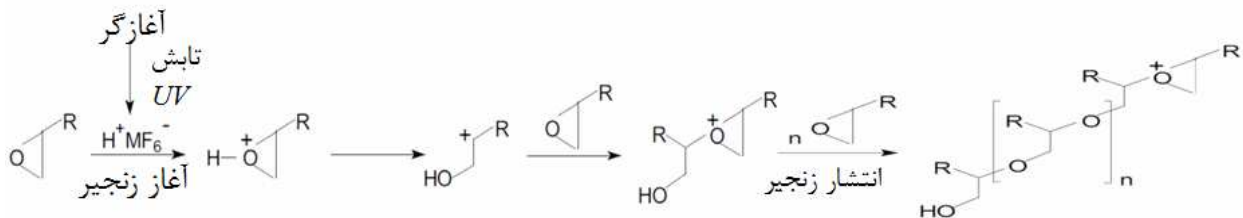
این فناوری نیز مانند هر فناوری جدید دیگر با چالش‌ها و کمبودهایی روبرو است. منحصر به فرد بودن اجزای ترکیب‌بندی از سویی و ایجاد محدودیت‌های فرآیندی چاپ جوهرافشان، از سوی دیگر باعث بروز مشکلاتی در استفاده از این مرکب‌ها در چاپ جوهرافشان می‌شود. چند مورد از این محدودیت‌ها و برخی از روش‌های برطرف کردن آن‌ها، در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

مشکل این روش زمان‌بر بودن روند فعالیت آغازگرها و کامل شدن پلیمریزاسیون است. این سازوکار به رطوبت هوا حساس است و سازوکار پخت می‌تواند تا حد زیادی توسط رطوبت باز داشته شود. زیرا آب می‌تواند به عنوان یک ماده انتقال‌دهنده زنجیر عمل کند و از این طریق به میزان قابل توجهی می‌تواند عملیات پخت را آهسته کند [۱۰، ۲۷]. در این روش، پس از این که مرکب نیمه خشک شد، دیگر نیازی نیست در مجاورت پرتو فرابنفش باقی بماند. این مساله از نظر کاهش مصرف انرژی برای رسیدن به پخت کامل بسیار مفید است. از سوی دیگر پلیمریزاسیون می‌تواند درون بطری یا در سیستم انتقال مرکب یا هد چاپگر در مجاورت اندکی نور نیز اتفاق بیافتد و مشکلاتی را در این زمینه ایجاد کند [۱۳]. این سازوکار چسبندگی بهتری را به زیرآیندهای سخت مانند پلاستیک و شیشه ایجاد می‌کند و فعالیت آغازگرها در این روش با ایجاد بو همراه نیست [۲۷].

۳-۲-۲- مقایسه سیستم‌های پخت کاتیونی و رادیکالی

هر یک از این سیستم‌های پخت با توجه به نوع سازوکار، ویژگی‌های خاصی را دارا می‌باشند. همانطور که در بخش ۲-۲-۱- اشاره شد، در حالت کلی بیشتر از سازوکار رادیکالی در صنعت استفاده می‌شود، ولی وجود مزایای فرآیندی در سازوکار کاتیونی مانند میزان جمع‌شدگی کمتر فیلم نهایی پس از پخت و همچنین چسبندگی بهتر به زیرآیندهای فلزی و پلاستیکی باعث شده است که امروزه پیشرفت‌هایی در زمینه مواد اولیه مورد استفاده در این سازوکار صورت بگیرد [۱۲، ۲۷].

- ¹ Radical Formation
² Initiation
³ Propagation
⁴ Chain transfer
⁵ Termination



شکل ۱۰- سازوکار پخت کاتیونی در سیستم اپوکسی [۱۲].

جدول ۳- مقایسه میان سیستم‌های پخت کاتیونی و رادیکالی [۱، ۱۲، ۲۷]

ویژگی	سازوکار رادیکالی	سازوکار کاتیونی
مواد اولیه	تنوع بیشتر	محدودیت
علت بازدارندگی	اکسیژن (اثر بیشتر)	رطوبت (اثر کمتر)
مدت زمان پخت	پخت کامل در مدت کوتاه	پخت کامل در مدت طولانی
نیاز به مجاورت منبع UV	در تمام مدت پخت	تنها در لحظات آغازین پخت
چسبندگی	کمتر	بیشتر
پخت عمقی	کمتر	بیشتر
جمع‌شوندگی پس از پخت ^۱	بیشتر	کمتر
هزینه‌های کلی سیستم	کمتر	بیشتر

¹Shrinkage

۱-۳- گرانروی مرکب

گرانروی مناسب برای یک چاپگر جوهرافشان در محدوده ۱۴-۸ mPa.s قرار دارد. این در حالی است که گرانروی مونومرها و الیگومرهای موجود در ترکیب بندی، که محمل اصلی را تشکیل می دهند، بالای ۱۵ mPa.s است. این مقدار حداقل گرانروی، مربوط به یک مونومر دو عملی آکریلات^۱ است که می تواند در واکنش پلیمریزاسیون شرکت کند. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود، بیشتر مونومرهایی که می توان با استفاده از آن ها خواص مطلوبی را از مرکب به دست آورد، گرانروی بالاتر از مقدار مجاز برای چاپ جوهرافشان دارند. با افزایش تعداد گروه های عاملی در مونومر، گرانروی ذاتی آن افزایش پیدا کرده و در نتیجه گرانروی مرکب زیاد خواهد شد. از سوی دیگر بیشتر بودن تعداد گروه های عاملی منجر به ایجاد پیوندهای عرضی بیشتر و استحکام بیشتر شبکه می شود. همچنین وجود درصد بالاتر الیگومرها در ترکیب بندی مرکب باعث بهبود خواص مکانیکی مرکب می شود ولی بالا بودن گرانروی ذاتی در این مواد باعث افزایش گرانروی ترکیب بندی خواهد شد. می توان با استفاده از مونومرهای تک عاملی در ترکیب بندی، گرانروی مرکب را کاهش داد ولی وجود این مونومرها در ترکیب بندی، باعث افت خواص مکانیکی و مقاومتی مرکب خواهد شد. بنابراین یکی از مسائل مهم در ترکیب بندی مرکب تابش پز رسیدن به خواص مکانیکی و مقاومتی مطلوب در کنار باقی نگه داشتن گرانروی مرکب در محدوده مناسب برای چاپ جوهرافشان است [۱، ۲۹، ۳۰].

۲-۳- کشش سطحی

برای تعیین کشش سطحی مناسب باید بین موارد زیر تعادل برقرار شود:

۱. قابلیت پاشش خوب از نازل

۲. کیفیت تصویر

۳. چسبندگی خوب به زیرآبند

۴. چگونگی پخش قطره روی زیرآبند

ترشدن مناسب سطح زمانی اتفاق می افتد که کشش سطحی مرکب کمتر از زیرآبند باشد. ولی اگر این میزان خیلی کم باشد، پخش بیش از حد قطره، باعث کاهش وضوح تصویر می شود [۳۱، ۳۲]. تنظیم کشش سطحی در چاپ جوهرافشان از مهم ترین مسائل در ترکیب بندی مرکب است. اگر کشش سطحی مرکب خیلی کم باشد سبب چسبندگی مرکب به دیواره نازل شده و در روند خروج قطرات از نازل مشکل ایجاد می کند. همچنین بالا بودن بیش از حد کشش سطحی مرکب، باعث جلوگیری از پاشش صحیح قطره از نازل می گردد. محدوده مناسب برای کشش سطحی در چاپ جوهرافشان $40-25 \text{ dynes/cm}$ است. هرگونه افزودنی در ترکیب بندی باعث تغییر در میزان کشش سطحی شده و این امر، بدست آوردن کشش سطحی مناسب را برای مرکب با مشکل مواجه می کند [۲۹، ۳۱].

۲-۳- نوع و اندازه ذرات

در فرآیند چاپ جوهرافشان، از نازل هایی با قطر متفاوت استفاده می شود ولی در حالت کلی اندازه ذرات باید کم تر از یک صدم قطر نازل باشد تا تجمع ذرات موجب گرفتگی نازل نشود. وجود ذراتی با اندازه بزرگتر از یک میکرون، موجب گرفتگی نازل خواهد شد. به همین دلیل هنگام استفاده از رنگدانه ها در مرکب تابش پز، تنظیم اندازه ذرات در محدوده مورد نیاز و جلوگیری از تجمع آن ها از مهم ترین مسائل به شمار می رود [۱، ۲۸، ۲۹]. با استفاده از فرآیند آسیاب^۲ رنگدانه ها و سپس صاف کردن^۳ آنها، می توان تا حدودی اندازه ذرات رنگدانه ها را به محدوده تعریف شده برای چاپ جوهرافشان نزدیک کرد. ولی پس از آن، مشکل تجمع ذرات در ترکیب بندی و گرفتگی نازل مواجه وجود دارد. این تجمع به علت عدم پایداری مرکب، ایجاد می شود. در سال های اخیر با اعمال روش های اصلاح سطحی رنگدانه ها تا حدودی پایداری مرکب افزایش پیدا کرده است. همچنین استفاده از مواد فعال سطح^۴ مناسب در ترکیب بندی مرکب نیز از عوامل بسیار موثر در کاهش تجمع ذرات به شمار می رود. طبق تحقیقات انجام گرفته، وجود درصد بالای رنگدانه در ترکیب بندی باعث کاهش سختی فیلم نهایی مرکب می شود. این پدیده به علت کاهش جذب پرتو فرابنفش در حضور رنگدانه است. رنگدانه ها با توجه به ساختار شیمیایی، درصدی از پرتو فرابنفش تابشی را جذب می کنند. انرژی جذب شده توسط ذرات رنگدانه باعث تخریب ساختار فیلم رزین در اطراف آن ها می شود. این تخریب کاهش مقاومت و سختی فیلم نهایی را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر این، وجود این رنگدانه ها، مانع از رسیدن تمامی انرژی تابشی به مولکول های فعال و آغاز کننده پلیمریزاسیون می شوند [۲۸، ۲۹]. ساختار مواد رنگزا در این ترکیب بندی بسیار مهم است. برای مثال مواد رنگزای محلول در آب گزینه مناسبی برای استفاده در ترکیب بندی مرکب تابش پز نیستند. این رنگدانه ها مقاومت کافی در مقابل پرتو فرابنفش را ندارند و در مجاورت پرتو فرابنفش، بی رنگ خواهند شد. همچنین برخی از ساختارها در این گروه مانع از پیشرفت واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی می شود [۲۹].

۲-۴- شدت پرتو فرابنفش

منبع پرتو فرابنفش بر روی نازل چاپگر قرار می گیرد. برای پخت از لامپ های فشار بخار جیوه استفاده می شود، که چند مشکل را به وجود می آورد:

۱. داغ شدن بیش از حد زیرآبند

۲. مصرف انرژی زیاد

۳. نیازمندی این لامپ ها به جایگزینی در فواصل زمانی کوتاه [۱۱].

یکی از مهم ترین ویژگی های پوشش های تابش پز، قابلیت کنترل خواص آنها با تغییر شدت تابش است. بنابراین شدت پرتو فرابنفش^۵ در حین فرآیند پخت از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج حاصل از آخرین پژوهش ها نشان می دهند که شدت بالای تابش فرابنفش، موجب پخت بیش از حد^۶ فیلم،

² Milling

³ Filtration

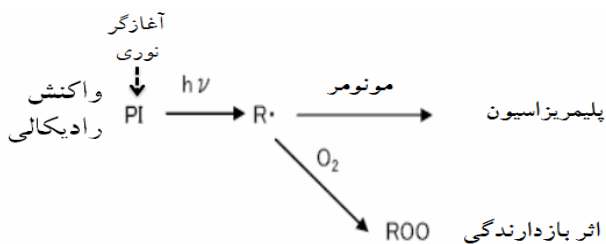
⁴ Surfactant

⁵ Radiation doses of ultraviolet

⁶ Over-Cured

¹ Tripropylene glycol diacrylate (TPGDA)

مولکول‌های آغازگر نمی‌رسد و حتی در مدت زمان بالای مجاورت نیز، فرآیند پخت مطلوب انجام نخواهد شد [۲۷].



شکل ۱۲- عملکرد بازدارندگی اکسیژن در سازوکار رادیکالی [۲۷].

- روش‌های متفاوتی برای جلوگیری از بازدارندگی اکسیژن و یا کم کردن تأثیر آن بر سیستم وجود دارد [۱۲].
۱. استفاده از محیط فاقد اکسیژن در هنگام پخت فیلم (استفاده از محیط خنثی مانند اتمسفر نیتروژن)
 ۲. افزایش شدت پرتو فرابنفش و یا کاهش طول موج نور تابشی برای افزایش میزان انرژی منتقل شونده
 ۳. افزایش ترکیب درصد آغازگرها در ترکیب بندی مرکب

۳-۶- سلامتی و ایمنی

مونومرهای آکریلات خطرناک هستند و در تماس با پوست موجب حساسیت می‌شوند. برای مثال مونومر هگزان دی ال دی آکریلات^۴ یکی از مونومرهای آکریلات است که گرانبوی پایینی دارد و سرعت پخت و خواص چسبندگی خوبی نیز فراهم می‌آورد. ولی خواص تحریک‌کنندگی خطرناکی دارد. همچنین در بیشتر موارد، مشاهده شده است که مونومرهایی با گرانبوی پایین‌تر، که برای استفاده در ترکیب بندی مرکب تابش‌پز مناسب هستند، خاصیت تحریک‌کنندگی بیشتری را از خود نشان می‌دهند [۲۹].

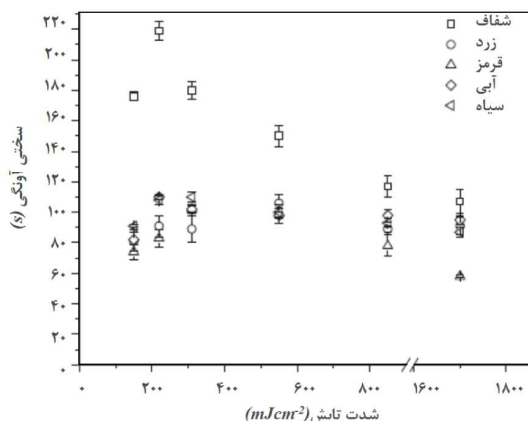
۳-۷- سازگاری با اجزای سازنده چاپگر

بسیاری از واشرها، لوله‌ها، مخازن مرکب و صافی‌ها از مواد پلاستیکی تشکیل شده‌اند. گاهی در ترکیب بندی مرکب از مونومرهای خورنده‌ای استفاده می‌شود که ممکن است سبب تخریب این اجزا در چاپگر شوند. با قرار دادن قطعات چاپگر در داخل مرکب و بالا بردن دما تا دمای عملکرد چاپگر، می‌توان با اندازه گرفتن تغییر وزن و ظاهر قطعات، مشکلات ترکیب بندی مرکب را تشخیص داد [۱، ۲۹].

۴- نتیجه‌گیری

امروزه مرکب‌های تابش‌پز به علت صرفه بالای فرآیندی، اقتصادی و همچنین سازگاری بیشتر با محیط زیست بسیار مورد توجه شرکت‌های مرتبط با این صنعت قرار گرفته‌اند. این نوع از مرکب می‌تواند چایی سریع و با کیفیت بالا را

زردشدگی^۱ سطح و کاهش براقیت در اثر تخریب ساختارهای سطحی فیلم خواهد شد. این امر موجب افت خواص مکانیکی و همچنین کاهش سختی فیلم می‌شود. این تغییر خواص را می‌توان در نمودار شکل ۱۱ نیز مشاهده کرد. نوع رنگدانه نیز در میزان تغییرات سختی مؤثر خواهد بود [۲۸]. کافی نبودن شدت تابش و یا مدت زمان تابش نیز موجب کامل نشدن فرآیند پخت و عدم دستیابی به خواص مکانیکی مورد نظر خواهد شد. می‌توان شدت پرتو فرابنفش برای هر مرکب را با توجه به نوع ترکیب بندی، به ویژه نوع رنگدانه به کار رفته در آن، تعیین کرد.



شکل ۱۱- میزان میانگین سختی برای ترکیب بندی‌هایی با رنگدانه مختلف و در شدت تابش‌های مختلف از پرتو ماورای بنفش [۲۸].

۳-۵- بازدارندگی اکسیژن

اکسیژن موجود در محیط و همچنین اکسیژنی که ممکن است در مواد اولیه ترکیب بندی مرکب وجود داشته باشد، می‌تواند در روند پلیمریزاسیون رادیکالی اختلال ایجاد کند. بازدارندگی اکسیژن از مشکلاتی است که هنگام پخت سیستم‌های آکریلاتی با گرانبوی پایین شدت بیشتری پیدا می‌کند. چرا که در گرانبوی کم، امکان نفوذ اکسیژن به فیلم مرکب افزایش می‌یابد. از آن جایی که میزان گرانبوی در مرکب جوهرافشان، نسبت به انواع مرکب‌های دیگر، مقدار کمتری دارد، اکسیژن نفوذ آسان‌تری در فیلم مرکب خواهد داشت [۱۲]. مولکول اکسیژن به صورت دو رادیکالی^۲ وجود دارد و در مواجهه با رادیکال‌های دیگر موجود در سیستم، که چگونگی تولید آن‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است، آن‌ها را از ادامه فرآیند بازمی‌دارد. در نتیجه رشد زنجیرها کامل نمی‌شود و پخت ضعیفی^۳ صورت می‌گیرد. بازدارندگی اکسیژن معمولاً به صورت لایه‌ای نازک و پلیمریزه نشده در سطح فیلم بروز پیدا می‌کند. چگونگی عملکرد اکسیژن در کنار رادیکال‌های دیگر در شکل ۱۲ نشان داده شده است [۱۲، ۲۷]. در شدت پایین پرتو فرابنفش، به علت حضور اکسیژن در محیط، انرژی کافی برای آغاز پلیمریزاسیون به

¹ Yellowness

² Diradical

³ Poor Cure

⁴ Hexane diol diacrylate

برای رسیدن به این ویژگی‌ها و قرار گرفتن خواص مرکب تابش‌پز در محدوده مورد نیاز چاپ جوهرافشان محدودیت‌هایی در انتخاب مواد و مقدار آن‌ها وجود دارد. با توجه به موارد گفته شده، می‌توان بیان کرد که این دسته از مرکب‌ها ویژگی‌های مطلوب و مزایای قابل توجهی دارند که کاربرد آنها را وسیع و رو به رشد می‌کند. با توجه به نیاز روزافزون چاپ با کیفیت، به نظر می‌رسد این فناوری از فناوری‌های پیشرو در آینده‌ای نزدیک باشد.

بر روی محدوده وسیعی از زیرآیند ایجاد کند. مرکب تابش‌پز هیچ جزء فراری ندارد و به همین دلیل در چاپ جوهرافشان مشکل گرفتگی نازل به علت تبخیر سریع حلال در این مرکب‌ها وجود نخواهد داشت. روند پخت و خشک شدن این مرکب از طریق پلیمریزاسیون رادیکالی یا کاتیونی صورت می‌گیرد. مرکب تابش‌پزی که برای استفاده در فرآیند چاپ جوهرافشان استفاده می‌شود، به علت ویژگی‌های مورد نیاز برای این نوع چاپ، مانند محدوده خاص گرانی و کشش سطحی، به ترکیب‌بندی ویژه‌ای نیاز دارد.

۵- مراجع

1. S. Magdassi, "The chemistry of Ink jet Inks", The Hebrew University of Jerusalem, world scientific publishing co. pte. ltd, Singapore, **2010**
2. U. Cagalar, "Studies of Inkjet printing technology with focus on electronic materials", Thesis For The Degree of Doctor of Technology, Tampere University of Technology, **2010**.
3. E. Svanholm, "Printability and Ink-Coating interactions in Inkjet printing", Karlstad University Studies, Sweden, **2007**.
4. A. Lundberg, "Ink-Paper interactions and Effect on Print quality in Inkjet printing", Thesis for the degree of Licentiate Sundsvall, Department of Information, Mid Sweden University, **2011**.
5. H. Wijshoff, "Structure and Fluid dynamics in Piezo inkjet printheads", Oc'e Technologies B.V, The Netherlands, **2008**.
6. A. Hudd, "Inkjet comes of Age for Industrial applications", Xennia Technology Ltd, The Proof Is in Production - IMI Lisbon Conference, **2008**.
7. م. مومنی نسب، س. م. بیدکی، "کاربردهای متنوع چاپگرهای جوهرافشان DOD به عنوان ابزار تولید"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، سال اول، شماره اول، تابستان **۱۳۹۰**.
8. ن. شکیب، آ. سلیمانی گرگانی، "مروری بر چاپ پارچه‌های پنبه‌ای به وسیله چاپگر جوهرافشان"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، سال اول، شماره دوم، زمستان **۱۳۹۰**.
9. م. پیمان‌نیا، آ. سلیمانی گرگانی، م. قهاری، "نانومرکب‌های سرامیکی جوهرافشان"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، سال دوم، شماره سوم، پاییز **۱۳۹۱**.
10. R. H. Leach, Mr R. J. Pierce, E. P. Hickman, M. J. Mackenzie, H. G. Smith, "The printing ink manual", Springer, Netherlands, Fifth Edition, **2007**
11. S. E. Edison, "UV-Curable inkjet inks: Revolutionize industrial printing", RadTech Report, September, **2006**.
12. A. Arceneaux, K. Willard, UV & EB Chemistry, And Technology, Rad Tech, Technology Expo And Conference, Chicago, **2012**.
13. S. Madhusoodhanan, D. Nagvekar, "Dual cure digital inks for industrial printing", RadTech Reporter, UV/EB Technology Expo and Conference, Chicago, **2008**.
14. F. Flyunt, R. Czihal, K. Langguth, H. Mehnert, R. Schubert, R. Buchmeiser, "UV curing and matting of acrylate coatings reinforced by nano- silica and micro-corundum particles", M. R., Prog. Org. Coat. 60, 121-126, **2007**.
15. Y. Kranbuehl, D. E. Sautereau, H. Seytre, G. Dupuy, "Study of UV cure kinetics resulting from a changing concentration of mobile and trapped radicals", J. Macromolecules, 41, 708-715. **2008**.
16. M. Carluccio, "Advances in UV-curable Ink Jet", Plastics Decorating Magazine, available in <http://www.plasticsdecorating.com>, **2006**.
17. S. Tose, "InfoTrends predicts continued strong growth in Wide-Format UV inkjet segment", InfoTrends Questex.CO, January 12, **2012**.
18. K. Pianoforte, "The UV inkjet ink report", Available in www.inkworld.com/articles, **2007**.
19. X. Yang, X. F. Wei, B. Q. Huang, W. Zhang, L. Zhao, "Study on The printability of UV-Curable inkjet ink on Different printed materials", Applied Mechanics and Materials, 262, 324-328, December, **2012**.
20. L. Cong, "Radiation curable ink compositions", U. S. Patent Application, No. 12/544.955, **2012**.
21. S. Madhusoodhanan, S. Nagvekar, "Dual cure digital inks for Industrial printing", RadTech UV/EB Technology Expo and Conference, Chicago, **2008**.
22. P. T. McGovern, "UV-Inkjet Inks: Introduction to The value delivery system", RadTech Report, **2004**.
23. S. Villeneuve, H. Ripoll, "New materials for Radiation curable ink jet inks", Ciba & Startomer research, Nurnberg, **2009**.
24. R. Stephen Davidson, "Exploring the science technology and applications of UV and EB curing", SITA Technology, 67-85, **1999**.
25. J. Burton, "A primer on UV-Curable inkjet inks", SGIA (Specialty Graphic Imaging Association) Online Magazine, Available in www.sgia.org, **2008**.
26. P. Y. Bruice, "Chain growth polymers", J. Organic Chemistry, 1013-1019, **1995**.
27. N. Caiger, S. Herlihy, "Oxgen inhibition effects in UV-Curing inkjet inks", IS&T's NIP 15 International Conference on Digital printing technologies, 116-119, **1990**.
28. M. A. G. Bardi, L. D. B. Machado, "Accompanying of parameters of Color, gloss and hardness on polymeric films coated with Pigmented inks cured by Different radiation doses of ultraviolet light", Radiation physics and Chemistry, 81, 1332-1335, **2012**
29. A. Hancock, L. Lin, "Challenges of UV curable ink-jet printing inks-a formulator's perspective", Pigment & Resin Technology, 33, 280-286, **2004**.
30. C.J.Chang, Y.H.Lin, H.Y.Tsai, "Synthesis and properties of UV-curable hyperbranched polymers for ink-jet printing of color micropatterns on glass", J.Thin Solid Films, 519, 5243-5248, **2011**.
31. S. Madhusoodhanan, S. Sung, E. Delp, D. Nagvekar, M. Ellison, D. Wilson, "Dynamic surface tension of digital UV curable inks", Available in www.inkworld.com/articles, **2008**.
32. B. Zhmud, "Dynamic aspects of ink- paper interaction in relation to inkjet printing", Institute Surface Chemistry YKI, pira international conference: ink on paper, Stockholm, Sweden, **2003**