Tarbiat Modares University

Journal of
Applied Research in Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Sublimation Inkjet Ink Stability via Optimized Surfactant–Dispersant Levels

Mojtaba Jalili *, Mohsen Mohammad Raei Nayini

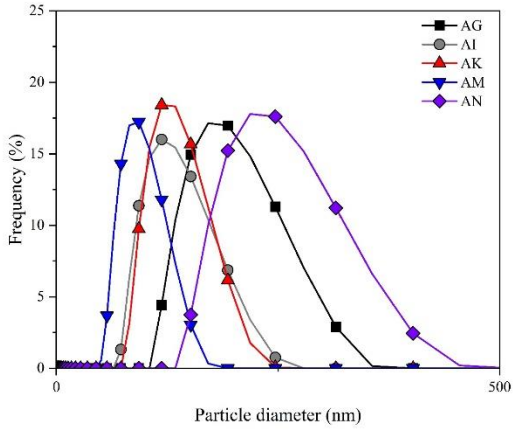
Department of Printing Science and Technology, Faculty of color physics, Institute for Color Science and Technology,Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Received 2025-10-11
Revised 2025-11-18
Accepted 2025-11-19
Available online 2026-01-25
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:
Inkjet printing
Polymeric dispersant
Surfactant
Dispersion stability
Sublimation transfer

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: The formulation of sublimation inkjet inks based on disperse dyes requires precise control of dispersion stability and rheological behavior to achieve consistent print quality and printer compatibility. One of the main challenges in this field is establishing an appropriate balance between polymeric dispersants and low-molecular-weight surfactants to prevent sedimentation, viscosity fluctuations, and surface tension instability. This study investigates the influence of nonionic surfactant concentration on the physical characteristics, dispersion stability, and rheological behavior of Disperse Blue 359 in aqueous sublimation inkjet ink formulations.

Research approach: Dye concentrates were prepared using a jar mill in the presence of a polymeric dispersant, glycerol, and deionized water. The concentration of the nonionic surfactant was varied from 0 to 7.1 wt%. The samples were characterized in terms of color strength by UV-vis spectrophotometry, particle size by dynamic light scattering, surface tension by the Wilhelmy method, and rheological behavior by a rotational rheometer. Dispersion stability was also monitored by turbidity measurements over different time intervals.

Main results: The results revealed that the simultaneous presence of the polymeric dispersant and the nonionic surfactant significantly improved the stability and flowability of the system. Specifically, the sample with the optimally concentrated surfactant exhibits turbidity oscillation of less than 30 NTU and a viscosity below 8.5 cp, while the surfactant-free sample experiences a turbidity reduction exceeding 500 NTU over the test duration and a viscosity above 17 cp. At an optimal surfactant concentration of approximately 3.6 wt%, the particle size reached its minimum, color strength reached its maximum, and dispersion stability was maximized. Conversely, both higher and lower surfactant concentrations led to particle aggregation, increased turbidity, and diminished print quality. These findings highlight the critical importance of accurately tuning the ratio of surfactant to dispersant in designing reliable sublimation inkjet inks with desirable optical and rheological properties.

* Corresponding author: Jalili@icrc.ac.ir – ORCID: 0000-0002-6818-0672

Copyright@ 2025, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی–پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

پایداری جوهرهای تصعیدی جوهرافشان با بهینه‌سازی میزان سطح‌فعال و پراکنشیار

مجتبی جلیلی [۱،*]، محسن محمد رائی نائینی [۱]

[۱] گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: فرمول‌بندی جوهرهای جوهرافشان تصعیدی مبتنی بر رنگزاهای پراکنده، نیازمند کنترل دقیق پایداری پراکنه و رفتار رئولوژیکی برای دستیابی به کیفیت چاپ پایدار و سازگاری با سامانه چاپگر است. یکی از چالش‌های اساسی در این زمینه، ایجاد تعادل مناسب میان پراکنشیارهای پلیمری و سطح‌فعال‌ها با وزن مولکولی پایین است تا از ته‌نشینی ذرات، نوسانات گرانروی و تغییرات کشش سطحی جلوگیری شود. این پژوهش با هدف بررسی نقش غلظت سطح‌فعال غیریونی بر ویژگی‌های فیزیکی، پایداری پراکنه و رفتار رئولوژیکی رنگزای پراکنده آبی ۳۵۹ در فرمول‌بندی‌های جوهرهای جوهرافشان تصعیدی آب‌پایه انجام شد.

روش تحقیق: افشرده‌های رنگزا با استفاده از دستگاه آسیاب خمره‌ای در حضور پراکنشیار پلیمری، گلیسیرین و آب یون‌زدوده تهیه شدند. غلظت سطح‌فعال غیریونی در محدوده‌ی ۰ تا ۷/۱ درصد وزنی تنظیم شد. نمونه‌های حاصل‌شده با استفاده از طیف‌سنجی UV-vis برای تعیین قدرت رنگی، روش پراکندگی نور پویا برای اندازه ذرات، روش Wilhelmy برای کشش سطحی، و رئومتر چرخشی برای بررسی رفتار رئولوژیکی مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین پایداری پراکنه با آزمون کدورت در بازه‌های زمانی مختلف بررسی شد.

نتایج اصلی: نتایج نشان داد حضور هم‌زمان سطح‌فعال غیریونی و پراکنشیار پلیمری موجب بهبود قابل‌توجه در پایداری و جریان‌پذیری سامانه می‌شود به شکلی که نمونه‌ی با غلظت بهینه‌ی سطح‌فعال، نوسان کدورت کمتر از ۳۰NTU و گرانروی کمتر از ۸/۵cp دارد و نمونه‌ی عاری از سطح‌فعال بیش از ۵۰۰NTU کاهش کدورت را طی زمان آزمون تجربه کرد و گرانروی بیش از ۱۷cp نیز دارد. در غلظت بهینه‌ی حدود ۳/۶ درصد وزنی از سطح فعال، اندازه ذرات به کمینه مقدار و قدرت رنگی به بیشینه مقدار خود رسید و پایداری پراکنه نیز بیشینه شد. در مقابل، مقادیر بسیار بالا یا پایین‌تر از این مقدار، سبب رشد تجمعی ذرات، افزایش کدورت و کاهش کیفیت چاپ شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تنظیم دقیق نسبت سطح‌فعال به پراکنشیار، برای طراحی جوهرهای جوهرافشان تصعیدی با خواص نوری و رئولوژیکی مطلوب، اهمیت اساسی دارد.

کلیدواژه‌ها

چاپ جوهرافشان

پراکنشیار پلیمری

سطح‌فعال

پایداری پراکنه

انتقال تصعیدی

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸

دسترس آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۰۵

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: Jalili@icrc.ac.ir – ORCID: 0000-0002-6818-0672

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

فناوری چاپ جوهرافشان در دو دهه‌ی اخیر به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های چاپ دیجیتال، تحولی بنیادین در بسیاری از صنایع از جمله چاپ نساجی، الکترونیک‌های چاپی و بسته‌بندی ایجاد کرده است. این فناوری به‌دلیل امکان کنترل دقیق بر اندازه و مسیر قطرات جوهر، نیاز نداشتن به کلیشه و شابلون، کاهش مصرف رنگزا و آب، و قابلیت چاپ طرح‌های پیچیده با دقت بالا، جایگزینی مناسب برای روش‌های سنتی به‌ویژه در صنایع نساجی محسوب می‌شود [۱-۳].

در میان انواع مختلف چاپ جوهرافشان، چاپ جوهرافشان تصعیدی (Sublimation Inkjet Printing)جایگاه ویژه‌ای در صنعت نساجی دارد. در این روش، جوهر حاوی رنگزای پراکنده ابتدا بر روی کاغذ انتقالی چاپ می‌شود و سپس تحت اعمال دما (۱۷۵-۲۱۰°C) و فشار (۱/۰۳-۴/۱۴ bar) از کاغذ به سطح زیرآیند منتقل می‌شود. در این فرایند، رنگزای پراکنده از حالت جامد مستقیماً به فاز بخار تصعید و درون ساختار زیرآیند (پارچه پلی‌استر و یا هر زیرآیندی که قابلیت جذب رنگزاهای پراکنده داشته باشد) نفوذ می‌کند [۴]. این روش به‌دلیل وضوح بالای طرح، دوام رنگی مناسب، حذف فرایند شست‌وشوی پس از چاپ و سازگاری با محیط زیست، به‌سرعت در تولید منسوجات تزئینی، پوشاک ورزشی و پارچه‌های فنی مورد توجه قرار گرفته است [۵].

ویژگی‌های فیزیکی جوهرهای جوهرافشان تصعیدی نقش بسیار مهمی در کیفیت چاپ نهایی ایفا می‌کنند. عامل‌هایی نظیر گرانروی، کشش سطحی، اندازه ذرات، پایداری پراکنه و رفتار رئولوژیکی از جمله عوامل کلیدی در عملکرد جوهر و جلوگیری از گرفتگی افشانک چاپگر هستند [۶]. در فرمول‌بندی چنین جوهرهایی، علاوه بر رنگزای پراکنده و حلال پایه (آب)، از مواد پراکنشیار برای تثبیت پراکنش ذرات رنگزا و از سطح‌فعال‌ها برای کنترل کشش سطحی و بین‌سطحی استفاده می‌شود [۷, ۸].

در پراکنه‌های آب‌پایه، اگرچه پراکنشیارها از فعالیت سطحی مناسبی برخوردارند، اما استفاده از سطح‌فعال‌ها به‌عنوان عامل کمک‌کننده بسیار رایج است و می‌تواند فرایند پراکنش و عملکرد فرمول‌بندی را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد. نکته کلیدی و قابل تأمل، درک روش استفاده بهینه از سطح‌فعال‌هاست تا بیشترین اثربخشی در سامانه حاصل شود [۹, ۱۰].

سطح‌فعال‌ها نقش بسیار مهمی در پراکنش ذرات رنگدانه ایفا می‌کنند. این ترکیبات با ترکردن مؤثر سطح ذرات رنگدانه خشک، کشش بین‌سطحی را کاهش داده، فرایند آسیاب و کاهش اندازه ذرات تا حد بهینه را تسهیل و در نهایت موجب پایداری ذرات رنگدانه در محیط پراکنش می‌شوند. معمولاً استفاده از یک نوع سطح‌فعال برای دستیابی به پایداری مطلوب کافی نیست از این‌رو، در اغلب موارد ترکیبی از دو یا سه نوع سطح‌فعال استفاده می‌شود تا ویژگی‌های عملکردی و فرایندی مورد نظر، از جمله پایداری پراکنه حاصل شود [۱۱].

سطح‌فعال‌ها با کاهش کشش سطحی امکان تشکیل قطرات یکنواخت را فراهم می‌کنند و پایداری جوهر را در حین ذخیره‌سازی و چاپ افزایش می‌دهند. با این حال، نوع و مقدار آن‌ها تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌هایی مانند شدت رنگ، پایداری پراکنه و اندازه ذرات دارد. به‌ویژه، سطح‌فعال‌های غیریونی اتوکسیله به‌دلیل سازگاری خوب با رنگزاهای آلی و عدم حساسیت به تغییرات pH، در فرمول‌بندی جوهرهای تصعیدی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند [۱۲].

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که طول زنجیر هیدروکربنی و درجه اتوکسیلاسیون در سطح‌فعال‌های غیریونی می‌توانند موجب تغییرات قابل‌توجهی در کشش سطحی و پایداری سامانه‌های پراکنده شوند [۱۳]. در پژوهشی دیگر مشخص شد که افزایش تعداد گروه‌های اتوکسی در اسیدهای چرب اتوکسیله سبب کاهش کشش سطحی و بهبود یکنواختی اندازه ذرات می‌شود [۱۴]. جذب و شدت رنگ رنگزاهای پراکنده در فرایند مطالعه رنگرزی الیاف پلی‌استر به‌واسطه رنگزاهای پراکنده نشان داد که غلظت سطح‌فعال غیریونی و طول زنجیر اتوکسیله بر شدت رنگ و نفوذ رنگزا به داخل الیاف نقش تعیین‌کننده‌ای دارد [۱۵].

در پژوهش حاضر، اثر سطح‌فعال اسید اولئیک ۶ مول اتوکسیله بر خواص افشرده‌ی رنگزای آبی پراکنده ۳۵۹ در محیط آبی بررسی شده است. در این مطالعه، مقدار پراکنشیار ثابت نگه داشته شده و تنها غلظت سطح‌فعال تغییر داده شده است تا تأثیر آن بر ویژگی‌هایی چون شدت رنگ در ناحیه آبی طیف مرئی، پایداری پراکنه، رفتار رئولوژیکی، کشش سطحی و اندازه ذرات مشخص شود. نتایج حاصل می‌تواند در بهینه‌سازی فرمول‌بندی جوهرهای جوهرافشان تصعیدی آب‌پایه و درک بهتر نقش ساختار شیمیایی سطح‌فعال‌ها در پایداری و کیفیت چاپ پارچه‌های پلی‌استری مؤثر باشد.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد و دستگاه‌ها

رنگزای پراکنده آبی ۳۵۹ خالص از شرکت Tiankun تهیه شد. پراکنشیار پلیمری Tegodisperse 750 که دارای ۴۰ درصد جامد بود از شرکت کالاکار نماینده ایوونیک تأمین شد. گلیسیرین گرید خوراکی با خلوص ۹۹/۹ درصد و سطح‌فعال غیریونی اسیداولئیک ۶ مول اتوکسیله از شرکت آسان‌کم خریداری شد. در این پژوهش از آب یون‌زدوده با رسانایی الکتریکی µS/cm ۰/۰۲ استفاده شد.

برای تهیه نمونه‌های خمیر آسیاب از دستگاه آسیاب خمره‌ای با پرل های زیرکونیایی به قطر ۰/۷- ۰/۸ میلی‌متر استفاده شد. رفتار جذب نمونه‌ها در ناحیه مرئی (۴۰۰- ۷۰۰ nm) به‌وسیله دستگاه طیف‌سنج UV-VIS مدل Bio Spec-1601 شرکت شیمادزو ژاپن بررسی شد. خواص رئولوژیکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه رئومتر MCR300 شرکت آنتون-پار اتریش اندازه‌گیری شد. برای بررسی رئولوژی، در ابتدا نمونه‌ها به‌مدت یک دقیقه تحت برش $100 s^{-1}$ قرار گرفته و سپس به‌مدت دو دقیقه در فاز استراحت و بدون اعمال تنش باقی ماندند. این کار به‌منظور حذف تاریخچه‌ی رئولوژیکی نمونه‌ها و برای افزایش اعتبار نتایج صورت گرفت (۸). مطالعه کدورت نمونه‌ها با دستگاه کدورت‌سنج مدل 2100 AN شرکت Hach آمریکا صورت گرفت. کشش سطحی نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه تنشیومتر (Tensiometer) مدل K100MK2 شرکت Kruss آلمان و به روش Wilhelmy plate بررسی شد. از هر نمونه پنج بار سنجش کشش سطحی به عمل آمد و میانگین نتایج گزارش شد. همچنین اندازه ذرات نمونه‌ها با روش پراکندگی نور پویا

(dynamic light scattering) یا DLS به‌وسیله دستگاه Horiba SZ-100 شرکت Horiba فرانسه اندازه‌گیری شد.

۲-۲ روش تهیه نمونه‌ها

فرمول‌بندی نمونه‌ها در جدول ۱ گزارش شده است. برای تهیه نمونه‌ها ۷۰ درصد آب مصرفی در فرمول به همراه گلیسیرین وارد بشر شده و اجازه داده می‌شود تا به‌وسیله‌ی همزن مغناطیسی انحلال یکنواخت صورت پذیرد. سپس به‌ترتیب پراکنشیار و سطح‌فعال اضافه می‌شوند و اختلاط ادامه می‌یابد. پس از اینکه محلول یکنواختی حاصل شد، به تدریج پودر رنگزا اضافه می‌شود تا در نتیجه آن، تعلیقه‌ای یکنواخت نیز حاصل شود. برای این امر تعلیقه به‌کمک همزن مغناطیسی ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به هم زده می‌شود. در انتها، تعلیقه به مخزن آسیاب خمره‌ای انتقال داده می‌شود و باقی‌مانده‌ی آب فرمول‌بندی نیز در چند مرحله برای انتقال کامل نمونه از بشر اضافه می‌شود. مقدار پرل مصرفی در نمونه ها ۱۲۰ گرم بود. برای خردایش بهینه ذرات رنگزا سرعت آسیاب خمره‌ای روی ۱۴۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. همچنین زمان آسیاب نمونه‌ها ۶ روز منظور شده است.

جدول ۱ فرمول‌بندی نمونه‌ها
Table 1 Samples formulations

Components	Component portion (wt%)					
	AG	AH	AI	AK	AM	AN
Disperse Blue 359	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
Polymeric dispersant	17.9	-	17.9	17.9	17.9	17.9
Glycerol	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
Surfactant	-	0.7	0.7	1.4	3.6	7.1
Water	60.7	67.9	60.0	59.3	57.1	53.6

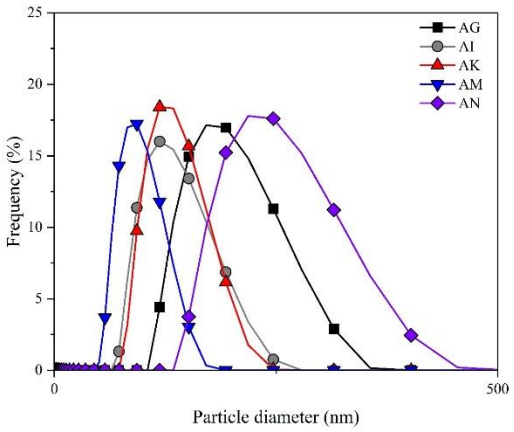
در تهیه‌ی نمونه‌ها، نمونه‌ی AH با استفاده از سطح‌فعال و بدون حضور پراکنشیار پلیمری تهیه شد تا امکان حذف پراکنشیار پلیمری نیز بررسی شود. اما از آنجا که این نمونه در همان مرحله‌ی pre-mix به‌شدت خمیری و گرانرو شد و امکان ادامه فرایند آسیاب و . . . برای آن میسر نبود، انجام آزمون‌های مشخص‌شده در مورد آن ناممکن بود.

۳ بحث و نتایج

۳-۱ اندازه ذرات و کشش سطحی

توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها در شکل ۱ و جدول ۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان سطح‌فعال تا ٪۳/۶ علاوه بر اینکه اندازه ذرات کاهش می‌یابد توزیع آن نیز باریک‌تر می‌شود ولی با افزایش میزان سطح‌فعال به ٪۷/۱، توزیع اندازه ذرات پهن و اندازه ذرات نیز بزرگ‌تر می‌شود.

در فرمول‌بندی جوهرهای جوهرافشان لازم است که از حداقل میزان سطح‌فعال‌ها استفاده شود تا باعث بروز مشکلاتی از جمله کاهش کشش سطحی و ریزش جوهر از افشانک نشود. علاوه بر این، کاهش بیش از حد کشش سطحی سبب می‌شود که جوهر در چاپگر جوهرافشان عملکرد خوبی نداشته و باعث تشکیل قطرات سرگردان و کاهش کیفیت چاپ شود. از طرف دیگر احتمال پخش جوهر روی صفحه هد و گرفتگی افشانک‌ها افزایش می‌یابد [۱۶, ۱۷].



شکل ۱ توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها
Figure 1 Particle size distribution of samples

جدول ۲ مولفه‌های توزیع اندازه ذرات، مستخرج از داده‌های DLS
Table 2 Particle size distribution parameters for the samples, obtained by DLS

Sample	AG	AI	AK	AM	AN
Z-average of particle size (nm)	193.5	132.6	133.3	94.0	246.6
D10 (nm)	134.2	93.0	93.0	64.5	171.2
D50 (nm)	193.5	134.2	134.2	93.0	247.0
D90 (nm)	279.0	193.5	171.2	134.2	315.3
Standard deviation (nm)	29.4	30.4	45.7	22.5	56.7

کشش سطحی نمونه‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش غلظت سطح‌فعال باعث کاهش معنی‌داری در کشش سطحی نمونه‌های AI و AK شده است و با افزایش بیشتر مقدار سطح‌فعال در نمونه‌های AM و AN تغییر چندانی در کشش سطحی نمونه بوجود نمی‌آید که این امر می‌تواند به علت اشباع غلظت سطح‌فعال در سطح مشترک بوده که در ادامه منجر به تشکیل ریشال شده و تقریباً کشش سطحی از این نقطه به بعد ثابت می‌ماند.

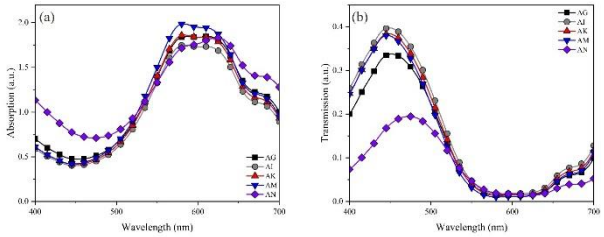
جدول ۳ کشش سطحی نمونه‌ها
Table 3 Surface tension of samples

Sample	AG	AI	AK	AM	AN
Surface tension (mN/m)	49.441	38.806	36.954	35.797	35.164

نکته جالب توجه که از نتایج آزمون‌های اندازه ذره و کشش سطحی قابل برداشت است این است که نمونه AM دارای کوچکترین اندازه ذره با توزیعی باریک است. در واقع می‌توان علت این امر را به این صورت توضیح داد که در فرایند آسیاب، در اثر نیروهای چکشی و مالشی که به ذرات رنگزا وارد می‌شود، این ذرات شکسته شده و ذرات کوچک‌تر، با سطوح جدید به وجود می‌آیند. برای جلوگیری از به‌هم چسبیدن مجدد این ذرات ریزتر، لازم است که از نقطه‌نظر سینتیکی کوچک مولکول‌هایی در سامانه وجود داشته باشند تا بتوانند به سرعت روی سطوح تازه‌تشکیل‌شده جذب شوند (نمونه AM). از طرفی اگر غلظت سطح‌فعال‌ها از مقدار بهینه بیشتر باشد، ممکن است که با ایجاد کف در سامانه، بازده آسیاب را کاهش دهند. علاوه بر این غلظت بالای سطح‌فعال‌ها، می‌تواند مانع از جذب مولکول‌های پراکنشیار شود که این امر، رشد ذرات را به دنبال دارد (نمونه AN).

۳-۲ قدرت رنگی نمونه‌ها

شکل ۲ طیف جذب و انتقالی نمونه‌ها در ناحیه مرئی (۴۰۰- ۷۰۰ nm) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ها در محدوده ۴۰۰ nm تا ۵۵۰ دارای قله انتقالی هستند که شدت و پهنای آن برای هر نمونه متفاوت است. از آن‌جا که نمونه‌ها آبی رنگ بوده و رنگزای پراکنده آبی ۳۵۹ در آب پراکنده شده است، هر چه میزان انتقال در این ناحیه بیشتر باشد، قدرت رنگی ادراک شده نیز بیشتر خواهد بود.



شکل ۲ طیف (a) جذبی و (b) انتقالی نمونه‌ها در ناحیه‌ی مرئی
Figure 2 Spectrophotometry of samples in (a) absorption and (b) transmission modes

شدت انتقال در نمونه‌های AI، AK و AM تفاوت چندانی ندارد، اما اختلاف بین دو نمونه AG و AN قابل‌توجه بوده و نسبت به سایر نمونه‌ها نیز معنی‌دار است. این نتایج نشان می‌دهد که حضور سطح‌فعال در غلظت‌های پایین باعث بهبود پراکنش رنگزا و در نتیجه افزایش قدرت رنگی می‌شود، در حالی که در غلظت‌های بالا به‌دلیل اثرات تجمعی و کاهش پایداری سامانه، قدرت رنگی کاهش می‌یابد [۱۸]. نکته جالب توجه آن است که نمونه AM شدت جذب بیشتری در ناحیه ۵۵۰ تا ۶۵۰ نانومتر دارد (شکل ۲- a) که ناشی از اندازه ذرات کوچک‌تر آن نسبت به سایر نمونه‌ها است. با کاهش اندازه ذرات مساحت سطح ویژه افزایش و در نتیجه برهم‌کنش نور با نمونه افزایش پیدا می‌کند و به تبع آن جذب بیشتر می‌شود. همچنین نمونه‌ی AM پهنای باند جذبی کمتری دارد که منجر به خلوص بیشتر رنگ می‌شود. شدت جذب در طول موج بیشینه جذب (λ_{max}) که حدود ۵۸۰nm است و همچنین پهنای پیک جذبی در نصف ارتفاع پیک در این طول موج، برای تمامی نمونه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. طول موج ۵۸۰nm، دقیقاً طول موج مشخصه‌ی رنگ زرد است که رنگ مکمل رنگ آبی است و با یافته‌های آزمون طیف‌سنجی UV-vis کاملاً مطابقت دارد.

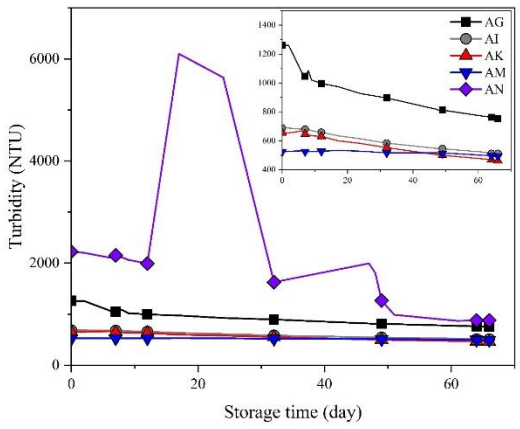
در مورد دو نمونه‌ی AN و AG نیز که با وجود جذب بیشتر در محدوده‌ی طول موج ۶۵۰- ۵۵۰ nm جذب بالایی دارند ولی در عین حال در محدوده‌ی ۴۵۰ nm شدت انتقال کمی دارند، نیز می‌توان علت را در تفاوت سازوکار جذب در این دو نمونه با اندازه ذرات بزرگ‌تر، در مقایسه با نمونه‌های دیگر جستجو کرد. کاهش شدت پرتو عبوری، با دو سازوکار جذب و انتشار اتفاق می‌افتد. انتشار بر اثر اختلاف ضریب شکست ذره و محیط رخ می‌دهد و با نزدیک شدن اندازه ذرات به میزان نیمی از طول موج طیف عبوری به بیشینه مقدار خود می‌رسد. اما جذب به‌صورت انتخابی و در مقیاس مولکولی محقق می‌شود. هم‌زمانی جذب بیشتر این دو نمونه و شدت نور عبوری کمتر در آن‌ها را می‌توان نشان‌دهنده‌ی نزدیک‌تر بودن اندازه ذرات آن‌ها به محدوده‌ی ۲۵۰ نانومتری نسبت داد. در واقع، انتشار بیشتر نور (اندازه ذرات بزرگ‌تر) در این دو نمونه، سبب شده است که شدت نور عبوری در این نمونه‌ها کاهش بیشتری را نشان دهد [۶, ۱۸].

جدول ۴ شدت جذب و عرض پیک جذبی در λ_{max}
Table 4 absorption intensity and width of absorption peak at λ_{max}

Sample name	AG	AI	AK	AM	AN
Absorption intensity at λ_{max}	1.838	1.747	1.8588	1.9842	1.7152
Width of absorption peak	146	114	113	113	135

۳-۳ پایداری پراکنه

پایداری پراکنه نمونه‌ها با رصد کدورت نمونه‌ها طی زمان انبارداری، پس از پایان آسیاب مورد سنجش ارزیابی گرفت. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود نمونه AM دارای کمترین و نمونه AN دارای بیشترین مقدار کدورت است. از طرفی نمونه AN بسیار ناپایدار است در حالی که نمونه AM از پایداری پراکنه قابل‌توجهی برخوردار است.



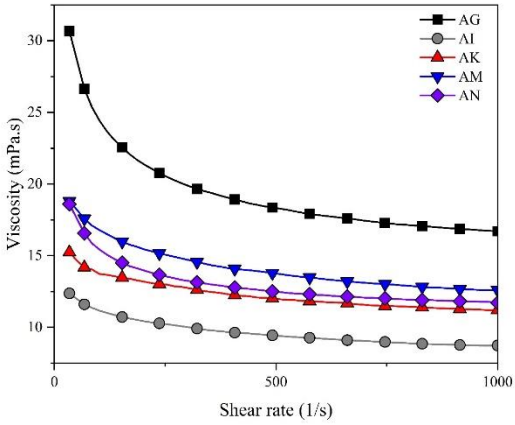
شکل ۳ تغییرات کدورت نمونه‌ها با زمان
Figure 3 Turbidity evolution of samples

افزایش اولیه کدورت در نمونه AN به علت رشد ذره است که در واقع ناشی از غلظت‌های بالای سطح‌فعال است. در چنین شرایطی سطح‌فعال به‌واسطه غلظت و سرعت بالای جذب مانع از جذب مولکول‌های پراکنشیار می‌شود. همچنین ضخامت لایه‌ای که روی سطح رنگزا تشکیل شده کم بوده که در نتیجه باعث غلبه نیروهای جاذبه واندروالسی بر نیروهای دافعه شده و منجر به بهم‌پیوستن ذرات و رشد آن‌ها می‌شود که به شکل افزایش میزان کدورت نمایان می‌شود. از طرفی با رشد ذرات، قطر ذرات افزایش یافته که مطابق با قانون استوکز سرعت ته‌نشینی به شدت افزایش می‌یابد که باعث کاهش کدورت می‌شود. در مقایسه نمونه‌های AI و AK با نمونه AG مشاهده می‌شود (شکل ۳) که اگرچه روند کدورت در این نمونه‌ها تقریباً مشابه است ولی سرعت ته‌نشینی نمونه AG به مراتب بیشتر است که ناشی از اندازه ذرات بزرگ‌تر این نمونه است. اما نمونه‌ی AM تقریباً کدورت ثابتی را در بازه‌ی زمانی ۶۶ روزه‌ی بررسی نشان می‌دهد که بیانگر پایداری مناسب این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها است [۱۹-۲۱].

علت این امر که نمونه‌های AG و AN، به‌ترتیب با کمترین و بیشترین غلظت سطح‌فعال‌ها، بزرگ‌ترین اندازه ذرات را دارند را می‌توان با اشاره به ساختار ریشال‌های تشکیل‌شده از سطح‌فعال‌ها توضیح داد. غلظت زیاد سطح‌فعال‌ها، موجب می‌شود که تعداد زیادی ریشال از این عوامل در محیط پراکنش تشکیل شوند که به بروز پدیده‌هایی نظیر جدایی فازی ناشی از تهی‌شدگی (Depletion Induced Phase Separation) منجر می‌شود و در ضمن، با تشکیل یک لایه‌ی ضخیم از این عوامل بر روی سطح ذرات، به خنثی شدن دافعه الکتریکی بین لایه‌های سطحی دو ذره نیز می‌انجامد [۲۲-۲۵]. از سوی دیگر، کاهش بیش از حد مقدار سطح‌فعال‌ها، موجب می‌شود که با افزایش سطح ویژه، عامل ترکننده کافی برای پوشش‌دادن سطح ذرات در دسترس نباشد و به افت پایداری پراکنه منجر شود [۲۵].

۴-۳ رفتار رئولوژیکی

از مهم‌ترین مولفه‌های جوهرهای جوهرافشان که تعیین‌کننده‌ی عملکرد و چاپ‌پذیری آن‌ها است، رفتار رئولوژیکی آن‌هاست. جوهرهای جوهرافشان باید گرانروی بسیار پایین در محدوده‌ی کمتر از ۱۵cp و با رفتار رئولوژیکی تا حد امکان نزدیک به سیال نیوتونی داشته باشند. در غیراین‌صورت، امکان بروز مشکلاتی نظیر گرفتگی هد یا تشکیل قطرات ماهواره‌ای بسیار زیاد خواهد بود [۲۶-۲۸]. شکل ۴، رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمونه AG نسبت به سایر نمونه‌ها نه‌تنها گرانروی بیشتری دارد بلکه رفتار رقیق‌شونده با برش شدیدتری دارد که احتمالاً ناشی از برهم‌کنش بیشتر ذرات در سرعت‌های برشی کمتر است. نمونه AN نسبت به سه نمونه دیگر (AI، AK و AM) رفتار رقیق‌شونده شدیدتری در سرعت‌های برشی کم دارد که می‌تواند ناشی از پایداری پراکنه‌ی نامناسب باشد. همان‌طور که در قسمت‌های قبل (شکل ۲ و شکل ۳) نشان داده شد، نمونه‌ی AN، بزرگ‌ترین اندازه ذرات و کمترین پایداری را دارد. پایداری پراکنه‌ی نامناسب به عدم توانمندی سامانه‌ی پراکنه در کاهش برهم‌کنش بین سطح ذرات ارتباط دارد. این ناتوانی از یک سو موجب افزایش اندازه ذرات و از سوی دیگر موجب عدم پایداری شده است. در اینجا نیز با افزایش برهم‌کنش بین سطح ذرات، رفتار رقیق‌شوندگی برشی به وضوح قابل مشاهده است. اما اینکه چرا در مقایسه با نمونه AG با پایداری پراکنه و اندازه ذرات مناسب‌تر، نمونه‌ی AN گرانروی و میزان انحراف از رفتار نیوتونی کمتری دارد، علت را می‌توان در اندازه ذرات بزرگ‌تر نمونه‌ی AN جستجو کرد. این نمونه با اندازه ذرات بزرگ‌تر (شکل ۱)، سطح ویژه‌ی به مراتب کمتر و به تبع آن برهم‌کنش بین ذرات کمتری دارد. همین امر می‌تواند بیانگر علت گرانروی بیشتر نمونه AM -با کمترین اندازه ذرات- در مقایسه با سایر نمونه‌های حاوی سطح‌فعال نیز باشد [۲۹, ۳۰].



شکل ۴ رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها
Figure 4 Rheological behavior of samples

درمجموع چهار نمونه‌ای که دارای سطح‌فعال هستند به‌ترتیب دارای رفتار رئولوژیکی شبه‌نیوتونی و نیوتنی در سرعت‌های برشی پایین و بالا هستند در صورتی که نمونه AG که فاقد سطح‌فعال است در سرعت‌های برشی پایین دارای رفتار رقیق‌شونده با برش شدید است.

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر غلظت سطح‌فعال غیریونی بر ویژگی‌های شیمی فیزیکی سامانه‌ی رنگزای پراکنده آبی ۳۵۹ در حضور پراکنشیار پلیمری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر غلظت سطح‌فعال نقش تعیین‌کننده‌ای در اندازه ذرات، پایداری پراکنه، کشش سطحی و رفتار رئولوژیکی سامانه دارد. در میان نمونه‌ها، فرمول AM با دارا بودن نسبت بهینه‌ی سطح‌فعال (حدود ۳٫۶٪)، کوچک‌ترین اندازه ذره، توزیع اندازه باریک‌تر، کشش سطحی متعادل و بیشترین پایداری پراکنه را نشان داد. نتایج آزمون طیف‌سنجی UV-Vis نشان داد که در این فرمول، به‌دلیل پراکنش مؤثرتر ذرات، شدت جذب در ناحیه‌ی مرئی و در نتیجه قدرت رنگی افزایش یافته است. همچنین بررسی رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها بیانگر آن بود که فرمول AM دارای گرانروی پایین و رفتار نزدیک به نیوتونی است که از دیدگاه کاربردی، برای استفاده در جوهرهای جوهرافشان ایده‌آل است. در مقابل، غلظت‌های بالاتر از حد بهینه (نمونه AN) منجر به رشد ذرات، افت پایداری، و رفتار رقیق‌شونده با برش شدید گردید که ناشی از پدیده‌های تجمعی و کاهش کارایی پراکنشیار پلیمری است.

به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده‌ی هم‌زمان از پراکنشیار پلیمری و سطح‌فعال غیریونی در محدوده‌ی بهینه، با ایجاد تعادل میان

نیروهای جاذبه و دافعه‌ی بین‌ذره‌ای، پراکنش پایدار و ویژگی‌های رئولوژیکی مناسب را فراهم می‌سازد. این نتایج می‌تواند در طراحی فرمول‌بندی جوهرهای جوهرافشان آب‌پایه و سایر سامانه‌های کلوئیدی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

1. Derby B., Reis N. Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions. *MRS Bulletin*, 28(11), 815-818, 2003.
2. The Chemistry of Inkjet Inks: WORLD SCIENTIFIC; 2009. 356 p.
3. Sirringhaus H., Shimoda T. Inkjet Printing of Functional Materials. *MRS Bulletin*, 28(11), 802-806, 2003.
4. Sarkodie B., Tawiah B., Agbo C., Wizi J. Status and development of transfer printing in textiles—a review. *AATCC Journal of Research*, 5(2), 1-18, 2018.
5. Alihoseini M.R., Khani M.R., Jalili M., Shokri B. Direct Sublimation Inkjet Printing as a New Environmentally Friendly Approach for Printing on Polyester Textiles. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 14(2), 129-138, 2021.
6. Jalili M., Naeini M.M.R., Ajili N. Optimizing dispersion in sublimation inkjet inks: unveiling the role of sodium naphthalene sulfonate formaldehyde condensate as a co-dispersant. *Journal of Coatings Technology and Research*, 22(4), 1557-1572, 2025.
7. Jalili M., Mohammad Raei Naeini M., Bastani S., Ajili N. Optimizing the Surfactant/Polymeric Dispersant Combination in Pigment-Based Aqueous Inkjet Inks. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 18(2), 177-188, 2025.
8. Abraham J., Thomas S., Kalarikkal N., Handbook of Carbon Nanotubes. *Springer International Publishing*, Cham, 341-392, 2022.
9. Makarewicz E., Michalik A. Research on the Influence of the Type of Surfactant and Concentrator in Aqueous Dispersion of Pigments. *Journal of Surfactants and Detergents*, 17(4), 773-784, 2014.
10. Patel G., Deshmukh K., Hussain C.M., *Advances in Functionalized Polymer Nanocomposites.* Woodhead Publishing, Cambridge- United States, 195-231, 2024.
11. Nagose S., Rose E., Joshi A. Study on wetting and dispersion of the Pigment Yellow 110. *Progress in Organic Coatings*, 133, 55-60, 2019.
12. Sadeghi-Kiakhani M., Tehrani-Bagha A., Aladpoosh R., Hashemi E. Application of different non-ionic surfactants on the conventional extraction and dyeing characteristics of natural dyes on the wool yarn. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 17(3), 275-288, 2024.
13. Abd El-Wahab H., Nasser A., Abd ElBary H., Abd Elrahman M., Hassanein M. Effect of the modified dispersing agent and milling time on the properties and particle size distribution of inkjet ink formulation for textile printing. *Pigment & Resin Technology*, 50(4), 336-356, 2021.
14. Hama I., Sakaki M., Sasamoto H. Effects of ethoxylate structure on surfactant properties of ethoxylated fatty methyl esters. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74(7), 823-827, 1997.
15. Karmakar S., Hakim I. Interaction Between Disperse Dyes and Non-Ionic Surfactants During Thermosol Dyeing of Polyester. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 16(12), 275-278, 1991.
16. Kamyshny A., Sowade E., Magdassi S. Inkjet Ink Formulations: Overview and Fundamentals. In: Zapka W, editor. Inkjet Printing in Industry. Weinheim, Germany: WILEY-VCH GmbH; 2022. p. 93-124.
17. Kusber A., Gaida R.J., Dziubek K., Wit M. The role of resin in optimizing the performance and printing properties of water-based inkjet inks for food packaging. *Pigment & Resin Technology*, 53(6), 824-832, 2024.
18. Herzog B., Sengün F. Scattering particles increase absorbance of dyes — a model study with relevance for sunscreens. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 14(11), 2054-2063, 2015.
19. Rust S., Pauer W. Determination of inline-particle sizes by turbidity measurement in high solid content emulsion polymerisations. *Journal of Polymer Research*, 29(7), 307, 2022.
20. Chung Y.-S. Turbidimetric Evaluation of the Dispersion Properties of Disperse Dyes. *Textile Research Journal*, 70(6), 550-554, 2000.
23. Gharanjig H., Gharanjig K., Sarli M.A., Ozguney A.T., Jalili M., Gharanjik A., et al. Effect of molecular composition of comb-like polycarboxylate dispersants on hydrophobic dye dispersion properties. *Journal of Molecular Liquids*, 350, 118615-118623, 2022.
22. Hang J., Shi L., Feng X., Xiao L. Electrostatic and electrosteric stabilization of aqueous suspensions of barite nanoparticles. *Powder Technology*, 192(2), 166-170, 2009.
23. Jenkins P ,Snowden M. Depletion flocculation in colloidal dispersions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 68, 57-96, 1996.
24. Tuinier R. Introduction to Depletion Interaction and Colloidal Phase Behaviour. In: Lang P, Liu Y, editors. Soft Matter at Aqueous Interfaces. Cham, Switzerland: Springer International Publishing; 2016. p. 71-106.
25. Pu Z., Fan X., Su J., Zhu M., Jiang Z. Aqueous dispersing mechanism study of nonionic polymeric dispersant for organic pigments. *Colloid and Polymer Science*, 300(3), 167-176, 2022.
26. Hoath S.D., *Fundamentals of Inkjet Printing.* Wiley-VCH. Weinheim, 117-140, 2016.
27. Mohammad Raei Nayini M., Jalili M., Ranjbar Z. Printed Electronics, Based on Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets. *Journal of studies in color world*, 10(3), 29-42, 2020.
28. Nallan H.C., Sadie J.A., Kitsomboonloha R., Volkman S.K., Subramanian V. Systematic Design of Jettable Nanoparticle-Based Inkjet Inks: Rheology, Acoustics, and Jettability. *Langmuir*, 30(44), 13470-13477, 2014.
29. Tuladhar T. Measurement of Complex Rheology and Jettability of Inkjet Inks. Handbook of Industrial Inkjet Printing2017. p. 409-430.
30. Mohammad Raei Nayini M., Ataeefard M. Characterization of Electrophotographic Printing Toner: Thermomechanical Point of View. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 17(2), 175-183, 2024.