

مقاله پذیرفته شده

عنوان مقاله: نقش سطح فعال‌های غیریونی در بهبود کیفیت پراکنه و پایداری خمیرآسیاب جوهرهای جوهرافشان

نویسندگان: مجتبی جلیلی

JCST-2512-1278

شماره مقاله:

۱۴۰۴-۰۹-۲۴

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴-۱۰-۱۸

تاریخ اصلاح:

۱۴۰۴-۱۱-۷

تاریخ پذیرش:

این فایل pdf مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکت مقاله توسط دفتر نشریه علوم و فناوری رنگ تهیه شده و قبل از چاپ برای ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می‌شود.

Accepted Manuscript

Title: Role of Non-Ionic Surfactants in Enhancing the Dispersion Quality and Stability of Inkjet Ink Millbases

Authors: M Jalili

To appear in: Journal of Color Science and Technology

Receives date: 15-12-2025

Revises date: 08-01-2026

Accepted date: 28-01-2026

Please cite this article as:

Jalili M. Role of Non-Ionic Surfactants in Enhancing the Dispersion Quality and Stability of Inkjet Ink Millbases. J Color Sci Tech. (2026): JCST-2512-1278.

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form.



نقش سطح فعال های غیر یونی در بهبود کیفیت پراکنه و پایداری خمیر آسیاب جوهرهای جوهرافشان

مجتبی جلیلی

گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴

چکیده:

در این پژوهش اثر ساختار مولکولی و غلظت سه نوع سطح فعال غیر یونی سوربیتان مونو اولئات ۲۰ مول اتوکسیله (Tween80)، اسید اولئیک ۶ مول اتوکسیله (Keol6) و نونیل فنول ۱۰ مول اتوکسیله (Kenon10) بر فرآیند آسیاب و ویژگی های پراکنه رنگزای دیسپرس آبی ۳۵۹ جهت کاربرد در جوهرهای آب پایه جوهرافشان بررسی شد. آزمون های از جمله اندازه ذرات، کشش سطحی، رنگ سنجی، طیف سنجی و پایداری دینامیکی انجام شد. نتایج نشان داد که Kenon10 به میزان ۰/۰۵ گرم به دلیل ساختار آروماتیک و طول زنجیر اتوکسیله مناسب، موجب تشکیل پراکنه ای با کوچک ترین اندازه ذرات (حدود ۱۰۰ نانومتر)، باریک ترین توزیع، بالاترین قدرت رنگی و پایداری مطلوب می شود. افزایش غلظت این سطح فعال به دلیل رقابت با پراکنش پلیمری و کاهش بیش از حد کشش سطحی، منجر به بزرگ شدن ذرات، کاهش قدرت رنگی و ناپایداری می گردد. سطح فعال های Keol6 و Tween80 بر خلاف Kenon10 در غلظت ۰/۱ گرم عملکرد خوبی داشتند. بررسی ها نشان می دهد که ساختار مولکولی سطح فعال تاثیر بسزایی بر عملکرد آن در تهیه کنسانتره های رنگزا از نقطه نظر راندمان فرآیند آسیاب، قدرت رنگی و پایداری کلونیدی پراکنه دارد.

کلمات کلیدی: رنگزای دیسپرس، پایداری پراکنه، سطح فعال غیر یونی، جوهر جوهرافشان آب پایه، فرآیند آسیاب

Role of Non-Ionic Surfactants in Enhancing the Dispersion Quality and Stability of Inkjet Ink Millbases

Department of Printing Science and Technology, Faculty of color physics, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

* Jalili@icrc.ac.ir

This study investigates the effect of molecular structure and concentration of three non-ionic ethoxylated surfactants— Sorbitan monooleate (Tween80), oleic acid (Keol6), and nonylphenol (Kenon10)—on the milling process and final properties of dispersions for water-based inkjet inks. Particle size, surface tension, colorimetry, spectroscopy, and dynamic stability were evaluated. Results indicated that Kenon10 at an amount of 0.05 g, yields dispersions with the smallest particle size (~100 nm), narrowest distribution, highest color strength, and superior stability, attributed to its aromatic structure and optimal ethoxylate chain. Higher Kenon10 concentrations induce excessive surface tension reduction and competitive adsorption with the polymeric dispersant, leading to particle growth, reduced color strength, and instability. Conversely, Keol6 and Tween80 perform effectively at a higher concentration (0.1 g). The findings highlight the critical influence of surfactant molecular architecture on dispersion quality, governing milling efficiency, color performance, and colloidal stability.

Key words: Disperse dye, Colloidal stability of dispersion, Non-ionic surfactant, Water-based inkjet ink, milling process

۱. مقدمه

ظهور و گسترش فناوری چاپ جوهرافشان تحولی شگرف در صنایع مختلف از جمله نساجی ایجاد کرده است. این فناوری با مزایایی چون سرعت بالا، انعطاف پذیری در چاپ روی سطوح مختلف و کیفیت تصویری بی نظیر به یکی از پرکاربردترین روش های چاپ دیجیتال تبدیل شده است (۱،۲). در این فناوری، قابلیت تغییر الگوی چاپی، صرف نظر از میزان تقاضای بازار، در هر زمانی و به سهولت امکان پذیر است. در قلب این فناوری، جوهرهایی تخصصی قرار دارند که بر عملکرد نهایی چاپگر نقش تعیین کننده ای دارند. جوهرهای آب پایه به دلیل مزایای زیست محیطی، عدم سمیت و سهولت استفاده، سهم عمده ای از بازار جوهرهای جوهرافشان را به خود اختصاص داده اند (۳). با این حال، فرمولاسیون این جوهرها با چالش های فنی پیچیده ای روبرو است. این چالش ها ناشی از ملزومات سختگیرانه ای

مقاله پذیرفته شده

است که یک جوهر جوهرافشان باید همزمان برآورده کند. ویسکوزیته پایین و محدوده باریک کشش سطحی برای عبور جوهر از نازل‌های میکرونی و تشکیل قطره‌های یکنواخت، پایداری کلوئیدی بلندمدت و اندازه ذرات نانویی رنگدانه (معمولاً زیر ۲۰۰ نانومتر) با توزیع اندازه ذرات باریک جهت جلوگیری از ته‌نشینی رنگدانه در مجاری انتقال جوهر و گرفتگی نازل‌ها و همچنین تکرارپذیری کیفیت چاپ از جمله این ملزومات می‌باشند. از طرفی با کاهش اندازه ذرات و باریک شدن توزیع اندازه ذرات قدرت رنگی و خلوص رنگی جوهر نیز افزایش می‌یابد (۴-۷).

در این میان، رنگزاهای آلی به دلیل طیف رنگی وسیع، خلوص رنگ بالا و پایداری شیمیایی خوب، گزینه‌ای ایده‌آل برای جوهرهای جوهرافشان با کیفیت عالی محسوب می‌شوند (۸، ۹). از طرفی مولکول‌های رنگزاهای آلی اغلب مسطح و متشکل از حلقه‌های آروماتیک مزدوج هستند که باعث افزایش شدید نیروهای جاذبه واندروالسی و در نتیجه تشکیل تجمعات آب‌گریز می‌شوند. استفاده از آسیاب‌های افقی با گلوله‌های زیرکونیایی به قطر ۰/۳-۰/۴ میلی‌متر روشی کلیدی برای شکستن این تجمعات و کاهش اندازه ذرات اولیه رنگزا تا مقیاس نانومتری است (۱۰). موفقیت این فرآیند و کیفیت نهایی پراکنه، به شدت وابسته به نوع افزودنی‌های به کاررفته است. معمولاً جهت بهینه‌سازی فرآیند آسیاب و خواص کنسانتره رنگزا از ترکیب پراکنش‌پلیمری و سطح‌فعال‌ها استفاده می‌شود. پراکنش‌پلیمری با وزن مولکولی بالا، از طریق ایجاد ممانعت فضایی، سد محکمی در برابر نیروهای جاذبه واندروالسی بین ذرات ایجاد کرده و پایداری بلندمدت پراکنه را تضمین می‌کند (۱۱). از سوی دیگر، سطح‌فعال‌ها با کاهش کشش سطحی و بین‌سطحی، ترشدن ذرات و توده‌های رنگدانه را تسهیل کرده و باعث تسریع فرآیند کاهش اندازه ذرات در مرحله آسیاب می‌شوند (۱۲، ۱۳). همچنین با نفوذ به درون خلل و فرج بین ذرات، شکستن ساختارهای اولیه را ممکن می‌سازند (۱۴).

با این حال، انتخاب و بهینه‌سازی افزودنی‌ها، به‌ویژه سطح‌فعال‌ها، امری بسیار حساس، و چالشی جدی در فرمولاسیون جوهر جوهرافشان محسوب می‌شود. شاخص تعادل آبدوستی-چربی‌دوستی^۱، ساختار شیمیایی (آلیفاتیک در مقابل آروماتیک) و غلظت سطح‌فعال، پارامترهای تعیین‌کننده‌ای هستند (۱۵). با افزایش HLB سطح‌فعال‌های غیریونی، اگرچه طول زنجیر اتوکسیله افزایش یافته و سبب افزایش ممانعت فضایی می‌شود ولی حلالیت نیز افزایش یافته و ممکن است سبب تولید کف در مرحله آسیاب شود. کف در حین فرآیند آسیاب با ایجاد یک لایه الاستیک، انتقال مؤثر انرژی از گلوله‌ها به ذرات رنگدانه را مختل کرده و منجر به توزیع پهن اندازه ذرات و افزایش زمان آسیاب می‌گردد (۱۶).

از دیگر عوامل بسیار مهم در تهیه خمیر رنگزا، رقابت بین سطح‌فعال و پراکنش‌پلیمری در جذب سطحی روی ذرات رنگزا است. سطح‌فعال‌ها معمولاً طول زنجیر کوتاهی دارند بنابراین قابلیت ایجاد لایه‌ای ضخیم جهت ممانعت فضایی و پایداری سامانه را ندارند. از طرفی نرخ جذب و واجذب آنها به سطح سریع است از این‌رو جذب آنها به روی سطح به‌جای پراکنش‌پلیمری می‌تواند منجر به ناپایداری کلوئیدی، رشد مجدد ذرات و در نهایت ته‌نشینی شود که در فرمولاسیون جوهرهای جوهرافشان بسیار چالش‌برانگیز است (۱۷).

با توجه به موارد مذکور، درک عمیق از تأثیر متقابل ساختار مولکولی سطح‌فعال و غلظت بهینه آن بر سینتیک فرآیند آسیاب، اندازه نهایی ذرات، قدرت رنگی و به‌ویژه پایداری دینامیکی پراکنه در بازه‌های زمانی مختلف، یک شکاف دانشی مهم به‌شمار می‌رود. ارائه یک راهنمای مشخص برای انتخاب سطح‌فعال بر اساس ساختار شیمیایی و HLB آن، جهت دستیابی همزمان به پراکنه‌ای ریزدانه، پایدار و با قدرت رنگ‌دهی بالا، ضرورتی انکارناپذیر در تهیه جوهرهای جوهرافشان است.

در این پژوهش، سه سطح‌فعال سوربیتان مونو اولئات ۲۰ مول اتوکسیله (Tween80)، اسید اولئیک ۶ مول اتوکسیله (Keol6) و نونیل فنول ۱۰ مول اتوکسیله (Kenon10) در تهیه خمیر رنگزا جهت کاربرد در جوهرهای آب‌پایه جوهرافشان بررسی شده است. در این مطالعه، پارامترهایی از جمله اندازه ذرات، کشش سطحی، طیف‌های جذب و عبور، مشخصه‌های رنگی در فضای رنگی CIE L*a*b* و پایداری سوسپانسیون ارزیابی و تحلیل شده‌اند. نتایج این تحقیق نقش و عملکرد سطح‌فعال‌های غیریونی در جهت

^۱Hydrophilic-Lipophilic Balance (HLB)

^۲ Foam

مقاله پذیرفته شده

بهینه‌سازی فرآیند آسیاب و همچنین دستیابی به جوهری پایدار با اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات و همچنین قدرت رنگ‌دهی بهینه نشان می‌دهد.

۲. تجربیات

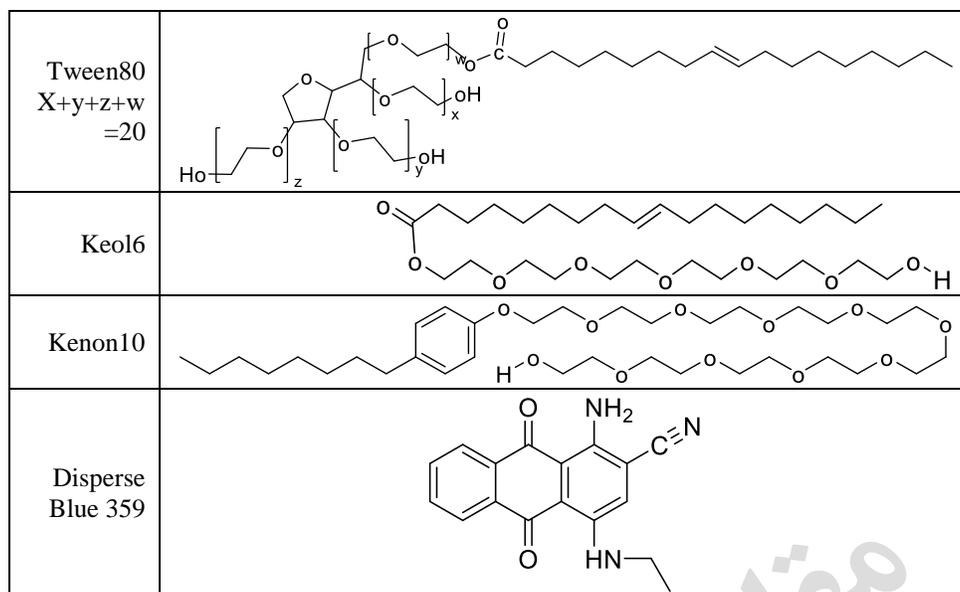
۱.۲. مواد و دستگاه‌ها

در این مطالعه، رنگزای دیسپرس آبی ۳۵۹ بدون نمک از شرکت Tiankun چین تهیه شد. پراکنش‌یار پلیمری Tegodispers 750w با درصد جامد ۴۰٪ از طریق شرکت کالاکار نماینده ایوونیک تامین شد. گلیسرین با خلوص ۹۹/۹٪ از شرکت آسان کم خریداری شد. سطح‌فعال‌های Kenon10 و Keol6 از شرکت کیمیاگران امروز و Tween80 از شرکت نوترون خریداری شد. ساختار مولکولی و خصوصیات سطح‌فعال‌ها به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ گزارش شده است. آب دیونیزه با رسانایی الکتریکی $0.2 \mu\text{S}/\text{cm}$ به عنوان حلال استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های خمیرآسیاب، از دستگاه جارمیل همراه با پرل‌های زیرکونیایی با قطر ۰/۸ تا ۱ میلی‌متر استفاده شد. از طیف‌سنج UV-VIS مدل BioSpec-1601 ساخت شیمادزو ژاپن، برای بررسی جذب نور نمونه‌ها در ناحیه (۴۰۰-۸۰۰ نانومتر) استفاده شد. کدورت نمونه‌ها با دستگاه 2100AN شرکت Hach آمریکا اندازه‌گیری شد و کشش سطحی با روش صفحه ویلهلمی و دستگاه K100MK2 شرکت Kruss آلمان تعیین گردید. در روش اندازه‌گیری آزمون کشش سطحی تعداد دفعات اندازه‌گیری ۵ مرتبه و انحراف معیار ۰/۰۵٪ تعریف شده است. همچنین اندازه ذرات با استفاده از دستگاه Horiba SZ-100 شرکت Horiba فرانسه مشخص شد. ارزیابی رنگ‌سنجی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه spectrodensitometer S900 شرکت Ihara ژاپن اندازه‌گیری شده است که میانگین سه مرتبه اندازه‌گیری گزارش شده است. فیلم نمونه جهت ارزیابی رنگ‌سنجی و قدرت رنگی به‌وسیله فیلم‌کش میله‌ای ۴ میکرومتر از شرکت K-coater روی شیشه اعمال شد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی سطح‌فعال‌ها و پراکنش‌یار پلیمری

Table 1. Physical properties of the surfactants and polymeric dispersant

surfactant	HLB	Ethoxylated moles	Hydrophobic group	Molecular structure	Molecular weight (g/mol)
Tween80	15	20	Oleic acid	Branched	1310
Kenon10	13.3-14	10	Nonyl phenol	Linear	630-660
Keol6	9.9	6	Oleic acid	Linear	370-390
Tegodispers 750w	---	---	---	Blocked copolymer	10000-15000



شکل ۱. ساختار مولکولی سطح فعال ها و پراکنش پلمری
Figure 1. Molecular structure of the surfactants and polymeric dispersant

۲،۲. روش تهیه نمونه‌ها

فرمولاسیون نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. برای تهیه نمونه‌ها، ابتدا آب دیونیزه و گلیسرول در بشر ریخته شده و با استفاده از همزن مغناطیسی تا حصول یکنواختی کامل مخلوط می‌شوند. سپس به ترتیب پراکنش پلمری و سطح فعال افزوده شده و اختلاط ادامه می‌یابد. پس از دستیابی به محلولی همگن، پودر رنگزا به تدریج اضافه می‌شود تا سوسپانسیونی یکنواخت شکل گیرد. برای این منظور، سوسپانسیون به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه توسط همزن مغناطیسی بهمزده می‌شود. در مرحله بعد، سوسپانسیون به جار منتقل شده و باقی مانده آب فرمولاسیون در چند مرحله به منظور انتقال کامل نمونه از بشر اضافه می‌گردد. مقدار پرل مصرفی برای هر نمونه ۱۲۰ گرم تعیین شد. مقدار کل هر نمونه ۱۴ گرم بوده است. برای خردایش مؤثر ذرات رنگزا، سرعت جارمیل روی ۱۴۰ دور بر دقیقه تنظیم گردید و نمونه‌ها به مدت ۶ روز آسیاب شدند.

جدول ۲: فرمولاسیون نمونه‌ها

Table 2: Samples formulations

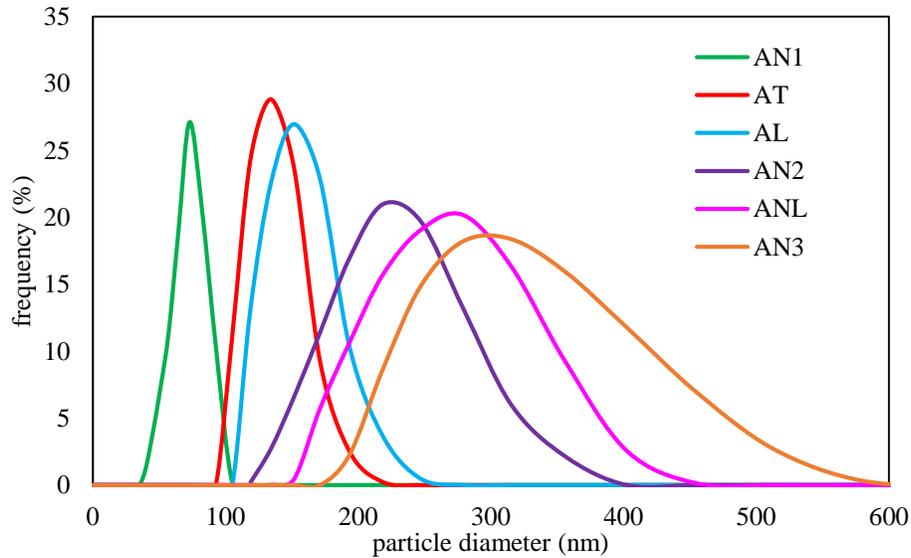
Components	Component portion (wt%)					
	AL	AN1	AN2	AN3	ANL	AT
Disperse Blue 359	2	2	2	2	2	2
Polymeric dispersant	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Glycerol	1	1	1	1	1	1
K16	0.1	---	---	---	0.1	---
Kn10	---	0.05	0.1	0.2	0.1	---
Tween80	---	---	---	---	---	0.1
Water	8.4	8.45	8.4	8.3	8.3	8.4

۳. بحث و نتایج

۱،۳. اندازه ذرات

شکل ۲ توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نمونه AN1 نسبت به سایر نمونه‌ها علاوه بر اینکه اندازه ذرات

کوچکتری دارد توزیع اندازه ذرات باریک‌تری نیز دارد. اندازه ذرات نمونه AT از AL نسبتاً کوچکتر است ولی هر دو نمونه از توزیع اندازه ذرات نسبتاً باریکی برخوردار هستند. سه نمونه AN2، ANL و AN3 دارای اندازه ذراتی به مراتب بزرگتر و از توزیع اندازه ذرات پهنی نیز برخوردار هستند.

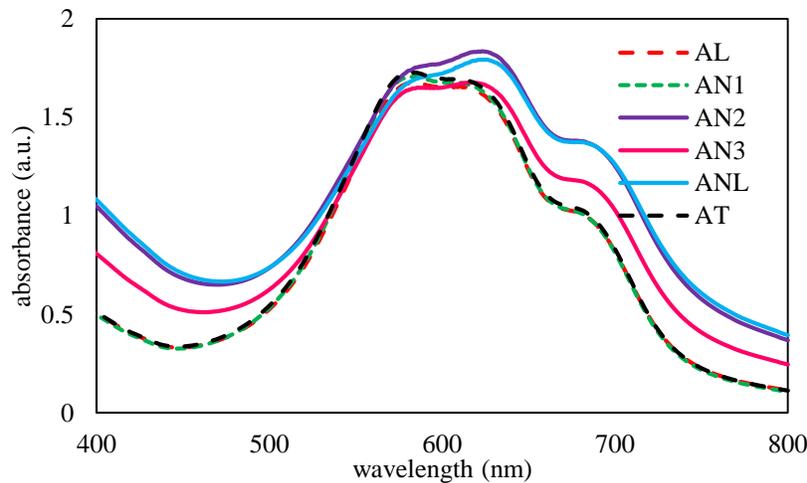


شکل ۲. توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها

Figure 2. Particle size distribution of the samples

۲.۳. قدرت رنگی نمونه‌ها

شکل ۳ طیف جذب نمونه‌ها در ناحیه طول‌موج‌های ۴۰۰-۸۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نمونه‌ها دارای فام آبی هستند بنابراین هر چه نسبت جذب در λ_{max} (۶۱۰ nm) به جذب در طول‌موج ۴۴۷ nm بیشتر باشد فام آبی شدیدتری حاصل می‌شود که در جدول ۳ گزارش شده است.



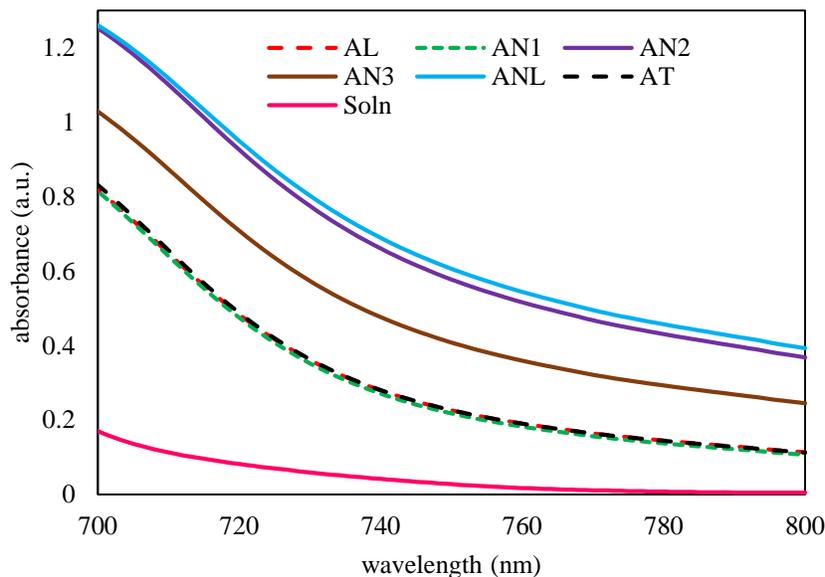
شکل ۳. طیف جذب نمونه‌ها در ناحیه ۴۰۰-۸۰۰ نانومتر

Figure 3. Absorption spectra of the samples in the 400-800 nm region

جدول ۳. قدرت رنگی نمونه‌ها براساس نسبت جذب در λ_{max} به طول موج ۴۴۷ nm
Table 3. Color strength of the samples determined from the absorbance ratio at λ_{max} / 447

sample	AL	AN1	AN2	AN3	ANL	AT
Absorbance at λ_{max}	1.6551	1.6744	1.8063	1.6701	1.7586	1.6934
Absorbance at 447 nm	0.3313	0.3259	0.6932	0.5277	0.7182	0.3362
Absorbance ratio	4.996	5.138	2.606	3.165	2.449	5.037

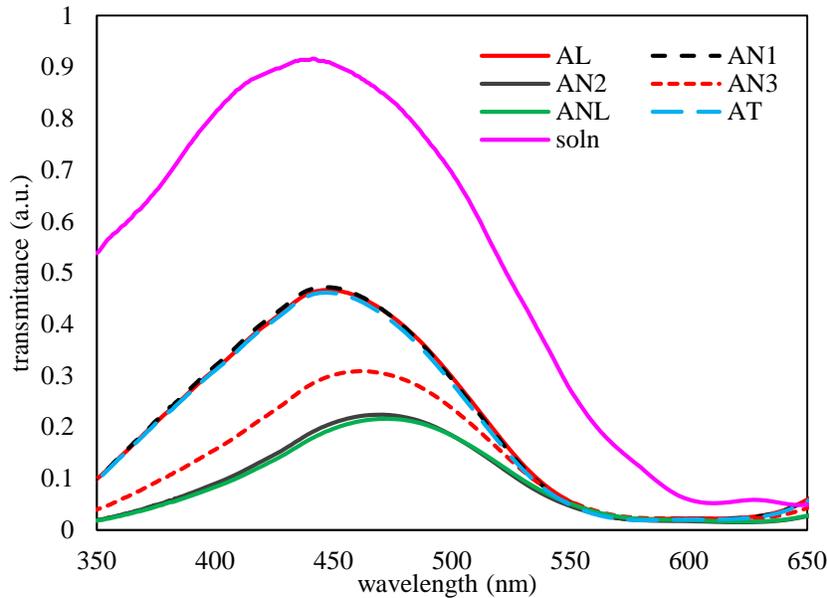
همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد به ترتیب نمونه‌های AN1، AT و AL بیشترین قدرت رنگی و نمونه‌های AN2، AN3 و ANL کمترین قدرت رنگی دارند. از طرفی برهمکنش نمونه‌ها با امواج الکترومغناطیس در ناحیه طول موج‌های مادون قرمز ۷۰۰-۸۰۰ نانومتر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. برهمکنش پراکنه نمونه‌ها و محلول رنگزا با نور در ناحیه مادون قرمز
Figure 4. Interaction of the sample dispersions with light in the infrared region

در مواد رنگزای آلی جذب انتخابی در اثر انتقالات الکترونی $\pi \rightarrow \pi^*$ ملاحظه می‌شود که پراکنه‌های ANL، AN2 و AN3 به ترتیب بیشترین جذب و AN1، AL و AT جذب یکسان و به مراتب کمتری دارند. در صورتی که نمونه محلول رنگزا در استون با غلظت مشابه (۰/۴ گرم بر لیتر) جذب بسیار کمی در ناحیه مذکور دارد. با مقایسه میزان جذب نمونه محلول و پراکنه‌ها، به نظر می‌رسد که افزایش ظاهری در جذب نمونه‌ها در این ناحیه ناشی از انتشار نور و در نتیجه کاهش میزان شدت نور عبوری از نمونه‌ها بوده است. از طرفی اندازه ذرات تاثیر قابل توجهی بر میزان انتشار دارد به طوری که با افزایش آن، شدت انتشار نیز افزایش می‌یابد. از اینرو می‌توان گفت که نمونه‌های AL، AN1 و AT دارای اندازه ذره کوچک‌تر هستند در حالی که نمونه ANL دارای بزرگترین اندازه ذره و

پس از آن نمونه AN2 و سپس AN3 قرار دارد. شکل ۵ نشان می‌دهد که اندازه ذرات به چه میزان بر شدت عبور نمونه‌های رنگزا در ناحیه طول موج‌های آبی تاثیرگذار است. در نمونه soln که رنگزا به صورت مولکولی وجود دارد انتشار صفر و یا بسیار کم است در نتیجه نمونه دارای بیشترین میزان عبور است ولی در پراکنه‌ها به وضوح مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه ذرات میزان انتشار افزایش یافته و از میزان عبور نور کاسته می‌شود.



شکل ۵. میزان عبور نمونه‌ها در ناحیه ۳۰۰-۶۵۰ نانومتر
Figure 5. Transmittance of the samples in the 300-650 nm region

۳.۳. رنگ‌سنجی

بررسی تغییرات پارامترهای رنگی نمونه‌ها با زمان آسیاب نیز نشان می‌دهد که اندازه ذرات اثر بسزایی بر قدرت رنگی نمونه‌ها دارند. مقادیر $L^*a^*b^*$ فیلم نمونه‌ها پس از ۲۴ و ۷۲ ساعت آسیاب در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴. پارامترهای رنگی فیلم نمونه‌ها پس از ۲۴ و ۷۲ ساعت آسیاب

Table 4. Color parameters of the sample films after 24 and 72 hours of milling

sample	After 24 h milling			After 72 h milling		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
AL	32.82	1.58	-36.02	24.13	6.70	-42.06
AN1	30.56	2.43	-36.16	25.68	5.50	-42.15
AN2	33.85	3.40	-31.41	26.29	3.82	-38.54
AN3	32.87	2.88	-32.00	30.25	4	-36.67
ANL	30.41	4.57	-29.95	27.16	3.12	-38.14
AT	28.82	3.89	-35.35	26.17	4.57	-42.09

مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آسیاب مقدار روشنایی نمونه‌ها کاهش و شدت رنگ آبی آنها نیز بیشتر می‌شود که مولفه b^* این مطلب را نشان می‌دهد. از طرفی مشاهده می‌شود که نمونه‌های AL، AN1 و AT قدرت رنگی بیشتری دارند که نشان می‌دهد عملکرد سطح‌فعال‌های Tween80 و Keol6 در غلظت ۰/۱ گرم مشابه Kenon10 در غلظت ۰/۰۵ گرم بوده است. از طرفی افزایش بیشتر غلظت سطح‌فعال Kenon10 اثر معکوسی روی قدرت رنگی دارد به طوری که نمونه AN3 کمترین قدرت رنگی را حاصل کرده است.

۴.۳. کشش سطحی

جدول ۵ کشش سطحی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در نمونه‌های AL، AN2 و AT که دارای میزان یکسان سطح فعال هستند AN2 دارای کمترین مقدار کشش سطحی است. عامل اصلی این مشاهده، در واقع اندازه ذرات بزرگتر نمونه AN2 است که به علت اندازه ذرات بزرگتر، سطح ویژه کمتری برای جذب سطح فعال وجود داشته و در نتیجه مقادیر بیشتری از سطح فعال در بالک به صورت تک مولکول حضور دارند که باعث کاهش بیشتر کشش سطحی می‌شوند.

جدول ۵. کشش سطحی نمونه‌ها

Table 5. Surface tension of the samples

sample	AN1	AN2	AN3	ANL	AL	AT
Surface tension (mN/m)	44.757	36.698	35.179	35.705	39.474	45.185

دو نمونه AL و AT همچنان که شکل ۲ نشان می‌دهد دارای اندازه ذرات کوچک‌تر بوده و در نتیجه جذب سطح فعال بیشتری روی سطح آنها صورت می‌گیرد که باعث کاهش غلظت سطح فعال در بالک و افزایش کشش سطحی می‌شود. با افزایش غلظت kenon10 از ۰/۰۵ به ۰/۱ گرم کشش سطحی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است ولی با افزایش آن به ۰/۲ گرم کاهش معنی‌داری در کشش سطحی مشاهده نمی‌شود که احتمالاً در اثر اشباع غلظت سطح فعال در سطح مشترک و تشکیل مایسل‌ها می‌باشد. افزایش درصد سطح فعال وابسته به میزان HLB از دو جنبه حائز اهمیت است. در مقادیر کم نه تنها سطح فعال با کاهش کشش بین سطحی باعث بهبود ترشوندگی و کمک به کاهش اندازه ذرات می‌شود همچنین ممکن است با جذب روی سطح رنگزا در پایدارسازی پراکنش رنگزا موثر واقع شود (۱۸). از طرف دیگر در مقادیر زیاد در جذب به روی سطح رنگزا با پراکنش رقیب کرده و مانع جذب آن می‌شود. علاوه بر این با کاهش زیاد کشش سطحی مطابق معادله واشبرن فشار مایع بر ستون‌های مویینه کاهش یافته و نفوذ محمل به داخل تخلخل‌ها با تاخیر مواجه شده و در نتیجه کاهش اندازه ذرات مستلزم زمان آسیاب طولانی‌تر می‌شود. همچنین مقادیر زیاد سطح فعال باعث بوجود آمدن کف در سیستم شده و مانع انتقال موثر نیرو از پرل به ذرات می‌شود که این امر نیز کاهش اندازه ذرات را با مشکل مواجه می‌سازد.

نمونه‌های AN3 و ANL هر کدام دارای مقدار یکسانی از سطح فعال هستند ولی در نمونه ANL ۵۰ درصد سطح فعال از نوع keol6 است. این سطح فعال در مقایسه با Kenon10 از HLB کمتری برخوردار بوده (۹/۹ در مقابل ۱۳/۳-۱۴) که سبب می‌شود تا حلالیت کمتری در آب داشته و می‌تواند به عنوان ضد کف عمل کرده و تا حدی با از بین بردن کف باعث بهبود فرآیند آسیاب شود. در مجموع نمونه AN1 که دارای کمترین مقدار سطح فعال Kenon10 است از شرایط مطلوب‌تری برخوردار است.

۴.۳. کدورت و تغییرات آن

در جدول ۶ میزان کدورت اولیه نمونه‌ها پس از ۷۲ و ۱۴۴ ساعت گزارش شده است. با مقایسه مقادیر کدورت مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آسیاب کدورت نمونه‌های AL، AN1 و AN2 بیش از پنجاه درصد و نمونه‌های AN2 و ANL تقریباً بیست درصد کاهش یافته است. رفتار نمونه AN3 متفاوت از بقیه و افزایش کدورت را نشان می‌دهد. نتایج مندرج در جدول ۵ با شکل ۲ که نشان‌دهنده اندازه ذرات است کاملاً مطابقت دارد زیرا کدورت سوسپانسیون‌ها با اندازه ذرات آنها رابطه مستقیم دارد (۱۹).

جدول ۶. کدورت اولیه نمونه‌ها پس از ۷۲ و ۱۴۴ ساعت آسیاب

Table 6. Initial turbidity of the samples after 72 and 144 hours of milling

sample	AL	AN1	AN2	AN3	Anl	AT
Turbidity after 72 h milling (NTU)	1567	1455	2843	2456	2981	1549
Turbidity after 144 h milling (NTU)	775	645	2286	8287	2428	717

مقاله پذیرفته شده

در فرآیند آسیاب رنگزا، مراحل از جمله ترشدن ذرات و تجمعات، انتقال انرژی از گلوله به تجمعات، کاهش اندازه ذرات و در نهایت پایداری ذرات پراکنده از اهمیت بسزایی برخوردار هستند.

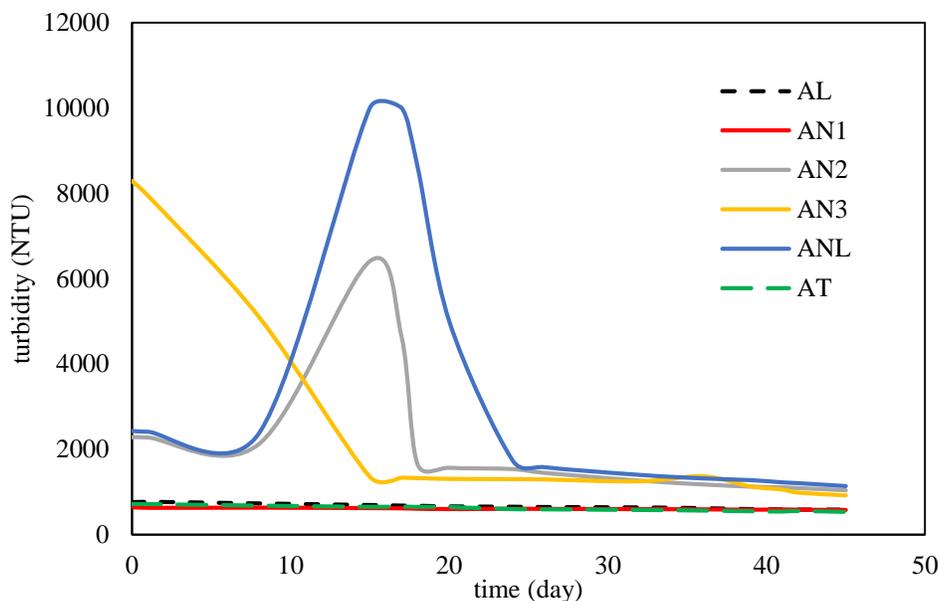
سینتیک ترشدن ذرات مطابق با معادله واشبرن به این شکل تعریف می‌شود

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi R^2 \sigma_l \cos \theta}{4\eta L} \quad \text{معادله ۱}$$

در این معادله V حجم محمل یا مایع نفوذ کرده، t زمان، R شعاع ستون‌های مویینه (در واقع خلل و فرج و یا فضاهای بین ذرات)، σ_l کشش سطحی محمل، θ زاویه تماس محمل با ذره، η ویسکوزیته محمل و L متوسط طول ستون‌های مویینه می‌باشند. مشاهده می‌شود که سرعت ترشدن ذرات متناسب با کشش سطحی و زاویه تماس است. روشن است که با افزایش کشش سطحی، زاویه تماس افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که کشش سطحی بالاتر نقش موثرتری در سرعت ترشدن و کاهش اندازه ذرات داشته است (نمونه‌های AL، AN1 و AT). در واقع کشش سطحی بالاتر فشار بیشتر جهت نفوذ به داخل ستون‌های مویینه فراهم کرده و سبب تسریع ترشدن ذرات و سهولت بیشتر فرآیند آسیاب می‌شود که از نقطه نظر سینتیکی از اهمیت کلیدی برخوردار است. با کاهش کشش سطحی، تمایل محمل به جاری شدن روی سطح افزایش یافته و فشار آن جهت نفوذ به داخل خلل و فرج کاهش می‌یابد. از آنجا که هدف نهایی تهیه پراکنه پایدار از نقطه نظر ترمودینامیکی است لذا باید موازنه‌ای بین کشش سطحی و زاویه تماس برقرار شود (۱۰ و ۲۰).

HLB و غلظت سطح فعال از عوامل دیگری هستند که در انتقال انرژی به ذرات موثرند. سطح فعال‌هایی که از HLB بالاتری برخوردار هستند تمایل به تولید کف دارند. ایجاد کف در مرحله آسیاب از انتقال موثر انرژی به ذرات ممانعت کرده و کاهش اندازه ذرات را مختل می‌سازد از طرفی باعث به وجود آمدن توزیع پهن اندازه ذرات می‌شود که جهت کاربرد در جوهرافشان مناسب نیست. بنابراین مشاهده می‌شود که افزایش غلظت Kenon10 از ۰/۰۵ به ۰/۱ و ۰/۲ گرم باعث کاهش کشش سطحی و در نتیجه کاهش فشار ستون مایع جهت نفوذ در تخلخل‌ها می‌شود که ترشدن و کاهش اندازه ذرات را به تأخیر می‌اندازد. از طرفی با ایجاد کف و حباب در سیستم مانع از انتقال موثر انرژی به ذرات شده و سبب می‌شود تا توزیع اندازه ذرات پهنی حاصل شود.

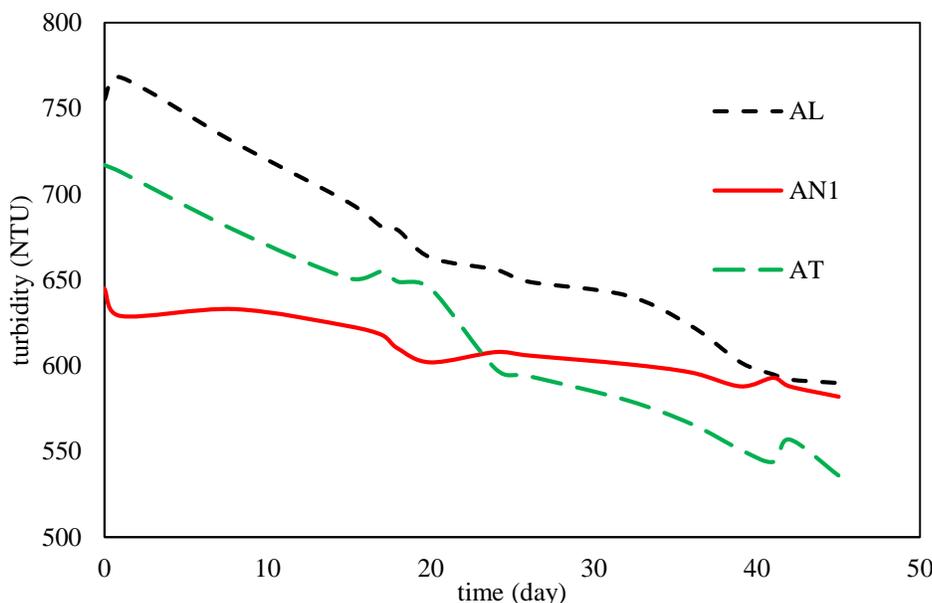
مقایسه نمونه AN2 با نمونه‌های AL و AT با غلظت یکسان از سطح فعال نشان می‌دهد که سطح فعال Kenon10 رفتار متفاوتی دارد. Kenon10 HLB از K16 بیشتر است ولی همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد ساختار بخش آب‌گریز آن متشکل از یک زنجیر آلیفاتیک ۹ کربنی متصل به حلقه بنزن آروماتیک است که به واسطه ابر الکترونی π تمایل شدیدی به جذب روی سطح رنگزا دارد. از این رو این سطح فعال در مقایسه با K16 و Tween80 که قسمت آب‌گریز آنها متشکل از اسید اولئیک است در غلظت‌های بالا می‌تواند با پراکنش پلیمری رقابت کرده و مانع از جذب آن شود که باعث ناپایداری سامانه می‌شود. بنابراین می‌توان گفت حضور Kenon10 در غلظت‌های بالاتر از ۰/۰۵ گرم مانع از جذب پراکنش پلیمری می‌شود. از طرفی جرم مولکولی سطح فعال کم بوده و با جذب روی سطح نمی‌تواند لایه ضخیمی روی سطح ذرات تشکیل دهد تا به واسطه ممانعت فضایی از تشکیل تجمعات جلوگیری کند. همچنین سطح فعال‌ها برخلاف پراکنش پلیمری تنها از یک نقطه به سطح رنگزا متصل می‌شوند که باعث می‌شود تا سرعت فرآیند جذب و واجذب آنها به‌روی سطح به مراتب بالاتر باشد که در مجموع منجر به ناپایداری سامانه در قالب رشد ذرات و تشکیل تجمعات، دوفازی شدن سامانه و تهنشینی ذرات می‌شوند.



شکل ۶. تغییرات کدورت نمونه‌ها با زمان

Figure 6. Turbidity evolution of samples

شکل ۶ تغییرات کدورت نمونه‌ها را با زمان نشان می‌دهد. نکته قابل تامل، رفتار عجیب سه نمونه AN3، AN2 و ANL است. کاهش شدید کدورت نمونه AN3 در زمان‌های اولیه به‌وضوح نشان می‌دهد که ذرات درشت به‌سرعت در حال ته‌نشینی هستند. پس از ته‌نشینی ذرات درشت سامانه به حالت پایدار رسیده و مشاهده می‌شود که تغییر محسوسی در میزان کدورت با زمان صورت نمی‌گیرد. نمونه‌های AN2 و ANL دارای رفتار مشابهی هستند. بعد از یک کاهش کم در کدورت، افزایش شدیدی در کدورت آنها به‌خصوص برای نمونه ANL مشاهده می‌شود. افزایش کدورت، بیانگر رشد ذرات و در واقع تشکیل تجمع ذرات است. این پدیده زمانی شکل می‌گیرد که سطح ذرات به‌خوبی توسط پراکنش‌یار و یا سطح‌فعال‌ها پوشیده نشده باشد. در این صورت نیروهای ممانعت فضایی و یا دافعه الکترواستاتیک لازم برای غلبه بر نیروهای واندروالسی بین ذرات وجود نداشته و در نتیجه منجر به تشکیل تجمعات و رشد ذره می‌شود که به صورت افزایش میزان کدورت نمایان می‌شود. با تشکیل تجمعات، انرژی سامانه کاهش یافته و رشد متوقف می‌شود. با افزایش اندازه ذرات، جرم ذرات به حدی افزایش می‌یابد که نیروی جاذبه بر نیروهای پایدارساز پراکنه غلبه کرده و در نتیجه ته‌نشینی ذرات و کاهش کدورت مشاهده می‌شود. پس از ته‌نشینی تجمعات، تغییرات چندانی در سامانه مشاهده نمی‌شود و می‌توان گفت به حالت پایدار رسیده است. این مشاهدات نشان می‌دهند که ساختار مولکولی سطح‌فعال و غلظت آن، نقشی کلیدی در راندمان فرآیند آسیاب، سرعت کاهش اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات و پایداری پراکنه دارند (۲۱). همان‌طور که بیان شد Kenon10 به علت وجود حلقه بنزن در ساختار آن، تمایل به جذب قابل توجهی روی سطح ذرات داشته و از این منظر قابلیت رقابت با پراکنش‌یار پلیمری در جذب به‌روی سطح ذرات دارد. از طرفی سرعت جذب و واجذب بالای آن و همچنین ضخامت لایه کمی که روی سطح ذرات تشکیل می‌دهد سبب می‌شود تا نه تنها اندازه ذرات کاهش نیابد بلکه ناپایداری سامانه را تشدید کند.



شکل ۷. بررسی تغییرات کدورت سه نمونه AL، AN1 و AT

Figure 7. Evolution of turbidity for samples AL, AN1, and AT

شکل ۷ نشان می‌دهد که کدورت نمونه AN1 برخلاف نمونه‌های AL و AT با زمان تغییرات چندانی نداشته و تقریباً مسطح است. عدم تغییر و یا تغییرات کم کدورت بیان‌کننده پایداری سامانه پراکنه است در صورتی که کاهش کدورت بیان‌کننده ته‌نشینی ذرات و ناپایداری پراکنه است. در نمونه AN1 ابر الکترونی حلقه بنزن برهمکنش‌های قوی از نوع $\pi-\pi$ با ابر الکترونی مستقر روی سطح ذرات برقرار می‌کند. از طرف دیگر طول موثر زنجیر اتوکسیله آن در مقایسه با keo16 و Tween80 بیشتر است که تشکیل ضخامت بیشتری جهت ممانعت فضایی می‌دهد. لذا این سطح فعال می‌تواند در کنار پراکنش‌پلیمری در جهت پایداری پراکنه اثر هم‌افزایی داشته و تشکیل سامانه‌ای پایدارتر دهد (۲۲).

۴. نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، اثر ساختار مولکولی و غلظت سه سطح فعال غیر یونی شامل Tween80، Keo16 و Kenon10 بر فرآیند آسیاب، کاهش اندازه ذرات، قدرت رنگی و پایداری دینامیکی پراکنه رنگزای دیسپرس آبی ۳۵۹ جهت تهیه جوهرهای آب‌پایه جوهرافشان بررسی شد. نتایج حاصل از آنالیز اندازه ذرات، طیف‌سنجی، پارامترهای رنگی، کشش سطحی و آزمون کدورت نشان داد که انتخاب نوع سطح فعال و میزان بهینه آن نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی پراکنه دارد.

مشخص شد که سطح فعال Kenon10 در غلظت پایین ۰/۰۵ گرم، به دلیل وجود بخش آروماتیک و طول مناسب زنجیر اتوکسیله، منجر به تشکیل پراکنه‌ای با اندازه ذرات حدود ۱۰۰ نانومتر، توزیع اندازه ذرات باریک، قدرت رنگی بالا و پایداری کلوئیدی مطلوب می‌شود. این عملکرد به برهم‌کنش‌های قوی $\pi-\pi$ با سطح رنگزا و ایجاد ممانعت فضایی مؤثر در کنار پراکنش‌پلیمری نسبت داده می‌شود. در مقابل، افزایش غلظت Kenon10 باعث کاهش بیش‌ازحد کشش سطحی، ایجاد کف، رقابت در جذب سطحی با پراکنش‌پلیمری و در نهایت رشد ذرات، کاهش قدرت رنگی و ناپایداری سامانه می‌شود.

همچنین نتایج نشان دادند که سطح فعال‌های Keo16 و Tween80، علی‌رغم تفاوت در HLB و ساختار آب‌گریز، در غلظت بالاتر ۰/۱ گرم عملکرد قابل‌قبولی از نظر راندمان آسیاب و پایداری پراکنه از خود نشان می‌دهند. تحلیل سینتیک فرآیند ترشوندگی بر اساس معادله واشبرن بیانگر آن است که ایجاد تعادل مناسب بین کشش سطحی و زاویه تماس برای تسریع کاهش اندازه ذرات و دستیابی به پراکنه‌ای پایدار ضروری است.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که ساختار مولکولی سطح فعال، HLB و غلظت بهینه آن باید به صورت هم‌زمان در طراحی فرمولاسیون خمیر رنگزا برای جوهرهای جوهرافشان مدنظر قرار گیرد.

۵. مراجع

- [1] Xu M. Dye Sublimation Inkjet Inks and Applications. In: Handbook of Industrial Inkjet Printing. 2017. p. 179–94. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527687169.ch9>.
- [2] Hutchings IM, Martin GD. Introduction to Inkjet Printing for Manufacturing. In: Inkjet Technology for Digital Fabrication. 2012. p. 1–20. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118452943.ch1>.
- [3] Magdassi S. The Chemistry of Inkjet Inks. WORLD SCIENTIFIC; 2009. 356 p. doi: <https://doi.org/10.1142/6869>.
- [4] Jalili M, Mohammad Raei Naeini M, Bastani S, Ajili N. Optimizing the Surfactant/Polymeric Dispersant Combination in Pigment-Based Aqueous Inkjet Inks. Prog Color Color Coatings. 2025;18(2):177–88. doi: https://pccc.icrc.ac.ir/article_82040.html.
- [5] Jalili M, Naeini MMR, Ajili N. Optimizing dispersion in sublimation inkjet inks: unveiling the role of sodium naphthalene sulfonate formaldehyde condensate as a co-dispersant. J Coatings Technol Res. 2025;22(4):1557–72. doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-024-01060-w>.
- [6] Pond SF. Inkjet technology and product development strategies. Torrey Pines; 2000. 153–210.
- [7] Martin GD, Hoath SD, Hutchings IM. Inkjet printing - the physics of manipulating liquid jets and drops. J Phys Conf Ser. 2008;105(1):012001. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/105/1/012001>.
- [8] Annable T, Lozman O, Ewing P. Polymer Stabilized Pigment Dispersions for High Reliability Ink- Jet Printing. NIP 27 and Digital Fabrication. 2011. p. 586–9.
- [9] Willy Herbst, Klaus Hunger, Gerhard Wilker, Heinfred Ohleier RW. General. In: Industrial Organic Pigments. 2004. p. 1–181. doi: <https://doi.org/10.1002/3527602429.ch1>.
- [10] Parfitt GD. The Dispersion of Powders in Liquids - an Introduction. Powder Technol. 1977;17:157–62.
- [11] General Classification of Dispersing Agents and Adsorption of Surfactants at the Solid/Liquid Interface. In: Dispersion of Powders in Liquids and Stabilization of Suspensions. 2012. p. 85–105. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527656592.ch6>.
- [12] Steenweg K, Reinhold I, Mettin T, Struck S, Voit W, Zapka W. The Influence of Surfactants on the Interfacial Tension and Droplet Formation in UV Curable Jet Inks. NIP25 and Digital Fabrication. 2009. p. 307–11.
- [13] Kröger M, Vermant J. The Structure and Rheology of Complex Fluids. 2000;10(3):110–1. doi: <https://doi.org/10.1515/arh-2000-0024>.
- [14] Washburn EW. The Dynamics of Capillary Flow. Phys Rev. 1921;17(3):273–83. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/physrev.17.273>.
- [15] Owen K, Payne KR, Porter MR, Weeks JC. Recent Developments in the Technology of Surfactants. Maurice PR, editor. Vol. 30. Elsevier; 1990. 35–64.
- [16] Tadros T. Encyclopedia of Colloid and Interface Science. springer; 2013. 49–52.
- [17] Chang CJ, Chang SJ, Tsou S, Chen SI, Wu FM, Hsu MW. Effects of polymeric dispersants and surfactants on the dispersing stability and high-speed-jetting properties of aqueous-pigment-based ink-jet inks. J Polym Sci Part B Polym Phys. 2003 Aug 15;41(16):1909–20. doi: <https://doi.org/10.1002/polb.10562>.
- [18] Nagose S, Rose E, Joshi A. Study on wetting and dispersion of the Pigment Yellow 110. Prog Org Coatings. 2019 Aug 1;133:55–60.
- [19] Kourti, T. (2006). Turbidimetry in Particle Size Analysis. In Encyclopedia of Analytical Chemistry (eds R.A. Meyers and R.B. Flippen). <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a1517>.
- [20] Oyarzúm J. Pigment Processing: Physico-Chemical Principles. Hannover, Germany: Vincentz Network; 2016. <https://doi.org/10.1515/9783748600336>.
- [21] Haramagatti CR, Dhande P, Bhavsar R, Umbarkar A, Joshi A. Role of surfactants on stability of iron oxide yellow pigment dispersions. Prog Org Coatings. 2018;120: 260–5. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.03.006>.
- [22] McKay RB. Influence of organic pigment particles on millbase flow of nitro-cellulose/alcohol-rich liquid inks. Prog Org Coatings. 1998;33(3):187–95. doi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944098000526>.