Document Type: Full length research Paper

Pages: 1-14

Investigation the effect of various factors on the stability of nanofluids containing metal oxide nanoparticles based on ethylene glycol

Ameneh Ahangarpour*, Amal Shakhi, Mansoor Farbod

Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 25.12.2025 Final revised: 23.05.2026 Accepted: 01.07.2026 Published On-Line: 05.09.2026

Doi: 10.22055/jrmbs.2026.20897

Abstract

In this study, nanofluids containing metal oxide nanoparticles (ZnO, CuO, and $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$) were prepared based on ethylene glycol with 0.1, 0.25, and 0.5 wt.%. The effect of various factors, including the type of ultrasonic device, ultrasonic time, addition of sodium dodecyl sulfate (SDS) as a surfactant, and surface modification of metal oxide nanoparticles using a mixture of oleic acid and oxylene on the stability of the samples was investigated. For functionalization of the nanoparticles, a mixture of oleic acid and oxylene was used with different ratios of 3%, 5%, 7%, 9%, 10%, 30%, 40%, and 50%. The results showed that the ratio of oleic acid to oxylene of 50% had the highest stability compared to other samples. UV-vis spectroscopy was used to investigate the stability of the nanofluids. The results showed that the functionalization of nanoparticles had the greatest effect on the stability of the samples, as the nanofluids containing functionalized nanoparticles were stable for about 12 days. It was also observed that for synthesis the samples, probe ultrasonication is more suitable than bath ultrasonication.

Keywords: Metal oxide nanoparticles, Nanofluids, Stability, Oleic acid, Oxylene, UV-vis spectroscopy.

*Corresponding Author: a.ahangarpour@scu.ac.ir, ahangarpour8@yahoo.com

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

بررسی تأثیر عوامل مختلف بر پایداری نانوسیال‌های حاوی نانوذرات اکسیدفلزی بر پایهٔ اتیلن گلیکول

آمنه آهنگرپور*، امل شاخی، منصور فربد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

دریافت: ۱٤۰٤/۱۰/۰٤ ویرایش نهائی: ۱٤۰۵/۰۳/۰۲ پذیرش: ۱٤۰۵/۰٤/۱۰ انتشار بر خط: ۱٤۰۵/۰٦/۱٤

Doi: 10.22055/jrmbs.2026.20897

چکیده

در این تحقیق، نانوسیال‌های حاوی نانوذرات اکسید فلزی (ZnO، CuO و $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$) بر پایهٔ اتیلن گلیکول با درصدهای وزنی ۰٫۱، ۰٫۲۵ و ۰٫۵ ساخته شدند. تأثیر عوامل مختلف از جمله نوع دستگاه اولتراسونیک، زمان اولتراسونیک، افزودن سدیم دودسیل سولفات (SDS) به‌عنوان سورفکتانت و همچنین اصلاح سطحی نانوذرات اکسیدفلزی با استفاده از مخلوط اولئیک اسید و اوزایلن بر پایداری نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جهت عامل‌دار سازی نانوذرات از مخلوط اولئیک اسید و اوزایلن با نسبت‌های مختلف ٪۳، ٪۵، ٪۷، ٪۹، ٪۱۰، ٪۳۰، ٪٤۰ و ٪۵۰ استفاده شد. نتایج نشان دادند که نسبت اولئیک اسید به اوزایلن ٪۵۰ دارای بیشترین پایداری در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد. به‌منظور بررسی پایداری نانوسیال‌های ساخته شده از طیف‌سنجی UV-vis استفاده شد. نتایج نشان دادند که عامل‌دارسازی نانوذرات، بیشترین تأثیر را در پایداری نانوسیال‌های ساخته شده دارد به‌طوری‌که نانوسیال‌های حاوی نانوذرات آلایش یافتهٔ عامل‌دار تا حدود ۱۲ روز پایدار بودند. همچنین مشاهده شد که برای ساخت نمونه‌ها، اولتراسونیک میله‌ای مناسب‌تر از اولتراسونیک حمامی است.

کلیدواژگان: نانوذرات اکسید فلزی، نانوسیال‌ها، پایداری، اولئیک اسید، اوزایلن، طیف‌سنجی UV-vis

مقدمه

نانوسیال‌ها، سیال‌های انتقال حرارت با خواص فیزیکی بهبود یافته هستند که شامل یک سیال پایه به‌همراه نانوافزودنی‌های معلق شده در آن می‌باشند. برای تهیهٔ نانوسیال‌ها، نانوذرات با اندازه‌های بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر به سیال‌های معمول انتقال حرارت (مانند آب، اتیلن گلیکول یا محلول‌های مبتنی بر روغن) اضافه می‌شوند و موادی ایجاد می‌کنند که رسانندگی حرارتی و ضرایب انتقال حرارت همرفتی را افزایش می‌دهند. این خواص، نانوسیال‌ها را در کاربردهای علمی و مهندسی، از جمله سیستم‌های خنک‌کنندهٔ خودرو، مبدل‌های حرارتی در صنایع شیمیایی و پتروشیمی، سیستم‌های ذخیرهٔ انرژی حرارتی، تجهیزات درمانی، نیروگاه‌های هسته‌ای و سیستم‌های تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی، فوق‌العاده ارزشمند می‌کند [٦-۱]. رسانندگی حرارتی یکی از ویژگی‌های مهم نانوسیال‌ها است که تحت تأثیر طیف وسیعی از عوامل مرتبط قرار می‌گیرد. حرکت براونی [۷]، تشکیل نانولایه [۸] و تجمع نانوذرات [۹،۱۰] از عوامل شناخته شده‌ای هستند که در افزایش رسانندگی حرارتی مشاهده شدهٔ

*نویسندهٔ مسئول: a.ahangarpour@scu.ac.ir, ahangarpour8@yahoo.com

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کریتیو کامنز تخصیص ٤.۰ بین‌المللی می‌باشد

نانوسیال‌ها نقش دارند. با این حال، سهم نسبی هر کدام، همچنان موضوع بحث‌های مداوم است. کانتی و همکاران تأکید کردند که مقدار pH با تعدیل پتانسیل زتا روی سطوح نانوذرات، به‌طور قابل توجهی بر پایداری پخشی تأثیر می‌گذارد [۱۱]. نکته قابل توجه این است که نانوسیال‌ها با پایداری پخشی بالاتر، تمایل به افزایش قابل توجه رسانندگی حرارتی دارند. با این حال، ناگونکار و همکاران گزارش دادند که در غلظت‌های پایین نانوذرات، سازوکار غالب در انتقال حرارت، حرکت براونی است و با افزایش غلظت، اثرات تجمع نانوذرات به‌طور فزاینده‌ای قابل توجه می‌شوند [۱۲]. تجزیه و تحلیل جامع داده‌های تجربی توسط کبلینسکی و همکاران [۱۳] اهمیت حرکت براونی و نانولایه‌ها را به چالش کشید و نتیجه گرفت که تجمع نانوذرات، عامل اصلی افزایش رسانندگی حرارتی در نانوسیال‌ها می‌باشد که به‌صورت تجربی نیز مورد تأیید قرار گرفت [۱٤]. همچنین کبلینسکی و همکاران [۱۵] و ژانگ و همکاران [۱٦] توضیح دادند که تجمع نانوذرات، مسیرهای مقاومت حرارتی پایینی ایجاد می‌کنند و به‌طور مؤثر انتقال حرارت را در نانوسیال افزایش می‌دهند. مشکل اصلی که در استفاده از نانوسیال‌ها وجود دارد، عدم پایداری آن‌ها می‌باشد، زیرا تجمع نانوافزودنی‌ها در سیال پایه منجر به ته‌نشینی و ناپایداری می‌شود. بنابراین پایداری یک موضوع کلیدی است که بر خواص نانوسیال‌ها تأثیر می‌گذارد. برای رفع این مشکل از روش‌های مختلفی مانند افزودن سورفکتانت (پایدارساز)، استفاده از انواع دستگاه‌های اولتراسونیک جهت پخش بهتر نانوافزودنی‌ها، اصلاح سطحی (عامل‌دارسازی سطح) نانوافزودنی‌ها و کنترل pH استفاده شده است [۲٦–۱۷]. در تحقیقی که توسط سهامی‌فر و همکاران در سال ۲۰۲۵ انجام شد [۱۷]، پایداری نانوسیال‌های Al_2O_3–آب از طریق روش‌های مختلف آماده‌سازی، از جمله رسوب‌گذاری و سانتریفیوژ در نیروهای گریز از مرکز و مدت زمان‌های مختلف، همراه با افزودن سدیم دودسیل بنزن سولفونات (SDBS) به‌عنوان یک عامل تثبیت‌کننده، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که سانتریفیوژ با نیروهای گریز از مرکز بالاتر و زمان سانتریفیوژ طولانی‌تر، پایداری بالاتری حاصل می‌کند. همچنین افزودن SDBS، پایداری نانوسیال‌ها را تا چند ساعت افزایش می‌دهد. این مطالعه همچنین نشان داد که اگرچه اندازه‌گیری‌های DLS و پتانسیل زتا بینش‌های مفیدی در مورد پایداری نانوسیال ارائه می‌دهند، اما به‌عنوان شاخص‌های مستقل پایداری قابل اعتماد نیستند. در تعدادی از پژوهش‌ها از دستگاه‌های مختلفی مانند هم‌زن مغناطیسی، اولتراسونیک حمامی و اولتراسونیک میله‌ای برای بهبود پایداری نانوسیال‌ها استفاده شده است که از بین این روش‌ها، دستگاه اولتراسونیک میله‌ای مؤثرترین روش بوده است [۲۱–۱۸]. به‌طور کلی، نشان داده شده است که پایداری نانوسیال‌ها با افزایش زمان اولتراسونیک بهبود می‌یابد، اما پس از عبور از یک آستانهٔ بهینه، افزایش زمان اولتراسونیک کمکی به‌بهبود پایداری نمی‌کند [۱۸]. با وجود این‌که نشان داده شده است امواج اولتراسونیک پایداری نانوسیال‌ها را افزایش می‌دهند، ولی زمان و توان خروجی بهینه اولتراسونیک همچنان نامشخص است و نتایج متناقضی در مقالات گزارش شده است [۱۸،۲۰]. رویکرد دیگر برای پایدارسازی نانوسیال‌ها، استفاده از روش‌های شیمیایی، مانند افزودن سورفکتانت‌ها و کنترل pH است. در حالی‌که برخی مطالعات نشان می‌دهند که افزودن سورفکتانت‌هایی مانند SDBS به نانوسیال‌های Al_2O_3–آب، اثر مضر [۲۲،۲۳] یا تأثیر ناچیز [۲٤] بر پایداری دارد، اکثر یافته‌ها نشان می‌دهند که سورفکتانت‌ها با افزایش نیروهای دافعه الکترواستاتیک و فضایی، پایداری نانوسیال‌ها را افزایش می‌دهند [۲۱–۱۹]. سانتریفیوژ

روش دیگری برای افزایش پایداری نانوسیال‌ها است. برخی از مطالعات، تأثیر زمان و سرعت سانتریفیوژ را بر اندازهٔ نانوذرات به‌عنوان شاخصی از پایداری نانوسیال‌ها بررسی کرده‌اند. در سال ۲۰۱۸ شارما و همکاران [۲۵]، نانوسیال‌های حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره در آب را به‌همراه SDBS به‌عنوان سورفکتانت، با استفاده از هم‌زن مغناطیسی و اولتراسونیک تهیه کردند. نتایج نشان دادند که استفاده از SDBS و سانتریفیوژ به‌طور قابل توجهی پایداری را افزایش می‌دهد. سانتریفیوژ ذرات بزرگتری را که عمدتاً مسئول ناپایداری نانوسیال هستند، حذف می‌کند که البته منجر به‌کاهش غلظت نانوسیال در مقایسه با مقدار اولیهٔ آن نیز می‌شود. دو و همکاران [۲٦] در سال ۲۰۱۹، نانوسیال‌های حاوی گرافن در آب را با استفاده از پلی‌وینیل الکل (PVA) به‌عنوان سورفکتانت تهیه کردند. پس از پراکنده کردن گرافن در آب، به‌منظور کنترل اندازهٔ ذرات، نمونه‌ها با سرعت‌های مختلف، سانتریفیوژ شدند. نتایج نشان دادند که هر دو عامل، زمان پراکندگی طولانی‌تر و سرعت سانتریفیوژ بالاتر، منجر به کاهش اندازهٔ متوسط نانوذرات می‌شود. در پژوهش‌های قبلی انجام شده [۲۸و۲۷]، تأثیر زمان اولتراسونیک و اصلاح سطحی (عامل‌دارسازی سطح) نانوافزودنی‌ها بر پایداری نانوسیال‌های حاوی نانولوله‌های کربنی در سیال‌های پایهٔ آب و اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که عامل‌دارسازی سطح نانولوله‌های کربنی تأثیر بسیار زیادی بر پایداری نانوسیال‌ها دارد، به‌طوری‌که نانوسیال‌های حاوی نانولوله‌های کربنی عامل‌دار حدود ۹۰ روز پایدار بودند. در این پژوهش به‌بررسی تأثیر عوامل مختلف از جمله نوع دستگاه اولتراسونیک، زمان اولتراسونیک، افزودن سدیم دودسیل سولفات (SDS) به‌عنوان سورفکتانت و همچنین اصلاح سطحی نانوذرات اکسیدفلزی (ZnO، CuO و $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$) با استفاده از مخلوط اولئیک اسید و اوزایلن بر پایداری نانوسیال‌های حاوی نانوذرات اکسیدفلزی بر پایه اتیلن گلیکول، پرداخته شده است.

کارهای آزمایشگاهی

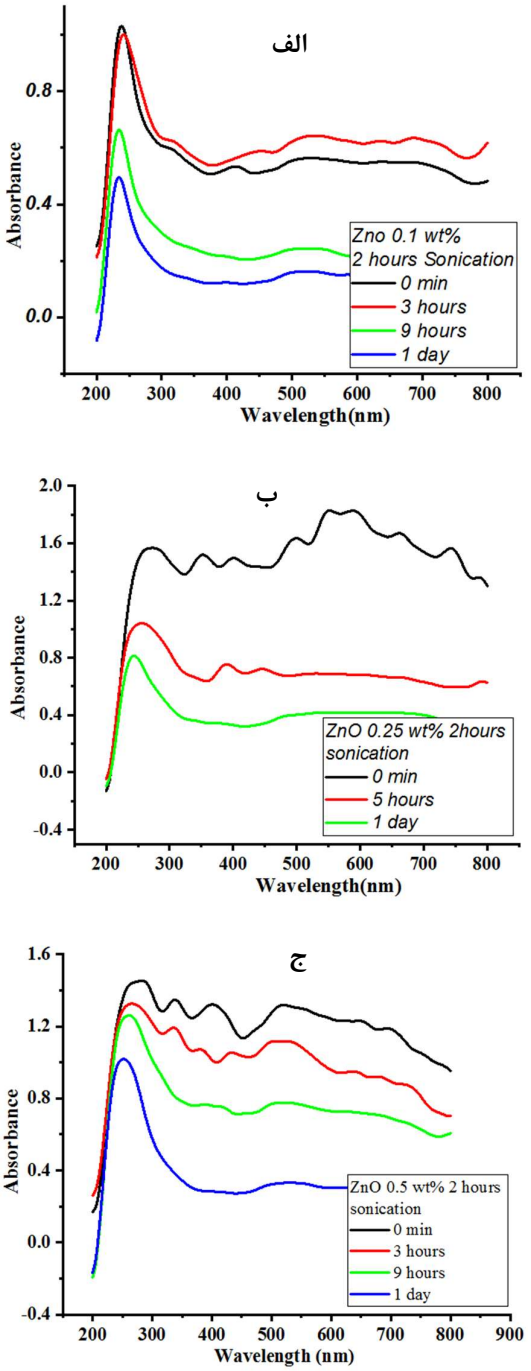
در پژوهش قبلی انجام شده [۲۹]، تأثیر استفاده از نانوذرات آلایش‌یافته بر رسانندگی حرارتی نانوسیال‌های بر پایهٔ اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات ZnO، CuO و $Zn_{1-x}Cu_xO$ به‌روش سل–ژل خوداحتراقی با استفاده از گلایسین به‌عنوان سوخت با نسبت‌های مولی مختلف یون‌های گلایسین/فلز ساخته شدند. مقادیر مختلف X (۰٫۰۲، ۰٫۰۳، ۰٫۰٤، ۰٫۰٦، ۰٫۰۷ و ۰٫۰۸) برای ساخت نانوذرات $Zn_{1-x}Cu_xO$ مورد استفاده قرار گرفتند و با توجه به نتایج حاصل از طیف‌سنجی XRD، x=۰٫۰۳ به‌عنوان حد حلالیت برای ساخت نانوذرات آلایش‌یافته به‌دست آمد. سپس از نانوذرات ZnO، CuO و $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$ به‌عنوان افزودنی برای تهیهٔ نانوسیال‌های بر پایهٔ اتیلن گلیکول (EG) با درصدهای وزنی مختلف (۰٫۱، ۰٫۲۵ و ۰٫۵) استفاده شد. رسانندگی حرارتی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه KD2-Pro اندازه‌گیری شد و بیشترین افزایش رسانندگی حرارتی حدود ٪۱۲٫۵ برای نانوسیال حاوی نانوذرات آلاییده شده با $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$ در غلظت ۰٫۵ درصد وزنی مشاهده شد. یکی از ویژگی‌های مهم در کاربردی شدن استفاده از نانوسیال‌ها، پایداری آن‌هاست. لذا در این پژوهش، تأثیر عوامل مختلف بر پایداری نانوسیال‌های تهیه شده، مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی پایداری نمونه‌ها از طیف‌سنجی UV-vis استفاده شد. به‌این‌منظور، بعد از ساخت هریک از نانوسیال‌ها، بخشی از آن در یک ظرف درپوش‌دار قرار

داده و به‌طور ساکن و به‌دور از هرگونه لرزش در دمای اتاق نگه‌داری شد. با استفاده از یک پیپت میکرولیتر، حجم مشخصی از سطح نمونه در فواصل زمانی مختلف، برداشته و طیف UV-vis آن گرفته شد. این فرآیند برای تمامی نمونه‌ها تا زمان برهم خوردن پایداری نمونه تکرار گردید. به‌دلیل این‌که هدف این پژوهش، بررسی پایداری نانوسیال با گذشت زمان بود، جهت جلوگیری از ایجاد آشفتگی و لرزش در نمونه، برای گرفتن طیف UV-vis از سطح نانوسیال، نمونه برداشته شد.

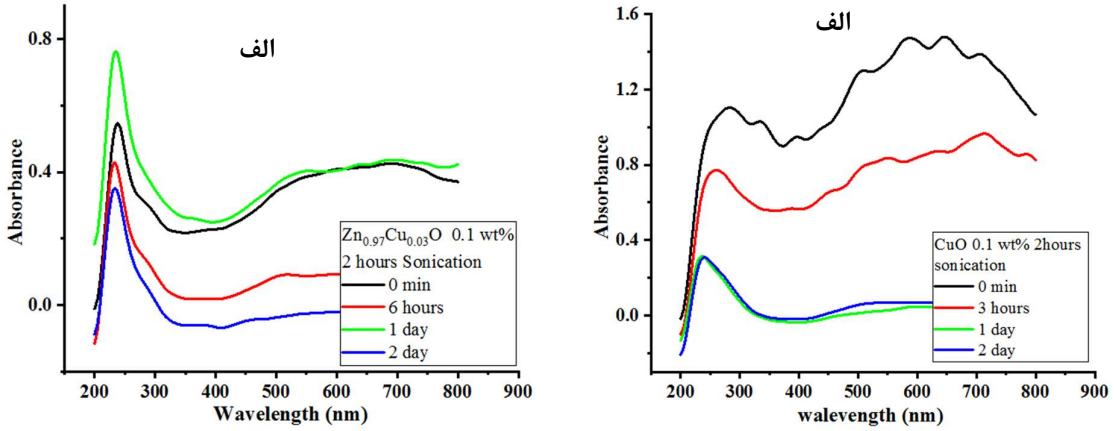
بحث و نتایج

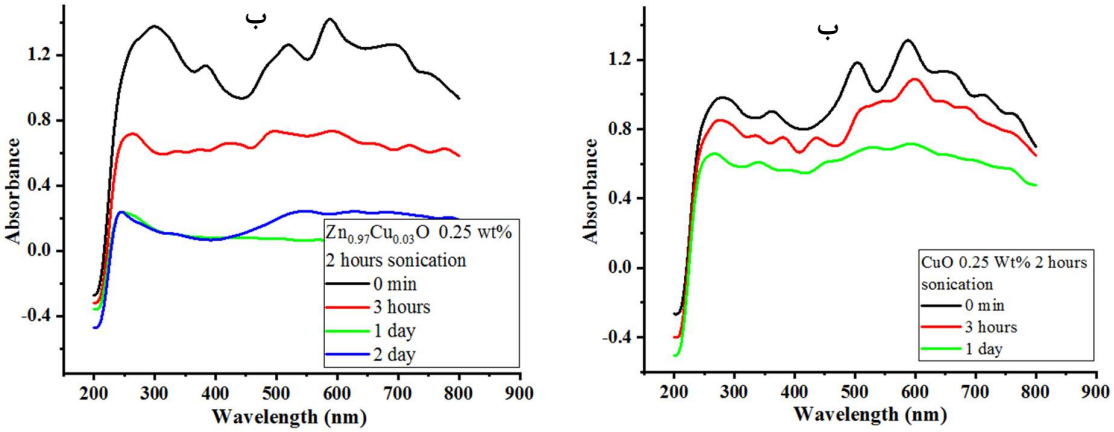
بررسی اثر زمان اولتراسونیک بر پایداری نانوسیال‌های تهیه شده

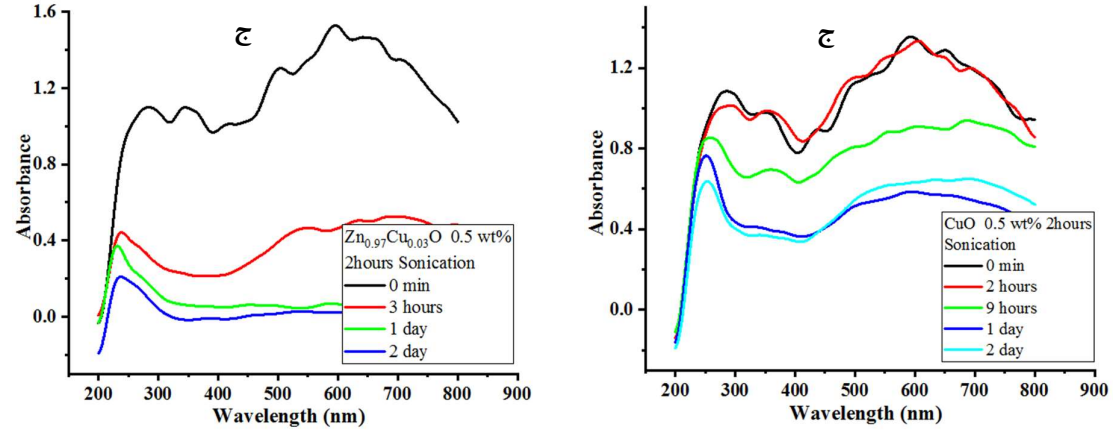
به‌این‌منظور از اولتراسونیک حمامی در مدت زمان‌های ۱، ۲ و ۳ ساعت جهت تهیهٔ نانوسیال‌های بر پایهٔ اتیلن گلیکول (EG) با درصدهای وزنی ۰٫۱، ۰٫۲۵ و ۰٫۵ استفاده شد. نتایج مربوط به طیف‌سنجی UV-vis با مدت زمان ۲ساعت اولتراسونیک حمامی نانوسیال‌های ZnO/EG، CuO/EG و $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$/EG به‌ترتیب در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده‌اند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود برای تمامی نمونه‌ها پس از مدت حدود یک روز از ساخت نمونه، شدت قلهٔ جذب به حدود نصف شدت آن پس از ساخت نمونه رسیده است. این کاهش قلهٔ جذب، به‌معنای عدم پایداری نمونه است و بیانگر آن است که استفاده از اولتراسونیک به‌تنهایی نمی‌تواند عامل مؤثری در پایداری نمونه‌ها باشد. همین فرآیند برای زمان‌های ۱ و ۳ ساعت اولتراسونیک حمامی تکرار و نتایج مشابهی حاصل شد.



شکل ۱. نمودار طیف‌سنجی UV-vis نانوسیال‌های ZnO/EG تهیه شده در مدت زمان ۲ ساعت اولتراسونیک با درصدهای وزنی الف: ۰٫۱، ب: ۰٫۲۵ و ج: ۰٫۵.





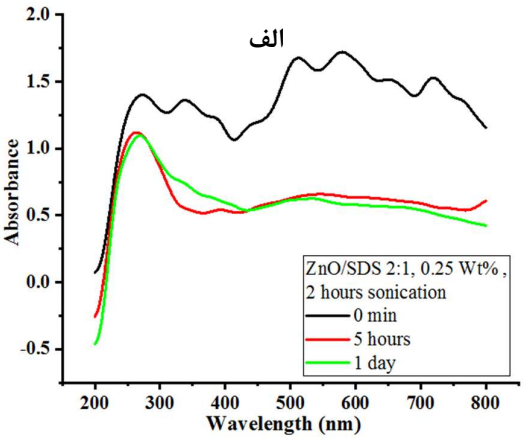


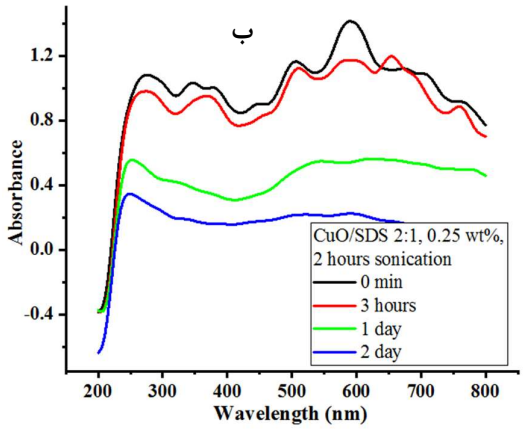
شکل۲. نمودار طیف‌سنجی UV-vis نانوسیال‌های CuO/EG تهیه شده در مدت زمان ۲ساعت اولتراسونیک با درصدهای وزنی الف: ۰٫۱، ب: ۰٫۲۵ و ج: ۰٫۵.

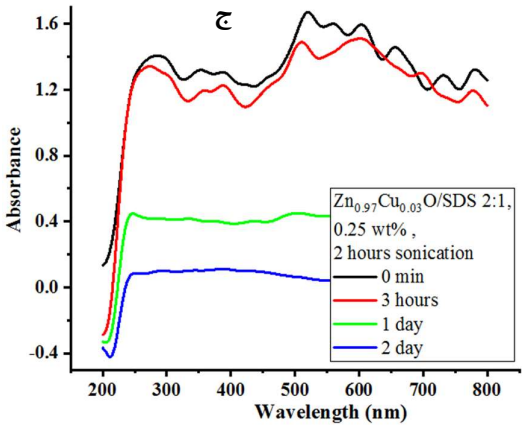
شکل۳. نمودار طیف‌سنجی UV-vis نانوسیال‌های $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$/EG تهیه شده در مدت زمان ۲ساعت اولتراسونیک با درصدهای وزنی الف: ۰٫۱، ب: ۰٫۲۵ و ج: ۰٫۵.

بررسی اثر افزودن سورفکتانت بر پایداری نانوسیال‌های تهیه شده

به‌منظور بهبود پایداری نمونه‌ها، از سدیم دودسیل سولفات (SDS) به‌عنوان سورفکتانت با نسبت‌های مختلف نانوذره/SDS (۱:۱، ۱:۲ و ۱:٤) برای تهیهٔ نانوسیال‌های ۰٫۲۵ درصد وزنی با مدت زمان ۲ساعت اولتراسونیک استفاده شد. نتایج مربوط به طیف‌سنجی UV-vis نانوسیال‌های ZnO/EG، CuO/EG و $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$/EG با نسبت نانوذره/SDS (۱:۲) در شکل ٤ آورده شده‌اند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود با افزودن سورفکتانت افزایش محسوسی در پایداری نمونه‌ها صورت نگرفته است و حداکثر تا یک روز پس از زمان ساخت، شدت قلهٔ جذب به‌حدود نصف شدت آن پس از ساخت نمونه رسیده است که بیانگر ته‌نشین شدن نانوذرات و عدم پایداری آنهاست. بنابراین افزودن سورفکتانت SDS نیز تأثیر قابل توجهی بر بهبود پایداری نمونه‌ها نداشت.





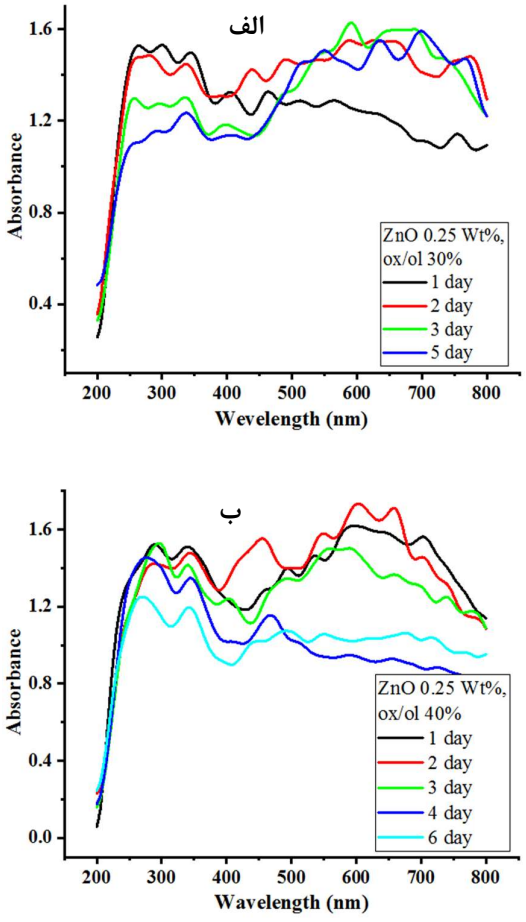


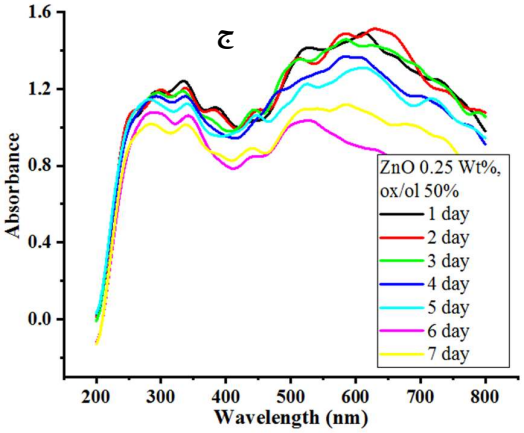
شکل٤. نمودار طیف‌سنجی UV-vis نمونه‌های ۰٫۲۵ درصد وزنی در مدت زمان ۲ ساعت اولتراسونیک با نسبت نانوذره/SDS (۱:۲) برای نانوسیال‌های الف: ZnO/EG، ب: CuO/EG و ج: $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$/EG.

بررسی اثر اصلاح سطحی نانوذرات بر پایداری نانوسیال‌های تهیه شده

برای اصلاح سطحی (عامل‌دارسازی) نانوذرات، از مخلوط اوزایلن و اولئیک اسید بانسبت‌های مختلف ۳٪، ۵٪، ۷٪، ۹٪، ۱۰٪، ۳۰٪، ٤۰٪ و ۵۰٪ استفاده شد. جهت انجام فرآیند اصلاح سطحی، مخلوط اوزایلن و اولئیک اسید با نسبت مشخص، بر روی همزن مغناطیسی به‌طور مداوم به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰°C همزده شدند. اوزایلن سرطان‌زا و محرک تنفسی می‌باشد، به‌همین دلیل، فرآیند زیر هود انجام شد. سپس

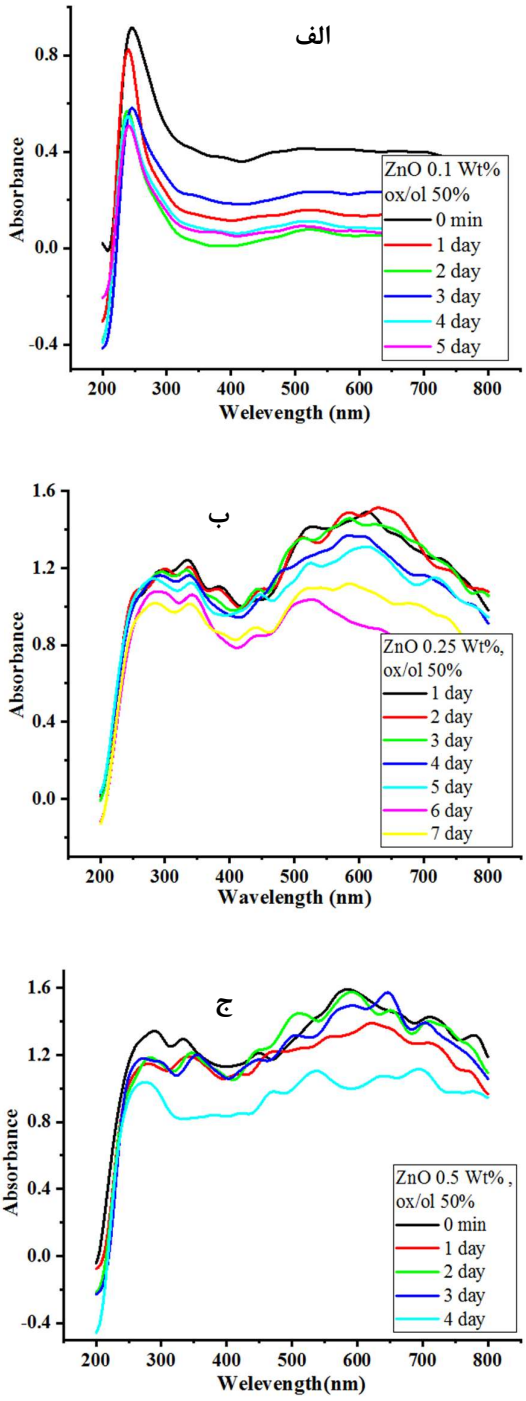
پودر نانوذرهٔ اکسید فلزی در محلول پراکنده شد و به‌مدت ۹۰ دقیقه در همان دما به‌طور مداوم هم‌زده شد. سپس محلول به‌مدت ۹۰ دقیقه تحت تأثیر امواج مافوق صوت قرار داده شد و پس از آن به‌مدت ۲ساعت با سرعت ٤۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از ته‌نشین شدن نانوذرات، نمونه سه مرتبه با تولوئن شستشو داده شد. محصول به‌دست آمده که حالت چرب و نیمه‌جامدی داشت، در آون به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰°C قرار داده شد. سپس به‌منظور خشک کردن کامل، نمونه تحت خلأ نیز به‌مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰°C قرار داده شد. درنهایت نانوذرات اکسید فلزی عامل‌دار خشک به‌دست آمدند. سپس از این نانوذرات برای تهیهٔ نانوسیال‌های بر پایهٔ اتیلن گلیکول با غلظت‌های ۰٫۱، ۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد وزنی استفاده شد. به‌منظور پراکندگی نانوذرات عامل‌دار در سیال پایه ابتدا نمونه به‌مدت ۳ ساعت بر روی هم‌زن مغناطیسی به‌طور مداوم هم‌زده شد و سپس به‌مدت ۲ ساعت تحت تأثیر امواج مافوق صوت در اولتراسونیک حمامی قرار داده شد ولی مشاهده گردید که نانوذرات در سیال پایه به‌خوبی پخش نشده و روی سطح نمونه جمع می‌شوند. لذا جهت بررسی نوع اولتراسونیک در پخش نانوذرات، از اولتراسونیک میله‌ای با زمان‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه استفاده شد و ملاحظه گردید که برای نمونه‌های با زمان اولتراسونیک میله‌ای ۱۵ دقیقه، نانوذرات به‌طور نسبتاً یکنواخت در سیال پایه پخش شده‌اند. به‌همین دلیل برای ساخت تمامی نانوسیال‌های حاوی نانوذرات عامل‌دار از اولتراسونیک میله‌ای با زمان ۱۵ دقیقه استفاده شد. به‌منظور بررسی پایداری نمونه‌ها از طیف سنجی UV-vis استفاده شد. نتایج نشان دادند که برای نانوذرات عامل‌دار شده تا نسبت ٪۱۰ افزایش محسوسی در پایداری نانوسیال‌ها مشاهده نمی‌شود و نمونه‌ها پس از یک روز ته‌نشین شدند. با افزایش بیشتر نسبت اوزایلن به اولئیک اسید به ٪۳۰، ٪٤۰ و ٪۵۰ افزایشی در پایداری نانوسیال‌ها مشاهده شد. نتایج مربوط به طیف‌سنجی UV-vis نانوسیال‌های حاوی نانوذرات ZnO عامل‌دار (با نسبت‌های اوزایلن به اولئیک اسید ٪۳۰، ٪٤۰ و ٪۵۰) و غلظت wt.% ۰٫۲۵، در شکل۵ نشان داده شده‌اند. همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد نسبت ٪۵۰ در مقایسه با ٪۳۰ و ٪٤۰ پایداری بهتری دارد و نمونه تا حدود ۷ روز پایداری قابل قبولی دارد.





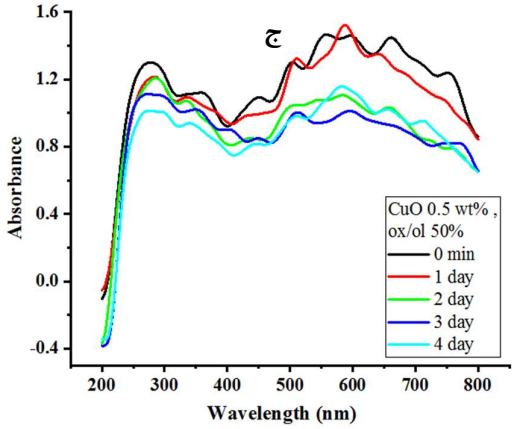
شکل۵. نمودار طیف‌سنجی UV-vis نمونه‌های ۰٫۲۵ درصد وزنی حاوی نانوذرات ZnO عامل‌دار شده با نسبت اوزایلن به اولئیک اسید الف: ٪۳۰، ب: ٪۴۰ و ج: ٪۵۰.

با توجه به‌این‌که نانوسیال با غلظت wt.% ۰٫۲۵ حاوی نانوذرات ZnO عامل‌دار شده با نسبت ٪۵۰ اوزایلن به اولئیک اسید دارای پایداری بهتری در مقایسه با دو نمونهٔ دیگر (نسبت‌های ٪۳۰ و ٪۴۰) بود، برای تهیهٔ نمونه‌ها با غلظت‌های ۰٫۱ و ۰٫۵ درصد وزنی نیز از نانوذرات ZnO عامل‌دار شده با نسبت ٪۵۰ اوزایلن به اولئیک اسید استفاده شد. نتایج مربوط به طیف‌سنجی UV-vis نمونه‌های تهیه شده در شکل٦ نشان داده شده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد نمونهٔ دارای غلظت wt.% ۰٫۲۵ نسبت به دو نمونهٔ دیگر پایداری بیشتری داشته و تا حدود ۷ روز پس از ساخت، نسبتاً پایدار بوده است.

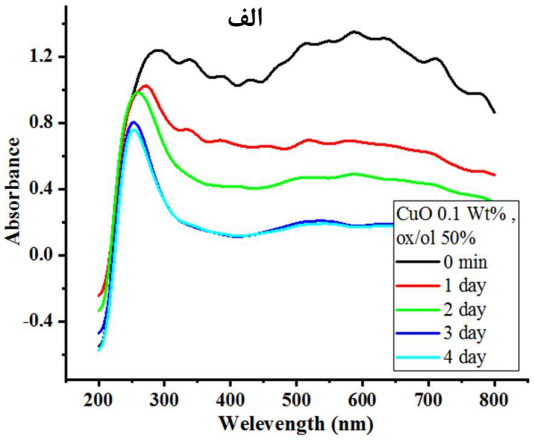


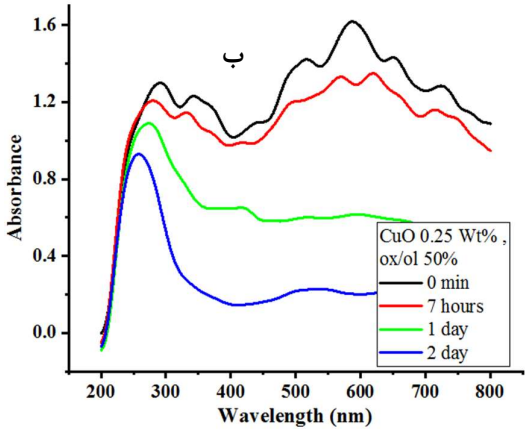
شکل٦. نمودار طیف‌سنجی UV-vis نانوسیال‌های حاوی نانوذرات ZnO عامل‌دار شده با نسبت اوزایلن به اولئیک اسید ٪۵۰ با درصدهای وزنی الف: ۰٫۱، ب: ۰٫۲۵و ج: ۰٫۵.

با توجه به‌نتایج به‌دست آمده برای نانوسیال‌های حاوی نانوذرات ZnO عامل‌دار شده، فرآیند مشابهی برای عامل‌دارسازی نانوذرات CuO با استفاده از مخلوط اوزایلن به اولئیک اسید با نسبت ٪۵۰ انجام شد. از نانوذرات CuO عامل‌دار شده برای تهیهٔ نانوسیال‌های بر پایهٔ اتیلن گلیکول با غلظت‌های ۰٫۱، ۰٫۲۵و ۰٫۵ درصد وزنی استفاده شد. نتایج مربوط به طیف‌سنجی UV-vis نمونه‌های تهیه شده در شکل۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد نمونهٔ دارای غلظت ۰٫۵ wt.% نسبت به دو نمونهٔ دیگر پایداری بیشتری داشته و تا حدود ٤ روز پس از ساخت، نسبتاً پایدار بوده است.

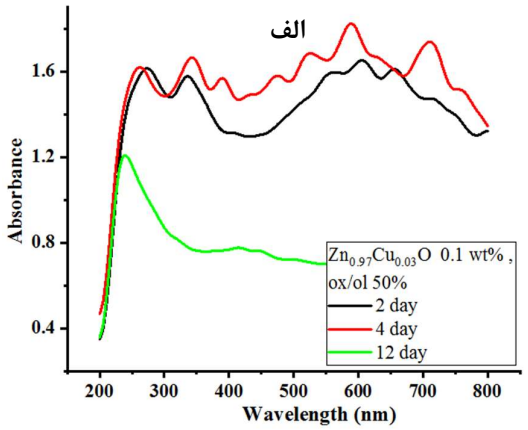


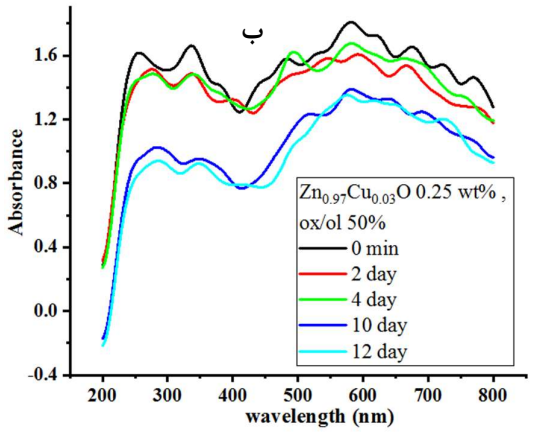
شکل۷. نمودار طیف‌سنجی UV-vis نانوسیال‌های حاوی نانوذرات CuO عامل‌دار شده با نسبت اوزایلن به اولئیک اسید ٪۵۰ با درصدهای وزنی الف: ۰٫۱، ب: ۰٫۲۵و ج: ۰٫۵.

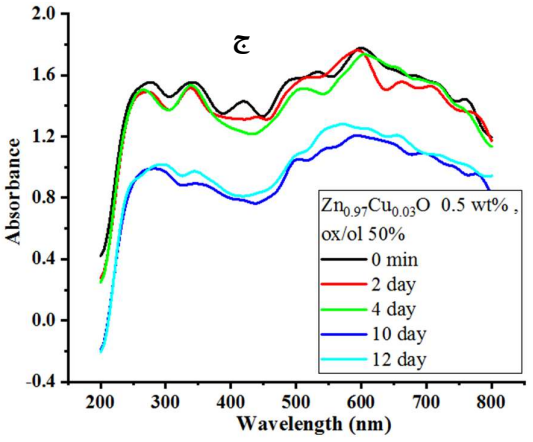




به‌منظور بررسی تأثیر عامل‌دارسازی بر پایداری نانوسیال‌های بر پایهٔ اتیلن گلیکول حاوی نانوذرات $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$، از مخلوط اوزایلن به اولئیک اسید با نسبت ٪۵۰ جهت عامل‌دارسازی نانوذرات استفاده شد. سپس از نانوذرات $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$ عامل‌دار شده برای تهیهٔ نانوسیال‌های بر پایهٔ اتیلن گلیکول با غلظت‌های ۰٫۱، ۰٫۲۵و ۰٫۵ درصد وزنی استفاده شد. نتایج مربوط به طیف‌سنجی UV-vis نمونه‌های تهیه شده در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد نمونهٔ دارای غلظت ۰٫۱ wt.% نسبت به دو نمونهٔ دیگر پایداری بیشتری داشته و تا حدود ۱۲ روز پس از ساخت، نسبتاً پایدار بوده است. در مجموع مشاهده می‌گردد که برای هر سه درصد وزنی، پایداری نانوسیال‌ها نسبت به نمونه‌های تهیه شده با ZnO و CuO (شکل‌های٦ و ۷) بهبود یافته است.







شکل۸. نمودار طیف‌سنجی UV-vis نانوسیال‌های حاوی نانوذرات $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$ عامل‌دار شده با نسبت اوزایلن به اولئیک اسید ٪۵۰ با درصدهای وزنی الف: ۰٫۱، ب: ۰٫۲۵ و ج: ۰٫۵.

کارهای مشابه در خصوص پایداری نانوسیال‌ها

به‌منظور مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با کارهای مشابه انجام شده در خصوص پایداری نانوسیال‌ها، تعدادی از تحقیقات انجام شده در جدول۱ آورده شده‌اند. همان‌طورکه مشاهده می‌گردد عوامل مختلفی می‌تواند بر پایداری نانوسیال‌ها تأثیرگذار باشد که هر کدام از تحقیقات اشاره شده به یک یا دو عامل از آن‌ها پرداخته‌اند.

جدول۱. تعدادی از کارهای انجام شده در بررسی پایداری نانوسیال‌ها.

روش پایدارسازی	نانوسیال	پایداری	منابع
پلی وینیل پیرولیدون به‌عنوان پایدارساز	نانوذرات نقره/اتانول	۱۰ ساعت	[۳۰]
اولتراسونیک	نانوذرات اکسید-روی/ اتیلن‌گلیکول	٦ ساعت	[۳۱]
استفاده از اولئیک اسید	نانوذرات نقره/رنگ-های روغنی	۳۰ روز	[۳۲]
کنترل pH و استفاده از SDS به‌عنوان پایدارساز	نانوذرات اکسیدمس/اتیلن-گلیکول	٤٥ روز	[۳۳]
استفاده از SDS به‌عنوان پایدارساز	نانوذرات تیتانیوم اکسید/آب	۱۱ روز	[۳٤]
کنترل pH	نانوذرات اکسیدمس/آب	٤٥ روز	[۳٥]
عامل‌دارسازی CNTs و اولتراسونیک	نانولوله‌های کربنی تزئین شده با نانوذرات نقره/آب	۹۰ روز	[۳٦]
عامل‌دارسازی CNTs و اولتراسونیک	نانولوله‌های کربنی تزئین شده با نانوذرات نقره و مس/اتیلن گلیکول	٤۳ روز	[۳۷]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نانوسیال‌های حاوی نانوذرات اکسید فلزی (ZnO، CuO و $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$) بر پایهٔ اتیلن گلیکول با درصدهای وزنی ۰٫۱، ۰٫۲۵و ۰٫۵ ساخته شدند. تأثیر عوامل مختلف از جمله نوع دستگاه اولتراسونیک، زمان اولتراسونیک، افزودن سدیم دودسیل سولفات (SDS) به‌عنوان سورفکتانت و همچنین اصلاح سطحی نانوذرات اکسیدفلزی با استفاده از مخلوط اولئیک اسید و اوزایلن بر پایداری نمونه‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. جهت عامل‌دارسازی نانوذرات از مخلوط اولئیک اسید و اوزایلن با نسبت‌های مختلف ٪۳، ٪۵، ٪۷، ٪۹، ٪۱۰، ٪۳۰، ٪٤۰ و ٪۵۰ استفاده شد. نتایج نشان دادند که بهترین پایداری در نسبت اولئیک اسید به اوزایلن ٪۵۰ به‌دست آمد. به‌منظور بررسی پایداری نانوسیال‌های ساخته شده از طیف‌سنجی UV-vis استفاده شد. نتایج نشان دادند که افزایش زمان اولتراسونیک حمامی و همچنین افزودن سورفکتانت تأثیر چندانی در پایداری نانوسیال‌های تهیه شده ندارند، در حالی‌که عامل‌دارسازی نانوذرات، بیشترین تأثیر را در پایداری نمونه‌ها دارد به‌طوری‌که نانوسیال‌های حاوی نانوذرات $Zn_{0.97}Cu_{0.03}O$ عامل‌دارشده تا حدود ۱۲ روز پایدار بودند. همچنین مشاهده شد که برای ساخت نانوسیال‌های حاوی نانوذرات عامل‌دار، اولتراسونیک میله‌ای مناسب‌تر از اولتراسونیک حمامی است. جهت بررسی زمان مناسب اولتراسونیک در پخش نانوذرات، از اولتراسونیک میله‌ای با زمان‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه استفاده شد و ملاحظه گردید که برای نمونه‌های با زمان اولتراسونیک میله‌ای ۱۵ دقیقه، نانوذرات به‌طور کامل و یکنواخت در سیال پایه پخش شده‌اند.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه شهید چمران اهواز به‌خاطر حمایت مالی از این پژوهش قدردانی می‌کنند.

مرجع‌ها

[1] G.F. Smaisim, D.B. Mohammed, A.M. Abdulhadi, K.F. Uktamov, et al., RETRACTED ARTICLE: Nanofluids: properties and applications, J. Sol-Gel Sci. Technol. 104 (2022) 1-35. https://doi.org/10.1007/s10971-022-05859-0.

[2] H.B. Bacha, N. Ullah, A. Hamid, N.A. Shah, A comprehensive review on nanofluids: synthesis, cutting-edge applications, and future prospects, Int. J. Thermof. 22 (2024) 100595. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100595.

[3] A.K. Hussein, F.L. Rashid, M.K. Rasul, A. Basem, O. Younis, R.Z. Homod, M.E.H. Attia, M.A. Al-Obaidi, M.B.B. Hamida, B. Ali, S.F. Abdulameer, A review of the application of hybrid nanofluids in solar still energy systems and guidelines for future prospects, Sol. Energy 272 (2024) 112485. https://doi:10.1016/j.solener.2024.112485.

[4] J. Du, R. Wang, Q. Zhuo, W. Yuan, Heat transfer enhancement of Fe_3O_4-water nanofluid by the thermo-magnetic convection and thermophorestic effect, Int. J. Energy Res. 46 (7) (2022) 9521–9532. https://doi.org/10.1002/er.7821.

[5] R. Wang, T. Chen, J. Qi, et al., Investigation on the heat transfer enhancement by nanofluid under electric field considering electrophorestic and thermophoretic effect, Case Stud. Therm. Eng. 28 (2021) 101498. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101498.

[6] Y. Tong, R. Wang, S. Wang, et al., Comparison and evaluation of energetic and exergetic performance of an evacuated tube solar collector using various nanofluid, Process Saf. Environ. Prot. 174 (2023) 585–594. https://doi:10.1016/j.psep.2023.04.025.

[7] S.S. Azimi, M. Kalbasi, A Molecular dynamics simulation of brownian motion of a nanoparticle in a nanofluid. Nano- micro-scale thermophy, Eng. 21 (4) (2017) 263–277. https://doi.org/10.1080/15567265.2017.1286420

[8] X. Wang, D. Jing, Determination of thermal conductivity of interfacial layer in nanofluids by equilibrium molecular dynamics simulation, Int. J. Heat Mass Tran. 128 (1) (2019) 199–207. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.073.

[9] S. Chamara, S. Nalaka, J. Saliya, P. Kapila, A molecular dynamics study of thermal conductivity and viscosity in colloidal suspensions: from well-dispersed nanoparticles to nanoparticle aggregates. App, Therm. Eng. 229 (2023) 120651. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120651.

[10] R. Wang, S. Qian, Z. Zhang, Investigation of the aggregation morphology of nanoparticle on the thermal conductivity of nanofluid by molecular dynamics simulations, Int. J. Heat Mass Tran. 127 (10) (2018) 1138–1146. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.117.

[11] P. Kumar Kanti, P. Sharma, K.V. Sharma, et al., The effect of pH on stability and thermal performance of graphene oxide and copper oxide hybrid nanofluids for heat transfer applications: application of novel machine learning technique, J. Energy Chem. 82 (7) (2023) 359–374. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.04.001.

[12] A.P. Nagvenkar, I. Perelshtein, A. Gedanken, Doping effect on the thermal conductivity of metal oxide nanofluids: insight and mechanistic investigation, Int. J. Phys. Chem. C 121 (47) (2017) 26551–26557. http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10020.

[13] P. Keblinski, R. Prasher, J. Eapen, Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over?, J. Nano Res. 10 (7) (2008) 1089–1097. https://doi.org/10.1007/s11051-007-9352-1.

[14] M. Sedighi, A. Mohebbi, Investigation of nanoparticle aggregation effect on thermal properties of nanofluid by a combined equilibrium and non-equilibrium molecular dynamics simulation, J. Mol. Liq. 197 (9) (2014) 14–22. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.04.019.

[15] P. Keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (Nanofluids), Int. J. Heat Mass Tran. 45 (4) (2002) 855–863. https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2.

[16] Z. Zhang, S. Qian, R. Wang, Z. Zhu, Effect of aggregation morphology of nanoparticles on thermal conductivity of nanofluid, Acta Phys. Sin. 68 (5) (2019) 054401. https://doi.org/10.7498/aps.68.20181740.

[17] S. Sahamifar, D. Naylor, J. Friedman, Interferometric assessment of methods to improve the stability of Al_2O_3-water nanofluids, J. Mol. Liq. 436 (2025) 128202. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.128202.

[18] A.R.I. Ali, B. Salam, A review on nanofluid: preparation, stability, thermophysical properties, heat transfer characteristics and application, SN Appl. Sci. 2 (2020) 1636. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03427-1.

[19] J. Wang, X. Yang, J.J. Kleme, K. Tian, T. Ma, B. Sunden, A review on nanofluid stability: preparation and application, Renew. Sustain. Energy Rev. 188 (2023) 113854 .https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113854.

[20] L. Kong, J. Sun, Y. Bao, Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids, RSC Adv. 7 (2017) 12599–12609 . https://doi.org/10.1039/C6RA28243A.

[21] S. Chakraborty, P.K. Panigrahi, Stability of nanofluid: a review, Appl. Therm. Eng. 174 (2020) 115259. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115259.

[22] P.K. Das, A.K. Mallik, A.H. Molla, A.K. Santra, R. Ganguly, A. Saha, S. Kumar, V.K. Aswal, Experimental investigation for stability and surface properties of TiO_2 and Al_2O_3 water-based nanofluids, J. Therm. Anal. Calorim. 147 (10) (2022) 5617–5635. https://doi.org/10.1007/s10973-021-10894-0.

[23] J. Ji, X. Yao, J. Gao, W. Lu, W. Wang, D. Chu, Effect of surfactants and pH values on stability of γ-Al_2O_3 nanofluids, Chem. Phys. Lett. 16 (781) (2021) 138996. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138996.

[24] B. Mehta, D. Subhedar, Synthesis and characterization of γ-Al_2O_3-Water nanofluid with and without surfactant, Mater Today Proc. 62 (2022) 418–425. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.448.

[25] B. Sharma, S.K. Sharma, S.M. Gupta, A. Kumar, Modified two-step method to prepare long-term stable CNT nanofluids for heat

transfer applications, Arab. J. Sci. Eng. 43 (2018) 6155–6163. https://doi.org/10.1007/s13369-018-3345-5.

[26] B. Du, Q. Jian, Size controllable synthesis of graphene water nanofluid with enhanced stability, Fuller. Nanotub. Car. N. 27 (1) (2019) 87–96. https://doi.org/10.1080/1536383X.2018.1529667.

[27] M. Farbod, A. Ahangarpour, S.G. Etemad, Stability and thermal conductivity of water-based carbon nanotubenanofluids, Particuology 22 (2015) 59–65. https://doi.org/10.1016/j.partic.2014.07.005.

[28] A. Ahangarpour, M. Farbod, The noble effect of aging on the thermal conductivity of modified CNTs-ethylene glycol nanofluids, Phys. Chem. Liq. 56(1) (2018) 9-15. https://doi.org/10.1080/00319104.2016.1233183

[29] A. Ahangarpour, A. Shakhi, M. Farbod, Fabrication of $Zn_{1-x}Cu_xO$ nanoparticles and investigation of their effect on the thermal conductivity of nanofluids, J. Particle Sci. Technol. 8 (2) (2022) 95-102. https://doi.org/10.22104/jpst.2023.6200.1225.

[30] A.K. Singh, V.S. Raykar, Microwave synthesis of silver nanofluids with poly-vinylpyrrolidone (PVP) and their transport properties, Colloid Polym. Sci. 286 (2008) 1673-1667. https://doi.org/10.1007/s00396-008-1932-9.

[31] W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid, Thermochim. Acta 491 (2009) 92–96. https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.03.007.

[32] D. Li, B. Hong, W. Fang, Y. Guo, R. Lin, Preparation of well-dispersed silver nanoparticles for oil-based nanofluids, Ind. Eng. Chem. Res. 49 (2010) 1697–1702. https://doi.org/10.1021/ie901173h.

[33] V. Nikkhah, M.M. Sarafraz, F. Hormozi, S.M. Peyghambarzadeh, Particulate fouling of CuO–water nanofluid at isothermal diffusive condition inside the conventional heat exchanger-experimental and modeling, Exp. Therm Fluid Sci. 60 (2015) 83-95. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.08.009.

[34] E. Salari, S.M. Peyghambarzadeh, M.M. Sarafraz, F. Hormozi, Boiling thermal performance of TiO2 aqueous nanofluids as a coolant on a disc copper block, Period. Polytech. Chem. Eng. 60 (2) (2015) 106–122. https://doi.org/10.3311/PPch.8262.

[35] M. Kamalgharibi, F. Hormozi, S.A.H. Zamzamian, M.M. Sarafraz, Experimental studies on the stability of CuO nanoparticles dispersed in different base fluids: influence of stirring, sonication and surface active agents, Heat Mass Transf. 52 (1) (2015) 55-62. https://doi.org/10.1007/s00231-015-1618-z.

[36] M. Farbod, A. Ahangarpour, Improved thermal conductivity of Ag decorated carbon nanotubes water based nanofluids, Phys. Lett. Sect. A 380 (2016) 4044–4048. http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2016.10.014

[37] A. Ahangarpour, E. Hemmatian Larki, M. Farbod, Investigation of the thermophysical properties of ethylene glycol based nanofluids containing decorated carbon nanotubes with silver and copper nanoparticles by passing time, Iran. J. Phys. Res. 25 (3) (2025) 165-174.