



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱۷ تا ۳۰  
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 17-30



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک

AmirKabir Journal of Science & Research  
Mechanical Engineering  
(ASJR-ME)

## بررسی تجربی پایداری نانوسیال اکسید مس بر پایه آب یونزدایی شده و دستیابی به شرایط بهینه پایداری

مهدی کمال‌غریبی<sup>۱</sup>، سید امیر حسین زمزمیان<sup>۲\*</sup>، فرامرز هرمزی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان  
۲- استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج  
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۵، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۴)

### چکیده

در این تحقیق، پایداری نانوسیال اکسید مس با غلظت وزنی ۰/۱ درصد بر پایه آب یونزدایی شده به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها با هدف بررسی تأثیر عوامل سرعت دورانی و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، زمان موجهی فراصوت، نوع و غلظت مواد فعال سطحی و مقدار اسیدیته بر پایداری نانوسیال و دستیابی به یک شرایط بهینه پایداری طراحی شده‌اند. نتایج از لحاظ آماری و با استفاده از روش تاگوچی در نرم افزار کوالیتک-۴ تحلیل شده‌اند. علاوه بر آن، میزان پایداری نانوسیالات به کمک بررسی تصاویر ته‌نشینی و همچنین روش پتانسیل زتا مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات با غلظت وزنی ۰/۱ درصد، یک ساعت موجهی فراصوت با استفاده از دستگاه موجهی فراصوت میله‌ای و تنظیم مقدار اسیدیته برابر ۱۰/۷۲، بهترین شرایط را برای پخش نانوذرات اکسید مس در آب یونزدایی شده فراهم آورده‌اند. در این شرایط، نانوسیال ساخته شده برای مدت زمان حداقل ۴۰ روز بدون مشاهده هیچ اثری از ته‌نشینی نانوذرات، پایداری خود را حفظ نموده است.

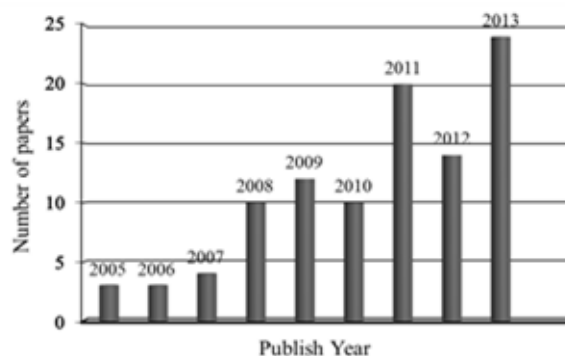
### کلمات کلیدی:

نانوسیال، پایداری، سرعت دورانی، مواد فعال سطحی، موجهی فراصوت، اسیدیته، روش تاگوچی، پتانسیل زتا

## ۱- مقدمه

نانوسیالات، سوسپانسیونی از نانوذرات جامد هستند که از مخلوط کردن نانوذرات در مایعات مختلفی مانند آب، روغن- های حرارتی و یا اتیلن گلیکول ساخته می‌شوند و در عین پایداری بیشتر و افزایش کمتر افت فشار در مقایسه با سوسپانسیون های معمولی، خواص انتقال حرارت بهتری دارند. چوی [۱]، در سال ۱۹۹۵ برای نخستین بار ایده استفاده از نانوسیالات در سیستم های انتقال حرارت را مطرح کرد. یکی از مهمترین موضوعات در بحث نانوسیالات، پایداری مخلوط ایجاد شده است زیرا از یک سو به دلیل اختلاف دانسیته، نانوذرات تمایل به ته نشینی دارند و از سوی دیگر به دلیل وجود نیروی جاذبه واندروالس بین ذرات، تمایل ذرات برای به هم پیوستن و در نتیجه، تشکیل توده ذرات نیز زیاد است. این پدیده ها هر یک به نوبه خود موجب عدم پایداری سوسپانسیون خواهند شد. این موضوع در طی سالیان اخیر به عنوان یکی از مهمترین موضوعات مورد بحث در زمینه نانوسیالات مطرح شده است که خواص و کاربرد نانوسیالات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عنوان مثال، پدیده تشکیل توده نانوذرات با ایجاد نواحی خالی از ذرات نانو در سیال پایه و در نتیجه با کاهش سطح موثر انتقال حرارت، موجب کاهش خواص انتقال حرارتی نانوسیال می‌شود. بنابراین در این مسیر، مطالعه و تحلیل عوامل موثر بر پایداری نانوسیالات امری الزامی است.

شکل ۱، روند پیشرفت انتشار مقالاتی که در طول یک دهه اخیر به بررسی تجربی پایداری نانوسیالات پرداخته‌اند را نشان می‌دهد. این مقالات در زمینه بررسی تجربی پایداری نانوسیالات با هر دو عنوان کلیدی نانوسیال و پایداری در تاریخ ۱۳۹۲/۵/۱۱ و طبق تمامی منابع موجود در زمینه مهندسی شیمی در پایگاه اطلاعات مقالات علمی<sup>۱</sup> جستجو شده اند.



شکل ۱: روند پیشرفت انتشار مقالات در زمینه بررسی تجربی پایداری نانوسیالات

همانطور که مشاهده می‌شود، میزان توجه به بررسی تجربی پایداری نانوسیالات به نحو چشمگیری رو به افزایش است که این موضوع گویای اهمیت فراوان پایداری نانوسیالات است. بیشتر محققان در تحقیقات خود از روش های موجهی فراصوت، افزودن مواد فعال سطحی و کنترل مقدار اسیدیته به منظور پایداری پخش نانوذرات در سیال پایه استفاده

کرده‌اند. مشخصات برخی از این تحقیقات که در آنها از نانوذرات اکسید مس استفاده شده است، در جدول ۱ آورده شده است. یکی از عوامل مورد توجه در روش موجهی فراصوت، مدت زمان موجهی است. در برخی از تحقیقات [۱۰]، موجهی طولانی مدت موجب ایجاد پدیده‌هایی مثل جدایش فازها و تشکیل لایه کف روی سطح سیال شده است. در برخی مطالعات نیز، یک مدت زمان موجهی بهینه گزارش شده است. قدیمی و میتسلار [۱۱]، در مطالعه خود بر روی تأثیر فرایند موجهی فراصوت بر پیشرفت پایداری نانوسیال تیتانیوم، از طریق ارزیابی میزان جذب نانوسیال، مدت زمان سه ساعت را به عنوان زمان بهینه موجهی فراصوت گزارش دادها. کول و دی [۱۲]، در مطالعه خود بر روی اثر موجهی فراصوت طولانی مدت بر رسانش حرارتی نانوسیال اکسید روی / اتیلن گلیکول، از طریق ارزیابی اندازه توده نانوذرات، مدت زمان ۶۰ ساعت را به عنوان زمان بهینه موجهی فراصوت گزارش دادها.

برخی محققان نیز عوامل دیگری را در نظر گرفته‌اند. امامی میبدی و همکارانش [۱۳]، در مطالعه خود بر روی پایداری و رسانش حرارتی نانوسیال نانولوله کربنی/آب، مدت زمان موجهی را مقداری مشخص و ثابت در نظر گرفتند و تأثیر توان امواج فراصوت را بر پایداری مورد سنجش قرار دادند. تاجیک و همکارانش [۱۴]، در مطالعه خواص موجهی فراصوت بر سوسپانسیون های نانوذرات تیتانیا و آلومینا در آب، اثر کیفیت امواج را بر روی پایداری نانوسیال بررسی کردند. آنها از دو نوع ضربان پیوسته و ناپیوسته استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که پالس ناپیوسته قادر به شکستن تمامی توده‌های ذرات نیست و بعد از ۴۸ ساعت ته نشینی رخ می‌دهد.

تأثیر نوع دستگاه موجهی فراصوت نیز در برخی تحقیقات مورد توجه قرار گرفته است. موندراگون و همکارانش [۱۵] در مطالعه بر روی خواص فیزیکی و پایداری نانوسیال سیلیکا/آب از روش پخش با دستگاه موجهی فراصوت میله ای بهره بردند.

با وجود استفاده بیشتر از دستگاه موجهی فراصوت حمامی نسبت به نوع میله ای آن در تحقیقات تجربی، برخی محققان از هر دو نوع دستگاه در آزمایش هایشان بهره گرفته‌اند. هوانگ و همکارانش [۱۶]، در آزمایش خود بر روی پایداری پخش نانوذرات کربن سیاه و نقره در آب از هر دو نوع سیستم استفاده کردند. با این وجود، روش همگساز در فشار بالا را به عنوان موثرترین روش پخش نانوذرات گزارش کردند.

با وجود تعداد بسیار زیاد تحقیقات انجام گرفته در زمینه بررسی تأثیر غلظت مواد فعال سطحی بر پایداری نانوسیال [۱۷]، تأثیر نوع ماده فعال سطحی در مطالعات کمتری مورد توجه قرار گرفته است. وانگ و همکارانش [۱۸]، در مطالعه خود بر روی سنتز نانوذرات نقره، از پلی وینیل پیرولیدین برای پایداری نانوسیال نقره/محلول آبی نقره استفاده کردند و به پایداری حداقل یک ماه دست یافتند. کاردیک و همکارانش [۱۹]، در مطالعه خود بر روی نانوسیال سدیم آلومینیوم/آب از سدیم دودسیل سولفات استفاده کردند و بیان کردند که جذب قوی تر این ماده، پایداری بیشتری حاصل می‌کند.

1 www.sciencedirect.com/scopus

جدول ۱: برخی از پژوهش‌های تجربی انجام شده در زمینه پایداری نانوذرات اکسید مس

مرجع	مدت زمان پایداری	شرایط بهینه پایداری	مدت زمان موج دهی (ساعت)	ماده فعال سطحی	سیال پایه	غلظت نانوذره (درصد حجمی)
[۲]	۱۲ ساعت	بیان نشده است	۱۱	-	آب یونزدایی شده	۱-۴
[۳]	بیان نشده است	۹ ساعت موجدهی فراصوت	۱-۳۰	-	اتیلن گلیکول	۰/۰۰۱-۵
[۴]	چندین روز	بیان نشده است	۳	-	آب	۲-۱۰
[۵]	چندین هفته	بیان نشده است	بیان نشده است	ACT	آب	۰/۱-۱۰
[۶]	یک ماه	pH= 9.50	۹	PVP	اتیلن گلیکول	۰/۰۱ مولار
[۷]	بیان نشده است	CuO:Tiron= 2.5:1	۶	Tiron	آب	<۰/۰۱۶
[۸]	بیان نشده است	pH= 7.8 0.045 wt% CuO	بیان نشده است	-	آب/ اتیلن گلیکول	بیان نشده است
[۹]	۶۰ ساعت	pH= 10.1 0.2 wt% SDS	بیان نشده است	SDS	آب	۰-۰/۴

حتی پاسخ سیستم را در شرایط بهینه و بدون انجام آزمایش، پیشگویی می‌نماید [۲۳]. این روند بررسی با در نظر گرفتن اثر تداخل عوامل<sup>۲</sup>، میزان تأثیر هر عامل را بر پایداری و مقدار بهینه هر عامل را مشخص می‌کند که در مطالعات قبلی مشاهده نشده است. ضمن آن که در مطالعاتی که از همزن مغناطیسی به عنوان ابزار پراکنده‌سازی نانوذرات در سیال پایه استفاده شده است، عوامل سرعت دورانی پخش نانوذرات و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، مورد توجه لازم قرار نگرفته‌اند. ارتفاع تهنشینی نانوذرات از طریق عکسبرداری دقیق از نانوسیالات انجام شده است. مزیت این روند بررسی آن است که رفتار پایداری نانوسیال در هر لحظه قابل مشاهده و تحلیل است. علاوه بر این، مقایسه عملکرد دو ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات و پلی وینیل پیرولیدین، تاکنون تنها در مطالعه کیم و همکارانش [۲۴] بر روی مشخصات حرارتی و ویسکوزیته نانولوله‌های کربنی چند دیواره مشاهده شده است.

## ۲- تعاریف و مفاهیم

موارد زیر، توضیح مختصری از تعاریف و مفاهیم به کار رفته در این تحقیق هستند:

پایداری نانوسیال: عدم تشکیل توده نانوذرات و یا عدم تهنشینی نانوذرات با سرعت قابل توجه در یک نانوسیال.

نیروی دافعه الکترواستاتیک: نیروی دافعه بین دو نانوذره با بار مشابه در یک نانوسیال. این نیرو نقش بسیار مهمی در پایداری نانوسیال ایفا می‌کند.

نیروی دافعه فضایی<sup>۳</sup>: نیروی دافعه بین نانوذرات زمانی که نانوذرات در یک شبکه پلیمری پوشش داده شده‌اند.

ژوان [۲۰]، در مطالعه خود بر روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات، برای تهیه سوسپانسیون ذرات مس در آب از نمک لورات برای افزایش پایداری استفاده کرد. او نشان داد با افزودن این نمک به آب حاوی ۹ درصد وزنی اکسید مس و پس از موجدهی فراصوت، سوسپانسیون بیش از ۳۰ ساعت در حال سکون، به طور پایدار باقی می‌ماند. با وجود قابلیت بالای مواد فعال سطحی در پایداری نانوسیالات، روش افزودن این مواد به نانوذرات در دماهای بالا کاربردی نیست زیرا در این صورت، احتمال پیوند بین ماده فعال سطحی و نانوذره وجود دارد. در این رابطه، برخی محققان دمای بالای ۶۰ درجه سانتیگراد را به عنوان دمای بحرانی گزارش داده‌اند [۲۱].

در سال‌های اخیر، تأثیر مقدار اسیدیته نانوسیال بر پایداری آن مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. لی و همکارانش [۲۲]، تغییرات اندازه توده نانوذرات را بر اساس تغییرات اسیدیته نانوسیال مشاهده کردند. آنها نتیجه گرفتند زمانی که مقدار اسیدیته نانوسیال برابر ۱/۷ بود، اندازه توده‌های ذرات تا میزان ۱۸ درصد کاهش یافت و زمانی که این مقدار برابر ۷/۶۶ بود، اندازه توده‌های ذرات تا میزان ۵۱ درصد افزایش یافت. سهولی [۸]، در مطالعه خواص حرارتی نانوذرات اکسید مس بر پایه ترکیب آب/اتیلن گلیکول، مقدار بهینه اسیدیته را به منظور پایداری نانوسیال برابر ۷/۸ گزارش کرد.

در این تحقیق، برای نخستین بار با استفاده از روش تاگوچی و اجرای نرم افزار کوالیتک-۴، تأثیر عوامل سرعت دورانی و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، مدت زمان موجدهی فراصوت و غلظت مواد فعال سطحی بر روی پایداری نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته است. این روش قادر است با اطمینان بالایی، تعداد آزمایش‌ها، زمان انجام، هزینه اجرا و احتمال خطا در رسیدن به پاسخ مطلوب را تا چندین برابر کاهش دهد و

2 Interaction factors effect  
3 Steric repulsion force

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و ترموفیزیکی نانوذرات اکسید مس

توضیحات	خواص
پودر سیاه رنگ تقریباً کروی	شکل ظاهری
۴۰	اندازه (نانومتر)
۹۹	خلوص (درصد)
۲۰	مساحت سطح ویژه ( $\text{g/m}^2$ )
۷۹/۵۵	وزن مولکولی ( $\text{g/mol}$ )
۶/۴	دانسیته ( $\text{g/cm}^3$ )
۷۵	ضریب رسانش حرارتی ( $\text{W/m.k}$ )

جدول ۳: مشخصات مواد فعال سطحی

ماده فعال سطحی	فرمول مولکولی	وزن مولکولی ( $\text{g/mol}$ )	دانسیته ( $\text{g/cm}^3$ )
سدیم دودسیل سولفات	$\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$	۲۸۸/۳۷۲	۱/۰۱
پلی وینیل پیرولیدن	$n(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})$	۲/۵	۱/۲۰

مربوط به این دو بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. دلیل انتخاب آب یونزدایی شده به عنوان سیال پایه، آن است که آب معمولی دارای مقادیری یون های مثبت و منفی مانند آهن، منگنز، سولفات و کربنات است که روی سطح نانوذرات نشست و تأثیر ماده فعال سطحی را کاهش می دهند. همچنین، بار خالص روی سطح نانوذرات و به موجب آن، پایداری نانوسیال را تغییر می دهند. به منظور کاهش خوردگی و همچنین، پراکندگی بهتر نانوذرات در محیط های آبی، معمولاً از غلظت های پایین نانوذرات استفاده می کنند. به همین دلیل در این تحقیق، غلظت وزنی ۰/۱ درصد از نانوذرات استفاده شده است. در نهایت، دلیل استفاده از سدیم دودسیل سولفات و پلی وینیل پیرولیدن، به ترتیب، به عنوان مواد فعال سطحی آنیونی و غیر یونی، آن است که این مواد، به ترتیب، با افزایش نیروی دافعه الکترواستاتیک و نیروی دافعه فضایی بین ذرات، وضعیت پخش نانوذرات در سیال پایه را بهبود می بخشند و بدین ترتیب مقایسه نقش این دو نیرو در پایداری نانوسیال، ممکن خواهد بود.

### ۳-۲- روش ها و ابزار

در مرحله نخست این تحقیق، هدف از اجرای آزمایش ها، بررسی میزان و نحوه تأثیر هر یک از عوامل سرعت دورانی و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، غلظت مواد فعال سطحی و مدت زمان موجهی فراصوت بر پایداری نانوسیال و دستیابی به مقادیر بهینه هر یک از این عوامل است. بر این اساس، مطابق جدول ۴، چهار عامل، سرعت پخش نانوذرات

نیروی جاذبه و اندروالس: نیروی بین مولکول های منفرد در هر نانوذره، به عبارت دیگر، نیروی بین هر مولکول از ذره اول با هر یک از مولکول های ذره دوم. این نیرو، عامل اصلی به هم پیوستن نانوذرات و در نتیجه ناپایداری نانوسیال است.

لایه مضاعف الکتریکی<sup>۴</sup>: لایه تشکیل شده در سطح مشترک یک نانوذره جامد و مایعی که در تماس با نانوذره است. این لایه، خود شامل دو زیرلایه است؛ لایه داخلی، شامل یون هایی با بار مشابه که بر روی سطح نانوذره جذب شده اند و لایه خارجی، شامل یون های متحرک با بار مخالف که در سیال اطراف نانوذره پخش شده اند.

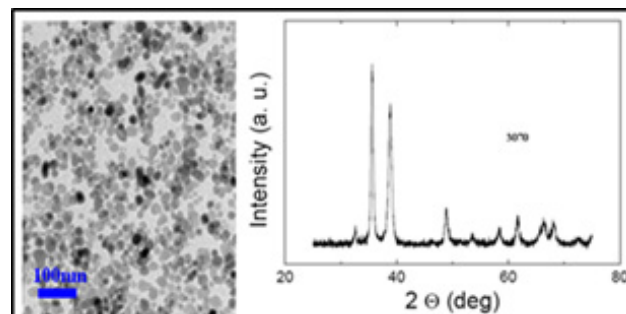
پتانسیل زتا: اختلاف پتانسیل بین محیط پخش و لایه ساکن سیال متصل به نانوذره. رابطه بین پتانسیل زتا و پایداری نانوسیال از دافعه متقابل بین نانوذرات با بار یکسان ناشی می شود. اگر پتانسیل زتای سطح نانوذره، مقدار مطلق بالایی داشته باشد، نیروی دافعه الکترواستاتیک بین نانوذرات و به موجب آن، پایداری نانوسیال افزایش می یابد.

نقطه ایزوالکتریک<sup>۵</sup>: مقدار اسیدیته نانوسیال در حالتی که نانوذره، بار الکتریکی سطحی خالصی نداشته باشد. در این حالت، پتانسیل زتای سطح نانوذره صفر بوده و در نتیجه، نانوسیال در ناپایدارترین وضعیت خود قرار دارد.

### ۳-۱- آزمایش ها

#### ۳-۱-۱- مواد

در این تحقیق، از ذرات اکسید مس به عنوان نانوذره، از آب یونزدایی شده<sup>۶</sup> به عنوان سیال پایه و از سدیم دودسیل سولفات و پلی وینیل پیرولیدن به عنوان مواد فعال سطحی در تهیه نانوسیالات استفاده شده است. خواص فیزیکی و ترموفیزیکی نانوذره در جدول ۲ آورده شده است. مشخصات مواد فعال سطحی نیز در جدول ۳ آورده شده است. اندازه ذرات به کمک میکروسکوپ الکترونی عبوری و مشخصات ساختاری ذرات به کمک بررسی طیفسنجی پراش اشعه ایکس (XRD)، تعیین شده اند. نتیجه



شکل ۲: تصاویر گرفته شده از نانوذرات به کمک میکروسکوپ الکترونی عبوری (چپ) و نمودار طیفسنجی پراش اشعه ایکس (راست)

4 Electrical double layer or EDL

5 Isoelectric point or IEP

6 Deionized water

جدول ۴: عوامل و سطوح مربوطه در طراحی آزمایش ها

عوامل	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
(A) سرعت پخش نانوذرات در سیال پایه (دور بر دقیقه)	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰
(B) مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه (دقیقه)	۶۰	۹۰	۱۲۰	۱۵۰
(C) غلظت ماده فعال سطحی (درصد وزنی)	۰/۰۵	۰/۱	۰/۳	۰/۵
(D) مدت زمان موج‌دهی فراصوت (دقیقه)	۳۰	۶۰	۹۰	۱۲۰

با مقادیر اسیدیته ۴، ۷ و ۱۰ استانداردسازی شده بود، اندازه‌گیری شدند. در ادامه، مقدار پتانسیل زتای سطح نانوذره برای هر نمونه به وسیله یک دستگاه زتاسایزر در شرایط دمای ۲۱ درجه سانتیگراد، فشار ۱ اتمسفر و رطوبت ۳۸ درصد اندازه‌گیری شد. در نهایت، با بررسی تأثیر مقدار اسیدیته بر پتانسیل زتای سطح نانوذره برای هر نمونه، مقدار بهینه اسیدیته نیز حاصل شد.

#### ۴- نتایج و تحلیل آزمایش ها

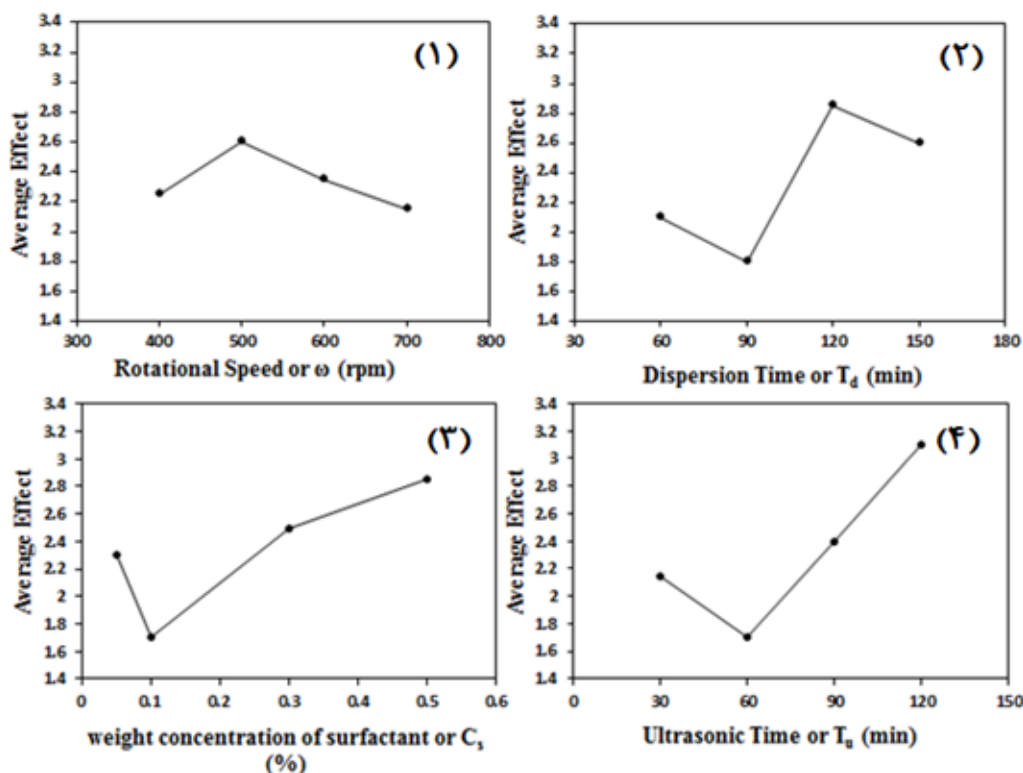
##### ۴-۱- تعیین مقدار بهینه عوامل

متطابق با عوامل و سطوح مربوطه (جدول ۴) و با استفاده از روش تاگوچی، یک آرایش متعامد L-16 برای طراحی آزمایشها به کار برده شد که تعداد آزمایش

در سیال پایه (دور بر دقیقه)، مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه (دقیقه)، غلظت ماده فعال سطحی (درصد وزنی) و مدت زمان موج‌دهی فراصوت (دقیقه)، در چهار سطح در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از روش تاگوچی و با اجرای نرم‌افزار کوالیتک-۴، ترتیب و نحوه آزمایش ها مشخص شدند.

به منظور انحلال مواد فعال سحی در آب یونزدایی شده و پخش نانوذرات اکسید مس با غلظت ۰/۱ درصد وزنی در سیال حاصل، از روش اختلاط با همزن مغناطیسی استفاده شد و در ادامه، نانوسیالات ساخته شده درون یک دستگاه موج‌دهی فراصوت میله ای با بسامد موج ۲۴ کیلوهرتز، دامنه موج ۱۰۰ درصد و توان خروجی ۴۰۰ وات، در معرض موج‌دهی فراصوت قرار گرفتند. سپس، ظروف محتوی نمونه‌ها برای مدت زمان یک هفته در حالت ساکن و در مکانی با دمای ثابت اتاق و دور از نور مستقیم خورشید نگاهداری شدند. پس از آن، مقدار ارتفاع ته‌نشین شده نانوذرات در هر نمونه به وسیله یک دوربین عکسبرداری با وضوح تصویر بسیار بالا، اندازه‌گیری شد. پس از اجرای آزمایش ها و دستیابی به مقادیر بهینه هر یک از عوامل ذکر شده، نانوسیال دارای شرایط بهینه پایداری شناسایی شد.

در مرحله دوم تحقیق، تأثیر عامل اسیدیته بر پایداری نانوسیال مورد سنجش قرار داده شد. بر این اساس، مقدار اسیدیته نانوسیالی که شرایط بهینه پایداری آن در مرحله نخست شناسایی شده بود، با استفاده از محلول های سدیم هیدروکسید با غلظت ۰/۱ نرمال و هیدروکلریک اسید با غلظت ۱ مولار، در گستره ۲ تا ۱۲ تغییر داده شد. مقدار اسیدیته نمونه‌ها به وسیله یک اسیدیته‌سنج دقیق دیجیتالی که به کمک سه محلول بافر



شکل ۳: نمودار اثر متوسط عوامل (۱) سرعت دورانی پخش نانوذرات در سیال پایه (۲) مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه (۳) غلظت وزنی ماده فعال سطحی (۴) مدت زمان موج‌دهی فراصوت در آزمایش های گروه الف

جدول ۵: نحوه طراحی آزمایش ها با استفاده از آرایش ۱۶-L روش تاگوچی

آزمایش ها	سطوح عامل (A)	سطوح عامل (B)	سطوح عامل (C)	سطوح عامل (D)
آزمایش ۱	۱	۱	۱	۱
آزمایش ۲	۱	۲	۲	۲
آزمایش ۳	۱	۳	۳	۳
آزمایش ۴	۱	۴	۴	۴
آزمایش ۵	۲	۱	۲	۳
آزمایش ۶	۲	۲	۱	۴
آزمایش ۷	۲	۳	۴	۱
آزمایش ۸	۲	۴	۳	۲
آزمایش ۹	۳	۱	۳	۴
آزمایش ۱۰	۳	۲	۴	۳
آزمایش ۱۱	۳	۳	۱	۲
آزمایش ۱۲	۳	۴	۲	۱
آزمایش ۱۳	۴	۱	۴	۲
آزمایش ۱۴	۴	۲	۳	۱
آزمایش ۱۵	۴	۳	۲	۴
آزمایش ۱۶	۴	۴	۱	۳

ها را از ۴۰۹۶ به ۱۶ کاهش داد. این آرایش در جدول ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در آزمایش نخست، تمامی عوامل در سطح اول خود در نظر گرفته میشوند، در حالی که، به عنوان مثال، در آزمایش دوم، عامل (A) در سطح اول خود و سایر عوامل در سطح دوم خود در نظر گرفته شده اند.

این ۱۶ آزمایش، برای نانوسیالات شامل ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات با عنوان گروه الف و برای نانوسیالات شامل ماده فعال سطحی پلی وینیل پیرولیدین با عنوان گروه ب، به طور جداگانه انجام شد. در این طراحی، مقدار ارتفاع تهنشین شده نانوذرات در نانوسیال پس از مدت زمان یک هفته، به عنوان پاسخ هر آزمایش در نظر گرفته شده

است. بدیهی است که مقدار کمتر ارتفاع تهنشینی نانوذرات در نانوسیال به معنای پایداری بیشتر آن نانوسیال است.

پس از مشخص شدن پاسخ ها، نتایج با استفاده از روش تاگوچی و با اجرای نرم افزار کوالیتک-۴ از لحاظ آماری مورد بررسی قرار گرفتند. در این روش، برای دستیابی به شرایط بهینه، از روش محاسبه اثر متوسط عوامل<sup>۷</sup> استفاده شده است. جدول ۶، نتایج مربوط به محاسبه اثر متوسط عوامل در سطوح مربوطه را برای آزمایش های گروه الف و ب نشان می دهد. به این ترتیب، از طریق رسم نمودار اثر متوسط عوامل در آزمایش های مربوط به گروه های الف و ب که به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است، مقدار بهینه هر عامل به دست آمده است.

جدول ۶: اثر متوسط عوامل در سطوح مربوطه

عوامل	گروه الف				گروه ب			
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
سرعت پخش دورانی نانوذره در سیال پایه (دور بر دقیقه)	۲/۲۵	۲/۶۰	۲/۳۵	۲/۱۵	۲/۵۰	۲/۲۰	۲/۳۰	۱/۹۵
مدت زمان پخش نانوذره در سیال پایه (دقیقه)	۲/۱۰	۱/۸۰	۲/۸۵	۲/۶۰	۲/۴۵	۲/۱۰	۲/۷۵	۱/۶۵
غلظت ماده فعال سطحی (درصد وزنی)	۲/۳۰	۱/۷۰	۲/۵۰	۲/۸۵	۲/۲۵	۱/۸۵	۱/۸۰	۳/۵۰
مدت زمان موج دهی فراصوت (دقیقه)	۲/۱۵	۱/۷۰	۲/۴۰	۳/۱۰	۲/۳۰	۱/۶۵	۱/۸۵	۳/۱۵

در سیال پایه، مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، غلظت ماده فعال سطحی و مدت زمان موج‌دهی فراصوت بر پایداری نانوسیال، به ترتیب، در حدود ۴، ۲۷، ۲۸ و ۴۱ درصد است.

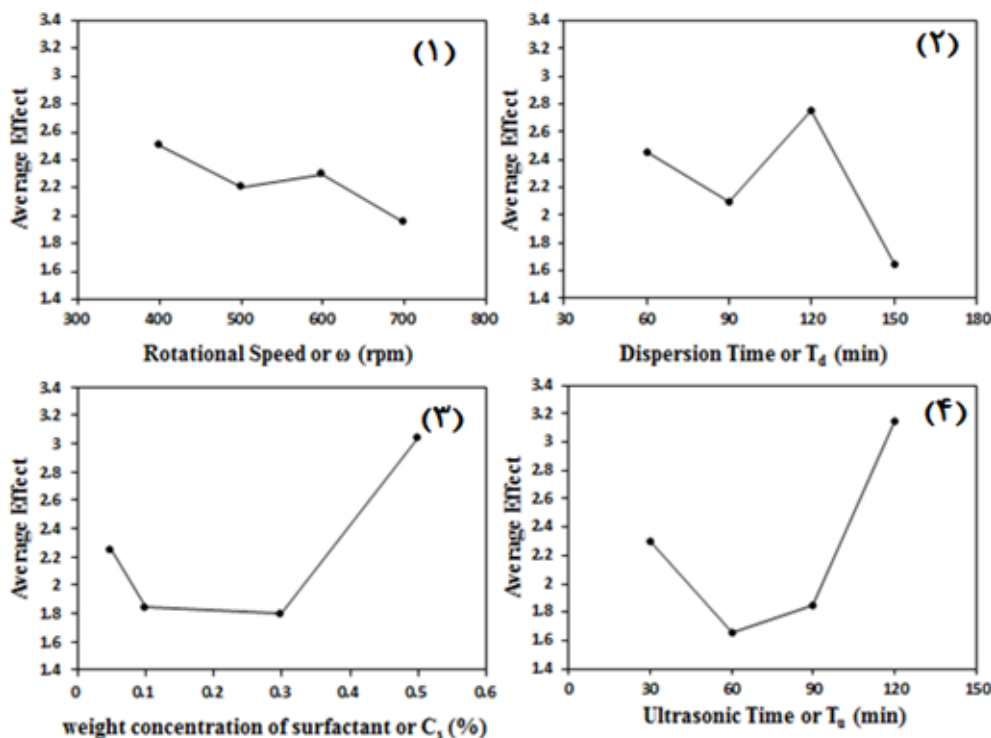
جدول ۸ نشان می‌دهد زمانی که از پلی وینیل پیرولیدین به عنوان عامل پایدارکننده نانوذرات استفاده شده است، سهم هر یک از عوامل نام برده شده، به ترتیب، در حدود ۵، ۲۱، ۳۲ و ۴۲ درصد است. طبق اصول استاندارد ارئه شده توسط تاگوچی [۲۵]، در صورتی که مقدار خطای محاسبه شده در تحلیل واریانس، کمتر از ۱۵ درصد باشد نتایج تحلیل را می‌توان معتبر دانست و در غیر این صورت، آزمایش‌ها باید دوباره و با دقت بیشتری تکرار شوند. همانطور که در جداول ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، مقدار خطای محاسبه شده در تحلیل واریانس نتایج، بسیار پایین بوده و در نتیجه نتایج حاصل شده قابل اطمینان هستند. روش تاگوچی، در یک آزمایش با تعداد N عامل، تعداد بر هم کنش یا تداخل را بین دو عامل در نظر می‌گیرد. بنابراین، در این تحقیق با داشتن چهار عامل، تعداد شش تداخل بین دو عامل، در نظر گرفته شده است. میزان تأثیر هر تداخل در پاسخ آزمایش، با شاخصی به نام شاخص شدت<sup>۱۱</sup> سنجیده می‌شود. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب، میزان تأثیر تداخل عوامل مورد نظر را در پاسخ آزمایش‌های گروه‌های الف و ب نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تداخل دو عامل، سرعت دورانی پخش نانوذرات و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، بیشترین تأثیر را بر ارتفاع ته نشینی نانوذرات در نانوسیال داشته است.

از آن جا که در این تحقیق، مقدار پایین تر ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات در نانوسیال (پایداری بهتر) مد نظر است، معیار «کمتر-بهتر»<sup>۸</sup>، مشخصه کیفی<sup>۹</sup> انتخاب شده در تحلیل آزمایشها بوده است. بر این اساس، همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، زمانی که از سدیم دودسیل سولفات به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، مقدار بهینه هر یک از عوامل، سرعت دورانی پخش نانوذرات در سیال پایه، مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، غلظت ماده فعال سطحی و مدت زمان موج‌دهی فراصوت، به ترتیب، ۷۰۰ دور بر دقیقه، ۹۰ دقیقه، ۰/۱ درصد وزنی و ۶۰ دقیقه بوده است.

به همین ترتیب، مطابق شکل ۴، زمانی که از پلی وینیل پیرولیدین به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، مقدار بهینه هر یک از عوامل نام برده شده، به ترتیب، ۷۰۰ دور بر دقیقه، ۱۵۰ دقیقه، ۰/۳ درصد وزنی و ۶۰ دقیقه بوده است.

#### ۴-۲- میزان و نحوه تأثیر عوامل

علم به این موضوع که هر عامل به چه میزان بر پایداری نانوسیال اثرگذار است و این اثرگذاری به چه صورت انجام شده است، بسیار مهم و قابل توجه است. برای این منظور، روش تاگوچی، از تحلیل واریانس<sup>۱۰</sup> استفاده می‌کند. جداول ۷ و ۸، به ترتیب، نتایج تحلیل واریانس عوامل مربوط به آزمایشهای گروه الف و ب را نشان می‌دهند. جدول ۷، نشان می‌دهد زمانی که از سدیم دودسیل سولفات به عنوان عامل پایدارکننده نانوذرات استفاده شده است، سهم هر یک از عوامل سرعت دورانی پخش نانوذرات



شکل ۴: نمودار اثر متوسط عوامل (۱) سرعت دورانی پخش نانوذرات در سیال پایه (۲) مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه (۳) غلظت وزنی ماده فعال سطحی (۴) مدت زمان موج‌دهی فراصوت در آزمایش‌های گروه ب

11 Severity index or SI

8 Smaller is better

9 Quality characteristic or QC

10 Analysis of variance or ANOVA

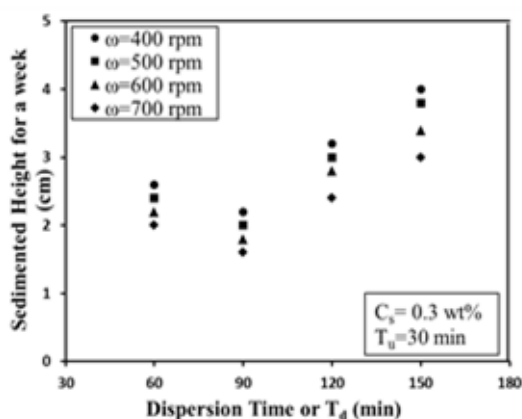
جدول ۷: نتایج حاصل از تحلیل واریانس عوامل مربوط به آزمایش های گروه الف

عوامل	مجموع مربعات	واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد تأثیر
سرعت پخش نانوذره (دور بر دقیقه)	۰/۴۴۷	۰/۱۴۹	۰/۴۴	۴/۳۷۵
مدت زمان پخش نانوذره (دقیقه)	۲/۷۰۷	۰/۹۰۲	۲/۷	۲۶/۸۴۵
غلظت ماده فعال سطحی (درصد وزنی)	۲/۷۸۷	۰/۹۲۹	۲/۷۸	۲۷/۶۴۱
مدت زمان موجدهی فراصوت (دقیقه)	۴/۱۰۷	۱/۳۶۹	۴/۱	۴۰/۷۶۵
خطا	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	-	۰/۳۷۴

جدول ۸: نتایج حاصل از تحلیل واریانس عوامل مربوط به آزمایش های گروه ب

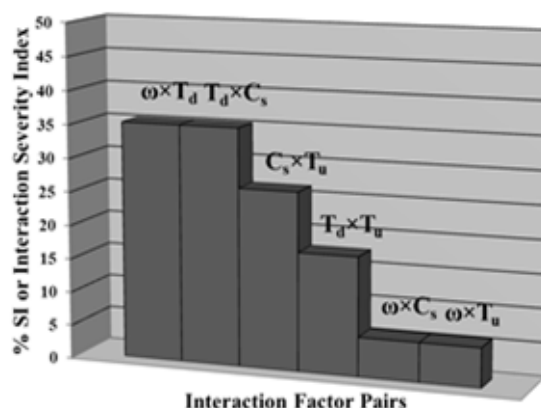
عوامل	مجموع مربعات	واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد تأثیر
سرعت پخش نانوذره (دور بر دقیقه)	۰/۶۲۷	۰/۲۰۹	۰/۶۲	۴/۸۹۸
مدت زمان پخش نانوذره (دقیقه)	۲/۶۸۷	۰/۸۹۵	۲/۶۷۹	۲۱/۱۷۳
غلظت ماده فعال سطحی (درصد وزنی)	۴/۰۰۷	۱/۳۳۵	۳/۹۹۹	۳۱/۶۰۱
مدت زمان موجدهی فراصوت (دقیقه)	۵/۳۲۷	۱/۷۷۵	۵/۳۲	۴۲/۰۳
خطا	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	-	۰/۲۹۸

شکل ۷، تأثیر سرعت دورانی و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه را بر ارتفاع تهنشینی نانوذرات در نانوسیال آزمایش های گروه الف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه تا ۹۰ دقیقه، پایداری افزایش یافته است اما پخش نانوذرات در مدت زمان طولانی تر، موجب افزایش تهنشینی نانوذرات در نانوسیال و در نتیجه، موجب کاهش پایداری نانوسیال شده است.

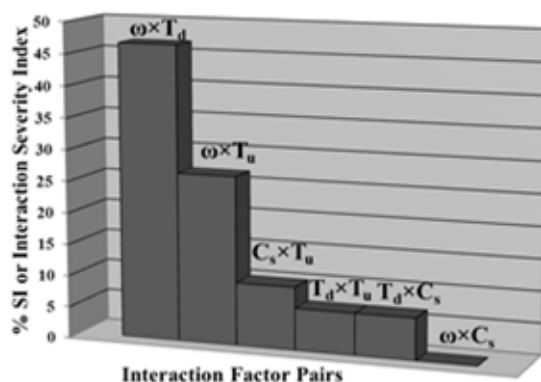


شکل ۷: اثر سرعت دورانی و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه (گروه الف)

این نتیجه را به این صورت می توان توجیه کرد که در طول اجرای آزمایش ها، زمانی که ۹۰ دقیقه از پخش نانوذرات در سیال پایه سپری شد، لایه نازکی از کف روی سطح نانوسیال تشکیل شد. حضور این لایه که آن را می توان به انحلال سدیم دودسیل سولفات در آب یونزدایی شده نسبت داد، مسیر حرکت چرخشی و منظم نانوذرات در حال پخش و



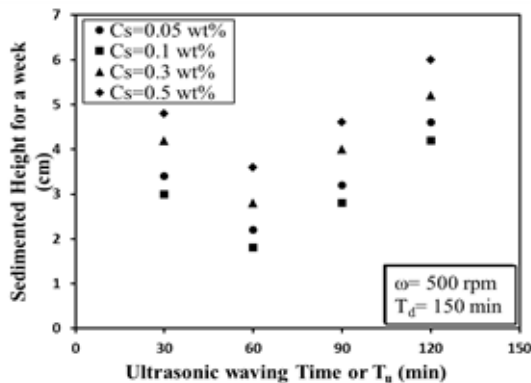
شکل ۵: میزان تأثیر تداخل در آزمایش های گروه الف



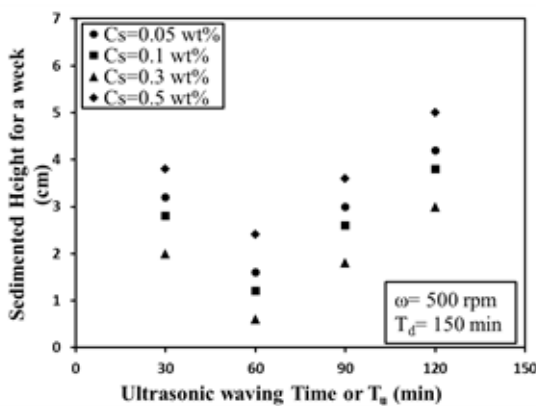
شکل ۶: میزان تأثیر تداخل در آزمایش های گروه ب



می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مدت زمان موج‌دهی تا ۶۰ دقیقه، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات کاهش یافته است اما موج‌دهی در مدت زمانهای بیشتر، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات را افزایش داده است. شکل (۱۰) نیز نتیجه مشابهی را در مورد آزمایش های گروه ب نشان می‌دهد.



شکل ۹: اثر مدت زمان موج‌دهی فراصوت و غلظت ماده فعال سطحی (گروه الف)

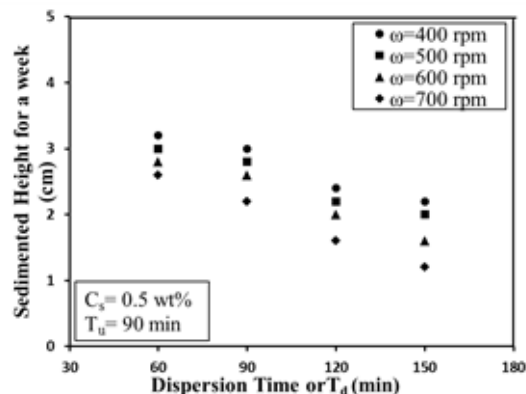


شکل ۱۰: اثر مدت زمان موج‌دهی فراصوت و غلظت ماده فعال سطحی (گروه ب)

این نتایج را به این صورت می‌توان توجیه کرد که؛ زمانی که نانوسیالات در معرض موج‌دهی فراصوت قرار می‌گیرند، تمام نقاط سیال در معرض نوسان و شتاب بسیار زیادی قرار می‌گیرند. در چنین شتاب بالایی، در این نقاط، «حباب کاویتاسیون<sup>۱۲</sup>» ایجاد می‌شود که در طول چندین دوره زمانی، رشد کرده و به یک قطر بحرانی می‌رسد و در نهایت نیز متلاشی می‌شود. طی این فرایند، شرایط موضعی خاصی به نام «نقطه داغ<sup>۱۳</sup>» به وجود می‌آید که در نتیجه ی آن، ضمن افزایش فوق العاده دما، میکروجرایان پرفشار و سریعی از مایع ایجاد می‌شود. حرکت این جریان از بین نانوذرات موجب شده است که یک نیروی برشی بسیار قوی به نیروهای الکترواستاتیکی بین ذرات (نیروی جاذبه واندرالس) وارد شده و بر آن غلبه کند. به این ترتیب، ذرات از هم جدا شده و پایداری نانوسیال افزایش می‌یابد.

نزدیک به سطح را تغییر داده و موجب برخورد این ذرات به هم شده است. به این ترتیب، توده‌های از ذرات شکل گرفته است که به دلیل وزن بیشتر نسبت به سایر ذرات، ته‌نشین شده‌اند و در نتیجه، موجب کاهش پایداری نانوسیال شده‌اند. با افزایش مدت زمان پخش، ضخامت این لایه افزایش یافته است و توده بزرگتری از ذرات موجب افت بیشتر پایداری نانوسیال شده‌اند. این موضوع می‌تواند توجیه مناسبی برای افزایش ۶ درصدی میزان تأثیر مدت زمان پخش نانوذره بر پایداری، زمانی که از سدیم دودسیل سولفات به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، باشد. نکته قابل توجه دیگر در شکل ۷، آن است که با افزایش سرعت دورانی پخش نانوذره در سیال پایه، در یک مدت زمان پخش ثابت، پایداری نانوسیال افزایش یافته است. این نتیجه را به این صورت می‌توان توجیه کرد که در سرعت های دورانی پایین، تعداد کمی از ذرات در سیال پایه پراکنده شده‌اند و باقی ذرات ته‌نشین شده‌اند. در حالی که، با افزایش سرعت دورانی پخش نانوذرات، میزان شرکتپذیری ذرات در فرایند پراکنده‌گی در سیال پایه، افزایش یافته و سوسپانسیون پایداری از نانوذرات تشکیل شده است.

شکل ۸، تأثیر سرعت دورانی و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه را بر ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات در نانوسیال آزمایش های گروه ب نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات به طور پیوسته کاهش یافته است و در نتیجه، پایداری نانوسیال افزایش یافته است. پلی وینیل پیرولیدین، یک ماده فعال سطحی قابل حل در آب است که انحلال آن در آب یونزدایی شده مشکلاتی مانند وجود لایه کف روی سطح نانوسیال ایجاد نمی‌کند. بنابراین، با افزایش مدت زمان پخش نانوذره، انحلال پذیری پلی وینیل پیرولیدین در آب یونزدایی شده افزایش یافته و در نتیجه، تأثیر این ماده در بهبود رفتار پخش نانوذرات نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش پایداری نانوسیال در این حالت، قابل توجیه است.



شکل ۸: اثر سرعت دورانی و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه (گروه ب)

شکل ۹، تأثیر مدت زمان موج‌دهی فراصوت و غلظت مواد فعال سطحی را بر ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات در نانوسیال آزمایش های گروه الف نشان

12 Cavitation bubble

13 Hot spot

جذب شده و با ایجاد نیروی فضایی اضافی بین ذرات، پایداری نانوسیال را افزایش دهد.

با حضور غلظت های ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد وزنی پلی وینیل پیرولیدین در نانوسیال، مولکول های این ماده توانایی پوشش کامل سطح نانوذرات را نداشته‌اند. علاوه بر آن، زنجیره جانبی این ماده فعال سطحی روی یک ذره می‌تواند به ذره دیگر پیوندد و منجر به تشکیل توده ذرات شود و به موجب آن، ارتفاع ته‌نشینی ذرات را افزایش دهد. با افزایش غلظت پلی وینیل پیرولیدین تا مقدار ۰/۳ درصد وزنی، سطح نانوذرات به میزان قابل توجهی تحت پوشش مولکول های این ماده قرار گرفته‌اند و به این ترتیب، با افزایش ضخامت لایه مضاعف الکتریکی، بار خالص سطح ذرات و به موجب آن، پتانسیل زتای سطح ذرات، افزایش یافته است. در نتیجه، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات، کاهش یافته است. با افزایش غلظت پلی وینیل پیرولیدین تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی، تعداد مولکول های جذب شده ی این ماده روی سطح نانوذرات، بیش از حد لازم بوده است. در این وضعیت، ممکن است بخش هایی از گروه آنگریز پلی وینیل پیرولیدین به درون سیال، کشیده شده باشند و در نتیجه، مولکول های بیش از حد آن، به نوعی موجب ایجاد پل بین نانوذرات شده‌اند و به این ترتیب، با تشکیل توده‌های از نانوذرات، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات، افزایش یافته و پایداری کاهش می‌یابد.

#### ۴-۳- تغییر اسیدیته و بررسی تأثیر آن بر پایداری نانوسیال

تغییر مقدار اسیدیته نانوسیال می‌تواند با جلوگیری از به هم‌پیوستگی نانوذرات، بستر بسیار مناسبی را برای پایدارسازی نانوسیال فراهم آورد. مقدار اسیدیته نانوسیال، مهمترین عاملی است که روی پتانسیل زتای سطح نانوذرات تأثیر می‌گذارد، زیرا گروه‌های عاملی که روی سطح ذرات حاضر هستند، اغلب شامل اتم هایی هستند که می‌توانند پروتون بگیرند یا بدهند. بنابراین، میزان اسیدیته نانوسیال می‌تواند تأثیر زیادی روی بار سطح داشته باشد. در این مرحله، مقدار اسیدیته نانوسیالات دارای بهترین شرایط پایداری در آزمایش های گروه الف و ب، در گستره ۲ تا ۱۲ تغییر داده شد و مقدار پتانسیل زتای سطح نانوذره برای هر نمونه با مقدار اسیدیته مشخص، اندازه‌گیری شد. شکل (۱۱)، نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. در هر دو گروه، با افزایش مقدار اسیدیته نانوسیال تا یک مقدار مشخص و کاهش خاصیت اسیدی نانوسیال، مقدار پتانسیل زتای سطح نانوذرات، افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.

این نتایج را به این صورت می‌توان توجیه کرد؛ زمانی که از پلی وینیل پیرولیدین به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، از آن جا که این ماده قابلیت یونش در سیال پایه را ندارد، سطح نانوذره به دلیل ناکافی بودن یون های هیدروکسید در مقدار پایین اسیدیته (مقدار ۲/۲۴)، دارای بار اضافی مثبت است. بنابراین، در ابتدا، پتانسیل زتای سطح ذره مقدار مثبتی را داراست. افزایش مقدار اسیدیته و همچنین، تشکیل پیوند هیدروژنی بین اکسیژن موجود در گروه کربونیل ماده فعال سطحی و هیدروژن موجود در آب، شرایطی را ایجاد کرده است که در آن،

زمانی که نانوسیال بیش از ۶۰ دقیقه در معرض موج‌دهی فراصوت قرار گیرد، دمای سوسپانسیون، افزایش یافته و موجب شده است که ذرات کوچکتر نیز به واسطه ارتعاشات ناشی از امواج فراصوتی، با همان سرعت میکروجریان گذرنده از بین ذرات، شتاب گرفته و با هم برخورد کنند. به این ترتیب، توده‌های از ذرات، شکل گرفته و موجب ناپایداری نانوسیال شده‌اند. با افزایش مدت زمان موج‌دهی فراصوت، توده بزرگتری از ذرات، تشکیل شده و پایداری نانوسیال افت بیشتری داشته است. افزایش بیش از حد مدت زمان موج‌دهی فراصوت، ممکن است به حدی دمای نانوسیال را افزایش دهد که منجر به تبخیر آن گردد.

نکته قابل توجه دیگر در شکل ۹، آن است که با افزایش غلظت ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات تا مقدار ۰/۱ درصد وزنی، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات در نانوسیال کاهش یافته است اما با افزودن مقدار بیشتری از این ماده به سیال پایه، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات افزایش یافته است. در توجیه این نتیجه می‌توان از مفهوم پتانسیل زتا استفاده کرد.

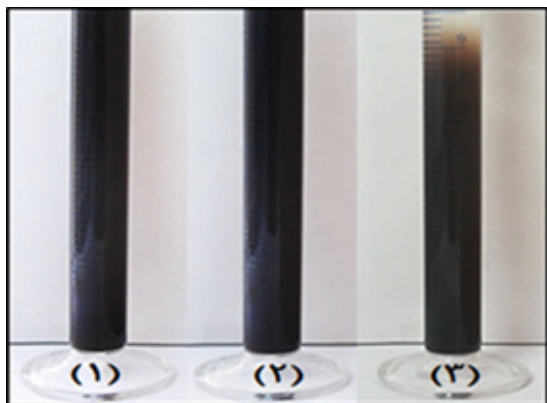
نانوذرات اکسید مس در یک محیط آبی خنثی حامل بار مثبت است. زمانی که سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی در نانوسیال حضور داشته است، کاتیون های سدیم این ماده به سمت سیال پایه جهت‌گیری کرده‌اند و آنیون های سولفات آن در اثر یونش، از ماده جدا شده و روی سطح نانوذرات که بار مخالف دارند جذب شده‌اند. بنابراین، سطح نانوذرات نیز بار منفی گرفته‌اند. اما مولکول های کافی سدیم دودسیل سولفات برای ایجاد پوشش کامل پایدارکنندگی روی سطح نانوذرات وجود نداشته است. با افزایش غلظت سدیم دودسیل سولفات تا مقدار ۰/۱ درصد وزنی، مولکول های ماده فعال سطحی، پوششدهی بهتری از سطح نانوذرات داشته‌اند. گروه آنیونی به درون لایه داخلی کشیده شده است و به واسطه تقویت بار منفی موجود روی سطح نانوذرات، منجر به افزایش ضخامت لایه مضاعف الکتریکی شده است. در نتیجه، مقدار مطلق پتانسیل زتای سطح ذرات و به موجب آن، پایداری نانوسیال افزایش یافته است. با افزایش غلظت سدیم دودسیل سولفات، غلظت کاتیون های سدیم در لایه پخش، افزایش یافته و منجر به ورود گروه کاتیونی به لایه داخلی شده است. به این ترتیب، بار منفی خالص سطح نانوذرات، کاهش یافته است. در نتیجه، مقدار مطلق پتانسیل زتای سطح نانوذرات و به موجب آن، پایداری نانوسیال نیز کاهش یافته است.

با توجه به شکل ۱۰، با افزایش غلظت ماده فعال سطحی پلی وینیل پیرولیدین تا مقدار ۰/۳ درصد وزنی، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات در نانوسیال، کاهش یافته است اما با افزودن مقدار بیشتری از این ماده به سیال پایه (۰/۵ درصد وزنی)، ارتفاع ته‌نشینی نانوذرات افزایش یافته است (در حدود ۲ سانتیمتر). به منظور توجیه این نتیجه باید به این موضوع توجه داشت که پلی وینیل پیرولیدین، یک ماده فعال سطحی غیر یونی است و بنابراین، قابلیت یونش در سیال پایه را ندارد اما گروه آبدوست آن، شامل اتم اکسیژن است که می‌تواند با آب، پیوند هیدروژنی تشکیل دهد. به این ترتیب، خاصیت پلیمری این ماده موجب می‌شود که روی سطح نانوذرات،

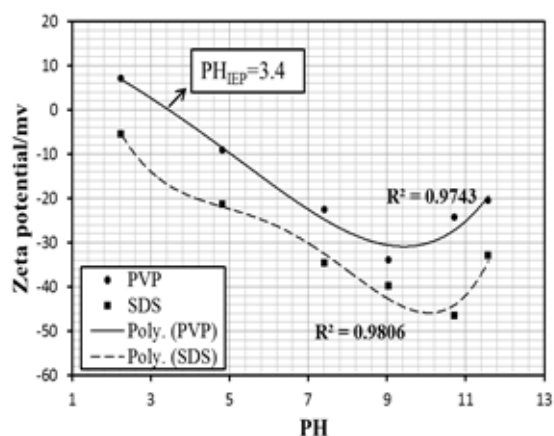
نیز به همان میزان افزایش می‌یابد و در نتیجه، بار منفی خالص روی سطح نانوذرات و به موجب آن، پتانسیل زتای سطح نانوذرات به اندازه قابل توجهی افزایش یافته است. افزایش بیشتر مقدار اسیدیته موجب افزایش بیش از حد غلظت آنیونهای هیدروکسید می‌شود. همانطور که پیشتر نیز به آن اشاره شد، نتیجه نهایی این امر، کاهش پتانسیل زتای سطح نانوذرات است.

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، منحنی های روند به منظور تحلیل رگرسیون ترسیم شده‌اند. با مشخص شدن ضریب تعیین منحنی روند، منحنی پلینومیال درجه ۴، بهترین منحنی برای برازش داده های تجربی هر دو گروه آزمایش بوده است. داده های تجربی این تحقیق نشان داده‌اند که مقدار بهینه اسیدیته برای گروه های الف و ب، به ترتیب، برابر ۱۰/۷۲ و ۹/۰۵ می‌باشد زیرا پتانسیل زتا در این مقادیر اسیدیته، دارای بیشترین مقدار مطلق بوده است. در حالی که، تحلیل رگرسیون، مقدار بهینه اسیدیته را برای آزمایش های گروه الف و ب، به ترتیب، برابر ۱۰/۲ و ۹/۴ پیشبینی کرده است. نتایج نهایی مربوط به شرایط بهینه پایداری در جدول ۹ آورده شده است.

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۹، مدت زمان پایداری هر یک از نانوسیالات دارای شرایط بهینه پایداری، مورد بررسی قرار گرفت. شکل های ۱۲ و ۱۳، نتایج مربوط به این بررسی را به ترتیب، در مورد آزمایش های گروه الف و ب نشان می‌دهند.



شکل ۱۲: تصاویر ته نشینی نانوذرات در نانوسیال دارای شرایط نهایی بهینه پایداری در گروه الف، پس از مدت زمان (۱) ۳۰ روز، (۲) ۴۰ روز و (۳) ۵۰ روز.



شکل ۱۱: اثر مقدار اسیدیته بر پتانسیل زتای سطح نانوذرات اکسید مس با غلظت ۱/۰ درصد وزنی در نانوسیال بهینه

یون های کافی هیدروکسید برای آن که به طور کامل در تعادل با یون های هیدروژن در سطح خارجی ذره باشند، وجود دارد. این تعادل موجب شده است تا عملاً بار خالصی روی سطح نانوذرات وجود نداشته باشد و این به معنای آن است که پتانسیل زتای سطح نانوذره در این حالت (نقطه ایزوالکتریک) صفر است (مقدار ۳/۴). با افزایش مقدار اسیدیته نانوسیال، غلظت آنیون های هیدروکسید در نانوسیال، بیشتر و بیشتر شده است و در نتیجه، به دلیل ناکافی بودن کاتیون های هیدروژن، بار منفی اضافی به وجود آمده است. به این ترتیب، با تقویت بار منفی روی سطح نانوذره، مقدار پتانسیل زتای سطح ذره نیز مقدار منفیتری گرفته است. اما در یک مقدار اسیدیته مشخص (مقدار ۹/۰۵)، افزایش بیشتر اسیدیته موجب افزایش بیش از حد غلظت آنیونهای هیدروکسید شده است که منجر به تراکم لایه مضاعف الکتریکی می‌شود. به این ترتیب، بار منفی خالص روی سطح نانوذره، کاهش یافته و در نتیجه، پتانسیل زتای سطح نانوذره نیز کاهش می‌یابد.

زمانی که از سدیم دودسیل سولفات به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، از یک سو، نشست آنیون های سولفات که گروه آگریز ماده فعال سطحی هستند و از سوی دیگر، تفکیک گروه های اسیدی روی سطح نانوذرات موجب شده است تا پتانسیل زتای سطح نانوذرات در ابتدا مقداری منفی داشته باشد. با افزایش هرچه بیشتر مقدار اسیدیته تا یک مقدار مشخص (مقدار ۱۰/۷۲)، غلظت آنیون های هیدروکسید

#### جدول ۹: نتایج نهایی شرایط بهینه پایداری برای نانوسیال اکسید مس با غلظت ۱/۰ درصد وزنی

آزمایش	سرعت	مدت زمان	غلظت	مدت زمان
	پخش نانوذره	پخش نانوذره	ماده فعال سطحی	موج‌دهی فراصوت
	(دور بر دقیقه)	(دقیقه)	(درصد وزنی)	(دقیقه)
الف	۷۰۰	۹۰	۰/۱	۶۰
ب	۷۰۰	۱۵۰	۰/۳	۶۰

استفاده شده است، مقدار بهینه هر یک از این عوامل، به ترتیب، ۷۰۰ دور بر دقیقه، ۱۵۰ دقیقه، ۰/۳ درصد وزنی و ۶۰ دقیقه بوده است.

۳- برای تعیین میزان تأثیر عوامل بر پایداری نانوسیال، از تحلیل واریانس استفاده شده است. نتایج نشان دادند، زمانی که از سدیم دودسیل سولفات به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، میزان تأثیر عوامل سرعت دورانی پخش و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، غلظت ماده فعال سطحی و مدت زمان موجهی فراصوت بر پایداری نانوسیال، به ترتیب، ۴، ۲۷، ۲۸ و ۴۱ درصد بوده است. در حالی که، وقتی از پلی وینیل پیرولیدن به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، میزان تأثیر این عوامل بر پایداری نانوسیال، به ترتیب، ۵، ۲۱، ۳۲ و ۴۲ درصد بوده است. بر این اساس، به نظر می‌رسد، مدت زمان موجهی فراصوت، نقش بسیار مهمی در پایداری نانوسیال ایفا می‌کند اما سرعت دورانی پخش نانوذرات در سیال پایه، نقش چندان قابل توجهی در پایداری نانوسیال ندارد.

۴- با در اختیار داشتن چهار عامل، تعداد ۶ تداخل بین دو عامل در نظر گرفته شد. میزان تأثیر هر تداخل در پاسخ با شاخص شدت تعیین شد. تحلیل آماری نتایج نشان داد که میزان تداخل دو عامل سرعت دورانی و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، بیشترین تأثیر را بر ارتفاع تهنشینی نانوذرات در نانوسیال داشته است.

۵- با افزایش سرعت دورانی پخش نانوذرات در سیال پایه، ارتفاع تهنشینی نانوذرات، کاهش یافته است اما این کاهش، چشمگیر نبوده است.

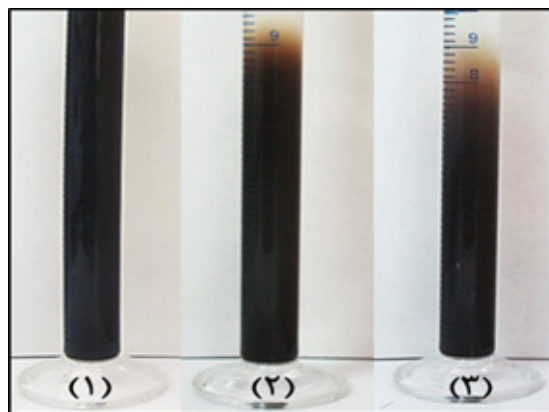
۶- زمانی که از سدیم دودسیل سولفات به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، با افزایش مدت زمان پخش نانوذرات تا ۹۰ دقیقه، ارتفاع تهنشینی نانوذرات، کاهش یافته است. اما مدت طولانی تر منجر به افزایش ارتفاع تهنشینی نانوذرات شده است. زمانی که از پلی وینیل پیرولیدن به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، با افزایش مدت زمان پخش نانوذرات، ارتفاع تهنشینی نانوذرات به طور پیوسته کاهش یافته است.

۷- با افزایش غلظت ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات تا ۰/۱ درصد وزنی، ارتفاع تهنشینی نانوذرات کاهش می‌یابد. اما غلظت های بالاتر، ارتفاع تهنشینی نانوذرات را افزایش داده‌اند. نتیجه مشابهی در مورد ماده فعال سطحی پلی وینیل پیرولیدن در غلظت ۰/۳ درصد وزنی، حاصل شده است.

۸- با افزایش مدت زمان موجهی فراصوت تا ۶۰ دقیقه، ارتفاع تهنشینی نانوذرات، کاهش یافته است اما مدت زمان طولانی تر منجر به افزایش ارتفاع تهنشینی نانوذرات شده است.

۹- تأثیر مقدار اسیدیته به عنوان یک عامل حیاتی بر پایداری نانوسیال بررسی شده است. با مشخص شدن ضریب تعیین منحنی روند ترسیم شده در نمودار تأثیر مقدار اسیدیته بر پتانسیل زتای سطح نانوذرات، منحنی پلینومیال درجه ۴، بهترین منحنی برای برازش داده‌های تجربی مربوطه بوده است.

۱۰- نتایج تحلیل رگرسیون نشان می‌دهند که؛ زمانی که از سدیم



شکل ۱۳: تصاویر ته نشینی نانوذرات در نانوسیال دارای شرایط نهایی بهینه پایداری در گروه ب، پس از مدت زمان (۱) ۳۰ روز، (۲) ۴۰ روز و (۳) ۵۰ روز.

همانطور که مشاهده می‌شود، نانوسیال دارای شرایط بهینه پایداری در گروه الف، برای مدت زمان حداقل ۴۰ روز پایداری خود را حفظ کرده است. در حالی که، مدت زمان پایداری نانوسیال گروه ب، حداقل ۳۰ روز بوده است. بنابراین، ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات دارای توانایی بالاتری در پایداری نانوسیال اکسید مس با غلظت ۰/۱ درصد وزنی و بر پایه آب یونزدایی شده، بوده است. این نتیجه، با توجه به شکل ۱۱ نیز قابل توجه است زیرا در شرایط بهینه پایداری، نانوسیال گروه الف، مقدار پتانسیل زتای بیشتری نسبت به نانوسیال گروه ب داشته است.

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به آزمایش های انجام شده در این تحقیق، نتایج زیر قابل ارائه هستند:

۱- آزمایش ها با هدف تعیین میزان و نحوه تأثیر عوامل، سرعت دورانی پخش و مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، غلظت مواد فعال سطحی و مدت زمان موجهی فراصوت بر پایداری نانوسیال و همچنین تعیین مقدار بهینه این عوامل طراحی شدند. بر این اساس، با در نظر گرفتن هر یک از این عوامل در چهار سطح، یک آرایش متعامد L-16 برای طراحی آزمایش ها در قالب دو گروه الف و ب به کار برده شد. میزان ارتفاع ته نشینی نانوذرات در نانوسیال، پس از مدت زمان یک هفته نیز به عنوان پاسخ آزمایش در نظر گرفته شد.

۲- تحلیل آماری نتایج به کمک روش تاگوچی و با اجرای نرمافزار کوالیتک-۴ انجام گرفت. در این رابطه، برای تعیین مقدار بهینه عوامل، از روش محاسبه اثر متوسط عوامل با در نظر گرفتن مشخصه کیفی کمتر-بهرتر استفاده شد. نتایج نشان دادند که؛ زمانی که از سدیم دودسیل سولفات به عنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است، مقدار بهینه هر یک از عوامل، سرعت دورانی پخش نانوذرات، مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه، غلظت ماده فعال سطحی و مدت زمان موجهی فراصوت، به ترتیب، ۷۰۰ دور بر دقیقه، ۹۰ دقیقه، ۰/۱ درصد وزنی و ۶۰ دقیقه بوده است و زمانی که از پلی وینیل پیرولیدن به عنوان ماده فعال سطحی

## ۷- مراجع

- [1] Choi, S.U.S., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, In developments and applications of non-newtonian flows", ASME Fluids Engineering Division (FED), Vol. 66, pp. 99- 103, 1995.
- [2] Das Sarit Kumar, P.N., Peter, T., Wilfried, R., "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids", Heat Transfer Journal, Vol. 125, pp. 8, 2003.
- [3] Kwak, K., Kim, C., "Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol", Korea-Australia Rheol Journal, Vol. 17, pp. 35- 40, 2005.
- [4] Li, C.H., Peterson, G.P., "Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions", Appl. Phys Journal, Vol. 99, 2006.
- [5] Zhu, H.T., Zhang, C.Y., Tang, Y.M., Wang J.X., "Novel synthesis and thermal conductivity of CuO nanofluid", Phys. Chem Journal, Vol. 111, pp. 1646, 2007.
- [6] Sahooli, M., Sabbaghi, S., "CuO nanofluids, The synthesis and investigation of stability and thermal conductivity", Journal of Nanofluids, Vol. 1, pp. 155-160, 2012.
- [7] Rohini Priya, K., Suganthi, K.S., Rajan, K.S., "Transport properties of ultra-low concentration CuO-water nanofluids containing non-spherical nanoparticles", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, pp. 4734- 4743, 2012.
- [8] Sahooli, M., Sabbaghi, S., "Investigation of thermal properties of CuO nanoparticles on the ethylene glycol-water mixture", Materials Letters, Vol. 93, pp. 254- 257, 2013.
- [9] Naraki, M., Peyghambarzadeh, S.M., hashemabadi, S.H., Vermahmoudi, Y., "Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator", International Journal of Thermal Science, Vol. 66, pp. 82- 90, 2013.
- [10] Witharana, S., Palabiyik, I., Musina, Z., Ding, Y., "Stability of glycol nanofluids, The theory and experiments", Powder Technology, Vol. 239, pp. 72-77, 2013.
- [11] Ghadimi, A., Metselaar, I.H., "The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 51, pp. 1- 9, 2013.

دودسیل سولفات به عنوان عامل پایدارکننده استفاده شده است، نانوسیال در مقدار اسیدیته برابر ۱۰/۲ دارای بالاترین مقدار مطلق پتانسیل زتا بوده و در نتیجه، بهترین وضعیت پایداری را داراست. در حالی که، نتایج تجربی نشان دادند که این مقدار برابر ۱۰/۷۲ بوده است (۵ درصد خطا). همچنین، زمانی که از پلی ویتیل پیرولیدن به عنوان عامل پایدارکننده استفاده شده است، بالاترین مقدار مطلق پتانسیل زتا و در نتیجه، بهترین وضعیت پایداری، در مقدار اسیدیته برابر ۹/۴ حاصل می‌شود و این در حالی است که نتایج تجربی، این مقدار را برابر ۹/۰۵ گزارش داده‌اند (۴ درصد خطا). علاوه بر این، نانوسیال در این حالت، در مقدار اسیدیته برابر ۳/۴ دارای پتانسیل زتای صفر بوده و در نتیجه در ناپایداریترین وضعیت خود قرار داشته است (نقطه ایزوالکتریک).

۱۱- با مقایسه مدت زمان پایداری نانوسیالات دارای شرایط بهینه پایداری نهایی، نانوسیال شامل ۰/۱ درصد وزنی نانوذرات اکسید مس و ۰/۱ درصد وزنی ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات که سرعت پخش نانوذرات و مدت زمان پخش نانوذرات در آن، به ترتیب، ۷۰۰ دور بر دقیقه و ۹۰ دقیقه بوده و به مدت یک ساعت در معرض موجدهی فراصوت قرار گرفته است، بهترین نمونه از لحاظ پایداری بوده است که برای مدت زمان حداقل ۴۰ روز، شرایط پایداری خود را حفظ کرده است. برای بهره‌گیری از عمده قابلیت‌های نانوسیال، به ویژه، خواص انتقال حرارتی آن، بررسی پایداری نانوسیال در اولویت قرار دارد. در نتیجه، نانوسیال با پایداری طولانی مدت می‌تواند مورد توجه بسیاری از صنایع، به ویژه، صنایعی که به نوعی با مسأله انتقال حرارت روبرو هستند، قرار گیرد. در این تحقیق، با بررسی میزان تأثیر برخی عوامل موثر بر پایداری نانوسیال و تعیین مقدار بهینه این عوامل، نانوسیال با پایداری حداقل ۴۰ روز حاصل شد که نسبت به مطالعات پیشین در زمینه پایداری نانوسیالات اکسید مس، نتیجه قابل توجهی به شمار می‌آید. بنابراین، در این راستا به محققان محترم پیشنهاد می‌شود که در بررسی پایداری هر نانوسیال، میزان تأثیر عوامل مورد نظر بر پایداری، اثر تداخل عوامل و مقدار بهینه‌ی هر یک از عوامل را در نظر بگیرند.

## ۶- تقدیر و تشکر

نویسنده این مقاله، وظیفه خود می‌داند که از تمامی مسئولین پژوهشگاه مواد و انرژی کرج که همکاری لازم را جهت اجرای تحقیق داشته‌اند، صمیمانه تشکر نماید.

## فهرست علائم

$C_s$	غلظت ماده فعال سطحی (درصد وزنی)
$T_d$	مدت زمان پخش نانوذرات در سیال پایه (دقیقه)
$T_u$	مدت زمان موجدهی فراصوت (دقیقه)
	علائم یونانی
$\omega$	سرعت دورانی پخش نانوذرات در سیال پایه (دور بر دقیقه)

- silver nanoparticles with flake-like shapes”, *Materials Letters*, Vol. 59, pp. 1760- 1763, 2005.
- [19] Karthik, V., Ghosh, S., Pabi, S.K., “Effects of bulk stoichiometry and surface state of NiAl nano-dispersoid on the stability and heat transfer characteristics of water based nanofluid”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 48, pp. 156- 162, 2013.
- [20] Xuan, Y., Li, Q., “Investigation on convection heat transfer and flow features of nanofluids”, *Heat Transfer Journal*, Vol. 125, pp. 151, 2005.
- [21] Sato, M., Abe, Y., Urita, Y., Di Paola, R., Cecere, A., Savino, R., “Thermal performance of self-wetting fluid heat pipe containing dilute solutions of polymer-capped silver nanoparticles synthesized by microwave”, In *Proceedings of ITP, Polyol Process*, 2009.
- [22] Lee, K., Hwang, Y.H., Cheong, S., Kwon, L., Kim, S., Lee, J., “Performance evaluation of nanolubricants of fullerene nanoparticles in refrigeration mineral oil”, *Curr. Appl. Phys.*, Vol. 9, pp. 128- 131, 2009.
- [23] Montgomery, D.C., “Design of experiments”, New York, pp. 225- 364, 1995.
- [24] Kim, N., Park, S., Lim. S., Chun, W., “A study on characteristics of carbon nanofluids at the room temperature”, *International communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 313- 318, 2011.
- [25] Roy, R.K., “A primer on the Taguchi method”, Van Nostrand Reinhold, pp. 23- 27, 1990.
- [12] Cole, M., Dey, T.K., “Effect of prolonged ultrasonication on the thermal conductivity of ZnO/ ethylene glycol nanofluids”, *thermochimica Acta*, Vol. 535, pp. 58- 65, 2012.
- [13] Emami Meibodi, M., Vafaie-Sefti, M., Rashidi, A., Amrollahi, A., Tabasi, M., Sid Kalal, H., “The role of different parameters on the stability and thermal conductivity of carbon nanotube-water nanofluids”, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 319- 323, 2010.
- [14] Tajik, B., Abbassi, A., Saffar-Avval, M., Ahmadi Najafabadi, M., “Ultrasonic properties of suspensions of TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in water”, *Powder Technology*, Vol. 217, pp. 171- 176, 2012.
- [15] Mondragon, R., Enrique Julia, J., Barba, A., Jarque, A., “Characterization of silica-water nanofluids dispersed with an ultrasound probe, a study of their physical properties and stability”, *Powder Technology*, Vol. 224, pp. 138- 146, 2012.
- [16] Hwang, Y., Lee, J., Jeong, Y., Cheong, S., Ahn, Y., Kim Soo, H., “Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids”, *Powder Technology*, Vol. 186, pp. 145- 153, 2008.
- [17] Halelfadl, S., Estelle, P., Aladag, B., Doner, N., Mare, T., “Viscosity of carbon nanotubes water based nanofluids, Influence of concentration and temperature”, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 71, pp. 111- 117, 2013.
- [18] Wang, D., Song, C., Hu, Z., Zhou, X., “Synthesis of