

## افزایش پایداری نانوسیالات و روش‌های تخمین آن

بهمن رحمتی نژاد<sup>۱\*</sup>، فرزین عظیم پور شیشوان<sup>۲</sup>

۱- مربی؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

نانوذرات موادی هستند که حداقل یکی از ابعادشان (طول، عرض، ارتفاع) در مقیاس نانو (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) باشد. نانوسیالات از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند. سیالات رایج، نظیر آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول که معمولاً در انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند و توانایی محدودی از لحاظ خواص حرارتی دارند. خواص جالب نانوسیالات (مانند ضریب انتقال حرارت بالا) و پتانسیل زیادی که برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند، سبب شده که این گروه از سیالات در سال‌های اخیر در کانون توجه محققان قرار گیرند. یکی از فاکتورهای کلیدی در بهینه‌شدن خواص این دسته از سیالات مسئله‌ی پایداری آن‌هاست. اجتماع ذرات و کلوخه‌شدن آن‌ها باعث افزایش احتمال ته‌نشینی می‌شود، پایداری سوسپانسیون را کاهش می‌دهد و موجب از بین رفتن ویژگی‌های سوسپانسیون، از جمله هدایت حرارتی، ویسکوزیته و افزایش ظرفیت حرارتی می‌شود. در این تحقیق، روش‌های افزایش پایداری و ابزارهای بازرسی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده‌ی همزمان از ارتعاش مافوق صوت و مواد فعال‌کننده‌ی سطح (سورفکتانت) تأثیر بسزایی در پایداری نانوسیالات دارد و دو روش استفاده از پراکنش نور DLS و روش طیف‌سنجی جذبی فرابنفش - مرئی به‌منظور بررسی پایداری توسط محققین زیادی در تحقیقات خود مورد استفاده قرار گرفته است.

### کلمات کلیدی

نانوسیالات، نانوذرات، پایداری نانوسیالات، تخمین پایداری نانوسیالات

## Increasing the stability of nanofluids and its estimation methods

Bahman Rahmatinejad<sup>1\*</sup>, Farzin Azimpour<sup>2</sup>

1- PhD, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### Abstract

Nanoparticles are materials which have at least one of their dimensions (length, width, height) at the nano scale (among 1 and 100 nm). Nanofluids are obtained from the distribution of particles with nano dimensions in normal fluids. Common fluids such as water, oils and ethylene glycol, which are usually used in heat transfer, have limited ability in terms of thermal properties. The interesting properties of nanofluids (such as high heat transfer coefficient) and the great potential they show for increasing heat transfer have caused this group of fluids to be in the focus of researchers' attention in recent years. One of the key factors in optimizing the properties of these fluids is their stability. The gathering of particles and their agglomeration increases the possibility of sedimentation, reduces the stability of the suspension, and causes the loss of the properties of the suspension, such as thermal conductivity, viscosity, and increase in heat capacity. In this research, methods of increasing stability and inspection tools were investigated. The results showed that the simultaneous use of ultrasonic vibration and surface activating substances (surfactant) has a significant effect on the stability of nanofluid. And two methods of using DLS light scattering and ultraviolet-visible absorption spectrometry have been used by many researchers in their research in order to check stability.

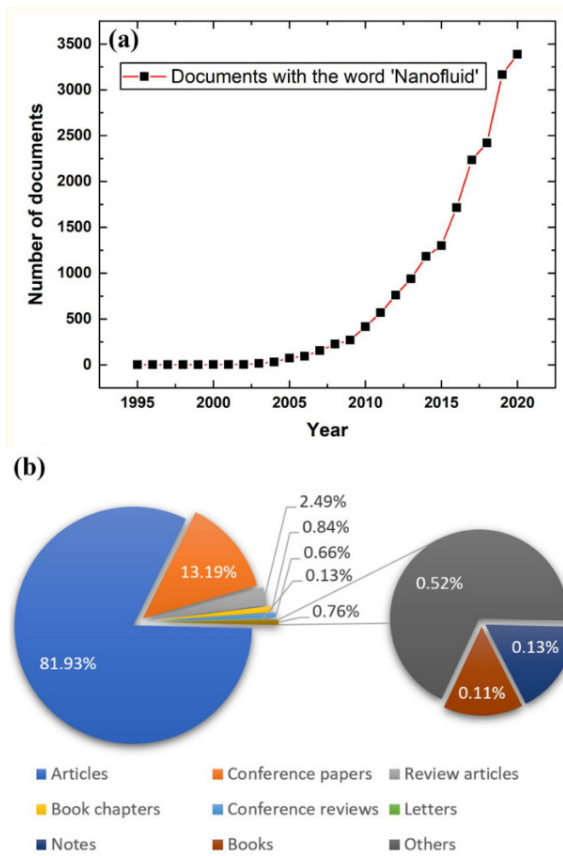
### Keywords

Nanofluid, nanoparticles, nanofluid stability, estimation of nanofluid stability

## ۱- مقدمه

برای سیال‌های واسط انتقال حرارت متداول باشند و به عنوان نسل بعدی سیالات انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرند. لذا مطالعات تجربی و عددی زیادی جهت بررسی رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی این سیالات در سیستم‌های حرارتی مختلف انجام گرفته است. خواص جالب نانوسیال‌ها (مانند ضریب انتقال حرارت بالا) و پتانسیل زیادی که برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند، سبب شده که این گروه از سیالات در سال‌های اخیر در کانون توجه محققان قرار گیرند [۳ و ۴]. با پیشرفت روزافزون فناوری نانو و گسترش شاخه‌های کاربرد این فناوری در علوم مختلف، اخیراً استفاده از نانوسیالات به عنوان راهبردی جدید در عملیات انتقال حرارت مطرح شده و تحقیقات زیادی در این خصوص انجام شده است.

بهینه‌سازی و افزایش بازده سیستم‌های انتقال حرارت یکی از اساسی‌ترین چالش‌های مهندسان و طراحان طی سالیان اخیر بوده است [۱]. سیالات رایج، نظیر آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول که معمولاً به عنوان واسط انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند، توانایی محدودی از لحاظ خواص حرارتی دارند که اولین مانع برای فشرده‌کردن و بالا بردن راندمان مبدل‌های حرارتی می‌باشد [۲]. یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت افزودن نانوذرات فلزی، مانند  $Al_2O_3$  و  $CuO$  و . . . به سیال پایه‌ی آب و مخلوط اتیلن گلیکول است. این روش در مورد سیالاتی که از ذرات با اندازه‌ی میلی‌متر یا میکرومتر استفاده می‌کنند، به دلیل پایداری کم، ته‌نشینی سریع، ایجاد انسداد و گرفتگی مسیر جریان، ایجاد سایش و فرسایش سریع دیواره‌ی لوله و تجهیزات و افزایش شدید افت فشار در جریان سیال مورد استقبال قرار نگرفت. در سال ۱۹۹۵ میلادی، چوی گونه‌ی جدیدی از سیال با نام سیال نانو را معرفی کرد که از یک سیال پایه که حاوی ذرات جامد در اندازه‌ی نانو با ضریب رسانایی بالا و نسبت حجمی کم بود، تشکیل شده بود [۳]. تحقیقات نشان داد که نانوسیال‌ها رفتار کاملاً متفاوتی نسبت به مخلوط سیال‌های رایج با ذرات میلی‌متری و میکرومتری دارند. در مقایسه با مخلوط‌های شامل ذرات معلق میلی‌متری و میکرومتری، مخلوط شامل ذرات نانومتری، پایداری و خواص جریانی بهتری را از خود نشان می‌دهند [۲]. همچنین ضریب انتقال حرارت هدایتی بسیار بالاتری را هم نشان می‌دهند و در عین حال افت فشار خاصی هم دیده نمی‌شود؛ به این ترتیب شاخه‌ی جدیدی در علوم مهندسی حرارتی ایجاد شده و به نظر می‌رسد که سیالات نانو به دلیل قابلیت مناسب در افزایش انتقال حرارت، جایگزین مناسبی

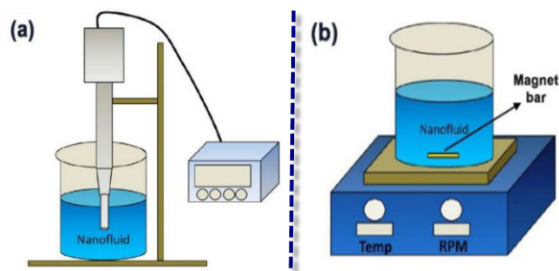


شکل ۱: نتیجه‌ی جستجو از پایگاه Scopus در مورد نانوسیالات که در آن (a) تعداد آثار منتشرشده در سال را نشان می‌دهد و (b) درصد هر نوع از این اسناد را نشان می‌دهد [۵]

شکل ۲ اثر خوشه‌شدن و درصد حجمی را بر روی ضریب هدایت حرارتی نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش درصد حجمی نانوذرات احتمال خوشه‌شدن وجود دارد و همچنین هر چقدر نانوذرات به‌صورت خوشه‌ای تبدیل شوند، ضریب هدایت حرارتی کاهش پیدا خواهد کرد. برای افزایش پایداری در نانوسیالات می‌توان از روش‌های ارائه‌شده در ادامه استفاده کرد.

## ۲-۱- استفاده از همزن برقی و تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی

بی‌شک اولین و ساده‌ترین روش جهت مخلوط‌کردن نانوسیال استفاده از همزن برقی می‌باشد. برای حفظ پایداری بیشتر می‌توان بعد از استفاده از همزن برقی، از تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی نیز استفاده کرد. رحمتی‌نژاد و همکاران برای تهیه‌ی نانوسیال از یک همزن برقی با قابلیت تنظیم دور از ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه استفاده کردند و سپس از یک تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه و قدرت گرمایش ۴۰۰W استفاده کردند [۷].



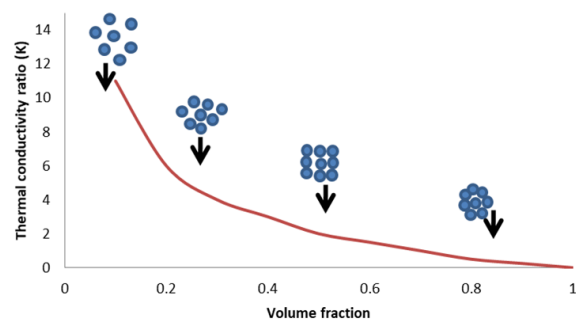
شکل ۳: (a) همزن برقی (b) تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی [۸]

با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از همزن برقی و سپس تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی جهت مخلوط‌کردن نانوسیال، باعث پایداری بیشتر نانوسیال می‌شود. به‌طوری‌که بدون اضافه کردن هیچ تثبیت‌کننده‌ای تا ساعت‌ها می‌توان نانوسیال را پایدار نگاه داشت.

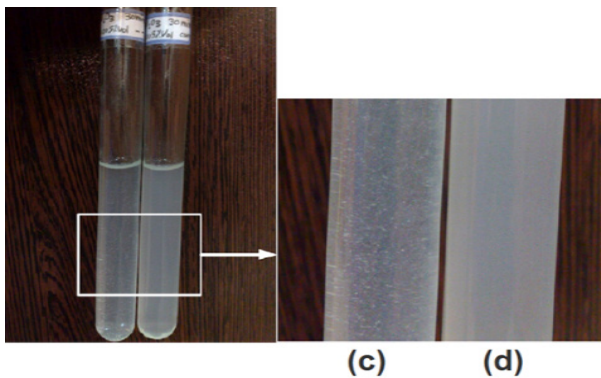
اما مشکل عمده‌ی این سیالات بحث پایداری بلندمدت آنان می‌باشد که کاربرد آن‌ها را در مصارف صنعتی با محدودیت مواجه کرده است. در این تحقیق، روش‌های افزایش پایداری و همچنین روش‌های کنترل پایداری مورد بحث قرار گرفته است. با توجه به عدم وجود مطالعات مشابه به‌صورت جامع در این خصوص، و از طرفی ارائه‌ی نتایج ضد و نقیض توسط پژوهشگران در این مورد باعث شد این تحقیق انجام شود.

## ۲-۲- روش‌های افزایش پایداری نانوسیالات

تهیه‌ی سوسپانسیون یک‌نواخت و پایدار تأثیر بسزایی در بهبود خواص حرارتی نانوسیال دارد. یکی از مواردی که بر پایداری نانوسیال تأثیر می‌گذارد، پدیده‌ی تشکیل خوشه یا تجمع ذرات می‌باشد که باعث ته‌نشینی این ذرات می‌شود. پدیده‌ی خوشه‌شدن از دو جهت ممکن است اثر منفی روی نانوسیال داشته باشد. این پدیده با ایجاد توده‌های بزرگ ممکن است باعث عدم پایداری سوسپانسیون شود و همچنین با ایجاد نواحی خالی از ذرات نانو در مایع و بالا رفتن مقاومت گرمایی، باعث کاهش انتقال گرما شود. این موضوع در (شکل ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: اثر خوشه‌شدن و درصد حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی [۶]



شکل ۵: تصویر SEM از نانوذرات  $Al_4O_3$  بعد از (a) ۳۰ min  
اولتراسونیک مداوم، (b) اولتراسونیک ناپیوسته، (c) نمونه‌ی در معرض اولتراسونیک ناپیوسته [۱۰]

با توجه به شکل ۵ مشخص است که استفاده از اولتراسونیک ناپیوسته باعث سوسپانسیون بهتر می‌شود. به طوری که در شکل ۵- (c)، به علت استفاده‌ی ناپیوسته از دستگاه اولتراسونیک شاهد خوشه‌ای شدن نانوذرات هستیم.

### ۲-۳- افزودن موارد فعال کننده‌ی سطح (سورفکتانت)

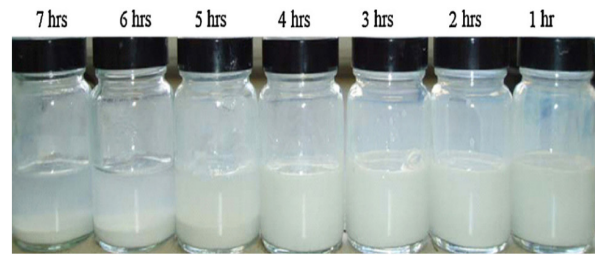
افزودن ماده‌ی فعال سطحی در نانوسیال روشی ساده و مقرون به صرفه برای افزایش پایداری نانوسیال است. مواد فعال سطحی به طور قابل ملاحظه‌ای بر مشخصه‌ی سطح آبدوست و یک سر آب‌گریز هستند. مواد فعال سطحی را بر اساس ترکیب سر آبدوست به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌کنند:

الف: غیر یونیکه‌ی گروه باردار در سر آبدوست وجود ندارد.

ب: آنیونی با گروه باردار منفی.

ج: کاتیونی با گروه باردار مثبت.

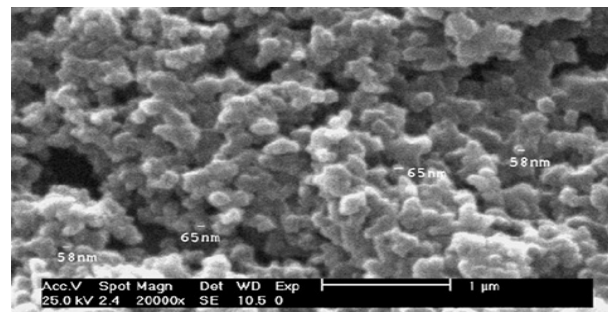
د: آمفوتر (دوخصلتی) که بار سر آبدوست می‌تواند مثبت یا منفی باشد.



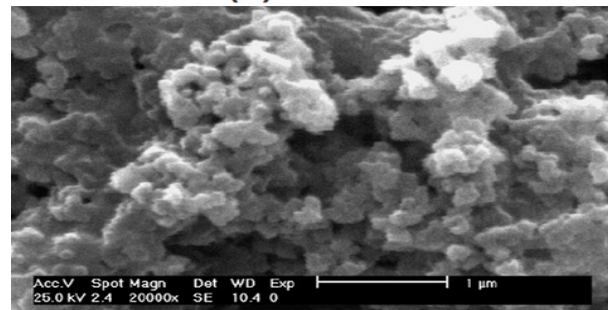
شکل ۴: آزمایش پایداری نانوسیال  $Al_4O_3$  نسبت به زمان (بدون اضافه کردن هیچ تثبیت کننده‌ای) [۹]

## ۲-۲- استفاده از ارتعاش مافوق صوت

به منظور افزایش پایداری نانوسیال می‌توان از لرزاننده‌های فراصوت استفاده کرد. در این روش، امواج فراصوت سبب از بین رفتن پیوندهای سطحی ضعیف میان نانوذرات شده و در نتیجه پایداری نانوسیال را افزایش می‌دهند. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها، از جمله مغناطیسی و همزن برقی مفیدتر است؛ بنابراین توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



(a)

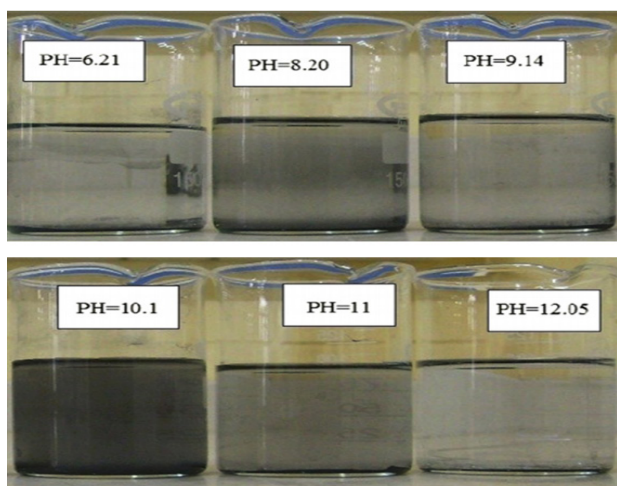


(b)

دودسیل سولفات به عنوان سورفکتانت، حتی پس از ۱۰ روز پایداری خود را حفظ کرده است. رحمتی‌نژاد در تحقیق خود به منظور حفظ پایداری محلول، برای اینکه برای کارهای مهندسی مناسب باشد، از ۱٪ وزنی مواد فعال‌کننده‌ی سطحی (سدیم دودسیل بنزن سولفونات) در نانوسیال  $Al_2O_3$  استفاده کرد [۱۴].

## ۲-۴- تغییر اسیدیته

پایداری یک نانوسیال ارتباط مستقیمی با خواص الکتروستاتیکی آن دارد. به این صورت که اگر در سطح نانوذرات چگالی بار زیاد باشد، به علت نیروی دافعه الکترواستاتیکی، نانوذرات در سیال پایدار خواهند بود؛ بنابراین می‌توان با تنظیم PH نانوسیال، به پایداری مطلوب رسید (شکل ۷) [۱۱].

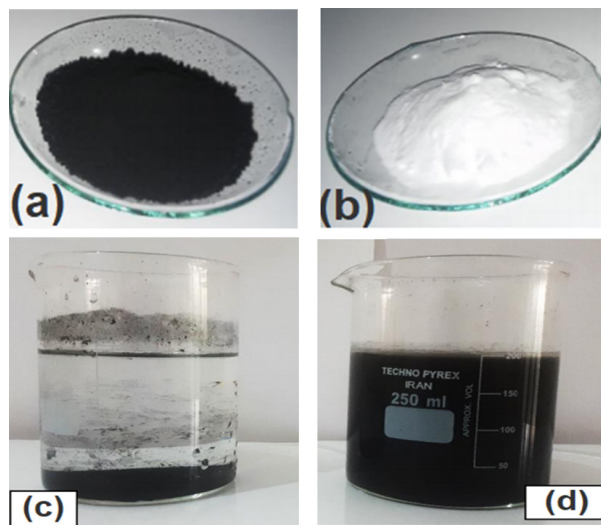


شکل ۷: بررسی تأثیر PH‌های مختلف بر پایداری نانوسیال اکسید مس [۱۵]

## ۳- ابزارهای بازرسی پایداری نانوسیالات

اصلی‌ترین عیب نانوسیالات که کاربردشان را محدود کرده است، عدم تمایل به پراکندگی همگن در فاز مایع است؛ از این رو بحث پایداری نانوسیالات اهمیت بالایی دارد.

برای انتخاب ماده‌ی فعال سطحی مناسب، باید به این نکته توجه کرد که اگر سیال پایه قطبی باشد، از مواد فعال سطحی با سر آب‌دوست و در غیر این صورت، از مواد فعال سطحی‌ای که در روغن محلول هستند، استفاده می‌شود [۱۱]. همچنین در استفاده از این مواد باید دقت کرد؛ زیرا حضور بیش از حد این مواد در نانوسیال خصوصیات نانوسیال را تغییر داده و بر انتقال حرارت اثر می‌گذارد. اگرچه استفاده از مواد فعال سطحی یکی از راه‌های معمول بهبود پایداری نانوسیال است، اما افزودن این مواد به نانوسیال ممکن است سبب بروز مشکلاتی، چون ایجاد کف و کاهش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال شود. همچنین با تخریب پیوند بین ماده‌ی فعال سطحی و نانوذره در دماهای بالای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، پایداری نانوسیال از بین می‌رود [۱۲].



شکل ۸: (a) نانوکربن، (b) سدیم دودسیل سولفات، (c) نانوسیال کربن بدون سورفکتانت، (d) نانوسیال کربن با سورفکتانت [۱۳]

شکل ۸ تفاوت در ته‌نشینی نانوسیال با سورفکتانت و بدون سورفکتانت را نشان می‌دهد. نانوسیال بدون سورفکتانت پس از گذشت مدت زمان حدود ۶ ساعت به‌طور کامل ته‌نشین شده است، در حالی که نانوسیال حاوی سدیم

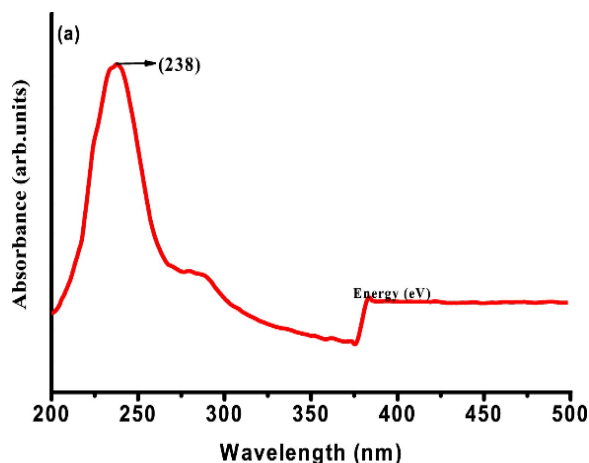
### ۳-۲- اعمال میدان خارجی و ته‌نشینی

در این روش، مقدار وزن یا حجم رسوب نانوذرات در نانوسیال تحت نیروی میدان خارجی گرانشی یا سانتریفیوژ، معیاری از پایداری نانوسیال است. به این صورت که هرچقدر مقدار بیشتری از نانوذره رسوب کند، نانوسیال پایداری کمتری دارد.

### ۳-۳- طیف‌سنجی جذبی فرابنفش - مرئی

(UV-Vis spectrophotometry)

این روش یکی از روش‌های آسان بررسی پایداری نانوسیال است. تغییرات غلظت ذرات شناور در نانوسیال، برحسب زمان از طریق اندازه‌گیری جذب نانوسیالات به دست می‌آید؛ چراکه به‌طور کلی یک رابطه‌ی خطی بین شدت جذب و غلظت نانوذرات در سیال وجود دارد. اساس طیف‌بینی جذبی فرابنفش - مرئی، اندازه‌گیری میزان جذب یک پرتو نوری در محدوده‌ی طیفی ناحیه‌ی مرئی از طول موج (۳۸۰-۲۰۰nm) و فرابنفش (۷۷۰-۳۸۰nm) با عبور از درون یک نمونه یا بعد از انعکاس از سطح یک نمونه است. عیب این روش این است که برای نانوسیالات با غلظت بالا مناسب نیست (شکل ۹).

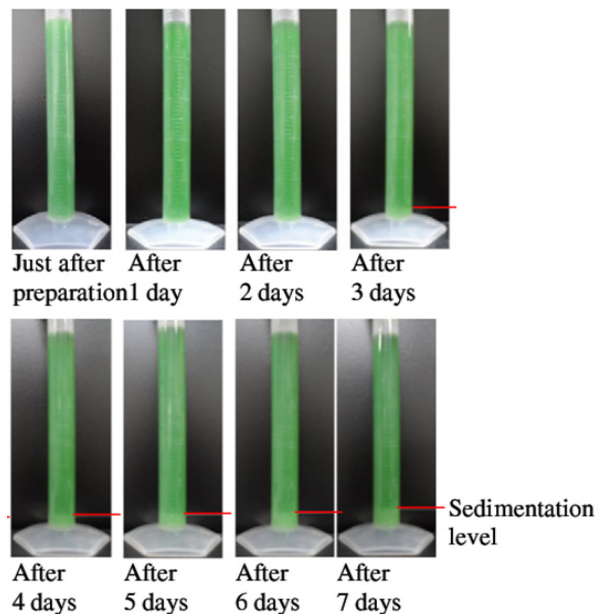


شکل ۹: طیف فرابنفش نانوذرات  $Al_2O_3$  [۱۸]

برای تخمین دقیق پایداری نسبی نانوسیال، به استفاده از چند روش نیاز است و نباید به یکی از این روش‌ها اکتفا کرد که در ادامه چند مورد از این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۱- عکس‌برداری از رسوب

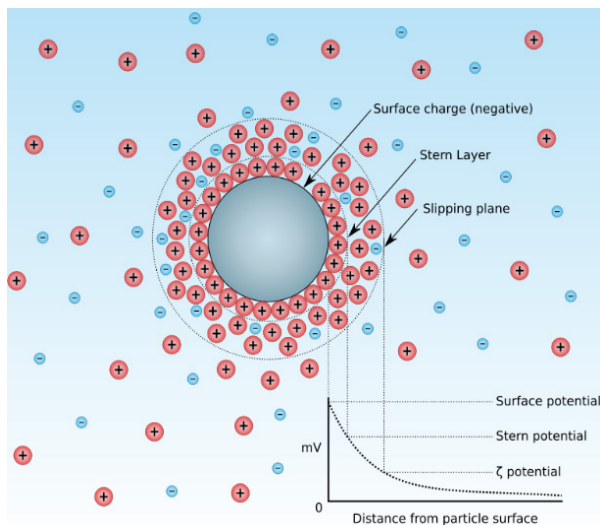
یکی از ساده‌ترین روش‌های بازرسی پایداری نانوسیالات عکس‌برداری از رسوب است. در این روش، پس از آماده‌شدن سوسپانسیون، از آن طی زمان‌های مختلف عکس گرفته می‌شود و میزان رسوب مشخص می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸: بررسی سطح رسوب‌گذاری نانوسیال  $Al_2O_3$  با گذشت زمان [۱۶]

رحمتی‌نژاد و همکاران برای بررسی زمان ته‌نشینی، آزمایش عکس‌برداری از رسوب را برای  $Al_2O_3$  و  $CuO$  انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان از پایداری  $Al_2O_3$  در ۲۲ روز و  $CuO$  در ۲۰ روز اول داشت [۱۷].

است؛ این فاصله را در اصطلاح، فاصله‌ی هیدرودینامیکی می‌نامند و پتانسیلی را که در این فاصله وجود دارد به نام پتانسیل زتا می‌شناسند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: اثر پتانسیل زتا [۲۰]

یکی از مهم‌ترین روش‌های یافتن کیفیت پایداری نانوسیال از طریق رفتار الکتروفوریتیک (حرکت ذرات یک محلول کلئیدی بر اثر جریان الکتریسیته) آن است. بر اساس یک تئوری پایداری، اگر پتانسیل زتا دارای مقدار مطلق بالایی باشد، دافعه‌ی الکترواستاتیک بین ذرات افزایش می‌یابد که این منجر به پایداری خوب سوسپانسیون می‌شود. ذراتی که بار سطحی بالایی دارند، تمایلی به تشکیل خوشه ندارند. معمولاً سوسپانسیون‌های با مقدار مطلق پتانسیل زتای بالای ۳۰ mV از لحاظ پایداری سوسپانسیون خوبی به‌شمار می‌روند (جدول ۱). مشکل این روش این است که آنالیزهای آن برای ویسکوزیته‌ی سیال مبنا محدودیت‌هایی دارد [۲۰].

### ۳-۴- روش موازنه‌ی رسوب

در این روش، سینی تعادل رسوب در نانوسیال تازه فرو می‌رود و وزن رسوب نانوذرات در طی یک پریود زمانی مشخص اندازه‌گیری می‌شود. سپس جزء ذرات رسوب‌کرده در زمان مورد نظر از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود؛  $W_0$  وزن کل نانوذرات در آن بازه‌ی زمانی و  $W$  وزن نانوذرات رسوب‌کرده در بازه‌ی زمانی مورد نظر است [۱۹].

$$F_s = \frac{(W_0 - W)}{W_0} \quad (1)$$

### ۳-۵- تست پتانسیل زتا

همواره ذره در داخل سیال دارای بار سطحی بوده و در اطراف سطح ذره‌ای که درون سیال قرار گرفته است، افزایش غلظت یون‌های با بار مخالف سطح ذره دیده می‌شود؛ بنابراین یک لایه‌ی اضافی از این یون‌ها سطح ذره را احاطه می‌کند و لایه‌ی اضافی دیگری در دور ذره به‌وجود می‌آورد. این لایه‌ی به‌وجودآمده‌ی دور ذره را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد:

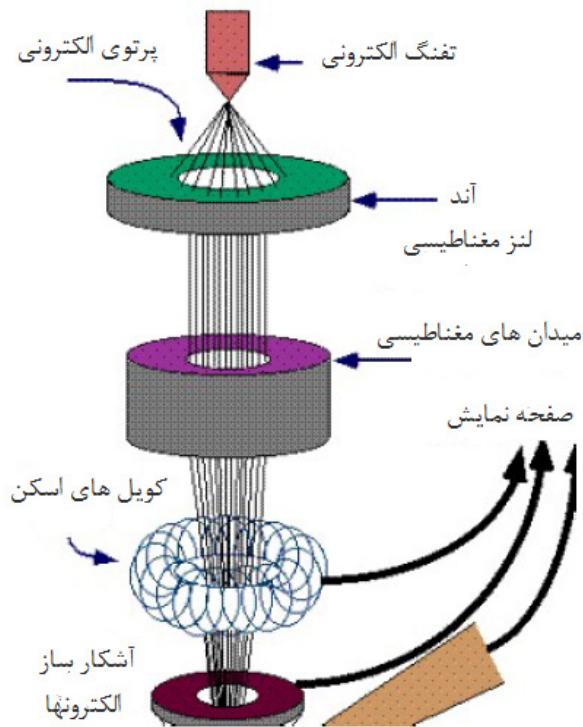
قسمت درونی: شامل یون‌هایی است که به‌صورت قوی با سطح خارجی غشا اتصال پیدا کرده است.

قسمت بیرونی یا ناحیه‌ی پراکنده که یون‌ها در آن قسمت در حالت تعادل یونی به‌سر می‌برند.

وقتی ذره‌ی درون سیال حرکت می‌کند، لایه‌های درونی و بیرونی اطراف آن نیز به همراه ذره جابجا می‌شوند و با ذره حرکت می‌کنند؛ بنابراین می‌توان یک فاصله‌ی فرضی بین ذره و محیط سیال تصور کرد که این فاصله‌ی فرضی همان لایه‌ی مضاعفی است که ذره را احاطه کرده

جدول ۱: مقدار پایداری بر اساس پتانسیل زتا

پایداری	پتانسیل زتا [mV]
پایداری کم (ناپایدار)	۰
پایداری کم با مقداری ته‌نشینی	۱۵
پایداری متوسط	۳۰
پایداری خوب	۴۵
-----	۶۰



شکل ۱۱: شماتیک دستگاه SEM [۲۱]

در روش (TEM)، پرتو الکترونی به بخش بزرگی از نمونه تابیده می‌شود و پرتو الکترونی از نمونه عبور می‌کند. پرتو الکترونی عبوری روی یک صفحه‌ی حساس به پرتو الکترونی تابانده می‌شود و از این طریق تصویر ایجاد می‌شود. برای اینکه پرتو الکترونی بتواند از داخل نمونه عبور کند، ضخامت نمونه باید کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد؛ از این رو برای تصویربرداری از نمونه‌های غیرپودری، نیاز است تا نمونه نازک شود و این امر در برخی موارد بسیار مشکل است. برای نمونه‌های پودری با اندازه‌ی ذرات کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر، نیاز به آماده‌سازی خاصی وجود ندارد.

TEM قدرت بزرگ‌نمایی و تفکیک بالاتری نسبت به SEM دارد، ولی آماده‌سازی نمونه‌های غیرپودری برای TEM هزینه‌بر و زمان‌بر است. SEM از سطح نمونه تصویربرداری می‌کند؛ از این رو برای بررسی پدیده‌های سطحی و بررسی مورفولوژی، باید از SEM استفاده کرد.

### ۳-۶ استفاده از تصاویر TEM و SEM

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از ابزارهای بسیار مفید برای تشخیص شکل، اندازه و توزیع ذرات نانوسیال هستند.

وسیله‌ای است که به کمک آن SEM می‌توان تصویر بزرگ‌تر از نمونه را با کمک الکترون‌ها (به جای نور) خلق کرد. پرتویی از الکترون‌ها به کمک تفنگ الکترونی میکروسکوپ تولید می‌شود. پرتو الکترونی در خلأ به صورت عمودی از میکروسکوپ عبور می‌کند. سپس با عبور از میدان‌های الکترومغناطیسی و لنزهای ویژه به صورت متمرکز به نمونه تابانده می‌شود. به محض برخورد پرتو با نمونه، الکترون‌ها و اشعه‌های ایکس از نمونه خارج می‌شوند. سپس آشکارسازها پرتوهای ایکس، الکترون‌های اولیه و الکترون‌های ناشی از برخورد الکترون‌های اولیه با جسم را جمع‌آوری می‌کنند و آن‌ها را به سیگنال مبدل کرده و به صفحه‌ی نمایش منتقل می‌کنند و به این طریق تصویر نهایی تهیه می‌شود (شکل ۱۱).



### ۳-۷- استفاده از پراکنش نور DLS

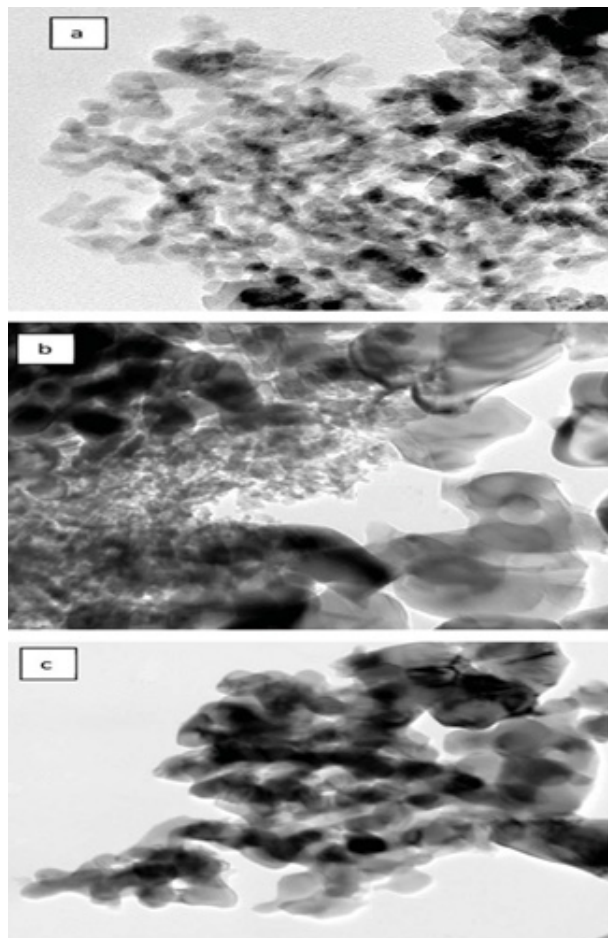
در این روش، یک پرتو لیزر به سوسپانسیون تابانده می‌شود و پراکنندگی نور لیزر توسط یک آشکارساز نوری ثبت می‌شود. ذرات با اندازه‌های مختلف نور را به صورت‌های مختلفی پراکنده می‌کنند. ذرات بزرگ‌تر نور را در زوایای کوچک‌تری پراکنده می‌کنند، در حالی که ذرات کوچک‌تر در محدوده‌ی زوایای وسیع‌تری نور را پراکنده می‌سازند. پراکنندگی نور توسط ذرات جامد باعث ایجاد یک الگوی نقاط روشن و تاریک روی آشکارساز می‌شود. این الگوهای روشن و تاریک با حرکت ذرات تغییر می‌کنند و باعث می‌شوند که الگوی ایجادشده با زمان تغییر کند. نرم‌افزار دستگاه DLS با بررسی تغییرات این الگو با زمان می‌تواند توزیع اندازه‌ی ذرات را مشخص کند. ذرات بزرگ‌تر سرعت کمتری در محلول نسبت به ذرات کوچک‌تر دارند. از این رو تغییرات الگوی پراش در سوسپانسیونی با ذرات بزرگ‌تر کندتر از سوسپانسیونی با ذرات ریزتر تغییر می‌کند [۱۹].

ارتباط بین اندازه‌ی ذرات و سرعت حرکت براونی توسط رابطه‌ی استوکس انیشتین برقرار می‌شود (رابطه‌ی ۲).

$$d_H = \frac{KT}{3\pi\eta D} \quad (2)$$

$d_H$ : قطر هیدرودینامیکی ذره،  $K$ : ثابت بولتزمن،  $\eta$ : ویسکوزیته دینامیکی حلال است که به دما وابسته بوده و به چگالی و فشار سیستم مرتبط نیست.  $T$ : دمای مطلق و  $D$ : ضریب نفوذ است [۲۴].

در شکل ۱۲، تصویر TEM از نانوذرات  $Al_2O_3$  با قطرهای ۲۰ nm، ۵۰ nm و ۱۰۰ nm نشان داده شده است.



شکل ۱۲: تصویر TEM از نانوذرات  $Al_2O_3$  (a) ۲۰ nm، (b) ۵۰ nm، (c) ۱۰۰ nm [۲۲]

رحمتی‌نژاد و عظیم‌پور در تحقیق خود تصاویر TEM را توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری مدل H۹۵۰۰ (دارای رزولوشن بالا و نقطه‌به‌نقطه از ۰/۱۸ نانومتر و وضوح شبکه از ۰/۱ نانومتر) و تصاویر SEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Su۳۵۰۰ شرکت HITACHI (با قدرت تفکیک ۱ تا ۵ نانومتر) گرفتند [۲۳].

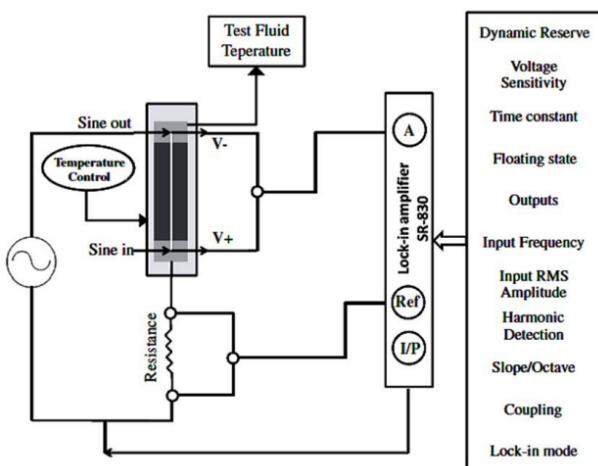
### ۳-۸- استفاده از اسپکتروفتومتر

اسپکتروفتومتری یا طیفسنجی که روش آنالیز آن با طیفسنجی مرئی - فرابنفش یکسان بوده و نتایج مشابهی را گزارش می‌کند، روشی است که با استفاده از عبور نور از یک آنالیت در یک محلول شیمیایی و تعیین میزان جذب و عبور نور از آن به تعیین خصوصیات آن آنالیت و ماده شیمیایی می‌پردازد. نور مورد استفاده طیفی از انرژی الکترومغناطیس است که هر طیف نوری دارای طول موج و فرکانس مشخصی می‌باشد. میزان جذب هر ماده‌ی شیمیایی در طول موج‌های مختلف انرژی الکترومغناطیس متفاوت است. با توجه به این امر، هر ماده‌ی شیمیایی در طول موج خاصی از انرژی الکترومغناطیس حداکثر جذب و حداقل عبور را خواهد داشت که این فرآیند در جهت تعیین خاصیت آن ماده‌ی شیمیایی استفاده می‌شود [۲۵]. همچنین غلظت هر ماده‌ی شیمیایی نیز در میزان جذب طول موج خاصی از امواج الکترومغناطیس تأثیر دارد. به طوری که با افزایش غلظت ماده، میزان جذب در طول موج مشخص افزایش و با کاهش غلظت، میزان جذب کاهش و مقدار نور عبوری افزایش می‌یابد که به نام قانون بیر شناخته می‌شود. در این روش، با استفاده از تأثیر متقابل غلظت ماده و میزان جذب نور عبوری از آن ماده، به تعیین رابطه و معادله‌ی غلظت - جذب هر ماده‌ی شیمیایی می‌پردازند. بر اساس قانون بیر، با افزایش غلظت ماده، میزان جذب در طول موج مشخص افزایش و با کاهش غلظت، میزان جذب کاهش و مقدار نور عبوری افزایش می‌یابد. نتایج این دستگاه برای توصیف کمی پایداری کلئیدی سوسپانسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. پایداری سوسپانسیون اغلب به شکل اندازه‌گیری حجم ته‌نشین شده برحسب زمان

ته‌نشینی بررسی می‌شود. عیب این روش این است که برای نانوسیالات با غلظت بالا، به‌خصوص محلول نانوتیوب‌های کربنی مناسب نیست.

### ۳-۹- استفاده از روش امگا-۳

در این روش، پایداری کلئیدی نانوسیال از طریق یافتن نمو تغییرات ضریب هدایت حرارتی در محدوده‌ی وسیعی از کسرهای حجمی نانوذرات مشخص می‌شود. دامنه‌ی استفاده از این روش در تحقیقاتی که تاکنون انجام گرفته محدود است [۱۹]. مشابه روش سیم داغ، روش امگا-۳ با استفاده از یک جریان شعاعی گرما در یک المنت که در عمل، هم به عنوان هیتر، و هم به عنوان دماسنج استفاده می‌شود، عمل می‌کند [۱۹ و ۲۰]. استفاده از نوسانات دما به جای پاسخ وابسته به زمان، تفاوت عمده‌ی این روش نسبت به سیم داغ گذراست. مطابق شکل ۱۳، جریان سینوسی با فرکانس  $\omega$  از طریق سیم فلزی عبور می‌کند و تولید موج گرما با فرکانس  $2\omega$  می‌کند که توسط جزء ولتاژ به فرکانس  $3\omega$  تبدیل می‌شود.



شکل ۱۳: شماتیک دستگاه روش امگا-۳ [۲۸]

انتقال حرارت امتیاز کوچک‌سازی تجهیزات را به همراه دارد که موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیز می‌شود؛ بنابراین نانوسیال از لحاظ اقتصادی نسبت به سیالات پایه بسیار مقرون به صرفه است. روش‌های شیمیایی و فیزیکی متفاوتی برای ایجاد پایداری در سوسپانسیون ارائه شده است که از بین آن‌ها می‌توان به تغییر اسیدیته، استفاده از سورفکتانت‌ها و ارتعاش مافوق صوت اشاره کرد.

## ۶- مراجع

[۱] ریحانی، مجید، عابدین، آرمین & ابراهیمی ممقانی، علی. (۱۳۹۶). نگاهی بر خواص، عملکرد و پایداری نانوسیال‌ها و فروسیال‌ها. مهندسی مکانیک، ۲۶(۵)، ۳۸-۴۹.

[۲] ولی‌زاده، کامران و تاج‌دینی، پدرام و خباززاده، محمد و طهماسبی، محمد مهدی، ۱۳۹۱، ویسکوزیته در نانو سیالات، اولین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، تهران.

[3] Choi S. U. S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, Vol. 231, No.66, pp. 99-105, 1995.

[4] Masuda T., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N., Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersion of  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  and  $TiO_2$  ultra-fine particles). *Netsu Bussei*, Vol. 4, pp. 227-233, 1993.

[5] Ali, N., Bahman, A. M., Aljuwayhel, N. F., Ebrahim, S. A., Mukherjee, S., & Alsayegh, A. (2021). Carbon-Based Nanofluids and Their Advances towards Heat Transfer Applications-A Review. *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 11(6), 1628. <https://doi.org/10.3390/nano11061628>.

حجم سیال مورد نیاز برای محاسبه‌ی خواص در حالت پایدار در روش ۳W در حدود میکرولیتر است که در مقایسه با سایر روش‌ها، مانند سیم داغ گذرا بسیار کمتر است که این خاصیت بیشتر برای مایعات گران‌قیمت، مانند نانوسیال، مایعات بیولوژیک و غیره مفید است [۲۹]. تاومن و تارگات هدایت حرارتی نانوسیالات آب‌اکسید آلومینیوم، آب  $TiO_2$  و آب  $SiO_2$  در کسر حجمی‌های مختلف و دماهای مختلف را به روش ۳W مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد [۳۰].

## ۴- فهرست علائم

وزن نانوذرات رسوب‌کرده، gr	W
وزن کل نانوذرات، gr	w.
قطر هیدرودینامیکی ذره، mm	$d_H$
ثابت بولتزمن	K
ویسکوزیته دینامیکی حلال	$\eta$
دمای مطلق	T
ضریب نفوذ	D

## ۵- نتیجه‌گیری

تکنولوژی جدید به کارگیری نانوسیالات افق‌های روشنی در مطالعات انتقال حرارتی ایجاد کرده است، اما مشکل عمده‌ی این سیالات بحث پایداری بلندمدت آنان می‌باشد که کاربرد آن‌ها را در مصارف صنعتی با محدودیت مواجه کرده است. پایداری نانوذرات در سیال پایه تأثیر بسزایی در بهبود انتقال حرارت دارد. افزایش

of  $Al_2O_3$  Nanoparticles in Water and Ethylene Glycol Based Fluids. *Journal of Nanostructures*, 12(3), 642-659.

[15] Peyghambarzadeh S. M., Hashemabadi S. H., Naraki M., & Vermahmoudi Y., Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 52(1), pp. 8-16, 2013.

[16] Elias M. M., Mahbubul I. M., Saidur R., Sohel M. R., Shahrul I. M., Khaleduzzaman S. S., Sadeghipour S., Experimental investigation on the thermo-physical properties of  $Al_2O_3$  nanoparticles suspended in car radiator coolant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 48-53, 2014.

[17] Rahmatinejad, B., Abbasgholipour, M., & Mohammadi Alašti, B. (2021). Investigating thermo-physical properties and thermal performance of  $Al_2O_3$  and CuO nanoparticles in Water and Ethylene Glycol based fluids. *International Journal of Nano Dimension*, 12(3), 252-271.

[18] Prashanth P. A., Raveendra R. S., Hari Krishna R., Ananda S., Bhagya N. P., Nagabhushana B. M., Lingaraju K., Raja Naika H., Synthesis, characterizations, antibacterial and photoluminescence studies of solution combustion-derived  $\alpha-Al_2O_3$  nanoparticles. *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 3, pp.345-351, 2015.

[19] XU R., Particle Characterization: Light Scattering Methods. Kluwer Academic Publishers, 2002.

[20] Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H. S. C., A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *Int.J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp.4051-4068, 2011.

[21] Walock, M. J. (2012). Nanocomposite coatings based on quaternary metal-nitrogen and nanocarbon

[6] Keblinski P., Phillpot S. R., Choi S. U. S., Eastman J. A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855-863, 2002.

[۷] رحمتی نژاد، بهمن، عباسقلی پور، مهدی، محمدی الستی، بهزاد. (۱۴۰۱). ارزیابی تجربی انتقال حرارت رادیاتور تراکتور MF ۲۸۵ با استفاده از نانوسیال  $water+Al_2O_3$  ماشین‌های کشاورزی.

[8] Chakraborty S., Panigrahi P.K. Stability of nanofluid: A review. *Appl. Therm. Eng.* 2020;174:115259.

doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115259

[9] Wen D., Lin G., Vafaei S., Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*, Vlo. 7, pp. 41–50, 2009.

[10] Tajik B., Abbassi A., Saffar-Avval M., and Najafabadi M. A., Ultrasonic properties of suspensions of  $TiO_2$  and  $Al_2O_3$  nanoparticles in water. *Powder Technology*, vol. 217, pp. 171–176, 2012.

[11] Ho C., Liu W., Chang Y., Lin C., Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 1345-1353, 2010.

[12] Humenic G., Humenic A., Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 9, pp. 4280-4287, 2011.

[13] Sherve A., Shafie M., Bastani H., Firozzadeh M., Bozorghmerian M. Experimental study of heat transfer coefficient in carbon-water nanofluid in turbulent flow. *Second International Congress of Science and Engineering*. 2018. (In Persian)

[14] Rahmatinejad, B. (2022). Investigating Thermophysical Properties and Thermal Performance

- SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Vol. 76, pp. 124902-1-14, 2005.
- [27] E. Yusibani, P. L. Woodfield, M. Fujii, K. Shinzato, X. Zhang, Y. Takata, Application of the Three-Omega Method to Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Hydrogen Gas, *Int J Thermophys*, Vol. 30, pp. 397–415, 2009.
- [28] K. T. Wojciechowski, R. Zybala, R. Mania, Application of DLC layers in 3-omega thermal conductivity method, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 512-517, 2009.
- [29] G. M. Paul, I. Chopkar, P. K. Manna, Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 1913–1924, 2010.
- [30] Tavman, I., & Turgut, A. L. P. A. S. L. A. N. (2010). An investigation on thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids. In *Microfluidics Based Microsystems* (pp. 139-162). Springer, Dordrecht.
- systems. The University of Alabama at Birmingham.
- [22] Saheed A. A., Sharifpur M., Meyer J. P., Influence of ultrasonication energy on the dispersion consistency of  $Al_2O_3$ -glycerol nanofluid based on viscosity data, and model development for the required ultrasonication energy density. *Journal of Experimental Nanoscience*, Vol. 11(8), pp. 630-649, 2016.
- [۲۳] رحمتی‌نژاد، بهمن، عظیم‌پور شیشوان، فرزین. (۱۴۰۱). ارزیابی تجربی و عددی انتقال گرمای رادیاتور موتور پرکینز A۴,۲۴۸ با استفاده از نانوسیال CuO+water مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز.
- [24] Pecora, R. 1985. *Dynamic Light Scattering. Applications of Photon Correlation Spectroscopy*. Springer.
- [25] JAMALI, M. R., & TAVAKOLI, M. (2016). Separation and preconcentration trace amounts of mercury (II) from water samples using solvent-assisted dispersive solid phase extraction and spectrophotometric determination.
- [26] C. Dames, G. Chen, 1 $\omega$ , 2 $\omega$  & 3 $\omega$  methods for measurements of thermal properties, *REVIEW OF*