



## Effect of Temperature and Weight Percentage of Aluminum Oxide Nanoparticles on Thermophysical Properties of Nanofluid

Saeed Rahman Salari<sup>1</sup>, Maryam Khavarpour<sup>2\*</sup>, Mojtaba Masoumi<sup>3</sup>, Saba Mosivand<sup>4</sup>

<sup>1</sup> PhD student of Chemical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol

<sup>2</sup> Associate Professor of Chemical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol

<sup>3</sup> Assistant Professor of Chemical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol

<sup>4</sup> Associate Professor of Physics, Physics Department, Faculty of Basic Sciences, Lorestan University, Khorram-Abad

Received: 18 Oct 2023 Accepted: 28 Dec 2023

### Abstract

In this research, the effect of temperature and weight percentage of aluminum oxide nanoparticles on the thermophysical properties of nanofluid was studied. Aluminum oxide nanoparticles were synthesized and the methods of using surfactant, ultrasonic vibration and changing acidity were used to disperse the nanoparticles in base fluid. The effect of 0.1-0.5 weight percent of nanoparticles at temperatures of 25, 45 and 65 °C on the thermophysical properties of nanofluid was investigated. Maximum stability of nanofluid based on water and ethylene glycol with 25 and 75% by volume, respectively was achieved in a one-to-one weight ratio of sodium dodecyl sulfate to nanoparticles. With increasing temperature and weight percentage of nanoparticles, the thermal conductivity increased nonlinearly. Density and viscosity increased with increasing weight percentage and decreasing temperature. The results showed that the maximum increase in thermal conductivity was 76.2% at a temperature of 25 °C and 0.5% by weight of nanoparticles.

**Keyword:** Nanofluid, Aluminum Oxide, Viscosity, Weight Percentage, Thermal Conductivity.

\* mkhavarpoor@yahoo.com

## اثر دما و درصد وزنی نانوذرات اکسید آلومینیوم بر خواص ترموفیزیکی نانوسیال

سعید رحمان سالاری<sup>1</sup>، مریم خاورپور<sup>2\*</sup>، مجتبی معصومی<sup>3</sup>، صبا موسیوند<sup>4</sup>  
<sup>1</sup> دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل  
<sup>2</sup> دانشیار مهندسی شیمی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل  
<sup>3</sup> استادیار مهندسی شیمی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل  
<sup>4</sup> دانشیار فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم آباد  
دریافت: 1402/07/26 پذیرش: 1402/10/21

### چکیده

در این پژوهش اثر دما و درصد وزنی نانوذرات اکسید آلومینیوم بر خواص ترموفیزیکی نانوسیال مورد مطالعه قرار گرفت. نانوذرات اکسید آلومینیوم سنتز شد و از روش‌های استفاده از سورفکتانت، ارتعاش اولتراسونیک و تغییر اسیدیته برای پراکندگی نانوذرات در سیال پایه استفاده گردید. اثر 0/1-0/5 درصد‌های وزنی نانوذرات در دماهای 25، 45 و 65 درجه سلسیوس بر خواص ترموفیزیکی نانوسیال بررسی شد. حداکثر پایداری نانوسیال بر پایه آب و اتیلن گلیکول با به ترتیب 25 و 75 درصد حجمی در نسبت وزنی یک به یک سدیم دودسیل سولفات به نانوذرات به دست آمد. با افزایش دما و درصد وزنی نانوذرات، رسانایی حرارتی به طور غیرخطی افزایش یافت. دانسیته و ویسکوزیته با افزایش درصد وزنی و کاهش دما، افزایش یافت. نتایج نشان داد حداکثر افزایش هدایت حرارتی 76/2 درصد در دمای 25 درجه سلسیوس و 0/5 درصد وزنی نانوذره بدست آمد.

**کلمات کلیدی:** نانوسیال، اکسید آلومینیوم، ویسکوزیته، درصد وزنی، هدایت حرارتی.

\* mkhavarpoor@yahoo.com

## 1- مقدمه

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های کارخانه‌ها و صنایعی که با انتقال گرما روبه‌رو هستند، سیستم‌های خنک‌کننده است. با پیشرفت فناوری در صنایعی که در مقیاس‌های زیر صد نانومتر، عملیات‌های سریع و حجیم با سرعت‌های بسیار بالا (چند گیگا هرتز) اتفاق می‌افتد و استفاده از موتورهایی با توان و بار حرارتی بالا اهمیت به‌سزایی پیدا می‌کند، استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده پیشرفته کاری اجتناب‌ناپذیر است. بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال حرارت موجود، در اکثر مواقع به وسیله افزایش سطح آن‌ها صورت می‌گیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه این دستگاه‌ها می‌شود. لذا برای غلبه بر این مشکل، به خنک‌کننده‌های جدید و مؤثر نیاز است و نانو سیالات به عنوان راهکاری جدید در این زمینه مطرح شده‌اند. نانوسیالات، سیالاتی حاوی نانوذرات جامد هستند که در اثر حرکات براونی و نامنظم به طور دائم در مایع شناورند. به این ترتیب سیال جدیدی حاصل می‌گردد که خواص کاملاً متفاوتی نسبت به سیال اولیه دارد و قابلیت‌های مناسبی در انتقال حرارت دارد. همچنین، به دلیل اندازه بسیار کم ذرات (کمتر از 100 nm)، مخلوط جامد - مایع تقریباً همگنی حاصل می‌گردد [1].

نانوذرات فلزی به دلیل رسانایی بسیار بزرگتر از سیال پایه و سطح تماس زیاد، می‌توانند در منطقه گرم سیستم حرارت را گرفته و به ذرات در منطقه سرد انتقال دهند. تحقیقات اخیر نشان داده‌است که جایگزینی سیالات مرسوم خنک‌کن با نانو سیالات افق روشنی پیش روی دارد و می‌توان آن‌ها را در خنک کردن موتور، گرمادهی خورشیدی آب، سردکردن تجهیزات الکترونیکی، خنک کردن روغن‌های ترانسفورمر، بهبود بازده ژنراتورهای دیزلی، خنک کردن سیستم‌های تبادل حرارتی، بهبود بازده حرارتی چیلرها، یخچال فریزرهای خانگی، راکتورهای هسته‌ای، صنایع دفاعی و نظامی و حتی بیوتکنولوژی به کار برد [2].

تاکنون محققان چندین نوع نانوسیال را تهیه و مطالعه کرده‌اند که در آن فلزات و ترکیباتی مانند: مس، نقره، نیکل، آلومینیوم، دی‌اکسید زیرکونیوم، اکسید تیتانیوم، اکسید مس، اکسید آلومینیوم، اکسید روی، اکسید آهن، دی‌اکسید سیلیکون، باریم تیتانات، کاربید سیلیکون، نانولوله‌های کربنی، نیتريد آلومینیوم، کربنات کلسیم و گرافن استفاده شده است [3، 6]. در تحقیقی رحمان سالاری و همکاران، نانوسیالات تهیه شده از نانوذرات  $\text{Co}_3\text{O}_4$  و  $\text{SnO}_2$  را مورد مطالعه قرار دادند. بیشترین پایداری در  $\text{pH} = 7/5$  و  $\text{pH} = 8$  به ترتیب برای نانوسیال  $\text{SnO}_2$  و  $\text{Co}_3\text{O}_4$  مشاهده شد. چگالی و ویسکوزیته نمونه‌ها با افزایش دما کاهش و با کسر جرمی ذرات افزایش یافت. همچنین ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال‌ها با افزایش دما برای همه نمونه‌ها افزایش نشان داد. در حالی که در غلظت‌های بالاتر نانوذرات، این پارامتر نسبت به سیال پایه کاهش یافت [7] داس و همکاران [8-10]، ظرفیت حرارتی ویژه نانوسیال‌های آماده شده با نانوذرات دی‌اکسیدسیلیکون، آلومینا و اکسید روی را مورد بررسی قرار دادند. برخی گزارش‌ها نیز در مورد نانوسیال‌های اکسیدمس [11] با اندازه ذرات و غلظت‌های مختلف وجود دارد.

پایدار و یکنواخت بودن سوسپانسیون، عدم تغییر ماهیت شیمیایی نانوسیال و جلوگیری از توده‌ای شدن زیاد ذرات برای تهیه نانو سیال اهمیت زیادی دارد. برای رسیدن به این هدف می‌توان از روش‌های مختلفی مانند تغییر  $\text{pH}$  محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال سطحی و مواد ضد انعقاد ذرات و یا از التراسونیک استفاده کرد [1].

این مقاله بر روی سنتز و خصوصیات نانوذرات اکسید آلومینیوم و تهیه نانوسیالات آن تمرکز دارد. برای سنتز نانوذرات از روش الکترواکسیداسیون استفاده شده است. همچنین، به طور همزمان از سه روش استفاده از سورفکتانت، حمام التراسونیک و تغییر اسیدیته براب پایداری نانوسیال استفاده می‌شود. سیال پایه آب مقطر (25٪ حجمی) و اتیلن گلیکول (75٪ حجمی) است. اتیلن گلیکول در حالت عادی در دمای منفی 12 درجه سلسیوس یخ می‌زند. ولی ترکیب 75 درصد اتیلن گلیکول و 25 درصد آب در دمای منفی 52 درجه سلسیوس یخ می‌زند. در نتیجه، یکی از دلایل انتخاب اتیلن گلیکول و آب افزایش نقطه جوش و کاهش نقطه انجماد است که برای استفاده در سیستم‌های خنک کننده و مناطق سردسیر مفید است. نانوذرات اکسید آلومینیوم به دلیل ساختار آبریز در آب، به سرعت رسوب می‌کند و یک سوسپانسیون پایدار تشکیل نمی‌دهند. به همین دلیل در مطالعه حاضر، از سدیم دودسیل سولفات (SDS) به عنوان سورفکتانت استفاده شد و اثر تغییر pH و زمان اولتراسونیک روی پایداری نانوسیال مورد بررسی قرار گرفت. یکی دیگر از اهداف این مطالعه، بررسی اثر غلظت نانوذرات و دما بر خواص ترموفیزیکی نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه اتیلن گلیکول/آب، شامل چگالی، ویسکوزیته، ظرفیت گرمایی ویژه و هدایت حرارتی است.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- تهیه نانو ذرات اکسید آلومینیوم

مراحل ساخت و تهیه نانو ذرات اکسید آلومینیوم شامل تهیه محلول الکترولیت، سونش و ماسک‌گذاری الکترودها و آماده‌سازی سلول اکسیداسیون در حمام ترموستاتیک است. الکترودهای مورد نیاز در این پژوهش از جنس آلومینیوم می‌باشد که درجه خلوص این قطعه با استفاده از دستگاه کوانتومتر 99/7 درصد تعیین گردیده است. الکترولیت مورد نیاز جهت تهیه نانو ذرات  $Al_2O_3$  به روش الکترواکسیداسیون آلومینیوم فلزی، با حل کردن نمک تترامیل آمونیوم کلراید در آب آماده گردید پس از سونش کامل الکترودها و برطرف کردن ناخالصی‌ها، به منظور برقراری جریان الکتریکی لازم در سلول اکسیداسیون یک رشته سیم مسی بر سطح هر یک از الکترودها قرار گرفت. این مجموعه به یک منبع تغذیه DC جهت برقراری جریان و یک آوومتر برای نمایش مقدار ولتاژ و جریان اعمال شده متصل گردید. براساس مطالعات اولیه کمترین زمان لازم برای تشکیل رسوب سفید رنگ تحت اعمال کمترین ولتاژ، 30 دقیقه است. به منظور تهیه نانو ذرات  $Al_2O_3$ ، حمام آب گرمایی در دمای 10 تا 60 درجه سلسیوس تنظیم شد و پس از این که مجموعه کاملاً هم‌دمای شد، ولتاژ لازم از 5 تا 25 ولت توسط منبع تغذیه DC به سیستم اعمال گردید. با شروع واکنش رنگ محلول الکترولیت که در ابتدا بی رنگ بود، به تدریج به شیری و در نهایت به رنگ سفید تغییر یافت. پس از اتمام زمان 30 دقیقه، جریان الکتریکی قطع گردید و رسوب تولید شده توسط دستگاه سانتیفریوژ از محلول جدا شد و به منظور حذف آمین چسبیده شده به سطح ذرات رسوبات جمع‌آوری شده چندین بار شستشو داده شد و سپس برای خشک شدن در دمای اتاق قرار گرفت. پودر به دست آمده به مدت 2 ساعت در دمای 600 درجه سلسیوس درون کوره حرارت داده شد [12].

### 2-2- تهیه نانوسیال

در این تحقیق از روش دو مرحله ای برای تهیه نانوسیال استفاده شده است. ابتدا، نانوذرات اکسید آلومینیوم با استفاده از روش‌های الکترواکسیداسیون سنتز شدند. به دلیل ساختار آبریز، این نانوذرات اکسیدی به سرعت رسوب می‌کنند

و با آب یک سوسپانسیون پایدار تشکیل نمی‌دهند. استفاده از سورفکتانت‌ها، تغییر pH و ارتعاش اولتراسونیک سه روش متداول تعلیق نانوذرات در آب هستند که در این مطالعه از هر سه روش برای تهیه نانوسیال استفاده شده‌است. به منظور تهیه نانوسیال، SDS در آب مقطر (25 درصد وزنی) و اتیلن گلیکول (75 درصد وزنی) به عنوان سورفکتانت حل شد و سپس نانوذرات به محلول اضافه شدند. جرم SDS برابر با جرم نانوذرات برای هر نمونه نانوسیال بود. مخلوط حاصل برای 390 دقیقه اولتراسونیک شد تا پراکندگی و پایداری نانوذرات در سیال پایه بهبود یابد. نانوسیال‌های تهیه شده به این روش برای بیش از سه هفته بدون مشاهده بارش پایدار بودند. بهترین تثبیت در  $pH=7/5$  مشاهده شد. در این مطالعه، 4 نمونه سیال شامل 3 نمونه نانوسیال اکسید آلومینیوم با درصد وزنی 0/1، 0/3 و 0/5 و یک سیال پایه با 25 درصد آب مقطر و 75 درصد اتیلن گلیکول تهیه شد. دلیل انتخاب اتیلن گلیکول می‌تواند نقطه جوش و انجماد بالای این ماده و حلالیت خوب آن در آب باشد.

### 2-3- تعیین مشخصات نانوذرات اکسید آلومینیوم

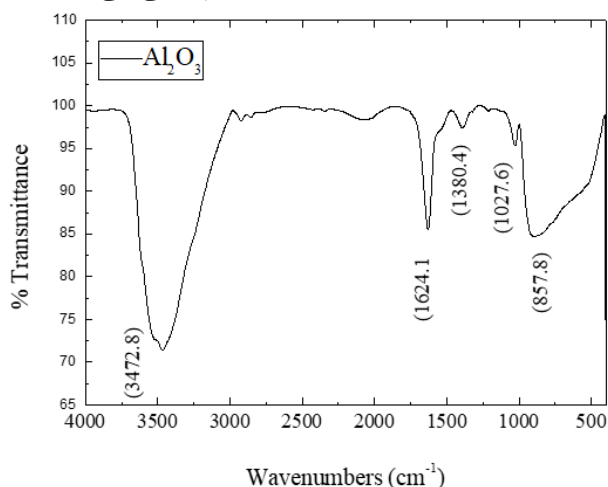
در این تحقیق، خواص ساختاری نانوذرات سنتز شده با استفاده دستگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌است. طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر نیکولت 320 به صورت قرص یا فیلم بر روی قرص KBr ثبت شدند. آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری با دستگاه مدل EM208 ساخت شرکت Philip انجام شد. طیف‌های UV-vis با استفاده از اسپکتروفوتومتر UV-1650 PC مدل شیمادزو، به ثبت رسیدند. حمام فراصوت (مدل 22 RS کیلوهرتز، ساخت ایتالیا) جهت پخش مواد در حلال مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی با دستگاه FE-SEM (دانشگاه لرستان) انجام شد. فاز و بلورینگی با آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) توسط پراش سنج اشعه ایکس مدل X'Pert Pro، ساخت شرکت فیلیپس از کشور هلند انجام شد. دستگاه ویسکومتر (Viscometer) مدل AMVn، شرکت Anton paar، کشور آلمان برای اندازه‌گیری ویسکوزیته به روش Falling ball استفاده شد. چگالی مایعات با استفاده از دستگاه دانسیتومتر مدل DMA5000 مورد بررسی قرار گرفت. گرماسنج روبشی تفاضلی (DSC) برای اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی ویژه (Cp) مورد استفاده قرار گرفت. جهت اندازه‌گیری رسانایی حرارتی از دستگاه KD2 استفاده شد. این دستگاه براساس روش Transient hot wire عمل می‌کند. دستگاه از دقت بالایی برخوردار بوده و حداکثر خطای آن 50 درصد می‌باشد. نمونه‌های نانوسیال در محیطی از آب با دمای ثابت که از طریق یک سیرکولاتور با کنترل دقیق دما کنترل می‌گردد، قرار داده شده و از طریق سنسور حرارتی 6 سانتی‌متری دستگاه که در نانوسیال وارد می‌گردد، رسانایی حرارتی اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- مشخصه یابی نانوذرات اکسید آلومینیوم

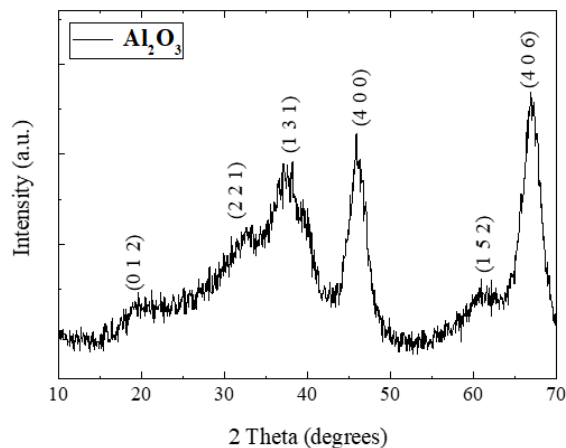
به منظور بررسی گروه‌های عاملی موجود در نانوذرات سنتز شده از طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه استفاده شد. در شکل 1 طیف نمونه تهیه شده از نانو ذرات اکسید آلومینیوم در ولتاژ 25 ولت نشان داده شده‌است. پیک‌های موجود در حوالی  $3500\text{cm}^{-1}$  ناشی از ارتعاشات OH آب می‌باشد. پیک‌های قابل مشاهده در محدوده‌ی طول موج‌های  $1027\text{cm}^{-1}$  و  $1624\text{cm}^{-1}$  در طیف نمونه مربوط به ارتعاشات پیوندهای C-N در مولکول تترامتیل‌آمونیم کلراید موجود بر سطح ذرات است. وجود قله‌های ناشی از کشش C-N گروه آمین در طیف FT-IR بیانگر این است که این

گونه‌ی آلی به‌وسیله‌ی اتم‌های نیتروژن به سطح اکسید آلومینیوم اتصال یافته‌است. پیک‌های موجود در محدوده  $500\text{cm}^{-1}$  تا  $857\text{cm}^{-1}$  نیز از پیوند Al-O در ساختار اکسید آلومینیوم ناشی می‌شود [13-14].



شکل 1- طیف FTIR نانوذرات اکسید آلومینیوم

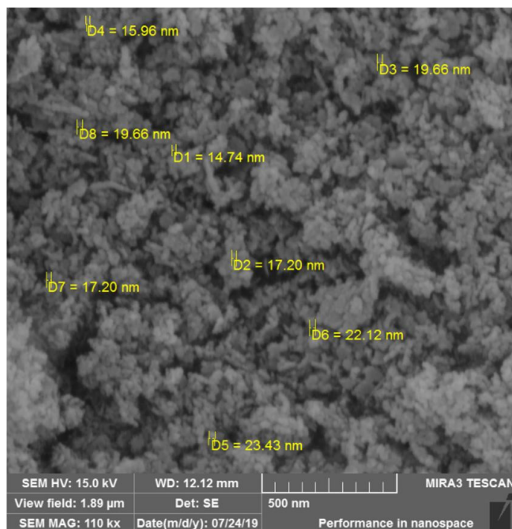
جهت تشخیص ماهیت ساختاری نمونه‌ها از دستگاه XRD استفاده شد. در شکل 2 الگوی XRD نانوذرات اکسید آلومینیوم با اندیس‌های میلر منطبق بر هر پیک نشان داده شده است. مقایسه الگوی پراش نمونه‌ها با الگوی کارت استاندارد 00-046-1515، حاکی از آن است محصولات تولید شده دارای ساختار اکسید آلومینیوم با فرمول شیمیایی  $\text{Al}_2\text{O}_3$  می‌باشند. بر طبق رابطه دبای شرر، پهن‌شدگی پیک‌ها هم حاکی از اندازه بسیار کوچک نانوبلورک‌ها است.



شکل 2- طیف XRD نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$

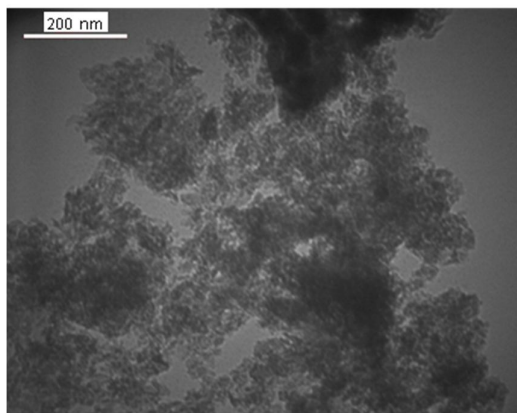
به‌منظور تعیین اندازه ذرات تولید شده و بررسی مورفولوژی آن‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید. در شکل 3 تصویر SEM از نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ساخته شده در این تحقیق ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود ذرات دارای شکل شبه‌کروی می‌باشند. به‌منظور تعیین اندازه میانگین ذرات ساخته شده، تعدادی از ذرات هر نمونه به‌صورت تصادفی و کاتوره‌ای انتخاب و اندازه آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار اندازه‌گیری تعیین گردید. سپس اندازه میانگین ذرات برآورد شد. با توجه به نتایج اندازه میانگین ذرات، در حدود 20 نانومتر تخمین زده شد. می‌توان

مشاهده کرد که ذرات موجود در تصویر به صورت کلوخه‌ای تجمع یافته‌اند. بر اساس ترمودینامیک، نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، دارای انرژی سطحی بسیار بالایی هستند. از سوی دیگر، نیروهای جذاب واندروالس بین ذرات وجود دارد. با تجمع نانوذرات، انرژی سطحی، انرژی سطح به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و این موضوع می‌تواند منجر به پایداری ترمودینامیکی ساختارها شود [12]. یکی دیگر از دلایل تجمع ذرات این است که نانوذرات با اندازه کوچک و سطح زیاد اتم‌های غیر اشباع بیشتری در سطح دارند در واقع هر اتم سطحی دارای مکان‌های هماهنگی خالی است و تمایل دارد پیوندهای بیشتری با ذرات مجاور ایجاد کند و این پدیده نیز منجر به تجمع ذرات می‌شود. بدیهی است که تصویر میکروسکوپ الکترونی نتایج حاصل از بررسی نانو ذرات با الگوی XRD را تایید می‌کنند.



شکل 3- تصویر SEM نانوذرات اکسید آلومینیوم

به منظور مطالعه دقیق‌تر اندازه نانوذرات ساخته شده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده شد. در شکل 4 تصویر TEM مربوط به نانوذرات اکسید آلومینیوم تولید شده مشاهده می‌شود. ذرات موجود در این تصویر نیز بسیار کوچک با شکل شبه کروی و اندازه میانگین در حدود 20 نانومتر می‌باشند و با یکدیگر تجمع یافته‌اند. نتایج حاصل از تصویربرداری TEM، با نتایج حاصل از آنالیز XRD و SEM مطابقت دارد.



شکل 4- تصویر TEM نانو ذرات اکسید آلومینیوم



### 3-2- مکانیسم رشد نانوبلورها

تشکیل نانوذرات بلوری در محلول با فرآیند هسته‌سازی آغاز شده و با کنترل آن تعداد و اندازه ذرات را می‌توان کنترل نمود. تاکنون مطالعات زیادی در مورد مکانیسم هسته‌سازی و رشد بلورها در محلول انجام شده است. مکانیسم دو مرحله‌ای هسته‌سازی مهم‌ترین مکانیسم است که بر اساس آن می‌توان با تنظیم پارامترهای ترمودینامیکی محلول فرآیند هسته‌سازی را کنترل کرد. رشد کریستال مجموعه‌ای از فرآیندهایی است که توسط آنها یک اتم یا یک مولکول در سطح یک بلور وارد شده و اندازه آن را بزرگتر می‌کند. این فرآیندها را می‌توان در چهار مرحله به صورت زیر خلاصه نمود:

1- حمل و نقل اتم‌ها از طریق محلول

2- اتصال اتم‌ها به سطح

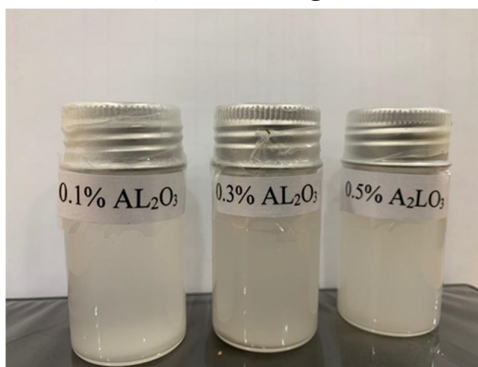
3- حرکت اتم‌ها روی سطح

4- اتصال اتم به لبه‌ها

در واقع به منظور تشکیل یک کریستال از یک محلول رقیق یا گاز، هم غلظت کافی و هم نوسانات گونه‌های اتمی و یونی ضروری است. شکل‌گیری بلورها در محلول به دو پارامتر غلظت و ساختار بستگی دارد. انتقال از فاز محلول به بلور به‌عنوان یک انتقال در راستای هر دو پارامتر چگالی و تبلور همزمان روی می‌دهد [14].

### 3-3- پایداری نانوسیال

جهت بهبود پایداری نانوذرات اکسید آلومینیم در سیال، سورفکتانت SDS مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر شکل 5 مربوط به نانو سیالات تهیه شده در شرایط بهینه می‌باشند که پس از 4 هفته تصویر برداری شده‌اند. با توجه به تصاویر هیچ‌گونه ته‌نشینی مشاهده نشده است و این موضوع نشان دهنده پایداری نانو سیال حداقل برای 4 هفته می‌باشد.



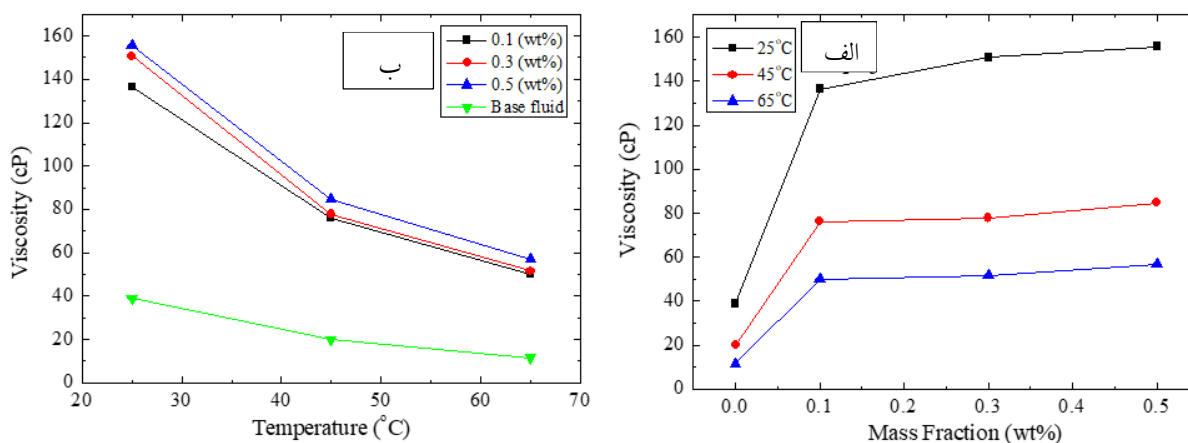
شکل 5- تصویر نانوسیال‌های تهیه شده با نانوذرات  $Al_2O_3$

### 3-4- ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم بر حسب دما و درصد وزنی

شکل 6، ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم و همچنین سیال پایه حاوی آب مقطر (25 درصد) و اتیلن گلیکول (75 درصد) بر حسب تغییرات دما و درصد وزنی نانوذرات را نشان می‌دهد. بدیهی است که ویسکوزیته همه نمونه‌های نانوسیال با افزایش دما کاهش می‌یابد اما با افزایش درصد وزنی ذرات افزایش می‌یابد. برای نانو سیال حاوی نانو ذرات  $Al_2O_3$  مقادیر ویسکوزیته با درصد وزنی 0/5 در دماهای 25، 45 و 65 درجه سلسیوس به ترتیب 155/7108، 84/6769 و 56/9077 سانتی پواز اندازه‌گیری شده است. مطالعات تجربی متعددی در مورد تأثیر عوامل مختلف



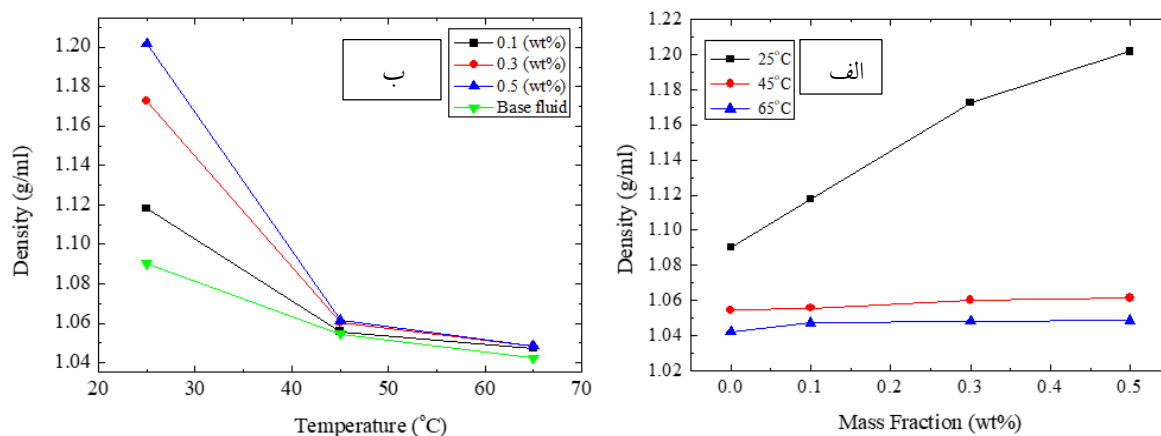
مانند غلظت، ساختار و ماهیت ذرات، دما، مواد افزودنی و اسیدیته بر تغییرات ویسکوزیته نانو سیالات گزارش شده است [15]. ساندار و همکاران [16] ویسکوزیته نانوسیال‌های مختلف تهیه شده با استفاده از نانو ذرات آلومینا را در سیالات پایه حاوی اتیلن گلیکول و آب در دمای 0-60 درجه سلسیوس و غلظت‌های حجمی مختلف آزمایش کرده‌اند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که حداکثر مقدار افزایش ویسکوزیته 2/75 برابر در مقایسه با سیال پایه، برای نانوسیال اتیلن گلیکول/آب 40:60 درصد در دمای صفر درجه سانتیگراد است. همچنین، جمشیدی و همکاران [17] تأثیر ذرات  $\text{SiO}_2$  را بر ویسکوزیته نانوسیال، اتیلن گلیکول، روغن ترانسفورماتور و آب به عنوان سیالات پایه بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که ویسکوزیته نانو سیال با افزایش دما کاهش می‌یابد و با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه افزایش می‌یابد که با نتایج به دست آمده از این تحقیق مطابقت دارد.



شکل 6- ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم (الف) بر حسب درصد وزنی (ب) بر حسب دما

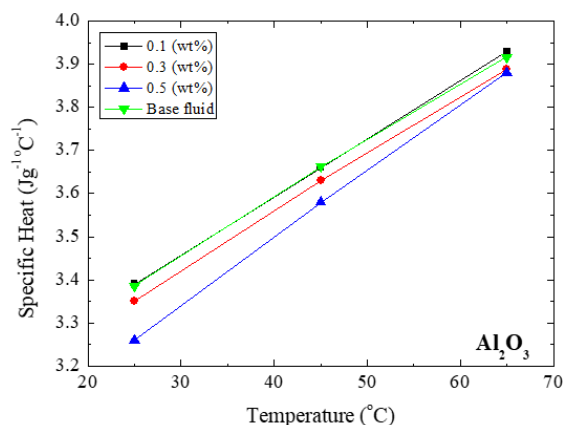
### 3-5- دانسیته نانوسیال اکسید آلومینیوم بر حسب دما و درصد وزنی

تغییرات دانسیته سیال پایه و نانوسیال اکسید آلومینیوم نسبت به دما و درصد وزنی نانوذرات در شکل 7 قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به اینکه دانسیته با جرم رابطه مستقیم دارد، بنابراین با افزایش درصد وزنی هر کدام از سه نمونه نانو سیال، مطابق نمودار شکل 7 دانسیته افزایش یافته‌است. بدیهی است با افزایش دما حجم افزایش یافته و با ثابت ماندن درصد وزنی دانسیته کاهش یافته‌است.



### 3-6- بررسی ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب دما و درصد وزنی

تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه و نانوسیال اکسید آلومینیوم با دما و درصد وزنی نانوذرات با دقت 0/025206 در شکل 8 نشان داده شده است. ظرفیت گرمایی ویژه با افزایش دما برای همه نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین، ظرفیت حرارتی نانوسیالات حاوی 0/1 درصد وزنی اکسید آلومینیوم در مقایسه با سیال پایه کمی افزایش یافته است. اما این پارامتر با پراکندن 0/3 درصد وزنی نانوذرات کاهش یافته و با افزایش کسر جرمی به 0/5 درصد وزنی دوباره به صورت چشمگیری کاهش یافته است. ظرفیت گرمایی ویژه برای بعضی نمونه‌های نانوسیال روند ثابتی را نشان نداد [18-19]. داس و همکاران [8، 10] ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال‌های آماده شده با نانوذرات دی اکسیدسیلیکون، آلومینا و اکسیدروی در مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال با افزایش غلظت نانوذرات کاهش می‌یابد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. همچنین، ژو و نی [20] نتیجه مشابهی را برای ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال آلومینا برپایه آب به دست آوردند. دیروبرتیس و همکاران [21] نیز کاهش گرمای ویژه نانوسیال‌ها را در مقایسه با اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه تایید کردند. بر اساس گزارش‌های مختلف، نانوسیال‌های مبتنی بر آب و اتیلن گلیکول با افزایش غلظت ذرات، کاهش گرمای ویژه را نشان می‌دهند [22-23].



شکل 8- ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال اکسید آلومینیوم بر حسب دما

### 3-7- رسانایی حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم

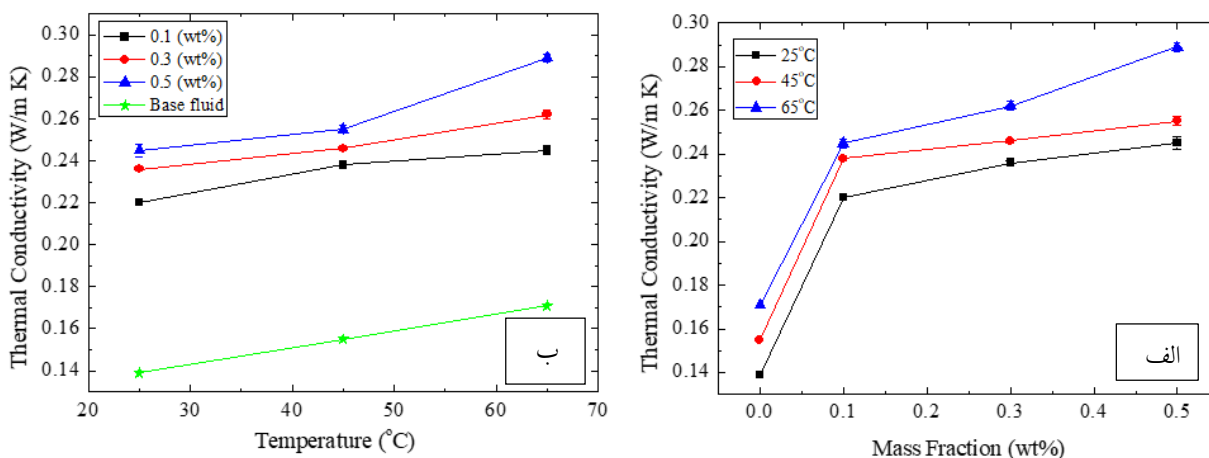
جهت اندازه‌گیری رسانایی حرارتی از دستگاه KD2 که بر اساس روش Transient hot wire عمل می‌کند، استفاده شد. از نتایج ثبت شده توسط دستگاه، مقادیری که R-square در آنها بزرگتر از 0/9998 بود یادداشت و میانگین گرفته شد. در این بررسی 4 نمونه شامل سه نمونه نانوسیال اکسید آلومینیوم با درصدهای وزنی 0/1، 0/3 و 0/5، و یک نمونه سیال پایه (25 درصد آب مقطر و 75 درصد اتیلن گلیکول) تهیه گردید و رسانایی حرارتی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در جدول 1 قابل مشاهده می‌باشد. هوانگ و همکاران [24] و همچنین، بیک و همکاران [25] پیشنهاد کردند که ذرات استوانه‌ای با نسبت طول به قطر زیاد و ذرات کروی دو شکل رایج از ذرات هستند که برای سنتز نانوسیال استفاده می‌شوند و می‌توانند رسانایی گرمایی را بهبود بخشند.

**جدول 1- رسانایی حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم**

%Enhancement	K(65 °C) (W/m.k)	%Enhancement	K(45 °C) (W/m.k)	%Enhancement	K(25 °C) (W/m.k)	درصد وزنی (%wt)
-	0/171	-	0/155	-	0/139	0
43/3	0/245	53/3	0/238	58/3	0/220	0/1
53/2	0/262	58/7	0/246	69/8	0/236	0/3
69	0/289	64/5	0/255	76/2	0/245	0/5

**3-8- هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم بر حسب دما و درصد وزنی**

شکل 9 هدایت حرارتی سیال پایه و نانوسیال اکسید آلومینیوم را به عنوان تابعی از دما و درصد وزنی نشان داده است. در این بررسی هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال در دماهای 25، 45 و 65 درجه سلسیوس برای غلظت‌های مختلف اکسید آلومینیوم اندازه‌گیری شد. با مقایسه داده‌ها با سیال پایه، می‌توان دریافت که با افزودن نانوذرات، میزان هدایت حرارتی نانوسیال برای همه نمونه‌های آماده شده افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، هدایت حرارتی سیال پایه W/mK 0/171 در دمای 65 درجه سلسیوس می‌باشد، در حالی که با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم با درصد وزنی 0/5، این مقدار به 0/289 W/mK افزایش یافته است. تاثیر درصدهای وزنی مختلف نانوذرات بر رسانایی گرمایی در دماهای بالاتر بصورت واضح تر قابل مشاهده است. حداکثر افزایش هدایت حرارتی 76/2 درصد برای نانوسیال اکسید آلومینیوم با درصد وزنی 0/5 در دمای 25 درجه سلسیوس مشاهده گردید. روند افزایش هدایت حرارتی با دما و درصد وزنی بصورت غیر خطی است. یو و همکاران [26] تأثیر دما بر افزایش هدایت حرارتی نانوسیال‌های حاوی ذرات اکسید روی را بررسی کردند و دریافتند که بهبود هدایت حرارتی در دمای بالاتر افزایش می‌یابد. رفتار خطی و غیر خطی افزایش هدایت گرما با درصد وزنی به ماهیت سیال پایه و نوع نانوذرات مربوط می‌شود.


**شکل 9- هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم (الف) بر حسب درصد وزنی (ب) بر حسب دما**

عبدالباقی و همکاران [27] نشان دادند هدایت حرارتی به دست آمده از پراکندگی آلومینا با اندازه ذرات 13 نانومتر در بیوگلیکول/آب مخلوط شده با نسبت وزنی 40:60 در دمای 80 درجه سلسیوس، 24 درصد است. با تغییر نسبت اختلاط سیال پایه به 60:40 وزنی هدایت حرارتی به 13 درصد کاهش یافت. علاوه بر این، با افزایش درصد وزنی،

فاصله ذره‌ها کاهش می‌یابد و باعث افزایش فرکانس ارتعاش شبکه می‌شود که به عنوان اثر نفوذ انتقال حرارت شناخته می‌شود. همچنین، نیروهای چسبندگی بین ذرات و بین مولکولها در دماهای بالاتر ضعیف تر می‌شود که منجر به افزایش حرکت براونی و حرکت تصادفی نانوذرات می‌شود. این باعث افزایش هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال در دماهای بالاتر می‌شود [28]. گزارش شده است که عوامل و مکانیسم‌های بیشتری مانند خوشه بندی ذرات و لایه بندی مایع در اطراف آنها بر افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات تأثیر می‌گذارد. این پدیده‌ها به برخی پارامترهای مهم مانند دما، درصد وزنی و pH نانوسیال مربوط می‌شوند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که عوامل مختلف مانند نوع، اندازه و شکل ذرات، دما، ماهیت سیال پایه، مواد افزودنی، اسیدیته و غلظت در هدایت حرارتی نانوسیال موثر است.

#### 4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، نانوذرات اکسید آلومینیوم سنتز شدند و نانوسیال آن‌ها بر پایه آب (25 درصد حجمی) و اتیلن گلیکول (75 درصد حجمی) مورد بررسی قرار گرفت. ساختار نانوذرات با استفاده از XRD تایید شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد که میانگین اندازه ذرات اکسید آلومینیوم 10 نانومتر است. در این مطالعه برای بهبود پایداری سیالات سه روش استفاده از سورفکتانت، تنظیم pH و استفاده از ارتعاش مافوق صوت، به کار گرفته شد. پایداری نانوسیال‌ها با استفاده از سدیم دودسیل سولفات به عنوان سورفکتانت و تنظیم pH= 7/5 بسیار بهبود یافت. همچنین، بهترین زمان فراصوت 390 دقیقه بدست آمد. سیال بدست آمده حداقل به مدت 4 هفته پایدار ماند. نمونه‌های مختلفی از نانوسیالات اکسید آلومینیوم با درصد وزنی 0/1، 0/3 و 0/5 تهیه و خواص ترموفیزیکی آن‌ها در دماهای 25، 45 و 65 درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس تجزیه و تحلیل‌های ترموفیزیکی، چگالی و ویسکوزیته نانوسیال‌ها با افزایش دما کاهش یافت. بررسی ظرفیت گرمایی ویژه نمونه‌ها نشان داد که ظرفیت گرمایی ویژه با افزایش دما برای تمام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. حداکثر افزایش هدایت حرارتی برای نانوسیال اکسید آلومینیوم 76/2 درصد در دمای 25 درجه سلسیوس و با 0/5 درصد وزنی نانوذرات بدست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، به دلیل اندازه کوچک نانوذرات تهیه شده و پایداری خوب نانوذرات اکسید آلومینیوم در سیال پایه و همچنین استفاده از ترکیب آب (25 درصد حجمی) و اتیلن گلیکول (75 درصد حجمی) به عنوان سیال پایه، هدایت حرارتی افزایش پیدا کرد.

#### 5- منابع

- [1] ف. سلیمی، ج. سلیمی، "مروری بر کاربردهای نانوسیال در زمینه انتقال حرارت و انتقال جرم"، نشریه فرایند نو، سال هشتم، شماره 44، ص. 39-49، زمستان 1392.
- [2] R. Saidura, K. Y. Leong, H.A. Mohammad, "A review on applications and challenges of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, pp. 1646-1668, 2011.
- [3] P. K. Das, "A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 240, pp. 420-446, 2017.

- [4] M. Bahiraei, R. Rahmani, A. Yaghoobi, et al, "Recent research contributions concerning use of nanofluids in heat exchangers: A critical review", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 133, pp.137-159, 2018.
- [5] M. Gupta, V. Singh, R. Kumar, Z. Said, "A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 638–670, 2017.
- [6] K.S. Suganthi, K.S. Rajan, "Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 76, PP. 226–255, 2017.
- [7] S. Rahman Salari, M. Khavarpour, M. Masoumi, S. Mosivand, "Preparation of cobalt oxide and tin dioxide nanofluids and investigation of their thermophysical properties", *Microfluidics and Nanofluidics* 26, 79, 2022.
- [8] P.K. Namburu, D.P Kulkarni, A. Dandekar, D.K. Das, "Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids", *Micro & Nano Letters*, vol. 2, pp. 67–71, 2007.
- [9] D.P. Kulkarni, R.S. Vajjha, D.K. Das, D.Oliva, "Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant", *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp.1774–1781, 2008.
- [10] R.S. Vajjha, D.K. Das, "Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations", *Journal of Heat Transfer*, vol. 131, pp.071601, 2009.
- [11] B. Barbes, R. Paramo, E. Blanco, C. Casanova, "Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of CuO nanofluids", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 115, pp.1883-1891, 2013.
- [12] S. Mosivand, I. Kazeminezhad, S. Piri Fathabad. "Easy, fast, and efficient removal of heavy metals from laboratory and real wastewater using electrocrystalized iron nanostructures", *Microchemical Journal*, vol. 146, pp. 534–543, 2019.
- [13] S. Iranshahi, S. Mosivand, "Cobalt/graphene oxide nanocomposites: Electro-synthesis, structural, magnetic, and electrical properties", *Ceramics International*, vol. 48, pp.12240-12254, 2022.
- [14] م. آدمی، ص. موسیوند، "ساخت و مشخصه‌یابی خواص بلوری نانوساختارهای هیدروکسید آلومینیوم و بررسی کاربرد آنها"، *مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای، دوره 10، شماره 2، ص. 67-83، تابستان 1399.*
- [15] K .Bashirnezhad, Sh .Bazri, M .R .Safaei, M .Goodarzi, M .Dahari, O .Mahian, A .SelimDalkılıç, S .Wongwises, "Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 73, pp. 114-123, 2016.
- [16] L. Syam Sundar, E. Venkata Ramana, Manoj K. Singh, Antonio C.M. Sousa, "Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids for heat transfer applications: an experimental study", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 56, pp. 86–95, 2014.
- [17] N. Jamshidi, M. Farhadi, D.D. Ganji, K. Sedighi, "Experimental investigation on the viscosity of nanofluids", *International Journal of Engineering, Transactions B*, vol. 25, pp. 201–209, 2012.
- [18] E. Ionela Cherecheș, D. Bejan, A. Adriana Minea, "Experimental study on viscosity and isobaric heat capacity of PEG 400 enhanced with TiO<sub>2</sub> nanoparticles", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 81, pp. 256–263, 2023.
- [19] D. Ranjan Parida, S. Basu, "On the specific heat capacity of HITEC-salt nanocomposites for concentrated solar power applications", *RSC Advances*, vol. 13, pp. 5496-5508, 2023.
- [20] S.Q. Zhou, R. Ni, "Measurement of the specific heat capacity of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid", *Applied Physics Letters*, vol. 92 (9), 2008.

- [21] E. De Robertis, E.H.H. Cosme, R.S. Neves, A.Y. Kuznetsov, A.P.C. Campos, S.M. Landi, et al. "Application of the modulated temperature differential scanning calorimetry technique for the determination of the specific heat of copper nanofluids", *Applied Thermal Engineering*, vol. 41, pp. 7-10, 2012.
- [22] R. Hentschke, "On the specific heat capacity enhancement in nanofluids", *Hentschke Nanoscale Research Letters*, 11(88), pp. 1-11, 2016.
- [23] H. Riazi, T. Murphy, G. B. Webber, R. Atkin, S. S. M. Tehrani, R. A. Taylor, "Specific heat control of nanofluids: A critical review", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 107, pp. 25-38, 2016.
- [24] Y. Hwang, J.K. Lee, C.H. Lee, Y. Jung, S.I. Cheong, C.G. Lee, et al, "Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids", *Thermochimica Acta*, vol. 455, 2007.
- [25] M.P. Beck, Y. Yuan, P. Warriar, A.S. Teja, "The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids", *Journal of Nanoparticle Research*, vol.11, pp. 1129–1136, 2009.
- [26] W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, "Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid", *Thermochimica Acta*, vol.491, no.1, pp. 92–96, 2009.
- [27] M.K. Abdolbaqi, W.H. Azmi, R. Mamat, K.V. Sharma, G. Najafi, "Experimental investigation of thermal conductivity and electrical conductivity of bioglycol-water mixture based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid", *Applied Thermal Engineering*, 102: pp. 932–941, 2016.
- [28] S. Askari, H. Koolivand, M. Pourkhalil, R. Lotfi, A. Rashidi, "Investigation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Graphene nanohybrid heat transfer properties: Experimental approach", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 87, pp. 30–39, 2017