

Research Paper

## Synthesis and Experimental Study of the Effect of Volume Fraction and Temperature on Thermal Conductivity Coefficient of Copper Oxide-Water Nanofluid

Maryam Moridpour<sup>\*1</sup>, Ali Reza Razeghizadeh<sup>2</sup>, Vahdat Rafee<sup>3</sup>

Received: 2019.05.11

Accepted: 2020.01.25

### Abstract

The effect of volume fraction and temperature on the thermal conductivity coefficient of nanofluid copper oxide was investigated. The synthesized copper oxide nanoparticles were characterized by XRD, EDX and SEM. XRD analysis of the samples established the phase, EDX analysis provided the presence of copper and oxygen elements and SEM analysis confirmed their nanometer sizes. Copper oxide nanoparticles with dimensions of 50nm were used to synthesize copper oxide nanofluids. Copper oxide nanofluid were synthesized by two step method using distilled water as a base fluid in various volume fractions (%1, %2, %3). Then, they were mixed in ultrasonic for 30min and the nanoparticles were suspended homogeneously in the base fluid. In this regard, the pH of all samples was measured and controlled. Also, the thermal conductivity coefficient of the synthesized nanofluid samples were measured at temperature range 23 - 51°C. The results of the research showed that with increasing temperature and volume fraction of copper oxide nanoparticles in distilled water, the thermal conductivity coefficient in all samples increased. A sample with concentration of %3 had the higher thermal conductivity coefficient and optimum point in the concentrations, because in addition to the high thermal conductivity, it had a neutral pH. Finally, the experimental results of thermal conductivity of copper oxide nanofluids were compared to the obtained values from theoretical models.

**Keyword:** *Volume Fraction, Nanoparticle, Nanofluid, Copper Oxide, Thermal Conductivity Coefficient.*

---

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Faculty of Science, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran. (Corresponding Author). m\_mouridpour2018@yahoo.com

<sup>2</sup> Assistant Professor. Faculty of Science, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email: alirezazarazeghizadeh@yahoo.com.

<sup>3</sup> Assistant Professor. Faculty of Science, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email: v.rafee@gmail.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا  
سال نهم، پیاپی ۱۶، بهار ۱۳۹۸

## مقاله پژوهشی

# سنتز و بررسی تجربی اثر نسبت حجمی و دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس-آب<sup>۱</sup>

مریم مریدپور\*<sup>۲</sup>، علیرضا رازقی زاده<sup>۳</sup>، وحدت رفیعی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵

### چکیده

در این مقاله اثر نسبت حجمی نانوذرات و دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس به صورت تجربی بررسی شد. بدین منظور، نانوذرات اکسید مس پس از تهیه، توسط آنالیزهای XRD و EDX و SEM مشخصه‌یابی شدند. آنالیز XRD فاز نمونه و آنالیز EDX حضور عناصر مس و اکسیژن و SEM ابعاد نانومتری نمونه سنتز شده را تأیید کرد. نانوذرات اکسید مس با ابعاد ۵۰ نانومتر پس از تهیه، جهت سنتز نانوسیال اکسید مس استفاده شدند. نمونه‌های نانوسیال اکسید مس به روش دومرحله‌ای و با استفاده از آب مقطر به عنوان سیال پایه در نسبت‌های حجمی مختلف (۰.۱٪، ۰.۲٪، ۰.۳٪) سنتز شدند. سپس در اولتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شدند و نانوذرات به صورت همگن

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/jap.2020.26012.1125

<sup>۲</sup> دانشجوی، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران. (نویسنده مسئول).

m\_mouridpoor2018@yahoo.com

<sup>۳</sup> استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران.

alirezazarazeghizadeh@yahoo.com

<sup>۴</sup> استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران. v.rafee@gmail.com

درون سیال پایه به حالت تعلیق در آمدند. سپس، pH تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری و کنترل شد. همچنین ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال سنتز شده در محدوده دمایی ۲۳-۵۱ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما و نسبت حجمی نانوذرات اکسید مس درون آب مقطر، در همه نمونه‌ها ضریب هدایت حرارتی افزایش یافت. نمونه دارای نسبت حجمی ۰.۳٪ بالاترین ضریب هدایت حرارتی و نقطه بهینه را در بین غلظت‌های موجود دارد، زیرا علاوه بر ضریب هدایت حرارتی خوب، pH خنثی نیز دارد. در ادامه، نتایج تجربی هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس-آب با مقادیر به دست آمده از مدل‌های نظری مقایسه شد.

**واژگان کلیدی:** نسبت حجمی، نانوذرات، نانوسیال، اکسید مس، ضریب هدایت حرارتی.

## ۱. مقدمه

با توجه به خواص انتقال حرارت ضعیف سیال‌های معمولی مانند آب و روغن و اتیلن گلیکول و به علت محدودیت اساسی در هدایت حرارتی این سیال‌های متداول، بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت و ارتقاء رفتار حرارتی در این نوع سیال‌ها و به دنبال آن توسعه سیال‌های انتقال حرارت پیشرفته‌تر با هدایت حرارتی بیشتر، نیازی جدی در صنعت محسوب می‌شود [۱]. مفهوم نانوسیال به نوع جدیدی از سیال‌های انتقال حرارت اشاره دارد که از تعلیق ذرات فلزی یا غیر فلزی در ابعاد نانو درون سیال پایه ایجاد می‌شوند [۲]. خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها توسط مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات و سیال پایه کنترل می‌شود [۳]. به عبارت دیگر، از دشواری‌های بسیار مهم نانوسیال، درک چگونگی تعامل و برهم کنش بین نانوذرات و سیال پایه است که باعث بروز تغییر در خواص ترموفیزیکی سوسپانسیون‌ها می‌شود [۴]. در حقیقت، نانوسیال‌ها به دلیل حضور نانوذرات نسبت به سایر سیال‌های پایه، خواص ترموفیزیکی پیشرفته‌تری مانند هدایت حرارتی، نفوذ حرارتی، ویسکوزیته و چگالی دارند که هدایت حرارتی یکی از مهمترین خواص نانوسیال است که عوامل زیادی در آن تأثیرگذار است [۵]. گزارش‌ها نشان می‌دهد که جنس نانوذرات و اندازه و شکل آن‌ها، ویژگی‌های سیال پایه، مدت زمان اولتراسونیک، ترموفورسیس، اثر لایه‌سازی اطراف نانوذرات، حرکت براونی نانوذرات، نسبت حجمی و دما و pH عوامل مؤثری هستند که نقش مهمی در تغییر هدایت حرارتی نانوسیال‌ها ایفا می‌کنند [۶]. لازم است ذکر کنیم، هر یک از این پارامترهای عنوان شده یا سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی خواهد شد یا کاهش آن را در پی خواهد داشت. پژوهش‌ها و مطالعات مختلفی برای بررسی تأثیر این عوامل مطرح شده در

هدایت حرارتی نانوسیال‌ها صورت گرفته است [۷]. برای مثال، لی و همکارانش [۸] هدایت حرارتی نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم و اکسید مس را در نسبت‌های حجمی (۰.۱٪، ۰.۲٪، ۰.۳٪، ۰.۴٪) بررسی کردند. بدین منظور، از آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه و از نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس با اندازه‌های ۲۳،۶ نانومتر و ۳۸،۴ نانومتر استفاده کردند. نتایج نشان داد که نانوسیال‌های حاوی مقادیر کمی از نانوذرات نسبت به سیال پایه هدایت حرارتی بیشتری دارند. همچنین، طی مقایسه میان داده‌های تجربی به دست آمده و مدل هامیلتون کراسر، دریافتند که این مدل فقط هدایت حرارتی نانوسیال حاوی ذرات بزرگ و کلوخه اکسید آلومینیوم را به درستی پیش‌بینی می‌کند در صورتی که برای نانوسیال اکسید مس موفق عمل نکرد و این رفتار نشان داد که نه تنها شکل نانوذرات بلکه اندازه نانوذرات نیز هدایت حرارتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهشی دیگر، بک و همکارانش [۹] به منظور بررسی تأثیر اندازه نانوذرات در هدایت حرارتی، هفت نمونه نانوسیال حاوی نانوذرات آلومینیوم را با اندازه‌های ۸-۲۸۲ نانومتر سنتز و به روش سیم داغ گذرا بررسی کردند و از آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه استفاده کردند. نتایج تجربی نشان داد که با کاهش اندازه ذرات تا حدود ۵۰ نانومتر، هدایت حرارتی در این نانوسیال‌ها کاهش می‌یابد. آنها دلیل این کاهش هدایت حرارتی را در نانوسیال‌ها به پراکندگی فونون‌ها نسبت دادند و بیان کردند که دلیل اینکه اندازه ذرات آنها کوچک است، هدایت حرارتی توسط افزایش پراکندگی فونون تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در ادامه تحقیقات، مرشد و همکارانش [۱۰] طی بررسی تأثیر شکل نانوذرات در هدایت حرارتی، جهت سنتز نانوسیال از نانوذرات  $TiO_2$  در دو شکل میله‌ای و کروی استفاده کردند. آنها پس از پراکنده ساختن نانوذرات در آب دیونیزه و اندازه‌گیری هدایت حرارتی نمونه‌ها با استفاده از روش سیم داغ گذرا دریافتند که نانوسیال حاوی نانوذرات میله‌ای بیشترین هدایت حرارتی را داشتند. کول و همکارانش [۱۱] به منظور بررسی تأثیر زمان اولتراسونیک در هدایت حرارتی، نانوسیال اکسید روی را بدون سورفاکتانت و با استفاده از مدت زمان طولانی اولتراسونیک در نسبت‌های حجمی ۰.۳، ۳.۷۵، ۵ درصد سنتز کردند. آنها با استفاده از اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه، هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال را در محدوده دمایی  $70^{\circ}C - 10^{\circ}C$  اندازه گرفتند. نتایج بیشترین افزایش ضریب هدایت حرارتی را در نسبت حجمی ۰.۳، ۷۵٪ و دمای  $30^{\circ}C$  در حدود ۰.۴٪ نشان داد. همچنین، مشخص شد که هدایت حرارتی مؤثر نمونه‌های نانوسیال با افزایش زمان اولتراسونیک بعد از ۶۰ ساعت به دلیل پایداری بیشتر به حداکثر می‌رسد. در ادامه مطالعات، ژوان و همکارانش [۱۲] با پراکنده ساختن نانوذرات مس و اکسید آلومینیوم تأثیر pH را در هدایت حرارتی بررسی کردند. آنها جهت تغییر مقدار pH نمونه‌های نانوسیال سنتز شده به روش دومرحله‌ای، از هیدروکلریک اسید و سدیم هیدروکسید استفاده

کردند و پس از اندازه‌گیری هدایت حرارتی، نتایج نشان داد که در مقدار بهینه pH، نانوسیال‌ها به طور چشمگیری هدایت حرارتی بیشتری دارند. تأثیر نسبت حجمی در افزایش هدایت حرارتی نانوسیال‌ها در طیف وسیعی مطالعه شده است و نتایج در اکثر مقالات نشان داد که بین افزایش نسبت حجمی نانوذرات و افزایش ضریب هدایت حرارتی رابطه مستقیمی وجود دارد. برای مثال، چوی و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۵ تأثیر نسبت حجمی نانوذرات را در ضریب هدایت حرارتی سیال پایه از طریق پراکنده ساختن نانوذرات آهن در اتیلن گلیکول بررسی کردند. در این بررسی تجربی، نانوذرات آهن به روش رسوب بخار شیمیایی سنتز شد و تصاویر TEM متوسط ابعاد نانوذرات را ۱۰ نانومتر نشان داد. نانوسیال به روش دو مرحله‌ای در نسبت‌های حجمی مختلف ۰/۲ و ۰/۳ و ۰/۴ درصد سنتز شدند و پس از قرارگیری در دستگاه اولتراسونیک به مدت ۷۰ دقیقه و اندازه‌گیری هدایت حرارتی نمونه‌ها با روش سیم داغ گذرا نتایج نشان داد که هدایت حرارتی به صورت خطی با افزایش نسبت حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین در سال ۲۰۰۶، لی و پترسون [۱۴] میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی آب مقطر را با تعلیق نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم با قطرهای ۲۹ و ۳۶ نانومتر در چهار نسبت حجمی مختلف ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۱/۰ بررسی کردند و نشان دادند که نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم تأثیر معناداری در هدایت حرارتی مؤثر این سوسپانسیون‌ها دارند، به طوری که نانوسیال اکسید مس در نسبت‌های حجمی بیشتر از ۰/۴ افزایش ۱/۵۲ درصدی هدایت حرارتی و نانوسیال اکسید آلومینیوم افزایش ۱/۳ درصدی را نسبت به آب مقطر خالص نشان داد و افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه در نسبت‌های حجمی بالاتر تأیید شد. سپس، کی‌مناکشی و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۱۵ با پراکنده ساختن نانوذرات اکسید مس با قطر ۲۰ نانومتر در آب مقطر در نسبت‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۳ و ۰/۵ افزایش چشمگیر هدایت حرارتی نانوسیال را گزارش کردند. در این پژوهش مشاهده شد که میان نمونه‌های نانوسیال تهیه‌شده، نانوسیال دارای نسبت حجمی ۰/۵ بیش‌ترین ضریب هدایت حرارتی را دارد. در همان سال، فدلا و همکارانش [۱۶] مشخصه‌های نانوسیال پایه آبی حاوی نانوذرات  $TiO_2$  را در نسبت‌های حجمی بین ۱ تا ۳۵٪ بررسی کردند. پس از اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها و مشاهده افزایش آن با افزایش نسبت حجمی نانوذرات، آنها هدایت حرارتی را به عنوان تابعی از نسبت حجمی نانوذرات معرفی کردند. به طور کلی، در سوسپانسیون‌های متداول (حاوی ذرات میلی‌متری و میکرومتری) هدایت حرارتی به تغییرات دما نسبت به سیال پایه حساس‌تر است. اما در نانوسیال‌ها، طبق مطالعات صورت‌گرفته، تغییرات دما در حرکت براونی و خوشه‌بندی نانوذرات تأثیر می‌گذارد و به دنبال آن باعث تغییر مقدار هدایت حرارتی در جهت افزایش آن خواهد شد [۱۷]. در همین راستا، پاتل و همکارانش [۱۸] هدایت حرارتی مؤثر

نانوسیال‌های پایه آبی و تولوئن حاوی نانوذرات مختلف Au با قطر متوسط ۱۰-۲۰ نانومتر را اندازه‌گیری کردند. نمونه‌های نانوسیال در نسبت حجمی ۰/۰۰۰۲۶/۰ سنتز شد و در محدوده دمایی ۳۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس به روش سیم داغ گذرا ارزیابی شد. نتایج افزایش ۲۱.۵ درصدی ضریب هدایت حرارتی را در این محدوده دمایی نشان داد و پارامتر دما را از عوامل تأثیرگذار در افزایش هدایت حرارتی مؤثر سوسپانسیون‌ها معرفی کردند. همچنین، ونگ و ایز و همکارانش [۱۹] مطالعاتی جهت تعیین تغییرات هدایت حرارتی با دما انجام دادند. آنها نانوذرات  $TiO_2$  را با نسبت حجمی ۰/۲ تا ۲ درصد در آب پراکنده کردند. ایشان جهت اندازه‌گیری هدایت حرارتی از روش سیم داغ گذرا در محدوده ۱۵ تا ۳۵ درجه سلسیوس استفاده کردند و نتایج به دست آمده وابستگی هدایت حرارتی را به دما نشان داد به طوری که هدایت حرارتی نانوسیال‌ها با افزایش دما افزایش می‌یابد.

روش‌های تجربی مختلفی جهت اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به کار می‌رود که در این راستا می‌توان به روش سیم داغ گذرا، سطوح موازی پایدار، نوسانات دمایی و ۳-امگا اشاره کرد. اما در مطالعات و پژوهش‌های انجام شده معمولاً از روش سیم داغ گذرا استفاده می‌کنند، زیرا این روش یکی از روش‌های دقیق جهت تعیین هدایت حرارتی سیال‌ها نسبت به سایر روش‌های مطرح است و یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تجربی به شمار می‌رود [۸]. هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال با استفاده از دستگاه KD2 Pro اندازه‌گیری می‌شود که این دستگاه از روش سیم داغ گذرا برای تعیین خواص حرارتی نانوسیال‌ها استفاده می‌کند [۲۰]. از مزایای این روش می‌توان به حذف کامل اثرات همرفت طبیعی در نانوسیال اشاره کرد، به علاوه اینکه این روش از روش‌های دیگر بسیار سریع‌تر است [۸]. این روش بر مبنای اندازه‌گیری تغییرات دما طی فرآیند انتقال حرارت توسط یک سیم کوچک است که این سیم هم به عنوان منبع گرما و هم حسگر دما استفاده می‌شود. این سیم کوچک دارای نسبت انتشار حرارتی زیادی دارد که گرما را به طور کامل به اطراف نمونه نانوسیال منتقل می‌کند. به این صورت که جریان الکتریکی در سیم شارش می‌یابد و آن را تبدیل به منبع گرما می‌کند و دمای سیم و به دنبال آن دمای نانوسیال افزایش خواهد یافت ولی این افزایش دما به هدایت حرارتی نمونه بستگی دارد [۷]. البته اخیراً طی مطالعاتی به مقایسه روش سیم داغ گذرا و روش‌های دیگر پرداختند و اشاره کردند که هدایت‌های حرارتی بسیار زیاد به دست آمده با استفاده از روش سیم داغ گذرا ممکن است به علت اثرات موج گرمایی ناشی از انتشار حرارتی شدید سیم باشد و از این رو برخی خطاهای اضافی را ایجاد کند. با این همه، با استفاده از داده‌های تجربی حاصل از روش سیم داغ گذرا می‌توان به درک بهتری از اثرات انتقال گرما بر افزایش هدایت حرارتی مؤثر در سوسپانسیون حاوی نانوذرات دست

یافت [۲۰]. اکسید مس یکی از رایج‌ترین انواع نانوذرات است که به دلیل هدایت حرارتی شدید در مقایسه با سایر اکسیدهای فلزی مطالعه شده است [۲۱]. اکسید مس غیر سمی است و به راحتی توسط اکسیداسیون مس به دست می‌آید و یکی از مهمترین اکسیدهای فلزی است که اخیراً به دلیل هزینه کم تولید آن، فراوان بودن و همچنین خواص خاص آن در تحقیقات استفاده می‌شود. اکسید مس ساختار مونوکلینیک دارد و نیم‌رسانای نوع p با شکاف انرژی ۱/۵eV-۱/۲ است که به عنوان گسیلنده میدانی و عامل کاتالیزوری کارآمد و حساس به گاز مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، در زمینه‌هایی مانند ابررساناها و یاخته‌های خورشیدی و باتری‌ها در نقش یک عامل غیر معدنی مهم استفاده می‌شود [۲۲، ۲۳]. از طرفی، نانوذرات اکسید مس به دلیل خواص انتقال حرارت مناسب جهت افزایش هدایت حرارتی در نانوسیال‌ها استفاده می‌شود [۵].

در مقاله حاضر، نانوسیال اکسید مس با استفاده از آب مقطر به عنوان سیال پایه به روش دومرحله‌ای و در سه نسبت حجمی متفاوت ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به منظور بررسی تأثیر نسبت حجمی نانوذرات و دما در هدایت حرارتی سیال پایه سنتز شد. سپس با اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال اکسید مس در محدوده دمای ۲۳-۵۱ درجه سلسیوس توسط دستگاه KD2 Pro، نتایج در این مقاله ارائه شد. لازم است ذکر کنیم، که در این پژوهش بر خلاف سایر مقالات مطرح شده، جهت حفظ کیفیت نمونه و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی در هنگام استفاده کاربردی در تجهیزات انتقال حرارت، pH نمونه‌های نانوسیال در نسبت‌های حجمی مختلف اندازه‌گیری شده و با رسیدن pH نمونه به منطقه خنثی، نسبت حجمی نانوسیال افزایش داده نشد. به عبارتی دیگر، pH نانوسیال در این پژوهش به عنوان نقطه توقف در افزایش نسبت حجمی نانوسیال مطرح شد. در نهایت، نتایج آزمایشگاهی هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال اکسید مس-آب با مقادیر پیش‌بینی شده مدل‌های نظری موجود مقایسه شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

سنتز نانوذرات اولین گام جهت تهیه نانوسیال به شمار می‌آید. در این پژوهش نانوذرات مورد استفاده، از شرکت US Research Nanomaterials تهیه شد. بنابراین، پس از تهیه نانوذرات اکسید مس جهت مشخصه‌یابی نمونه‌ها و بررسی خواص کیفی آنها و اطمینان از خلوص و اندازه نانوذرات، از آنالیزهای XRD و EDX و SEM استفاده شد. خواص فیزیکی و ترموفیزیکی نانوذرات اکسید مس تهیه شده در جدول ۱ آورده شده است.

**جدول ۱** مشخصات نانوذرات اکسید مس.

خواص	توضیحات
رنگ	پودر قهوه‌ای رنگ
ریخت (شکل ظاهری)	تقریباً کروی
خلوص (%)	۹۹
اندازه	۵۰ nm
مساحت سطح ویژه	۱۲,۸m <sup>2</sup> /gr
چگالی حقیقی	۶,۴gr/cm <sup>3</sup>
چگالی حجمی	۰,۷۹gr/cm <sup>3</sup>

جهت تهیه نانوسیال اکسید مس پایه آبی از روش دومرحله‌ای استفاده شد و طی سنتز از هیچ ماده‌ای به عنوان عامل پایدارکننده برای عدم تغییر خواص نانوسیال استفاده نشد. از آنجا که، در روش دومرحله‌ای کلوخه شدن و رسوب نانوذرات معضل بزرگی است، از دستگاه اولتراسونیک حمامی الما ساخت کشور آلمان با مدل E30H جهت تخریب کلوخه‌های بین نانوذرات و جلوگیری از رسوب‌گذاری آنها و به دست آوردن سوسپانسیونی با پراکندگی یکنواخت و تعلیق پایدار استفاده شد. در ابتدای فرآیند، جهت تهیه نمونه‌های نانوسیال در نسبت‌های حجمی مختلف ۱٪ و ۲٪ و ۳٪، مقادیر وزنی مورد نیاز نانوذرات اکسید مس محاسبه شده و با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰,۰۰۱ گرم توزین شد. بنابراین، جهت آماده‌سازی نمونه‌های نانوسیال با نسبت حجمی ۱٪ و ۲٪ و ۳٪، مقدار نانوذرات مورد نیاز ۰,۴، ۰,۸، ۱,۲ گرم محاسبه شد و به ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده شد. مشاهده شد پس از افزودن نانوذرات به آب با تجمع نانوذرات به دلیل وجود نیروهای واندروالس، ته‌نشینی بعد از چند دقیقه آغاز می‌شود و حالت ناپایدار و غیرهمگنی در نانوسیال ایجاد می‌شود.

بنابراین از اولتراسونیک حمامی به مدت ۳۰ دقیقه به منظور جلوگیری از مشکل ته‌نشینی شدن و تعلیق پایدار نانوذرات در سیال پایه استفاده شد و مشاهده شد که ظرف حاوی نمونه نانوسیال توسط مولد امواج اولتراسونیک با فرکانس و شدت زیادی مرتعش شده و با پراکنده ساختن نانوذرات در سیال پایه، نانوسیال از حالت ته‌نشینی در آمده و تشکیل سوسپانسیون پایدار می‌دهد. اطلاعات مربوط به سنتز نمونه‌های نانوسیال با نسبت‌های حجمی مختلف به طور خلاصه در جدول ۲ آورده شده است.



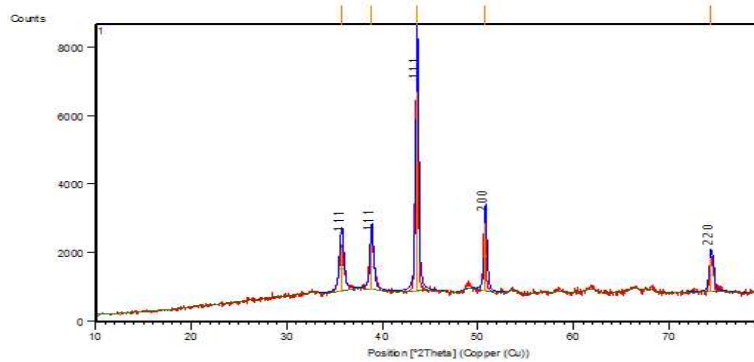
**جدول ۲** مشخصات سنتز نمونه‌های نانوسیال اکسید مس در نسبت‌های حجمی مختلف.

۰٫۴ gr	مقدار نانوذره اکسید مس ۵۰ nm در غلظت ۱٪
۰٫۸ gr	مقدار نانوذره اکسید مس ۵۰ nm در غلظت ۲٪
۱٫۲ gr	مقدار نانوذره اکسید مس ۵۰ nm در غلظت ۳٪
۴۰ ml	حجم سیال پایه (آب مقطر)
۰٫۵۸۶ w/m.k	ضریب هدایت حرارتی سیال پایه
دو مرحله‌ای	روش آماده‌سازی نانوسیال
۳۰ دقیقه	زمان اولتراسونیک
۲۳-۵۱ °C	دما

پس از سنتز نمونه‌های نانوسیال جهت حفظ کیفیت نمونه‌ها، توسط کاغذ pH آلمانی، pH همه نمونه‌های نانوسیال اکسید مس-آب اندازه‌گیری شد و نتایج مقادیر اندازه‌گیری شده ثبت شد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها وجود دارد که در این پژوهش از روش سیم داغ گذرا به دلیل سرعت عالی و دقت در اندازه‌گیری استفاده می‌شود. بدین منظور، از دستگاه KD2Pro و حسگر KS-1 با دقت ۰٫۵٪ که بهترین گزینه برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی سیال‌ها محسوب می‌شود استفاده شد. این حسگر برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی انواع نانوسیال با سیال‌های پایه متفاوت مناسب است. در این روش حسگر دستگاه KD2 Pro درون ظرف مخصوص نمونه‌های نانوسیال قرار گرفت و با توجه به غلظت انتخاب شده، میزان ضریب هدایت حرارتی در محدوده دمایی ۲۳-۵۱ °C اندازه‌گیری شد و نتایج به منظور بررسی تأثیر نسبت حجمی و دما در ضریب هدایت حرارتی ثبت شد.

### ۳. نتایج و بحث

پس از تهیه نانوذرات اکسید مس جهت تجزیه و تحلیل ساختار بلوری و شناسایی فازهای نمونه از پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. نتیجه به دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نانوذرات اکسید مس، با زاویه  $2\theta$  در محدوده ۱۰ تا ۸۰ درجه در شکل ۱ ارائه شده است. الگوی پراش پرتو ایکس نشان داد که همه قله‌های اصلی پراش نمونه با داده‌های استاندارد مطابقت می‌کند. همچنین، همان‌طور که در شکل ۱ مشخص شده تیز بودن قله‌ها گویای درجه خلوص و بلورینگی عالی نمونه نانوذرات تهیه شده است.

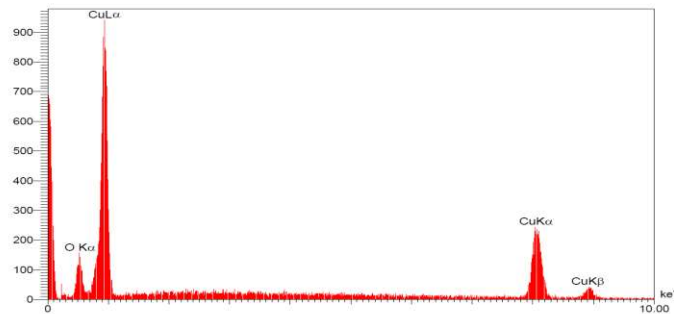


شکل ۱ الگوی XRD نانوذرات اکسید مس.

در ادامه، با استفاده از داده‌های الگوی پراش نانوذرات اکسید مس و جاگذاری آنها در رابطه شیرر [۲۴] میانگین اندازه بلورک‌ها  $14.56 \text{ nm}$  محاسبه شد،

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $D$  اندازه بلورک‌ها،  $l$  طول موج پرتو ایکس،  $b$  نیم پهنای گوسی،  $q$  زاویه پراش و  $K$  ثابتی است که به شکل نانوذرات وابسته و مقدار آن برابر  $0.94$  است. جهت شناسایی بهتر نانوذرات اکسید مس طیف EDX تهیه و نتایج در شکل ۲ نشان داده شد. زیرا EDX می‌تواند آنالیز عنصری دقیق‌تری درباره نانومواد نمایش دهد. با توجه به طیف EDX نمونه سنتز شده، حضور عناصر مس و اکسیژن توسط قله‌های Cu و O ثابت شد. با توجه به ارتفاع بیشتر قله مس در مقایسه اکسیژن می‌توان به غلظت زیاد اتم‌های مس پی برد. با توجه به الگوی پراش هیچ گونه قله‌ای مربوط به ناخالصی مشاهده نشد.



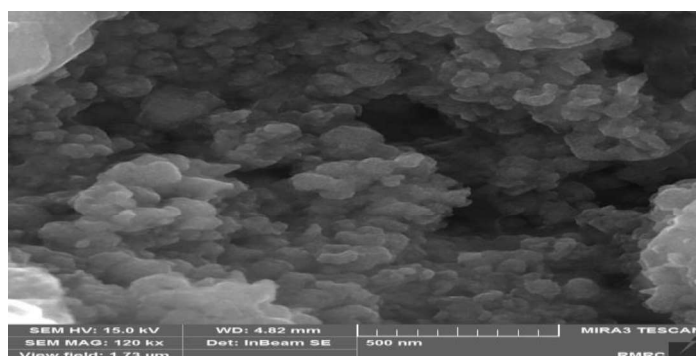
شکل ۲ آنالیز EDX نمونه اکسید مس تهیه شده.

۸۰ / سنتز و بررسی تجربی اثر نسبت حجمی و دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس-آب

**جدول ۳** درصد وزنی عناصر مس و اکسیژن در نمونه اکسید مس.

عناصر	درصد وزنی W(%)
Cu	۸۹٫۱۸
O	۱۰٫۸۲

به منظور بررسی و اطمینان از اندازه و ریخت نانوذرات یا به عبارت دیگر، ویژگی های سطح نانوذرات اکسید مس، از آنالیز SEM استفاده شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل ۳ ارائه شده است. بررسی این تصویر ابعاد نانومتری نانوذرات اکسید مس را تأیید می کند و واضح است که ابعاد نمونه در مقیاس نانو قرار دارد و همچنین تصاویر بیانگر شکل تقریباً کروی نانوذرات است.



**شکل ۳** تصویر SEM نانوذرات اکسید مس.

پس از سنتز نانوسیال اکسید مس داده های آزمایشگاهی مربوط به ضریب هدایت حرارتی نمونه ها که توسط دستگاه KD2Pro در دمای اتاق و در نسبت های حجمی متفاوت به دست آمد و در جدول ۴ ارائه شد.

**جدول ۴** نتایج تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس.

pH نمونه های نانوسیال	درصد افزایش (%)	ضریب هدایت حرارتی نانوسیال (w/m.k)	نسبت حجمی نانوذرات اکسید مس	ضریب هدایت حرارتی سیال پایه (w/m.k)
۶	۲۲٫۸۶	۰٫۷۲۰	٪۱	۰٫۵۸۶
۶٫۵	۴۱٫۸۵	۰٫۹۲۳	٪۲	۰٫۵۸۶
۷	۸۴٫۹۸	۱٫۰۸۴	٪۳	۰٫۵۸۶

همانطور که نتایج نشان می‌دهد با اضافه کردن نانوذرات اکسید مس به سیال پایه آب مقطر، ضریب هدایت حرارتی همه نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این مقدار با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در سیال پایه بیشتر می‌شود. به عبارتی دیگر، از آنجا که نانوذرات به عنوان ماده جامد درون سیال پایه قرار گرفتند، سیال‌های حاوی نانوذرات جامد معلق ضریب هدایت حرارتی بیشتری نسبت به سیال پایه دارند و هرچه نسبت حجمی نانوذرات را افزایش دهیم، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال سنتز شده افزایش می‌یابد.

برای یافتن پاسخی برای این پرسش که تا کجا می‌توان نسبت حجمی نانوذرات را درون سیال پایه افزایش داد، pH نمونه‌های نانوسیال مرحله به مرحله اندازه‌گیری شد. ملاحظه شد که با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در سیال پایه آب، pH تمامی نمونه‌ها نیز افزایش یافت تا اینکه در نسبت حجمی ۳٪ به مقدار ۷ یا همان منطقه خنثی رسید. از این موضوع چنین استنباط می‌شود که با افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس در سیال پایه میزان ضریب هدایت حرارتی سیر صعودی داشته ولی باید مقدار pH نانوسیال را مرحله به مرحله کنترل کرد تا از ایجاد یک محیط بازی در نمونه‌های نانوسیال و آسیب‌های احتمالی هنگام استفاده کاربردی از نانوسیال‌ها جلوگیری شود.

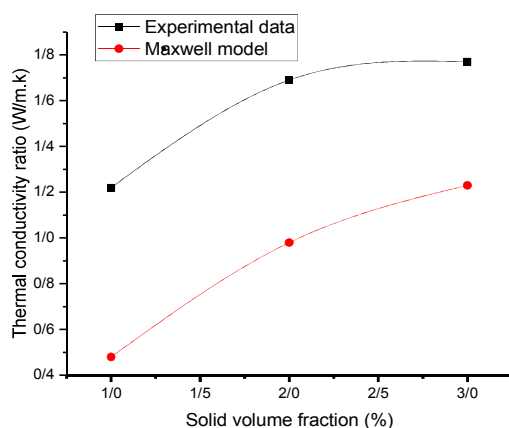
با تمام این تفاسیر، با توجه به مقدار pH در نمونه نانوسیال اکسید مس-آب با نسبت حجمی ۳٪، می‌توان عنوان کرد که این مقدار نسبت حجمی، نقطه بهینه در بین نسبت‌های حجمی موجود است، زیرا بیشترین ضریب هدایت حرارتی را به همراه pH خنثی دارد. بنابراین، افزایش نسبت حجمی تا ۴٪ و بیشتر ادامه داده نشد و می‌توان عنوان کرد که مقدار pH نقطه توقف در افزایش نسبت حجمی در نانوسیال محسوب می‌شود. در ادامه، جهت مقایسه نتایج تجربی با داده‌های حاصل از روابط نظری و همچنین ارزیابی اعتبار مدل نظری برای بررسی هدایت حرارتی سیال‌های حاوی ذرات معلق، از معادله ماکسول که اولین رابطه نظری جهت اندازه‌گیری هدایت حرارتی سوسپانسیون‌های حاوی ذرات کروی است استفاده شد. رابطه ماکسول [۲۵] در زیر آمده است،

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2j(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - j(k_p - k_f)} \quad (2)$$

که در آن،  $k_f$  و  $k_{nf}$  و  $k_p$  به ترتیب، هدایت حرارتی سیال پایه و نانوسیال و ذراتی با شکل کروی هستند و  $j$  نسبت حجمی ذرات است. شکل ۴ مقایسه مقادیر هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ماکسول را نشان می‌دهد.

همانطور که در نمودار شکل ۴ مشاهده شد، مقادیر هدایت حرارتی به دست آمده به صورت تجربی نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده بسیار بیشتر است. از آنجا که، مدل ماکسول از میان تمامی عوامل تأثیرگذار در ضریب هدایت حرارتی فقط نسبت حجمی ذرات را در نظر

می‌گیرد و اثرات مهمی چون اندازه ذرات و لایه‌سازی در ذرات-سیال را در نظر نمی‌گیرد، این ممکن است دلیلی برای به دست آوردن هدایت حرارتی بیشتر در نتایج آزمایشگاهی باشد [۲۶]. همچنین، بررسی نظریه فونون برای هدایت حرارتی نشان می‌دهد که پراکندگی مرزی که به دلیل اندازه ذرات اتفاق می‌افتد در هدایت حرارتی نانوذرات تأثیرگذار است و اگر این تأثیر در معادله ماکسول به کار گرفته شود به طور دقیق‌تری موجب پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیال خواهد شد [۱۴].



شکل ۴ نمودار مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل نظری در دمای محیط.

جهت بررسی تأثیر دما در ضریب هدایت حرارتی، نمونه‌های دارای کمترین و بیشترین میزان نسبت حجمی، در محدوده دمایی ۲۳-۵۱ درجه سلسیوس بررسی شدند. به همین منظور دمای نمونه‌های نانوسیال با نسبت حجمی ۱٪ و ۳٪ به دلیل نداشتن عامل پایدارکننده و ته‌نشینی سریع توسط دستگاه اولتراسونیک حمامی افزایش داده شد. حسگر دستگاه KD2 در نمونه نانوسیال اکسید مس-آب قرار داده شد و ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و نتایج در جدول (۵) و (۶) آورده شد.

جدول ۵ نتایج تأثیر دما بر ضریب هدایت حرارتی نمونه نانوسیال با نسبت حجمی ۱٪.

شماره نمونه	دما (°C)	هدایت حرارتی نمونه (w/m.k)	میزان افزایش (%)
۱	۲۴	۰,۷۲۰	۲۲,۸۶
۲	۳۳	۰,۷۳۲	۲۴,۹۱
۳	۳۴	۱,۴۰۷	۱۴۰,۱۰
۴	۳۵	۱,۴۵۹	۱۴۸,۹۷
۵	۴۱	۱,۵۱۶	۱۵۷,۶۷

**جدول ۶** نتایج تأثیر دما بر ضریب هدایت حرارتی نمونه نانوسیال با نسبت حجمی ۳٪.

شماره نمونه	دما (°C)	هدایت حرارتی نمونه (w/m.k)	میزان افزایش (%)
۱	۳۰	۱,۰۸۴	۸۴,۹۸
۲	۳۲	۱,۱۵۹	۹۷,۷۸
۳	۴۸	۱,۵۰۱	۱۵۶,۱۴
۴	۵۰	۱,۷۸۳	۲۰۴,۲۶
۵	۵۱	۲,۸۹۱	۳۹۳,۳۴

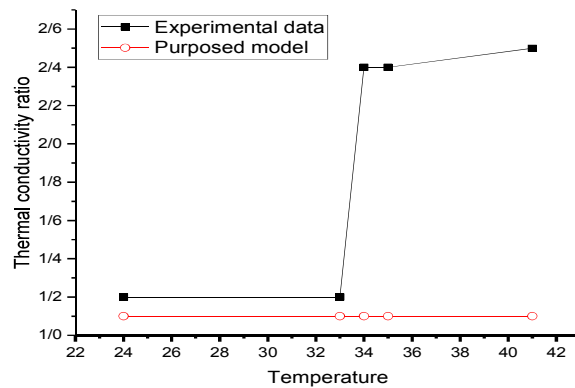
همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش دما ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال اکسید مس-آب در نسبت‌های حجمی ۱٪ و ۳٪ به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و این افزایش در نسبت حجمی ۳٪ به وضوح بیشتر است. علت اصلی بهبود هدایت حرارتی با افزایش درجه حرارت را می‌توان با افزایش تعاملات میان نانوذرات و حرکت براونی توضیح داد. به عبارتی دیگر، در نسبت‌های حجمی زیاد تعداد نانوذرات معلق بیشتر بوده، در نتیجه با افزایش دما برخورد میان نانوذرات و حرکات تصادفی بین نانوذرات و ملکول‌های سیال پایه افزایش می‌یابد. در واقع، با حضور تعداد زیادی از نانوذرات، اثر دما در حرکت ذرات ملموس‌تر است و همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شد بیشترین افزایش هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس-آب در نسبت حجمی ۳٪ و دمای ۵۱ درجه سلسیوس رخ می‌دهد [۲۷]. در حقیقت، ممکن است تعداد زیادی از نانوذرات اکسید مس درون سیال، که بر اثر حرکت براونی حرکت می‌کنند، باعث شوند که ملکول‌های سیال در فواصل زمانی نزدیک به طور مرتب یک اثر میکروجاب‌جایی در اطراف هر ذره درون سیال پایه ایجاد کنند و این اثرات و آشفتگی ناشی از حرکت براونی به نوبه خود سبب افزایش انتقال حرارت در نانوسیال می‌شود [۱۴].

در ادامه جهت مقایسه نتایج تجربی با داده‌های حاصل از روابط نظری، از یک مدل پیشنهادی استفاده شد که بدیهی‌ترین ویژگی مهم این مدل آن است که علاوه بر نسبت حجمی ذرات، پارامتر فیزیکی مهم دما نیز در نظر گرفته شده است. این رابطه پیشنهادی [۲۷] چنین است

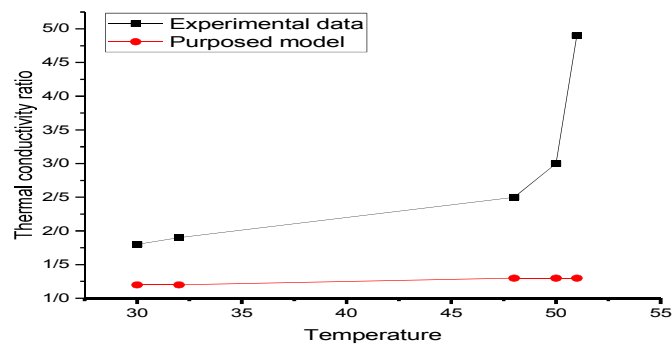
$$\frac{K_{nf}}{k_f} = 1 + j^{0.7038} T^{0.6009} \quad (3)$$

که در آن،  $k_f$  و  $K_{nf}$  نشان‌دهنده هدایت حرارتی سیال پایه و نانوسیال،  $j$  نسبت حجمی ذرات و  $T$  بیانگر دماست. شکل ۵ و ۶ مقایسه مقادیر هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده و مقادیر

پیش‌بینی شده با استفاده از مدل پیشنهادی را در محدوده دمایی ۲۳-۵۱ درجه سلسیوس و نسبت‌های حجمی ۰.۱٪ و ۰.۳٪ نشان می‌دهد.



شکل ۵ نمودار مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل نظری در دماهای مختلف برای نسبت حجمی ۰.۱٪.

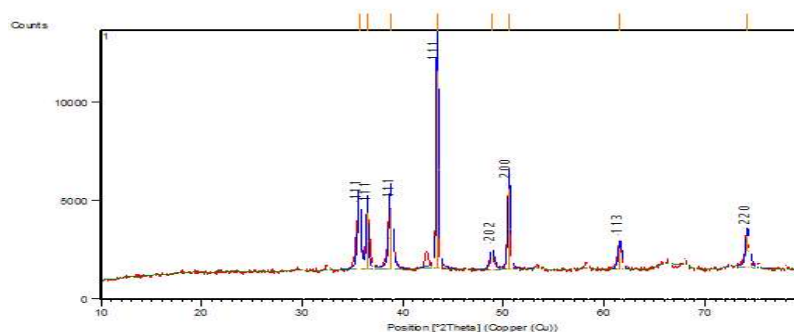


شکل ۶ نمودار مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل نظری در دماهای مختلف برای نسبت حجمی ۰.۳٪.

مطابق نتایج در نمودارهای شکل ۵ و ۶، می‌توان دریافت که هدایت حرارتی محاسبه شده توسط مدل نظری پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری شده فقط در دمای محیط به هم نزدیکند و این نزدیکی در نسبت حجمی ۰.۱٪ مشهودتر است. این مسئله نشان‌دهنده کمبود مدل‌های نظری موجود در توصیف انتقال حرارت نانوسیال‌هاست. به این دلیل که به نظر می‌رسد هدایت حرارتی نانوسیال به حرکات میکروسکوپی نانو ذرات مانند حرکت براونی و ساختار ذرات وابسته باشد. بنابراین، هر مدل جدیدی برای توصیف هدایت حرارتی نانوسیال‌ها باید حرکات میکروسکوپی نانو ذرات

و رفتار وابسته به ساختار نانوذرات را که مربوط به اندازه و خصوصیات سطح آنهاست شامل شود [۲۵].

پس از اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی، نمونه با نسبت حجمی ۳٪ به دلیل غلظت بهینه انتخاب و جهت تجزیه و تحلیل ساختار بلوری و شناسایی فازهای نمونه و بررسی تأثیر دما در اندازه بلورکها و ریخت نانوذرات بعد از سنتز نانوسیال، از آنالیزهای XRD و FESEM استفاده شد و نتایج در شکل های ۷ و ۸ نمایش داده شد.



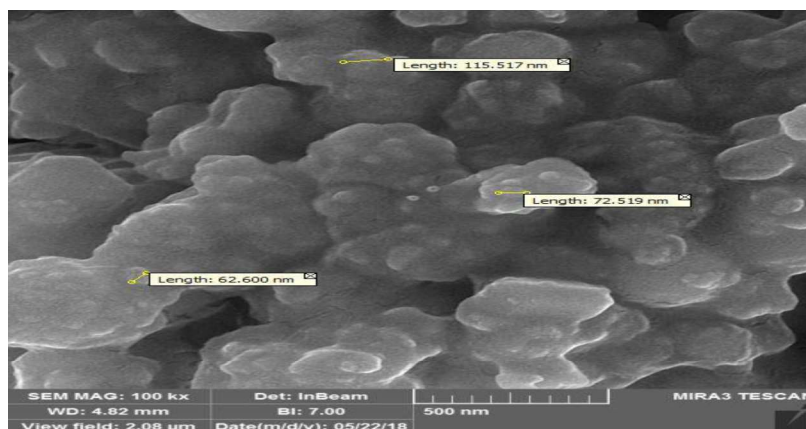
شکل ۷ الگوی XRD نانوسیال اکسید مس مربوط به نسبت حجمی ۳٪.

الگوی پراش پرتو ایکس تغییر فاز را در نانوسیال اکسید مس سنتز شده نشان داد. وجود سه فاز در نانوسیال سنتز شده با نسبت حجمی ۳٪ را می توان به این صورت توجیه کرد که حرارت دهی و افزایش دمای نمونه در حین آزمایش سبب تغییر فاز نانوسیال اکسید مس شده است. برای بررسی اثر دما در اندازه بلورکها و با توجه به اینکه رابطه شیر یکی از شاخص هایی است که ریز شدن یا درشت شدن بلورکها را مشخص می کند، با استفاده از داده های الگوی پراش پرتو ایکس نانوسیال اکسید مس با نسبت حجمی ۳٪ و جاگذاری آنها در این رابطه، میانگین اندازه بلورکها حدود ۳۲٫۸۱ nm محاسبه شد.

طی مقایسه میانگین اندازه ریز بلورکهای نانوذرات در زمان های قبل و بعد از سنتز نانوسیال، مشاهده شد که با سنتز نانوسیال، اندازه بلورکها به سمت درشت شدن پیش رفته است. این تفاوت در اندازه بلورکها را می توان به افزایش پی در پی دمای کلوخه شدن نانوذرات در حین سنتز نمونه نانوسیال نسبت داد. تأیید این فرضیه توسط آنالیز FESEM صورت گرفت که در شکل ۸ نشان داده شد.



بررسی این تصویر ابعاد نانومتری نمونه نانوسیال اکسید مس پودر شده را تأیید می‌کند و واضح است که ابعاد نمونه پودر شده در مقیاس نانو قرار داد و همچنین تصاویر بیانگر شکل تقریباً کروی نانوذرات است. با وجود این، نکته مهمی که در تصاویر مربوط به FESEM مشاهده می‌شود، تجمع و کلوخه‌ای بودن نمونه سنتز شده و همچنین وجود تفاوت در اندازه نانوذرات نمونه نانوسیال اکسید مس پودر شده نسبت به نانوذرات تهیه شده است. این موضوع را می‌توان این گونه توجیه کرد که خشک کردن نمونه با افزایش دما توسط آون، باعث افزایش چسبندگی میان نانوذرات شده و این امر باعث کلوخه‌ای شدن نمونه و همچنین افزایش اندازه نانوذرات در نمونه نانوسیال سنتز شده نسبت به نانوذرات تهیه شده می‌شود. پس عامل مهمی که باعث ایجاد اختلاف در اندازه نانوذرات و کلوخه‌ای شدن آنها نقش دارد، خشک کردن نمونه با افزایش دما در دستگاه آون است. از طرفی، شکل تقریباً کروی نانوذرات در نمونه سنتز شده نشان داد که افزایش دما در ریخت نانوذرات تأثیری نخواهد گذاشت.



شکل ۸ تصاویر FESEM از نمونه پودر شده نانوسیال اکسید مس مربوط به نسبت حجمی ۳٪.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر نسبت حجمی و دما را در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس به صورت تجربی و آزمایشگاهی بررسی کردیم. در این فرآیند از نانوذرات اکسید مس پس از تهیه و مشخصه‌یابی توسط آنالیزهای XRD و EDX و SEM، جهت آماده‌سازی نمونه‌های نانوسیال استفاده شد. نانوسیال اکسید مس پایه‌آبی به روش دومرحله‌ای در نسبت‌های حجمی متفاوت ۱٪ و ۲٪ و ۳٪ به عنوان نمونه‌های آزمایشگاهی سنتز شد و بدین منظور از آب مقطر به عنوان سیال پایه استفاده شد. نمونه‌های نانوسیال به منظور ایجاد سوسپانسیونی با پراکندگی یکنواخت و تعلق پایدار

به مدت ۳۰ دقیقه درون دستگاه اولتراسونیک قرار گرفتند. سپس جهت بررسی اثر نسبت حجمی و دما در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس-آب سنتز شده، با استفاده از دستگاه KD2Pro ضریب هدایت حرارتی همه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و نتایج ثبت شد. طی این آزمایش‌ها و بررسی نتایج، مشخص شد که با افزایش نسبت حجمی نانوذرات اکسید مس درون آب مقطر، افزایش ضریب هدایت حرارتی در تمامی نمونه‌ها اتفاق افتاد، به طوری که نمونه با نسبت حجمی ۳٪ بیشترین ضریب هدایت حرارتی را در میان نمونه‌ها دارد. علت این افزایش را می‌توان به بزرگ بودن ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اکسید مس در مقایسه با آب مقطر نسبت داد و غلظت زیاد نانوذرات و سطح ویژه بزرگ آنها را سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها دانست. در حقیقت، می‌توان عنوان کرد وجود نانوذرات بیشتر باعث ایجاد مساحت سطح تماس بیشتر بین فاز جامد (نانوذرات اکسید مس) و سیال (آب مقطر) خواهد شد و به دنبال آن به افزایش شدید هدایت حرارتی می‌انجامد. از طرفی، نمونه دارای نسبت حجمی ۳٪ نقطهٔ بهینه در بین غلظت‌های موجود است، زیرا علاوه بر داشتن بیشترین ضریب هدایت حرارتی، pH خنثی دارد و pH نانوسیال به عنوان نقطهٔ توقف افزایش نسبت حجمی نمونه‌ها مطرح شد. سپس اثر دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید مس-آب سنتز شده در کمترین و بیشترین نسبت حجمی بررسی شد. طی این آزمایش‌ها، مشخص شد که افزایش دما باعث افزایش هدایت حرارتی در نمونه‌های دارای نسبت‌های حجمی ۱٪ و ۳٪ شد و افزایش ضریب هدایت حرارتی را نسبت به دمای محیط نشان داد. این افزایش به این علت صورت گرفت که افزایش دما باعث افزایش حرکت براونی نانوذرات اکسید مس و افزایش برخورد آنها با ملکول‌های سیال شده و سرعت انتقال حرارت و در نتیجه ضریب هدایت حرارتی نمونه نسبت به دمای محیط بهبود می‌یابد. در حقیقت به دلیل اندازهٔ کوچک نانوذرات درون سیال پایه، انتقال انرژی از طریق حرکات براونی و نیروهای درون‌ذره‌ای صورت می‌گیرد. ممکن است تعداد زیادی از نانوذرات که بر اثر حرکت براونی حرکت می‌کنند باعث ایجاد میکروجاب‌جایی‌هایی در اطراف هر ذره درون سیال پایه و ایجاد اثرات آشفستگی شود که همهٔ این موارد انتقال حرارت نانوسیال را افزایش می‌دهد.

در ادامه مقایسهٔ میان نتایج تجربی هدایت حرارتی و داده‌های محاسبه شده با استفاده از مدل‌های نظری، کمبود این مدل‌ها را در توصیف انتقال حرارت نانوسیال‌ها نشان داد و مشخص شد به دلیل در نظر نگرفتن عوامل اثرگذاری چون حرکات میکروسکوپی نانوذرات درون سیال پایه و رفتار وابسته به ساختار نانوذرات از قبیل اندازه و خصوصیات سطح نانوذرات، این مدل‌ها نمی‌توانند به طور دقیق هدایت حرارتی نانوسیال را پیش‌بینی کنند. با همهٔ این موارد، تحقیقات

بیشتری برای وضوح درک تأثیر دما و نسبت حجمی نانوذرات در هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال‌ها لازم است.

### منابع

- [1] Lee S., Choi S.U.S., Li S. and Eastman J.A.; "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", *Journal of Heat Transfer*, 121, 280-289, (1999).
- [2] Xuan Y.; Li Q.; "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", *Journal of Heat Transfer*, 125, 151-155, (2003).
- [3] Esfe M.H., Karimpour A., Wei-Mon Yan., Akbari M., Safaei M. R., Dahari M., "Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol based nanofluid containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 728-734, (2015).
- [4] Timofeeva E. V., Routbort J. and Singh D., "Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids"; *Journal of Applied Physics*, vol 106, 014304, (2009).
- [5] Manimaran R., Palaniradja K., Alagumurthi N., Sendhilnathan S., Hussain J.; "Preparation and characterization of copper oxide nanofluid for heat transfer application", *Appl nanosci*, 4, 163-167, (2014).
- [6] Turget A., Tavman I., Chirtoc M., Schuchmann H. P., Sauter C., Tavman S. ; "Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluid", *Journal of Thermophysics*, 30, 1213-1226, (2009).
- [7] Yimsawasd T., Dalkilic A.S., Wongwises S., "Measurement thermal conductivity titania and alumina nanofluids", *Thermochimica Acta*, 545, 48-56, (2012).
- [8] Lee S., Choi S.U.S, Li S. and Eastman J.A., "Measurement thermal conductivity of nanofluids containing oxide nanoparticles"; *Journal of Heat Transfer*, 121, 474-480, (1999).
- [9] Beck M.P., Yuan Y., Warriar P., Teja A.S., "The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids", *J. Nanopart Res.*, 11, 1129-1136, (2009).
- [10] Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C.; "Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>-water based nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 367-373, (2005).
- [11] Kole M., Dey T.K., "Effect of prolonged ultrasonication on the thermal conductivity of ZnO-ethylen glycol nanofluid", *Thermochimica Acta*, 535, 58-65, (2012).
- [12] Xian W., Li X.F., "Influence of pH on nanofluids viscosity and thermal conductivity", *Chinese Physics Letters*, 26, 056601, (2009).
- [13] Hong T.K., Yang H.S., Choi C.J., "Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids", *Journal of Applied Physics*, 97, 609-735, (2005).
- [14] Li C., Peterson P., "Experimental investigation of temperature and volume fraction variation on effective thermal conductivity nanoparticle suspensions (nanofluid)", *Journal of Applied Physics*, 99, 084314, (2006).

- [15] Meenakshi K.S., Sudhan E.P, "Preparation and characterization of copper oxide-water based nanofluids by one step method for heat transfer applications", *Chemical Science Transactions*, 4, 127-132, (2015).
- [16] Fedele L., Colla L., Bobbo S., "Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles", *International Journal of Refrigeration*, 35, 1359-1366, (2012).
- [17] Lomascolo M., Colangelo G., Milanese M., Risi A.D., "Review of heat transfer in nanofluids; conductivity, convective and radiative experimental results", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1182-1198, (2015).
- [18] Patel H.P., Das S.K., Sundararajan T., "Thermal conductivities of naked and mono-layer protected metal nanoparticle based nanofluids; manifestation of anomalous enhancement and chemical effects", *Applied Physics Letters*, 83, 2931-2933, (2003).
- [19] Wongwises S., Duangthongsuk W., "Measurement of temperature dependent thermal conductivity and viscosity of Tio<sub>2</sub>-water nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 706-714, (2009).
- [20] Mintsu H.A., Roy G., Nguyen C.T., Doucet D., "New temperature dependent thermal conductivity data for water based nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 363-371, (2009).
- [21] Anandan D. and Rajan K.S., "Synthesis and stability of copper oxide-water based nanofluids: A novel coolant for efficient cooling", *Asian Journal of Scientific Research*, 5, 218-227, (2012).
- [22] Nithya K., Yuvasree P., Rajasekaran N., "Preparation and characterization of copper oxide nanonparticles", *International Journal of Chem Tech Research*, 6, 2220-2222, (2014).
- [23] Srivastava S., Kumar M., Agrawal A., Dwivedi S.D., "Synthesis and characterization of copper oxide nanoparticles", *Journal of Applied Physics*, 5, 61-65, (2013).
- [24] Razeghizadeh A.R., Zalaghi L., Kazeminezhad I., Rafee V. ; "Growth and optical properties investigation of pure Al- doped SnO<sub>2</sub> nanostructures by Sol-Gel method"; *Iranian Journal of chemistry and chemical Engineering*, 36(5), 1-8, (2017).
- [25] Wang X., Xu X., "Thermal conductivity of nanoparticle - fluid mixture", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13, 474-480, (1999).
- [26] Senthilraja S., Vijayakumar K., Gangadevi R., "A comparative study on thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water, Cu<sub>2</sub>O-water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu<sub>2</sub>O/water nanofluid", *Journal of nanomaterial and Biostructures*, 76, 1449-1458, (2015).
- [27] Sarbolookzadeh Harandi S., Karimipour A., Afrand M., Akbari M., Orazio A., "An experimental study thermal conductivity of F-MWCNTs-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/EG hybrid nanofluid; effects of temperature and concentration", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 171-177, (2016).