



## بررسی آزمایشگاهی اثر نانوذرات جامد هیبریدی نانولوله کربنی و اکسید منیزیم بر هدایت حرارتی اتیلن گلیکول

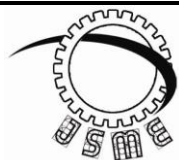
مسعود وفایی<sup>۱</sup>، مسعود افراند<sup>۲\*</sup>

\* نویسنده مسئول: masoud.afrand@pmc.iaun.ac.ir

| واژه‌های کلیدی  | چکیده   |
|---|---|
| هدایت حرارتی، نانوسیال هیبریدی، اکسید منیزیم-نانولوله کربنی، اتیلن گلیکول، رابطه تجربی. | در دهه اخیر نانو سیالات پیشرفته‌ی جدیدی که از ذرات مختلف تشکیل شده‌اند مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. این گونه از نانوسیالات، که به نانوسیالات هیبریدی معروف هستند، عموماً از ترکیب دو گونه مختلف نانوذرات ترکیب شده در سیال پایه به دست می‌آیند. در این مقاله، بررسی آزمایشگاهی اثر نانوذرات جامد هیبریدی نانولوله کربنی و اکسید منیزیم بر ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول ارائه شده است. آزمایش‌ها در بازه دمایی ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی گراد بر روی نمونه‌هایی با کسر حجمی ۰/۰۵٪، ۰/۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲٪، ۰/۴٪ و ۰/۶٪ انجام شد. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که با افزایش مقدار نانوذرات و افزایش دما، ضریب هدایت حرارتی تا ۲۳/۳٪ افزایش می‌یابد. در پایان یک رابطه تجربی جدید به منظور پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی ارائه شد و تحلیل حاشیه انحراف برای آن پیشنهادی انجام شد. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که حداکثر حاشیه انحراف ۰/۹۵٪ بود که بیانگر دقت قابل قبول رابطه پیشنهادی برای پیش‌بینی مقادیر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال است. |
| تاریخ ارسال ۹۴/۱۱/۰۱  |   |
| تاریخ بازنگری ۹۴/۱۱/۲۹  |   |
| تاریخ پذیرش ۹۵/۰۲/۱۸  |   |

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

## Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



### **An experimental investigation on effect of hybrid solid MWCNTs and MgO on thermal conductivity of ethylene glycol**

Masoud Vafaei<sup>1</sup>, Masoud Afrand<sup>2,\*</sup>

\* Corresponding Author: [masoud.afrand@pmc.iaun.ac.ir](mailto:masoud.afrand@pmc.iaun.ac.ir)

#### **Abstract:**

In recent decade, the new advanced nanofluids, composed from various particles, have attracted the attention of researchers. This class of nanofluids, which can be prepared by suspending several types (two or more than two) of nanoparticles in base fluid, is termed as hybrid nanofluids. In this work, an experimental investigation on the effects of temperature and concentration of nanoparticles on the thermal conductivity of MgO-MWCNT/EG hybrid nanofluid is presented. The experiments performed at temperatures ranging from 25°C to 50°C and solid volume fraction range of 0 to 0.6%. The measurements revealed that the thermal conductivity of nanofluids enhances up to 23.3% with increase in concentration of nanoparticles and temperature. Moreover, efforts were made to provide an accurate correlation for estimating the thermal conductivity at various temperatures and concentrations. Deviation analysis of the thermal conductivity ratio was performed. The comparison between experimental results and correlations outputs showed a maximum deviation margin of 0.95%, which is an acceptable accuracy for an empirical correlation.

#### **Key words:**

Thermal conductivity,  
Hybrid nanofluid,  
MgO-MWCNTs,  
Ethylene glycol,  
Empirical correlation.

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

## ۱- مقدمه

در دهه اخیر با پیشرفت های به وجود آمده در ساخت نانوذرات جامد، نانوذرات جدیدی، که ترکیبی از نانوذرات مختلف هستند، با عنوان نانوذرات هیبریدی معروف شدند. باغبان زاده و همکاران [۱۷] اثر افزایش دما و همچنین افزایش کسر جرمی تا ۱٪ نانوذرات اکسید سیلیسیم و نانو لوله کربنی چند جداره<sup>۱</sup> را در سیال پایه آب در بازه دمایی ۲۷ و ۴۰ درجه سانتی گراد به صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش های آنها نشان می دهد که در این نانو سیال هیبریدی ضریب انتقال حرارت هدایت در کسر حجمی ۱٪ و در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد، حدود ۲۲٪ افزایش داشته است. مونخابایار و همکاران<sup>۲</sup> [۱۸] در یک آزمایش تجربی اثر افزایش دما و غلظت را بر روی نانو سیال هیبریدی متشکل از نانوذرات نقره و نانو لوله کربنی چند جداره و سیال پایه آب مورد بررسی قرار دادند. آنها این آزمایش را در بازه زمانی ۱۵ تا ۴۰ درجه سانتی گراد و افزایش کسر جرمی تا ۳٪ انجام دادند. نتایج آزمایش های آنها افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت تا ۱۴/۵٪ در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد و کسر جرمی ۳٪ می باشد. سیام و همکاران<sup>۳</sup> [۱۹] اثرات افزایش دما و کسر حجمی را در نانو سیال هیبریدی تشکیل شده از نانو ذرات اکسید آهن و نانو لوله کربنی چند جداره و سیال پایه آب به صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند. آزمایش های آنها در بازه دمایی ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد و در کسر حجمی تا ۳٪ انجام شد. نتایج آزمایش های آنها نشان می دهد که در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و کسر حجمی ۳٪ ضریب انتقال حرارت هدایت تا ۳۱٪ افزایش یافته است. همت و همکاران [۲۰] در یک آزمایش تجربی اثرات افزایش دما و غلظت نانو ذرات مس و اکسید تیتانیوم را در بازه دمایی ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد و تا کسر حجمی ۲٪ مورد بررسی قرار دادند. سیال پایه نیز هیبریدی و مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول بود. نتایج آزمایش های ایشان افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت تا ۴۴٪ در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و کسر حجمی ۲٪ بود.

از ۲۰ سال پیش تاکنون کاربرد های نانو سیالات در صنایع مختلف گسترش یافته است. نانو سیالات مخلوط هایی از نانو ذرات (تا قطر ۱۰۰ نانومتر) در مایعات رایج مانند آب، اتیلن گلیکول یا روغن هستند. خواص نانو سیالات پارامترهای مهم برای ارزیابی کیفیت انتقال حرارت هستند. در بیان خواص ترموفیزیکی نانو سیالات، هدایت حرارتی برای کاربرد های انتقال حرارت بسیار تعیین کننده است. به دلیل بالاتر بودن هدایت حرارتی نانوذرات در مقایسه با مایعات رایج افزودن نانوذرات در مایعات موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال می شود. بسیاری از محققین بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات تمرکز کردند و نشان دادند که نانو سیالات دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به سیالات معمولی هستند. خلاصه ای از پژوهش های پیشین برای درصد افزایش هدایت حرارتی نانو سیالات در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس این پژوهش ها ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات تابعی از جنس، اندازه، شکل، دما و کسر حجمی ذرات است.

جدول (۱) خلاصه ای از پژوهش های پیشین برای درصد افزایش

## هدایت حرارتی نانو سیالات

| مرجع | سیال پایه       | ذرات              | درصد افزایش |
|------|-----------------|-------------------|-------------|
| [۱]  | اتیلن گلیکول    | اکسید روی         | ۲۳          |
| [۲]  | آب/اتیلن گلیکول | اکسید تیتانیوم    | ۲۵          |
| [۳]  | آب              | اکسید آلومینیوم   | ۲۴          |
| [۴]  | آب              | اکسید آلومینیوم   | ۲۸          |
| [۵]  | آب              | اکسید آلومینیوم   | ۱۰          |
| [۶]  | آب              | اکسید آهن         | ۴۸          |
| [۷]  | آب              | اکسید روی         | ۲۱          |
| [۸]  | اتیلن گلیکول    | اکسید منیزیم      | ۴۶          |
| [۹]  | آب              | هیدرواکسید منیزیم | ۲۳          |
| [۱۰] | اتیلن گلیکول    | اکسید روی         | ۳۸          |
| [۱۱] | آب              | نانولوله کربنی    | ۳۸          |
| [۱۲] | آب              | نانولوله کربنی    | ۱۱/۳        |
| [۱۳] | آب              | نانولوله کربنی    | ۵۳          |
| [۱۴] | اتیلن گلیکول    | نانولوله کربنی    | ۱۴/۸        |
| [۱۵] | آب              | نانولوله کربنی    | ۴۶          |
| [۱۶] | آب              | نانولوله کربنی    | ۷           |

<sup>1</sup> Multi-Walled Carbon NanoTubes (MWCNTs)

<sup>2</sup> Munkhbayar et al.

<sup>3</sup> Syam et al.

تعلیق مناسب نانوذرات در سیال پایه می تواند خطای زیادی در اندازه گیری ایجاد کند. برای جلوگیری از این پدیده روش های مختلف وجود دارد.

در این بررسی آزمایشگاهی اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه استفاده شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانو لوله های کربنی چند جداره و اکسید منیزیم تشکیل شده بودند در مقدار معینی از اتیلن گلیکول (ساخت شرکت مرکد آلمان) تعلیق شدند. خواص فیزیکی و شیمیایی اتیلن گلیکول، اکسید منیزیم و نانو لوله های کربنی چند جداره به ترتیب در جداول (۲) تا (۴) ارائه شده اند. به منظور شناسایی ساختار نانوذرات تصاویر XRD از نانو لوله های کربنی و اکسید منیزیم تهیه شد که در شکل های (۱) و (۲) نشان داده شده اند.

جدول (۲) اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اتیلن گلیکول

| مشخصه       | مقدار                     |
|-------------|---------------------------|
| دمای احتراق | ۴۱۰ (°C)                  |
| غلظت اشباع  | ۱۵ (g/m <sup>3</sup> )    |
| نقطه ذوب    | -۱۳ (°C)                  |
| جرم مولی    | ۶۲/۰۷ (g/mol)             |
| چگالی       | ۱/۱۱ (g/cm <sup>3</sup> ) |
| مقدار pH    | ۶-۷/۵                     |
| نقطه جوش    | ۱۹۷/۶ (°C)                |
| فشار بخار   | ۰/۰۵۳ (kPa)               |

جدول (۳) اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اکسید منیزیم

| مشخصه          | مقدار                     |
|----------------|---------------------------|
| خلوص           | ٪۹۹                       |
| رنگ            | سفید                      |
| قطر            | ۴۰ نانومتر                |
| مساحت سطح ویژه | ~۲۵ (m <sup>2</sup> /g)   |
| شکل هندسی      | چند وجهی                  |
| چگالی          | ۳/۵۸ (g/cm <sup>3</sup> ) |

جدول (۴) اطلاعات فیزیکی و شیمیایی نانو لوله کربنی چند جداره

| مشخصه             | مقدار                          |
|-------------------|--------------------------------|
| خلوص (%)          | +۰/۹۷                          |
| رنگ               | سیاه                           |
| قطر خارجی         | ۵-۲۰ (nm)                      |
| قطر داخلی         | ۲-۶ (nm)                       |
| ضریب هدایت حرارت  | ۱۵۰۰ (W/m.K)                   |
| چگالی             | ۰/۱۵-۰/۳۵ (g/cm <sup>3</sup> ) |
| ظرفیت گرمایی ویژه | ۶۳۰ (J/kg.K)                   |

اتیلن گلیکول به صورت عادی برای انتقال حرارت استفاده می شود. اگرچه تکنیک های مختلفی به منظور افزایش انتقال حرارت اعمال شده است ولی راندمان حرارتی کم این مایع در انتقال حرارت مانع از انتقال حرارت بالا و فشرده گی در مبدل های حرارتی شده است. همانطور که در بالا ذکر شد استفاده از ذرات جامد به عنوان یک افزودنی (به حالت تعلیق) در مایع پایه یک تکنیک برای افزایش انتقال حرارت است. بالا بردن هدایت حرارتی ایده کلیدی برای بهبود انتقال حرارت است. از آنجا که نانوذرات اکسید فلزی و نانولوله های کربنی خاصیت حرارتی بیشتری نسبت به سیال پایه دارند به تعلیق در آوردن این نانو مواد در مایع پایه باعث افزایش هدایت حرارتی می شود. از طرفی مروری بر پژوهش های پیشین نشان داد که تاکنون تحقیقی بر روی نانو سیال هیبریدی متشکل از اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه و نانولوله های کربنی چند جداره و اکسید منیزیم انجام نشده است. همچنین به دلیل مکانیزم و ساختار پیچیده نانو سیالات، بسیاری از مدل های نوین و کلاسیک از تخمین ضریب هدایت حرارتی با دقت مطلوب عاجزند. بنابراین در این پژوهش، اثرات مربوط به کسر حجمی و دما بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال هیبریدی اتیلن گلیکول/نانولوله کربنی چند جداره-اکسید منیزیم به صورت تجربی و آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار می گیرد. به دلیل دقت زیاد و سرعت بالای روش سیم داغ گذرا در اندازه گیری ضریب انتقال هدایت حرارتی، در این پژوهش از این روش استفاده می شود. در پایان تلاش خواهد شد تا بر مبنای آزمایش ها یک مدل مطلوب به منظور ارزیابی ضریب هدایت حرارتی این نانو سیال پیشنهاد شود.

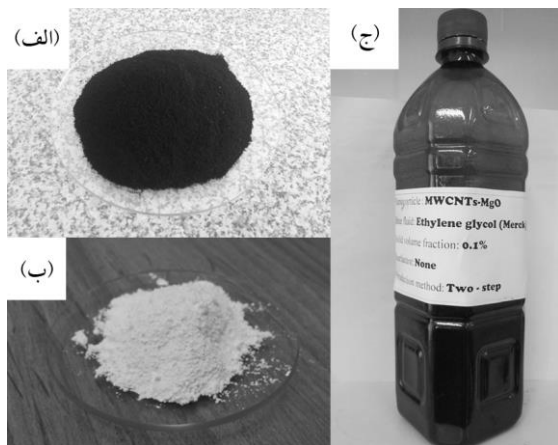
## ۲- کار آزمایشگاهی

### ۲-۱- تهیه نانو سیال

برای انجام آزمایش های مربوط به خواص نانو سیالات مهمترین گام، تهیه نانو سیالی مناسب است. برای انجام آزمایش هایی با کمترین خطا در اختیار داشتن نمونه های پایدار و همگن مهمترین شرط است. کلوخه شدن یا عدم

در انجام آزمایش ها به منظور تولید نمونه‌های پایدار، ابتدا به وسیله دستگاه همزن مغناطیسی، پودر نانو و سیال پایه به مدت دو ساعت مخلوط شده و سپس نانوسیال تهیه شده به مدت هفت ساعت توسط دستگاه همزن التراسونیک (ساخت شرکت هیلشر<sup>۱</sup> آلمان با توان ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز) برای جلوگیری از کلوخه شدن در معرض امواج مغناطیسی قرار گرفت. با توجه به تجربه های گذشته، بعد از ساخت نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف، هر نمونه به مدت سه روز به صورت چشمی مورد پایش قرار گرفت که هیچ گونه رسوب، ته نشینی و کلوخه شدن مشاهده نشد. تصاویری از نانو لوله کربنی، اکسید منیزیم و نانوسیال تهیه شده در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

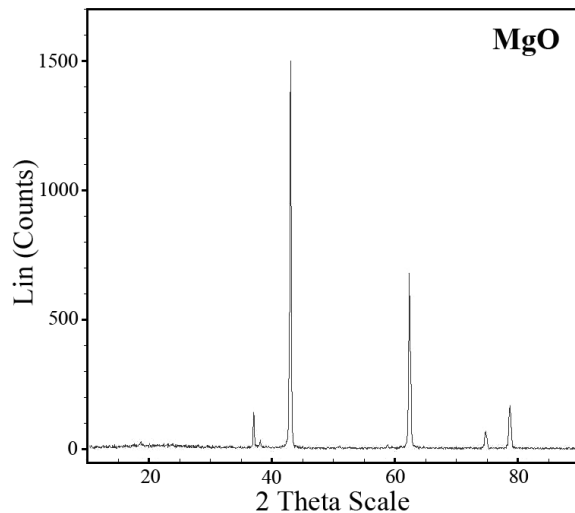
برای کسر حجمی‌های بالاتر از ۰/۶٪ آثار ته‌نشینی و توده‌ای شدن در نمونه‌ها مشاهده شد. بنابراین نمونه‌ها تا ۰/۶٪ محدود شدند.



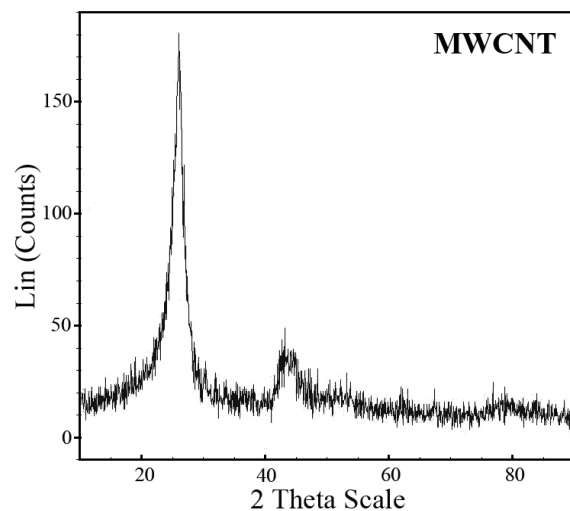
شکل (۳) تصاویر نمونه‌های مورد استفاده، (الف) نانولوله های کربنی، (ب) اکسید منیزیم، (ج) نانوسیال.

## ۲-۲- اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی

در این تحقیق ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بوسیله یک دستگاه<sup>۲</sup> KD2 Pro با حداکثر خطای ۵٪ اندازه گیری شد. دستگاه KD2 از روش سیم داغ گذرا برای اندازه گیری خواص حرارتی رساناهای جامد و مایع استفاده می‌کند. در این روش، یک پالس حرارتی به یک سیم فرستاده می‌شود و پاسخ دما در واحد زمان یا در سیم داغ و یا در سیم مجاور دیگری در طول هر پالس حرارتی مانیتور



شکل (۱) الگوی XRD مربوط به نانوذرات اکسید منیزیم



شکل (۲) الگوی XRD مربوط به نانولوله های کربنی چند جداره

برای آماده سازی نمونه ها از روش دو مرحله ای استفاده شد و نانو سیال با کسرهای حجمی ۰/۰۵٪، ۰/۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲٪، ۰/۴٪ و ۰/۶٪ فراهم شد. مقادیر نانوذرات و سیال پایه و اینکه چه میزان از آنها برای کسرهای حجمی گوناگون نیاز است با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\varphi\% = \frac{\left[ \left( \frac{w}{\rho} \right)_{MWCNT} + \left( \frac{w}{\rho} \right)_{MgO} \right]}{\left[ \left( \frac{w}{\rho} \right)_{MWCNT} + \left( \frac{w}{\rho} \right)_{MgO} + \left( \frac{w}{\rho} \right)_{EG} \right]} \quad (1)$$

در این رابطه  $\varphi$  درصد کسر حجمی،  $\rho$  چگالی و  $w$  وزن مواد است. وزن مواد توسط یک ترازوی حساس دیجیتال اندازه گیری شد.

<sup>1</sup> Hielscher

<sup>2</sup> Decagon Devices, Inc.

سری از مشاهدات، محاسبه می‌شود. در حالی که عدم قطعیت اندازه‌گیری نوع B بر اساس اطلاعاتی به جز تحلیل آماری بر روی مشاهدات، برآورد می‌شود.

در این پژوهش برای محاسبه عدم قطعیت، از عدم قطعیت استاندارد نوع A استفاده شده است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$U = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

که U عدم قطعیت استاندارد، N تعداد اندازه‌گیری‌ها در یک رشته می‌باشد و S انحراف معیار استاندارد می‌باشد و از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

که  $X_i$  مقدار اندازه‌گیری شده در هر آزمایش و  $\bar{X}$  میانگین تعداد N ها می‌باشد.

در تحقیق حاضر هدایت حرارتی سیال پایه در دمای ۲۵°C، ده مرتبه اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از روابط (۲) و (۳) و مطابق با جدول (۵) مقدار عدم قطعیت در اندازه‌گیری محاسبه شد که برابر با ۰/۳۳٪ بود. در نهایت با توجه به خطای ۵ درصدی دستگاه KD2 در اندازه‌گیری مقدار کلی خطا برابر ۵/۳۳٪ در نظر گرفته شد.

جدول (۵) مقدار عدم قطعیت در اندازه‌گیری هدایت حرارتی سیال پایه برای سیال پایه در دمای ۲۵°C

| شماره آزمایش | مقدار اندازه‌گیری شده هدایت حرارتی (W/m. K) |
|--------------|---|
| ۱            | ۰/۲۵۱                                       |
| ۲            | ۰/۲۴۸                                       |
| ۳            | ۰/۲۴۱                                       |
| ۴            | ۰/۲۶۲                                       |
| ۵            | ۰/۲۴۷                                       |
| ۶            | ۰/۲۶۵                                       |
| ۷            | ۰/۲۳۷                                       |
| ۸            | ۰/۲۵۷                                       |
| ۹            | ۰/۲۴۸                                       |
| ۱۰           | ۰/۲۳۳                                       |
| میانگین      | ۰/۲۴۹                                       |
| S            | ۰,۰۱۰۳۴۳۵۴۳                                 |
| U            | ۰,۰۰۳۲۷۰۹۱۶                                 |

می‌شود که ماهیت پاسخ دمایی یک نتیجه از خواص حرارتی ماده را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال سنسور KS-1 که دارای طول ۶۰ میلی‌متر و قطر ۱/۲۷ میلی‌متر است مورد استفاده قرار گرفت. این سنسور توسط یک پالس حرارتی بسیار کوچک می‌تواند هدایت حرارتی بسیاری از سیالات را بدون ایجاد جابه‌جایی آزاد اندازه‌گیری کند.

از آنجایی که در دماهای بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد آثار نیروی شناوری در نانوسیال ظاهر می‌شود انجام آزمایش‌ها در دماهای کمتر از ۵۰ درجه سانتیگراد صورت گرفت. در واقع در دماهای بالاتر از این حد خطای دستگاه KD2 بسیار زیاد است.

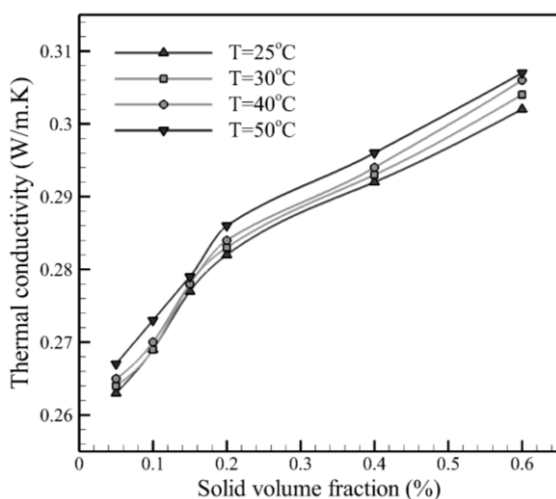
### ۲-۳- محاسبه خطا و عدم قطعیت

به منظور اعتبار سنجی آزمایش، دستگاه KD2 باید قبل از استفاده کالیبره<sup>۱</sup> می‌شود. برای این منظور قبل از اندازه‌گیری‌ها، دستگاه توسط ماده‌ای که شرکت سازنده اعلام کرده (گلیسرین) کالیبره شد. مطابق با راهنمای دستگاه مقدار دقت اندازه‌گیری ۵٪± مقدار اندازه‌گیری شده است. از آنجایی که فقط یک دستگاه در اندازه‌گیری مقدار هدایت حرارتی دخیل است، باید عدم قطعیت نیز محاسبه شود. عدم قطعیت یک عامل همراه با نتیجه اندازه‌گیری است که محدوده مقادیری را معین می‌کند که نتیجه اندازه‌گیری می‌تواند داشته باشد. در واقع عدم قطعیت نمود کمی کیفیت نتیجه اندازه‌گیری است و بصورت  $\pm$  یک مقدار یعنی فاصله ای در اطراف نتیجه اندازه‌گیری بیان می‌شود. لازم به ذکر است که عدم قطعیت یک جزء غیر قابل اجتناب در اندازه‌گیری است. اگر عدم قطعیت نتایج اندازه‌گیری، بصورت یک انحراف استاندارد بیان شود، به آن عدم قطعیت استاندارد می‌گویند و با u نشان داده می‌شود. عدم قطعیت استاندارد به دو نوع A و B تقسیم می‌شوند. در عدم قطعیت نوع A اندازه‌گیری با کمک تحلیل آماری بر روی یک

<sup>1</sup> Calibration Befor Use (CBU)

## ۳- نتایج و بحث

نانوسیال‌ها در یک کسر حجمی معین با کاهش قطر فاصله بین نانوذرات کمتر بوده و نیروهای جذبی واندر- والس بین ذرات شدیدتر می‌شود. این رفتار برای سایر دماها نیز مشاهده می‌شود. همچنین دیده می‌شود که شیب تغییرات نسبت ضریب هدایت حرارتی در بازه کسر حجمی ۰/۰۵٪ تا ۰/۲٪ بیشتر از شیب تغییرات در بازه کسر حجمی ۰/۲٪ تا ۰/۶٪ است. در کسرهای حجمی بالاتر (۰/۲٪ تا ۰/۶٪) افزایش در غلظت نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود اما بطور همزمان باعث شکل‌گیری خوشه‌های نانوذره شده که باعث می‌شود شیب تغییرات اندکی کاهش یابد.



شکل (۴) ضریب هدایت حرارتی در کسرهای حجمی و دماهای مختلف

شکل (۵) تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال برحسب دما در کسر حجمی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دما ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. برای مثال در کسر حجمی ۰/۲٪ در دمای ۵۰°C ضریب هدایت حرارتی ۷/۵ درصد نسبت به زمانی که اتیلن گلیکول در دمای ۵۰°C قرار دارد افزایش یافته است؛ یعنی افزودن ۰/۲ درصد نانوذره به سیال پایه موجب افزایش ۷/۵ درصدی ضریب هدایت حرارتی آن شده است. بیشترین شیب افزایش ضریب هدایت حرارتی در دمای ۴۰°C و برابر ۲/۵ درصد است. لایه هرچه دما افزایش یابد جنبش نانوذرات بیشتر می‌شود و در نتیجه در اثر تماس

در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده بصورت نمودار و جدول همراه با تحلیل داده‌ها ارائه خواهد شد. اثرات دما و کسر حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بررسی می‌شود. سپس رابطه دقیقی برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌شود. نمونه‌ها از اتیلن گلیکول و حجمی مساوی از نانوذرات اکسید منیزیم و نانوذره‌های کربنی چند جداره تشکیل شده‌اند. آزمایش‌ها در بازه دمایی ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و برای نمونه‌های مختلف با کسرهای حجمی ۰/۰۵٪، ۰/۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲٪، ۰/۴٪ و ۰/۶٪ انجام شد.

### ۳-۱- بررسی اثر تغییرات کسر حجمی و دما روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال

شکل (۴) ضریب هدایت حرارتی نانوسیال برحسب کسر حجمی در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در دمای ۲۵°C تنها با اضافه کردن ۰/۰۵٪ نانوذره به اتیلن گلیکول ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ۵/۶ درصد نسبت به ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول در دمای مشابه افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۰/۱ درصد ضریب هدایت حرارتی ۸ درصد و در کسر حجمی ۰/۱۵ ضریب هدایت حرارتی نسبت به سیال پایه ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۰/۲ ضریب هدایت حرارتی ۱۳ درصد افزایش یافته است و در کسر حجمی ۰/۴ ضریب هدایت حرارتی ۱۷ درصد نسبت به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه در دمای ۲۵°C افزایش می‌یابد. به همین ترتیب در کسر حجمی ۰/۶ افزایش ضریب هدایت حرارتی معادل ۲۱/۲ درصد است. با افزایش کسر حجمی و در کنارهم قرار گرفتن نانوذرات خوشه‌هایی از نانوذرات تشکیل می‌شود. با تشکیل این خوشه‌ها حرارت از طریق این نواحی جامد سریع‌تر از زمانی که در سیال در حال عبور است می‌تواند حرکت کند، در نتیجه ضریب هدایت حرارتی نیز بیشتر می‌شود. در نانوسیال‌هایی با نانوذرات کوچکتر به وقوع پیوستن این پدیده مشهودتر است، زیرا در این

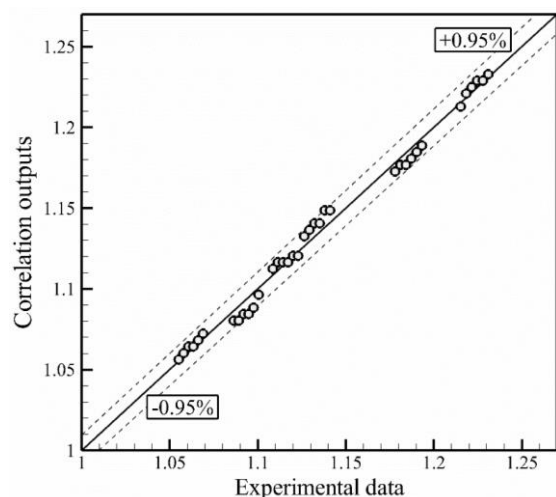
است. همچنین اندیس های bf و nf به ترتیب بیانگر سیال پایه و نانو سیال هستند.

به منظور بررسی دقت روابط پیشنهادی پارامتری تحت عنوان حاشیه انحراف به صورت زیر تعریف می شود.

$$MoD = \left[ \frac{\left( \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \right)_{Exp} - \left( \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \right)_{Pred}}{\left( \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \right)_{Exp}} \right] \times 100(\%) \quad (5)$$

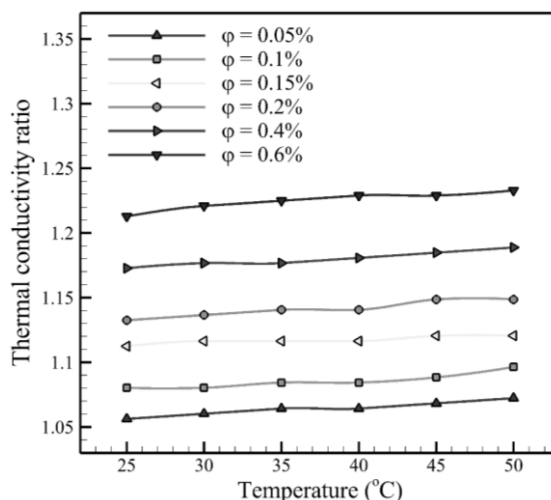
در رابطه فوق اندیس های Exp و Pred مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی شده توسط رابطه پیشنهادی است.

یک مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و خروجی رابطه پیشنهادی در شکل (۶) انجام شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود اکثر نقاط بر روی نیمساز یا نزدیک آن قرار دارند که این نشان از دقت مناسب این رابطه دارد. همچنین مقادیر حداکثر حاشیه انحراف در این نمودار نشان داده شده است که برابر ۰/۹۵٪ است. این مقدار برای یک رابطه تجربی مقدار قابل قبولی است.



شکل (۶) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و خروجی رابطه پیشنهادی

بیشتر اتم های سطح با مولکولهای سیال ضریب هدایت حرارتی نیز بیشتر می شود. افزایش ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما و کسر حجمی را عمدتاً در سست شدن پیوندهای بین ملکولی در لایه های سیال و همچنین افزایش برخورد میان نانوذرات و افزایش حرکت براونی می توان دانست. شکل های (۴) و (۵) نشان دادند که بیشترین افزایش در مقدار ضریب هدایت حرارتی حدود ۲۳/۳ درصد است.



شکل (۵) ضریب هدایت حرارتی نسبی در دماها و کسرهای حجمی مختلف

### ۳-۲- ارائه مدل جدید

با توجه به عدم وجود یک رابطه دقیق و مناسب برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی/اتیلن گلیکول، در این بخش یک رابطه بر اساس نتایج اندازه گیری ها به صورت تابعی از کسر حجمی و دما ارائه می شود. این رابطه که با استفاده از برازش منحنی به دست آمده است در معادله (۲) بیان شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0.9506 + 0.2213\phi^{0.3602} T^{0.1086} \quad (4)$$

در این معادله K ضریب هدایت حرارتی، T دمای نانوسیال بر حسب درجه سانتی گراد و  $\phi$  کسر حجمی



شد که برای کسر های حجمی بالاتر از ۰/۲٪ اثر دما بر نسبت ضریب هدایت حرارتی چشمگیر تر است. اما در کسر های حجمی پایین تر تغییر نسبت ضریب هدایت حرارتی قابل ملاحظه نیست. اندازه گیری ها نشان داد که بالاترین افزایش ضریب هدایت حرارتی ۲۳/۳٪ است که در کسر حجمی ۰/۶٪ و دمای ۵۰ درجه سانتی گراد رخ می دهد. در پایان، با توجه به عدم وجود یک رابطه دقیق و مناسب برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانو لوله کربنی / اتیلن گلیکول، رابطه ای تجربی بر اساس نتایج اندازه گیری ها به صورت تابعی از کسر حجمی و دما ارائه شد. بررسی های انجام شده مشخص کرد که مقادیر حداکثر حاشیه انحراف برای این رابطه پیشنهادی برابر ۰/۹۵٪ است. این مقدار برای یک رابطه تجربی مقدار قابل قبولی است.

#### ۵- فهرست علائم

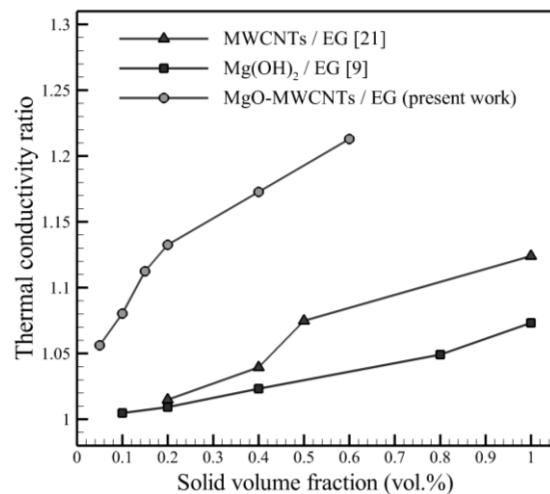
|           |                                    |
|-----------|------------------------------------|
| $T$       | دما (°C)                           |
| $\phi$    | کسر حجمی (%)                       |
| $k$       | ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)          |
| $nf$      | نانو سیال                          |
| $bf$      | سیال پایه                          |
| $Exp$     | آزمایشگاهی                         |
| $Pred$    | پیش بینی شده                       |
| $S$       | انحراف معیار استاندارد             |
| $U$       | عدم قطعیت استاندارد                |
| $N$       | تعداد داده ها                      |
| $X_i$     | مقدار اندازه گیری شده در هر آزمایش |
| $\bar{X}$ | میانگین داده ها                    |

#### مراجع:

- Lee G., Kim C. K., Lee M. K., Rhee C. K., Kim S., Kim C., Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method, *Thermochimica Acta*, 542, 2012, pp. 24–27.
- Yiamsawasd T., Selim Dalkilic A., Wongwises S., Measurement of the thermal

### ۳-۳- بررسی مزیت استفاده از نانوذرات جامد هیبریدی

برای شناخت رفتار نانوسیال هیبریدی و تفهیم موضوع کار، مقایسه بین هدایت حرارتی نسبی نانوسیال هیبریدی و نانوسیالات مونو MWCNT/EG و Mg(OH)<sub>2</sub>/EG (که در گذشته گزارش شده اند [۹ و ۲۱]) در شکل (۷) نشان داده شده است. این مقایسه برای دمای اتاق و به ازای کسر حجمی های مختلف انجام شده است. این شکل نشان می دهد که هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی از هر دو نانوسیال دیگر بالاتر است. در واقع وجود ذرات کروی MgO در بین نانولوله های کربنی از خوشه های شدن و تشکیل توده جلوگیری می کند. این پدیده سبب می شود که ذرات جامد هیبرید سطح ویژه بیشتری در مقایسه با ذرات مونو داشته باشند.



شکل (۷) مقایسه هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی با نانوسیالات مونو

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ضریب هدایت حرارتی نانو سیال هیبریدی MgO-MWCNT/EG در بازه دمایی ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی گراد برای نمونه هایی با کسر های حجمی ۰/۰۵٪، ۰/۱۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲٪، ۰/۴٪ و ۰/۶٪ اندازه گیری شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نسبت ضریب هدایت حرارتی با افزایش درصد کسر حجمی و دما افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دما ضریب هدایت حرارتی نانو سیال افزایش می یابد. به علاوه مشاهده

13. Glory J., Bonetti M., Helezen M., Hermite M. M. L., Reynaud C., Thermal and electrical conductivities of water-based nanofluids prepared with long multiwalled carbon nanotubes, *Journal of Applied Physics*, 103, 2008, 094309.
14. Harish S., Ishikawa K., Einarsson E., Aikawa S., Chiashi S., Shiomi J., Maruyama S., Enhanced thermal conductivity of ethylene glycol with single-walled carbon nanotube inclusions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2012, pp. 3885–3890.
15. Hemmat Esfe M., Saedodin S., Mahian O., Wongwises S., Thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of COOH-functionalized multi walled carbon nanotubes/water nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 58, 2014, pp. 176–183.
16. Hemmat Esfe M., Saedodin S., Mahian O., Wongwises S., Heat transfer characteristics and pressure drop of COOH-functionalized DWCNTs/water nanofluid in turbulent flow at low concentrations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73, 2014, pp. 186–194.
17. Baghbanzadeh M., Rashidi A., Rashtchian D., Lotfi R., Amrollahi A., Synthesis of spherical silica/multiwall carbon nanotubes hybrid nanostructures and investigation of thermal conductivity of related nanofluids, *Thermochimica Acta*, 549, 2012, pp. 87–94.
18. Munkhbayar B., Tanshen M. R., Jeoun J., Chung H., Jeong H., Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics, *Ceramics International*, 39, 2013, pp. 6415–6425.
19. Sundar S. L., Singh M. K., Sousa A. C. M., Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water hybrid nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52, 2014, pp. 73–83.
20. Hemmat Esfe M., Wongwises S., Naderi A., Asadi A., Safaei M. R., Rostamian H., Dahari M., Karimipour A., Thermal conductivity of Cu/TiO<sub>2</sub>-water/EG hybrid nanofluid: Experimental data and modeling using artificial neural network and correlation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66, 2015, pp. 100–104.
21. Liu M.S., Lin M. C. C., Wang C. C., Enhancements of thermal conductivities with Cu, CuO, and carbon nanotube nanofluids and application of MWNT/water nanofluid on a water chiller system, *Nanoscale Research Letters*, 6, 2011, p. 297.
- conductivity of titania and alumina nanofluids, *Thermochimica Acta*, 545, 2012, pp. 48–56.
3. Das S. K., Putra N., Thiesen P., Roetzel W., Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, 125, 2003, pp. 567–574.
4. Li C. H., Peterson G. P., The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids, *Journal of Applied Physics*, 101, 2007, 044312.
5. Chandrasekar M., Suresh S., Chandra Bose A., Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34 2010, 210–216.
6. Sundar L. S., Singh M. K., Sousa A. C. M., Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>nanofluid for heat transfer applications, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 2013, 7–14.
7. Jeong J., Li C., Kwon Y., Lee J., Hyung Kim S., Yun R., Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids, *International Journal of Refrigeration*, 36, 2013, 2233-2224.
8. Hemmat Esfe M., Saedodin S., Bahiraei M., Toghraie D., Mahian O., Wongwises S., Thermal conductivity modeling of MgO/EG nanofluids using experimental data and artificial neural network, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 118 (2014) 287–294.
9. Hemmat Esfe M., Saedodin S., Asadi A., Karimipour A., Thermal conductivity and viscosity of Mg(OH)<sub>2</sub>-ethylene glycol nanofluids: Finding a critical temperature, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120, 2015, pp. 1145-1149
10. Hemmat Esfe M., Saedodin S., Naderi A., Alirezaie A., Karimipour A., Wongwises S., Goodarzi M., Dahari M., Modeling of thermal conductivity of ZnO-EG using experimental data and ANN methods, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 63, 2015, 35–40.
11. Assael M. J., Chen C. F., Metaxa I., Wakeham W. A., Thermal conductivity of carbon nanotube suspensions in water, *International Journal of Thermophysics*, 25, 2004, pp. 971–985.
12. Hwang Y. J., Ahn Y. C., Shin H. S., Lee C. G., Kim G. T., Park H. S., Lee J. K., Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids, *Current Applied Physics*, 6, 2006, pp. 1068–1071.