



طراحی و ساخت دستگاه اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی و اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی یک نمونه نانوسیال مغناطیسی

هادی کارگر شریف‌آباد^{1*}، مرتضی میرزایی امیرآباد²

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
2- کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
* سمنان، صندوق پستی 35145-179، h.kargar@semnaniau.ac.ir

اطلاعات مقاله

یادداشت پژوهشی
دریافت: 14 بهمن 1393
پذیرش: 15 اسفند 1393
ارائه در سایت: 23 فروردین 1394
کلید واژگان:
نانوسیال
ضریب هدایت حرارتی
سیم داغ گذرا
پل وتستون
نانوسیال مغناطیسی

چکیده

آگاهی از ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها با توجه به توسعه چشمگیر استفاده از آنها در پژوهش‌ها ضروری است که با توجه به ناتوانی مدل‌های ارائه شده در اکثر موارد لازم است بصورت تجربی ضریب هدایت حرارتی اندازه‌گیری شود. در این مقاله طراحی و بررسی عملکرد دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی سیالات و نانوسیالات بدون استفاده از پل وتستون بررسی شده است. سابقاً از روش پل وتستون برای ساخت سیم داغ کوتاه گذرا استفاده می‌شد که نیاز به سیستم الکترونیکی پیچیده و مصرف توان الکتریکی بالایی دارد. در این مقاله روش جدیدی ارائه شده است به طوری که نه جریان ثابت نگه‌داشته شده است و نه ولتاژ، بلکه از روش اندازه‌گیری مقاومت نسبی و از پراب مسی با روکش لاک با قطر 40 میکرون استفاده شده است که به راحتی در دسترس است. بیشترین اختلاف نتایج این طراحی با مراجع، % 1/17 به دست آمده است. در این راستا تغییرات ضریب هدایت حرارتی سیال مغناطیسی به صورت تجربی بررسی شده است. سیالهای مغناطیسی دسته جدیدی از نانوسیالها هستند که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند و خواص آنها دچار تغییر می‌شود. آزمایش‌ها برای سیال مغناطیسی Fe_3O_4 بر پایه آب با درصدهای حجمی مختلف انجام شده است.

Design and construction of thermal conductivity measurement device and measuring of a magnetic nanofluids thermal conductivity

Hadi Kargarsharifabad^{1*}, Morteza MirzaeiAmirabad²

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
* P.O.B. 35145-179, Semnan, Iran, h.kargar@semnaniau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Research Note
Received 03 February 2015
Accepted 06 March 2015
Available Online 12 April 2015

Keywords:
Nanofluids
magnetic nanofluid
thermal conductivity
transient hot wire
Wheatstone bridge

ABSTRACT

Awareness of the thermal conductivity of nanofluids with regard to a significant development for use in research is necessary considering the inability of the analytical and experimental models that are presented in most cases; it's experimentally thermal conductivity can be measured. In this paper, the design and performance of thermal conductivity of fluids and nanofluids measurement device without using a Wheatstone bridge is tested. Wheatstone bridge short transient hot wire method has previously been used for construction requiring complex electronic systems and high power consumption. In this paper, a new method is provided so that no current or voltage is kept constant, but the method of measuring the relative resistance of the copper-clad lacquered with a diameter of 40 microns was used probe is easy to is within reach. A difference of 1.17% between the results of the design referencesis obtained. In this regard, changes in the magnetic fluid thermal conductivity are studied experimentally. Magnetic fluids are a new class of nanofluids that are affected by magnetic fields and their properties can be changed. Fe_3O_4 magnetic water-based tests for different volume percentages.

1- مقدمه

ضریب هدایت حرارتی نانو سیال‌ها به دلیل رفتارها و حرکت‌های پیچیده آن‌ها، انکارپذیر نیست. لذا برای انجام پژوهش‌های دقیق وجود ابزاری برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها لازم است. با مشخص شدن توانایی نانوسیال‌ها در افزایش جابجایی انتقال حرارت، پژوهشگران متعددی خواص حرارتی آن‌ها را به صورت تجربی و تئوری بررسی نموده‌اند. در بررسی‌های تجربی با استفاده از وسایلی که اکثراً بر مبنای روش سیم داغ گذرا عمل می‌کنند، ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانو سیال اندازه‌گیری و اثر

آگاهی از ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مختلف از لحاظ جنس نانوسیال، غلظت نانوسیال، PH اسیدی نانوسیال، ابعاد نانوذرات محلول در سیال مبنای... در راستای رشد روزافزون استفاده از نانوسیالها و جهت طراحی دقیق دستگاه‌های انتقال حرارتی، امری ضروری است. علیرغم ارائه روابط تئوری متعددی که توسط محققان مختلف [1] برای مدل‌سازی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها انجام شده است، ناتوانی این مدل‌ها در بیان دقیق مقدار

Please cite this article using:

H. Kargarsharifabad, M. MirzaeiAmirabad, Design and construction of thermal conductivity measurement device and measuring of a magnetic nanofluids thermal conductivity, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 419-422, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

همگن برابر است با:

$$T - T_0 = \left(\frac{q}{4\pi k} \right) Ei\left(\frac{-r^2}{4at}\right) \quad (4)$$

که $Ei(x)$ انتگرال نمایی متغیر x است و برابر است با:

$$Ei(x) = - \int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (5)$$

در مرجع [14] حل تقریبی $Ei(x)$ برای مقادیر کوچک $Ei(x)$ به صورت زیر داده شده است:

$$Ei(x) = \gamma + \ln x + x + \frac{1}{4}x^2 + O(x^3) \quad (6)$$

با جاگذاری x با $\frac{r^2}{4at}$ خواهیم داشت:

$$-Ei(-x) = -Ei\left(\frac{r^2}{4at}\right) = -\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \frac{r^2}{4at} - \left(\frac{r^2}{8at}\right)^2 + \dots \quad (7)$$

با افزایش زمان، ترم سوم به بعد قابل صرف نظر کردن بوده و با ترکیب معادلات (4) و (7) خواهیم داشت:

$$T - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \left(\ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \right) \quad (8)$$

یا

$$T - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \left(\ln(t) - \gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4a}\right) \right) \quad (9)$$

با گسترش معادله فوق خواهیم داشت:

$$T - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \ln(t) + \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4a}{r^2}\right) - \frac{q\gamma}{4\pi k} \quad (10)$$

با مشتق گرفتن از T نسبت به $\ln(t)$ خواهیم داشت:

$$\frac{dT}{d(\ln(t))} = \frac{q}{4\pi k} \quad (11)$$

با حل معادله فوق برای k خواهیم داشت:

$$k = \frac{q}{4\pi} \left(\frac{dT}{d(\ln(t))} \right)^{-1} \quad (12)$$

رابطه فوق حل تحلیلی برای پخش حرارتی ایده‌آل در مختصات یک بعدی استوانه‌ای بوده که با شرط لازم (برای جلوگیری از ایجاد انتقال حرارت جابجایی در سیال) صادق می‌باشد. از طرفی طبق قانون ژول داریم:

$$R = R_0(1 + \beta\Delta T) \Rightarrow \Delta T = \frac{R - R_0}{\beta R_0} \quad (13)$$

و در نتیجه

$$k = \frac{q}{4\pi} \left(\frac{R - R_0}{\beta R_0} \right)^{-1} \frac{1}{d(\ln t)} \quad (14)$$

$$q = \frac{Ri^2}{l} \quad (15)$$

از نظر تجربی تغییرات R نسبت به خود R ناچیز است (کوچکتر از 0/1%)، پس می‌توان نوشت:

$$k = \frac{Ri^2}{4l\pi} \left(\frac{R - R_0}{\beta R_0} \right)^{-1} \frac{1}{(\ln t_2 - \ln t_1)} \quad (16)$$

معادله‌ی حاصل، از نظر تجربی معادله‌ی بهینه است زیرا اندازه‌گیری طول سیم و جریان عبوری از سیم به‌سادگی و قبل از شروع کار دستگاه انجام می‌شود. بقیه اندازه‌گیری‌ها، از جنس اندازه‌گیری مقاومت و زمان بوده و سیستم به‌صورت ولتاژ ثابت کار می‌کند.

پارامترهای مختلف مشخص شده است که می‌توان به بررسی‌های لی و همکاران [2]، چوی و همکاران [3] و ژانگ و همکاران [4] اشاره نمود. روش سیم داغ گذرا بهترین روش برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی سیالات و نانوسیالات است [6,5] و به‌عنوان روشی با بیشترین دقت و سریع‌ترین راه جهت تعیین ضریب هدایت حرارتی یک سیال و بخصوص نانوسیال پیشنهاد شده است [7]. نانوسیال مغناطیسی، دسته‌ی ویژه‌ای از نانوسیال‌ها هستند که کلوئیدهای مواد نانو مثل Fe_3O_4 ، $\gamma-Fe_2O_3$ ، Co ، $CoFe_2O_4$ ، Fe یا FeC بوده و به‌طور پایدار در یک مایع پراکنده شده‌اند. لی و همکاران [8] ویسکوزیته و ضریب انتقال حرارت هدایتی سیالات مغناطیسی را تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بررسی و به این نتیجه رسیدند که ویسکوزیته و ضریب انتقال حرارت هدایتی با افزایش میدان در درصد حجمی خاصی از سیال افزایش می‌یابد. گاولی و همکاران [9] بهبود 200% در ضریب انتقال حرارت هدایتی فروسیال را به دست آوردند.

پایه روش سیم داغ گذرا، اندازه‌گیری پاسخ زمانی دمای یک سیم به یک پالس لحظه‌ای الکتریکی است [10]. برای جلوگیری از الکترولیز شدن سیال، سیم را توسط مواد مختلفی از جمله پلی‌استر، سیلیکا، اکسید آلومینیوم و اکسید تانتالیوم عایق می‌کنند [11]. اکثر بررسی‌های تجربی انجام شده برای تعیین ضریب هدایت حرارتی سیالات، از روش پل و تستون برای اندازه‌گیری پاسخ زمانی دمای یک سیم به یک پالس لحظه‌ای الکتریکی استفاده کرده‌اند. در طراحی گارنیر و همکاران [11]، با حذف پل و تستون، تغییرات مقاومت سیم داغ توسط یک نانو ولت‌متر اندازه‌گیری می‌شود که برای رسیدن به این هدف جریان عبوری از سیم را ثابت نگاه داشته‌اند. نکته قابل توجه در این روش این است که ثابت نگه داشتن هر متغیری قطعاً منجر به وارد شدن خطای ذاتی وسایل آزمایش در محاسبات می‌شود. در این طراحی سعی شده بدون نیاز به ثابت نگه داشتن جریان، این خطا به‌طور کلی حذف شود.

2- روش تجربی

2-1- تئوری روش سیم داغ گذرا

اساس روش سیم داغ گذرا بر اندازه‌گیری دمای گذرا یک سیم نازک داغ به‌عنوان یک منبع خطی تولید حرارت که در سیال نمونه قرار دارد، استوار است. نکته مهم، تغییرات دمایی سیم با توجه به ضریب هدایت حرارتی سیال اطراف آن است. تغییرات لحظه‌ای دمای $(T(t))$ یک سیم فلزی طویل نامحدود (با شعاع r_0) که با شار حرارتی ثابت q در واحد طول، در زمان $t > 0$ گرم می‌شود و در سیال همگن نامحدود (با ضریب هدایت و پخش حرارتی k_f و α_f) قرار دارد، با استفاده از معادله پخش حرارت گذرای یک بعدی در مختصات استوانه‌ای در جهت شعاع به‌صورت زیر به دست می‌آید [12].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

که $T = T_0 + \Delta T$ دمای محیط در زمان t و شعاع قراردادی r ، T_0 دمای اولیه منبع و محیط، و ΔT تغییرات دمایی سیم با دمای اولیه است. این رابطه تابع شرایط مرزی زیر می‌باشد.

$$r = 0, t = 0 \Rightarrow \lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = - \frac{q}{2\pi k_f} \quad (2)$$

$$r = \infty, t \geq 0 \Rightarrow \lim_{r \rightarrow \infty} (\Delta T(r, t)) = 0 \quad (3)$$

حل معادله فوق به‌مراه شرایط داده شده با روش سری‌های نامحدود توسط محققین بررسی شده است [13,14]. کارسلا و جاگر [13] نشان داده‌اند که تغییرات دمای گذرا در فاصله r از یک منبع خطی پایدار و در یک محیط

2-2- اندازه‌گیری زمان و سیستم الکترونیکی

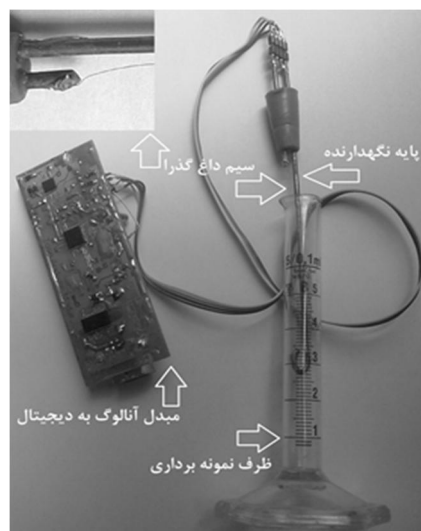
با توجه به معادله‌ی (16) بایستی تغییرات مقاومت سیم نسبت به تغییرات لگاریتم زمان اندازه‌گیری شود. با توجه به اینکه خطای اندازه‌گیری زمان در طول یک ثانیه توسط سیستم الکترونیکی ثابت است، برای اجتناب از بزرگ شدن خطای اندازه‌گیری زمان نسبت به زمان، اندازه‌گیری‌ها، 0/002 ثانیه بعد از تزریق جریان به سیم داغ انجام می‌شود. جهت اندازه‌گیری دقیق و سریع، از تراشه جدید (شرکت آنالوگ دیوایس با کد 17190) [15] استفاده شده است. این تراشه قابلیت اندازه‌گیری ولتاژ به صورت تناسبی (مقاومت سنجی) دارد. داده‌های این تراشه به میکروکنترلر ارسال و سپس به رایانه منتقل می‌گردد.

2-3- ساخت دستگاه سیم داغ گذرا

با توجه به اساس عملکرد روش سیم داغ گذرا و تئوری که در قسمت قبل ارائه شد، پراب خاصی طراحی شد که عکس آن در شکل 1 آمده است. برای ساخت دستگاه از سیم مسی با روکش لاک (برای جلوگیری از الکترولیز شدن سیال) به قطر 40 μm و طول 15 cm به‌عنوان پراب استفاده شده که ضریب تغییرات حرارتی مقاومت آن در مرجع [16] 0/0068 به ازای یک درجه‌ی سانتیگراد بیان شده است. مطابق با مشخصات تراشه استفاده شده، مدت زمان یک اندازه‌گیری یک ثانیه و جهت حذف خطای ناشی از حرکت سیال، یک دقیقه لازم است تا سیال در ظرف به حالت سکون برسد. با توجه به محدوده دمای عملکرد تراشه‌ها و قطعات استفاده شده، دستگاه در محدوده دمایی 10 تا 50 درجه سانتیگراد عملکرد مناسب دارد. همچنین با توجه به معادلات استفاده شده در طراحی، دستگاه قادر است سیالهای مختلف از نظر میزان لزجت در محدوده 1/2 × 10⁻⁵ kg/s.m تا 2 kg/s.m را اندازه‌گیری نماید.

2-4- تهیه نانوسیال مغناطیسی و تجهیزات آزمایش

نانوسیال مغناطیسی در این آزمایش ترکیب Fe₃O₄ با آب است و از سورفکتانت اسیدسیتریک استفاده شده است. جهت تعیین اندازه ذرات از میکروسکوپ لغزشی استفاده شده و سایز ذرات به طور میانگین 25 nm تعیین شده است.



شکل 1 تصویر پراب دستگاه سیم داغ گذرا

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی عملکرد دستگاه

از مایع‌های خالص مانند آب، اتیلن گلیکول و هوا برای بررسی درستی، تکرار پذیری، تجدیدپذیری و عدم قطعیت دستگاه استفاده شده است. در جدول 1 ضریب هدایت حرارتی تجربی سیال‌های مختلف در دماهای مختلف با نتایج مرجع [17] مقایسه شده و مشخص است که دستگاه به‌خوبی می‌تواند تغییرات ضریب هدایت حرارتی با دما را با بیشترین خطای 1/17% نشان دهد.

3-2- اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

جهت به دست آوردن مقدار ضریب انتقال حرارت هدایتی، Fe₃O₄ با سه درصد حجمی مختلف بر پایه آب تهیه گردید. تمام اندازه‌گیریها برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال Fe₃O₄ در دمای 25 درجه سانتیگراد انجام شده است. اندازه‌گیریها برای هر درصد حجمی، 25 دفعه تکرار شد که نتایج در شکل 2 نشان داده شده است.

با توجه به اهمیت آگاهی از ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مختلف از لحاظ جنس نانوسیال، غلظت نانوسیال و ...، از آنجا که دلیل تنوع نامحدود آنها در مراجع غیرقابل ارائه می‌باشند لازم است با استفاده از روابط تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات را پیش‌بینی نمود. در این راستا روابط تجربی زیادی توسط محققین [18-20] در این زمینه ارائه شده است که هر رابطه برای شرایط خاصی دارای دقت کافی می‌باشد. یکی از روابط ارائه شده رابطه (17) توسط واسپ [21] می‌باشد.

$$k_{eff} = k_f \left[\frac{2 + k_{pf} + 2\phi(k_{pf} - 1)}{2 + k_{pf} - \phi(k_{pf} - 1)} \right], k_{pf} = \frac{k_p}{k_f} \quad (17)$$

در این پژوهش توانایی این مدل برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی Fe₃O₄ با آب و سورفکتانت اسیدسیتریک بررسی شده است. همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی Fe₃O₄ با آب و سورفکتانت اسید سیتریک استفاده شود.

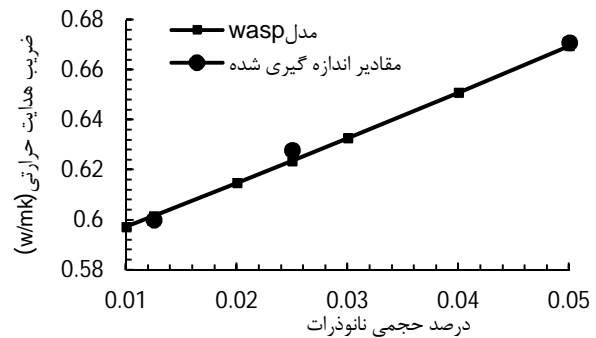
جدول 1 داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ساخته شده

ردیف	آب (22) (درجه)	آب (26) (درجه)	آب (32) (درجه)	آب (47) (درجه)	هوا (26) (درجه)	اتیلن گلوکل (26) (درجه)
1	0/598	0/617	0/6252	0/639	0/0263	0/255
2	0/5989	0/613	0/6214	0/639	0/0263	0/255
3	0/5991	0/616	0/6263	0/638	0/0263	0/256
4	0/5993	0/613	0/6232	0/641	0/0264	0/257
5	0/5993	0/611	0/6222	0/636	0/0265	0/258
6	0/5994	0/611	0/6261	0/640	0/0258	0/259
7	0/6004	0/610	0/6234	0/637	0/0266	0/259
8	0/6008	0/615	0/625	0/637	0/0261	0/26
9	0/6012	0/614	0/6204	0/639	0/0268	0/261
میانگین	0/5996	0/617	0/623	0/638	0/0265	0/259
مقدار مرجع خطا	0/6017	0/612	0/6184	0/640	0/0262	0/256
	0/350%	0/81%	0/875%	0/31%	1/067%	1/17%
میانگین خطا						0/7652%

ثابت اولر (0/5772)	γ
زیر نویس	
خواص موثر	eff
خواص سیال	f
خواص ذره	p
شرایط اولیه	0

7- مراجع

- [1] Z. Shams, M. Moghiman, A model for thermal conductivity of nanofluids-effect of interfacial layer and non-uniform size distribution of nanoparticles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 91-98, 2015 (In Persian)
- [2] S. Lee, S.-S. Choi, S. Li, and, J. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 2, pp. 280-289, 1999 .
- [3] S. Choi, Z. Zhang, W. Yu, F. Lockwood, E. Grulke, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, *Applied physics letters*, Vol. 79, No. 14, pp. 2252-2254, 2001 .
- [4] X. Zhang, H. Gu, M. Fujii, Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, No. 6, pp. 593-599, 2007 .
- [5] J. Pátek, J. Klomfar, Measurement of the thermal conductivity of argon and methane: a test of a transient hot-wire apparatus, *Fluid phase equilibria*, Vol. 198, No. 1, pp. 147-163, 2002 .
- [6] W. A. Wakeham, A. Nagashima, J. Sengers, *Measurement of the transport properties of fluids*: Blackwell Science Inc, 1991 .
- [7] S. Murshed, K. Leong, C. Yang, Enhanced thermal conductivity of TiO₂—water based nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44, No. 4, pp. 367-373, 2005 .
- [8] Q. Li, Y. Xuan, J. Wang, Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, No. 2, pp. 109-116, 2005 .
- [9] A. Gavili, F. Zabih, T. D. Isfahani, J. Sabbaghzadeh, The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 41, pp. 94-98, 2012 .
- [10] A. Kadjo, J.-P. Garnier, J. Maye, S. Martemianov, A new transient two-wire method for measuring the thermal diffusivity of electrically conducting and highly corrosive liquids using small samples, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 29, No. 4, pp. 1267-1277, 2008 .
- [11] J. Garnier, J. Maye, J. Saillard, G. Thévenot, A. Kadjo, S. Martemianov, A new transient hot-wire instrument for measuring the thermal conductivity of electrically conducting and highly corrosive liquids using small samples, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 29, No. 2, pp. 468-482, 2008 .
- [12] J.-H. Lee, K. S. Hwang, S. P. Jang, B. H. Lee, J. H. Kim, S. U. Choi, C. J. Choi, Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 11, pp. 2651-2656, 2008 .
- [13] H. Carslaw, J. Jaeger, *Heat in solids*: Clarendon Press, Oxford, 1959 .
- [14] M. Kostic, K. C. Simham, Computerized, transient hot-wire thermal conductivity (HWTC) apparatus for nanofluids, *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Heat and Mass Transfer (HMT'09)*, pp. 71-78, 2009 .
- [15] http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/AD7190.pdf
- [16] W. Hayt, J. Kemmerly, S. Durbin, *Engineering circuit analysis*: McGraw-Hill, 2011 .
- [17] C. Kumar, *Nanomaterials for Medical Applications*, Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007 .
- [18] W. Daungthongsuk, S. Wongwises, A critical review of convective heat transfer of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, No. 5, pp. 797-817, 2007 .
- [19] K. Kwak, C. Kim, Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol, *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 17, No. 2, pp. 35-40, 2005 .
- [20] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, No. 1, pp. 58-64, 2000 .
- [21] E. J. Wasp, J. P. Kenny, R. L. Gandhi, Solid-liquid flow: slurry pipeline transportation. [Pumps, valves, mechanical equipment, economics], *Ser. Bulk Mater. Handl. (United States)*, Vol. 1, No. 4, 1977 .



شکل 2 مقایسه مقادیر اندازه گیری شده با مدل واسپ

4- نتیجه گیری

تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مختلف در راستای رشد روزافزون استفاده از نانوسیالها و جهت طراحی دقیق دستگاه‌های انتقال حرارت، امری ضروری است. لذا ضمن بیان ساختمان و نحوه ساخت دستگاه سیم داغ گذرا، پس از بررسی عملکرد دستگاه ساخته شده، روند بررسی تجربی تغییر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مغناطیسی شرح داده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مدل واسپ بخوبی می‌تواند برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی Fe₃O₄ با آب و سورفکتانت اسید سیتریک استفاده شود.

جهت انجام تحقیقات مشابه موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- جهت افزایش سرعت نمونه‌برداری، از آنالوگ سوئیچ‌های سریع‌تر استفاده شود.
- از سیم‌هایی با جنس مختلف مانند پلاتین، کروم-نیکل و تانتالیوم با قطر و طول متفاوت استفاده و اثر جنس و اندازه بررسی شود.

5- تشکر و قدردانی

در پایان از دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان در خصوص حمایت از طرح پژوهشی با عنوان " طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی سیالات و نانوسیالات با روش سیم داغ گذرا " تحت قرارداد شماره 1107 تشکر و قدردانی می‌شود.

6- فهرست علائم

k	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)
i	جریان الکتریکی (A)
q	انرژی حرارتی بر واحد طول (W/m)
R	مقاومت الکتریکی (Ω)
r	شعاع (m)
T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
t	زمان (s)
x	فاصله محوری (m)
α	ضریب پخش حرارت (m^2/s)
β	ضریب تغییرات حرارتی مقاومت سیم ($1/^{\circ}\text{C}$)
ρ	چگالی (kg/m^3)
ϕ	درصد حجمی نانو ذرات

علائم یونانی