ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی اثر دما و کسر حجمی نانوذرات بر لزجت نانوسیال هیبریدی غیرنیوتنی

 2 حامد اشکرف 1 ، مسعود افرند ** ، محمد همت اسفه

1- كارشناس ارشد، گروه مهندسی مكانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.
 2- استادیار، گروه مهندسی مكانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.
 * نجف آباد، صندوق پستی 8514143131.

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 25 دی 1394 پذیرش: 22 بهمن 1394 ارائه در سایت: 08 اسفند 1394	در این مقاله اثر دما و کسر حجمی نانوذرات بر لزجت نانوسیال هیبریدی، که حاوی مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه و ترکیبی از نانولولههای کربنی چند جداره و دی کسید سیلیسیوم بهعنوان ذرات اضافه شده است، بهطور تجربی بررسی شد. اندازهگیریها در بازه دمایی 27.5° تا 2006 و با استفاده از لزجتسنج استوانهای در نرخ برشهای مختلف انجام شد.نمونههای همگن و پایدار با کسر حجمی جامد
<i>کلید واژگان:</i> لزجت نانوسیال هیبریدی رفتار غیرنیوتنی	- 0.0625، %0.5، %0.5، %0.7، %1، %1.5 و 2% با تعلیق ترکیب حجمی مساوی از نانولولههای کربنی و دیاکسید سیلیسیوم در مخلوط %50-%50 حجمی آب اتیلن گلیکول تهیه شدند. نتایج اندازه گیری در نرخ برشهای مختلف نشان داد که سیال پایه (مخلوط آب و اتیلن گلیکول) از خود رفتار نیوتنی دارد، درحالی که همه نمونههای نانوسیال رفتار غیرنیوتنی مشابه مدل قاعده توانی (سدو پلاستیک) و با شاخص توان کمتر از یک نشان دادند. برای همه نمونههای نانوسیال و همه دماها ضرایب مدل پاورلا از طریق برازش منحنی با دقت بالایی

Experimental investigation of the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non-Newtonian hybrid nanofluid

Hamed Eshgarf, Masoud Afrand^{*}, Mohammad Hemmat Esfe

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran * P.O.B. 8514143131 Najafabad, Iran, masoud.afrand@pmc.iaun.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 15 January 2016 Accepted 11 February 2016 Available Online 27 February 2016	In this paper, the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non- Newtonian hybrid nanofluid, containing water and ethylene glycol as a base fluid and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and silica (SiO2) as additives, have been investigated experimentally. The measurements have been carried out in temperatures range of 27.5°C - 50°C by using a Brookfield
Keywords: Viscosity Hybrid nanofluid Non-Newtonian behavior Experimental investigation	DV-I PRIME digital Viscometer for different shear rates. The stable and homogeneous samples, with the solid volume fractions of 0.0625%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.5% and 2%, were prepared by dispersing equal volumes of dry MWCNTs and SiO2 nanoparticles in a specified amount of the binary mixture of water/EG (50:50 %vol.). The measurement results at different shear rates showed that the base fluid possessed Newtonian behavior, while all nanofluid samples exhibit a pseudoplastic rheological behavior with a power law index of less than unity (n<1). Moreover, the consistency index and power law index have been obtained by accurate curve-fitting for all nanofluid samples. The results also revealed that the apparent viscosity generally increases with an increase in the solid volume fraction and decreases with rising temperature.

1-مقدمه

آلومینیوم را بر ضریب انتقال حرارت هدایت مخلوط آب و اتیلن گلیکول به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. ایشان کسر حجمی نانوذرات را تا 18% افزایش دادند و اثر این افزایش را در بازه دمایی 2°50 تا 2°55 مشاهده کردند. نتایج نشان داد که ضریب هدایت حرارتی در هر دو نانوسیال می تواند تا 25% در کسر حجمی 18% افزایش یابد. نتایج مشابه در زمینه افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات، توسط چاندراسکار و همکاران [2]، ساندر و همکاران [3]، جیونگ و همکاران [4] و همت و همکاران [5] ارائه شده است. همچنین تعدادی از محققان به بررسی پتانسیل استفاده از نانوسیالات در فرآیندهای

مخلوط آب و اتیلن گلیکول، که ضد یخ نیز نامیده می شود، برای کاربرد در سیستمهای خنک کاری، مبدلهای حرارتی، کلکتورهای خورشیدی، رادیاتور اتومبیلها و ... مورد استفاده قرار می گیرد. با این وجود این مخلوط دارای ضریب هدایت حرارتی پائین برای کار در سیستمهای گرمایی است. در همین راستا بسیاری از محققان تلاش کردهاند تا هدایت حرارتی این مخلوط را با تعلیق کردن نانوذرهها یا نانولولههای کربنی در این مخلوط بهبود دهند. برای مثال یامساواسد و همکاران [1]، اثر افزودن نانوذرات اکسید تیتانیوم و اکسید

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. Eshgarf, M. Afrand, M. Hemmat Esfe, Experimental investigation of the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non-Newtonian hybrid nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 98-104, 2016 (in Persian)

مختلف مهندسی نظیر انتقال حرارت جوشش [6]، انتقال حرارت جابهجایی توام [7]، ماشین کاری [8]، خنک کاری [9] و میکرومبدل حرارتی [10] پرداختهاند.

در سالهای اخیر نانوسیالات هیبریدی که ترکیبی از دو یا چند نانو ماده مختلف است بهمنظور افزایش نرخ انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفتهاند. در همین راستا، همت و همکاران [11] در یک پژوهش تجربی اثرات افزایش دما و غلظت نانو ذرات هیبریدی مس و اکسید تیتانیوم را در بازه دمایی 2°30 تا 60°C و تا کسر حجمی 2% مورد بررسی قرار دادند. سیال پایه مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول بود. نتایج آزمایشهای ایشان افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت تا 44% در دمای 2°60 و کسر حجمی 2% بود. نانوسیالات هیبریدی دیگری نیز توسط باغبانزاده و همکاران [12]، مونخابایار و همکاران [13] و سیام و همکاران [14] نیز بررسی شدهاند.

واضح است که افزودن مواد جامد به مایعات، دیگر خواص ترموفیزیکی آنها را تحت تأثیر قرار می دهد. یکی از مهمترین خواص ترموفیزیکی لزجت نانوسیال است که بهطور مستقیم بر توان پمپاژ و سیستمهای انتقال حرارت جابجایی اجباری اثر می گذارد. بنابراین تعیین لزجت نانوسیالات برای محاسبه توان مصرفی پمپاژ ضروری به نظر می رسد. تحقیقات زیادی در بررسی اثر افزودنیها بر روی لزجت نانوسیالات انجام شده است. تعدادی از این تحقیقات (برای نانوسیالات حاوی مخلوط آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه) که همگی براساس رفتار نیوتنی نانوسیالات گزارش شدهاند به طور خلاصه در جدول 1 ارائه شدهاند. این تحقیقات نشان دادهاند که لزجت نانوسیالات با افزایش غلظت مواد جامد، افزایش و با افزایش دما، کاهش می یابد.

على غم مطالعات زيادى كه بر روى لزجت نانوسيالات گزارش شدهاند، تحقيقات اندكى به رفتار غيرنيوتنى آنها پرداختهاند. بهعنوان مثال كاباليرو و همكاران [20] به مطالعه رفتار رئولوژيك نانوسيال دىاكسيد تيتانيوم اتيلن گليكول در بازه دمايى 2°20 تا 2°50 و تا كسر حجمى %25 پرداختهاند. ايشان اندازه گيرى لزجت را در نرخ برشهاى متفاوت انجام دادند و نشان دادند كه نانوسيال رفتار غيرنيوتنى شبيه مدل استوالد نشان مىدهد. رفتار رئولوژيك پلى كربنات حاوى كسر جرمى %5.0 تا %51 نانولولههاى كربنى توسط پوچكه و همكاران [21] بررسى شد. ايشان گزارش كردند كه نمونههاى داراى كسر جرمى بالاتر از %2 رفتار غيرنيوتنى نشان مىدهند. فوك و همكاران [22] لزجت نانوسيالات حاوى نانولولههاى كربنى چند موداره را بهصورت آزمايشگاهى بررسى كردند. نتايج ايشان يك كاهش %20 در مقدار لزجت را نشان داد. ايشان همچنين درحالى كه لزجت افزايش پيدا كرد، رفتار غيرنيوتنى مشاهده كردند.

ن دول 1 تعدادی از تحقیقات موجود برای لزجت نانوسیالات حاوی مخلوط آب و
یلن گلیکول به عنوان سیال پایه

Table 1 A summary of	existing studies	for the viscos	ity of EG-
water based nanofluids			

ذرات معلق	بازه دمایی (C°)	بازه کسر حجمی (%)	مرجع
سيليكا	(-35)-50	0-10	[15]
اکسید مس	(-35)-50	0-6.12	[16]
اكسيد آلومينيوم	(-35)-50	1-10	[17]
اکسید آهن	0-50	0-1	[18]
اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم	15-40	0-4	[19]

آلاداگ و همکاران [23] اثر دما و نرخ برش را بر لزجت نانوسیالات نانولولههای کربنی- آب و اکسید آلومینیوم- آب بررسی کردند. آزمایشهای ایشان نشان داد که نانوسیال حاوی نانولولههای کربنی در نرخ برشهای بالا رفتار نیوتنی دارند، درحالی که نانوسیال حاوی اکسید آلومینیوم در بازه دمایی مورد بررسی، رفتار غیرنیوتنی نشان داد. تمجید و جنتر [24] رفتار رئولوژیک نانوسیال نقره اتیلن گلیکول را در بازه کسر حجمی ۱۵۰/۱۰ تا 4.38 بررسی کردند. اندازه گیریهای ایشان نشان داد که رفتار کلی نانوسیال شبیه رفتار سدوپلاستیک¹ است. ایشان همچنین نمودارهای تنش برشی- نرخ برش را با مدلهای بینگهام پلاستیک²، هرسل- بالکی³ و کسن⁴ ارزیابی کردند. مقدم و جرمیهای متفاوت (200-2000) و دماهای مختلف (2[°]00 تا 2[°]00) اندازه گیری کردند. نتایج ایشان نشان داد که لزجت نانوسیالات با افزایش کسر جرمی، افزایش و با افزایش دما، کاهش مییابد. ایشان همچنین مشاهده کردند که رفتار نانوسیال غیرنیوتنی است.

با این وجود، همانطور که در بالا بیان شد، تعداد محققانی که بر رفتار رئولوژیک نانوسیالات هیبریدی تمرکز کردهاند اندک است. از طرفی به این علت که رفتار نیوتنی یا غیرنیوتنی نانوسیالات نقش مهمی در کاربردهای حرارتی و جریان سیال ایفا میکند، یک نیاز ضروری به تعیین رفتار رئولوژیک نانوسیالات وجود دارد. از اینرو، در این مقاله، رفتار رئولوژیک نانوسیال هیبریدی نانولوله کربنی چند جداره- دیاکسید سیلیسیوم/آب -اتیلن گلیکول بررسی میشود. برای نیل به این هدف نمونههای نانوسیال در کسر حجمیهای مختلف تهیه شده و در دماهای متفاوت مورد ارزیابی قرار میگیرد.

2-انجام آزمایش

1-2- تهيه نمونههای نانوسيال

نمونههای پایدار و همگن با کسرحجمیهای %0.025 تا %2 با معلق کردن نانولولههای کربنی و سیلیکا (با کسرحجمی مساوی) در سیال پایه، که مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول با نسبت حجمی مساوی است، تهیه شدند. خواص ذرات جامد، آب و اتیلن گلیکول در جداول 2 و 3 ارائه شدهاند.

مقادیر لازم نانوذرات و نانولولههای کرینی چند جداره برای تهیه نمونهها با کسر حجمیهای مختلف از رابطه (1) محاسبه شدند. این مقادیر در جدول 4 ارائه شدهاند.

$$\varphi = \left[\frac{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{SiO}_2} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{MWCNT}}}{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{WATER}} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{SiO}_2} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{MWCNT}} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{EG}}} \right] \times 100$$
(1)

در این رابطه، φ مقدار کسر حجمی، ρ چگالی برحسب kgm^3 و w جرم برحسب kg است.

در تحقیق حاضر، بهمنظور تولید نمونههای پایدار، ابتدا بهوسیله دستگاه همزن مغناطیسی، پودر نانو و سیال پایه به مدت دو ساعت مخلوط شده و سپس نانوسیال تهیه شده به مدت پنج الی شش ساعت توسط دستگاه همزن التراسونیک (ساخت شرکت هیلشر⁵ آلمان با توان 400 وات و فرکانس 24 کیلوهرتز) برای جلوگیری از کلوخه شدن در معرض امواج مغناطیسی قرار گرفت. با توجه به تجربه های گذشته، بعد از ساخت نانوسیال در کسرهای

¹⁻ Pseudoplastic behavior

²⁻ Bingham plastic 3- Herschel–Bulkley

⁴⁻ Casson

⁵⁻ Hielscher

جدول 4 مقادیر نانولولههای کربنی چند جداره و نانوذرات دی کسید سیلیسیوم برای تهيه نمونهها

Table 4 Amounts of MWCNTs and SiO₂ nanoparticles for preparing the samples

جرم (g) [±0.001]		(%)	
MWCNTs	SiO ₂	کسر حاجمتی (۱۰) –	وعيف
12.6	14.4	2	1
9.4	10.8	1.5	2
6.3	7.2	1	3
4.7	5.4	0.75	4
3.15	3.6	0.5	5
1.57	1.8	0.25	6
0.37	0.43	0.0625	7



Fig. 1 Photographs of MWCNTs, SiO₂ nanoparticles, EG and prepared nanofluid

شکل 1 تصاویر نانولولههای کربنی، سیلیکا، اتیلن گلیکول و نانوسیال تهیه شده



Fig. 2 Measurement of viscosity using Brookfield DV-I PRIME digital Viscometer equipped with a temperature bath شکل 2 نحوه اندازه گیری لزجت با استفاده از لزجت سنج بروکفیلد تجهیز شده با یک حمام دما

استفاده کالیبره⁴ شود. برای این منظور هنگامی که دستگاه روشن می شود و قبل از اندازه گیری، دستگاه توسط مادهای که شرکت سازنده اعلام کرده باید کالیبره شود. ماده مورد استفاده در لزجتسنج بروکفیلد، سیلیکون است. در

جدول 2 مشخصات نانولوله های کربنی چند جداره و نانوذرات دی اکسید سیلسیوم Table 2 Characteristics of MWCNTs and SiO₂ nanoparticles

	مقدار	
مسحصات	نانولوله های کربنی	دى اكسيد سيلسيوم
خلوص	+0.97%	+0.99%
رنگ	مشکی	سفيد
	nm) 5-20 = قطر خارجی(nm)	
اندازه	3-5 = قطر داخلی (nm)	20-30 (nm)
	50= طول (µm)	
هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	1500	1.3
چگالی (gcm ⁻³)	~2.1	2.4
سطح ويژه (m ² g ⁻¹)	233	180-600

جدول 3 مشخصات آب و اتیلن گلیکول

Fable 3	Characteristics	of water	and ethylene glycol	

ب الم	مقدار اتیلن گلیکول آب	
مستحصات		
فرمول شيميايى	H ₂ O	$C_2H_6O_2$
جرم مولی (^{۱-} gmol)	18.02	62.07
ظاهر	تقریبا بی رنگ- شفاف	مایع بی رنگ- شفاف
بو	بی بو	بی بو
چگالی (kgm ⁻³)	998.21	1113.20
نقطه ذوب (C°)	0.00	-12.9
نقطه جوش (C°)	100	197.3
هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	0.6	0.224
لزجت (mPas) در 20°C	1	16.1

حجمی مختلف، هر نمونه به مدت سه روز به صورت چشمی مورد پایش قرار گرفت که هیچگونه رسوب، تهنشینی و کلوخه شدن مشاهده نشد. تصاویری از نانوذرات دی کسید سیلیسیوم، نانولولههای کربنی، اتیلن گلیکول و یک نمونه تهیه شده برای کسر حجمی %2 در شکل 1 نشان داده شدهاند.

2-2- اندازه گیری لزجت

لزجت نمونه های نانوسیال، که با کسر حجمی های %0.0625، %0.5، 0.75%، 1%، 1.5% و 2% تهيه شده بود، در بازه دمايي 27.5°C تا 50°C اندازه گیری شد. برای این کار از لزجت سنج استوانهای بروکفیلد¹ که به یک حمام دما تجهیز شده بود استفاده شد. اسپیندل بهکار گرفته شده در این آزمایش از نوع یو ال ای² است که دارای ضریب نرخ برشی 1.223 و ضریب ثابت 0.64 است. اندازه گیریها برای نرخ برشهای مختلف انجام شد. دقت و تکرارپذیری این لزجتسنج به ترتیب %1± و %0.2 کل گستره اندازهگیری ٔ است. قبل از انجام آزمایشها، لزجتسنج با اتیلن گلیکول و آب اعتبارسنجی شد. بەمنظور ارزیابی رفتار رئولوژیک (نیوتنی یا غیرنیوتنی) نانوسیال، همه آزمایشها برای هر نمونه در هر دما با دورهای مختلف (نرخ برشهای مختلف) تكرار شد. شكل 2 نحوه اندازه گيرى لزجت با استفاده از لزجت سنج بروكفيلد تجهيز شده به يک حمام دما نشان ميدهد.

2-3- محاسبه خطا و عدم قطعيت

به منظور اعتبارسنجی آزمایش، دستگاه لزجتسنج بروکفیلد باید قبل از

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28

⁴⁻ Calibration Befor Use (CBU)

¹⁻ DV-I PRIME model

²⁻ ULA 3- Full Scale Range (FSR)



Fig. 3 Viscosity versus shear rate for base fluid at different temperatures



Fig. 4 Shear stress versus shear rate for base fluid at different temperatures

شکل 4 تنش برشی برحسب نرخ برش برای سیال پایه در دماهای مختلف

کاهش مییابد. این رفتار با اصطلاح نازک-برش¹ یا سدوپلاستیک شناخته میشود [26]. شکل 6 نیز رفتار غیرخطی تنش برشی برحسب نرخ برش را به خوبی نشان میدهد. این دو شکل به وضوح نشان دادند که با افزایش اندکی از ذرات جامد رفتار نیوتنی سیال پایه به رفتار غیرنیوتنی تغییر مییابد.

رفتار غیرنیوتنی برای نمونه نانوسیال با کسر حجمی ۱% نیز در شکلهای 7 و 8 نشان داده شده است. شکلهای 5 تا 8 بهوضوح نشان میدهند که در این مطالعه، رفتار نانوسیال یک رفتار غیرنیوتنی از نوع سدوپلاستیک است و از مدل قاعده توانی² (پاورلا) که در رابطه (5) نشان داده شده است پیروی میکند. برای سایر کسر حجمیها نیز چنین رفتاری مشاهده شد. با بررسی شکلهای 5 تا 8 نتیجه میشود که لزجت با افزایش دما کاهش و با افزایش کسر حجمی ذرات افزایش چشمگیری دارد. آزمایش های اولیه که برای تعیین لزجت نمونه سیلیکون در دمای ²⁵22 انجام گرفت مشخص شد که لزجت اندازه گیری شده با مقدار لزجت درج شده بر روی ماده نمونه (484 mPas) برابر است. این همخوانی نشان میدهد که لزجت سنج مورد استفاده کالیبره است.

مطابق با راهنمای دستگاه مقدار دقت اندازه گیری %1± کل گستره اندازه گیری است. کل گستره اندازه گیری با استفاده از رابطه (2) محاسبه میشود.

 FSR [mPas] = TK × SMC × 10000 RPM
 (2)

 که در آن TK ضریب گشتاور و برابر 0.0937 است. همچنین SMC ثابت

 اسپیندل و برابر 0.64 است. RPM نیز بیانگر مقدار دور دستگاه در دقیقه است.

مقدار خطای اندازه گیری لزجتسنج مورد استفاده را میتوان براساس راهنمای شرکت سازنده از رابطه (3) محاسبه کرد.

 $Error [mPas] = (0.01 \times FSR) + (0.01 \times \mu)$ (3)

 mPas
 μ مقدار لزجت اندازه گیری شده توسط دستگاه برحسب mPas

 Impose
 μ مقدار لزجت اندازه گیری شده توسط دستگاه برحسب mPas

برای نمونه، جدول 5 خطای محاسبه شده در اندازه گیری لزجت نانوسیال با کسر حجمی %0.0625 در دمای C°27.5 و دورهای مختلف را نشان می دهد.

3-نتايج و بحث

همان طور که در بخش 2-2 بیان شد لزجت نمونههای نانوسیال با کسر حجمیهای %0.06. %0.25، %0.5، %0.75، %1، %1.5 و %2 در نرخ برشها و دماهای مختلف اندازه گیری شد. در ابتدا با اندازه گیری لزجت سیال پایه در نرخ برشهای مختلف، که نتایج آن در شکل 3 نشان داده شده است، رفتار رئولوژیک سیال پایه ارزیابی شد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود لزجت سیال پایه مستقل از نرخ برش است و این یعنی این که سیال پایه رفتار نیوتنی دارد. برای درک بهتر این ادعا نمودار تنش برشی برحسب نرخ برش برای سیال پایه در دماهای مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. رابطه (4) که نشان دهنده وابستگی تنش برشی به نرخ برش است نشان می دهد که است. با توجه به شکل 4 و رابطه (4) واضح است که سیال پایه نیوتنی است. (4)

در اینجا ۲ تنش برشی برحسب Pa، γ نرخ برش برحسب s⁻¹ و µ لزجت سیال برحسب Pas است.

شکلهای 5 و 6 به ترتیب مقادیر لزجت و تنش برشی را برحسب نرخ برش برای نمونه با کسر حجمی %0.0625 در دماهای مختلف نشان میدهند. همان طور که در شکل 5 دیده می شود مقدار لزجت با افزایش نرخ برش

جدول 5 مقادیر کل گستره و خطا برای کسرحجمی %0.0625، در دمای C°27.5 و دورهای مختلف

خطا (mPas)	کل گسترہ (mPas)	دور (RPM)	رديف
0.6923	60	10	1
0.3767	30	20	2
0.2716	20	30	3
0.1865	12	50	4
0.1654	10	60	5

¹⁻ Shear-thinning 2- Power law



Fig. 8 Shear stress versus shear rate for solid volume fraction of 1% at different temperatures



Fig. 9 Curve-fitting results for nanofluid with solid volume fraction of 0.5% at different temperatures شكل 9 نتايج برازش منحنى براى نانوسيال با كسر حجمى 0.5% در دماهاى مختلف



با توجه به نتایج ارائه شده در شکلهای 5 تا 8 و رفتار غیرنیوتنی نانوسیال، به دست آوردن پارامترهای m و n برای محاسبه توان پمپاژ و انتقال حرارت جابجایی مهم و ضروری به نظر میرسد. همان طور که مشاهده شد،

1- Consistency index



Fig. 5 Viscosity versus shear rate for solid volume fraction of 0.0625% at different temperatures



Fig. 6 Shear stress versus shear rate for solid volume fraction of 0.0625% at different temperatures

شکل 6 تنش برشی برحسب نرخ برش برای کسر حجمی %0.0625 در دماهای مختلف



Fig. 7 Viscosity versus shear rate for solid volume fraction of 1% at different temperatures

شکل 7 لزجت برحسب نرخ برش برای کسر حجمی 1% در دماهای مختلف

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.14.1

²⁻ Power law index

³⁻ Apparent viscosity

تنش برشی تابعی غیرخطی از نرخ برش، دما و کسر حجمی است؛ بنابراین می توان با برازش منحنی و به کمک رابطه (5) مقادیر m و n را برای هر دما و کسر حجمی به دست آورد. در این تحقیق با استفاده از نرمافزار سیگما پلات برای هر حالت مقادیر m. n و R^2 به دست آمد که نتایج حاصل در جدول 6 گزارش شده است. برای بررسی دقت برازش انجام شده، شکل 9 چگونگی عبور منحنی برازش شده بر نتایج آزمایشگاهی برای کسر حجمی 0.5% در دو دمای مختلف را نشان می دهد. این شکل مطابقت خوب منحنی های برازش شده را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد.

همان طور که در جدول 6 مشاهده می شود مقادیر n همواره کمتر از یک هستند و این به این معناست که با افزایش نرخ برشی، لزجت ظاهری کاهش مییابد. همچنین با افزایش کسر حجمی در اکثر نقاط مقدار n کاهش مییابد و این بدان معناست که رفتار سیال از حالت نیوتنی فاصله بیشتری می گیرد و رفتار غیرنیوتنی بیشتر محسوس است. با بررسی شاخص m مشاهده می شود که با افزایش کسرحجمی، m افزایش و با افزایش دما، m کاهش مییابد. همانطور که در جدول 6 ارائه شده است با افزایش کسر حجمی ذرات m و در نتیجه لزجت نانوسیال در یک دمای ثابت افزایش می یابد (براساس رابطه (6)). در واقع با افزایش ذرات حرکت تصادفی نانوذرات در سیال پایه که یکی از عوامل تاثیرگذار بر لزجت است افزایش مییابد. در اثر برخورد پیوسته بین نانوذرات و مولکولهای سیال پایه این حرکت تصادفی به وجود میآید. وقتی کسر حجمی افزایش یابد یعنی حضور نانوذرات در سیال پایه بیشتر شده و چون لزجت به معنی مقاومت نانوسیال در برابر حرکت است، با اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه مقاومت در برابر جریان افزایش می یابد. همچنین وقتی نانوذرات و نانولوله ها به سیال پایه اضافه می شوند، در سیال پایه پراکنده شده و در اثر نیروی واندروالس بین ذرات و سیال پایه، نانوخوشه های بزرگتر تشکیل میشوند. این نانوخوشهها باعث ممانعت از حرکت سیال پایه روی يكديگر شده ودر نتيجه لزجت افزايش مىيابد. همچنين جدول 6 نشان میدهد که با افزایش دما مقدار m کاهش می یابد. در واقع وجود لزجت در اثر نیروهای چسبندگی بین مولکولهای مایعات است. در مایعات مولکولها تحت تاثیر دماهای بالاتر دارای انرژی بیشتر شده و میتوانند بر نیروهای چسبندگی بین مولکولی غلبه کنند. در نتیجه مولکولهای انرژیدار راحتتر حرکت میکنند. کاهش نیروهای بین مولکولی در اثر افزایش دما سبب کاهش مقاومت در برابر جریان می شود. در نتیجه لزجت نانوسیال با افزایش دما کاهش می یابد. نتایج به دست آمده برای رفتار m و n برحسب دما و کسر حجمی با نتایج تحقیقات گذشته که توسط حجت و همکاران [27] و یاسار و همکاران [28] گزارش شدهاند مطابقت خوبی دارند.

4-نتيجه گيري

در این پژوهش لزجت نمونههای نانوسیال با کسر حجمیهای %0.0625، %0.25، %0.5، %0.75، %1، %1.1 و %2 در نرخ برشها و دماهای مختلف اندازهگیری شد. در ابتدا با اندازهگیری لزجت سیال پایه در نرخ برشهای مختلف رفتار رئولوژیک سیال پایه ارزیابی شد و مشخص شد که سیال پایه رفتار نیوتنی دارد. نتایج نشان داد که با افزایش اندکی ذرات جامد به سیال پایه رفتار نانوسیال تولید شده غیرنیوتنی شد که از مدل قاعده توانی پیروی می کرد. همچنین مشخص شد که رفتار رئولوژیک نانوسیال به شدت به دما و کسر حجمی وابسته است. بنابراین با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و برازش منحنی شاخصهای مدل قاعده توانی (m و n) برای همه نمونههای

جدول 6 شاخصهای مدل قاعده توانی برحسب دما و کسر حجمی
Table 6 Power law model parameters as a function of

temperature and solid volume fraction					
کسر حجمی (%)	دما (°C)	m (Pas ⁿ)	n	R^2	
0.0625	27.5	0.013	0.8378	0.9994	
	30	0.0132	0.8249	0.9995	
	35	0.0122	0.8144	0.9996	
	40	0.011	0.8073	0.9991	
	45	0.0114	0.776	0.9994	
	50	0.0118	0.7361	0.9985	
0.25	27.5	0.0526	0.6061	0.9985	
	30	0.0527	0.5832	0.9982	
	35	0.0448	0.5687	0.9975	
	40	0.0351	0.6009	0 9994	
	45	0.0312	0 5904	0.9990	
	50	0.0273	0.5781	0.9995	
	50	0.0275	0.0701	0.7775	
0.5	27.5	0 1493	0.4615	0 9978	
010	30	0.1365	0.4702	0.9991	
	35	0.1052	0.5193	0.9970	
	40	0.1032	0.4605	0.9951	
	40	0.0896	0.5014	0.9960	
	50	0.0693	0.5136	0.0083	
	50	0.0095	0.5150	0.9985	
0.75	27.5	0.2168	0.5508	0.9984	
	30	0.1894	0.5523	0.9961	
	35	0.1703	0.4982	0.9993	
	40	0.1493	0.4246	0.9985	
	45	0.123	0.4073	0.9912	
	50	0.1177	0.3359	0.9966	
1	27.5	0.3071	0.5164	0.9974	
	30	0.2832	0.5064	0.9990	
	35	0.2521	0.4707	0.9921	
	40	0.2183	0.4765	0.9980	
	45	0.1821	0.4411	0.9957	
	50	0.1723	0.3638	0.9979	
1.5	27.5	0.4837	0.4572	0.9985	
	30	0.4483	0.4653	0.9985	
	35	0.3316	0.4807	0.9989	
	40	0.2589	0.4353	0.9995	
	45	0.227	0.4465	0.9996	
	50	0.1967	0.3394	0.9993	
2	27.5	0.5144	0.4073	0.9985	
	30	0.483	0.4507	0.9979	
	35	0.4193	0.4289	0.9958	
	40	0.3396	0.4493	0.9980	
	45	0.3031	0.4388	0.9984	
	50	0.2821	0.3963	0.9980	

نانوسیال و در همه دماها به صورت جداگانه به دست آمدند. مقایسه ها نشان داد که برازش منحنی انجام شده دارای دقت خوبی است.

5-فهرست علائم

شاخص استحکام سیال (Pas ⁿ)	т
شاخص رفتار جريان	n
دما (°C)	Т
جرم (kg)	W
	علائم يونانى
نرخ برش (s-1)	· γ
لزجت دینامیکی (یا ^۱ -s ^{-۱} s)	μ
چگالی (kgm ⁻³)	ρ
تنش برشی (Pa)	τ

¹⁻ Yasar

6415-6425, 2013.

- [14] L. S. Sundar, M. K. Singh, A. C. M. Sousa, Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT–Fe3O4/water hybrid nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 3, pp. 73-83, 2014.
- [15] 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, No. 3, pp. 67-71, 2007.
- [16] P. K. Namburu, D. P. Kulkarni, D. Misra, D. K. Das, Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, *Experimental Thermal and Fluid Scienc*, Vol. 32, No. 2, pp. 397-402, 2007.
- [17] B. C. Sahoo, R. S. Vajjha, R. Ganguli, G. A. Chukwu, D. K. Das, Determination of Rheological Behavior of Aluminum Oxide Nanofluid and Development of New Viscosity Correlations, *Petroleum Science and Technology*, Vol. 27, No. 15, pp. 1557-1770, 2009.
- [18] L. S. Sundar, E. V. Ramana, M. K. Singh, A. C. M. De Sousa, Viscosity of low volume concentrations of magnetic Fe3O4 nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, *Chemical Physics Letters*, Vol. 554, No. 1, pp. 236-242, 2012.
- [19] T. Yiamsawas, O. Mahian, A. S. Dalkilic, S. Kaewnai, S. Wongwises, Experimental studies on the viscosity of TiO2 and Al2O3 nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications, *Applied Energy*, Vol. 111, No. 1, pp. 40-45, 2013.
- [20] D. Cabaleiro, M. J. Pastoriza-Gallego, C. Gracia-Fernández, M. M Piñeiro, L. Lugo, Rheological and volumetric properties of TiO2ethylene glycol nanofluids, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 8, No. 1, pp. 286, 2013.
- [21] P. Potschke, T. D. Fornes, D. R. Paul, Rheological behavior of multi walled carbon nanotube/polycarbonate composites, *Polymer*, Vol. 43, No. 11, pp. 3247-3255, 2002.
- [22] T. X. Phuoc, M. Massoudi, R. H. Chen, Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 1, pp. 12-18, 2011.
- [23] B. Aladag, S. Halelfadl, N. Doner, T. Mare, S. Duret, P. Estelle, Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures, *Applied Energy*, Vol. 97, No. 1, pp. 876-880, 2012.
- [24] E. Tamjid, B.H. Guenther, Rheology and colloidal structure of silver nanoparticles dispersed in diethylene glycol, *Powder Technology*, Vol. 197, No. 1-2, pp. 49-53, 2010.
- [25] M. B. Moghaddam, E. K. Goharshadi, M. H. Entezari, P. Nancarrow, Preparation, characterization and rheological properties of grapheme–glycerol nanofluids, *hemical Engineering Journal*, Vol. 231, No. 1, pp. 365-372, 2013.
- [26] R. P. Chhabra, J. F. Richardson, Non-Newtonian Flow in the Process Industries: Fundamentals and Engineering Applications, First published, pp. 6-10, Great Britain: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [27] M. Hojjat, S. G. Etemad, R. Bagheri, J. Thibault, Rheological characteristics of non-Newtonian nanofluids: experimental investigation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 2, pp. 144-148, 2011.
- [28] F. Yasar, H. Togrul, N. Arslan, Flow properties of cellulose and carboxymethyl cellulose from orange peel, *ournal of Food Engineering*, Vol. 81, No. 1, pp. 187-199, 2007.

- [1] T. Yiamsawasd, A. Selim Dalkilic, S. Wongwises, Measurement of the thermal conductivity of titania and alumina nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 545, No. 1, pp. 48-56, 2012.
- [2] M. Chandrasekar, S. Suresh, A. Chandra Bose, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al2O3/water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Scienc*, Vol. 34, No. 2, pp. 210-216, 2010.
- [3] L. S. Sundar, M. K. Singh, A. C. M. Sousa, Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe3O4nanofluid for heat transfer applications, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 5, pp. 7-14, 2013.
- [4] J. Jeong, C. Li, Y. Kwon, J. Lee, S. Hyung Kim, R. Yun, Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, No. 8, pp. 2233-2241, 2013.
- [5] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, M. Bahiraei, D. Toghraie, O. Mahian, S. Wongwises, Thermal conductivity modeling of MgO/EG nanofluids using experimental data and artificial neural network, *Thermal Analysis and Calorimetr*, Vol. 118, No. 8, pp. 287-297, 2014.
- [6] A. Abdollahi, M. R. Salimpour, N. Etesami, Experimental analysis of pool boiling heat transfer of ferrofluid on surfaces deposited with nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 19-30, 2016. (in Persian فارسي)
- [7] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G. A. Sheikhzadeh, Effects of magnetic field on mixed convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 183-164, 2014. (in Persian, 2014) (ill enclosure)
- [8] S. Amini, S. M. Asgari, M. H. Mazaheri, investigating the machining parameters in turning of Monel K500 super alloy at dry and minimum quantity lubrication (QL) by nano-fluids conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 13, pp. 59-63, 2015. (in Persian فارسى)
- [9] M. Nazari, N. Babazade-baie, M. .M. Shahmardan, M. Ashouri, Experimental study of transient cooling of fluid inside closed reservoir by using CuO/water nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 99-106, 2015. (in Persian فارسى)
- [10] M. S. Gachuiee, S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, A. Chabi, Experimental investigation of convective heat transfer of Al2O3/water nanofluid through the micro heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 74-85, 2013. (in Persian, edited)
- [11] M. Hemmat Esfe, S. Wongwises, A. Naderi, A. Asadi, M. R. Safaei, H. Rostamian, M. Dahari, A. Karimipour, Thermal conductivity of Cu/TiO2–water/EG hybrid nanofluid: Experimental data and modeling using artificial neural network and correlation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, No. 8, pp. 100-104, 2015.
- [12] M. Baghbanzadeh, A. Rashidi, D. Rashtchian, R. Lotfi, A. Amrollahi, Synthesis of spherical silica/multiwall carbon nanotubes hybrid nanostructures and investigation of thermal conductivity of related nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 549, No. 1, pp. 87-94, 2012.
- [13] B. Munkhbayar, M. R. Tanshen, J. Jeoun, H. Chung, H. Jeong, Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNTaqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics, *Ceramics International*, Vol. 39, No. 6, pp.

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.14.1

6-مراجع