

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Su Nanoakışkanı İle Isı Transferinin İyileştirilmesi

Neşe BUDAK ZİYADANOĞULLARI<sup>1\*</sup>, H.Lütfi YÜCEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yrd.Doç.Dr, Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman  
[nesebudak@gmail.com](mailto:nesebudak@gmail.com)

<sup>2</sup> Yrd.Doç.Dr, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[hlyucel@frat.edu.tr](mailto:hlyucel@frat.edu.tr)

Geliş Tarihi/Received:

14.06.2017

Kabul Tarihi/Accepted:

22.11.2017

Yayın Tarihi/Published:

27.12.2017

### ÖZ

Son yıllarda malzeme bilimindeki gelişmeler sonucunda ısı transferinin iyileştirilmesinde yüz yıllardır uygulanan akışkan içerisine milimetre veya mikrometre boyutlarındaki katı partiküllerin süspansiyon edilmesi yöntemi yeni bir boyut kazanmıştır. 100 nm' nin altında parçacıklar elde edilerek bu parçacıklar, geleneksel olarak endüstriyel sistemlerde ısı transfer akışkanı olarak kullanılan su, sentetik yağ (motor yağı), etilen glikol gibi temel akışkanlarla belirli oranlarda karıştırılarak yeni akışkanlar elde edilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülleri saf suyun içerisine katılarak nanoakışkanlar hazırlanmış ve hazırlanan nanoakışkanların termofiziksel özellikleri (ısı iletkenlik, viskozite gibi) belirlenmiştir. Sonuçlar literatürdeki mevcut modellerle karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Nanoakışkanlar, Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri, Isıl İletkenlik, Viskozite

## Enhancement of Heat Transfer with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water Nanofluid

### ABSTRACT

In recent years, as a result of advances in materials, the process of suspending solid particles in millimeters or micrometers size to the fluid has been gaining a new dimension that has been applied for hundreds of years to improving heat transfer. By obtaining particles below 100 nm, these particles have begun to obtain new fluids mixed with basic fluids such as water, synthetic oil (engine oil), ethylene glycol at certain ratios, which are traditionally used as heat transfer fluid in industrial systems. In this study, nano-powders were prepared by adding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in pure water at 0.2, 0.4 and 0.8% concentration and the thermophysical properties (thermal conductivity, viscosity, etc.) of prepared nano-powders were determined. The results were compared with the existing models in the literature.

**Keywords:** Nanofluids, Thermophysical Properties of Nanofluids, Thermal conductivity, Viscosity

### 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerle birlikte son yıllarda sanayi sektöründe her geçen gün artan bir enerji talebi mevcuttur. Günlük yaşamın da en önemli girdilerinden olan enerjiye talep sürekli olarak artarken enerji kaynakları da hızlı bir şekilde tükenmektedir. Bu doğrultuda mevcut enerji dönüşüm sistemlerinin yeniden gözden geçirilip var olan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Mevcut yöntemler arasında aktif (dış güç kaynağının kullanılmasını gerektiren, ısı transfer edilen akışkana veya ortama ilave enerji verilerek ısı transferinde

iyileşme sağlayan), pasif (ilave enerji verilmeden ısı transferindeki iyileşmeyi sağlayan) ve karma (aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlasını birlikte kullanan) yöntemlerle ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar literatürde çokça mevcuttur. Bu çalışmalarda çoğunlukla kullanılan geleneksel ısı transfer akışkanları su, sentetik yağlar ve etilen glikol (antifriz) vs. dir. Ancak bu ısı transfer akışkanlarının performanslarının düşük olması nedeniyle ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmaları kısıtlamaktadır. Bu sebeple son yıllarda araştırmacılar yeni nesil ısı transfer akışkanları üzerinde çalışmaktadır.

Günümüzde nanoteknolojik gelişmeler, nanometre boyutlarında partikül üretimine olanak sağladığından akışkan içine partiküllerin katılması gündeme gelmiştir. Özellikle metalik nanopartiküllerin üretiminde kullanılan yöntemler; mikroemülsiyon teknikleri, gaz fazından üretim teknikleri olan asal gaz yoğunlaştırma, kimyasal buhar yoğunlaştırma ve hidrojen redüksiyonu gibi yöntemlerdir ( Gürmen ve Ebin, 2008 ). Üretilen bu nanopartiküller (1-100 nm boyutlu) ile geleneksel ısı transfer akışkanları su, sentetik yağ ve etilen glikol gibi bazı temel akışkanlar belirli hacimsel veya kütsel oranlarda karıştırılarak yeni akışkanlar elde edilmektedir. Bu akışkanlar nanoakışkan olarak adlandırılmaktadır. Nanoakışkan terimini nanoparçacıkların süspanse edildiği akışkan olarak çalışmasında ilk kullanan Choi küçük hacimsel oranlarda (% 1 den daha az) nanopartikül eklenmesi durumunda akışkanın ısı iletkenliğinin yaklaşık olarak iki katına çıktığını göstermiştir( Choi, 1995 ). Nanoakışkanların gelişmiş ısı iletkenlikleri, yüksek soğutma oranları, düşük pompalama gücü, daha küçük ve hafif soğutma sistemleri, düşük sürtünme katsayısı ve geliştirilmiş aşınma direnci gibi birçok fayda sağlamaktadır. Son zamanlarda sürtünme ile ilgili yapılan çalışmalar, nanopartikül (MoS<sub>2</sub>, CuO, TiO<sub>2</sub>, elmas, vs.) katkılı yağlama yağlarının yük-taşıma kapasitesi, aşınma önleyici ve sürtünme azaltıcı özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir ( Xu ve ark.1996, Verma ve ark. 2007 ). Bu özellikler nanoakışkanları; imalat, ulaşım, enerji, ve elektronik dahil, v.b. sanayideki birçok soğutma yağlama uygulamalarında cazip hale getirmiştir.

Bu çalışmamızda iki adım yöntemiyle % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülleri saf suyun içerisine katılarak nanoakışkanlar hazırlanmış ve hazırlanan nanoakışkanların termofiziksel özellikleri (ısı iletkenlik, viskozite gibi) belirlenmiştir. Isı transferini iyileştirmeye yardımcı olan nanopartiküllerin, nanoakışkanın karakteristiğini nasıl değiştirdiğini incelerken nanoakışkan kavramının, nanoakışkanların hazırlanmasının, nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin ve ısı transferi ölçüm tekniklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bunlardan ilki nanoakışkanın hazırlanması aşamasıdır. Nanoakışkanın hazırlanması için iki yöntem vardır. Birincisi tek adım yöntemi, ikincisi iki adım yöntemidir. Tek adım metodunun ana fikri temel akışkan içerisinde nanopartikül üretimidir. Fakat kuru nanopartikül elde etmek için akışkandan partikülü ayırmak zordur. Zhu ve ark. tek adım yöntemiyle CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O ve NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O ile topaklanmamış ve kararlı Cu nanoakışkanını elde etmişlerdir (Zhu ve ark. 2004). % 0.3 hacimsel oranlı Cu ve etilen glikol ile hazırlanan nanoakışkanın ısı iletkenliğinde % 40 iyileşme Eastman ve ark. tarafından ölçülmüştür (Eastman, 2001). TiO<sub>2</sub>, CuO ve Cu gibi çeşitli nanopartikül içeren nanoakışkan üretebilmek için kullanılan bir diğer tek adım metodunun toz altı nanopartikül sentezi olduğu bildirilmiştir (Chang ve ark.2005, Lo ve ark.2005, Lo ve ark.2005). Bu yöntemle nanopartiküller, katının elektrodan alınan ısı ile ısıtılması sonucu üretilmekte ve sonrasında vakum odasında sıvı hale yoğunlaştırılmasıyla nanoakışkan üretilmiştir.

İki adım metodunda önceden hazırlanmış olan nanopartiküller temel akışkan içerisine uygun yöntemlerle karıştırılarak süspansiyon oluşturulur. Tek adım metodu ile karşılaştırıldığında iki adım metodu metalik partiküller için daha az uygun olmasına karşın oksit nanopartiküller için iyi sonuç vermektedir. Nanoakışkan süspansiyonu üç şekilde; yüzey aktivatörleri ve/veya seyrelticiler kullanarak, süspansiyonun pH değerini değiştirerek, ultrasonik titreşimler kullanarak hazırlanabilir. Bu tekniklerle,

süspansiyon edilen partiküllerin yüzey özelliklerini değiştirmek ve kararlı süspansiyon elde etmek için partikül kümelenmesini önlemek amaçlanır zira nanoakışkan basit bir sıvı-katı süspansiyonu değildir (Dilek, 2008).

Wen ve Ding  $\gamma$ -  $Al_2O_3$  ile deiyonize su nanoakışkanını iki adım metoduyla hazırlarken dağıtıcı olarak sodyum dodikilbenzen sülfonat kullanmışlardır ( Wen ve Ding, 2004).

Liu ve ark. karbon nanotüp ve sentetik motor yağı ile farklı oranlarda nanoakışkanın kararlılığı için N-hidroksisüksinimid kullanarak ultrasonik titreşimlerle iki adım yöntemiyle hazırlamışlardır(Liu ve ark.2005).

Uzun süre kararlılığını koruyan ve akışkanın kimyasal özelliklerinin sabit kaldığı bir karışım elde etmeye çalışan araştırmacılar yaptıkları çalışmalarla topaklanma, akışı engelleme ve tortulaşma gibi problemleri gidermeyi hedeflemişlerdir. Aynı zamanda düşük nanopartikül hacimsel oranlı (%1 den daha az) geleneksel ısı transfer akışkanlarının ısı iletkenliklerinin de, temel akışkana oranla yaklaşık 2 kat daha fazla olduğu görülmüştür (Choi ve ark. 2001). Nanoakışkanın ısı iletkenliği; nanoakışkanın viskozitesine, sıcaklığa, temel akışkanın ısı iletkenliğine, katı partiküle (partikül şekli, boyutu, yoğunluğu, gizli ısısı gibi) ve nanopartikülün hacimsel oranına bağlıdır. Yapılan deneysel çalışmalar hacimsel oranın ısı iletkenlik üzerindeki etkisinin genel olarak artan bir eğilim trendinde olduğunu göstermektedir.

Deneysel çalışmamız, nanoakışkan sentezlenmesi ve nanoakışkanın ısı iletkenlik, viskozite gibi fiziksel ve ısı özelliklerinin belirlenmesini kapsamaktadır.

## 2. YÖNTEM

Deneylerde kullanılan  $Al_2O_3$  nanopartikülleri Sigma-Aldrich firmasından satın alınmış ve nanopartiküllerin özellikleri Tablo 1.1' de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan nanopartiküllerin özellikleri

Partikül Adı	Moleküler Formülü	Molekül Ağırlığı	Fazı	Partikül Boyutu	Yüzey Alanı	Erime noktası	Isıl İletkenliği
Alumina	$Al_2O_3$	101.96 g/mol	Gama	< 50nm	35-43 $m^2/g$	2040°C	37.14 W/mK

Nanoakışkan hazırlanırken,  $Al_2O_3$  nanopartikülü temel akışkan içerisine % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 olmak üzere üç farklı hacimsel oranda eklenmiş, iki adım metodu kullanılarak nanoakışkan hazırlanmıştır. Nanoakışkana eklenecek olan nanopartikülün kütlesi aşağıdaki eşitliklerden yararlanarak hesaplanmıştır.

$$\phi = \frac{\rho_n - \rho_l}{\rho_p - \rho_l} \quad (1)$$

Eşitlik 1' de  $\phi$  hacimsel oran, partikülün ve akışkanın yoğunluk değerleri  $\rho_p$  ve  $\rho_l$  sırasıyla yerine yazılarak nanoakışkanın yoğunluğu  $\rho_n$  hesaplanır.

$$\rho_n = \frac{m_n}{v_n} \quad (2)$$

$c_m$  Eşitlik 3' te yerine yazılarak süspansiyon içindeki nanopartikül kütlesi  $m_p$  hesaplanmıştır.

$$c_m = \phi \frac{\rho_p}{\rho_n} \quad (3)$$

$$m_p = c_m m_n \quad (4)$$

$m_p$  Eşitlik 4' te yerine yazılarak nanoakışkan hazırlanırken kullanılacak olan temel akışkanın kütlesi, hesaplanan  $m_{su}$  değeri Eşitlik 6'de yerine yazılarak temel akışkanın hacmi hesaplanmıştır.

$$m_{su} = m_n - m_p \quad (5)$$

$$\rho_{su} = \frac{m_{su}}{V_{su}} \quad (6)$$

Eşitlik 4'ten kütlesi belirlenen nanopartiküller hassas teraziyle tartılarak, Eşitlik 6'dan hacmi belirlenen temel akışkan içerisine eklenerek iki adım metoduyla nanoakışkan hazırlanmıştır. Deneylerde nanopartikül olarak  $Al_2O_3$ , temel akışkan olarak ise saf su kullanılmıştır. Nanoakışkanlar hazırlanırken oluşabilecek topaklanmayı engellemek ve nanoakışkanın stabilitesini artırmak için HIELSCHER Marka UP400S Model Ultrasonik Homojenizatör kullanılmıştır. Nanoakışkan hazırlanırken ısınmasını engellemek için 2 L kapasiteli reaktör kullanılmıştır.



Şekil 1. Hazırlanan  $Al_2O_3$  nanoakışkan numuneleri

Geçici sıcak tel yöntemi nanoakışkanın ısı iletkenliğinin ölçümünde kullanılan en yaygın metottur. Nanoakışkanların ısı özellikleri bu metot ile çalışan KD2 Pro kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm sonuçları, literatürde sıkça yararlanılan, ölçüm sonuçlarına yakın sonuçların elde edildiği Maxwell, Bruggeman ve Lu-Lin modelleri ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan nanoakışkanların viskozitesi FUNGILAB marka Smart serisi modeli viskozimetre ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Einstein, Batchelor, Pak ve Cho ve Brinkman modelleri ile karşılaştırılmıştır.

### 3. BULGULAR

$Al_2O_3$  nanopartikülleri % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 olacak şekilde üç farklı hacimsel oranda temel akışkan olarak saf suyun içerisine katılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda saf su içerisine katılacak olan nanopartikülün oranları ve miktarları Tablo 2' de verilmiştir. Hazırlanan nanoakışkanların yaklaşık 90 güne kadar stabil kaldığı gözlenmiştir.

Tablo 2. Nanopartiküllerin oranları ve miktarları

Partikül	Hacimsel oran(%)	Kütlesel oran(%)	Nanopartikül kütlesi $m_p$ (gr)	Nanoakışkan kütlesi $m_n$ (gr)	$V_{su}$ (mL)
$Al_2O_3$	0.2	0,00803	40	4978,603	4990
	0.4	0,01597	80	5008,706	4980
	0.8	0,03156	160	5068,912	4960

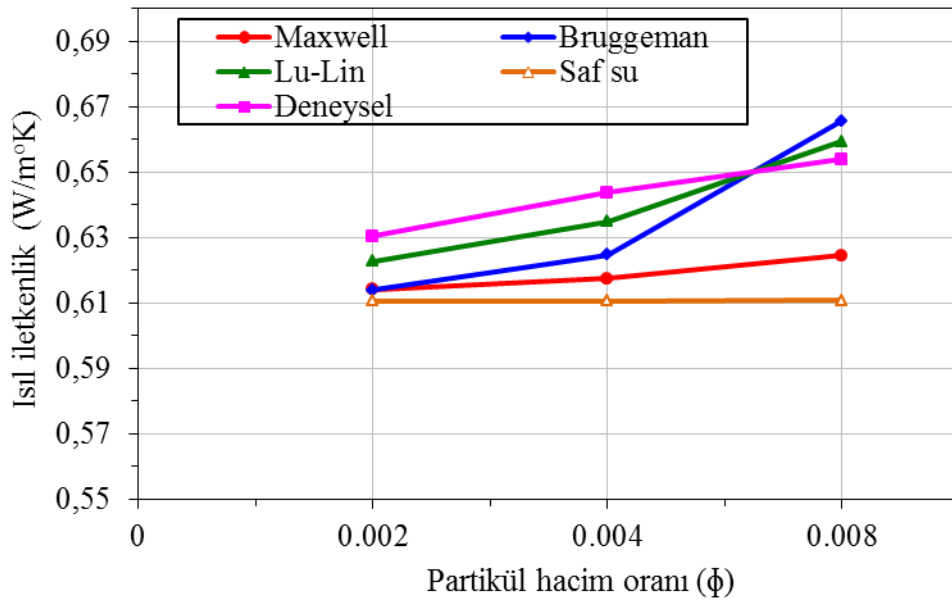
Nanoakışkanların ısı iletkenlik ölçümleri KD2 Pro cihazı ile tek sıcaklık değeri olan  $30^\circ C$ 'de yapılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen veriler mevcut Maxwell, Lu-Lin ve Bruggeman modelleri ile

karşılaştırılmıştır. Nanoakışkanların ısı iletkenliklerini tahmin etmek için araştırmacılar tarafından geliştirilen modeller Tablo 3’ te verilmiştir (Choi ve ark. 2001). Tabloya göre verilen modellerde  $k_p$  partikülün ısı iletkenliği,  $k_l$  esas akışkanın ısı iletkenliği,  $k_e$  partikül/sıvı süspansiyonunun efektif ısı iletkenliği,  $\phi$  (phi) süspansiyonun partikül hacim oranı,  $\alpha$  (alfa) ısı iletkenlikler oranı, ( $\alpha = k_p/k_l$ ),  $\beta$  (beta)=  $(\alpha -1)/(\alpha +2)$  ve  $n$  partikül Şekil faktörü olarak tanımlanmıştır.  $\beta$  ise nano katman kalınlığının partikül yarıçapına oranıdır.

**Tablo 3.** Katı/sıvı süspansiyonları için efektif ısı iletkenlik modelleri

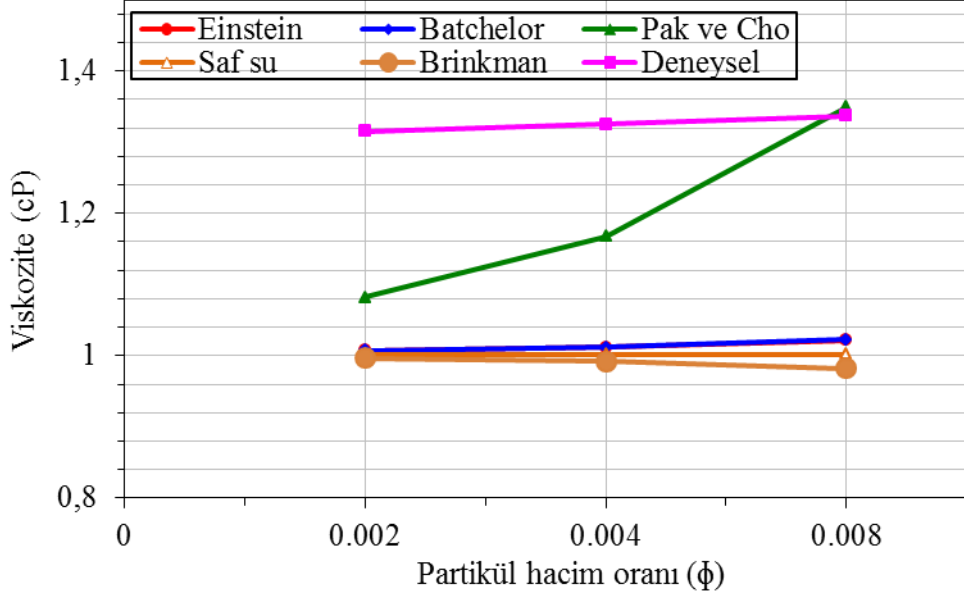
Modeller	İfadeler	Açıklamalar
Maxwell	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + 2(k_p - k_l)\phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)\phi}$	Küresel partiküller için geçerlidir.
Bruggeman	$k_e = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_l] + \frac{k_l}{4}\sqrt{\Delta}$ $\Delta = [(3\phi - 1)^2(k_p/k_l)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_p/k_l)]$	Homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için önerilmiştir.
Lu-Lin	$\frac{k_e}{k_l} = 1 + \alpha\phi + b\phi^2$	Küresel ve küresel olmayan partiküller için geçerlidir. Küresel partiküllerde $\alpha=10$ için, $a=2.25$ , $b=2.27$ ; $\alpha=\infty$ için $a=3.00$ , $b=4.51$ Yakın ve uzak alan çiftlerin etkileşimleri dikkate alınır.

Şekil 2.’ de  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılmalı değişimleri verilmiştir. Őekilden görüldüğü gibi, partikül hacim oranı artışıyla ısı iletkenlik değeri artmıştır.



**Şekil 2.**  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılması

Viskozite akışkanın en önemli akış özelliklerindedir. Pompalama gücü, laminar akıştaki pompalama gücü ve taşınım ısı transferi direkt olarak akışkanın viskozitesi ile ilgilidir. % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarındaki nanoakışkanların 30 °C sıcaklıktaki viskoziteleri Fungilab marka viskozimetre ile ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde Şekil 3.’de verildiği gibi partikül konsantrasyonu arttıkça viskozitenin arttığı gözlemlenmiştir. Nanoakışkanların viskozitesini tahmin etmek için bazı formüller geliştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından geliştirilen modeller Tablo 4’ te verilmiştir (Mishra ve ark. 2014).



Şekil 3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanının viskozitesinin modeller ile karşılaştırılması

Deneysel sonuçlar literatürdeki Einstein, Batchelor, Pak-Cho ve Brinkman viskozite modelleri ile karşılaştırılınca genel olarak uyum içinde olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Katı/sıvı süspansiyonları için viskozite modelleri

Modeller	İfadeler	Açıklamalar
Einstein	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi$	Küresel partiküllerin çok düşük hacimsel oranlarda ( $\phi < 0.02$ )
Batchelor	$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2)\mu_f$	Brown hareketi dikkate alınarak Einstein modeli uzatma
Brinkman	$\mu_{nf} = (1 - \phi)^{2.5} \mu_f$	Einstein modelinden formüle edilmiştir. 4% 'den az partikül konsantrasyonlarda sürekli bir ortam için geçerlidir
Pak and Cho	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2)$	Oda sıcaklığını referans alarak geliştirilen

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan bu çalışmada basit bir katı-sıvı süspansiyonu olmayan, kararlı (stabil) ve dayanıklı bir süspansiyon olan, partiküllerdeki topaklanma ihmal edilebilir düzeyde olan, akışkanın kimyasal özelliklerinin değişmediği % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-saf su nanoakışkanı hazırlanarak ısı iletkenlik ve viskozite değerleri ölçülmüştür. Elde edilen ölçümler literatürdeki mevcut modellerle kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Temel akışkanın termofiziksel özellikleri, partikül eklenmesi ile önemli ölçüde değişmektedir. Partikül hacimsel oranının artışıyla ısı iletkenlik ve viskozite değerleri artmıştır.

Partikül hacim oranı artışıyla ısı iletkenlik değeri artmıştır ve ısı iletkenlik değerleri tüm karışım oranlarında temel akışkanın ısı iletkenlik değerinden fazladır. % 0.2 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değerleri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 2.66, Bruggeman modeli için % 2.69, Lu-Lin modeli için ise % 1.23 daha fazladır. Aynı şekilde % 0.4 hacimsel

oranlı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değerleri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 4.23, Bruggeman modeli için % 3.02, Lu-Lin modeli için ise % 1.37 daha fazladır. % 0.8 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değerleri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 4.68 daha fazla, Bruggeman modeli için % 1.78, Lu-Lin modeli için ise % 0.86 daha azdır.

Deneysel viskozite ölçümleri modellere kıyasla daha fazladır. % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlı nanoakışkanlar için viskozite değerleri ölçümlere en yakın model Pak ve Cho olduğu görülmüştür. % 0.2 oranlı  $Al_2O_3$  nanoakışkanı için Einstein, Batchelor, Pak-Cho ve Brinkman viskozite modellerinde sırasıyla % 30.64, % 30.65, % 21.53 ve % 31.95 daha fazladır. % 0.4 oranlı  $Al_2O_3$  nanoakışkanı için sırasıyla % 30.98, % 30.97, % 13.56 ve % 33.63 daha fazladır. % 0.8 oranlı  $Al_2O_3$  nanoakışkanı için sırasıyla % 30.77, % 30.72, % 1.08 ve % 36.10 daha fazladır. Hacimsel konsantrasyon arttıkça modellerden sapmaların daha fazla olduğu görülmektedir.

## 5.KAYNAKÇA

- Chang, H., Tsung, T. T., Chen, L. C., Yang, Y. C., Lin, H. M., Lin, C. K., Jwo, C. S., 2005. Nanoparticle Suspension Preparation Using the Arc Spray Nanoparticle Synthesis System Combined with Ultrasonic Vibration and Rotating Electrode, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 552–558.
- Choi, S.U.S., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *The Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, USA, ASME, FED 231/MD 66, 99–105.
- Choi, S.U.S., Zhang, Z. G, Yu, W., Lockwood, F. E., Grulke, E.A., 2001. Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions, *Applied Physics Letters*, 79 (14), 2252- 2254.
- Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu F.E. 2001. Lockwood and E.A. Grulke, Anomalous Thermal Conductivity Enhancement Nanotube suspensions, *Applied Physics Letters*, 79, 2252-2254.
- Dilek, E. F., 2008. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Isıl İletkenliklerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., Thompson, L. J., 2001. Anomalous Increased Effective Thermal Conductivity of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles, *Applied Physics Letters*, 78, 718–720.
- Gürmen, S. Ebin, B., 2008. Nanopartiküller ve Üretim Yöntemleri-1, *Metallurji Dergisi*, 150, 31-38.
- Xu J.F., Zhang J.R., Du Y.W., 1996, Ultrasonic velocity and attenuation in nano- structured Zn materials, *Mater Lett*; 29, 131–4.
- Liu , M., Lin , M., Huang , I., Wang, C., 2005. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32, 1202–1210.
- Lo, C.-H., Tsung, T.-T., Chen, L.-C., Su, C.-H., Lin, H.-M., 2005. Fabrication of Copper Oxide Nanofluid Using Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System (SANSS), *Journal of Nanoparticle Research*, 7, 313–320.
- Lo, C.-H., Tsung, T.-T., and Chen, L.-C., 2005. Shaped-Controlled Synthesis of Cu-Based Nanofluid Using Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System (SANSS), *Journal of Crystal Growth*, 277, 636–642.
- Mishra P. C., Mukherjee S., Nayak S. K., Panda A., 2014. A brief review on viscosity of nanofluids, *Int Nano Lett*, 4, 109–120.

- Verma P., Chaturvedi P., Rawat J.S.B.S., 2007. Elimination of current non-uniformity in carbon nanotube field emitters, *J Mater Sci: Mater Electron*, 18, 677–80.
- Wen, D., Ding, Y., 2004. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 5181–5188.
- Zhu, H., Lin, Y., Yin, Y., 2004. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 277, 100–103.

#### **TEŞEKKÜR**

Bu çalışmaya MF.14.24 nolu proje ile sağladığı maddi destekten dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Koordinatörlüğüne teşekkür ederiz.