

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOAKIŞKANLARIN ISI GEÇİŞİ BAŞARIMININ SAYISAL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İsmail OĞUZ**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**OCAK 2012**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOAKIŞKANLARIN ISI GEÇİŞİ BAŞARIMININ SAYISAL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İsmail OĞUZ  
301081048**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ**

**OCAK 2012**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301081048 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İsmail OĞUZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**NANOAKIŞKANLARIN ISI GEÇİŞİ BAŞARIMININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Nilgün K. YAVUZ**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Hakan DEMİR**      .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **19 Aralık 2011**  
**Savunma Tarihi :**      **23 Ocak 2012**



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, nanoakışkanların ısı geçişi başarımı araştırılmıştır. Nanoakışkanların doğal taşınım ile ısı geçişi sayısal olarak incelenmiştir.

Bu konuda çalışmayı bana öneren ve konu olarak veren, çalışmalar boyunca her zaman yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen, yönlendiren ve teşvik eden değerli hocam Sayın Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan DEMİR'e sayısal incelemeye ilişkin yardımlarından dolayı özel olarak teşekkür ederim.

Son olarak, bütün hayatım boyunca gösterdikleri sabır, hoşgörü ve her konudaki sonsuz destekleri için aileme en içten sevgilerimi sunarım.

Ocak 2012

İsmail OĞUZ  
(Makine Mühendisi)





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ .....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. NANOAKIŞKAN TEKNOLOJİSİ.....</b>	<b>5</b>
2.1 Nanoparçacık ve Nanoakışkanların Üretimi .....	7
2.2 Nanoakışkanların Ticari Olarak Üretilmesinin Önündeki Zorluklar .....	8
2.2.1 İki adımlı süreç.....	8
2.2.2 Tek adımlı süreç.....	9
2.2.3 Diğer süreçler .....	10
2.3 Nanoakışkanların Isıl İletkenliği Üzerine Deneysel Araştırmalar .....	10
2.3.1 Parçacık hacim konsantrasyonunun etkisi .....	11
2.3.2 Parçacık malzemesinin etkisi .....	12
2.3.3 Parçacık boyutunun etkisi .....	14
2.3.4 Parçacık şeklinin etkisi.....	17
2.3.5 Ana akışkan malzemesinin etkisi .....	19
2.3.6 Sıcaklığın etkisi.....	19
2.3.7 Katkı maddelerinin etkisi .....	24
<b>3. NANOAKIŞKANLARIN ISIL İLETKENLİĞİ İLE İLGİLİ TEORİK</b>	
<b>ARAŞTIRMALAR.....</b>	<b>25</b>
3.1 Nanoparçacık-Sıvı Arayüz Tabakası.....	26
3.2 Nanoparçacık Brown Hareketinin Etkisi.....	28
3.3 Nanoparçacık Kümelenmesinin Etkisi .....	29
<b>4. NANOAKIŞKANLARDA TAŞINIMLA ISI GEÇİŞİ.....</b>	<b>33</b>
4.1 Yoğunluk ve Özgül Isı .....	33
4.2 Viskozite.....	33
4.3 Taşınımın Isı Geçiş Teorik Analizi .....	34
<b>5. SAYISAL ANALİZ.....</b>	<b>37</b>
5.1 Matematiksel Model.....	37
5.2 Sayısal Analizin Doğrulanması .....	40
5.3 Doğal Taşınımın Isı Geçişinin İncelenmesi .....	44
5.3.1 Grashof sayısının etkisi .....	44
5.3.2 Hacim konsantrasyonu etkisi .....	47
5.3.3 Nanoparçacık çeşidi etkisi .....	52
5.3.4 Ana akışkan çeşidi etkisi.....	52
<b>6. SONUÇ ve TARTIŞMA .....</b>	<b>55</b>

<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>61</b>

## **KISALTMALAR**

**EG** : Etilen Glikol  
**MWCNT** : Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 4.1</b> : Nanoakışkanlarda Taşınım İle Isı Geçişi Modelleri. ....	36
<b>Çizelge 5.1</b> : Akışkan ve parçacık malzemelerinin ısı-fiziksel özellikleri. ....	40
<b>Çizelge 5.2</b> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için referans çalışma ile bu tez çalışmasında elde edilen sıcaklık değerleri karşılaştırması. ....	43
<b>Çizelge 5.3</b> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için referans çalışma ile bu tez çalışmasında elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı oranları karşılaştırması. ....	43



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1	: Yıllara göre nanoakışkan ile ilgili yayın oranları .....	6
Şekil 2.2	: Su içerisindeki $Al_2O_3$ 'in ısı iletkenlik artışı .....	11
Şekil 2.3	: Su içerisindeki $CuO$ 'in ısı iletkenlik artışı .....	12
Şekil 2.4	: Su içerisindeki parçacıklar için parçacık malzemesinin etkisi .....	12
Şekil 2.5	: Etilen glikol içindeki parçacıklar için parçacık malzemesinin etkisi ....	13
Şekil 2.6	: Etilen glikol içindeki parçacıklar için parçacık malzemesinin etkisi ....	14
Şekil 2.7	: Su içerisindeki $Al_2O_3$ için parçacık boyutunun etkisi ... ..	15
Şekil 2.8	: Etilen glikol içerisindeki $Al_2O_3$ için parçacık boyutunun etkisi.....	15
Şekil 2.9	: Su içerisindeki $CuO$ için parçacık boyutunun etkisi .....	16
Şekil 2.10	: Su içerisindeki $SiC$ için parçacık boyutunun etkisi.....	17
Şekil 2.11	: Etilen glikol içerisindeki $SiC$ için parçacık boyutunun etkisi. ....	18
Şekil 2.12	: Su içindeki $TiO_2$ için parçacık boyutunun etkisi.....	18
Şekil 2.13	: Ana akışkan malzemesinin etkisi. ....	19
Şekil 2.14	: Su içerisindeki $Al_2O_3$ için sıcaklığın etkisi. ....	20
Şekil 2.15	: Su içerisindeki $Al_2O_3$ için sıcaklığın etkisi. ....	20
Şekil 2.16	: Su içerisindeki $Al_2O_3$ için sıcaklığın etkisi. ....	21
Şekil 2.17	: Su içerisindeki $CuO$ için sıcaklığın etkisi .....	21
Şekil 2.18	: Su içerisindeki $CuO$ için sıcaklığın etkisi. ....	22
Şekil 2.19	: Su içerisindeki MWCNT için sıcaklığın etkisi. ....	23
Şekil 2.20	: Su içerisindeki MWCNT için sıcaklığın etkisi. ....	23
Şekil 5.1	: Matematiksel Model .....	37
Şekil 5.2	: $Al_2O_3$ – Su nanoakışkanı için deneysel çalışma ve teorik modeller ile elde edilen ısı iletkenlik artışı karşılaştırması. ....	39
Şekil 5.3	: $Gr= 10^3$ için referans çalışmaya ait a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri. ....	41
Şekil 5.4	: $Gr= 10^3$ için bu çalışmada elde edilen a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri .....	41
Şekil 5.5	: $Gr= 10^4$ için referans çalışmaya ait a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri .....	41
Şekil 5.6	: $Gr= 10^4$ için bu çalışmada elde edilen a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri. ....	41
Şekil 5.7	: $Gr= 10^5$ için referans çalışmaya ait a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri. ....	42
Şekil 5.8	: $Gr= 10^5$ için bu çalışmada elde edilen a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri ... ..	42
Şekil 5.9	: $Gr= 10^3$ 'de $Al_2O_3$ – Su nanoakışkanı için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri.....	45
Şekil 5.10	: $Gr= 10^4$ 'de $Al_2O_3$ – Su nanoakışkanı için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri.....	45
Şekil 5.11	: $Gr= 10^5$ 'de $Al_2O_3$ – Su nanoakışkanı için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri.....	46

<b>Şekil 5.12</b> : $Al_2O_3$ – Su nanoakışkanı için Grashof sayısı değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi.....	46
<b>Şekil 5.13</b> : $CuO$ – Su nanoakışkanı için Grashof sayısı değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi .....	47
<b>Şekil 5.14</b> : Nanoparçacık ilavesinin olmadığı durum için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri .....	48
<b>Şekil 5.15</b> : $Al_2O_3$ – Su, $\phi$ =% 1 için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri.....	48
<b>Şekil 5.16</b> : $Al_2O_3$ – Su, $\phi$ =% 5 için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri.....	48
<b>Şekil 5.17</b> : $Al_2O_3$ – Su, $\phi$ =% 10 için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri.....	49
<b>Şekil 5.18</b> : $Al_2O_3$ – Su, $\phi$ =% 20 için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri.....	49
<b>Şekil 5.19</b> : $Gr= 10^4$ 'de $Al_2O_3$ – Su nanoakışkanı için hacim konsantrasyonu değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi .....	50
<b>Şekil 5.20</b> : $Gr= 10^4$ 'de $CuO$ – Su nanoakışkanı için hacim konsantrasyonu değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi .....	50
<b>Şekil 5.21</b> : $Gr= 10^4$ 'de $Al_2O_3$ – Su nanoakışkanı için alt yüzey boyunca yerel ısı geçişi katsayısı dağılımı .....	51
<b>Şekil 5.22</b> : $Gr= 10^4$ 'de $CuO$ – Su nanoakışkanı için alt yüzey boyunca yerel ısı taşınım katsayısı dağılımı.....	51
<b>Şekil 5.23</b> : Nanoparçacık çeşidinin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi. ...	52
<b>Şekil 5.24</b> : Ana akışkan çeşidinin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi.....	53



## SEMBOL LİSTESİ

$k$	: Isı İletim Katsayısı ( $W/mK$ )
$\phi$	: Parçacık Hacim Konsantrasyonu
$\rho$	: Yoğunluk ( $kg/m^3$ )
$C_p$	: Özgül Isı ( $J/kgK$ )
$\mu$	: Dinamik Viskozite ( $kg/ms$ )
$T$	: Sıcaklık( $T$ )
$\beta$	: Isıl Genleşme Katsayısı ( $1/K$ )
$Pr$	: Prandtl Sayısı
$Re$	: Reynolds Sayısı
$Nu$	: Nusselt Sayısı
$Gr$	: Grashof Sayısı
$Pe$	: Peclet Sayısı
$l$	: Molekül Ortalama Serbest Yolu (m)
$\nu$	: Kinematik Viskozite ( $m^2/s$ )
$h$	: Ortalama Isı Taşınım Katsayısı ( $W/m^2K$ )
$h_y$	: Yerel Isı Taşınım Katsayısı ( $W/m^2K$ )
$u$	: Hız ( $m/s$ )
$d$	: Çap (m)
$r$	: Yarıçap (m)
$g$	: Yerçekimi İvmesi ( $m/s^2$ )
$t$	: Sıvı Tabaka Kalınlığı (m)

## Alt indis

$p$	: Parçacık
$f$	: Ana Akışkan
$nf$	: Nanoakışkan
$l$	: Sıvı Tabaka
$cl$	: Küme
$e$	: efektif
$H$	: Sıcak
$L$	: Soğuk
$w$	: Duvar
$b$	: Akışkan



# NANOAKIŞKANLARIN ISI GEÇİŞİ BAŞARIMININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

## ÖZET

Nano boyutlu katı parçacıklar ile bir ana akışkanın bir arada bulunduğu akışkan yapısı nanoakışkan olarak adlandırılır. Nanoakışkanlar yüksek ısı iletim katsayıları sebebiyle ısı geçişi artırımı için gelecek vaat etmektedirler. Literatürde, nanoakışkanların ısı iletim katsayıları ile ilgili çeşitli sonuçlar mevcuttur. Öte yandan söz konusu ısı iletim katsayısı artışına sebep olan mekanizmalar konusu henüz tam olarak aydınlanmamıştır. Bu çalışmanın ilk bölümünde, nanoakışkan teknolojisi özetlenmiş ve nanoakışkanların ısı iletim katsayıları ile ilgili detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Deneysel çalışmalar, parçacık hacim konsantrasyonu, parçacık malzemesi, parçacık boyutu, parçacık şekli, ana akışkan malzemesi çeşidi, sıcaklık ve katkı maddesi parametrelerinin ısı iletim katsayısına etkisinin incelenmesi suretiyle özetlenmiştir. Ayrıca, nanoakışkan ısı iletim katsayısı artışlarını açıklamak için önerilen mekanizmalar ve ilgili ısı iletim katsayısı modelleri araştırılmıştır. Literatürde yer alan araştırmalar incelenerek, nanoakışkanların ısı iletim katsayısındaki artışı açıklayabilmek için geliştirilmiş olan nanoparçacık-sıvı arayüz tabakası, nanoakışkan Brown hareketi ve nanoparçacık kümelenmesi modelleri açıklanmıştır.

Nanoakışkanlarda taşınım ile ısı geçişi konusundaki araştırmalar, nanoakışkanların ısı geçişi donanımlarında kullanılabilmesi açısından önem arz etmektedir. Son dönemde yapılan deneysel çalışmalar, nanoakışkanlarla elde edilen ısı geçişi artırımının, ilgili ısı iletim katsayısı artımından yüksek olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde nanoakışkanlarda taşınım ile ısı geçişi konusu ele alınmış ve nanoakışkanlarda taşınım ile ısı geçişi analizi yapılmıştır. Nanoakışkanların ısı taşınım katsayılarını belirleyebilmek için kullanılacak yaklaşımlardan bahsedilmiş ve ilgili bağıntılar verilmiştir. Son bölümde ise nanoakışkanların doğal taşınım ile ısı geçişi sayısal olarak incelenmiştir. Bu incelemede, iki boyutlu dikdörtgen şekilli kapalı bir hacim matematiksel model olarak kabul edilmiş ve Fluent 6.3 hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak içerisinde nanoakışkan ve ana akışkan bulundurduğu haller için sayısal analiz yapılmıştır. Nanoakışkanların ısı geçişi başarımları, parçacık hacim konsantrasyonu, Grashof sayısı, katı parçacık çeşidi ve ana akışkan çeşidine göre araştırılmıştır. Yapılan inceleme, % 1, % 5, % 10 ve % 20 hacim konsantrasyonları ve  $10^3, 10^4, 10^5$  Grashof sayıları için gerçekleştirilmiştir. Katı parçacık olarak  $Al_2O_3$ , CuO ve MWCNT kullanılmıştır. Ana akışkan olarak su, yağ ve etilen glikol seçilmiştir. Sonuçlar, nanoakışkan kullanımı ile önemli ölçüde ısı geçişi artışı elde edildiğini göstermiştir.



# NUMERICALLY INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF NANOFLUIDS

## SUMMARY

A nanofluid is the suspension of nanoparticles in a base fluid. Nanofluids are promising fluids for heat transfer enhancement due to their anomalously high thermal conductivity. At present, there are significant results in nanofluid thermal conductivity data in the literature. On the other hand, thermal conductivity enhancement mechanisms of nanofluids have not been fully understood yet. The first part of this study includes a literature survey.

In the second part, technology and production of nanofluids are summarized. In addition, barriers and challenges to the commercial production of nanofluids are discussed. Nanofluids of various qualities have been produced mainly in small volumes. This production has been adequate for research work, but large scale production of well dispersed nanofluids at low cost is required for commercial applications.

The second part also includes a detailed literature review about the thermal conductivity of nanofluids. Experimental studies are discussed in terms of the effects of some parameters such as particle volume fraction, particle material, particle size, particle shape, base fluid material, temperature and additives on the thermal conductivity of nanofluids. The studies shown that thermal conductivity enhancement increases with the increased particle volume concentration. When the effect of particle material on thermal conductivity enhancement was considered, the metal particles produce the same enhancement as the oxide particles but at much lower volume concentration. It was expected that metal particles would outperform oxide particles owing to the higher thermal conductivity of the former. In terms of the effect of particle size, the trends are not monotonic. When particles which have different geometric shape were compared, cylindrical shapes show an increase in thermal conductivity enhancement than spherical shapes. When the effect of base fluid material on thermal conductivity enhancement was considered, the results show increased thermal conductivity enhancement for poorer heat transfer fluids. This result is encouraging because heat transfer enhancement is often most needed when poorer heat transfer fluids are involved. In general, the thermal conductivity of nanofluid is more temperature sensitive than that of the base fluid. Consequently, the thermal conductivity enhancement of nanofluids is also rather temperature sensitive. Although there are no direct comparisons of data among experimenters, the trends of all but one experimental group show increased thermal conductivity enhancement with increased temperature. All results in the study considered, we find substantial support for the general temperature trend presented. This trend is encouraging for engine and heat exchanger applications in the transportation industry, where fluids operate at elevated temperatures. Experimenters have used fluid additives in an attempt to keep nanoparticles in suspension and to prevent them from agglomerating. The results in the literature are scattered and wide ranging with respect to additive

type, concentration. However, most studies involving additives show enhancement in the thermal conductivity ratio as a result.

The third part includes enhancement mechanisms proposed to explain nanofluid thermal conductivity and associated thermal conductivity models. Classical model like Maxwell and Hamilton-Crosser which are used for calculating the effective thermal conductivity of solid-liquid mixtures were originally derived for relatively larger solid particles that have diameters on the order of millimeters or micrometers. Therefore, it is questionable whether these models are able to predict the effective thermal conductivity of nanofluids. Recently, many theoretical studies were made and several mechanisms were proposed in order to explain the anomalous thermal conductivity enhancement obtained with nanofluids. To improve the predictions, mechanisms have been identified and formulated specifically for the nanoscale, including the effects of nanoparticle-matrix interfacial layer, nanoparticle Brownian motion and nanoparticle clustering.

Research about the heat transfer performance of nanofluids is important for the practical application of nanofluids in heat transfer devices. Recent experiments showed that heat transfer enhancement of nanofluids exceeds the thermal conductivity enhancement of nanofluids. The forth part of this study, convective heat transfer in nanofluids are discussed and analyzed. The approaches and equations are discussed to determine heat transfer coefficient of nanofluids. Therefore, more experimental and theoretical studies are needed before general models can be developed and verified to define heat transfer coefficient of nanofluids.

In the last part of this study, natural convection heat transfer in nanofluids is numerically investigated. This investigation considers a two dimensional enclosure of height 0,04 m and width 0,25 m filled with nanofluids or base fluids for mathematical model. For the two long walls, the bottom wall is maintained at a higher temperature and constant and the top wall is at a lower temperature and changeable. The shorts walls are assumed to be insulated, non-conducting and impermeable to mass. The nanofluid in the enclosure is assumed to be Newtonian, incompressible and in laminar regime. It is assumed that both the fluid phase and nanoparticles are in thermal equilibrium and they flow at the same velocity with no slip. The thermal properties of the nanofluid are assumed to be constant except for the density variation required to generate the buoyancy force, which is based on the Boussinesq approximation. The proposed equations in the literature are used to determine thermophysical properties of nanofluids. For thermal conductivity of nanofluids, a model is chosen in the literature. The investigation covered a wide range of the dimensionless parameters Grashof number and solid volume fraction in the nanofluid. The Grashof number  $Gr$  ranged from  $10^3$  to  $10^5$ . The volume fraction varied between % 0 and % 20.  $Al_2O_3$ , CuO and MWCNT are used for nanoparticle. Water, oil and ethylene glycol are used for base fluid. The final mesh structure used was  $46 \times 100$  and oriented in such a way that the number of control volumes is greater near the walls where higher gradients of variable values are expected. The numerical method was validated by comparing the results with a data which is in the literature. Fluent 6.3 is used for numerical analysis and the effects of solid volume fraction, Grashof number, particle material and base fluid material on heat transfer characteristics of nanofluids are investigated. The results of streamlines and isotherms contours are shown in the study. Also, ratios of the average heat transfer coefficient of nanofluids to base fluids are shown with graphics. Results indicate that considerable heat transfer enhancement is possible using nanofluids. Also, the heat

transfer performance is dependent on parameters such as orientation of the cavity, Grashof number and solid volume fraction in the nanofluid. These results show that suspended nanoparticles significantly increase the heat transfer rate at all Grashof numbers. The heat transfer coefficient increases with increase in the solid volume fraction and Grashof number. A comparative study of different types of nanofluids indicates that MWCNT nanoparticle has the highest heat transfer rate in the present group at any given solid volume fraction, followed by  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and CuO. In addition, when use oil and ethylene glycol for base fluid, higher heat transfer enhancement are obtained than water.





## 1. GİRİŞ

Literatürdeki sayısal araştırmalarda, nanoakışkanların ısı geçişi karakteristiğini araştırmak için farklı yaklaşımlar kabul edilmiştir. İlk yaklaşım, asılı duran nano boyutlu parçacıkları içeren akışkanlar için de geçerli kabul edilen süreklilik yaklaşımıdır. Literatürde pekte yaygın olmayan diğer yaklaşım ise sıvı ve katı fazın daha iyi bir tanımı için iki fazlı bir model kullanılmasıdır. Tek fazlı model daha basit ve hesaplama açısından daha verimlidir. Bunların dışındaki bir başka yaklaşım ise Boltzmann teorisidir. Nanoakışkan kullanarak ısı geçişi arttırımı, Brown hareketi, katı/sıvı ara yüzey tabakası, nanoparçacık kümelenmesi ve sıvı ve katı parçacıklar arası sürtünme gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Ancak tüm bu faktörleri matematiksel olarak açıklaması zordur.

**Maiga ve diğ. (2004a, 2004b)**, uygun özellikler ile tek fazlı model kullanarak, laminar ve türbülanslı rejimde düzgün ısıtılan bir tüp boyunca akan nanoakışkanın ısı ve hidrodinamik karakteristiğini araştırmışlardır. Sonuçlar, nanoparçacık ilavesinin, ana akışkan ile karşılaştırıldığında ısı transferini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca  $Al_2O_3$  –Etilen glikol nanoakışkanının,  $Al_2O_3$  –Su nanoakışkanından daha iyi ısı geçişi arttırımı sağladığı görülmüştür. Bununla beraber, nanoakışkanların ısı geçişi konusunda dezavantajları da tartışılmış ve nanoparçacıkların duvar kayma gerilmesine şiddetli etkilerinden bahsedilmiştir.

**Roy ve diğ. (2004)**, bir soğutma sisteminde  $Al_2O_3$  –Su nanoakışkanını kullanarak ısı geçişi üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma ile ana akışkan içerisine nanoparçacık ilavesinin ısı geçişi hızlarını oldukça arttırdığı sonucunu elde etmişlerdir. %10 hacimsel konsantrasyondaki nanoparçacık kullanımı, saf ana akışkan ile karşılaştırıldığında iki kat ısı geçişi hızı artışı ile sonuçlanmıştır. Aynı modeli kullandıklarında, **Maiga ve diğ. (2004)** tarafından elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

**Wang ve diğ. (2006)** çalışmalarında, farklı nanoakışkanları kullanarak çeşitli Grashof sayısı ve hacimsel konsantrasyon aralıkları için iki boyutlu bir hacim içerisinde doğal taşınım ile ısı geçişi karakteristiğini nümerik olarak araştırmışlardır.

Sonuçlar, bütün Grashof sayıları için nanoparçacık ilavesiyle ısı geçişi hızının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. % 10 hacimsel konsantrasyondaki  $Al_2O_3$  –Su nanoakışkanı için ortalama ısı taşınım katsayısı artışı yaklaşık % 30 seviyesindedir. % 10 hacimsel konsantrasyondaki  $Cu$  –Su nanoakışkanı için ise ısı geçişi başarımındaki artış yaklaşık olarak % 80 olarak elde edilmiştir. Bununla beraber, % 1 hacim konsantrasyonuna sahip MWCNT(karbonnanotüp) –Yağ nanoakışkanı için ise ısı taşınım katsayısında yaklaşık % 100 artış görülmüştür. Ayrıca, ana akışkan içerisindeki nanoparçacıkların, akışkan akışının yapısını değiştirdiği de görülmüştür.

**Khanafer ve diğ. (2003)**, dikdörtgen şeklindeki kapalı bir hacimde su bazlı bakır nanoakışkanlarının, doğal taşınım ile ısı geçişini sayısal olarak incelemiştir. Kapalı hacimdeki nanoakışkan tek fazlı olarak kabul edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, herhangi bir Grashof sayısında su içindeki bakır nanoparçacıklarının hacim konsantrasyonu arttıkça ısı geçişinde de artış söz konusu olmaktadır.

**Kim ve diğ. (2004)**, nanoparçacık ilavesinin ana akışkanın ısı geçişi ve taşınım kararsızlığına etkisini tanımlayabilmek için nanoakışkanın, ana akışkana göre Rayleigh sayısı oranını veren yeni bir faktör kullanarak, nanoakışkanların doğal taşınımında kararsızlığını araştırmışlardır. Sonuçlar, ana akışkan ile karşılaştırıldığında hacim konsantrasyonunun artması durumunda ısı geçişi hızlarının arttığını göstermiştir.

**Xuan ve Roetzel (2000)**, nanoakışkanların taşınımıyla ısı geçişi için çeşitli korelasyonlar geliştirmişlerdir. Tek fazlı ve iki fazlı modellerin her ikisi de ısı geçişi hızlarındaki artışı açıklayabilmek için kullanılmıştır. Ancak, bu tür modelleri doğrulayabilmek için çalışmada da belirtildiği gibi sınırlı sayıda deneysel veri bulunmaktadır.

**Jang ve Choi (2004a)**, alttan ısıtılan dikdörtgen bir hacim içerisinde 6 nm bakır ve 2 nm elmas nanoparçacıklarını içeren su bazlı nanoakışkanların doğal kararlılığını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, nanoakışkanların ana akışkanlara göre daha kararlı oldukları sonucuna varmışlardır.

**Xuan ve Yao (2005)**, Lattice-Boltzmann modelini kullanarak nanoakışkan akışını ve nanoparçacık dağılımını modellemiştir. Artan akışkan sıcaklığı, nanoakışkan dağılımını artırmıştır bu da nanoakışkanlardaki ısı geçişi artımından sorumlu önemli bir faktördür. Çalışmada, nanoparçacıkların Brown hareketinin, sınır duvarlar

yakınındaki sıcaklık dağılımını düzleştirme eğiliminde olduğu da gözlemlenmiştir. Akışkan içerisindeki asılı kalan katı parçacıkların düzensiz dalgalanması nedeniyle, Nusselt dağılımının, ana akışkandaki düzgün dağılım yerine akış yönü boyunca dalgalı olduğunu görmüşlerdir. Sonuçlar, nanoakışkanların ısı geçişi arttırımını ve sıcaklık dağılımını belirlemede, nanoparçacıkların hacimsel konsantrasyonunun ve dağılımının önemli faktörler olduğunu göstermiştir.

**Xue ve diğ. (2004)**, dengede olmayan moleküllerin dinamik simülasyonlarını kullanarak sayısal bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Sıvı-katı ara yüzey tabakası etkisi incelenmiş ve katı parçacık etrafındaki sıvının, yüzeye paralel veya yüzeye normal ısı taşıma üzerine herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Çalışmada, ısı iletkenlikteki büyük artışın, katı-sıvı ara yüzey tabakası etkisi ile açıklanamayacağı sonucuna varılmıştır.

**Santra ve diğ. (2008)**, kapalı hacim içerisindeki nanoakışkanlara ait doğal taşınımın ısı geçişi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında ısı iletkenlik katsayısı için farklı iki model kullanmışlar ve kullandıkları modellerden Bruggemann modelinin, Maxwell-Garnett modeline göre daha yüksek ortalama ısı taşınım katsayıları verdiğini görmüşlerdir.

**Hwang ve diğ. (2007)**, alüminyum bazlı nanoakışkanların, alttan ısıtılmış dikdörtgen kapalı bir hacimde doğal taşınımını incelemişler ve nanoparçacık çapının artması ile ortalama Nusselt sayısında önemli düşüşler söz konusu olduğu sonucuna varmışlardır.

**Öztop ve Abu-Nada (2008)**, sol duvarı kısmen ısıtılan ve sağ duvarı soğutulan, diğer duvarları yalıtılmış olan dikdörtgen bir hacim içerisindeki çeşitli nanoparçacıklar ile oluşturulan nanoakışkanla doğal taşınımı sayısal olarak incelemişlerdir. Isıtıcı uzunluğu arttıkça ısı geçişi başarımının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, nanoakışkan kullanımıyla ısı geçişi başarımının arttığını ve yüksek boyut oranından daha çok düşük boyut oranında bu etkinin daha belirgin olduğunu görmüşlerdir.

**Öğüt (2009)**, yan duvardan sabit ısı akısıyla kısmen ısıtılmış, eğik kare bir kapalı bir hacim içerisindeki farklı nanoparçacıklar ile oluşturulan su bazlı nanoakışkanların, doğal taşınımını incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Rayleigh sayısı ve parçacık hacim konsantrasyonu arttıkça, ortalama ısı geçişi miktarının arttığını ve ısıtıcı

uzunluğu arttıķa ısı geğişi miktarının dūřtūęünü gōzlemlemiřtir. Ayrıca, ısıtıcı uzunluğu arttıķa, ortalama ısı geğişi oranının, kūęük eęim ağıları için azalmaya başlamakta olduğunu belirtmiştir.

Bu yūkssek lisans tez çalışmasında, nanoakışkanların ısı iletim katsayıları ile ilgili literatūr araştırması yapılmış ve ısı iletim katsayılarını veren teorik modeller incelenmiştir. Nanoakışkanların taşınım ile ısı geğişi teorik olarak analiz edilmiştir. Nanoakışkanlarda doğal taşınım ile ısı geğişinin olduğu matematiksel model sayısal olarak incelenmiş ve sonuçlar, Grashof sayısı, hacim konsantrasyonu, katı parçacık çeşidi ve ana akışkan çeşidi değişkenlerine bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, % 1, % 5, % 10 ve % 20 hacim konsantrasyonları ve  $10^3, 10^4, 10^5$  Grashof sayıları için yapılmıştır. Katı parçacık olarak  $Al_2O_3$ , CuO ve MWCNT(karbonnanotūp) kullanılmıştır. Ana akışkan olarak su, yaę ve etilen glikol seçilmiştir.

## 2. NANOAKIŞKAN TEKNOLOJİSİ

Birçok endüstriyel süreç, akan veya durgun kaynayan akışkanların yanı sıra laminer veya türbülanslı bir rejimde akan bir akışkan vasıtasıyla ısı aktarımını içerir. Bu işlemler çok geniş bir yelpazede sıcaklık ve basıncı kapsamaktadır. Bu uygulamaların çoğu, kullanılan akışkanının ısı geçişi başarımının artması ile bir kazanç sağlayabilir. Bu durum bizi, düşük sermaye maliyetleri ve arttırılmış enerji verimlerine sahip olan daha küçük ısı geçişi sistemlerine götürebilir. Nanoakışkanlar, ısı geçişi başarımının arttırılması potansiyeline sahiptir ve bu tarz geliştirilmiş ısı geçişi akışkanlarından yarar sağlayabilecek endüstriyel gruplar oldukça çeşitlidir. Bu gruplar; ulaşım, elektronik, tıp, gıda ve üretim ile ilgili alanları içermektedir.

Nanoakışkan, nanometre boyutlu parçacıkların askıda kaldığı bir akışkanı tanımlamak için Argon Ulusal Laboratuvarı tarafından ortaya atılmış bir isimdir. Sıvılarda askıda duran parçacıklardan oluşan nanoakışkanların, ana akışkanların taşınımıyla ısı aktarımı ve ısıl iletkenlik başarımını arttırdığı görülmüştür. Katı parçacıkların ısıl iletkenlikleri, su, etilen glikol ve hafif yağlar gibi ana akışkanların ısıl iletkenliğinden daha büyüktür ve düşük hacim konsantrasyonlarında bile nanoakışkanlar ısıl başarımda önemli artışlara neden olurlar (Yu ve diğ., 2007).

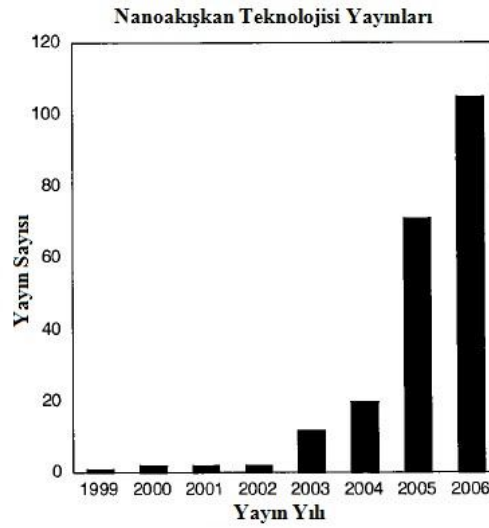
Dünya genelindeki nanoakışkan araştırma gruplarından elde edilen araştırma sonuçları, nanoakışkanların bilinen ısı geçişi akışkanlarının sahip olduğundan çok farklı ısıl özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bir çalışmada bilinen ısı geçişi akışkanlarına küçük miktarda(hacim konsantrasyonu % 1'den daha az) nanoparçacık eklenmesi, akışkanların ısıl iletkenliğini hemen hemen iki katına kadar arttırmıştır (Choi ve diğ., 2001). Daha sonra tartışılacağı üzere, birçok araştırmacı hacim konsantrasyonları % 0.5 ile 4 aralığında olan çeşitli sıvılarda farklı nanoparçacıkların ısıl iletkenliğini araştırmıştır.

Isı taşınım katsayısı, motorlar ve motor sistemleri dahil olmak üzere zorlanmış taşınım soğutma uygulamalarında belirleyici parametredir. Araştırmalar, nanoparçacıkların sıvıların ısı taşınım katsayılarını önemli ölçüde arttırdığını göstermiş ve bazı araştırmacılar, ısı taşınım katsayılarında çok büyük oranda artışlar

olduğunu iddia etmişlerdir (Faulkner ve diğ., 2004). Bu noktada, rapor edilen yüksek seviyelerdeki ısı taşınım katsayısı artışlarının birçoğunun, arttırılmış ısıl iletkenliğin etkisinin üzerinde olması dikkate değer bir noktadır.

Nanoakışkanların ısıl özellikleri ve ısı geçişi üzerine birçok deneysel araştırmanın yanı sıra, bazı araştırmacılar bu olguyu tarif etmek ve tahmin etmek için fiziksel mekanizmalar ve matematiksel modeller önermişlerdir. Bütün ana faktörleri göz önünde bulunduran nanoakışkanlarla ilgili kapsamlı teorik modeller yetersiz olsa da, bu alanda araştırmalar devam etmektedir.

Isı geçişi uygulamaları için nanoakışkanların olağanüstü potansiyelinin görülmesi, hem endüstrinin hem de üniversitelerin nanoakışkan teknolojisinde araştırma ve geliştirme girişimleri başlatmasını sağlamıştır. Şekil 2.1'de gösterilen yıllık yayımların derlemesinden görüldüğü üzere, bu girişimler özellikle 2002'den sonra oldukça artmıştır.



**Şekil 2.1 :** Yıllara göre nanoakışkan ile ilgili yayın oranları (Yu ve diğ., 2007)

Nanoakışkanlar üzerine artan bu ilginin çoğu yüksek performanslı soğutucu potansiyeline dayanmaktadır. Otomobil sanayisi için ilgilenilen akışkanlar, düşük basınç ve motor çalışma sıcaklıklarındaki sıvılardır. Etilen glikol, soğutma sistemleri için en çok arzulanan ana akışkandır. Ana akışkan olarak, motor yağı içeren nanoakışkanların otomotiv uygulamaları da vardır. Fakat endüstriyel uygulamaya geçiş, nanoakışkan teknolojisinin daha fazla geliştirilmesini ve bazı önemli engellerin üstesinden gelinmesini gerektirmektedir.

## 2.1 Nanoparçacıkların ve Nanoakışkanların Üretimi

Modern fabrikasyon teknolojisi, malzemelerin nanometre ölçeğinde üretimine olanak sağlar. Nanoparçacıklar, aynı malzemenin daha büyük parçacıklarına kıyasla kendine özgü fiziksel ve kimyasal özellikler gösteren bir malzeme sınıfıdır. Nanoakışkanlarda kullanılan nanoparçacıklar birçok malzemeden üretilebilir ve nanoparçacıkların üretimi iki genel başlık altında toplanabilir: fiziksel ve kimyasal işlemler.

Nanoakışkanlarda şu ana kadar kullanılan nanoparçacık malzemelerinin bazıları oksit seramikleri ( $Al_2O_3$ , CuO), nitrür seramikleri (AlN, SiN), karbür seramikleri (SiC, TiC), madenler (Ag, Au, Cu, Fe), yarı iletkenler ( $TiO_2$ ), tek, çift veya çok duvarlı karbonnanotüpler (SWCNT, DWCNT, MWCNT) ve nanoparçacık çekirdek polimerli kabuk bileşimleri gibi kompozit malzemelerdir. Ek olarak, parçacık-sıvı arayüzünün çeşitli moleküllerle katkılı olduğu yeni malzemeler ve yapılarında nanoakışkan olarak kullanımı caziptir (Yu ve diğ., 2007).

Çeşitli malzemelerin nanoparçacıkları, kimyasal veya fiziksel sentez teknikleri aracılığıyla üretilmiştir. Genellikle kullanılan fiziksel yöntemler, mekanik taşlama yöntemi ve soygaz yoğunlaştırma tekniğini içermektedir. Nanoparçacıkları üretmek için kimyasal yöntemler; kimyasal çöktürme, kimyasal buhar çökeltme, mikro-emülsiyonlar, sprey piroliz ve ısıl püstürmeyi içermektedir. Özellikle, metal nanoparçacık yapımı için kullanılan mevcut işlemler; mekanik öğütme, soygaz yoğunlaştırma tekniği, kimyasal çöktürme, sprey piroliz ve ısıl püskürtmeyi kapsamaktadır.

Nanoparçacıklar, yaygın olarak toz formunda üretilmektedirler. Belirli uygulamalar için nanoakışkan oluşturmak amacıyla toz formundaki nanoparçacıklar, sulu veya organik sıvılarda dağıtılabılırler. Şu ana kadar birçok organik sıvı türü kullanılmıştır. Fakat etilen glikol veya etilen glikol ve su karışımları otomotiv uygulamaları için en çok arzu edilenlerdir. Bu tarz uygulamalar için nanoparçacık olarak çeşitli malzemelerin iyi bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Nanoakışkanlar, iki adım tekniği ve tek adım tekniği olmak üzere iki teknik ile üretilirler. İki adım tekniği, fiziksel veya kimyasal sentez tekniklerinden biriyle üretilen nanoparçacıklar ile başlar ve bunların bir ana akışkan içinde dağıtılması ile devam eder. Tek adım tekniği ise nanoparçacıkları doğrudan eş zamanlı olarak bir ana akışkan içinde oluşturur ve dağıtır. Literatürde belirtilen oksit nanoparçacıkları

ve karbon nanotüpleri içeren nanoakışkanların çoğu iki adım süreciyle üretilmişlerdir (Yu ve diğ., 2007).

## **2.2 Nanoakışkanların Ticari Olarak Üretilmesinin Önündeki Engeller ve Zorluklar**

Şu ana kadar çeşitli niteliklerdeki nanoakışkanlar özellikle küçük hacimlerde üretilmişlerdir. Bu üretim, araştırma çalışması için yeterli olmuştur fakat ticari uygulamalar için iyi dağıtılmış nanoakışkanların düşük maliyette ve geniş ölçekli üretimi gerekmektedir. Bu üretim durumu, araçların radyatör soğutucu sistemlerinde ve diğer araç yakıtlarında nanoakışkanların test edilmesi ve kullanımına ciddi bir engel teşkil etmektedir (Yu ve diğ., 2007).

### **2.2.1 İki adımlı süreç**

İki adımlı süreci kullanarak nanoakışkan üretmek önceden beri önemli bir zorluk durumundadır. Çünkü tam dağılım gerçekleştirilemeden her parçacık çabucak kümeleşme eğilimindedir. Bu kümeleşme, nanoparçacıkların arasındaki Van der Waals çekici kuvvetlerinden dolayı meydana gelmektedir. Nanoakışkan teknolojisi dahil olmak üzere bütün nano toz teknolojilerinde kümeleşme ciddi bir sorundur ve yüksek performanslı ısı geçişi nanoakışkanlarına ulaşmayı başarmak için önemli bir basamak, sıvılarda hemen hemen tekil dağılımlı veya kümeleşmeyen nanoparçacıkları üretmek ve onları askıda tutabilmektir. Bu sorun, metal parçacıklara oranla, nanoakışkanlarda aynı ısı geçişi artışını sağlamak için daha yüksek hacimli konsantrasyonlar gerektiren oksit nanoparçacıkların kullanımıyla daha da büyümektedir. Yüksek hacim konsantrasyonlarında kümeleşme durumu daha da büyük bir sorun haline gelmektedir. Bazı yüzey işlemi görmüş nanoparçacıklar, ana akışkanlarda mükemmel dağılım ve iyi ısıl özellikler sergilemektedir. Buradaki zorluk, büyük hacimlerde iyi dağılmış nanoakışkanlar üretmek amacıyla iki adımlı süreci geliştirmek için yenilikçi yöntemler geliştirmektir. Bazı akışkanlar, küçük parçacıkların sıvı süspansiyonları formunda ticari olarak şu anda mevcuttur. Seramik süspansiyonlar büyük miktarlarda mevcuttur. Demiroksit parçacıkları içeren manyetik akışkanlar, 1970'lerden beri piyasada bulunmaktadır. Bu akışkanlar, iki adımlı süreç ile laboratuvar ortamlarında yapılan nanoakışkanlarda olduğu gibi aynı kümeleşme ve çökelme problemlerini sergilemektedir (Yu ve diğ., 2007).



### 2.2.2 Tek adımlı süreç

Bakır gibi yüksek iletkenliğe sahip madenler içeren nanoakışkanlar için parçacıkların oksidasyonunu engellemek amacıyla tek adım tekniği, iki adım tekniğine göre daha uygundur. Bu teknikle nanoparçacıklar, tek bir işlemde, bir akışkan içerisinde oluşturulur ve dağıtılır. Argon Ulusal Laboratuvarı, nanoakışkanlar yaratmak için tek adımlı bir fiziksel yöntem geliştirmiştir. Bu patentli tek adım yöntemi doğrudan buharlaştırma içermektedir ve etilen glikolda eşit oranda dağılmış olarak ve kararlı bir şekilde askıda kalan, kümeleşmeyen bakır nanoparçacıkları üretmek için kullanılmıştır. Bu teknik, nanoevreli tozları bir vakum haznesi içinde buhar fazından, doğrudan düşük buhar basınçlı akan bir etilen glikole sıvılaştırmayı içermektedir. Etilen glikoldeki iyi dağılmış Cu nanoakışkanları, %0.3'lük bir parçacık hacim konsantrasyonunda ana akışkanın ısı iletkenliğini %40'a kadar artırır (Eastman ve diğ., 2001). Bir diğer tek adımlı fiziksel yöntem olan daldırılmış ark nanoparçacık sentezinin, TiO<sub>2</sub>, CuO ve Cu gibi çeşitli nanoparçacıklar içeren nanoakışkanlar üretmek için kullanıldığı da literatürde belirtilmiştir (Chang ve diğ., 2005; Lo ve diğ., 2005).

Tek adımlı fiziksel yöntemler ile araştırma amacıyla küçük miktarlarda nanoakışkanlar üretilmiş olsa da, ticari nanoakışkan üretiminin dayanak noktası olmaları pek olası değildir. Vakum gerektiren işlemler, nanoparçacıkların ve nanoakışkanların üretimini büyük oranda yavaşlatırlar, buda üretim oranının sınırlandırılmasına neden olur. Ayrıca, tek adımlı fiziksel süreçler ile nanoakışkan üretmek pahalıdır.

Yapılan çalışmalarda, bakır içeren nanoakışkanlar üretmek için alternatif bir tek adımlı kimyasal yöntemden bahsedilmiştir (Zhu ve diğ., 2004). Çapı 20 nm'den daha küçük olan bakır nanoparçacıkları, sodyum hipofosfit ile bakır tuzunun azaltılmasıyla üretilmiş ve etilen glikol içinde dağıtılmıştır. Polivinilpirolidon, parçacık kümeleşmesini engelleyen koruyucu bir polimer ve stabilizatör olarak eklenmiştir. Bu tek adımlı kimyasal yöntemle üretilen bakır içeren nanoakışkanlar, tek adımlı fiziksel yöntemle üretilen nanoakışkanlarla hemen hemen aynı ısı iletkenlik artışı göstermişlerdir. Yakın bir zamanda, Argon Ulusal Laboratuvarı bu süreçle başarılı bir şekilde küçük miktarlarda nanoakışkanlar üretmiştir. Bu yöntemin geliştirilmesiyle, tek adımlı fiziksel süreçten daha hızlı bir şekilde büyük miktarda nanoakışkan üretme potansiyeline sahip olabileceği düşünülmektedir. Fakat bu

teknikğin önündeki önemli bir sınırlama, üretilebilecek nanoakışkan miktarları ve nanoparçacıkların hacim konsantrasyonunun, iki adım tekniği ile üretilenlerden çok daha sınırlı olacak olmasıdır (Yu ve diğ., 2007).

İki adımlı sürecin aksine tek adımlı süreçler henüz ticari olarak mevcut değildir. Ekonomik olarak büyük miktarlarda nanoakışkan üretmek amacıyla tek adımlı kimyasal süreci geliştirmek için yenilikçi yöntemler geliştirmek önemli bir zorluktur.

Nanoakışkan üretimi için hem fiziksel hem de kimyasal tek adımlı süreçlerdeki eksikliklerden biri, sistemlerin, nanoparçacık boyutunun kontrol edilmesi de dahil bazı önemli parametreler üzerinde sınırlı bir kontrole sahip olarak çalışmasıdır. Tek adımlı kimyasal işlemi sürekli bir modda çalıştırabilmenin, ticari uygulanabilirliği arttırabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla McGill Üniversitesi'nde, bakır nanoparçacıklar içeren etilen glikol bazlı nanoakışkanların tek adımlı üretimi için yarı-sürekli bir süreç geliştirilmiştir (Cao ve Tavares, 2006).

### **2.2.3 Diğer süreçler**

Şu ana kadar olan nanoakışkan üretimlerinin çoğunda yukarıda anlatılan tekniklerden biri kullanılmış olsa da, nanoparçacığın ve akışkanın belirli kombinasyonuna bağlı olarak başka teknikler de bulunmaktadır. Örneğin; spesifik geometrilere, yoğunluklara, porozitelere, yük ve yüzey kimyalarına sahip olan nanoparçacıklar; kalıplama, elektrolizle metal bırakımı, tabaka-tabaka birleştirme, mikro-damlacık kurutma ve diğer kolloid kimyası teknikleriyle üretilbilirler. Bir diğer proses olan kimyasal buhar yoğunlaşması tekniği, parçacık boyutunun kontrolü, ölçeklenebilirlik kolaylığı ve yeni çekirdek kabuk nano yapıları üretme olasılığı açısından avantajlı görünmektedir (Srdic ve diğ., 2001). Bir diğer teknik ise nanoparçacıkların oda sıcaklığında şekil ve boyut kontrollü sentezidir (Cao ve diğ., 2006). Ortalama parçacık boyutu, parçacık boyut dağılımı ve şekil gibi nanoparçacıkların yapısal karakteristikleri, sentez yöntemine bağlıdır. Süspansiyonlardaki nanoparçacıkların bu karakteristikleri kolaylıkla ölçülemez. Bu durum, literatürde bulunan farklı araştırmalar arasındaki tutarsızlıkların bir kısmını açıklayabilir.

## **2.3 Nanoakışkanların Isıl İletkenliği Üzerine Deneysel Araştırmalar**

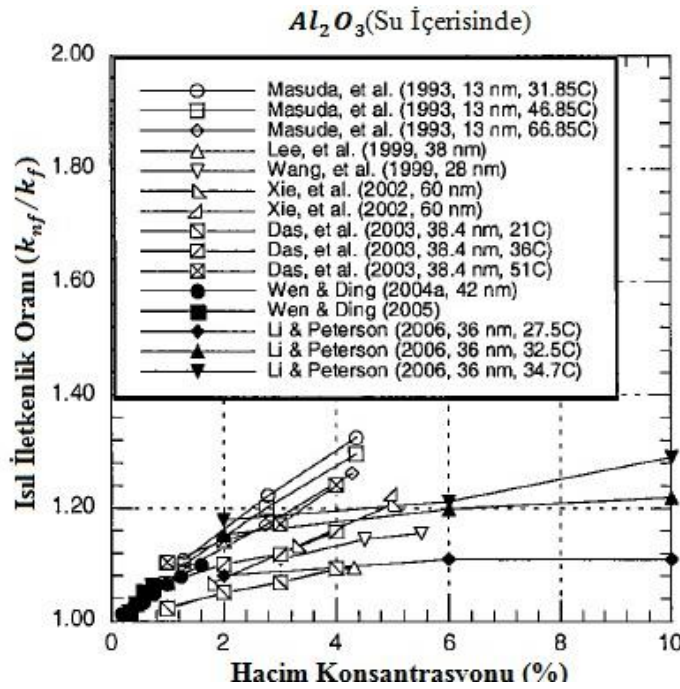
Akan bir akışkanın ısı aktarım direnci, akışkanın ısıl iletkenliğini doğrudan hesaba katan bir Nusselt sayısı ile ve genellikle de dolaylı olarak hesaba katan Prandtl sayısı

ile sıklıkla temsil edilir. Bu nedenle, bir nanoakışkanın ısı geçişi potansiyelinin değerlendirilebilmesi için öncelikli olarak ısı iletkenliğini göz önünde bulundurmak gerekir. Şimdiye kadar bu alanda nanoakışkanlarla ilgili herhangi bir diğer alana göre daha fazla araştırma yayınlanmıştır.

Nanoakışkanın ısı iletkenlik artışı üzerine etki eden parametreler; parçacık hacim konsantrasyonu, parçacık malzemesi, parçacık boyutu, parçacık şekli, ana akışkan malzemesi, sıcaklık ve katkı maddesidir (Yu ve diğ., 2007).

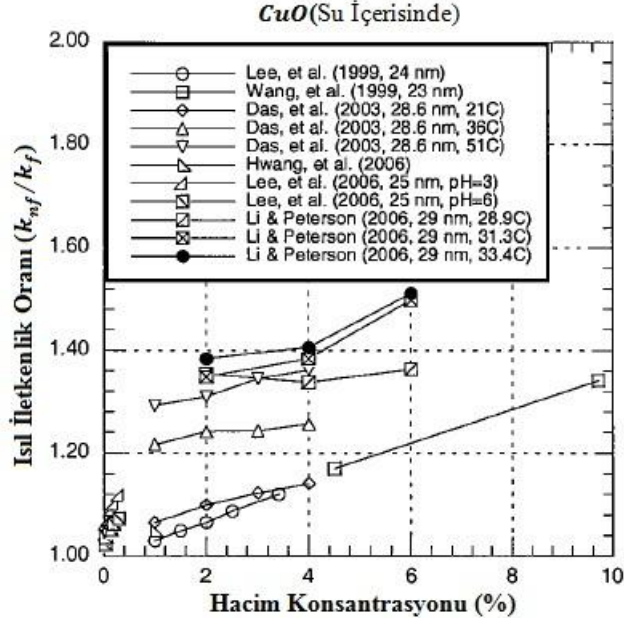
### 2.3.1 Parçacık hacim konsantrasyonunun etkisi

Parçacık hacim konsantrasyonunun, nanoakışkanın ısı iletkenlik artışı üzerine etkisi Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Bu şekilde yedi araştırma grubunun çalışmaları, su içerisindeki  $Al_2O_3$  için sunulmuştur. Parçacık boyutu ve nanoakışkan sıcaklığı gruptan gruba değişiklik göstermektedir. Ancak genel eğilim, ısı iletkenliğinin, artan parçacık hacim konsantrasyonu ile birlikte arttığı yönündedir. Oksit parçacık hacim konsantrasyonları dengeli viskozite artışlarını sürdürmek için %4 ile %5'in altındadır ve yaklaşık olarak % 30'a kadar olan bir artış seviyesi görülmektedir.



Şekil 2.2 : Su içerisindeki  $Al_2O_3$ 'ün ısı iletkenlik artışı (Yu ve diğ., 2007)

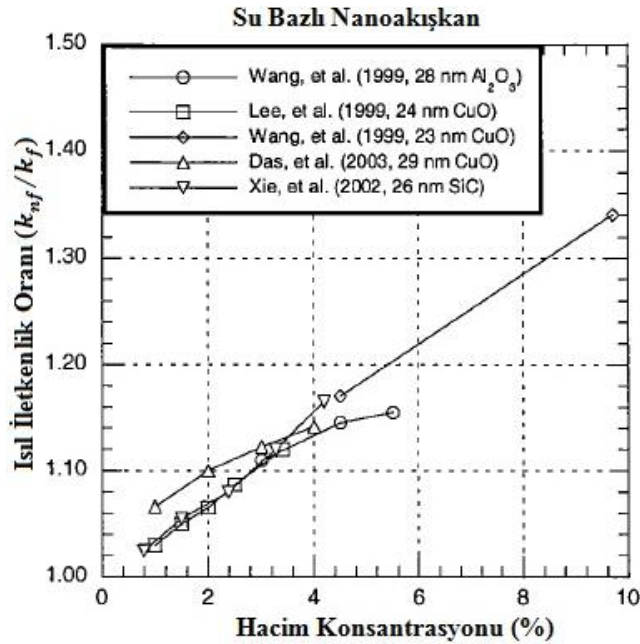
Isı iletkenlik artışı için bazı araştırmalardan alınan sonuçlar su içindeki CuO için Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Şekil 2.2'de olduğu gibi, çeşitli parçacık boyutları ve akışkan sıcaklıkları, Şekil 2.3'e dahil edilmiştir.



Şekil 2.3 : Su içerisindeki CuO'nun ısı iletkenlik artışı (Yu ve diğ., 2007)

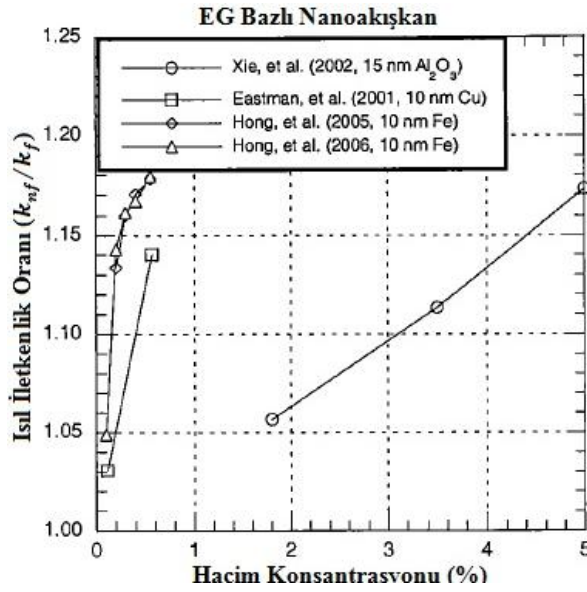
### 2.3.2 Parçacık malzemesinin etkisi

Parçacık malzemesinin ısı iletkenlik artışı üzerindeki etkisi, su bazlı olan iki oksit parçacığı ve silisyum karbür için Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Şekil 2.4 incelendiğinde, nispeten düşük ısı iletkenliğe sahip parçacıklar için parçacık malzemesinin, artış üzerinde etkisi olduğu söylenemez. Yüksek iletkenliğe sahip parçacıklar kullanıldığında ise bu durum değişmektedir.



Şekil 2.4 : Su içerisindeki parçacıklar için parçacık malzemesinin etkisi (Yu ve diğ., 2007)

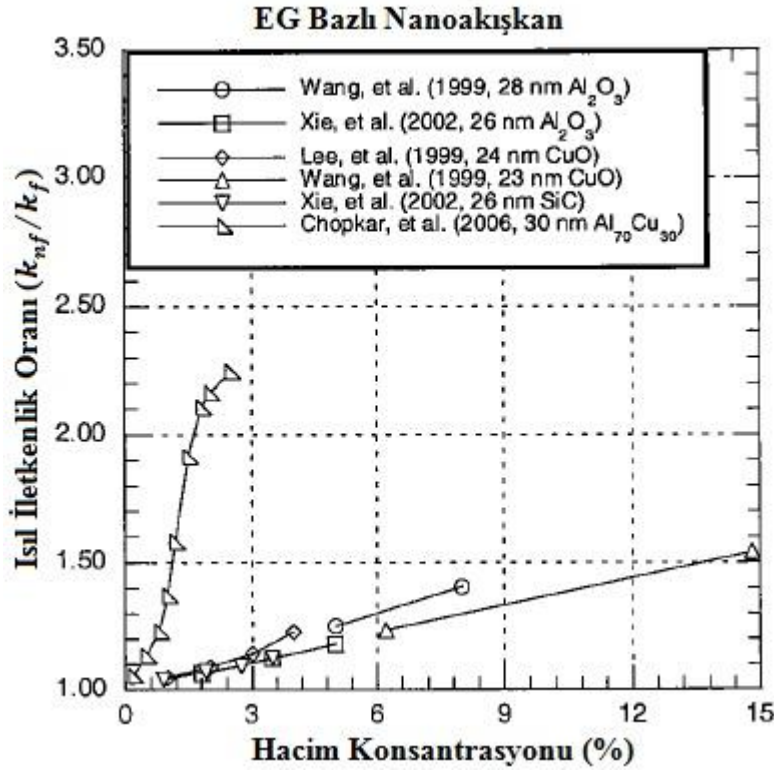
Şekil 2.5’de gösterilen ısı iletkenlik artışı sonuçları, karşılaştırma için iki metal parçacığını ve bir oksidi içermektedir. Görüldüğü gibi metal parçacıkları, oksit parçacıklarıyla aynı artışı göstermektedir. Fakat metal parçacıklarında bu durum, düşük hacim konsantrasyonlarında gerçekleşmektedir. Metal parçacıklarının daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasından dolayı artışın oksit parçacıklarını geçmesi beklenmiştir. Üretim sürecinde, parçacıkların oksitlenmeden metal parçacıklı nanoakışkanları oluşturması zordur. Şekil 2.5’deki Cu parçacıkları tek adım yöntemiyle oluşturulmuştur.



**Şekil 2.5 :** Etilen glikol içindeki parçacıklar için parçacık malzemesinin etkisi (Yu ve diğ., 2007)

Şekil 2.5’de metal için ısı iletkenlik oranının oksit parçacıklarından daha hızlı arttığı görülmektedir. Metal parçacık deneyleri daha yüksek hacim konsantrasyonu seviyelerine uygulanırsa, oranın ne kadar yükseğe çıkabileceği, Şekil 2.6’da verilen çalışmalarla araştırılmıştır. Burada sonuçlar, oksit, silisyum karbür ve metal parçacıkları için verilmiştir. Şekil 2.6’daki parçacıklar Şekil 2.5’dekilerden boyut olarak daha büyüktür, fakat gösterilen ana etki, parçacık hacim konsantrasyonu, Şekil 2.5’deki metal parçacıklarının yaklaşık maksimum değeri olan % 0.7’ye kıyasla % 2.5’a yükseltildiğinde, metal parçacık nanoakışkanının çok yüksek ısı iletkenlik artışıdır. Şekil 2.6’dan % 2.5’luk bir metal parçacığı hacim konsantrasyonunda, nanoakışkanın ısı iletkenliğinin, ana akışkan olan etilen glikolün ısı iletkenliğinden % 115 daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç, Şekil 2.6’nın metal olmayan parçacık sonuçlarından önemli ölçüde yüksektir. Fakat daha önceden de bahsedildiği

gibi, metal parçacıklı nanoakışkanların önündeki önemli bir sorun, üretim aşamasında ve daha sonra kullanım esnasında oksitlenme sürecini ortadan kaldırmaktır. Parçacık kaplama bu sorunu çözmek için üzerinde durulan bir yöntemdir (Yu ve diğ., 2007).

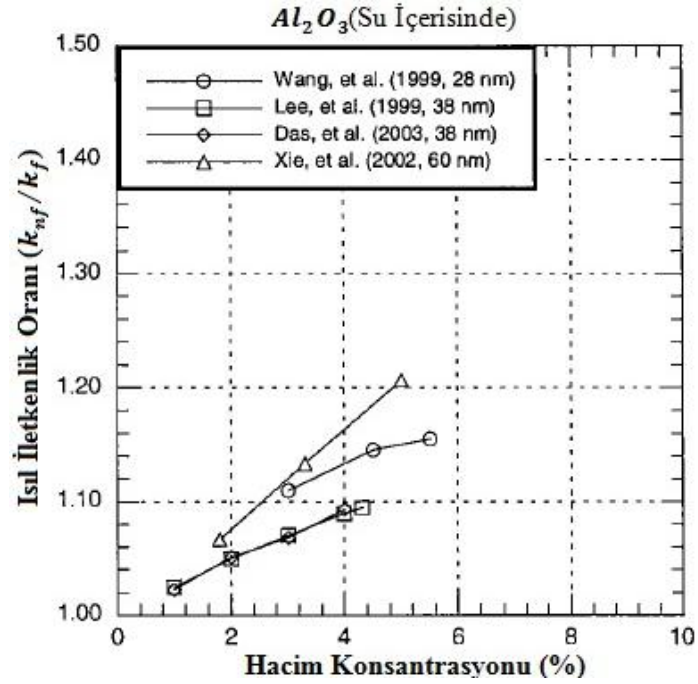


Şekil 2.6 : Etilen glikol içindeki parçacıklar için parçacık malzemesinin etkisi (Yu ve diğ., 2007)

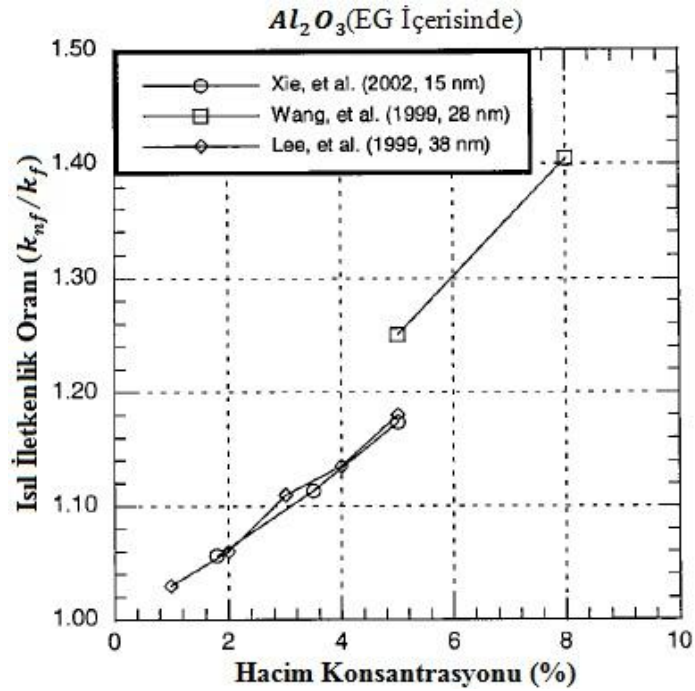
### 2.3.3 Parçacık boyutunun etkisi

Parçacık malzemesinden sonra, parçacık boyutunun ısı iletkenlik artışı üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Bu bölümde, sadece literatürde boyut parametresi nominal çap olan ve küresel olduğu bildirilen parçacıkların sonuçları verilmiştir. 28 nm'den 60 nm'ye değişen parçacık çaplarında tek bir parçacık-su kombinasyonu için sonuçlar Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Gösterilen eğilimler, belli bir yönde değildir. 38 nm'lik parçacıklar ile çalışan iki araştırma grubu arasında bir uzlaşma vardır. Daha büyük çaplı parçacıklar için olan sonuçlar ise ısı iletkenlik artışında bir yükselme göstermektedir. Bu sonuçlara dayanarak, en küçük parçacıkların, en az artış göstermesi beklenmektedir. Fakat 28 nm'lik parçacıklar için olan sonuçlar daha büyük olan iki boyutun arasına denk gelmektedir. Parçacık boyutundaki çeşitlilik, bütün diğer parametrelerin aynı kaldığı verilerin bulunduğu

Şekil 2.7’de nispeten azdır. Şekil 2.7’nin sonuçları bu eğilim bakımından kesin değildir. Aynı durum Şekil 2.8’de gösterilen etilen glikoldaki sınırlı parçacık boyut aralığıyla ilgili sonuçlar için de geçerlidir. Burada ısı iletkenlik artışı orta boyutlu parçacıklar için en fazladır.



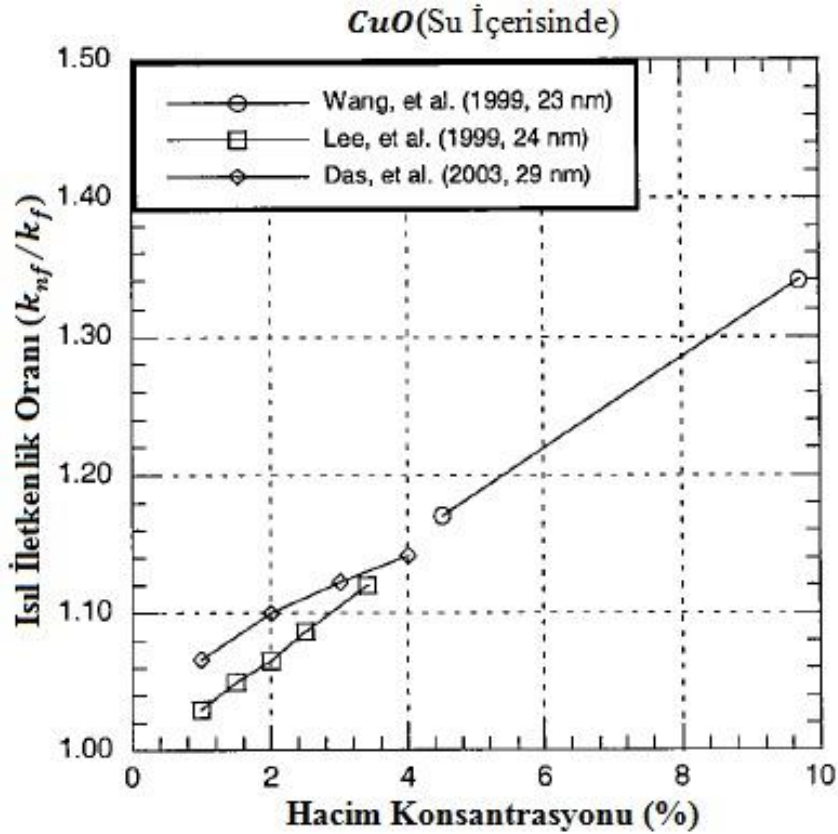
Şekil 2.7 : Su içerisindeki  $Al_2O_3$  için parçacık boyutunun etkisi (Yu ve diğ., 2007)



Şekil 2.8 : Etilen glikol içerisindeki  $Al_2O_3$  için parçacık boyutunun etkisi (Yu ve diğ., 2007)

Wang ve diğ. (1999) tarafından elde edilen veriler göz önünde bulundurulmazsa, Şekil 2.7 ve 2.8'deki sonuçlardan, daha büyük parçacık çaplarının ısı iletkenlikte yüksek bir artış gösterdiği sonucuna varılabilir. Bu sonuç, küçük parçacıkların homojen dağılımının, en iyi artışı ortaya çıkardığına işaret eden bazı teorilerle uyumlu değildir. Parçacık kümeleşmesi kilit bir nokta olmasına rağmen birçok ısı iletkenlik deneyinde genellikle bilinmeyen bir faktör olduğundan, parçacık boyutunun deneydeki ve teorideki etkisi gerçekte aynı oranda olmayabilir.

Parçacık boyutunun ısı iletkenlik artışı üzerindeki etkisinin bir diğ er karşılaştırması su içerisindeki CuO için Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Burada, Wang ve diğ. (1999) tarafından bulunan sonuçlar, artan parçacık boyutuyla birlikte yükselen bir artış eğilimini gösteren diğ er iki gruptan ayrılır. Şekiller 2.7 ile 2.9'un sonuçları, ısı iletkenlik artışının askıdaki küresel nanoparçacıkların çapıyla birlikte arttığını öne sürmektedir.

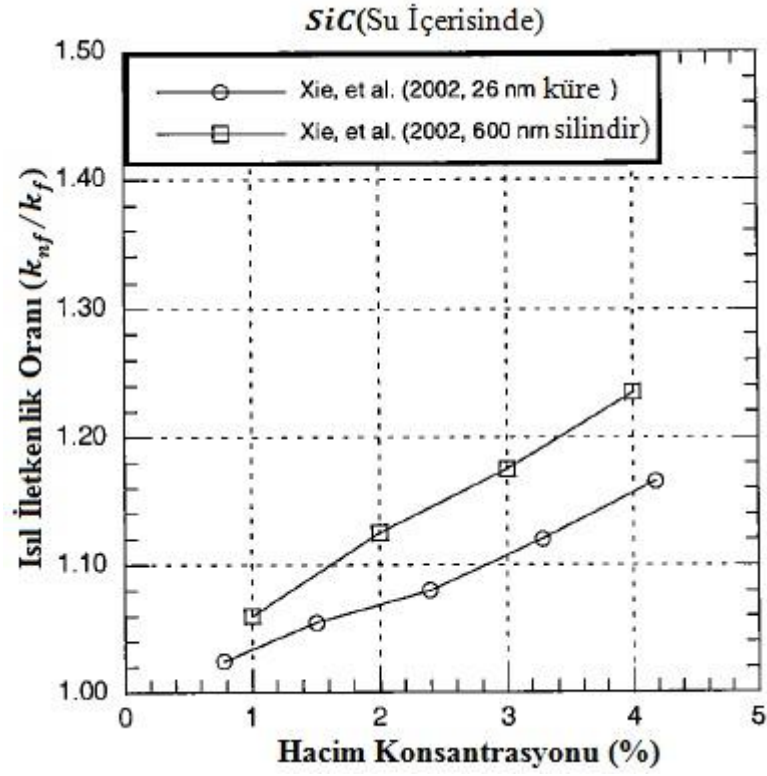


**Şekil 2.9 :** Su içerisindeki CuO için parçacık boyutunun etkisi (Yu ve diğ., 2007)

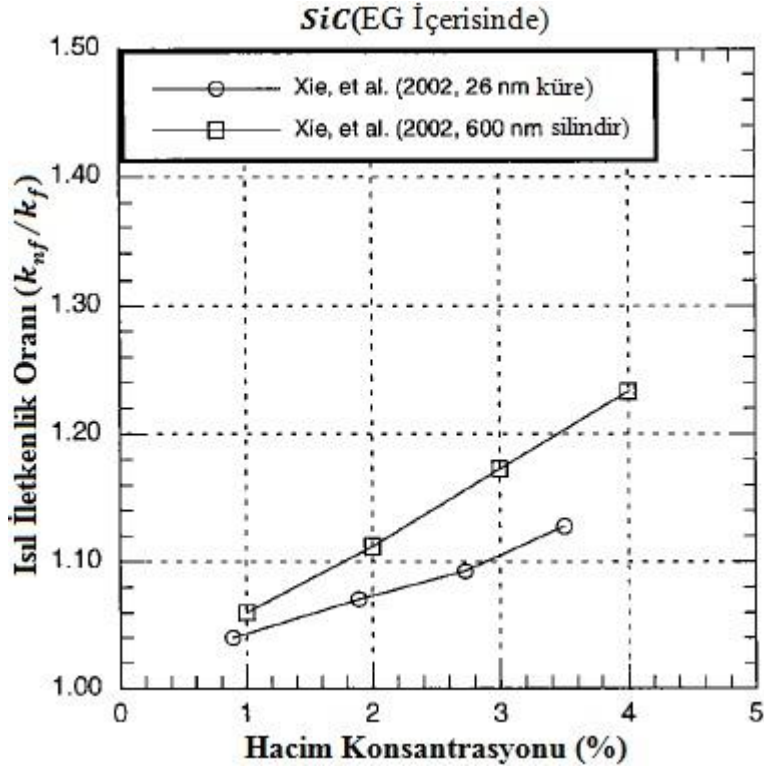


### 2.3.4 Parçacık şeklinin etkisi

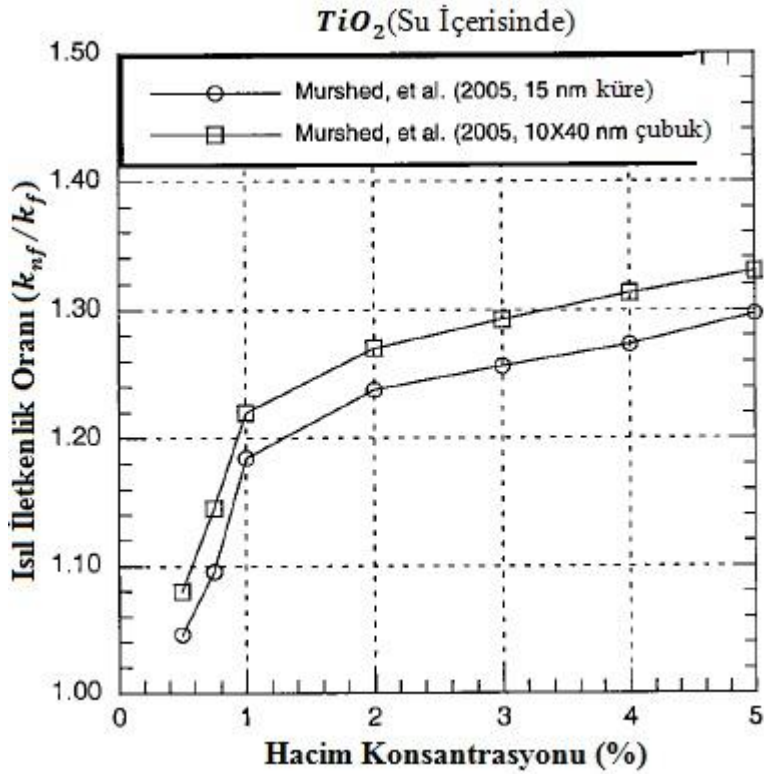
Nanoakışkanlardaki ısı iletkenlik artışı, parçacıkların geometrik şekli bakımından karşılaştırılmıştır. Şekil 2.10'da küresel ve silindirik parçacık şekilleri karşılaştırılmaktadır. Silindirikler, ısı iletkenlik artışında bir yükselmeyi işaret etmektedir. Bu sonucun, ısıyı akışkan boyunca ileten uzamış parçacıkların oluşturduğu bir hasırdan dolayı olduğu düşünülmektedir. Şekil 2.10'un sonuçları tek bir gruba aittir. Şekil 2.11 ve 2.12'de de parçacıkların şekli, ısı iletkenlik artışı bakımından karşılaştırılmıştır. Şekil 2.10, 2.11 ve 2.12'nin bütün sonuçları, uzamış parçacıkların, ısı iletkenlik artışında küresel olanlardan daha üstün olduğunu göstermektedir. Sıklıkla küresel parçacıklar en iyi fiyatlarda en hazır olarak bulunanlar olsa da, bu sonuç nanoakışkan araştırma ve üretimi için farklı bir yönü işaret etmektedir.



**Şekil 2.10 :** Su içerisindeki SiC için parçacık boyutunun etkisi (Yu ve diğ., 2007)



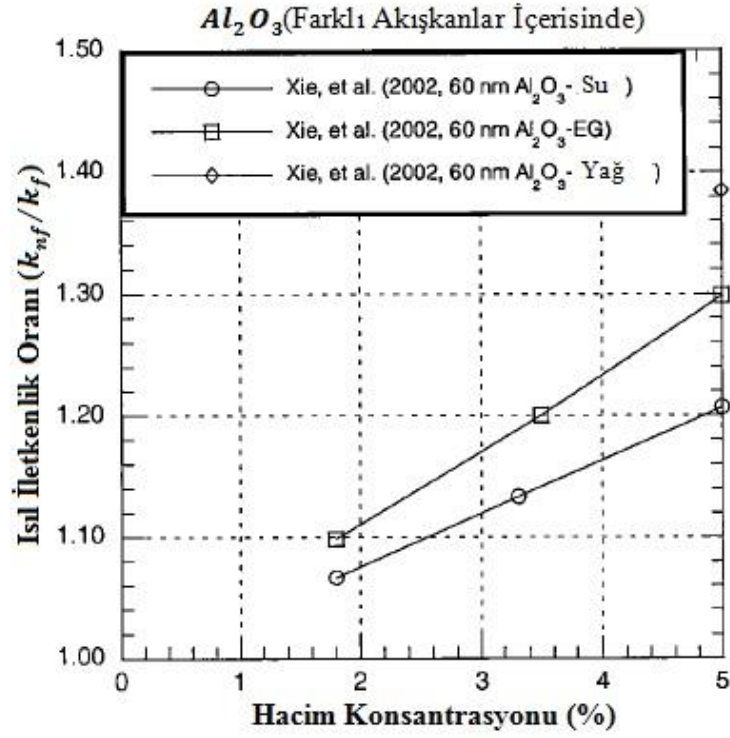
Şekil 2.11 : Etilen glikol içerisindeki SiC için parçacık boyutunun etkisi (Yu ve diğ., 2007)



Şekil 2.12 : Su içindeki TiO<sub>2</sub> için parçacık boyutunun etkisi (Yu ve diğ., 2007)

### 2.3.5 Ana akışkan malzemesinin etkisi

Ana akışkanın, nanoakışkanların ısı iletkenlik artışı üzerine etkisi Şekil 2.13’de gösterilmektedir. Sonuçlar, daha düşük ısı iletkenliğe sahip akışkanlar için yükselen ısı iletkenlik artışını göstermektedir. Şekil 2.13’ün sonuçları, karşılaştırılan akışkanlar arasında en yüksek ısı iletkenliğe sahip en iyi ısı geçişi akışkanı olan su için en az artışı göstermektedir. Tek başına etilen glikol su ile karşılaştırıldığında, nispeten zayıf bir ısı geçişi akışkanıdır ve su ile etilen glikol karışımları ısı geçişi etkililiği bakımından ikisinin arasına denk gelir. Bu nedenle, etilen glikol ve su karışımlarındaki nanoparçacıklar, motor soğutma uygulamaları için iyi potansiyele sahiptir.

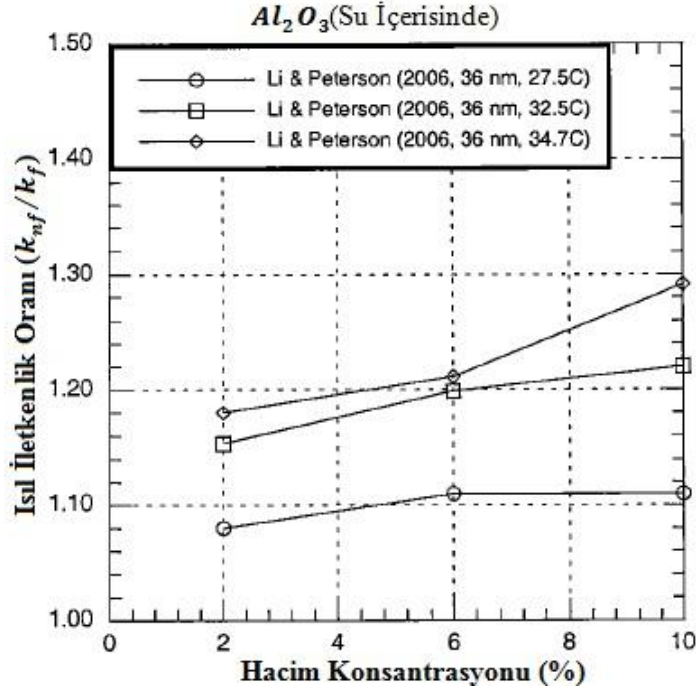


Şekil 2.13 : Ana akışkan malzemesinin etkisi (Yu ve diğ., 2007)

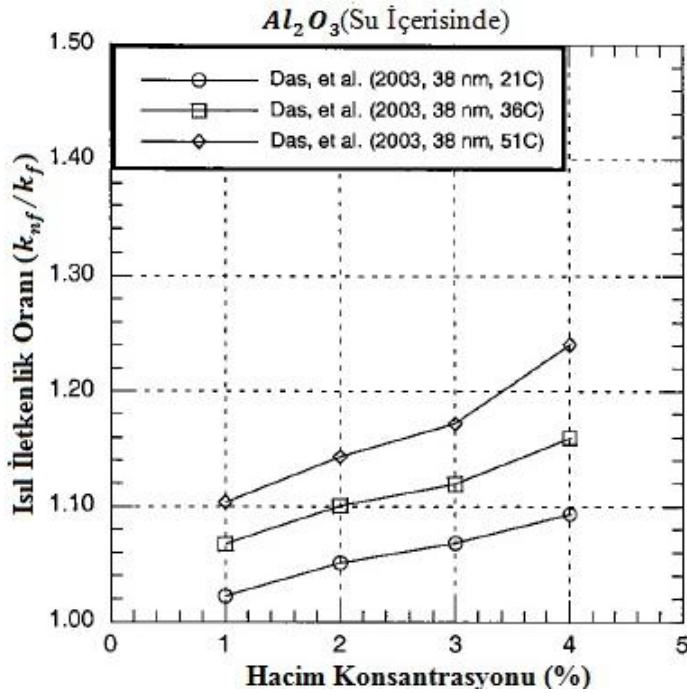
### 2.3.6 Sıcaklığın etkisi

Genel olarak, nanoakışkanların ısı iletkenliği ana akışkanlara nazaran sıcaklığa daha duyarlıdır. Dolayısıyla, nanoakışkanların ısı iletkenliğinin artışı da nispeten sıcaklığa daha duyarlıdır. Das ve diğ. (2003), su içerisindeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve su içerisindeki CuO için küçük bir sıcaklık aralığında değişen veriler sunmuşlardır. Nanoakışkanın ısı iletkenliğinin ana akışkanlara göre sıcaklığa daha bağımlı oluşunu, nanoparçacıkların hareketinden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir.

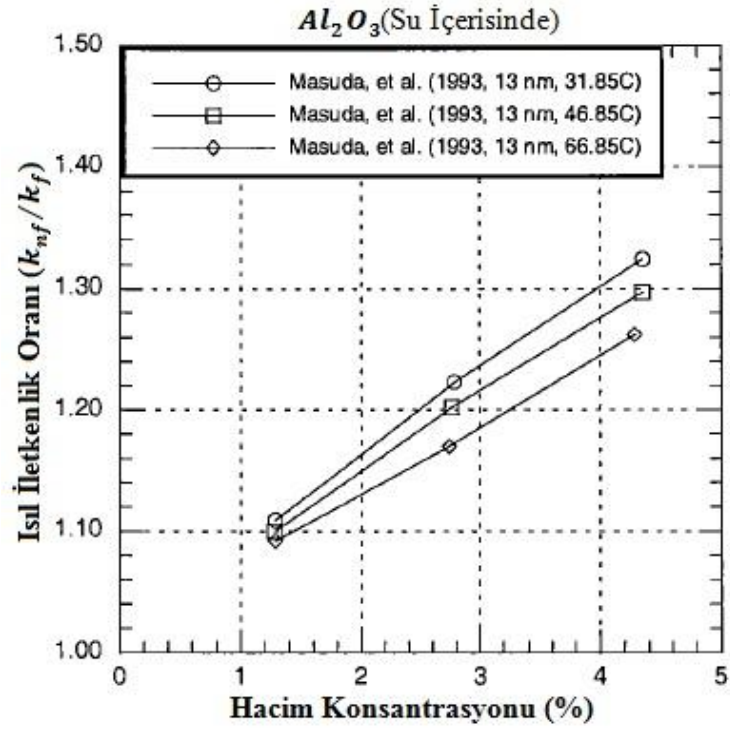
Su içerisindeki  $Al_2O_3$  için sonuçlar, üç araştırma grubu için Şekil 2.14, 2.15 ve 2.16'da gösterilmektedir. Parçacık boyutları ve akışkan sıcaklıkları, şekiller arasında değişiklik göstermektedir ancak parçacık boyutu her şekilde sabittir ve sıcaklık her birinde değişmektedir. Sadece Masuda ve diğ. (1993) genel eğilim ile uyumlu olmayan sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 2.14 : Su içerisindeki  $Al_2O_3$  için sıcaklığın etkisi (Yu ve diğ., 2007)

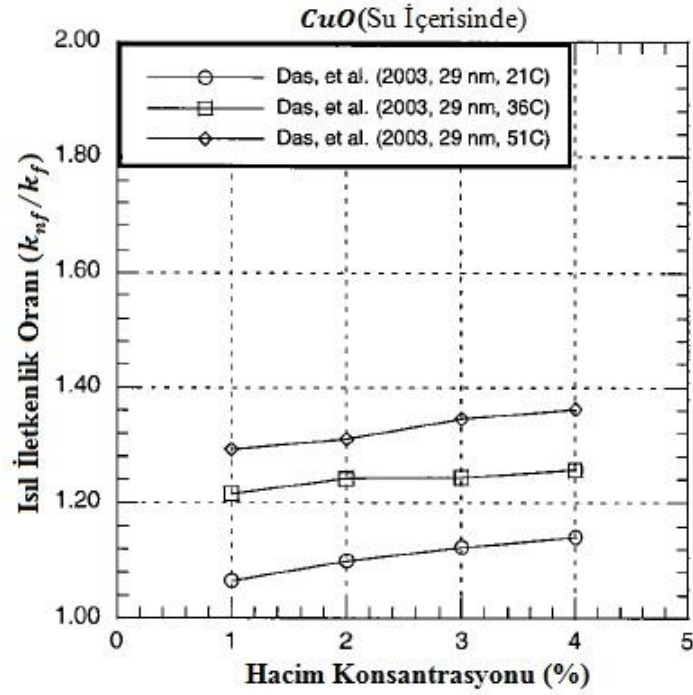


Şekil 2.15 : Su içerisindeki  $Al_2O_3$  için sıcaklığın etkisi (Yu ve diğ., 2007)

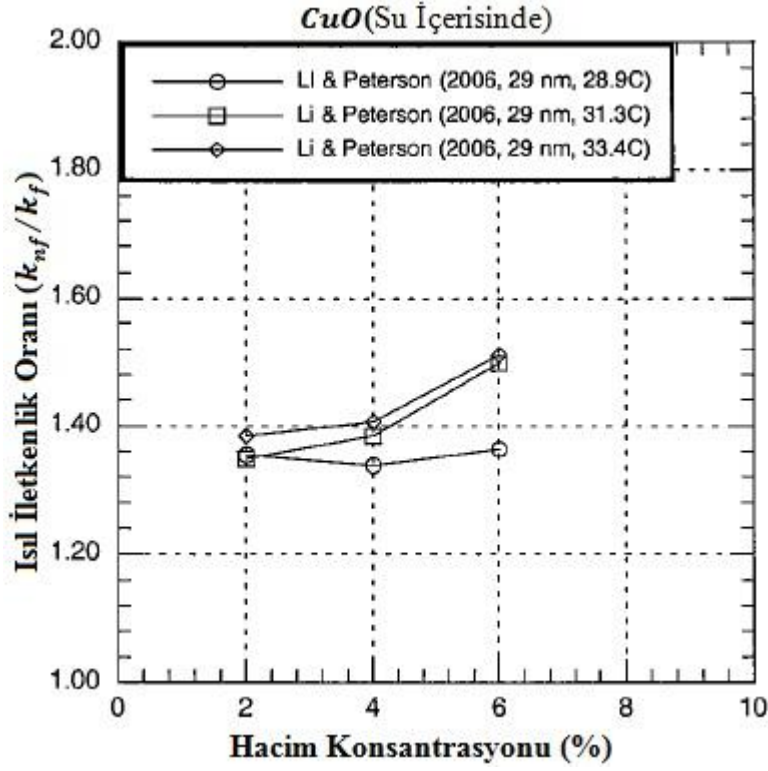


**Şekil 2.16** : Su içerisindeki  $Al_2O_3$  için sıcaklığın etkisi (Yu ve diğ., 2007)

İki araştırma grubuna ait su içerisindeki  $CuO$  için ısı iletkenlik artışı Şekil 2.17 ve 2.18’de gösterilmektedir. Veriler artışın, artan sıcaklıkla birlikte yükseldiğini göstermektedir.



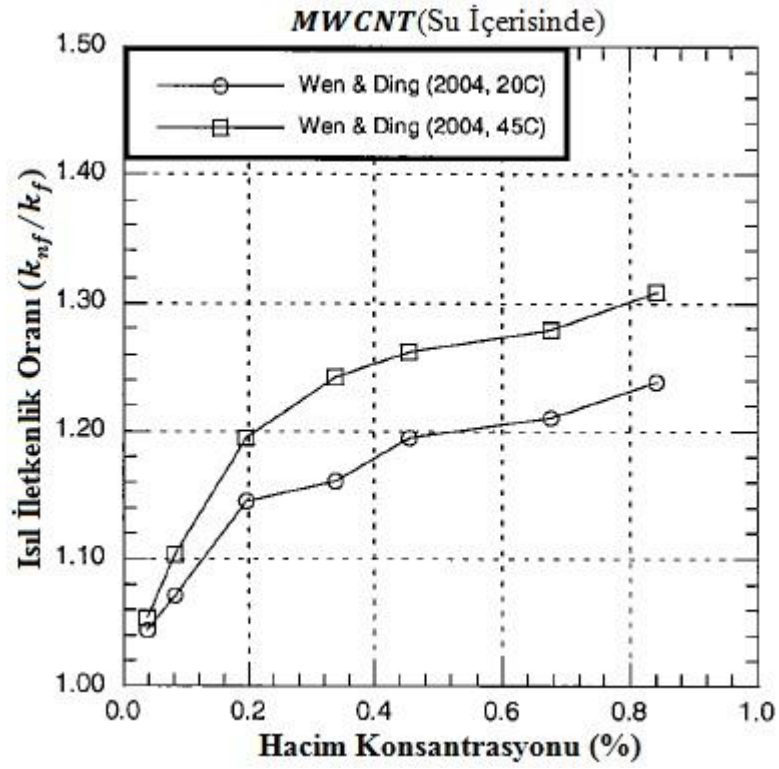
**Şekil 2.17** : Su içerisindeki  $CuO$  için sıcaklığın etkisi (Yu ve diğ., 2007)



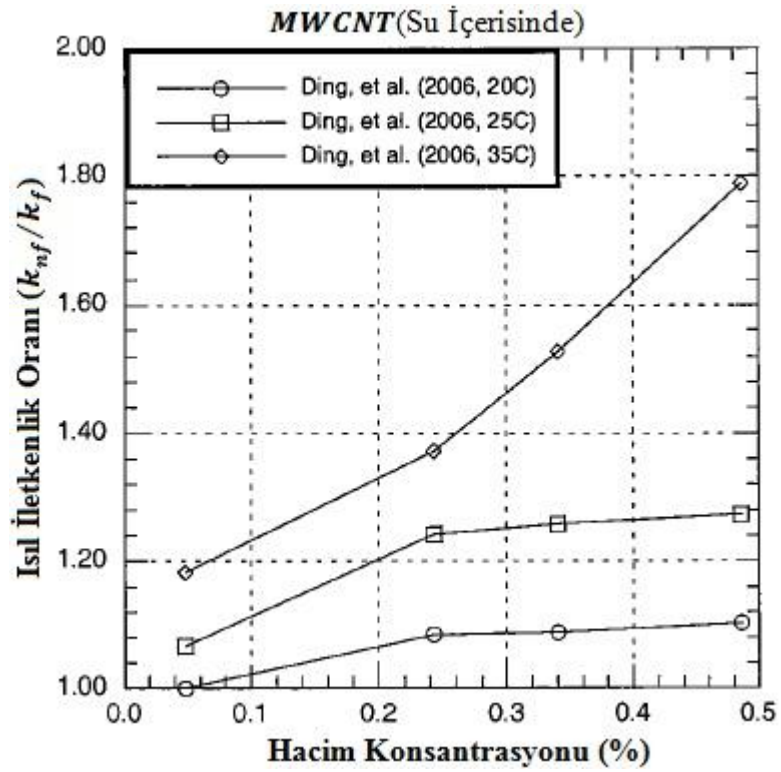
**Şekil 2.18** : Su içerisindeki CuO için sıcaklığın etkisi (Yu ve diğ., 2007)

Şekil 2.19 ve 2.20’de, su içerisindeki MWCNT için iki araştırma grubundan elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde, sonuçların Şekil 2.17 ve 2.18 ile benzer olduğu görülebilmektedir.

Bütün sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, sunulan genel sıcaklık eğilimi için sağlam kanıt elde edilebilmektedir. Bu eğilimin, akışkanların yüksek sıcaklıklarda çalıştığı ulaşım endüstrisinde motor ve ısı değiştiricisi uygulamaları için teşvik edici olduğu söylenebilir (Yu ve diğ., 2007).



Şekil 2.19 : Su içerisindeki MWCNT için sıcaklığın etkisi (Yu ve diğ., 2007)



Şekil 2.20 : Su içerisindeki MWCNT için sıcaklığın etkisi (Yu ve diğ., 2007)

### **2.3.7 Katkı maddelerinin etkisi**

Araştırmacılar, nanoparçacıkları akışkan içerisinde askıda tutma ve kümelenmelerini önleme çabasıyla akışkan katkı maddeleri kullanmışlardır. Literatürdeki sonuçlar, katkı maddesi türü, konsantrasyon vb. bakımından çok çeşitlidir. Fakat katkı maddelerini içeren birçok çalışma sonuç olarak, ısı iletkenlik oranında artış göstermektedir. Yani, ısı iletkenlik artışı katkı maddesi kullanılarak yükseltilmiştir.



### 3. NANOAKIŞKANLARIN ISIL İLETKENLİĞİ İLE İLGİLİ TEORİK ARAŞTIRMALAR

Teorik modelleme amacıyla nanoakışkan, sürekli bir ana akışkan bileşeni ve parçacık adı verilen sürekli olmayan bir katı bileşenden oluşan bir karışım olarak tanımlanabilir. Nanoakışkanların özellikleri; bileşen özellikleri, bileşen hacim konsantrasyonları, parçacık boyutu, parçacık şekli, parçacık dağılımı, parçacık hareketi ve sıvı-parçacık arayüzü gibi etkilere bağlıdır. Yapılarının bütün detayları tam olarak bilinmedikçe nanoakışkanların efektif özelliklerini hesaplamak imkansızdır. Bu sorunu çözebilmek amacıyla araştırmacılar genellikle karışımların mikro yapıları konusunda bazı varsayımlara dayanarak efektif özellikleri hesaplamışlardır. Bu bölümde, nanoakışkanların ısı iletkenliği ile ilgili klasik modeller sunulmuştur.

Maxwell (1881), akışkan içerisinde asılı konumdaki parçacıklar aracılığıyla ısı iletimini analitik olarak inceleyen ilk kişilerden biridir. Çalışmalarında, parçacıklar arasındaki etkileşimi göz ardı ederek, küresel parçacıkları içeren katı-sıvı karışımlarının ısı iletkenliğini hesaplayabilmek için denklem (3.1) ile verilen eşitliği geliştirmiştir.

$$k_{nf} = \frac{2k_f + k_p + 2\phi(k_p - k_f)}{2k_f + k_p - \phi(k_p - k_f)} k_f \quad (3.1)$$

Burada  $k_{nf}$ ,  $k_f$ ,  $k_p$  sırasıyla nanoakışkanın, ana akışkanın ve parçacığın ısı iletkenliğidir.  $\phi$ , hacim konsantrasyonunu ifade etmektedir. Denklem incelendiğinde, parçacık şekli ve boyutunun hesaba katılmadığı görülebilmektedir.

Maxwell (1881) tarafından yapılan ilk araştırmadan bu yana Maxwell eşitliği çok sayıda araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. Bu araştırmalarda, ısı iletkenlikle ilgili çeşitli faktörler hesaba katılmıştır. Hamilton ve Crosser (1962), katı parçacık şeklini de hesaba katarak, Maxwell modelini geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu model denklem (3.2) ile verilmiştir.

$$k_{nf} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} k_f \quad (3.2)$$

Burada  $n$  ampirik şekil faktörüdür ve denklem (3.3) ile verilen eşitlik ile bulunur.

$$n = \frac{3}{\Psi} \quad (3.3)$$

Burada  $\Psi$ , küreselliktir. Küresellik, parçacık ile aynı hacme sahip bir kürenin yüzey alanının, parçacık yüzey alanına oranıdır. Bir küre için bu değer 3'tür ve bu durumda Hamilton-Crosser modeli, Maxwell modeli ile aynı olmaktadır.

Yapılan araştırmalar, akışkanlardaki nispeten büyük parçacıkların seyreltik karışımları için ısı iletkenliği makul bir şekilde tahmin etse de, nanoakışkanlar için olan teorik öngörüler ve deneysel veriler arasındaki karşılaştırma genellikle tatmin edici değildir. Bu eşitlikler ya küresel parçacıklar içeren nanoakışkanlar için olan deneysel verilerin sonuçlarını olduğundan daha az öngörmektedir ya da oval küresel parçacıklar içeren nanoakışkanlar için olan deneysel verileri olduğundan daha yüksek olarak tahmin etmektedir. Tahminleri geliştirmek için nano ölçeğe özgü olarak nanoparçacık-sıvı arayüz tabakasının etkileri, nanoparçacık Brown hareketi ve nanoparçacık kümelenmesi ile ilgili mekanizmalar geliştirilmiş ve formüle edilmiştir.

### 3.1 Nanoparçacık-Sıvı Arayüz Tabakası

Katı bir yüzeye yakın sıvı moleküllerin tabakalı yapılar oluşturduğu bilinmektedir (Yu ve diğ., 2000). Bu katımsı sıvı tabakalarla birlikte nanoakışkan yapısı, katı nanoparçacıklar, kabuklar(katımsı sıvı tabakalar) ve sıvıdan oluşur. Tabakalı moleküllerin bir katı ve sıvı arasında ara bir fiziksel halde olmasından ötürü katımsı tabakanın, sıvınınkinden daha yüksek bir ısı iletkenliğe sahip olması beklenebilir. Bu yüzden, katımsı sıvı tabakanın katı bir parçacık ve sıvı arasında ısı bir köprü görevi gördüğü düşünülmektedir. Bu varsayımına dayanarak, Yu ve Choi (2003), bu sıvı tabakanın etkisini Maxwell eşitliğine dahil ederek, parçacık-sıvı süspansiyonlarının ısı iletkenliği için denklem (3.4) ile verilen eşitliği geliştirmiştir.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_{pe} + 2k_f + 2(k_{pe} - k_f)(1 + \eta)^3 \phi}{k_{pe} + 2k_f - (k_{pe} - k_f)(1 + \eta)^3 \phi} \quad (3.4)$$

$$\eta = \frac{t}{r_p} \quad (3.5)$$

Burada  $\eta$ , sıvı tabaka kalınlığının orijinal parçacık yarıçapına oranıdır.  $k_{pe}$ , eşdeğer nanoparçacık ısı iletkenliğidir.

$$k_{pe} = \frac{[2(1-\gamma)+(1+\eta)^3(1+2\gamma)]\gamma}{-(1-\gamma)+(1+\eta)^3(1+2\gamma)} k_p \quad (3.6)$$

$$\gamma = \frac{k_l}{k_p} \quad (3.7)$$

Burada  $\gamma$ , sıvı tabaka ısıl iletkenliğinin parçacık ısıl iletkenliğine oranıdır.  $k_l$  ise sıvı tabaka ısıl iletkenliğidir.

Bu durum, küresel olmayan parçacıklara da uyarlanabilir. Hamilton ve Crosser eşitliğini geliştirerek, Yu ve Choi (2004) küresel olmayan parçacıkları içeren bir model de geliştirmiştir.

Xie ve diğ. (2005), nanoparçacık-sıvı arayüz tabakası etkisi ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Nanoparçacık etrafında t kalınlığında küresel bir kabuk olarak bir nano yüzey modellemişlerdir. Bu modelleme Yu ve Choi (2004) tarafından düşünülen yaklaşıma benzerdir. Fakat Yu ve Choi (2004) çalışmalarında sıvı tabaka ısıl iletkenliğini sabit kabul etmişlerdir. Xie ve diğ. (2005) ise ısıl iletkenliğin radyal yönde değiştiğini varsaymışlar ve sıvı tabaka ısıl iletkenliğinin; sıvı tabaka-sıvı arayüzeyinde sıvı ısıl iletkenliğine, sıvı tabaka-nanoparçacık arayüzeyinde ise parçacık ısıl iletkenliğine eşit olduğunu kabul etmişlerdir. Nanoakışkan ısıl iletkenliğini belirleyebilmek için denklem (3.8) ile verilen eşitliği öne sürmüşlerdir.

$$\frac{k_{nf}-k_f}{k_f} = 3\Theta\phi_T + \frac{3\Theta^2\phi_T^2}{1-\Theta\phi_T} \quad (3.8)$$

Burada  $\phi_T$ , nanoparçacık ve sıvı tabaka toplam hacim konsantrasyonudur ve denklem (3.9) ile verilen eşitlik ile bulunur.

$$\phi_T = \phi(1 + \eta)^3 \quad (3.9)$$

Burada  $\eta$ , sıvı tabaka kalınlığının orijinal parçacık yarıçapına oranıdır ve denklem (3.5) ile verilen eşitlik ile bulunur. Denklem (3.8)'de bulunan  $\Theta$  ifadesi denklem (3.10) ile verilen eşitlik ile bulunur.

$$\Theta = \frac{k_{lf} \left[ (1+\eta)^3 - \frac{k_{pl}}{k_{fl}} \right]}{(1+\eta)^3 + 2k_{lf}k_{pl}} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'deki  $k_{lf}$ ,  $k_{pl}$ ,  $k_{fl}$  değerleri aşağıda denklem (3.11), (3.12) ve (3.13) ile verilen ifadelerle bulunmaktadır.

$$k_{lf} = \frac{k_l - k_f}{k_l + 2k_f} \quad (3.11)$$

$$k_{pl} = \frac{k_p - k_l}{k_p + 2k_l} \quad (3.12)$$

$$k_{fl} = \frac{k_f - k_l}{k_f + 2k_l} \quad (3.13)$$

Sıvı tabaka ısı iletkenliği  $k_l$ , denklem (3.14) ile verilen eşitlik ile tanımlanır.

$$k_l = \frac{k_f M^2}{(M - \eta) \ln(1 + M) + \eta M} \quad (3.14)$$

M ifadesi, denklem (3.15) ile bulunur.

$$M = \left( \frac{k_p}{k_f} (1 + \eta) \right) - 1 \quad (3.15)$$

Bu yaklaşımda, sıvı tabaka ısı iletkenliği sabit kabul edildiğinde, Yu ve Choi modeli ile aynı sonuçlara ulaşılmaktadır.

Nanoparçacık etrafındaki sıvı tabaka etkisi göz önünde bulundurulduğunda en büyük sorun, sıvı tabaka kalınlığını ve sıvı tabaka ısı iletkenliğini tespit edebilmektir. Bu nedenle, gelecekte bu konuda yapılacak çalışmaların, bu sorunun çözümine odaklanması gerekmektedir.

### 3.2 Nanoparçacık Brown Hareketinin Etkisi

Bir sıvıda yüzen veya asılı parçacıkların rastlantısal hareketi Brown hareketi olarak adlandırılır. Nanoparçacıkların Brown hareketi, nanoakışkanların ısı iletkenlik artışını hesaplamada bir diğer olası faktördür. Birçok durumda, nanoakışkanlarda askıdaki nanoparçacıkların Brown hareketinin etkisi, klasik eşitliklerce öngörülen artırılmış ısı iletkenliğe bir eklenti olarak düşünülebilir. Bu kavramı göz önünde bulundurarak Xuan ve diğer. (2003), Maxwell eşitliğine aşağıdaki değişikliği önermişlerdir:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{2k_f + k_p + 2\phi(k_p - k_f)}{2k_f + k_p - \phi(k_p - k_f)} + \frac{1}{2} \frac{\rho_p C_{p,p} \phi}{k_f} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu_f r_{cl}}} \quad (3.16)$$

Bu eşitlik, deneysel olarak belirlenmesi gereken nanoparçacık kümelerinin görünen yarıçapı  $r_{cl}$  nedeniyle küme etkisini de içermektedir. Bu denklemdeki  $k_B$  ifadesi Boltzmann sabitidir.  $\mu_f$ ,  $\rho_p$ ,  $C_{p,p}$ ,  $T$  ifadeleri sırasıyla ana akışkan dinamik viskozitesini, parçacık yoğunluğunu, parçacık özgül ısısını ve sıcaklığı temsil etmektedir.

Jang ve Choi (2004b), tek bir Brown parçacığı tarafından oluşturulan taşınımı hesaba katan bir model geliştirmişlerdir.

$$k_{nf} = (1 - \phi)k_f + \beta\phi k_p + 3c\left(\frac{r_f}{r_p}\right)\phi\left(\frac{k_B T}{3\pi\mu_f v_f l_f}\right)^2 Pr_f k_f \quad (3.17)$$

Burada,  $c$  orantılılık sabiti,  $\beta$  ise deneysel verilerden elde edilen bir sabittir.  $r_f$  ve  $r_p$  ana akışkan ve parçacık yarıçaplarını ifade etmektedir.  $Pr_f$ , ana akışkan Prandtl sayısıdır.  $k_B$ ,  $T$ ,  $l_f$ ,  $v_f$ ,  $\mu_f$  sırasıyla Boltzmann sabiti, sıcaklık, ana akışkan moleküllerinin ortalama serbest yolu, ana akışkan kinematik viskozitesi ve ana akışkan dinamik viskozitesidir.

Ayrıca, belirli nanoakışkanlar için nanoparçacığın Brown hareketi etkisiyle ısı iletkenliğini tahmin etmek için de araştırmalar yapılmıştır. Bu yaklaşımı kullanarak, Koo ve Kleinstreuer (2004) CuO kullanılan nanoakışkanlar için denklem (3.18) ile verilen bir ısı iletkenlik modeli geliştirmişlerdir.

$$k_{nf} = \frac{2k_f + k_p + 2\phi(k_p - k_f)}{2k_f + k_p - \phi(k_p - k_f)} k_f + 5 \times 10^4 \beta \rho_f C_{p,f} \phi \sqrt{\frac{k_B T}{2\rho_p r_p}} [(-134.63 + 1722.3\phi) + (0,4705 - 6.04\phi)T] \quad (3.18)$$

Bu eşitlik, Maxwell eşitliğinin geliştirilmiş bir halidir.  $\beta$  parametresi, nanoparçacık Brown hareketiyle ilgilidir ve deneysel olarak denklem (3.19) ile verilen şekilde belirlenmiştir.

$$\beta = \begin{cases} 0.0137(100\phi)^{-0.8229} & \phi < 0.01 \\ 0.0011(100\phi)^{-0.7272} & \phi > 0.01 \end{cases} \quad (3.19)$$

### 3.3 Nanoparçacık Kümelenmesinin Etkisi

Nanoparçacıklar, nanoakışkanlarda genellikle küme yapıları oluştururlar. Bu yapıların, nanoakışkanların ısı iletkenlik artışına katkıda buldukları düşünülmektedir. Wang ve diğ. (2003), bir küme yarıçapı dağılım fonksiyonu ortaya atarak, küme etkisini araştırmışlardır. Elde edilen eşitlik Maxwell eşitliğinin geliştirilmiş halidir.

$$k_{nf} = \frac{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{cl}(r)n(r)}{2k_f + k_{cl}(r)} dr}{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_f}{2k_f + k_{cl}(r)} n(r) dr} k_f \quad (3.20)$$

Burada  $n(r)$ , küme yarıçapı dağılım fonksiyonunu temsil etmektedir.  $k_{cl}(r)$ , Bruggeman modeli ile belirlenen küme eşdeğer ısı iletkenliğidir ve denklem (3.21) ile verilmiştir.

$$k_{cl}(r) = (3\phi^* - 1)k_p + [3(1 - \phi^*) - 1]k_f + \sqrt{\Delta} \quad (3.21)$$

Buradaki  $\Delta$  ifadesi denklem (3.22) ile bulunur.

$$\Delta = (3\phi^* - 1)^2 k_p^2 + [3(1 - \phi^*) - 1]^2 k_f^2 + 2[2 + 9\phi^*(1 - \phi^*)]k_p k_f \quad (3.22)$$

$\phi^*$  ifadesi için denklem (3.23) ile verilen eşitlik geliştirilmiştir.

$$\phi^* = (r_{cl}/r_p)^{D_{fl}-3} \quad (3.23)$$

Burada  $r_{cl}$  nanoparçacık kümelerinin yarıçapı,  $r_p$  ise parçacıkların yarıçapıdır.  $D_{fl}$ , fraktal boyutu ifade etmektedir.  $D_{fl}$  değeri, % 6.5 hacim konsantrasyonundaki  $SiO_2$  – Etanol nanoakışkanı için 1.66, % 0.13 hacim konsantrasyonundaki  $CuO$  – Su nanoakışkanı için 1.73, % 0.25 hacim konsantrasyonundaki  $CuO$  – Su nanoakışkanı için 1.76 ve % 0.38 hacim konsantrasyonundaki  $CuO$  – Su nanoakışkanı için 1.81 olarak belirlenmiştir.  $CuO$  parçacıklarının boyutu 50 nm'dir. Küme yarıçapı dağılım fonksiyonu  $n(r)$ , denklem (3.24) ile verilen dağılım formuyla yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\ln\sigma)r_{cl}} e^{-[\ln(r_{cl}/\bar{r}_{cl})/(\sqrt{2\pi}\ln\sigma)]^2} \quad (3.24)$$

Burada  $\bar{r}_{cl}$ , nanoparçacık kümelerinin geometrik ortalama yarıçapıdır.  $\sigma$ , standart sapmadır ve 1.5 olarak alınabilir (Wang ve diğ., 2003).

Prasher ve diğ. (2006), nanoakışkanların ısı iletkenliğinin, nanoparçacıkların kümelenmesinin bir sonucu olarak önemli ölçüde artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, nanoparçacık kümelenme etkisini içeren denklem (3.25) ile verilen eşitliği elde etmişlerdir.

$$k_{nf} = k_f + 3 (r_{cl}/r_p)^{3-d_f} \phi \frac{k_{cl}-k_f}{2k_f+k_{cl}-(r_{cl}/r_p)^{3-d_f} \phi(k_{cl}-k_f)} k_f \quad (3.25)$$

Burada  $r_{cl}$  nanoparçacık küme yarıçapını,  $r_p$  ise parçacık yarıçapını ifade etmektedir.  $d_f$ , ana akışkan molekülleri çapını ifade etmektedir.  $k_{cl}$ , küme ısı iletkenliğini ifade etmektedir. Küme ısı iletkenliği  $k_{cl}$ 'yi hesaplamak için Bruggeman eşitliğinin kullanılması önerilmiştir.

$$\left[1 - (r_p/r_{cl})^{3-d_f}\right] \frac{k_f - k_{cl}}{2k_{cl} + k_f} + (r_p/r_{cl})^{3-d_f} \frac{k_p - k_{cl}}{2k_{cl} + k_p} = 0 \quad (3.26)$$

Nanoakışkanlardaki nanoparçacık küme yapıları, ısı iletkenlik artışı için pozitif faktörlerdir. Yine de, oluşan büyük nanoparçacık küme yapıları çökme eğilimindedir. Dolayısıyla, ısı iletkenlik artışını ortadan da kaldırabilirler. Bu açıdan, nanoparçacık küme boyutu nanoakışkanların ısı transfer performansı için önemlidir.

Bu bölümdeki tartışmalar nanoparçacık-sıvı arayüz tabakası, nanoparçacık Brown hareketi veya nanoparçacık kümelenmesi etkisinin fiziksel mekanizmalarına dayanan matematiksel modellerin genellikle bazı ampirik parametreler içerdiğine göstermektedir. Bir nanoakışkanın ısı iletkenliğini öngörebilmek için matematiksel modeller kullanmadan önce ilk olarak bu ampirik parametreler belirlenmelidir. Bu ihtiyaç, teorik model kullanımını fazlasıyla sınırlamaktadır. Ayrıca, bir mekanizma yerine, bunların ve diğer mekanizmaların birleşik etkisinin, bir nanoakışkanın ısı iletkenlik artışının belirlenmesinde faydalı olabileceği düşünülmektedir (Yu ve diğ., 2007).





## 4. NANOAKIŞKANLARDA TAŞINIMLA ISI GEÇİŞİ

Isıl iletkenlikteki artışların yanı sıra yoğunluk, özgül ısı ve viskozitedeki değişimler nanoakışkanların gelişmiş ısı geçişi davranışının önemli göstergeleri olsa da, nanoakışkanların ısı geçişindeki net yararı ile ilgili en belirleyici parametre ısı taşınım katsayısıdır. Eğer nanoakışkanlar kullanıldıkları sistemlerin ısı taşınım katsayısını geliştirebilirlerse, bu tarz sistemlerin boyutlarında küçültmeyi kolaylaştırabilir ve artan enerji ve yakıt verimliliklerine, daha düşük kirliliğe ve gelişmiş güvenilirliğe götürebilirler. Bu amaçla, belirli uygulamalara özgü akış koşulları altında nanoakışkanların ısı geçişi başarımını doğrudan ölçmek önemlidir. Şimdiye kadar bu alanda sınırlı sayıda araştırma belgelenmiştir.

Bu bölümde, nanoakışkanlarda taşınım ile ısı geçişi araştırılmıştır.

### 4.1 Yoğunluk ve Özgül Isı

Bir nanoakışkanın yoğunluğu, denklem (4.1) ile verilen eşitliklerle bulunur ( Pak ve Cho, 1998).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (4.1)$$

Burada  $\rho_{nf}$ ,  $\rho_f$ ,  $\rho_p$  sırasıyla nanoakışkan, ana akışkan ve parçacık yoğunluğunu temsil etmektedir.  $\phi$ , hacim konsantrasyonudur. Nanoakışkanların ısı kapasitesi denklem (4.2) ile verilen eşitlik ile bulunur (Pak ve Cho, 1998; Xuan ve Roetzel, 2000).

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (4.2)$$

Buradan da özgül ısı için denklem (4.3) elde edilir.

$$C_{p,nf} = \frac{(1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{(1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p} \quad (4.3)$$

### 4.2 Viskozite

Parçacık-sıvı karışımlarının viskozitesi üzerine yapılan çalışmaların tarihi hemen hemen ısı iletkenlik üzerine yapılan çalışmalar kadar eskidir. Nanoakışkanların

viskozitesi, zorlanmış taşınımında basınç düşüşünü doğrudan etkilemesi nedeniyle pratikteki uygulamalarda önemli bir parametredir. Kürelerin süspansiyonunun efektif viskozitesini, hidrodinamik eşitlikler temelinde hesaplayan ilk kişi Einstein'dır. Einstein (1906), viskozitesi  $\mu_f$  olan bir viskoz akışkan ile küçük parçacıkların seyreltik bir süspansiyonunun efektif viskozitesi  $\mu_e$ 'yi değerlendirmiştir. Belirli bir parçacığın neden olduğu ana akışkan akış modelinin bozulmasının, askıda olan ikinci bir parçacığın varlığının neden olduğu akış bozulmasıyla çakışmadığını varsayarak, aşağıdaki eşitliği elde etmiştir:

$$\mu_e = (1 + 2.5\phi)\mu_f \quad (4.4)$$

Bu ilk çalışmadan itibaren, araştırmacılar Einstein (1906) tarafından öne sürülen teoriyi temel alarak nanoakışkanların viskozitesini belirlemek için çalışmışlardır. Brinkmann (1952) tarafından geliştirilen denklem (4.5) ile verilen viskozite modeli nanoakışkanlar için kullanılan en yaygın modeldir.

$$\mu_{nf} = \mu_f \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (4.5)$$

### 4.3 Taşınımın Isı Geçişi Teorik Analizi

Nanoakışkanların ısı geçişi başarımları ve ısıl özelliklerini içeren sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Bunların bir kısmı nanoakışkanların ısıl iletkenliği ve viskozitesi üzerine, bir kısmı ise ısı geçişi başarımları üzerine odaklanmıştır. Pratikteki uygulamalar için, konunun tamamen anlaşılması gerekmektedir.

Çoğu taşınım akışları, Reynolds, Prandtl veya Rayleigh sayılarına bağlıdır. Fakat nanoakışkan durumunda, bütün bileşenlerin ısıl özellikleri hesaba katılmalıdır. Nanoakışkanların ısı taşınım katsayısının; ana akışkanın ve nanoparçacıkların ısı iletkenlik katsayısı ve ısı kapasitesi, akış modeli, Reynolds, Prandtl veya Rayleigh sayısı, sıcaklık, hacim konsantrasyonu ve parçacıkların boyut ve şekillerine bağlı olması beklenmektedir.

Xuan ve Roetzel (2000), Nusselt Sayısı için denklem (4.6)'da verilen genel fonksiyonu önermişlerdir.

$$Nu_{nf} = f[Re, Pr, \frac{K_p (\rho C_p)_p}{K_f (\rho C_p)_f}, \phi, \text{parçacık şekli, akış geometrisi}] \quad (4.6)$$

Burada f ve p alt indisleri sırasıyla ana akışkan ve nanoparçacığı temsil etmektedir.

Xuan ve Roetzel (2000) tarafından sunulan bir başka olası yöntem, ısı iletkenlik katsayıları ile orantılı ısı taşınım katsayısı oranıdır.

$$h_{nf} \approx h_f \left( \frac{K_{nf}}{K_f} \right)^m \quad (4.7)$$

Burada  $üs(m)$  akış rejimine dayanmaktadır ve türbülanslı akış için  $m=2/3$  önerilmiştir. Yukarıda verilen denklem, gerçekte iki fazlı bir katı-sıvı karışımı olmasına rağmen tek fazlı bir akış olarak düşünülen nanoakışkan içindir. Dağılmış parçacıkların boyutu, enerji geçişi sırasında katı parçacıklar ve akışkan arasındaki etkileşimin analizinde bazı zorluklar doğurmaktadır. Çoğu araştırmacı Brown hareketini, ısı transferi artırımının en önemli faktörlerinden biri olarak ileri sürmüşlerdir. Bu ultra-ince parçacıkların rastgele hareketinin, katı parçacıklar ve sıvı arasında bir kayma hızı yaratabileceği düşünülmektedir. Xuan ve Roetzel (2000), Brown hareketini hesaplayabilmek için hız ve sıcaklık denklemlerine küçük değişiklikler önermişlerdir.

Nanoakışkanların ısı taşınım katsayısını bulabilmek için uygulanabilecek yaklaşımlardan birisi, nanoakışkan fiziksel özelliklerini bilinen ısı geçişi bağıntıları üzerinde kullanmaktır. Yoğunluk, özgül ısı ve viskozite için bu bağıntılar bölüm 4 içerisinde incelenmiştir. Isıl iletkenlik için kullanılacak bağıntılardan ise bölüm 3'te bahsedilmiştir. Bunların dışında aşağıda verilen geleneksel ısı geçişi bağıntıları, uygun nanoakışkan özellikleri kullanılarak laminar ve türbülanslı akışta nanoakışkanların ısı taşınım katsayısını hesaplamak için kullanılabilir (Kakaç ve Pramuanjaroenkij, 2009).

$$Pr = \frac{\mu_{nf} C_{p,nf}}{k_{nf}} \quad (4.8)$$

$$Re = \frac{\rho_{nf} u d}{\mu_{nf}} \quad (4.9)$$

$$Gr = \frac{g \beta (T_H - T_L) L^3}{\nu^2} \quad (4.10)$$

$$Nu = \frac{h d}{k_{nf}} \quad (4.11)$$

Belirtilen sınır koşulları altında korunum denklemlerinin çözülebilmesi için tek fazlı akış için kullanılan korunum denklemleri, nanoakışkanlara da uygulanabilir. Korunum denklemlerinin çözümleri, parçacık ve akışkan arasında bir kayma olmaksızın sıkıştırılmaz ve ısı dengede oldukları düşünülerek verilir. (Kakaç ve

Pramuanjaroenkij, 2009). Bu koşullar altında, vektörel formda korunum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir,

Kütle Korunumu,

$$\text{div}(\rho\vec{v}) = 0 \quad (4.12)$$

Momentum Korunumu,

$$\text{div}(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\text{grad}P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (4.13)$$

Enerji Korunumu

$$\text{div}(\rho\vec{v}C_pT) = \text{div}(k\text{grad}T) \quad (4.14)$$

Bu eşitlikler, gerekli çözüm göz önünde bulundurularak basitleştirilebilir.

Çizelge 4.1, nanoakışkanlarda taşınım ile ilgili çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiş teorik modelleri göstermektedir. Sınırlı sayıdaki bu modeller, Dittus-Boelter eşitliği ve Gnielinski eşitliği gibi geleneksel eşitliklere ampirik parametreler ilave edilerek elde edilmiştir. Bu nedenle, bu eşitlikler sadece belirli aralıklardaki belirli nanoakışkanlar için geçerlidir. Genel modeller geliştirilmeden ve doğrulanmadan önce daha fazla deneysel ve teorik çalışma gerekmektedir (Yu ve diğ., 2007).

**Çizelge 4.1 :** Nanoakışkanlarda Taşınım ile Isı Geçişi Modelleri (Yu ve diğ., 2007)

<b>Nanoakışkanlarda Taşınım ile Isı Geçişi ile İlgili Modeller</b>	
Pak ve Choi	$Nu = 0.021Re^{0.8}Pr^{0.5}$ (Türbülanslı akış. Su içerisinde $Al_2O_3$ ve su içerisinde $TiO_2$ bulunan nanoakışkanlar için.)
Das ve Diğerleri	$Nu = cRe^mPr^{0.4}$ (Kaynama. Su içerisinde $Al_2O_3$ bulunan nanoakışkanlar için. Burada c ve m hacimsel konsantrasyona bağlı ampirik parametrelerdir.)
Xuan ve Li	$Nu = 0.0021(1.0 + 7.6286\phi^{0.6886}Pe_p^{0.001})Re^{0.9238}Pr^{0.4}$ (Türbülanslı akış. Su içerisinde CuO bulunan nanoakışkanlar için.)
Jang ve Diğerleri	$Nu = cRe^mPr^{1/3}(D/L)^{1/3}(\mu_B/\mu_W)^{0.14}$ (Laminer akış, Şanzıman sıvısında grafit ve sentetik yağ karışımında grafit kullanımında. C ve m, nanoakışkan ve sıcaklığa bağlı ampirik parametrelerdir.)
Buongiorno	$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+\delta_v^+(f/8)^{1/2}(Pr_v^{2/3}-1)}$ (Türbülanslı akış. Burada boyutsuz katman kalınlığı $\delta_v^+$ , ampirik bir parametredir.)

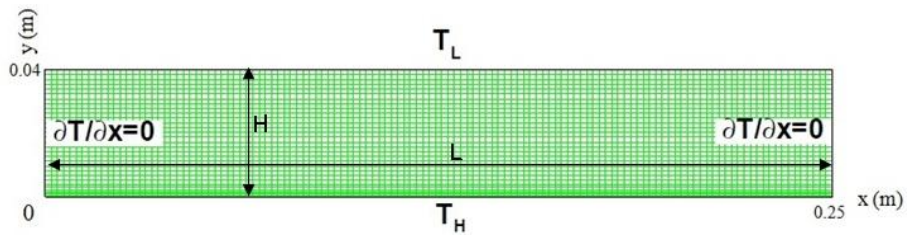
## 5. SAYISAL ANALİZ

Literatürde bulunan araştırmalar, nanoakışkan kullanımının taşınım ile ısı geçişi başarımını arttırdığını göstermektedir. Taşınım ile ısı geçişindeki bu artışı açıklamak için öne sürölen çok sayıda göröşü vardır. Nanoakışkanlar ile ısı geçişi üzerine araştırmaların halen çok yeni olması nedeniyle, bu alanda yapılacak olan kuramsal ve deneysel çalışmaların durumun açıklığa kavuşturulabilmesi için büyük katkısı olacaktır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında, nanoakışkanların doğal taşınım ile ısı geçişi sayısal olarak incelenmiştir.

### 5.1 Matematiksel Model

Nanoakışkanların, bilinen ısı geçişi akışkanları ile karşılaştırıldıklarında, arttırılmış ısı iletim katsayıları nedeniyle daha yüksek ısı geçişi başarımı göstermeleri beklenmektedir. şimdiye kadar yapılan çalışmaların çoğu, hacim konsantrasyonu, parçacık boyutu ve şeklini dikkate alarak nanoakışkanların ısı iletkenliğini ölçmeye ve analiz etmeye odaklanmıştır.

Bu çalışmada, şekil 5.1'de gösterilen nanoakışkan içeren dikdörtgen şeklinde iki boyutlu kapalı bir hacimde ısı geçişi incelenmiştir. şekildeki dikdörtgen hacim için, alt yüzey sabit ve yüksek sıcaklıkta ( $T_H = 325 K$ ), üst yüzey değişken ve düşük sıcaklıkta ( $T_L$ ), yan yüzeyler ise yalıtımlı ( $\partial T/\partial x = 0$ ) olarak kabul edilmiştir. Hacim içerisindeki nanoakışkan, Newtonian, sıkıştırılmaz ve laminer akış rejiminde kabul edilmiştir. Sıvı faz ve nanoparçacıkların, ısı dengede olduğu varsayılmıştır. Nanoakışkanların ısı özelliklerinin, kaldırma kuvveti oluşumu için gerekli olan yoğunluk değişimi haricinde sabit olduğu kabul edilmiştir.



şekil 5.1 : Matematiksel model

Korunum denklemleri, içerisinde nanoakışkan bulunan kapalı bir ortamda iki boyutlu, laminer doğal taşınım akışı için Boussinesq yaklaşımı kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\text{Süreklilik Denklemi :} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5.1)$$

Momentum Denklemleri:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5.2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta_{nf} g (T - T_L) \quad (5.3)$$

$$\text{Enerji Denklemi:} \quad u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5.4)$$

Burada  $\nu_{nf}, \beta_{nf}, \alpha_{nf}$  sırasıyla nanoakışkanın kinematik viskozitesini, ısıl genleşme katsayısını ve ısıl difüzyon katsayısını ifade etmektedir. Sayısal analiz ve korunum denklemlerinin çözümü için FLUENT 6.3 hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz programı kullanılmıştır. Denklemlerin çözümü için kullanılan başlangıç ve sınır koşulları aşağıda verilmiştir.

$$x = 0 \text{ da } u = v = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ ve } 0 \leq y \leq H \text{ (} H = 0.04 \text{ m)} \quad (5.5)$$

$$T = T_H, y = 0 \text{ da } u = v = 0, 0 \leq x \leq L \text{ (} L = 0.25 \text{ m)}$$

$$T = T_L, x = L \text{ de } u = v = 0, 0 \leq x \leq L$$

Nanoakışkan yoğunluğu, aşağıda verilen denklem (5.6) ile bulunabilir (Pak ve Cho, 1998).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (5.6)$$

Burada,  $\rho_f, \rho_p, \phi$  sırasıyla ana akışkan yoğunluğunu, nanoparçacığın yoğunluğunu ve hacim konsantrasyonunu ifade etmektedir. Eğer nanoakışkan ısıl dengede ise, nanoakışkanın özgül ısısını hesaplamak için kullanılan genel ilişki (Pak ve Cho, 1998; Xuan ve Roetzel, 2000);

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_p \quad (5.7)$$

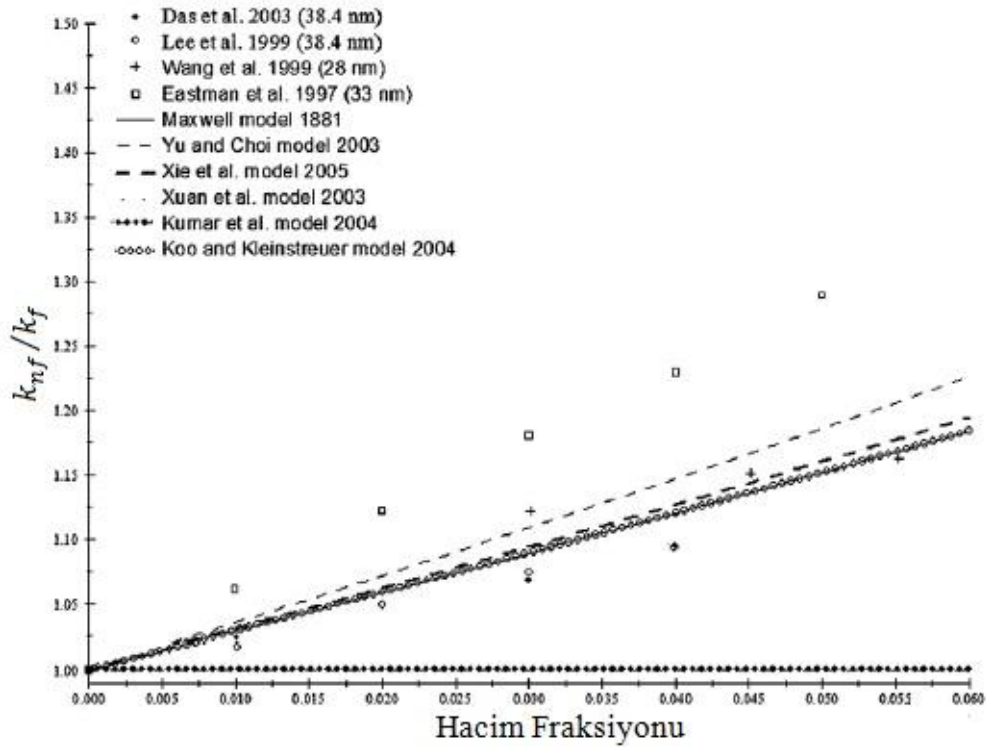
şeklindedir. Burada,  $(\rho c_p)_{nf}, (\rho c_p)_f, (\rho c_p)_p$  sırasıyla nanoakışkan, ana akışkan ve nanoparçacık ısıl kapasitelerini ifade etmektedir.

Bu çalışmada nanoakışkanların viskoziteleri için Brinkman (1952) tarafından önerilen model kullanılmıştır.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (5.8)$$

Burada,  $\mu_f$  ana akışkanın dinamik viskozitesidir.

Şekil 5.2,  $Al_2O_3$  – Su nanoakışkanı kullanılarak, teorik model ve deneysel çalışmalar ile elde edilen ısı iletkenlik artımı değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir.



**Şekil 5.2 :**  $Al_2O_3$  – Su nanoakışkanı için deneysel çalışma ve teorik modeller ile elde edilen ısı iletkenlik artışı karşılaştırması (Wang ve Mujumdar , 2007)

Literatürde nanoakışkanların ısı iletkenliği için önerilen modellerden Maxwell, Hamilton Crosser modelleri deneysel verilerle karşılaştırıldığında daha düşük ısı iletim katsayıları vermektedir. Bilinen diğer modellerden olan Koo ve Kleinstreuer (2004), Khanfer ve diğ. (2003) ve Xuan ve diğ. (2003) ait modeller ise Maxwell ve Hamilton-Crosser modellerine göre daha iyi sonuçlar vermelerine rağmen, Khanfer ve diğ. (2004) ait model için deneysel veriler ile modelin karşılaştırılmasıyla elde edilecek bir sabite ihtiyaç vardır. Koo ve Kleinstreuer (2004) ve Xuan ve diğ. (2003) ait modellerde ise nanoakışkan özelliklerinin detaylı bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, deneysel veriler incelendiğinde diğer modellere göre

daha iyi sonuç vermesi dikkate alınarak, nanoparçacık etrafında oluşan sıvı tabaka etkisine dayanan Yu ve Choi (2003) modeli kullanılmıştır. Yu ve Choi modelinde kullanılan sıvı tabaka kalınlığının orijinal tanecik yarıçapına oranı ( $\eta$ ), 0.1 kabul edilmiştir. Kullanılan akışkan ve katı parçacıkların özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Akışkan ve parçacık malzemelerinin ısıl-fiziksel özellikleri (Wang, 2007; Ögüt, 2009)

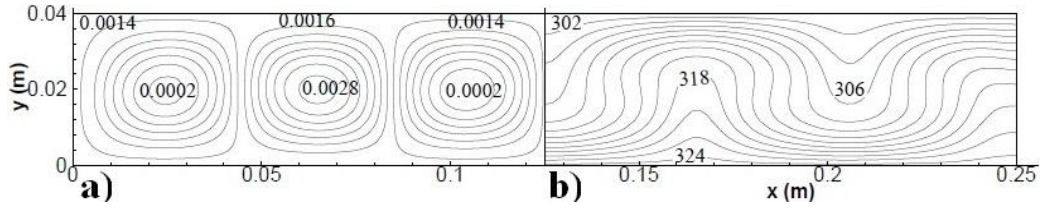
Fiziksel Ö.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	MWCNT	Su	Yağ	Etilen G.
$c_p(J/kgK)$	765	540	500	4179	1880	2415
$\rho(kg/m^3)$	3970	6510	1400	997.1	960	1114
$k(W/mK)$	40	18	2000	0.604	0.1448	0.252
$\mu \times 10^{-3}(kg/ms)$	-	-	-	1.003	48	21.3
$\beta \times 10^{-5}(1/K)$	2.4	5.1	-	21	70	57

## 5.2 Sayısal Analizin Doğrulanması

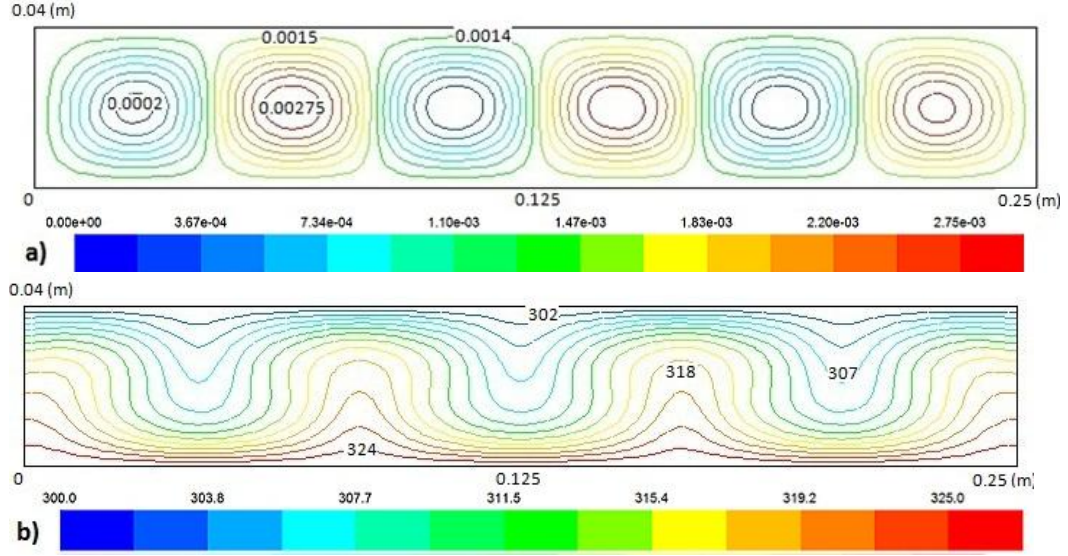
Analize başlamadan önce, daha önce bu konuda yapılmış araştırmalar incelenmiştir. Wang (2007) tarafından yapılmış olan çalışma referans alınarak, yapılacak modellemenin doğruluğu kontrol edilmiştir. Hacim konsantrasyonu %10 olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoakışkanı için  $10^3, 10^4, 10^5$  Grashof sayılarında ısı geçişi incelenmiş ve Wang (2007) ile çok yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Bu noktada, Wang (2007) tarafından yapılan çalışmada, akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrilerini içeren sonuçların simetri özelliği kullanılarak verildiğini belirtmek gerekir. Bu nedenle aşağıdaki Wang (2007) tarafından yapılan çalışmanın akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrilerini gösteren şekillerde, kapalı hacmin sol yarısında akım çizgileri, sağ yarısında ise eş sıcaklık eğrileri görülmektedir.

Şekil 5.3,  $Gr = 10^3$  için Wang (2007) tarafından elde edilen akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrilerini, Şekil 5.4,  $Gr = 10^3$  için bu çalışmada elde edilen akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrilerini göstermektedir. Benzer şekilde,  $Gr = 10^4$  için Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'de sırasıyla Wang (2007) ve bu tez çalışmasına ait akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri verilmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 ise,  $Gr = 10^5$  için sırasıyla Wang (2007) ve bu tez çalışmasına ait akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrilerini göstermektedir. Şekillerden de görülebildiği gibi, iki çalışmaya ait sonuçlar birbirleriyle uyum içerisindedir.

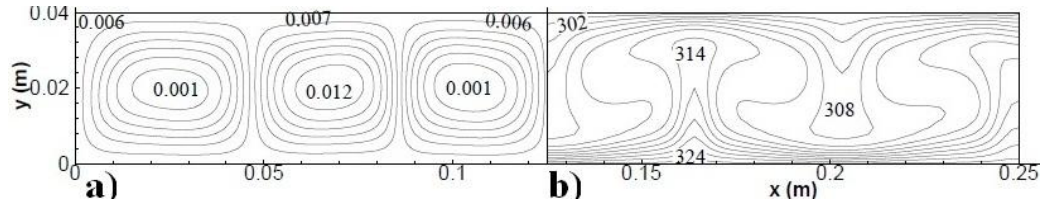




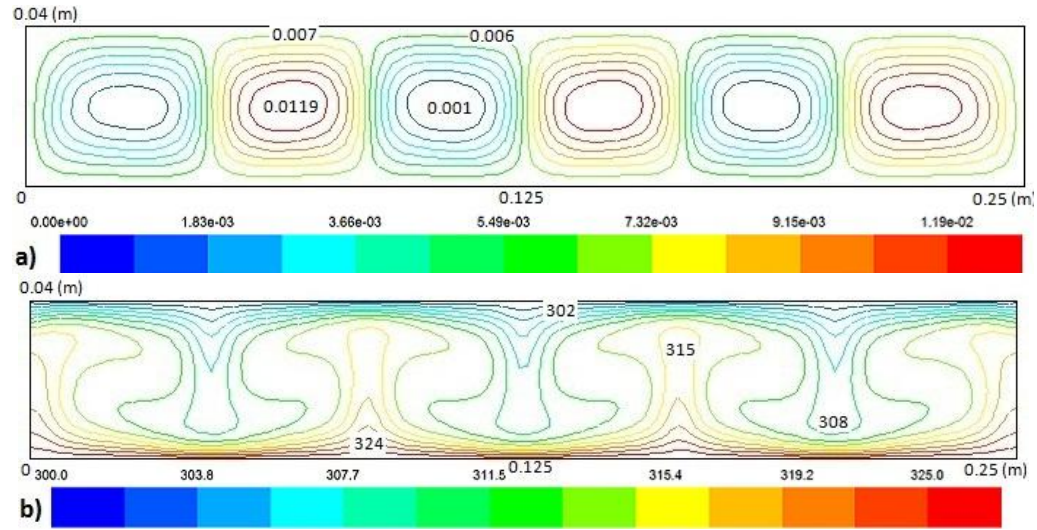
Şekil 5.3 :  $Gr= 10^3$  için referans çalışmaya ait a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri



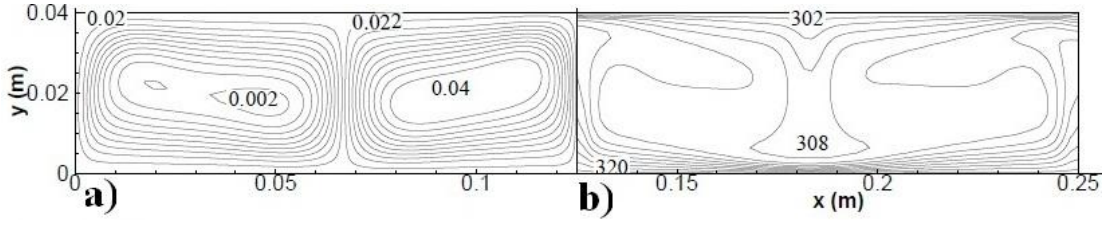
Şekil 5.4 :  $Gr= 10^3$  için bu çalışmada elde edilen a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri



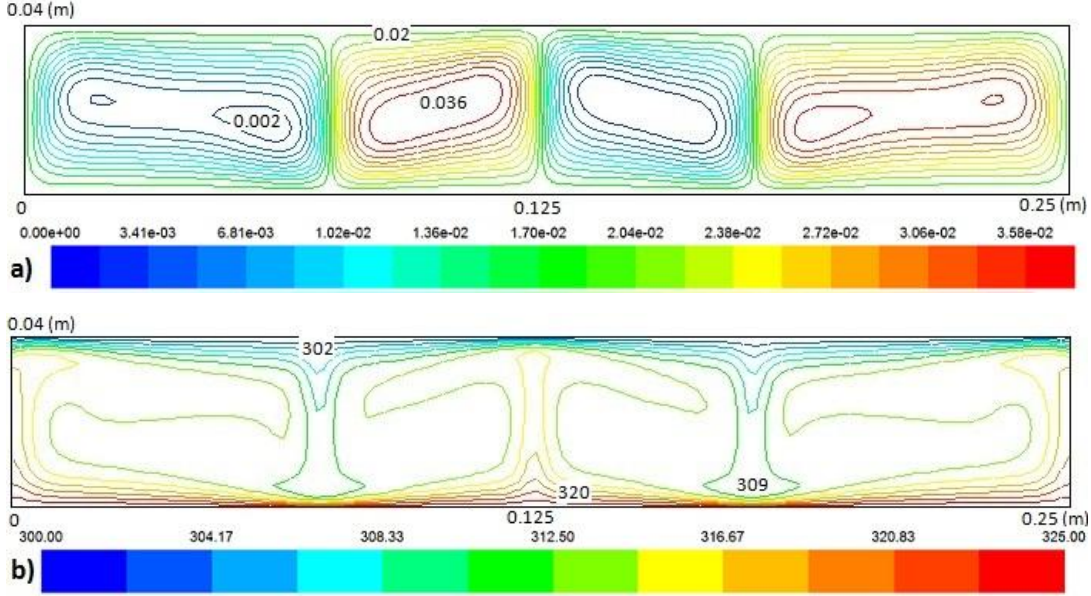
Şekil 5.5 :  $Gr= 10^4$  için referans çalışmaya ait a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri



Şekil 5.6 :  $Gr= 10^4$  için bu çalışmada elde edilen a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri



**Şekil 5.7 :**  $Gr= 10^5$  için referans çalışmaya ait a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri



**Şekil 5.8 :**  $Gr= 10^5$  için bu çalışmada elde edilen a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri

Çizelge 5.2,  $Al_2O_3$  – Su nanoakışkanı için referans çalışma ile bu tez çalışmasında elde edilen, kanal boyunca değişen sıcaklık değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Çizelgedeki değerler incelendiğinde, her iki çalışmada da, hacim içerisinde aynı noktalarda aynı sıcaklık değerlerinin elde edildiği görülebilmektedir.

Çizelge 5.3,  $Al_2O_3$  nanoakışkanı için referans çalışma ile bu tez çalışmasında elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı oranlarının karşılaştırmasını göstermektedir. Değerler incelendiğinde, farklı Grashof sayılarındaki çeşitli hacim konsantrasyonları için her iki çalışmaya ait değerlerinde birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülebilmektedir.

**Çizelge 5.2 :** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için referans çalışma ile bu tez çalışmasında elde edilen sıcaklık değerleri karşılaştırması

	Hacim İçerisinde Yatay Eksendeki Yeri(x) (m)	T(K)	
		Wang(2007)	Mevcut Çalışma
$Gr = 10^3$	0,08	324	324
	0,125	302	302
	0,165	318	318
	0,205	306	307
$Gr = 10^4$	0,08	324	324
	0,125	302	302
	0,165	314	315
	0,205	308	308
$Gr = 10^5$	0,07	302	302
	0,125	320	320
	0,185	308	309

**Çizelge 5.3 :** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için referans çalışma ile bu tez çalışmasında elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı oranları karşılaştırması

	Hacim Konsantrasyonu( $\phi$ )	$h_{nf}/h_f$	
		Wang(2007)	Mevcut Çalışma
$Gr = 10^3$	0,01	1,039	1,039
	0,05	1,16	1,168
	0,08	1,22	1,238
	0,1	1,24	1,27
$Gr = 10^4$	0,01	1,04	1,046
	0,05	1,181	1,21
	0,08	1,262	1,31
	0,1	1,315	1,365
$Gr = 10^5$	0,01	1,042	1,049
	0,05	1,195	1,22
	0,08	1,28	1,336
	0,1	1,33	1,395

### 5.3 Doğal taşınım ile ısı geçişinin incelenmesi

Bu çalışmada, nanoakışkanların ısı geçişi başarımları, Grashof sayısı, hacim konsantrasyonu, katı parçacık çeşidi, ana akışkan çeşidine göre sayısal olarak araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında yapılan inceleme, % 1, % 5, % 10 ve % 20 hacim konsantrasyonları ve  $10^3, 10^4, 10^5$  Grashof sayıları için gerçekleştirilmiştir. Katı parçacık olarak  $Al_2O_3$ , CuO ve MWCNT kullanılmıştır. Ana akışkan olarak su, yağ ve etilen glikol seçilmiştir. Kapalı hacmin modellenmesi, mesh yapısı 46x100 olarak ve daha yüksek değişim değerleri beklenen duvar yakınlarda kontrol hacimlerinin sayısı daha çok olacak şekilde oluşturulmuştur.

Ortalama ısı taşınım katsayısı  $h$ , denklem (5.9) kullanılarak hesaplanmıştır.

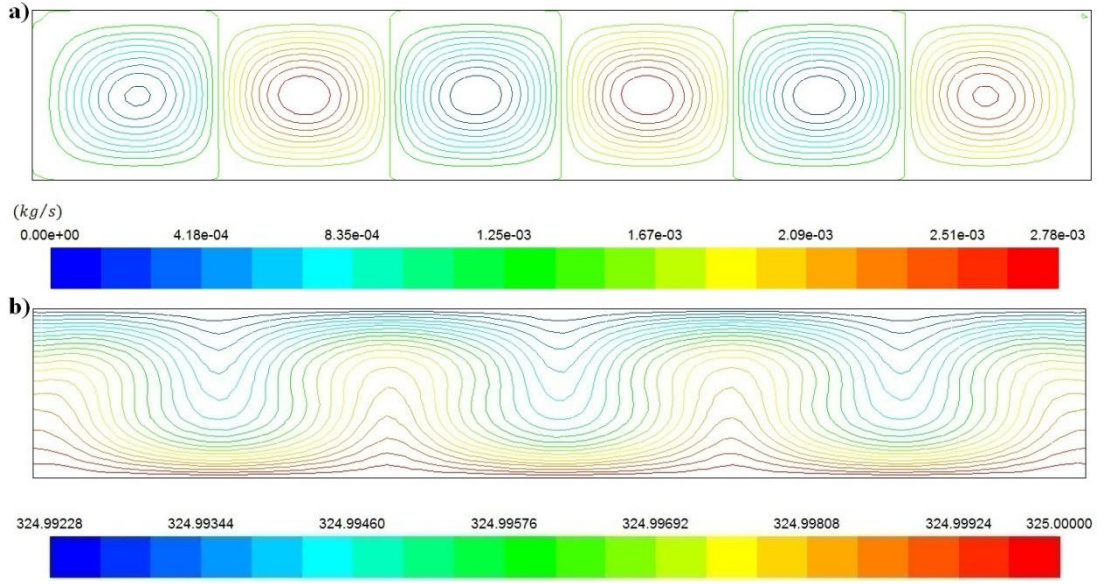
$$h = q/A(T_w - T_b) \quad (5.9)$$

Burada,  $q$  toplam ısı geçişi,  $T_w$  duvar sıcaklığı ve  $T_b$  akışkan sıcaklığıdır.

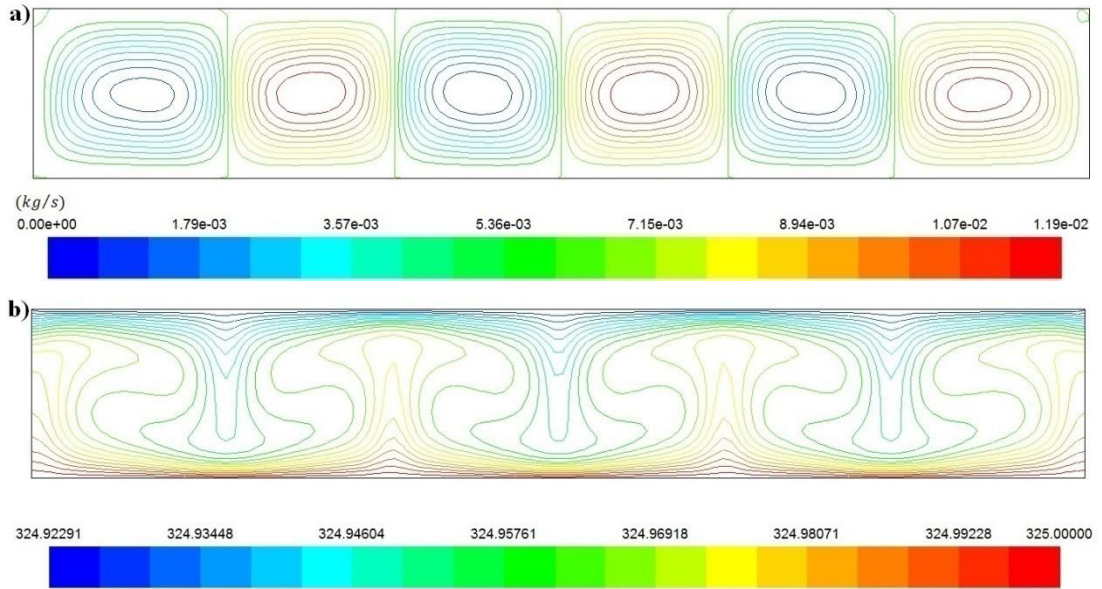
#### 5.3.1 Grashof sayısının etkisi

Şekil 5.9, 5.10, 5.11, hacim konsantrasyonu %10 olan  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanı için sırasıyla  $Gr = 10^3, Gr = 10^4, Gr = 10^5$  için akım çizgilerini ve eş sıcaklık eğrilerini göstermektedir. Şekillerdeki akım çizgileri incelendiğinde  $Gr = 10^3$  olduğu durumda hacim içerisinde altı adet elipse benzer şekilde akış hücresi oluşmaktadır. Grashof sayısının  $10^3$ 'den  $10^4$ 'e artması ile hücreler eliptik şekilden dikdörtgensel şekle doğru değişme eğilimi göstermektedirler. Grashof sayısı  $10^5$  olduğunda ise akış hücreleri genişleyerek sayısı dörde düşmektedir ve kabın yan duvarlarına yakın bölgelerde hücrelerin orta kısmında daha küçük çapta iki akış hücresi oluşmaktadır. Ayrıca, şekillerdeki akım fonksiyonu değerleri incelendiğinde, Grashof sayısının artması ile akış şiddetlenmekte ve bu nedenle akım fonksiyonu değerleri artmaktadır.

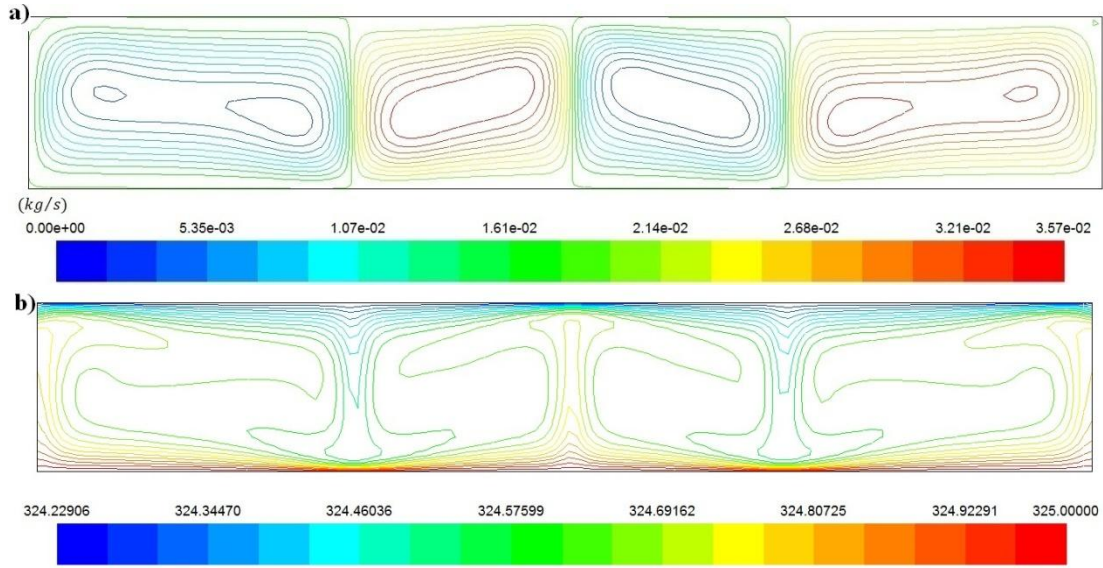
Şekil 5.9-5.11'deki eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde, Grashof sayısının artması ile alt ve üst duvarlarda ısı sınır tabaka kalınlığının azaldığı, akışın hızlanmasına ve akım fonksiyonunun değişimine bağlı olarak sıcaklığın hacim içerisine daha çok yayıldığı görülmektedir.



**Şekil 5.9 :**  $Gr = 10^3$ 'de  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanı için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri

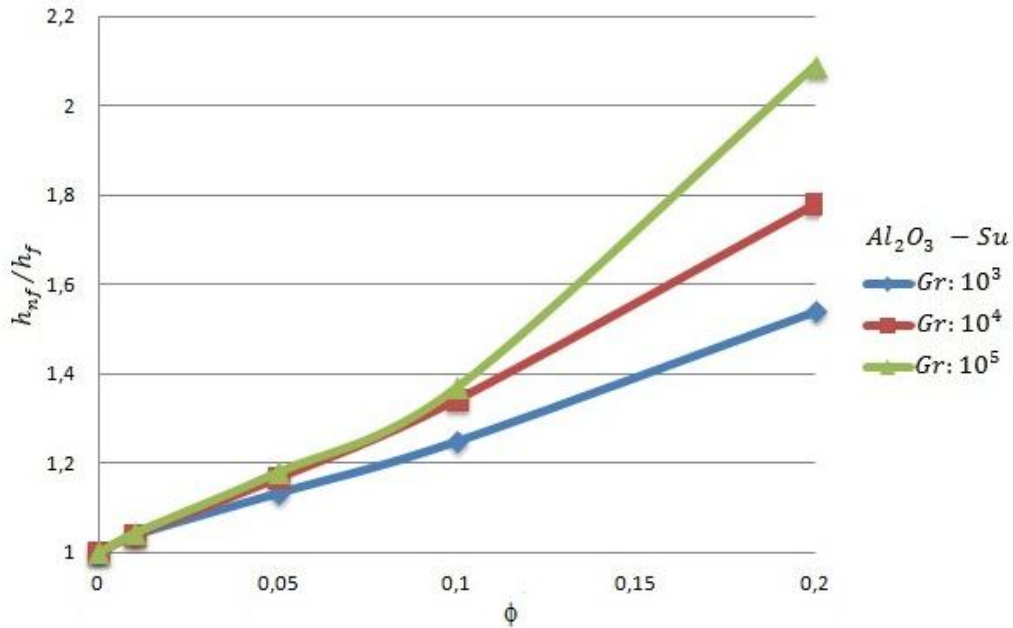


**Şekil 5.10 :**  $Gr = 10^4$ 'de  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanı için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri

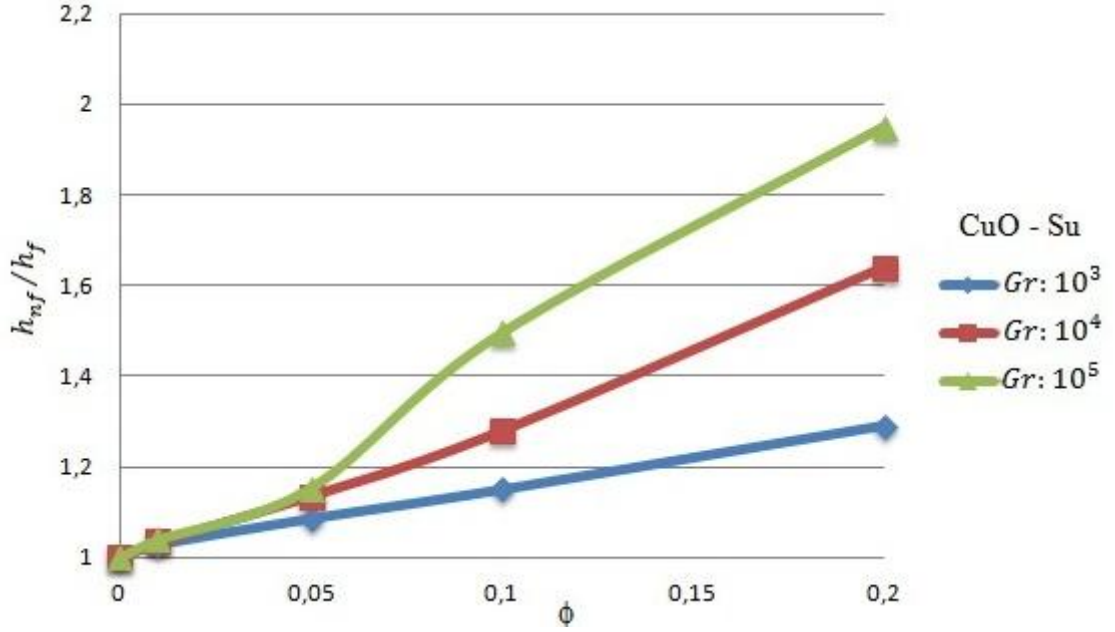


**Şekil 5.11 :**  $Gr = 10^5$ 'de  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanı için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri

Şekil 5.12,  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanı için Grashof sayısının değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisini göstermektedir. Şekil 5.13 ise  $CuO-Su$  nanoakışkanı için Grashof sayısının değişiminin ısı taşınım katsayısı üzerine etkisini göstermektedir. Her iki grafikten de görülebildiği gibi sabit bir hacim konsantrasyonu için Grashof sayısının artması ile ısı taşınım katsayısı oranı artmaktadır. Isı taşınım katsayısındaki bu iyileşme oranı, hacim konsantrasyonu arttıkça daha fazla olmaktadır.



**Şekil 5.12 :**  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanı için Grashof sayısının değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi

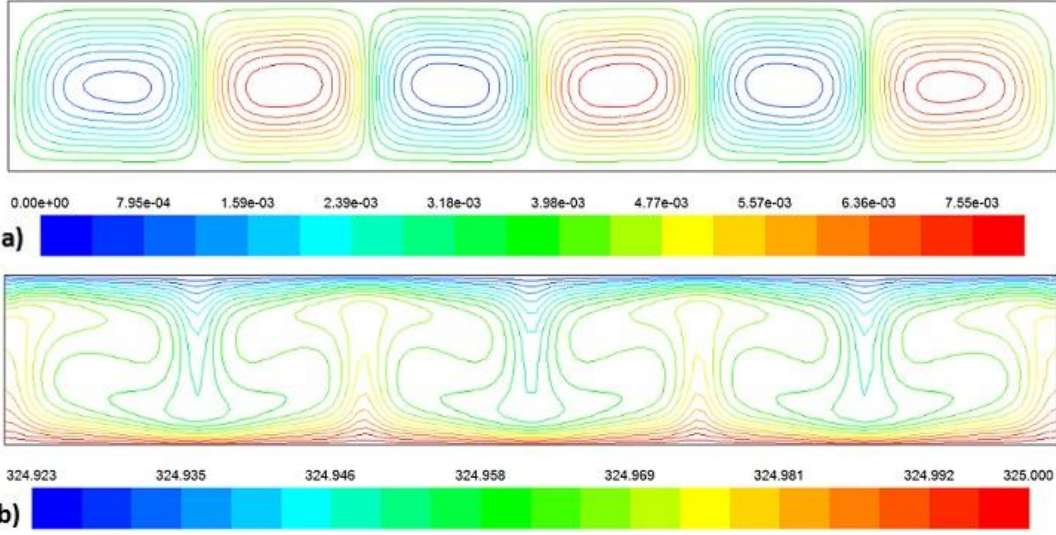


**Şekil 5.13 :** CuO – Su nanoakışkanı için Grashof sayısı değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi

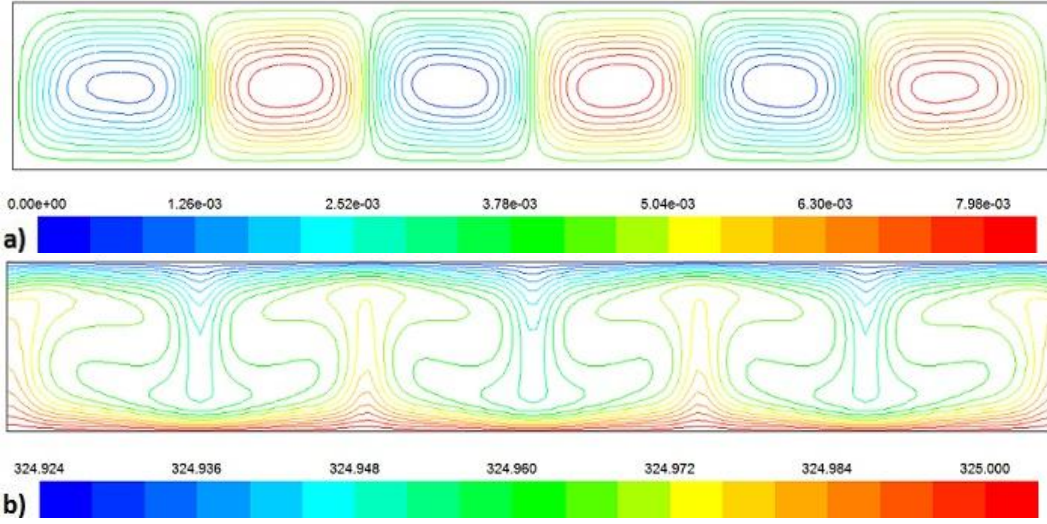
### 5.3.2 Hacim konsantrasyonu etkisi

Çalışmada hacim konsantrasyonunun etkisi incelenirken,  $Gr = 10^4$  olarak seçilmiştir. Şekil 5.14'de akışkan olarak sadece suyun olduğu nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunun sıfır olduğu hal için akım ve eş sıcaklık eğrileri görülmektedir. Şekil 5.15- 5.18,  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanının, % 1, % 5, % 10 ve % 20 hacim konsantrasyonlarında akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrilerini göstermektedir. Akım çizgileri incelendiğinde, hacim içerisinde 6 adet eliptik şekilli hücre oluştuğu görülmektedir. Hacim konsantrasyonunun artması ile hücre şekillerinde gözle görülebilir bir değişiklik olmamakta ancak akım fonksiyonu değerleri artmaktadır. Bu veriler göz önünde bulundurularak, hacim konsantrasyonunun artması ile hacim içerisindeki akışkan hızının arttığı sonucuna varılabilir.

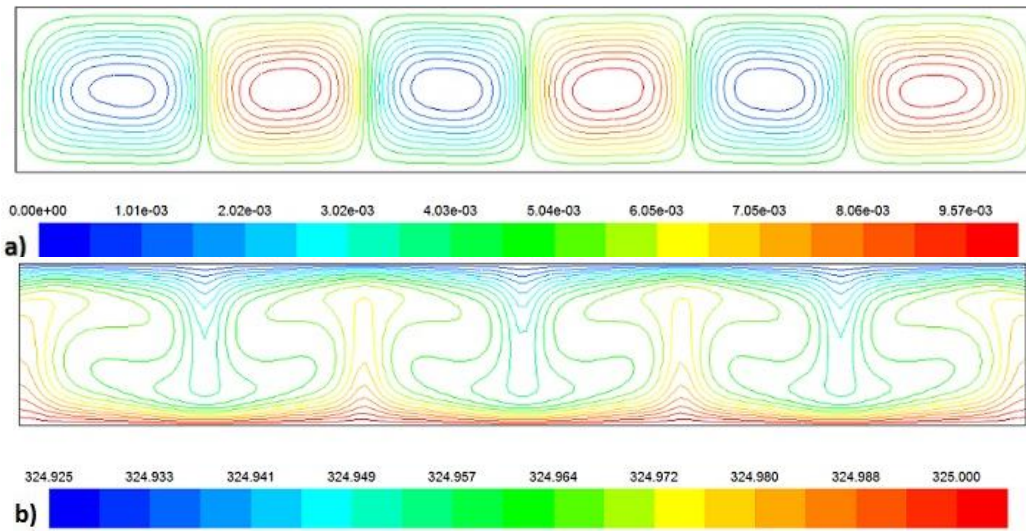
Eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde ise, hacim konsantrasyonunun artması ile sıcaklık eğrilerinin dikdörtgen merkezinden uzaklaşma eğiliminde oldukları görülmektedir. Hacim konsantrasyonu arttıkça eğriler merkezden duvarlara doğru yaklaşarak duvar yüzeyinde ısıl tabaka oluşturmaktadırlar.



**Şekil 5.14 :** Nanoparçacık ilavesinin olmadığı durum için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri

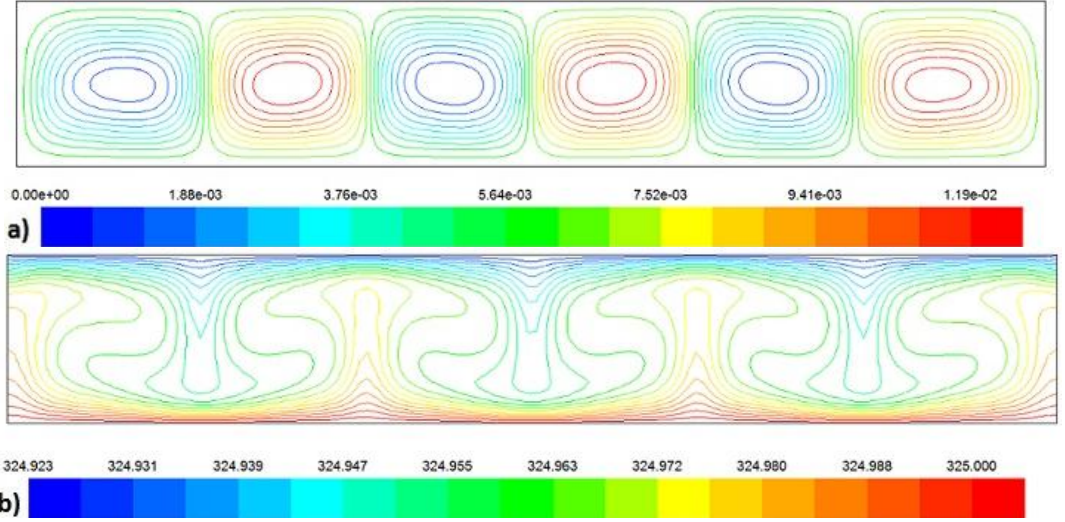


**Şekil 5.15 :**  $Al_2O_3 - Su, \phi = 1\%$  için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri

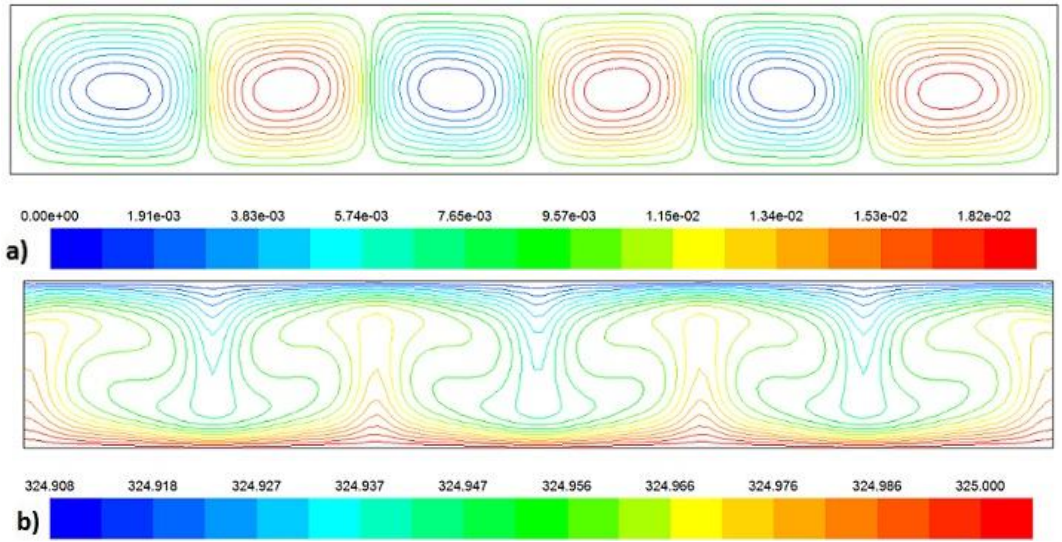


**Şekil 5.16 :**  $Al_2O_3 - Su, \phi = 5\%$  için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri





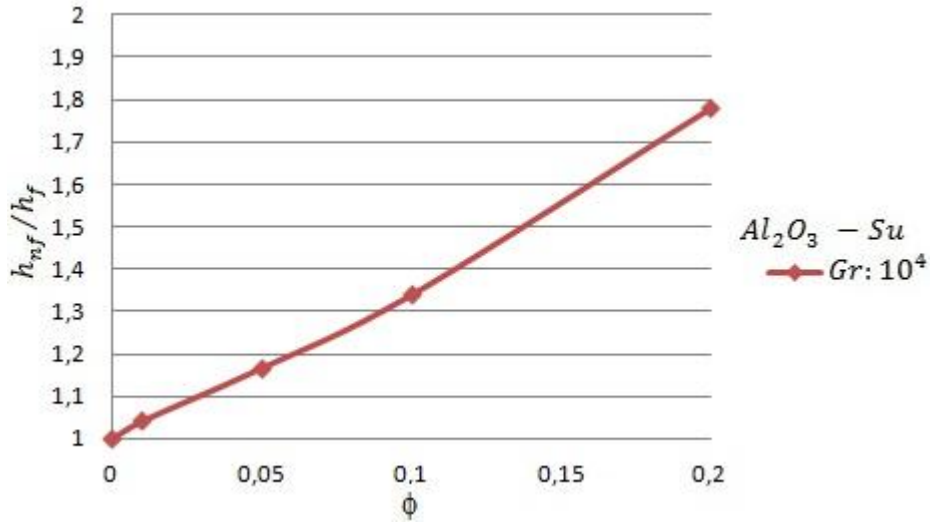
Şekil 5.17 :  $Al_2O_3 - Su$ ,  $\phi = 10\%$  için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri



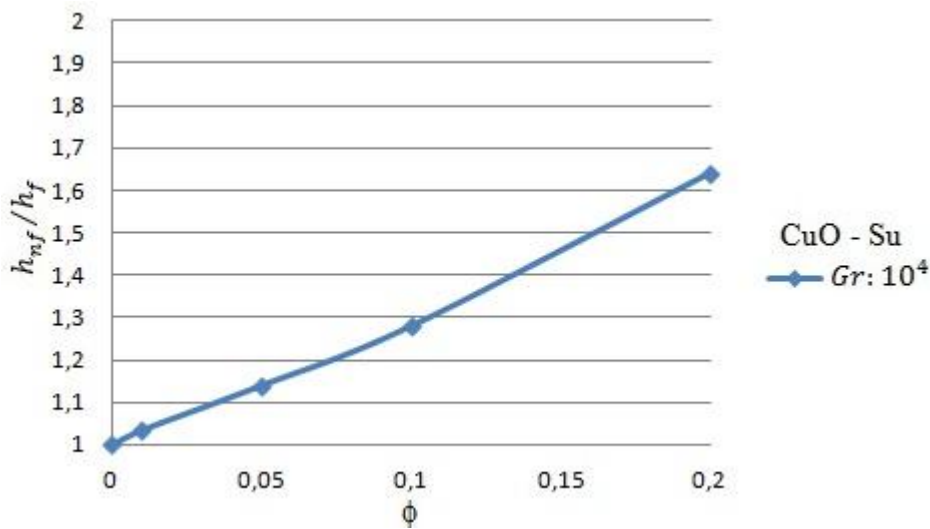
Şekil 5.18 :  $Al_2O_3 - Su$ ,  $\phi = 20\%$  için a) akım çizgileri b) eş sıcaklık eğrileri

Şekil 5.19,  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanının,  $Gr = 10^4$ 'de hacim konsantrasyonu değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisini göstermektedir. Şekil 5.20 ise  $CuO - Su$  nanoakışkanının  $Gr = 10^4$  için, hacim konsantrasyonu değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisini göstermektedir. Her iki grafikten de, hacim konsantrasyonunun artması ile  $h_{nf}/h_f$  değerinin arttığı görülebilmektedir. Bu veriler, nanoparçacık ilavesinin nanoakışkanların ortalama ısı taşınım katsayısını arttırdığını göstermektedir. Örneğin,  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanı için  $Gr = 10^4$ 'de hacim konsantrasyonu % 5 olduğunda ortalama ısı taşınım katsayısı artışı yaklaşık % 16 kadardır. Aynı nanoakışkan için  $Gr = 10^4$ 'de hacim konsantrasyonu % 10'a arttırıldığında ise ortalama ısı taşınım katsayısı artışı yaklaşık % 34 olmaktadır.

CuO – Su nanoakışkanı içinde aynı durum sözkonusudur. Hacim konsantrasyonunun artması ile  $h_{nf}/h_f$  değeri orantılı bir şekilde artmaktadır.



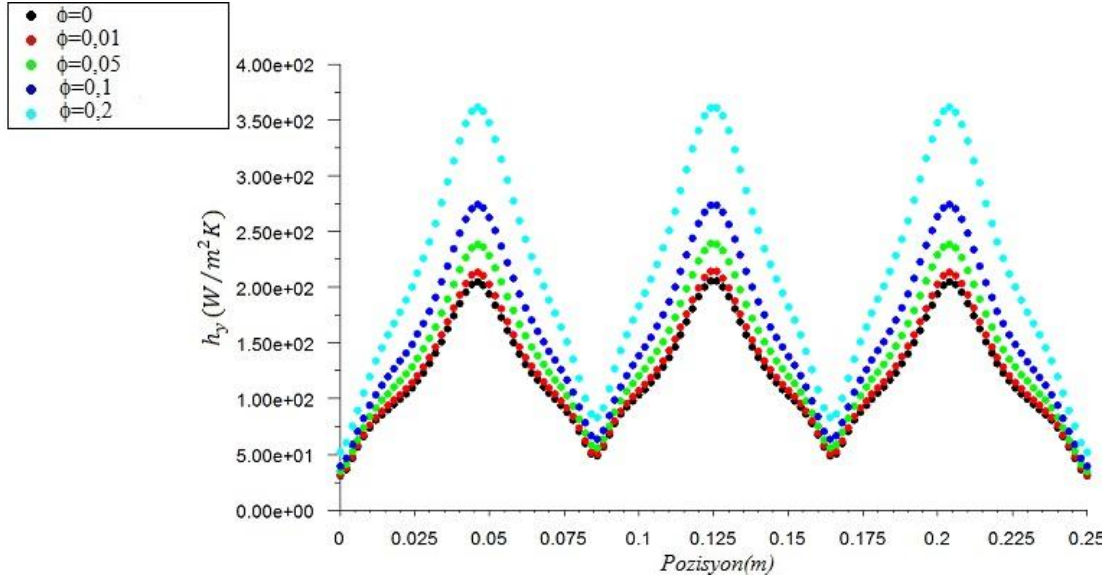
**Şekil 5.19 :**  $Gr = 10^4$ 'de  $Al_2O_3$  – Su nanoakışkanı için hacim konsantrasyonu değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi



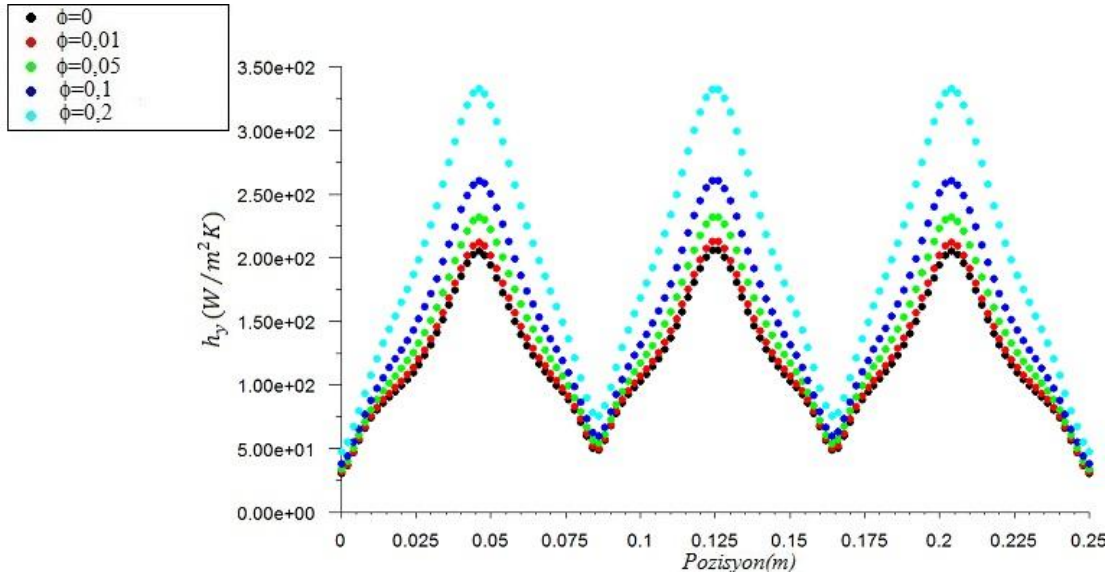
**Şekil 5.20 :**  $Gr = 10^4$ 'de CuO – Su nanoakışkanı için hacim konsantrasyonu değişiminin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi

Şekil 5.21,  $Al_2O_3$  – Su nanoakışkanı için  $Gr = 10^4$ 'de alt yüzey boyunca yerel ısı taşınım katsayısı dağılımını göstermektedir. Şekil 5.22 ise CuO – Su nanoakışkanı için  $Gr = 10^4$ 'de alt yüzey boyunca yerel ısı taşınım katsayısı dağılımını göstermektedir. Şekiller incelendiğinde, yerel ısı taşınım katsayısının kabın başlangıcı olan düşey duvarlarda en düşük değere sahip olduğu ve +x yönü boyunca giderek arttığı görülmektedir. Bu artış hücrelerin yapısı ile açıklanabilir (Xue, 2003). Yerel ısı taşınım katsayısının maksimuma ulaştığı noktalar hücre sınırlarıdır. Her iki

şekilden de, hacim konsantrasyonunun artması ile yerel ısı taşınım katsayısı değerinin arttığı görülebilmektedir. En düşük yerel ısı taşınım katsayısı değerleri, nanoparçacık içermeyen duruma ait değerlerdir. Hacim konsantrasyonunun artması ile yerel ısı taşınım katsayısı değerleri artar ancak katsayı dağılım eğrileri birbirine benzerdir.



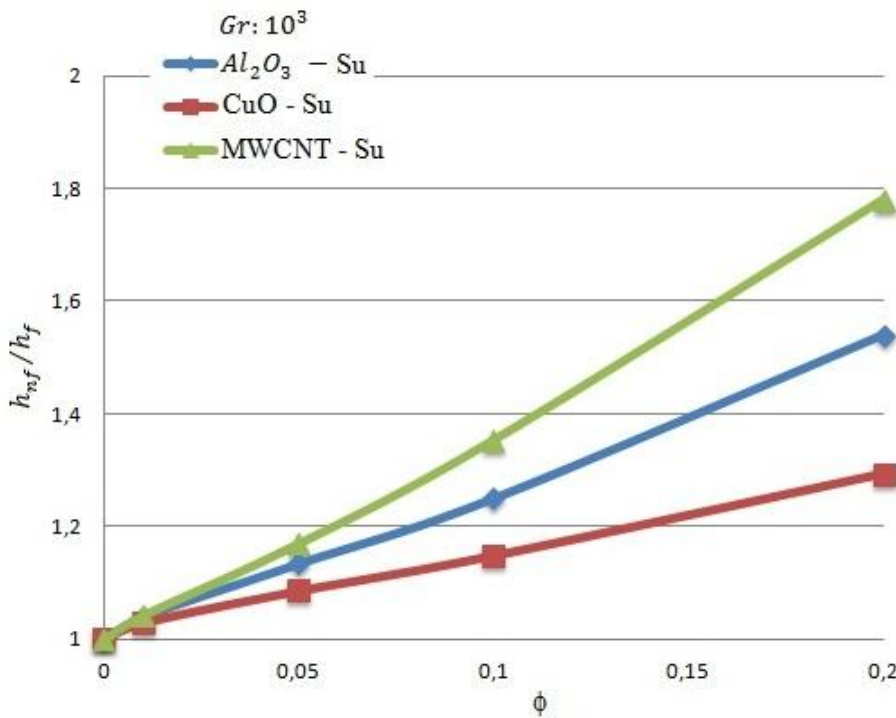
Şekil 5.21 :  $Gr = 10^4$ 'de  $Al_2O_3$  – Su nanoakışkanı için alt yüzey boyunca yerel ısı taşınım katsayısı dağılımı



Şekil 5.22 :  $Gr = 10^4$ 'de  $CuO$  – Su nanoakışkanı için alt yüzey boyunca yerel ısı taşınım katsayısı dağılımı

### 5.3.3 Nanoparçacık çeşidi etkisi

Şekil 5.23'de  $Gr: 10^3$ 'de  $Al_2O_3 - Su$ ,  $CuO - Su$  ve  $MWCNT - Su$  nanoakışkanlarının değişik hacim konsantrasyonları için ortalama ısı taşınım katsayısı değişimleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde,  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanının,  $CuO - Su$  nanoakışkanına göre bütün hacim konsantrasyonlarında daha yüksek ortalama ısı taşınım katsayısına sahip olduğu görülebilir. Aynı şekilde,  $MWCNT - Su$  nanoakışkanı da hem  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanına göre hem de  $CuO - Su$  nanoakışkanına göre daha yüksek ortalama ısı taşınım katsayısına sahiptir. Bu veriler ışığında,  $MWCNT$  nanoparçacığının  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  nanoparçacıklarına göre daha iyi ısı geçişi başarımı gösterdiği sonucuna varılabilir.

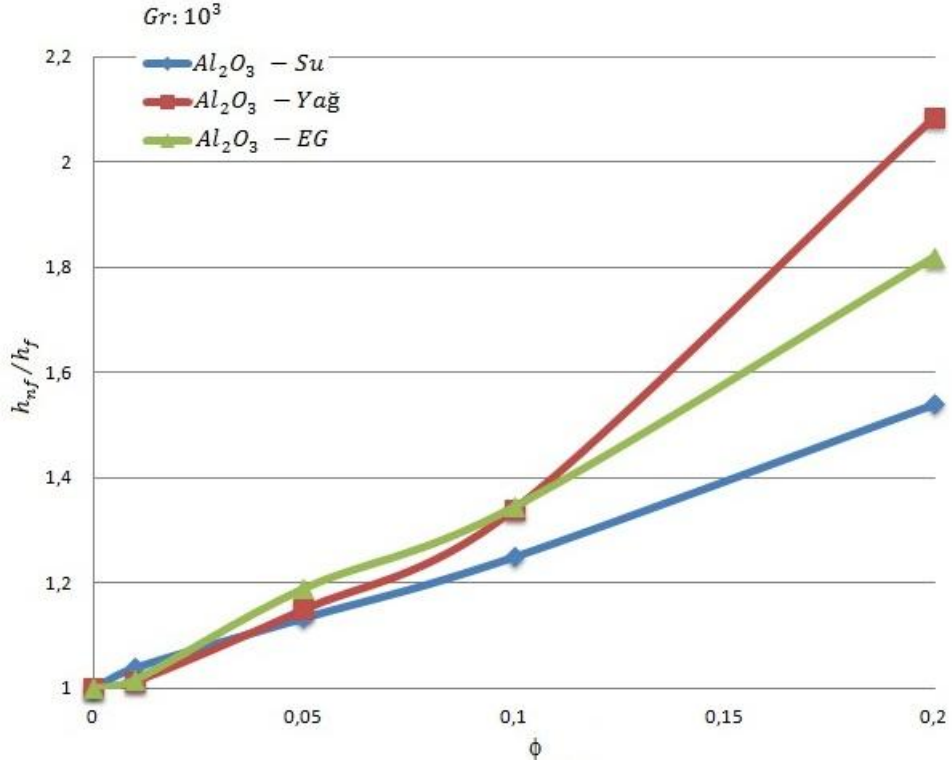


Şekil 5.23 : Nanoparçacık çeşidinin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi

### 5.3.4 Ana akışkan çeşidi etkisi

Şekil 5.24'de,  $Gr: 10^3$  için  $Al_2O_3 - Su$ ,  $Al_2O_3 - Yağ$  ve  $Al_2O_3 - etilen glikol(EG)$  nanoakışkanlarının değişik hacim konsantrasyonları için ortalama ısı taşınım katsayısı oranlarının değişimleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde, hacim konsantrasyonuna göre nanoakışkanların farklı sonuçlar gösterdiği görülmektedir. Hacim konsantrasyonunun %1 olduğu durumda,  $Al_2O_3 - Su$  nanoakışkanı diğerlerine göre daha yüksek  $h_{nf}/h_f$  değeri sağlarken, hacim konsantrasyonunun % 10 olduğu duruma kadar  $Al_2O_3 - EG$  nanoakışkanı en yüksek  $h_{nf}/h_f$  değerini

sağlamaktadır. Hacim konsantrasyonu % 10 üzerine çıktığında ise  $Al_2O_3$  – Yağ nanoakışkanı diğerlerine göre daha yüksek  $h_{nf}/h_f$  değeri sağlamaktadır. Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, yağ ve etilen glikol ile suya nazaran daha yüksek ısı geçişi artırımını elde edilebileceği görülmektedir.



Şekil 5.24 : Ana akışkan çeşidinin ortalama ısı taşınım katsayısı üzerine etkisi



## 6. SONUÇ ve TARTIŞMA

Isı geçişi etkinliğindeki bir artışın, bir ürünün veya sürecin kalitesi, miktarı veya maliyeti için faydalı olabileceği sonsuz sayıda durum bulunmaktadır. Bu durumların çoğunda nanoakışkanlar ısı geçişi başarımında artış sağlamak için iyi adaylardır. Örneğin, enerji verimliliğindeki artışların pompa gücünü artırmadan gerçekleştirilebileceği binalarda nanoakışkanlar potansiyel uygulamaya sahiptir. Bu tarz bir uygulama çevreye yararlar sağlarken, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sisteminde enerji tasarrufu sağlayabilir. Yenilenebilir enerji endüstrisinde ise nanoakışkanlar güneş kolektörlerinden depolama tanklarına ısı geçişini artırmak ve enerji yoğunluğunu artırmak için kullanılabilir. Nanoakışkan soğutucu sıvılar; malzeme, kimya, yiyecek ve içecek, yağ ve gaz, kağıt ve matbaacılık ve tekstil gibi önemli proses endüstrilerinde de potansiyel uygulamaya sahiptir.

Birçok endüstrinin çeşitli sayıda kısıtlama altında ısı geçişi oranlarını artırmaya ihtiyacı vardır. Nanoakışkanlar bu tip bir ihtiyacı ve kısıtlamayı karşılama potansiyeline sahiptir. Nanoakışkanların nitelikleri, onları çok sayıda endüstri için cazip kılmaktadır. Fakat bu tür uygulamaları için ideal veya optimize edilmiş nanoakışkanlar hala mevcut değildir. Bu araştırmada, nanoakışkanın ısıl iletkenliği üzerine birçok alanda çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan araştırmaların, nanoakışkanların ısı geçişi karakteristiğini belirleyebilmek için belirli bir mesafe kaydettiği gösterilmiştir. Parçacık boyutu gibi bazı özellikler hala doğrulama gerektirmektedir ve katkı maddelerinin kullanımı çok az ele alınmıştır. Fakat bu çalışmada bahsedilen nanoakışkanların ısı geçişi ile ilgili veriler, uygulama için yararlı bilgiler sağlayabilir.

Nanoakışkanların ısıl özellikleri için birçok model önerilmiş ve simülasyonlar geliştirilmiş olsa da, doğrulanmış genel bir teoriden bahsetmek hala mümkün değildir.

Bu çalışmada, literatürde yer alan deneysel veriler incelenmiş ve diğer modellere göre daha iyi sonuç vermesi dikkate alınarak, ısı iletim katsayılarının belirlenmesi için nanoparçacık etrafında oluşan sıvı tabaka etkisine dayanan Yu – Choi modeli kullanılmıştır.

Çalışmada FLUENT 6.3 ile yapılan sayısal analizde, nanoakışkanların ısı geçişi başarımları, Grashof sayısı, hacim konsantrasyonu, katı parçacık çeşidi, ana akışkan çeşidine göre araştırılmıştır. Sonuçlar, nanoakışkan kullanımı ile önemli ölçüde ısı geçişi artışı elde edildiğini göstermektedir. Nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunun ve Grashof sayısının artmasının ortalama ısı taşınım katsayısını arttırdığı görülmüştür. Farklı katı parçacıklar kullanılarak yapılan incelemede, MWCNT katı parçacıkları kullanılan nanoakışkan,  $Al_2O_3$  ve CuO kullanılanlara göre daha yüksek ortalama ısı taşınım katsayısı değeri vermektedir. Çeşitli ana akışkanlar için yapılan analizde ise yağ ve etilen glikol ısı transfer akışkanları ile suya nazaran daha yüksek ısı geçişi artırımı elde edilebileceği görülmüştür. Bunun nedeni, yağ ve etilen glikolün suya göre daha düşük ısı iletkenliğe sahip olmasıdır.

Nanoakışkan araştırma sürecinde gelecekteki adımlarda; ideal parçacık boyutu ve şekli, parçacık hacim konsantrasyonu, akışkan katkı maddesi ve ana akışkan gibi öğeleri dikkate alarak ısı transfer artışına ve fiziksel mekanizmalarına odaklanmak yararlı olacaktır. Mühendislik tasarımları geliştirebilmek için nanoakışkanların daha iyi bir şekilde nitelendirilebilmesi önemlidir.



## KAYNAKLAR

- Cao, H. L., Qian, X. F., Gong, Q., Du, W. M., Ma, X. D. and Zhu, Z. K.,** (2006). Shape- and Size-Controlled Synthesis of Nanometer ZnO from a Simple Solution Route at Room Temperature, *Nanotechnology*, **17**, 3632-3636.
- Cao, Q. and Tavares, J.,** (2006). Dual Plasma Synthesis of Coated Nanoparticles and Nanofluids.
- Chang, H., Tsung, T. T., Chen, L. C., Yang, Y. C., Lin, H. M., Lin, C. K. and 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., Zhang Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E. and Grulke, E. A.,** (2001). Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions. *Applied Physics Letters*, **79**, 2252-2254.
- Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W.,** (2003). Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, **125**, 567-574.
- Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W. and Thompson, L. J.,** (2001). Anomalous Increased Effective Thermal Conductivity of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles, *Applied Physics Letters*, **78**, 718-720.
- Einstein, A.,** (1906). Eine Neue Bestimmung der Moleküldimensionen, *Annalen der Physik*, **19**, 289-306.
- Faulkner, D. J., Rector, D. R., Davidson, J. and Shekarritz, R.,** (2004). Enhanced Heat Transfer through the Use of Nanofluids in Forced Convection. *The Proceeding of IMECE 2004*, Anaheim, California, USA, November 13-19.
- Hamilton, R. L. and Crosser, O. K.,** (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two component systems, *I&EC Fundam*, **1**, 182-191.
- Hwang, K. S., Lee, J.H. and Jang, S.P.,** (2007). Buoyancy-driven Heat Transfer of Water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids in a Rectangular Cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, 4003-4010.
- Jang, S.P. and Choi, S. U. S.,** (2004a). Free convection in a rectangular cavity (Benard convection) with nanofluids, *Proceedings of IMECE*, Anaheim, California, USA. 13-19.
- Jang, S.P. and Choi, S. U. S.,** (2004b). Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, *Applied Physics Letters*, **84**, 4316-4318.

- Kakaç, S. and Pramuanjaroenij, A.,** (2009). Review of Convective Heat Transfer with Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, 3187-3196.
- Khanafer, K., Vafai, K. and Lightstone, M.,** (2003). Bouyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, 3639-3653.
- Kim, J., Kang, J. T. and Choi, C. K.,** (2004). Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids, *Physics of Fluids*, **16**, 2395-2401.
- Koo, J. and Kleinstreuer, C.,** (2004). A new thermal conductivity model for nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, **6**, 577-588.
- 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.
- Maiga, S. E. B., Nguyen, C. T., Galanis, N. and Roy G.,** (2004a). Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube, *Superlattices and Microstructures*, **35**, 543–557.
- Maiga, S. E. B., Nguyen, C. T., Galanis, N. and Roy, G.,** (2004b). Hydrodynamic and thermal behaviours of a nanofluid in a uniformly heated tube, *Vol. 5 of Computational Studies*, WIT Press, Southampton, SO40 7AA, United Kingdom, Lisbon, Portugal, 453–462.
- Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K. and Hishinuma, N.,** (1993). Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles, *Netsu Bussei*, **7**, 227-233.
- Maxwell, J. C.,** (1881). A Treatise on Electricity and Magnetism, 2nd Edition, Clarendon Press, Oxford, UK.
- Ögüt, E. B.,** (2009). Natural convection of water-based nanofluids in an inclined enclosure with a heat source, *International Journal of Thermal Sciences*, **48**, 2063-2073.
- Öztop, H. F. and Abu-Nada, E.,** (2008). Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **29**, 1326-1336.
- Pak, B. C. and Cho, Y. I.,** (1998). Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles, *Experimental Heat Transfer*, **11**, 151-170.
- Prasher, R., Phelan, P. E. and Bhattacharya, P.,** (2006). Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions, *Nano Letters*, **6**, 1529-1534.
- Roy, G., Nguyen, C. T. and Lajoie, P. R.,** (2004). Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids, *Superlattices and Microstructures*, **35**, 497–511.
- Santra, A.K., Sen, S. and Chakraborty, N.,** (2008). Study of Heat Transfer Augmentation in a Differentially Heated Square Cavity using Copper–

- water Nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, **47**, 1113-1122.
- Srdic, V. V., Winterer, M., Möller, A., Miehe, G. and Hahn, H.**, (2001). Nanocrystalline Zirconia Surface-Doped with Alumina: Chemical Vapor Synthesis, Characterization and Properties, *Journal of the American Ceramic Society*, **84**, 2771-2776.
- Wang, B. X., Zhou, L. P. and Peng, X. F.**, (2003). A Fractal Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Liquid with Suspension of Nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, 2665-2672.
- Wang, X., Xu, X. and Choi, S. U. S.**, (1999). Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **13**, 474-480.
- Wang, X. Q.**, (2007). New Approaches to Micro-Electronic Component Cooling, A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Chapter 7, 161-176.
- Wang, X. Q., Mujumdar, A. S. and Yap, C.**, (2006). Free convection heat transfer in horizontal and vertical rectangular cavities filled with nanofluids, in: *International Heat Transfer Conference IHTC-13*, Sydney, Australia.
- Wang, X. Q. and Mujumdar, A. S.**, (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *International Journal of Thermal Sciences*, **46**, 1-19.
- Xie, H., Fujii, M., and Zhang, X.**, (2005). Effect of Interfacial Nanolayer on the Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **48**, 2926-2932.
- Xuan, Y., Li, Q. and Hu, W.**, (2003). Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids, *Aiche Journal*, **49**, 1038–1043.
- Xuan, Y. and Roetzel, W.**, (2000). Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **43**, 3701-3707.
- Xuan, Y. and Yao, Z.**, (2005). Lattice boltzmann model for nanofluids, *Heat and Mass Transfer/Waerme und Stoffuebertragung*, **41**, 199–205.
- Xue, Q. Z.**, (2003). Model for effective thermal conductivity of nanofluids, *Physics Letters*, **307**, 313–317.
- Xue, L., Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., and Eastman, J. A.**, (2004). Effect of liquid layering at the liquid-solid interface on thermal transport, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, 4277–4284.
- Yu, C. J., Richter, A. G., Datta, A., Durbin, M. K. and Dutta, P.**, (2000). Molecular Layering in a Liquid on a Solid Substrate: an X-Ray Reflectivity Study, *Physica B*, **283**, 27-31.

- Yu, W., and Choi, S. U. S.,** (2004). The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Hamilton–Crosser Model, *Journal of Nanoparticle Research*, **6**, 355-361.
- Yu, W. and Choi, S. U. S.,** (2003), The Role of Interfacial Layer in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model, *Journal of Nanoparticles Research*, **5**, 167–171.
- Yu, W., France, D. M., Choi, S. U. S. and Routbort, J. L.,** (2007). Review and Assesment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications, Argonne National Laboratory, 1-78.
- Zhu, H. T., Lin Y. S. and Yin Y. S.,** (2004). A Novel One Step Chemical Method for Preparation of Copper Nanofluids, *Journal of Colloid and Interface Science*, **277**, 100-103.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** İsmail Oğuz

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Bolu-1985

**E-Posta:** oguz.ism@gmail.com

**Lisans:** Yıldız Teknik Üniversitesi- Makine Mühendisliği

**Mesleki Deneyim:** Yeni Öztürk Makine

1985 yılında Bolu'da doğdu. Bolu İzzet Baysal Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği bölümüne girdi ve buradan 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Bilimi ve Teknoloji yüksek lisans programına başladı. Halen Bolu'da özel bir firmada Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır.