

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SU ESASLI CuO NANOAKIŞKAN İÇİN PLAKALI ISI DEĞİŞTİRGEÇİNDE**  
**PERFORMANS İNCELEMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mustafa Suat HACİSALİHOĞLU**

**ŞUBAT 2021**  
**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SU ESASLI CuO NANOAKIŞKAN İÇİN PLAKALI ISI DEĞİŞTİRGEÇİNDE**  
**PERFORMANS İNCELEMESİ**

**Mustafa Suat HACISALİHOĞLU**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**“DOKTOR (Makine Mühendisliği)”**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21.01.2021**  
**Tezin Savunma Tarihi : 24.02.2021**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU**

**Trabzon 2021**

## ÖNSÖZ

Üniversite, enstitü ve özel araştırma kurumlarında yapılan çeşitli AR-GE çalışmaları ile birlikte, teknolojik uygulamada önemli gelişmeler yaşanmakta ve buna bağlı olarak da toplumsal gelişme ortaya çıkmaktadır. Özellikle üniversitelerde, değişen gereksinimler ve koşullara uygun olarak yapılan teorik ve sayısal çalışmaların deneysel çalışmalarla bütünleşik olarak yürütülmesi günümüzde bilimsel zeminlerde kabul görmektedir. Bu bağlamda yazılım destekli olan uygulamaya yönelik çalışmalar oldukça yaygınlaşmıştır. Disiplinlerarası çalışmalar öne çıkmaya başlamış ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Nano boyutta üretilebilen toz metaller ve bunlardan yararlanılarak hazırlanan nanoakışkanlar günümüzde akışkanlar mekaniği ve ısı transferinin önemli konularından bir tanesi haline gelmiştir.

Bu çalışmada; CuO nano tozların özel karıştırma yöntemleri ile suya karıştırılması sonucunda elde edilen çeşitli oranlardaki su esaslı CuO nanoakışkanların model bir tesisattaki plakalı ısı değiştirgecindeki performansı deneysel olarak incelenmiştir.

Tez çalışmama öncülük eden ve destek veren, sürekli yanımda olan başta danışman hocam Prof. Dr. Burhan Çuhadaroğlu olmak üzere laboratuvar ve cihaz desteği sağlayan KTÜ Rektörü Prof. Dr. Hamdullah Çuvalcı'ya, Fen Bilimleri Enstitü Müdürü Prof. Dr. Asım Kadioğlu'na ve Yönetim Kurulu Üyelerine; deneysel çalışmalarda destek sağlayan KTÜ Makina Mühendisliği Bölümüne ve Termodinamik Anabilim Dalına, HİTAŞ çalışanlarına, yardımlarını gördüğüm Dr. Sinan Köse'ye ve emeği geçen herkese teşekkür ediyorum.

Mustafa Suat HACISALİHOĞLU  
Trabzon, 2021

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “SU ESASLI CuO NANOAKIŞKAN İÇİN PLAKALI ISI DEĞİŞTİRGEÇİNDE PERFORMANS İNCELEMESİ” baŐlıklı bu çalıŐmayı baŐtan sona kadar danıŐmanım Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/02/2021

Mustafa Suat HACISALİHOĞLU

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	X
KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Nanoakışkanlar ve Uygulama Alanları.....	3
1.2.1. Genel Bilgiler.....	3
1.2.2. Termofiziksel Özellikler.....	4
1.2.3. Hazırlanma Yöntemleri.....	7
1.2.4. Uygulama Alanları.....	9
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	13
2.1. Teorik Çalışmalar.....	14
2.2. Deneysel Çalışmalar.....	15
2.3. Uygulamada Kullanım Çalışmaları.....	19
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	25
3.1. Nanoakışkan Hazırlama.....	25
3.2. İç Yapı.....	28
3.3. Yapışma Davranışı.....	29
3.4. Çökelme Davranışı.....	31
3.5. Isıl İletkenlik.....	33
3.6. Viskozite.....	37
3.7. Isıtma Tesisatı Deney Düzeneği.....	40
3.8. Belirsizlik Analizi.....	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	47
4.1. Termofiziksel Özellikler.....	47
4.2. Hidrodinamik İnceleme.....	48

4.3. Isıl İnceleme .....	51
5. SONUÇLAR .....	63
6. KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

**SU ESASLI CuO NANOAKIŞKAN İÇİN PLAKALI ISI DEĞİŞTİRGEÇİNDE  
PERFORMANS İNCELEMESİ**

Mustafa Suat HACISALİHOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU  
2021, 70 Sayfa

Çeşitli ısı tekniği uygulamalarında nano-parçacık katkılı akışkanların kullanılması konusunda son yıllarda belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Konu ile ilgili literatürden de anlaşılacağı gibi; kısaca nanoakışkan olarak bilinen nano parçacık katkılı akışkanlar, sağlamakta oldukları bazı avantajlar nedeniyle çeşitli ısı transfer sistemlerinde kullanılmaktadırlar. En belirgin özellikleri ısı iletiminde iyileşme olup, ısı transferinin önemli olduğu mikro kanallarda, ısıtma tesisatlarında ve diğer çeşitli alanlarda aracı akışkan olarak klasik akışkanların yerini almaya başlamışlardır. Nanoakışkanların, nano parçacık katkı oranındaki artış ile ana (baz) akışkana göre ısı transfer özelliklerinin iyileşmesine karşın; viskozite değerlerinde artış, özgül ısı değerlerinde düşme olduğu bilinmektedir. Ayrıca, artan çalışma sıcaklığı ile nanoakışkanların ısı iletkenliğinde artışın olduğu ve diğer özelliklerin de sıcaklıktan etkilenmekte olduğu çeşitli çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur. Bu çalışmada; su bazlı ve bakıroksitli (CuO) nanoakışkanın, hacimsel karışım oranına bağlı olarak ısı iletkenliği, özgül ısı, yoğunluk gibi özelliklerinin yanı sıra mikro-yapı, çökme süresi, topaklaşma ve katkı etkisi gibi işletme özellikleri incelenmiştir. Ayrıca model bir ısıtma tesisatında yer alan plakalı ısı değiştirgeci üzerinde yapılmış olan ısı ve hidrodinamik performans incelemesi ile CuO nanoakışkan için yeni korelasyon bağıntıları önerilmiştir. Deneysel çalışmaların bir bölümü Karadeniz Teknik Üniversitesinin laboratuvarlarındaki kalibrasyonlu deney düzeneklerinde yapılmıştır. Nanoakışkanlar manyetik ve ultrasonik bir karıştırıcı ile hazırlanmıştır. Isı iletkenliği ölçümünde Fourier yasasına uygun olarak çalışan ve dar bir aralıkta tutulan akışkanın farklı ortalama sıcaklıklardaki ısı iletkenlikleri ölçülmüştür. Mikro yapı incelemeleri uygun bir TEM mikroskop altında yapılarak mikro yapıya ait görüntüler üzerinde değerlendirme yapılmıştır. Nanoakışkanların diğer özellikleri çeşitli klasik ölçme yöntemleri ile ölçülmüş ve elde edilen bulgular literatürdeki mevcut bulgular ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Nanoakışkan, CuO, Isı değiştirgeci, Korelasyon.

PhD. Thesis

SUMMARY

PERFORMANCE ANALYSIS OF WATER BASED CuO NANOFUIDS  
IN A PLATE HEAT EXCHANGER

Mustafa Suat HACISALIHOĞLU

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU  
2021, 70 Pages

In recent years, it is seen that there is a significant increase in usage of the thermal systems with nano-particle fluids. It may be understood from the literature on the subject that the nano-particle fluids which are known as nanofluids are used in various heat transfer systems due to their advantages. Their most outstanding feature is to enhance heat conduction and they have been replacing by the classical fluids as a working fluid in micro channels, heating installations and other technical applications where heat transfer is important. Although nanofluids enhance the heat transfer by increasing additive ratio of nano-particles compared to base fluids, it is well known that their viscosity increase and specific heat values decrease by increasing additive ratio. In addition, it has been revealed by the studies in the literature that thermal conductivity of nanofluids increases with increasing temperature and the other characteristics are also affected by temperature. In this thesis, some thermophysical characteristics of water based CuO nanofluids such as thermal conductivity, specific heat, density are analyzed experimentally as well as micro-structure, suspension time, agglomeration and effects of additives by additive ratio of nano-particles. In addition, the thermal and hydrodynamic performance of a plate heat exchanger in a modeled heating system have also been analyzed and some new correlations have been proposed. Some of the experimental studies were performed in the labs of Karadeniz Technical University. The nanofluids were prepared by a magnetic stirrer. The thermal conductivity of the nanofluids were measured by a calibrated experimental apparatus which the nanofluids were kept in a narrow gap. The micro-structure examinations were made under an appropriate SEM microscope and the evaluations were made on the images of the micro-structures. The other properties of nanofluids in the plate exchanger have been measured by various comparative methods and the results are compared to other studies in the literature.

**Key Words:** Nanofluids, CuO, Heat exchanger, Correlation.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.	Nanoakışkanlar konusunda yayınlanmış olan makale sayılarının ScienceDirect verilerine göre olan değişimi..... 13
Şekil 2.	Nanoakışkanların hazırlandığı karıştırıcılar..... 26
Şekil 3.	Çeşitli hacimsel CuO oranlarına sahip katkısız (askorbik asitsiz) örneklerle ait TEM görüntüleri ..... 28
Şekil 4.	Kütleli olarak %6,8 askorbik asit katkılı örneklerle ait TEM görüntüleri ..... 29
Şekil 5.	Galvaniz dökme demir (a) ve pirinç (b) örneklerle ait yapışma testi sonucu..... 30
Şekil 6.	Farklı hacimsel oranlardaki CuO için çökeltme görseli..... 31
Şekil 7.	Çökeltme davranışı ölçüm cihazı ve deney kabı ..... 32
Şekil 8.	$\phi=1,1$ hacimsel orana sahip örnekte üst ve alt seviyelerdeki elektriksel direncin zamanla olan değişimi ..... 33
Şekil 9.	Katkısız örnekler için ısı iletkenliğinin CuO oranına göre değişimi ..... 34
Şekil 10.	Askorbik asit katkılı örnekler için ısı iletkenliğinin CuO oranına göre değişimi ..... 35
Şekil 11.	Isı iletkenliğinin sıcaklığa göre değişimi ..... 36
Şekil 12.	Elektriksel iletkenlik ölçümünde kullanılan TDS cihazı ..... 36
Şekil 13.	Elektriksel iletkenliğinin CuO oranına göre değişimi..... 37
Şekil 14.	Düşen pistonlu viskozimetre ..... 38
Şekil 15.	Düşen pistonlu viskozimetreye ait kalibrasyon eğrisi ve korelasyon bağıntısı ..... 39
Şekil 16.	Nanoakışkan viskozitesinin CuO oranına bağlı olarak değişimi ..... 40
Şekil 17.	Deney düzeneği şeması ..... 42
Şekil 18.	Deney düzeneğine ait çeşitli görseller. .... 43
Şekil 19.	Pompalama gücünün nanoakışkanın hacimsel oranına bağlı olarak değişimi ..... 49
Şekil 20.	Pompalama gücünün <i>Re</i> sayısına bağlı olarak değişimi..... 50
Şekil 21.	Ana devrede basınç düşümünün çeşitli CuO hacimsel oranları (%) için <i>Re</i> sayısına bağlı olarak değişimi ..... 51
Şekil 22.	Isı değiştirgeci etkinliğinin nanoakışkanın hacimsel oranına bağlı olarak değişimi ..... 52
Şekil 23.	Isı değiştirgeci etkinliği ile pompalama gücü arasındaki değişim ..... 53
Şekil 24.	Ortalama ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile olan değişimleri..... 54
Şekil 25.	Nusselt sayısının Peclet sayısı ile olan değişimleri 57

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Çeşitli malzemelerin ısı iletkenlikleri.....	4
Tablo 2. Nanoakışkanların temel uygulama alanları.....	11
Tablo 3. CuO nano tozun fiziksel özellikleri.....	25
Tablo 4. Askorbik asidin fiziksel özellikleri.....	26
Tablo 5. Fiziksel özelliklere ait deneysel çalışmadaki karışım oranları (%).....	27
Tablo 6. Model tesisat deneylerinde kullanılan nanoakışkanlara ait karışım oranları (%).....	27
Tablo 7. Yapışma testi sonuçları.....	30
Tablo 8. Deney düzeneğinde yer alan elemanlar ve özellikleri .....	44
Tablo 9. Ölçüm cihazlarının belirsizlikleri .....	46
Tablo 10. Nanoakışkan örneklerin Denklem (23) ile hesaplanan özgül ısı değerleri.....	55
Tablo 11. Nanoakışkan örneklere ait Prandtl sayıları .....	55
Tablo 12. $Nu = f(\phi, \mu)$ korelasyon bağıntıları.....	57
Tablo 13. Benzer türden ısı değiştirgeçleri için literatürde mevcut olan $Nu = f(\phi, \mu)$ korelasyon bağıntıları .....	59
Tablo 14. $Nu = f(\phi)$ korelasyon bağıntıları .....	60
Tablo 15. Benzer türden ısı aktarıcılar için literatürde mevcut olan $Nu = f(\phi)$ korelasyon bağıntıları.....	62

## KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

### KISALTMALAR

HVAC	: Isıtma Havalandırma ve İklimlendirme
PCM	: Faz Değiştiren Malzemeler
TEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EG	: Etilen Glikol
Cu/EG	: Bakır/Etilen Glikol
LDR	: Işığa Duyarlı Diyot
TDS	: Elektrik İletkenlik ölçü Aleti
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp
PEM	: Proton Exchange Membrane
AZEL M-BUS	: Isı Sayacı Bilgi Aktarma Yazılımı
AZL-10	: Bilgi Aktarım Modülü
PPRC	: Poli Propilen Plastik Boru
$C_6H_8O_6$	: Askorbik Asit
$Gr$	: Grashof Sayısı
$Nu$	: Nusselt Sayısı
$Nu_m$	: Ortalama Nusselt Sayısı
$Ra$	: Rayleigh Sayısı
$Re$	: Reynolds Sayısı
$Pr$	: Prandtl sayısı
$Pe$	: Peclet sayısı

### SEMBOLLER

$A$	: Alan ( $m^2$ )
$C_p$	: Özgül Isı ( $J/kgK$ )
$C_{pnf}$	: Nanoakışkanın Özgül Isısı ( $J/kgK$ )
$C_{paf}$	: Ana Akışkanın Özgül Isısı ( $J/kgK$ )
$C_{pp}$	: Nanoparçacığın Özgül Isısı ( $J/kgK$ )
$D$	: Boru Çapı ( $m$ )
$g$	: Yerçekimi İvmesi ( $m/s^2$ )
$h$	: Isı Taşınım Katsayısı ( $W/m^2K$ )
$k$	: Isı İletim Katsayısı ( $W/mK$ )

$k_{nf}$	: Nanoakışkan Isı İletim Katsayısı (W/mK)
$k_{bf}$	: Ana Akışkan Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
$k_p$	: Nanoparçacık Isı İletim Katsayısı (W/mK)
$\mu$	: Dinamik Viskozite (kg/(ms))
$\mu_{bf}$	: Ana Akışkanın Viskozitesi (kg/(ms))
$\mu_{nf}$	: Nanoakışkanın Viskozitesi (kg/(ms))
$\eta$	: Kinematik Viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$\Delta T$	: Sıcaklık Farkı (K)
$d$	: Nano Parçacıkların Boyutu
$d_o$	: Taşıyıcı (ana) Akışkan İçin Karakteristik Molekül Boyutu
$\beta$	: Karışımdaki Nano Toz CuO Kütlesel Oranı
$\phi$	: Nano Parçacık Hacimsel Oranı
$n$	: Amprik Şekil Faktörü
$R^2$	: Değişim Belirleme Katsayısı
$V$	: Düşme Hızı (m/s)
	: Pompalama Gücü (W)
$Q$	: Debi (m <sup>3</sup> /s)
$\Delta P$	: Toplam Basınç Değişimi (kPa)
	: Soğutucu Akışkan Aldığı Isı (kW/m <sup>2</sup> )
	: Isıtıcı Akışkanın Verdiği Isı (kW/m <sup>2</sup> )
$X_i$	: Bağımsız Değişken
$\rho_p$	: Nano Parçacık Ortalama Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{eff}$	: Nanoakışkanın Efektif Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{bf}$	: Ana Akışkan Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{nf}$	: Nanoakışkan Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{su}$	: Suyun Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{cuo}$	: Bakıroksitin yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$V_{cuo}$	: Bakıroksitin Hacmi (m <sup>3</sup> )
$V_{top}$	: Karışımın Hacmi (m <sup>3</sup> )
$\beta$	: Isıl Genişleme Katsayısı
$Ph$	: Asitlik Derecesi
$T$	: Sıcaklık (°C)
$W_g$	: Grafit Ağırlığı (N)
	: Silisyum dioksit Ağırlığı (N)

$M_{CuO}$	: Bakıroksit kütlesi (N)
$M_{top}$	: Toplam karışım kütlesi (N)
$R_{alt}$	: Alt Direnç Değeri (Ohm)
$R_{üst}$	: Üst Direnç Değeri (Ohm)
$D_R$	: Direnç Bağlı Değişim Değeri (Ohm)
$T_a$	: Akışkan Sıcaklığı (°C)
$T_y$	: Yüzey Sıcaklığı (°C)



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Amaç ve Kapsam

Isıl sistemlerde kullanım amacına göre ısı geçiş performansının iyileşmesi ve buna uygun tasarımların yapılması gerekir. Isıl sistemler çoğunlukla iletim ve taşınım mekanizmalarını birlikte barındırmakta olup, hem katılar içerisindeki ısı iletimi hem de akışkanda ortaya çıkan ısı taşınımını üzerinde bilimsel inceleme yapılmasını gerektiren birçok parametre açısından incelenirler. Bilindiği üzere metaller gibi katı malzemelerin ısıl iletkenlikleri akışkanların ısıl iletkenliklerine göre çok daha yüksektir. Örneğin bakırın 300 K sıcaklıkta 400 W/mK olan ısı iletim katsayısı, suyun aynı sıcaklıktaki ısı iletim katsayısına göre yaklaşık olarak 660 kat daha fazladır. Akışkanların katılara göre daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olmalarına karşın taşınım özellikleri nedeniyle ısı geçişinde iyileşme sağlarlar.

Sistemden ısı çekmek ya da sisteme ısı sağlamak üzere teknikte uygulanan yöntemlerin hepsinde ısı geçişini iyileştirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu alanda ilgi çeken araştırma konularından bir tanesi de akışkanlara nano boyutta metal tozlarının katılması ile elde edilen nanoakışkanlardır. Isı iletkenliği düşük olan sıvı akışkanların ısı iletkenlik değerlerini artırmak amacıyla içlerine karıştırılan nano boyutlu metal tozları sayesinde ısıl iletkenlikleri artmakta ve bu şekilde hazırlanan nanoakışkanlar çeşitli uygulamalarda aracı akışkan olarak kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda ve güç çevrimlerinde, mikro kanal akışlarında ve ısıtma tesisatlarında klasik aracı akışkan yerine tercih edilmektedirler.

Nanoakışkanların kullanıma girmeleri ile birlikte termo-fiziksel özellikleri ve hidrodinamik özellikleri üzerine yapılan araştırmalar da yaygınlaşmaya başlamıştır. Nanoakışkanların, nanoparçacık katkı oranındaki artış ile saf baz (ana) akışkana göre ısı transfer özelliklerinin iyileşmesine karşın; viskozite değerlerinde artış, özgül ısı değerlerinde düşme olduğu bilinmektedir. Ayrıca, artan çalışma sıcaklığı ile nanoakışkanların ısı iletkenliğinde artışın olduğu ve diğer özelliklerin de sıcaklıktan etkilenmekte olduğu çeşitli çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur. Nanoakışkanların, yüksek ısı iletimi, stabilite, topaklaşmama, düşük erozyon ve pompalama gücü gibi özellikleri taşınması istenir. Genellikle  $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $TiO_2$  gibi nano parçacıkların topaklaşma önleyici bazı katkıları

kullanılarak sentezlenmesi ile elde edilen nanoakışkanların ısı davranışı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çeşitli nano parçacıkların %0,1 ila %5 aralığındaki hacimsel oranı için ısı iletkenlikte önemli bir artışın olduğu birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur.

Nanoakışkanların temel fiziksel özelliklerinin yanı sıra, teknikteki kullanım amaçlarına ve koşullarına uygun deneysel incelemeler de yapılmaktadır. Isıl sistemlerde nanoakışkan kullanımı ile birlikte ortaya çıkan performans değişimini etkileyen bazı unsurlar mevcuttur. Nanoakışkanların; viskozite, topaklaşma davranışı, erozyon etkisi gibi özelliklerinin pompalama gücü ve ısı geçişi üzerinde sıcaklığa ve debiye bağlı olarak etkili olduğu bilinmektedir. Ayrıca nanoakışkan içerisinde ortaya çıkan yeni akışkan yapısının ısı sistemde kullanılan malzemeler ve çeşitli elemanlar üzerinde belirli bir etkisinin olacağı da açıktır. Özellikle vanalar, geçiş parçaları, dirsekler, ısı değiştiriciler vb. elemanlarda ortaya çıkabilen birikme ve topaklaşmanın önlenmesi amacıyla nanoakışkanlara uygulanan katkı malzemelerin oranı ve özellikleri incelemeye değer konular olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer bir deyişle uygulamada yaşanabilecek bazı pratik sorunların çözümü için özellikle deneysel çalışmalara gereksinim vardır.

Bu tez çalışmasında çeşitli oranlarda hazırlanmış su bazlı bakıroksit (CuO) nanoakışkanın termo-fiziksel özellikleri ve model bir ısıtma tesisatındaki performansı deneysel olarak incelenmiştir. Dört ana bölümden oluşan bu tez çalışmasının birinci bölümünde nanoakışkanlar hakkında temel bilgiler derlenmiş ve hazırlanma yöntemleri üzerinde durulmuştur. Yine bu bölümde nanoakışkanların teknolojideki uygulama alanları hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir. Tezin ikinci bölümünde konu ile ilgili literatür gözden geçirilerek literatürde yer almayan ve incelenmesi gereken noktalar belirlenmiştir. Tez çalışması kapsamında hazırlanmış olan CuO nanoakışkanın çeşitli termo-fiziksel özellikleri için yapılmış olan deneyler tezin üçüncü bölümünde yer almaktadır. Ayrıca özel olarak hazırlanmış olan bir model ısıtma tesisatında aracı akışkan olarak kullanılan CuO nanoakışkan için çeşitli koşullar altında yapılmış olan deneysel çalışmanın detayları bu bölümde verilmiştir. Çalışmadan elde edilmiş olan bulgular dördüncü bölümde ele alınarak değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Beşinci bölümde çalışmanın sonuçları ve bilimsel literatüre yapılacak olan katkılar üzerinde durulmuştur.

Tez çalışmasında yapılmış olan çalışmalarda kullanılan çeşitli ölçme sistemleri, test cihazları, taramalı elektron mikroskobu, ultrasonik karıştırıcı için büyük ölçüde KTÜ laboratuvarlarından yararlanılmıştır. Tesisat deneyleri ise malzeme temininde kolaylık ve

pratik olması açısından *HİTAŞ Hacısalihoğlu İnşaat ve Ticaret A.Ş.* bünyesindeki test merkezinde kurulmuş olan model ısıtma tesisatı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

## **1.2. Nanoakışkanlar ve Uygulama Alanları**

### **1.2.1. Genel Bilgiler**

Endüstriyel işlemlerde ısı transferi ile ilgili çeşitli uygulamalar mevcuttur. Bu işlemlerde ısı kaynağının niteliğinin yanı sıra ısıtmanın ve soğutmanın performansı da önemlidir. Isıtma ya da soğutmanın iyileştirilecek olması; enerjinin ekonomik kullanılması, işlem zamanından tasarruf, sistemin çalışma ömrünün uzaması gibi olumlu sonuçlar sağlar. Isı transferinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar çeşitli alanlarda yoğunlaşmıştır. Genişletilmiş yüzeyler, titreşim, mikro kanal kullanımı gibi tekniklerin yanı sıra taşıyıcı akışkanın ısıl iletkenliğinin artırılması da ısı transferinde iyileşme sağlar. Bilindiği gibi su, etilen glikol, motor yağı gibi yaygın akışkanların ısıl iletkenlikleri katıların ısıl iletkenliklerine göre daha düşüktür. Katıların bu özelliğinden yararlanmak üzere akışkanlara küçük katı parçacıklar karıştırılmak suretiyle daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanoakışkanlar geliştirme yoluna gidilmiştir (Sivashanmugam, 2012).

Oda sıcaklığında bakırın ısıl iletkenliği suya göre yaklaşık olarak 700 kat, motor yağına göre de yaklaşık olarak 3000 kat daha yüksektir (Tablo 1). Bu nedenle içerisinde asılı katı metalik parçacıklar içerebilen akışkanların ısıl iletkenliklerinin klasik ısı transferi akışkanlardan önemli oranda yüksek olması beklenir. 100 yıldan fazla bir süredir bilim insanları ve araştırmacılar sıvıların ısıl iletkenlik özelliğini bu şekilde artırabilmek için önemli bir çaba göstermişlerdir. Maxwell (1881)'den bu yana yapılmış olan çeşitli teorik ve deneysel çalışma sonucunda nanoakışkanlar konusunda günümüzde önemli bir birikim sağlanmış durumdadır. Nanoakışkanların hazırlanmasında ve kullanılmasında ortaya çıkabilecek olan çökelme, akışta malzeme erozyonu, tıkanma, basınç düşümü gibi sorunların aşılması konusunda çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Das ve Choi, 2009).



Tablo 1. Çeşitli malzemelerin ısı iletkenlikleri (Das ve Choi, 2009).

	<b>Malzeme</b>	<b>Isıl iletkenlik (W/mK)</b>
Metalik	Gümüş	429
	Bakır	401
	Alüminyum	237
Metalik olmayan katılar	Elmas	3300
	Karbon nanotüp	3000
	Silikon	148
	Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40
	Bakır oksit	30
Metalik sıvı	Sodyum (644 K'de)	72.3
Metalik olmayan sıvılar	Su	0.613
	Etilen glikol	0.253
	Motor yağı	0.145

Nanoakışkanların işlevsel olarak uygulamada etkin bir şekilde kullanılması için bazı temel özellikleri taşımaları gerekmektedir. Diğer bir deyişle yeni tür nanoakışkan geliştirmede göz önünde tutulması gereken bazı temel ölçütler mevcuttur. Elde edilmiş olan birikime göre bu özellikler:

1. Isıl iletkenliğin yüksek olması
2. Yüksek stabilite (uzun süre topaklaşmadan ve çökmeden kalabilmesi)
3. Küçük konsantrasyon ve Newtonumsu davranış
4. Erozyona neden olmamak
5. Parçacık boyutuna bağlı olmamak

olarak sıralanmaktadır (Das ve Choi, 2009). Günümüzde modern teknoloji ile metalik ya da metalik olmayan nanoparçacıklar 100 nm boyutun altında üretilebilmektedir. Nanoparçacıkların; mekanik, optik, manyetik ve ısı özellikleri bütün durumdaki malzeme özelliklerine göre çok daha üstün durumdadır. Bu özelliğin tespit edilmesi ile birlikte ısı mühendisliğinde nanoteknoloji kullanımı da yaygınlaşmaya başlamış ve yeni bir araştırma alanı doğmuştur (Das vd., 2008).

### 1.2.2. Termofiziksel Özellikler

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ısı transferi ve akış davranışının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Isıl iletkenlik, viskozite, özgül ısı ve yoğunluk temel termofiziksel özellikler olarak nanoakışkan kullanımında bilinmesine gerek duyulan

özelliklerdir. Bu özellikler sadece nano parçacıkların hacimsel oranına bağlı olmayıp, aynı zamanda parçacık şekli, karışımın içeriği, yüzeyde kayma mekanizması gibi parametrelere de önemli ölçüde bağlıdır. Bilimsel çalışmalar göstermektedir ki; nanoakışkanların viskoziteleri de ısı iletkenlikleri gibi ana akışkana göre daha yüksektir. Bugüne kadar yapılmış olan çeşitli çalışmalar ile nanoakışkanların ısı iletkenlikleri ve dinamik viskoziteleri için çeşitli korelasyon bağıntıları geliştirilmiştir. Ancak iç mekanizmanın tam olarak anlaşılammış olmasından dolayı genel bir korelasyon bağıntısı henüz elde edilememiştir (Sivashanmugam, 2012).

Elektrik devrelerinde iletkenlik için önerilmiş olan modele (Maxwell, 1881) analogi kurularak, göreceli olarak büyük parçacıklar içermekte olan katı-sıvı karışımının ısı iletkenliği için:

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_p + 2k_{nf} + 2\phi(k_p - k_{nf})}{k_p + 2k_{nf} - \phi(k_p - k_{nf})} k_{bf} \quad (1)$$

bağıntısı temel bir model olarak göz önüne alınmıştır. Burada  $k_p$  parçacıkların ısı iletkenliği,  $k_{nf}$  nanoakışkanın ısı iletkenliği,  $k_{bf}$  ana akışkanın ısı iletkenliği ve  $\phi$  asılı parçacıkların hacimsel oranıdır. Isı iletkenliğin deneysel olarak genel davranışı; küçülen parçacık boyutu ile artması şeklindedir. Bu davranış teorik olarak nanoparçacıkların yapmakta olduğu Brownian hareketi ile açıklanmaktadır. Isı iletkenliğin küçülen parçacık boyutu ile azalmakta olduğunu gösteren deneysel çalışmalar da literatürde mevcuttur (Sivashanmugam, 2012).

Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri; parçacık boyutunun yanı sıra parçacıkların malzemesine, ana akışkanın türüne, parçacıkların boyutuna, parçacıkların şekline ve geometrisine, topaklaşma davranışına ve  $pH$  değerine de bağlıdır. Özerinç vd.(2010) tarafından yapılmış olan çalışmada konu ile ilgili olarak geniş bir literatür özeti verilmiştir. İlk bakışta ısı iletkenlik değeri yüksek olan parçacıklardan oluşan nanoakışkanın ısı iletkenlik değerinin, ısı iletkenlik değeri daha düşük parçacıklardan oluşan nanoakışkana göre daha yüksek olacağı zannedilebilir. Ancak bunun böyle olmadığını gösteren çalışmalar literatürde mevcuttur. Örneğin  $Al_2O_3$ 'ün ısı iletkenliğinin  $CuO$ 'nun ısı iletkenliğinden daha yüksek olmasına rağmen,  $Al_2O_3$  nanoparçacıklı nanoakışkanın ısı iletkenliğinin  $CuO$  nanoparçacıklı akışkanın ısı iletkenliğinden daha düşük olduğu deneysel olarak gösterilmiştir (Özerinç vd., 2010). Bunun temel nedeni;  $Al_2O_3$  parçacıklarının  $CuO$

nanoparçacıklara göre daha fazla topaklaşma davranışı göstermesidir. Bu nedenle parçacık malzemesinin nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerinde en etkin parametre olduğu söylenemez.

Ana akışkan türünün nanoakışkanlarının ısı iletkenlik değeri üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalardan elde edilmiş olan bulgular genel olarak Denklem (1) ile verilen değışime uygun sonuçlar vermektedir. Buna göre; ana akışkanın ısı iletkenliği azaldıkça nanoakışkanın da ısı iletkenliği azalmaktadır (Özerinç vd., 2010).

Parçacık boyutu ısı iletkenliği etkileyen önemli bir parametredir. Nanoparçacık ortalama boyutunun büyümesi ile nanoakışkanların ısı iletkenlik değeri de önemli ölçüde düşmektedir. Örneğin; etilen glikol içerisine  $Al_{70}Cu_{30}$  tozu karıştırılarak elde edilmiş olan nanoakışkan ile yapılmış olan bir çalışmada, 9 nm'den 83 nm'ye kadar değışen boyutlardaki parçacıklar ile elde edilmiş olan bulgulara göre ısı iletkenlikteki iyileşme katkısız duruma göre %38'den %3'e kadar düşmektedir. Aynı bulgu benzer çalışmalarda da elde edilmiştir. Bu davranışın tersi yönünde elde edilmiş olan bulguların nedeni olarak parçacıkların topaklaşma davranışı gösterilmiştir (Özerinç vd., 2010).

Nanoakışkanlarda kullanılmakta olan parçacıklar genel olarak küresel ya da silindirik şekildedirler. Parçacıkların bu şekli ile ısı iletkenlik arasındaki ilişki üzerine yapılmış olan bir çalışmadan elde edilmiş olan bulgulara göre; %4.2 hacimsel orandaki küresel şekle sahip olan parçacıklı nanoakışkanların ısı iletkenliğindeki artış %15.8 iken; %4 hacimsel oranda silindirik şekle sahip parçacıkların bulunduğu nanoakışkanın ısı iletkenliğindeki artış %22.9 olmuştur. Bunun nedeni silindirik parçacıkların daha büyük uzunluk/çap oranına sahip olmasıdır. Bu üstünlüğe karşın silindirik parçacıklı nanoakışkanların viskozite değeri artışı olduğu ve dolayısıyla daha fazla pompalama gücü gerektireceği de göz önünde tutulmalıdır (Özerinç vd., 2010).

Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri üzerinde sıcaklığın, topaklaşmanın, *pH* değeri de etkili olduğu bilinmektedir. Genel eğilim olarak artan sıcaklık ile ısı iletkenlik azalmakta iken, topaklaşma ile doğrusal bir ilişkinin olmadığı (farklı hacimsel oranlarda) gözlenmiştir. Öte yandan *pH*'ın etkisi konusunda yapılmış olan sınırlı sayıda araştırmaya göre; artan *pH* değeri ile birlikte (azalan asitlik) ısı iletkenlik değeri de düşmektedir (Özerinç vd., 2010).

Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri üzerine yapılmış olan deneysel çalışmalara göre viskozitelerinin incelenmiş olduğu çalışma sayısı çok daha sınırlı sayıdadır. Viskozite ile ilgili olarak geliştirilmiş olan birkaç model günümüzde de benimsenmiştir. Deneysel bulgulara göre elde edilmiş olan bu modeller nanoakışkanlarda parçacıkların hacimsel oranlarındaki artış ile birlikte viskozitenin de doğal olarak artmakta olduğunu ifade

etmektedir (Sivashanmugam, 2012). Viskozitenin etkisi üzerine Rudyak, V. Y. (2013) tarafından yapılmış olan çalışmada katkısız akışkanın viskozitesine olan oranı tanımlayan genel bir bağıntı önerilmiştir:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \frac{0.013}{3.43} \left( 2.5 + \frac{0.013}{3.43} \right) \varphi + (7.35 + \frac{0.013}{3.43}) \varphi^2 \quad (2)$$

Burada  $d$ ; nanoparçacıkların boyutu,  $d_0$  taşıyıcı (ana) akışkan için karakteristik molekül boyutu,  $\varphi$  ise hacimsel orandır. Öte yandan nanoakışkanların viskoziteleri ile nano parçacık çapları arasındaki ilişki için literatürde yapılmış olan çalışmaların gözden geçirilmiş olduğu bir çalışmada; aynı hacimsel oranlardaki karışımlarda bile farklı parçacık çaplarının viskozite üzerindeki etkisi farklı davranış göstermektedir (Koca vd., 2018). Bu bulguya ait yapılan yorumlamada, nanoakışkanların üretim yöntemleri ve ölçme yöntemlerinin farklı bulgular üzerinde etkili olabileceği ifade edilmektedir. Ayrıca karışımlarda kullanılan katkı maddelerinin detaylı olarak verilmediği ve çoğu çalışmada katkı maddelerinden hiç bahsedilmemiş olduğu dile getirilmektedir. Öte yandan parçacık boyutlarının aynı olmasına rağmen, literatüre girmiş olan çalışmalarda parçacık şekli ve geometrisi konusunda da yeterli bilgilerin verilmemiş olması, viskozite etkisi hakkında tutarlı sonuçların ortaya konulmasında bir engel teşkil etmektedir (Koca vd., 2018).

İki fazlı karışımlara ait klasik formüller kullanılarak nanoakışkanların yoğunluk ve özgül ısıları modellenebilir. Bu konuda ana akışkanın ve parçacıkların özelliklerine bağlı olarak literatürde kabul gören ifadeler (Sivashanmugam, 2012):

$$\rho_{\text{nanofluid}} = (1 - \varphi)\rho_{\text{fluid}} + \varphi\rho_{\text{particle}} \quad (3)$$

$$(\rho C_p)_{\text{nanofluid}} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_{\text{fluid}} + \varphi(\rho C_p)_{\text{particle}} \quad (4)$$

### 1.2.3. Hazırlanma Yöntemleri

Nanoakışkanların hazırlanması nano boyutlu parçacıkların bir akışkan içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlayabilen özel bazı yöntemler gerektirir. Metal, oksit, karpit ve nanotüp malzemelerden oluşan nano parçacıkların üretiminde ise mikro emülsiyon sentezi, kimyasal sentez, mekanik aşındırma, çökeltme, kimyasal buhar ayrıştırması ve lazer

buhar ayrıştırması gibi yöntemler kullanılmaktadır (Das ve Choi, 2009). Nanoparçacıkların üretilmeleri özellikle malzeme bilimi ve katı hal fiziğinin kapsamı alanına giren bir konu olup, bu konu üzerinde önemli sayıda çalışma yapılmıştır. Nanoparçacıkların üretim teknikleri üzerine geniş bir tarama çalışması Gleiter, H. (1989) tarafından yapılmıştır. Nanoakışkanlarda kullanılan nanoparçacıklar için ilk dönemde üretim kolaylığı ve kimyasal kararlılık göstermeleri gibi nedenlerden dolayı oksit parçacıklar kullanılmıştır. Sonraki dönemde asal gaz yoğunlaşma prosesi yardımıyla 2-200nm boyutlarında  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  nanotozların üretimi sağlanmış ve kullanıma girmiştir. Bu proseste malzeme düşük yoğunluklu asal gaz içerisinde buharlaştırılıp tekrar yoğunlaştırıldıktan sonra elde edilen nanoparçacıkların soğuk bir çubuk üzerinde toplanması sağlanır. Daha sonra oksijen temasıyla oksit nanoparçacıklar elde edilir ve istenilen akışkana uygun şekilde karıştırılarak dağılımları sağlanır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı işlem hızının yavaş olması ve topaklaşma eğiliminin yüksek olmasıdır (Das ve Choi, 2009).

Günümüzde nanoakışkanların hazırlanmasında iki adımlı ve tek adımlı olmak üzere iki yöntem uygulanmaktadır. Nano parçacıklar, nano fiberler, nano tüpler ve diğer nano malzemelerin kullanıldığı iki adımlı yöntemde öncelikle kimyasal ya da fiziksel yöntemlerle kuru toz üretilir. Daha sonra nano boyutlu toz akışkan içerisinde; manyetik kuvvet yardımıyla karıştırma, ultrasonik karıştırma, yüksek kaymalı karıştırma, homojenleştirme ve top öğütme gibi yöntemler yardımıyla yayılım sağlanır. Bu yöntem en ekonomik yöntem olup, endüstriyel olarak nanoakışkanların hazırlanmasına elverişlidir. Geniş yüzey alanları ve yüzey aktiviteleri nedeniyle nanoakışkan içerisindeki nanoparçacıklar topaklaşma eğilimi gösterirler. Bu sorunu aşmak üzere yüzey gerilimini azaltıcı katkı maddelerinden yararlanılır. İki adımlı yöntem ile kararlı yapıda bir nanoakışkan hazırlamada ortaya çıkan zorluklar nedeniyle bazı ileri yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi de tek adımlı yöntem olarak bilinmektedir (Yu ve Xie, 2012).

Tek adımlı yöntemde topaklaşmayı azaltmak için ilk olarak  $Cu$ /etilen-glikol hazırlamak üzere fiziksel buhar yoğunlaşma yöntemi geliştirilmiştir. Tek adımlı proseste aynı anda hem parçacıklar hazırlanır hem de akışkan içinde dağıtılır. Bu yöntemde nanoakışkanın kurutulması, depolanması, taşınması ve nanoparçacıkların akışkan içinde dağıtılması gibi işlemlere gerek duyulmadan doğrudan amaç gerçekleştirilmiş olur ve topaklaşma en aza indirilerek akışkanın stabilitesi artırılmış olur. Tek adımlı yöntem ile nanoparçacıkların uniform bir dağılımı ve stabil bir şekilde nanoakışkan içerisinde asılı kalmaları sağlanır. Tek adımlı fiziksel yöntem maliyetin yüksekliği nedeniyle büyük miktarlarda üretim yapmaya

elverişli değildir. Bu nedenle tek adımlı kimyasal esaslı yöntem geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. İlk olarak Cu/etilen-glikol nanoakışkan içerisine  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ile birlikte  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  karıştırılarak radyasyonsuz mikro dalga altında hazırlanmış olan örneğin çok iyi sonuç verdiği görülmüştür. Aynı şekilde mineral yağı temel akışkanına gümüş nano parçacıklar karıştırılarak elde edilen nanoakışkanın da iyi bir performans gösterdiği, yaklaşık 1 aylık bir süre boyunca kararlılığını koruduğu tespit edilmiştir (Yu ve Xie, 2012).

Bu yöntemlerin dışında yeni ve endüstriyel üretime elverişli ucuz ve yüksek performanslı yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Anlaşılacağı gibi nanoakışkanların kısa süreli kullanımlarını amaçlayan deneysel çalışmalarda iki adımlı basit bir yöntemle hazırlanarak test edilmeleri çok daha geçerli bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Nanoakışkanların teknolojide kullanımları söz konusu olduğunda stabil olmaları önem kazanacağından ileri tekniklerle hazırlanmış olanları tercih edilmelidir.

#### **1.2.4. Uygulama Alanları**

Elektronik, taşıma, tıp ve HVAC sistemlerindeki son teknolojik gelişmeler soğutma sistemlerinde performans artışının da sağlanması üzerine yoğunlaşmıştır. Hareketli bir akışkanın laminer ya da türbülanslı akışında soğutmanın iyileştirilmesi ısı transferinin de iyileştirilmesi ile sağlanabilir. Isı transfer prosesinde kullanılmakta olan birçok aktif ve pasif teknik içerisinde nanoakışkanların kullanımı son yıllarda öne çıkmaya başlamıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte üretimi kolaylaşan ve ucuzlayan nanoakışkanların kullanım ve uygulama alanları da yaygınlaşmaya başlamıştır. Deneysel ve teorik çalışmalara bağlı olarak nanoakışkanların ısı transferinde iyileşme ve enerji verimliliğinde artış sağlamaları nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda yerlerini almışlardır (Shanthi vd., 2012).

Isı transferinde iyileştirmenin önemli olduğu elektronik, taşıma, endüstriyel soğutma uygulamaları, nükleer sistemlerin soğutulması, uzay ve savunma gibi alanlarda nanoakışkanlar etkin bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Elektronik sistemlerde kullanılan çiplerin yüksek yoğunluklu olmaları nedeniyle elektronik sistemlerde kompakt bileşenlerin tasarlanmasında ısı yayılımında zorluklar yaşanmaktadır. Optimum geometriyi oluşturmak ya da ısı transfer kapasitesini artırmak gibi çözümler geliştirilmektedir. Bu aşamada su soğutmalı sistemlerde nanoakışkan kullanımı ile etkin bazı çözümler elde edilebilmektedir. Otomotiv endüstrisinde motor soğutma işleminde saf suyun yerine çeşitli nanoakışkanların kullanımı gittikçe yaygınlaşan bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Nanoakışkanlı motor

soğutma sistemlerinde soğutma performansının artmasıyla beraber daha kompakt sistemler ve küçük, hafif radyatörler kullanıma gireceğinden taşıt performansı da dolaylı olarak iyileşecektir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki; nanoakışkanlı otomobil radyatör alanında ortaya çıkan %10'luk azalma, taşıt aerodinamiğinde de iyileşmeye neden olarak yaklaşık %5'lik bir yakıt tasarrufu sağlamaktadır (Yu ve Xie, 2012). Endüstriyel soğutma uygulamalarındaki kullanım ise özellikle elektrik santrallerinde yaygınlaşmış durumdadır. Bu sayede performans artışının yanı sıra atmosfer havasına atılan zararlı gaz salımlarında da önemli düzeyde bir düşüş sağlanmaktadır. Benzer şekilde konutlardaki ısıtma tesisatlarında nanoakışkan kullanımı ile birlikte önemli oranda enerji tasarrufu ve salım azaltımı sağlanabilmektedir. Nükleer sistemlerde soğutma, mekân kısıtı bulunan uzay araçlarında ve askeri taşıtlarda ısı taşıma özelliği yüksek olan nanoakışkanlar gittikçe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yu ve Xie, 2012).

Nanoakışkanların bir başka kullanım amacı kütle transferinde iyileşme sağlamak üzerinedir. Teknikte çeşitli şekillerde kullanılmakta olan adsorbanların performansı nanoakışkan katkısı ile birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Yapılmış olan bir çalışmaya göre; nanoakışkan ve diğer katkılar ile  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  adsorbanının performansında 5.32 kat artış ortaya çıkmıştır (Yu ve Xie, 2012).

Nanoakışkanlar çeşitli enerji uygulamalarında hem ısıyı depolama hem de ısıyı absorbe etme işleminde önemli bir performans artışı sağlamaktadır. Faz değiştiren malzemeler (PCM) bilindiği gibi düşük sıcaklıklarda katı-sıvı faz dönüşümü gösterebilen ve bu özellikleri sayesinde ısıyı gizli olarak depolayabilme davranışı gösterdiklerinden yalıtım amacıyla kullanılmaktadırlar. PCM'lere yapılan bakır nanoparçacık katkısı ile yapının ısıtma amaçlı enerji gereksinimi %30.3 ve soğutma amaçlı enerji gereksinimi de %28.2 düzeyinde düşmekte olduğu gösterilmiştir (Yu ve Xie, 2012). Güneş kolektörlerinde kullanılmakta olan aracı akışkan yerine nanoakışkan kullanılması durumunda önemli düzeyde bir performans artışının ortaya çıktığı bilinmektedir.

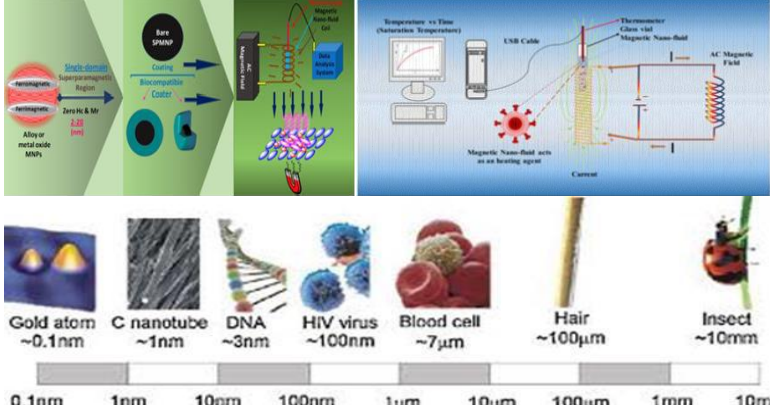

Mekanik uygulamalarda yağlama yağına katılan nanoparçacıklar ile sürtünmenin daha düşük düzeylere inmekte olduğu ve yağlama işlemine önemli bir katkı sağlamakta olduğu görülmüştür. Biyomedikal uygulamalarda; antibakteriyel aktivite ve nano ilaç enjeksiyonu gibi işlemlerde nanoakışkanlardan yararlanılmaktadır. Ayrıca hassas mikroreaktörler, taşıt fren akışkanı, nano akışkan esaslı mikrobiyal yakıt hücresi gibi uygulamalar da mevcuttur (Yu ve Xie, 2012). Tablo 2'de uygulama örnekleri yer almaktadır.

Tablo 2. Nanoakışkanların temel uygulama alanları (Yu ve Xie, 2012).

	Uygulama
Isı transferinde iyileştirme	
Kütle transferinde iyileştirme	
Enerji uygulamaları	
Mekanik uygulamalar	

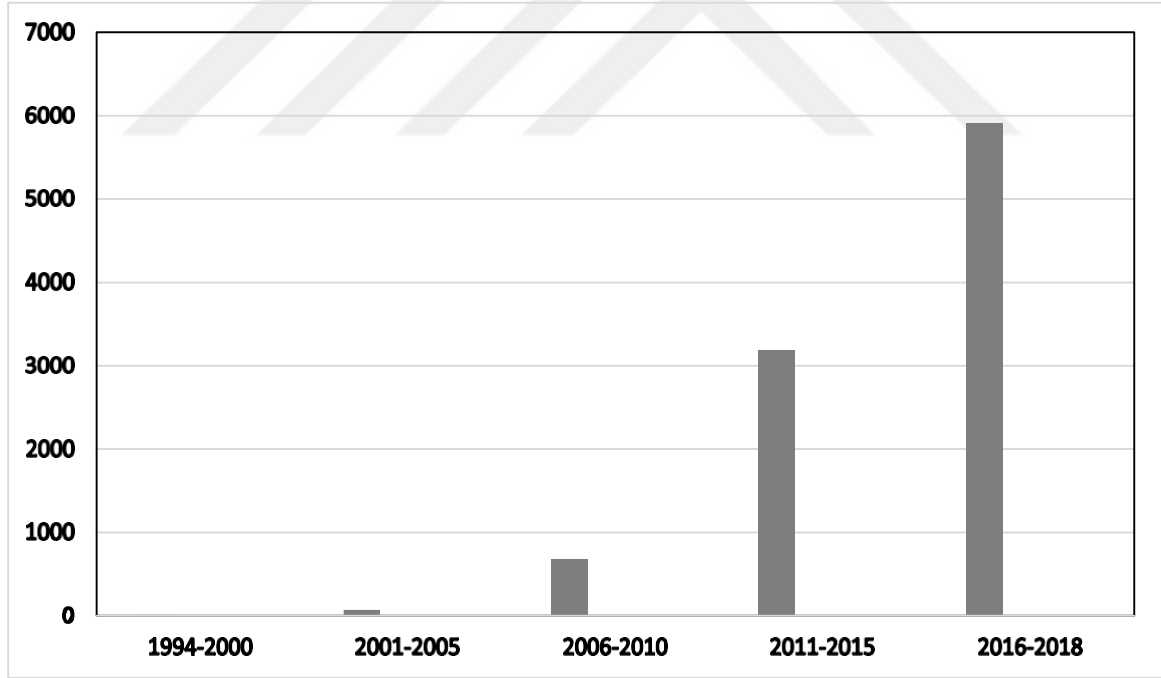


Tablo 2'nin devamı

	Uygulama
Biyomedikal uygulamalar	 <p>Diagram illustrating biomedical applications of nanotechnology. The process involves the synthesis of superparamagnetic iron oxide (SPIO) nanoparticles, their coating with a biocompatible layer, and their use in a magnetic field for hyperthermia treatment. A schematic shows a USB cable connected to a computer, with a magnetic field coil and a thermometer. Below, a scale bar from 0.1 nm to 10 mm is shown with various biological entities: Gold atom (~0.1 nm), C nanotube (~1 nm), DNA (~3 nm), HIV virus (~100 nm), Blood cell (~7 μm), Hair (~100 μm), and Insect (~10 mm).</p>
Diğer uygulamalar	 <p>Diagram illustrating other applications of nanotechnology, specifically a nanofiber-based device for water purification. The device consists of a nanofiber membrane, a cold water inlet, a hot water inlet, a pump, and a cold water outlet. The diagram also shows a power source and a control unit.</p>

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Tez konusu ile ilgili olarak literatürde önemli bir birikimin oluştuğu bilinmektedir. Nanoakışkanların geliştirilmesi fikrinin ortaya çıkmasından itibaren geçen süreç içerisinde teorik modelleme çalışmaları, deneysel çalışmalar ve uygulamadaki kullanımları olmak üzere birçok alanda araştırmalar yapılmıştır. Nanoakışkanların teknolojiye yaygınlaşmasına bağlı olarak çeşitli parametreler açısından incelenmeleri de kaçınılmaz olmuştur. Özellikle yeni tür nanoakışkanlar için yapılan deneysel çalışmalarda karışım oranlarına bağlı olarak ve diğer etkili parametreler açısından ısı performansları incelenmektedir. Şekil 1’de Science Direct’te kayda girmiş olan ve 1994 yılından günümüze değin nanoakışkanlar üzerine yayınlanmış olan makale sayılarının değişim grafiği görülmektedir. Grafikten de görüleceği gibi konu üzerinde yapılmakta olan çalışmalarda gittikçe hızlanan bir artış söz konusudur.



Şekil 1. Nanoakışkanlar konusunda yayınlanmış olan makale sayılarının ScienceDirect verilerine göre olan değişimi

Bu çalışmalar içerisinde ısı özelliklerin incelenmiş olduğu deneysel çalışmalar ağırlıktadır. Uygulamadaki kullanım üzerine yapılmakta olan çalışmalarda da son yıllarda

belirgin bir artışın olduğu gözlenmektedir. Bu çalışmadaki literatür taraması da teorik, deneysel ve uygulamada kullanım konuları üzerinde yapılmıştır.

## 2.1. Teorik Çalışmalar

Nanoakışkan fikrinin ilk ortaya atılması ile birlikte teorik modelleme çalışmaları da başlamıştır. Bilindiği gibi zaman alıcı ve pahalı olan deneysel çalışmalarda parametre sayısının ve çeşitli etkenlerin önemi vardır. Olabildiğince ekonomik deneysel bir inceleme yapabilmek için belirli düzeyde ön bilgilere gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle konu ile ilgili bazı genel teorik bilgiler göz önüne alınmakta ve buna uygun olarak deneysel çalışmaların sınırları teşkil edilerek verimli bir çalışmanın yapılması amaçlanmaktadır.

Nanoakışkanların katı-sıvı faz karışımı olduğu gerçeği ile yola çıkılarak klasik ısı transferi ve mekanik teorilerinden yararlanmak suretiyle ısı iletkenlik konusunda çeşitli teorik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Parçacık şekli ve boyutu, akışkan türü, sıcaklık gibi birçok faktör geniş bir şekilde hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Maxwell'in (1881) klasik teorisinden bu yana yapılmış olan çeşitli çalışmalarda nanoakışkanlarda etkili olduğu düşünülen çeşitli parametreler için teorik analizler yapılmış ve bazı modeller önerilmiştir. Hamilton ve Crosser (1962) heterojen yapıdaki iki bileşenli sistemlerin ısı iletkenlikleri için teorik olarak bir model önermişler ve muhtelif karışımlar için yapmış oldukları deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular ile teorik modelin kıyaslamasını yapmışlardır. Keyfi şekilli parçacıklar içermekte olan karışıma ait ısı iletkenlik için önerilen bağıntı;

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{f}} \left[ \frac{k_{\text{p}} + (n-1)k_{\text{f}}}{k_{\text{p}} + (n-1)k_{\text{f}}} + \phi \left( \frac{k_{\text{p}} - k_{\text{f}}}{k_{\text{p}} + (n-1)k_{\text{f}}} \right) \right] \quad (5)$$

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{f}} \left[ \frac{k_{\text{p}} + (n-1)k_{\text{f}}}{k_{\text{p}} + (n-1)k_{\text{f}}} - \phi \left( \frac{k_{\text{p}} - k_{\text{f}}}{k_{\text{p}} + (n-1)k_{\text{f}}} \right) \right]$$

şeklindedir. Burada yer alan  $\phi$  nano parçacık hacimsel oranı göstermektedir.  $n$  amprik şekil faktörü ise parçacıkların şekline bağlı olarak değer almakta olup,  $n=3/\psi$  olarak  $\psi$  küreselliğine bağlı olarak kullanılır. Küre için  $\psi=1$  olan değer küresellikten olan sapma için daha düşük değerler almaktadır. Bu bağıntı;  $\psi=1$  yazılması durumunda küre şekilli parçacıklardan oluşan nanoakışkana ait ısı iletkenlik değerine ait (1) bağıntısına indirgenmiş olur. Hamilton ve Crosser (1962) tarafından önerilen model deneysel veriler ile oldukça iyi bir uyum göstermektedir.

Keblinski vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada nanoakışkan içerisinde her bir bileşen için (parçacık ve akışkan) ısı transportu göz önüne alınmış ve sıcaklık alanını ifade eden enerji denkleminde yola çıkılarak teorik bir analiz yapılmıştır. Parçacıkların Brownien hareketi için yapılan analizde parçacık etrafındaki akışkan tabakalaşma kalınlığına bağlı olarak ısı iletkenlikteki iyileşme hesaplanmıştır. Elde edilen teorik bulgulara göre parçacık çapındaki artış ile birlikte ısı iletkenlikteki iyileşme de azalmaktadır. Öte yandan parçacıkların uygun geometrik formlar halinde topaklaşması durumları için ısı iletkenlikteki değişim de teorik olarak belirlenmiştir.

Sundar vd. (2013); nanoakışkanların viskoziteleri için yapmış oldukları tarama çalışmasında literatürdeki bazı teorik modellere yer vermişlerdir. Buna göre nanoakışkanların viskoziteleri için geliştirilmiş olan modeller; içerisinde parçacık bulunmayan ve ana akışkan ile aynı viskoziteye sahip olan eriyik ile içerisinde akışkan bulunmayan ve katı gibi davranmakta olan eriyik durumlarını sınır koşul olarak barındırmaktadır.

Yang vd. (2017) tarafından yapılmış olan teorik çalışmada; klasik teorik çalışmaların yetersizliği olarak görülen parçacık anizotropi özelliği göz önüne alınarak, silindirik geometriye sahip parçacıkların nanoakışkan içerisinde yatay ve dikey konumlanmaları için ısı iletkenlikleri teorik olarak modellenmiştir. Çalışmadan elde edilmiş olan bulgulara göre; önerilen modelden elde edilen ısı iletkenlik değerleri deneysel bulgular ile %95 uyumlu olup, bağıl hata %10 düzeyinde kalmaktadır.

## 2.2. Deneysel Çalışmalar

Nanoakışkanlar üzerine yapılmış olan deneysel çalışmalarda araştırmacılar büyük ölçüde ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi ve bu konuda etkili olan çeşitli parametrelere yoğunlaşmışlardır. Xuan ve Li (2000); yağ-Cu ve su-Cu olmak üzere iki tür nanoakışkanın hazırlanışı, bunların ısı iletkenlik ölçümü konusunda deneysel bir çalışma yapmışlardır. Ayrıca temel enerji denklemini kullanarak ısı transferinin iyileştirilmesini teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmada nanoakışkanlara ait TEM görüntüleri üzerinde Cu parçacıklarının yayılma ve kararlılık davranışı için yapılan değerlendirmede; yağ içerisinde suya göre çok daha iyi bir dağılımın olduğu ve daha kararlı bir yapının olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun nedeni olarak da ana akışkanın viskozitesinin parçacık yayılmasında etkili bir parametre olduğu ifade edilmiştir. Isı iletkenlik değerlerinin; 0.3'ten 1'e kadar olan

$\psi$  küreselliği ile artmakta olduğu ve yanı sıra artan parçacık hacimsel oranı ile de doğrusal olarak artmakta olduğu tespit edilmiştir. Isıl performans üzerinde yapılmış olan teorik çalışma sonucunda elde edilmiş olan teorik ilişkiye göre  $Nu$  sayısı Peclet sayısı ( $Pe$ ) ile yine doğrusal olarak artmaktadır. Bu davranışın nedeni olarak sadece nanoakışkanın artmakta olan ısı iletkenliği değil, aynı zamanda nanoparçacıkların tesadüfi hareketleri ve yayılma davranışı da gösterilmiştir. Çalışmada sonuç olarak elde edilen teorik bulguların deneysel olarak da doğrulanması gerektiği ifade edilmiştir (Xuan ve Li, 2000).

Zhang vd., (2006) tarafından yapılmış olan çalışmada  $Al_2O_3$ -su,  $ZrO_2$ -su,  $TiO_2$ -su ve  $CuO$ -su nanoakışkanlar için ısı iletkenlik ve ısı yayılım değerleri ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre her bir nanoakışkanın ısı iletkenlik değerleri ve ısı yayılım değerleri hacimsel orana göre doğrusal olarak artış göstermektedir. Çalışmada ısı iletkenlik değerleri için elde edilen değişimlerin düşük hacimsel oranlardaki küresel nano parçacık için (5) bağıntısı ile verilen Hamilton-Crosser modeli ile oldukça iyi bir uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir.

Elmas malzemesinin yüksek ısı transport özelliği nedeniyle nanoakışkan malzemesi olarak kullanılması da düşünülmüş ve elmas nano parçacıklardan oluşan etilen glikol katkılı nanoakışkanın ısı iletkenliği ve viskozitesi için deneysel bir çalışma yapılmıştır (Xie vd., 2009). Çalışmadan elde edilmiş olan bulgulara göre; elmas nanoparçacık hacimsel oranı ile ısı iletkenlik de doğrusal olarak artmakta ve katkısız duruma göre %2 hacimsel oran için ısı iletkenlikte yaklaşık olarak %18 düzeyinde bir artış olduğu görülmektedir. Viskozitenin de Newtonumsu akışkan davranışı ile benzer şekilde artan akışkan sıcaklığı ile birlikte düşmekte olduğu belirlenmiştir (Xie vd., 2009).

Meenakshi ve Sudhan (2015) tarafından tek adımlı yöntem ile hazırlanmış olan  $CuO$ -su nanoakışkanın üç farklı hacimsel oran için ısı iletkenlik ve viskozite değerleri üzerine yapılmış olan çalışmadan elde edilmiş olan bulgulara göre ısı iletkenlik; artan hacimsel oran ile ve artan sıcaklık ile birlikte düzgün bir şekilde artmaktadır. Viskozite ölçümlerine göre her karışım oranı için artan sıcaklık ile birlikte viskozite de belirgin bir biçimde düşmekte ve artan karışım oranı ile birlikte viskozite düzgün bir şekilde artmaktadır (Meenakshi ve Sudhan, 2015). Bu çalışmada nanoakışkan örneklerine ait TEM görüntüleri de ayrıntılı olarak incelenmiş ve parçacık boyutları Fourier dönüşümü ile 8 nm olarak tespit edilmiştir.

Hibrit nanoakışkan  $SiO_2$ -grafit-su için yapılan deneysel çalışmada dinamik viskozite ölçümleri yapılmış ve sıcaklığa, hacimsel orana ve grafit/ $SiO_2$  ağırlık oranına bağlı olarak ampirik bir bağıntı önerilmiştir (Dalkılıç vd., 2018). Sıcaklığın  $15^\circ C$ - $60^\circ C$  aralığında,

parçacık boyutunun 5 nm-50 nm aralığında ve  $\phi$  hacimsel oranın %0.01-%2 aralığında geçerli olmak üzere tanımlanan bağıntı:

$$\frac{\mu_{\phi}}{\mu_0} = 1.00527 \cdot T^{0.00035} \cdot (1 + \phi)^{9.36265} \cdot [ ]^{-0.028935} \quad (6)$$

$\mu_{\phi}$

$\mu_0$

şeklinde verilmiştir. Bu regresyon bağıntısının literatürde mevcut olan diğer deneysel veriler ile %10.24 standart sapma göstermekte olduğu ve %3.4 düzeyinde bir hassasiyete sahip olduğu ifade edilmiştir.

Nanoakışkanların doğal ve zorlanmış taşınım özelliklerinin incelenmesi de uygulamada karşılığı olan ilgi çekici bir araştırma alanı olarak çeşitli çalışmalarda ele alınmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Taşınım olayındaki etkin parametre yüzeydeki ısı taşınım katsayısı ve buna bağlı olarak karakteristik Nusselt sayısıdır ( $Nu$ ). Dolayısıyla taşınım ile ilgili çalışmalarda çeşitli koşullar için ısı taşınım katsayısı ölçümleri yapılarak, Reynolds sayısı ( $Re$ ) ve Rayleigh sayısı ( $Ra$ ) ile Nusselt sayısının değişimleri elde edilmektedir. Nanoakışkanların doğal taşınım olayındaki davranışı üzerine yapılmış olan bir çalışmada; bir tabanı ısıtılmakta olan ve diğer tabanı soğutulmakta olan yatay konumdaki bir silindir içerisinde yer alan su esaslı  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  nanoakışkanların performansı incelenmiştir (Putra vd., 2003). Bu çalışmada  $Nu$  sayısının Rayleigh sayısı ( $Ra$ ) ile olan değişimleri için elde edilen bulgulara göre; nano parçacıkların varlığı zorlanmış taşınımdakinin tersine paradoksal olarak doğal taşınımda bozulmaya ve  $Nu$  sayısında azalmaya neden olmaktadır. Bu duruma ait yorumlamada doğal taşınımda hızların düşük olması nedeniyle parçacıklardaki hareketliliğin azalmakta olması ve bu nedenle ısı transferinin de azaldığı görüşüne yer verilmiştir.

Ding vd. (2007) tarafından yapılmış olan deneysel çalışmada da ağırlıkça %0.8, %1.5 ve %2.4 oranlardaki  $TiO_2$ -su nanoakışkan için hem doğal taşınım hem de zorlanmış taşınımda ısı transfer deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre doğal taşınım koşulları altında  $Nu$  sayısı artan  $Ra$  sayısı ile düzgün bir şekilde artmaktadır. Düşük oranlı nanoakışkanlar için  $Nu$  sayısı daha yüksek değerler verirken artan  $TiO_2$  oranı ile birlikte  $Nu$  sayısı da düşmektedir. Bu davranışın nedeni olarak viskozitenin artması ve buna bağlı olarak ısı taşınım özelliğinin azalması görüşü ifade edilmiştir. Öte yandan zorlanmış taşınım deneylerinden elde edilen bulgular, ısı transfer özelliği açısından düzgün bir değişimin

olmadığını göstermekte; bunun nedeni olarak da topaklaşma davranışının etkisinden bahsedilmektedir.

Su esaslı alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), zirkonyumdioksit ( $ZrO_2$ ) ve titanyumdioksitli ( $TiO_2$ ) nanoakışkanlar için yapılan deneysel çalışma ile  $20^\circ C$ 'taki ısı transfer katsayısı ve pompalama gücü ölçümleri yapılmıştır (Haghighi vd., 2013). Çalışmadan elde edilen bulgulara göre; laminer akışta aynı *Re* sayılarında olmak üzere ortalama ısı transfer katsayısında ana akışkana göre  $Al_2O_3$ 'lü nanoakışkanda %23,  $TiO_2$ 'li akışkanda %8 ve  $ZrO_2$ 'li akışkanda %15 oranında iyileşme olduğu görülmüştür. Türbülanslı akış rejimi için yapılmış olan deneylerde ise; ana akışkana göre ortalama ısı transfer katsayısında  $Al_2O_3$ 'lü nanoakışkanda %51,  $TiO_2$ 'li akışkanda %13 ve  $ZrO_2$ 'li akışkanda %41 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir. Ancak pompalama gücünde ana akışkana göre,  $Al_2O_3$ 'lü nanoakışkanda %63,  $TiO_2$ 'li akışkanda %17 ve  $ZrO_2$ 'li akışkanda %52 oranında kötüleşme olduğu tespit edilmiştir.

Nanoakışkanların ısı transfer (ısı taşınım) performansları üzerine literatürde yapılmış olan çalışmaların derlendiği ve gözden geçirilmiş olduğu çalışmada konu ile ilgili olarak bazı değerlendirmelere yer verilmiştir (Godson vd., 2010). Literatürde mevcut olan birkaç korelasyonun ısı transfer performansını belirlemede oldukça iyi sonuçlar vermesine rağmen; hacim oranı, parçacık şekli ve boyutunun etkisini içeren korelasyonların henüz mevcut olmadığı ifade edilmiştir. Bu nedenle nanoakışkanların taşınım ısı transferi konusunda yeni araştırmalara gerek olduğu ve özellikle akış rejimindeki özelliklerine ilişkin yeni bilgilere gerek olduğu görüşüne yer verilmiştir (Godson vd., 2010).

Nano parçacıkların geometrik özelliklerinin ve sahip oldukları şeklin termofiziksel özellikler üzerinde etkili olduğunun anlaşılması ile birlikte bu konu üzerinde de incelemeler yapılmaya başlanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgulara göre; çubuk şekilli (silindirik)  $TiO_2$  nano parçacıklar içeren nanoakışkanların ısı iletkenlikleri, küresel şekilli nano parçacıklardan oluşan nanoakışkanlara göre daha yüksektir (Murshed vd., 2005). Saf su esaslı olarak hazırlanmış olan nanoakışkan içerisinde %5 hacimsel orana kadar çeşitli oranlarda 10 nm çapında 40 nm uzunluğunda çubuk şekilli  $TiO_2$  nano parçacıklı örnekler ve 15 nm çapında küresel şekilli nano parçacıklar için ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Çalışmada ısı iletkenlik değerleri teorik Hamilton Crosser (1962) modeli bir diğer teorik model ile kıyaslanmış ve önemli düzeyde artışların olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre; %5 hacimsel oranlı örneklerde saf suya göre çubuk şekilli nano parçacıklar için %33, küresel şekilli parçacıklar için %30 düzeyinde ısı iletkenlik değerinde iyileşme

ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yine %5 hacimsel oranlı çubuk şekilli nano parçacıklı nanoakışkana için Hamilton-Crosser modeline göre %12 düzeyinde bir artışın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla teorik modellerde sadece şekil faktörü tanımlaması ile göz önüne alınan parçacık geometrisinin yeterli olmadığı ve parçacıkların gerçek şeklinin ısı iletkenlik üzerinde etkili olduğu ve bu parametrenin de teorik modellerde yer alması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Nanoakışkanlarda parçacık şeklinin termofiziksel özellikler üzerindeki etkisi detaylı bir deneysel çalışma Timofeeva vd. (2009) tarafından alüminyum oksit (alümina) nanoakışkan için incelenmiştir. Katkı malzemesi olarak etilen glikolün kullanıldığı çalışmada çeşitli şekilli nano parçacıklı (küre, küp, silindir, hap, oval şekilli) nanoakışkanların şekil faktörlerinin yer aldığı ait teorik modeller ile kıyaslama yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre; şekil faktörünü göz önüne alan Hamilton-Crosser modelinin vermekte olduğu ısı iletkenlik değerleri deneysel verilere göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu nedenle parçacık küreselliği için yeni düzeltme katsayıları önerilmiştir. Aynı çalışmada göz önüne alınan parçacık şekilleri için nanoakışkanların reolojik davranışı da incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre her hacimsel karışım oranında viskozite değerleri yüksekten düşüğe doğru silindir, küp, oval ve hap olarak sıralanmıştır.

Gupta vd. (2018); ısı iletkenlik ve viskozite gibi termofiziksel özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla farklı içerikte ve yapıdaki nanoakışkanların bir araya getirilmesi ile oluşturulan hibrit nanoakışkanlar konusunda literatürde yer almakta olan çalışmaları gözden geçirerek derlemiş ve bazı değerlendirmeler yapmışlardır. Hibrit nanoakışkanların klasik nanoakışkanlara göre daha iyi ısı iletkenlik performansı göstermekte oldukları ancak yoğunluk, viskozite ve özgül ısı gibi özelliklerin performans üzerindeki etkilerinin literatürde henüz incelenmemiş olduğu ifade edilmektedir.

### **2.3. Uygulamada Kullanım Çalışmaları**

Nanoakışkanların ısı performanslarının ve diğer termofiziksel özelliklerinin detaylı olarak incelenmesine bağlı olarak teknikte ve uygulamada kullanımları da yaygınlaşmaya başlamıştır. Uygun katkıların kullanılması ile birlikte özellikle topaklaşma sorunu ve kararsızlık yapısı belirli ölçüde aşılmış ve uygun yerlerde kullanılmaya başlamışlardır. Teknike ısı transferi uygulaması olan hemen her alanda nanoakışkan kullanımı ile ortaya çıkabilecek olan performans iyileşmeleri üzerine deneysel çalışmalar yapılmaya



başlanmıştır. Nanoakışkanların temel termofiziksel özellikleri üzerine yapılmış olan çalışmalar belirli bir düzeye gelmiş olmasına karşın uygulamada kullanımları ve sistem performansı üzerindeki etkileri kısmen yeni araştırma alanı olarak görülmektedir. Uygulamada kullanım çalışmalarında belirli ısı transferi sistemlerinde ısı transfer katsayısındaki iyileşme, basınç düşümünün belirlenmesi ile ilgili olarak çeşitli parametrik incelemeler yapılmaktadır.

Jeotermal enerjiden yararlanmak üzere kurulan tesislerde, yer altındaki sıcak rezervlere gönderilen aracı akışkan suyun ısınarak tekrar geriye çekilmesi ve istenilen amaca uygun olarak kent ısıtması ve sıcak su arzı yapılmaktadır. Bu tür uygulamada ısı değiştirgeçlerinin rolü ve dolayısıyla ısı transfer mekanizmasının performansı önem taşımaktadır. Jeotermal enerji sistemlerinde nanoakışkan kullanımı üzerine teorik bir çalışma Sui vd. (2017) tarafından yapılmıştır. Çalışmada; bir jeotermal kaynaktan temin edilen ısı enerjisi için mevcut 1.yasa bağıntısı ile  $Al_2O_3$  nanoakışkanın termofiziksel özellik değerleri kullanılarak yapılan hesaplama ile suya göre hem çıkış sıcaklığında hem de ısı gücünde özellikle yüksek debilerde önemli ölçüde iyileşme olduğu teorik olarak gösterilmiştir.

Pourhoseini vd. (2018) tarafından plakalı bir ısı değiştirgeçinde gümüş-su nanoakışkan kullanımı ile ortaya çıkan performans değişimi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre; sistemdeki toplam ısı geçirme katsayısı ( $U$ ) artan nano parçacık kütsel oranı ile birlikte düşme davranışı göstermekte ancak artan debi ile birlikte önemli ölçüde artmaktadır.

Su yoğunlaşmalı hava şartlandırma ünitesinde aracı akışkan olarak alümina nanoakışkan kullanılması durumunda ortaya çıkan performans değişimi Ahmed vd. (2018) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada şartlandırılmakta olan hava için farklı debilerde ve aracı akışkan alümina nanoakışkanın farklı karışım oranlarında havadaki sıcaklık düşme zamanları ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre; artan karışım oranlarına göre havadaki sıcaklık düşme zamanı kısalmakta ve dolayısıyla sistemin performansı iyileşmektedir.

Asadi vd. (2018) tarafından ısı sistemlerinde soğutucu akışkan olarak kullanılan klasik yağın yerine nanoakışkan kullanımı ile ortaya çıkacak olan ısı ve hidrodinamik performans değişimi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada MWCNT (çok duvarlı karbon nano tüp)-MgO/motor yağı hibrit nanoakışkan kullanılmış ve %2 nanoparçacık konsantrasyonu için ısı iletkenlikte %65 iyileşme olduğu gösterilmiştir. Buna karşın

nanoakışkan kullanımı ile birlikte laminer ve türbülanslı akış rejimlerinde pompalama gücünde artış olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Mikrokanallarda silika ve alümina nanoakışkanların akış ve ısı transferi davranışı Bowers vd. (2018) tarafından incelenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre; düşük Re sayılarında sürtünme katsayıları yüksek iken, yüksek Re sayılarında sürtünme katsayısı düşmektedir. Silika nanoakışkana ait ısıl iletkenlik Maxwell-Crosser modeli ile uyum göstermekte, ancak alümina nanoakışkan modelden hafif sapma göstermektedir. Düşük konsantrasyonlarda her iki nanoakışkan saf suya göre ısı taşınımında daha iyi performans göstermektedir. Öte yandan her iki nanoakışkanda pompalama gücündeki artış ısı transferindeki artışa göre çok daha fazla olmaktadır.

PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt hücrelerinde nanoakışkan kullanımı ile ortaya çıkan performans değişimi Islam vd. (2016) tarafından teorik model kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada etilen glikol nanoakışkanın hacimce % 0.05-2 aralığındaki farklı oranları için yapılmış olan hesaplamalarda ısı transferinin artan nanoparçacık oranıyla birlikte önemli bir oranda değişmediği ancak ısı transfer hızının önemli ölçüde artmakta olduğu görülmüştür. Dolayısıyla ısı değiştirgeci yüzey alanında önemli oranda düşme olacağı sonucu elde edilmiştir. PEM yakıt hücrelerinde  $Al_2O_3$  kullanımı ile termoelektrik performansın nasıl değiştiği konusunda yapılmış olan bir diğer çalışmadan elde edilmiş olan bulgulara göre; saf suda hacimce %0.1  $Al_2O_3$  oranında nanoparçacık kullanılmış olan nanoakışkan etilen-glikol nanoakışkana göre en iyi performansı sağlamıştır (Zakaria vd. 2018).

Otomobil motorlarındaki soğutma sistemlerinde klasik soğutucu akışkan yerine nanoakışkan kullanımı ile performans iyileşmesi olacağı düşünülerek bu alanda da çeşitli deneysel çalışmalar literatürde yer almaya başlamıştır. Khan ve Dil (2017); üç farklı su esaslı nanoakışkanın ( $CuO$ ,  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$ ) otomobil radyatöründe aracı akışkan olarak kullanılmasına ilişkin teorik denklemlerden yola çıkarak sayısal bir performans incelemesi yapmışlardır. Çalışmadan elde edilmiş olan bulgulara göre;  $CuO$  nanoakışkan ısı transfer hızı açısından en iyi performansı göstermektedir. Ahmed vd. (2018) tarafından yapılmış olan deneysel çalışma ile otomobil radyatörlerinde  $TiO_2$ -su nanoakışkan kullanımındaki performans değişimi incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilmiş olan bulgular otomobil radyatörlerinde  $TiO_2$  nanoakışkan kullanılması durumunda radyatörde ısı transfer hızının önemli ölçüde artmakta olduğunu ve dolayısıyla otomobil performansının da iyileşeceğini göstermektedir.

Tipik bir ısıtma sistemi olan güneş enerjili klasik kolektörler ve hücrelerde aracı akışkan yerine nanoakışkan kullanılması durumuna ilişkin performans incelemeleri çeşitli çalışmalarda yapılmıştır. Kim vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada; içerisinde çalışma akışkanı olarak %20 hacimsel orana sahip propilen glikollü su bulunan U borulu bir güneş kolektöründe su esaslı MWCNT (çok duvarlı karbon nano tüp),  $Al_2O_3$ , CuO,  $SiO_2$  ve  $TiO_2$  nanoakışkanlar kullanılarak performans incelemesi yapılmıştır. Elde edilmiş olan bulgulara göre; güneş kolektörünün verimi yüksekten düşüğe doğru olmak üzere MWCNT, CuO,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  ve  $SiO_2$  şeklinde sıralanmıştır. En yüksek verim %0.2 hacimsel orana sahip MWCNT için propilen glikollü suya göre %10.5 olarak ölçülmüştür. Bu durumda  $CO_2$  salım değerinde önemli ölçüde düşme ve enerji kullanımında da önemli ölçüde tasarruf sağlanacağı belirtilmiştir (Kim vd., 2016). Parabolik güneş kolektöründe nanoakışkan kullanımı ile ortaya çıkan performans artışı Rios vd. (2018) tarafından incelenmiştir. Çalışmada %1 ve %3 hacimsel orana sahip damıtık su esaslı  $Al_2O_3$  nanoakışkan kullanılmış ve çeşitli güneş ışınımı geliş açıları için ısı verim deneyleri yapılmıştır. Elde edilmiş olan bulgulara göre;  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  geliş açıları arasında saf su için sistemi verimi %40.8 iken, %3 katkılı nanoakışkan kullanılması durumunda sistemin verimi %52.4 olarak ölçülmüştür. Işınım geliş açısının  $10^\circ$  olması durumunda ise saf su için %46.4 olan sistem verimi, %1 katkılı nanoakışkan için %57.7 değerine çıkmıştır. Düzlem bir güneş kolektöründe yapılmış olan teorik bir performans incelemesinde matematik model olarak enerji denklemi ve momentum denklemi kullanılarak uygun sınır koşulları altında teorik çözüm yapılmış ve  $Nu$  sayısı değişimleri elde edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre  $CeO_2$ -su nanoakışkanın performansı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkana göre daha iyi sonuç vermiştir (Sheikh vd., 2018).

Kulkarni vd., (2009) yapmış oldukları deneysel çalışmada; tipik bir deney düzeneğinde daimi akış koşulları altında bazı tür nanoakışkanlar için ısı taşınım katsayısı ölçümleri yapmışlardır. Deney düzeneği binaların ısıtılmasında kullanılan sudan havaya bir ısı değiştiricisi olarak modellenmiştir. Su esaslı olan nanoakışkanlarda %6 CuO, %6  $Al_2O_3$ , %6  $SiO_2$  ve etilen glikol karışımı için yapılan deneyler sonucunda ısı transfer katsayısı ile  $Re$  sayısı değişimleri elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre; en iyi performans sıralaması yüksekten düşüğe doğru olmak üzere CuO,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve etilen glikol/su şeklindedir. Örneğin  $Re=4000$  değerinde yapılan deneyde CuO için ısı taşınım katsayısı  $10.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $Al_2O_3$  için  $8.000 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve  $SiO_2$  için de  $4.900 \text{ W/m}^2\text{K}$  ölçülmüştür. Basınç düşümü deneylerine göre de en yüksek basınç düşümü; CuO nanoakışkanda ortaya çıkarken bunu sırasıyla  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve etilen glikol/su takip etmiştir.

Bu bulguya bağılı olarak binaların ısıtma sistemlerinde nanoakışkan kullanımı ile hem ısıtma sisteminde boyut küçültme hem de dolaylı olarak enerji kullanımında tasarruf ve çevre kirliliğinde iyileşme olacağı yorumu yapılmıştır (Kulkarni vd., 2009).

Nanoakışkanların ısı iletkenliklerindeki iyileşme etkisi ısı değiştiricilerde göz önüne alınarak konu ile ilgili çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Pandey ve Nema (2012) tarafından yapılmış olan çalışmada  $Al_2O_3$  nanoakışkanın çeşitli hacimsel oranları için plakalı ısı değiştiricisinde ısı geçişi, sürütünme kayıpları ve ekserji kayıpları üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre; ısı transfer karakteristikleri Reynolds sayısı ve Peclet sayısı ile birlikte iyileşirken, nanoakışkan konsantrasyonu ile birlikte azalmaktadır. Pompalama gücü, artan nanoakışkan konsantrasyonu ile birlikte artmaktadır. Pompa gücü ve ısııl gücün her ikisi birden göz önüne alındığında sistem performansının saf suya göre iyileşmekte olduğu sonucu elde edilmiştir.

Nanoakışkanların literatürde yer alan gözden geçirme çalışmaları konu ile ilgili olarak yapılmış çalışmaların genel bir değerlendirmesini yapmakta ve çalışmaların ortaya koyduğu bulguları genel olarak özetlemektedir. Isı borularında nanoakışkan kullanımı üzerine yapılmış olan bir gözden geçirme çalışmasında yer verilen görüşlere göre; ısı borularında ısı transferi nanoakışkan kullanımı ile etkin bir şekilde artmakta ve ısııl direnç önemli ölçüde düşmektedir (Sureskumar vd., 2013). Ambreen ve Kim (2018) yapmış oldukları gözden geçirme çalışmasında literatürde mevcut olan nanoakışkanların ısı transfer ve basınç düşümü korelasyon bağıntıları üzerine olan çalışmaları değerlendirerek konu ile ilgili bulguları dile getirmişlerdir. Buna göre; literatürde yer alan çalışmalar ısı transferi ve basınç düşüm karakteristiklerinin parçacık şekli ve boyutu, pH, sıcaklık, katkılar, topaklaşma ve konsantrasyon parametrelerine olan bağlılığı açısından detaylı bir şekilde incelenmiş olduğunu ve genel olarak uyumlu olduklarını göstermektedir. Ancak hidrotermal özellik açısından çalışmalarda tutarsızlıklar olduğu ifade edilmektedir. Aynı şekilde konu ilgili çalışmalar arasındaki uyumun sağlanması açısından yeni çalışmaların yapılmasına gerek olduğu ifade edilmektedir. Isı değiştiricilerde nanoakışkan uygulaması üzerine Humnic ve Humnic (2012) tarafından yapılmış olan gözden geçirme çalışmasında ise literatürde yer alan önemli teorik ve deneysel çalışmalar incelenmiş ve nanoakışkanların sağladığı ısııl üstünlük nedeniyle ısı değiştiricilerinde önemli bir seçenek haline gelmiş oldukları ve enerji verimliliğinde avantaj sağladıkları ifade edilmiştir. Ancak yine de ısııl iletkenlik ve viskozite konusunda yeni çalışmaların yapılmasına gerek olduğu dile getirilmiştir. Bir diğer gözden geçirme çalışmasında; plakalı ısı değiştiricilerinde nanoakışkan uygulamasında

nanoakışkanların etkinliği sadece termo fiziksel özelliklere bağlı olmayıp, akışın laminar ya da türbülanslı olup olmadığına da bağlı olduğu vurgulanmıştır (Kumar vd., 2015).

Nanoakışkanlar üzerine yapılmış olan çalışmaların gözden geçirilmesi ile görülmektedir ki; nanoakışkanların termofiziksel özellikleri konusunda önemli sayıda ve nitelikte çalışma yapılmıştır. Günümüzde gelinen noktada özellikle ısı sistemlerde nanoakışkanların kullanımı üzerine temel araştırmalara olan ilgi artmıştır. Isı değiştiriciler, hava şartlandırma sistemleri, jeotermal sistemler, otomobil soğutma sistemleri üzerinde çeşitli ön araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda çeşitli parametreler açısından ısı performans ve hidrodinamik performans incelemeleri yapılmıştır. Nanoakışkanların uygulamada kullanımı konusunda topaklaşma ve çökelme davranışı, katkıların etkisi, sistem özellikleri açısından inceleme konularında literatürde kısmen eksiklik mevcuttur. Ayrıca yapılardaki klasik ısıtma sistemlerinde aracı akışkan olarak nanoakışkan kullanımı ile ortaya çıkabilecek performans değişimleri ve uygulamadaki sorunlar üzerine yapılması gereken çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında; CuO nanoakışkanın termofiziksel özellikleri deneysel olarak belirlenmiş ve model bir tesisat düzeneğinde nanoakışkan kullanımı ile elde edilen performans değişimi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulguların literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Nanoakışkan Hazırlama

Mevcut nanoakışkanlar üzerinde yapılmış olan araştırma ile pratikte kullanılabilirlik ve temin kolaylığı açısından en uygun olanının CuO-su nanoakışkan olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında da yurtdışından temin edilmiş olan CuO nano toz, uygun karıştırıcılar kullanılarak belirli oranlarda hazırlanmış ve teste tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan CuO nano toza ait fiziksel özellikler Tablo 3'te topluca görülmektedir.

Tablo 3. CuO nano tozun fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Ortalama parçacık boyutu	40 nm
Safılık	%99.9
Birim kütle yüzey alanı	14000 m <sup>2</sup> /kg
Serbest durumda yoğunluk	790 kg/m <sup>3</sup>
Gerçek yoğunluk	6300-6490 kg/m <sup>3</sup>
Özgül Isı	540 J/kgK
Isı iletim katsayısı	30 W/m.K
Suda çözünürlük	Çözünmez
Renk	Siyah
Morfoloji	Küresele yakın

Nanoakışkanlarda kullanılan nano tozların topaklaşma, çökme, yapışma davranışı göstermeleri nedeniyle pratikte zorluklar ortaya çıkmaktadır. Nanoakışkan içerisinde olabildiğince homojen bir dağılımın sağlanması ve çökmenin önüne geçilmesi, ayrıca bu yapının olabildiğince uzun süreli olarak korunabilmesi amacıyla çeşitli katkıları kullanılır. Bu çalışmada da katkı malzemesi olarak askorbik asit (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>) kullanılmıştır. Askorbik aside ait fiziksel özellikler Tablo 4'te görülmektedir.

Karışımların hazırlanmasında esas akışkan olarak (base fluid) deinoze (saf) su (pH=7-8) kullanılmıştır. İçeriğinde yer alan nano boyutlu metal tozun fiziksel özelliği nedeniyle nanoakışkanların hazırlanması özel bir şekilde yapılmaktadır. Bu amaçla çeşitli türden karıştırıcılar kullanılmaktadır. Karıştırıcılar uygun bir süre boyunca akışkan toz karışımını homojenize ederek karışımı üzerinde test yapabilecek duruma getirir. Bu çalışmada

hazırlanan örnekler önce manyetik karıştırıcıda yaklaşık 1,5 saat süren bir karıştırma işleminden sonra alındıkları ultrasonik karıştırıcıda yaklaşık 6 saat boyunca karıştırma işlemine tabi tutulmuş ve deneysel ölçümlere hazır duruma getirilmiştir. Karıştırma işleminin yapıldığı manyetik ve ultrasonik karıştırıcılar Şekil 2’de görülmektedir.

Tablo 4. Askorbik asidin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Molar kütle	0.17612 kg/mol
Yoğunluk	1650 kg/m <sup>3</sup>
Ergime noktası	190-192 °C
Suda çözünürlük	0.33 kg/L
Oksijen tutma özelliği	Var
Görünüm	Beyaz/açık sarı



Şekil 2. Nanoakışkanların hazırlandığı karıştırıcılar

Çalışmada 100 gr saf su; 7,5 gr askorbik asitten oluşan karışıma sırasıyla 1, 2, 3, 4 ve 5 gr CuO nano tozunun karıştırılmasıyla hazırlanmış olan nanoakışkanların hacimsel oranları topluca Tablo 5’te görülmektedir.

Tablo 5. Fiziksel özelliklere ait deneysel çalışmadaki karışım oranları (%)

Örnek	Su		Askorbik Asit		CuO	
	Kütlesel	Hacimsel	Kütlesel	Hacimsel	Kütlesel	Hacimsel
1	92.2	95.50	6.9	4.35	0.9	0.15
2	91.3	95.36	6.9	4.34	1.8	0.30
3	90.5	95.22	6.8	4.33	2.7	0.45
4	89.7	95.08	6.7	4.32	3.6	0.60
5	88.9	94.94	6.7	4.32	4.4	0.74

Model tesisat deneylerinde nanoakışkana ait hidrodinamik ve ısı performans incelemesi yapılmış olup, deneyler nanoakışkanın hareketli olması ve çökme davranışı göstermeyeceği kadar kısa süreli olduğundan katkısız örnekler kullanılmıştır. Katkısız nanoakışkanlar hazırlanırken kütle esaslı oranlar göz önüne alınmış olup, su ve CuO için yoğunluk değerleri kullanılarak gerekli dönüşüm bağıntısı ile hacimsel oranlar hesaplanmıştır.  $\phi$  hacimsel oran için dönüşüm bağıntısı;

$$\phi = \frac{V_{CuO}}{V_{Su}} = \frac{0.01\beta}{\rho_{CuO} + 0.01\beta(\rho_{Su} - \rho_{CuO})} \quad (7)$$

şeklinde dir. Burada  $\beta$  karışımındaki nano toz CuO için kütlesel oranı göstermektedir ( $m_{CuO}/m_{Su}$ ). Bu bağıntıda yer alan fiziksel değerler ile ( $\rho_{Su}=998 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{CuO}=6400 \text{ kg/m}^3$ ) elde edilmiş olan ve model tesisat deneylerinde kullanılan nanoakışkanlara ait hacimsel oranlar topluca Tablo 6'da yer almaktadır.

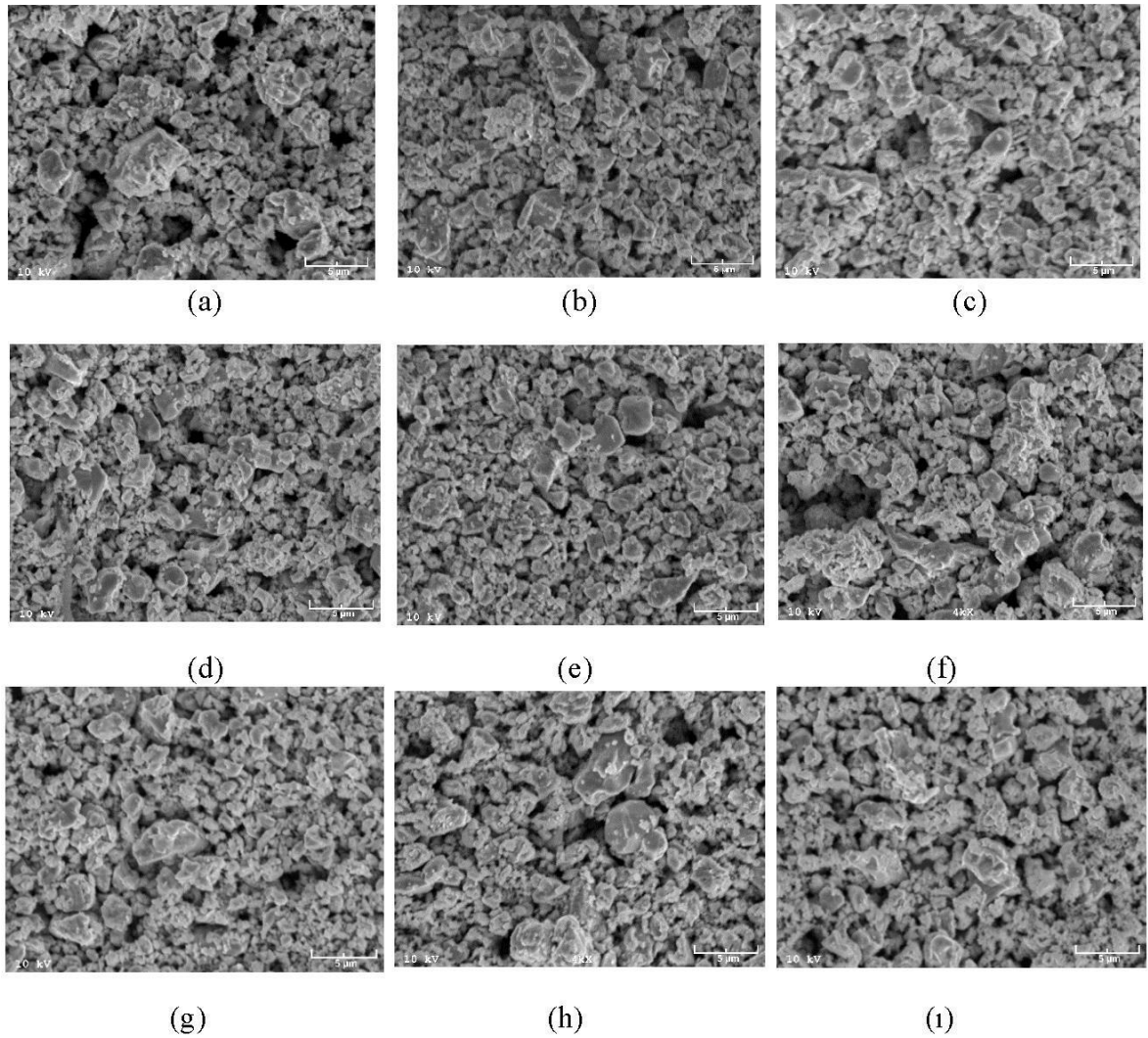
Tablo 6. Model tesisat deneylerinde kullanılan nanoakışkanlara ait karışım oranları (%)

Örnek	Su (%)		CuO (%)		Nanoakışkan yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )
	Kütlesel	Hacimsel	Kütlesel ( $\beta$ )	Hacimsel ( $\phi$ )	
1	98.25	99.73	1.75	0.27	1012.59
2	96,50	99.44	3.50	0.56	1028.25
3	95,00	99.19	5.00	0.81	1041.76
4	93.00	98.90	7.00	1.10	1057.42



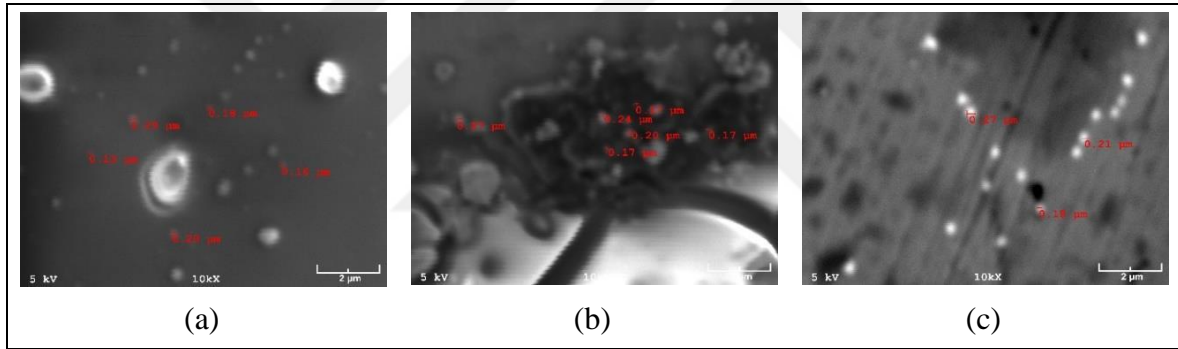
### 3.2. İç Yapı

Deneysel çalışmada kullanılacak olan test örneğini belirlemek amacıyla bazı parametreler açısından optimizasyon yapmak üzere çeşitli oranlara sahip örnekler hazırlanmış ve termofiziksel özellikleri ölçülmüştür. Bu amaçla yapılmış olan çalışmalardan bir tanesi içyapı incelemesi olmuştur. Katkısız olarak sadece CuO tozunun saf suda karıştırılması ile elde edilen nanoakışkan örneklerinin içyapıları taramalı elektron mikroskopunda (TEM) incelenmiş ve elde edilen görüntüler Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Çeşitli hacimsel CuO oranlarına sahip katkısız (askorbik asitsiz) örneklere ait TEM görüntüleri (a) %0,15; (b) %0,31; (c) %0,47; (d) %0,62; (e) %0,77; (f) %0,92; (g) %1,08; (h) %1,22; (i) %1,54

Örneklerin vakum altında incelenmesi gerektiğinden, nanoakışkan örnekleri yüzeye damlatılıp kurutulduktan sonra elde edilen kuru zemin üzerinde kalan CuO tozuna ait görüntüler üzerinde inceleme yapılmıştır. Görsellerin incelenmesinde de görüleceği üzere artan CuO hacimsel oranı ile birlikte birim alandaki yoğunlukta da hafifçe bir artış ortaya çıkmaktadır. Deneylerde kullanılan CuO tozunun ortalama çapının 40 nm olmasına rağmen, görüntülerde 130 nm'den başlayan toz çaplarının olması karışımın tane düzeyine inememiş olduğunu ve bu boyutta bir topaklaşmanın olduğunu göstermektedir. Bu nedenle CuO tozunun topaklaşmasını önlemek ve homojen bir dağılım sağlamak üzere askorbik asit katkısı ile örnekler hazırlanmış ve iç yapıları görüntülenmiştir (Şekil 4). Şekil 4'te görülen örneklerdeki askorbik asit katkısı kütleli olarak yaklaşık %6.8 civarındadır. Görüldüğü gibi askorbik asit katkısı iç yapıda topaklaşmayı önlemekte ve belirli bir homojenlik sağlamaktadır.



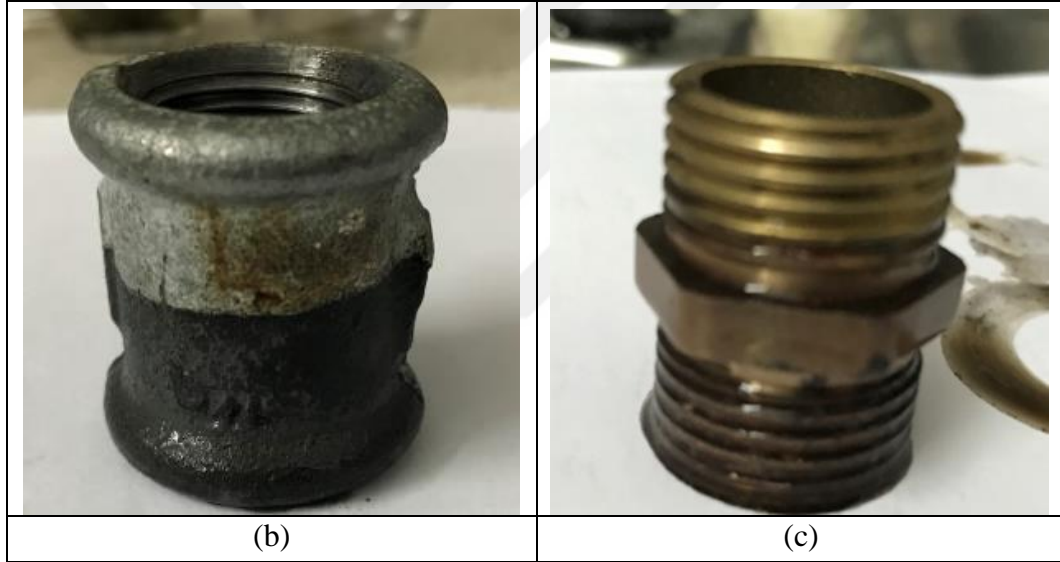
Şekil 4. Kütleli olarak %6,8 askorbik asit katkılı örneklere ait *TEM* görüntüleri (a) %0,15 CuO; (b) %0,30 CuO; (c) %0,45 CuO.

### 3.3. Yapışma Davranışı

Nanoakışkanların teknolojiye kullanım amacına uygun olarak yapışma davranışlarının hangi düzeyde olduğu konusu da önemlidir. Zira nanoakışkan yapışma nedeniyle hem kendi özelliğini kaybedebilir hem de bir boru akışı uygulamasında akışkanın katı yüzeydeki tutunma davranışı etkilenerek akışın hidrodinamik yapısı değişebilir. Yapışma davranışına ait deneylerde hacmen % 0,23 CuO-su örneği içerisinde gözleme dayalı bir yapışma testi yapılmış ve elde edilen bulgular kayıt altına alınmıştır. Buna göre; özellikle tesisat uygulamalarında kullanılmakta olan dört farklı türden malzeme örnekleri, nanoakışkan örneği içerisinde 40 saat süre ile bekletilerek malzeme üzerinde çıplak gözle muayene

yapılmış ve malzemeye bir yapışma olup olmadığı incelenmiştir. Gözlemler sonucunda PPRC ve bakır boru örneklerinde nanoakışkanın herhangi bir yapışma göstermediği ve malzemenin aynı kaldığı, pirinç malzemede kısmi bir yapışmanın olduğu, ancak galvaniz dökme demir malzeme üzerinde belirgin bir yapışmanın olduğu görülmüştür (Şekil 5).

Gözlem sonuçları topluca Tablo 7’de verilmiştir. Yapışma davranışında yüzey pürüzlülüğünün baskın bir özellik olarak etkili olduğu açıktır. Ancak bunun yanı sıra atomik düzeyde bağların oluşması buna bağlı olarak kalıcı yapışmaların ortaya çıkması da kaçınılmaz olmaktadır. Gözlem sonuçlarına göre; tesisat uygulamalarında nanoakışkan kullanımı söz konusu olduğunda PPRC ya da bakır boru kullanılması yapışma davranışı açısından çok daha uygun olmaktadır.



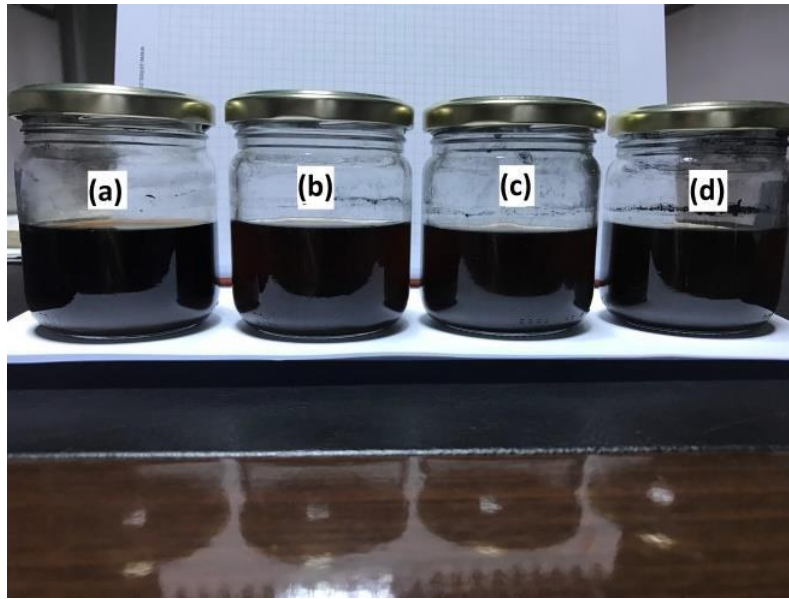
Şekil 5. Galvaniz dökme demir (a) ve pirinç (b) örneklere ait yapışma testi sonucu

Tablo 7. Yapışma testi sonuçları

Örnek	Renk Değişimi	Yapışma	Yıkama Sonrası	Sonuç
PPRC boru	Yok	Yok	Aynı	Uygun
Bakır boru	Yok	Yok	Aynı	Uygun
Pirinç rakor	%20	Az	%3 kalıcı	Uygun
Galvaniz dökme demir	%50	Var	%40 kalıcı	Değil

### 3.4. Çökme Davranışı

Nanoakışkanların teknolojik uygulamalarında ortaya çıkan önemli risklerin başında katı nano parçacıkların çökmesi ve buna bağlı olarak nanoakışkan özelliğinin ortadan kalkmasıdır. Nanoakışkan içerisindeki nano tozların çökme eğilimi göstermesi ile birlikte çeşitli yerlerde birikme ve tıkanma gibi istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Ayrıca nanoakışkan içerisindeki nano tozlardan arınmaya başladıkça ana akışkan özelliklerine geri döneceğinden nanoakışkan özelliği de kaybolacaktır. Bu nedenle nanoakışkanların bu özelliğinin de deneysel inceleme ile test edilmesi ve çökme davranışlarının incelenmesi gereklidir. Bu çalışmada incelenen oranlardaki askorbik asit katkılu CuO örnekleri uygun bir çökme testine tabi tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında hazırlanan karışımlar yine yapışma testine benzer bir şekilde gözleme dayalı bir inceleme yapılarak yaklaşık 100 saat kadar bekletilmiş ve gözle yapılan muayene sonucunda ortaya çıkan çökme davranışı tespit edilmiştir (Şekil 6). Buna göre örnekler yaklaşık 12 saatlik bir bekleme süresi sonucunda çökmeye başlamakta, ancak kaba bir çalkalama ile tekrar ilk görünen yapısına geri dönebilmektedir. Doğal olarak hacimsel olarak en yüksek CuO içeriğine sahip örnekte çökme süresi en uzun olarak tespit edilmiştir. İçerikteki CuO oranı azaldıkça çökme süresi de kısalmaktadır.



Şekil 6. Farklı hacimsel oranlardaki CuO için çökme görseli (a) %0,15; (b) %0,30; (c) %0,60; (d) %0,74

Nanoakışkan örneklerin çökme davranışının ölçüm düzeni içerisinde belirlenmesi amacıyla basit bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla 50\*50\*50 mm boyutlarında hazırlanmış şeffaf plastik bir kap içerisine alınan örneklerde ışığa duyarlı diyotlar ile elektriksel direnç ölçümü yapılmıştır (Şekil 7). Kabin içerisinde tabandan 15 mm ve 40 mm yükseklikte (aralarında 25 mm mesafe olacak şekilde) konumlanan ışığa duyarlı (LDR) diyotlar yardımıyla kaba doldurulmuş olan nanoakışkanın diyot konumlarındaki elektriksel dirençlerinin zamana bağlı olarak değişimleri elde edilmiştir. Bu amaçla yapılan deneylerde, ultrasonik karıştırıcıda hazırlanan örnekler şeffaf kaba alınarak her 10 dakikada bir direnç ölçümüne tabi tutulmuştur. Beklendiği gibi belirli bir süre boyunca (yaklaşık 70 dakika) üst seviyedeki ölçümde değişim göstermeyen direnç değeri, belirli bir zamandan sonra azalma göstermeye başlamakta; alt diyotta ise deney başlangıcından itibaren artmaya başlamaktadır. Dolayısıyla numunenin üst kısmı çökme nedeniyle şeffaflaşmaya başlarken alt kısmı çökme nedeniyle koyulaşmaya başlamaktadır. %1.1 hacimsel orana sahip CuO nanoakışkana için elde edilen direnç değişimleri Şekil 8’de görülmektedir.

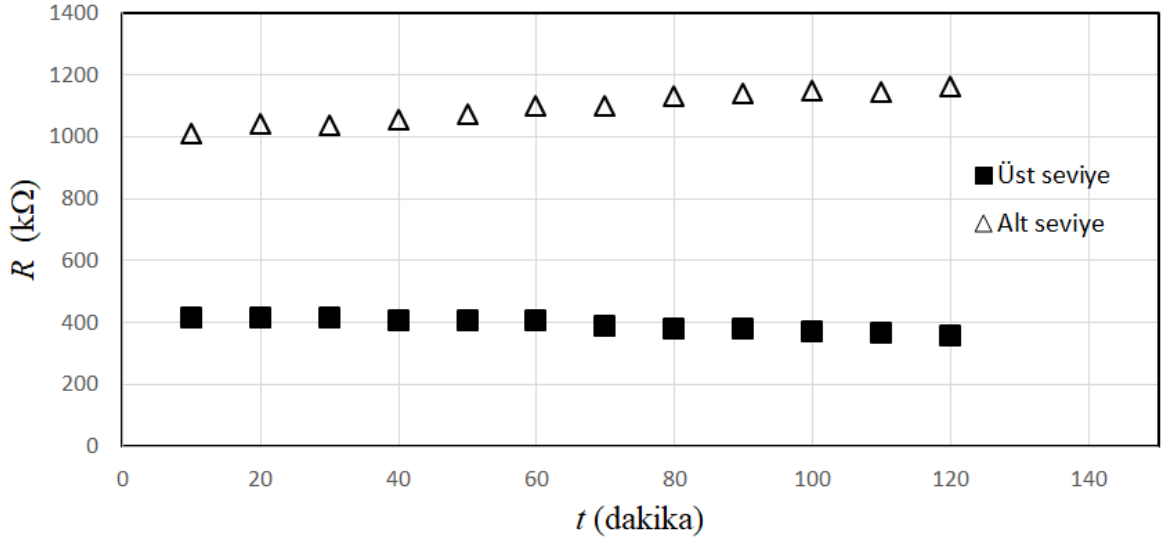


Şekil 7. Çökme davranışı ölçüm cihazı ve deney kabı

Şekil 8’de de görüldüğü gibi üst ve alt seviyelerde ölçülen direnç değerleri arasındaki farkın artması, nanoakışkan örneğin çökme davranışı hakkında parametrik olarak bir fikir vermektedir. Alt seviyede ölçülen direncin bağıl değeri olarak tanımlanan değer ( $\Delta R = (R_{alt} - R_{üst}) / R_{üst}$ ) ile dakika birimli zaman arasındaki korelasyon için elde edilen:

$$\Delta R = 0,581 e^{0,0015 t} \quad (8)$$

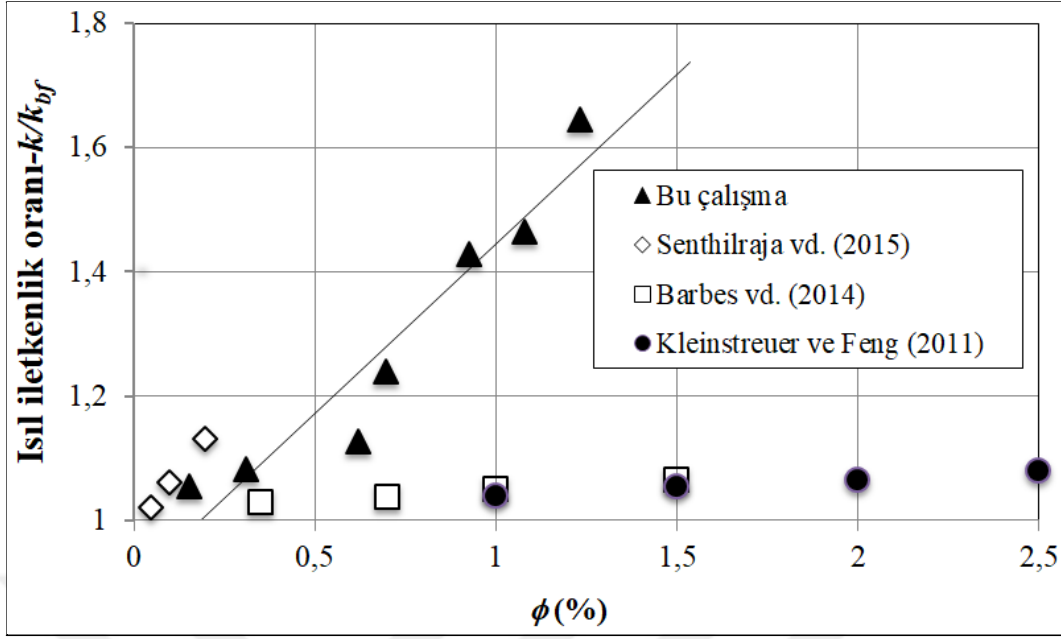
bağıntısı iyi bir uyum vermektedir ( $R^2 = \%98$ ).



Şekil 8.  $\phi=1,1$  hacimsel orana sahip örnekte üst ve alt seviyelerdeki elektriksel direncin zamanla olan değişimi

### 3.5. Isıl İletkenlik

Çeşitli oranlarda ve içeriklerde hazırlanmış olan örneklerin ısı iletim katsayısı ölçümlerinin bazıları Ondokuz Mayıs Üniversitesi (OMÜ) Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde mevcut olan deney düzeneğinde ve bazıları da KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Isı Transfer Laboratuvarında bulunan deney düzeneğinde yapılmıştır. Literatürde nanoakışkanlar üzerine yapılan deneysel çalışmalarda nano parçacık hacimsel oranları genellikle %1'in altında tutulmaktadır. Sadece fiziksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla yönelik olarak sınırlı düzeyde tutulan bu düşük oranlı çalışmaların yanı sıra nano parçacık oranının daha yüksek tutulduğu çalışmalar da mevcuttur. Bu tez çalışmasında katkısız (askorbik asitsiz) çeşitli oranlardaki örnekler OMÜ'de mevcut deney düzeneğinde test edilmiş ve 20°C-27°C sıcaklık aralığında yapılmış olan deneylerde elde edilmiş olan sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir. Isıl iletkenlik oranı ( $k/k_{bf}$ ) nanoakışkana ait ısı iletkenliğinin aynı sıcaklıktaki ana akışkana ait ısı iletkenliğine olan oranı olarak tanımlanmış olup, nanoakışkan katkısı ile ısı iletkenliğinin değişimi konusunda doğrudan bir fikir vermektedir.



Şekil 9. Katkısız örnekler için ısı iletkenliğin CuO oranına göre değişimi

Şekil 9’da görülen değişime ait belirleme katsayısı ( $R^2$ ) %91,5 gibi oldukça yüksek bir değer olup,  $\phi$  hacimsel oranına bağlı olarak elde edilen korelasyon bağıntısı;

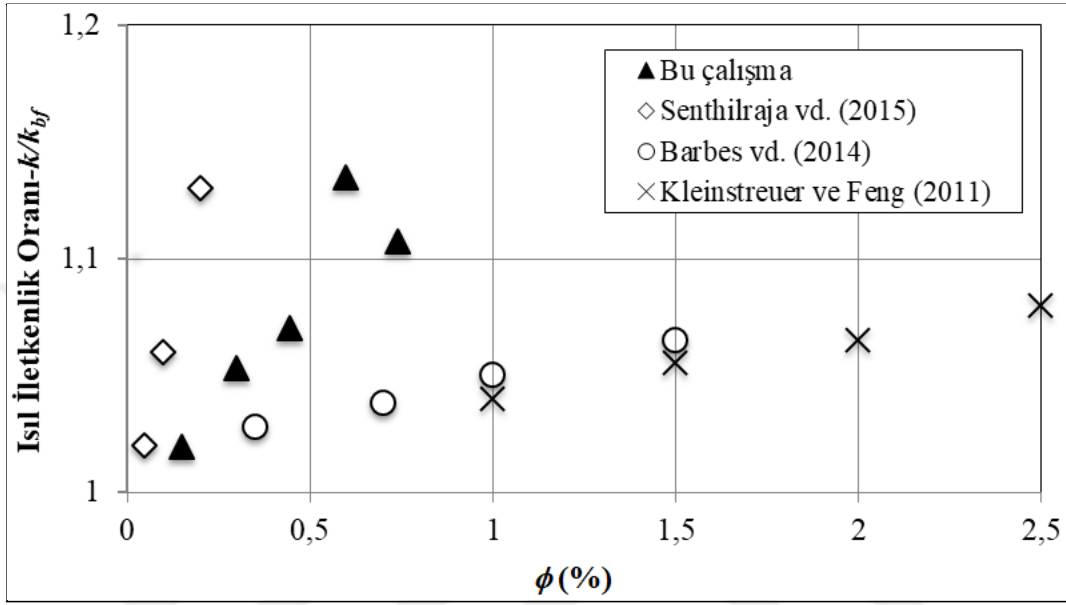


$$k/k_{bf} = 0.5455\phi + 0.8997 \quad (9)$$

şeklindedir. Düşük hacimsel oranlarda diğer deneysel veriler ile uyumlu olan sonuçların yüksek hacimsel oranlarda önemli ölçüde sapma gösterdiği ve hazırlanmış örneklerin gerektiği gibi homojenize olmadığı ve topaklaşmış olduğu anlaşılmaktadır. Nanoakışkan örneklerde topaklaşmayı önlemek ve kararlı bir yapı elde etmek üzere katkı maddesi olarak askorbik asit kullanılarak Tablo 5’te karışım oranları görülen yeni örnekler hazırlanmış ve ısı iletkenlikleri ölçülmüştür.

KTÜ’deki deney düzeneği; göbek kısmında elektrikli bir ısıtıcı bulunan ve radyal doğrultuda geçen ısının bir soğutma suyuna aktarıldığı klasik bir sistemden oluşmaktadır. Deneyde ölçümü yapılacak akışkan, 0,345 mm kalınlığındaki silindir halkası hazneye dikkatlice enjekte edildikten sonra uygun bir süre beklenmiş ve rejim durumunda veriler kaydedilmiştir. Deneylerde ısıtıcı geriliminin 5 farklı değerinde elde edilen sıcaklık farkları ve ortalama sıcaklık değerleri için ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır. Ölçme hatalarının olumsuz etkisini en az düzeye çekebilmek amacıyla ölçülen ısı iletim katsayıları aynı

sıcaklıktaki saf su için ölçülmüş olan ısı iletim katsayısı ile normalize edilmiş ( $k/k_0$ ) ve değişim grafikleri bu parametre için hazırlanmıştır. Ortalama ölçüm sıcaklığının yaklaşık olarak 60°C civarında olduğu ölçümlere ait değişim, diğer deneysel veriler ile kıyaslamalı olarak Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Askorbik asit katkılı örnekler için ısı iletkenliğin CuO oranına göre değişimi

Değişimlerden görüldüğü gibi düşük hacimsel oranlarda (%0,5'in altında) diğer deneysel bulgular ile oldukça yakın olan değerler, hacimsel oranın yükselmesi ile birlikte sapma göstermektedir. Literatürdeki veriler arasında genel olarak görülen bu uyumsuzluk büyük ölçüde topaklaşma davranışında uygun bir standardın henüz geliştirilememiş olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 10'da görülen değişime ait korelasyon bağıntısı;

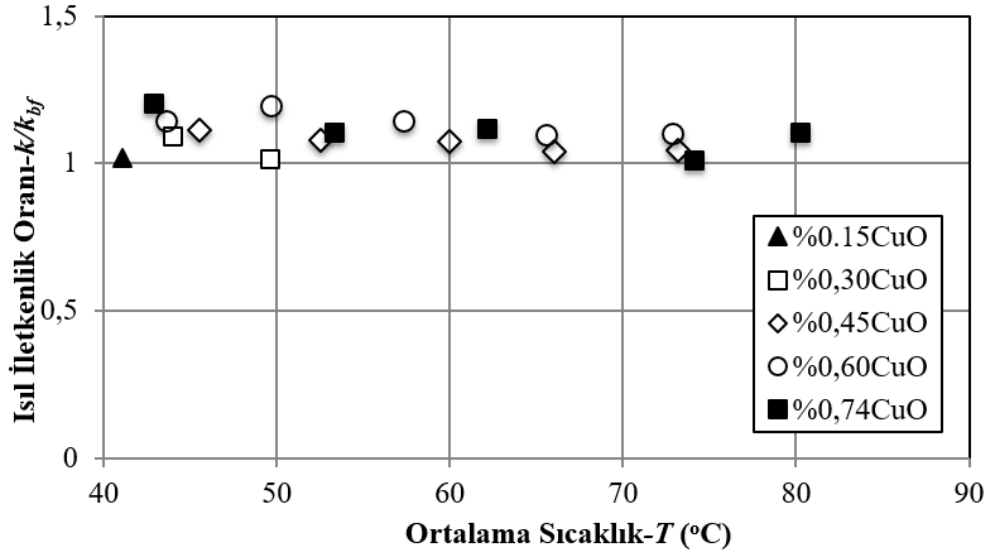


$$\diamond = 0.1746\phi + 0.9987 \quad (10)$$

şeklinde olup, % 81.75 belirleme katsayısı değerine sahiptir. Askorbik asit katkısız ve katkılı örneklerin ısı iletkenlik değerleri kıyaslandığında (Denklem 9 ve 10 arasında); aynı hacimsel orana sahip askorbik asit katkısız örneklerin ısı iletkenliklerinin askorbik asit katkılı örneklere göre yaklaşık olarak %7 civarında daha yüksek olduğu görülmektedir.



Elde edilen sonuçlara göre bu çalışmadaki hacimsel karışım oranları aralığında, artan sıcaklık ile boyutsuz ısıl iletkenlik hafifçe azalmaktadır (Şekil 11). Literatürde yüksek hacim oranlı nanoakışkanlar için ( $\geq\%1$ ) artan sıcaklığa bağlı olarak ısıl iletkenliğin artmakta olduğu bulgusuna karşın, düşük hacimsel oranlarda bu davranışın ortaya çıkmasının nedeni olarak nanoyapıdaki topaklanma olduğu düşünülmektedir.



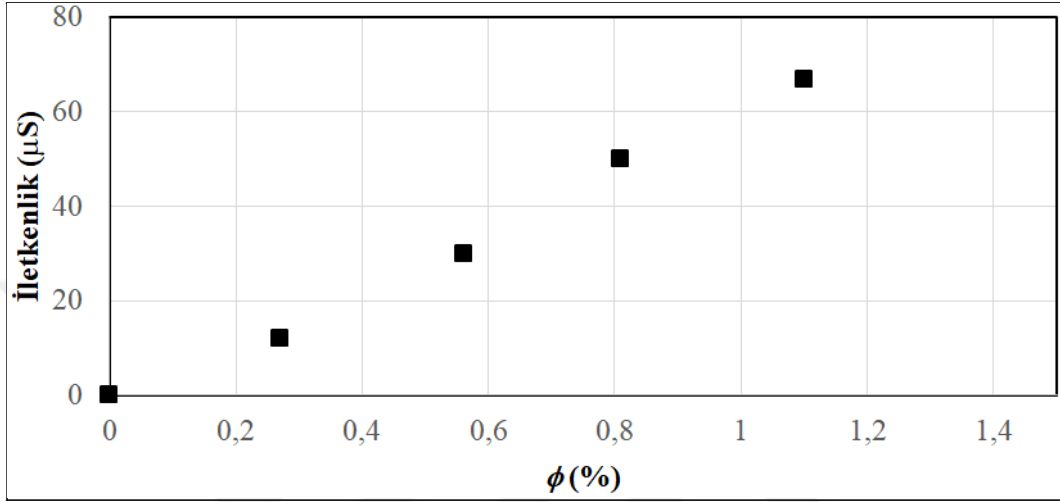
Şekil 11. Isıl iletkenliğin sıcaklığa göre değişimi

Çalışma kapsamında hazırlanmış olan örnekler üzerinde elektriksel iletim ölçümleri de yapılmıştır. Bunun nedeni bilindiği gibi elektriksel ve ısıl iletkenlik arasında analogik bir ilişkinin olmasıdır. Bu amaçla Şekil 12'de görseli yer alan bir TDS (*Total Dissolved Solids*) cihazı ile iletkenlik ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 12. Elektriksel iletkenlik ölçümünde kullanılan TDS cihazı

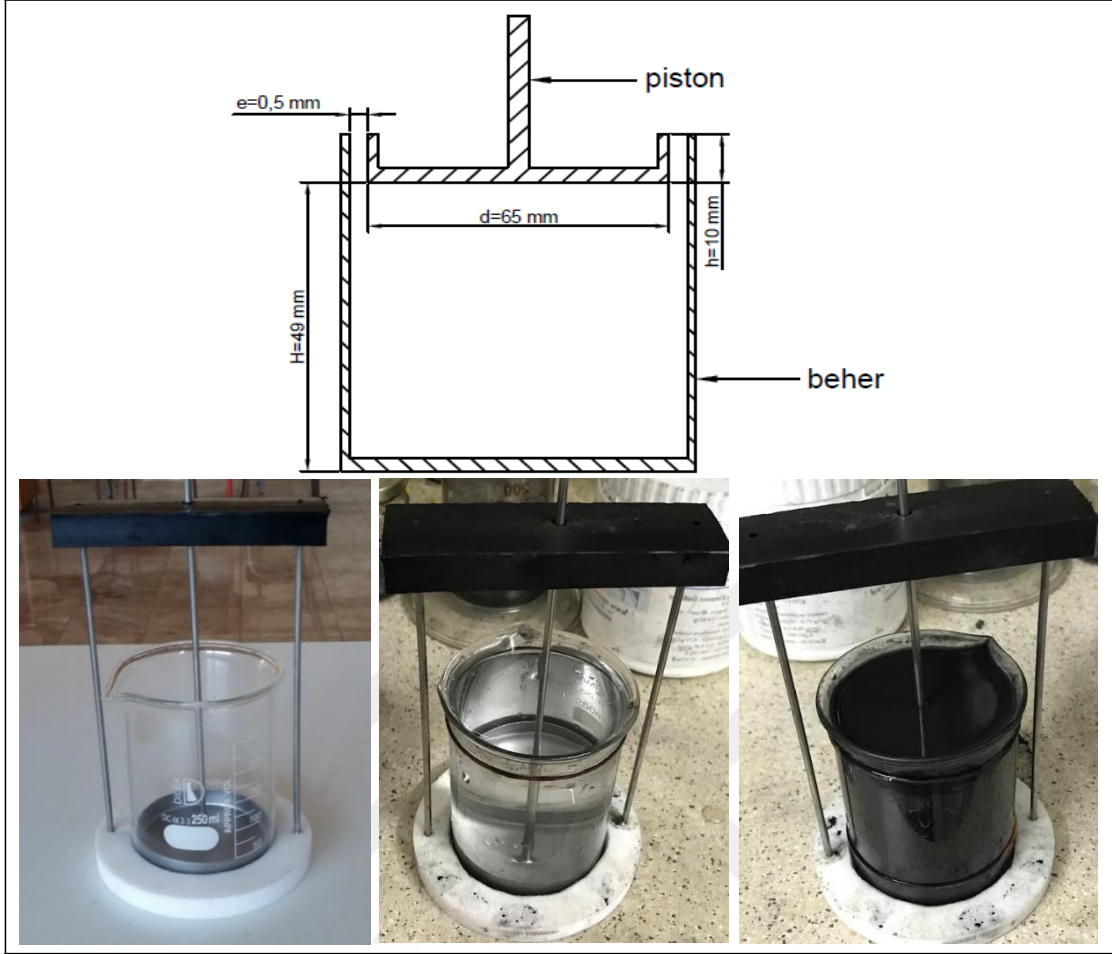
Elektrik iletkenliği ölçümleri sonucunda elde edilmiş olan bulgular Şekil 13'te görülen grafikte verilmiştir. Değişimde de görüldüğü gibi; artan hacimsel oran ile birlikte nanoakışkanların elektriksel iletkenlikleri de Şekil 10'da görülen ısı iletkenlik değişimine benzer bir şekilde doğrusal olarak artmaktadır.



Şekil 13. Elektriksel iletkenliğin CuO oranına göre değişimi

### 3.6. Viskozite

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri içerisinde yer alan viskozite uygulamada önemli olan bir özelliktir. Akış halinde olan akışkanların pompalama direncini etkileyen temel özellik olarak viskozitenin bilinmesi ve projelendirme çalışmalarında buna göre uygun hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Viskozite ölçüm teknikleri konusunda belli başlı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerde esas olan unsur; viskozitenin bağlı olduğu hız, zaman, debi gibi temel değişkenlerin ölçülmesi ile dolaylı olarak viskozitenin belirlenmesidir. Bu çalışmada; KTÜ Makine Mühendisliği Bölümünde öğrenci proje çalışması olarak geliştirilmiş olan ve kalibrasyonu yapılmış bir “düşen pistonlu viskozimetre” kullanılarak viskozite ölçümleri yapılmıştır. Viskozimetrenin teknik çizimi ve çeşitli görselleri Şekil 14'te görülmektedir.

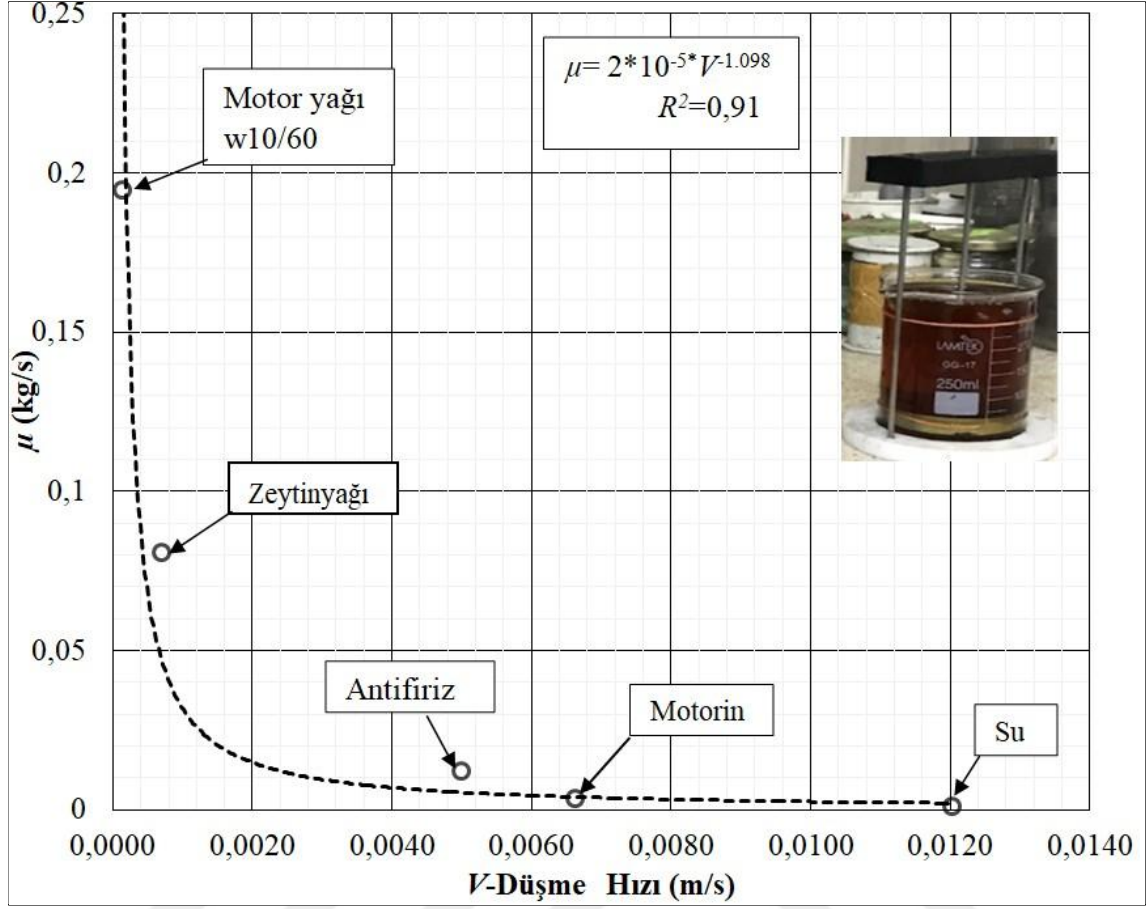


Şekil 14. Düşen pistonlu viskozimetre

Viskozimetrenin kalibrasyonu viskozitesi bilinen çeşitli akışkanlar kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla elde edilmiş olan kalibrasyon grafiğinde de (Şekil 15) görüldüğü gibi ölçüm yapılacak olan akışkan doldurulduktan sonra aksel olarak sabitlenmiş pistonun akışkan içerisindeki yaklaşık 49 mm mesafedeki düşme zamanı not edilerek bilinen viskozite değerleri ile olan değişim eğrisi (kalibrasyon eğrisi) elde edilmiştir. Viskozite deneylerinde motor yağı, zeytinyağı, antifriz, motorin ve su kullanılmıştır. Belirleme katsayısı ( $R^2$ ) %91 düzeyinde olan kalibrasyon eğrisinin denklemi;

$$\mu = 2 * 10^{-5} * \tau^{-1.098} \quad (11)$$

olarak elde edilmiştir.

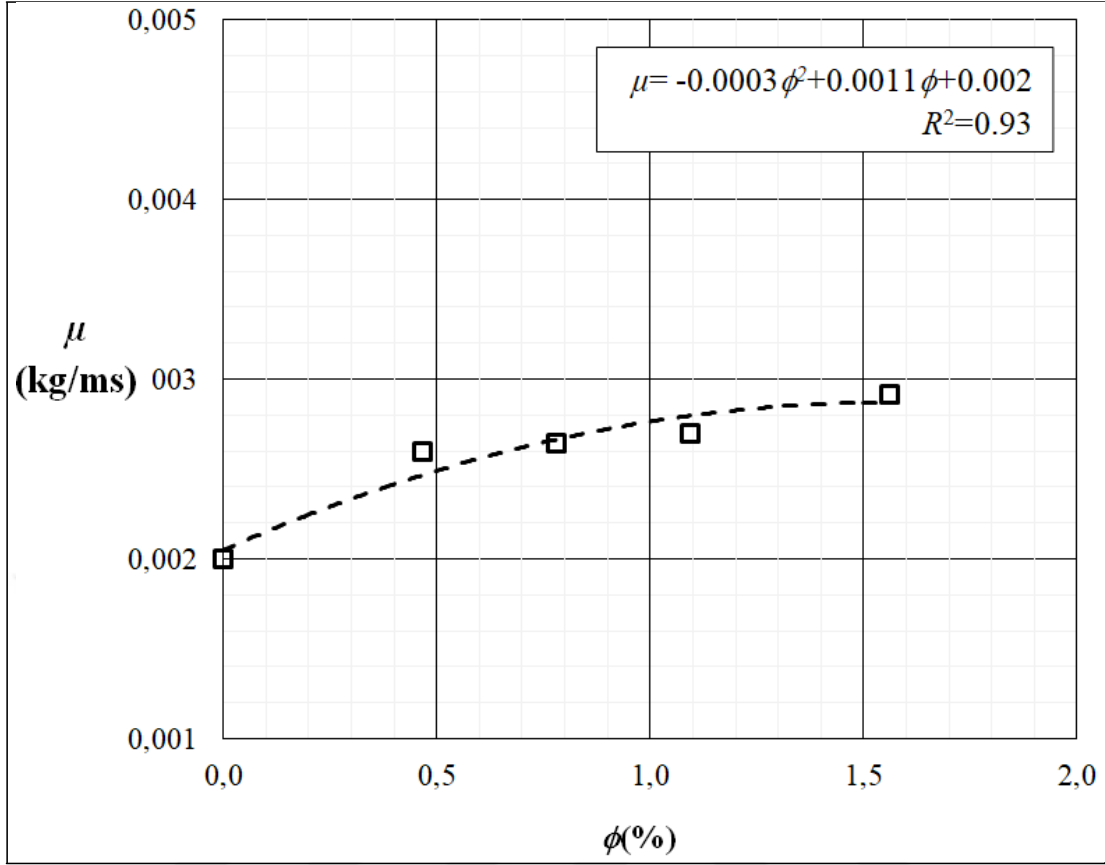


Şekil 15. Düşen pistonlu viskozimetreye ait kalibrasyon eğrisi ve korelasyon bağıntısı

CuO katkılı nanoakışkanların viskoziteleri de aynı şekilde pistonun düşme zamanları (hızları) ölçülerek kalibrasyon eğrisine ait korelasyon bağıntısı Denklem (11) kullanılarak belirlenmiştir. Ortam sıcaklığında yapılmış olan ölçümlerden elde edilmiş olan değişim Şekil 16'da görülmektedir.  $\phi$  hacimsel CuO oranına bağlı olarak bu şekilde elde edilmiş olan korelasyon bağıntısı;

$$\mu = -0.0003\phi^2 + 0.0011\phi + 0.002 \quad (12)$$

şeklindedir. Şekilde de görüldüğü gibi; korelasyon katsayısı %93 olan değişime göre, artan CuO hacimsel oranı ile birlikte viskozite de düzgün olarak artmaktadır. Elde edilen değişim literatürdeki veriler ile uyumlu olup, beklendiği gibi artan CuO konsantrasyonu viskoziteyi artırıcı etki yapmaktadır.



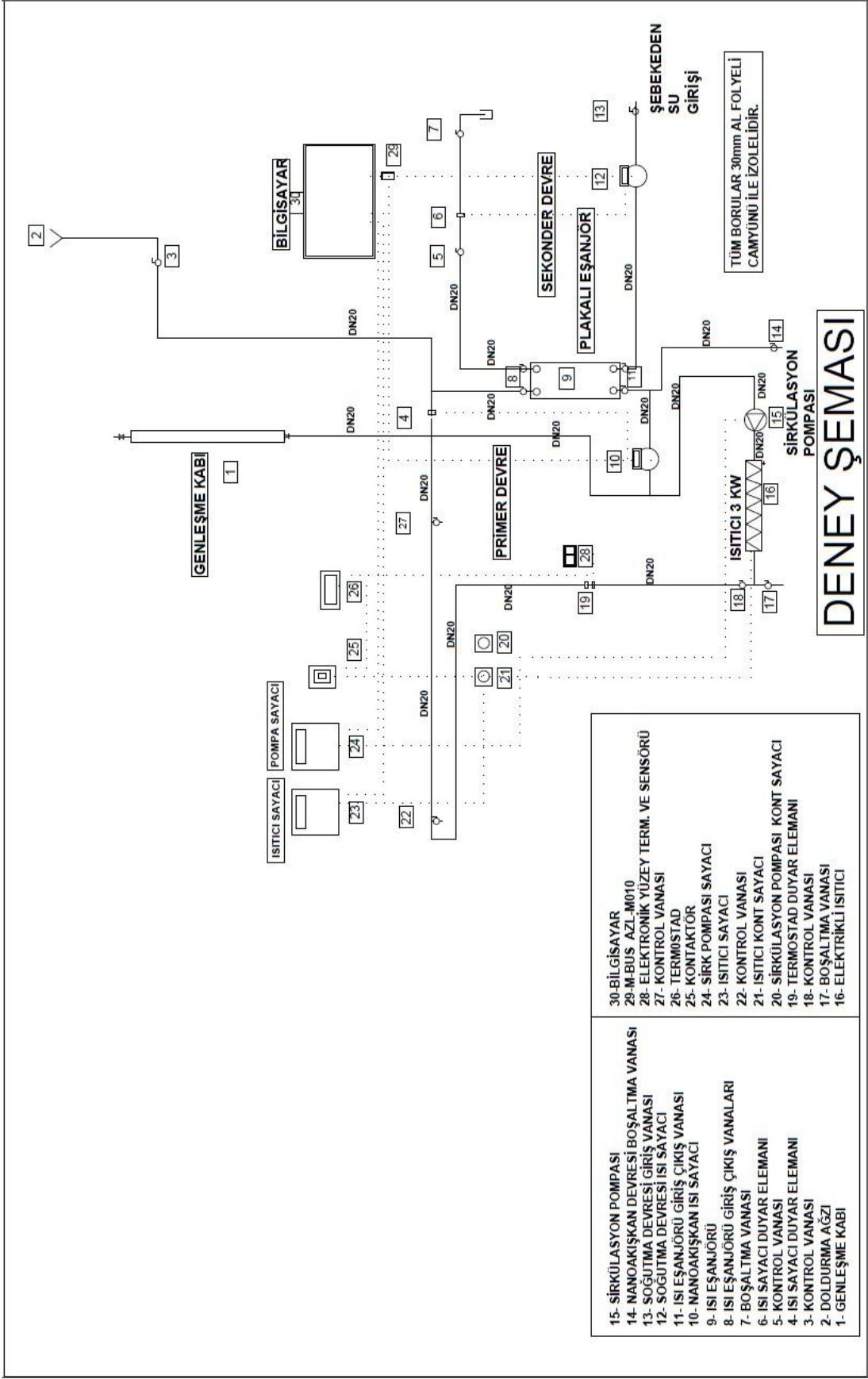
Şekil 16. Nanoakışkan viskozitesinin CuO oranına bağlı olarak değişimi

### 3.7. Isıtma Tesisatı Deney Düzenegi

Çalışmanın amaçlarından bir tanesi olan ısıtma tesisatında aracı akışkan CuO nanoakışkan için performans incelemesi, model bir tesisat üzerinde deneysel olarak yapılmıştır. Deneysel çalışmaya ait şema Şekil 17’de görülmektedir. Sistem; su şebekesine bağlı olan açık bir soğutma devresi ve aracı akışkan CuO nanoakışkanın dolaştığı kapalı ana devre olarak iki temel kısımdan oluşmaktadır. Ana devrede; 3 kW’lık elektrikli bir ısıtıcı, kolektör, ayar vanası ve sayacı, üç devirli dolaşım pompası ve sayacı, elektronik termostat ve duyar elemanı, genişleme kabı, çelik plakalı ısı değiştirgeci ve ısı sayacı (kalorimetre) yer almaktadır. Soğutucu devre üzerinde benzer şekilde kalorimetre, su giriş vanası, debi ayar vanası ve boşaltma vanası bulunmaktadır. Sistemde ısı aktarımı çelik plakalı bir ısı değiştiricisinde gerçekleştirilmekte ve sistemdeki Nusselt sayısı kayıtları burada sıcak akışkan (nanoakışkan) tarafında yüzey ve akışkan sıcaklıkları ölçülerek yapılmıştır. Akışkan

ve yüzey sıcaklıkları, eşanjör giriş ve çıkışında yapılmış olan sıcaklık ölçümlerinin ortalaması olarak alınmıştır.

Deney düzeneğinde 13,2 mm iç çapa sahip DN20 PPRC boru kullanılmış olup, bütün sistem 30 mm cam yünü yalıtım ve üzerine alüminyum folyo ile kaplanarak yalıtılmıştır. Yapılan ölçümlerin kaydı AZEL M-BUS yazılımı ile yapılmıştır. Isı sayaçları ve diğer sıcaklık ölçümleri mini master AZL-010 modülü kullanılarak bilgisayara veri aktarımı sağlanmıştır. Deneyin başlangıcında kapalı ana devreye önceden hazırlanmış nanoakışkan doldurularak sistemin havası alınmıştır. Çalışma debisine uygun pompa devir sayısı kabaca ayarlandıktan sonra kolektördeki vana ile hassas debi ayarı yapılmıştır. Sistemdeki ısıtıcı çalıştırılmadan önce soğutma devresindeki vanalar ile bu devredeki debi de ayarlanarak sistem hazır hale getirilmiştir. Sistem çalıştırıldıktan sonra daimi rejim durumu sağlanıncaya kadar beklenir ve daimi koşullar oluştuğundan sonra belirli zaman adımlarında (5 dakikada bir) ısıtıcının çektiği elektrik enerjisi, debi, sıcaklık, ısı değiştiricisi giriş/çıkışlarından okuma yapan kalorimetre üzerinden aktarılan ısı enerjileri kaydedilmiştir. Her bir deneyden sonra ana devredeki nanoakışkan boşaltılmış ve devre temiz su ile iyice temizlendikten sonra yeni deney örneği için hazır hale getirilmiştir (Şekil 18).



Şekil 17. Deney düzeneği şeması



Şekil 18. Deney düzeneğine ait çeşitli görseller.

Deney düzeneğinde yer alan elemanlar ve özellikleri topluca Tablo 8’de görülmektedir.



Tablo 8. Deney düzeneğinde yer alan elemanlar ve özellikleri

<b>Eleman</b>	<b>Kullanım Yeri</b>	<b>Kullanım Amacı</b>	<b>Özellik</b>	<b>Adet/ Ölçü</b>
Kalorimetre	Ana ve soğutma devresi	Isı enerjisi ölçümü	5-6 kW (Lifos)	2
Plakalı ısı değiştirgeci	Ana ve soğutma devreleri arası	Isı aktarımı	10 kW(Wecol)	1
Dolaşım pompası	Ana devre	Sirkülasyon	0,063-0,41 (Wilo)	1
Elektrikli ısıtıcı	Ana devre	Akışkan ısıtıcı	3 kW	1
Hava alma tüpü	Ana devre	Tesisattan hava tahliyesi	DN20 Pirinç	1
Genleşme kabı	Ana devre	Akışkan genleşmesini karşılamak	Cam	1
Doldurma ağzı	Ana devre	Dolum	PPRC	1
Yalıtım	Boru ve bağlantılarda	Isı kayıplarını önleme	Al folyolu camyünü	30 mm
Doldurma/boşaltma vanaları	Ana ve soğutma devresi	Debi kontrolü	DN20 Pirinç	10
Elektrik sayacı	Isıtıcı ve pompa için	Enerji ölçümü	3-500A/ 220-380V	2
Elektronik termostat	Ana devre	Isıtıcı kontrolü	0-250°C	1
Boru	Ana ve soğutma devresi	Akışkan taşıyıcı	DN20-PPRC	6 m
Aktarma modülü	Ana ve soğutma devresi	Bilgisayara aktarma	AZEL M-BUS	1
Bilgisayar	Deney	Veri toplama		1

### 3.8. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerde kullanılan ölçüm cihazları ve sistemlerin belirsizlik değerleri göz önüne alınarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki belirsizliklerin belirlenmesi gerekir. Deneysel çalışmalarda oluşabilecek belirsizlikler iki türdür.

1. Sistemik belirsizlik de denilen ve tekrarlanan ölçümlerde aynı miktarda ortaya çıkan belirsizlikler olup, her ölçümde aynı oldukları için uygun bir kalibrasyon işlemi ile ortadan kaldırılabirler.

2. Rastgele oluşan düzensiz belirsizlikler olup, her ölçümde farklılık gösterdikleri için ortadan kaldırılamazlar.

Yapılmış olan deneysel ön çalışmada, hem ölçülen hem de hesaplanan parametrelere ait belirsizlik değerleri Fox ve McDonald (1994) tarafından ortaya konulan hesaplama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemde ölçülen  $x_i$  bağımsız değişkenlerine bağlı olarak hesaplanan herhangi bir  $R$  sonuç değeri, matematiksel olarak;

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (13)$$

şeklinde ifade edilir. Herhangi bir  $x_i$  değişkeninde ortaya çıkan bir  $\delta x_i$  değişimi,  $R$  değerinde;

$$\delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (14)$$

kadarlık bir değişime neden olur. Uygulamalarda bu denklemin  $R$ 'ye bölünerek normalize edilmiş şeklinin kullanılması daha uygundur. Sonuç olarak;

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (15)$$

elde edilir. (15) ifadesi  $x_i$  değerlerindeki değişim sonucu ortaya çıkan belirsizlik aralığını tahmin etmede kullanılabilir. Bunun için belirsizlik aralığı ifadesi,  $x_i$  'ye bölünerek;

$$u_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (16)$$

elde edilir. Bütün  $x_i$ 'ler için belirsizlik aralığının toplam etkisinin  $R$  üzerinde oluşturmuş olduğu belirsizlik ise;

$$\frac{\partial R}{\partial x_i} = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

şeklinde yazılabilir (Fox ve McDonald, 1994). Burada her bir alt değişkene ait belirsizlik

$u_i = \frac{\partial R}{\partial x_i}$  olarak yazıldığında, sonuca ait toplam belirsizlik;

$$u_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

olarak elde edilir. Ölçüm cihazları ile okunan değerler ile hesaplanan parametreler ait belirsizlikler Denklem (18) ile Reynolds sayısı için  $u_{Re}=\%3,5$ , Prandtl sayısı için  $u_{Pr}=\%5,2$  ve Nusselt sayısı için  $u_{Nu}=\%4,2$  olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin hesaplanmasında göz önüne alınan ve yapılan ölçümlerde yer alan parametrelere ait belirsizlikler topluca Tablo 9'da yer almaktadır.

Tablo 9. Ölçüm cihazlarının belirsizlikleri

Cihaz	Ölçüm Aralığı	Ölçülen	Belirsizlik (%)
Termoeleman	0-300°C	Sıcaklık	0,1
Debiölçer	0,8-8 L/dak.	Debi	0,01
Isıölçer	0-3 kW	Isı	0,2
Watmetre	0,063-0,41	Güç	0,2

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Termofiziksel Özellikler

Çalışmada hazırlanmış olan çeşitli karışım oranlarındaki nanoakışkanlar fiziksel özellikleri ve ısı özellikleri açısından incelenmiştir. Bu amaçla 3. Bölüm'de detaylarına yer verilmiş olan deneysel çalışmalar ile içyapı görünüşü, yapışma ve çökme davranışı, viskozite gibi fiziksel özelliklerin yanında ısı bir özellik olarak da ısı iletkenlik incelenmiştir. Bu kapsamdaki deneylerden elde edilen bulgular şu şekilde sıralanabilir:

1. CuO nano tozlu nanoakışkanlar ultrasonik karıştırıcılar kullanılarak uzunca bir süre karıştırma yapmak suretiyle deneysel çalışma yapılabilecek kıvamda hazırlanabilirler. Nanoakışkanların içyapılarında homojenliğin sağlanması ve uzun süreli kullanımlarında çökme davranışının önüne geçilmesi için mutlaka katkı maddelerinin kullanılması gerekmektedir.
2. Çalışmada kullanılan askorbik asit katkısı ile hazırlanmış olan nanoakışkan örneklere ait TEM görüntülerinden de anlaşıldığı gibi, nanoakışkan içyapısında askorbik asit katkısı ile topaklaşma önemli ölçüde önlenmekte ve belirli bir homojenlik sağlanmaktadır. Bu nedenle uzun süreli kullanım gerektiren yerlerde nanoakışkanlara mutlaka topaklaşma önleyici katkıların katılması gerekmektedir.
3. Nanoakışkanların ısı taşıyan akışkan olarak kullanılmakta olduğu tesisat türü uygulamalarda yapışma davranışı önem kazanır. Bu çalışmada hacmen % 0,23 CuO içermekte olan örnek için farklı malzemeye sahip boru malzemeleri üzerinde yapılmış olan yapışma testinden elde edilen bulguya göre; galvaniz dökme demir dışında kalan PPRC, bakır ve pirinç malzemeye sahip örneklerde herhangi bir yapışma davranışı ortaya çıkmamaktadır.
4. Nanoakışkanların yapışma özelliği gibi çökme özellikleri de aracı akışkan olarak uzun süreli kullanımlarında önem kazanan bir özelliktir. Nano tozların zaman içerisinde çökme davranışı göstermesi tesisatta tıkanmalara ve performans düşüklüğüne yol açabilir. Çalışmada askorbik asit katkılı örnekler üzerinde yapılan gözleme dayalı çökme davranışı testinde CuO oranı yüksek karışımın çökme süresinin, CuO oranı düşük karışıma göre daha uzun olduğu gözlenmiştir. Bu


davranışın nedeni olarak; Brownian hareket etkisinin artan CuO oranı ile birlikte azalması olduğu söylenebilir.

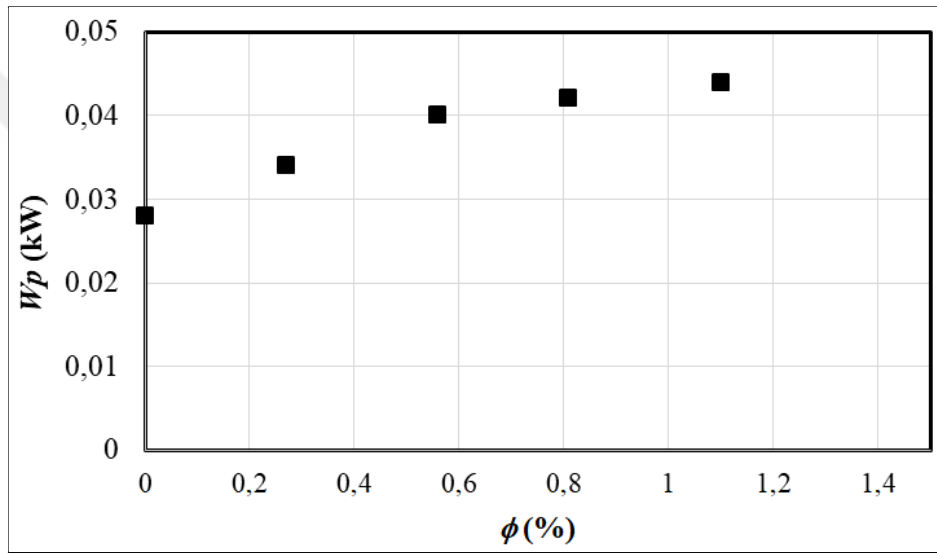
5. Çalışmada hazırlanmış olan askorbik asit katkılı ve katkısız örnekler için ısı iletkenlik deneylerinden elde edilen bulgulara göre; her durumda artan hacimsel oran ile birlikte ısı iletkenlik de doğrusal olarak artmaktadır. Ancak katkısız örnekler için Denklem (9) ile verilen  $k/k_{\text{0}} = 0.5455\phi + 0.8997$  korelasyon bağıntısı ile katkılı örnekler için Denklem (10) ile verilen  $k/k_{\text{0}} = 0.1746\phi + 0.8997$  korelasyon bağıntısının eğimlerinde belirgin bir fark görülmektedir. Her iki korelasyon bağıntısı arasındaki bu fark, askorbik asit katkısı ile birlikte yapıdaki homojenliğin katkısız duruma göre iyileşmesi ve buna bağlı olarak da ısı iletkenliğinin yaklaşık olarak %7 düzeyinde artmasından kaynaklanmaktadır.
6. Çalışmada hazırlanmış olan askorbik asit katkılı CuO nanoakışkanların ısı iletkenliklerinde artan sıcaklık ile belirgin bir değişikliğin olmadığı görülmüştür. Oysaki Newtonumsu nanoakışkanların ısı iletkenlikleri için genel davranış artan sıcaklıkla beraber ısı iletkenliklerin de artması yönündedir. Beklentiye uygun olmayan bu davranışın nedeni olarak ölçme sürecinde yapıda ortaya çıkan topaklaşma olduğu söylenebilir.
7. Çalışmada incelenmiş olan CuO nanoakışkanların viskozite ölçümlerinden elde edilmiş olan  $\mu = -0.0003\phi^2 + 0.0011\phi + 0.002$  korelasyon bağıntısına göre (Denklem 12) viskozite, hacimsel karışım oranına bağlı olarak lineer olmayan bir şekilde artmaktadır. Bu ilişki; yüksek hacimsel oranlara göre düşük hacimsel oranlarda viskozitedeki artış hızının daha yüksek olduğunu göstermektedir.

#### 4.2. Hidrodinamik İnceleme

Nanoakışkanların tesisat sistemlerinde kullanılması durumlarında hidrodinamik davranışlarının bilinmesi önem arz eder. Akışkanların hidrodinamik davranışları yoğunluk, viskozite gibi temel özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Bilindiği gibi akışkanların pompalama gücü Reynolds sayısının ve dolayısıyla viskozitenin bir fonksiyonu olup, artan viskozite ile birlikte pompalama gücü de artmaktadır. Nanoakışkanların ısı özelliklerinin üstünlüğü nedeniyle ısı performans gerektiren uygulamalarda tercih edilebilmeleri

hidrodinamik davranışlarının da detaylı olarak bilinmesine bağlıdır. Çalışma kapsamında yapılan model tesisat deneylerinde bu konu ele alınarak çeşitli hacimsel oranlara sahip nanoakışkanların pompalama güçleri incelenmiştir. Bu amaçla daimi koşullarda çalışan tesisatta belirli süre boyunca (30 dakika) sirkülasyon pompasının çektiği enerji kaydedilerek

bu zaman dilimi için  pompalama gücü belirlenmiştir. Bu pompa gücünün akışkana tamamının aktarılmış olduğu, diğer bir deyişle pompa veriminin % 100 olduğu kabul edilerek değişimler çizilmiştir. Her bir nanoakışkan için üç farklı debi değerinde yapılmış olan deneylerden elde edilen ortalama sonuçlar Şekil 19’da görülmektedir.

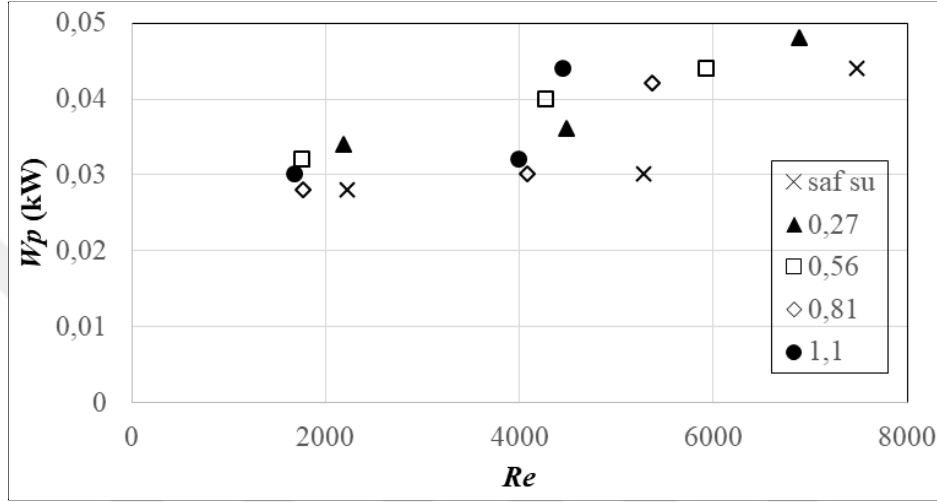


Şekil 19. Pompalama gücünün nanoakışkanın hacimsel oranına bağlı olarak değişimi

Şekil 19’da da görüldüğü gibi nanoakışkanın hacimsel oranındaki artış ile birlikte viskozitesi de artmakta olduğundan (Şekil 16) pompalama gücü de hafifçe artmaktadır. Beklentilere uygun olan bu bulgu çalışma kapsamında da doğrulanmıştır. İlgili değişim grafiğinden de görüldüğü gibi saf su için olan pompalama gücüne göre düşük hacimsel oranlarda artış hızı yüksek iken yüksek hacimsel oranlara doğru gidildiğinde artış hızı hafifçe azalmaktadır. Nanoakışkanların tesisat uygulamalarında nano toz katkı oranına bağlı olarak pompalama gücünde ortaya çıkan bu değişim göz önüne alınmalıdır.

Çalışma kapsamında inceleme yapılan örnekler için pompalama gücünün  $Re$  sayısı ile olan ilişkisi Şekil 20’de görülmektedir. Artan  $Re$  sayısı ile birlikte her karışım oranı için pompalama gücünün de artmakta olduğu ve öte yandan yaklaşık olarak aynı  $Re$  sayılarında

genel olarak artan hacimsel oran ile birlikte pompalama gücünün de biraz daha artmakta olduğu görülmektedir. Beklentilere uygun olan bu davranış, yüksek  $Re$  sayılarında dolaşım sağlayabilmek için pompalama gücünün de yükselmesi gerektiğini göstermektedir. Aynı şekilde artan nano toz konsantrasyonu birlikte aynı  $Re$  sayılarında artmakta olan viskoziteye bağlı olarak pompalama gücünün de yükselmekte olduğu bulgusu elde edilmiştir.



Şekil 20. Pompalama gücünün  $Re$  sayısına bağlı olarak değişimi

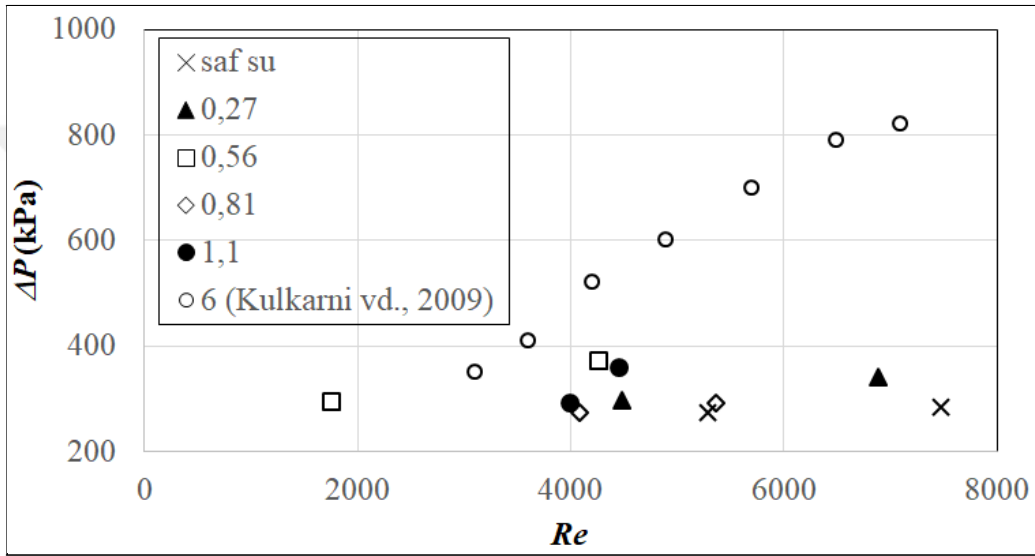
Model tesisat deneylerinde yapılan pompalama gücü ve debi ölçümlerinden elde edilen değerler ile nanoakışkanın dolaştığı ana devrede ortaya çıkan toplam basınç düşümleri de hesaplanmıştır. Bu amaçla akışkanlar mekaniğinden bilinen;

$$\Delta P_{\text{toplam}} = \Delta P_{\text{boru}} + \Delta P_{\text{dirsek}} + \Delta P_{\text{vana}} + \Delta P_{\text{ısı değiştirgeci}} \quad (19)$$

temel bağıntısı kullanılarak dolaşım devresindeki  $\Delta P_{\text{toplam}}$  toplam basınç düşümü hesaplanmıştır. Burada yer alan  $\Delta P_{\text{toplam}}$  toplam basınç düşümü, ana devrede nanoakışkanın karşılaşmakta olduğu boru sürtünmeleri, dirsek, vana, ısı değiştirgeci gibi özel dirençlerde ortaya çıkan dirençleri yenerek  $Q$  debisinde dolaşabilmesi için gereken pompa basıncını

göstermektedir. Yapılan deneylerden alınan ölçümlere bağlı olarak  $\Delta P_{\text{toplam}}$  basınç düşümü ile Reynolds sayısı arasındaki değişimler çeşitli CuO hacimsel oranları için Şekil 21'de çizilmiştir. Değişimlerden görüldüğü gibi artan  $Re$  sayısı ile birlikte  $\Delta P_{\text{toplam}}$  basınç düşümleri hafifçe artmaktadır. Aynı CuO hacimsel orana sahip örnekler için yapılan deneylerden elde

edilen bulgulara göre artan CuO oranı ile birlikte  $\Delta P$  basınç düşümleri de hafifçe artış göstermektedir. CuO katkı oranının artmasıyla beraber  $\Delta P$  basınç düşümlerinde de yüksek artış olduğu görülmektedir. Şekil 21’de yer alan Kulkarni vd. (2009) tarafından yapılmış olan deneysel çalışmaya ait %6 CuO hacimsel oran için elde edilmiş sonuç kıyaslama amaçlı olarak kullanılmıştır. Kulkarni vd. (2009) verileri ile düşük  $Re$  sayılarında uyum olduğu görülürken, yüksek  $Re$  sayılarında belirgin bir fark ortaya çıktığı görülmektedir. Ancak Kulkarni vd. (2009) tarafından yapılmış olan deneyin %6 CuO oranı için yapılmış olduğu da göz önüne alınmalıdır.



Şekil 21. Ana devrede basınç düşümünün çeşitli CuO hacimsel oranları (%) için  $Re$  sayısına bağlı olarak değişimi.

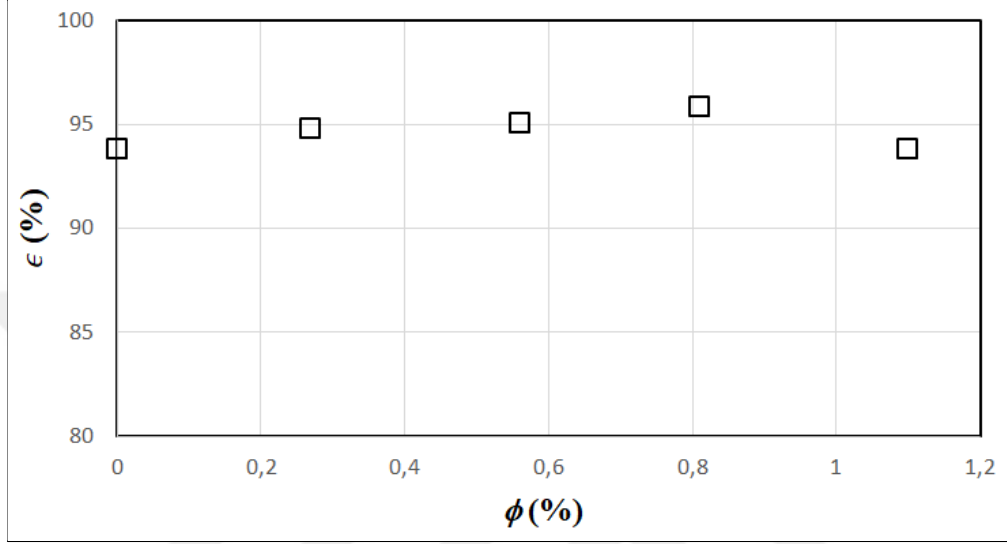
### 4.3. Isıl İnceleme

Sistemde kullanılan ısı değiştirgecinin etkinliği sıcak ısıtıcıdan nanoakışkana aktarılan ısıнын açık devredeki soğuk akışkana geçen kısmının ölçülmesi ile belirlenmiştir. Bu işlem her bir devrenin ısı değiştirgecine giriş ve çıkış sıcaklıklarına ve debisine bağlı olarak hesaplanmış olan ısı değerleri ile yapılmıştır. Isı değiştirgecinin etkinliği olarak göz önüne alınan bu tanım:

$$\eta = \frac{Q_{out} - Q_{in}}{Q_{max} - Q_{in}} \quad (20)$$



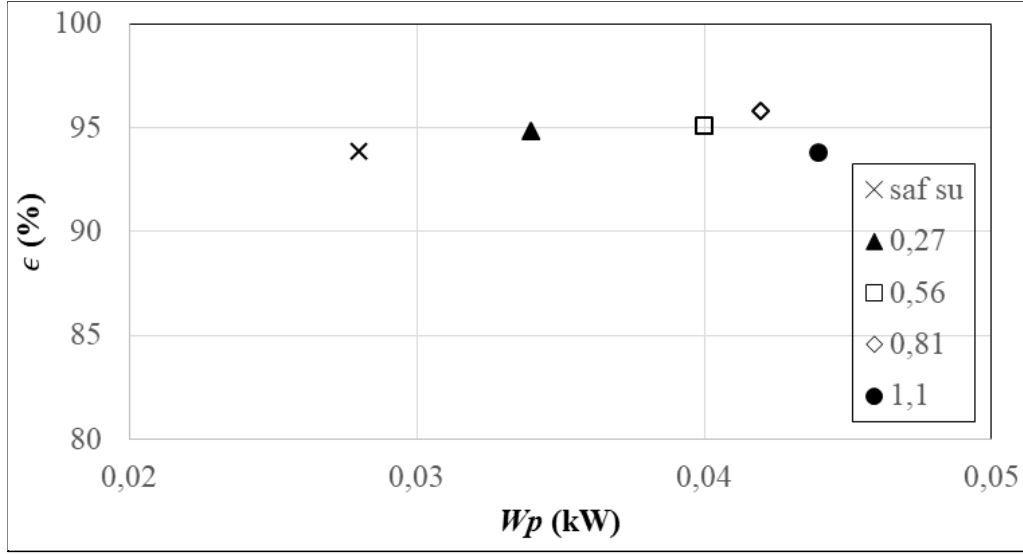
seklindedir. Burada  $\epsilon$  sıcak su ile plakalı ısı değiştirgecinde nanoakışkanın bulunduğu ana devreden,  $\phi$  ise plakalı ısı değiştirgecinde nanoakışkanın bulunduğu ana devreden, suyunun dolaşmakta olduğu soğutucu devreye geçen ısıdır. Nanoakışkan hacimsel oranına bağlı olarak ısı değiştirgecinin etkinlik değişimi Şekil 22’de görülmektedir.



Şekil 22. Isı değiştirgeci etkinliğinin nanoakışkanın hacimsel oranına bağlı olarak değişimi

Etkinlik değişiminden de görüldüğü gibi artan hacimsel oran ile birlikte etkinlikte az da olsa bir artış ortaya çıkmaktadır.  $\phi=0.81$  için en yüksek değerini alan etkinlik, daha sonra en yüksek hacimsel oranda ( $\phi=1.1$ ) saf su değerine kadar düşmektedir.

Sistemin genel performansına bakıldığında pompalama gücü ve aktarılan ısısal gücün bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Artan nano toz katkısının ısı transferinde sağlamakta olduğu iyileştirmeye karşın, artan viskozite değeri nedeniyle pompalama gücünde ortaya çıkabilecek olan artış arasındaki enerji gideri anlamına gelmektedir. Şekil 23’te görülen değişim her iki parametre arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



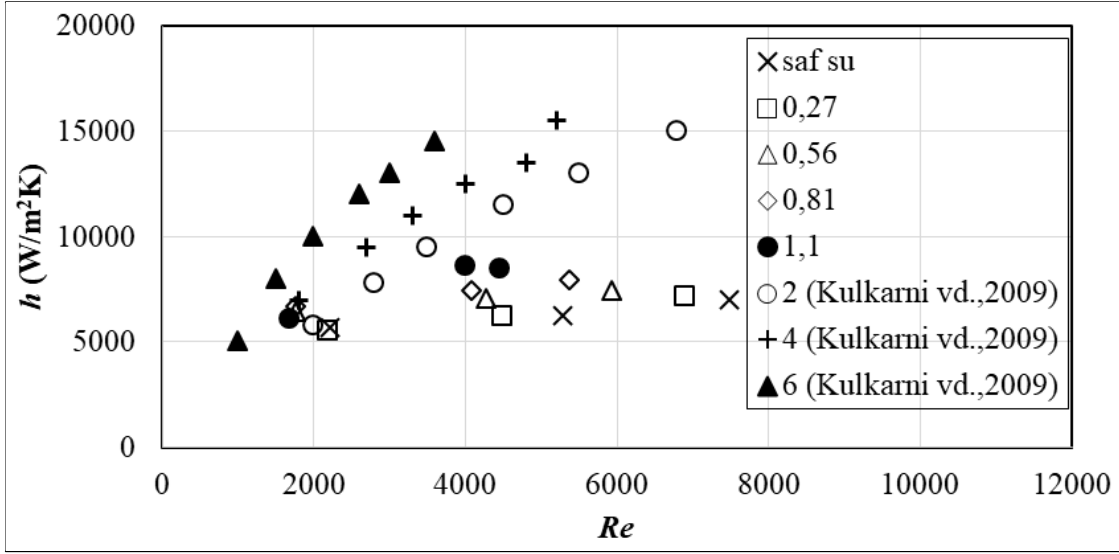
Şekil 23. Isı değıştirgeci etkinliği ile pompalama g¼c¼ arasındaki değişim

Şekilde de gör¼ld¼đ¼ gibi; artan nano toz konsantrasyonu ile birlikte pompalama g¼c¼ de artarken, aktarılan ısıdaki iyileşme belirgin bir değişim göstermemektedir. Sadece  $\phi=1.1$  için ısı g¼c¼nde hafif bir artış olduğu gör¼lmektedir.

Sistemde yer alan ısı değıştirgecinde nanoakışkan tarafındaki ortalama ısı taşınım katsayısı ( $h$ ) ısı taşınım performansını gösteren en temel parametredir. Bilindiği gibi  $h$  ortalama ısı taşınım katsayısı;

$$h = \frac{Q}{(T_x - T_y)} \quad (21)$$

olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada yapılmış olan ölç¼mlere göre elde edilmiş olan ortalama ısı taşınım katsayısı değişimleri Kulkarni vd. (2009) tarafından çeşitli oranlardaki CuO nanoakışkanlar ile kıyaslamalı olarak Şekil 24'te verilmiştir. Elde edilen değişimlerden de gör¼ld¼đ¼ gibi;  $Re$  sayısının 4000'e kadar olan aralığında Kulkarni vd. (2009) tarafından elde edilmiş olan %2, %4 ve %6 CuO nanoakışkanlara ait ortalama ısı taşınım katsayıları, bu çalışmadaki nanoakışkanlar ile karışım oranları göz önüne alındığında iyi bir uyum göstermektedir.  $Re=4000$  değerinden daha yüksek değerlerde kıyaslama yapılan literat¼rdeki deneysel veriler ile olan uyum azalmaktadır.



Şekil 24. Ortalama ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile olan değişimleri

Isı taşınım karakteristiğinde kullanılan bir diğer parametre de Nusselt sayısıdır. İnceleme konusunda boyutsuz bir parametre olarak önemli bir karakteristik sayı olan Nusselt sayısı ( $Nu$ ) ısı değiştirgecinin ısı aktaran tarafındaki ortalama ısı taşınım katsayısı ( $h$ ), nanoakışkanın ısı iletim katsayısı ( $k$ ) ve boru iç çapına ( $D$ ) bağlı olarak bilindiği üzere:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (22)$$

şeklinde tanımlanır. Burada yer alan  $h$  ısı taşınım katsayısı Denklem (21) ile deneysel verilere göre hesaplanmıştır. Isı iletim katsayısı  $k$  ise çalışmada askorbik asit katkısız örneklerle ait Denklem (9) ile verilmiş olan korelasyon bağıntısından hesaplanmıştır.

Nanoakışkan örneklerin özgül ısıları için literatürde önerilen belli başlı bağıntılar mevcuttur. En yaygın olarak kullanılan bağıntı; nano parçacıkların ve ana akışkanın ısı dengede olduğunu kabul eden ve Buongiorno (Kulkarni vd., 2009) tarafından önerilen bağıntıdır:

$$c_{pp} = \frac{\phi \rho_p c_{pp} + (1-\phi) \rho_f c_{pf}}{\rho} \quad (23)$$

Burada  $c_{pp}$  nanoakışkana ait özgül ısı olup; nano parçacık ortalama yoğunluğu ( $\rho_p=6400 \text{ kg/m}^3$ ), ana akışkan yoğunluğu ( $\rho_f=998 \text{ kg/m}^3$ ), özgül ısıların ( $c_{pf}=540 \text{ J/kgK}$ ,

$c_{pf}=4187 \text{ J/kgK}$ ) ağırlıklı ortalaması ile hesaplanmaktadır.  $\rho_{nf}$  ise nanoakışkanın yoğunluğu olup Tablo 6’da verilmiş olan değerlerden alınmıştır. Çalışmada kullanılan nanoakışkanlara ait özgül ısılar için hesaplanan değerler Tablo 10’da topluca görülmektedir.

Bu çalışmada göz önüne alınan Prandtl sayısı ( $Pr$ ) hesabında da (23) bağıntısı ile hesaplanan özgül ısılar kullanılmıştır. Bilindiği gibi Prandtl sayısı:

$$Pr = \frac{\mu_{nf}}{c_{pf} \rho_{nf}} \quad (24)$$

olarak tanımlanmakta olup, momentum ve ısıl yayılım katsayıları arasındaki oranı ifade etmektedir. Çalışmada göz önüne alınan örnekler için  $Pr$  sayılarının hesabında örneklerin özgül ısı değerlerinin yanı sıra ölçümle belirlenmiş olan ısı iletim katsayıları ve viskozite değerleri göz önüne alınarak hesaplanan değerler Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 10. Nanoakışkan örneklerin Denklem (23) ile hesaplanan özgül ısı değerleri

$\phi$	$C_{eff}$ (J/kgK)
0,27	3933,99
0,56	3670,27
0,81	3449,26
1,10	3199,99

Tablo 11. Nanoakışkan örnekler için Prandtl sayıları

$\phi$	$Pr$
0.27	14,45
0.56	12,73
0.81	11,61
1.10	9,99

Bilindiği üzere; Navier-Stokes denklemlerine ve enerji denkleminin benzerlik prensibinin uygulanması ile elde edilen boyutsuz denklemlerde belirli bazı boyutsuz sayı grupları ortaya çıkar. Sıcaklığın etkili olduğu durum için daimi akışa ait boyutsuz formdaki Navier-Stokes denklemlerinde Reynolds sayısı ve Grashof sayısı ( $Gr$ ) ortaya çıkarken, enerji denkleminde yine Reynolds sayısı, Prandtl sayısı, Grashof sayısı ( $Gr$ ) sayısı ve Eckert sayısı

( $Ec$ ) ortaya çıkar. Her iki denklemin ortak analiz edilmesi ile ısı transferinin ortaya çıktığı taşınım olaylarında boyutsuz sayı grupları arasında;

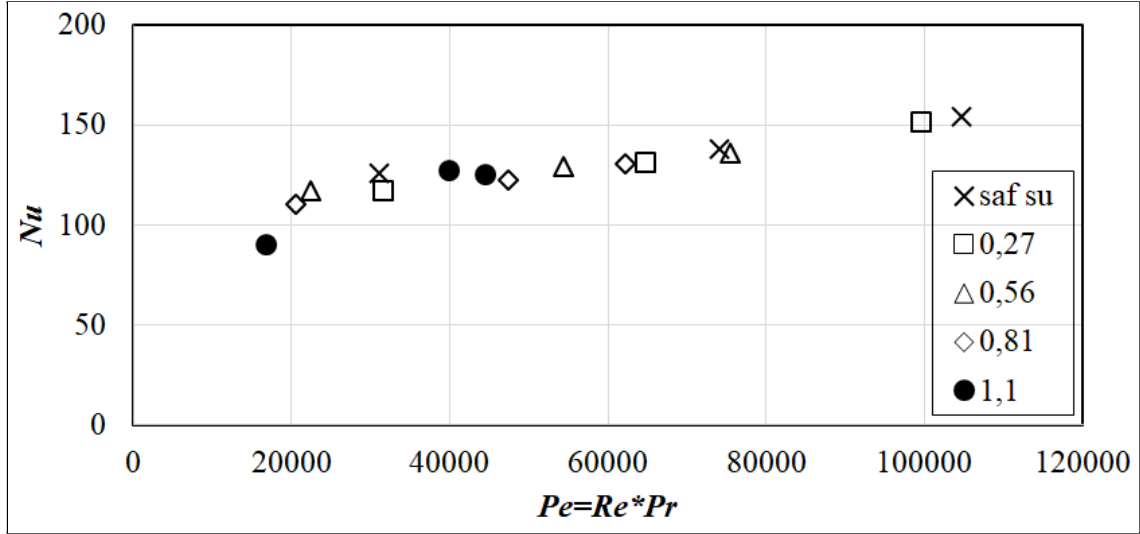
$$Nu = f(Gr, Ec) \quad (25)$$

İlişkisi elde edilir. Bu ilişki ısı transferi içeren bütün akışlarda geçerli olup, deneysel çalışmalarda önemli bir referans olarak kullanılmaktadır (Schlichting, H., 1979). Akış özelliklerine bağlı olarak Denklem (25) ile verilen fonksiyonel ilişki basit formlar alabilir. Örneğin sıcaklık farklarının düşük kaldığı (birkaç derece) düşük hızlı durumlarda analizde  $Ec$  sayısı göz önüne alınmaz. Benzer şekilde orta düzey hızlara çıkıldığında olaydaki kaldırma etkisi, atalet ve sürtünme etkilerinin yanında göz ardı edilebilecek düzeylerde kalır. Bu durumda olayda doğal taşınımı karakterize eden  $Gr$  sayısı da etkin olmaktan çıkar. Diğer bir deyişle akışın zorlanmış taşınım tanımına uygun olması durumunda Denklem (25) basitleşerek;

$$Nu = f(Gr) \quad (26)$$

yapısına dönüşür (Schlichting, H., 1979). Bu çalışmada göz önüne alınan plakalı ısı değiştiricisi içerisindeki akış davranışı; tipik bir zorlanmış taşınım olup, Denklem (26) ile tanımlanan ilişkiye uygundur. Sistemde dolaşan akışkanın taşımakta olduğu ısının önem kazandığı durumlarda ortaya çıkan önemli bir boyutsuz sayı da Peclet sayısı ( $Pe$ ) olup kısaca  $Pe=Re*Pr$  olarak hesaplanır. Çoğunlukla düz boru içerisindeki zorlanmış taşınımında ortaya çıkan  $Pe$  sayısı; ısı transferi için önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır.

Akış içerisinde taşınmakta olan (advection) ısı enerjisinin iletimle olan (conduction) ısı transferine oranını ifade eden  $Pe$  sayısı için bu çalışmada göz önüne alınan nanoakışkanlara ait termo fiziksel veriler ve akış parametreleri ile elde edilen deneysel verilere göre ortalama  $Nu$  sayısının  $Pe$  ile olan ilişkisi Şekil 25'te görülmektedir.



Şekil 25. Nusselt sayısının Peclet sayısı ile olan değişimleri

Şekil 25'te görülen deneysel değişimlerin her biri için  $Nu = f(Re, Pr, \phi)$  korelasyon bağıntıları elde edilmiş ve topluca Tablo 12'de verilmiştir.  $Re=5000$  için korelasyon

bağıntılarından elde edilmiş olan örnek değerlerden de görüldüğü gibi artan karışım oranı ile birlikte  $Nu$  sayısında hafifçe bir düşme ortaya çıkmakta ve  $\phi=1,1$  için yeniden yükselmektedir.

Tablo 12.  $Nu = f(Re, Pr, \phi)$  korelasyon bağıntıları

$\phi$ (%)	Korelasyon	Örnek Değer ( $Re=5000$ için)
Saf su	$Nu = 2,527 * Re^{0,1626} * Pr^{0,4}$	141,29
0,27	$Nu = 1,369 * Re^{0,2284} * Pr^{0,4}$	138,39
0,56	$Nu = 3,759 * Re^{0,1193} * Pr^{0,4}$	132,19
0,81	$Nu = 3,062 * Re^{0,1502} * Pr^{0,4}$	127,77
1,1	$Nu = 0,623 * Re^{0,2193} * Pr^{0,4}$	193,56

Literatürde çeşitli türden nanoakışkanlar için farklı deney koşullarında ve parametreler için yapılmış olan deneylerden elde edilmiş olan  $Nu = f(Re, Pr, \phi)$  korelasyon bağıntıları ve bu çalışmada  $\phi=1,1$  karışım oranı için elde edilmiş olan bağıntı kıyaslamalı olarak Tablo

13'te verilmiştir. Tabloda yer alan çalışmalardaki nanoakışkanlar ve hacimsel oranlarının yanı sıra akış rejimi ve deneysel çalışma aralıklarında da farklılıklar olması nedeniyle, bu çalışmadan elde edilmiş olan korelasyon bağıntısından hesaplanmış olan  $Nu$  sayısının diğer

bağıntılardan hesaplanan değerler ile farklılıklar göstermiş olması normal bir sonuçtur. Örnek değerın hesaplanmasında çalışmalarda ortak olabilecek olan  $Re$  ve  $Pr$  sayıları göz önüne alınmıştır.



Tablo 13. Benzer türden ısı değiştirgeçleri için literatürde mevcut olan  $Nu = f(Re, Pr)$  korelasyon bağıntıları (Ambreen ve Kim, 2018).

Korelasyon	Nanoakışkan	Geçerlilik Aralığı	Açıklama	Örnek Değer*
$Nu = (0,9223 + 0.2327 * Re^{0,4}) * Pr^{0,2120}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su $\phi = \%5$	$200 < Re < 1700$	Sayısal, düzlem güneş kolektörü	15,3151
$Nu = 0,3762 * Re^{0,6681} * Pr^{0,4}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su $\phi = \%1,89$	$182 < Re < 956$	Deneysel, plakalı ısı değiştirgeci	125,1311
$Nu = 0,623 * Re^{0,3600} * Pr$	CuO/su $\phi = \%1,1$	$1500 < Re < 7500$	Bu çalışma	86,672

\*  $Re=1500$  ve  $Pr=10$  için hesaplanmış  $Nu$  değeri



Şekil 24 ve Şekil 25'in karşılaştırılması ile görülmektedir ki;  $Pe$  sayısı göz önüne alındığında çalışmadaki orta düzey  $Pe$  sayılarında  $Nu$  yaklaşık olarak sabit kalmakta düşük ve yüksek  $Pe$  sayılarında artan  $Pe$  sayısı ile birlikte  $Nu$  sayısında artış eğilimi devam

etmektedir. Bu çalışmadan elde edilmiş olan deneysel verilere dayalı olarak  $Nu = f(\phi)$  ilişkisi için Şekil 25'te görülen değişimlere ait korelasyon bağıntıları topluca Tablo 14'te verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi bütün hacimsel oranlar için belirleme katsayıları oldukça yüksek değerlerde olup, korelasyon bağıntıları deneysel değişimleri yüksek doğruluk düzeyinde yansıtmaktadır. Tabloda  $Pe=40000$  değeri için hesaplanmış olan  $Nu$  sayısı değerleri incelendiğinde düzgün bir değişimin olmadığı, artan katışım oranı ile birlikte  $Nu$  sayısında azalan-aratan-azalan bir değişimin olduğu görülmektedir. Bu davranış literatürde de yer aldığı gibi (Pandey ve Nema, 2012); nanoakışkana nano toz katkısı ile ısı taşınım ve ısı iletim özelliklerindeki değişimler farklı hızda olup, bu nedenle  $Nu$  sayısında da düzgün bir değişim elde edilememektedir. Nanoakışkanların içerdikleri nano tozların katışım oranına bağlı olarak ortaya çıkan bu  $Nu$  sayısı kararsızlığına rağmen ısıl performansları iyileşmektedir (Şekil 22).

Tablo 14.  $Nu = f(\phi)$  korelasyon bağıntıları

$\phi$ (%)	Korelasyon	$R^2$ (%)	Örnek Değer ( $Pe=40000$ için)
Saf su	$Nu = 24,207 * \phi^{0,1581}$	92,19	129,28
0,27	$Nu = 11,611 * \phi^{0,2214}$	95,58	121,27
0,56	$Nu = 35,573 * \phi^{0,1186}$	99,32	125,00
0,81	$Nu = 24,951 * \phi^{0,1488}$	98,5	120,75
1,1	$Nu = 2,6058 * \phi^{0,364}$	98,05	123,33

Çalışmanın yapıldığı hacimsel oranlardaki  $CuO$  nanoakışkanlar için en genel korelasyon bağıntısı  $\phi$  hacimsel oranını da göz önüne alan bağıntıdır. Konu ile ilgili klasik

$Nu = f(\phi * \phi)$  korelasyon bağıntısına hacimsel oranın üstel olarak eklenmesi ile yeni bir korelasyon tanımı yapılmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada elde edilmiş olan deneysel veriler kullanılarak literatürde de yer almakta olan  $Nu = A * \phi^B * \phi^C * \phi^D$  bağıntısına uygun genel korelasyon bağıntısı;

$$Nu = 11,3453 * \phi^{0,199194} * \phi^{0,305504} * \phi^{0,00965827} \quad (27)$$

olarak elde edilmiştir. Burada yer alan  $\phi$ , % olarak nanoakışkan hacimsel oranını temsil etmektedir. Farklı nanoakışkanlar ve yakın çalışma koşulları için literatürde mevcut olan korelasyon bağıntıları kıyaslama amaçlı olarak Tablo 15’te verilmiştir. Bu çalışmalarda; yaygın olarak kullanılan nanoakışkanlar için çeşitli uygulamalarda yapılmış olan sayısal ve deneysel çalışmalar ile korelasyonlar elde edilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi literatürdeki değerler arasında belirli düzeyde farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Görülen farklılıkların yanı sıra nanoakışkan tane boyutu ve morfolojisi ile birlikte tespit edilemeyen diğer faktörlerin bu farklar üzerinde etkili olduğu açıktır.



Tablo 15. Benzer türden ısı aktarıcılar için literatürde mevcut olan  $Nu = f(\phi, Re, Pr)$  korelasyon bağıntıları

Korelasyon	Nanoakışkan	Geçerlilik Aralığı	Açıklama	Örnek Değer
$Nu = (0,26 + 0,02\phi - 0,0051\phi^2) * Re^{0,27}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su	3000 < Re < 9000 1 ≤ φ ≤ 5	DeneySEL, Isı değiştirgeci (Pandey ve Nema, 2012)	2,706 (Pe=5000, φ=3 için)
$Nu = 0,2521 * Re^{0,397} * Pr^{0,432} * (1 + \phi)^{9,836}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su	600 < Re < 2000 0,25 < φ < 0,77	DeneySEL, mikrokanal (Ambreen ve Kim, 2018)	670,679 (Re=1500, Pr=10, φ=0,5 için)
$Nu = 0,074 * Re^{0,707} * Pr^{0,385} * \phi^{0,074}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su	4500 < Re < 11500 0,1 < φ < 1,5	Sayısal, halka kanal (Ambreen ve Kim, 2018)	2,606 (Re=5000, Pr=10, φ=1 için)
$Nu = 9,12 * Re^{0,18} * (1 - \phi)^{-2,41}$	Cu/motor yağı	Re < 2000 0 < φ < 10	Sayısal, halka kanal (Ambreen ve Kim, 2018)	51,48 (Re=1500, Pr=10, φ=1 için)
$Nu = 11,3453 * Re^{0,199194} * Pr^{0,305504} * \phi^{0,00965827}$	CuO/su	1500 < Re < 7500 0 ≤ φ ≤ 1,1	Bu alışma	98,404 (Re=1500, Pr=10, φ=1 için)

## 5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında uygun şekilde hazırlanmış olan CuO nanoakışkanın öncelikle termofiziksel özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Çeşitli karışım oranlarına sahip CuO nanoakışkanlar için model bir ısıtma tesisatında yer alan plakalı bir ısı değiştirgecinde deneysel olarak performans incelemesi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Su esaslı CuO nanoakışkanın termofiziksel özelliklerinin yanı sıra hidrodinamik ve ısıl davranış özellikleri de hacimsel karışım oranına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Pratikteki teknolojik uygulamalarda kullanım alanı gittikçe yaygınlaşan nanoakışkanların; özgül ısı, ısıl ve elektriksel iletkenlik, viskozite, yoğunluk gibi termofiziksel özellikleri analitik ve sayısal modelleme çalışmalarında kullanılan önemli parametrelerdir. Ayrıca nanoakışkanların kullanımlarında çökme ve yapışma davranışı ile topaklaşma özelliğinin önemli bir rolü vardır. Nanoakışkandan olan beklentiyi olumsuz yönde etkileyen bu özelliklerin çeşitli katkılarla giderilmesi ve nanoakışkanların kullanımlarında sorun ortaya çıkarmayacak duruma getirilmesi gerekmektedir.
- Su esaslı CuO nanoakışkanın topaklaşma, yapışma ve çökme özellikleri nano düzeydeki fiziksel etkiler nedeniyle ortaya çıkan kaçınılmaz bir durumdur. Brownian hareket gösteren nano tozların bu rastlantısal ve öngörülemeyen hareketi ile birlikte ortaya çıkan topaklaşma ve yapışma davranışında ana (esas) akışkanın etkili olduğu açıktır. Ana akışkanın türüne göre seçilmesi gereken uygun katkı maddeleri ile Brownian etki azaltılarak topaklaşma ve yapışma davranışı önemli ölçüde önlenmektedir. Bu çalışmada ana akışkan suya katkı olarak kullanılan askorbik asit topaklaşmayı önlemede etkili olmuştur.
- Çalışmada göz önüne alınmış olan su esaslı CuO nanoakışkan için yapılmış olan ısıl iletkenlik ölçümlerinden elde edilmiş olan bulgular göstermektedir ki; CuO nano tozun artan hacimsel oranı ile birlikte ısıl iletkenlik, katkısız ve katkılı durumların her ikisinde de artmaktadır. Askorbik asit katkılı örneklerin daha düşük ısıl iletkenlik performansı göstermesi askorbik asidin suya göre daha düşük ısıl iletkenliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır. CuO nanoakışkanın hacimsel oranındaki artışın her durumda ısıl iletkenlikte artış sağlaması ısıl

performans açısından iyi olmasına karşın, diğer özellikler ile birlikte (viskozite gibi) değerlendirildiğinde iyi bir optimizasyon yapılması gerektiği anlaşılır.

- Viskozite açısından elde edilmiş olan korelasyon sonucuna göre; beklentiye uygun olarak, artan CuO hacimsel oranı ile birlikte nanoakışkanın viskozitesi de doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Bu bulguya göre düşük hacimsel oranlarda viskozitedeki artış yüksek hızda olurken, hacimsel oranın % 0,8 değerinden sonra viskozitedeki artış hızı düşmektedir. Dolayısıyla çalışmada göz önüne alınmış olan sınırlar içerisindeki davranış üzerinden ifade edilebilecek olan sonuç; yüksek CuO hacimsel oranının akış direnci üzerinde önemli bir etkisinin olmadığıdır.
- Su esaslı CuO nanoakışkan ile model tesisat düzeneği üzerinde yapılmış olan deneylerde pompalama gücünün artan hacimsel karışım oranı ile birlikte artmakta olan viskozite etkisine bağlı olarak artmakta olduğu görülmüştür. Bu değişim viskozitenin hacimsel karışım oranına göre olan değişimi ile oldukça benzer bir davranış göstermekte olup, hacimsel oranın % 0,8 değerinden itibaren pompalama gücündeki artış hızı da düşmektedir. Pompalama gücünün tüm hacimsel oranlarda artan  $Re$  sayısı ile birlikte artmakta olduğu ve bunun nedeninin de artan boru sürtünme direnci olduğu sonucuna varılmıştır.
- Pompa basıncındaki değişimlere ait bulgular göstermektedir ki; artan  $Re$  sayısı ile birlikte pompalama basıncı da hafifçe artmaktadır. Bu davranış; hızdaki artışın yanı sıra viskozitedeki artışın da etkisiyle, artan  $Re$  sayısı ile birlikte pompalama gücündeki artışın debideki artışa göre biraz daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.
- Su esaslı CuO nanoakışkanların kullanıldığı ısı aktarma sistemlerinde etkinlik; bu çalışmada göz önüne alınmış olan hacimsel oran aralığında olmak üzere hacimsel orana bağlı olarak bir miktar değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan model ısıtma tesisatındaki ısı değiştirgecinde  $\phi = 0,81$  değerinde etkinlik %96 düzeyindeki en yüksek değerine ulaşmıştır. Hacimsel oranın 1,1 değerindeki etkinlik yaklaşık olarak saf su için olan değere düşmüştür. Bu bulgu göstermektedir ki; CuO nano toz katkısı belirli bir değere kadar iletim etkisiyle etkinliği artırırken, belirli bir değerden sonra topaklaşma nedeniyle etkinlik de düşmektedir. Bu nedenle nano akışkanlı ısı değiştirgeçlerinde etkinlik açısından optimum değer araştırması mutlaka yapılmalıdır.

- Isı transferli akışlardaki performans incelemesinde ısı ve hidrodinamik açıdan kazanç ve kayıp kıyaslaması yapılmalıdır. Bu çalışmada da suya CuO nano toz eklenmesi sonucunda ortaya çıkan ısı performans değişimi ile nanoakışkanın pompalama gücünde ortaya çıkan değişim kıyaslanmış ve belirgin bir etkileşimin olduğu görülmüştür. Buna göre artan nano toz hacimsel oranı ile birlikte pompalama gücü ve ısı değiştirgecinin etkinliği de artmakta, 0,81 karışım oranında en yüksek etkinlik değerine ulaşılmaktadır. 1,1 karışım oranında hem en yüksek pompalama gücü hem de en düşük etkinlik sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu bulgu yine etkinlik/pompalama gücü açısından optimizasyon yapılması gerektiğini göstermektedir.
- Isı taşınım katsayısı açısından katkısız akışkan davranışına benzer şekilde her durumda artan Reynolds sayısı ile birlikte su esaslı CuO nanoakışkanlarda da ısı taşınım katsayısının artmakta olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca literatürdeki veriler ile uyumlu olarak nano toz karışım oranının artması ile birlikte ısı taşınım katsayısının da artmakta olduğu belirlenmiştir.
- Deneysel çalışmada elde edilmiş olan Nusselt sayısı ve bağlı olduğu parametreler ile olan ilişkiler göstermektedir ki; su esaslı CuO nanoakışkanın ısı davranışı büyük ölçüde sahip olduğu termofiziksel özellikler ile bağlantılıdır. Buna göre; nano toz katkısı ile esas akışkanın değişen termofiziksel özelliği yeni bir akışkan gibi davranmasına ve buna uygun davranış göstermesine neden olmaktadır. Nitekim  $Nu=f(Re)$  ve  $Nu=f(Pr)$  ilişkilerinde nanoakışkan karışım oranlarına göre olan değişimlerin arka planında akışkanın sahip olduğu yeni termofiziksel özellikler yatmaktadır.
- Bu çalışmada göz önüne alınmış olan su esaslı CuO nanoakışkanın incelenen karışım oranlarında artan karışım oranı ile birlikte ısı taşınım katsayısının artış göstermesine rağmen, daha yüksek oranda artış gösteren ısı iletim katsayısı nedeniyle  $Nu$  sayısında düzgün bir değişimin olmadığı görülmüştür. Ancak buna karşın uygulamadaki çeşitli sistemlerde kullanılan farklı nanoakışkanlar, artan karışım oranı ile birlikte sistemin ısı performansında iyileşme sağlamakta olup, bu bulgu bu çalışmada da CuO nanoakışkan için doğrulanmıştır.
- Nanoakışkanların uygulamadaki kullanımlarında bilinen ısı ve hidrodinamik analiz parametrelerinin yanı sıra, korelasyon bağıntılarının içyapı, morfoloji,

hazırlama koşulları vb. parametreleri de içerecek şekilde yeni teorik modellerin geliştirilmesine gereksinim olduğu görölmektedir.



## 6. KAYNAKLAR

- Ahmed, M. S., Hady, M. R. M. and Abdallah, G. (2018). Experimental investigation on the performance of chilled-water air conditioning unit using alumina nanofluids. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5, 589-596.
- Ahmed, S. A. Ozkaymak, M., Sözen, A., Menlik, T. and Fahed, A. (2018). Improving car radiator performance by using TiO<sub>2</sub>-water nanofluid. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21, 996-1005.
- Ambreen, T. and Kim, M. H. (2018). Heat transfer and pressure drop correlations of nanofluids: a state of art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 564-583.
- Asadi, M., Asadi, A. and Aberoumand, S. (2018). An experimental and theoretical investigation on the effects of adding hybrid nanoparticles on heat transfer efficiency and pumping power of an oil-based nanofluid as a coolant fluid. *International Journal of Refrigeration*, 89, 83-92.
- Barbes, B., Paramo, R., Blanco, E. and Casanova, C. (2014). Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of CuO nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115, 1883-1891.
- Boers, J., Cao, H., Qiao, G., Li, Q., Zhang, G., Mura, E. and Ding, Y. (2018). Flow and heat transfer behavior of nanofluids in microchannels. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28, 225-234.
- Dalkılıç, A. S., Açıkgöz, Ö., Küçükyıldırım, B. O., Eker, A. A., Lüleci, B., Jumholkul, C. and Wongwises, S. (2018). Experimental investigation on the viscosity characteristics of water based SiO<sub>2</sub>-graphite hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 97, 30-38.
- Das, S. D., Choi, S. U. S., Yu, W. and Pradeep, T. (2008). *Nanofluids-science and technology*. NewYork: John Wiley and Sons.
- Das, S. D. and Choi, S. U. S. (2009). A review of heat transfer in nanofluids. In A. Bar, Y. Cho & G. Greene (Eds.), *Advances in heat transfer, Vol. 41* (pp. 81-197). Academic Press, NewYork.
- Ding, Y., Chen, H., Wang, L., Yang, C. Y., He, Y., Wang, W., Lee, W. P. Zhang, L. and Huo, R. (2007). Heat transfer intensification using nanofluids. *KONA Powder and Particle Journal*, 25, 23-38.
- Gleiter, H. (1989). Nanocrystalline materials. *Progress in Material Science*, 33, 223-315.



- Godson, L., Raja, B., Lal, D. M. and Wongwises, S. (2010). Enhancement of heat transfer using nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 629-641.
- Gupta, M., Singh, V., Kumar, S., Kumar, S., Dilbaghi, N. and Said, Z. (2018). Up to date review on the synthesis and thermophysical properties of hybrid nanofluids. *Journal of Cleaner Production*, 190, 160-192.
- Haghighi, E., Saleemi, M., Nikkam, N., Khodabandeh, R., Toprak, M. S., Muhammed, M. and Palm, B. (2014). Accurate basis of comparison heat transfer in nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52, 1-7.
- Hamilton, R. L. and Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering Chemical Fundamentals*, 1, 3, 187-191.
- Holman, J. P. (2014). *Isı Transferi*, onuncu basımdan çeviri., Nobel, Ankara.
- Huminc, G. and Huminc, A. (2012). Application of nanofluids in heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16, 5625-5638.
- Islam, M. R., Shabani, B. and Rosengarten, G. (2016). Nanofluids to improve the performance of PEM fuel cell cooling systems: A theoretical approach. *Applied Energy*, 178, 660-671.
- Kebllinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S. and Eastman, J.A. (2002). Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 855-863.
- Khan, M. S. and Dil. T. (2017). Heat transfer enhancement of automobile radiator using H<sub>2</sub>O-CuO nanofluid. *AIP Advances*, 7, 045018.
- Kim, H., Ham, J., Park, C. and Cho, H. (2016). Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids. *Energy*, 94, 497-507.
- Kleinstreuer, C. and Feng, Y. (2011). Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: A review. *Nanoscale Research Letters*, 6:229.
- Koca, H. D., Doganay, S., Turgut, A., Tavman, İ. H, Saidur, R. and Mahbulul, I. M. (2018). Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1664-1674.
- Kulkarni, D., Das., D. K. and Vajjha, R. S. (2009). Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution. *Applied Energy*, 86, 2566-2573.
- Kumar, V., Tiwari, A.K. and Ghosh, S. K. (2015). Application of nanofluids in plate heat exchanger: A review. *Energy Conversion and Management*, 105, 1017-1036.

- Maxwell, J. C. (1881). *A Treatise on electricity and magnetism*, second ed., Clarendon Press, Oxford, UK.
- Meenakshi, K. S. and Sudhan, P. J. (2015). Preparation and characterization of copper oxide-water based nanofluids by one step method for heat transfer applications. *Chemical Science Transactions*, **4**, 1, 127-132.
- Murshed, S., Leong, K. and Yang, C. (2005). Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>-water based nanofluids, *International Journal of Thermal Science*, **44**, 4, 367-373.
- Özerinç, S., Kakaç, S. and Yazıcıoğlu, A.G. (2010). Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-art review. *Microfluid Nanofluid*, **8**, 145-170.
- Pandey, S. D. and Nema, V. K. (2012). Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant plate heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **38**, 248-256.
- Pourhoseini, S. H., Naghizadeh, N. and Hoseinzadeh, H. (2018). Effect of silver-water nanofluid on heat transfer performance of a plate heat exchanger: An experimental and theoretical study. *Powder Technology*, **332**, 279-286.
- Putra, N., Roetzel, W. and Das, S. K. (2003). Natural convection of nano-fluids. *Heat and Mass Transfer*, **39**, 775-784.
- Rios, M. S. B. D. L., Solorio, C. I. R. and Cuellar, A. J. G. (2018). Thermal performance of a parabolic trough linear collector using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O nanofluids. *Renewable Energy*, **122**, 665-673.
- Rudyak, V. Y. (2013). Viscosity of nanofluids-Why it is not described by the classical theories. *Advances in Nanoparticles*, **2**, 266-279.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory*, seventh ed., McGraw-Hill, New York, USA.
- Senthilraja, S., Vijayakumar, K. and Gangadevi, R. (2015). A comparative study on thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water, CuO/water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO/water nanofluids. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, **10**, 4, 1449-1458.
- Shanti R., Anandan, S. S. and Ramalingam, V. (2012). Heat transfer enhancement by nanofluids an overview. *Thermal Science*, **16**, 2, 423-444.
- Sheikh N. A., Ali, F., Khan, I. and Gohar, M. (2018). A theoretical study on the performance of a solar collector using CeO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> water based nanofluids with inclined plate: Atangana-Baleanu fractional model. *Chaos, Solutions and Fractals*, 135-142.
- Sivashanmugam, P. (2012). *Application of nanofluids in heat transfer, An Overview of Heat Transfer Phenomena* Salim N. Kazi, IntechOpen, DOI: 10.5772/52496.

- Sui, D., Langaker, V. H. and Yu, Z. (2017). Investigation of thermophysical properties of nanofluids for application in geothermal energy. *Energy Procedia*, 105, 5055-5060.
- Sundar, L. S., Sharma, K. V., Naik, M. T. and Singh M. K. (2013). Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 670-686.
- Sureshkumar, R., Mohideen, S. T. and Nethaji, N. (2013). Heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 397-410.
- Timofeeva, E.V., Routbort, J. L. and Singh, D. (2009). Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 106, 1, 014304.
- Xie, H., Yu, W. and Li, Y. (2009). Thermal performance enhancement in nanofluids containing diamond nanoparticles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, 0954113.
- Xuan, Y. and Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21, 58-64.
- Yang, L. Du, K. and Zhang, X. (2017). A theoretical investigation of thermal conductivity of nanofluids with particles in cylindrical shape by anisotropy analysis, *Powder Technology*, 314, 328-338.
- Yu, W. and Xie, H. (2012). A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms and applications, *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1-17.
- Zakaria, I., Mohamed, W. A. N. W., Azmi, W. H., Mamat, A. M. I. and Mamat, R. (2018). Thermo-electrical performance of PEM fuel cell using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 119, 460-471.
- Zhang, X., Gu, .H. and Fujii, M. (2006). Experimental study on the effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids. *International Journal of Thermophysics*. 27, 2, 569-580.

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Suat Hacısalihoğlu 1974 yılında Trabzon Lisesi'nden mezun oldu. 1975 yılında İstanbul Devlet Mühendislik Mimarlık Akademisi Işık Mühendislik Yüksek Okulu Makine Bölümüne kaydoldu. 1979 yılında Işık Mühendislik Yüksek Okulu Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1979 Yılında İDMMA Makine Mühendisliği Bölümü Makine Konstrüksiyon Dalında yüksek lisansa başladı.1982 Yılında İDMMA Makine Bölümü Konstrüksiyon dalından mezun oldu. 1983 KTÜ / Fen Bilimleri Enstitüsü/ Makine Mühendisliği Anabilim dalında doktora eğitime başladı.

1979-1982 yılları arasında İstanbul'da serbest mühendislik ve müşavirlik hizmetleri yaptı. 1982 Yılında Trabzon'a gelerek Kent Mühendislik, müşavirlik ve müteahhitlik firmasını kurdu. 1988 Yılında Hitaş şirketini kurarak mühendislik, müteahhitlik, sektöründe geniş kapsamlı çalışmalara başladı. Arsin Organize Sanayi bölgesinde fabrika kurarak ısıtma gereçleri, katı, sıvı, gaz yakıtlı kalorifer kazanları, boyler, ejanjör imalatları üretimini sürdürdü. 2010 yılından sonra HETAŞ enerji firmasını kurarak hidroelektrik santrali elektro mekanik ve inşaat konularında imalat işlerine başladı. Halen iki adet hidroelektrik santrali işletmesini yürütmektedir.

1997 yılında TTSO Meclis Başkan Yardımcılığı ve 2009 yılından itibaren 3 dönem Ticaret ve Sanayi Odası Yönetim Kurulu Başkanlığı devam etmektedir. TOBB Ticaret ve Sanayi Odaları Konsey Üyeliği, Dünya Ticaret Odası Türkiye Milli Komitesi Başkan Yardımcılığı görevi halen devam etmektedir. TTSO İpekyolu Müzesini kurmuştur.

2010 yılında Milli produktivite Merkezi tarafından verilen "2009 yılı verimli işadamı ödülünü" almıştır.

TTSO tarafından kurulan Trabzon Yatırım Adası Endüstri Bölgesi, TTSO tarafından Trabzon Teknokent içerisinde kurulan "İnovasyon ve Biyoteknoloji "kurucusudur. Avrasya Üniversitesi Kurucu müteveli heyet üyesi, Doğu Karadeniz Kalkınma Ajansı Yönetim Kurulu üyesi, KTÜ Akademik Değerlendirme ve Kalite Geliştirme Kurulu üyesi, KTÜ Güçlendirme Vakfı doğal üyesi, KTÜ Tıp Fakültesi Vakfı üyesi, Teknokent Yönetim Kurulu Üyesi, Akçaabat OSB Başkan yardımcısıdır. Evli ve 3 çocuk babasıdır.