

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOAKIŞKAN ORTAMINDA TİTREŞİMLE ISIL TAŞINIMIN DENEYSEL  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Eren ÇOLAK**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat K. AKTAŞ**

**NİSAN 2018**

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Murat K. AKTAŞ**

Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151511019 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Eren ÇOLAK**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**NANOAKIŞKAN ORTAMINDA TİTREŞİMLE ISIL TAŞINIMIN DENEYSEL İNCELENMESİ**" başlıklı tezi **03.04.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Murat K. AKTAŞ** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Oğuz TURGUT(Başkan)** .....  
Gazi Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı USLU** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Eren ÇOLAK

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### NANOAKIŞKAN ORTAMINDA TİTREŞİMLE ISIL TAŞINIMIN DENEYSEL İNCELENMESİ

Eren ÇOLAK

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat K. AKTAŞ

Tarih: NİSAN 2018

Nanoakışkanlar optik, ilaç üretimi, ısı transferi uygulamaları vb. bir çok alanda kullanılmaktadırlar. Yüksek ısı performansları sebebiyle ısı transferi uygulamalarında son yıllarda popülerliği oldukça artmıştır ve üzerine yapılan çalışma sayısı web of science kayıtlarına göre 2010 yılından 2016 yılına kadar 3 kat artış göstermiştir. Titreşimli akış koşulları da ısı transferini iyileştirici bir yöntemdir ve termoakustik soğutucular gibi bir çok yerde kullanılmaktadırlar. Bu tez çalışmasında ise titreşimli akış koşullarında gerçekleşen ısı transferinin titreşim frekansı, titreşim genliği, akışkan tipi parametreleriyle değişimini incelemektedir. Bu amaçla birbirine, akışı laminar tutma amacıyla kılcal boru demetiyle bağlanmış soğuk ve sıcak iki rezervuar arasındaki ısı transferi incelenmektedir. Titreşimler mekanik bir sarsıcı yardımıyla deney aparatının alt yüzeyinden uygulanmakta ve aparat içerisinde titreşimli akış koşulları oluşturulmaktadır. Bu inceleme için kullanılan parametreler 6-10 Hz frekans aralığı, 4,5,6 mm titreşim genliği, saf su ve saf su-CuO(%2) nanoakışkanıdır. Elde edilen sonuçlara göre titreşim frekansının artışıyla ısı transferi arasında parabolik bir

ilişki kurulurken, titreşim genliğinin artışıyla doğru orantılı bir artış söz konusudur.  
Nanoakışkan kullanımı ise toplam ısı transferini arttırmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Nanoakışkan, Titreşimli akış, Isı transferi.



## **ABSTRACT**

Master of Science

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OSCILLARY HEAT CONVECTION IN NANOFLUID MEDIA**

Eren ÇOLAK

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Murat K. AKTAŞ

Date: APRIL 2018

Nanofluids are used in numerous fields such as optics, pharmaceutical and heat transfer implementations. Due to their high heat transfer performances in heat transfer applications, popularity of nanofluids has quite increased in recent years and according to the records of Web of Science, the number of publications 2010 to 2016 has tripled. Oscillatory flow conditions are also a reformative method for heat transfer and is used in many fields, thermoacoustic coolers are an example. In this study the heat transfer performance between the cold and the hot reservoirs are investigated under oscillatory flow conditions which are connected with a capillary bundle to keep the flow under laminar regime. The chosen parameters for this purpose are oscillation frequency, amplitude and fluid type. Vibrations are applied from the lower surface of the cold reservoir with the shaker and oscillatory flow conditions are formed in the experimental apparatus. The parameters used for this study are 6-10 Hz frequency range, 4.5, 6 mm amplitude, DI water and 2% volumetric water based CuO nanofluid. It is observed that frequency increase shows a parabolic relation with effective thermal diffusivity. Heat transfer rate increases with the increase of displacement for both DI

water and water based nanofluid. In each case, nanofluid has better influence than the DI water in term of total heat transfer.

**Keywords:** Nanofluid, Oscillatory flow, Heat transfer.



## TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca beni manevi, maddi olarak destekleyen babam Prof. Dr. Rifat ÇOLAK'a ve tüm aileme, danışman hocam Doç. Dr. Murat K. AKTAŞ'a, Isı Bilimleri Laboratuvarında çalışan arkadaşlarıma, Berk ÇEVİRİM'e, Emine KABAĞÇIOĞLU'na ve öğrenim gördüğüm süre boyunca bilgilerinden, tecrübelerinden faydalandığım bütün hocalarıma teşekkürlerimle.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xvi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>RESİM LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Literatür Araştırması .....	7
1.1.1    Nanoakışkan ile ısı transferi çalışmaları .....	7
1.1.2    Titreşimle ısı transferi çalışmaları.....	11
1.2    Araştırma Gereksinimi .....	16
1.3    Tezin Kapsamı ve Amacı .....	16
<b>2. DENEY METODU</b> .....	<b>17</b>
2.1    Deney Düzeneği .....	17
2.2    Nanoakışkanın Hazırlanması.....	21
2.3    Nanoakışkanın Özelliklerinin Belirlenmesi .....	24
2.3.1    Isıl iletim katsayısı ölçümü .....	24
2.3.2    Dinamik viskozite ölçümü .....	25
<b>3. DENEYİN YAPILIŞI</b> .....	<b>27</b>
<b>4. VERİ ANALİZİ</b> .....	<b>31</b>
4.1    Etkin Isıl Yayınım Katsayısı Hesabı .....	31
4.2    Anlık Isı Transferi .....	33
4.3    Toplam Isı Transferi .....	33
4.4    Prandtl Sayısı Hesabı.....	34
4.5    Womersley Sayısı Hesabı.....	34

<b>5. SONUÇLAR</b> .....	<b>35</b>
5.1 Saf Su Deneyleleri.....	36
5.1.1 Basınç sonuçları .....	36
5.1.2 Etkin ısı yayılım katsayısı sonuçları.....	41
5.1.3 Isı transfer hızı sonuçları .....	42
5.1.4 Etkin Prandtl sayısı sonuçları .....	46
5.1.5 Toplam ısı transferi sonuçları.....	48
5.1.6 Saf su deneylerinde güç tüketimi .....	50
5.2 Nanoakışkan Deneyleleri.....	51
5.2.1 Basınç sonuçları .....	51
5.2.2 Womersley sayısı .....	56
5.2.3 Etkin ısı yayılım katsayısı sonuçları.....	57
5.2.4 Isı transfer hızı sonuçları .....	61
5.2.5 Etkin Prandtl sayısı sonuçları .....	64
5.2.6 Toplam ısı transferi sonuçları.....	67
5.2.7 Güç tüketimi sonuçları .....	72
5.3 Optimum Çalışma Noktası .....	74
5.3.1 Etkin ısı yayılım katsayısının güç tüketimi ile yorumlanması .....	75
5.3.2 Toplam ısı transferinin güç tüketimi ile yorumlanması .....	76
5.4 Etkin Isıl Yayılım Katsayısı Sonuçlarının Literatür ile Karşılaştırması .....	80
<b>6. BELİRSİZLİK ANALİZİ</b> .....	<b>83</b>
<b>7. DEĞERLENDİRME</b> .....	<b>87</b>
7.1 Özet.....	87
7.2 Çalışma Neticesinde Ulaşılan Sonuçlar.....	87
7.3 Öneriler.....	88
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>91</b>
<b>EKLER</b> .....	<b>97</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>100</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1: Dalga çeşitleri a) Üçgen, b) Sinüs, c) Kare, d) Testere..	3
Şekil 1.2: Yıllara göre nanoakışkanlar hakkında yayınlanan çalışma sayısı [9].....	5
Şekil 1.3: Kurzweg'in deney düzeneği [34].	13
Şekil 1.4: Kaviany'nin su için frekans artışı ile etkin ısı yayılım katsayısı değişimi grafiği.	13
Şekil 2.1: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.	18
Şekil 2.2: Nanoakışkanın ölçülen ısı iletim katsayısının literatür ile karşılaştırılması.	25
Şekil 2.3: Nanoakışkanın ölçülen dinamik viskozitesinin literatür ile karşılaştırılması.	26
Şekil 3.1: Photon+ programından incelenen yer değiştirme sinyali.	28
Şekil 3.2: Photon+ programından incelenen sinyalin gürültü seviyesi.	28
Şekil 5.1: Rezervuar sıcaklıklarının zamana göre değişimi.	35
Şekil 5.2: Saf su ile gerçekleştirilen 6 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.	37
Şekil 5.3: Saf su ile gerçekleştirilen 7 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.	37
Şekil 5.4: Saf su ile gerçekleştirilen 8 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.	38
Şekil 5.5: Saf su ile gerçekleştirilen 9 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.	38
Şekil 5.6: Saf su ile gerçekleştirilen 10 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.	39
Şekil 5.7: Saf su ve $\Delta s=4$ mm'de gerçekleştirilen deneylerde frekans değişimi ile basınç değişimi.	39
Şekil 5.8: Saf su ve $\Delta s=5$ mm'de gerçekleştirilen deneylerde frekans değişimi ile basınç değişimi.	40
Şekil 5.9: Saf su ve $\Delta s=6$ mm'de gerçekleştirilen deneylerde frekans değişimi ile basınç değişimi.	40
Şekil 5.10: Etkin ısı yayılım katsayısının frekansa ile değişimi.	41
Şekil 5.11: Etkin ısı yayılım katsayısının $\Delta s$ ile değişimi.	42
Şekil 5.12: 6 Hz frekansı için ısı transfer hızı.	43
Şekil 5.13: 7 Hz frekansı için ısı transfer hızı.	44
Şekil 5.14: 8 Hz frekansı için ısı transfer hızı.	44
Şekil 5.15: 9 Hz frekansı için ısı transfer hızı.	45
Şekil 5.16: 10 Hz frekansı için ısı transfer hızı.	45
Şekil 5.17: Etkin Prandtl sayısının frekans ile değişimi.	46

Şekil 5.18: Etkin Prandtl sayısının $\Delta s$ ile değişimi. ....	47
Şekil 5.19: Toplam ısı transferinin frekans ile değişimi. ....	48
Şekil 5.20: Toplam ısı transferinin $\Delta s$ ile değişimi. ....	49
Şekil 5.21: Güç tüketiminin frekans ile değişimi. ....	50
Şekil 5.22: Güç tüketiminin $\Delta s$ ile değişimi. ....	51
Şekil 5.23: 6 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değişimiyle kıyaslanması. ....	52
Şekil 5.24: 7 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değişimiyle kıyaslanması. ....	52
Şekil 5.25: 8 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değişimiyle kıyaslanması. ....	53
Şekil 5.26: 9 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değişimiyle kıyaslanması. ....	53
Şekil 5.27: 10 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değişimiyle kıyaslanması. ....	54
Şekil 5.28: $\Delta s=4$ mm için frekans değişimi ile nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin kıyaslanması. ....	55
Şekil 5.29: $\Delta s=5$ mm için frekans değişimi ile nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin kıyaslanması. ....	55
Şekil 5.30: $\Delta s=6$ mm için frekans değişimi ile nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin kıyaslanması. ....	56
Şekil 5.31: Etkin ısı yayılım katsayısının $\Delta s=4$ mm için frekansa ve akışkana bağlı değişimi. ....	58
Şekil 5.32: Etkin ısı yayılım katsayısının $\Delta s=5$ mm için frekansa ve akışkana bağlı değişimi. ....	58
Şekil 5.33: Etkin ısı yayılım katsayısının $\Delta s=6$ mm için frekansa ve akışkana bağlı değişimi. ....	59
Şekil 5.34: Etkin ısı yayılım katsayısının her frekans için akışkan ve yer değiştirmeye bağlı değişimi. ....	60
Şekil 5.35: Etkin ısı yayılım katsayısının bütün frekans ve yer değiştirme değerlerinde saf su ve nanoakışkan için üç boyutlu gösterimi. ....	60
Şekil 5.36: Isı transfer hızının 6 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi. ....	61
Şekil 5.37: Isı transfer hızının 7 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi. ....	62
Şekil 5.38: Isı transfer hızının 8 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi. ....	62
Şekil 5.39: Isı transfer hızının 9 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi. ....	63
Şekil 5.40: Isı transfer hızının 10 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi. ....	63
Şekil 5.41: Etkin Prandtl Sayısının $\Delta s=4$ mm için frekans ve akışkan tipi ile değişimi. ....	64
Şekil 5.42: Etkin Prandtl sayısının $\Delta s=5$ mm için frekans ve akışkan tipi ile değişimi. ....	65

Şekil 5.43: Etkin Prandtl sayısının $\Delta s=6$ mm için frekans ve akışkan tipi ile değişimi.	65
Şekil 5.44: Her frekans için frekans ve akışkan tipine bağlı olarak etkin Prandtl sayısının değişimi.	66
Şekil 5.45: Toplam ısı transferinin $\Delta s=4$ mm için frekans ve akışkana bağlı değişimi.	68
Şekil 5.46: Toplam ısı transferinin $\Delta s=5$ mm için frekans ve akışkana bağlı değişimi.	69
Şekil 5.47: Toplam ısı transferinin $\Delta s=6$ mm için frekans ve akışkana bağlı değişimi.	69
Şekil 5.48: Toplam ısı transferinin her frekans için yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi.	70
Şekil 5.49: Toplam ısı transferinin bütün frekans ve yer değiştirme değerlerinde saf su ve nanoakışkan için üç boyutlu gösterimi.	71
Şekil 5.50: Güç tüketiminin $\Delta s=4$ mm için frekansa ve akışkan tipine bağlı değişimi.	73
Şekil 5.51: Güç tüketiminin $\Delta s=5$ mm için frekansa ve akışkan tipine bağlı değişimi.	74
Şekil 5.52: Güç tüketiminin $\Delta s=6$ mm için frekansa ve akışkan tipine bağlı değişimi.	74
Şekil 5.53: Etkin ısı yayılım katsayısının güç tüketimi ve akışkan tipi ile değişimi.	75
Şekil 5.54: Toplam ısı transferinin güç tüketimi ve akışkan tipine göre değişimi.	77
Şekil 5.55: $\Delta s=4$ mm birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi.	78
Şekil 5.56: $\Delta s=5$ mm birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi.	79
Şekil 5.57: $\Delta s=6$ mm birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi.	79
Şekil 5.58: Nishio'nun denklemleriyle elde edilen değerlerin saf su deneylerinin sonuçlarıyla karşılaştırılması.	81
Şekil 5.59: Nishio'nun denklemleriyle elde edilen değerlerin nanoakışkan deneylerinin sonuçlarıyla karşılaştırılması.	81
Şekil 5.60: Kurzweg'in etkin ısı yayılım katsayısı sonuçlarıyla saf su deney sonuçlarının karşılaştırılması.	82
Şekil 6.1: $\Delta s=5$ mm, $\Delta s=6$ mm ve 7 Hz frekans ile gerçekleştirilmiş deneyler için ısı transfer hızı belirsizlik analizi.	84
Şekil 6.2: $\Delta s=4$ mm ve 7 Hz frekans ile gerçekleştirilmiş deneyler için etkin ısı yayılım katsayısı belirsizlik analizi.	85

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1: Deney koşulları altında elde edilen Reynolds sayıları.....	19
Çizelge 2.2: Hacimsel %2 nanoakışkan hazırlamak için gerekli olan nanoakışkan ve saf su miktarı. ....	23
Çizelge 5.1: Tez çalışması boyunca gerçekleştirilen deneyler.....	35
Çizelge 5.2: Etkin ısıl yayılım katsayısının frekansa göre değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayıları. ....	41
Çizelge 5.3: Etkin ısıl yayılım katsayısının $\Delta s$ ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları. ....	42
Çizelge 5.4: Etkin Prandtl sayısının frekans ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları. ....	47
Çizelge 5.5: Etkin Prandtl sayısının $\Delta s$ ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.....	48
Çizelge 5.6: Toplam ısı transferinin frekans ile değişimi ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları. ....	49
Çizelge 5.7: Toplam ısı transferinin $\Delta s$ ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.....	50
Çizelge 5.8: Nanoakışkan ile elde edilmiş etkin ısıl yayılım katsayılarının frekansa bağlı değişimi grafikleri için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.....	59
Çizelge 5.9: Nanoakışkan ile elde edilmiş etkin Prandtl sayılarının frekansa bağlı değişimi grafikleri için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.....	66
Çizelge 5.10: Nanoakışkan kullanımının, saf su kullanımına göre etkin Prandtl sayısı üzerindeki bağıl farkı.....	67
Çizelge 5.11: Nanoakışkan ile elde edilmiş toplam ısı transferi değerlerinin frekansa bağlı değişimi grafikleri için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.....	70
Çizelge 5.12: Nanoakışkan kullanımının, saf su kullanımına göre toplam ısı transferi üzerindeki bağıl farkı.....	72
Çizelge 5.13: Akışkan ve frekansa bağlı Womersley sayıları.....	57
Çizelge 5.14: Deneylerde harcanan güç(W). ....	73
Çizelge 5.15: Etkin ısıl yayılım katsayısının güç tüketimi ve akışkan tipi ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları. ...	76
Çizelge 5.16: Toplam ısı transferinin güç tüketimi ve akışkan tipi ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları. ....	77
Çizelge 5.17: Birim güç başına toplam ısı transferi verileri için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.....	80

Çizelge 5.18: Birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi  $Q^*$  (J/W). ..... 80



## KISALTMALAR

**SS** :Saf Su  
**NA:** :Nanoakışkan





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$c_p$	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)
$f$	Frekans (Hz)
$K$	Isıl iletim katsayısı (W/mK)
$L$	Kılcal boru uzunluğu (m)
$q$	Anlık ısı transferi (W)
$Q$	Toplam ısı transferi (J)
$t$	Zaman (s)
$T_c$	Soğuk rezervuar sıcaklığı (°C)
$T_h$	Sıcak rezervuar sıcaklığı (°C)
$\Delta T$	Sıcaklık farkı (°C)
$D$	Çap (m)
$\Phi$	Hacimsel oran
$\nu$	Kinematik viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	Özkütle (kg/m <sup>3</sup> )
$Pr$	Prandtl sayısı
$Wo$	Womersley sayısı
$A$	Isı transferi alanı (m <sup>2</sup> )
$f$	Frekans (Hz)
$\Delta s$	Titreşim genliği (m)
$a$	Kılcal boru iç çapı (m)
$\alpha_{e,ort}$	Ortalama ısıl yayılım katsayısı (m <sup>2</sup> /s)
$\alpha_e$	Etkin ısıl yayılım katsayısı (m <sup>2</sup> /s)

$0$	Etkin Prandtl sayısı
$k_{na}$	Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı (W/mK)
$\mu_{na}$	Nanoakışkanın dinamik viskozitesi (P)
$Q^*$	Birim güç başına ısı transferi(Q(J)/P(W))



## RESİM LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Resim 1.1: Byron Higgins'in “Şarkı Söyleyen Alev” düzeneği [2]. .....	2
Resim 1.2: Piston-silindir düzeneği ile titreşim üretici bir sistem [6].....	3
Resim 1.3: Lycugus Kupası [7].....	4
Resim 2.1: Güç kaynağı. ....	19
Resim 2.2: Alt rezervuar ve titreşim iletici körük.....	20
Resim 2.3: Veri depolayıcı.....	21
Resim 2.4: Nanoakışkan doldurulmuş deney aparatı. ....	21
Resim 2.5: Hacimce %2 saf su-CuO nanoakışkanı.....	23
Resim 2.6: Isıl iletim katsayısı ölçümü. ....	24
Resim 2.7: Brookfield DV3TLV dinamik viskozite ölçer. ....	26
Resim 3.1: Deney aparatına akışkan eklemek için kullanılan aparat. ....	27
Resim 4.1: Kılcal boru demeti. ....	33



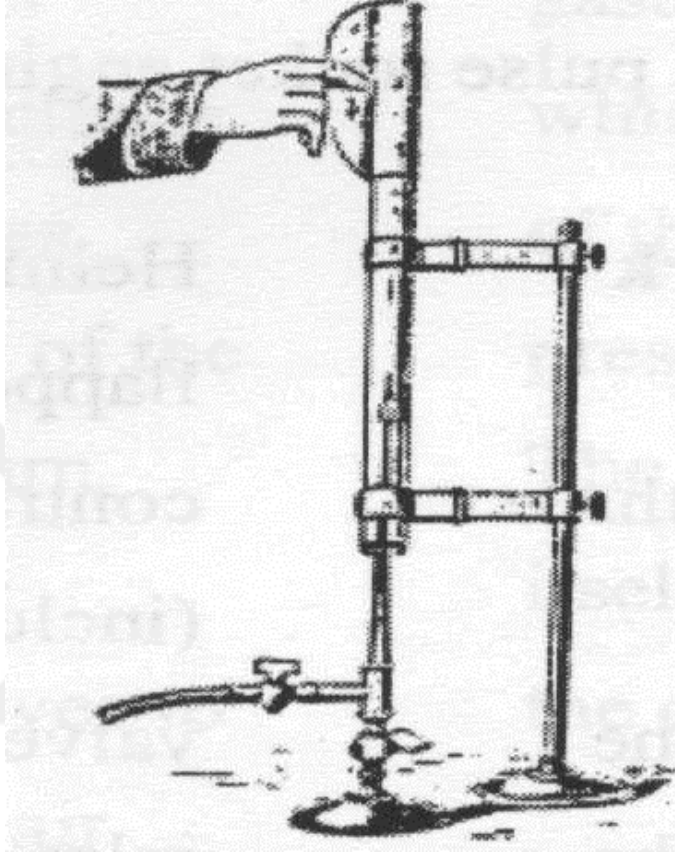
## 1. GİRİŞ

Enerjinin sürdürülebilirliği ve gelişimi sağlaması dolayısıyla oldukça değerli olduğu günümüzde, ısı enerjisinin en yüksek verim ve en düşük maliyetle transfer edilebilmesi büyük bir önem arz etmektedir. İnsan, diğer canlılar, gıdalar ve elektronik aletlerin işlevselliklerini koruyabilmeleri için buldukları, çalıştıkları ortamların belirli bir sıcaklık değer aralığında olması gerekmektedir. Canlılar için konfor sıcaklığı, gıdalar için ortam sıcaklığı, elektronik cihazlar için ise çalışma sıcaklık aralığının optimum değerlerde tutulması gıdalar için bozunmayı, elektronik aletler için ise işlevsel çalışmayı sağlamakta ve verimliliği arttırmaktadır. Bu amaçla sürekli kompaktlaşan elektronik aletlerin ısı problemlerinin çözülmesi, gelişen sanayinin, büyüyen ve modernleşen yapıların ısıtma/soğutma ihtiyaçlarının karşılanması gibi sebeplerle ısı transferi çalışmaları önemini korumaktadır.

Titreşimle ısı transferi ise temeli 1700'lerin sonuna uzanan ve hala güncelliğini koruyan bir konudur. Termoakustik motorlar, termoakustik soğutucular titreşimle ısı transferinin uygulandığı sistemlerdir. Termoakustik cihazlar yüksek sıcaklığa sahip kaynaktaki ısıyı akustik güce dönüştürüp, artan ısıyı düşük sıcaklıktaki bir kaynağa aktarırlar. Stirling Cihazı termoakustik cihazlara bir örnek olarak gösterilebilir[1]. Termoakustik soğutucular ise düşük ısı kaynağından yüksek ısı kaynağına akustik güç kullanarak ısıyı transfer ederler. Bu sayede düşük ısı kaynağının sıcaklığı istenilen seviyede kalır. Isı transferi uygulamalarında titreşimler iki farklı şekilde oluşturulmaktadır.

Birinci yöntem, sistem duvarına belirli zaman aralıklarıyla yüksek miktarda ısı uygulayarak içerideki akışkanın sıcaklığını yükseltmek suretiyle basınç dalgaları oluşturmaya dayanan termoakustik dalgalardır. Bu oluşturulan termoakustik dalgaların hızı ses hızı civarındadır. Bu alandaki ilk çalışma 1777 yılında Byron Higgins[2] tarafından yapılmıştır. Higgins Resim 1.1'de görünmekte olan iki ucu açık bir boru içerisindeki hidrojen alevi kullanımının ses ürettiğini farkederek, bu yapıya

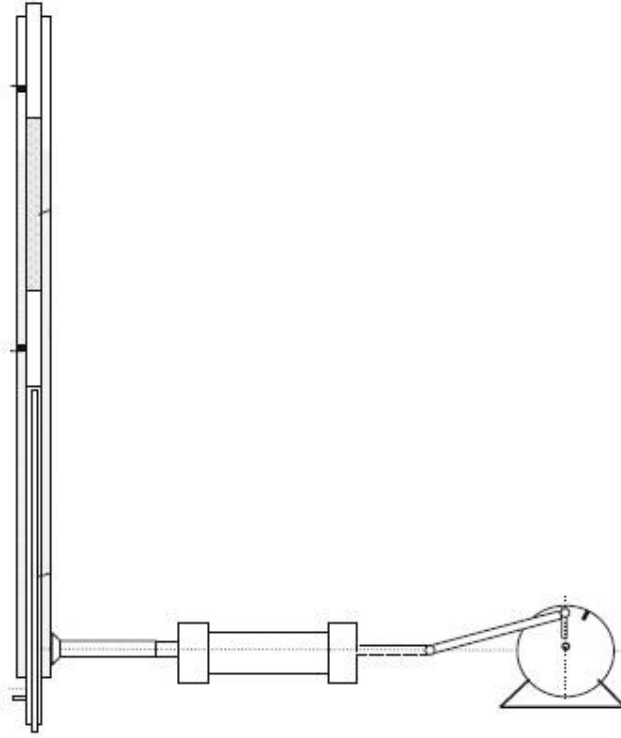
“Şarkı Söyleyen Alev” adını vermiştir. Bu çalışma daha sonra Rijke Tüpü[3] adı verilen, iki ucu açık boru içerisinde metal ızgara bulunduran bir yapıya referans olmuştur. Rijke tüpü ise tek tarafı kapatılmış halde kullanılarak Sondhauss Tüpü[4] olarak anılmıştır ve Lord Rayleigh[5] tarafından detaylı bir açıklaması mevcuttur.



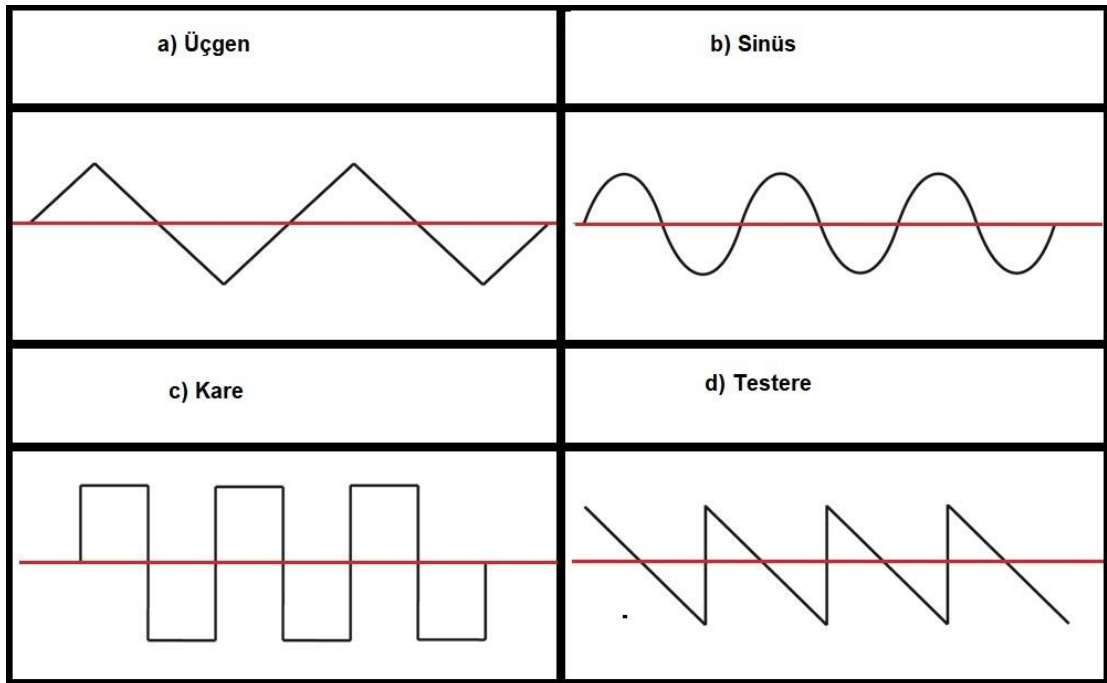
Resim 1.1: Byron Higgins'in “Şarkı Söyleyen Alev” düzeneği [2].

İkinci yöntemde ise titreşimler bir sarsıcı yahut piston sistemi yardımıyla sistem duvarına uygulanan periyodik itirme hareketiyle oluşturulmaktadır. Bu yöntemde periyodik itirme hareketi kapalı sistem içerisinde oluşturduğu dalga ile akışkanı itirme yönünde hareket ettirir, oluşturulan dalga sistem sonundan yansıyarak, akışkanı yine kendi yönünde hareket ettirir ve bu sayede titreşimli bir akış oluşturulmuş olur. Piston-silindir ikilisi ile titreşimli akış oluşturan bir sistem Resim 1.2’de gösterilmektedir. Titreşimler genellikle hız profilinin sinüs dalgası şeklinde tanımlanmasıyla oluşturulsa da; Şekil 1.1’de görüldüğü üzere kare, üçgen, testere olarak tanımlanan dalga tipleri de mevcuttur. Bu tez çalışmasında sinüs fonksiyonu şeklinde tanımlanan hız profili Şekil 1.1.b’de gösterilmektedir ve istenen periyod

içerisinde genlik değerinin pozitif ve negatif değerine ulaşması ve bunu her periyod( $2\pi$ ) sonunda tekrarlamasıyla tezahür etmektedir.



Resim 1.2: Piston-silindir düzeneği ile titreşim üretici bir sistem [6].



Şekil 1.1: Dalga çeşitleri a) Üçgen, b) Sinüs, c) Kare, d) Testere.

Isı transferini iyileştirme yöntemleri arasında sistem içerisinde kullanılan akışkanın termofiziksel özelliklerini istenilen şekilde geliştirmek de yer almaktadır. Bu yöntem sayesinde sistemin tasarım sınırlamaları zorlanmadan sistemden hali hazırda elde edilen ısı transferinden daha yüksek ısı transferi elde etmek mümkün kılınmaktadır. Böylelikle sistemin verimliliği arttırılabilmektedir. Nanopartiküllerin ve karbon nanotüplerin ısı transferi uygulamalarında kullanılması bu alanda devrim niteliği taşımaktadır. Ana sıvıdan daha yüksek ısıl iletim katsayısı olan nanopartiküller ve karbon nanotüpler içinde bulunduğu akışkanın ısıl iletim katsayısını ve ısıl yayılım katsayısı kullanılan konsantrasyonla orantılı olarak arttırmaktadırlar.

Nanopartiküller boyutları 1 ile 100  $\mu\text{m}$  ( $10^{-9}\text{m} = 1 \mu\text{m}$ ) arasında değişen küçük boyutlu parçacıklardır. Malzemelerin boyutu nano boyuta indirildiğinde, malzemeler standart davranışlarından sapma göstermektedirler; çünkü parçacıkların hacim yüzey oranlarındaki değişim, yüzeydeki aktif atomların sayısını arttırmaktadır. Metaller için daha düşük kaynama noktası, mekanik güçlerinde artış, optik özelliklerinde değişim gibi özellik değişimleri olmaktadır. Örneğin, 20  $\mu\text{m}$ 'lik altın nanopartikülünün rengi şarap kırmızısı, gümüşün rengi sarımsı gri, platinin ise siyahtır. Nanopartiküllerin ilk kullanımı milattan sonra 4. yüzyıla kadar uzanmaktadır. Resim 1.3'te gösterilen Lycurgus Kupası 14:1 oranında, 70  $\mu\text{m}$  boyutunda gümüş ve altın nanopartikülleriyle kaplıdır, bu sebepten ışık açısına göre farklı renklerde görünmektedir.

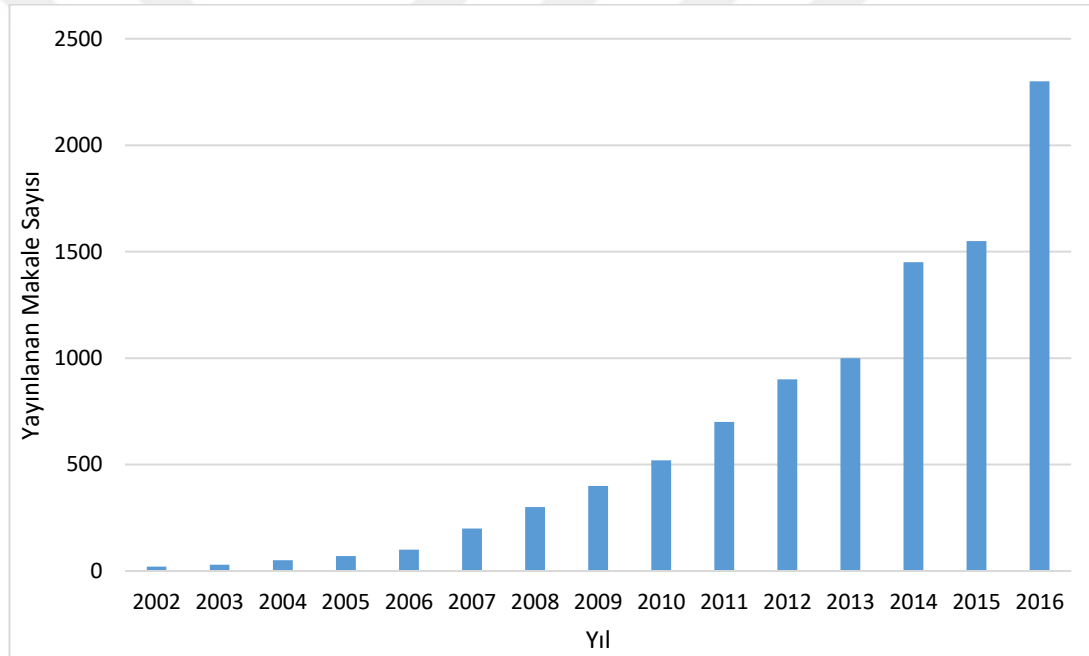


Resim 1.3: Lycurgus Kupası [7].



Nanopartiküllerin bir çok kullanım alanı bulunmaktadır. Medikal alanda nanopartiküllerin gözenekli yapısı dolayısıyla ilaç yükleyerek kullanımı, kanser hücrelerini hedefleyen manyetik nanopartiküllerin kullanımı; ısı bilimlerinde elektronik cihaz soğutma, güneş panellerinde ısı taşınımı artırma, araçların yakıt sarfiyatını azaltma amacıyla radyatör boyutunu düşürme çalışmaları için ve bir çok farklı alanda nanopartiküller kullanılmaktadır. Yüksek ısı iletim katsayıları sebebiyle ısı transferi alanında oldukça ilgi görmektedirler.

Choi[8]'nin 1995 yılında nanoakışkanlar terimini literatüre kazandırmasıyla birlikte nanopartiküllerin ısı transferi üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar artmaya başlamıştır. Yıllara göre düzenli artış gösteren çalışma sayısı Şekil 1.2'de gösterildiği üzeredir. Son verilere göre 2016 yılında 2000'in üzerinde çalışma yayınlanmıştır[9].



Şekil 1.2: Yıllara göre nanoakışkanlar hakkında yayınlanan çalışma sayısı [9].

Nanoakışkanların ısı iletim katsayısını etkileyen parametreler: ana sıvı içerisindeki nanopartikül konsantrasyonu, nanoparçacık boyutu, nanoparçacık şekli, nanoparçacığın ısı iletim katsayısı, ana akışkanın tipi, nanoakışkanın bulunduğu sıcaklık ve nanoakışkan hazırlama tekniği olarak özetlenebilir[10].

Nanoakışkanların ısı transferini iyileştirmesi ise literatürde dört farklı mekanizmayla açıklanmaktadır. Bunlar geçici etkiler olmakla birlikte sırasıyla: nanoakışkanın sıvı katı arayüzünde moleküler seviyede katman oluşturması, nanopartiküller içerisindeki

ısı nakli, çökelme davranışı ve nanopartiküllerin ana sıvı içerisindeki Brownian hareketidir[11].

Moleküler seviyede oluşan katman, nanopartiküllerin çevresinin ana sıvı tarafından oluşturulan “katı gibi” bir nano tabaka tarafından kaplanması fikrini içermektedir. Bu modele göre parçacık yarıçapı azaldıkça ısı iletim katsayısı artmaktadır. Debye Teorisine göre fononun “Ortalama Açık Yol”u, yani partikülün her çarpışmadan sonra kat ettiği mesafesi eşitlik 1.1 ile açıklanmaktadır

$$l = \frac{10aT_m}{\gamma T} \quad (1.1)$$

Burada; a Lattice sabiti,  $T_m$  erime noktası, T sıcaklık,  $\gamma$  ise Gruneisen parametresidir. Bu eşitliğe göre 293K'deki alumina partikülünün ortalama açık yol'u 40  $\mu\text{m}$ 'dir. Bu değerin partikül çapından küçük olması durumunda katedilen mesafe önemini yitirmekte ve bu teoriyi o koşullar için işlevsiz hale getirmektedir.

Nanopartiküller içerisindeki ısı nakli ise, büyük çaplı parçacıklarla ısı transferini açıklamak için Fourier'in ısı iletim yasasının yetersiz olduğu yerlerde balistik ısı naklinin daha önemli hale gelmesiyle birlikte farklı şekillerde açıklanmaktadır.

Çökelme davranışı, partiküllerin çökerken oluşturduğu yolların ısı akışı için düşük ısı direnç bölgeleri oluşturmasını sağlamaktadır. Çökelme arttıkça ve çökelmiş partikül kümesi büyüdükçe, küme boyunca ısı iletim artmaktadır.

Brownian hareket ile partiküllerin sıvı içerisinde rastgele çarpışmaları sonucu ısı nakli sağlanmaktadır.

$$V_p = \sqrt{\frac{3k_b T}{M}} \quad (1.2)$$

Burada  $k_b$  Boltzman sabiti, T sıcaklık, M ise partikülün kütlesidir. Parçacığın Brownian hareket ile kazandığı hız denklem 1.2 ile verilmektedir. Fakat yapılan çalışmalar çapları 5-100  $\mu\text{m}$  arasında değişen parçacıklarla elde edilen  $V_p$  değeri ile elde edilen ısı transferinin, ısı difüzyonundan daha yüksek olmadığını göstermiştir. Bu sonuç da Brownian hareketin baskın ısı nakli metodu olmadığını göstermektedir. Nanopartiküllerle elde edilmiş en yüksek ısı iletim katsayısı ÇDKNP(çoklu duvarlı

karbon nano tüp)'e ait olup 2000-3000 W/mK'dir. Bu tez çalışmasında kullanılan saf su-CuO nanopartikülü olup ısıl iletim katsayısı 76,5 W/mK'dir.

Nanopartiküller gözenekli yapılı, okelmeye ve kümelenmeye yatkın maddelerdir. Nanoparçacıkların gözenekli yapıları SDBS(sodyum dodesilbenzen sülfonat), SDS(sodyum dodesil sülfonat), CTAB (setil trimetil amonyum bromür) gibi s rfaktantlar ile süspansiyon yapılarak kullanılmalarına olanak tanımaktadır. S rfaktantlar literatürde deterjan ailesi olarak geçmektedir ve özellikleri partiküllerin çevresini sararak yüzey gerilimlerini düşürüp, su yahut kullanılan ana akışkanın içerisinde partikülün askıda kalmasını sağlamaktır. S rfaktantların bu özelliği sayesinde partiküllerin okelmesi ve/veya kümelenmesi engellenir, homojen yapıda nanoakışkan elde edilir. Fakat yüksek oranda nanoparçacık kullanılması halinde s rfaktantlar da yetersiz kalmaktadır ve parçacıklar okelme eğilimi göstermektedir. Bu sebeptendir ki araştırmacılar %0,01 gibi oranlarda nanoakışkanlarla da çalışmakta ve literatüre katkı yapabilen sonuçlar alabilmektedirler.

Nanoakışkanlarla suya göre daha yüksek ısıl transferi değerleri elde edilmesinin temel sebepleri yukarıda bahsedilen mekanizmalar ile akışkan içerisindeki parçacıkların yüksek ısıl iletim katsayısı sağlaması olsa da, daha yüksek ısıl transferi alanı nedeniyle taşınım katsayısında da oldukça büyük artış elde edilmesidir [12]. Literatürde nanoakışkanların termofiziksel özellikleri, anlık ısıl transferi miktarı vb.  zelliklerin nanoparçacık oranı, nanoparçacık çapı, kullanılan sürfaktant miktarı, çalışma sıcaklığı vb. parametrelerle değişimini inceleyen bir çok makale mevcuttur.

## **1.1 Literatür Araştırması**

Bu bölümde, mevcut çalışmaya temel oluşturan titreşimle ısıl transferi çalışmaları, nanoakışkanların ısıl transferi uygulamalarında kullanımı ve nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin bağlı olduğu parametreleri inceleyen literatür araştırmaları sunulmuştur.

### **1.1.1 Nanoakışkan ile ısıl transferi alışmaları**

Masuda vd. [13] çalışmalarında ekstra hassas TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri kullanarak bu alanda yapılan ilk çalışmayı gerçekleştirmişlerdir ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin %4.3 oranında kullanılmasıyla etkin ısıl iletimin %30'a kadar artabileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışma nanoakışkanların literatüre eklenmesinden önce gerçekleştirilmiş olmasıyla, bu alandaki öncü bir çalışmadır.

Selvakumar ve Suresh [14] çalışmalarında elektronik cihaz soğutmak için ısı kuyusu içinde akışkan olarak su-CuO nanoakışkanı kullanmışlardır. %0.2 hacimsel oranda nanoakışkan kullanımıyla ara yüzde 1.15°C düşüş gözlemlerken taşınım katsayısında %29.63 artış gözlemlenmiştir. Fakat nanopartiküllerin özkütlelerinin saf sudan çok daha yüksek olması sebebiyle pompa gücünde saf suya nazaran %15.11 artış gözlemlenmiştir..

Wongcharee vd. [15] türbülanslı jet nozulunda %2, %3 ve %4 su CuO nanoakışkanı kullanarak yüzey sıcaklığı ve Nusselt sayısına olan etkisini incelemiştir. Çalışmalarında %2 ve %3 nanoakışkanlarla saf suya nazaran daha yüksek Nusselt sayısı ve daha düşük yüzey sıcaklığı elde etmişlerdir. Fakat %4 nanoakışkan kullanarak gerçekleştirdikleri deneylerde ise daha düşük Nusselt sayısı ve daha yüksek yüzey sıcaklığı elde etmişlerdir.

Pak ve Cho [16] Çalışmalarında 13 µm ve 27 µm boyutunda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO nanopartiküller kullanarak nanoakışkan hazırlamışlardır. Bu akışkanların viskozite ve Darcy sürtünme katsayısını bulmuşlardır. %10 nanoakışkanın viskozitesinin saf suya göre 3 kat fazla olduğunu gözlemlenmiştir. Karışım oranının %3 altında olduğu durumda ise partikül çapının Darcy sürtünme katsayısı üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını gözlemlenmiştir. %3 nanoakışkanın saf suya göre %12 daha düşük ısı transfer katsayısına sahip olduğunu gözlemleyerek, daha büyük çaplı parçacık kullanmanın bu problemi ortadan kaldıracağını kaydetmişlerdir.

Ho ve Chen [17] mini kanallı sistemlerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren nanoakışkan kullanarak, nanoakışkanın ısı transferine etkilerini gözlemlenmiştir. %0.5-10 ağırlıksal oranlarda nanoakışkan kullanmak suretiyle, ağırlıksal oran ile ısı iletim katsayısını ilişkilendirerek %2 nanoakışkanın ısı iletim katsayısının saf suya göre 1.2 kat daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. %10 ağırlıksal oranda nanoakışkanın giriş ve ortalama sıcaklığı baz alınarak hesaplanan ortalama ısı transferi katsayılarının ise sırasıyla %35 ve %72 arttığını kaydettiler. Ağırlık olarak ise %6'dan daha yüksek oranda nanoakışkan kullanmanın pompa gücünü arttırması ve verimliliği düşürmesi sebebiyle kullanıma elverişli olmadığını belirtmişlerdir.

Karthikeyan vd. [18] 8-36 µm aralığında farklı boyutlarda CuO nanopartiküllerini su ve etilen glikol içerisinde kullanarak, farklı hacimsel oranlarda nanoakışkanlar elde etmişlerdir ve bu nanoakışkanların ısı iletim katsayılarını incelemişlerdir. Maksimum ısı iletim katsayısı artışını 8 µm boyutunda, etilen glikol içerisinde %1 hacimsel oranla %54 olarak bulmuşlardır. Isı iletim katsayısı değişimini zamana bağlı olarak da inceleyerek, 20 dakika içerisinde nano partiküllerin ısı iletim katsayısı üstündeki artırıcı etkisinin ortadan kalktığını ve bunun temel nedeninin çökelme olduğunu belirtmişlerdir. Bu etkinin, sürfaktant kullanılmamalarından kaynaklanan ve beklenen bir etki olduğu söylenebilir.

Saleemi vd. [19] 20 µm ile 250 µm arası değişen boyutlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerini %50 su ve %50 AFN (antifrojen N) içerisinde kullanarak, nanopartikül boyutunun ısı iletim katsayısı ve viskozite üstündeki etkilerini incelemişlerdir. En yüksek viskoziteyi 20 µm partikül içeren nanoakışkanda elde ederek, parçacık boyutu ve viskozite arasında ters orantı elde etmişlerdir. Isı iletim katsayısının ise 20 µm'den 150 µm'ye kadar arttığını fakat bu değerden sonra düşüş yaşarak 250 µm için elde edilen değeri 40 µm için elde edilen değere yakın bir değer olarak elde etmişlerdir.

Anoop vd. [20] tüp içerisinde gerçekleştirilen akışta 45 µm ve 150 µm çapında partiküller içeren nanoakışkanlar kullanarak parçacık çapının ısı transferine olan etkisini incelediler. Re 1550 için iki nanoakışkan da ağırlıkça %4 olmak üzere; 45 µm partikül içeren akışkanın ısı taşınım katsayısının suya göre %25, 150 µm partikül içeren akışkanın ısı taşınım katsayısının ise %11 arttığını gözlemlemişlerdir.

Duangthongsuk ve Wongwises [21] ters akışlı bir ısı değiştirgecinde, türbülanslı akış koşullarında 21 µm boyutunda ve %0.2-2 aralığında hacimsel konsantrasyona sahip TiO nanoakışkanları kullanarak, hacimsel konsantrasyon ve ısı transferi arasında ilişki kurdular. %0.2-1 hacimsel oran aralığında ısı taşınım katsayısında artış gözlemlerken %1.5 nanoakışkanın, %1 akışkandan daha düşük ısı taşınım katsayısına sahip olduğunu, %2 nanoakışkanın ise ana sıvı olan suya göre %14 daha düşük ısı taşınım katsayısına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Colangelo vd. [22] su bazlı nanoakışkanlar yerine diatermik yağ bazlı nanoakışkanlar üzerine çalışmışlardır. CuO, AlO, ZnO ve Cu partikülleri kullanarak %0.1-3 hacimsel oranlarda nanoakışkanlar hazırlamışlardır. Hazırlanan tüm numunelerde ise diatermik

yağ bazlı nanoakışkanın ısı iletim katsayısının su bazlı nanoakışkandan daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Hamilton-Crosser modeliyle yapılan teorik çalışmanın ise deneysel verilerinden daha düşük sonuç vermesi dolayısıyla, ısı iletimin bu modelde dikkate alınmayan başka öğelerden de etkilendiği sonucuna ulaşmışlardır.

Cacua vd. [23]  $Al_2O_3$  partiküllerini saf su içerisinde SDBS(sodyum dodeksilbenzen sülfonat) ve CTAB (setil trimetil amonyum) ile ağırlıkça %0.1-0.5 olacak şekilde hazırladı. Bu işlem için prob tipi sonikatör kullanarak sonikasyon süresini maksimum 30 dakika tutmuşlardır. Elde ettikleri verilere göre sonikasyon süresi ve titreşim genliği arttıkça daha homojen bir karışım elde ettikleri yönünde olurken, optimal süre ve genlik için daha fazla çalışma yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Duangthongsuk [24] %0.3-0.6 hacimsel oranda  $SiO_2$  nanoakışkanları ile zigzag yapılı mikro kanallı ısı değiştirgecinde nanoakışkanların hidrolik ve ısı performansını incelemişlerdir. Parçacık konsantrasyonu artışının Nusselt ve Reynolds sayısını arttırdığını gözlemlerken, test düzeneği boyunca basınç dağılımına herhangi bir etki gözlemlenmediğini, %0.6 nanoakışkan için ise ısı performansın %8 daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

Teng vd.[25]  $Al_2O_3$  partikülleri sentezleyerek 20, 50 ve 100  $\mu m$  olmak üzere 3 farklı boyutta nanoparçacık elde ettiler. Her biri için %0.5,1.0,1.5 ve 2 ağırlıkça nanoakışkan ve 10,30 ve 50°C çalışma sıcaklığı ile boyut, konsantrasyon ve sıcaklığın ısı iletim katsayısına etkisini incelediler. Konsantrasyon ve sıcaklığın yükselmesinin ısı iletim katsayısını arttırdığını, nanopartikül boyutunun ise iletim katsayısı ile ters orantı olduğunu belirtmişlerdir.

Ma vd. [26] 1.65 mm iç çapına sahip ısı borularında titreşim ve nanoakışkanlar ile deney yapmışlardır. %1 hacimsel oranda 5-50  $\mu m$  çapında pırlanta nanoparçacıklar kullanarak gerçekleştirdikleri deneylerde ısı direncin nanoakışkanlarda saf suya göre çok daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Sıcaklıkla ısı direncin azaldığını belirtirken, 360 kW yük ile 0.03°C/W'a kadar düşüş gözlemlemişlerdir.

Chopkar vd. [27] AlCu ve Ag<sub>2</sub>Al nanopartiküllerini su ve etilen glikol ana sıvıları içerisinde kullanarak parçacık çapı, hacimsel oran ve ana akışkanın nanoakışkanlarda ısı iletim katsayısına olan etkilerini inceledi. Bu amaçla %1-1.5-1.8-2 hacimsel

oranlarda ve 25-80-120 µm boyutlarında partiküller kullanmışlardır. Nanopartikül oranı arttıkça ısı iletim katsayısının arttığını gözlemlerken, parçacık boyutu ve ısı iletim katsayısı arasında ters orantı tespit etmişlerdir.

Guven vd. [28] dikey kılcal boru demetinde su- $Al_2O_3$  nanoakışkanı ile titreşimli akış koşullarında nanoakışkanların ısı transferine etkisini incelediler. Partikül yoğunluğu arttıkça ısı iletim katsayısında ve viskozitede artış gözlemlenmiştir. Isıl iletim katsayısındaki artışa paralel olarak ısı transferi miktarında %5 artış elde etmişler. Titreşim genliğindeki artışın ısı transferini arttırdığını gözlemlerken, viskozite artışının aynı volt değeri için daha düşük genlikle sonuçlandığını belirtmişlerdir.

Wen ve Ding [29] çoklu duvarlı karbon nanotüplerin ısı iletim katsayısı üzerindeki etkilerini hacimsel oran ve sıcaklık parametreleriyle incelemişlerdir. Ana sıvı olarak su kullanıp, sürfaktant olarak SDBS kullanmışlardır. %0-0.84 hacimsel oran aralığında nanoakışkan hazırlarken, deney sıcaklık aralığını 10-70°C tuttular. Isıl iletim katsayısının sıcaklık yükselişi ve hacimsel oran artışıyla doğru orantılı olarak arttığını gözlemlenmiştir ve %0.84 hacimsel oran ve 70°C sıcaklıkta ana sıvıya oranla %30'luk ısı iletim katsayısı artışı gözlemlenmiştir.

Azizian vd.[10] nanoakışkanların ısı iletim katsayısındaki artışın, nanopartiküllerin hangi davranışından kaynaklandığını araştırmışlardır. 4 farklı mekanizmayla gerçekleşen nanopartikülle ısı transferi üzerine detaylı bir açıklamada bulunmuşlardır.

### **1.1.2 Titreşimle ısı transferi çalışmaları**

Wong ve Chon [30] ultrasonik titreşimlerin doğal taşınım ve kaynama üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaç için su metanol olmak üzere 2 akışkan kullanarak, doğal taşınımına göre 8 kat yüksek ısı transferi elde etmişlerdir.

Lemlich ve Hwu [31] yatay bir ısı değiştirgeci içerisindeki zorlanmış taşınımında titreşimin etkisini incelemişlerdir. Nusselt sayısında %51 artış gözlemleyerek, bunun sebebinin titreşimlerin türbülansı tetiklemesi olduğunu belirtmişlerdir.

Forbes vd. [32] titreşimin kapalı alanda taşınımına ısı transferine etkisini incelemişlerdir. 0-4000 Hz frekans aralığında ve 0-110g ivme aralığında çalışmışlardır. Titreşimle

oluşturulan akış koşullarında akışkanın rezonans frekansına yakın değerlerde ısı taşınım katsayısında %50 civarında artış gözlemlenmiştir.

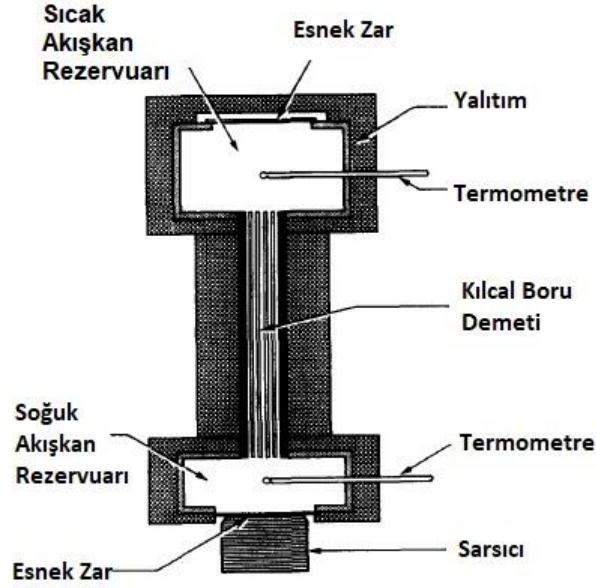
Watson [33] bir boru içerisinde sadece z ekseninde kütle transferi olması kabulü ile, kütle transferinin boru boyunca oluşturduğu etkiyi boru ve iki boyutlu kanal için incelemiştir. Taylor'ın çalışmasını baz alarak, titreşimli koşullar için denklemleri tekrar ele almak suretiyle yüksek frekans koşullarında sınır tabakada akışın hızlandığını belirtmiştir. Boru içinde titreşimli akışı inceleyen çoğu makaleye referans olması dolayısıyla bu çalışma oldukça değerlidir.

Kurzweg ve Zhao [34] dikey kılcal tüplerde ısı transferini inceleyerek, bu model için analitik çözüm sunmuşlardır. Şekil 1.3'de gösterilen deney düzeneğini kullanmak suretiyle deneysel olarak da destekledikleri çalışmalarında 2-8 Hz frekans aralığında çalışırken, akışkan olarak saf su kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarının analitik çözümleriyle örtüştüğünü gözlemleyerek, aldıkları sonuçlar neticesine frekans genliğinin karesi, kinematik viskozite ve frekansın kareköküyle etkin ısı yayılım katsayısının doğru orantılı olduğu, kılcal boru çapıyla ise ters orantılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada kullanılan kılcal boru demeti, "rüya boru" olarak adlandırılmaktadır ve bu alanda yapılmış bir çok çalışmanın önünü açması dolayısıyla bu çalışmanın literatürde önemli bir yeri vardır.

Kurzweg [35] bir önceki çalışması hakkında daha detaylı analitik incelemeler yaparak, kılcal boru çapının, Prandtl sayısının, çalışma frekansının ve uygulanan yer değiştirmenin ısı transferi üzerine etkilerini incelemiştir.

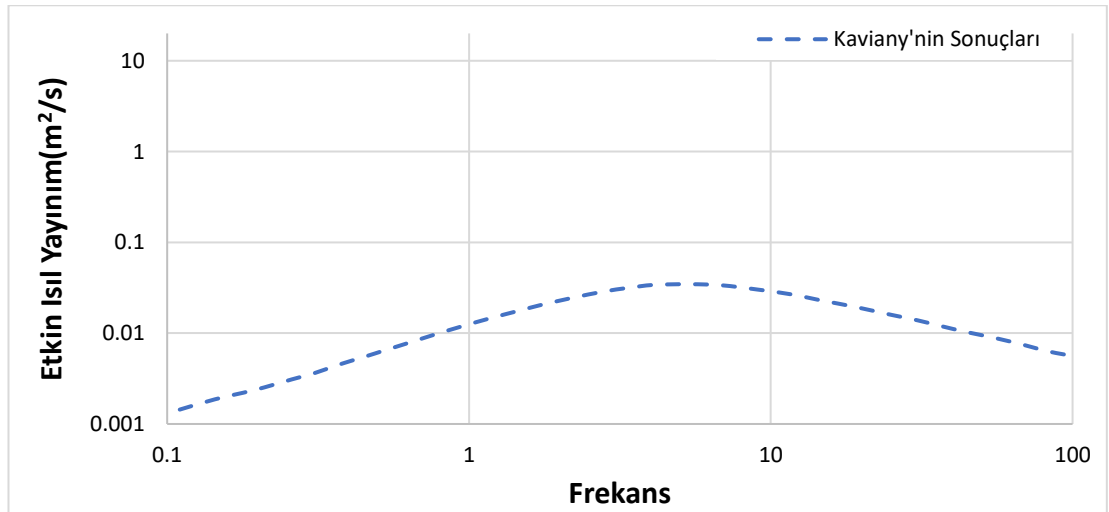
Zhang ve Kurzweg [36] aksinel boru akışında titreşim ve duvar kalınlığı etkisini sayısal olarak incelemiştir. 1,10 ve 100 Womersley sayıları için yaptıkları analizlerinde  $Wo=1$  için parabolik bir akış gözlemlerken  $Wo=100$  için ise akışın iki bölümden oluştuğunu, duvara yakın yerlerde tipik sınır tabaka kalınlığı gözlemlendiğini, orta bölgeler için sürtünmesiz Stokes tipi bir akış gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Dış duvarlarda yalıtım olmasının etkisini de inceledikleri çalışmalarında dış duvarın ısı iletim yapan bir materyalden olması durumunda ısı kapasitenin yükseldiğini ve bunun radyal ve aksiyal ısı transferini arttırdığını belirtmişlerdir.





Şekil 1.3: Kurzweg'in deney düzeneği [34].

Kaviany [37], Kurzweg'in çalışmasına viskoz kayıpları, frekansların ürettiği harmonikleri, kanal aralığını ve duvar kalınlığını ekleyerek "rüya boru" olarak tabir edilen sistem üzerinde çalışmıştır. Sistemi analitik olarak inceleyerek, boru çapının akışmaz alt tabaka kalınlığının 2 katı kadar büyük olması gerektiği fakat bu değerden yüksek olması durumunda etkin ısı yayılımında düşüş yaşandığını gözlemlemiştir. Frekans etkisi içinse Şekil 1.4'te görünmekte olan 1/10 Hz ile 100 Hz aralığını inceleyerek, frekans artışı ile etkin ısı yayılımı arasında parabolik bir ilişki kurmuştur.



Şekil 1.4: Kaviany'nin su için frekans artışı ile etkin ısı yayılım katsayısı değişimi grafiği.

Nishio vd. [38] Kurzweg'in "rüya boyu" olarak tabir edilen sistemi üzerinde çalışmıştır. Kullanılan sıvının türünün iyileştirilmiş ısı akışı hızı üzerine etkilerini

araştırıp, giriş gücüyle oranlamak suretiyle optimum çalışma aralığı üzerine çalışmışlardır. Gelişmemiş akış bölgesindeki etkin ısıl yayılım hesabı için denklem 1.3'ü önermiştir.

$$\alpha_{ef} = \frac{0.707}{\left(1 + \frac{1}{Pr}\right)\left(1 + \frac{1}{\sqrt{Pr}}\right)} \left(\frac{S^2}{R}\right) \sqrt{\omega\alpha} \quad (1.3)$$

Burada Pr Prandtl sayısı, S yer değiştirme miktarı, R kılcal boru çapı,  $\omega$  açısal frekans,  $\alpha$  ısıl yayılım katsayısıdır.

Siegel [39] üniform ısıtılmış paralel plakalı kanalda titreşimli akışı analitik olarak incelemiştir. Sinüs dalgası gereği geriye giden akışın, gelen akışa ön ısıtma uygulamasını hesabına dahil ederken, çözüm içerisinde bulunan gerekli duvar sıcaklığını bulmaya yardımcı olacak bir katsayıyı hesaplayamamıştır.

Guo vd. [40] içi gözenekli yapıyla kaplanmış boru içerisinde titreşimli akışı sayısal olarak incelemiştir. 0-10 Hz frekans aralığında gerçekleştirdikleri analizlerde Darcy sayısı, gözenekli yapı kalınlığı, titreşim genliğinin ısı transferine olan etkilerini incelemiştir.

Ma vd. [41] Titreşimli akış koşullarının boru içerisindeki akışa ve sıcaklık düşüşüne olan etkilerini nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Sistem içerisinde kalan baloncukları amortisör olarak kabul eden bir yaklaşım sergileyerek, titreşimin belirli bir giriş gücünü aştıktan sonra yahut sıcaklık farkının belirli bir değerin üstüne çıktığında başladığını belirtmişlerdir.

Huelsz ve Ramos [42], Rayleigh'in Sondhaus Tüpü hakkındaki yorumunu deneysel olarak valide etmişlerdir. Rayleigh'e göre ısı duvardan transfer olurken aksel sıcaklık gradyeni zamanın bir fonksiyonudur. Bu validasyon için titreşim üretici olarak 130 Hz frekans üreten bir kolon kullanmışlardır.

Akdag ve Ozguc [43] Dikey bir boru içerisinde titreşimin ve frekans genliğinin ısı transferine etkisini incelemiştir. Çalışmalarında titreşim üretici olarak bir piston-silindir ikilisi kullanmışlardır. Çalışma frekans aralıkları 1.445-5.13 rad/s yani, 0.229-0.8164 Hz aralığında, 7.73-10.3-12.8 olmak üzere 3 adet birimsiz frekans genliğinde

çalışmışlardır. Frekans ve frekans genliği arttıkça Nusselt sayısında artış gözlemlenmiştir.

Lee vd. [44] aksenel, sinüsel duvar sıcaklığı dağılımı gösteren bir boruda titreşimli akışın etkilerini çözümlenmiştir. Duvarın sinüs dalgası şeklinde sıcaklık dağılımı gösterdiği sistemlerinde akışı modifiye edilmiş Womersley sayısına( $\beta$ ) ve tarama bölgesine( $\lambda$ ) göre 3 ana bölümde incelemiştir. 1. Bölge  $\beta \ll 1$  için akışın düzenli rejimde olduğunu, 2. Bölge  $\beta > 1$  ve  $\lambda \ll 1$  için iletimden etkilenen kısmın duvar yakınları olduğunu, düzensiz ifadenin taşınımıyla dengede olduğunu ve sınır tabakanın frekans tarafından belirlendiğini, 3. Bölge  $\beta \lambda^{1/2} \gg 1$  ve  $\lambda \ll 1$  için ise ısı transferinin genel karakteristiğinin 2. Bölge ile benzer olduğunu fakat sınır tabakanın tarama uzunluğu oranından etkilendiğini belirtmiştir.

Miura vd. [45] boru içerisindeki titreşimle ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Akışkan olarak etanol ve %50 etanol-hava karışımı kullanmışlardır. 1-3 Hz frekans aralığında gerçekleştirdikleri deneylerinde hissedilir ısı taşınımında etkin ısı iletim katsayısının frekansla doğru orantılı olarak arttığını fakat gizli ısı taşınımındaki etkin ısı iletim katsayısının frekansla azaldığını gözlemlenmiştir. Tek bileşenli akışkan, yani etanol ile gerçekleştirdikleri deneylerde iki bileşenli, %50 etanol-hava karışımıyla gerçekleştirdikleri deneylere göre 2 katı kadar yüksek etkin ısı iletim katsayısı elde etmişlerdir.

Furukawa [46], boru içerisindeki titreşimli akışın mekanik bir sarsıcı yerine piezo-elektrik materyalin ters şekilde kullanılması ile oluşturulması üzerine çalışmıştır. 0.5-6 Hz aralığında gerçekleştirdiği çalışmasında aseton, amonyak vb farklı akışkanlar kullanarak ısı yayılımı üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Güler ve Aktaş [47] kılcal boru demeti içerisinde su kullanarak titreşim frekansı ve titreşim genliğinin ısı yayılım katsayısı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Etkin ısı yayılım katsayısının ve toplam ısı transferinin titreşim genliğinin artışıyla arttığını; etkin ısı yayılım katsayısının ise, suyun ısı yayılım katsayısının 4 katı civarında olduğunu gözlemlenmiştir.

Vadasz vd. [48] titreşimlerin parafinin katılaşması üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Erime sıcaklığı 29-36°C, katılaşma sıcaklığı 31-36°C aralığında olan

parafini 60°C'a ısıtarak sıvılaştırmışlardır. Tamamen sıvılaştırmanın ardından 15°C sıcaklığındaki soğuk banyoda soğutma suretiyle katılaştırdıkları numuneleri titreşimsiz ve titreşimli olacak şekilde inceleme suretiyle. 100 Hz frekansta yer değiştirme miktarının  $7.95 \pm 0.15$  mm olduğu titreşimler uygulayarak katılma süresinde %17 azalma elde etmişlerdir. Bu da ısı transferinin %17 arttığı anlamını taşımaktadır.

## **1.2 Araştırma Gereksinimi**

Literatürde nanopartiküllerin ısı transferi üzerindeki etkileri konusunda ve titreşim ile ısı transferi üzerine yayınlanmış bir çok yayın bulunmaktadır. Bununla birlikte nanoakışkanların titreşimli akışında ısı transferi konusunda yapılmış çalışmalar oldukça sınırlıdır. Dikey kılcal borularda nanoakışkan ile deneysel yapılmış bir ısı transferi çalışması mevcuttur ve su- $Al_2O_3$  nanoakışkan ile yapılmıştır. Su-CuO nanoakışkanı kullanılarak gerçekleştirilmiş ısı transferi çalışması hali hazırda bulunmamaktadır. Bu bağlamda dikey kılcal borularda su-CuO nanoakışkanının ısı transferine etkisinin titreşim genliği ve titreşim frekansı ile olan değişimini inceleyen bir çalışmaya ihtiyaç vardır.

## **1.3 Tezin Kapsamı ve Amacı**

Bu tez çalışması birbirine kılcal boru demetiyle bağlı soğuk ve sıcak akışkan rezervuarları arasındaki ısı transferinin akışkan tipi, titreşim frekansı ve titreşim genliğiyle değişimini incelemektedir. Bu bağlamda saf su ve saf su-CuO nanoakışkanı ile üç farklı genlikte ve beş farklı frekansta deneyler yapılmıştır. Titreşim genliği, titreşim frekansı ve nanoakışkanların dikey boyu demeti içerisinde gerçekleşen ısı transferi üzerindeki etkisini gözlemlemek hedeflenmektedir.

## 2. DENEY METODU

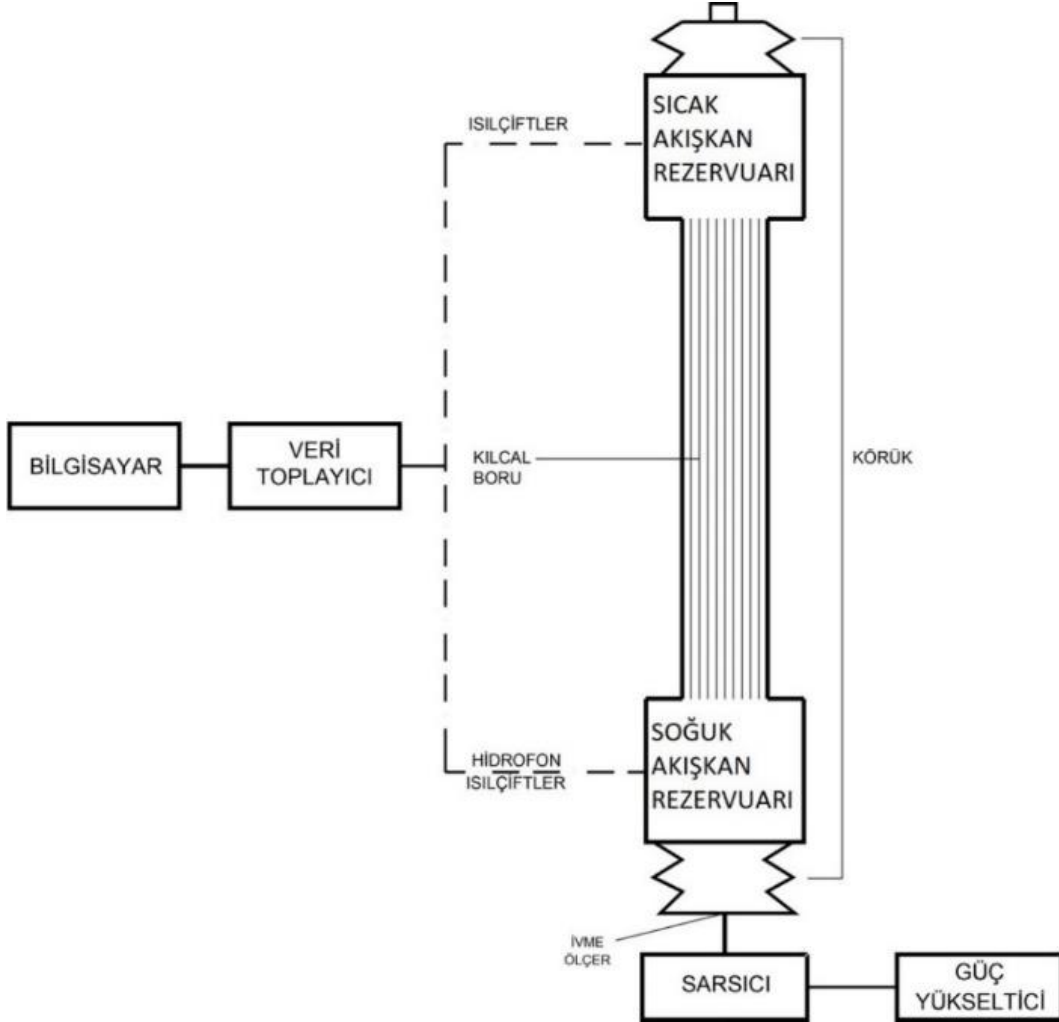
Bu bölümde deney düzeneği tanıtılıp, deneylerde kullanılan nanoakışkanın nasıl hazırlandığı ve hazırlanan nanoakışkanın özelliklerinin nasıl belirlendiği incelenmektedir.

### 2.1 Deney Düzeneği

Isı transferi deneyleri için kullanılan deneysel düzenek: soğuk akışkanın bulunduğu alt rezervuar, sıcak akışkanın bulunduğu üst rezervuar, alt ve üst rezervuar arasındaki bağlantıyı sağlayan kılcal boru demeti; ikisi alt rezervuarda, ikisi üst rezervuarda olmak üzere dört adet ısı çifti, alt rezervuara yerleştirilmiş hidrofon, titreşimin sisteme uygulandığı noktada ivme ölçer, titreşim üreticine güç sağlayan güç kaynağı, veri depolayıcı, sisteme titreşim sağlayan titreşim üretici ve titreşim üreticinin ucundaki iğneden oluşmaktadır. Kullanılan deneysel düzeneğin şematik gösterimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Rezervuarlar ve kılcal boru demetinin içinde bulunduğu borunun malzemesi akrilik camdır. Bu malzeme deney sistemi içerisindeki akışı görmeye müsade ederken, oluşabilecek baloncuk problemlerini gözle tespitiye imkan vermektedir. Alt rezervuar sabit bir konumda olup alt kısmı titreşimin üreticiden sisteme iletiildiği kauçuk körük ile kapatılmıştır ve ısı çifti, hidrofon ve sıvı girişi için üzerinde üç adet delik bulunmaktadır. Bu delikler pnömatik nipel rekora yuvalık yapmaktadır. Nipel rekor sayesinde ısı çifti, hidrofon ve sıvı girişini sağlayan plastik boru olası bir problemde kolayca değiştirilebilmektedir ve sızdırmazlık sağlanmaktadır. Bu rezervuarın üst kısmında hidrolik rekora ait pirinç somun, bağlantı noktası için kullanılmıştır. Kılcal boru demeti dış yarıçapı 1.5 mm olan 55 adet kılcal borunun içine sıkıştırıldığı bir adet büyük çaplı, alt ve üst kısmı yine hidrolik rekora ait vida oturtulmuş borudan meydana gelmektedir. Üst rezervuarın alt kısmında kılcal boru demetiyle bağlantıyı sağlaması için alt rezervuarda kullanılan hidrolik rekora ait somun bulunmaktadır. Üst rezervuarın üzerinde ısı çifti girişi için kullanılan bir pnömatik rekor bulunup, üst

kısmı kauçuk körük ve sıvı girişini sağlaması için sökülüp takılabilir bir parça ile kapatılmışlar.



Şekil 2.1: Deneysel düzeneğin şematik gösterimi.

Laminar akış koşullarını oluşturmak için, rezervuarları birbirine kılcal boru demetiyle bağlanmıştır. Bu amaçla Denklem 2.1 ile verilen Reynolds sayısı var olan boru çapı için bütün deney frekansları, frekans genlikleri ve akışkanları için hesaplanmıştır ve Çizelge 2.1’de sunulmaktadır.

$$Re = \frac{\rho u a}{\mu} \quad (2.1)$$

$\rho$ = Akışkanın özkütlesi ( $\text{kg/m}^3$ )

$u$ = Akış hızı (m/s)

$a$ = Kılcal boru çapı (m)

$\mu$ = Dinamik viskozite (Pa s)

Çizelge 2.1: Deneş koşulları altında elde edilen Reynolds sayıları.

	Reynolds Sayısı					
	Saf Su			Nanoakışkan		
	4 mm	5 mm	6 mm	4 mm	5 mm	6 mm
6 Hz	35.8	44.8	53.8	32.9	41.2	49.4
7 Hz	41.8	52.3	62.7	38.4	48	57.6
8 Hz	47.8	59.7	71.7	43.95	54.9	65.9
9 Hz	53.8	67.2	80.7	49.4	61.8	74.1
10 Hz	59.7	74.7	89.6	54.9	68.6	82.4

Boru içerisindeki akışta Reynolds sayısının 2100'ü aşması durumunda geçiş bölgesine, Reynolds sayısının 4000'i aşması durumunda ise türbülanslı akış koşullarına geçilmektedir. Kullanılan deney düzeneğinin ile gerçekleşen akış koşullarında ise Çizelge 2.1'den görülebileceği üzere Reynolds sayısı bütün frekans, frekans genliğı ve akışkan koşullarında 100'ün altında kalmaktadır. Elde edilen Reynolds sayısı sonuçları göz önüne alındığında akış koşullarının bütün deneyler boyunca laminar koşullarda kaldığı söylenebilmektedir.

Titreşimler Resim 2.1'de görünmekte olan güç kaynağına bağılı titreşim üreticinin ucundaki iğneyle, alt rezervuarın altına yerleştirilmiş olan kauçuk körüğe iletilmektedir.



Resim 2.1: Güç kaynağı.

Rijit bir cisim ile sızdırmazlığının sağlanmasının oldukça zor olması, böyle bir parçanın üretiminin ve montajının uzun süre gerektirmesi ve titreşim üreticinin kaldırabileceği bir ağırlık sınırının bulunması faktörlerinden dolayı titreşimleri sisteme iletecek ara parçanın ağırlık olarak minimum olması ve yüksek esnekliğe sahip olması beklenmektedir. Bu amaçla bu ara parça için kauçuk körük kullanımı sistemi pratikleştirmekte ve rijit bir cisme göre daha kolay bir kullanım imkanı sunmaktadır.

Titreşim üreticinden üretilen titreşimlerin genliği Resim 2.2’de görünmekte olan ivme ölçer ile ölçülüp, deneyler için gerekli olan yer değiştirme miktarı PHOTON+ programının işlem sonrası bölümünde bu ölçümlerin incelenmesiyle elde edilmektedir. İvme ölçer anlık olarak ivme ve yer değiştirme miktarını ölçebilmektedir.



Resim 2.2: Alt rezervuar ve titreşim iletici körük.

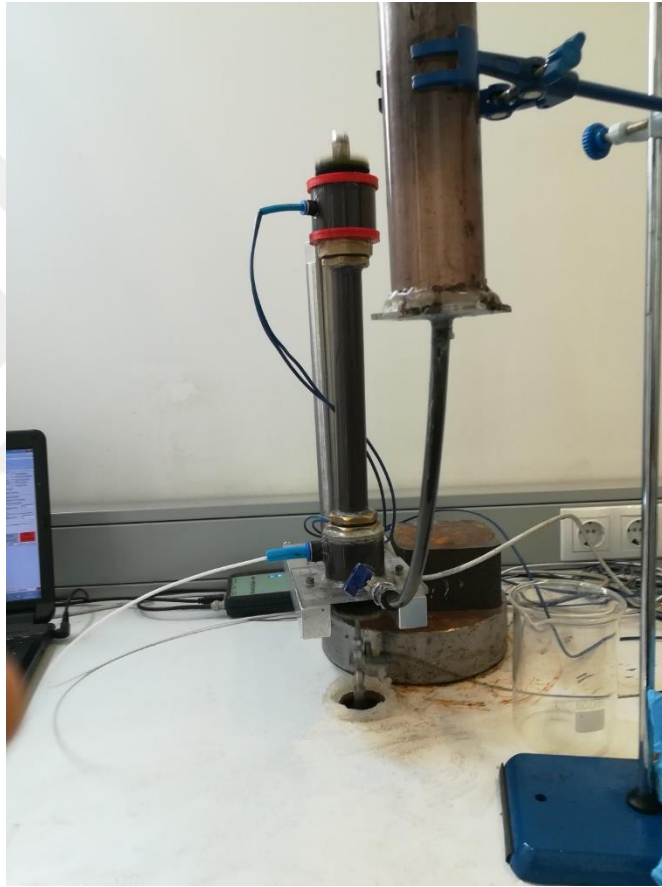
Düzenekte kullanılan ısı çiftleri K tipidir. Çalışma sıcaklığı aralığının geniş olan ve korozyon direnci yüksek olan K tipi ısı çift su ve nanoakışkan kullanılan bir sistem için oldukça uygundur. Kullanılan dört adet tipi ısı çifti Resim 2.3’te görünmekte olan veri depolayıcıya bağlıdır ve veri depolayıcı tipi ısı çiftlerinden gelen verileri saniyelik olarak kaydetmektedir. Alt ve üst rezervuarın sıcaklıkları her saniye 2 farklı ısı çifti tarafından ölçülmekte olup, kullanılan sıcaklık verileri bu 2 sıcaklık verisinin ortalamasıdır.

Resim 2.4’te deney aparatının nanoakışkanla doldurulmuş hali görünmektedir. Deney düzeneği bu hali ile deney yapılmaya hazır haldedir.





Resim 2.3: Veri depolayıcı.



Resim 2.4: Nanoakışkan doldurulmuş deney aparatı.

## 2.2 Nanoakışkanın Hazırlanması

Nanoakışkan hazırlamak için “tek-adım” ve “çift-adım” olmak üzere iki farklı ana yöntem mevcuttur. Tek-adım metodu nanoakışkanın kimyasal bir reaksiyon sonucu elde edilmesidir. Örneğin Cu nanoakışkanı elde etmek için ilk olarak  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (bakır metali) kompleks bileşiği 0.1 molar 25 mL etilen glikol içerisinde çözülür. Daha

sonra, PVP-K30 0.01 molar olacak şekilde 5 mL etilen glikol içerisinde çözülür. Bu iki çözelti 100 mL'lik bir behere konularak 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılır. Ardından  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  0.25 molar olacak şekilde 25 mL etilen glikol içerisinde çözülür ve 100 mL'lik beherde bulunan çözeltiliye eklenerek, yeni çözelti 15 dakika daha manyetik karıştırıcıda karıştırılır. Son olarak ise mikrodalga fırında 5 dakika boyunca reaksiyon gerçekleştirilir[49]. İki adım metodu ise farklı kimyasal metodlarla elde edilmiş nanoparçacıkların bir ana akışkan içerisine karıştırılarak nanoakışkan elde edilmesidir. Bu metod için sürfaktant ve ultrasonik banyo veya ultrasonik prob kullanımı ehemmiyet taşımaktadır. Yüksek frekanslarda nanoparçacıklar birbirinden ayrılarak çökme davranışı göstermemektedir. Fakat bu metodla üretilen nanoakışkanların ısı iletim katsayıları genellikle zamanın fonksiyonu olarak değişmekte ve zaman arttıkça çökme davranışıyla birlikte ısı iletim katsayıları düşmektedir.

Mevcut çalışmada US Research Nanomaterials, Inc. isimli firmadan temin edilen “Copper Oxide Water Dispersion 20% weight (22-55  $\mu\text{m}$ )” isimli nanoakışkan kullanılmıştır. Nanoakışkanların genel çökme ve topraklanma problemlerini ortadan kaldıran sürfaktantlarla süspanse şekilde satılmaktadır. Alınan ürün ağırlık olarak %20'dir. Bu oran Denklem (2.2) kullanılarak hacimsel orana dönüştürülmüştür.

$$\phi_{ho} = \frac{\phi_{ko} \rho_w}{\rho_{np} + \phi_{ko} \rho_w - \phi_w \rho_{np}} \quad (2.2)$$

$\phi_{ho}$ = Nanoakışkanın hacimsel oranı

$\phi_{ko}$ = Nanoakışkanın kütle oranı

$\rho_s$ = Suyun özkütlesi ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{np}$ = Nanopartikülün özkütlesi( $\text{kg/m}^3$ )

Mevcut hacimsel oran hesaplandıktan sonra istenilen hacimsel oranı elde etmek için mevcut nanoakışkana, gereken miktarda saf su ekleme suretiyle bu oran düşürülür. Kullanılması gereken nanoakışkan hacmi ve bu hacme eklenecek saf su hacmini hesaplamak için Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) kullanılmıştır.

$$V_{na} \phi_t = V_t \phi_{iho} \quad (2.3)$$

$$V_s = V_t V_{na} \quad (2.4)$$

$\phi_{iho}$ = İstenilen hacimsel oran

$V_s$ = Eklenmesi gereken saf su miktarı

$V_t$ = Toplam hacim

$V_{na}$ = Kullanılması gereken nanoakışkan miktarı

Denklem 2.2-2.3-2.4 EK-3'te verilen MATLAB kodu içerisinde kullanılarak, saf su CuO(%2) nanoakışkanı eldesi için karıştırılması gereken saf su ve su bazlı nanoakışkan(ağırlık olarak %20) miktarları hacimsel olarak elde edilir. Elde edilen hacim verileri Çizelge 2.2'de verilmektedir.

Çizelge 2.2: Hacimsel %2 nanoakışkan hazırlamak için gerekli olan nanoakışkan ve saf su miktarı.

	Saf su	Nanoakışkan	Toplam
Hacim(mL)	236.8	263.2	500

Seyreltilme işlemi dolayısıyla olası çökeltme problemleri yaşamamak için hazırlanan nanoakışkan 60 dakika süreyle manyetik karıştırıcıda yüksek devirde karıştırılır. Karıştırmadan çıkan nanoakışkan 100 dakika boyunca ultrasonik banyoda yüksek frekansta titreşime maruz bırakılır. Bu işlemler sonunda hazırlanan nanoakışkanda, akışkanın deney düzeneği içerisinde hareket içerisinde olacağı da göz önüne alınarak çökeltme problemi görülmemesi beklenmektedir. Hazırlanan nanoakışkan Resim 2.5'de gösterilmektedir.



Resim 2.5: Hacimce %2 saf su-CuO nanoakışkanı.

## 2.3 Nanoakışkanın Özelliklerinin Belirlenmesi

Deneyisel çalışmalarda kullanılan nanoakışkanın ısı iletim katsayısı ve dinamik viskozite değerinin ölçölüp, literatürle ve saf su ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu gereksinim dolayısıyla yapılan ölçümlerin nasıl yapıldığı bu bölümde incelenmektedir.

### 2.3.1 Isıl iletim katsayısı ölçümü

Literatürde ısı iletim katsayısı ölçmek için sürekli ve süreksiz metodlar olmak üzere iki ana yöntem mevcuttur. Sürekli metotlarda ısı geçişi tek boyuta düşürölür ve Fourier'in tek boyutlu ısı iletim yasasıyla ısı iletim katsayısı hesaplanır. Bu metotta ölçüm süresi uzun sürmekle birlikte korumalı sıcak plaka, ısı-akış metresi, direkt ısıtma yöntemi vb. uygulamaları vardır. Süreksiz metotlardan ise daha kısa sürede sonuç alınır ve yüksek nemli numuneler için uygulanır. Sıcak kablo metodu, sıcak disk metodu vb. uygulamaları mevcuttur.

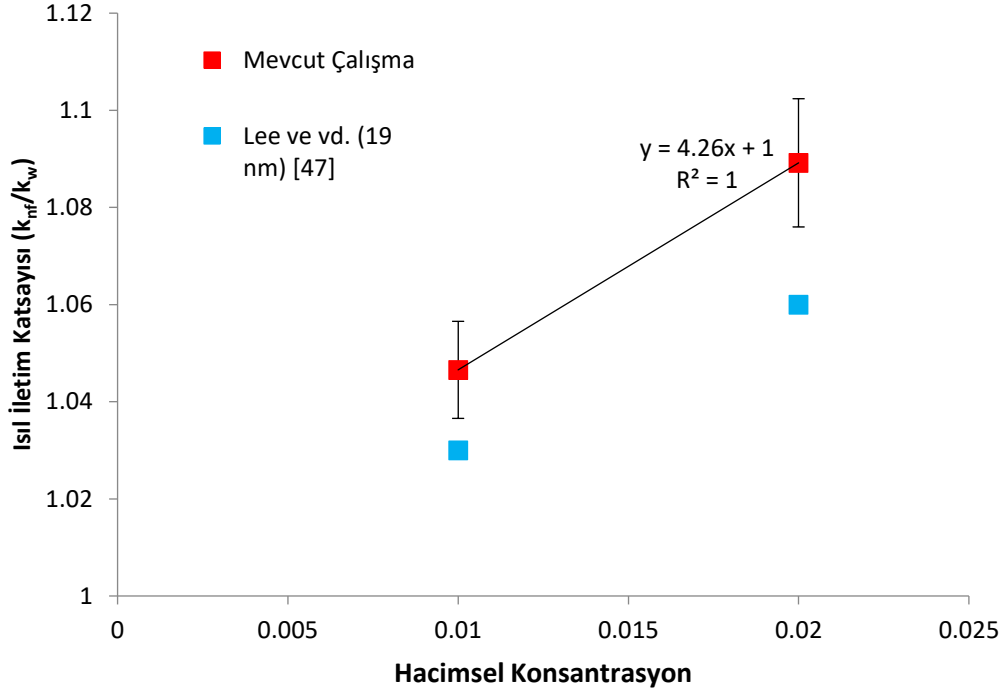
Bu çalışmada ise ısı iletim katsayısı ölçümleri için Resim 2.6'da gösterilen "KD2 Pro Thermal Properties Analyzer" isimli süreksiz metod kullanan cihaz kullanılmıştır. Ölçüm üç aşamadan oluşmakta olup 90 saniye sürmektedir. Ölçüm için cihazın iğnesi 50 mL akışkan bulunan tüpe daldırılır. İlk aşamada akışkan ile iğne denge sıcaklığına gelir, ikinci aşamada iğne akışkana ısı uygular, son aşamada ise iğnenin denge sıcaklığına ulaşması beklenir. Bu aşamalar sonucunda analizör Denklem (2.5) ile ısı iletim katsayısını hesaplar.



Resim 2.6: Isıl iletim katsayısı ölçümü.

$$k = \frac{q(\ln T_2 - \ln T_1)}{4\pi(\Delta T_1 - \Delta T_2)} \quad (2.5)$$

Şekil 2.2’de %2 CuO-Saf Su nanoakışkanının ısı iletim katsayısının, saf suyun ısı iletim katsayısına oranıyla, bu değerin literatür karşılaştırılması verilmiştir. Elde edilen sonuçta, nanoakışkan ile saf suya nazaran %8 oranında bir ısı iletim katsayısı artışı gözlenirken, literatüre kıyasla göre daha yüksek bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 2.2: Nanoakışkanın ölçülen ısı iletim katsayısının literatür ile karşılaştırılması.

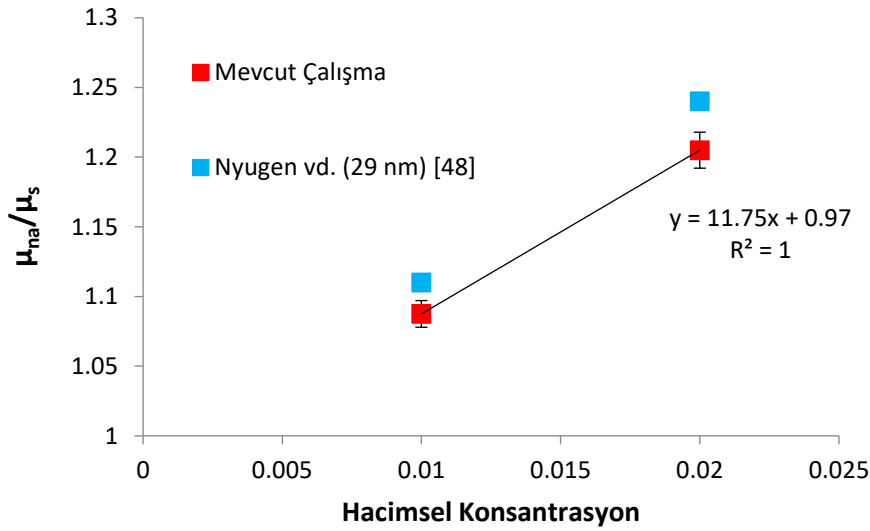
### 2.3.2 Dinamik viskozite ölçümü

Dinamik viskozitenin ölçümünde Resim 2.7’de görünen “Brookfield DV3TLV” isimli cihaz kullanılmıştır. Hata miktarı  $\pm 1.0$  olan cihazın tekrarlanabilirliği ise  $\pm 0.2$ ’dir. Cihaz kontrolör, akışkan haznesi ve mil olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Ölçüme başlamadan önce, ölçümü yapılacak akışkanın beklenen viskozite değeri aralığına uygun bir mil kullanılması elzemdir. Bu sebepten dolayı 0.1-3000 cP aralığında çalışan “CPA-40Z” mili kullanılmıştır. Ölçümler için hazne öncelikle saf su ile temizlenir ve kurulanır. Dinamik viskozitesi ölçülmek istenen akışkandan 0.5 mL numune alınarak hazneye koyulur. Bu aşamadan sonra cihaz tork uygulamaya başlar ve dinamik viskoziteyi ölçer.



Resim 2.7: Brookfield DV3TLV dinamik viskozite ölçer.

Şekil 2.3'te ise, nanoakışkanın dinamik viskozitesinin saf suyun viskozitesine oranının literatürle karşılaştırılması verilmiştir. Nanoakışkanın saf suya nazaran %20.5 daha yüksek dinamik viskozitesi olduğu gözlemlenirken, literatüre yakın fakat daha düşük bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 2.3: Nanoakışkanın ölçülen dinamik viskozitesinin literatür ile karşılaştırılması.

### 3. DENEYİN YAPILIŞI

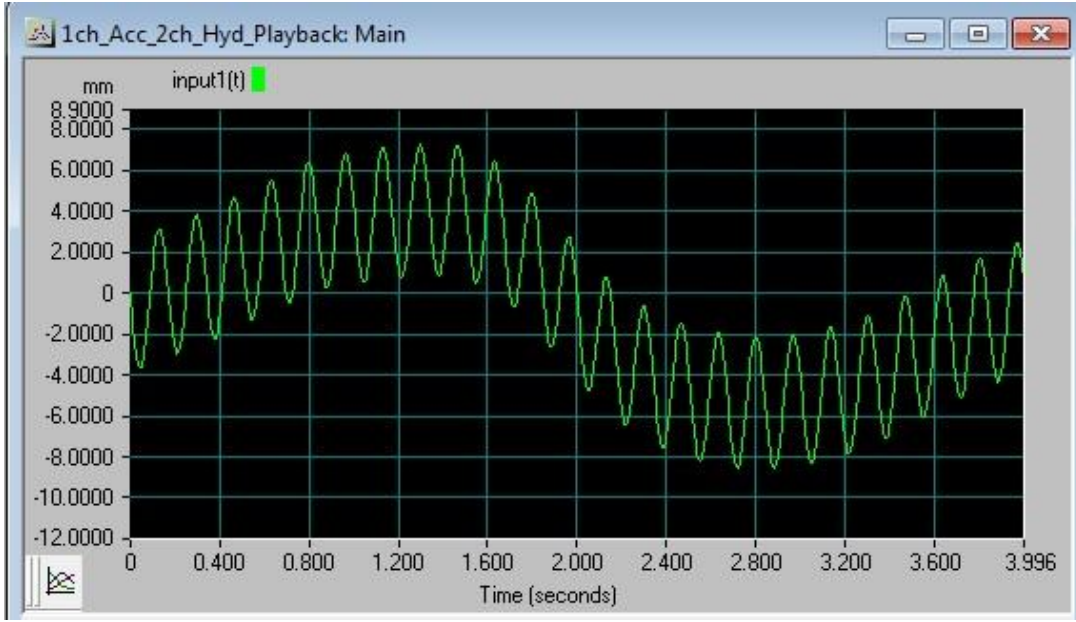
Deneye başlamadan önce Resim 3.1’te görülen giriŐten sisteme akışkan eklenir. Sıvı giriŐinin deney dzeniğinin altında bulunmasının sebebi aparat içinde oluŐacak baloncukları sıvı yükseliŐiyle birlikte aparattan tahliye etmektir. Deney aparatı tamamen akışkan ile doldurulup, sıvı giriŐleri kapatılır. İstenilen dikey yer değiştirme değerlerini yakalamak için deney yapılacak frekansta farklı voltajlar ile rezervuarlar arasında ısı transferi olmadan sisteme titreşim uygulanır. Titreşim uygulayıcı iğnenin yer değiştirme sinyalleri incelenmek üzere toplanır.



Resim 3.1: Deney aparatına akışkan eklemek için kullanılan aparat.

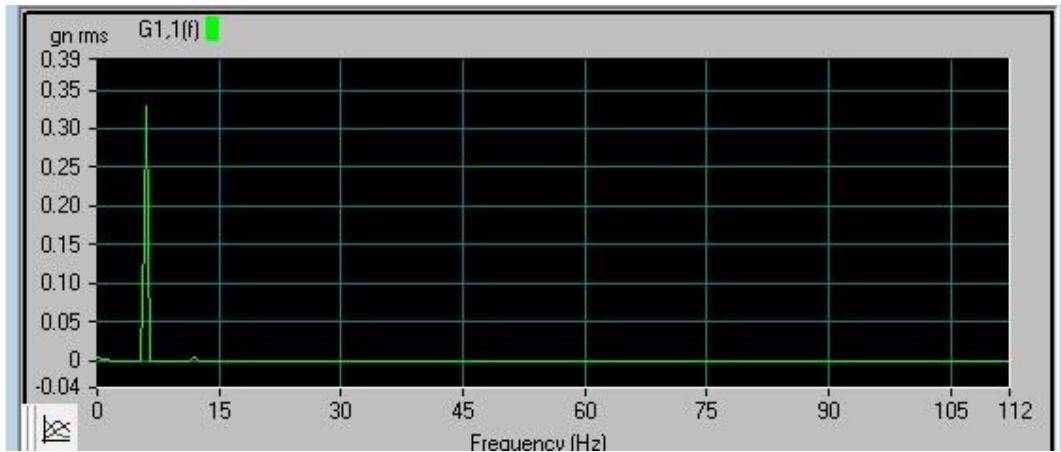
Her akışkanın özkütlesinin farklı olması, bu tip bilgi alışverişi açısından açık bir sistemde dikey yer değiştirme miktarının her akışkan için ayrı bulunmasını gerektirmektedir. Sıvının ağırlığı değiştiği için, sabit uygulanacak voltaj her akışkanda farklı dikey yer değiştirme miktarı vermektedir.

Dikey yer değiştirme bulma işlemi istenilen değer yakalanana kadar devam etmektedir. Bu değer Şekil 3.1'te görülmekte olan Photon+ programında sinyallerin incelenmesiyle bulunmaktadır.



Şekil 3.1: Photon+ programından incelenen yer değiştirme sinyali.

Burada önemli bir husus olan gürültü, var olan sistemde oldukça düşüktür ve bir alçak geçiren filtre ile alınan sinyal gürültüden arındırılabilir. Şekil 3.2'te 6 Hz frekansında yapılmış bir deneyden alınan sinyalin gürültü seviyesi gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Photon+ programından incelenen sinyalin gürültü seviyesi.



İstenilen dikey yer değiştirme değerleri sinyaller incelenerek elde edildikten sonra aparat içerisindeki akışkan tahliye edilir ve yeni akışkan eklenir. Akışkan aparatı tamamen doldurmak yerine, sıcak akışkan rezervuarının ortasına gelecek kadar eklenir. Akışkan alt kısımdan eklenmesine rağmen sistemde hala baloncuk olabilmektedir. Bu sebepten dolayı sistem tam dolu değilken belirli bir frekans ve genlikte sisteme titreşim uygulanır. Bu işlem sonucunda aparat içerisinde kalan baloncuklar sistemden tahliye edilir. Baloncuklar aparattan tahliye edildikten sonra st rezervuar boşaltılır.

Manyetik karıştırıcı yardımıyla ısıtma işlemi boyunca karıştırılmak suretiyle homojen bir ısı dağılımı sağlanarak ısıtılan akışkan, 61°C'ye kadar ısıtılır. Sıcak rezervuara eklenen akışkanın 50°C olması istenirken, akışkanın 61°C'ye ısıtılma sebebi ise ısıtılmış akışkanın rezervuara eklenme suresince ısı kaybetmesi ve soğumasıdır. 61°C'ye ısıtılan akışkan sıcak rezervuara eklendikten ve aparatın sıvı girişi kapatılır ve ölçülen sıcak rezervuar sıcaklığı 50°C olmaktadır.

Bu aşamadan sonra ise sisteme titreşim uygulanır ve rezervuarlar ısıl dengeye ulaşana kadar bu işlem devam eder. Rezervuarlar ısıl dengeye ulaştıktan sonra ise veri depolayıcı tarafından kaydedilen sıcaklık verileri önceden hazırlanmış olan excel şablonu içerisinde incelenerek elde edilmek istenen etkin ısıl yayınım katsayısı, anlık ısı transferi vb. veriler elde edilir.



## 4. VERİ ANALİZİ

Bu bölümde deneyler sonucunda elde edilen verilerin, hangi işlemlere tabi tutulduğu, elde edilen sonuçların ne şekilde elde edildiği incelenmektedir. Sırasıyla etkin ısı yayılım katsayısı, anlık ısı transferi, toplam ısı transferi, Prandtl ve Womersley sayılarının eldesi aşağıda incelenmiştir.

### 4.1 Etkin Isıl Yayılım Katsayısı Hesabı

Etkin ısı yayılım katsayısı hesabı için, öncelikle ısı iletim katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla soğuk rezervuara transfer edilen ısı miktarı Denklem (4.1) ile hesaplanmış, Denklem (4.2) ile verilen Fourier'nin ısı iletim yasasına eşitlenerek, Denklem (4.3) elde edilmiştir. Bu eşitlik düzenlenerek Denklem (4.4) elde edilmiştir. Bu denklemle ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır. Isı iletim katsayısı elde edildikten sonra Denklem (4.5) kullanılarak etkin ısı yayılım katsayısı elde edilmiştir.

$$q = \rho V_c c_p \frac{\Delta T_c}{\Delta t} \quad (4.1)$$

$$q = k_e A \frac{(T_h - T_c)}{L} \quad (4.2)$$

$$\rho V_s c_p \frac{\Delta T_c}{\Delta t} = k_e A \frac{(T_h - T_c)}{L} \quad (4.3)$$

$$k_e = \frac{\rho V_s c_p L}{A(T_h - T_c)} \frac{\Delta T_c}{\Delta t} \quad (4.4)$$

$$\alpha_e = \frac{k_e}{\rho c_p} \quad (4.5)$$

$\alpha_e$ = Etkin ısı yayılım katsayısı(m<sup>2</sup>/s)

k= Etkin ısı iletim katsayısı(W/mK)

q= Anlık ısı transferi miktarı(W)

$V_c$ = Soğuk rezervuar hacmi( $m^3$ )

$L$ = Boru uzunluğu( $m$ )

$T_h$ = Sıcak rezervuarda ölçülen sıcaklık( $^{\circ}C$ )

$T_c$ = Soğuk rezervuarda ölçülen sıcaklık( $^{\circ}C$ )

Nanoakışkan için,  $C_p$  değerinin ayrıca hesaplanması gerekmektedir. Nanoakışkan içerisindeki nanopartikülün kullanım yüzdesi, partikülün özgül ısısı ve ana akışkanın özgül ısısına bağlı olan Denklem (4.6) kullanılmaktadır.

$$(c_p)_{na} = \frac{\phi(\rho c_p)_p + (1 - \phi)(\rho c_p)_{aa}}{\rho_{na}} \quad (4.6)$$

$C_{p,na}$ = Nanoakışkanın özgül ısısı ( $kJ/kgK$ )

$C_{p,aa}$ = Anaakışkanın özgül ısısı ( $kJ/kgK$ )

$C_{p,p}$ = Nanopartikülün özgül ısısı ( $kJ/kgK$ )

$\phi$ = Nanoakışkanın hacimsel oranı

Etkin ısıl yayılım katsayısının ikinci bir eldesi de Nishio[36] tarafından gelişmemiş akış bölgesinde geçerli şekilde tanımlanan Denklem (1.3)'tür. Bu tanım titreşim genliğinin karesi, Prandtl sayısı, titreşim frekansı ve ısıl yayılım katsayısının kareköküyle doğru orantılı bir tanımdır. Burada kullanılan ısıl yayılım katsayısı ve Prandtl sayıları, akışkanın özelliği olan niceliklerdir ve yapılan deneylerden bağımsızdır.

Denklemlerde kullanılan ısı transferi alanı terimi “A” ise akış kesit alanını belirtmektedir. Resim 4.1’de görülmekte olan kılcal boru demeti 55 kılcal boru içermektedir. Akış kesit alanı, kılcal boruların et kalınlık alanlarının, kılcal boruları sarmakta olan dış borunun iç çap alanından çıkarılmasıyla Denklem (4.7) ile elde edilmektedir.

$$A = \frac{\pi}{4} [D_{boru}^2 - n(D_{dış}^2 - D_{iç}^2)] \quad (4.7)$$

$D_{boru}$ = Dış boru iç çapı

$D_{dış}$ = Kılcal boru dış çapı

$D_{iç}$ = Kılcal boru iç çapı

$n$ = Kılcal boru sayısı



Resim 4.1: Kılcal boru demeti.

#### 4.2 Anlık Isı Transferi

İki rezervuar arasındaki anlık ısı transferi hesapları için Denklem (4.2)'de verilen Fourier'in ısı iletim yasası kullanılmıştır. İkisi soğuk, ikisi sıcak rezervuarda bulunan ısı çiftlerinden alınan anlık sıcaklık verilerinin kendi içerisindeki ortalamaları kullanılarak denklemde yerine koyulmuştur.

#### 4.3 Toplam Isı Transferi

Toplam ısı transferi hesapları için, anlık ısı transferi hesabıyla elde edilmiş olan Watt cinsinden değerler ile bu değerlerin zaman verileri kullanılarak trapezoidal nümerik integrasyon yöntemi uygulanır. Bu yöntem tanımlı bir integral ile alan bulma yöntemi olmakla birlikte standart karelerle alan tamamlamaya nazaran daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Trapezoidal integrasyonun eldeki problem için kullanılan şekli (Denklem 4.8)'de verildiği şekildedir. Burada  $Q(J)$  toplam ısı transferi,  $q_n$  (W) anlık ısı transferidir.

$$Q = \Delta t \left( \frac{q_0}{2} + q_1 + q_2 + q_3 + \dots + \frac{q_n}{2} \right) \quad (4.8)$$

#### 4.4 Prandtl Sayısı Hesabı

Prandtl sayısını hesaplamak için dinamik viskozite ölçüm değeri, ısı iletim katsayısı ölçüm değeri ve ısı iletim kapasite değeri kullanılmaktadır. Hesaplama için Denklem (4.9) kullanılmıştır.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (4.9)$$

$\mu$ = Dinamik viskozite(Pa s)

$k$ = Isıl iletim katsayısı (W/mK)

$C_p$ = Özgül Isı (kJ/kgK)

Etkin Prandtl sayısı hesabı için ise Denklem (4.10) kullanılmıştır. Burada kullanılan etkin ısı yayılım değeri deney sonucunda elde edilmiş ısı iletim katsayısı ile elde edilmiştir.

$$Pr_e = \frac{v}{a_e} \quad (4.10)$$

$a_e$ = Etkin ısı yayılım katsayısı(m<sup>2</sup>/s)

$v$ = Kinematik viskozite(m<sup>2</sup>/s)

#### 4.5 Womersley Sayısı Hesabı

Womersley sayısı boyutsuz, frekansın viskoz etkilerle ilişkisini belirten bir sayıdır ve Denklem (4.11)'te verilmektedir. Buradaki frekans verisi açısal frekans olmakla birlikte, Hz cinsinden frekansın açısal frekansa dönüşümü Denklem (4.12) ile yapılmaktadır.

$$Wo = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (4.11)$$

$$\omega = 2 \pi f \quad (4.12)$$

$a$ = Kılcal boru çapı(m)

$\omega$ = Açısal frekans(1/s)

$\nu$ = Kinematik viskozite(m<sup>2</sup>/s)

$f$ = Frekans(1/s)

## 5. SONUÇLAR

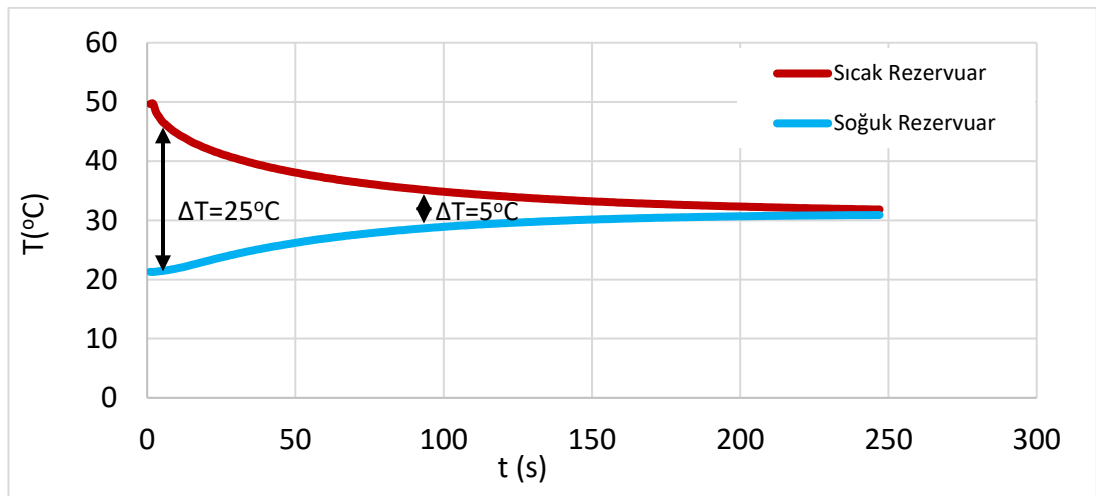
Bu bölümde ısı transferi deneyleri sonucunda elde edilmiş sonuçlar irdelenmektedir. Saf su deneyleri ve nanoakışkan deneyleri olmak üzere iki ana başlık; basınç, etkin ısıl yayılım katsayısı, ısı transfer hızı, toplam ısı transferi, etkin Prandtl sayısı, ve sistemin harcadığı güç olmak üzere altı farklı alt başlık bulunmaktadır.

Deneyler üç frekans genliği, beş titreşim frekansı ve biri nanoakışkan olmak üzere iki farklı akışkan ile gerçekleştirilmiş olup, deney koşulları Çizelge 5.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 5.1: Tez çalışması boyunca gerçekleştirilen deneyler.

Akışkan Tipi	Saf Su			Nanoakışkan		
Yer Değiştirme(mm)	4	5	6	4	5	6
Frekans(Hz)	6,7,8,9,10					

Gerçekleştirilme koşulları verilen deneylerin, başlangıçlarından bitişlerine kadar olan sürelerinin tamamı yerine Şekil 5.1’de görünen belirli bir bölümleri dikkate alınmıştır. Bu yaklaşımın geçiş bölgelerini hesaba katmama suretiyle elde edilen verilerin tutarlılığını arttıracakı düşünülmektedir.



Şekil 5.1: Rezervuar sıcaklıklarının zamana göre değişimi.

Toplam ısı transferi verileri hariç olmak suretiyle, incelenen verilerin tamamı Şekil 5.1'de görünen,  $\Delta T=25^{\circ}\text{C}$  anından başlayarak  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ 'a kadar süren bölgeye aittir. Toplam ısı transferi verileri ise  $\Delta T=25^{\circ}\text{C}$  anından başlamak suretiyle 46 saniyelik süreyi kapsamaktadır. Toplam ısı transferi sonuçları için farklı bir yaklaşım uygulanmasının sebebi ise  $\Delta T$  baz alınarak hesaplanacak toplam ısı transferi sonuçlarının, enerjinin korunumu gereği anlamlandırılabilir sonuçlar vermeyecek olmasıdır. 46 saniye seçimi ise, 7 Hz frekans, 6 mm yer değiştirme değeri saf su-CuO nanoakışkanı ile gerçekleştirilmiş deneyin ısı dengeye ulaşma süresidir. Yani, seçilmiş olan zaman dilimi rastgele olmayıp, en hızlı gerçekleşen ısı transferi deneyinin gerçekleştiği zaman dilimini kapsamaktadır.

## **5.1 Saf Su Deneyleri**

Bu bölümde titreşimli akış koşulları altında gerçekleştirilmiş saf su deneylerinin sonuçları incelenmektedir. Sonuçlar sırasıyla: Basınç, Etkin ısı yayılım katsayısı, Isı transfer hızı, Etkin Prandtl sayısı, Toplam ısı transferi ve Güç tüketimi olmak üzere 6 alt başlıkta incelenmektedir.

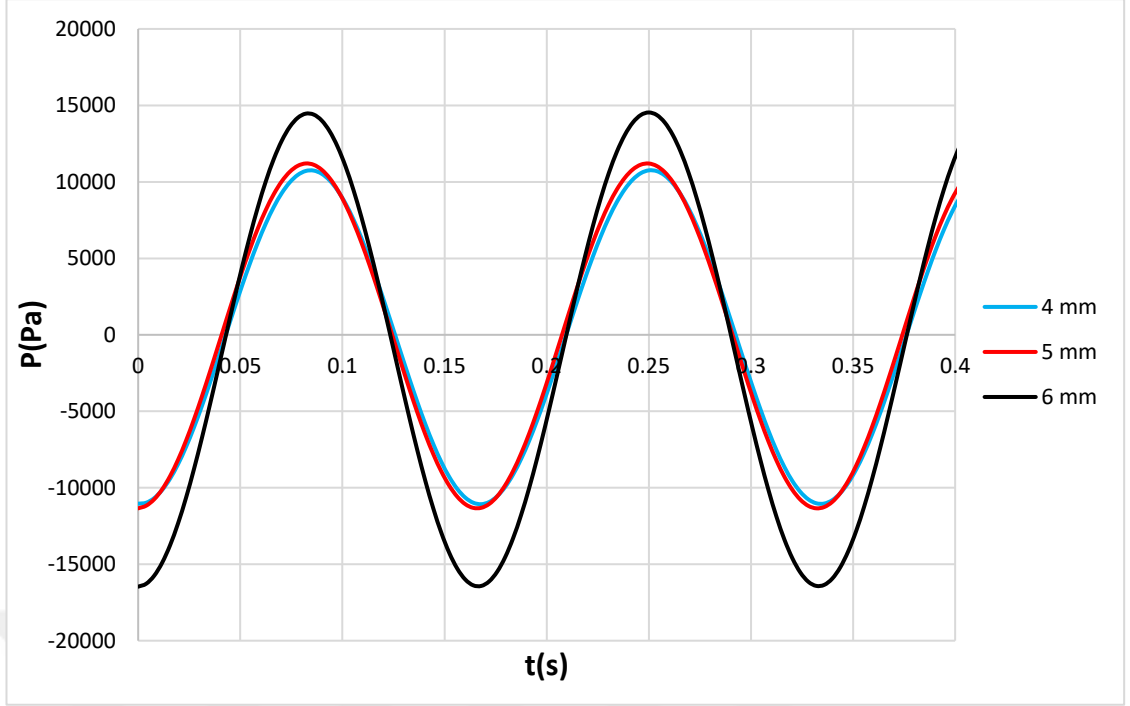
### **5.1.1 Basınç sonuçları**

Deneyler süresince hidrofona alt rezervuardan basınç ölçümleri yapılmaktadır. Bu kısımda da bu ölçümler sonucunda elde edilmiş basınç verileri sabit yer değiştirme değerleri için frekansa göre değişimi ve sabit frekans değerleri için yer değiştirme değerlerine göre değişimi için incelenmektedir.

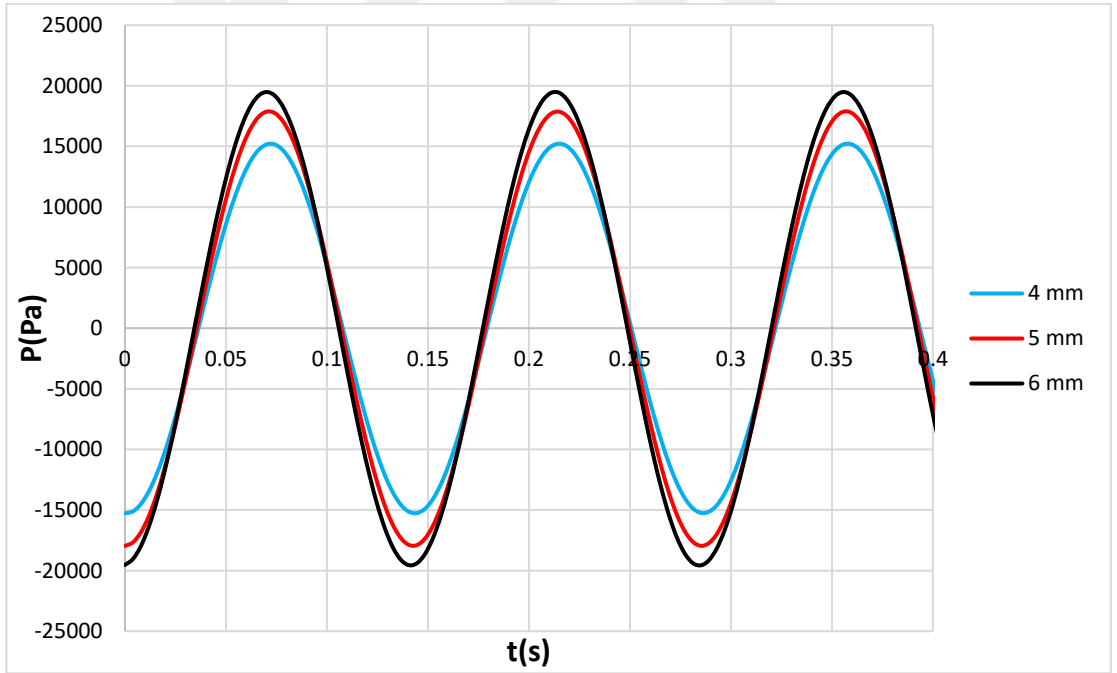
6 Hz frekansta gerçekleştirilen deneylerden elde edilen basınç sonuçları Şekil 5.2'de verilmektedir. Yer değiştirme değerinin artışıyla birlikte basınçta artış gözlenmektedir. 4 ve 5 mm değerleri için 11kPa civarında gözlenen basınç değeri 6 mm için 14kPa civarındadır. 4 ve 5 mm yer değiştirme değerleri için basınç değerleri birbirine çok yakın olsa da, 5 mm yer değiştirme ile elde edilmiş basınç değeri daha yüksektir.

7 Hz frekansta gerçekleştirilen deneylerden elde edilen basınç sonuçları Şekil 5.3'te verilmektedir. 4 mm yer değiştirme değeri için 15 kPa, 5 mm yer değiştirme değeri için 17 kPa, 6 mm yer değiştirme değeri için ise 19.5 kPa basınç değerleri elde edilmiştir. Yer değiştirme değerinin artışıyla birlikte basınçta artış gözlenmektedir. Elde edilen basınç değerleri 6 Hz frekansı ile elde edilen değerlerden daha yüksektir.



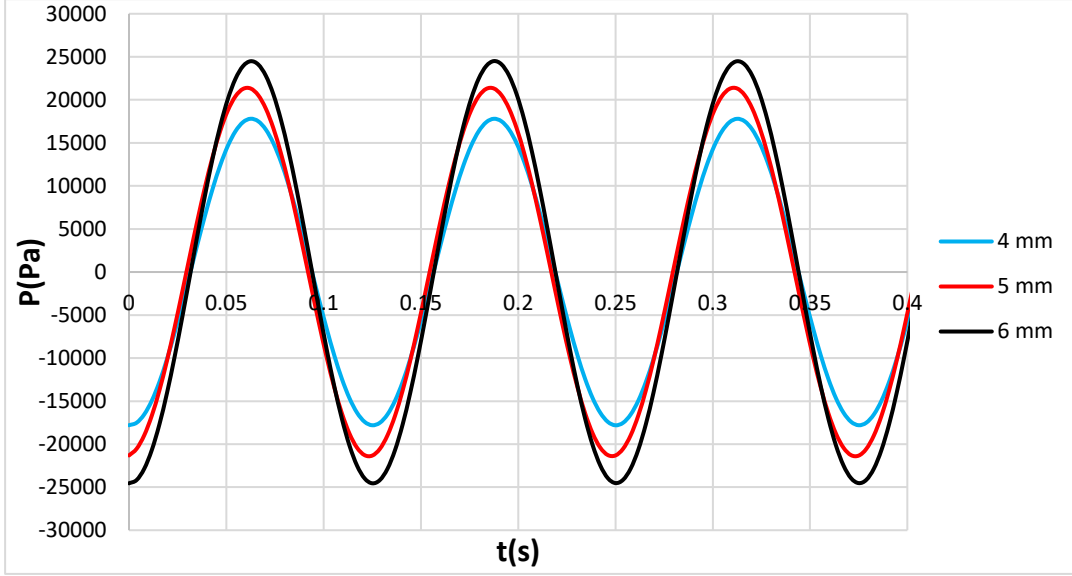


Şekil 5.2: Saf su ile gerçekleştirilen 6 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.



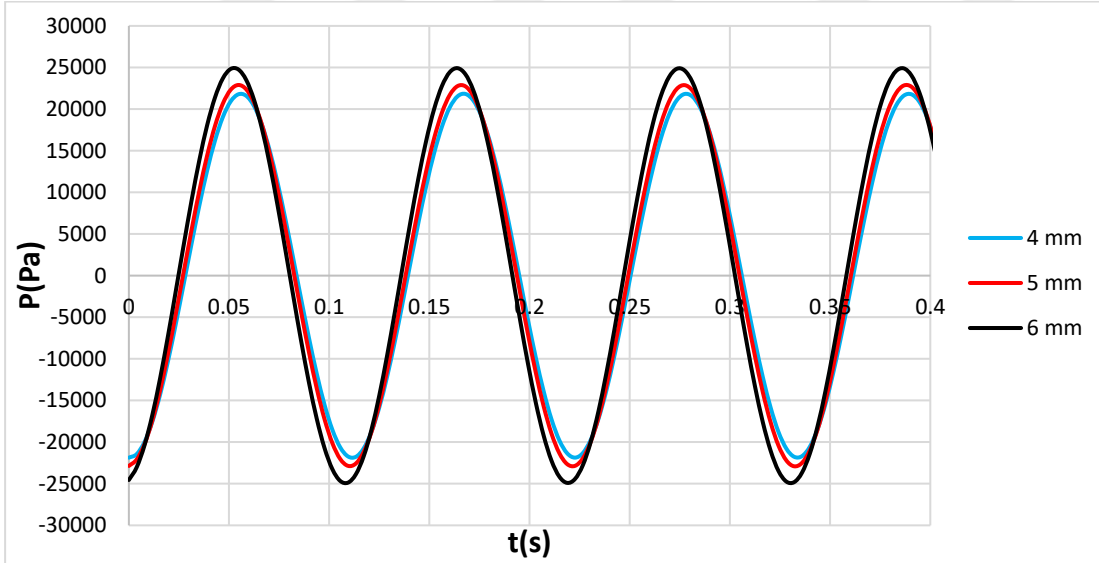
Şekil 5.3: Saf su ile gerçekleştirilen 7 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.

8 Hz frekansta gerçekleştirilen deneylerde elde edilen basınç değerleri ise Şekil 5.4'te verilmektedir ve 4 mm yer değiştirme değeri için 18 kPa, 5 mm yer değiştirme değeri için 21 kPa, 6 mm yer değiştirme değeri için ise 24.5 kPa'dır. 7 Hz frekansı ile gerçekleştirilmiş deneylere kıyasla basınçta artış gözlenmektedir.



Şekil 5.4: Saf su ile gerçekleştirilen 8 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.

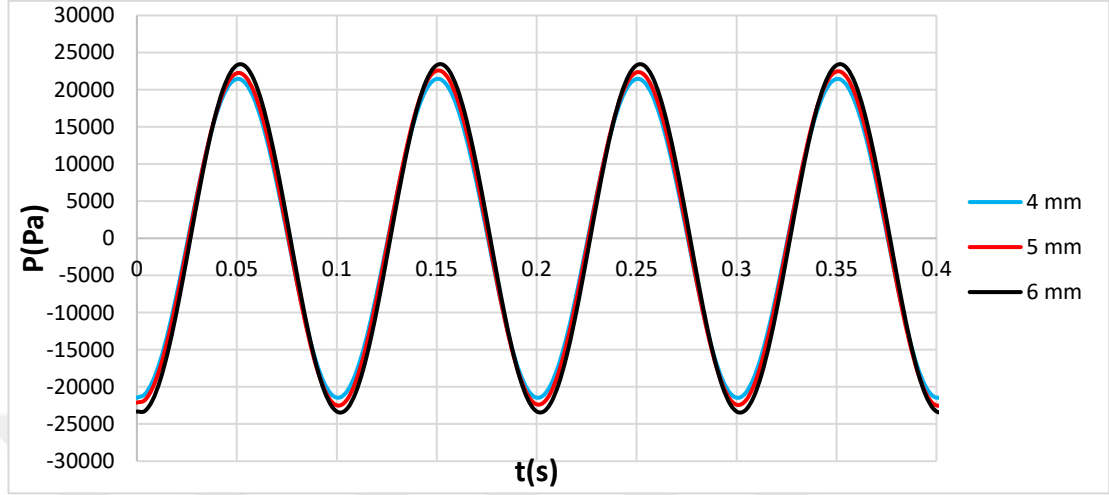
9 Hz frekansta gerçekleştirilen deneylerden elde edilen basınç değerleri de Şekil 5.5'te verilmektedir ve 4 mm yer değiştirme değeri için 22 kPa, 5 mm yer değiştirme değeri için 23 kPa, 6 mm yer değiştirme değeri için 25 kPa'dır. 8 Hz frekansı ile elde edilen basınç değerlerine kıyasla artış gözlenmektedir.



Şekil 5.5: Saf su ile gerçekleştirilen 9 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.

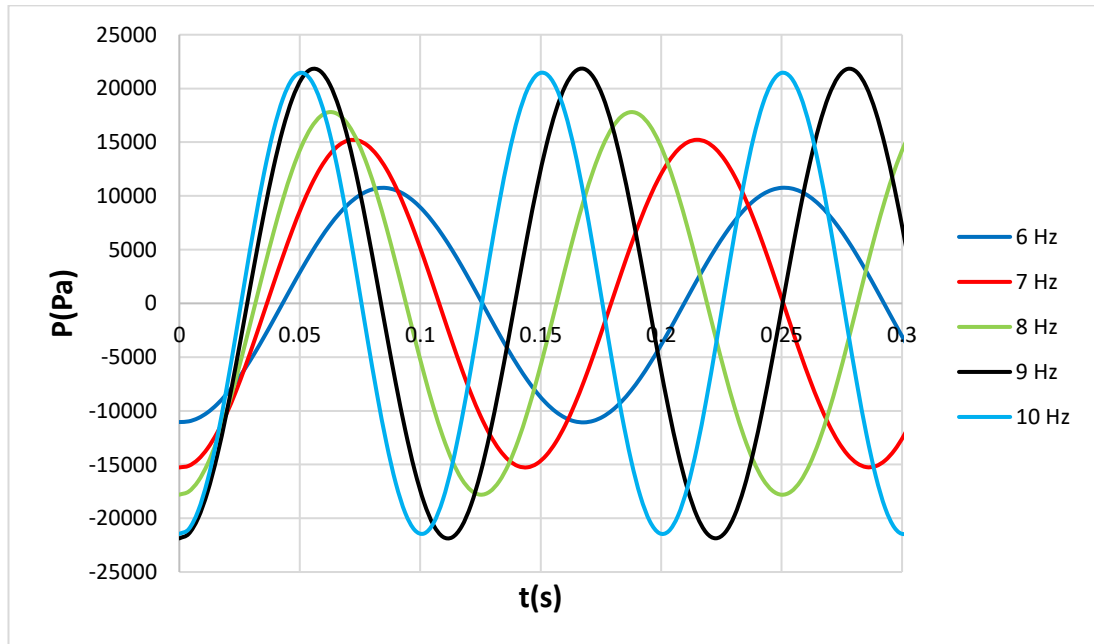
10 Hz frekansı ile gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen basınç değerleri Şekil 5.6'da görüldüğü üzere birbirine oldukça yakın değerler vermektedir. Yer değiştirmenin 1 mm artışına karşılık yaklaşık 1 kPa artış gözlenmektedir. 4 mm yer değiştirme değeri için 21.5 kPa, 5 mm yer değiştirme değeri için 22.3kPa, 6 mm yer

değiştirme değeri için ise 23.5 kPa'dır. 9 Hz frekansından daha düşük basınç değerleri elde edilmiştir. Yani, 9 Hz frekansını aştıktan sonra basınç değerleri düşüş eğilimi göstermektedir.



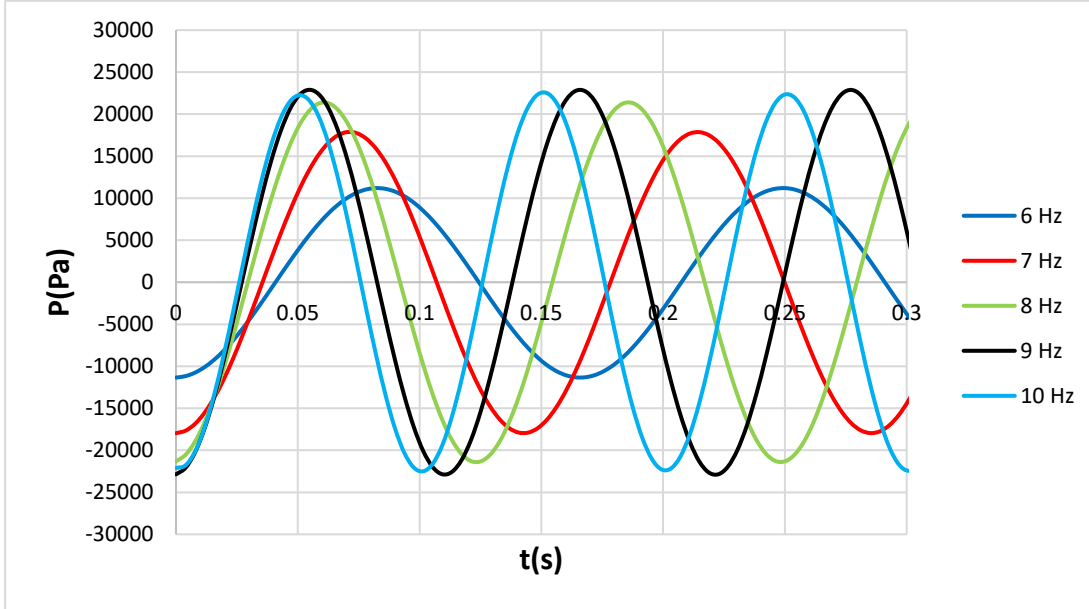
Şekil 5.6: Saf su ile gerçekleştirilen 10 Hz sabit frekans deneylerinden elde edilen basınç verileri.

4 mm sabit yer değiştirme değeri Şekil 5.7'de verilmektedir ve bu basınç verileri frekans değişimine göre incelendiğinde 9 Hz frekansına kadar frekans artışı ile birlikte basınçta artış gözlenmektedir. 10 Hz frekansında ise 9 Hz frekansı için elde edilmiş değere yakın bir sonuç elde edilmektedir fakat bu değer, 9 Hz frekansı için elde edilmiş basınç değerinden daha düşüktür.



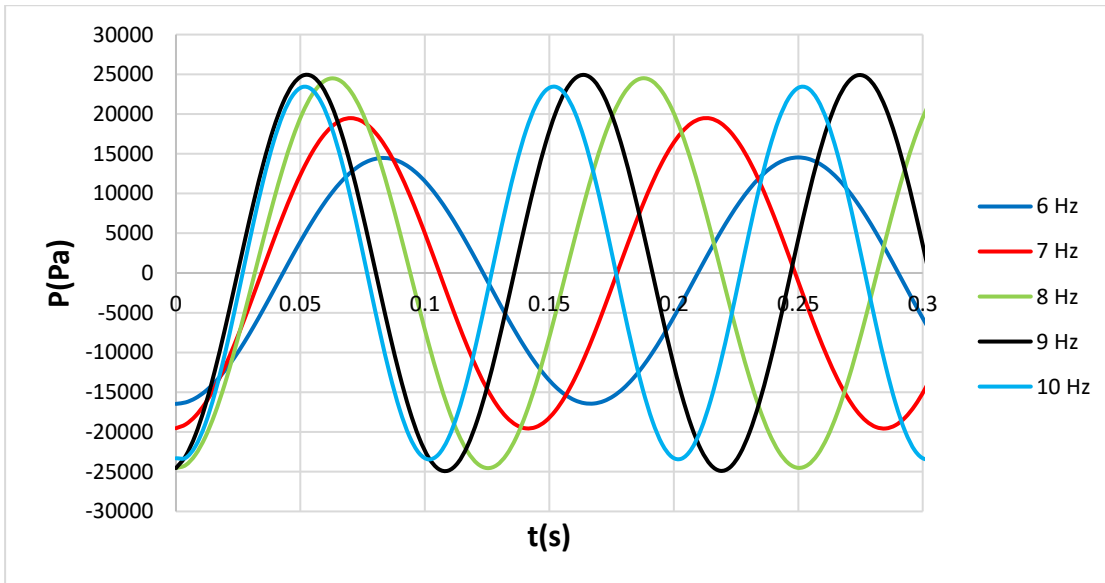
Şekil 5.7: Saf su ve  $\Delta s=4$  mm'de gerçekleştirilen deneylerde frekans değişimi ile basınç değişimi.

5 mm sabit yer değiştirme değeri için frekans değişimine göre basınç değişimi Şekil 5.8'de verilmektedir. 9 Hz frekansına kadar frekans artışı ile basınç yükselmektedir fakat bu noktadan sonra frekans artışı basınç düşüşü ile sonuçlanmaktadır.



Şekil 5.8: Saf su ve  $\Delta s=5$  mm'de gerçekleştirilen deneylerde frekans değişimi ile basınç değişimi.

6 mm yer değiştirme değerinde gerçekleştirilen deneylerin basınç sonuçları ise Şekil 5.9'da verilmektedir. 9 Hz frekansına kadar frekans artışı ile basınç değerlerinde artış gözlemlenirken, 10 Hz frekansında 9 Hz frekansına göre basınçta düşüş gözlenmektedir.

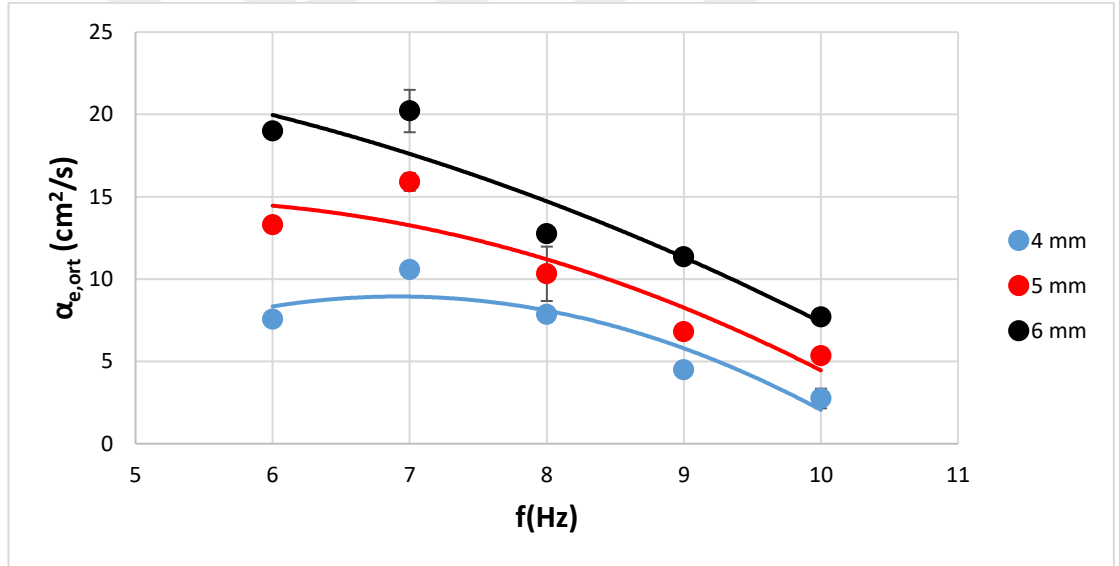


Şekil 5.9: Saf su ve  $\Delta s=6$  mm'de gerçekleştirilen deneylerde frekans değişimi ile basınç değişimi.

### 5.1.2 Etkin ısı yayılım katsayısı sonuçları

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de saf su ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen etkin ısı yayılım katsayısı verileri görünmektedir. 1. Şekilde verili yer değiştirme değerleri için, frekansa bağlı olarak etkin ısı yayılım katsayısındaki değişim gösterilirken, 2. şekilde verili frekanslar için yer değiştirmeye bağlı olarak etkin ısı yayılım katsayısındaki değişim gösterilmektedir.

Şekil 5.10’da görülebileceği üzere etkin ısı yayılım katsayıları 7 Hz’e kadar artış gösterirken, bu noktadan sonra düşüş eğilimi göstermektedir. 6 mm yer değiştirme ile yapılan deneyde 8 Hz, 9 Hz’den daha düşük sonuç vermekte, fakat bunun dışında genel eğilim 7 Hz’e kadar etkin ısı yayılım katsayısında artış, 7 Hz’ten sonra etkin ısı yayılım katsayısında düşüş şeklinde gözlenmektedir. Çizelge 5.2 bu veri noktaları için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayılarını içermektedir.

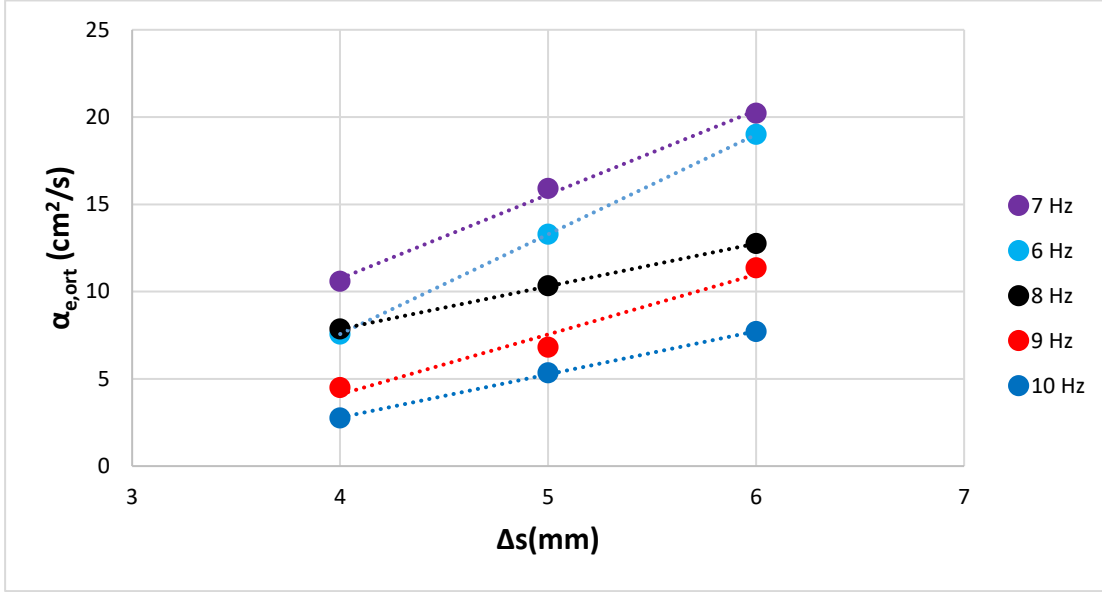


Şekil 5.10: Etkin ısı yayılım katsayısının frekansa ile değişimi.

Çizelge 5.2: Etkin ısı yayılım katsayısının frekansa göre değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayıları.

$\Delta s(\text{mm})$	Eğri denklemleri	$R^2$
4	$\alpha_{e,ort} = -0.7f^2 + 9.9f - 25.6$	0.85
5	$\alpha_{e,ort} = -0.4 f^2 + 4.4f + 3.2$	0.84
6	$\alpha_{e,ort} = -0.2 f^2 + f + 23.1$	0.89

Şekil 5.11’de her frekans için, yer değiştirme miktarının artışıyla etkin ısı yayılım katsayısının değişimi gösterilmektedir. İstisnasız olarak bütün deneyler için yer değiştirme miktarının artışı ile etkin ısı yayılım katsayısının artışı gözlemlenirken, en yüksek ısı yayılım katsayısı  $20.2 \text{ cm}^2/\text{s}$  olarak 7 Hz-6mm deneyi ile elde edilmektedir. Çizelge 5.3 bu veri noktaları için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayılarını içermektedir.



Şekil 5.11: Etkin ısı yayılım katsayısının  $\Delta s$  ile değişimi.

Çizelge 5.3: Etkin ısı yayılım katsayısının  $\Delta s$  ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

f(Hz)	Eğri denklemleri	R <sup>2</sup>
6	$\alpha_{e,ort} = 5.7f - 15.2$	1
7	$\alpha_{e,ort} = 4.8f - 8.5$	0.99
8	$\alpha_{e,ort} = 2.4f - 1.9$	1
9	$\alpha_{e,ort} = 3.4f - 9.6$	0.96
10	$\alpha_{e,ort} = 2.4f - 7.1$	0.99

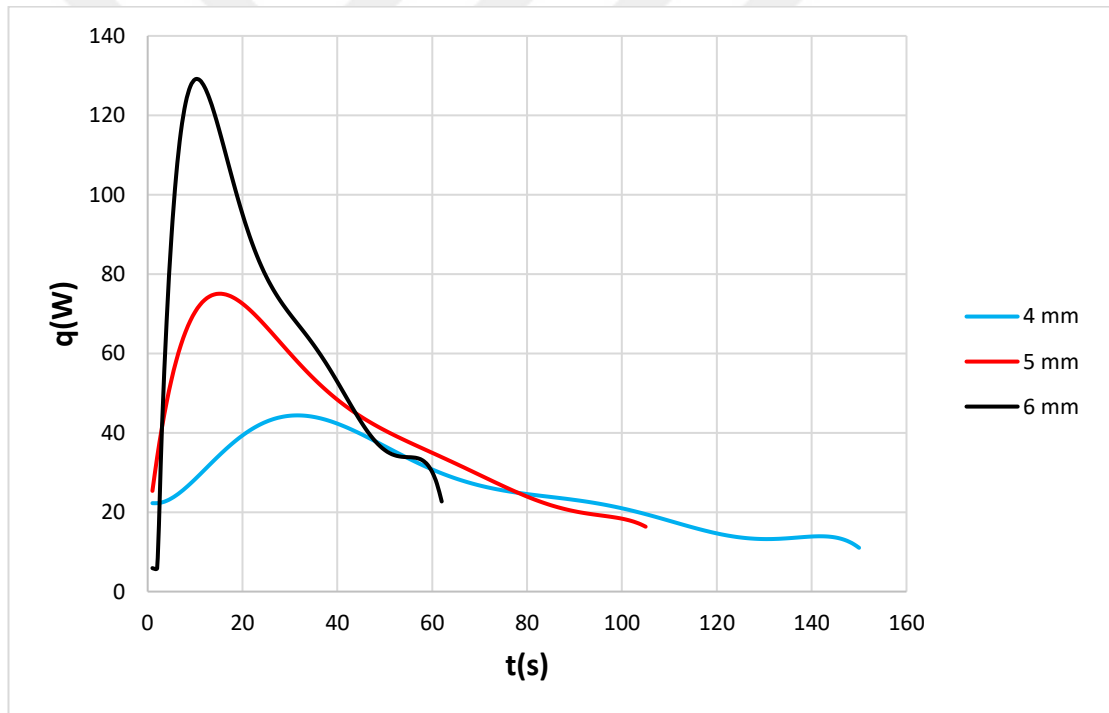
### 5.1.3 Isı transfer hızı sonuçları

Bu bölümde deneyler sonucunda elde edilen ısı transfer hızı verileri incelenmektedir. Veri depolayıcının bütün ısı çiftlerden saniyelik olarak aldığı sıcaklık verileriyle elde

edilen anlık ısı transferi verileri akış koşullarından dolayı osile bir grafik oluşturmaktadır. Görsel olarak anlamlandırması zor olan bu grafikler eğri uydurma metoduyla düzenlenmiştir.

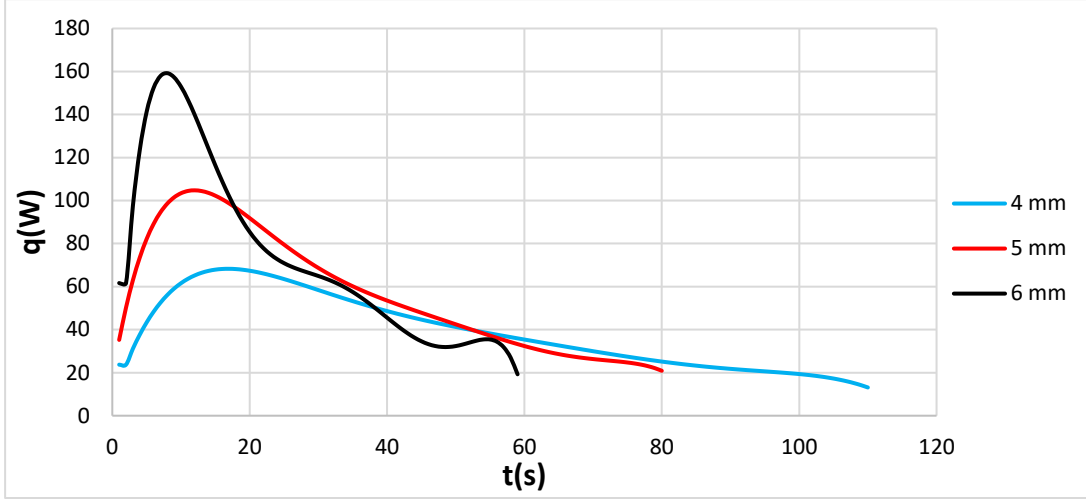
Deney süreleri  $\Delta T$  baz alınarak belirlendiği için, deneylerin süreleri eşit değildir. Bu sebepten, ısı transferinin daha hızlı gerçekleştiği deneyler daha erken sürede bitmektedir.

Şekil 5.12’de 6 Hz frekansında, farklı yer değiştirme değerleri ile gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen ısı transfer hızı grafiği görülmektedir. Yer değiştirme miktarı arttıkça  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$  anına ulaşma süresinin kısaldığı, tepe noktasının ise yükseldiği görülmektedir.  $\Delta s=4$  mm için deney süresi 150 saniye,  $\Delta s=5$  için deney süresi 110 saniye,  $\Delta s=6$  mm için ise deney süresi 62 saniyedir.



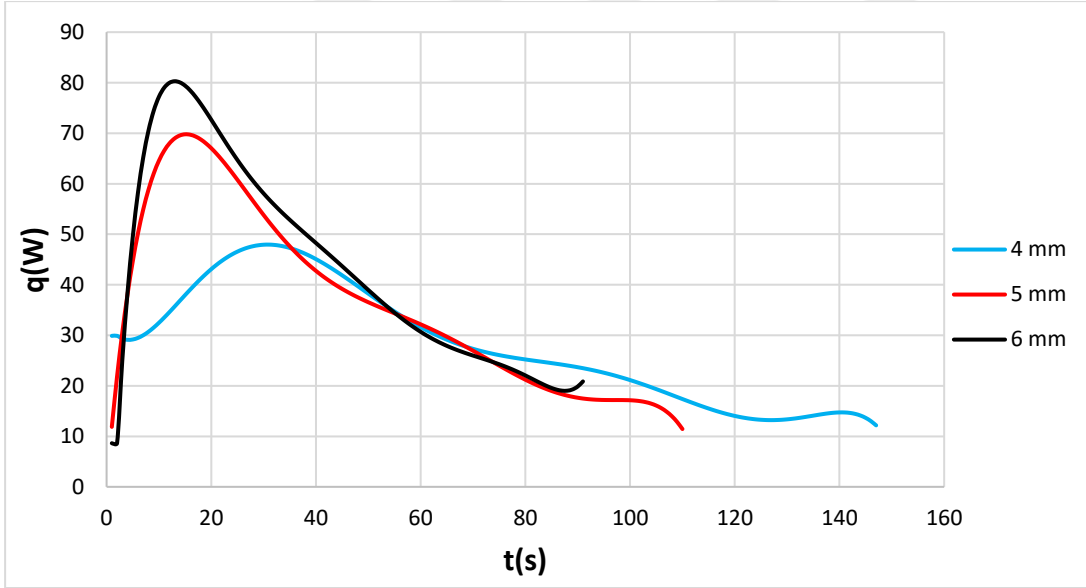
Şekil 5.12: 6 Hz frekansı için ısı transfer hızı.

Şekil 5.13’te 7 Hz frekansında, farklı yer değiştirme değerleri ile gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen ısı transfer hızı grafiği görülmektedir. Yer değiştirme miktarı arttıkça  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$  anına ulaşma süresinin kısaldığı, tepe noktasının ise anlık olarak 160 W’ya kadar yükseldiği görülmektedir.  $\Delta s=4$  mm için deney süresi 110 saniye,  $\Delta s=5$  mm için deney süresi 80 saniye,  $\Delta s=6$  mm için ise deney süresi 58 saniyedir.



Şekil 5.13: 7 Hz frekansı için ısı transfer hızı.

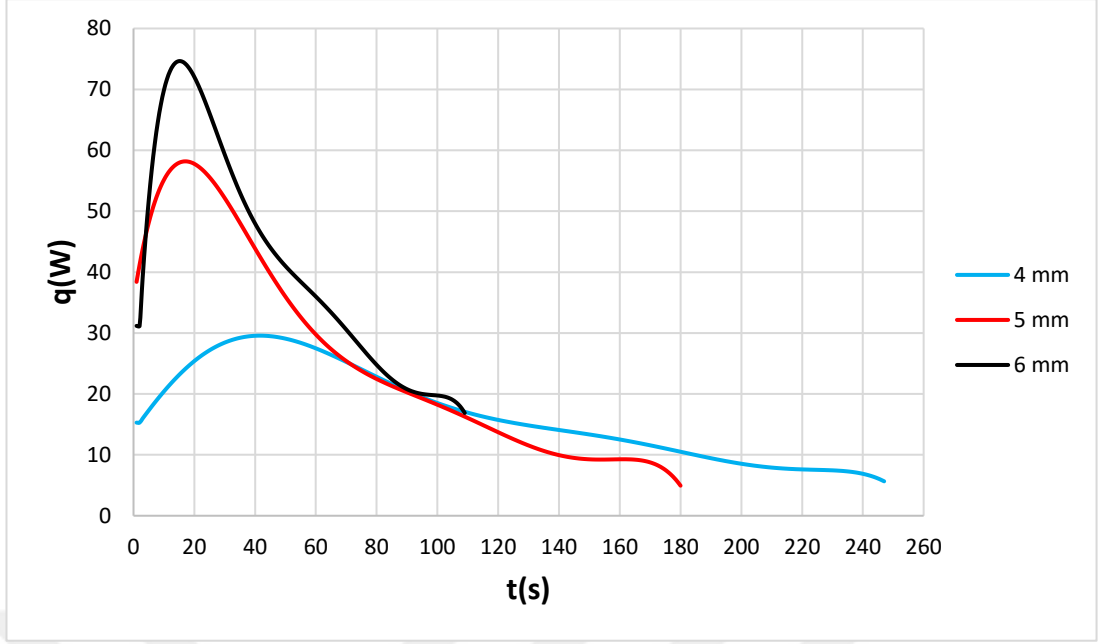
Şekil 5.14'te 8 Hz frekansında, farklı yer değiştirme değerleri ile gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen ısı transfer hızı grafiği görülmektedir. 8 Hz'den itibaren deney sürelerinin uzamaya başladığı görülmektedir.  $\Delta s=4$  mm için deney süresi 148 saniye,  $\Delta s=5$  mm için deney süresi 115 saniye,  $\Delta s=6$  mm için ise deney süresi 90 saniyedir.



Şekil 5.14: 8 Hz frekansı için ısı transfer hızı.

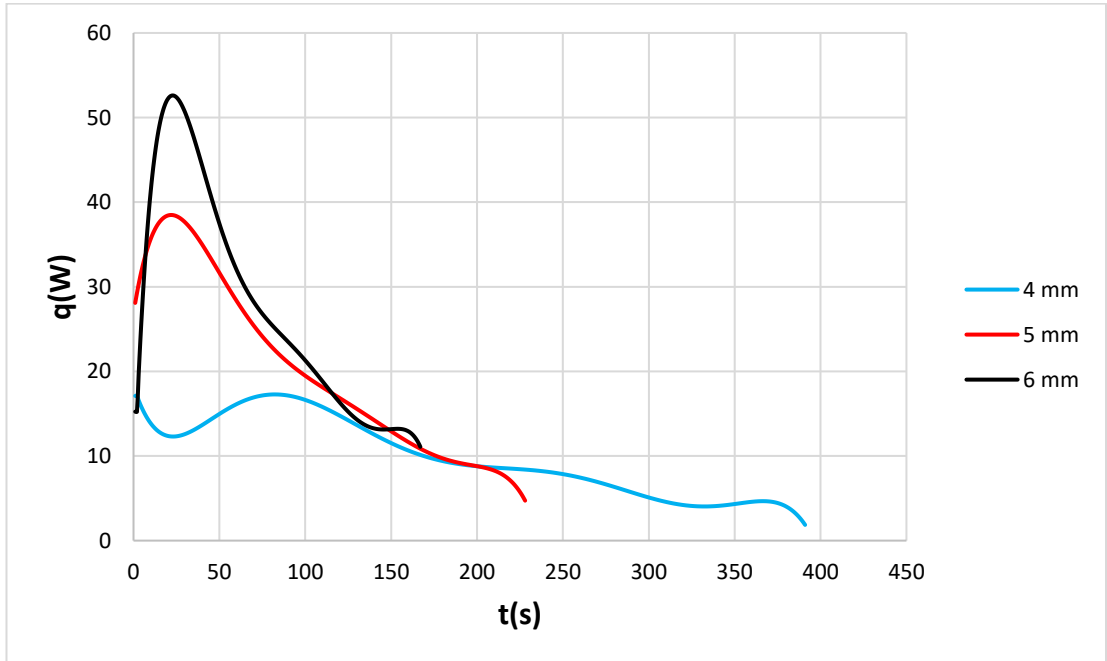
Şekil 5.15'te 9 Hz frekansında, farklı yer değiştirme değerleri ile gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen ısı transfer hızı grafiği görülmektedir. 9 Hz için deney süresinin 8 Hz'den de yüksek olduğu, maksimum tepe noktasının ise 75(W)'a kadar düştüğü görülmektedir..  $\Delta s=4$  mm için deney süresi 250 saniye,  $\Delta s=5$  mm için deney süresi 180 saniye,  $\Delta s=6$  mm için ise deney süresi 110 saniyedir.





Şekil 5.15: 9 Hz frekansı için ısı transfer hızı.

Şekil 5.16'da 10 Hz frekansında, farklı yer değiştirme değerleri ile gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen ısı transfer hızı grafiği görülmektedir. 10 Hz deneylerinde en yavaş ısı transfer hızı değerleri elde edilirken, maksimum tepe noktasının ise 53(W)'a kadar düştüğü görülmektedir..  $\Delta s=4$  mm için deney süresi 390 saniye,  $\Delta s=5$  mm için deney süresi 230 saniye,  $\Delta s=6$  mm için ise deney süresi 150 saniyedir. Özellikle 4 mm deneyi için ısı transferinin ekstrem şekilde yavaş olduğu gözlenmektedir.

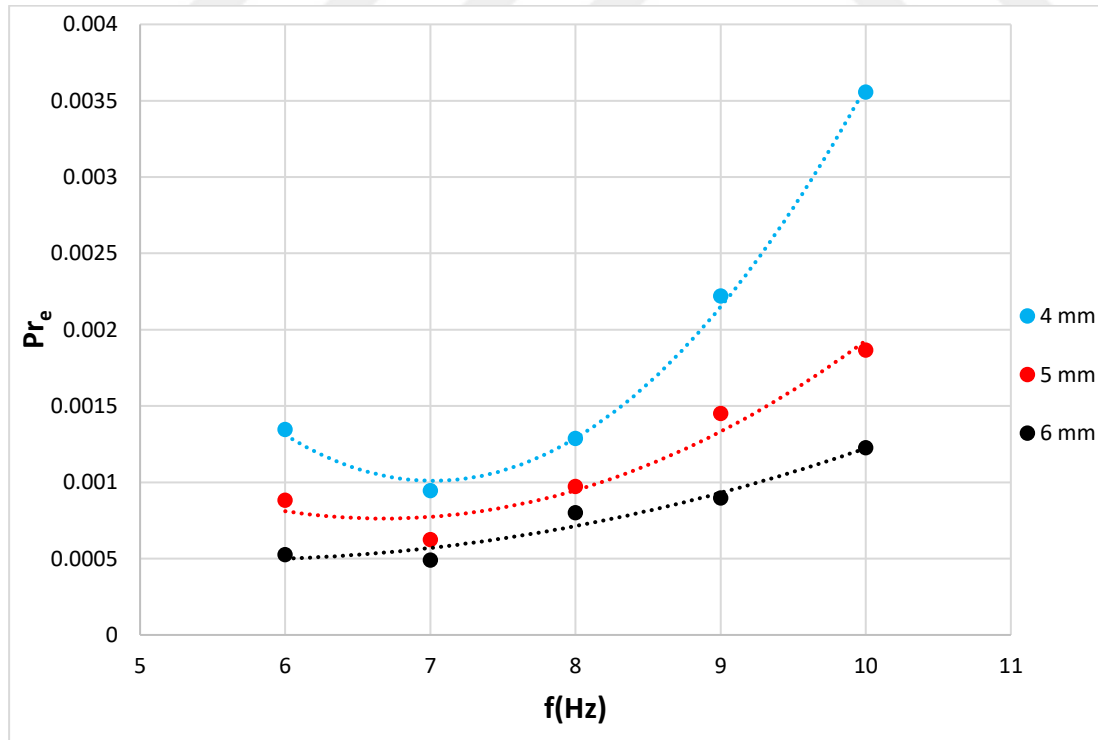


Şekil 5.16: 10 Hz frekansı için ısı transfer hızı.

#### 5.1.4 Etkin Prandtl sayısı sonuçları

Momentum yayınımları ile ısı yayınımlarının oranı olarak tanımlanan birimsiz etkin Prandtl sayısının sabit yer değiştirme değerleri için frekansa ile değişimi Şekil 5.17, yer değiştirme ile değişimi ise Şekil 5.18’de verilmektedir. Etkin Prandtl sayısının  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  mertebelerinde olduğu görülmektedir. Bütün deneyler için  $Pr_e \ll 1$  olduğu için, ısı yayınımlarının momentum yayınımlarına baskın olduğu ve akışın düzensiz bölgede olduğu, tam gelişmiş akış koşullarına ulaşamadığı görülmektedir.

Etkin Prandtl sayısı etkin ısı yayınımlarının katsayısı ile elde edildiği ve ters orantılı olduğu için, etkin ısı yayınımlarının katsayısı trendini ters orantılı olarak takip etmektedir. 10 Hz deneylerinin, aynı yer değiştirme miktarı ile yapılmış deneylerde diğer frekanslardan daha yüksek sonuç verdiği, 7 Hz deneylerinin ise aynı yer değiştirme miktarı ile yapılmış deneylerde diğer frekanslardan daha düşük sonuç verdiği görülmektedir. Maksimum etkin Prandtl sayısının 4 mm yer değiştirme ve 10 Hz deneyinde elde edildiği görülürken, minimum etkin Prandtl sayısının 6 mm yer değiştirme ve 7 Hz deneylerinde elde edildiği gözlemler arasındadır. Çizelge 5.4 bu veri noktaları için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayılarını içermektedir.

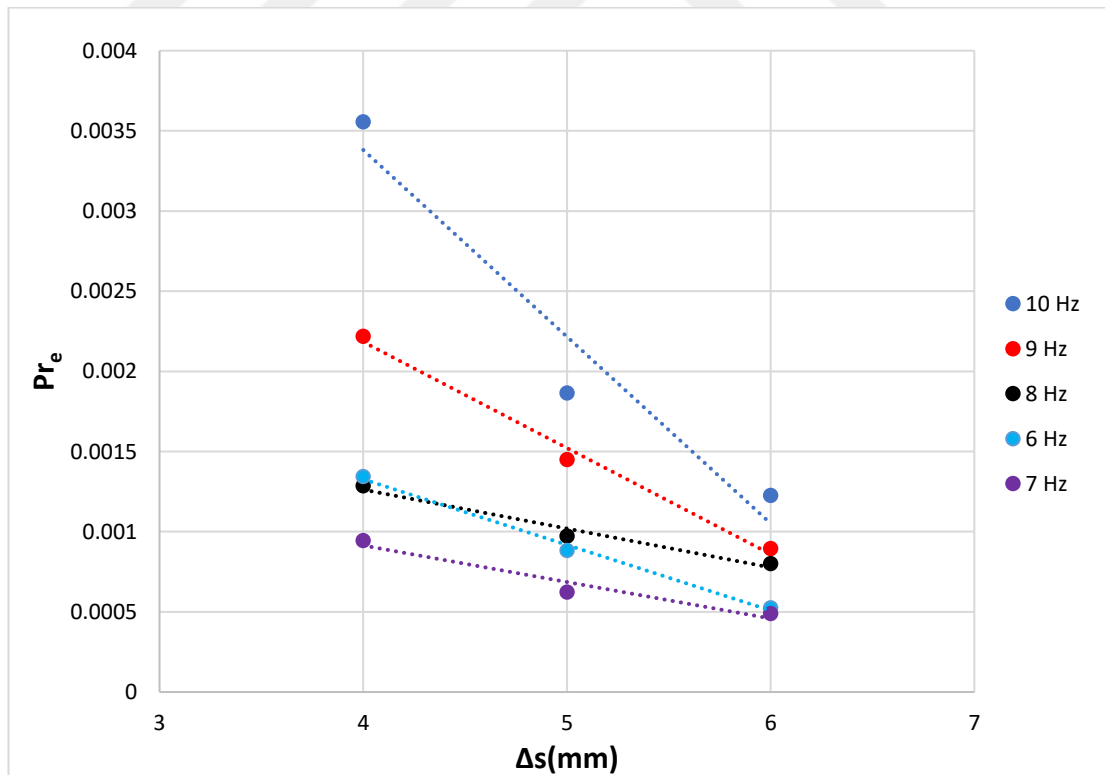


Şekil 5.17: Etkin Prandtl sayısının frekans ile değişimi.

Çizelge 5.4: Etkin Prandtl sayısının frekans ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

$\Delta s(\text{mm})$	Eğri denklemleri	$R^2$
4	$Pr_e = 0.0003f^2 - 0.004x + 0.01$	0.99
5	$Pr_e = 0.0001 f^2 - 0.001x + 0.005$	0.95
6	$Pr_e = 5E-05 f^2 - 0.0006x + 0.002$	0.96

Yer değiştirme miktarının etkin Prandtl sayısı üzerindeki etki incelendiğinde bütün frekanslar için yer değiştirme miktarı arttıkça etkin Prandtl sayısının azaldığı gözlenmektedir. Bunun sebebi yer değiştirme miktarı arttıkça etkin ısıl yayınım katsayısının artmasıdır. Çizelge 5.5 bu veri noktaları için uydurulmuş eğrilerin denklemlerini ve belirleme katsayılarını içermektedir.



Şekil 5.18: Etkin Prandtl sayısının  $\Delta s$  ile değişimi.

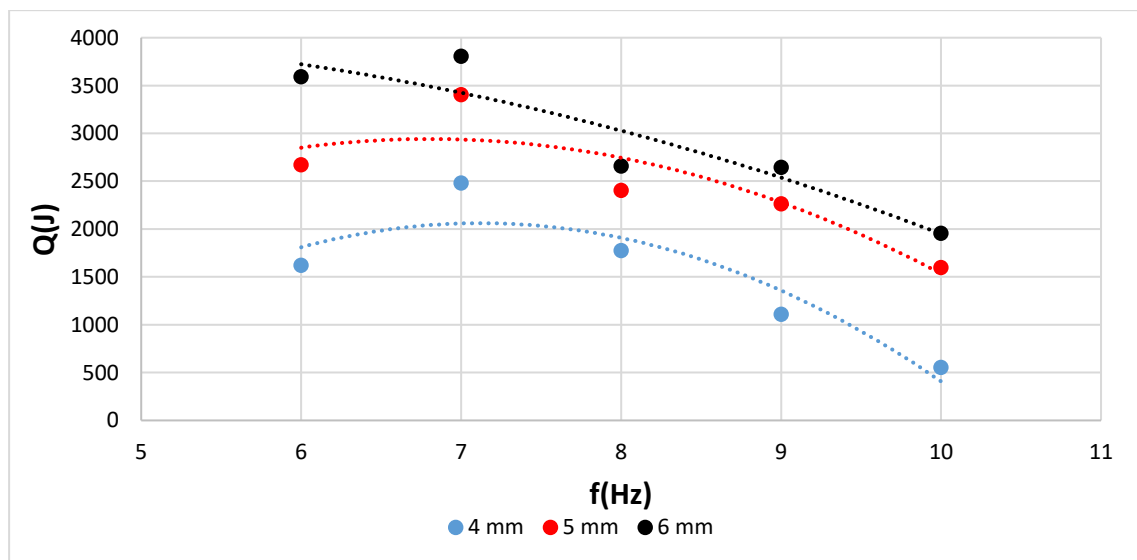
Çizelge 5.5: Etkin Prandtl sayısının  $\Delta s$  ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

f(Hz)	Eğri denklemleri	R <sup>2</sup>
6	$Pr_e = -0.0004f + 0.003$	0.99
7	$Pr_e = -0.0002f + 0.0018$	0.94
8	$Pr_e = -0.0002f + 0.002$	0.97
9	$Pr_e = -0.0007f + 0.004$	0.99
10	$Pr_e = -0.0011f + 0.007$	0.92

### 5.1.5 Toplam ısı transferi sonuçları

Toplam ısı transferi verileri, bölüm başında bahsedildiği üzere enerjinin korunumu gereği anlamlandırılmayacak sonuçlar verecek olması dolayısıyla  $\Delta T$  baz alınarak hesaplanmamış olup,  $\Delta t$  baz alınarak en hızlı ısı transferi deneyinin deney süresi olan 46 saniye boyunca gerçekleşen ısı transferinin toplamı olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.19'da bütün yer değiştirme değerleri için toplam ısı transferinin frekansla olan değişimi gösterilmektedir. 7 Hz toplam ısı transferi için de maksimum nokta olmakla birlikte yine parabolik bir değişim gözlenmektedir. Çizelge 5.6 bu veri noktaları için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayılarını içermektedir.

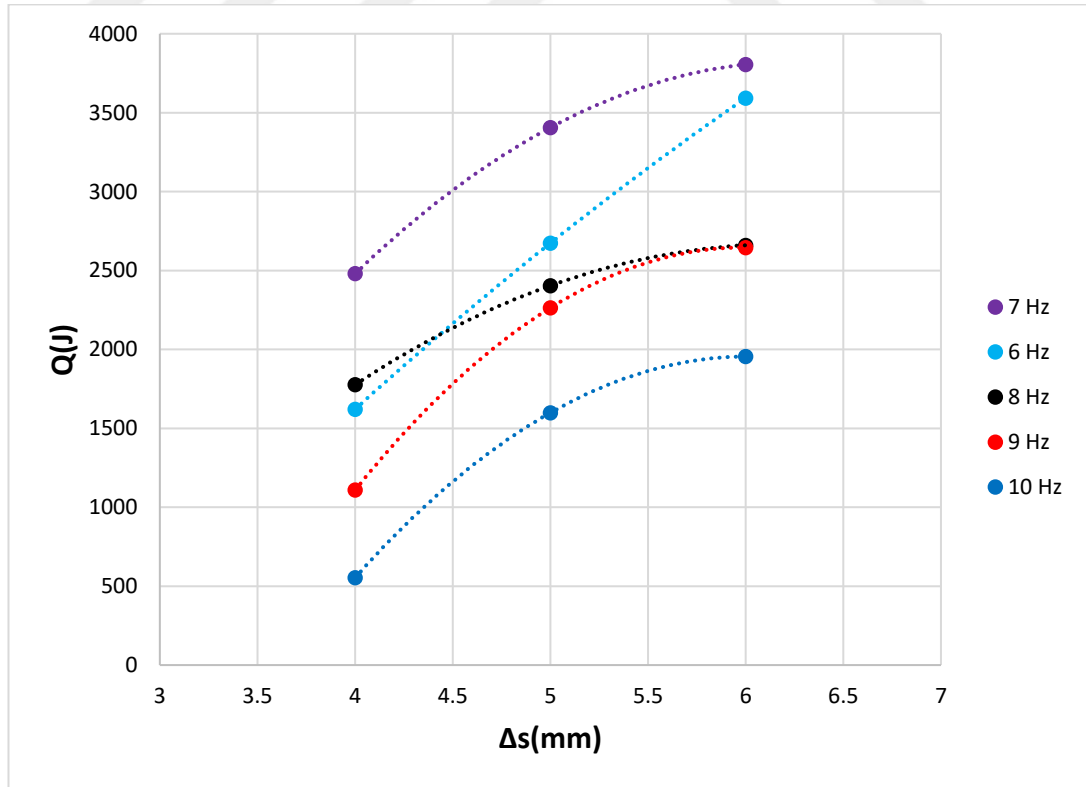


Şekil 5.19: Toplam ısı transferinin frekans ile değişimi.

Çizelge 5.6: Toplam ısı transferinin frekans ile değişimi ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

$\Delta s(\text{mm})$	Eğri denklemleri	$R^2$
4	$Q=-199.36f^2+2839.2f-8047.5$	0.85
5	$Q=-138f^2+1878.9f-345$	0.78
6	$Q=-48.198f^2+327.81f+3490.8$	0.86

Şekil 5.20’de her frekans için yer değiştirme miktarı ile toplam ısı transferinin değişimi görülmektedir. Her frekans için, yer değiştirme miktarı arttıkça toplam ısı transferinin arttığı gözlenmektedir. Bu artış 6 Hz frekansında lineer olmakla birlikte diğer frekanslarda daha parabolik olarak gerçekleşmektedir. Çizelge 5.7 bu veri noktaları için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayılarını içermektedir.



Şekil 5.20: Toplam ısı transferinin  $\Delta s$  ile değişimi.

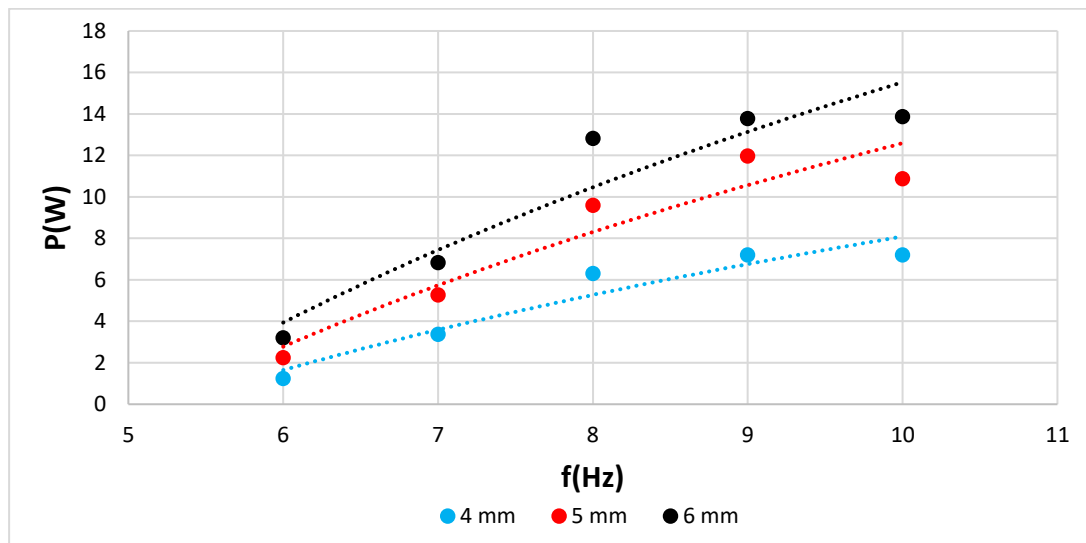
Çizelge 5.7: Toplam ısı transferinin  $\Delta s$  ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

f(Hz)	Eğri denklemleri	R <sup>2</sup>
6	$Q=-262.6f^2+3289.2x-6474.8$	1
7	$Q=-66.1 f^2+1647.6x -3910$	1
8	$Q=-185.39 f^2+2295.8x-4440.7$	1
9	$Q=-385.6 f^2+4625x-11221$	1
10	$Q=-343.7 f^2+4138.8x-10501$	1

### 5.1.6 Saf su deneylerinde güç tüketimi

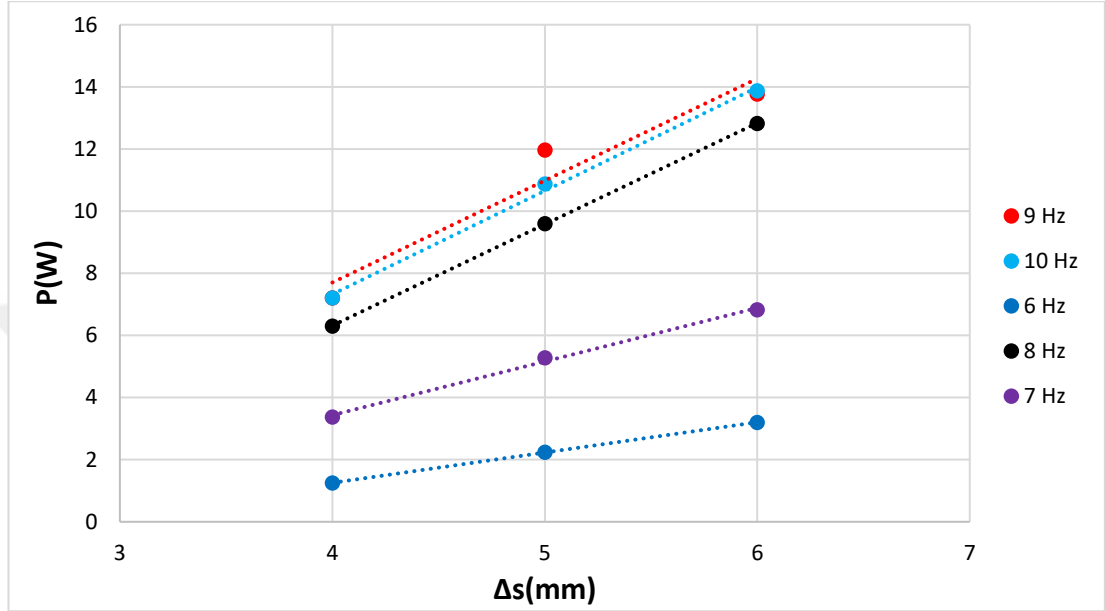
Titreşim üretici deneyler boyunca güç kaynağından aldığı güçle titreşimleri üretmektedir. Sıcak rezervuarın üstte konuşlandırılmasından dolayı doğal taşınım engellenmekte ve sisteme iş vermeden sistemden enerji elde etmek, yani ısı transferini gerçekleştirmek mümkün değildir. Dolayısıyla sistemde gerçekleşen ısı transferi harcanan güç ile gerçekleşmektedir.

Güç tüketimi verileri frekansa bağlı olarak incelendiğinde 9 Hz frekansına kadar artış gözlenmektedir. 10 Hz frekansında ise, 9 Hz frekansına oldukça yakın güç tüketimi olmasına karşın bu değer 9 Hz frekansından daha düşüktür.



Şekil 5.21: Güç tüketiminin frekans ile değişimi.

Yer değiştirme miktarının gücü tkretim üzerindeki etkisi ise, beklenildiği üzere yer değiştirme miktarı arttıkça gücü tkretiminin artması şeklinde-dir. Yer değiştirme titreşim retedecinin her periyod sonunda kat ettiği mesafeyi ifade ettiği için, yer değiştirme miktarının artması daha fazla gücü gerektirmektedir. Bu artış neredeyse lineerdir.



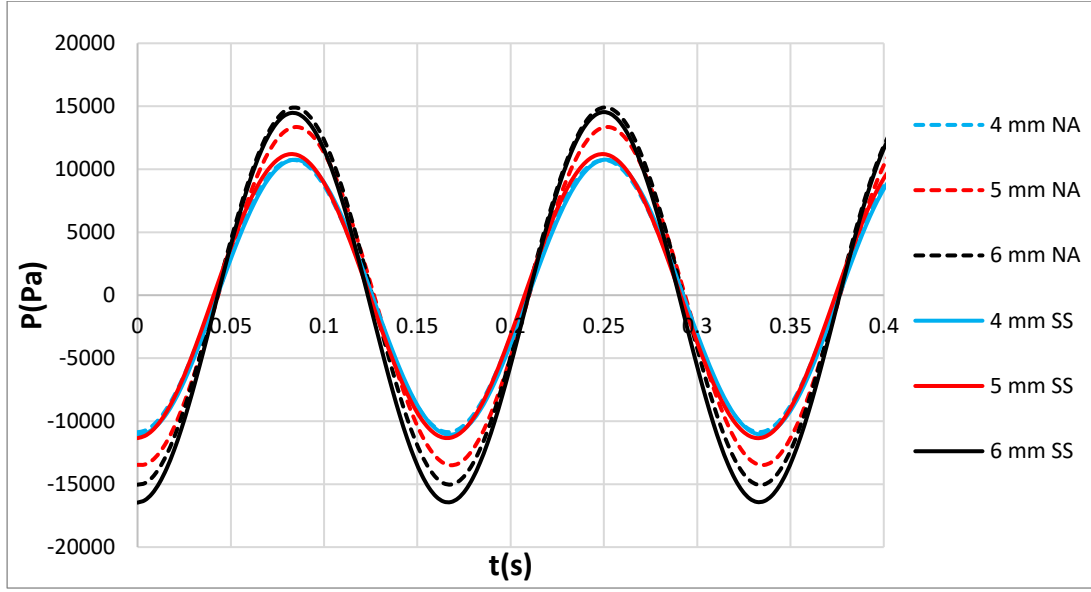
şekil 5.22: Gücü tkretiminin  $\Delta s$  ile değişimi.

## 5.2 Nanoakışkan Deneyleri

Bu bölümde tezin esas konusu olan, akışkan tipi olarak nanoakışkan kullanmanın titreşimli akış koşullarında ısı transferi üzerine etkisi saf su deneyleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Kullanılan nanoakışkan Bölüm 2.2’de açıklanan hacimce %2 saf su-CuO nanoakışkanıdır. Saf su deney sonuçlarında olduğu gibi sonuçlar beş alt başlıkta incelenmektedir.

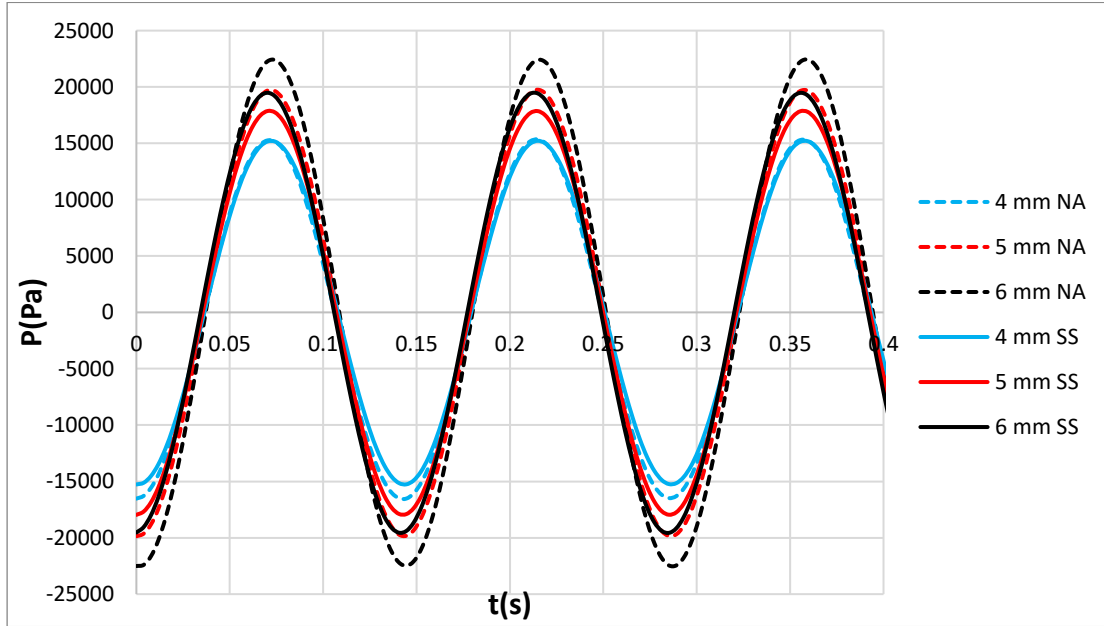
### 5.2.1 Basınç sonuçları

6 Hz sabit frekansta nanoakışkan ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen basınç sonuçları şekil 5.23’te verilmektedir saf su sonuçları ile karşılaştırılmasında, 4 ve 6 mm yer değiştirme değerleri için çok yakın değerler elde edilmektedir. Fakat, 6 mm saf su deneyinin minimum tepe noktasının mutlak değerinin maksimum tepe noktası değerinden daha yüksektir. 5 mm yer değiştirme değeri için ise nanoakışkanın basınç sonuçları saf su sonuçlarından daha yüksektir.



Şekil 5.23: 6 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değişimiyle kıyaslanması.

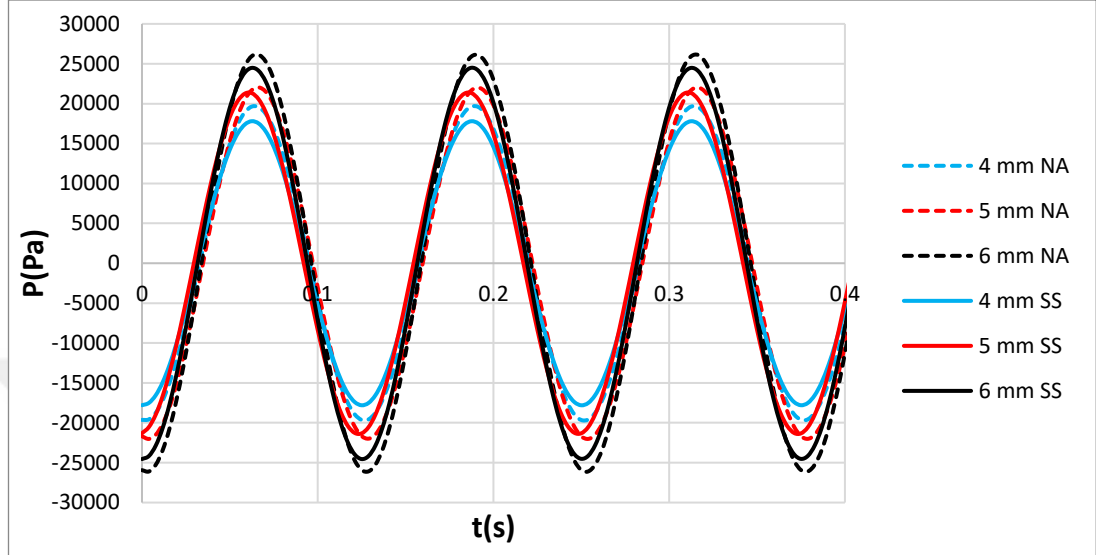
7 Hz sabit frekansı ve 4 mm yer değiştirme ile elde edilmiş basınç sonuçları Şekil 5.24'te verilmektedir. Saf su ve nanoakışkan basınç değerlerinin maksimum tepe noktaları çakışmaktadır fakat nanoakışkanla elde edilmiş minimum tepe noktası değeri saf su sonucundan daha yüksektir. 5 ve 6 mm sonuçlarında ise nanoakışkan deneylerinden elde edilmiş basınç değerleri saf su ile elde edilmiş basınç değerlerinden daha yüksektir.



Şekil 5.24: 7 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değişimiyle kıyaslanması.

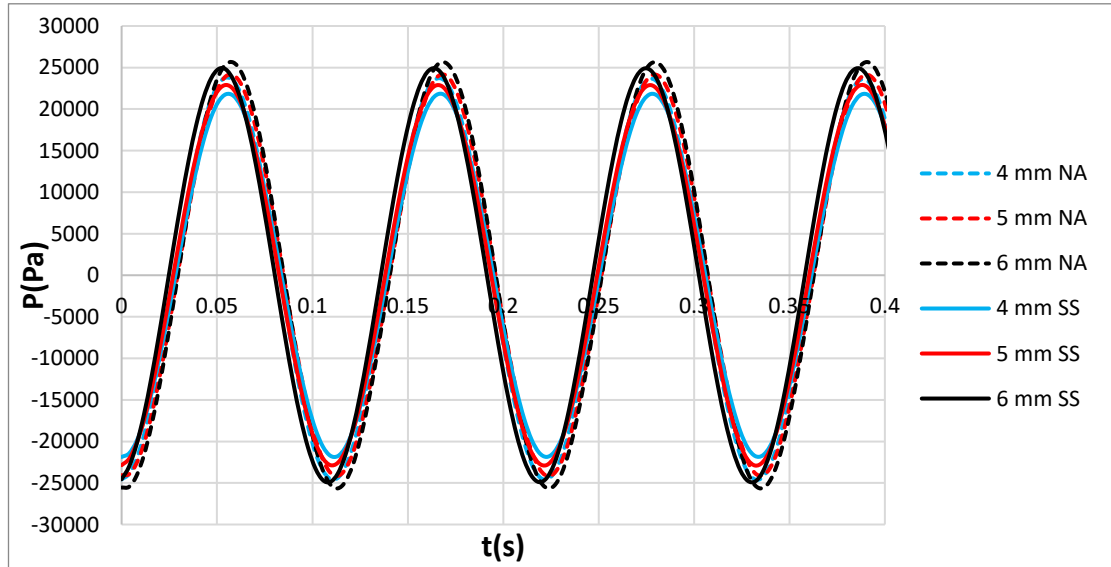


8 Hz frekansı ile gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen basınç sonuçları ise Şekil 5.25'te verilmekte ve nanoakışkan ile elde edilmiş basınç değerleri bütün yer değiştirme değerlerinde saf su deneylerinden elde edilmiş basınç değerlerinden daha yüksek olarak elde edilmektedir.



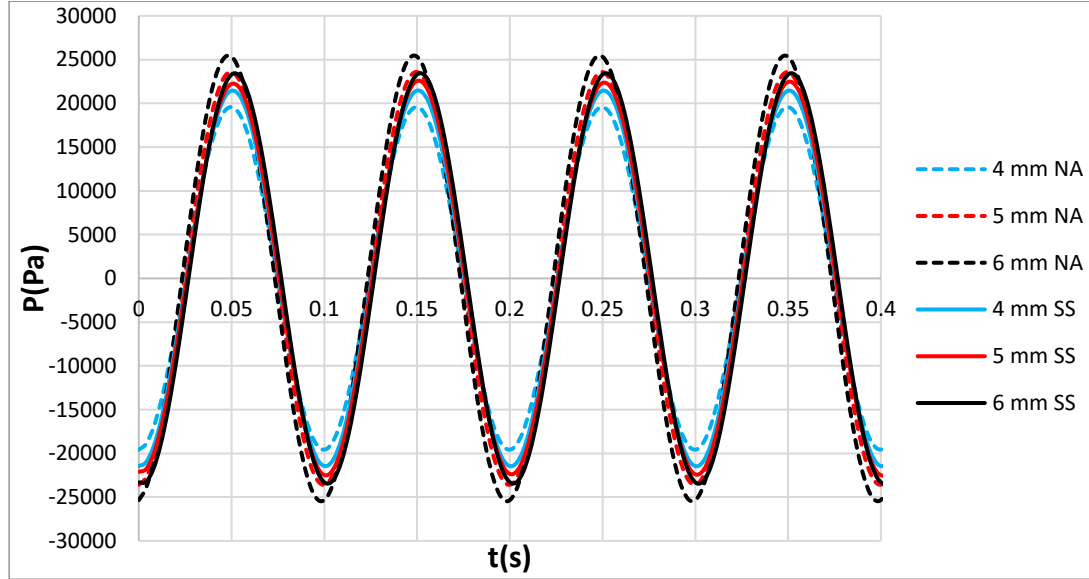
Şekil 5.25: 8 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değeriyle kıyaslanması.

9 Hz frekansı ile gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen basınç sonuçları ise Şekil 5.26'da verilmektedir. Nanoakışkan ile elde edilmiş basınç değerleri bütün yer değiştirme değerlerinde saf su deneylerinden elde edilmiş basınç değerlerinden daha yüksektir.



Şekil 5.26: 9 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değeriyle kıyaslanması.

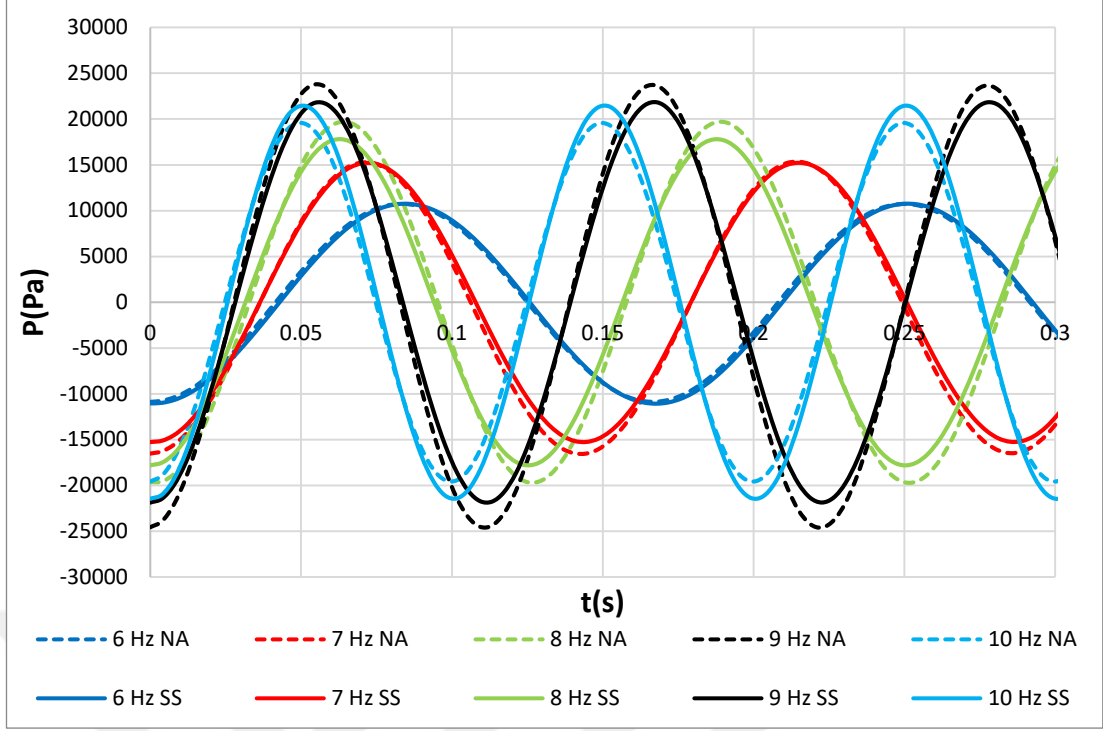
10 Hz frekansında gerçekleştirilmiş nanoakışkan deneylerinden elde edilen basınç verileri şekil 5.27’de görünmektedir. 4 mm yer değiştirme değerinde saf su ile elde edilmiş basınç değerleri nanoakışkan sonucuna göre daha yüksek çıkmaktadır. 5-6 mm yer değiştirme değerlerinden elde edilen sonuçlarda ise nanoakışkan ile elde edilmiş basınç değerleri daha yüksektir.



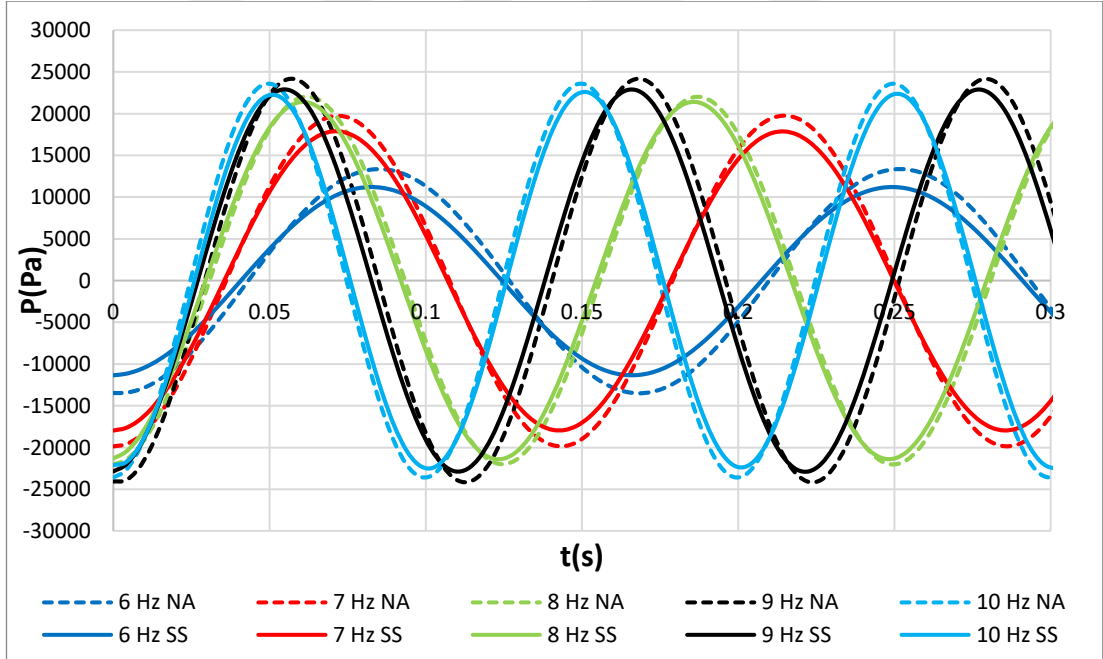
Şekil 5.27: 10 Hz sabit frekansta nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin yer değiştirme değeriyle kıyaslanması.

4 mm sabit yer değiştirme değeri için frekans değişimine göre nanoakışkan ve saf su basınç verilerinin karşılaştırılmasında ise Şekil 5.28’de görüldüğü üzere saf su sonuçlarında olduğu gibi 9 Hz frekansına kadar frekans artışıyla birlikte basınç değerlerinde artış gözlenmektedir. 9 Hz frekansı aşıldıktan sonra ise basınç değerleri düşüş eğilimi göstermektedir. 6 Hz frekansı için nanoakışkan ve saf su basınç değerleri örtüşmekte ve fark gözlenmemektedir. 7 Hz frekansı için maksimum tepe noktaları çakışmakta fakat minimum tepe noktasında nanoakışkan ile elde edilmiş basınç değeri daha düşük çıkmaktadır. 8 Hz ve 9 Hz frekansları için nanoakışkan kullanımı basınç değerlerinde artışa sebep olmakta, 10 Hz frekansı için ise nanoakışkan kullanımı basınç değerini düşürmektedir.

5 mm sabit yer değiştirme değeri için frekans değişimine göre nanoakışkan ve saf su basınç verilerinin karşılaştırılmasında da Şekil 5.29’da görülmektedir. 9 Hz frekansına kadar frekans artışıyla birlikte basınç değerlerinde artış gözlenmektedir. Bütün frekanslar için nanoakışkan kullanımı basınç değerlerini arttırmaktadır.



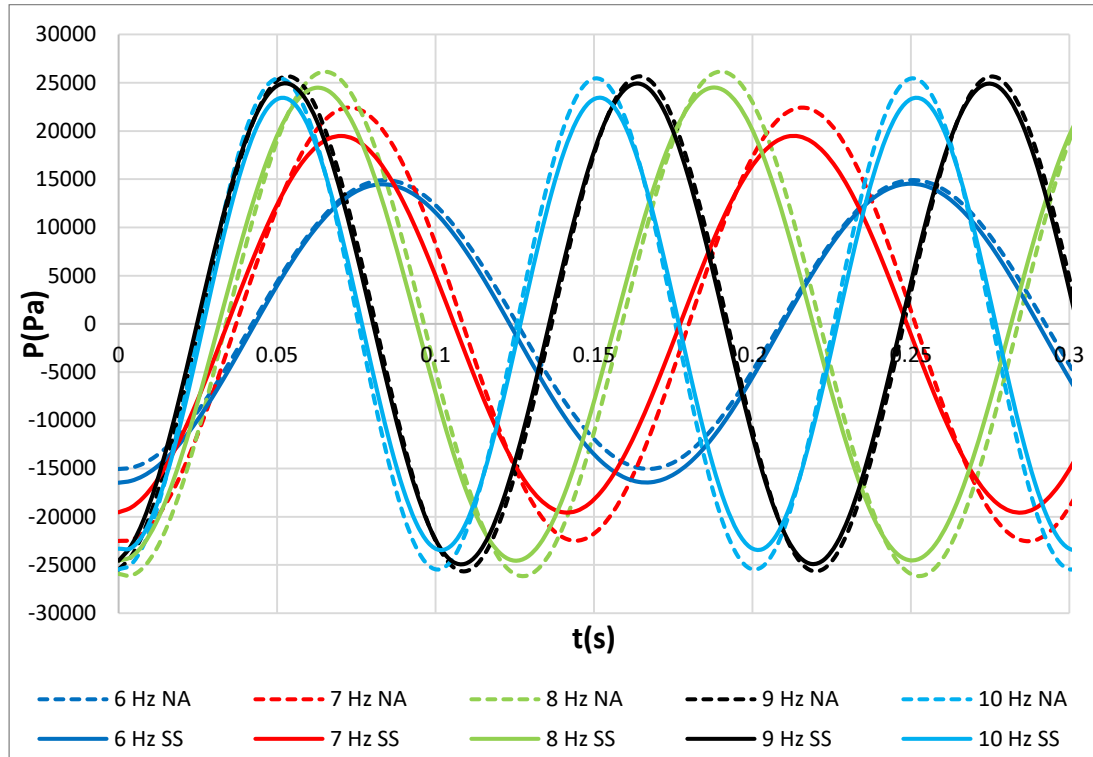
Şekil 5.28:  $\Delta s=4$  mm için frekans değişimi ile nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin kıyaslanması.



Şekil 5.29:  $\Delta s=5$  mm için frekans değişimi ile nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin kıyaslanması.

6 mm sabit yer değiştirme değeri için de nanoakışkan kullanımı bütün frekanslar için basınç sonuçlarını Şekil 5.30'da görüldüğü üzere arttırmaktadır. 8 Hz frekansı için bir faz farkı göze çarpmaktadır. Basınç verilerinin 0.004 saniyelik kesitlerle

kaydedilmesinden ve incelenen zaman diliminin 0.3 saniye olmasından dolayı bu tarz faz kaymaları yaşanabilmektedir.



Şekil 5.30:  $\Delta s=6$  mm için frekans değişimi ile nanoakışkan ve saf su basınç değerlerinin kıyaslanması.

### 5.2.2 Womersley sayısı

Womersley sayısı frekans ile doğru, akışkanın viskozitesi ile ters orantılı olarak değişen, titreşimli sistemlerde akış koşullarını belirten bir sayıdır ve yer değiştirme miktarından etkilenmemektedir. Bu sebepten toplamda 10 farklı Womersley sayısı elde edilmiştir. Frekans ile doğru orantılı olmasından dolayı, frekans arttıkça arttıkça Womersley sayısı artmaktadır. Nanoakışkan için elde edilen Womersley sayıları ise akışkanın viskozitesinin saf suya nazaran yüksek olması dolayısıyla, ters orantılı olmasının getirisi olarak saf sudan daha düşük sonuç vermektedir. Womersley sayısının 1 civarında olması akış profilinin paraboligimsi olduğu anlamı taşırken, 100 mertebesine çıkması akışı iki bölgeye ayıracak seviyede atalet kuvvetlere sebep olmaktadır[36]. Çizelge 5.8’de elde edilmiş Womersley sayıları verilmektedir ve gerçekleştirilen deney koşullarında Womersley sayısının 10 civarında olduğu gözlenmektedir. Bu sonuç ise kılcal boruların sınır bölgelerinde slug akışın meydana geldiğini belirtmektedir.

Çizelge 5.8: Akışkan ve frekansa bağlı Womersley sayıları.

	Womersley Sayısı	
	Saf Su	Nanoakışkan
6 Hz	9.2	8.8
7 Hz	9.9	9.5
8 Hz	10.8	10.4
9 Hz	11.2	10.8
10 Hz	11.8	11.4

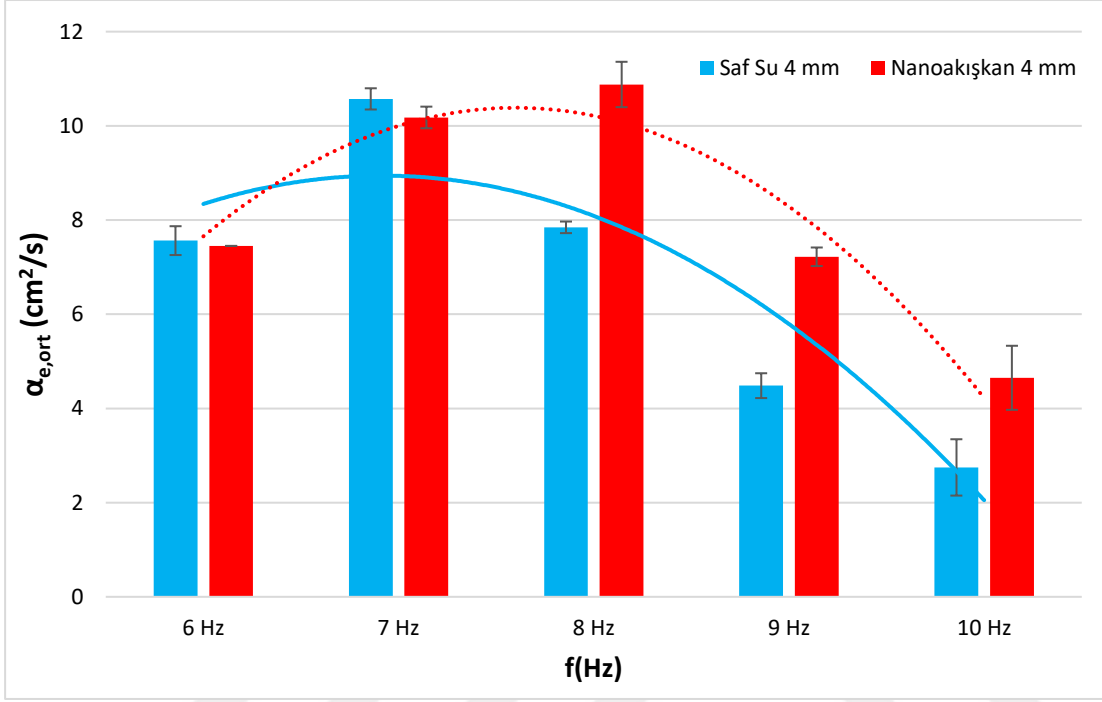
### 5.2.3 Etkin ısı yayılım katsayısı sonuçları

Nanoakışkan kullanımının etkin ısı yayılım katsayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde, Şekil 5.31’de görüldüğü üzere 4 mm yer değiştirme için etkin ısı yayılım katsayısının 6 Hz ve 7 Hz civarında düşük bir miktar da olsa düştüğü gözlenmektedir. 8 Hz, 9 Hz ve 10 Hz frekansları için ise etkin ısı yayılım katsayısı artmaktadır.

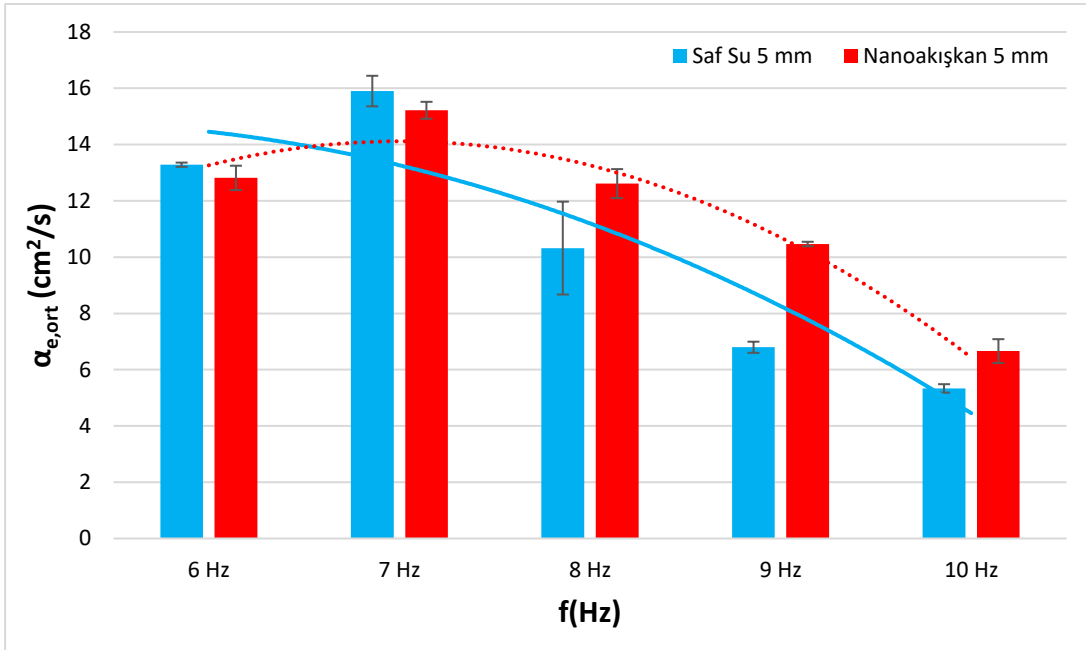
5 mm yer değiştirme için etkin ısı yayılım katsayısının değişimi incelendiğinde Şekil 5.32’de görüldüğü üzere 4 mm deneylerinde olduğu gibi 6 Hz ve 7 Hz deneylerinde etkin ısı yayılım katsayısının düştüğü, 8 Hz, 9 Hz ve 10 Hz deneyleri için ise etkin ısı yayılım katsayısının arttığı gözlenmektedir.

6 mm yer değiştirme değeri için etkin ısı yayılım katsayısı incelendiğinde ise Şekil 5.33’de görüldüğü üzere 6 Hz frekansında nanoakışkanın etkin ısı yayılım katsayısının saf su sonucuna göre ondalık düzeyde daha düşük olduğu, 7 Hz frekansında ise dikkate değer bir artış olduğu gözlenmektedir. Yer değiştirmenin artmasıyla birlikte 6 Hz frekansındaki farkın da azaldığı göz önüne alınarak yer değiştirme miktarının artışının nanoakışkan deneylerinde etkin ısı yayılım katsayısının daha fazla arttığı buradan çıkarılabilecek bir sonuçtur. 8 Hz, 9 Hz ve 10

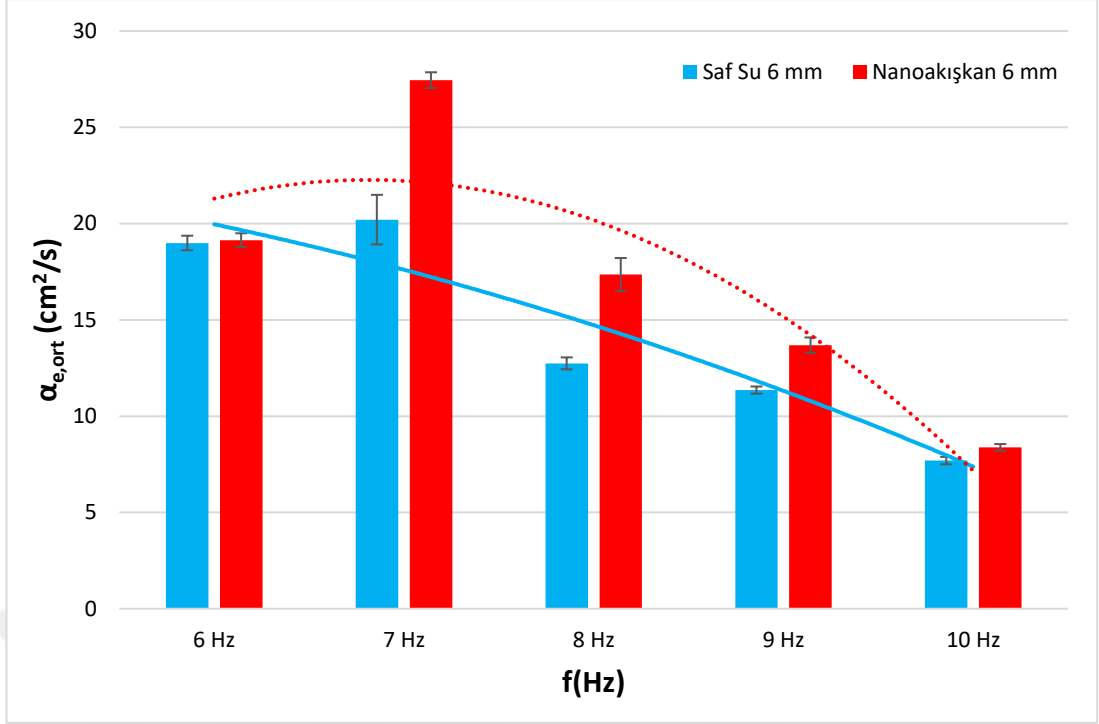
Hz deneylerinde ise etkin ısıl yayılım katsayısı diğer yer değiştirme değerlerinde olduğu gibi nanoakışkan deneylerinde daha yüksek çıkmaktadır. Şekil 5.31, 5.32, 5.33 için uyruan eğrilerin denklem ve belirleme katsayıları ise Çizelge 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.31: Etkin ısıl yayılım katsayısının  $\Delta s=4$  mm için frekansa ve akışkana bağlı değişimi.



Şekil 5.32: Etkin ısıl yayılım katsayısının  $\Delta s=5$  mm için frekansa ve akışkana bağlı değişimi.

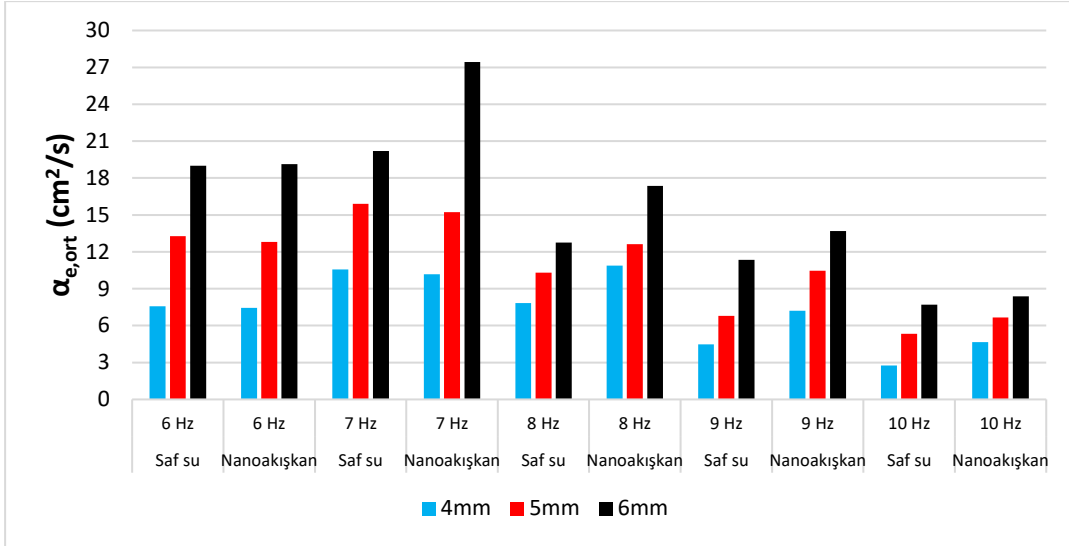


Şekil 5.33: Etkin ısı yayılım katsayısının  $\Delta s=6$  mm için frekansa ve akışkana bağlı değişimi.

Çizelge 5.9: Nanoakışkan ile elde edilmiş etkin ısı yayılım katsayılarının frekansa bağlı değişimi grafikleri için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

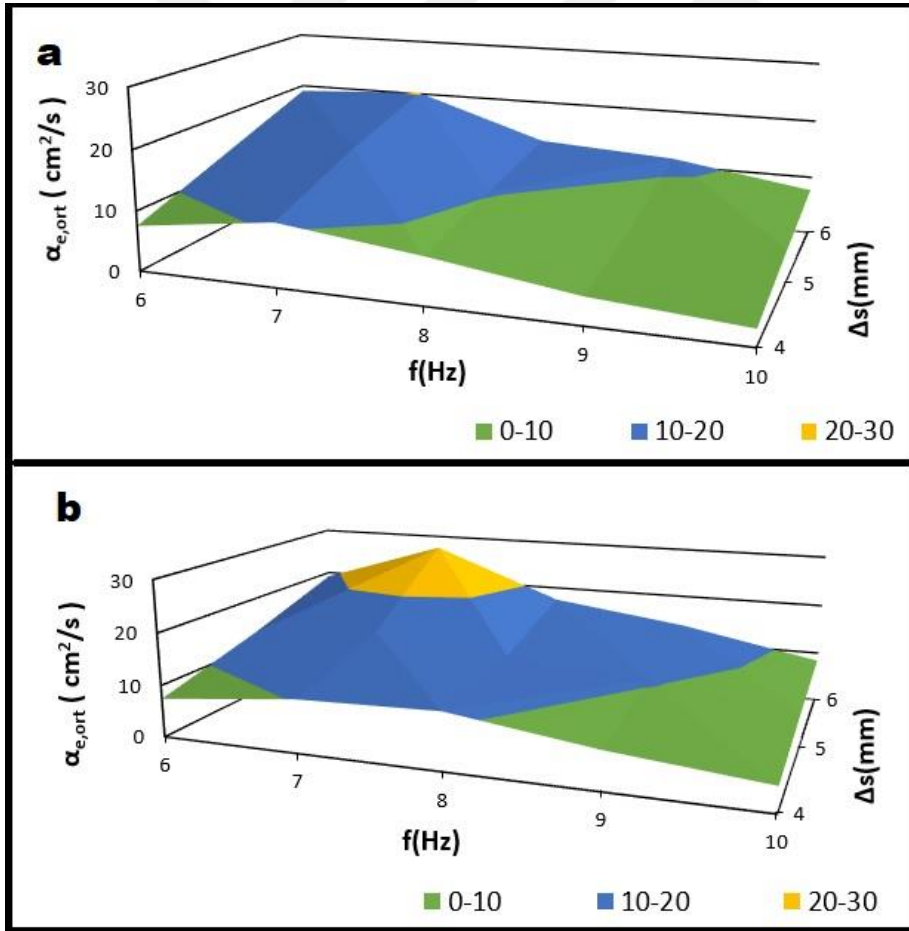
$\Delta s(\text{mm})$	Eğri denklemleri	$R^2$
4	$\alpha_{e,ort} = -1.f^2 + 5.5f + 3.1$	0.92
5	$\alpha_{e,ort} = -0.85f^2 + 3.41f + 10.7$	0.95
6	$\alpha_{e,ort} = -1.48f^2 + 5.38f + 17.39$	0.78

Şekil 5.34'te ise bütün frekanslar için yer değiştirme ve akışkan tipine göre etkin ısı yayılım katsayısının değişimi görülmektedir. Bütün frekans ve akışkan tipleri için, yer değiştirme miktarının artışıyla birlikte etkin ısı yayılım katsayısı artış göstermektedir.



Şekil 5.34: Etkin ısı yayılım katsayısının her frekans için akışkan ve yer değiştirmeye bağlı değişimi.

Şekil 5.35'te etkin ısı yayılım katsayısı sonuçları kullanılan her iki akışkan için bütün frekans ve yer değiştirme değerlerinde üç boyutlu yüzey olarak sunulmaktadır.



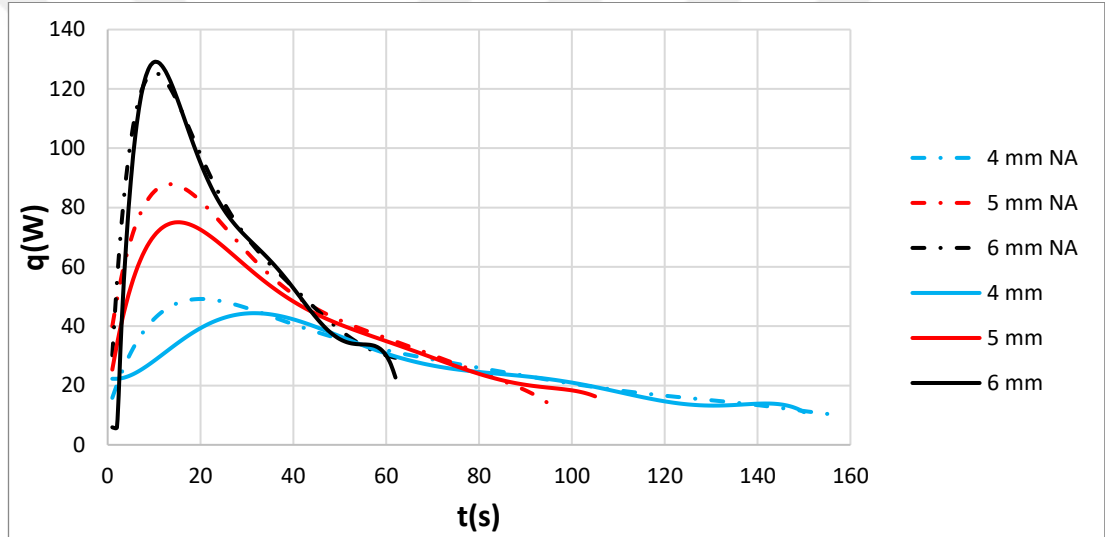
Şekil 5.35: Etkin ısı yayılım katsayısının bütün frekans ve yer değiştirme değerlerinde a) saf su ve b) nanoakışkan için üç boyutlu gösterimi.



#### 5.2.4 Isı transfer hızı sonuçları

Isı transfer hızı verilerinin karşılaştırılması sırasında genel olarak, nanoakışkan grafiklerinin tepe noktalarının daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Bu durum, ısı transferinin nanoakışkanlarda daha yavaş gerçekleştiği deneyler için de geçerlidir. Bu durum, toplam ısı transferi bölümünde karşılaşılabilecek olan sonuçlarda daha detaylı olarak açıklanacaktır.

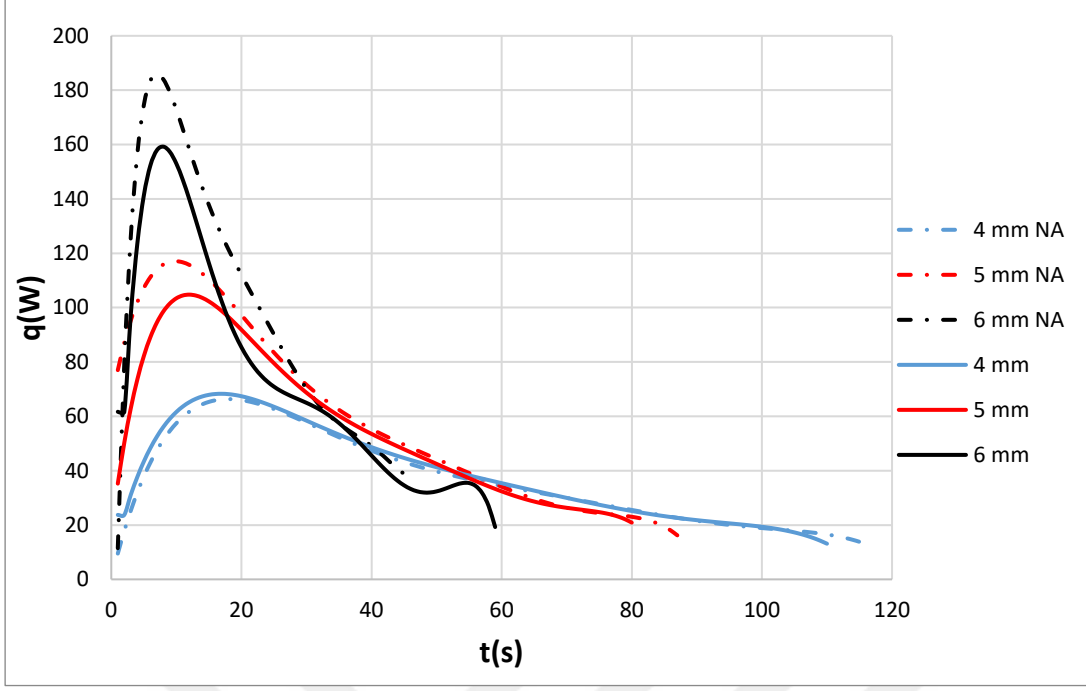
Şekil 5.36'da 6 Hz frekansı için 4 mm deneyinde nanoakışkan deneyinin saf su deneyinden daha uzun sürdüğü görülmektedir. Buna rağmen nanoakışkan deneyinin tepe noktası daha yüksektir. 5 mm deneyi için deney süresi nanoakışkan için daha kısa, 6 mm deneyi için deney süreleri neredeyse eşit çıkmaktadır.



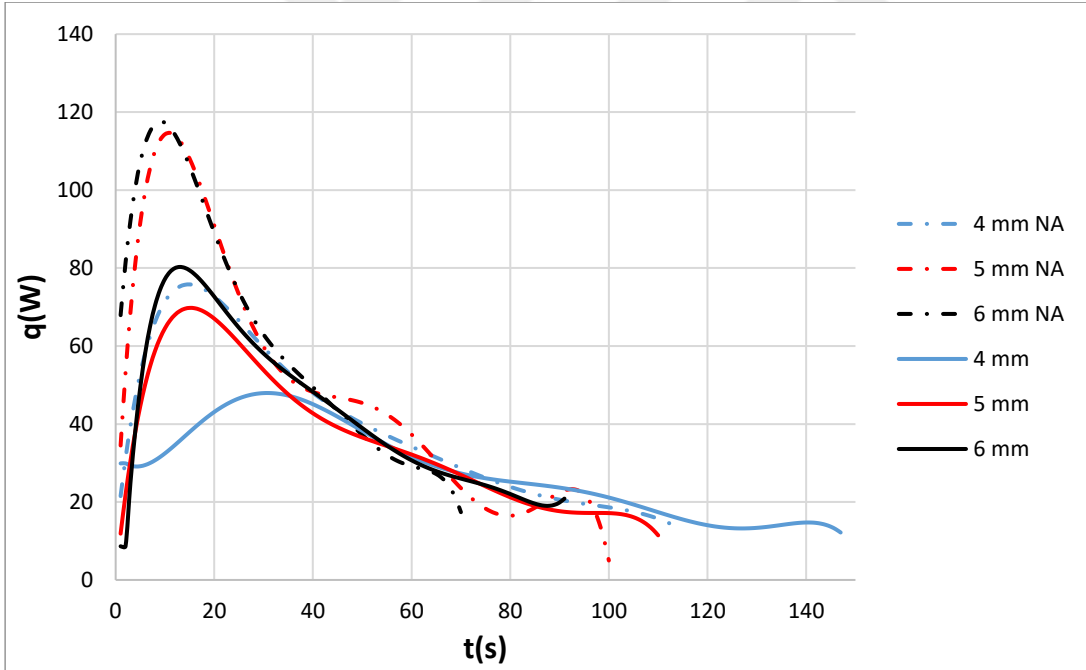
Şekil 5.36: Isı transfer hızının 6 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi.

Şekil 5.37'de görülmekte olan 7 Hz frekansı için 4 mm deneyi daha uzun sürede tamamlanmaktadır ve tepe noktası daha düşük çıkmaktadır. Bu bağlamda bu deneyde nanoakışkanın negatif etki gösterdiği söylenebilmektedir. 5 mm deneyi için deney süresinin daha kısa olduğu fakat tepe noktasının daha yüksek olduğu görülmektedir. 6 mm deneyi için ise deney süresi daha kısa ve tepe noktası oldukça daha yüksektir.

Şekil 5.38'de görünmekte olan 8 Hz deneylerinde bütün yer değiştirme değerleri için nanoakışkan deneyleri daha kısa sürede tamamlanmaktadır ve tepe noktaları saf su deneylerinden daha yüksektir. 8 Hz deneyleri için, bütün noktalarda nanoakışkanın ısı transfer hızı üzerine pozitif etkisi olduğu söylenebilmektedir.

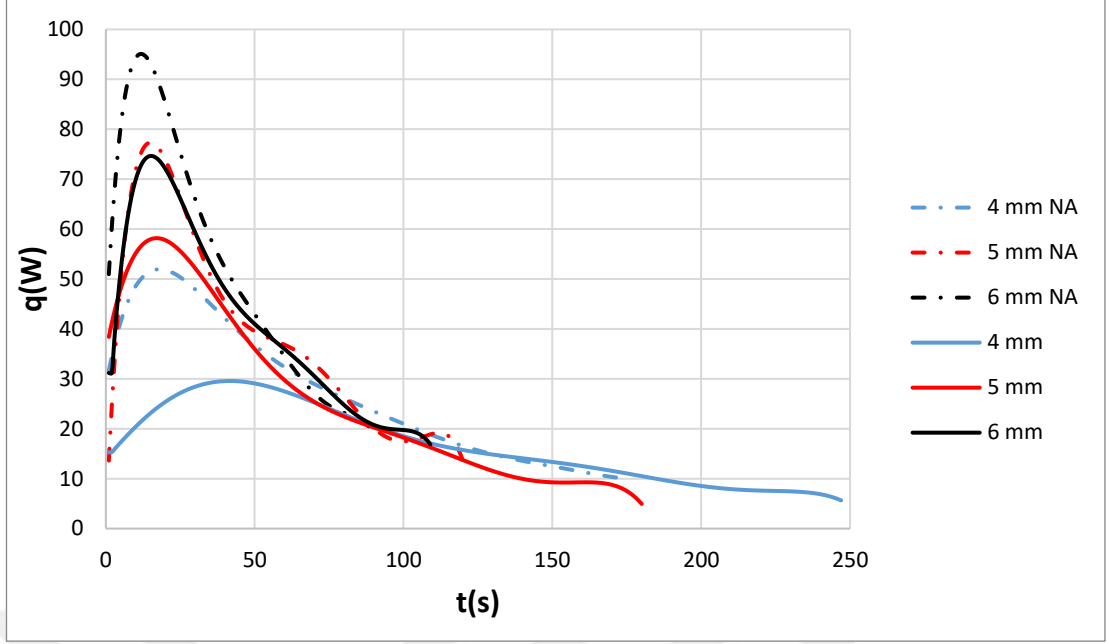


Şekil 5.37: Isı transfer hızının 7 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi.



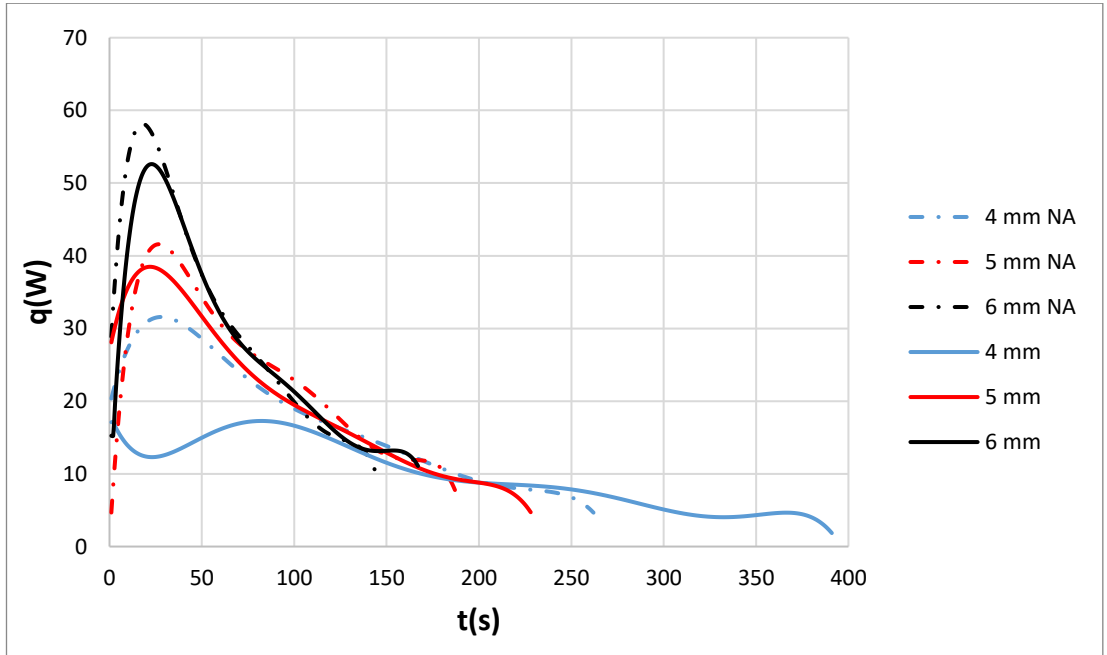
Şekil 5.38: Isı transfer hızının 8 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi.

Şekil 5.39'da görülmekte olan 9 Hz deneyleri için de bütün yer değiştirme değerleri için nanoakışkan ile gerçekleştirilmiş deneyler deney süresi kısalmaktadır ve grafiklerin tepe noktaları yükselmektedir.



Şekil 5.39: Isı transfer hızının 9 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi.

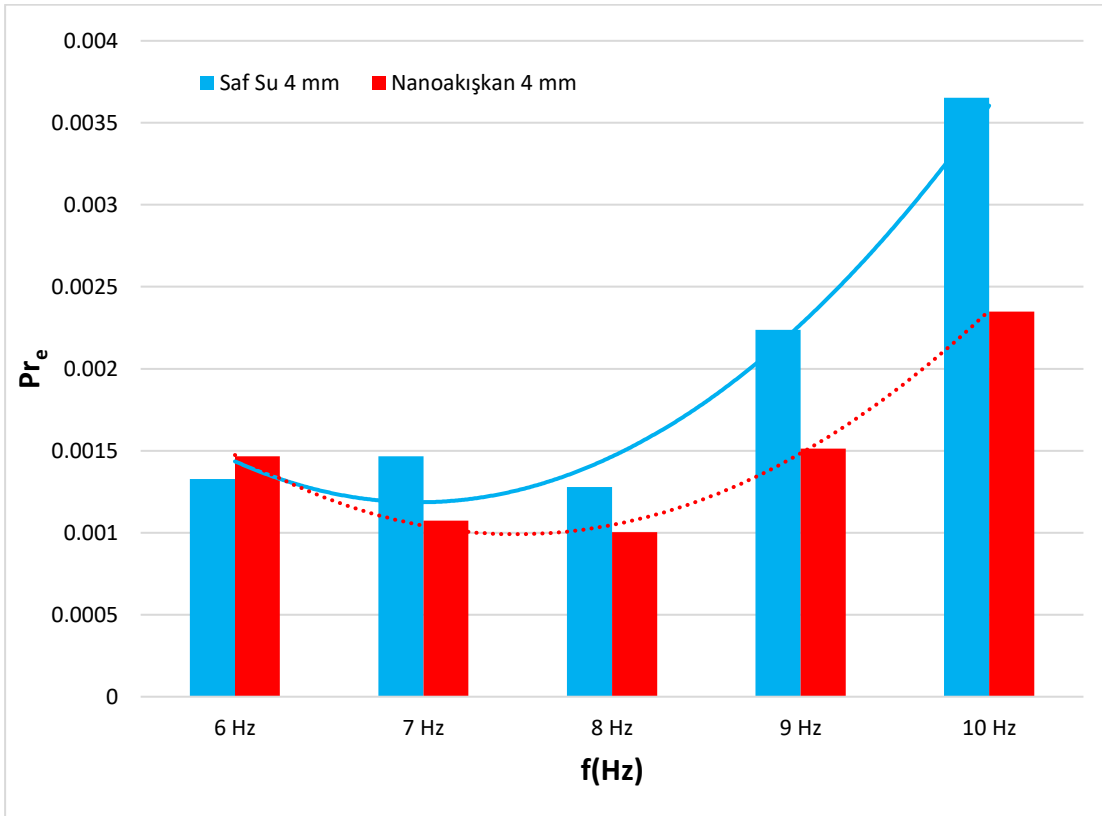
Şekil 5.40'ta verilmekte olan 10 Hz deneylerinde ise 4 mm yer değiştirme için gerçekleştirilmiş deneylerde, ekstrem bir fark gözlenmektedir. Saf su deneyi 390 saniye sürerken, nanoakışkan deneyi 260 saniye sürmektedir ve grafiklerin tepe noktaları arasındaki fark oldukça yüksektir. 5 ve 6 mm deneyleri için ise nanoakışkan deneyleri daha kısa sürede tamamlanmış olup, tepe noktaları daha yüksektir.



Şekil 5.40: Isı transfer hızının 10 Hz frekansında yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi.

### 5.2.5 Etkin Prandtl sayısı sonuçları

Nanoakışkan kullanımının etkin Prandtl sayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde, nanoakışkanın kinematik viskozitesinin daha yüksek olması, aşağıda incelenen belirli frekanslarda etkin ısıl yayınım katsayısının daha düşük olduğu durumlarda bile etkin Prandtl sayısının daha düşük çıkması sonucunu vermektedir. Genel trend olarak ise nanoakışkan kullanımının etkin Prandtl Sayısını düşürmesi şeklindedir. Şekil 5.41’de 4 mm yer değiştirme değeri için etkin Prandtl sayıları görülmektedir.

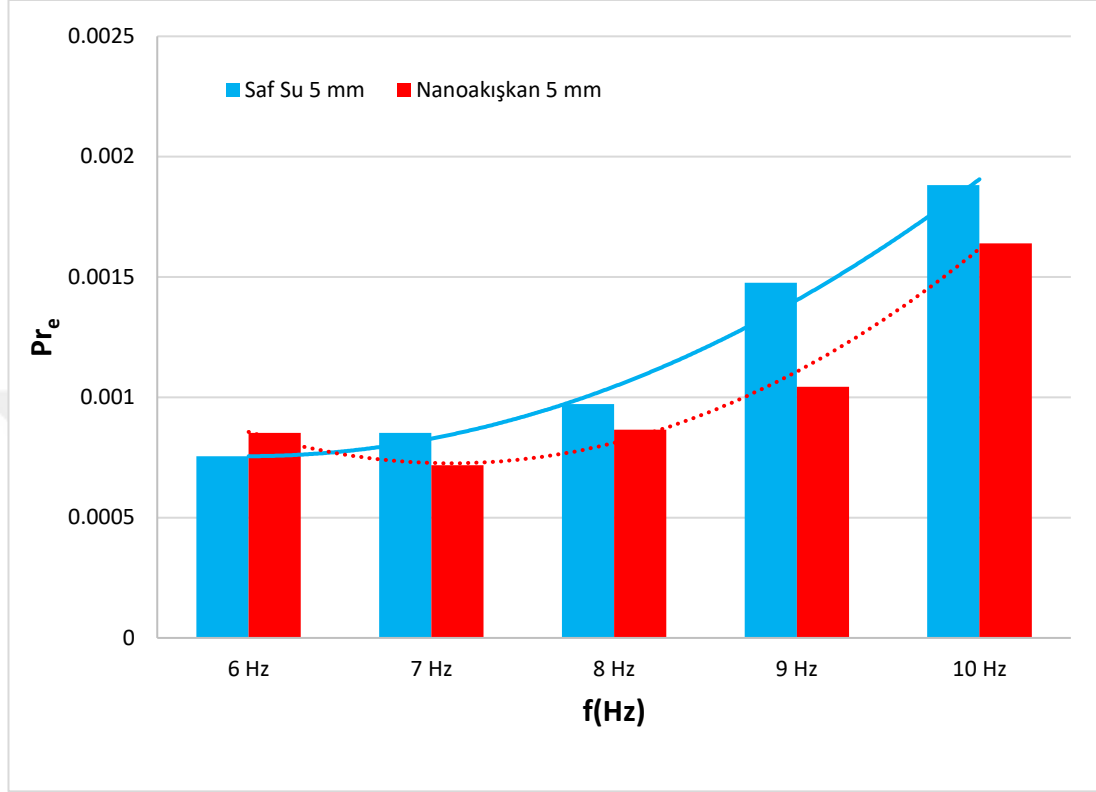


Şekil 5.41: Etkin Prandtl Sayısının  $\Delta s=4$  mm için frekans ve akışkan tipi ile değişimi.

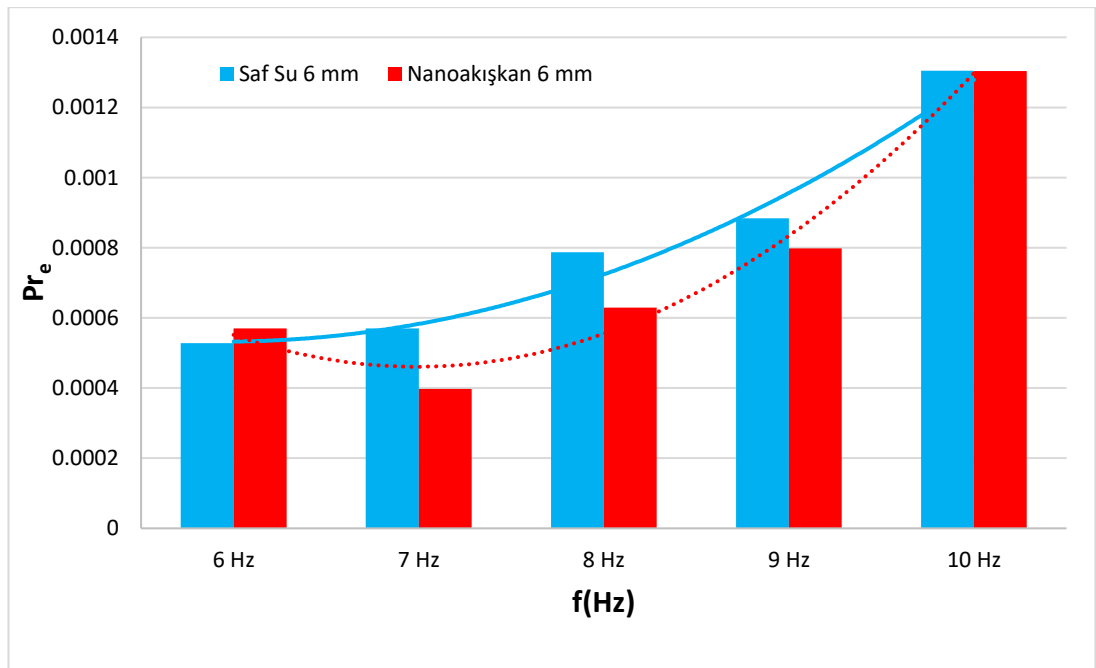
Şekil 5.42’de görülmekte olan 5 mm yer değiştirme sonuçlarında 6 Hz frekansında saf su sonuçlarının etkin ısıl yayınım katsayılarının daha yüksek olmasından dolayı bu frekansta etkin Prandtl sayısı daha düşük çıkmaktadır. Bu frekans haricinde ise etkin Prandtl sayısı bütün deneyler boyunca nanoakışkanlar için daha düşük çıkmaktadır.

Şekil 5.43’te verilen 6 mm yer değiştirme değeri sonuçlarında 7 Hz frekansı için ise, 4 mm ve 5 mm deneylerinde saf su deneylerinin ısıl yayınım katsayısı daha yüksek olmasına rağmen, bu farkın ondalık seviyede olması ve nanoakışkanın viskozitesinin daha yüksek olmasından dolayı 4 mm ve 5 mm deneyleri için 7 Hz frekansının etkin

Prandtl sayısı daha düşük sonuç vermektedir. 6 mm deneyi için ise etkin ısıl yayılım katsayısı nanoakışkan deneyinde daha yüksek olmasından dolayı etkin Prandtl sayısı daha düşük çıkmaktadır. Şekil 5.41, 5.42, 5.43 için uydurulan eğrilerin denklem ve belirleme katsayıları ise Çizelge 5.10’da verilmektedir.



Şekil 5.42: Etkin Prandtl sayısının  $\Delta s=5$  mm için frekans ve akışkan tipi ile değişimi.

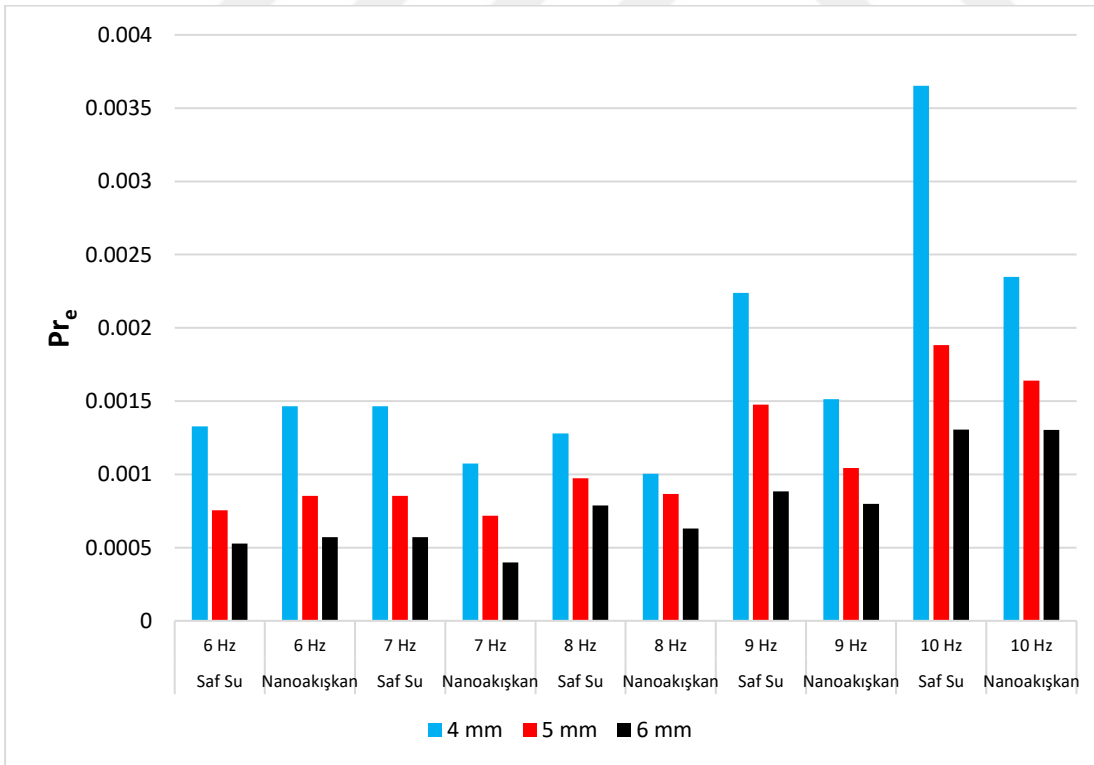


Şekil 5.43: Etkin Prandtl sayısının  $\Delta s=6$  mm için frekans ve akışkan tipi ile değişimi.

Çizelge 5.10: Nanoakışkan ile elde edilmiş etkin Prandtl sayılarının frekansa bağlı değişimi grafikleri için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

$\Delta s(\text{mm})$	Eğri denklemleri	$R^2$
4	$Pr_e = 0.0002f^2 - 0.0011f + 0.0023$	0.99
5	$Pr_e = 7E-05f^2 - 0.0001f + 0.0008$	0.98
6	$Pr_e = 9E-05f^2 - 0.0004f + 0.0008$	0.97

Yer değiştirmenin etkin Prandtl sayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise, yer değiştirme miktarı arttıkça etkin Prandtl sayısında düşüş olarak gözlenmektedir. Etkin Prandtl sayısının, etkin ısıl yayılım katsayısı ile ters orantılı olduğu ve yer değiştirme miktarı arttıkça etkin ısıl yayılım katsayısının arttığı göz önüne alınarak; yer değiştirme miktarı arttıkça etkin Prandtl sayısının düşüş davranışı göstermesi beklenen bir davranıştır.



Şekil 5.44: Her frekans için frekans ve akışkan tipine bağlı olarak etkin Prandtl sayısının değişimi.

Çizelge 5.10’da ise nanoakışkan kullanımının etkin Prandtl sayısı üzerindeki, saf suya bağlı etkisi verilmektedir. Bu fark Denklem (5.1) ile elde edilmiştir ve sonuçlar yüzdesel olarak Çizelge 5.11’de verilmektedir. Şekillerle açıklandığı üzere, 6 Hz frekansı hariç bütün frekanslarda nanoakışkan kullanımı etkin Prandtl sayısını azaltmaktadır.

$$Pr_{e,b} = \frac{Pr_{e,NA} - Pr_{e,SS}}{Pr_{e,SS}} \quad (5.1)$$

$Pr_{e,b}$ = Bağlı etkin Prandtl sayısı farkı

$Pr_{e,NA}$ =Nanoakışkanın etkin Prandtl sayısı

$Pr_{e,SS}$ =Saf suyun etkin Prandtl Sayısı

Çizelge 5.11: Nanoakışkan kullanımının, saf su kullanımına göre etkin Prandtl sayısı üzerindeki yüzdesel etkisi.

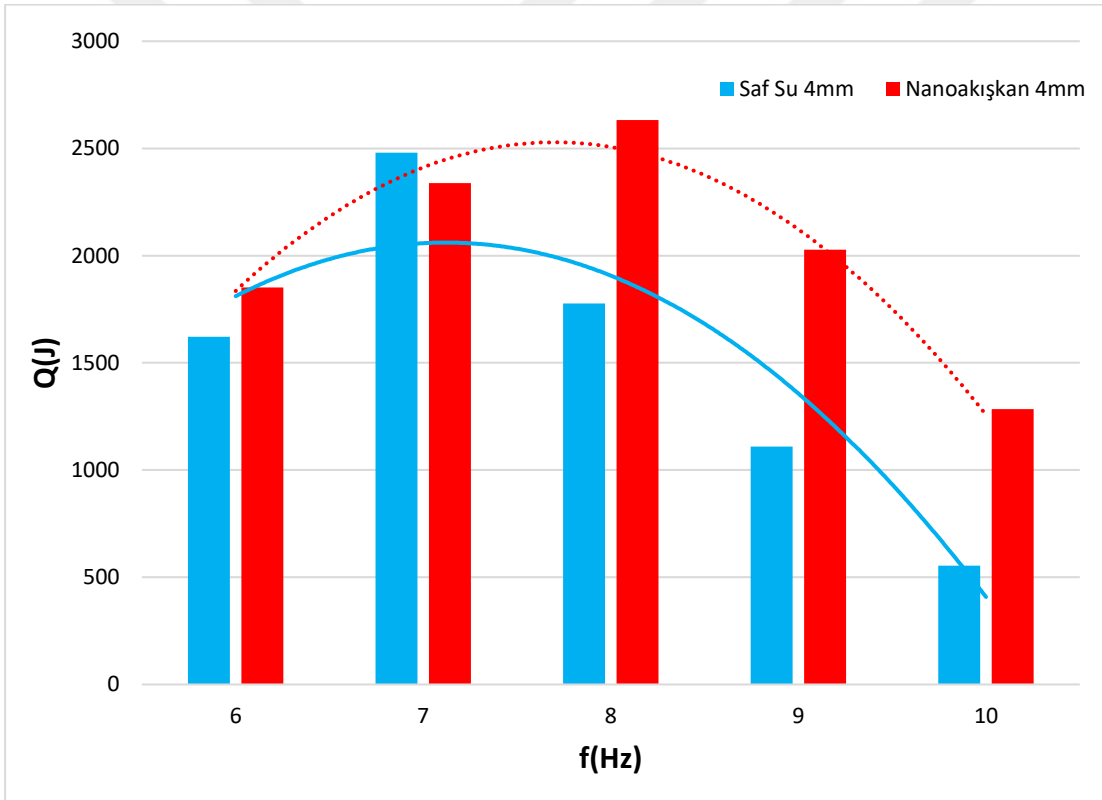
	Yüzdesel değişim		
	4 mm	5 mm	6 mm
6 Hz	+%9.5	+%11	+%7.4
7 Hz	-%36	-%12	-%43
8 Hz	-%27	-%12	-%25
9 Hz	-%48	-%41	-%11
10 Hz	-%55	-%15	-%0.78

### 5.2.6 Toplam ısı transferi sonuçları

Nanoakışkan kullanımının toplam ısı transferi üzerindeki etkisinin belirtilen yer değiştirme değerleri için grafikleri Şekil 5.44, 5.45 ve 5.46’da verilmektedir. 5. bölümünün başında açıklandığı üzere, toplam ısı transferi verileri 46 saniyelik bir sürede için hesaplanmıştır. Dolayısıyla, zamana bağlı olarak ısı iletim katsayısında düşüş yaşanan nanoakışkanların çökme davranışından etkilenme süresi, deney süresi olarak  $\Delta T$ ’nin baz alındığı etkin ısı iletim katsayısı verilerinden daha düşüktür. Isı

transfer hızı grafiklerinden de açıkça görülmekte olan, nanoakışkan deneylerinde tepe noktalarının daha yüksek olması durumu incelenmekte olan zamanın kısalması durumunda nanoakışkan etkisini oldukça arttırmaktadır. Bu bağlamda, deney süresinin kısalması halinde nanoakışkan kullanımının ısı transferine etkisinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Dolayısıyla Şekil 5.44, Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'dan açıkça görülmektedir ki saf su yerine nanoakışkan kullanımı toplam ısı transferinde artış sağlamaktadır.

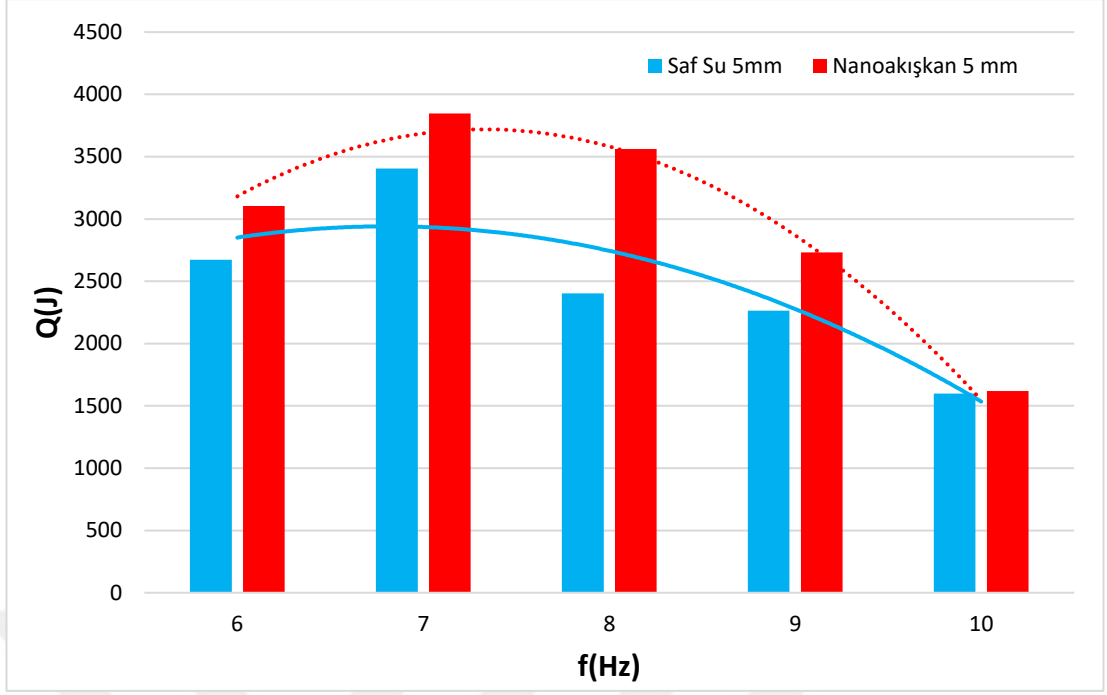
Şekil 5.45'te verilen 4 mm yer değiştirme değeri elde edilen için toplam ısı transferi verileri incelendiğinde, 7 Hz hariç bütün frekanslarda nanoakışkan kullanımının ısı transferini arttırdığı gözlenmektedir. Frekans arttıkça toplam ısı transferi farkının da arttığı gözlenmektedir.



Şekil 5.45: Toplam ısı transferinin  $\Delta s=4$  mm için frekans ve akışkana bağlı değişimi.

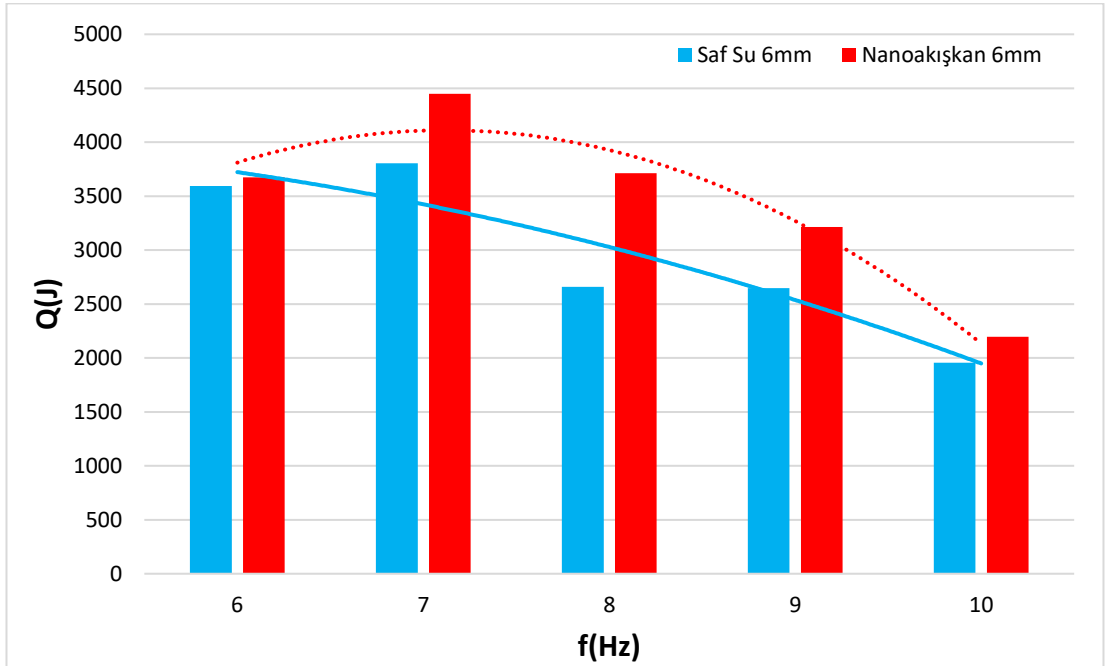
Şekil 5.46'da verilen 5 mm sabit yer değiştirme değeri için nanoakışkan etkisi verileri incelendiğinde bütün frekanslar için toplam ısı transferinde artış gözlenmektedir. Bu artış 8 Hz frekansında orantısal olarak en yüksek miktarı vermektedir. 10 Hz için çok düşük bir artış gözlenmektedir.





Şekil 5.46: Toplam ısı transferinin  $\Delta s=5$  mm için frekans ve akışkana bağlı değişimi.

Şekil 5.47’de verilen 6 mm sabit yer değiştirme için nanoakışkan kullanımının etkisi verileri incelendiğinde nanoakışkanın bütün frekanslar için toplam ısı transferini arttırdığı görülmektedir. Bu artış 5 mm yer değiştirme değerinde olduğu gibi 8 Hz frekansında en yüksek orandadır. Şekil 5.44, 5.45, 5.46 için uydurulan eğrilerin denklem ve belirleme katsayıları ise Çizelge 5.12’de verilmektedir.

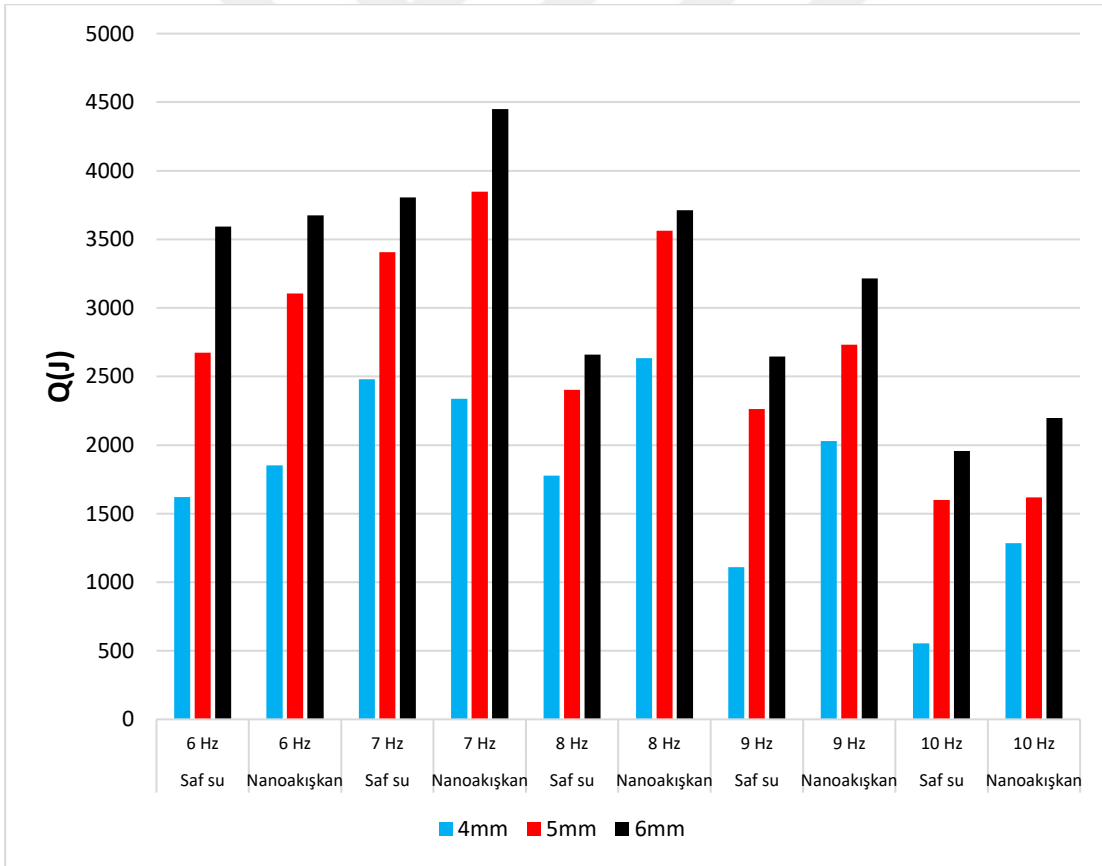


Şekil 5.47: Toplam ısı transferinin  $\Delta s=6$  mm için frekans ve akışkana bağlı değişimi.

Çizelge 5.12: Nanoakışkan ile elde edilmiş toplam ısı transferi değerlerinin frekansa bağlı değişimi grafikleri için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

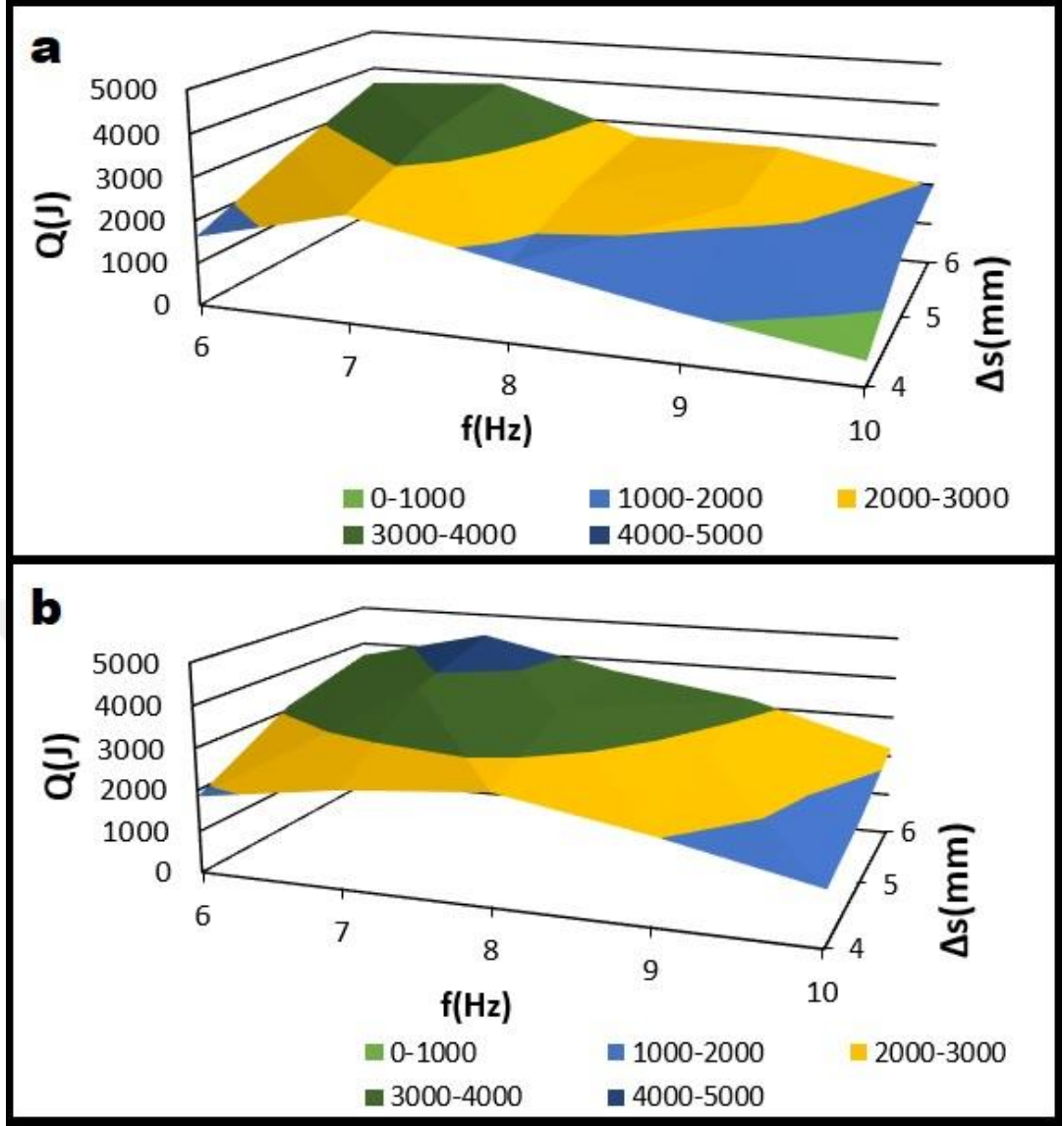
$\Delta s(\text{mm})$	Eğri denklemleri	$R^2$
4	$Q = -240.1 f^2 + 1296.2f + 779.27$	0.85
5	$Q = -304.35f^2 + 1417.3f + 2069.4$	0.78
6	$Q = -238.64f^2 + 1012.9f + 3035.9$	0.86

Şekil 5.48'de sabit frekanslar için yer değiştirme miktarına bağlı olarak toplam ısı transferi değerleri karşılaştırılmaktadır. Bütün deney sonuçları için yer değiştirme miktarının artışıyla birlikte toplam ısı transferinde artış gözlenmektedir.



Şekil 5.48: Toplam ısı transferinin her frekans için yer değiştirme ve akışkana bağlı değişimi.

Şekil 5.49'da toplam ısı transferinin frekans ve yer değiştirme parametrelerine bağlı olarak 3 boyutlu gösterimi verilmektedir.



Şekil 5.49: Toplam ısı transferinin bütün frekans ve yer değiştirme değerlerinde a) Saf su ve b) Nanoakışkan için üç boyutlu gösterimi.

Nanoakışkan kullanımının, saf su kullanımına bağlı olarak toplam ısı transferi üzerindeki etkisini belirten değerler Çizelge 5.13'te verilmektedir. Bu değerler Denklem (5.2) ile elde edilmiştir.

$$Q_b = \frac{Q_{NA} - Q_{SS}}{Q_{SS}} \quad (5.2)$$

$Q_b$ = Bağlı toplam ısı transferi farkı

$Q_{NA}$ =Nanoakışkan deneyinden elde edilmiş toplam ısı transferi

$Q_{SS}$ =Saf su deneyinden elde edilmiş toplam ısı transferi

Çizelge 5.13: Nanoakışkan kullanımının, saf su kullanımına göre toplam ısı transferi üzerindeki yüzdesel etkisi.

	Yüzdesel değişim		
	4 mm	5 mm	6 mm
6 Hz	+%14	+%16	+%2
7 Hz	-%5	+%12	+%16
8 Hz	+%48	+%48	+%30
9 Hz	+%82	+%20	+%21
10 Hz	+%131	+%1	+%12

Çizelge 5.13'den açıkça görülmektedir ki nanoakışkan kullanımı toplam ısı transferini istisnai durum sayılabilecek 4 mm 7 Hz deneyi haricinde arttırmaktadır. Bu artış 0.02 ile ekstrem bir değer olan 1.31 arasında değişmektedir. 1.31 değeri 4 mm 10 Hz deneyine ait olmakla birlikte, 4 mm 7 Hz deneylerinde ise 0.05 düşüş gözlenmektedir.

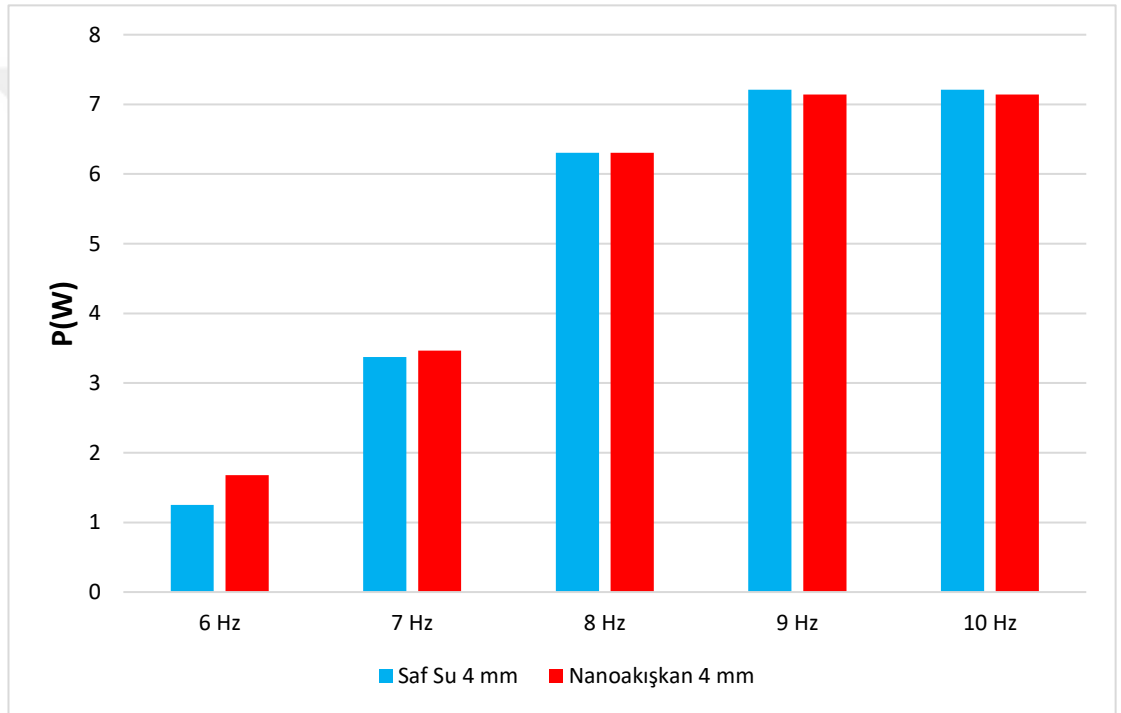
### 5.2.7 Güç tüketimi sonuçları

Sistemin güç tüketiminin frekans artışı ile birlikte artış göstermektedir. 9 Hz ve 10 Hz frekansları birbirine oldukça yakın güç tüketimi gösterse de, genel davranış frekans artışı ile güç tüketiminin artması yönündedir. Yer değiştirme miktarının artması da, daha yüksek yer değiştirme elde etmek için daha fazla güç tüketimi ihtiyacı doğurması dolayısıyla güç tüketimini arttırmaktadır. Nanoakışkan kullanımı ise akışkanın özkütlesinin düşük bir miktar artmasına sebep olmasından dolayı güç tüketimini yüksek olmayan bir miktarda arttırmaktadır. Güç tüketimi verileri Çizelge 5.14'te verilmiştir.

Şekil 5.50'de verilen 4 mm sabit yer değiştirme için 6-8 Hz frekans aralığında nanoakışkan deneylerinin güç tüketiminin bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. 9-10 Hz frekansları için ise nanoakışkan deneylerinin güç tüketimi ondalık mertebede daha düşüktür.

Çizelge 5.14: Deneylerde harcanan güç(W).

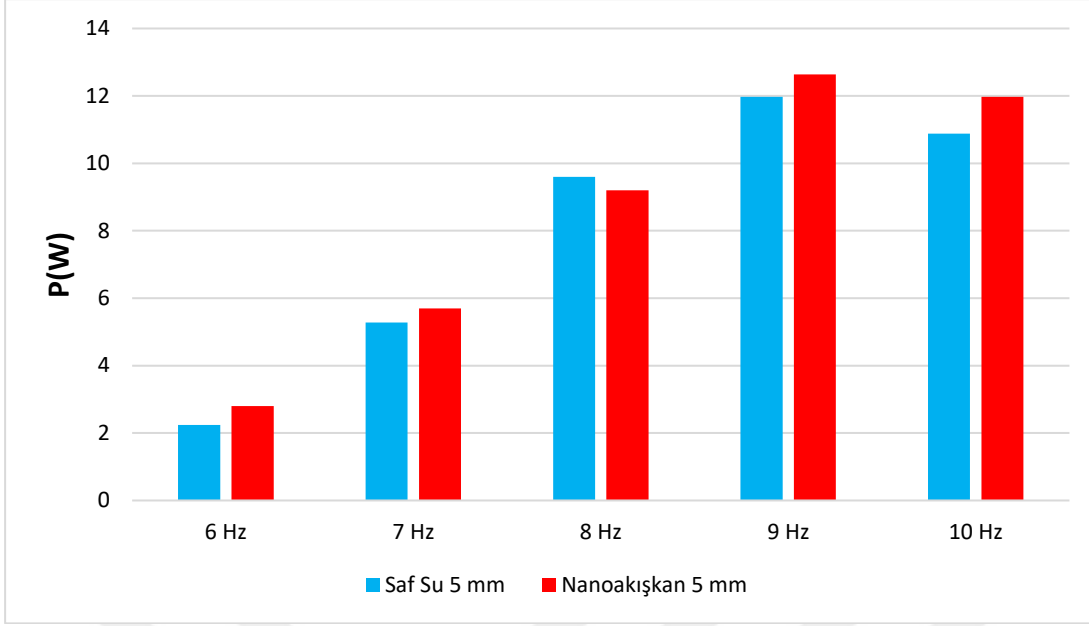
	Güç(W)					
	Saf Su			Nanoakışkan		
	4 mm	5 mm	6 mm	4 mm	5 mm	6 mm
6 Hz	1.2	1.9	3.2	1.6	2.8	3.6
7 Hz	3.3	5.2	6.8	3.4	5.7	6.8
8 Hz	6.3	9.6	12.8	6.3	9.2	9.8
9 Hz	7.2	11.9	13.7	7.1	12.6	14.7
10 Hz	7.2	10.8	13.8	7.1	11.7	14.2



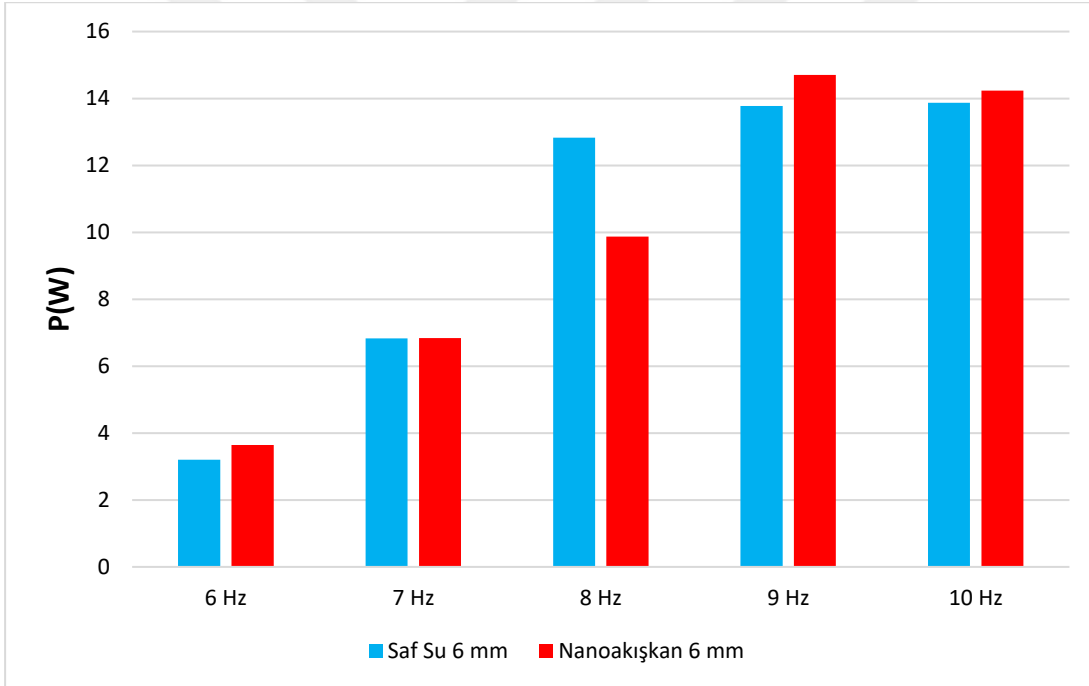
Şekil 5.50: Güç tüketiminin  $\Delta s=4$  mm için frekansa ve akışkan tipine bağlı değişimi.

Şekil 5.51’de verilen 5 mm sabit yer değiştirme değerinde elde edilmiş güç tüketimi verilerinde ise 7 Hz deneyi hariç bütün deneylerde nanoakışkan ile gerçekleştirilmiş deneylerde sarf edilen güç daha yüksektir.

Şekil 5.52’de verilen 6 mm sabit yer değiştirme değeri ile elde edilen güç değerlerinde ise 6, 9 ve 10 Hz frekanslarında nanoakışkan deneylerinde daha fazla güç sarf edilirken, 8 Hz frekansında kayda değer bir güç düşüşü olmuştur. 7 Hz frekansı ile gerçekleştirilen deneylerde ise güç sarfiyatı saf su ve nanoakışkan akışkanları için neredeyse aynıdır.



Şekil 5.51: Güç tüketiminin  $\Delta s=5$  mm için frekansa ve akışkan tipine bağlı değişimi.



Şekil 5.52: Güç tüketiminin  $\Delta s=6$  mm için frekansa ve akışkan tipine bağlı değişimi.

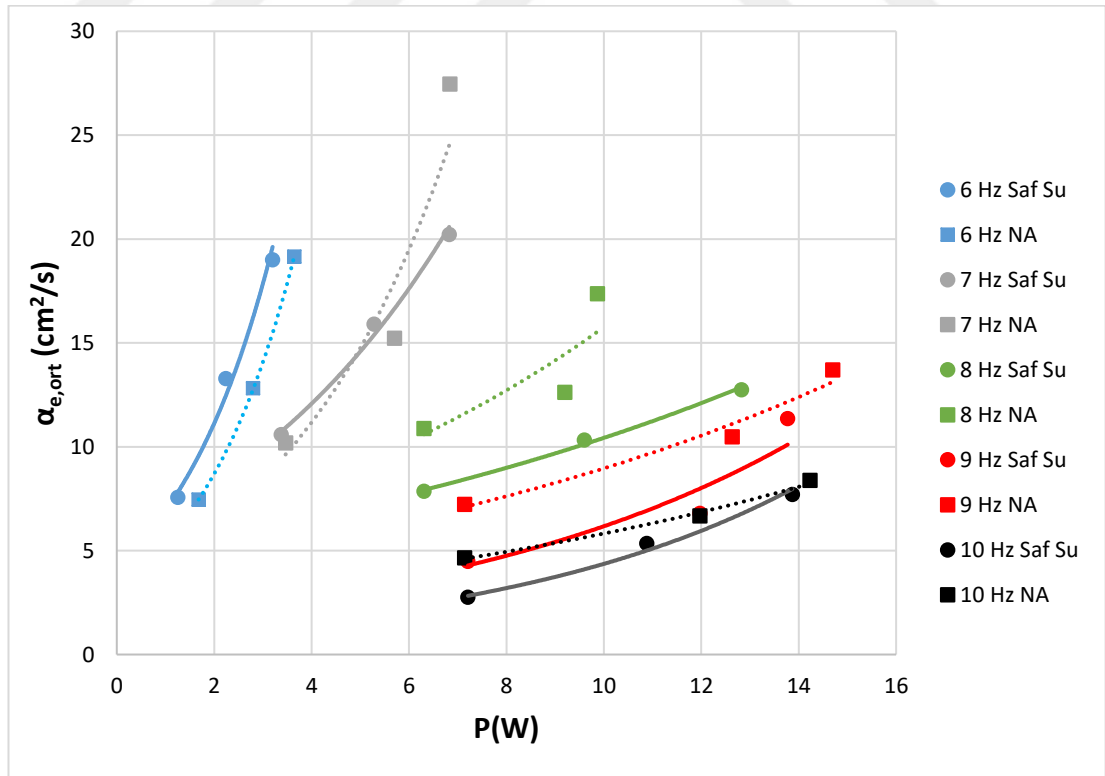
### 5.3 Optimum Çalışma Noktası

Bu bölümde güç tüketimi verileri etkin ısıl yayılım katsayısı ve toplam ısı transferi verileri ile birlikte incelenerek sistemin optimum çalışma noktası araştırılmaktadır. Deneyler boyunca titreşim üretici, güç kaynağından aldığı güç ile deneysel aparat içerisindeki akışkanı osile etme suretiyle titreşimli akış koşulu oluşturmakta, bu sayede de titreşimle ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Sıcak rezervuarın üst rezervuarda

olması dolayısı ile doğal taşınım engellenmektedir. Bu sebepten sisteme güç verilmeden sistemden ısı transferi elde etmek imkansızdır. Dolayısıyla, sistemin ısı transferini gerçekleştirebilmek için güce ihtiyacı vardır. Bu bölümde sistemin belirtilen frekans, yer değiştirme değerleri ve akışkan tipi ile gerçekleştirilen deneylerde harcadığı güce karşılık elde edilen etkin ısı yayılım katsayısı ve toplam ısı transferi verileriyle yorumları yer almaktadır.

### 5.3.1 Etkin ısı yayılım katsayısının güç tüketimi ile yorumlanması

Şekilde 5.53'te tüm deneylerden elde edilmiş olan Etkin ısı yayılım katsayısı değerleri, deneyler için harcanan güç ile incelenmektedir. Maksimum ortalama etkin ısı yayılım katsayısının 6 mm yer değiştirme, 7 Hz ve nanoakışkan ile gerçekleştirilmiş deneyden elde edildiği görülmektedir. 9-10 Hz deneylerinin güç tüketiminin neredeyse aynı olması dışında, frekans artışıyla birlikte güç tüketiminde artış ve 7 Hz'den sonra ortalama etkin ısı yayılım katsayısıda düşüş gözlenmektedir. 6 Hz deneyleri içinse daha düşük ortalama Etkin ısı yayılım katsayısı ve daha düşük güç tüketimi elde edilmiştir. Şekil 5.53 için uydurulan eğrilerin denklem ve belirleme katsayıları ise Çizelge 5.15'de verilmektedir.



Şekil 5.53: Etkin ısı yayılım katsayısının güç tüketimi ve akışkan tipi ile değişimi.

Çizelge 5.15: Etkin ısı yayılım katsayısının güç tüketimi ve akışkan tipi ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

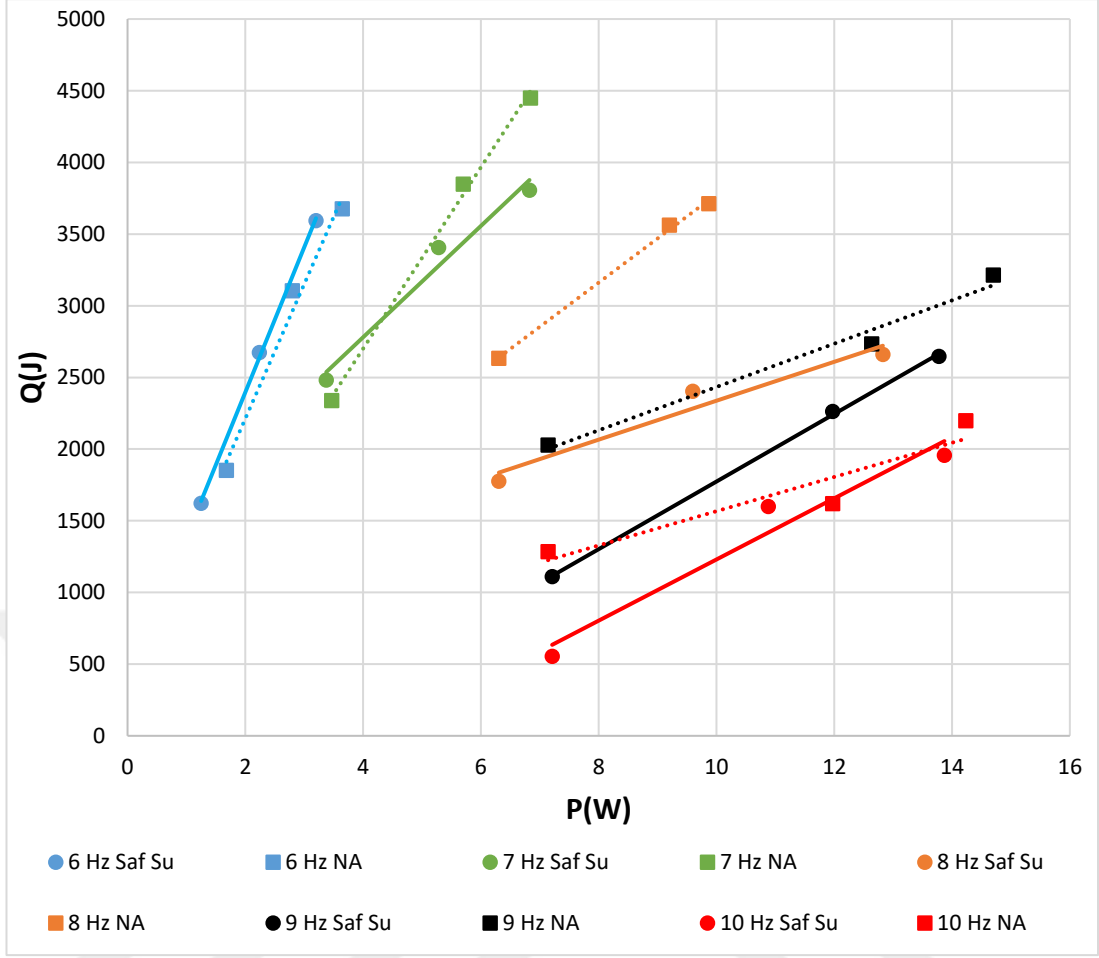
	Saf Su		Nanoakışkan	
f(Hz)	Eğri denklemleri	R <sup>2</sup>	Eğri denklemleri	R <sup>2</sup>
6	$\alpha_{e,ort} = 4.3e0.47P$	0.98	$\alpha_{e,ort} = 3.3e0.48P$	1
7	$\alpha_{e,ort} = 5.6e0.18P$	0.99	$\alpha_{e,ort} = 3.7e0.3P$	0.91
8	$\alpha_{e,ort} = 4.9e0.07P$	0.99	$\alpha_{e,ort} = 5.4e0.1P$	0.7
9	$\alpha_{e,ort} = 1.6e0.13P$	0.9	$\alpha_{e,ort} = 3.9e0.08P$	0.97
10	$\alpha_{e,ort} = 0.9e0.15P$	0.98	$\alpha_{e,ort} = 2.5e0.08P$	0.99

### 5.3.2 Toplam ısı transferinin güç tüketimi ile yorumlanması

Toplam ısı transferi verileri güç tüketimi Şekil 5.54'te verilmektedir ve toplam ısı transferi için de etkin ısı yayılım katsayısı sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmektedir. 6 Hz minimum güç tüketimi yapmakta ve güç tüketimi 9 Hz'e kadar artış göstermekte, 10 Hz'de ise 9 Hz'e yakın fakat daha düşük güç tüketimi olmaktadır. Toplam ısı transferi ise 7 Hz'de maksimum olmakta, bu noktadan sonra düşüş eğilimi göstermektedir.

Nanoakışkan etkisi incelendiğinde ise 6 Hz'de bütün yer değiştirme değerleri için güç tüketimini ve toplam ısı transferini arttırdığı, 7 Hz'de bütün yer değiştirme değerleri için güç tüketimini arttırdığı fakat 4 mm için toplam ısı transferini azalttığı, 8 Hz'de ise 6 mm deneyinde güç tüketiminin oldukça az olduğu fakat bütün yer değiştirme değerleri için ısı transferinin oldukça arttığı, 9 Hz frekansı için bütün yer değiştirme değerlerinde güç tüketimini ve ısı transferini arttırdığı ve son olarak 10 Hz için de bütün yer değiştirme değerleri için güç tüketimini ve toplam ısı transferini arttırdığı gözlenmektedir. Bu veriler için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayıları ise Çizelge 5.16'da verilmektedir.





Şekil 5.54: Toplam ısı transferinin güç tüketimi ve akışkan tipine göre değişimi.

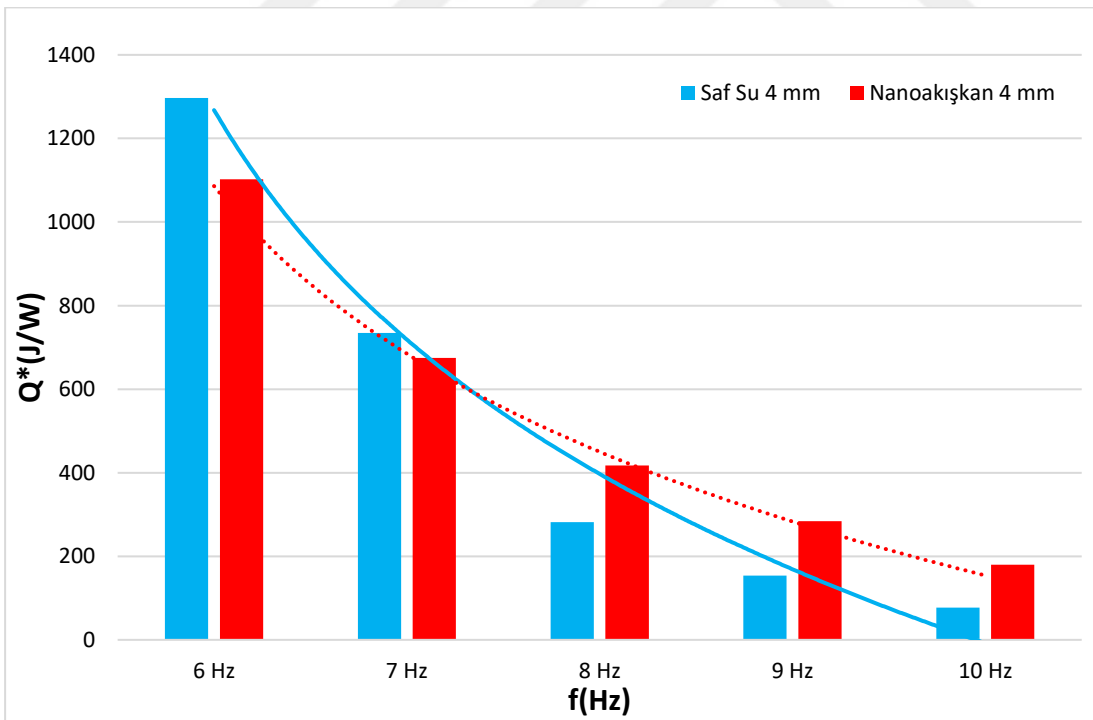
Çizelge 5.16: Toplam ısı transferinin güç tüketimi ve akışkan tipi ile değişimi grafiği için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

f(Hz)	Saf Su		Nanoakışkan	
	Eğri denklemleri	R <sup>2</sup>	Eğri denklemleri	R <sup>2</sup>
6	$Q=1011.3P + 374.03$	0.99	$Q=938P+335$	0.98
7	$Q=388.23P + 1227.3$	0.99	$Q=632P+170$	0.99
8	$Q=308P+697$	0.99	$Q=388P+1227$	0.97
9	$Q=235P-584$	0.99	$Q=151P+923$	0.97
10	$Q=213P-903$	0.95	$Q=119P+373$	0.87

Birim güç başına(W) elde edilen toplam ısı transferi miktarı(J) ise Şekil 5.53-5.54-5.55'de ve Çizelge 5.18'de verilmektedir. Bu veri noktaları için uydurulmuş eğrilerin denklem ve belirleme katsayıları Çizelge 5.17'de verilmektedir. Nanoakışkanların yoğunluklarının saf sudan yüksek olması dolayısıyla aynı yer değiştirme değeri için,

saf su ile yapılan deneylere nazaran daha yüksek güç tüketimi gereksinimini doğurmaktadır. Dolayısıyla, nanoakışkan ile yapılan deneylerde istisnai durumlar dışında saf su ile yapılan deneylerden daha yüksek güç tüketimi olmaktadır. Elde edilen toplam ısı transferi miktarı nanoakışkan deneylerinde daha yüksek olmasından dolayı bu nicelik frekanslara göre farklı sonuçlar doğurmaktadır. Bu durum birim güç başına elde edilen ısı transferi miktarı şeklinde incelendiğinde Çizelge 5.18’de görüldüğü üzere 6 Hz frekans ile saf su kullanılarak yapılan deneylerde, nanoakışkan kullanımına göre birim güç başına daha yüksek toplam ısı transferi değeri elde edilmesi sonucunu doğurmaktadır. 7-10 Hz frekans aralığında ise istisnai durumlar dışında nanoakışkan kullanımı birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi değeri açısından daha yüksek sonuçlar vermektedir.

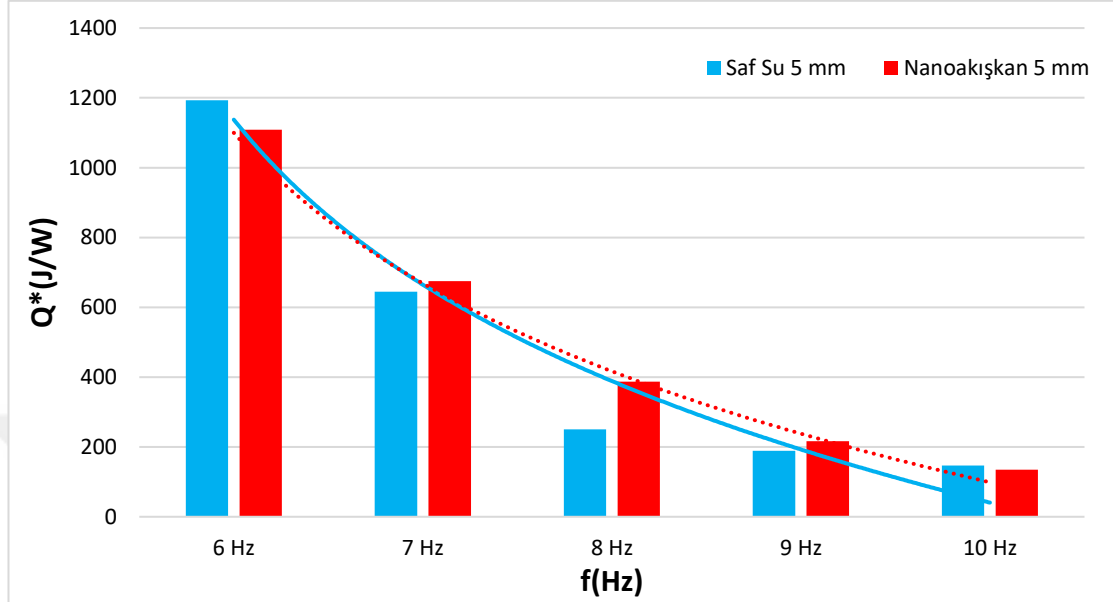
4 mm sabit yer değiştirme değeri için elde edilen birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi için 6, 7 Hz frekansları için saf su deneyleri daha yüksek sonuç vermektedir. 8,9,10 Hz frekanslarında ise nanoakışkan kullanımı birim güç başına elde edilen toplam ısı transferini saf su kullanımına göre arttırmaktadır.



Şekil 5.55:  $\Delta s=4$  mm birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi.

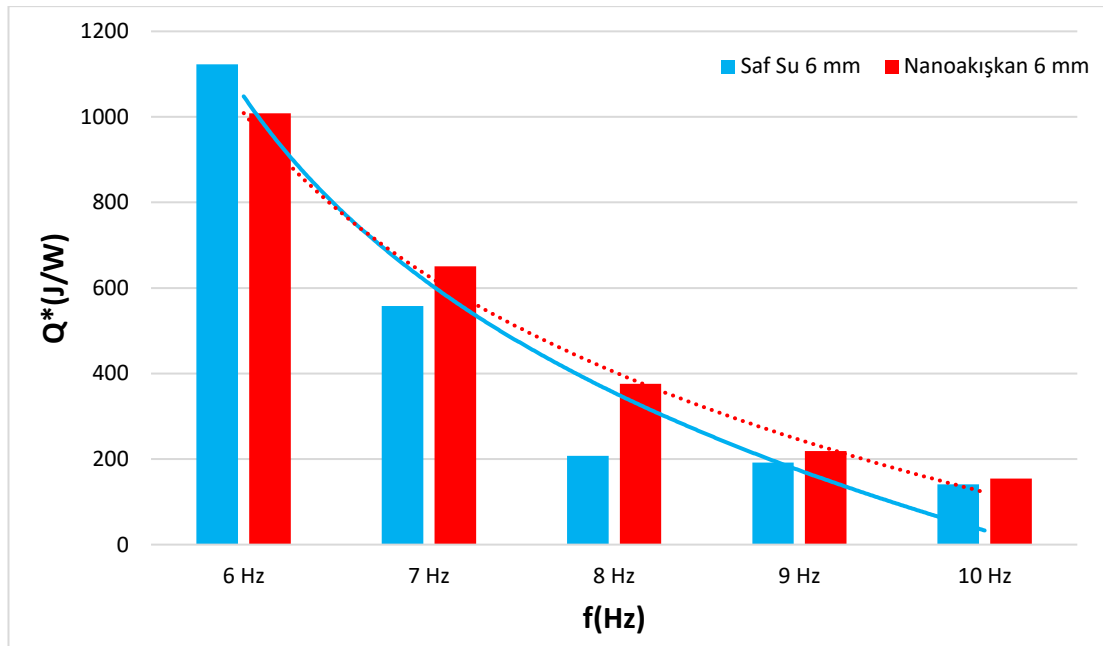
5 mm sabit yer değiştirme değeri için 6 Hz frekansında saf su deneylerinden daha yüksek birim güç başına toplam ısı transferi elde edilmektedir. Frekans artışı ile

birlikte nanoakışkan kullanımı birim güç başına, saf su kullanımına göre daha yüksek değer vermektedir fakat, 10 Hz frekansında saf su kullanımı tekrardan nanoakışkana göre daha yüksek değer vermektedir.



Şekil 5.56:  $\Delta s=5$  mm birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi.

6 mm sabit yer değiştirme değeri için ise yine, 6 Hz hariç bütün frekanslarla gerçekleştirilmiş deneylerde nanoakışkan kullanımı saf su kullanımına göre birim güç başına elde edilen toplam ısı transferini arttırmaktadır. 6 Hz deneylerinde ise saf su kullanımı daha yüksek birim güç başına toplam ısı transferi değeri vermektedir.



Şekil 5.57:  $\Delta s=6$  mm birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi.

Çizelge 5.17: Birim güç başına toplam ısı transferi verileri için uydurulmuş eğrilerin denklemleri ve belirleme katsayıları.

$\Delta s(\text{mm})$	Saf Su		Nanoakışkan	
	Eğri denklemleri	$R^2$	Eğri denklemleri	$R^2$
4	$Q^* = -792.6\ln(f) + 1267.8$	0.98	$Q^* = -579\ln(f) + 1086.1$	0.99
5	$Q^* = -681.5\ln(f) + 1137.5$	0.95	$Q^* = -621.9\ln(f) + 1100$	0.99
6	$Q^* = -630.7\ln(f) + 1048.1$	0.99	$Q^* = -550.8\ln(f) + 1009$	0.97

Çizelge 5.18: Birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi  $Q^*$  (J/W).

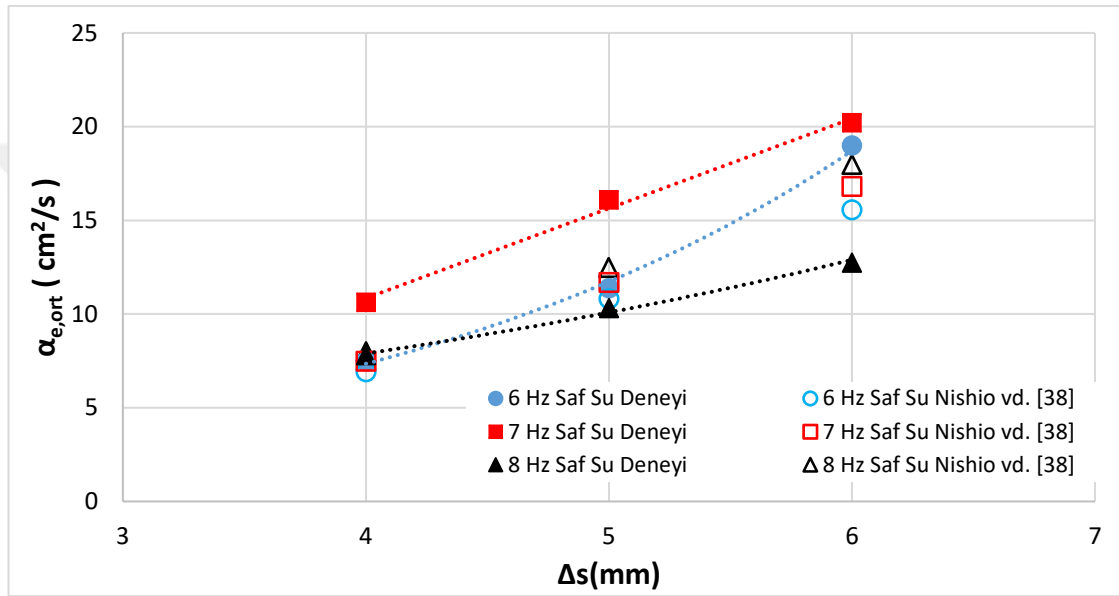
	$Q^*$ (J/W)					
	Saf Su			Nanoakışkan		
	4 mm	5 mm	6 mm	4 mm	5 mm	6 mm
6 Hz	1297	1392	1122	1101	1108	1008
7 Hz	734	645	557	674	675	650
8 Hz	281	250	207	417	387	352
9 Hz	153	189	192	284	216	218
10 Hz	76	146	141	179	138	154

Birim güç başına elde edilen toplam ısı transferi miktarı frekansa bağlı olarak incelendiğinde 6 Hz frekansta en yüksek değere ulaşıldığı ve frekansın artışıyla ters orantılı olarak düşüş yaşandığı görülmektedir. Bunun sebebi frekans artışına bağlı olarak artan güç tüketiminin yanısıra, 7 Hz frekansta maksimum olan toplam ısı transferinin de frekans artışıyla birlikte azalmasıdır. Dolayısıyla, frekans arttıkça güç tüketimi artmakta fakat elde edilen toplam ısı transferi miktarı azalmaktadır. Yer değiştirmenin etkisine bakıldığında ise, yine yer değiştirme artışı ile ters orantılı bir, birim başına elde edilen toplam ısı transferi gözlenmektedir.

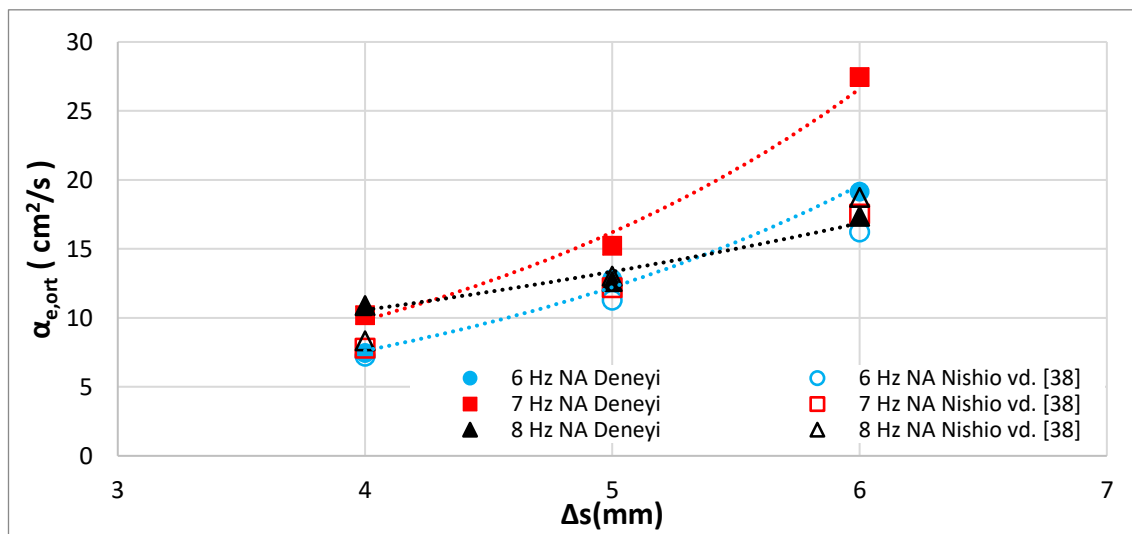
#### 5.4 Etkin Isıl Yayınım Katsayısı Sonuçlarının Literatür ile Karşılaştırması

Nishio'nun düzensiz bölge için verdiği Etkin ısıl yayınım katsayısı denklemi için elde edilen sonuçlar ise Şekil 5.58 ve Şekil 5.59'da verilmektedir. Denklem (1.3) ile verilen Nishio'nun denklemi frekansla doğru orantılı bir denklem olduğu için, frekans yükseldikçe daha yüksek etkin ısıl yayınım katsayısı sonucu vermektedir. Halbuki,

deney sonuçlarında 7 Hz frekansı aşıldığında etkin ısıl yayılım katsayısıda ciddi düşüşler gözlenmektedir. Gözlenen bu etkin ısıl yayılım katsayısı düşüşü, Kaviani[35]'nin Şekil 1.4'te verilen frekans etkin ısıl yayılım katsayısı yorumuyla uyum içerisinde. Dolayısıyla, karşılaştırma sonuçlarının sapmaları frekans artışıyla birlikte artmakta ve deney sonuçlarıyla uyumsuzluğu arttırmaktadır. Fakat 6 Hz deneyleri için deney sonuçları Nishio'nun analitik çözümüyle 4 ve 5 mm yer değiştirme değerleri için büyük bir uyum içerisinde. 6 mm yer değiştirme değerinde fark artmakla birlikte, frekans artışı ile birlikte modelden sapılmaktadır.



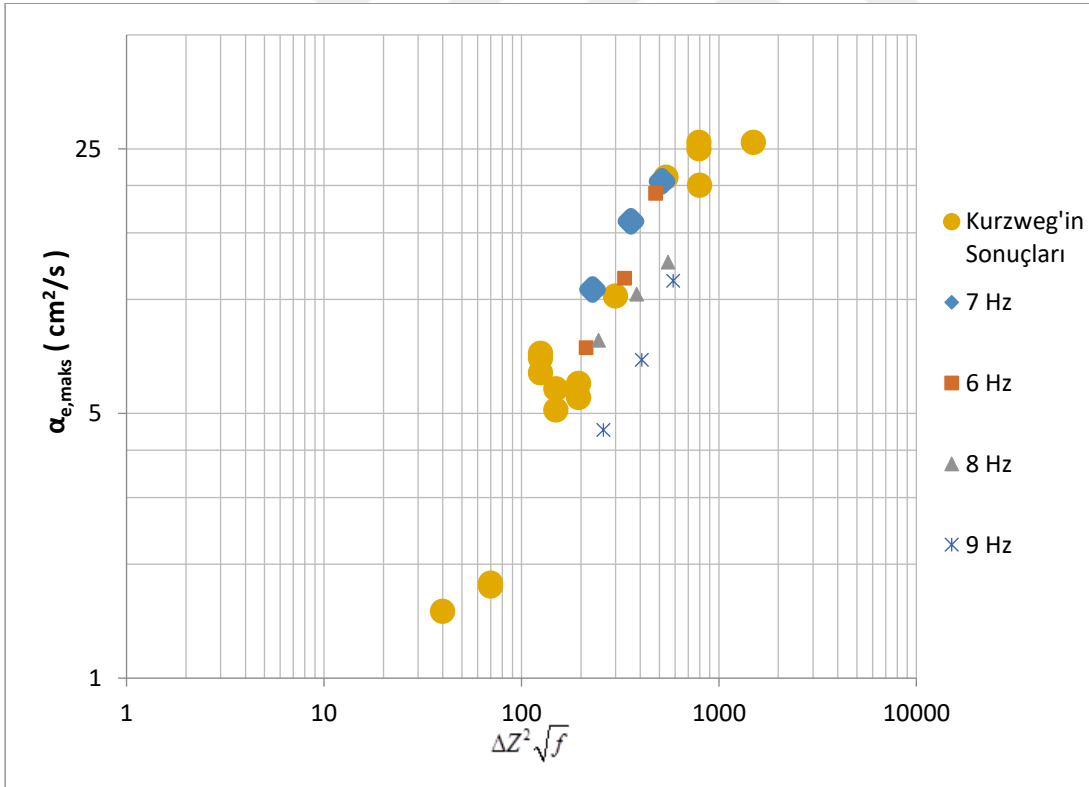
Şekil 5.58: Nishio'nun denklemiyle elde edilen değerlerin saf su deneylerinin sonuçlarıyla karşılaştırılması.



Şekil 5.59: Nishio'nun denklemiyle elde edilen değerlerin nanoakışkan deneylerinin sonuçlarıyla karşılaştırılması.

Kurzweg'in deneysel etkin ısı yayılım katsayısı sonuçlarının tez çalışması süresince gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen maksimum ısı yayılım katsayısı sonuçları ile kıyaslama ise Şekil 5.60'de verilmiştir. Bu karşılaştırma için ortalama Etkin ısı yayılım katsayısı yerine maksimum ısı yayılım katsayıları hesaplanmış olup, x ekseninde bahsi geçen  $\Delta Z$  akışkanın kılcal boru içerisinde, her titreşim sonucunda kat ettiği mesafeyi ifade etmektedir ve akıntusal yer değiştirme olarak anılmaktadır. Kurzweg'in deneyleri 3,5,7 Hz frekanslarında gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen tez çalışmasında gerçekleştirilmiş deneylerin çalışma aralığı birbirine ardışık ve 5 frekansı kapsadığı, yer değiştirme değerleri ise geniş bir aralığı kapsamadığı için logaritmik bir eksenle sonuçlar yığılık görünümlü bir sonuç vermektedir. Buna rağmen Kurzweg'in 7 Hz Deney sonucu, bu tez çalışmasının 7 Hz 6 mm deney sonucuyla oldukça yakın sonuçlar vermektedir.

Bu bağlamda, Nishio ve Kurzweg'in çalışmaları baz alınarak, tez çalışması süresince elde edilmiş sonuçların literatürle uyum içerisinde olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 5.60: Kurzweg'in etkin ısı yayılım katsayısı sonuçlarıyla saf su deney sonuçlarının karşılaştırılması.

## 6. BELİRSİZLİK ANALİZİ

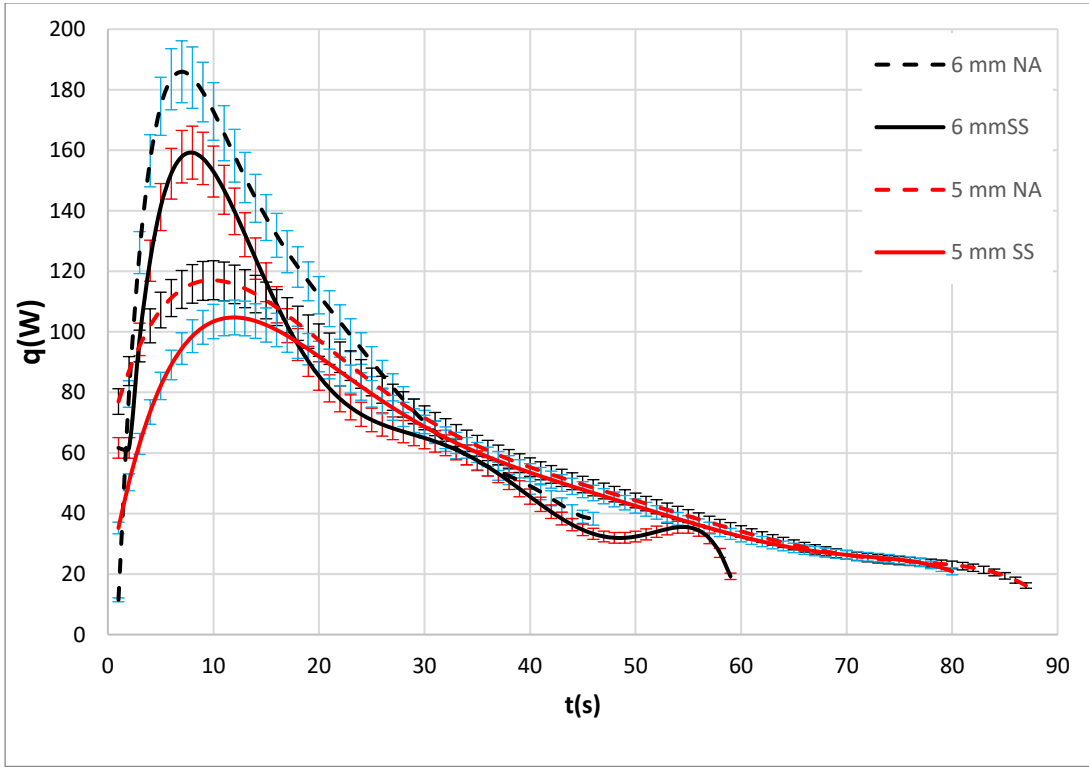
Deney sonuçlarının grafiksel olarak sunulması, deneylerde meydana gelen standart sapmalarının hesaplanması ve grafikte standart sapma barları şeklinde sunulması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Fakat bu bölümde elde edilen deney sonuçlarının belirsizlik hesaplamaları, hata oranlarının matematiksel olarak incelenmektedir. Bu inceleme için belirsizlik analizinin genel formülü olan Denklem (6.1) kullanılmıştır [54] ve ısı transfer hızı için indirgenerek Denklem (6.2), Etkin ısıl yayılım katsayısı için indirgenerek ise Denklem (6.3) elde edilmiştir.

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial y_1} w_{y1} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial y_2} w_{y2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial y_n} w_{yn} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.1)$$

Denklem 5.1'in, ısı transfer hızı değişkenleri olan özkütle, öz ısı, ısı transferi alanı, Etkin ısıl yayılım katsayısı, sıcak rezervuar sıcaklığı, soğuk rezervuar sıcaklığı için indirgenmiş hali Denklem (6.2) ile verilmektedir. Denklem 6.2 açıldığında denklem 6.3 elde edilmektedir. Denklem (6.3) ile bütün türevli ifadeler açık şekilde gösterilmiştir. Belirsizlik oranı Denklem (6.3) ile %6.12 olarak hesaplanmış olup Şekil 6.1 ile grafiksel olarak sunulmuştur.

$$W_q = \left[ \left( \frac{\partial q}{\partial \rho} w_\rho \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial c} w_c \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial \alpha} w_\alpha \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial A} w_A \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial T_h} w_{T_h} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial T_c} w_{T_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned}
W_q = & \left[ \left( \frac{c_p \alpha A (T_h - T_c)}{L} w_\rho \right)^2 + \left( \frac{\rho \alpha A (T_h - T_c)}{L} w_c \right)^2 \right. \\
& + \left( \frac{\rho c_p A (T_h - T_c)}{L} w_\alpha \right)^2 \\
& + \left( \frac{\rho c_p \alpha (T_h - T_c)}{L} w_A \right)^2 + \left( \frac{\rho c_p \alpha A}{L} w_{T_h} \right)^2 \\
& \left. + \left( \frac{\rho c_p \alpha A}{L} w_{T_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.3)
\end{aligned}$$



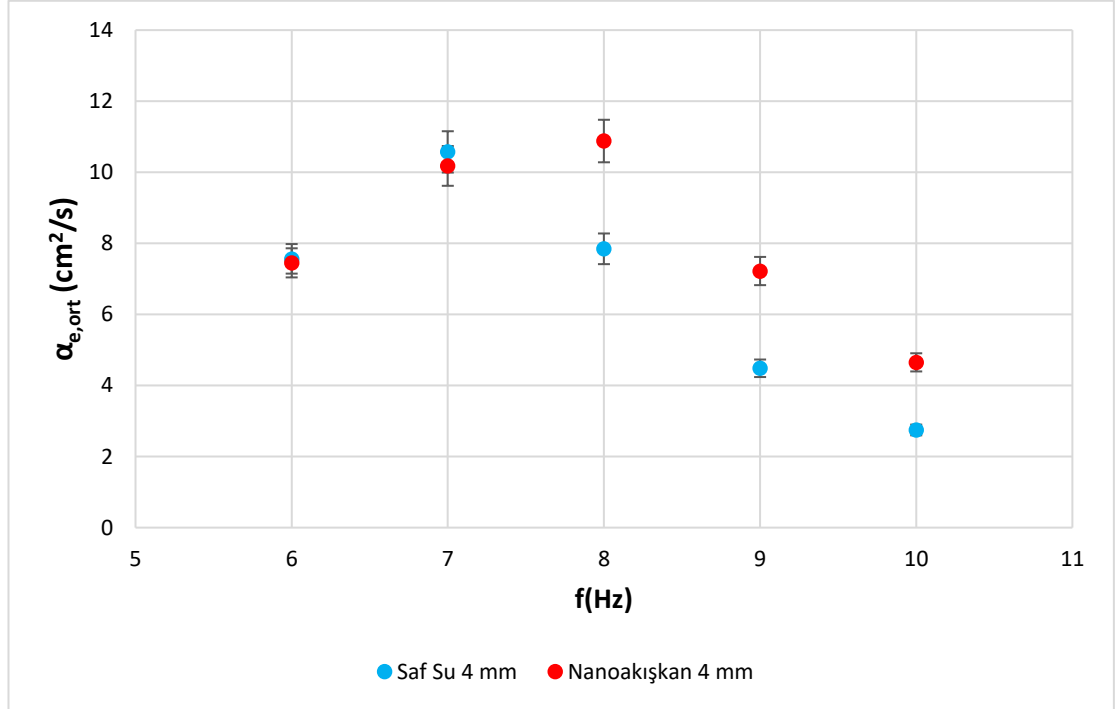
Şekil 6.1:  $\Delta s=5$  mm,  $\Delta s=6$  mm ve 7 Hz frekans ile gerçekleştirilmiş deneyler için ısı transfer hızı belirsizlik analizi.

Denklem 6.1'in, Etkin ısı yayılım katsayısı değişkenleri olan soğuk rezervuar hacmi, boru uzunluğu, ısı transferi alanı, soğuk rezervuar sıcaklık gradyeni, sıcak rezervuar sıcaklığı, soğuk rezervuar sıcaklığı değişkenlerine göre indirgenmiş hali ise Denklem (6.4) ile verilmektedir. Bu denklemdeki türevli ifadeler açıldığında ise Denklem (6.5) elde edilmektedir. Hata oranı %5.5 olarak bulunmuş olup, grafiksel olarak Şekil 6.2 ile sunulmuştur.



$$W_q = \left[ \left( \frac{\partial q}{\partial L} w_L \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial A} w_A \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial V} w_V \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial T_h} w_{T_h} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial T_c} w_{T_c} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial \Delta T_c} w_{\Delta T_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

$$W_\alpha = \left[ \left( \frac{V \Delta T_c}{A(T_h - T_c) dt} w_L \right)^2 + \left( \frac{V L \Delta T_c}{A^2 (T_h - T_c) dt} w_A \right)^2 + \left( \frac{L \Delta T_c}{A(T_h - T_c) dt} w_V \right)^2 + \left( \frac{V L \Delta T_c}{A(T_h - T_c)^2 dt} w_{T_h} \right)^2 + \left( \frac{V L \Delta T_c}{A(T_h - T_c)^2 dt} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.5)$$



Şekil 6.2:  $\Delta s=4$  mm ve 7 Hz frekans ile gerçekleştirilmiş deneyler için etkin ısıl yayılım katsayısı belirsizlik analizi.



## 7. DEĞERLENDİRME

### 7.1 Özet

Bu tez çalışmasında titreşimle oluşturulmuş akış koşullarında gerçekleştirilen ısı transferinin titreşimin genliği, titreşimin frekansı ve deney aparatı içerisinde kullanılan akışkanın çeşidi ile değişimi incelenmiştir. Çalışmada frekans aralığı olarak 6-10 Hz aralığı kullanılmış olup, uygulanan titreşim genlikleri ise 4,5,6 mm'dir. Kullanılan akışkanlar saf su ile saf su-CuO(%2) nanoakışkanıdır. Elde edilen veriler literatürle uyum içerisinde dir.

### 7.2 Çalışma Neticesinde Ulaşılan Sonuçlar

Frekans değişiminin ısı performansına etkisi incelendiğinde 7 Hz frekansta maksimuma ulaşan, parabolik bir değişim gözlenmektedir. Isıl performansın 7 Hz'e kadar artış gösterip, 7 Hz'den sonra azalması sonucu Kaviany[35]'nin çalışmasında verilen frekans artışı ile etkin ısı yayılım katsayısı arasındaki parabolik ilişki ile paralellik göstermektedir.

Yer değiştirme etkisi gözlemlendiğinde ise yer değiştirmedeki artış ile birlikte ısı performansın arttığı görülmektedir. Bu etki bütün frekanslar ve akışkanlar için gözlenmekte ve literatürdeki bütün analitik ve deneysel sonuçlarla uyum göstermektedir.

Deneysel için kullanılan nanoakışkanın termofiziksel özelliklerinin literatür ile karşılaştırılması sonucunda literatüre yakın sonuçlar elde edilmiştir. Nanoakışkan ile yapılan deneylerde ise frekansa bağlı bir değişim gözlemlense de, nanoakışkanın ısı performansını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Etkin Pr sayısı ise bütün deneyler için  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  mertebesinde dir. Durağan suyun Pr sayısının 6.85 civarında olduğu göz önüne alınırsa, titreşimli akış koşullarının etkin Pr sayısı üzerindeki etkisinin oldukça büyük olduğu söylenebilmektedir. Etkin Pr sayısının frekans ve akışkan ile değişimi gözlemlendiğinde ise en yüksek Etkin Pr

sayısının 10 Hz ve saf su deneylerine ait olduğu görülmektedir. En düşük Etkin Pr sayısı ise 7 Hz ve nanoakışkan deneylerine aittir. 7 Hz ve nanoakışkan ile gerçekleştirilen deneyin yapılan deneyler arasındaki maksimum ısı performansını verdiği önüne alınırsa ısı yayılım katsayısının maksimum olduğu bu noktanın en düşük etkin Pr sayısını vermesi beklenen bir sonuçtur. Yani, etkin Pr sayısı, etkin ısı yayılım katsayısı eğrisini ters orantılı olarak takip etmektedir.

Toplam ısı transferi verileri incelendiğinde ise verilerin incelendiği zaman diliminin kısalmasıyla birlikte nanoakışkanın ısı transferi üstündeki pozitif etkisinin arttığı gözlenmiştir. Bu farklılık nanoakışkanların ısı iletim katsayısının çökme davranışı dolayısıyla zamana bağlı olarak azalmasından kaynaklanmaktadır.

Toplam ısı transferinin, incelenen zamanın kısalmasıyla nanoakışkanlarla daha yüksek sonuç vermesi ise bir çok çalışmada incelenen nanoakışkanların zamana bağlı olarak ısı iletim katsayısında düşüş gözlenmesi sonucunu destekler nitelikte olup, deney sürelerinin kısa tutulmasının nanoakışkanların ısı transferi üzerindeki pozitif etkisini arttıracaklarını göstermektedir.

Sistemin optimum verim noktası araştırıldığında ise yaklaşıma göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Toplam ısı transferinin, harcanan güç ile değerlendirilmesi hesabı sonucu elde edilen verilere göre 6 Hz ve saf su ile yapılan deneyler birim güç başına en yüksek ısı performansını verdiği görülmektedir. Fakat 6 Hz ısı transferinin en hızlı gerçekleştiği nokta değildir. Maksimum ısı performans 7 Hz ve nanoakışkanla yapılan deneylerden elde edilmektedir. Yani, enerji verimliliğinin gözetilmesi durumunda 6 Hz ve saf su ile yapılan deneyler optimum çalışma noktası olurken, yüksek ısı performansının istenildiği ve enerji verimliliğinin nisbeten daha az gözetildiği durumlarda 7 Hz ve nanoakışkan deneyleri optimum çalışma noktası olmaktadır.

### **7.3 Öneriler**

Deneyler için kullanılan sistem, bilgi alışverişi açısından açık bir sistemdir. Dolayısıyla, bir geri besleme mekanizması bulunmamaktadır. Elektronik cihazların kullanım süresi, kullanım koşulları gibi sebeplerden ötürü göz ardı edilebilir boyutlarda hatalara sebep olmaktadır. Deney düzeneğinde geri beslemeli, ivme-yer değiştirme verilerinin anlık olarak bilgisayar tarafından geri işleneceği bir sistem kullanılması oluşabilecek hata oranını düşürmeye yardımcı olacaktır.

Deney sisteminin 10-12 Hz frekanslarında rezonansa girdiği gözlemlenmiştir. Rezonans etkisinin ivme ölçümlerini etkilemesi ihtimalinden dolayı deneysel aparatın, deney düzeneğinin kalanı farklı masalara yerleştirilmesi bu olası problemi ortadan kaldıracaktır.

Titreşimin uygulandığı körükte, belirli bir kullanım süresi sonunda yırtıklar meydana gelmektedir. Körük bulunduğu konum itibariyle deney düzeneğine kalıcı hasar vermesi en muhtemel noktadadır. Bu sebepten dolayı körük yerine mekanik özellikleri çalışma koşullarına dayanmaya daha uygun bir malzeme kullanılması olası yırtılma problemlerini engelleme potansiyeline sahiptir.

Sıvıların kaplarla deney aparatına eklenmesi ve tahliye edilmesinden dolayı her deney sonunda bir miktar nanoakışkan kaybı olmaktadır. Nanoakışkanlarda ise topaklanma olmamasına karşın, bir süre kullanım sonunda çökme davranışı gözlenmektedir. Bu kayıpların deneyleri etkilememesi açısından nanoakışkan ile yapılacak deneylerin kısa süre içerisinde tamamlanması gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Walker G**, (1980). New York : Oxford University Press
- [2] **Higgins B**, (1802). Nicholson's J 1, p. 130.
- [3] **Rijke PL**, (1859). Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen,|| Ann Phys **107** (6), pp. 339-43.
- [4] **Sondhauss C**, (1850), —Ueber die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Glasröhren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite, —Ann Phys Chem **79**, pp. 1-34.
- [5] **Strutt J.W.**, (1877). The Theory of Sound. London: Macmillan and Co.
- [6] **Akdag, U., Ozdemir, M. and Oztug, A.** (2007). Heat removal from oscillating flow in a vertical annular channel. *Heat and Mass Transfer*, 44(4), pp.393-400. [5]S, Horikoshi., N Serpone., Introduction to Nanoparticles 2013, p. 2
- [7] **Mulvaney, P.**, (2001). MRS bulletin, 26(12), 1009
- [8] **Choi SUS**. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. ASME Publ-Fed 231; 1995, p. 99–106.
- [9] **Koca, H., Doganay, S., Turgut, A., Tavman, I., Saidur, R. and Mahbubul, I.** (2017). Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp.1664-1674.
- [10] **Tawfik, M.** (2017). Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, pp.1239-1253.

- [11] **Azizian, R., Doroodchi, E. and Moghtaderi, B.** (2011). Effect of Nanoconvection Caused by Brownian Motion on the Enhancement of Thermal Conductivity in Nanofluids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(4), pp.1782-1789.
- [12] **Nor Azwadi Che Sidik, N., Witri Mohd Yazid, M. and Mamat, R.** (2017). Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, pp.137-144.
- [13] **Masuda H, Ebata A, Teramae K.** (1993) Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultrafine particles). *Netsu Bussei* 1993;4:227–33.
- [14] **Selvakumar, P. and Suresh, S.** (2012). Convective performance of CuO/water nanofluid in an electronic heat sink. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40, pp.57-63.
- [15] **Wongcharee, K., Chuwattanakul, V. and Eiamsa-ard, S.** (2017). Influence of CuO/water nanofluid concentration and swirling flow on jet impingement cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, pp.277-283.
- [16] **Pak, B. and Cho, Y.** (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151-170.
- [17] **Ho, C. and Chen, W.** (2013). An experimental study on thermal performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in a minichannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), pp.516-522.
- [18] **Karthikeyan, N., Philip, J. and Raj, B.** (2008). Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids. *Materials Chemistry and Physics*, 109(1), pp.50-55.



- [19] **Saleemi, M., Vanapalli, S., Nikkam, N., Toprak, M. and Muhammed, M.** (2015). Classical Behavior of Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Nanofluids in Antifrogen N with Experimental Evidence. *Journal of Nanomaterials*, 2015, pp.1-6.
- [20] **Anoop KB, Sundararajan T, Das S.K.** (2009) Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *Int J Heat Mass Transfer* 2009;52:2189–95.
- [21] **Duangthongsuk, W. and Wongwises, S.** (2010). An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3), pp.334-344.
- [22] **Colangelo, G., Favale, E., de Risi, A. and Laforgia, D.** (2012). Results of experimental investigations on the heat conductivity of nanofluids based on diathermic oil for high temperature applications. *Applied Energy*, 97, pp.828-833.
- [23] **Cacua, K., Buitrago-Sierra, R., Herrera, B., Chejne, F. and Pabón, E.** (2017). Influence of different parameters and their coupled effects on the stability of alumina nanofluids by a fractional factorial design approach. *Advanced Powder Technology*, 28(10), pp.2581-2588.
- [24] **Duangthongsuk, W.** (2017). Thermal and Hydraulic Performances of Nanofluids Flow in Microchannel Heat Sink with Multiple Zigzag Flow Channels. *MATEC Web of Conferences*, 95, p.03011.
- [25] **Teng, T., Hung, Y., Teng, T., Mo, H. and Hsu, H.** (2010). The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 30(14-15), pp.2213-2218.
- [26] **Ma, H., Borgmeyer, B., Cheng, P. and Zhang, Y.** (2007). A Mathematical Model Predicting Heat Transfer Performance in a Oscillating Heat Pipe. *ASME 2007 InterPACK Conference, Volume 1*.

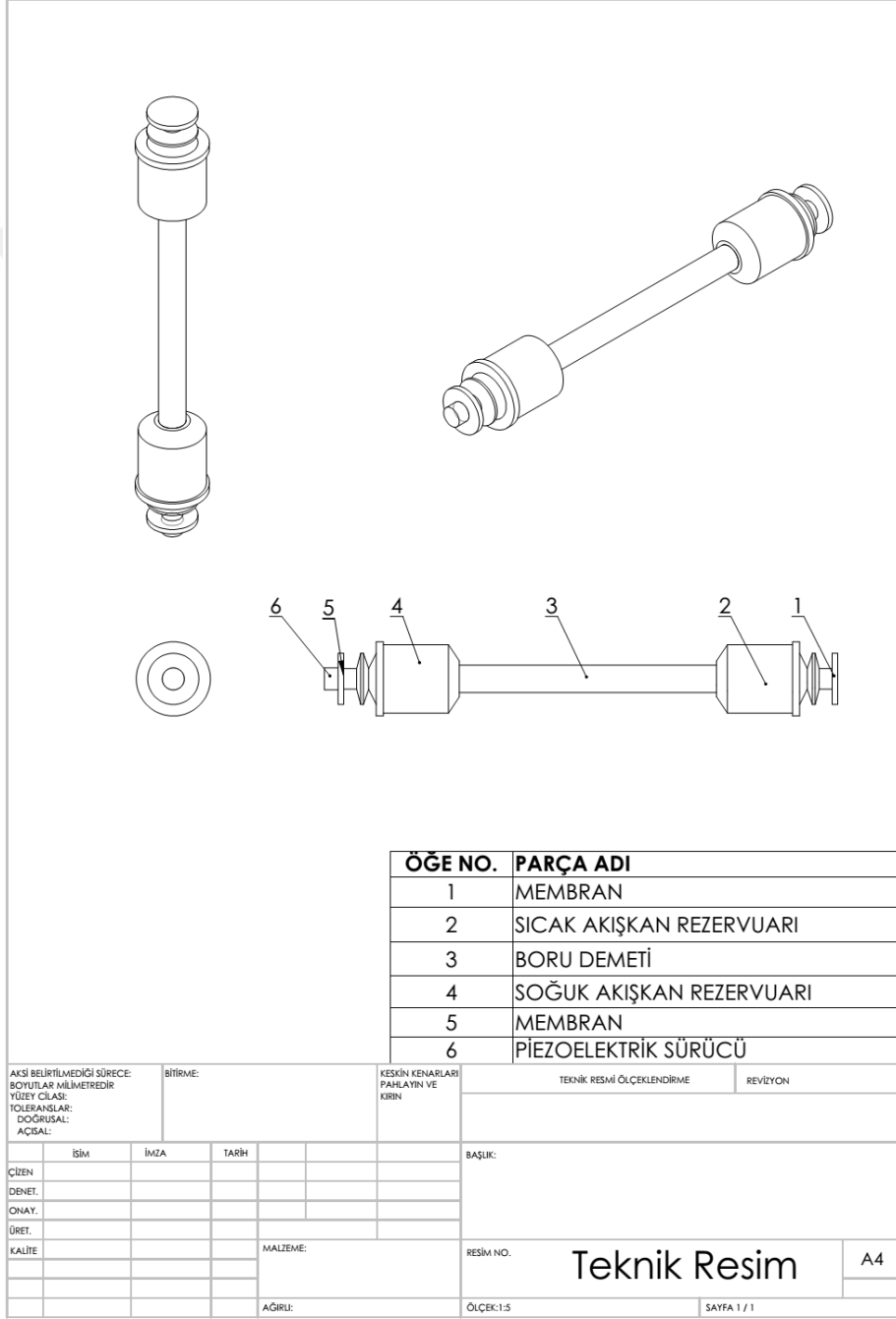
- [27] **Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P. and Manna, I.** (2008). Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(7), pp.1535-1542.
- [28] **Güven, O., Aktas, M. and Bayazitoglu, Y.** (2016). Experimental Investigation of Oscillation Controlled Thermal Transport in Water-Based Nanofluids. *Volume 1: Heat Transfer in Energy Systems; Thermophysical Properties; Theory and Fundamentals in Heat Transfer; Nanoscale Thermal Transport; Heat Transfer in Equipment; Heat Transfer in Fire and Combustion; Transport Processes in Fuel Cells and Heat Pipes; Boiling and Condensation in Macro, Micro and Nanosystems.*
- [29] **Wen, D. and Ding, Y.** (2004). Effective Thermal Conductivity of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (Carbon Nanotube Nanofluids). *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 18(4), pp.481-485.
- [30] **Wong, S. and Chon, W.** (1969). Effects of ultrasonic vibrations on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling. *AIChE Journal*, 15(2), pp.281-288.
- [31] **Lemlich, R. and Hwu, C.** (1961). The effect of acoustic vibration on forced convective heat transfer. *AIChE Journal*, 7(1), pp.102-106.
- [32] **Forbes, R., Carley, C. and Bell, C.** (1970). Vibration Effects on Convective Heat Transfer in Enclosures. *Journal of Heat Transfer*, 92(3), p.429.
- [33] **Watson, E.** (1983). Diffusion in oscillatory pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 133(-1), p.233.
- [34] **Kurzweg, U. and Zhao, L.** (1984). Heat transfer by high-frequency oscillations: A new hydrodynamic technique for achieving large effective thermal conductivities. *Physics of Fluids*, 27(11), p.2624.
- [35] **Kurzweg, U.** (1985). Enhanced Heat Conduction in Fluids Subjected to Sinusoidal Oscillations. *Journal of Heat Transfer*, 107(2), p.459.
- [36] **Zhang, J. and Kurzweg, U.** (1991). Numerical simulation of time-dependent heat transfer in oscillating pipe flow. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 5(3), pp.401-406.

- [37] **Kaviany, M.** (1986). Some aspects of enhanced heat diffusion in fluids by oscillation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 29(12), pp.2002-2006.
- [38] **Nishio, S., Shi, X. and Zhang, W.** (1995). Oscillation-induced heat transport: Heat transport characteristics along liquid-columns of oscillation controlled heat transport tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(13), pp.2457-2470.
- [39] **Siegel, R.** (1987). Influence of Oscillation-Induced Diffusion on Heat Transfer in a Uniformly Heated Channel. *Journal of Heat Transfer*, 109(1), p.244.
- [40] **Guo, Z., Kim, S. and Sung, H.** (1997). Pulsating flow and heat transfer in a pipe partially filled with a porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(17), pp.4209-4218.
- [41] **Ma, H., Wilson, C., Yu, Q., Park, K., Choi, U. and Tirumala, M.** (2006). An Experimental Investigation of Heat Transport Capability in a Nanofluid Oscillating Heat Pipe. *Journal of Heat Transfer*, 128(11), p.1213.
- [42] **Huelsz, G. and Ramos, E.** (1999). An experimental verification of Rayleigh's interpretation of the Sondhauss tube. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(4), pp.1789-1793.
- [43] **Akdag, U. and Ozguc, A.** (2009). Experimental investigation of heat transfer in oscillating annular flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(11-12), pp.2667-2672.
- [44] **Lee, D., Park, S. and Ro, S.** (1995). Heat transfer by oscillating flow in a circular pipe with a sinusoidal wall temperature distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(14), pp.2529-2537.
- [45] **Miura, M., Nagasaki, T. and Ito, Y.** (2017). Experimental investigation of heat transport with oscillating liquid column in pulsating heat pipe using forced oscillation system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, pp.997-1004.
- [46] **Furukawa, M.** (2011). Heat Transport by Inverse-Piezoelectric Driven Dream Pipe. *Journal of Heat Transfer*, 133(10), p.101701.
- [47] **Guler O., Aktas M.** (2015). Experimental Investigation Of Oscillation Controlled Heat Transport Tubes. Volume 8A: Heat Transfer and Thermal Engineering

- [48] **Vadasz, J., Meyer, J., Govender, S. and Ziskind, G.** (2015). Experimental Study of Vibration Effects on Heat Transfer during Solidification of Paraffin in a Spherical Shell. *Experimental Heat Transfer*, 29(3), pp.285-298.
- [49] **Zhu H, Y LinY Yin,** (2004). A Novel One-Step Chemical Method For Preparation Of Copper Nanofluids ,277 *Journal of Colloid and Interface Science*.
- [50] **Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A.,** (1999). Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *ASME Journal of Heat Transfer*, 121, 280-289
- [51] **Nguyen, C.T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Mare'd, T., Boucher, S., Mints, H.A.,** (2007). Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 1492–1506.
- [52] **Incropera, F. and DeWitt, D.** (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: J. Wiley.
- [53] **Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M.** (2006). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*. Boston: McGraw-HillHigher Education.
- [54] **Holman, J.** (2012). *Experimental methods for engineers*. New York: McGraw Hill.

## EKLER

### Ek 1. Deneysel Aparatın Teknik Çizimi



## Ek 2. Cihaz Listesi

<b>Ekipman İsmi</b>	<b>Adet</b>	<b>Marka</b>
K ısı1 çift	4	
İvme ölçer	1	Brüel & Kjaer – 4394
Hidrofon	1	Brüel & Kjaer - 2739243
Titreşim üreteci	1	Brüel & Kjaer - 4824
Veri depolayıcı	1	Agilent Tech - 34980A
Güç kaynağı	1	Brüel & Kjaer - 2732

### Ek 3. Nanoakışkan Miktarının Hesaplandığı MATLAB kodu.

% Kütlesel oranı bilinen nanoakışkandan, hacimsel 0.02 oranda CuO-DI Su nanoakışkanı hazırlama kodu

np\_ro = 3.97; % nanoparçacık özkütlesi  
su\_ro = 0.997; % saf su özkütlesi  
m\_oran= 0.20; % nanoakışkanın kütlesel oranı

$v\_oran = (m\_oran * su\_ro) / (np\_ro + m\_oran * su\_ro - m\_oran * np\_ro)$   
% Eşitlik (2.1)

v\_total = 500 % hazırlanmak istenilen toplam nanoakışkan hacmi

oran2 = 0.02 % hazırlanmak istenilen nanoakışkan hacimsel oranı

$v\_nf2 = v\_total * oran2 / v\_oran$ ; % Eşitlik (2.2)

$v\_su2 = v\_oran - v\_nf2$ ; % Eşitlik (2.3)

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Eren ÇOLAK  
**Uyruğu** : Türkiye Cumhuriyeti  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 10.08.1990 - ELAZIĞ  
**E-posta** : colakeren23@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

**Yıl: 2012 Yer: RONA MAKİNA SANAYİ VE TİCARET A.Ş. Görev: Stajyer**  
**Yıl: 2013 Yer: HİTİT SANAYİ İNŞAAT VE TİCARET LTD ŞTİ. Görev: Stajyer**

### YABANCI DİL:

**İngilizce - İleri Seviye**

**Almanca – Başlangıç Seviyesi**

**Japonca – Başlangıç seviyesi**

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **COLAK, E., GUVEN, O., AKTAS, M.K. (2017). Experimental Investigation of Oscillatory Heat Convection in Nanofluid Media, 22-25 Ekim,.NanoTR13, ANTALYA.**