T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

İÇERİSİNDE AYRIK GÖZENEKLİ ISI ALICILAR BULUNAN BİR KANALDA NANOAKIŞKAN KULLANIMININ ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Oğuzhan ÖZBALCI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2022

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

İÇERİSİNDE AYRIK GÖZENEKLİ ISI ALICILAR BULUNAN BİR KANALDA NANOAKIŞKAN KULLANIMININ ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Oğuzhan ÖZBALCI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2022

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇERİSİNDE AYRIK GÖZENEKLİ ISI ALICILAR BULUNAN BİR KANALDA NANOAKIŞKAN KULLANIMININ ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Oğuzhan ÖZBALCI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 23/06/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ayla DOĞAN (Danışman)

Prof. Dr. Meltem ASİLTÜRK ERSOY

Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU

Doç. Dr. Nureddin DİNLER

ÖZET

İÇERİSİNDE AYRIK GÖZENEKLİ ISI ALICILAR BULUNAN BİR KANALDA NANOAKIŞKAN KULLANIMININ ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Oğuzhan ÖZBALCI

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayla DOĞAN

Haziran 2022; 146 Sayfa

Bu tez çalışmasında elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcıların kullanımının ısı transferine ve basınç kaybına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. CuO nanopartikülleri kullanılarak farklı kütlesel derişimlerde, katkılarda (Surfaktan ve partikül yüzeyine Ag atomu motifiye) ve partikül boyutunda hazırlanan toplamda 19 adet nanoakışkan ile (NA) çalışılmıştır. Nanoakışkan hazırlanmasında temel akışkan olarak saf su (TA) kullanılmıştır. Dört farklı kütlesel derişimlerde (%0.1, %0.5, %1.0 ve %2.0) hazırlanan CuO-H2O nanoakışkanları test edilmiş ve en uygun nanoakışkan derişiminin kütlece %0.1 olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen bu nanoakışkanın ısı transfer miktarını daha da arttırabilmek amacıyla farklı derişimlerde surfaktan eklenmesi ve partikül yüzeyine farklı oranlarda Ag atomu motiflenmesi ile yeni nanoakışkanlar hazırlanmıştır Ayrıca, yüksek alan/hacim oranına sahip 10 PPI ve 40 PPI gözenek yoğunluğunda, Al-6101 metal köpük ısı alıcılar kullanılarak artan yüzey alanının ısı transferine etkisi temel akışkan ve belirlenen nanoakışkanlar için incelenmiştir. Çalışmada kanal içerisinde ısıtılan yüzeye 5 adet metal köpük ısı alıcı ayrık formda yerleştirilmiştir. Deneyler, sabit ısı akısının 3267 W/m2 ila 5400 W/m2 ve hacimsel debinin 17.6 L/h ila 76.5 L/h arasında değişen değerleri için yapılmıştır.

Boş yüzeyde, NA16 (%0.1 CuO-H_2O/%2 PEI), NA17 (%0.1 CuO-H_2O-%0.03 Ag /%2 PEI) ve NA18 (%0.1 CuO-H_2O-%0.05 Ag /%2 PEI) nanoakışkanlarının kullanımıyla taşınımla ısı transferi katsayısında temel akışkana göre elde edilen iyileştirme miktarı sırasıyla %2.66, %2.39 ve %5.23 olarak belirlenmiştir. İçerisinden temel akışkan geçirilen kanalda, 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların kullanımıyla taşınımla ısı transferi katsayısında boş yüzeye göre, elde edilen en yüksek iyileştirme miktarları sırasıyla %15.19 ve %16.47 olarak hesaplanmıştır. NA 16, NA 17 ve NA 18 nanoakışkanlarının 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcılarla ayrı ayrı kullanımında, taşınımla ısı transfer katsayısında elde edilen iyileştirme miktarı sırasıyla NA 16'da %37.01 ve %33.72, NA 17'de %39.19 ve %44.69, NA 18'de ise %35.75 ve %57.75 olarak belirlenmiştir. Çalışmada temel akışkana göre, en düşük yüzey sıcaklıkları NA 18 (%0.1 CuO-H_2O-%0.05 Ag /%2 PEI) nanoakışkanı ve 40 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Elektronik Soğutma, Isı transferi, Metal köpük ısı alıcısı, Nanoakışkan

JÜRİ: Prof. Dr. Ayla DOĞAN

Prof. Dr. Meltem ASİLTÜRK ERSOY

Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU

Doç. Dr. Nureddin DİNLER

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NANOFLUID USAGE ON HEAT TRANSFER IN A CHANNEL WITH DISCRETE POROUS HEAT SINKS

Oğuzhan ÖZBALCI

PhD. Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ayla DOĞAN

June 2022; 146 pages

In this thesis, the effects of the use of nanofluid and metal foam heat sinks on the cooling of electronic systems on heat transfer and pressure loss were investigated experimentally. Using CuO nanoparticles, a total of 19 nanofluids (NA) prepared in different mass concentrations, additives (surfactant and Ag atom attaching on the particle surface) and particle sizes were studied. Pure water (TA) was used as the base fluid in the preparation of nanofluids. CuO-H2O nanofluids prepared in four different mass concentrations (0.1%, 0.5%, 1.0% and 2.0%) were tested and it was determined that the most suitable nanofluid concentration was 0.1% by mass. In order to increase the heat transfer amount of this determined nanofluid, new nanofluids were prepared by adding surfactant at different concentrations and attaching Ag atoms at different rates on the particle surface. In addition, the effect of increased surface area on heat transfer was investigated for the base fluid and the specified nanofluids by using Al-6101 metal foam heat sinks at 10 PPI and 40 PPI pore densities with high area/volume ratio. In the study, 5 metal foam heat sinks were placed on the heated surface in the channel in discrete form. The experiments were carried out for constant heat flux values ranging from 3267 W/m2 to 5400 W/m2 and volumetric flow rates ranging from 17.6 L/h to 76.5 L/h.

On the empty surface, the amount of improvement in the convective heat transfer coefficient with the use of, NA16 (%0.1 CuO-H_2O/%2 PEI), NA17 (%0.1 CuO-H_2O-%0.03 Ag /%2 PEI) and NA18 (%0.1 CuO-H_2O-%0.05 Ag /%2 PEI)nanofluids compared to the base fluid was determined as 2.66%, 2.39% and 5.23%, respectively. With the use of 10 PPI and 40 PPI metal foam heat sinks in the channel through which the base fluid was passed, the highest improvement in the convective heat transfer coefficient, relative to the empty surface, was calculated as 15.19% and 16.47%, respectively. When NA 16, NA 17 and NA 18 nanofluids were used separately with 10 PPI and 40 PPI, the improvement in convective heat transfer coefficient was obtained 37.01% and 33.72% in NA16, 39.19% and 44.69% in NA17, 35.75% and 57.75% in NA18, respectively. According to the base fluid in the study, the lowest surface temperatures were obtained using NA 18 (0.1% CuO-H2O-0.05% Ag / 2% PEI) nanofluid and 40 PPI metal foam heat sink.

KEYWORDS: Electronic Cooling, Heat transfer, Metal foam heat sink, Nanofluid

COMMITTEE: Prof. Dr. Ayla DOĞAN

Prof. Dr. Meltem ASİLTÜRK ERSOY

Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU

Assoc. Prof. Dr. Nureddin DİNLER

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım saygı değer hocam Prof. Dr. Ayla DOĞAN'a, yine çalışmalarımdaki katkılarından dolayı değerli hocam Prof. Dr. İbrahim ATMACA'ya, nanoakışkanların hazırlanması ve sentezi konusunda bilgi ve tecrübe edinmemi sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Meltem ASİLTÜRK ERSOY'a ve çalışmalarım esnasında manevi desteğini hiç esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının yapılmasında FBA-2019-4985 numaralı projeyle alınan ölçüm aletleri ve ekipmanlarının kullanmış olmasından dolayı Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
ÖNSÖZ v
AKADEMİK BEYAN viii
SİMGELER VE KISALTMALAR ix
ŞEKİLLERİN DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
1. GİRİŞ 1
1.1. Elektronik Soğutma Sistemleri ve Kullanılan Malzemeler 3
2. KAYNAK TARAMASI 8
2.1. Elektronik Soğutma Yöntemleri 8
2.1.1. Hava ile soğutma 9
2.1.1.1. Doğal konveksiyon 9
2.1.1.2. Zorlanmış konveksiyon 9
2.1.2. Sıvı ile soğutma 9
2.1.3. Isı pompası 12
2.1.4. Buhar sıkıştırmalı soğutma sistemleri 12
2.1.5. Termoelektrik soğutma 14
2.1.6. Faz değiştiren malzeme ile soğutma 14
2.2. Elektronik Sistemlerin Soğutulmasında Kullanılan Soğutma Sıvıları ve Beklenen Özellikler 14
2.2.1. Soğutma sıvısından beklenen özellikler 16
2.3. Nanobilim, Nanoteknoloji ve Nanoakışkanlar 16
2.3.1. Nanoakışkanların üretimi 18
2.3.2. Nanoakışkanların kararlılığı 19
2.3.3. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri 20
2.4. Elektronik Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Temas Yüzey Alanı Arttırma Yöntemleri 27
2.4.1. Metal köpük malzemeler 27
2.5. Elektronik Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Hesaplama Yöntemleri 32

2.5.1. İç akışta hidrodinamik ve ısıl davranış 32
2.6. Elektronik Soğutma Sistemlerinde Nanoakışkan ve Metal Köpük Kullanımına Yönelik Çalışmalar 37
2.6.1. Metal köpük malzemelerle yapılan çalışmalar 38
2.6.2. Nanoakışkanlarla yapılan çalışmalar 42
2.6.3. Metal köpük ve nanoakışkanlarla yapıla nümerik çalışmalar 46
2.6.4. Metal köpük ve nanoakışkanlarla yapılan birleşik çalışmalar 50
2.6.5. Tezin amacı, katkısı ve yenilikler 52
3. MATERYAL VE METOT 56
3.1. Materyal 56
3.1.1. Tez çalışmasında kullanılan akışkanlar 56
3.1.2. Partikül sentezi ve karakterizasyonu 57
3.1.3. Nanoakışkanların hazırlanması ve karakterizasyonu 61
3.1.4. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri 63
3.1.5. Deney düzeneği ve elemanları 66
3.2. Metot 77
3.2.1. Deneysel parametrelerin belirlenmesi 77
3.2.2. Geometrik parametreler 79
3.2.3. Isı transfer analizi 80
3.2.4. Performans analizi 82
3.2.5. Belirsizlik analizi 83
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 85
4.1. Deneysel Ölçümler ve Verilerin Analizi 85
5. SONUÇLAR 128
6. KAYNAKÇA 132
7. EKLER 141
EK – 1 Deney seti için örnek veriler ve analiz sonuçları 141
EK – 2 CPU ve GPU'ların maksimum ve optimum çalışma sıcaklık aralığı 142
EK – 3 Bilinen bazı HDD (Geleneksel bellek) ve SSD (Yüksek hızlı bellek) modellerinin optimum çalışma sıcaklık aralığı 146
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum "İçerisinde Ayrık Gözenekli Isı Alıcılar Bulunan Bir Kanalda Nanoakışkan Kullanımının Isı Transferine Etkisinin İncelenmesi" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

23/06/2022

Oğuzhan ÖZBALCI

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a : Partikül çapı [m]

A : Yüzey alanı [m^2]

A_k : Kesit alanı [m^2]

C_p : Özgül ısı [kJ/kgK]

D : Çap [m]

Da : Darcy sayısı [-]

D_h : Hidrolik Çap [m]

f : Sürtünme katsayısı [-]

g : Yerçekimi ivmesi [m/s^2]

Gz : Greatz sayısı [-]

H : Kanal Yüksekliği [m]

h : Taşınımla ısı transferi katsayısı [W/m^2K]

h_{na} : Nanoakışkanın taşınımla ısı transferi katsayısı [W/m^2K]

h_{ta} : Temel akışkanın taşınımla ısı transferi katsayısı [W/m^2K]

k : Termal iletkenlik katsayısı [W/mK]

k_a : Akışkanın termal iletkenlik katsayısı [W/mK]

$k_{yalıtım}$: Yalıtım malzemesinin termal iletkenlik katsayısı [W/mK]

K : Geçirgenlik [m^2]

l : Uzunluk [m]

$\dot{m}$: Kütlesel debi [kg/s]

n : viskozite katsayısı [kg/ms]

Nu : Nusselt sayısı [-]

P : Perimetre [m]

P_p : Pompalama gücü [W]

P : Basınç [mBar]

Pr : Prandtl Sayısı [-]

$\dot{Q}$: Isıtıcıya verilen ısı akımı [W]

$\dot{Q}_{konv.}$: Konveksiyonla olan ısı akımı [W]

$\dot{Q}_{kond.}$: Kondüksiyonla olan ısı akımı [W]

$q_{konv.}$: Aktarılan ısı akısı [W/m^2]

R : Elektrikli ısıtıcı direnci [ohm]

R_{th} : Termal direnç [K/W]

Re : Reynolds sayısı [-]

T : Sıcaklık [°C]

$T_ç$: Akışkan çıkış sıcaklığı [°C]

T_g : Akışkan giriş sıcaklığı [°C]

$T_{ort.y}$: Yüzey sıcaklık ortalaması [°C]

$T^*_{ort.y}$: Ortalama yüzey sıcaklığı [°C]

u_∞ : Hız [m/s]

V : Elektrikli ısıtıcı voltajı [V]

$\dot{V}$: Hacimsel debi [L/h]

w : Genişlik [m]

w_t : Hata analizi [%]

x : Kalınlık [m]

$x_{fd,h}$: Hidrodinamik giriş uzunluğu [m]

$x_{fd,t}$: Isıl giriş uzunluğu [m]

α : Isıl yayınım katsayısı [m^2/s]

ɣ : Çökme Hızı [m/s]

ε : Gözeneklilik [%]

ϵ_s : Akışkan ısı transfer etkenliği [-]

η : Performans analizi [-]

$\hbar$: Gözenekli yapının hidrolik iletkenliği [m/s]

μ : Dinamik viskozite [kg/ms]

v : Kinematik viskozite [m^2/s]

ρ : Yoğunluk [kg/m^3]

φ : Hacimsel derişim [%]

ω : Kütlesel derişim [%]

ΔP : Basınç kaybı miktarı [mBar]

ΔT : Sıcaklık farkı [°C]

ΔT_{lm} : Logaritmik ortalama sıcaklık farkı [°C]

$\Delta T_{\text{yalıtım}}$: Yalıtım malzemesinin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı [°C]

Kısaltmalar

Bit : Binary Digit (Programlama dilindeki en küçük birim)

CNT : Karbon nanotüp

CPU : Central processing unit (Mikroişlemci)

GNP : Grafen nanoplaka

GPU : Graphics processing unit (Ekran kartı)

NA : Nanoakışkan

PPI : Pore per inch (İnç başına düşen gözenek sayısı

TA : Temel akışkan

TEM : Geçirmeli elektron miktoskobu

ŞEKİLLERİN DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektronik cihazlarda çoğunlukla meydana gelen hasarlar ve yüzde dağılımları (Zhang vd. 2021) 3

Şekil 1.2. Çiplerin içerisinde bulunan transistör sayısına bağlı olarak yıllara göre ısı akısı ve güç değişimi (Zhang vd. 2021) 5

Şekil 2.1. Isı transferi metotlarının karşılaştırılması (Anandan ve Ramalingam 2008) 8

Şekil 2.2. Sıvı soğutma yöntemleri, **a)** Sıvı daldırma; **b)** Jet üfleme; **c)** Sprey üflemeli; **d)** Dolaylı Soğutma sistemi (Anandan ve Ramalingam 2008) 11

Şekil 2.3. Isı pompasıyla soğutma yöntemi (Anandan ve Ramalingam 2008) 12

Şekil 2.4. Buhar sıkıştırmalı soğutma yöntemi **a)** Dolaylı temaslı**; b)** Doğrudan temaslı (Trutassanawin ve Groll 2004) 13

Şekil 2.5. Elektronik soğutma sistemlerinde kullanılan bazı akışkanlar (Mohaparta 2006) 15

Şekil 2.6. Metal köpük malzemelerin gözenek yapısı, **a)** Açık hücreli; **b)** Kapalı hücreli (Sertkaya 2013) 28

Şekil 2.7. Kum yatağından Darcy akışı (Khayargoli vd. 2004) 30

Şekil 2.8. Farklı gözenek yoğunluğuna sahip metal köpük ısı alıcılar 31

Şekil 2.9. Kanaliçi akışta hidrodinamik sınır tabakanın değişimi (Incropera vd. 2011) 33

Şekil 2.10. Kanaliçi akışta ısıl sınır tabakanın değişimi (Incropera vd. 2011) 35

Şekil 3.1. Saf CuO nanpartiküllerinin XRD spektrumları 58

Şekil 3.2. Saf ve Ag içeren CuO nanopartiküllerinin partikül boyut dağılımı eğrileri 59

Şekil 3.3. Saf CuO nanopartiküllerinin elektron mikroskonu görüntüsü ve partikül boyut dağılımı grafiği 60

Şekil 3.4. Hazırlanan nanopartiküllerin elektron mikroskonu görüntüsü ve partikül boyut dağılımı grafiği **a)** CuO-%0.03 Ag; **b)** CuO-%0.05 Ag 61

Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan nanoakışkanların görünümü 62

Şekil 3.6. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan piknometrenin görünümü 63

Şekil 3.7. Ölçümlerde kullanılan viskozimetre ve sabit sıcaklıklı su banyosunun görünümü 64

Şekil 3.8. Deney düzeneğinin görünümü, **a)** Önden görünüm; **b)** Üstten görünüm.....67

Şekil 3.9. Deney düzeneğinin şematik görünümü 68

Şekil 3.10. Test bölgesinin görünümü 69

Şekil 3.11. Test bölgesinin detaylı şematik çizimi 69

Şekil 3.12. Test bölgesinin boyutları (cm).....70

Şekil 3.13. Elektrikli ısıtıcının görünümü **a)** Özellikleri; **b)** Geniş açıdan görünümü ...70

Şekil 3.14. Alüminyum metal köpük ısı alıcıların görünümü.....71

Şekil 3.15. Çalışmada kullanılan termal ped 71

Şekil 3.16. Metal köpük ısı alıcıların montajı **a)** Montaj noktaları; **b)** Test bölgesinde görünümü 72

Şekil 3.17. Çalışmada kullanılan sabit sıcaklıklı su banyosunun önden ve yandan görünümü 73

Şekil 3.18. Çalışmada kullanılan fark basınç transmitteri ve dijital göstergenin görünümü 74

Şekil 3.19. Hacimsel debinin ölçümünde kullanılan elemanlar, **a)** Türbin tip debimetre; **b)** Dijital kontrol cihazı; **c)** By-pass hattı; **d)** Dalgıç pompa 75

Şekil 3.20. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan veri kayıt sistemi.....76

Şekil 3.21. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan veri kayıt sistemi.....77

Şekil 3.22. Çalışma parametrelerinin belirlenmesi **a)** Sabit ısı akısı; **b)** Hacimsel debi.....78

Şekil 4.1. Isı transferi açısından olumlu sonuçların alındığı nanoakışkanlarla hacimsel debiye göre basınç kaybı **a)** Boş yüzey; **b)** Tüm yüzeyler.....87

Şekil 4.2. Temel akışkan ve tüm yüzeylerde, hacimsel debiye göre yüzey sıcaklıklarının değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 89

Şekil 4.3. Temel akışkan ve tüm yüzeylerde, hacimsel debiye göre taşınımla ısı transferi katsayısının değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 92

Şekil 4.4. Temel akışkan ve tüm yüzeylerde, hacimsel debiye göre Nusselt sayısının değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 95

Şekil 4.5. Farklı kütlesel derişimlerde nanoakışkan kullanımı sonucu, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiye göre değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 98

Şekil 4.6. Surfaktan kullanımı sonucunda, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiye göre değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 101

Şekil 4.7. Farklı surfaktan ve Ag motifiye kütlesel oranlarında hazırlanan nanoakışkanların kullanımında, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiye göre değişimi 103

Şekil 4.8. Farklı surfaktan ve Ag motifiye kütlesel oranlarında hazırlanan nanoakışkanların kullanımında, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiyle değişimi, **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 104

Şekil 4.9. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılması sonucu, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiyle değişimi, **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 108

Şekil 4.10. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiylee değişimi, **a)** NA 16; **b)** NA 17; **c)** NA 18 111

Şekil 4.11. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, taşınımla ısı transferi katsayısının, hacimsel debiyle değişimi, **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 113

Şekil 4.12. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, taşınımla ısı transferi katsayısının hacimsel debiyle değişimi, **a)** NA 16; **b)** NA 17; **c)** NA 18 116

Şekil 4.13. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, Nusselt sayısının hacimsel debiyle değişimi, **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2 118

Şekil 4.14. 5400 W/m^2 ısı akısında nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, Nusselt sayısının hacimsel debiyle değişimi, **a)** NA 16; **b)** NA 17; **c)** NA 18 121

Şekil 4.15. Nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcısının kullanılması sonucu termal direncin hacimsel debiye göre değişimi 123

Şekil 4.16. Nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcısının kullanılması sonucu hacimsel debiye göre, **a)** Sürtünme katsayısı değişimi; **b)** Pompalama gücü değişimi 124

Şekil 4.17. Nanoakışkanların hacimsel debiye göre ısı transferi etkenliği değişimi 125

Şekil 4.18. Nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcısı kullanımının hacimsel debiye göre termal performans değişimi 126

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kullanım alanına göre elektronik cihazların çalışma aralıkları (Anonim 1) 5

Çizelge 2.1. Elektronik sistemlerin soğutulmasında kullanılan sıvıların 20 °C'deki özellikleri (Mohaparta 2006) 15

Çizelge 2.2. Bazı sıvı ve katıların termal iletkenlik katsayısı (2014 Sreelakshmy) 18

Çizelge 2.3. Partikül boytunun termal iletkenlik katsayısına etkisi (Angayarkanni ve Philip 2015) 21

Çizelge 2.4. Su bazlı nanoakışkanlarda partikül derişiminin viskoziteye etkisi (Rudyak ve Minakov 2018) 25

Çizelge 2.5. Alüminyum metal köpük malzemelerin termal iletkenliklerinin değişimi (Morales 2017) 32

Çizelge 2.6. Elektronik soğutma sistemlerinde nanoakışkan kullanımına dair diğer çalışmalar 46

Çizelge 3.1. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri 59

Çizelge 3.2. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri 62

Çizelge 3.3. Nanoakışkanların yoğunluk ölçümü 63

Çizelge 3.4. Nanoakışkanların viskozite ölçüm sonuçları 64

Çizelge 3.5. Nanoakışkanların, temel akışkana göre bağıl termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları 65

Çizelge 3.6. Nanoakışkanların, termofiziksel özellikleri 65

Çizelge 3.7. Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları 66

Çizelge 3.8. Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan kimyasal maddeler 66

Çizelge 3.9. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri 71

Çizelge 3.10. Çalışmada kullanılan termal pedin özellikleri 72

Çizelge 3.11. Sabit sıcaklıklı su banyosunun teknik özellikleri 73

Çizelge 3.12. Fark basınç transmitteri ve dijital teknik özellikleri 74

Çizelge 3.13. Türbin tip debimetre ve dijital göstergenin teknik özellikleri 75

Çizelge 3.14. Veri kayıt sisteminin teknik özellikleri 76

Çizelge 3.15. Veri kayıt sisteminin teknik özellikleri.....77

Çizelge 3.16. Test bölgesinin hesaplanan geometrik parametreleri 80

Çizelge 3.17. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm parametrelerin belirsizlik değerleri.....84

Çizelge 3.18. Hesaplanan parametrelerin belirsizlik oranı 84

Çizelge 4.1. Hacimsel debiye göre Reynolds sayısının değişimi 86

Çizelge 4.2. Hacimsel debiye göre basınç kaybındaki değişim, **a)** Tüm akışkanlar ve boş yüzey; **b)** Isı transferi açısından daha etkili sonuçların alındığı nanoakışkanlar ve tüm yüzeyler.....88

Çizelge 4.3. Nanoakışkan ve/veya metal köpük ısı alıcısı kullanımı sonucu boş yüzey ve temel akışkana göre yüzey sıcaklıklarındaki ortalama iyileştirme miktarı....112

Çizelge 4.4. Nanoakışkan ve/veya metal köpük ısı alıcısı kullanımı sonucu boş yüzey ve temel akışkana göre taşınımla ısı transferi katsaysında elde edilen ortalama iyileştirme miktarı 117

Çizelge 7.1. Örnek veriler ve analiz sonuçları (4817 W/m^2 ısı akısında, 50,6 L/h hacimsel debi) 141

Çizelge 7.2. Farklı modellerde, **a)** CPU (Intel Modelleri); **b)** CPU (AMD Modelleri); **c)** GPU (Nvidia ve AMD) maksimum çalışma sıcaklıkları (Kumawat 2022).....142

Çizelge 7.3. Intel ve AMD marka işlemcilerden populer olan modellerin optimum çalışma sıcaklığı aralığı (Kumawat 2020).....145

Çizelge 7.4. Bilinen bazı HDD (Geleneksel bellek) ve SSD (Yüksek hızlı bellek) modellerinin optimum çalışma sıcaklık aralığı (Kumawat 2020).....146

1. GİRİŞ

"Elektrik" ve "Elektronik sistemler" insan hayatının birçok alanda ayrılmaz bir parçası haline gelen, cihaz ve makineleri tanımlamak için kullanılan bu iki kelimenin günümüze kadar olan gelişimi MÖ. 600 tarihlerine kadar dayanmaktadır. İlk olarak MÖ. 600 yılında yaşayan Yunan filozof Miletli THALES, mıknatıs taşıyla kehribarın birbirine sürtülmesi sonucunda aralarında bir çekim olduğunu bulmuştur. Hatta çok daha fazla birbirine sürtülmesi sonucunda kıvılcım oluştuğunu gözlemiştir. THALES'in ardından MS. 1600 yılında İngiliz bilim adamı William GILBER yunanca "Amber (Elektron)" kelimesinden Latince "Elektricus" kelimesini türetmiştir ki sonrasında buradan yola çıkarak İngilizce "Electric (Elektrik)" ve "Elektricity (Elektrik Bilimi)" kelimelerinin türetilmesi sağlanmıştır. 1660 yılında Alman bilim adamı Otto Van GUERICKE tarafından sürtünme ile statik elektrik üreten makine üretilmiştir. GUERICKE'nin ardından 1675 yılında vakum ortamında keşfedilen elektriksel itme ve çekme etkileri, 1729 yılında iletken ve yalıtkan malzemelerin sınıflandırılması yapılmıştır.

Elektrik ve manyetizma ile ilgili yapılan birçok çalışmanın ardından Nikola TESLA'nın Alternatif akımı (AC) bulması ve bu kapsamda birçok alet yapmasının ardından, alternatif akımın popülerleşmesiyle ilk vakum tüp (diyot) 1904 yılında yapılmıştır. İlk vakum tüpünün ardından üç kanallı vaküm tüpü (Triyot) ve bugün kullandığımız radyonun başlangıcı olan ilk radyo alıcısı yapılmıştır. İlk mekanik televizyonun yapılmasının ardından 1928'de tamamen elektronik ilk televizyon üretilmiştir. Elektronik cihazların önem kazanması ve yapabildikleri işlev sayısının arttırılabilmesi amaçlı yapılan geliştirmelerin temel taşlarından biri olan transistörler, 1947 yılında John BARDEEN ve arkadaşları tarafından bulunmuştur. Transistörlerin keşfedilmesiyle modern elektronik sistemlerin başlangıcı atılmıştır.

Bilgisayarlar ve çeşitli hesaplama cihazlarının keşfedilmesinden önce, detaylı mühendislik hesaplamaları insanlar tarafından doğrudan yapılmaktaydı. Detaylı mühendislik hesaplamaları yapan insanlara, "hesaplamak" anlamında kullanılan, "Compute" kelimesinden yola çıkılarak hesaplamayı yapan kişi, yani Türkçe'de "Bilgisayar" anlamında kullanılan "Computer" denmekteydi. Genellikle, bilgisayar olarak işe alınan insanlar, erkeklere göre daha ucuz maaşlarda çalışmalarından dolayı çoğunlukla kadınlardan seçilmiştir. Günümüzde, kullandığımız modern bilgisayarların bulunmasıyla hesaplama işlemlerini yapan kişiler, insan bilgisayar anlamında kullanılan "Human Computer" olarak adlandırılmaktadır. Bilgisayar (Computer) kelimesinin, ilk olarak mekanik ve elektronik cihazları tanımlamada kullanılmasına yakın yıllarda başlamıştır. 1942 yılında Atanasoff-Berry Bilgisayarı (ABC), 1944 yılında ise 2500 vakum tüplü 2. Dünya Savaşında kullanılan Colossus üretilmiştir. 1951 yılında kendisinden önce üretilen bütün bilgisayarlardan 1000 kat daha hızlı olan ENIAC üretilmiştir. Bilgisayar teknolojisinin büyük bir önem kazanmasıyla birlikte 1949 yılında matematik denklemleri için kullanılan ilk dijital tamburlu diferansiyel analiz cihazı MADIDA'ın ardından, 1950 yılında manyetik belleği olan ERA 1101 piyasaya çıkarılmıştır. 1958 yılında ilk entegre devre (Mikroçip) üretimi yapılmıştır. Aynı yıllarda dünyanın ilk ticari bilgisayarı olan Ferranti Mark 1'in üretimi ve satışı yapılmıştır. Bütün ülkeler arasında büyük bir yarışa neden olan ve gitgide daha teknolojik hale getirilen bilgisayarlara zaman içinde NEAC 2203, IBM 7030, IBM 1400, LINC ve zamanının en hızlı bilgisayarı olarak kabul edilen ATLAS eklenmiştir. Teknolojinin büyük bir hızla gelişmeye başlamasıyla, üretilen bütün bilgisayar modellerinde aranan, günümüzde de

elektronik teknolojisinde büyük bir öneme sahip olan yüksek işlem hızı ve küçük boyutlar ön plana çıkmıştır. Bu kapsamda 1964'te dünyanın en hızlı bilgisayarı olarak adlandırılan CDC 6600, birinciliğini 1968'te CDC 7600'e bırakmıştır.

Gün geçtikçe daha hızlı ve daha küçük boyutlu bilgisayarların ön plana çıkmasıyla dünyanın ilk 16 bit (binary digit) mini bilgisayarı olan, DDP-116 1965'te yapılmıştır. İlk HP bilgisayar, HP-2116A 1966'da üretilmiştir. Aynı yıllarda Intel, ilk mikroişlemci olan ve 2250 adet transistöre sahip Intel 4004'ü piyasaya sunmuştur. Intel 4004, saniyede 90.000 işlem yapabilmektedir. Intel 4004 ile aynı yıllarda çıkmış ve büyük yankı uyandırmış diğer bir elektronik cihaz ise Xerox 9700, dünyanın ilk lazer yazıcısıdır. Alto firması lazer yazıcının yanında Xerox PARC bilgisayarını tanıtmıştır. Xerox PARC bilgisayarı yakın yıllarda kullanıma başlayan, günümüzdeki işletim sistemlerine benzer şekilde pencerelerden oluşan ve işlemler için ikon bulunduran kullanıcı arayüzü, fare (Mouse) ve yerel internet ağından faydalanarak kullanıcıya geniş bir çalışma alanı vermektedir. 1976 ve 1977 yıllarında ise günümüzde birçok kişinin vazgeçilmezi olan elektronik markası Apple, sırasıyla "Apple I" ve "Apple II" bilgisayarlarını piyasaya çıkmıştır. Oyun dünyasının ve çocukluğumuzun bir zamanlar vazgeçilmezi olan "Atari" ise Apple II ile aynı yıllarda çıkmıştır. Atari, daha sonrasında 1979 yılında sırasıyla çıkardığı 400 ve 800 modelleriyle aynı yıllarda kullanılan Apple II, Commodore PET ve TRS-80 bilgisayarlarıyla piyasada yarış haline girmiştir. 1981 yılında üretilen ve IBM firmasının ilk kişisel bilgisayarı "IBM PC" (Personal Computer) bilinen adıyla IBM Model 5150 piyasaya sürülmüştür. 4.77 MHz, Intel 8088 mikroişlemcisine sahip IBM MODEL 5150, Microsoft'un MS-DOS işletim sistemiyle çalışmaktadır. 1982 yılında ise zamanının en çok satan bilgisayarı olarak Guinness rekorlar kitabına giren Commodore 64 bilgisayarı piyasaya sürülmüştür. Dünya çapında teknoloji ve piyasa yarışının büyük bir hızla artmasıyla günümüze kadar Macintosh, Amiga 1000, J-Phone J-SH04 (İlk kameralı cep telefonu) vb. çeşitli bilgisayarlar ve elektronik cihazlar üretilmiştir (Anonim 1; Bhuyam 2016).

Üretilen her bir elektronik cihazda aranan en önemli özellikler;

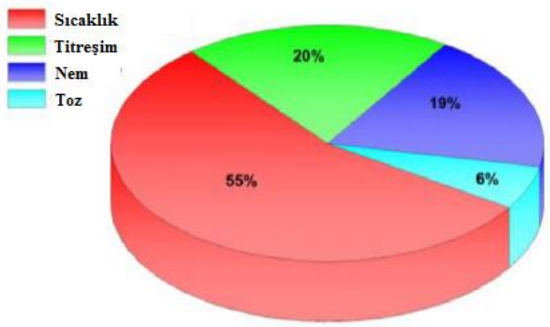
- İşlem Hızı
- Daha küçük boyut
- Kolay kullanım
- Daha ucuz fiyat
- Grafik ve görsellik
- Çok fonksiyonlu olabilmesidir.

Yukarıda belirtildiği gibi, elektronik cihazların hem daha fazla işlem hızına sahip olması, hem de daha çok fonksiyonu bir arada yerine getirebilmesi için elektrik akımı gerekmektedir. İçerisinden elektrik akımı geçen elektronik elemanların her biri, fazla enerjisini dışarı atamadığı için ısınmaya başlar. Artan işlem hızı ve fonksiyonların yanında, cihaz boyutlarının da küçülmesi, dar alanda daha çok ısı üretimine neden olmaktadır. Elektronik eleman üzerindeki ısı miktarının artması da yüzey sıcaklığının normalde olması gerekenden daha fazla yükselmesine neden olmaktadır. Bu sıcaklık yükselmesi, bir dereceye kadar tolere edilebilirken, belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda ise elemanın performansının düşmesine ve hatta artan sıcaklıkla birlikte yanma sonucu kullanılmaz hale gelmesine neden olmaktadır. Bu durum, elektronik sistemlerde parça kaybına ve parça değişimine neden olmaktadır. Elektronik elemanlarda

meydana gelen her bir parça kaybı kullanıcı için ekstra maliyete ve ürüne olan ilginin düşmesine neden olmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, elektronik eleman sıcaklıklarının azalan boyutlarla birlikte büyük bir sorun teşkil etmesi nedeniyle, her bir eleman üzerinde biriken ısının uygun soğutma yöntemleriyle uzaklaştırılması gerekmektedir. Soğutma yöntemlerinin yetersiz kalması durumunda, üretilen elektronik cihazlar kullanım esnasında performans düşümü veya parça kaybı nedeniyle popülerliğini yitirmekte ve teknolojik pazar yarışında kendine yer bulamaz hale gelmektedir. Bu sebeple, elektronik cihazlarla birlikte eş zamanlı olarak geliştirilen elektronik sistemlerde uygun soğutma yöntemlerinin geliştirilmesi ve kullanılmasının ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmıştır.

1.1. Elektronik Soğutma Sistemleri ve Kullanılan Malzemeler

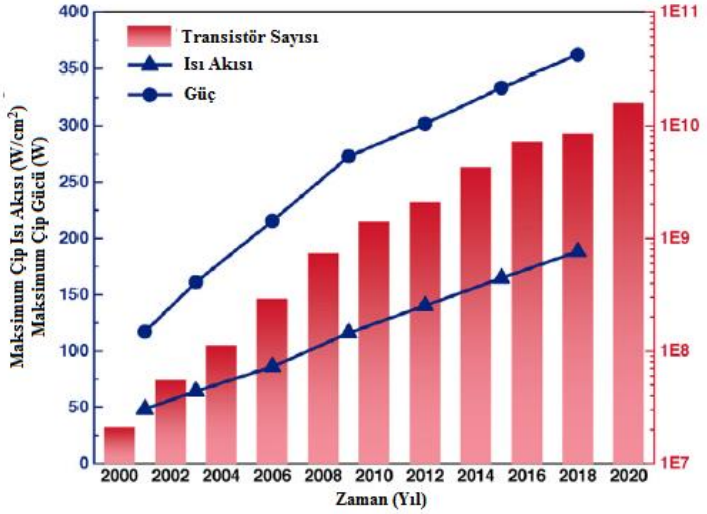
Elektronik cihazların zarar görerek çalışamaz hale gelmesinin birden fazla nedeni (Sıcaklık, titreşim, nem, toz vb.) vardır. Eleman sıcaklığı, elektronik cihazlarda en çok karşılaşılan hasar nedenidir. Çoğunlukla meydana gelen hasarlar ve yüzde dağılımları Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Elektronik cihazlarda çoğunlukla meydana gelen hasarlar ve yüzde dağılımları (Zhang vd. 2021)

İlk adımları 20. yüzyılın başlarında atılan, elektronik cihazlarda oluşan fazla ısının sistemden uzaklaştırılarak dışarı atılarak, yüzey sıcaklığının düşürülmesi ve devamlılığın sağlanabilmesi için kullanılan elektronik soğutma sistemleri, 1950 yılından itibaren belirgin olarak kullanılmaya ve geliştirilmeye başlanmıştır. 1950'den öncesinde sadece kayıtlı birkaç çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları için örnek verilecek olursa, Cockcroft tarafından transformatör üzerindeki sıcaklık dağılımını incelenmesi, Mouromsteff ve Kozanowski'nin 1920 ve 1930 yıllarında yüksek güçlü vakum tüplerini su ve hava ile ayrı ayrı soğutma çalışmaları, Elenbaas tarafından elektrikli ekipman soğutma için tasarlanmış, ısıtılan plakalar arasında doğal konveksiyonda ısı transferinin incelenmesidir. Modern bilgisayar çağının başlangıcı kabul edilen, ENIAC'ın (The Electrical Integrator and Cumputer) tasarlanmasıyla birlikte elektronik soğutma sistemlerinin geliştirilmesi de hızlanmıştır. Zamanının en iyi bilgisayarı kabul edilen ENIAC, 30 ton ağırlığında ve yaklaşık bir yük vagonu boyutlarındadır. ENIAC üzerinde büyük miktarda ısı yüküne sahip toplamda 18.000 adet vakum tüpünü taşımakta olduğundan, soğutma işlemi için birçok endüstriyel fan kullanılmıştır (Bergles 2003).

1947 yılında bulunan transistörler elektronik cihazların gelişiminde büyük bir rol oynarken, elektronik soğutma sistemlerinin de ilk adımlarının atılmasını sağlamıştır. Transistörler, vakum tüplerine göre daha küçük boyutta ve daha düşük enerji gereksinimiyle çalışırlar. Boyutunun küçük olması ve düşük enerji gereksinimi sayesinde transsitörler, vakum tüplerine göre daha az ısı yayarlar. Hemen hemen tüm elektronik sistemlerde transistörlerin kullanılmasına rağmen vakum tüplerinin de kullanıldığı yüksek enerjili sistemler bulunmaktadır. Transsitörler günümüzde elektronik cihazlarda kullanılan en temel devre elemanıdır. Transistör sayısına bağlı olarak elektronik elemanların hem farklı işlevleri yerine getirebilme yeteneği hem de çalışma hızı artar. Bu kapsamda, üzerinde birden fazla transistör bulunduran çip veya entegre devreler, ilk olarak 1950 yıllarının sonlarına doğru üretilmiştir ve üzerinde dört adet transistör bulunmaktadır. Daha sonrasında teknolojinin gelişmesiyle birlikte 1971 yılında Intel firması tarafından geliştirilen ilk mikroişlemci olan Intel 4004 üzerinde 2300 adet transistöre sahiptir. 1965 yılında Gordon Earle MOORE'un "Electronics" dergisinde yayınladığı bir çalışmasında, 18 ayda bir üretilen her yeni mikroişlemcinin üzerinde, bir öncekine göre iki kat daha fazla transistör bulunduracağından bahsetmiştir. Bunun sonucu olarak, her yeni mikroişlemcinin bir öncekinden daha fazla işlem yapabileceğini belirtmiştir. Moore'un bu açıklaması, daha sonraki yıllarda her iki yılda bir üretilen mikroişlemcilerin iki kat daha fazla transistör taşıyacağı şeklinde güncellenmesi sonucu "Moore yasası" olarak kabul edilmiştir. Ancak, artan transistör sayısına bağlı olarak elektronik elemanların soğutulması zorlaşmaktadır. Çünkü her biri çalışırken ısı enerjisi ürettiği için, artan transistör sayısına bağlı olarak elektronik elemanların ısınma hızı artar (Wilson 2005; Guarnieri 2016). Bu kapsamda geliştirilen "Black" eşitliğiyle elektronik elemanın sıcaklığı ile arızaya uğrama süresi arasında bir ilişki kurulmuştur. Black eşitliğine göre, bir elektronik elemanın sıcaklığının artmasıyla arızaya uğrama sürecinin hızlanacağı belirtilmektedir (Black 1969). Bu durum Şekil 1.2'de elektronik çiplerin içinde bulunan transistör sayısı göz önüne alınarak, yaydıkları ısı akısı, kullandıkları güç miktarı yıllara göre verilmiştir. Günümüzde, gelişmiş sunucu ekipman çiplerinin ısı akısı 1 MW/m^2 iken, faz dizili radar ve diğer ekipmanların yaydığı ısı akısı ise 5-10 MW/m^2'a kadar ulaşabilmektedir. Bu durumda, cihazın veya makinenin uygun çalışma sıcaklık aralığında ve yüksek performansla, güvenli bir şekilde çalışabilmesi, kullanılan soğutma sisteminin başarısına bağlıdır (Zhang vd. 2021). Elektronik sistemler, kullanım alanlarına göre farklı çalışma sıcaklık aralığına sahiptirler. Aşağıda Çizelge 1.1'de elektronik cihazların çalışma sıcaklık aralıkları verilmiştir (Anonim 1).



Şekil 1.2. Çiplerin içerisinde bulunan transistör sayısına bağlı olarak yıllara göre ısı akısı ve güç değişimi (Zhang vd. 2021)

Çizelge 1.1. Kullanım alanına göre elektronik cihazların çalışma aralıkları (Anonim 1)

Sınıf	Çalışma Sıcaklık aralığı (°C)
Ticari	0 ila 70
Endüstriyel	-40 ila 85
Askeri	-55 ila 125

Birçok elektronik cihazda olduğu gibi, bilgisayarlarda da işlemcilerin ve diğer devre elemanlarının sağlıklı ve performanslı çalışabilmesi için belirli bir çalışma sıcaklığının altında tutulması gerekmektedir. Bilgisayarlarda kullanılan program sayısına ve işlem yoğunluğuna bağlı olarak çiplerde gereken güç miktarı ve üzerinde biriktirdikleri ısı miktarı değişmektedir. Çiplerin herhangi bir işlem yapılmadan bekleme durumunda veya kullanım durumunda çalışması için gerekli güç ve yaydığı ısı miktarında belirgin farklar bulunmaktadır. Bu kapsamda, çiplerde yapılacak soğutma uygulamasının seçiminde maksimum çalışma kapasitesi dikkate alınmalıdır.

Bilgisayarlarda bulunan elektronik elemanlar incelendiğinde, çalışma esnasında yüksek performansları ve küçük boyutları sebebiyle CPU (Mikroişlemci) ve GPU'nun (Ekran kartı) daha fazla ısı yaydığı görülmüştür. Kullanılan soğutma sistemleri, genellikle bu iki elemanın çalışma sıcaklığına ve bulundukları alanın tasarımına göre seçilirler. En genel haliyle bu elemanların maksimum çalışma sıcaklıkları, CPU'lar için 65˚C ila 105 ˚C, GPU'lar için ise 88 ˚C ila 105 ˚C aralığındadır. EK-2-Çizelge 7.2'de farklı CPU ve GPU modellerinin maksimum çalışma sıcaklıkları, EK-2-Çizelge 7.3'te ise optimum çalışma sıcaklık aralıkları verilmiştir. Verilen çizelgelerde CPU ve GPU modellerinde, maksimum çalışma sıcaklığının üzerine çıkılması, belirli bir sürenin sonunda performans düşümüne, daha sonrasında ise zarar görerek kullanılamaz hale gelmesine neden olmaktadır. İşlemcilerin yüksek performansta ve uzun ömürlü kullanılabilmesi için EK-

2-Çizelge 7.3'te verilen optimum çalışma sıcaklık aralığının dışına çıkılmamalıdır. Benzer durum bilgisayarlarda bulunan diğer elemanlarda da geçerlidir. Bu kapsamda bilgisayarlarda veri depolamada kullanılan sabit disk sürücüleri HDD (Hard Disk) ve SSD çalışma sıcaklıkları aralığı EK-3-Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Elektronik cihazların boyutlarında ve performanslarında yapılan güncellemelerin getirdiği diğer bir sorun ise maliyetlerin artmasıdır. Ancak maliyetlerin artmasının tek nedeni boyutların küçülmesi, yeni veya güncellenmiş elektronik elemanların kullanılması değildir. Aynı zamanda, artan performanslarla birlikte cihazın çalışması için gerekli olan enerji tüketimi de artmaktadır. Bu durum, günlük hayatımızda kullandığımız elektronik cihazlarda belirgin bir fark oluşturmamasına rağmen, sanayi, askeri, sağlık sektörü gibi alanlarda enerji tüketiminde büyük farklara neden olmaktadır. Üretilen her yeni cihazın pazarda yerini alabilmesi için performans dışında aynı zamanda fiyatının da uygun olması gerekmektedir. Aksi takdirde, alıcı bulamayan bir cihazın üretilmesinin bir anlamı olmadığı gibi geleceğe yönelik devamlılığı da yoktur.

Elektronik soğutma sistemlerinde verimliliği arttırmak amacıyla yapılan araştırmalar iki farklı gruba ayrılmıştır. Araştırmacıların bir kısmı daha yüksek temas yüzey alanını sağlayacak malzemeler veya tasarımlar üzerinde çalışırken, bir kısmı ise kullanılan soğutma akışkanının temas alanını veya termal iletkenliğini arttırmaya yönelik çalışmalar yapmaktadır. Bu kapsamda, temas yüzey alanı arttırmak için yüksek termal iletkenliğe sahip kanatçıklı ısı alıcılar, mikro kanallar, tümsekler-çukurlar vb. birçok çalışma yapılmıştır. Isıyı sistemden uzaklaştırmak amacıyla farklı tipte birçok akışkan karışımı, faz değiştiren malzemeler, mikroakışkanlar, nanoakışkanlar, organik-inorganik akışkanlar vb. maddeler araştırılmaya başlanmıştır.

Günümüzde güç santralleri, elektronik sistemler, iklimlendirme, nükleer sistemler, uzay ve savunma sanayi, ulaşım vb. birçok alanda su, yağ, etilen/propilen glikol gibi akışkanlar kullanılmakta olup termal özellikleri bazı katı maddelere göre oldukça düşüktür (Gupta vd. 2017). Bu kapsamda araştırmacılar, katı bazı malzemelerin (metaller, metal oksitler, CNT vb.) yüksek termal özelliklerinden faydalanarak daha etkin soğutma yapmanın yollarını araştırmaktadırlar. Yapılan çalışmalar sonucunda farklı tanecik boyutlarında miliakışkan, mikroakışkan vb. incelemeler neticesinde hala araştırılmakta ve geliştirilmekte olan nanoakışkanlar ortaya çıkmıştır. Nanoakışkanlar, temel akışkanın içerisine (Su, etilen glikol vb.) nanometrik boyutta (100 nm'den küçük.) termal iletkenliği yüksek katı partiküllerinin eklenmesiyle hazırlanmakta olup, günümüzde en çok araştırılan yenilikçi soğutma akışkanlarından birisidir. Nanoakışkan fikrinin temeli 1873 yılında Maxwell'in çalışmalarına dayansa da nanoakışkan isminin kullanılması ve ilk uygulamaları 1995 yılında Choi ve Eastman tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda akışkanın içerisine çok az miktarda bile katı nanopartikül eklenmesinin termal iletkenliği temel akışkana göre büyük miktarda arttırdığını görülmüştür (Gupta vd. 2017). Ancak hala nanoakışkanların üretimi, stabilitesi, termal özellikleri ile ilgili bazı çelişkiler ve çözülememiş problemler bulunmaktadır.

Elektronik sistemlerde, termal verimliliği arttırmak ve daha yüksek ısı transferi sağlamak amaçlı üretilen yenilikçi malzemeden biri ise metal köpük ısı alıcılardır. Temelinde doğada buluna odun, kemik, doğal köpük vb. malzemelerden esinlenerek üretilen metal köpük malzemeler, yüksek alan/hacim oranına sahiptirler. Bu yüzden, elektronik cihazlarda boyutların küçülmesiyle daralan soğutma alanlarında, metal köpük

ısı alıcıların kullanılmasının yenilikçi bir çözüm yolu olduğu düşünülmektedir. Köpük malzemeler genel olarak bir metal veya alaşım eriğinin içerisinden gaz geçirilmesi ile üretilen malzemelerdir. Metal köpük malzemeler, açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere iki çeşittir. Bu iki farklı hücre yapısındaki metal köpük malzemelerin farklı gözenek yoğunluğu, şekli, malzemesi gibi üretilen örnekleri mevcuttur.

Literatürde nanoakışkanlar ve metal köpük malzemeler ile ilgili farklı ısıl uygulamalar konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak hem nanoakışkanın, hem de metal köpük malzemelerin elektronik sistemlerde bir arada kullanıldığı çalışmaların çok az sayıda olduğu görülmüştür. Özellikle kanal içi çalışmaların yok denecek kadar sınırlı sayıda olduğu dikkati çekmiştir. Metal köpük ısı alıcıların, kanal içerisine ayrık olarak yerleştirilerek ısı transferine etkisinin incelendiği çalışmalar çok azdır ve olanların neredeyse tamamı nümerik çalışmalardır. Aynı zamanda, yapılan çalışmalarda birçok farklı metal oksit – su nanoakışkanlarıyla denemeler bulunmaktadır. Ancak yapılan bütün çalışmalarda, kullanılan nanoakışkanlar arasında malzeme (Temel akışkan ve nanopartikül), üretim şekli, katkı vb. birçok faktöre göre değişiklikler bulunmaktadır. Nanoakışkan üretiminde yukarıda belirtilen faktörlerden birinde meydana gelen değişiklik, akışkanın termofiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, nanoakışkan konusunun ısıl sistemlere uygulanabilirliğinin tam anlamıyla oturmadığı ve hala bu konu ile ilgili çalışmaların ve araştırmaların sürdürülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

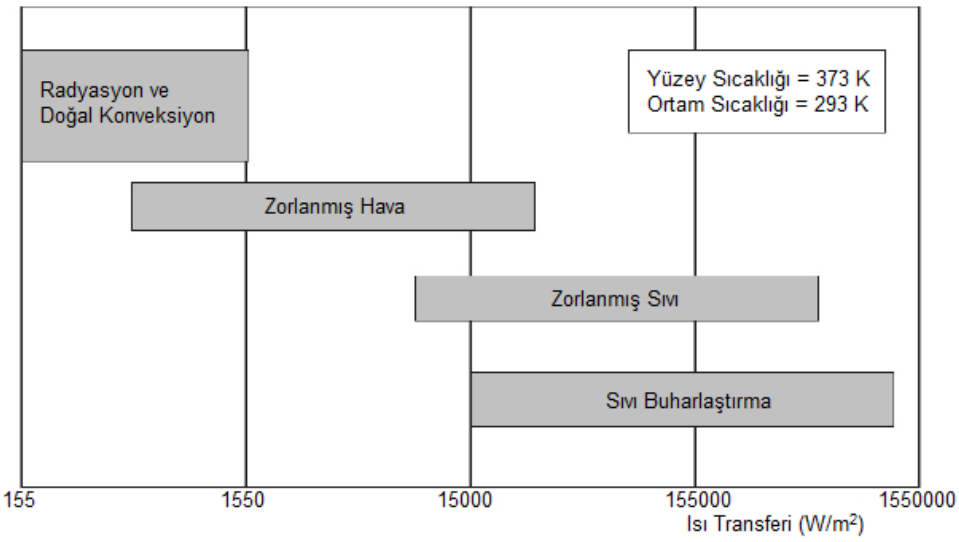
Bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak, dikdörtgen bir kanal içerisine ayrık olarak yerleştirilmiş alüminyum (Al-6101) metal köpük ısı alıcılardan olan ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir. Soğutucu akışkan olarak, yüzeyine Ag atomu motifiye edilmiş CuO-su nanoakışkanı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan nanoakışkanın, üretiminden kullanımına kadar her bir işlem adımı detaylı olarak verilmiştir. Bu kapsamda deneylerde farklı kütlesel derişimlerde, farklı katkılarla (surfaktan,ve yüzeye Ag motifiye) ve farklı nanopartikül boyutlarında hazırlanan nanoakışkanlar kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerde akışkanın ısı transferine etkisinin iyileştirilmesinde hangi özelliğin daha etkili olduğu belirlenmiştir. En uygun akışkan derişimi belirlendikten sonra, akışkan üzerinde katkı ve/veya modifikasyon çalışmaları yapılmıştır. Uygun nanoakışkanın belirlenmesinden sonra, artan yüzey alanının da ısı transferine etkisini incelemek amacıyla kanal içerisine ayrık olarak yerleştirilmiş metal köpük ısı alıcılarla deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar saf suyla yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Elektronik Soğutma Yöntemleri

Elektronik sistemlerde kullanılan soğutma yöntemleri, genel olarak pasif ve aktif olmak üzere ikiye ayrılırlar. Pasif soğutma yöntemleri mekanik eleman (fan, pompa vb.) içermeyen basit sistemlerdir ve aktif sistemlere göre daha düşük soğutma performansına sahip oldukları için kullanım alanları daha sınırlıdır. Aktif soğutma sistemleri ise mekanik elemanlarla desteklenmesinin yanında, performans kontrolü, ortam sıcaklığının altında soğutma gibi avantajları bulunmasıyla birlikte pasif sistemlere göre daha karmaşıklardır. Pasif sistemlerin hemen hemen hepsinde, soğutma performansını arttırmak amaçlı plakalı, iğneli gibi çeşitli ısı alıcılar kullanılmaktadır. Aktif soğutma sistemlerinde tercih edilen yönteme (Hava veya sıvı ile soğutma, faz değiştiren malzeme ile soğutma, Buhar sıkıştırmalı soğutma vb.) göre ısı alıcısı kullanılabilir. Yüzey ile ortam arasındaki sıcaklık farkının 80 °C olduğu bir durumda, ısı transferi yöntemlerinin verimliliği Şekil 2.1'te verilmiştir (Scott 1974).

- Radyasyon ve doğal konveksiyon (155 – 1550 W/m^2)
- Zorlanmış hava ile soğutma (800 – 16000 W/m^2)
- Zorlanmış sıvı ile soğutma (1100 – 930000 W/m^2)
- Sıvı buharlaştırma (15500 – 1400000 W/m^2)



Şekil 2.1. Isı transferi metotlarının karşılaştırılması (Anandan ve Ramalingam 2008)

Elektronik sistemlerde kullanılan soğutma yöntemleri genel olarak aşağıdaki gibi gruplandırılabilir. Bunlar,

- Hava ile soğutma,
- Sıvı ile soğutma,
- Isı pompası,
- Buhar sıkıştırmalı soğutma,

- Termoelektrik soğutma,
- Faz değiştiren malzeme tabanlı soğutmadır.

2.1.1. Hava ile soğutma

Vakum tüpünün (Diyot) bulunmasından bu zamana kadar üretilen bütün elektronik cihazlarda, kolay kullanım ve basit olması nedeniyle yaygın olarak kullanılan soğutma yöntemidir. Hava ile soğutma yöntemlerinde yapılan ilk örnekler doğal konveksiyonla ısı transferi üzerinedir. Daha sonra, doğal konveksiyonla ısı transferinin gelişen teknolojiyle yetersiz kalması sonucunda, bir fan veya üfleyici yardımıyla zorlanmış konveksiyonla soğutmaya geçilmiştir.

2.1.1.1. Doğal konveksiyon

Doğal konveksiyon ile soğutma sistemleri, basit olmaları ve az yer kaplamlarıyla çoğunlukla düşük güç tüketimi olan sistemlerde tercih edilirler. Soğutucu akışkan olarak genellikle hava kullanılır. Yüzeyden ısının uzaklaştırılması, sıcaklığa bağlı olarak yoğunluk farkıyla sağlanmaktadır. Ek bir fan veya üfleyici gibi bir elemana ihtiyaç duymazlar. Elektronik elemanlar tarafından tüketilen güç miktarının artmasıyla, artan ısıl yüklerin giderilmesi için eleman malzemesi, devre kartına montaj şekli gibi birtakım ayarlamalar yapılmıştır. Buna ek olarak, artan temas yüzey alanının ısı transferini iyileştirmesinden faydalanmak amacıyla eleman üzerine termal iletkenlik katsayısı yüksek malzemeden yapılmış farklı boyut, şekil ve kanatçık sayısında ısı alıcılar yerleştirilmektedir. Isı alıcıyla elektronik elemanın yüzeyi arasında tam temasın sağlanması ve aradaki hava boşluklarının giderilmesi için termal iletkenlik katsayısı yüksek macun veya ped malzemeler geliştirilmiştir. Doğal konveksiyonla soğutulan cihazlara televizyon, VCD oynatıcı vb. örnek verilebilir (Anandan ve Ramalingam 2008).

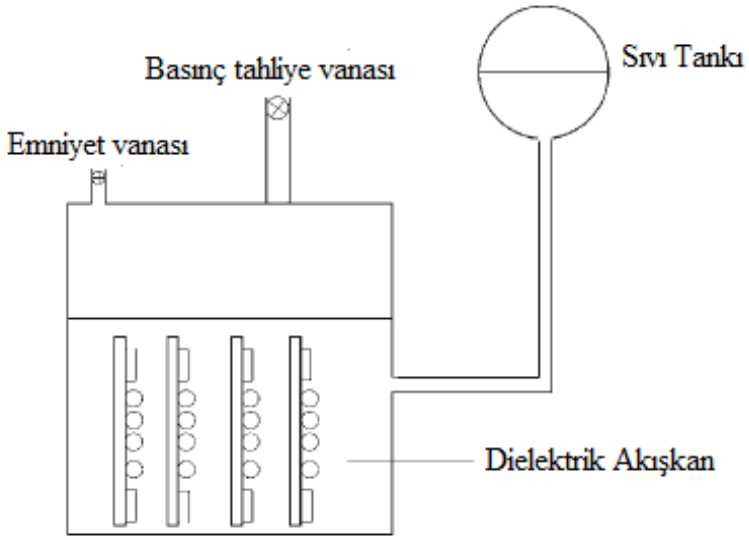
2.1.1.2. Zorlanmış konveksiyon

Zorlanmış konveksiyon, doğal konveksiyonla soğutmaya göre daha yüksek güç tüketimi olan sistemlerde kullanılır. Tercih edilen akışkan tipine ve soğutma uygulanacak sistemin şartlarına göre, fan, pompa, piezoelektrik fan gibi elemanlar kullanılmaktadır. Isı transferinin yetersiz kalması durumunda farklı tipte ısı alıcılar elemana monte edilerek temas yüzey alanı arttırılabilir. Genellikle zorlanmış konveksiyonla soğutma uygulamalarında akışkan olarak hava kullanılır. Yüksek güç tüketimi olan elektronik elemanlarda hava yerine termal iletkenlik katsayısı yüksek akışkanlar tercih edilmektedir. Piezoelektroik fan veya pompa gibi elemanların zorlanmış konveksiyonla soğutmada kullanımı son zamanlarda yaygınlaşmıştır. Elektronik elemanın üzerinde biriken ısı miktarının düşük olduğu sistemlerde, daha sessiz ve daha az güç tüketiminden dolayı piezoelektrik fanlar tercih edilirken, yüksek güç tüketimi olanlarda ise miktarına göre jet üfleme veya sıvı soğutma sistemleri de kullanılmaktadır.

2.1.2. Sıvı ile soğutma

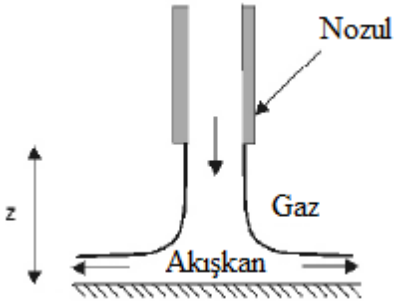
Elektronik sistemlerde hava ile soğutma yöntemleri yüksek güç tüketimi olan uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Bu kapsamda havaya göre daha yüksek termal iletkenlik katsayısına sahip olan sıvılar kullanılmaya başlanmıştır. Sıvı ile soğutma sistemlerinin kendi içerisinde doğrudan sıvı ile temaslı olan sıvıya daldırma, jet üflemeli, sprey üflemeli ve dolaylı soğutma sistemleri gibi birçok türü bulunmaktadır. Dolaylı soğutma sistemlerinde sıvı doğrudan elektronik elemanlarla temas etmez. Bunun yerine, soğutma sıvısı su bloğu veya soğuk plaka gibi ısınan yüzeyle temas halinde bulunan bir

ekipmanın içerisinden geçer. Doğrudan sistemlerde ise sıvı, bütün yüzeylerle temas halindedir ve su jeti gibi bir ekipman ile yüzeye püskürtülürler. Sıvı soğutma sistemlerinin havayla soğutma sistemlerine göre, avantajlarının yanında bazı önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan biri elektronik sistemlerin küçülen boyutlarıdır. Hava ile soğutma sistemlerinde akışkanın bir yerden başka bir yere aktarılması için gerekli kanal boşluklarının yapılması ve fan konması yeterli iken sıvı soğutma sistemlerinde kullanılan ekipmanlar için de ayrıca bir yer bırakılmalıdır. Sıvı soğutma sistemlerinde, akışkanın depolanması için tank, borular, pompa, radyatör ve kullanılan akışkana göre pislik tutucu gibi elemanlar gerekmektedir. Bu durumda, sıvı soğutma sistemlerinin uygulanacağı elektronik sistemlerde tasarım aşamasındayken, gerekli alanların bırakılması gerekmektedir. Sıvı soğutma sistemlerinin uygulamasında karşılaşılan başka bir sorun ise sızdırma problemidir. Hava ile soğutmada, hava kaçağı olmasının elemanlara doğrudan bir zararı olmaz iken sıvı uygulamalarında bu durum kısa devrelere, hatta elemanın kullanılamaz hale gelmesine neden olabilir. Ancak istisna bir durum olan doğrudan sıvı ile soğutma sistemleri bu durumun dışında tutulmalıdır. Dolaylı soğutma sistemlerinde su bloğu veya soğuk plaka gibi elemanların kullanılmasıyla akışkan ile elemanın doğrudan teması olmadığından, sızdırmazlığının iyi bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Şekil 2.2'de elektronik sistemlerde kullanılan bazı sıvı soğutma yöntemleri verilmiştir.

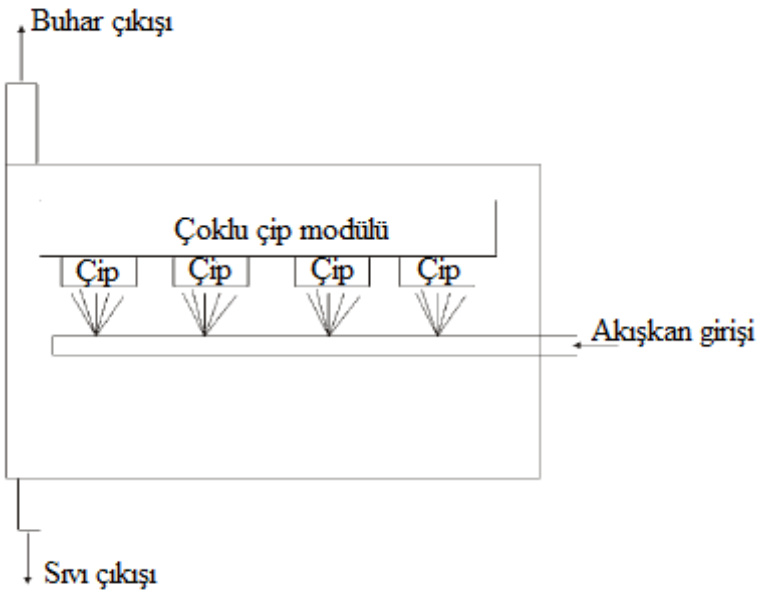


(a)

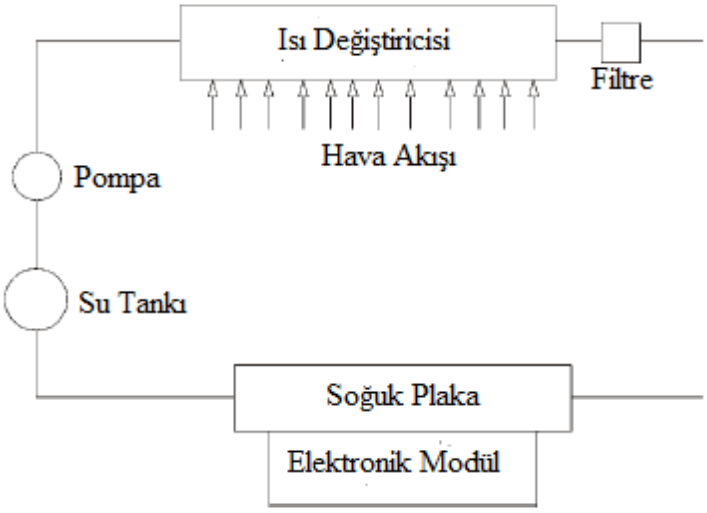
Şekil 2.2. Sıvı soğutma yöntemleri, **a)** Sıvı daldırma; **b)** Jet üfleme; **c)** Sprey üflemeli; **d)** Dolaylı Soğutma sistemi (Anandan ve Ramalingam 2008)



(b)



(c)

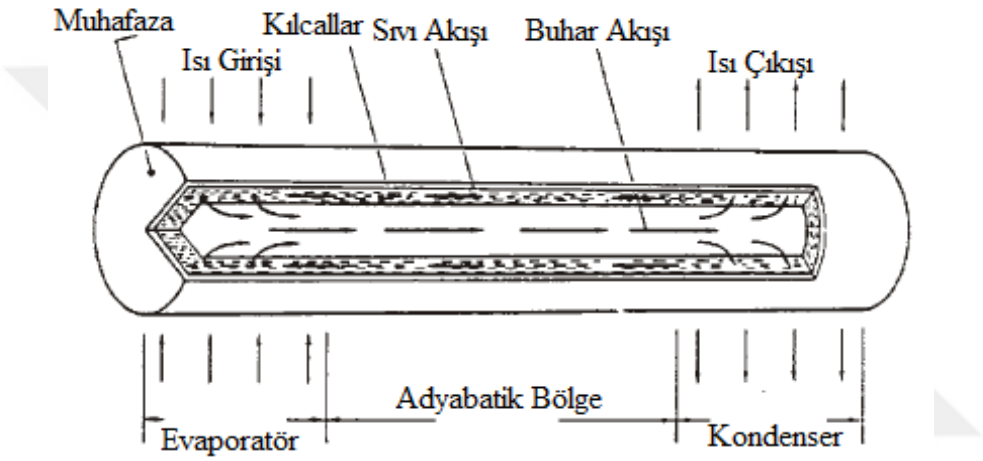


(d)

Şekil 2.2.'nin devamı

2.1.3. Isı pompası

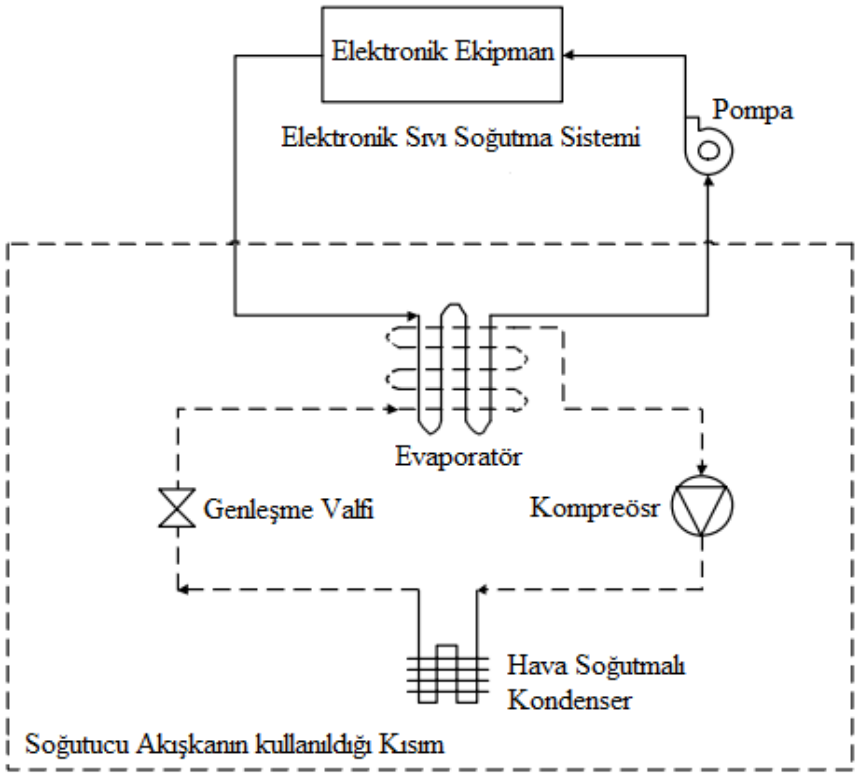
Isı pompasıyla soğutma uygulamaları yüksek miktarda ısıyı sistemden uzaklaştırabilen iki fazlı pasif yöntemlerdir. Bu sistemler yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve adyabatik bölge olmak üzere üç kısımdan meydana gelmektedir. Buharlaştırıcı kısmına ısı uygulandığında soğutma akışkanı buharlaşarak faz değiştirmektedir. Meydana gelen basınç farkıyla buhar ısısını dışarı atmak ve tekrar sıvı fazına geçmek için kondenser kısmına aktarılmaktadır. Bu şekilde, çevrim ısı uygulandığı sürece devam etmektedir. Kullanılan akışkan sistemin çalışma sıcaklığına göre değişmektedir (Anandan ve Ramalingam 2008). Elektronik sistemlerin soğutulmasında ısı pompası kullanımın şematik görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir.



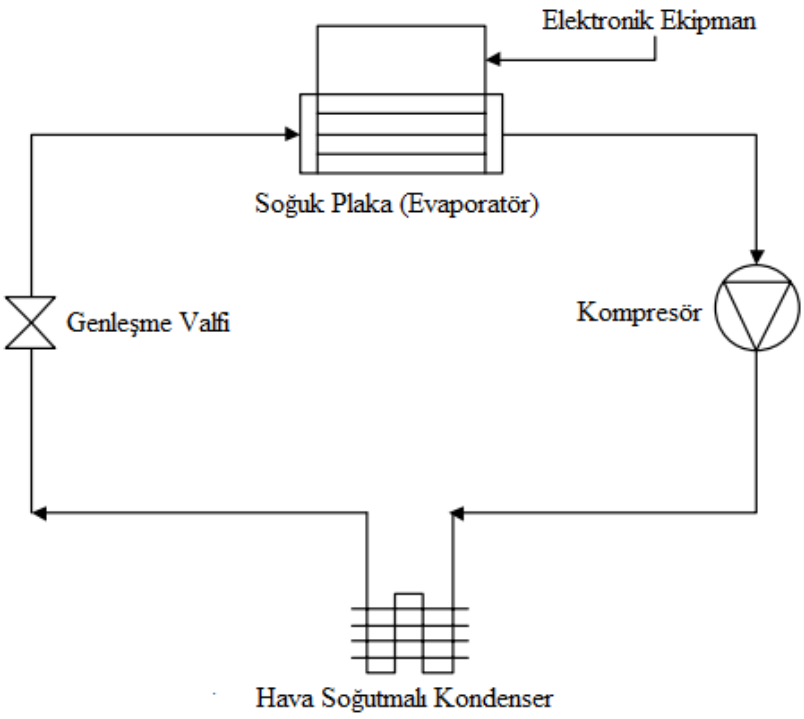
Şekil 2.3. Isı pompasıyla soğutma yöntemi (Anandan ve Ramalingam 2008)

2.1.4. Buhar sıkıştırmalı soğutma sistemleri

Yüksek güç tüketimi bulunan büyük sistemler ve iş istasyonlarında kullanılır. Bu tarz soğutma sistemlerinde, ısınan elektronik eleman doğrudan veya dolaylı olarak soğutma çevriminin buharlaştırıcısı ile temas halindedir. Elektronik elemanın temas ettiği bu kısım çevre sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa sahiptir. Bu sayede soğutma akışkanı veya sistemin buharlaştırıcı kısmı elektronik elemandan ısıyı alarak kolayca uzaklaştırabilmektedir. Bu tarz uygulamalar genellikle kriyojenik soğutma sistemlerine göre daha ucuz ve – 20 ile 40 °C arasında yüksek verimliliği olan sistemlerdir (Anandan ve Ramalingam 2008). Elektronik soğutmada kullanılan buhar sıkıştırmalı sistemlerin şematik görünümü şekil 2.4'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.4. Buhar sıkıştırmalı soğutma yöntemi **a)** Dolaylı temaslı**; b)** Doğrudan temaslı (Trutassanawin ve Groll 2004)

2.1.5. Termoelektrik soğutma

Termoelektrik soğutma sistemler, Peltier, Seebeck ve Thomson teorilerine dayanarak üretilen ve elektrik akımı altında bir tarafı soğuk iken diğer tarafı sıcak olan elemanlardır. Soğutucu elemanın iki ucu arasında bir elektrik akımı oluşturulduğunda iki uç arasında sıcaklık farkı meydana gelmektedir. Seebeck etkisi, iki farklı yarı iletken malzemede sıcaklık farkından dolayı elektrik geriliminin oluşmasıdır. Homojen bir iletkenin ayrı noktaları arasında sıcaklık farkından dolayı (Sıcaklık farkı yoksa akım oluşmaz) akım üretebileceği Thomson etkisiyle açıklanmaktadır. Peltier etkisi ise farklı iki iletken malzemeden oluşan devrede, iki bağlantı noktasında uygulanan elektrik akımından dolayı sıcaklık farkının oluşmasıdır. Termoelektrik soğutma sistemlerinde, belirli bir elektrik akımı altında soğutucu elemanın iki yüzeyi arasında meydana gelen sıcaklık farkından faydalanılmaktadır. Elektronik eleman, termoelektrik soğutucunun soğuk kısmı ile temas ettirilerek yüzeyde oluşan ısının uzaklaştırılması sağlanmaktadır.

2.1.6. Faz değiştiren malzeme ile soğutma

Diğer elektronik soğutma uygulamalarına alternatif olarak kullanılabilecek, hafif ve basit sistemlerdir. Faz değiştiren malzemeler, elektronik eleman üzerinde biriken ısıyı alarak erimesi sonucu, katı-sıvı faz arasındaki malzemenin gizli ısı enerjisinden faydalanılan sistemlerdir. Bu tarz malzemeler daha sonrasında tekrar eski haline dönerek tekrar tekrar kullanılabilirler.

2.2. Elektronik Sistemlerin Soğutulmasında Kullanılan Soğutma Sıvıları ve Beklenen Özellikler

Elektronik sistemlerin soğutulmasında kullanılan akışkanlar genel olarak dielektrik akışkanlar ve dielektrik olmayan (iletken) akışkanlar olarak iki sınıfa ayrılırlar. Dielektrik akışkanlara aromatik, silikat-ester bazlı, alifatik bazlı, silikon bazlı ve florokarbon akışkanlar örnek olarak verilebilir. Dielektrik grubundaki akışkanlardan sadece aromatik akışkanlar toksik akışkanlar sınıfında yer almaktadır. Bu gruptaki akışkanlar ısıtma-soğutma, savunma sanayi ve düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. Dielektrik olmayan akışkanlara etilen glikol, propilen glikol, metanol/su, etanol/su, kalsiyum klorür çözeltisi, potasyum format/asetat çözeltisi, sıvı metaller gibi akışkanlar örnek olarak verilebilir ve genellikle su bazlıdırlar. Bu akışkanlar, dielektrik akışkanlara göre daha iyi termal özellikleri olması nedeni ile elektronik sistemlerin soğutulmasında yaygın olarak kullanılırlar. Bu gruptaki akışkanların bazıları toksik veya yanıcı olarak sınıflandırılmaktadır. Elektronik sistemlerin soğutulmasında kullanılmaya başlanan iyonik sıvılar ve nanoakışkanlar hala araştırma konusu olarak literatürde yer almaktadır. Elektronik soğutma sistemlerinde kullanılan bazı soğutma akışkanları şematik olarak Şekil 2.5'te verilmiştir



Şekil 2.5. Elektronik soğutma sistemlerinde kullanılan bazı akışkanlar (Mohaparta 2006)

Çizelge 2.1'de elektronik sistemlerin soğutulmasında kullanılan bazı soğutucu sıvılar ve termofiziksel özellikleri verilmiştir. Buradaki akışkanlarla ilgili verilen tüm bilgiler Mohaparta (2006)'nın çalışmasından bulunmaktadır.

Çizelge 2.1. Elektronik sistemlerin soğutulmasında kullanılan sıvıların 20 °C'deki özellikleri (Mohaparta 2006)

	Soğutucu Kimyası	Donma Noktası (°C)	Parlama Noktası (°C)	Viskozite (kg/ms)	Termal iletkenlik (W/mK)	Özgül Isı (J/kgK)	Yoğunluk kg/m^3
Dielektrik Sıvılar	**Aromatikler (DEB)**	<-80	57	0.001	0.14	1700	860
	Silikat Ester (Soğutucu R25)	<-50	>175	0.009	0.132	1750	900
	Alifatik (PAO)	<-50	>175	0.009	0.137	2150	770
	Silikon Yağı (Sylterm XLT)	<-110	46	0.0014	0.11	1600	850
	Florokarbon-lar (FC-77)	<-100	-	0.0011	0.06	1100	1800

Çizelge 2.1'nin devamı

İletken Sıvılar	**EG/Su (50:50 V/V)**	-37.8	-	0.0038	0.37	3285	1087
	PG/Su (50:50 V/V)	-35	-	0.0064	0.36	3400	1062
	Metanol/Su (40:40 m/m)	-40	29	0.002	0.4	3560	935
	Etanol/Su (44:56 m/m)	-32	27	0.003	0.38	3500	927
	Potasyum Format/Su (40:60 m/m)	-35	-	0.0022	0.53	3200	1250
	Sıvı metal (Ga-ln-Sn)	-10	-	0.0022	39	365	6363

İyonik sıvılar, oda sıcaklığında sıvı tuz şeklinde bulunan akışkanlardır. Bu sıvılar termal stabilitesi, düşük buhar basınçları vb. özellikleriyle oldukça yenilikçi akışkanlardır. Günümüzde kullanım alanları oldukça sınırlı olan bu akışkanlar geliştirilme sürecindedir.

Nanoakışkanlar ise basit olarak açıklanacak olursa temel akışkanın (su, etilen glikol, yağ vb.) içerisine çeşitli metal, metal oksit, karbon nanotüp vb. nanopartiküllerin eklenmesiyle oluşturulan sıvılardır. Nanoakışkanların üretiminde farklı tekniklerin olmasının yanı sıra içerisindeki malzemelerin cinsi veya miktarının değiştirilmesiyle akışkanda iyileştirme odaklı birtakım modifikasyonlar yapılabilmektedir. Ancak bu akışkanların en büyük dezavantajı akışkan içerisindeki nanopartiküllerin çökmesi ve viskozitesinin artmasıdır. Araştırmacılar, bu problemlerin çözümü için daha homojen, ısıl performansı daha yüksek, korozif etkisi olmayan yeni akışkanlar üzerinde çalışmalara hızla devam etmektedirler.

2.2.1. Soğutma sıvısından beklenen özellikler

Elektronik sistemlerin soğutulmasında kullanılan sıvılarda kullanım alanına göre akışkanın uygun bazı termofiziksel özelliklere sahip olması gerekir. Akışkanın yüksek termal iletkenlik ve yüksek özgül ısıya sahip olması beklenirken, viskozitesinin düşük olması tercih edilir. Kullanım alanına göre donma noktalarının düşük olması gerekmektedir. Ayrıca, elektronik sistemin uzun ömürlü ve zarar görmemesi için kullanılan akışkan kararlı yapıda olmalıdır. Bunun yanı sıra çevreci ve ekonomik olmalı, toksik veya korozif etkisi bulunmamalıdır.

2.3. Nanobilim, Nanoteknoloji ve Nanoakışkanlar

Yunancada cüce veya çok küçük bir şey anlamında kullanılan "nano" ön eki metrik sistemde birim olarak metrenin milyonda birini (10^{-9} m) temsil etmektedir. Nanometre ölçeğinde olan yapıların ve moleküllerin incelendiği bilim dalına "nanobilim" denilmektedir. Nanobilimin ilk ortaya çıkışı M.Ö. 5. yüzyılda Yunanlılar ve Demokritos tarafından, maddenin sürekli olup olmadığı, sonsuza dek küçük parçalara bölünüp bölünemeyeceği veya en son bölünemez, yok edilemez bir parçasının olup olmadığı gibi sorulara cevap aradıkları zamanda gelişmeye başlamıştır. Nanoteknoloji ise nanometre

ölçeğindeki bir maddeyi nanobilimden faydalanarak çeşitli uygulamalara dönüştürme yöntemidir.

Nanoteknolojinin tarihi incelendiğinde bilinen en eski ürün 4. yüzyıl Roma da yapılan Lycurgus kupasıdır. British Museum'da sergilenen kupanın özelliği, ışığın geliş açısına göre iki farklı renkte gözükmesidir. Yapılan çalışmalar sonucunda bu durumun kupanın içyapısında bulunan 50-100 nm boyutlarındaki altın ve gümüş parçalarından olduğu görülmüştür. İlk nanoteknoloji ürünleri olarak bilinen örnekler ise 6.- 15. yüzyıllar arasında Avrupa katedrallerinde kullanılan vitray pencereler, 9.- 17. yüzyılda islam dünyasında, sonrasında Avrupa'da kullanılan seramik sırlar, 13. - 18. yüzyılda yapılan Dımışkı kılıçlarıdır (Bayda vd. 2020; Ersöz vd. 2018).

1857'de Micheal Faraday tarafından, 100 nm'den daha küçük altın nanotanecikler içeren sulu kolloidal sıvı hazırlanmıştır. Faraday yaptığı incelemelerde ürettiği bu kolloidal sıvının inanılmaz optik ve elektriksel özelliklere sahip olduğunu bulmuştur. Nanometre kavramını ise 1925 yılında ilk olarak Nobel ödüllü Richard Zsigmondy kullanmıştır ve altın kolloidleri gibi nanopartiküllerin boyutlarını ölçmüştür. Modern nanoteknolojinin ortaya çıkışı ise Richard Feynman tarafından 1959'da Altta Çok Fazla Yer Var adlı konuşmasında Britannica Ansiklopedisi'nin 24 cildinin tamamını neden bir toplu iğnenin başına yazamıyoruz? hipotezini kurmuştur ve moleküler seviyede makineler üreten makinelerin kullanımından bahsetmiştir. Feynman'in ardından 1974'te japon bilim adamı Norio Taniguchi nanoteknoloji kelimesini kullanarak, "Nanoteknoloji genel olarak malzemelerin bir atom veya molekül tarafından ayrılması, güçlendirilmesi ve bozulmasıdır." şeklinde tanımını yapmıştır (Bayda vd. 2020).

Feynman'in ardından, nanoyapılar bilim dünyasının ilgi odağı olmuştur ve sentezi için iki farklı yaklaşım tanımlanmıştır. İki yöntem de birbirinden kalite, hız ve bütçe açısından farklılık göstermektedir. Bunlar tepeden aşağı ve tabandan yukarıdır. Tepeden aşağı yaklaşımı kaba malzemeden nanopartikül, tabandan yukarı yaklaşımı ise atom, atom veya molekül, molekül nanoyapılar oluşturarak nanopartikül sentezlemeyi önermektedir.

Nanoakışkanlar genel olarak katı partiküller ve temel akışkandan oluşan iki fazlı sistemlerdir. Nanoakışkan içerisinde bulunan temel akışkanlar su, etilen glikol, propilen glikol, yağ vb. iken katı partiküller ise termal iletkenliği yüksek metal oksitler, alaşımlar, seramikler vb.'dir. Nanoakışkanlar, mikro, mili vb. akışkanlara göre daha kararlıdırlar. (Rudyak ve Minakov 2018) Nanoakışkanlar ile ilgili ilk fikir Maxwell tarafından 1873 yılında çıkarılmıştır. Maxwell kullanılan temel akışkanın termal iletkenlik katsayısını arttırmak için, içerisine katı partiküllerin eklenmesini önermiştir. Yalnız temel akışkan içerisine katı partiküller eklenerek yapılan çalışmalarda çökelme, basınç düşümünde artma ve boruların erozyona uğraması gibi nedenler, nanoakışkanlarda kayda değer pratik bir uygulamanın olmamasına neden olmuştur. Choi ve Eastman nano boyuttaki metal partikülleri ve karbon nanotüpleri araştırarak, nanoakışkanlar ile ilgili bilinen her şeyi değiştirmişlerdir ve "nanoakışkan" terimini bulmuşlardır. Birçok farklı sıvı ile çalışarak sonuçlar elde etmelerine rağmen nanoakışkanların pratik uygulamaları ile ilgili belirsizlik devam etmiştir (Nair 2014).

Nanoakışkanların en önemli özelliği içerisinde çok az miktarda bile nano partikül bulunması durumunda temel akışkana göre termal iletkenlik katsayısında kayda değer bir iyileştirmenin olmasıdır. Temel akışkana göre, nanoakışkan içerisinde bulunan partikül

miktarının artmasıyla basınç düşümünde yükselme ve çökelmeler meydana gelebilir. Bu sorunu gidermek için akışkan içerisine partiküllerin çökmesini, topaklanmasını azaltan ve temel sıvı içerisinde daha uzun süre asılı kalmasını sağlayan katkı malzemeleri (Surfaktan) eklenebilir veya akışkan üzerinde birtakım uygulamalar yapılabilir. Ancak literatürde yapılan birçok çalışmada, nanoakışkan içerisine farklı derişim ve malzemede surfaktan eklenmesi sonucunda termal iletkenlik katsayısında farklı etkiler görülmüştür (Angayarkanni ve Philip 2015). Nanoakışkanların içerisinde bulunan bazı nanopartikül ve temel akışkan özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı sıvı ve katıların termal iletkenlik katsayısı (2014 Sreelakshmy)

Malzeme	Form	Termal İletkenlik Katsayısı (W/mK)
Karbon	Karbon Nanotüp	1800-6600
	Elmas	2300
	Grafit	110-190
	Fulleren Film	0.4
Katı Metaller	Gümüş	429
	Bakır	401
	Nikel	237
Metal Olmayan Katılar	Aluminyum	40
	Sodyum (644 K)	72,3
Diğerleri	Su	0.613
	Etilen Glikol	0.253
	Motor Yağı	0.145

Nanoakışkanların termal iletkenlikleri, içinde bulunan yüksek termal iletkenlik katsayısına sahip farklı derişimde katı partiküllerinden dolayı yapıldıkları temel akışkanlara göre daha yüksektir. Nanoakışkanların en büyük avantajlarından biri kullanım alanına göre farklı ortamlarda veya cihazlarda farklılık gösterebilecek şekilde modifiye edilebilmesidir.

2.3.1. Nanoakışkanların üretimi

Nanoakışkanların üretim yöntemleri iki adımlı ve tek adımlı olmak üzere ikiye ayrılır.

a. İki adımlı metot

Nanoakışkan üretiminde en çok kullanılan yöntemdir. Nano boyutta fiziksel veya kimyasal yollarla elde edilen kuru malzemenin daha sonra temel akışkan içerisinde manyetik, ultrasonik, yüksek kesme veya bilyalı değirmen gibi karıştırma yöntemleriyle dağıtılması sonucu yapılmaktadır. İki adımlı yöntem daha ekonomik olması nedeniyle tercih edilen bir metottur. İki adımlı yöntem ile kararlı bir akışkan elde edilmesi oldukça zor olduğu için tek adımlı yöntem geliştirilmiştir.

b. Tek adımlı yöntem

Eastman tarafından partiküllerin çökmesini azaltmak için geliştirilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, nanopartiküllerin üretiminin ve temel akışkan içerisinde dağıtımının aynı anda yapılması gerekmektedir. Tek adımlı yöntemle, İki adımlı yönteme göre nanopartiküllerin kurutulması, depolanması, taşınması ve dağıtılması gibi işlemler ortadan kalkmaktadır. Bunun sonucu olarak daha kararlı bir akışkan elde ederek nanoakışkanlarda meydana gelebilecek çökmeler büyük oranda azaltılmaktadır. Tek adımlı yöntem iki adımlı yönteme göre daha pahalıdır.

İki adımlı ve/veya tek adımlı yöntemle nanoakışkan üretim teknikleri,

- Doğrudan buharlaştırma tekniği,
- Kimyasal indirgeme,
- Daldırılmış (su altı) ark nanopartikül sentez sistemi,
- Lazer ile uzaklaştırma,
- Mikrodalga ışınlama,
- Poliol işlemi,
- Faz transfer metodudur (Angayarkanni 2015).

2.3.2. Nanoakışkanların kararlılığı

Nanoakışkan üretiminde kararlı bir yapı elde etmek, yapılan çalışmanın hassas olması ve akışkandan dolayı meydana gelebilecek hasarları veya dezavantajları minimuma indirmek açısından çok önemlidir. Nanoakışkan içerisindeki partiküller sürekli topaklanmaya ve çökmeye eğilimlidirler. Bunun başlıca nedenleri ise partiküller arası van der Waals etkileri ve akışkan ile partiküller arasındaki yüksek yoğunluk farkıdır. Aynı zamanda nanoakışkanlardaki topaklanma ve çökme eğilimi temel akışkan ve partiküllerin karakteristik özelliklerine de bağlıdır. Nanoakışkan içerisindeki partiküllerin çökelme hızı (Ɣ) Stokes kanuna göre,

$$\gamma = \frac{a^2(\rho_p - \rho_{ta})g}{9\mu}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada a, ρ_{np}, ρ_{bf}, g ve μ sırası ile partikül çapı, partikül yoğunluğu, nanoakışkan yoğunluğu, yerçekimi ivmesi ve dinamik viskozitedir. Yukarıda verilen formüle göre, bir akışkanın çökelme hızı partikül boyutuna, akışkan- partikül yoğunluk farkına ve temel akışkanın viskozitesine bağlıdır. Bu kapsamda bir nanoakışkan içerisindeki partiküllerin çökme hızı, partikül boyutu ve yoğunluk farkının azalması ile doğru orantılı olarak azalırken, viskozitenin artması ile ters orantılı olarak azalmaktadır (Angayarkanni ve Philip 2015).

Nanoakışkanların kararlılığını belirlemek ve iyileştirmek için en çok kullanılan yöntemler;

- Dinamik ışık saçılım yöntemi (DLS),

- Zeta potansiyel ölçümü,
- Tortulaşma ve santrifüj metodu,
- Spektral analiz

olarak uygulanmaktadır.

2.3.3. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

a. Termal iletkenlik katsayısı,

Isı transferi ugulamarında kullanılan akışkanların (su, yağ, etilen glikol, propilen glikol vb.) termal iletkenlik katsayıları bazı katı partiküllerin termal iletkenlik katsayılarından (metal oksitler, alaşımlar, seramik yapılar, carbon nanotüpler vb.) daha düşüktür. Bu nedenle, temel akışkan içerisine az miktarda nanopartikül eklenmesi termal iletkenlik katsayısını ilk haline göre büyük oranda arttırmaktadır. Teorik olarak bakıldığında bunun nedeninin Brownian hareketi ve nanopartikül ile sıvı molekülleri arasındaki ara yüzey tabakasından kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır. Brownian hareketi sonucunda, partiküller arasında katı-katı ısı aktarımı meydana geldiği için termal iletkenlik katsayısı temel akışkana göre artmaktadır. Nanopartikül ile sıvı molekülleri arasındaki ara yüzey tabakası ise ısının aktarılmasında bir köprü gibi (sıvı-katı) rol üstlenerek ve termal iletkenliği artırır (Gupta 2017). Nanopartikül-sıvı arasındaki ara yüzeyin etkisi Keblinski vd. (2002) tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmaya göre ara yüzey kalınlığının artmasıyla termal iletkenlik katsayısında artış meydana gelmiştir. Düşük partikül çaplarında artan ara yüzey tabaka kalınlığının artmasıyla termal iletkenlik katsayısında artış olduğu belirtilmiştir. Ancak bu artış partikül çapıyla belirgin oranda azalmıştır. Bunun nedeninin artan nanopartikül boyutu ile termal iletkenlik katsayısının düşmesi olarak ifade edilmiştir.

Nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısını etkileyen daha büyük parametreler vardır. Literatürde farklı parametrelerle (partikül boyutu, derişim, malzeme, katkılar vb.) birçok çalışmalar yapılmış olup elde edilen sonuçlarda birtakım çelişkiler olduğu görülmüştür. Bu yüzden nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısını belirlemede bugüne kadar genel bir eşitlik geliştirilememiştir.

Derişimin, nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısı üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışmada, termal iletkenliğin nanopartikül derişiminin artmasıyla arttığı görülmüştür. Farklı nanopartikül derişimlerinde yapılan ölçümlerde, malzeme özellikleri, hazırlama yöntemi, kararlılık, katkılar vb. etkenlerden dolayı farklı oranlarda termal iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Ancak akışkan içerisindeki nanopartikül derişiminin artmasının termal iletkenliği arttırma avantajının yanında bazı dezavantajlarının olduğu belirlenmiştir. Artan derişim ile akışkanın artan viskozitesine bağlı olarak basınç düşümü miktarı artarken, yüzeylerde meydana gelebilecek aşınma ve korozyon miktarları da artmaktadır. Nanoakışkanlarda derişime bağlı olarak artan ısı transferinin, basınç düşümünde meydana gelebilecek artışa göre termal performansa olan etkisinin incelenmesi gerekir. Nanoakışkanlarda derişiminin etkisi Rudyak ve Minakov (2018) ve Pang vd. (2012) tarafından çalışılmıştır. Yaptıkları her iki çalışmada artan hacimsel derişimlerde nanoakışkanların termal iletkenlik katsayılarında artış görülmüştür. Ancak, Rudyak ve Minakov'un (2018) çalışmasında, ayrıca hacimsel derişiminin artmasıyla, nanoakışkanın temel akışkana göre termal iletkenlik katsayısında elde edilen artışın azalma eğiliminde olduğu belirtilmiştir.

Partikül boyutunun etkisi üzerine birçok çalışma yapılmış olup bunların çoğunda termal iletkenlik katsayısını arttırmak için partikül boyutunun azaltılması gerektiği belirtilmiştir. Ancak aksini belirten çalışmalar da mevcuttur. Bazı çalışmalarda artan partikül boyutlarında termal iletkenlik katsayısında farklı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Yine Rudyak ve Minakov'un (2018) yaptıkları çalışmada artan partikül boyutuyla nanoakışkanlarda termal iletkenlik katsayısındaki iyileştirme miktarında, temel akışkana göre artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak nanoakışkanların partikül türüne göre, termal iletkenlik katsayısındaki iyileştirme miktarında farklılıklar olduğunu belirtmişlerdir. He vd. (2007) çalışmalarında ise partikül boyutunun artmasıyla temel akışkana göre termal iletkenlik katsayısındaki iyileştirme miktarın da düşüş olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde Çizelge 2.3'te nanoakışkanlarda partikül boyutunun termal iletkenlik katsayısı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalar verilmiştir.

Çizelge 2.3. Partikül boytunun termal iletkenlik katsayısına etkisi (Angayarkanni ve Philip 2015)

Nanopartikül	**Derişimin (φ %)**	**Boyut (nm)**	**Termal iletkenlik oranı (k/k_f)**	**İyileştirme Miktarı (%)**
Al_2O_3/Su	1	11	1.09	8
		47	1.02	2
		150	1.005	0.5
TiO_2/Su	0.6	82	1.35	3.5
		140	1.25	2.5
		215	1.01	1
Al_2Cu/Su	0.5	9	1.3	30
		20	1.23	23
		25	1.19	19
		35	1.12	12
		83	1.04	4
Al_2O_3/Su	2	12	1.036	3.6
		16	1.058	5.8
		282	1.115	11.5
Al_2O_3/Su	14	36	1.13	13
		47	1.17	17
Al/EG	1	10	1.11	11
		45	1.06	6
		150	1.02	2
Al/Su	1	10	1.07	7
		45	1.05	5
		150	1.023	2.3
Al_2O_3/Su	0.51	20	1.06	6
		50	1.05	5
		100	1.04	4

Çizelge 2.3'ün devamı

A-SiC/Su	4.1	16	1.08	8
		29	1.098	9.8
		66	1.118	11.8
		90	1.124	12.4
Fe_3O_4/Kerosen(Gaz yağı)	5.5	2.8	1.05	5
		3.6	1.10	10
		6.1	1.17	17
		8.2	1.19	19
		9.5	1.22	22
Gümüş/EG	1	20	1.06	6
		30-50	1.06	6
		80	1.1	10
SiO_2/Su	8	10	1.08	8
		20	1.09	9
		40	1.09	9
		60	1.11	11
Al_2O_3/Su	0.5	13	1.075	7.5
		20	1.020	2
Cu/EG	0.03	12	1.15	15
	0.0035	3	1.038	3.8
Al_2O_3/Su	0.51	72	1	0
		115	1.02	2
		137	1.03	0.3
Fe/Su	0.01	37	1.07	7
		71	1.06	6
		98	1.05	5

Literatürde nanoakışkanlarda termal iletkenlik katsayısına, partikül şekli ve/veya partikül en boy oranının etkisinin incelendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Parçacığın değişen yüzey alanı miktarına göre ısı transferi miktarı değiştiği görülmüştür. Buna göre, parçacığın en boy oranının birden yüksek olmasının termal iletkenlik katsayısını arttırdığı belirlenmiştir (Angayarkanni ve Philip 2015). Benzer olarak, Gupta vd. (2017) silindirik şekilli parçaların küresel şekilli parçalara göre daha yüksek yüzey alanına sahip olması nedeni ile termal iletkenlik katsayısını arttırdığını belirlemişlerdir.

Nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısını etkileyen bir diğer parametre ise temel akışkan ve nanopartikül türüdür. Nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısı belirlenirken ve iyileştirme miktarı karşılaştırılırken referans olarak temel akışkan alınmaktadır. Nanoakışkan üretiminde kullanılan her bir temel akışkanın (su, etilen glikol, propilen glikol, yağlar vb.) kendine özgü termal iletkenlik katsayısı vardır. Aynı zamanda, farklı derişimlerde temel akışkana eklenen nanopartiküllerin (seramik, metal, metal oksit, karbon nanotüp, alaşımlar vb.) termal iletkenlik katsayıları farklıdır. Buna göre bir değerlendirme yapıldığında, farklı temel akışkan ve farklı nanopartiküllerle üretilen her bir nanoakışkanın termal iletkenlik katsayısının doğrudan malzeme özelliklerinden etkilendiği söylenebilir.

Birçok çalışmada nanoakışkanlarda kararlılığı sağlamak amacı ile içerisine surfaktan olarak adlandırılan katkı malzemeleri eklendiği görülmektedir. Farklı oranlarda eklenen katkı malzemeleri, nanopartiküllerin akışkan içerisinde daha uzun süreli asılı kalmasını sağlayarak, topaklanmalarını ve çökelmelerini azaltmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmaların çoğunda akışkana surfaktan eklenmesinin çökelmeleri azalttığı için termal iletkenlik katsayısını iyileştirdiği belirtilmiştir. CTAB, SDBS, SDS, NP9 gibi birçok surfaktan ile çalışmalar yapılmış olup, bazılarında termal iletkenlik katsayısı surfaktan etkisi ile artarken bazılarında azalmıştır (Angayarkanni ve Philip 2015).

Nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısına pH değerinin etkisi birçok çalışmada incelenmiştir. Bunlardan Xie vd. (2002) yaptıkları çalışmada artan pH değeri ile termal iletkenlik oranında azalma olduğunu belirlemişlerdir. Li vd. (2008) ve Zhu vd. (2009)'nin çalışmalarında ise artan pH değeri ile termal iletkenlik oranında belirli bir değere kadar artış gözlenmiştir. Ancak yaklaşık pH'ın 8-9'dan yüksek değerlerinde, termal iletkenlik katsayısı oranında düşüş olduğunu tespit edilmiştir.

Sıcaklık nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısını etkileyen diğer bir parametresidir. Temel akışkanın veya nanopartiküllerin termal iletkenlik katsayıları sıcaklıkla değişmektedir. Nanoakışkanın sıcaklığında meydana gelen artış veya azalışta, akışkanın termal iletkenlik katsayısı da değiştirmektedir. Akışkan içerisindeki nanopartiküllerin kümeleşerek çökmesi derişimi azaltacağı için termal iletkenlik katsayısını da etkilemektedir.

b. Viskozite,

Bilindiği gibi viskozite, bir akışkanın yüzey gerilimi altında deforme olmaya karşı gösterdiği direncin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Nanoakışkan içerisinde bulunan nanopartiküller, sistem içerisinde temel akışkanla birlikte, akmaya karşı ekstra bir direnç gösterir. Akışkan viskozitesinin artması, artan yüzey sürtünmeleriyle birlikte basınç kaybının dolayısıyla pompalama gücünün artmasına neden olmaktadır. Ancak literatürdeki çalışmalarda viskozitenin artmasının yüzeyden olan ısı transferinde bazı durumlarda avantaj sağladığı, bazı durumlarda ise dezavantajlı olduğu belirtilmiştir. Çalışmalarda, nanoakışkan viskozitesinin temel akışkana göre yüksek değerde olması nedeniyle, yüzeyle daha uzun süre temas halinde olduğu belirtilmiş ve bunun da ısı transferini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra, yapılan bazı çalışmalarda ise viskozitenin artmasıyla birlikte yüzeyde artan sürtünme miktarına bağlı olarak, tutunma ve birikme miktarı da artacağı için termal iletkenlik katsayısında ve ısı transferinde azalma olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında gerek ısı transferi açısından gerekse pompalama gücü göz önüne alınarak nanoakışkan viskozitesinin sistem performansı açısından uygun bir değerde tutulması gerekir. Nanoakışkanlarda viskozite derişim, partikül boyutu, partikül şekli, katkılar, temel akışkan-nanopartikül türü vb. birçok değişkenden etkilenmektedir. Nanoakışkanların viskozitesini belirlemek için piston tipi veya rotasyonlu reometre, kılcal viskozimetre gibi ölçüm aletleri kullanılmaktadır (Gupta vd. 2017).

Nanoakışkanların viskozitesi ile ilgili ilk araştırmalar Einstein'in süspansiyonların viskozitesini incelemek için yaptığı çalışmalara dayanır. Einstein bir sıvı içerisindeki tek bir partikülün harekeni izleyerek, partikülün akış alanında meydana getirdiği bozulmaları incelemiştir. Efektif gerilme tensörünü hesaplayarak, viskozite değeri için eşitlik geliştirmiştir.

$$\mu = \mu_{ta}(1 + 2.5\varphi)$$

Burada μ viskoziteyi, μ_{ta} temel akışkanın viskozitesini ve φ ise hacimsel derişimi göstermektedir. Daha sonra, viskoziteyi hesaplarken partiküller arası etkileşimlerin de dikkate alınması gerektiği belirlenerek eşitlik,

$$\mu = \mu_{ta}(1 + 2.5\varphi + k_a\varphi^2)$$

şekline çevrilmiştir. Burada k_a 4.3 ile 7.6 arasında değişen bir sabittir. Yapılan deneysel çalışmalarda Einstein'in eşitliğinin düşük derişimlerdeki süspansiyonların viskozitesini tanımlamada yeterli iken, artan derişimlerle yeteriz olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma, artan derişimler ile partiküller arasındaki etkileşimin artması, malzeme özelliğinin etkisi, partikül boyutu vb. parametrelerin neden olduğu belirtilmiştir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, nanoakışkanların viskozitesini tanımlayacak genel bir eşitlik belirlenememiş olup, farklı nanopartiküller ve farklı temel akışkanlarla korelasyonlar geliştirilmiştir ancak bütün akışkanlar için genel bir ifade elde edilememiştir (Rudyak ve Minakov 2018).

Rudyak ve Minakov (2018), yaptıkları çalışmada nanoakışkanlarda artan hacimsel derişime bağlı olarak viskozitenin yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Nanoakışkan derişiminin, akışkan viskozitesi üzerindeki etkisinin diğer parametrelere (partikül derişimi, boyutu, sıcaklık vb.) göre daha baskın olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde literatürde yapılan çalışmaların çoğunda derişimin artmasıyla nanoakışkanların viskozitesinin arttığı belirlenirken, aksine birkaç çalışmada ise partikül eklenmesi ile viskozitenin düştüğü belirtilmiştir. Yine Rudyak ve Minakov (2018) yapmış oldukları çalışmada, partikül boyutunun da viskoziteye olan etkisini birçok su bazlı nanoakışkan kullanılarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre artan partikül boyutu ile akışkan viskozitesinin azaldığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada, nanoakışkanların viskozitesini etkileyen diğer bir faktöründe sıcaklık olduğu, viskozitenin sıcaklıkla ters orantılı olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Farklı hacimsel derişimlerde üretilen SiO_2-etilen glikol nanoakışkan ile yapılan çalışmada sıcaklığın artmasıyla viskozitenin düştüğünü tespit edilmiştir. Çizelge 2.4.'te artan hacimsel derişimle (ϕ) birlikte partikül boyutuna bağlı olarak farklı metal oksit su nanoakışkanlarının viskozite değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.4. Su bazlı nanoakışkanlarda partikül derişiminin viskoziteye etkisi (Rudyak ve Minakov 2018)

	Al_2O_3 (150 nm)	**TiO_2 (150 nm)**		**ZrO_2 (44 nm)**	**ZrO_2 (105 nm)**
ϕ	**μ**	**μ**	**ϕ**	**μ**	**μ**
0.01	1.059	1.090	0.02	1.170	1.135
0.02	1.134	1.180	0.04	1.321	1.237
0.04	1.357	1.570	0.06	1.589	1.519
0.06	1.600	1.910	0.08	2.185	2.109

Benzer sonuçlar, Nguyugen vd (2008) farklı partikül boyutlarında (36, 47 nm) Al_2O_3-su nanoakışkanı ile yaptığı çalışmada da görülmüştür. Farklı partikül boyutu ve derişiminde Al_2O_3-su nanoakışkanı ile çalışmışlar ve elde ettikleri sonuçlarda, Al_2O_3-su nanoakışkan viskozitesinin derişimden ve sıcaklıktan daha fazla etkilendiğini belirlemişlerdir. Partikül boyutunun viskoziteye olan etkisinin genellikle yüksek derişimlerde daha etkin olduğunu tespit etmişlerdir. Chevalier vd. (2007) ise farklı boyutta SiO_2 partikülleri ile yaptıkları çalışmada hacimsel derişimin artmasıyla akışkan viskozitesinin arttığını, ancak partikül boyutunun artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir.

c. Özgül ısı,

Nanoakışkanlarla yapılan çalışmalarda, akışkana aktarılan ısı miktarı ve ısıl performansın belirlenmesinde kullanılan diğer bir özellik ise özgül ısıdır. Akışkan sıcaklığını bir derece yükseltmek için gerekli olan ısı miktarını belirten özgül ısı nanoakışkanlarda iki farklı yöntemle hesaplanmaktadır. Bunlar,

$$C_{p_{na}} = \varphi(C_p)_p + (1-\varphi)(C_p)_{ta}$$

$$C_{p_{na}} = \frac{(1-\varphi)\left(\rho C_p\right)_{ta} + \varphi\left(\rho C_p\right)_p}{(1-\varphi)\rho_{ta} + \varphi\rho_p}$$

eşitlikleridir (Gupta vd. 2017). Nanoakışkanların özgül ısılarını belirlemek için, temel akışkan ve nanopartikülünün özgül ısıları ayrı ayrı belirlendikten sonra genellikle bu iki eşitlik kullanılır.

Bu kapsamda Wang vd. (2006) farklı boyutlarda hazırlanan CuO nanopartiküllerinin özgül ısı değerlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, nanoakışkanların özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla artığını belirlemişlerdir. Ancak bu artış miktarının, düşük sıcaklıkta yüksek, yüksek sıcaklıklarda ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda yapılan çalışmada partikül boyutunun etkisi de incelenmiş olup, farklı nanopartikül boyutlarında hazırlanan nanoakışkanlar için düşük ve yüksek sıcaklıklarda farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Pradhan vd. (2009) yaptıkları çalışmada, çok duvarlı (MWCNT) ve tek duvarlı (SWCNT) karbon nanotüplerin 300-400 K sıcaklık sınırları arasındaki özgül ısı değerlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, MWCNT ve SWCNT nanomalzemelerinin yığın grafit ile benzer sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. MWCNT özgül ısı değerlerinin, diğerlerine göre daha düşük olduğunu ancak sıcaklık değişiminden daha az etkilendiğini belirlemişlerdir.

Saeedinia vd. (2012) yaptıkları çalışmada, % 0.2 - %2 kütlesel derişim aralığında hazırladıkları CuO-baz yağ nanoakışkanlarının özgül ısı değerlerini incelemişlerdir. Çalışmada nanoakışkan özgül ısı değerlerinin, temel akışkandan daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir ve nanoakışkan kütlesel derişiminin artmasıyla özgül ısının da düştüğünü belirlemişlerdir.

d. Yoğunluk,

Nanoakışkanlarla yapılan çalışmalarda yüzey sürtünmelerinin hesaplanmasında kullanılan bir parametredir. Özellikle ısıl çalışmalarda yoğunluk Reynolds sayısını, sürtünme katsayısını, basınç kaybını, Nusselt sayısını ve pompa gücünü doğrudan etkilemektedir. Nanoakışkanlarda, temel akışkan-nanopartikül türü, derişim, katkılama gibi etkenlerden dolayı akışkanın yoğunluğu değişmektedir. Pak ve Cho (2007) yaptıkları çalışmada mikrometre boyutundaki partiküller için kullanılan

$$\rho = (1 - \varphi)\rho_{TA} + \varphi\rho_p$$

eşitliğini nanopartiküller için kullanarak, Al_2O_3-su ve TiO_2-su nanoakışkanlarının yoğunluklarını incelemişlerdir ve artan derişimler ile nanoakışkan yoğunluğunun arttığını belirlemişlerdir. Teng ve Hung (2012), çalışmada farklı derişimlerdeki Al_2O_3-Su nanoakışkanlarının yoğunluk değişimini incelemişler ve artan derişimler ile nanoakışkan yoğunluğunun arttığını, artan sıcaklıkla ise yoğunluğun düştüğünü tespit etmişlerdir.

Nanoakışkanlar, gelecek vadeden yenilikçi akışkanlar olmasına rağmen hala yoğun bir şekilde bu alanda araştırılmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun nedeni ise, nanoakışkanlarda nanopartiküllerin çökmesi, topaklanması gibi ısı transferini ve akışı etkileyen birtakım sorunların hala çözülememiş olmasıdır. Literatürde nanoakışkanlarla ilgili yapılan bütün çalışmalarda sonuçlar, temel akışkan-nanopartikül türü, derişim, nanopartikül boyutu, eklenen katkı malzemesi gibi parametrelere bağlıdır ve benzer çalışmalarda bile farklılıklar görülebilmektedir. Özellikle kararlı bir akışkanın üretimi konusunda net bir yöntem geliştirilememiştir. Ayrıca nanoakışkanların kullanıldıkları sistemlere göre birçok dezavantajı bulunmaktadır. Bunların en bilineni basınç kaybıdır. Artan derişimlere bağlı olarak temel akışkana göre viskozitenin artması sonucu nanoakışkanlarda basınç kaybı miktarı artmaktadır ki, bu da pompa gücünün artmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmaların çoğunda etkin bir akışkanın elde edilebilmesi için ısı transferinde meydana gelen iyileştirme miktarı, basınç kaybında meydana gelen kayıpla karşılaştırılmıştır. Buna göre, ısı transferindeki iyileştirme miktarının basınç kaybındaki artışa göre baskın akışkanlar başarılı olarak sınıflandırılmıştır. Ancak uygun üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ile viskozitede meydana gelen artış giderildiğinde

daha etkin akışkanların üretilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca nanoakışkanlar, kullanıldıkları sistemlerde aşınmaya, korozyona ve partikül birikmelerine neden olmaktadır. Bu nedenle, nanoakışkanların kullanıldıkları sistemlerde meydana getirdikleri etkiler daha detaylı incelenerek, zaman içerisinde daha uzun ömürlü ve sistemle uyumlu hale geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.4. Elektronik Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Temas Yüzey Alanı Arttırma Yöntemleri

Gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını karşılamak, verimliliği arttırmak ve dar alanlarda daha yüksek ısı transferi elde etmek için elektronik soğutma sistemlerinde farklı yüzeyler kullanılmaktadır. Bunlardan en bilineni zorlanmış hava ile soğutmada kullanılan kanatçıklı yüzeylerdir. Bunun dışında, elektronik soğutma sistemlerinde kanatçıklı yüzeyler (iğneli, plakalı, iğneli-plakalı vb.), tümsek-çukur yüzeyler, saptırıcılar, vorteks jeneratörleri, oluklar, çeşitli boşluklar, kesintili duvarlar ve metal köpükler gibi yüzeyler kullanılmaktadır. Çeşitli uygulamalarda bahsedilen yüzeylerin mikro uygulamaları da yapılmaktadır. Farklı uygulamalarda kullanılan yüzey çeşitlerinden, metal köpükler tez çalışmasının da araştırma konusu olduğu için ayrı bir başlık altında incelenecektir.

2.4.1. Metal köpük malzemeler

Soğutma uygulamalarında farklı şekil ve boyutlarda birçok kanatçıklı ısı alıcısı kullanılmakta olup, hepsinde ortak amaç, temas yüzey alanını arttırarak yüzeyden olan ısı transferini iyileştirmektir. Bu kapsamda, yüzey ile akışkan arasındaki temas yüzey alanını arttırmak amaçlı geliştirilen ve hala araştırılan en yenilikçi malzemelerden biri de metal köpüklerdir. Metal köpük ısı alıcılar doğada bulunan odun, kemik, doğal süngerler, bazı taşlar vb. gözenekli malzemelerden esinlenerek üretilmiştir. Literatürde metal köpük ısı alıcılar ile ilgili yapılan çalışmalarda, yüksek alan/hacim oranları sayesinde diğer kanatçık türlerine göre ısı transferi açısından daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Ticari olarak kullanılan muadillerine göre, termal ve fiziksel birçok üstünlüklerinden dolayı farklı malzeme (seramik, metal, cam gibi inorganik veya organik malzemeler), boyut ve hücre şekillerine (açık veya kapalı) sahip birçok metal köpük, çeşitli uygulamalarda uzun süredir araştırılmakta ve kullanılmaktadır. Metal köpük malzemelerin üretimi için bilinen en eski uygulama 1925'te De Meller'in yaptığı çalışmadır. Köpük malzemelerin üretimi konusunda karşılaşılan zorlukların son zamanlarda gelişen üretim teknolojileriyle giderilmesi neticesinde, bu malzemelerin birçok alanda popülerleşen yenilikçi ürün olarak kullanılması sağlanmıştır.

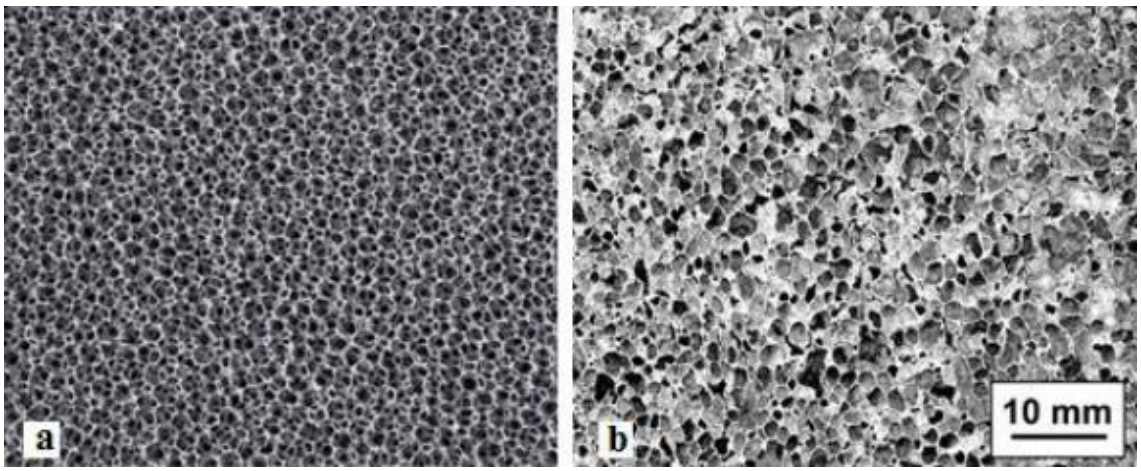
Metal köpük malzemelerin üretim yöntemleri, en genel haliyle doğrudan köpükleme ve öncü (Dolaylı) köpükleme olarak ikiye ayrılır. Doğrudan köpükleme yöntemi öncü yönteme göre kesintisiz köpük elde edilebilen bir yöntem olup, metal veya alaşım eriğine kaynağına göre farklı sayıda ve şekilde kanallar yerleştirilerek, içerisinden gaz üflenmesiyle yapılmaktadır. Farklı uygulamalarda metal eriğinin içerisine üfleme ajanı da eklenebilmektedir. Eklenen üfleme ajanı daha sonra çözünerek metal eriğin içerisinde gaz oluşmasına neden olarak, gözenekli yapıları meydana getirmektedir. Öncü köpükleme yönteminde ise gaz üfleme işlemi metal veya alaşımın erime aşamasında ya da toz presleme aşamasında yapılmaktadır. Gaz oluşturmak için bu işlemde de üfleme ajanı kullanılmaktadır (Banhart 2013).

Metal köpük malzemeler yapıldıkları orijinal malzemeye göre,

- Daha düşük ağırlık,
- Yüksek alan/hacim oranı,
- Yüksek ısı transfer potansiyeli, (açık hücreli)
- Yüksek geçirgenlikle birlikte yüksek termal iletkenlik, (açık hücreli)
- Termal şoka, aşınma, yüksek sıcaklıklara, nem ve ısıl döngüye karşı dayanım,
- Yüksek basınç koşullarına uygun yüksek dayanım ve tokluk,
- Darbe sönümleme yeteneği,
- Malzeme yapısının kolay kontrol edilebilmesi, (gözenek çapı ve dağılımı),
- İşlenebilmesi ve kaynaklanabilmesi kompleks parçaların oluşabilmesine olanak sağlaması,
- Mükemmel ses sönümleme özelliği,
- Termal yalıtım özelliği, (kapalı hücreli)
- Akışkanı iyi bir şekilde karıştırabilme,

özelliklerine sahiptir (Han vd. 2012).

Metal köpük malzemelerin gözenek yapısına, şekline ve yoğunluğuna göre birçok türü bulunmaktadır. Ancak en genel haliyle metal köpük malzemeler gözenek yapılarına göre açık ve kapalı hücreli olmak üzere iki farklı yapıda üretilmektedir. Açık ve kapalı hücre yapısına sahip metal köpüklerin görünümü Şekil 2.6'de verilmiştir. Açık hücreli yapıya sahip metal köpük malzemelerde gözenekler birbirleri ile temas halindedir ve sadece gözenekleri belli eden ince bir iskelet yapı bulunmaktadır. Kapalı hücreli yapıya sahip metal köpüklerde ise gözenekler birbirlerinden hücre duvarıyla ayrılmış olup, gözenekler arasında temas yoktur.



Şekil 2.6. Metal köpük malzemelerin gözenek yapısı, **a)** Açık hücreli; **b)** Kapalı hücreli (Sertkaya 2013)

Metal köpük malzemelerin kullanım alanları hücre yapılarına göre değişmektedir. Açık hücreli gözenek yapısına sahip metal köpükler, yüksek temas yüzey alanına sahip olmalarından dolayı ısı transferi uygulamalarında (ısı alıcı yüzey veya ısı

değiştiricisi olarak) ve gözenek yoğunluğuna göre bazı akışkan çalışmalarında karıştırıcı veya süzgeç olarak kullanılmaktadır. Kapalı hücreli gözenek yapısına sahip metal köpükler ise, darbe, ses ve titreşim sönümleme özelliğinden dolayı arabaların tampon kısımları ile motor kısımlarında uygulama örnekleri bulunmaktadır. Ayrıca, köprü veya viyadüklerin alt kısımlarında titreşim ve ses sönümleme uygulamaları da vardır.

Metal köpük malzeme kullanımının termal iletkenlik katsayısına ve ısı transferine etkisini araştıran çalışmalara geçmeden önce, literatürde kullanılan gözeneklilik, gerçirgenlik, gözenek (PPI) yoğunluğu terimleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

a. Gözeneklilik (ε),

Gözeneklilik, köpük yapılı malzeme içerisindeki boşluk miktarının bir tanımıdır. İçerisinde boşluk bulunan kum, taş, kemik vb. bütün gözenekli yapılarda bu değer hesaplanabilir. Kanatçıklı ısı alıcıların, kanatçıklar arası boşluk miktarı göz önüne alındığında gözeneklilik miktarı hesaplanabilir. Genellikle gözeneklilik en genel haliyle,

$$\varepsilon\,(\%) = \frac{\rho_T - \rho_k}{\rho_T} x100$$

şeklinde hesaplanır. Burada ρ_k, ρ_T sırası ile köpük (katı) yoğunluğu, $\boldsymbol{\rho_T}$ toplam yoğunluktur. Gözeneklilik boyutsuz bir sayıdır (Alhusseny vd. 2019). Daha basit bir şekilde tanımlanacak olursa boş hacmin toplam hacme oranı olup, gözeneklilik arttıkça metal köpük içerisindeki boşluk miktarı artmaktadır. Gözeneklilik arttıkça artan boşluklar sayesinde malzeme akışa daha müsait bir hale gelir. Basınç kaybı miktarı azalır. Çünkü akışa karşı olan katı malzeme direnci ve yüzey sürtünmeleri azalmaktadır. Bir malzeme içerisindeki gözeneklilik ne kadar düşerse boşluklar o kadar azalır ve orijinal katı haline yaklaşır.

b. Geçirgenlik (K),

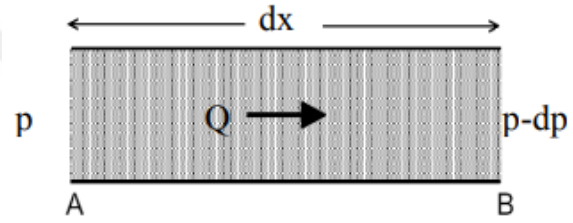
Geçirgenlik, gözenekli yapıların akışı içerisinden ne kadar geçirebildiğinin bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle akışın yapı içerisinden kolayca akabilme yeteneğidir. Gözenekli yapılar içerisinden olan akışın tanımlanmasında kullanılan en önemli parametrelerden biri olan geçirgenliği açıklamak için öncelikli olarak Darcy yasasının belirtilmesi gerekmektedir. Darcy yasası 1856 yılında Henry Darcy tarafından geliştirilmiştir. Henry Darcy yaptığı çalışmada Şekil 2.7'da verilen bir kum yatağında hacimsel debi ve basınç farkının değişimini incelemiş olup,

$$\dot{V} = \mathbb{k} A_k \frac{\partial p}{\partial x}$$

eşitliğini bulmuştur. Burada $\dot{V}$, κ, A_k, $\partial p/\partial x$ sırası ile hacimsel debi, gözenekli yapının hidrolik iletkenliği, kesit alanı ve basınç gradyanıdır. Darcy tarafından geliştirilen bu eşitliğin belirli sınırlamaları olduğu için genel olarak,

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K} V$$

şeklinde kullanılır. Burada, K geçirgenlik olup, μ/K bir önceki eşitlikteki 1/κ'ya eşittir. Hazen-Darcy denklemi olarak da bilinen bu eşitlik, gözenekli bir alan içerisinde birim mesafedeki basınç kaybının, akışkan hızı ve dinamik viskozite ile doğru orantılı olduğunu belirtir. (Khayargoli vd. 2004)



Şekil 2.7. Kum yatağından Darcy akışı (Khayargoli vd. 2004)

Khayargoli vd. (2004) farklı metal köpük malzemelerde geçirgenliğin değişimini incelemiş olup, elde ettikleri sonuçlara göre gözenek çapı ve gözeneklilik arttıkça geçirgenliğin arttığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Morales vd. (2017) alüminyum metal köpüklerle yaptıkları çalışmada, geçirgenliğin gözenek çapı ve gözenekliliğin artmasıyla arttığını belirlemişlerdir.

Darcy sayısı boyutsuz bir parametre olup,

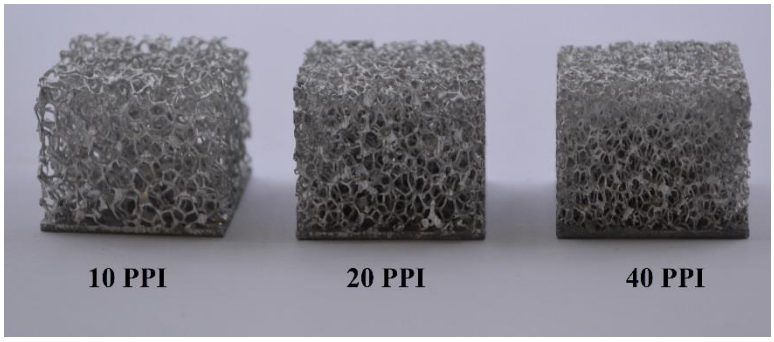
$$Da = \frac{K}{H^2}$$

şeklinde tanımlanır. Burada, H ise kanal yüksekliğidir (Rassam vd. 2020). Darcy sayısının hesabı yapılırken bölme işleminin alt kısmındaki parametre yapılan çalışmanın özelliklerine, şartlarına ve tercihe göre değişebilir. Bazı çalışmalarda kanal uzunluğu, kanal yüksekliği alınırken bazılarında ise gözenek çapı alınmıştır.

c. Gözenek yoğunluğu (PPI),

Metal köpük malzemelerde karşılaştırmada kullanılan diğer bir parametre ise gözenek yoğunluğu olup, birim mesafede bulunan gözenek sayısını belirtmektedir. Metal köpüklerde gözenek yoğunluğunu belirlemede kullanılan PPI (pores per inch) birim inç

başına düşen gözenek sayısı anlamına gelmektedir. Aşağıdaki şekil 2.8'te farklı gözenek yoğunluğuna sahip metal köpük ısı alıcıların görünümü verilmiştir.



Şekil 2.8. Farklı gözenek yoğunluğuna sahip metal köpük ısı alıcılar

d. Termal iletkenlik katsayısı (k),

Metal köpüklerin termal iletkenlik katsayısı malzeme cinsi, gözeneklilik, gözenek çapı vb. gibi etkenlerden etkilenmekte olup, genellikle etkin termal iletkenlik katsayısı kullanılır. Etkin termal iletkenlik katsayısı, metal köpük malzemelerde hem katı hem de sıvı fazın termal iletkenlik katsayısının yanında, taşınım ve ışınım etkilerini de dikkate alındığı homojen bir yapı olarak hesaplanır. Bu kapsamda, etkin termal iletkenlik katsayısı literatürde farklı parametreler altında birçok modelde hesaplanmıştır (Ranut ve Nobile 2021).

Ranut ve Nobile (2014) yaptıkları çalışmada, alüminyum metal köpük malzemelerin içerisinde su veya hava bulunması durumuna göre etkin termal iletkenlik katsayısını hem deneysel hem de nümerik olarak hesaplamış ve gözenekliliğin artmasıyla etkin termal iletkenlik katsayısının azaldığını belirlemişlerdir. Benzer sonuçlar Sadeghi vd. (2011) yaptığı çalışmada da elde edilmiş olup, artan gözeneklilik ile etkin termal iletkenliğin düştüğünü belirlemişlerdir. Ancak gözenek yoğunluğunun etkin termal iletkenliğe etkisinin olmadığını belirlemişlerdir. Çalışmada gözenekliliğin düşmesi ile malzeme içerisindeki katı bağ hacminin artması sonucu ısı akışı için yüksek iletim yollarının oluştuğu tespit edilmiştir. Morales vd. (2017) ise farklı alüminyum metal köpüklerin termal iletkenlik katsayısını incelemişlerdir ve elde edilen sonuçlar, Çizelge 2.5.'te verilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, termal iletkenliğin gözenek çapının artmasıyla arttığı belirtilmiştir. Metal köpüklerin termal iletkenliğinin, alüminyum ile havanın termal iletkenliklerinin bir kombinasyonu olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 2.5. Alüminyum metal köpük malzemelerin termal iletkenliklerinin değişimi (Morales 2017)

Gözenek Çapı (mm)	Gözeneklilik (%)	Termal İletkenlik (W/mK)
0.5	63.3	0.6
1	65.9	1.1
2	67.6	3

Metal köpük malzemeler uygulama alanlarına göre daha dayanıklı, daha sönümleyici ve daha fazla ısı transferi sağlamaları açısından oldukça kullanışlı malzemelerdir. En önemli özellikleri ise diğer malzemelere göre oldukça hafif olmalarıdır. Bu durum özellikle otomotiv sektöründe gelecek vadetmektedir. Araçlarda kullanılan muadillerine kıyasla daha hafif ve daha dayanıklı olmaları nedeniyle darbe-titreşim sönümlemede daha verimli olacağı düşünülmekledir. Ayrıca metal köpük malzemelerin diğer malzemelerle kıyaslandığında hafif olmaları nedeniyle, araçlarda yakıt tasarrufu yönünden olumlu etkisinin olacağı düşünülmektedir.

Isı transferi uygulamalarında ise, dar alanda daha yüksek temas yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle özellikle elektronik soğutma sistemlerinde artan ısıl yüklerin giderilmesinde gelecek vadeden malzemeler olarak görülmektedir. Metal köpük malzemeler gözenek yapısından bağımsız olarak kullanıldıkları hemen hemen bütün alanlarda yüksek performanslar göstermesine rağmen üretimi oldukça zor ve maliyetli yüksek malzemelerdir. Literatürde birçok üretim yöntemi olmasına rağmen henüz ekonomik ve basit bir yöntem net olarak belirlenememiştir. Metal köpük malzemelerin üretiminde en çok karşılaşılan zorluk homojenliktir. Homojen bir gözenek yapısının elde edilmesi, yapılan çalışmanın net bir şekilde incelenebilmesi için çok önemlidir. Gözenek yapısı homojen olmayan metal köpük malzemeler içerisinde bölge bölge farklı sonuçlar ortaya çıkabilir. Literatürde, metal köpüklerle ilgili birçok araştırma bulunmakta olup, genellikle gözenek yapısının, gözenek yoğunluğunun ve malzemesinin, çalışılan sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2.5. Elektronik Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Hesaplama Yöntemleri

Elektronik soğutma sistemlerinin ısıl ve hidrodinamik analizinde, uygulanan yöntemlere göre bazı değişiklikler olsa da genel olarak kapalı çevrim çalışmalarında (doğal ve zorlanmış taşınım uygulamaları) boru ve kanallar içerisinden olan iç akış için kullanılan hesaplama yöntemleri tercih edilmektedir. Bu kısımda elektronik soğutma sistemlerinde doğal ve zorlanmış akış uygulamalarında kullanılan analiz yöntemlerinden bahsedilmiş olup, tüm eşitlikler Incropera vd. (2011)'dan alınmıştır.

2.5.1. İç akışta hidrodinamik ve ısıl davranış

Elektronik soğutma kapsamında literatürde yapılan çalışmaların bir kısmı ısıl ve/veya hidrodinamik olarak tam gelişmiş bölgede yapılırken, büyük bir kısmı ise özellikle gerçek sistemlerde (Örn. bilgisayar soğutma sistemleri) tam gelişmiş akış koşullarını sağlayacak uzunlukta uygun ortam bulunmaması nedeniyle gelişmekte olan akış koşullarında uygulamalar yapılmıştır.

a. Hidrodinamik davranış,

Isı transferi veya akış çalışmalarında, kanal içerisinden geçen akışın hangi bölgede olduğu ve davranışını belirlemek oldukça önemlidir. Bu kapsamda Şekil 2.9'de verilen dairesel bir kanal düşünüldüğünde, bir akışın kanal içerisinde yüzey ile temas ettiği ilk andan itibaren sürtünme etkileri ile hız sınır tabakası gelişmeye başlar. Belirli bir x mesafesinden sonra sürtünme etkileri tüm kanal kesiti boyunca aynı olur ve sabit bir hız profili oluşur. Kanal boyunca hız profilinin sabit olarak ilerlediği bu noktaya "hidrodinamik giriş uzunluğu" denir. Hidrodinamik giriş uzunluğunun oluştuğu noktadan itibaren sonraki akışın şekline ise "tam gelişmiş akış" denir.

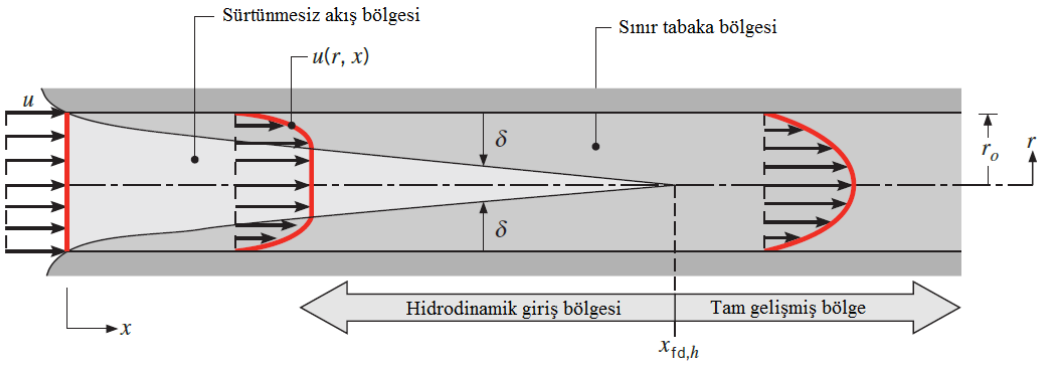
Kanaliçi akış çalışmalarında hidrodinamik giriş uzunluğunun belirlenmesi için akış tipinin (laminer veya türbülanslı) analiz edilmesi gerekmektedir. Çünkü kanaliçi bir akışta hidrodinamik giriş uzunluğu akışın laminer ($Re \leq 2300$) veya türbülaslı ($Re > 2300$) olmasına göre değişiklik göstermektedir. Akış tipinin belirlenmesinde Reynolds sayısından (Re) faydalanılmaktadır ve aşağıdaki verildiği gibi ifade edilir.

$$Re = \frac{\rho u_\infty D}{\mu}$$

Burada ρ, u_∞, D ve μ sırasıyla yoğunluk, ortalama akış hızı, boru çapı ve dinamik viskozitedir. Genellikle ısı transferi ve akış çalışmalarında formüller dairesel kanala göre verilmiştir. Dairesel olmayan kanallarda ise hidrodinamik çap (D_h) kullanılmakta olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D_h \equiv \frac{4A_k}{P}$$

Burada A_k akış kesit alanı, P ise ıslak çevredir.



Şekil 2.9. Kanaliçi akışta hidrodinamik sınır tabakanın değişimi (Incropera vd. 2011)

Hidrodinamik giriş uzunluğu laminer akışta,

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D}\right)_{Laminer} \approx 0.05\, Re_D$$

şeklinde hesaplanırken, türbülanslı akışta genel bir ifade olmamasına rağmen yaklaşık olarak,

$$10 \leq \left(\frac{x_{fd,h}}{D}\right)_{Türbülanslı} \leq 60$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buna göre ($x_{fd,h}$/D)>10 olduğunda tam gelişmiş türbülanslı akış kabul edilmektedir.

b. Isıl davranış,

Kanaliçi akışların analizinde hidrodinamik davranıştan sonra ısıl davranış incelenmektedir. Bu kapsamda Şekil 2.10'da verilen kanal düşünüldüğünde, sıcaklığı yüzey sıcaklığından daha düşük olan bir akışın kanala T(r,0) noktasından girmesiyle birlikte hem ısı transferi hem de ısıl sınır tabaka gelişmeye başlar ve girişinden itibaren belirli bir mesafeden ($x_{fd,t}$) sonra akış "ısıl açıdan tam gelişmiş akış" durumuna gelir. Kanal içerisindeki akışın ısıl açıdan tam gelişmiş hale gelmesi için gereken mesafeye ise "ısıl giriş uzunluğu" denir.

Hidrodinamik davranışta olduğu gibi ısıl davranışta da ısıl giriş uzunluğunun belirlenmesi için gereken mesafe akışın laminer veya türbülanslı olmasına göre değişiklik gösterir. Bu kapsamda laminer akış için ısıl giriş uzunluğu,

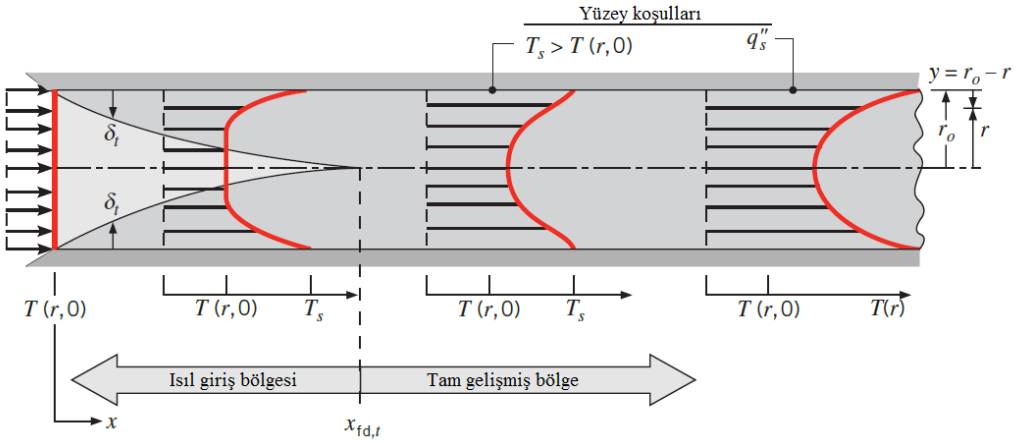
$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{Laminer} \approx 0.05 Re_D Pr$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada $x_{d,t}$, D, Re ve Pr sırası ile ısıl giriş uzunluğu, kanal çapı, Reynolds sayısı ve Prandtl sayısıdır. Boyutsuz Prandtl sayısı hız sınır tabakanın ısıl sınır tabakaya oranı olarak bilinir ve hangisinin daha önce oluştuğunu belirlemede kullanılır. Pr sayısının hesaplanması,

$$\mathrm{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{v}{\alpha}$$

şeklinde ifade edilir. Buna göre bir kanaliçi akışta Pr > 1 ise hidrodinamik sınır tabakanın ısıl sınır tabakadan daha hızlı gelişmektedir. Bunun sonucu olarak da hidrodinamik giriş uzunluğu ısıl giriş uzunlundan daha kısadır. Eğer Pr < 1 ise tam tersi durum mevcuttur. Isıl sınır tabaka daha hızlı gelişir ve bunun sonucu olarak da ısıl giriş uzunluğu hidrodinamik giriş uzunluğundan daha kısadır. Kanaliçi türbülanslı akış göz önüne alındığında ısıl giriş uzunluğu Pr sayısından bağımsızdır ve aşağıdaki şekilde alınabilir.

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right) = 10$$



Şekil 2.10. Kanaliçi akışta ısıl sınır tabakanın değişimi (Incropera vd. 2011)

Kanaliçi uygulamalarda ısı transferi analizinde kullanılan en önemli boyutsuz sayı Nusselt sayısıdır. Nusselt sayısı yüzeyden taşınımla olan ısı transferinin bir ölçüsüdür. Birçok çalışmada yüzeyden akışkana aktarılan ısı transferi miktarını belirlemede kullanılır. Nusselt sayısı,

$$Nu = \frac{hl}{k}$$

şeklinde hesaplanır. Burada h ve k sırası ile taşınımla ısı transferi katsayısı ve termal iletkenlik katsayısı, l ise kanal uzunluğudur ve farklı çalışmalarda kesit alanı veya hidrolik çap alınabilmektedir. Nusselt sayısı 1'e eşit olması durumunda ısı transferinin iletmle ısı transferi şeklinde gerçekleştiği söylenebilir. Ayrıca Nusselt sayısı ne kadar

yükselirse taşınımla ısı transferi miktarı iletimle olan ısı transferi miktarına göre artacaktır. Isınan bir yüzeyden akışkana aktarılan ısı miktarına bağlı olarak taşınımla ısı transferi katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$h = \frac{\dot{Q}_{konv.}}{A\Delta T}$$

Kanaliçi akışta girişten itibaren hem hız ve hem de ısıl sınır tabaka aynı anda oluşmaya başladığı için akışın analizi oldukça güçtür. Isıtılmamış başlangıç uzunluğundan sonra ısı geçişi olan örnek bir kanalda, en basit çözüm hidrodinamik giriş uzunluğu sağlanıp tam gelişmiş akış profili oluşuyorsa ısıl sınır tabakanın oluştuğunun kabul edilmesidir. Bu yaklaşım yağlar gibi Prandtl sayısı çok yüksek akışkanlar için uygun bir yaklaşım olabilir. Ancak elektronik soğutma sistemleri gibi ısıtılmamış başlangıç uzunluğunun verilmediği bir kanallarda hız ve ısıl sınır tabaka aynı anda gelişmeye başlar. İki sınır tabakanın da aynı anda gelişmeye başladığı durumlara birleşik giriş uzunluğu problemi denir. Bu kapsamda, bir kanalda giriş bölgesindeki akışın ısıl sınır tabakasının belirlenmesinde aşağıda verilen Graetz sayısından faydalanılabilir.

$$Gz_D \equiv \left(\frac{D}{x}\right) Re_D Pr$$

Kanaliçi çalışmalarda eğer tam gelişmiş akış koşullarında çalışılıyor ise, gerekli Re, Pr ve L/D oranlarının sağlanması koşuluyla literatürde belirtilen Nusselt formüllerinden faydalanılarak gerekli çözümlemeler yapılabilir. Ancak gerçek çalışmalarda, özellikle elektronik sistemlerde boyutların küçük olması nedeniyle akışın tam gelişmiş akış durumuna gelmesi için gerekli mesafeler sağlanamamakta olup, çoğu elektronik soğutma sisteminin analizi giriş bölgesinde yapılmaktadır. Benzer şekilde, literatürde de yapılan çoğu çalışmada gerçekçi sistemlere yaklaşabilmek amaçlı giriş bölgesinde araştırmalar yapılmıştır.

Elektronik soğutma sistemlerinde asıl amacın elemanın üzerinde oluşan fazla ısıyı uzaklaştırarak yüzey sıcaklıklarını minimumda (kritik değerin altında olacak şekilde) kalmasını sağlamak olduğu için, analizlerde öncelikli olarak yüzey sıcaklığı dikkate alınır. Bilgisayar çalışırken sürekli olarak ölçülen CPU yüzey sıcaklığı, kritik değerin (genellikle 70-75 °C) üzerine geçerse, bilgisayar otomatik olarak kendini kapatır. Bu şekilde bilgisayarların fazla ısınmaya karşı korunması sağlanmış olur. Ancak CPU sıcaklık değerinin düzgün ölçülememesi veya bir şekilde bilgisayarın kendini kapatması engellenirse artan yüzey sıcaklıkları, ilk önce performansın düşmesine, daha sonra da aşırı ısınmalar nedeniyle elemanın bozularak kullanılamaz hale gelmesine yani parça veya cihaz değişimine neden olur. Bu kapsamda, elektronik soğutma sistemleri konusunda çalışma yapılırken ilk olarak yüzey sıcaklıkları dikkate alınır.

Literatürde elektronik sistemlerin soğutulması kapsamında yapılan çalışmalarda, tercihe göre logaritmik ortalama sıcaklık farkı alınabildiği gibi doğrudan yüzey ile akışkanın giriş sıcaklığı arasındaki fark ($T_y - T_g$) da kullanılabilmektedir. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı (LMTD),

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_g - T_ç}{\ln\left(\frac{T_y - T_ç}{T_y - T_g}\right)}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada T_g, $T_ç$ ve T_y sırasıyla akışkanın kanala giriş sıcaklığı, akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı ve yüzey sıcaklığı ya da yüzey ortalama sıcaklığıdır.

Isınan yüzeyden akışkana aktarılan ısı miktarı, aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır.

$$q_{konv.} = \dot{m} c_p \Delta T$$

Burada, $\dot{m}$, c_p ve ΔT sırasıyla akışkanın kütlesel debisi, özgül ısısı ve sıcaklık farkıdır. Yukarıda verilen hesaplamalar elektronik soğutma sistemlerinin ısıl analizinde kullanılan genel ifadelerdir. Karşılaşılan ısınma problemine göre seçilen soğutma yönteminin analizinde farklı hesaplama prosedürleri uygulanmaktadır.

2.6. Elektronik Soğutma Sistemlerinde Nanoakışkan ve Metal Köpük Kullanımına Yönelik Çalışmalar

Geçmişten günümüze kadar insanlar günlük işlerini kolaylaştırmak için birçok alet, cihaz vb. ekipmanlar geliştirmiştir. Üretilen bütün aletler ve daha sonrasında gelen elektronik sistemlerdeki ortak amaç yapılması gereken işlerin daha verimli, hızlı ve ekonomik bir şekilde yerine getirilmesidir. Bu kapsamda ilk üretilen alet ve cihazlarda belirli bir işi daha hızlı ve verimli olarak yapmak hedeflenirken, teknolojinin gelişmesiyle birlikte yeni icat edilen cihaz ve makinelerde ise çok fonksiyonlu, hızlı, verimli ve ekonomik olmaları hedeflenmektedir. Özellikle 1900'lü yıllarda mikroişlemcilerin devreye girmesiyle birlikte üretilen her yeni elektronik sistemde işlem hızı, boyut ve maliyet önemli bir kıstas haline gelmiştir. Ancak teknolojideki bu hızlı gelişim beraberinde birtakım dezavantajları da yanında getirmiştir. Bu dezavantajlardan en önemlisi ve en çok karşılaşılanı ısınma problemidir.

Üretilen her yeni cihazın daha küçük, daha yüksek performanslı ve maliyeti düşük olması kullanıcı ve üretici açısından çok caziptir. Ancak bu durumda performansın artmasıyla birlikte elektronik sistemler daha çok enerji tüketmekte ve dolayısıyla artan fazla enerjileriyle daha çok ısınmaktadırlar. Elektronik elemanların üzerinde biriken ısı enerjisinin artması cihazın sıcaklığının daha çabuk yükselmesine neden olmaktadır. Buna ek olarak boyutlarının da küçülmesi birim alanda üretilen ısı miktarını arttırarak

kullanılan soğutma sisteminin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Boyutlardaki küçülmenin bir diğer dezavantajı ise hem kullanılması planlanan soğutma sisteminin montajı için gerekli alanın azalmasına, hem de uygulanacak soğutma işlemine göre gerekli olan kanal boyutlarının küçülmesine neden olmaktadır.

Elektronik sistemlerin soğutulmasında yukarıda belirtilen sorunların ışığında, araştırmacılar birim hacimde daha yüksek soğutma performansına sahip sistemler geliştirmek için birçok çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmalar genel olarak,

- Temas yüzey alanını geliştirmeye,
- Akış tipini değiştirmeye,
- Malzeme cinsini veya yapısını değiştirmeye,
- Akışkan özelliklerini değiştirmeye,

yönelik çalışmalardır.

Yapılan bu tez çalışması, elektronik sistemlerin artan performansları ve küçülen boyutları doğrultusunda birim alanda artan ısıl yükleri göz önüne alınarak yapılmıştır. Bu kapsamda etkin soğutmanın yapılabilmesi için literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Literatürde tez çalışmasının konusuna benzer şekilde yapılan çalışmalar derlenerek dört farklı grup altında toplanmıştır. Bunlar sırasıyla elektronik sistemlerin soğutulmasında;

- Metal köpük malzemelerle yapılan çalışmalar
- Nanoakışkanlarla yapılan çalışmalar
- Nümerik çalışmalar
- Metal köpük - nanoakışkan birleşik çalışmalarıdır.

2.6.1. Metal köpük malzemelerle yapılan çalışmalar

Bayomy ve Saghir (2016) çalışmalarında, intel core i7 işlemcisi için hazırlanan alüminyum köpük ısı alıcısının ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Elde edilen deneysel veriler nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada soğutma akışkanı olarak su kullanılmış olup, akışın titreşimli-sürekli olma durumlarında ölçümler alınmıştır. Deney düzeneğinde ölçümler bir önceki çalışmayla aynı Reynolds sayısı, ısı akısı aralığında yapılmıştır. Titreşimli akışta su kanal içerisinde kalp atışı gibi bir nabız aralığında (0.04-0.1 Hz genlik aralığında) sistem içerisine gönderilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, ortalama yüzey sıcaklığının ısı akısının azalmasıyla, akış frekansının ve genliğinin artmasıyla düştüğünü belirlenmiştir. Titreşimli akışın etkisiyle ortalama Nusselt sayısında sürekli akışa göre %14 artış olduğunu gözlenirken, buna karşılık, homojenlik indeksinde ise %73 düşüş olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede yüzey sıcaklığının sürekli akış durumuna göre daha homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir.

Yine, Bayomy ve Saghir (2017) yaptıkları çalışmada, aynı düzenekte alüminyum köpük ısı alıcısınının ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Kullanılan alüminyum metal köpük ısı alıcısının gözenekliliği, ve gözenek yoğunluğu sırasıyla 0.9 ve 40 PPI'dır. Çalışmada soğutma akışkanı olarak su kullanmış olup, Reynolds sayısının 297-1353 aralığındaki değerleri için ölçümler yapılmıştır. Elektrikli ısıtıcı tarafından yüzeye 8.5 ve 13.8 W/m^2 değerinde ısı akıları uygulanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar nümerik model ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, ısıl giriş uzunluğunun Reynolds

sayısının artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Yerel yüzey sıcaklıklarının ısı akısıyla ve akış yönü boyunca arttığı, Reynolds sayısıyla azaldığı belirlenmiştir.

Elektronik soğutma sistemlerinde metal köpük malzeme kullanımının etkisini inceleyen Bayomy ve Saghir (2017) daha sonra aynı deney düzeneği üzerinde kanatçıksız (A), iki kanatçıklı (B) ve üç kanatçıklı (C) metal köpük ısı alıcılarının kullanımını incelemişler ve elde ettikleri sonuçları nümerik modelle karşılaştırmışlardır. Önceki çalışmalarla aynı ısı akılarında ve Reynolds sayısının 541-1353 aralığındaki değerlerinde çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, üç ısı alıcısında da yerel yüzey sıcaklığının artan ısı akısıyla ve akış yönü boyunca arttığı ancak artan Reynolds sayısıyla düştüğü belirlenmiştir. Isı alıcılar incelendiğinde A tipi ısı alıcıda diğerlerine göre daha düşük yerel sıcaklıklar tespit etmiş olup, B ve C tipleri ile karşılaştırıldığında ortalama Nusselt sayısında sırasıyla %10 ve %20 düşüş olduğu belirtilmiştir. Metal köpük tasarımında optimum modelin belirlenmesi için termal verim indeksinden faydalanılmıştır. Bu kapsamda en uygun metal köpük ısı alıcısı Reynolds sayısının Re = 1353 tipinin B olduğuna karar verilmiştir.

Bayomy ve Sahgir (2020) bir diğer çalışmalarında arası metal köpük malzemeyle doldurulmuş alüminyum kanatçıklı ısı alıcıların termal performansını yine nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Önceki çalışmalarla aynı ısı akısında fakat farklı Reynolds sayılarında (300-600) ölçümler alınmıştır. Çalışmada üç (A), dört (B) ve beş (C) kanatçıklı olmak üzere üç farklı ısı alıcısı modelinde deneyler yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, B modelinde diğerlerine göre yerel yüzey sıcaklıklarının daha düşük, ortalama Nusselt sayısının daha yüksek olduğunu tespit edilmiştir. Deneylerde test bölgesi girişinde yerel Nusselt sayılarının yüksek olduğu ve akış boyunca azaldığı görülmüştür. B ve C modellerinin kullanımında A modeline göre, ortalama Nusselt sayısında sırasıyla %30 ve %17 oranında iyileştirme elde edilmiştir. En yüksek basınç kaybı miktarı C modelinde görülürken, Termal verim indeksine göre optimum modelin B modeli olduğu görülmüştür.

Boomsma vd. (2003) yaptıkları çalışmada, farklı gözenekliliğe sahip sıkıştırılmış alüminyum (6101-T6) açık hücreli metal köpüklerin, (Ortalama köpük çapı 2.3 mm) elektronik soğutma uygulamalarında ısı değiştiricisi olarak kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada test bölgesi üst kısımdan ısıtılmıştır ve maksimum ısıtıcı gücü 1000 W olarak belirlenmiştir. Ölçümlerde soğutma akışkanı olarak su kullanmış olup, elde ettikleri sonuçlara göre, sıkıştırılmış alüminyum köpüklerin, ısı transferinde benzer şartlar altında çalışan ticari ısı değiştiricilere göre daha iyi ısıl verime sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Benzer şekilde metal köpük ısı değiştiricilerin, ticari ısı değiştiricilere göre, termal direnci yaklaşık olarak yarıya düşürdüğü gözlenmiştir.

Elektronik soğutmada metal köpük ısı alıcıların termal performansı Li vd. (2021) tarafından deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada gözenek yoğunluğu 10 ve 20 PPI olan metal köpük malzemelerin ısı transferine etkisi araştırılmış olup, soğutma akışkanı olarak su kullanmıştır. Elde edilen sonuçlarda, köpük ısı alıcıların termal performansının boş kanala göre 1.4-1.76 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 20 PPI metal köpük ısı alıcısı kullanımında ısı transferinde elde edilen iyileştirme miktarının 10 PPI metal köpüğe göre %5 daha fazla olduğu görülmüştür. Yine Li vd. (2020) aynı deney düzeneğinde içerisinde iğneli kanatçıklar bulunan metal köpük ısı alıcısının termal performansı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada, içerisinde iğneli

kanatçık bulunan ve bulunmayan 10 ve 20 PPI metal köpük ısı alıcılardan elde edilen ısı transfer sonuçları karşılaştırılmış ve iğneli kanatçık bulunan metal köpük ısı alıcıların ısıl performansı %65 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, gözenek yoğunluğunun artmasıyla hem iğneli kanatçıklı hem de kanatçıksız metal köpük ısı alıcılarda ısı transferinin arttığı gözlenmiştir. Isı alıcı içerisinde gözenek boyutunun küçülmesi ve iğneli kanatçıkların kullanılmasıyla, basınç kaybı miktarında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Pompalama gücü sabit tutulup, ısı transferine göre bir karşılaştırma yapıldığında iğneli kanatçıklı metal köpük ısı alıcıların kanatçıksız olanlara göre Nusselt sayısını 1.5 kat arttırdığı görülmüştür.

Abadi ve Kim (2017) çalışmalarında, 4 mm iç çapa, 500 mm uzunluğa sahip yatay bakır bir borunun içini metal köpükle doldurarak, ısı transferi ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada soğutma akışkanı olarak R245fa akışkanı kullanılmış olup, bakır borunun içeri %90 gözenekliliğe sahip 20 PPI ve 30 PPI metal köpük malzemeler kullanarak ısı transferine etkileri incelenmiştir. Deneyler yapılırken soğutma akışkanının kütlesel debi akısı 200-1000 kg/m^{2}s aralığında tutmuş ve bakır boruya sabit ısı akısı uygulanmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, taşınımla ısı transfer katsayısı ve basınç düşümü miktarının hem Reynolds sayısına hem de metal köpük geometrisine bağlı olduğu belirlenmiştir. İçi metal köpük dolu borunun termo-hidrolik davranışını belirlemek için birçok korelasyon denenmiştir. Ancak kesit alanının boru çapına bağlı olarak dar olmasından dolayı birçok öngörünün başarısız olduğu görülmüştür. Çalışmada köpük malzeme kullanımıyla boş kanala göre daha yüksek taşınımla ısı transfer katsayısı ve basınç düşümü elde edilmiştir. Yapılan çalışmada içerisinde 30 PPI metal köpükle doldurulmuş kanalda en yüksek ısı transferi ve en yüksek basınç düşümü elde edilmiştir.

Bhattacharya ve Mahajan (2002) çalışmalarında, içerisinde farklı sayıda kanatçıklar (1,2,4 ve 6) bulunan 5 ve 20 PPI alüminyum metal köpük (%90 gözeneklilik) malzemelerden olan ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada soğutucu akışkan olarak havanın kullandığı deney düzeneğini bir hava tüneli şeklinde tasarlamışlardır. Metal köpük ısı alıcıların bulunduğu taban kısmına elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiş olup, hava hızı 0.5 – 2 m/s aralığında tutulmuştur. Elde ettikleri sonuçlara göre, köpüklerin içerisine kanatçıkların eklenmesiyle ısı transferinin arttığını tespit edilmiştir. Taşınımla ısı transferi katsayısının, kanatçık sayısıyla arttığını ancak belirli bir değerden sonra artan basınç düşümü miktarına bağlı olarak azaldığını belirlenmiştir. Bu duruma göre, 20 PPI metal köpükte basınç düşümüne karşı elde edilen ısı transferi miktarına bağlı olarak optimum dört kanatçığın kullanılmasının en iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. 5 PPI metal köpükte ise sırasıyla 1, 2 ve 4 kanatçıklı örneklerle ölçümler yapılmış olup, 20 PPI metal köpükle benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak 5 PPI metal köpük ısı alıcıda gözenek boyutunun daha büyük olması nedeniyle basınç düşümünün daha düşük olduğu gözlenmiştir. Kanatçıklı metal köpük ısı alıcıların kullanımının, kanatçıksız olanlara göre 1.5-2 kat daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Feng vd. (2014) çalışmalarında kanatçıklı metal köpük ısı alıcıların hava jetiyle soğutulmasının ısı transferine etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada içerisinde farklı yüksekliklerde, kanatçıklı ve kanatçıksız olarak hazırlanmış, %96,3 gözenekliliğe sahip 8 PPI alüminyum metal köpük ısı alıcılar kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, belirli bir debide kanatçıksız metal köpüklerle yapılan ölçümlerde köpük yüksekliği arttıkça ısı transferinin düştüğü belirlenmiştir. Kanatçıklı

metal köpük ısı alıcılarda ise köpük yüksekliğinin artmasıyla ısı transferinin arttığı tespit edilmiştir. Belirli bir debide veya pompalama gücünde kanatçıklı metal köpüklerden elde edilen ısı transferi miktarının kanatçıksız olanlara göre 1.5-2.8 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Yine Feng vd. (2018) yaptıkları çalışmada, ayrık olarak yerleştirilen metal köpük ısı alıcıların doğal konveksiyonla ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 10, 20, 40 ve 80 mm yüksekliğinde bakır metal köpük şeritler ısınan yüzeye 4, 5, 6, 7, 8 ve 10 sıra olacak şekilde yan yana yerleştirilmiştir. Şerit sayısı arttıkça aradaki boşluk miktarı da şerit sayısıyla orantılı olarak 20, 12.5, 8, 5, 2.86 ve 0 mm olarak azalmaktadır. Çalışmada ısıtıcıya verilen güç 0.8-24 W arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, taşınımla ısı transfer katsayısının şeritler arası mesafenin artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Ancak, şeritler arası mesafenin belirli bir değerinden sonra taşınımla ısı transfer katsayısında azalma olduğu gözlenmiştir. Metal köpük şeritler arasındaki optimum mesafe 5-8 mm olarak belirlenmiştir.

Doğan ve Ozbalcı (2017) yaptıkları çalışmada, gerçek bir sistemde bulunan CPU soğutucusunda metal köpük ısı alıcısı kullanımının ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemek için 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcılarını kullanmışlardır. Çalışmada ölçümler CPU'nun hem %0-10 (Bekleme durumu) kullanımında hem de %100 kullanımında ve ayrıca fan hızının 1140-4187 rpm değerinde alınmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, CPU %0-10 yükleme durumunda yüzey sıcaklık değeri alındığında, 10 PPI metal köpük malzemenin 40 PPI olana göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Ancak CPU %100 yükleme durumuna alındığında ise 40 PPI metal köpük ısı alıcıda gözenek yoğunluğuna bağlı olarak, iletimle ısı transferinin daha yüksek olması nedeniyle yüzey sıcaklık değeri daha düşük çıkmıştır.

Kanal içerisinde ayrık metal köpük ısı alıcıların kullanılmasının ısı transferine etkisini Doğan ve Ozbalci (2018) deneysel olarak çalışmışlardır. Tek sıra halinde ayrık olarak yerleştirilmiş 10, 20 ve 40 PPI metal köpük malzemelerin bulunduğu dikdörtgen şeklindeki kanalda doğal taşınımla ısı transferini farklı kanal açılarında incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, kanal açısının artmasıyla ısı transferi miktarının arttığı belirlenmiştir. Metal köpük ısı alıcıların kullanılması sonucu ısı transferinde boş kanala göre 2.3 kat artış olduğunu tespit edilmiştir. Isı transferindeki en yüksek artışı 10 PPI kanalda ve 30° kanal açısında olduğu belirlenmiştir.

Yine Ozbalcı ve Doğan (2018) ayrıca 3x3 diziliminde yerleştirilen metal köpük ısı alıcıların zorlanmış taşınım altındaki ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada 10, 20 ve 40 PPI metal köpük ısı alıcılar için ölçümler yapılmıştır. Reynolds sayısının 3363-9743, modifiye edilmiş Grashof sayısının $2.7 \times 10^6 - 7.5 \times 10^6$ aralığında deneyler yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, metal köpük ısı alıcı kullanımında boş kanala göre ısı transferinde neredeyse iki kat artış olduğu tespit edilmiştir. Orta sıradaki metal köpük ısı alıcıların yan taraflarda bulunanlara göre, yüzey sıcaklıkların daha yüksek, Nusselt sayısının ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Karşılaştırma yapıldığında ise 10 PPI metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla yüzey sıcaklıklarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

2.6.2. Nanoakışkanlarla yapılan çalışmalar

Ali ve Arshad (2015) çalışmalarında, iğneli mini kanatçıklara sahip bir ısı alıcısının farklı TiO_2/H_2O nanoakışkanlarıyla ısı transfer performansını incelemişlerdir. Çalışmada kanal içerisinde iğneli mini kanatçıklar düz sıralı (90°) ve açılı sıralı (45°) olarak iki farklı şekilde test bölgesine yerleştirilmiştir. Soğutma akışkanı olarak TiO_2/H_2O (Anataz) ve TiO_2/H_2O (Rutil) nanoakışkanları sırasıyla hacimce %4.31 ve %3.99 derişiminde hazırlanmıştır. Test bölgesinin altına 192 W güce sahip mika ısıtıcı yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, düz sıralı ve açılı sıralı kanatçık kullanımında, TiO_2/H_2O (Rutil) nanoakışkanından elde edilen iyileştirme oranının anataz yapıya sahip nanoakışkana göre, sırasıyla %16.46 ve %15.27 daha fazla olduğu gözlenmiştir. Düz sıralı ve açılı sıralı kanatçık durumunda temel akışkana göre, rutil yapılı nanoakışkan kullanımında sırasıyla %37,78 ve %33.85, anataz yapılı nanoakışkan kullanımında ise %18.30 ve %16.11 iyileştirme elde edilmiştir. Isı alıcı duvarında görülen en düşük sıcaklık 29.4 °C olarak rutil yapılı nanoakışkanda ve düz sıralı kanatçık durumunda görülmüştür. Rutil ve anatas yapılı nanoakışkanların kullanılmasıyla, saf su kullanımına göre ısı alıcı duvar sıcaklığında sırasıyla ortama %5 ve %4 düşüş tespit edilmiştir.

Ali ve Arshad (2017) bir önceki çalışmalarına benzer şekilde iğneli kanatçıklı ısı alıcının içerisinde grafen nanoplaka (GNP)-su nanoakışkanını kullanmışlardır. Soğutma akışkanının hacimsel debi aralığı 0.25 – 0.75 L/dk olup, hacimce %9.5 derişiminde nanoakışkan hazırlanmıştır. Bir önceki çalışmadan ayrı olarak burada iğneli kanatçıklı ısı alıcısı test bölgesine farklı koordinat açılarında (22.5°, 45° ve 90°) yerleştirilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, iğneli kanatçık sırasının eğim açısı 90°'den 22.5°'ye düşmesiyle taşınımla ısı transferi katsayısının arttığı belirlenmiştir. 22.5° ve 45° derece eğim açısında yapılan ölçümlerde 90°'ye göre, taşınımla ısı transferinde sırasıyla %84.30 ve %38.48 iyileşme gözlenmiştir. 22.5°, 45° ve 90° açılarında, GNP nanoakışkanının kullanılmasıyla taşınımla ısı transferi miktarında saf suya göre, sırasıyla %23.86, %22.44 ve %19.68 artış tespit edilmiştir. Aynı eğim açılarında nanoakışkan kullanımıyla birlikte ortalama logaritmik sıcaklık farkında saf suya göre sırasıyla %22.51, %19.72 ve %6.05 düşüş görülmüştür.

Sajid vd. (2019) çalışmalarında içerisinde dalgalı mini kanatçıklar bulunan bir ısı alıcısının içerisinden TiO_2/H_2O nanoakışkanını geçirerek ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. TiO_2/H_2O nanoakışkanı hacimce %0.006, %0.008, %0.01 ve %0.012 derişimlerinde hazırlanmıştır. 25, 35 ve 45 W ısıtıcı güçlerinde yapılan ölçümlerde nanoakışkanlardan elde ettikleri sonuçları laminer akışta saf suyla karşılaştırmışlardır. Test bölgesinde, $WCHS_1$ (W_c = 1 mm, λ=15 mm ve A = 1 mm), $WCHS_2$ (W_c = 2 mm, λ=15 mm ve A = 1 mm) ve $WCHS_3$ (W_c = 1 mm, λ=5 mm ve A = 0.5 mm) olmak üzere üç farklı şekilde kanatçıklı ısı alıcı (WCHS) kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlarda, ısı transferinin geometriden etkilendiğini belirlemiş olup, Nusselt sayısının, ısı alıcının kanatçık genişliğine göre uzunluğundan daha çok etkilendiği tespit edilmiştir. Reynolds sayısının 894 ve ısıtıcı gücünün 25 W olduğu durumda, $WCHS_3$ ısı alıcısı ve hacimce %0.012 derişimine sahip TiO_2/H_2O nanoakışkanı kullanımında Nusselt sayısındaki en yüksek iyileştirme miktarını %40.57 olarak belirlenmiştir. Aynı Reynolds sayısında ve en düşük ısıtıcı gücünde, $WCHS_3$ ısı alıcısı ve hacimce %0.012 derişimine sahip TiO_2/H_2O nanoakışkanı kullanımıyla, en düşük yüzey sıcaklığı 33.85 °C olarak tespit edilmiştir. Pompalama gücü açısından değerlendiğinde, $WCHS_3$ ısı alıcısında

maksimum ve $WCHS_2$ alıcısında ise minimum olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, $WCHS_3$ ısı alıcısının soğutma performansının diğer ısı alıcılardan daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Yine Sajid vd. (2020) çalışmalarında bir önceki çalışmaya benzer bir uygulama yapmış olup oluklu mini kanal ısı alıcısı içerisinden geçirilen MgO-su nanoakışkanının ekserjisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada kullandıkları MgO-su nanoakışkanını hacimce %0.006, %0.008 ve %0.01 derişimlerinde hazırlamışlardır. Çalışmada kullanılan oluklu mini kanal ısı alıcıları (CMHS) bir önceki çalışmaya benzer şekilde farklı genişlik ve uzunluklarda üretilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, nanoakışkan kullanımıyla ısı transfer miktarını saf suya göre düşürmüş olup, 25 W ısıtıcı gücünde %0.01 hacimsel derişiminde MgO-su nanoakışkanı kullanımında Nusselt sayısında su ya göre, %28.75'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. Diğer ısı alıcılara göre, daha uzun kanal mesafesine, daha düşük dalga boyuna ve daha kısa kanal genişliğine sahip olan $CMHS_3$ ısı alıcısıyla ve hacimce %0.01 nanoakışkanıyla en düşük duvar sıcaklığı 33.86 °C olarak ölçülmüştür. Bütün nanoakışkan derişimlerinde saf suya göre daha yüksek çıkış ekserjisi ve ekserji verimi elde edilmiştir.

Aliabadi vd. (2017) çalışmalarında sıralı halinde yerleştirilen şerit kanatçıklı ısı alıcılar (OSPMHS) ve Al_2O_3-su nanoakışkanı kullanımının ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada farklı şerit kanatçık boyutu ve dizilimine sahip dokuz adet ısı alıcıda ölçümler yapılmıştır. Kullanılan Al_2O_3-su nanoakışkanı kütlece %0.1 ve %0.3 derişiminde hazırlanmıştır. Ölçümler, 50 W ısıtıcı voltajında ve kütlesel debinin 0.004, 0.008, 0.012, 0.016 ve 0.02 kg/s değerlerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, şerit kanatçık kalınlığının düşmesiyle, taşınımla ısı transfer katsayısının iyileştiğini ve basınç düşümünün azaldığını belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan diğer ısı alıcı geometrilerine göre şerit kanatçık uzunluğunun termal performans üzerinde daha etkili olduğunu tespit edilmiştir. Al_2O_3-su nanoakışkanının saf suya göre daha yüksek taşınımla ısı transfer katsayısına sahip olduğu gözlenmiştir.

Elektronik soğutmada mikro kanallı ısı alıcı içerisinde Al_2O_3-su nanoakışkan kullanımının enerji ve ekserji analizi Khaledduzzaman vd. (2014) tarafından yapılmıştır. Çalışmada hacimce %0.1 - %0.25 derişim aralığında hazırlanan Al_2O_3-su nanoakışkanları kullanılmış olup, ölçümler sırasında hacimsel debi 0.375-1 L/dk aralığında tutulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek enerji verimliliği %94.68 olarak, 0.375 L/dk hacimsel debide ve hacimce %0.25 derişiminde Al_2O_3-Su nanoakışkanının kullanılmasıyla elde edilmiştir. Saf suya göre çıkış ekserjisinde elde edilen en yüksek iyileştirme %60,86 olarak, 1 L/dk hacimsel debide ve hacimce %0.25 derişiminde Al_2O_3-su nanoakışkanında görülmüştür.

Khaledduzzaman vd. (2015) çalışmalarında, ticari elektronik soğutma sistemlerinde kullanılan su bloğu içerisinden hacimce %0.1 derişime sahip TiO_2-su nanoakışkanını geçirmişlerdir. Hacimsel debinin 1-1.5 L/dk aralığında, ölçümlerde elde ettikleri verileri su ile karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, 1 ve 1.5 L/dk hacimsel debide, nanoakışkan kullanımıyla yüzey sıcaklıklarını saf suya göre sırasıyla 6.4 °C ve 2.17 °C düşürmüşlerdir. Hacimce %0.1 derişime sahip TiO_2-su nanoakışkanının kullanılmasıyla, taşınımla ısı transfer katsayısında saf suya göre %18.91 artış belirlemişlerdir.

Khaleduzzaman vd. (2017) çalışmalarında daha önceki çalışmalara benzer şekilde su bloğu içerisinden farklı hacimsel debilerde (1, 1.25 ve 1.5 L/dk) TiO_2-su

nanoakışkanını geçirerek enerji ve sürtünme katsayısındaki değişimlerin detaylı analizini yapmışlardır. Çalışmada hacimce %0.1 derişimine sahip TiO_2-su nanoakışkanı kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, nanoakışkan kullanımıyla yüzey sıcaklığında 6.4 °C düşüş gözlemlemişlerdir. Hem termal direncin hem de yüzey sıcaklıklarının artan hacimsel debiyle birlikte düştüğü belirtilmiştir. Nanoakışkan kullanımıyla taşınımla ısı transfer katsayısındaki en yüksek artış %20.82 olarak tespit edilmiştir 1, 1.25 ve 1.5 L/dk hacimsel debilerde, nanoakışkanın kullanılmasıyla enerji verimliliğini sırasıyla %78, %75 ve %75 olarak ölçülürken, su kullanımında sırasıyla %22, %11 ve %9 olarak belirlenmiştir. Nanoakışkan kullanımıyla suya göre daha yüksek sürtünme katsayısı belirlenmiştir.

Zhao vd. (2019) çalışmalarında, CPU soğutmada kullanılan bir ısı alıcıda, TiO_2-su nanoakışkanının termo-hidrolik performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde yüzeyi 1mm (a-1), 2 mm (a-2) dikdörtgen oluklu düz plakalı, sıralı (b-1) ve çapraz hizalanmış (b-2) silindirik kanatçıklı ısı alıcılar kullanılmıştır. TiO_2-su nanoakışkanı kütlece %0, %0.1, %0.2, %0.3 %0.4 ve %0.5 derişimlerinde hazırlanmış olup, ölçümler Reynolds sayısının 472-1198 aralığında alınmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, geniş dikdörtgen oluklu (a-2) ve çapraz sıralı silindirik kanatçıklı (b-2) ısı alıcı yüzeylerinin ısı transferinde daha etkili olduğunu belirlemişlerdir. Aynı ısı alıcılar için kütlece %0.3 ve %0.4 derişimlerinde nanoakışkan kullanımın en iyi ısı transferini sağladığı tespit edilmiştir. En düşük kütlesel derişim olan %0.1 nanoakışkanda ise en yüksek ekserji verimliliğini elde edilmiştir.

Alfarytaj vd. (2019) çalışmalarında, bilgisayar soğutma sistemlerinde nanoakışkanların termal performans ve basınç düşümü deneysel olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda, ticari CPU soğutma sistemlerinde kullanılan bir su bloğundan yararlanmışlardır. Çalışmada kullanılan nanoakışkanlar, CeO_2, Al_2O_3 ve ZrO_2 nanopartiküllerinden hazırlanmıştır. Üç farklı nanopartikülle hazırlanan nanoakışkanların derişimleri %0.5, %1 ve %2 oranlarında tercih edilmiş olup, temel akışkan olarak %20 etilen glikol - %80 su karışımı kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, temel akışkanla karşılaştırıldığında, nanoakışkan derişimi ve hacimsel debinin arttırılmasıyla ısı alıcı yüzey sıcaklığında düşüş görülmüştür. En yüksek sıcaklık düşüşü %8.3 olarak, %2 derişimde CeO_2 nanoakışkanında elde edilmiştir. Aynı derişimlerde hazırlanan Al_2O_3 ve ZrO_2 nanoakışkanları temel akışkanla karşılaştırıldığında, yüzey sıcaklıklarında sırasıyla %6.1 ve %4.2 düşüş görülmüştür. Ayrıca ortam sıcaklığının 25°C'den 40 °C'ye çıkartılmasıyla birlikte yüzey sıcaklığında artış olduğu tespit edilmiştir. Derişimlerin yükseltilmesi ve kütlesel debinin arttırılmasıyla temel akışkana göre, CeO_2, Al_2O_3 ve ZrO_2 nanoakışkanlarının kullanılmasıyla taşınımla ısı transfer katsayısında sırasıyla %29, %22 ve %17 artış gözlenmiştir.

Ho vd. (2019) yaptıkları deneysel çalışmalarda, mini kanallı bir ısı alıcının içerisinden alümina nanoakışkanını geçirerek ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada Al_2O_3-Su nanoakışkanları ağırlıkça %0-%8 aralığındaki derişimlerde hazırlanmıştır. Ölçümler ısı akısının 1.2-6.8 W/cm^2, Reynolds sayısının 238-1549 aralığındaki değerleri için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, derişiminin artması ve debinin azalmasıyla sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Reynolds sayısının 258, derişimin %8 olması durumunda saf suya göre nanoakışkanda, 1.41 kat daha fazla basınç düşümü elde edilmiştir. Alümina nanopartiküllerinin eklenmesiyle yüzey sıcaklığının düşürdüğü ve Nusselt sayısını arttırdığı belirlenmiştir.

Dairesel bir tüp içerisinden Al_2O_3-Su nanoakışkanı geçirilmesi sonucu basınç düşümü ve taşnıımla ısı transfer katsayısının değişimi Hwang vd. (2009) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan Al_2O_3-Su nanoakışkanının hacimsel derişimi %0.01 - %0.3 arasında değişmekte olup, ölçümler hacimsel debinin 0.4-21 mL/dk aralığında ve 5000 W/m^2 ısı akısında yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, suyun içerisine nanopartikül eklenmesiyle, düşük hacimsel derişimlerdeki (%0.01 ile %0.3 aralığında) nanoakışkanların aksine, tam gelişmiş akış şartlarında taşınımla ısı transfer katsayısını arttırdığı belirtilmiştir.

Hassani vd. (2018) çalışmalarında, üzerinde trapez şekilli kanatçıklar bulunan ısı alıcısıyla nanoakışkan kullanımını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan kanatçıklı ısı alıcısıları 8 farklı boyutta hazırlanmıştır. Soğutma akışkanı olarak hacimce %0.5 ve %1 derişiminde Al_2O_3-su nanoakışkanını kullanmış olup, deneyler laminer akış bölgesinde (Re<900) yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçları nümerik modelle karşılaştırılmıştır. Bütün ısı alıcılarda nanoakışkan kullanımıyla performans indeksinde %4.4 ile %35.5 arası artış tespit edilmiştir.

Anoop vd. (2009) bir tüp içerisinden alümina nanoakışkanını geçirerek, gelişmekte olan akış bölgesinde ısı transferini deneysel olarak araştırmışlardır. İki farklı nanopartikül boyutunda (45 nm ve 150 nm) ve farklı kütlesel derişimlerde (%1, %2, %4 ve %6) alümina nanoakışkanı hazırlanmış olup, pH değerleri sırasıyla 6.5, 6, 5.5 ve 5 olarak değişmektedir. 1200 mm uzunluğundaki tüp içerisinde sıcaklık ölçümleri yedi farklı noktadan (x/D olarak 10, 21, 63, 105, 147, 200 ve 244) alınmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, iki farklı boyutta hazırlanan nanoakışkanların suya göre daha yüksek termal performans gösterdiğini belirlenmiştir. 45 nm nanopartikül boyutundaki nanoakışkanda görülen ısı transfer katsayılarının 150 nm olana göre daha yüksek olduğunu tespit edilmiştir. Reynolds sayısının 1550 olduğu durumda, 147 (x/D) noktasında görülen taşınımla ısı transferi katsayılarında 45 nm ve 150 nm nanopartiküllü akışkanlar için temel akışkana göre, sırasıyla %25 ve %11 artış tespit edilmiştir. Partikül derişiminin ve debinin artmasıyla taşınımla ısı transferinin arttığı belirlenmiştir.

Korpys vd. (2013) çalışmalarında CPU soğutmada kullanılan ticari ısı alıcısı içerisinden CuO-su nanoakışkanını geçirerek yüzey sıcaklıklarındaki değişimi incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları nümerik modelle karşılaştırmışlardır. CuO-su nanoakışkanını hacimce 0.0086 ve 0.0225 olarak hazırlamış ve maksimum gücü 115 W olan işlemciyi soğutma kullanmışlardır. Deneyler kütlesel debinin 0.009 ve 0.05 kg/s aralığında yapılmıştır. Yapılan çalışmada yüzey sıcaklığı 0.5 K düşürerek en iyi soğutma miktarını hacimce 0.0225 derişiminde nanoakışkan kullanarak tespit etmişlerdir. Bunun sonucunda CPU soğutmada temel akışkan olan suyun yüzey soğutmada yeterli olduğu sonucuna varmışlardır.

Hashemzadeh ve Hormozi (2020) çalışmalarında, mini kanal içerisinden farklı nanoakışkanlar geçirerek hidrolik ve termal performansa olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada alümina/su, silika/su ve alümina-silika/su nanoakışkanlarını kullanmış olup, hacimsel derişimler %0-2 aralığında değişmektedir. Deneyler Reynolds sayısının 490-3100 aralığında yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçlarda, Nusselt sayısının, nanopartikül derişimi ve Reynolds sayısının artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Hacimce aynı (%0.2) derişiminde sahip hibrit (%75 alümina - %25 silika) ve alümina-su nanoakışkanlarının kullanımında, Nusselt sayısındaki en yüksek ve en düşük artış miktarlarını sırasıyla %46

ve %11 olarak elde edilmiştir. Temel akışkanın içerisindeki nanopartikül derişiminin artmasıyla sürtünme faktöründe %10.4'den %62.2'ye kadarlık bir artış gözlenmiştir.

Nanoakışkanlarla farklı ısı alıcılar veya kanallarla yapılan diğer çalışmalar ise Çizelge 2.6'ta verilmiştir. Çizelgede literatürde bulunan çalışmalar test bölgesi, nanoakışkan ve yazar ismine göre gruplanmıştır.

Çizelge 2.6. Elektronik soğutma sistemlerinde nanoakışkan kullanımına dair diğer çalışmalar

Yazar	Test bölgesi	Nanoakışkan	Derişim	Temel akışkana göre iyileştirme miktarı
Duangthongsuk ve Wongwises (2015)	Isı alıcısı	SiO_2-H_2O	(ϕ) %0.2, 0.4, 0.6	%4-14 (ITP)
Kim vd. (2019)	Tüp	Al_2O3-H_2O	(ω) %0.5, 1, 2	(Re= 1400) ≈ %13.8, 24.13, 27.58 (ITK)
Nazari vd. (2014)	Isı alıcı	Al_2O3-H_2O, CNT-H_2O, EG/H_2O	(ω) %0.1, 0.25, 0.5 (ω) %0.1, 0.25 (ϕ) %30, 50	Al_2O3-Su : %6 CNT-Su : %13 (ITK)
Rafati vd.(2012)	Isı alıcı	SiO_2/EG-H_2O Al_2O_3/EG-H_2O TiO_2/EG-H_2O	(ϕ) %0.5, 1, 1.5 %0.5, 0.75, 1 %0.1, 0.25, 0.5	(Re = 57) ≈ %62.01 %89,65 %44.8 (ITK)
Bahiraei vd. (2021)	Isı alıcı	Ag-H_2O	(ϕ) %0-0.4	%25.5 (ITK)
Ho vd. 2021	Isı alıcı	n-ikozan-H_2O	(ω) %0-10	(Re = 1381, q" =4.78 W/cm^2) ≈ %15.38 (Nu)
Selvakumar ve Suresh (2012)	Isı alıcı	CuO-H_2O	(ϕ) %0.1, 0.2	%29.63 (ITK)
Nguyen vd. (2006)	Isı alıcı	Al_2O3-H_2O	(ϕ) %0.95, 2.2, 4.5	%23 (Nu)
Ghasemi vd. (2017)	Isı alıcı	Al_2O3-H_2O	(ϕ) %0.25, 0.5, 0.75	(1.5 L/dk) ≈ %28.26 (Nu)
Li vd. (2020)	Isı alıcı	Al_2O3-H_2O	(ϕ) %0.1-0.5	%12-66 (Nu)

Kısaltmalar:		
ϕ: Hacimce derişim	ITP: Isı transfer performansı	Nu: Nusselt sayısı
ω: Kütlece derişim	IKT: Taşınımla Isı transfer katsayısı	

2.6.3. Metal köpük ve nanoakışkanlarla yapıla nümerik çalışmalar

Mashai ve Hosseinalipour (2014) çalışmalarında gözenekli bir kanal içerisine yerleştirilen ayrık ısıtıcılardan zorlanmış taşınım altında incelemişlerdir. Kanalın boyutları yükseklik cinsinden verilmiş olup, taban kısmına ayrık olarak 0.75H boyutunda ısı kaynakları yerleştirilmiştir. Çalışmada soğutma akışkanı olarak hacimce %3, %5 ve %9 derişime sahip Al_2O_3-su nanoakışkanını kullanılmıştır. Analizler, Darcy sayısının 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-4} ve 10^{-6}, ısı akısının 5000, 10.000, 20.000 ve 30.000 W/m^2, gözenekliliğin 0.4, 0.6, 0.8 ve 0.95 değerlerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hacimsel debinin

artmasıyla ısı transfer miktarında ve basınç düşümünde artış olduğunu belirtilmiştir. Kerişim sabit tutulduğunda, saf suya göre, ısı akısı ve gözenekliliğin artmasıyla, ortalama taşınımla ısı transfer katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca aynı şartlar altında termal iletkenlik oranının (k_s/k_{bf}) azalmasıyla da, ortalama taşınımla ısı transfer katsayısının arttığı belirlenmiştir. Darcy sayısının değişmesiyle ortalama taşınımla ısı transfer katsayısında bir değişim görülmemiştir.

Behnampour vd. (2017) çalışmalarında, kanal içerisinde üçgen, dikdörtgen ve trapez mikro kanatçıklarla birlikte nanoakışkan kullanımının ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada hacimce %2 ve %4 derişiminde Ag-Su nanoakışkanını kullanmıştır. Analizde üçgen, dikdörtgen ve trapez olarak tasarlanan mikro kanatçıkların boyutları sabit tutularak, şekil etkisi incelenmiştir. Sabit ısı akısı bütün kanatçıkların olduğu bölgeden uygulanmış olup, kanalın diğer kısımlar yalıtımlı kabul edilmiş olup, çalışma Reynolds sayısının 1, 50 ve 100 değerlerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, sürtünme katsayısındaki ve basınçtaki artışa karşılık, derişimin artmasıyla taşınımla ısı transfer katsayısında ve Nusselt sayısında iyileşme olduğunu tespit edilmiştir. Kanatçık şekilleri incelendiğinde, akış çizgilerinde en fazla değişimin dikdörtgen kanatçık şeklinde olduğunu, üçgen kanatçık şeklinde ise en iyi termal performansın elde edildiğini belirtilmiştir. Çalışılan tüm Reynolds sayılarında en düşük ısı transfer değerleri dikdörtgen şekilli kanatçıkta elde edilmiştir. Yüksek Reynolds sayılarında daha iyi termal performans göstermesi nedeniyle üçgen kanatçığın kullanımı tavsiye edilmiştir. Akışkanların hidrodinamik davranışları incelendiğinde, saf suya göre nanoakışkan kullanımında kanatçıklardan geçerken daha fazla hız düşümünün olduğu belirlenmiş olup, bu duruma artan derişime bağlı olarak sürtünme katsayısındaki artışın neden oluğu ifade edilmiştir.

Chikh vd. (1998) çalışmalarında içerisinde ayrık gözenekli bloklar bulunan bir kanalda ısı transferinin analizini yapmışlardır. Nümerik model hazırlanırken ısı kaynakları gözenekli blokların altına gelecek şekilde yerleştirilmiş olup, geri kalan kısımlar yalıtımlı veya adyabatik alınmıştır. Çalışmada analizler farklı Darcy ve gözenekli blok sayılarında yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, düşük geçirgenlikli gözenekli blokların arasında akış döngülerinin oluşması sonucu, akışkanın diğer bloğa gitmesinin kısmen engellendiği tespit edilmiştir. Çalışmada, Darcy sayılarının yüksek veya blok yüksekliğinin kanal yüksekliğinin %2'si kadar olduğu durumda, gözenekli bloklarının bulunmasının kayma gerilmelerini azalttığı ifade edilmiştir. Gözenekli blokların ayrık olarak yerleştirilmesiyle Nusselt sayısının arttığı, bunun sonucu olarak da duvar sıcaklıklarının %90'a kadar düştüğü belirtilmiştir.

Kanal içerisine gözenekli yapıların yerleştirilerek ısı transferinin arttırılması Haghighi vd. (2020) tarafından çalışılmıştır. Soğutucu akışkan olarak hava/su kullanılan bu çalışmada, kanal içerisine bir veya ayrık olarak yerleştirilmiş üç adet ısı alıcıdan olan ısı transferi incelenmiştir. Isı kaynağı gözenekli yapıların altına gelecek şekilde yerleştirilmiş olup, üçgen, dikdörtgen ve eliptik olmak üzere üç farklı gözenekli yapı çalışılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, Darcy sayısının ve geçirgenliğin, sistemin termo-hidrolik verimliliği üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Soğutma akışkanı olarak hava kullanıldığında, Soğutma akışkanı olarak hava kullanıldığında en yüksek Nusselt sayısı, Darcy sayının yüksek değerlerinde ve üçgen geometrili yapıda elde edilmiştir. Su kullanıldığında ise gözenekli yapının büyük bir etkisinin olmadığı

belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, üçgen geometrili yapı kanal yüksekliğinin 1/5'i olduğunda en yüksek termal performans değerleri tespit edilmiştir.

Ghorab (2015) yapmış olduğu nümerik çalışmada, yatay bir kanal içerisine ayrık olarak yerleştirilmiş gözenekli yapıların ısı transferine olan etkilerini karışık konveksiyon şartlarında incelemiş ve elde ettiği sonuçları boş yüzeyle karşılaştırmıştır. Çalışmalar, üç farklı kanal yüksekliğinde (H_e = 1, 0.5 ve 0.25), Reynolds sayısının $50 \leq Re \leq 300$, Darcy sayısının $10^{-2} \leq Da \leq 10^{-6}$, Richardson sayısının $0 \leq Ri \leq 100$ ve Prandtl sayısının $0.7 \leq Pr \leq 10$ aralığındaki değerleri için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, düşük Reynolds sayılarında, Richardson sayısının artmasıyla akışkan hızının ve sınır tabaka kalınlığının azaldığı belirtilmiştir. Darcy sayısının düşmesiyle gözenekli bloklar arkasındaki akış döngülerinin arttığı tespit edilmiş, meydana gelen akış döngülerinin yüksek Richardson sayılarında daha fazla gözlendiği analiz edilmiştir. Richardson ve Reynolds sayılarının artırılmasıyla ve kanal çıkış yüksekliğinin azalmasıyla taban yüzey sıcaklılarının düştüğü belirtilmiştir. Ayrıca, Darcy sayısının artmasıyla toplam Nusselt sayısında yükselme görülmüştür. Hem gözenekli hem de boş kanalda $Ri > 10$ durumu için Nusselt sayılarındaki artışın daha belirgin bir hale geldiği gözlenmiştir.

Rasam vd. (2020) çalışmalarında, içi gözenekli yapı ile doldurulmuş dikdörtgen yapıda bir ısı alıcıda meydana gelen ısı transferi ve entropi üretimini incelemişlerdir. Bu ısı alıcı, doğrudan elektronik elemanın sıcak yüzeyine temas edecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada, Reynolds sayısının 50-300, gözenekliliğin 0.8-0.98, gözenek yoğunluğunun 10 PPI - 30 PPI aralığındaki değerleri için analizler yapılmıştır. Viskoz yayılımı hesaba katarak, hız bölgesini belirlemek amaçlı Darcy-Brinkman modeli, sıcaklık bölgesini belirlemek için ise LTNE modeli kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, gözenek yoğunluğunun arttırılıp, gözenekliliğin azaltılmasıyla, yüzeylere yakın bölgelerde hız gradyanının arttığı, buna karşılık kanalın orta düzlemindeki maksimum hızın azaldığı tespit edilmiştir. Toplam tersinmezliğin, artan gözenek yoğunluluğu ve azalan gözeneklilikle birlikte azaldığı görülmüştür.

Yang vd. (2020) çalışmalarında, içerisinde iki farklı tabaka şeklinde gözenekli yapı bulunan bir boruda ısı transferi ve entropi üretimi için analizler yapmışlardır. Çalışma modeli sabit ısı akısına maruz bırakılan ve iç içe iki farklı gözenekli yapıyla doldurulan bir boru şeklinde hazırlanmıştır. Darcy sayısının 10^{-2} ile 10^{-5}, boyutsuz çapın 0-1 aralığındaki değerler için çalışmalar yapılmıştır. Analiz yapılırken Darcy-Brinkman eşitliği ve LTNE modeli kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, boru içerisindeki çift katmanlı köpük yapıda Darcy sayısının iç tabakada azalması ve dış tabakada artmasıyla, sıvının sıcaklığında homojen bir dağılım elde edilmiştir. İç tabakanın Darcy sayısı, dış tabaka değerinden daha düşük olması durumunda, iki tabakalı gözenekli yapıya sahip boruda tek tabakalı olana göre daha yüksek Nusselt sayısı elde edilmiştir. Yine iç tabaka Darcy sayısının dış tabaka değerinden daha düşük olması durumunda, Biot sayısının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durumda çift tabakalı tüpteki toplam entropi üretiminin tek tabakalı olana göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Sung vd. (1995), çalışmalarında, içerisinde ayrık gözenekli yapı bulunan kanalda zorlanmış taşınımla ısı transferini incelemişlerdir. Kanalın alt tabanına ısınan bir yüzey yerleştirilmiş olup, geri kalan kısımları adyabatik kabul edilmiştir. Analizde kullanılmak üzere kanal iki farklı şekilde tasarlanmıştır. Bunlardan birinci modelde (A) gözenekli yapı kanalın tavan kısmına ısınan yüzeyle aynı hizada yerleştirilmiştir ancak aralarında temas

yoktur. İkinci modelde (B) ise gözenekli yapı kanalın taban kısmına, ısınan yüzeyin üzerine yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, belirli bir S (boyutsuz gözenekli yapı kalınlığı) değerinde akış hızının gözenekli yapı içerisinde azaldığı belirlenmiş olup, Darcy sayısının azalmasıyla akış hızında artış olduğu gözlenmiştir. Kanalın A modelinde, Darcy sayısının düşmesiyle maksimum boyutsuz duvar sıcaklığında azalma görülürken, B modelinde Darcy sayısının azalmasıyla maksimum boyutsuz duvar sıcaklığında artış olduğu tespit edilmiştir.

El-Shorbagy vd. (2021) çalışmalarında, trapez kesit alanına sahip bir kanalda nanoakışkan ve gözenekli yapı kullanımını incelemişlerdir. Çalışma kanalın iki farklı en-boy oranında (0.3 ve 0.5), Richardson sayısının 0.1, 1 ve 10 değerinde ve Darcy sayısının 10^{-2}, 10^{-3} ve 10^{-4} değerlerinde yapılmıştır. Soğutma akışkanı olarak hacimce derişimi %0-3 arasında değişen Al_2O_3-H_2O nanoakışkanı kullanılmıştır. Analiz yapılırken sonlu hacim ve tek faz modelleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, gözenekli yapı yüksekliğinin artmasıyla, ortalama Nusselt sayısında belirli iki pik değerinin olduğu noktalarda önce yükselme, sonra azalma olduğu görülmüştür. Richardson sayısının azalmasıyla, zorlanmış taşınım etkilerinin daha baskın nedeniyle ısı transferinde artış gözlenmiştir.

Seyf ve Feizbakhshi (2012) çalışmalarında, iğneli mikro kanallı bir ısı alıcıda nanoakışkan kullanımının ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Çalışma, sonlu elemanlar yaklaşımıyla, sürekli şartlarda Navier-Stokes ve enerji eşitlikleri kullanılarak yapılmıştır. Soğutma akışkanı olarak farklı partikül boyutlarında (28,6 nm ve 29 nm) CuO- H_2O ve (38.4 nm ve 47 nm) Al_2O_3-H_2O nanoakışkanları hacimce 0.01 ve 0.04 oranlarında alınarak modelleme yapılmıştır. Nanoakışkanlardan elde ettikleri sonuçları temel akışkanla karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda, nanoakışkanların kullanımıyla saf suya göre daha yüksek Nusselt sayıları elde edilmiştir. Hacimsel derişimnin artmasıyla, Euler sayısı, Nusselt sayısı ve toplam ısı transfer verimliliğinin arttığını tespit edilmiştir. Reynolds sayısının arttırılmasıyla ise, Nusselt sayısında ve toplam ısı transfer miktarında artış olurken Euler sayısında düşüş gözlenmiştir. Nanoapartikül boyutuyla Nusselt sayısı arasındaki ilişki incelenmiş olup, Nusselt sayısının Al_2O_3-H_2O nanoakışkanında azalan nanopartikül boyutuyla arttığını, CuO-H_2O nanoakışkanında ise azaldığı belirtilmiştir.

Guerroudj ve Kahalerras (2010) çalışmalarında, iki boyutlu paralel plakalı kanal içerisinde farklı geometrili (Dikdörtgen, üçgen ve yamuk) gözenekli bloklardan ısı transferini laminer karışık konveksiyon şartlarında incelemişlerdir. Kanalın üst plakası yalıtılmış olup, taban kısmında bulunan ayrık ısıtıcılar üzerine gözenekli bloklar yerleştirilmiştir. Çalışma analizler genişletilmiş Brinkman-Forchheimer Darcy modeliyle yapılmıştır. Analizler yapılırken, gözenekli blokların geometrileri, yükseklikleri, geçirgenlikleriyle kanal yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı dikkate alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, özellikle üçgen geometrili bloklarda düşük geçirgenlik, düşük Reynolds sayısı ve düşük termal iletkenlik oranında karışık konveksiyon parametresinin (Gr/Re^2) artmasıyla Nusselt sayısının arttığı belirtilmiştir. Aynı parametrelerin yüksek değerlerinde ise dikdörtgen geometrili gözenekli bloğun daha optimum geometri olduğu tespit edilmiştir.

İğneli mikro kanallı ısı alıcısı içerisinde nanoakışkan kullanılarak yapılan diğer bir nümerik çalışma da Hasan (2014) tarafından yapılmıştır. Üç farklı iğneli kanatçık geometrisi (kare, üçgen ve dairesel) incelenmiştir ve soğutma akışkanı olarak hacimce

%1-4 derişime sahip elmas-su ve Al_2O_3-H_2O nanoakışkanları kullanmıştır. Çalışmada sabit duvar sıcaklığı kabulü yapılıp, analizler Reynolds sayısının 100-900 aralığında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bütün iğneli kanatçık geometrilerinde nanoakışkan kullanımıyla birlikte kanal çıkış sıcaklığında suya göre belirli bir artış olduğu tespit edilmiştir. Nanoakışkan kullanımı ve hacimsel derişimlerinin artmasıyla basınç düşümü miktarının da arttığını belirtilmiştir. Bütün iğneli kanatçık geometrilerinde elmas-su nanoakışkanının Al_2O_3-H_2O nanoakışkanına göre ısı transferinde daha iyi sonuçlar verdiğini belenmiştir. Sabit sıcaklık sınır şartında ve bütün Reynolds sayılarında, iki nanoakışkanın kullanımında da dairesel kanatçıkta daha yüksek ısı transfer miktarı görülmüştür. Kare geometrili iğneli kanatçık kullanımında ise daha yüksek basınç düşümü miktarı elde edilmiştir.

Xu vd. (2015) çalışmalarında, metal köpük içerisinde nanoakışkan kullanımının akış ve termal analizini yapmışlardır. Analizler, gözenek yoğunluğunun 5 PPI-60 PPI ve gözenekliliğin 0.8-0.95 aralığında değişen değerlere sahip bakır metal köpüklerle, Reynolds sayısının 500-2000 aralığında yapılmıştır. Soğutma akışkanı olarak, içerisinde hacimce %0-0.2 aralığında değişen Al_2O_3 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren nanoakışkanlar kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlar incelendiğinde, metal köpük içerisinde nanoakışkan kullanımı sonucu oluşan hız profilinin homojen bir dağılıma sahip olduğunu gözlenmiştir. Nanoakışkan kullanımının ısı transfer miktarını arttırdığı ve basınç düşümünde belirgin bir artışa neden olmadığı belirlenmiştir. Performans kriterinin artan pompalama gücüyle azaldığını tespit edilmiştir. Metal köpük malzemenin gözenek yoğunluğunun arttırılması ve gözenekliliğinin azaltılmasıyla ısı transferinin arttığı gözlenmiştir. Nanoakışkan hacimsel derişiminin artmasıyla yine ısı transferinde artış olduğu tespit edilmiştir.

2.6.4. Metal köpük ve nanoakışkanlarla yapılan birleşik çalışmalar

Bayomy ve Saghir (2017) çalışmalarında, Intel core i7 işlemcisinin soğutulmasında metal köpüklü ısı alıcı ve nanoakışkan kullanımını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Test bölgesi içerisine metal köpük ısı alıcı yerleştirilmiş olup, alt kısmından 8.5-13.8 W/cm^2 aralığında ısı akısı uygulanmıştır. Çalışmada soğutma akışkanı olarak hacimsel derişimi %0.1-0.6 arasında değişen γ-Al_2O_3-Su nanoakışkanı kullanılmıştır. Deneyler, Reynolds sayısının 210-631 aralığında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, düşük hacimsel derişimlerinde (%0.1 ve %0.2) nanoakışkan kullanımıyla hem yerel hem de ortalama Nusselt sayısında artış gözlenmiştir. Hacimce %0.2 derişiminde nanoakışkan kullanımında ısı transferinde saf suya göre, maksimum iyileştirme elde edilirken, hacimce %0.3 derişiminde nanoakışkan kullanımında, ısı transferinde meydana gelen iyileştirme miktarında ani bir düşüş gözlenmiştir. Daha sonra derişimler arttırılarak %0.6 derişime kadar tekrar ısı transferinde artış gözlenmiştir.

Welsford vd. (2019) çalışmalarında, nanoakışkan derişiminin ve kanatçıklı metal köpük malzemenin termal performansa etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişleridir. Soğutma akışkanı olarak hacimce %0.1, %0.3 ve %0.6 derişime sahip γ-Al_2O_3- H_2O nanoakışkanı kullanılmıştır. Test bölgesinde kullanılan ısı alıcı, alüminyum (6061-T6) metal köpük malzemeden yapılmış olup, 0.91 gözenekliliğe ve $3.36x10^{-8}$ m^2 geçirgenliğe sahiptir. Elde ettikleri sonuçlara göre, ortalama Nusselt sayısındaki en yüksek değer hacimce %0.6 derişiminde nanoakışkan ve içinde kanatçık bulunan metal köpük ısı alıcısı kullanımında meydana gelmiştir. Performans indeksinde görülen en yüksek değer hacimce %0.3 derişiminde nanoakışkan ve kanatçıksız metal köpük ısı alıcı kullanımında elde edilmiştir.

Saghir ve Rahman (2020) çalışmalarında, gözenekli bir yapı içerisinde Al_2O_3-Cu, TiO_2-SiO_2, (çok katmanlı karbon nanotüp) MWCNT-Fe_3O_4 ve (nano elmas) ND-Fe_3O_4 hibrit nanoakışkanlarının ısı transferine etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada temel akışkan olarak su ve etilen glikol-su karışımı kullanılmıştır. Test bölgesi içerisine daha önceki çalışmalara (Bayomy-Saghir çalışmaları) benzer şekilde alüminyum (6061-T6) metal köpük ısı alıcı yerleştirilmiştir. Deneyler ısıtıcı akısının 75000 W/m^2 ve akışkan hızının 0.2086 m/s değerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, temel akışkana göre hibrit nanoakışkanların kullanılmasıyla, ısı transferinde meydana gelen artışla birlikte basınç düşümünde ve pompalama gücünde artış gözlenmiştir. Kullanılan bütün nanoakışkanlarda, yüzeyin homojen sıcaklık indeksinin düzgün dağılımlı çıktığı belirtilmiş olup, MWCNT-Fe_3O_4 nanoakışkanında en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Akışkanların termal verimlilik indeksi incelendiğinde ise hacimce %0.2 derişime sahip ND-Fe_3O_4 hibrit nanoakışkanında en iyi sonuçlar belirlenmiştir.

Elektronik soğutmada nanoakışkan ve metal köpük kullanımının ısı transferine etkisi Qi vd. (2020) tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada 20 PPI, 30 PPI ve 40 PPI gözenek yoğunluğunda bakır metal köpük malzemeler kullanılmış olup, içerisinden kütlece %0-0.5 derişim aralığında hazırlanan TiO_2-H_2O nanoakışkanı geçirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, kütlece %0.3 TiO_2-H_2O nanoakışkanı kullanıldığında en düşük sürtünme katsayısı değerleri tespit edilmiştir. Saf suyla karşılaştırıldığında kütlece %0.3 derişime sahip TiO_2-Su naonakışkanı kullanıldığında, ısı transferinde elde edilen en yüksek iyileşme %35.7 olarak belirlenmiştir. 30 PPI ve 20 PPI metal köpük malzemeye göre, 40 PPI metal köpük malzeme kullanıldığında basınç düşümü miktarında sırasıyla %21.1 ve %21.8 artış gözlenmiştir.

Rabbani vd. (2019) çalışmalarında, metal köpükle doldurulmuş bakır tüp içerisinden MgO nanoakışkanını geçirerek termal performans ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir. Bakır tüp içinde %70 gözenekliliğe sahip metal köpük malzeme bulunmakta olup, alttan sabit ısı akısına maruz bırakılmıştır. Deney düzeneğinde test bölgesi hazırlanırken iki farklı tüp modeli kullanılmış olup, birinci tüpte köpük malzeme 1 cm'lik iç yarıçapa, ikinci modelde ise 1.8 cm'lik yarıçapa sahiptir. İki modelde de köpük malzeme tüp boyunca doldurulmuş olup, içerisinden soğutma akışkanı olarak hacimce %0.5, %0.25 ve %0.0625 derişiminde MgO nanoakışkanı geçirilmiştir. Hazırlanan nanoakışkanlarda temel akışkan olarak %60 su, %40 etilen glikol karışımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, ısı transfer katsayısının Reynolds sayısına, gözenekli yapı miktarına ve MgO nanoakışkanının hacimsel derişimine bağlı olduğunu belirlenmiştir. Boş tüp ile karşılaştırıldığında, köpük malzemeli iki tüp modelinde de basınç düşümü ve Nusselt sayısında belirgin bir artış gözlenmiştir. Nanoakışkan kullanımıyla saf suya göre ortalama taşınımla ısı transferi katsayısında birinci tüp modelinde %9, ikinci tüp modelinde ise %15 artış belirlenmiştir.

Amani vd. (2017) çalışmalarında, metal köpükle doldurulmuş tüp içerisinden Fe_3O_4-H_2O nanoakışkanını geçirerek ısı transferi ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada kütlece %1 ve %2 derişiminde Fe_3O_4-H_2O nanoakışkanı kullanılmış olup, bakır tüpün içerisine 0.8 gözenekliliğe sahip 10 PPI bakır metal köpük doldurulmuştur. Elde edilen sonuçlarda, nanoakışkan kullanımıyla saf suya göre ısı transferinde iyileştirme belirlenmiştir. Ayrıca Reynolds sayısının ve kütlesel derişiminin artmasıyla Nusselt sayısında artış gözlenmiştir. Kütlesel derişimin ısı transferine olan

etkisinin, yüksek Reynolds sayılarında daha etkili olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısının 200 ve 1000 olduğu durumlarda saf suya göre, kütlece %1 nanoakışkan kullanımında ısı transferinde sırasıyla %7.4 ve %11.7, kütlece %2 nanoakışkan kullanımında ise sırasıyla %13.7 ve %20 iyileştirme elde edilmiştir. Basınç düşümü açısından değerlendirildiğinde nanoakışkandaki basınç düşümünün saf suya göre bir miktar daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Reynolds sayısının 1000 olduğu durumda, kütlece %2 derişimde nanoakışkan kullanımıyla saf suya göre elde edilen maksimum basınç düşümü miktarı, %12.4 olarak belirlenmiştir.

Delisle vd. (2020) çalışmalarında, kanatçıkları arasına metal köpük doldurulan bir ısı alıcı içinde gerçekleşen ısı transferini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada ısı alıcılar iki ve üç kanallı olmak üzere iki farklı tipte hazırlanmış olup, kanatçıklar arasına 10 PPI ve 20 PPI köpük malzeme doldurulmuştur. Soğutma akışkanı olarak %0.6 derişiminde Al_2O_3-H_2O ve su kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, 20 PPI metal köpük ile doldurulmuş üç kanallı ısı alıcıda ve nanoakışkan kullanımında maksimum Nusselt sayısı değerine ulaşılmıştır. Ayrıca yüzeyde meydana gelen sıcaklık dağılımının nanoakışkan kullanımında daha homojen olduğu gözlenmiştir. Kanatçıklı metal köpük ve nanoakışkan kullanımı sonucu basınç düşümünde meydana gelen artışın ihmal edilebilir bir miktarda olduğu belirlenmiştir.

Pourfarzad vd. (2018) çalışmalarında, elektronik soğutma sistemlerinde metal köpük ve nanoakışkan kullanımının ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada ısı alıcısının içerisine 40x40x2.5 mm boyutlarında 15 PPI ve 30 PPI gözenek yoğunluğuna sahip bakır metal köpük malzemeler yerleştirilmiştir. Soğutma akışkanı olarak hacimce %0.1, %0.3 ve %0.5 derişime sahip Al_2O_3-H_2O nanoakışkanı kullanılmış olup, ısı alıcısının alt kısmından 62.5 kW/m^2 ısı akısı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarda, nanoakışkan hacimsel derişiminin Nusselt sayısı ve taşınımla ısı transferi katsayısı üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Köpük malzemeler karşılaştırıldığında daha düşük gözenek yoğunluğuna sahip metal köpük malzemenin kullanılmasıyla daha yüksek ısı transferi miktarı elde edilmiştir. Performans indeksi incelendiğinde ise yüksek hacimsel derişimlerde nanoakışkan kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Metal köpükle doldurulmuş bir boru içerisinde nanoakışkan kullanımının ısı transferine etkisi Nazari vd. (2015) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada 2 cm çapında ve 30 cm uzunluğundaki alüminyum metal borunun içi %50 gözenekliliğe sahip metal köpük malzeme yerleştirilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı alüminyum boru sabit yüzey sıcaklığına maruz bırakılmış olup, içerisinden hacimce %0.1, %0.25, %0.5, %1 ve %1.5 derişime sahip Al_2O_3-H_2O nanoakışkanı geçirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, Nusselt sayısındaki en yüksek artış Reynolds sayısının 3704 olduğu ve hacimce %1.5 derişiminde nanoakışkan kullanıldığı durumda %57 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, basınç düşümünde meydana gelen en büyük artış, yine aynı şartlar altında saf suya göre %39 olarak tespit edilmiştir.

2.6.5. Tezin amacı, katkısı ve yenilikler

Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkan ve metal köpük malzeme kullanımının ısı transferi ve basınç kaybına olan etkisinin incelendiği bu tez çalışmasında literatürde bulunan en yakın çalışmalara yukarıdaki bölümlerde bahsedilmiştir. Metal köpük malzemelerle yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu su bloğu çalışması olup,

genellikle tek bir köpük yapısı incelenmiştir. Farklı gözenek yoğunluğunun elektronik soğutma sistemlerinde kullanımına ilişkin yapılan çalışmalar çok azdır. Ayrıca kanaliçi çalışmalar yok denecek kadar azdır. Literatürde kanaliçi çalışmalara en yakın olan araştırmalar nümerik olarak yapılmıştır ve deneysel olarak en yakın çalışmalar ise çeşitli boyutlarda hazırlanan boru içerisinden akış uygulamalarıdır. Bugüne kadar yapılmış kanaliçi çalışmaların daha çok nümerik ağırlıklı olması ve deneysel çalışmaların azlığı dikkati çekmiştir. Bu durum deneysel çalışmalara biraz daha ağırlık verilerek sistemlerin bulundukları ortam şartlarına göre analiz edilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmaların çoğu metal köpük ısı alıcıların ve nanoakışkanların ayrı ayrı termal performans analizi konusunda olup, birlikte kullanımlarının etkisinin incelendiği araştırmalar yok denecek kadar azdır.

Elektronik sistemlerin yapısı (özellikle bilgisayarlar) göz önüne alındığında, her bir eleman devre kartı üzerine birbirinden ayrık olarak yerleştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu ısı alıcısı veya boru çalışmalarıdır. Isınan yüzeyler tek bir parça olarak düşünülmektedir. Ayrık ısı alıcıların bulunduğu çalışmaların çoğunluğunun nümerik analizler olduğu görülmüştür. Elektronik sistemlerin yüksek performanslı ve uzun ömürlü çalışabilmesi için ısınan yüzeylerde olabildiğince homojen bir soğutma işleminin yapılması gerekmektedir. Çünkü elektronik sistem içinde bulunan her bir eleman çalışma miktarına ve enerji tüketimine bağlı olarak farklı miktarlarda ısı üretmektedir. Bu durumda, homojen bir soğutma işleminin yapılabilmesi için en çok ısınan elemanların ısı transferinin en yüksek olduğu, en az ısınan elemanların ise daha düşük ısı transferi miktarının olduğu yerlere yerleştirilmesi gerekir.

Kullanılan akışkanlar incelendiğinde yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde, Al_2O_3-H_2O nanoakışkanı kullanılmış, geriye kalan çalışmalarda ise genellikle TiO_2-H_2O ve CuO-H_2O nanoakışkanları kullanılmış olup, çok nadir SiO_2-H_2O ve MgO-H_2O nanoakışkanlarıyla ilgili çalışmalara rastlanmıştır. Nanoakışkanlarla yapılan deneysel veya nümerik bütün çalışmalarda hacimsel veya kütlece derişimlerinin arttırılmasıyla ısı transferinin arttığı belirtilmiştir. Ancak artan derişim miktarına bağlı olarak akışkanın viskozitesi de artmaktadır. Ayrıca nanoakışkanın derişiminin arttırılması, akışkan içerisinde yeterli homojenliğin sağlanamaması, nanopartiküllerin topaklanması ve çökmesi gibi sorunları meydana getirmekte olup, bazı çalışmalarda bu konu üzerinde durulmuştur. Nanopartiküllerde çökme ve topaklanma sorunun yaşandığı çalışmalarda belirli bir derişim değerinden sonra ısı transferinde elde edilen iyileşmenin düştüğü belirtilmiştir. Bunun yanı sıra artan derişimlerle nanoakışkanların temel akışkana göre basınç kaybı miktarının da arttığı belirtilmiştir. Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında nanoakışkanların elektronik soğutma sistemlerinde gelecek vadeden akışkanlar olduğu, ancak gerçek sistemlerde yaygın olarak kullanılabilmesi için hala araştırılması ve geliştirilmesi gereken bazı konular olduğu görülmektedir.

Yukarıda bahsedilen araştırmalar göz önüne alındığında deneysel olarak yapılan bu tez çalışmasında dikdörtgen bir kanal içerisinde, farklı nanoakışkanlar ve yüzeye ayrık olarak yerleştirilmiş farklı gözenek yoğunluğunda (10 PPI ve 40 PPI) alüminyum (Al-6101) metal köpük ısı alıcıların birlikte kullanımının ısı transferine ve basınç kaybına etkisi incelenmiştir. Etkin soğutma yönteminin belirlenebilmesi için ölçümler farklı ısı akılarında ve farklı hacimsel debilerde yapılmıştır.

Yapılan tez çalışmasının özgün yanları ve literatüre getirdiği katkı ve yenilikler aşağıda sıralanmıştır:

- Ticari elektronik soğutma sistemlerinde kullanılan saf su, nanoakışkan hazırlanmasında temel akışkan olarak seçilmiştir. Literatürde bu kapsamda su bazlı nanoakışkanlarla birçok çalışma yapılmış olup, kullanılan akışkanların büyük çoğunluğunu Al_2O_3-H_2O nanoakışkanı oluşturmaktadır. Bunun yanında literatürde TiO_2-H_2O, CuO-H_2O, SiO_2-H_2O, MgO-H_2O ve Fe_3O_4-H_2O nanoakışkanları ile yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Ayrıca elektronik sistemlerin soğutulmasında hibrit nanoakışkan kullanımının incelendiği çalışmalar çok az olup, yapılan literatür araştırmasında Al_2O_3-Cu, TiO_2-SiO_2, MWCNT-Fe_3O_4 ve ND-Fe_3O_4 nanoakışkanlarının (Saghir ve Rahman 2020) ve Al_2O_3-SiO_2-Su nanoakışkanının kullanıldığı (Hashemzadeh ve Hormozi 2020) çalışmalara rastlanmıştır. Ancak, CuO nanopartiküllerinin yüzeyine farklı kütlesel derişimlerde Ag atomlarının motifiye edilmesiyle hazırlanan nanoakışkanlarla yapılan çalışmalara denk rastlanmamıştır.

- Literatürde kullanılan nanoakışkanların hemen hemen hepsinde termofiziksel özellikler ya detaylı olarak verilmemiş ya da ampirik formüllerle belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca nanoakışkan hazırlama yöntemleri, nanopartikül malzemesi, nanopartikül boyutu, derişim değerleri, seçilen temel akışkan, katkılama, pH vb. birçok parametrenin akışkanın termofiziksel özelliklerini etkilediği görülmüş olup, incelenen akışkanlar için geçerli bir formülün henüz belirlenemediği tespit edilmiştir (Rudyak ve Minakov 2018). Bu durumda nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ampirik ifadelerin yetersiz olduğu görülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında özel olarak hazırlanan nanoakışkanlardan ısı transferi açısından olumlu sonuçların alındığı akışkanların tüm termofiziksel özellikleri deneysel yöntemlerle belirlenmiştir.

- Tez çalışması için hazırlanan tüm akışkanlar özel olarak belirli parametreler kapsamında sentezlenmiş olup, her bir parametrenin değişimi için ayrı ayrı sentez yapılmıştır. Ancak literatürdeki çalışmalarda kullanılan nanoakışkanların bazıları hazır ticari nanopartiküllerle sentezlenmiştir veya doğrudan hazır akışkan olarak temin edilmiştir. Hazır nanopartikül veya hazır nanoakışkan kullanımı durumunda içerik tam olarak verilmemekte olup, bu durumda sağlıklı bir karşılaştırma yapılamamaktadır. Bu bilgiler kapsamında, mevcut tez çalışmasında kullanılan tüm nanoakışkanların hazırlanması ve nanopartikül sentezi özel olarak laboratuvarda yapılmıştır.

- Literatürde kanal içi çalışmaların azlığı dikkat çekmiş olup, kanal içerisinde nanoakışkanlar ve metal köpük malzemelerle deneysel bir çalışmaya rastlanmamıştır.

- Elektronik sistemlerin soğutulmasında metal köpük ısı alıcının kullanıldığı çalışmalarda genellikle tek bir numune tipi incelenmiştir. Farklı gözenekliliğe veya gözenek yoğunluğuna sahip metal köpük malzemeler ve nanoakışkan etkileşimini inceleyen detaylı çalışmalar yok denecek kadar azdır. Ayrıca yapılan bu tez çalışmasında, nanoakışkan derişimiyle, metal köpük malzemenin gözenek yoğunluğu arasındaki ilişkinin de detaylı bir şekilde incelenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Tez çalışması literatürde oluşan bu eksikliği tamamlamak amacıyla yapılmıştır.

- Bilindiği üzere elektronik sistemlerde ısınan elemanlar ayrık formda yerleştirilmektedir. Bu kapsamda literatürde ayrık ısı alıcıların kullanıldığı çalışmaların çoğunun sadece nümerik analizlerde olduğu belirlenmiştir. Nümerik çalışmalarda elde edilen sonuçlar ortam koşullarından bağımsız olarak elde edilip, literatürdeki benzer veya deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak, sonuçlar yorumlanmaktadır. Ortam koşulları da göz önüne alınarak yapılan bu deneysel tez çalışması, literatürdeki hem deneysel çalışma sayısını arttırarak bu açığı kapatma hem de nümerik çalışmalara destek olma niteliğindedir.

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, dikdörtgen kanalda, ısınan bir yüzey üzerine ayrık olarak yerleştirilmiş metal köpük ısı alıcılardan, nanopartikül yüzeyine Ag atomu motiflenmiş edilerek elde edilen CuO-H_2O nanoakışkanının kullanılmasının ısı transferi ve basınç kaybına etkisinin deneysel olarak incelenmesi bu tez çalışmasının en önemli özgün yanıdır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu kısımda tez çalışmasının yapıldığı deney düzeneği, hazırlanan nanoakışkanlar, nanopopartikül sentezi, nanoakışkan hazırlama ve ölçüm yöntemleri hakkında bilgiler verilecektir. Deneysel çalışmada kullanılan nanopartiküllerin sentezlenmesi ve akışkan hazırlama işlemlerinin tamamı Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır. Hazırlanan nanoakışkanların karakterizasyonu ve termofiziksel özellikleri imkanlar dahilinde öncelikli olarak aynı bölümün laboratuvarlarında yapılmış olup, yapılma imkanı olmayan analizler ise çeşitli üniversitelerden hizmet alımı olarak yapılmıştır.

Tez çalışması kapsamında kurulan deney düzeneğine ait bilgiler detaylı bir şekilde bu bölümde sunulmuştur. Hazırlanan deney düzeneğinin tasarımı, üretimi ve kontrolleri bu bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir. Test bölgesinin tasarımı yapılırken öncelikli olarak, elektronik sistemlerde ısınan elemanların devre üzerinde dağılımları göz önüne alınmıştır. Kullanılacak olan malzemeler, birleştirme yöntemleri, sızdırmazlıklar vb. parametreler göz önünle alınıp en uygun model tasarlanarak, montaj aşamasına geçilmiştir.

3.1.1. Tez çalışmasında kullanılan akışkanlar

a. Temel akışkan (TA),

Elektronik sistemlerin soğutulması kapsamında yapılan araştırmalarda ve ticari sıvı soğutma sistemlerinin çoğunda su veya su bazlı karışımlar kullanılmaktadır. Genellikle elektronik sistemler düşük ortam sıcaklıklarında çalıştırılmadığı için akışkanın donmasını engelleyecek herhangi bir katkı yapılmasına (Düşük sıcaklıklarda yapılan sanayi ve askeri uygulamalar hariç) ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak ticari soğutma akışkanlarında genellikle kullanıcının ilgisini çekmeye yönelik renklendirici katkılar kullanılmaktadır. Bu kapsamda tez çalışmasında, temel akışkan olarak su seçilmiştir.

b. Nanoakışkanlar (NA),

Tez çalışmasında, detaylı araştırmanın yapılabilmesi için toplamda 19 farklı nanoakışkanla deneyler yapılmıştır. Hazırlanan nanoakışkanlarla yapılan ölçümlerde derişim, surfaktan, nanopartikül yüzeyine Ag atomu ilavesi ve nanopartikül boyutunun ısı transferine olan etkisi temel akışkan ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın net bir şekilde yapılabilmesi için ölçümler öncelikli olarak temel akışkanla ve CuO-H_2O nanoakışkanının farklı derişimlerinde yapılmıştır. Daha sonra, derişim etkisinden alınan veriler doğrultusunda surfaktan kullanımı denenmiştir. Farklı tipte surfaktan ve surfaktan derişimleri kullanımından elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda CuO nanopartikülünün yüzeyine Ag atomu ilavesi uygun görülmüştür. Özellikle CuO nanopartikülünün yüzeyine Ag atomu motiflenmesiyle sentezlenen nanopartiküllerden hazırlanan nanoakışkanlarla literatürde yapılan çalışmalara farklı bir bakış açısı sunulacağı düşünülmektedir.

Çalışma parametreleri göz önünde bulundurularak, deney düzeneğinin içinden geçirilecek olan toplam akışkan hacmi tüm akışkanlar için 2.7 litre hacimde hazırlanmıştır.

3.1.2. Partikül sentezi ve karakterizasyonu

a. Saf CuO sentezi,

Çalışmada nanoakışkan hazırlanmasında kullanılan CuO nanopartikül sentezi için, mutlak etil alkol içerisinde hazırlanan 0.02 M $Cu(CO_2CH_3)_2$ çözeltisi geri soğutucu altında 70°C'ye ısıtıldıktan sonra, üzerine 0.5 M NaOH-etil alkol çözeltisi ilave edilmiştir. Karışım 70°C'de 40 dakika boyunca geri soğutucu altında bekletilerek partiküllerin çöktürülmesi sağlanmıştır. Hızlıca santrifüjlenen partiküller çözeltiden uzaklaştırılmış ve etil alkol-su karışımı ile yıkanarak 50°C'de vakum etüvünde kurutulmuştur.

b. Yüzeyi Ag motiflenmiş CuO sentezi,

Tez çalışması kapsamında iki farklı kütle oranında (w/w, Ag/CuO=0.3 ve 0.5) Ag içeren CuO sentezi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda önce saf CuO sentezlenmiş ve sonrasında yüzeyi $AgNO_3$ çözeltisinden indirgenerek elde edilen Ag metal atomları ile motiflenmiştir. Ag/CuO=0.3 olan sentez prosedürü aşağıda verilmiştir.

0.75 g. $AgNO_3$ 3 ml su içerisinde çözüldükten sonra üzerine 6 mM hidrazin hidrat çözeltisi ilave edilmiştir. Ele geçen kahverengi-siyah renkli karışım 1,6 gram CuO ve kütlece 5.0 gram polietilen imin içeren çözeltiye ilave edilmiştir. Ele geçen karışımdan su ısıtılarak uzaklaştırılmış ve Ag dekore edilmiş CuO partikülleri elde edilmiştir. 100 °C'de kurutulduktan sonra öğütülerek kapaklı tüplerde saklanmıştır. Ag/CuO=0.5 içinde aynı deneysel akış şeması takip edilmiştir.

c. Karakterizasyon,

Partiküllerin kristal yapısı X-ışını kırınımı tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Analiz süresince CuKα ışını kullanılmış olup 2θ değerleri 0-80°, tarama hızı 0.04 cm/s seçilmiştir. XRD analizleri, İnönü Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuarı'nda bulunan Rigaku Geigerflex D Max/Bmodel X-Ray difraktometresinde yaptırılmıştır.

Partiküllerin kimyasal yapısı FTIR analizi ile belirlenmiştir. Analiz 400-4000 cm^{-1} aralığında gerçekleştirilmiştir. FTIR analizleri, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yaptırılmıştır.

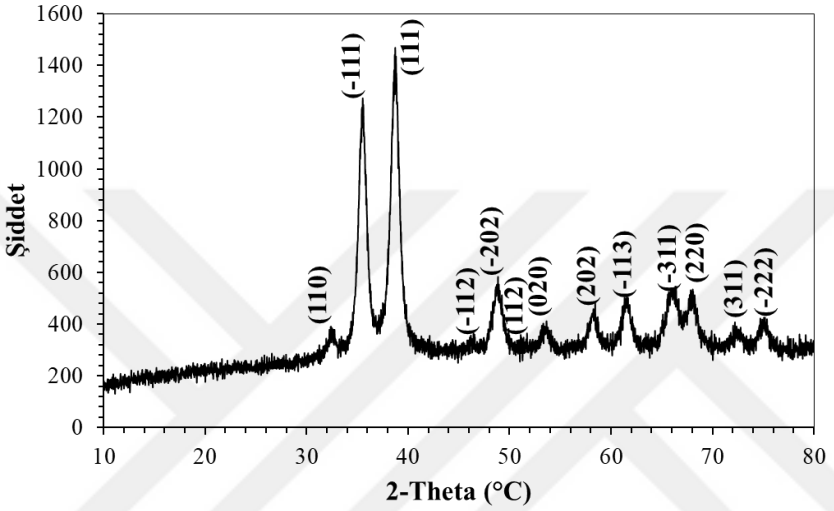
Partiküllerin tanecik boyut ve dağılımları dinamik ışık saçılımı esaslı partikül boyut analizörü ile belirlenmiştir. Boyut analizleri, İnönü Üniversitesi Kimya Bölümü Laboratuarı'nda bulunan Anton Paar marka cihazda yaptırılmıştır.

Partiküllerin yoğunlukları Arşimet'in akışkan hareketi prensibinin kullanıldığı cam piknometre ile belirlenmiştir. Yoğunluk analizleri Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yaptırılmıştır.

Partikül boyutları Ortadoğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı bünyesinde yer alan Geçirmeli Elektron Mikroskobu (TEM) aracılığıyla incelenmiştir. Görüntüleme işlemlerinde, kütlece %0.1'lik nanopartikül içeren nanoakışkanlardan alınan örneklerin damlatılıp kurutulduğu bakır üzeri kaplanmış 200 meshlik karbon gridler kullanılmıştır.

d. X ışınları kırınımı analizi,

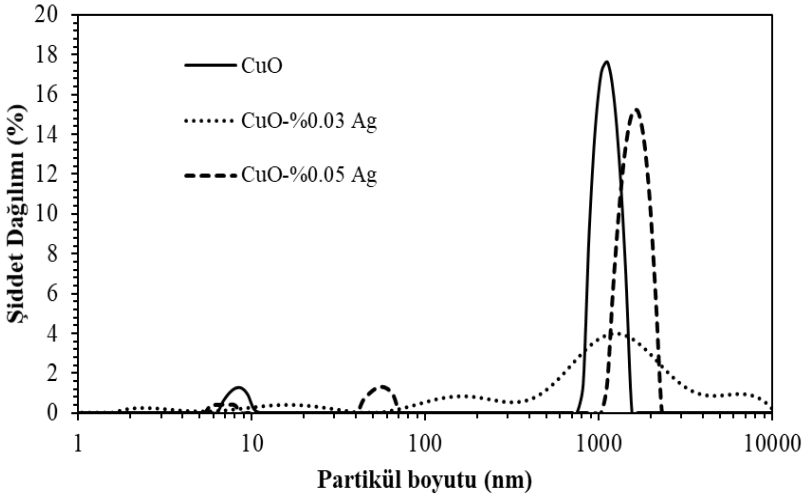
Saf CuO partiküllerinin kristal yapısına dair XRD spektrumları Şekil 3.1'de verilmiştir. XRD spektrumunda (110), (111), (111), (112), (202), (112) (020), (202), (-113), (311), (220), (311) and (222) düzlemlerine ait sinyaller oluşmuştur. Bu pikler monoklinik kristal yapısına sahip CuO oluştuğunu göstermektedir (Chand vd. 2015). Başka herhangi bir safsızlık yer almamaktadır. Ag atomları yüzeye ilave edildiği için kristal yapıda herhangi bir değişiklik oluşmamıştır.



Şekil 3.1. Saf CuO nanpartiküllerinin XRD spektrumları

e. Partikül boyut dağılımı analizi,

Saf CuO ile yüzeyinde iki farklı oranda Ag içeren CuO nanopartiküllerine ait partikül boyut dağılımlarını gösteren eğriler Şekil 3.2'te verilmiştir. Nanopartiküllerin TA içersinde partikül dağılım davranışlarını gösteren ve hidrodinamik boyutu hakkında bilgi veren bu eğrilere göre, saf CuO nanopartikülleri TA içerisindeki monodispers dağılım sergilemekte olup çapları 1000 nm aralığında değişmektedir. Yüzeylerine Ag atomu motiflenmiş CuO nanopartiküllerinin ise daha küçük boyutlarda (100 ve 10 nm altı için) sinyal verdiği görülmektedir. Her üç partiküle ait DLS boyut dağılımları ve zeta potansiyelleri aşağıdaki Çizelge 3.1'de verilmiştir. Partikül boyut ölçümlerinde filtreleme işlemi uygulanmamıştır. Transparan soller oluşmasına rağmen yüksek boyutların görülmesinin sebebi partiküllerin yoğun kümeleşmiş formda olduğunu işaret etmektedir. Partiküllerin zeta potansiyeli +18.5 mV olarak ölçülmüştür. Düşük oranlarda Ag atomu içermesinden dolayı yüzey potansiyelinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 3.2. Saf ve Ag içeren CuO nanopartiküllerinin partikül boyut dağılımı eğrileri

Çizelge 3.1. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

	Partikül Boyutu-Şiddet Dağılımı (%)			
Partikül Türü	**1.pik**	**2.pik**	**3.pik**	**Zeta Potansiyeli (Mv)**
CuO	1116 nm (%95)	8 nm (%5)	-	18.1±0.41
CuO-%0.03	1460 nm (%78)	6512 nm (%9)	169 nm (%13)	18,5±0.45
CuO-%0.05	1625 nm (%92)	54 (%6)	7 nm (%2)	18,5±0.95

g. CP analizi,

Çalışmada CuO nanopartiküllerinin özgül ısı değerlerinin belirlenmesinde Barbé (2014)'in araştırmasından faydalanılmıştır. Bu kapsamda 23 ˚C'de CuO nanopartiküllerinin özgül ısısı 536 J/kg.K olarak belirlenmiştir. Nanopartiküllerden elde edilen veriler neticesinde, nanoakışkanların Cp analizi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştırhesaplanmış olup, kütlece %0.1 CuO-H_2O nanoakışkanının özgül ısısı 4177.155 J/kg.K olarak tespit edilmiştir.

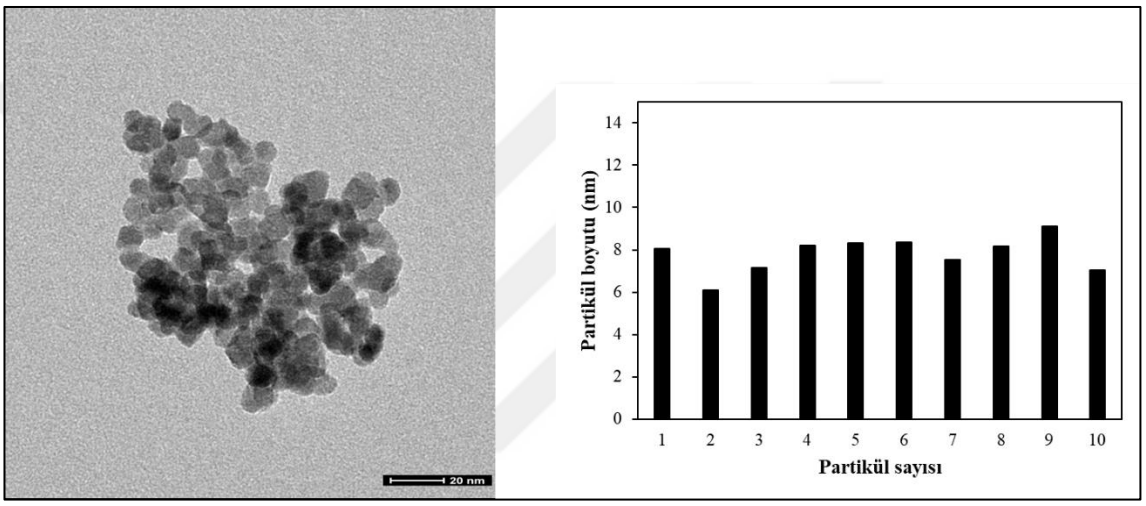
$$C_{p_{na}} = \varphi C_{p_p} + (1-\varphi) C_{p_{ta}} \tag{3.1}$$

h. Elektron mikroskobu görüntüleri

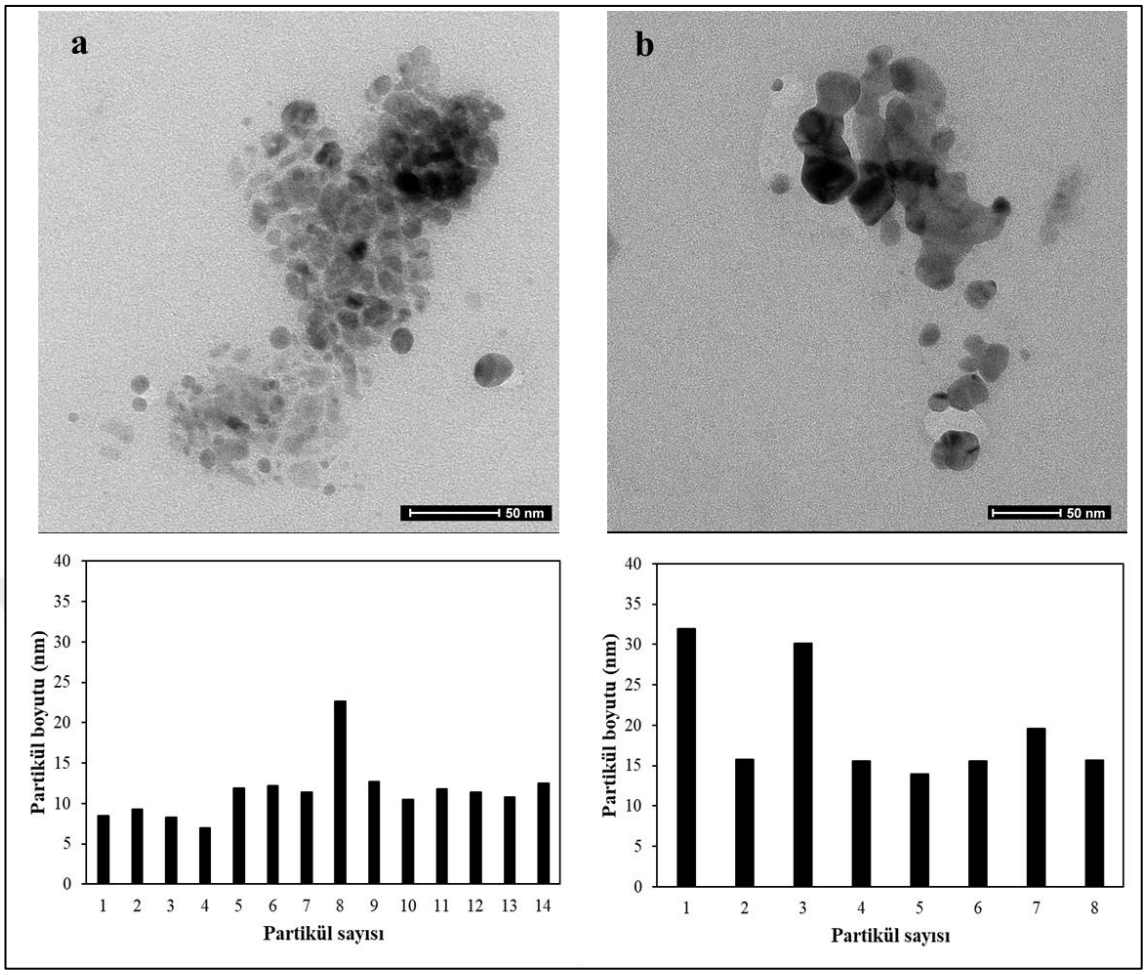
Nanopartiküllerin hem şekillerinin, hem de boyut ve dağılımlarının daha hassas bir şekilde belirlenmesi amacıyla geçirmeli elektron mikroskobu görüntüleri alınmıştır.

Analiz, ODTÜ Merkezi Laboratuvarı bünyesinde bulunan FEI 120kV CTEM cihazında (hizmet alımı şeklinde) gerçekleştirilmiştir. Nanopartiküllerin etil alkol içerisinde hazırlanan dispersiyonu, Cu grid üzerine damlatılarak kurutulmuş ve elektron mikroskobu görüntüleri alınmıştır.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'den görüldüğü üzere, sentezlenen saf CuO nanopartikülleri küresel formda ve dar boyut dağılımına sahiptir. Partikül boyutları ise ≤10 nm civarındadır. Partiküller Ag ile dekore edildikten sonra şeklini korumakla birlikte, boyutlarının da arttığı görülmektedir. Mikroskop görüntüleri üzerinden İmageJ programı ile yapılan analize göre, boyut dağılımları kümelenmeden dolayı daha fazla değişkenlik göstermiştir. Oluşan yapıya ilave edilen Ag miktarı arttıkça partikül boyutlarının yaklaşık olarak 12-13 nm'den 15-30 nm aralığına kaydığı gözlenmiştir.



Şekil 3.3. Saf CuO nanopartiküllerinin elektron mikroskonu görüntüsü ve partikül boyut dağılımı grafiği



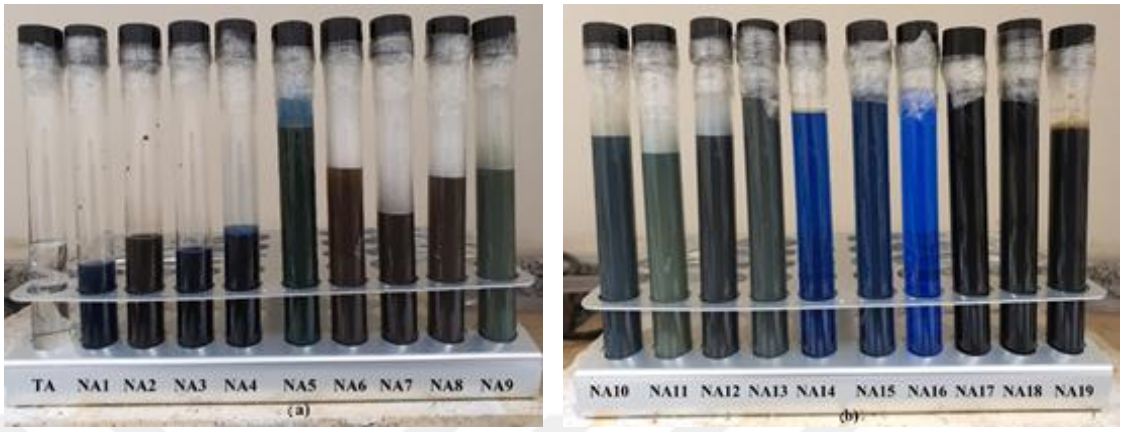
Şekil 3.4. Hazırlanan nanopartiküllerin elektron mikroskonu görüntüsü ve partikül boyut dağılımı grafiği **a)** CuO-%0.03 Ag; **b)** CuO-%0.05 Ag

3.1.3. Nanoakışkanların hazırlanması ve karakterizasyonu

Tez çalışmasında kullanılan nanoakışkanlar genel olarak temel akışkanlarla kütlesel (w/w) oranda hazırlanmıştır. Hazırlanan nanoakışkanlara, ihtiyaca göre surfaktan (CTAB ve PEI) katkısı ve yüzeye Ag atomu ilavesi işlemleri yapılmıştır. Nano boyuta sahip CuO ve yüzeyi iki farklı oranda Ag motiflenmiş CuO partiküllerinin distile su içerisinde kütlece %0.1 olacak şekilde solleri hazırlanmıştır. Bunun için, nanopartiküllerin üzerine sol oluşturmak üzere su ve kütlece %2 olacak şekilde polietilenimin ilave edilerek ultrasonik banyoya yerleştirilmiştir. Ortalama 2 saatlik ultrasonik işlem sonrasında tamamen şeffaf nanoakışkanla hazırlanmıştır.

Çalışmada yapılan ölçümlerde, nanoakışkanlarda birçok parametrenin (derişim, surfaktan, Ag atomu motiflenmesi) ısı transferine ve basınç kaybına etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı kütlesel derişimlerde ve farklı kütle oranında katkılamalarla toplamda 19 adet nanoakışkan hazırlanıp kullanılmıştır. Şekil 3.5'de kullanılan nanoakışkanların görünümü, Çizelge 3.2'de ise deneysel çalışmada kullanılan nanoakışkanların detaylı açıklamaları verilmiştir. Çizelgede, tüm nanoakışkanlar ve temel

akışkan için kısaltmalar verilmiştir. Buradan itibaren verilen tüm çizelge ve grafiklerde bu belirtilen kısaltmalar kullanılacaktır.



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan nanoakışkanların görünümü

Çizelge 3.2. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Akışkan Numarası	**Nanopartikül**	**Derişim (%) (w/w)**	**Surfaktan (CTAB/PEI) (%) (w/w)**	**Ag Motiflenmesi (%) (w/w)**
TA (H_2O)	-		-	-
NA 1	CuO-H_2O	0.1	-	-
NA 2	CuO-H_2O	0.5	-	-
NA 3	CuO-H_2O	1	-	-
NA 4	CuO-H_2O	2	-	-
NA 5	CuO-H_2O	2	2 (CTAB)	-
NA 6	CuO-SiO_2-H_2O	0.1	0.1 (CTAB)	0.003
NA 7	CuO-H_2O	0.1	0.1 (CTAB)	0.03
NA 8	CuO-H_2O	0.1	0.1 (CTAB)	1
NA 9	CuO-H_2O	0.1	1 (CTAB)	1
NA 10	CuO-H_2O	0.1	1,5 (CTAB)	1
NA 11	CuO-H_2O	0.1	1 (CTAB)	1,5
NA 12	CuO-H_2O	0.1	1 (CTAB)	0.03
NA 13	CuO-H_2O	0.1	2 (CTAB)	0.03
NA 14	CuO-H_2O	0.1	2 (PEI)	-
NA 15	CuO-H_2O	0.1	2 (PEI)	0.03
NA 16	CuO-H_2O* (7.81 ±0.81 nm)	0.1	2 (PEI)	-
NA 17	CuO-H_2O* (11.49 ±3.67 nm)	0.1	2 (PEI)	0.03

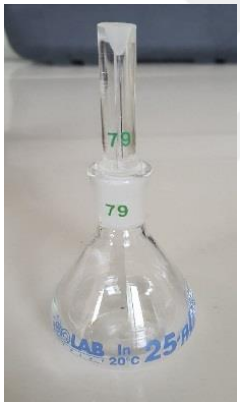
Çizelge 3.2'nin devamı

NA 18	CuO-H_2O* (19.77 ±7.15 nm)	0.1	2 (PEI)	0.05
NA 19	CuO-H_2O*	0.1	2 (PEI)	0.1
* Daha küçük boyutlu nanopartiküller				

3.1.4. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

a. Yoğunluk,

Çalışmada en iyi sonuçların alındığı nanoakışkanların yoğunluğunu ölçmek için, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında 25 mL hacimli piknometre kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan piknometrenin görünümü Şekil 3.4'de verilmiştir. Bu kapsamda su referans akışkan olarak alınarak, nanoakışkanların öncelikli olarak kütleleri hassas teraziyle ölçülmüştür. Daha sonra piknometreden alınan değerlerle birlikte akışkanların yoğunlukları hesaplanmıştır. Nanoakışkanların belirlenen yoğunluk değerleri Çizelge 3.6.'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan piknometrenin görünümü

Çizelge 3.3. Nanoakışkanların yoğunluk ölçümü

Numune	**Sıcaklık (°C)**	**Akışkan Kütlesi (m) (g)**	**Akışkan Hacmi (V) (cm^3)**	**Yoğunluk (ρ) (g/cm^3)**
TA	19	25.7777	25.819	0.99819
NA 16	19	25.8606	25.819	1.0016
NA 17	19	25.8818	25.819	1.0024
NA 18	19	25.8529	25.819	1.0013
TA : Su			**NA 16:** %0.1 CuO/%2 PEI	
Na 17: %0.1 CuO-%0.03 Ag/%2 PEI			**NA 18:** %0.1 CuO-%0.05 Ag/%2 PEI	

b. Viskozite,

Çalışmada ısı transferi açısından uygun görülen nanoakışkanların viskoziteleri, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında belirlenmiştir. Nanoakışkanların viskozitelerini belirlemede "Fungi-lab ALPHA viskozimetre" kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan viskozimetrenin görünümü Şekil 3.5'de verilmiştir. Bilindiği üzere nanoakışkanların termofiziksel özellikleri çoğu akışkan gibi sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu kapsamda viskozite ölçümlerinde ortalama akışkan giriş çıkış sıcaklığının en yüksek ve en düşük değerlerinde viskozite ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 3.7'te verilmiştir.



Şekil 3.7. Ölçümlerde kullanılan viskozimetre ve sabit sıcaklıklı su banyosunun görünümü

Çizelge 3.4. Nanoakışkanların viskozite ölçüm sonuçları

Numune	Viskozite (μ) (18 °C) (kg/ms)	Viskozite (μ) (25 °C) (kg/ms)
TA	0.00105	0.00089
NA 16	0.00149	0.00129
NA 17	0.00155	0.00140
NA 18	0.00156	0.00139
TA : Su		**NA 16:** %0.1 CuO/%2 PEI
Na 17: %0.1 CuO-%0.03 Ag/%2 PEI		**NA 18:** %0.1 CuO-%0.05 Ag/%2 PEI

c. Termal iletkenlik katsayısı,

Hazırlanan temel akışkan ve nanoakışkanların termal iletkenlik katsayısı ölçümleri hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde ilgili ekip tarafından

hazırlanan deneysel düzenekte, 3ω yöntemi kullanılarak 25 °C sabit sıcaklıkta ısıl iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 3.5'te verilmiştir. Yöntemin ve kullanılan düzeneğin detayları ilgili araştırmacıların çalışmasında verilmiştir (Turgut vd. 2016).

Çizelge 3.5. Nanoakışkanların, temel akışkana göre bağıl termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları

Numune	**Bağıl Termal İletkenlik (k_{NA}/K_{TA})**
NA 16	1.34
NA 17	1.45
NA 18	1.55
NA 16: %0.1 CuO/%2 PEI	
Na 17: %0.1 CuO-%0.03 Ag/%2 PEI	**NA 18:** %0.1 CuO-%0.05 Ag/%2 PEI

Hazırlanan nanoakışkanlardan ısı transferi açısından olumlu sonuçların alındığı akışkanlarla yapılan termofiziksel ölçümler sonrasında elde edilen değerlerin tek bir tabloda toplanmış hali Çizelge 3.6.'te detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.6. Nanoakışkanların, termofiziksel özellikleri

Numune	**Yoğunluk (ρ) (g/cm^3)**	**Viskozite (kg/ms) (μ)**	**Termal İletkenlik (k) (W/mK)**
TA	0.99819	0.00103	0.607
NA 16	1.0016	0.00146	0.813
NA 17	1.0024	0.00152	0.880
NA 18	1.0013	0.00153	0.940
TA : Su			**NA 16:** %0.1 CuO/%2 PEI
Na 17: %0.1 CuO-%0.03 Ag/%2 PEI			**NA 18:** %0.1 CuO-%0.05 Ag/%2 PEI

Tez çalışması kapsamında araştırılan nanoakışkanların, hazırlanması için kullanılan tüm cihazlar ve kullanım amaçları Çizelge 3.7'de, kimyasal maddeler ise Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları

Cihazın Adı	Cihazın Markası	Kullanım Amacı
Terazi	Precisa XB 1220 M	Tartım işlemlerinde kullanılmıştır.
Hassas Terazi	Mettler Toledo TLE204	Tartım işlemlerinde kullanılmıştır.
Magnetik Karıştırıcı	IKA RCT basic (ısıtıcılı)	Karıştırma ve ısıtma işlemlerinde kullanılmıştır.
Geri Soğutucu Düzeneği	-	Partiküllerin sentezlenmesinde kullanılmıştır.
Santrifüj	Hermle Z 326K	Partiküllerin ayrılmasında kullanılmıştır.
Etüv	Heratherm	Ön kurutma işlemlerinde kullanılmıştır.
Vakum Etüvü	BINDER	Kurutma işlemlerinde kullanılmıştır.
Ultrasonik	Elma S100H	Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılmıştır.
Saf Su Cihazı	Mp Minipure Marka Dest up	Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan saf suyun üretilmesinde kullanılmıştır
X-ışını Kırınımı Cihazı	Rigaku Geigerflex D Max/B Model	Partiküllerin kristal yapısının tanımlanmasında kullanılmıştır.
Partikül Boyut Ölçüm Cihazı	Anton Paar LiteSizer 500	Partiküllerin boyut analizinde kullanılmıştır.
Geçirmeli Elektron Mikroskobu	FEI 120kV CTEM	Partikül çaplarının belirlenmesinde kullanılmıştır.
Tergomagravimetrik Analiz	SETARAM / labSys evo	Partiküllerin Cp değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.
Viskozimetre	Fungilab Alpha model	Nanoakışkanların viskozitelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Çizelge 3.8. Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan kimyasal maddeler

Kimyasal Adı	Kimyasal Formül	Saflık (%)	Üretici Firma
Bakır asetat	$Cu(CO_2CH_3)_2$	98,5	J&K
Gümüş Nitrat	$AgNO_3$	-	İsolab
Polietilenimin	$(C_2H_5N)_n$-dallanmış	-	Sigma aldrich
Sodyum hidroksit	NaOH	-	İsolab
Etil Alkol	C_2H_5OH	-	Tekkim

3.1.5. Deney düzeneği ve elemanları

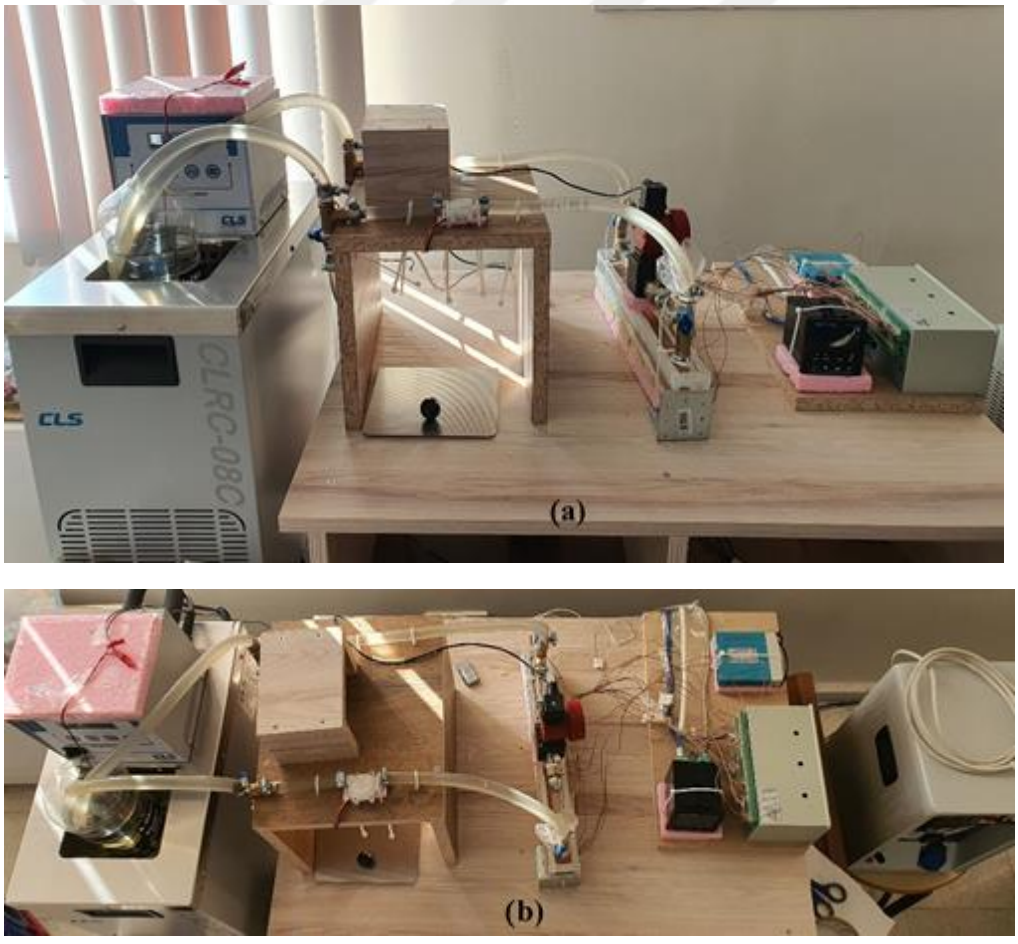
Tez çalışması kapsamında kurulan deney düzeneğinden elde edilen sonuçlarla ticari elektronik soğutma sistemlerine efektif bir yöntem sunulmak istenmiştir. Bu kapsamda, gerekli parametreler belirlenirken elektronik soğutma sistemlerinin çalışma aralıkları dikkate alınmıştır. Deney düzeneğinde hem gerekli boru uzunluğu hem de test

bölgesi boyutları olabildiğince küçük tutularak, kullanılacak olan akışkan miktarı en aza indirgenmeye çalışılmıştır.

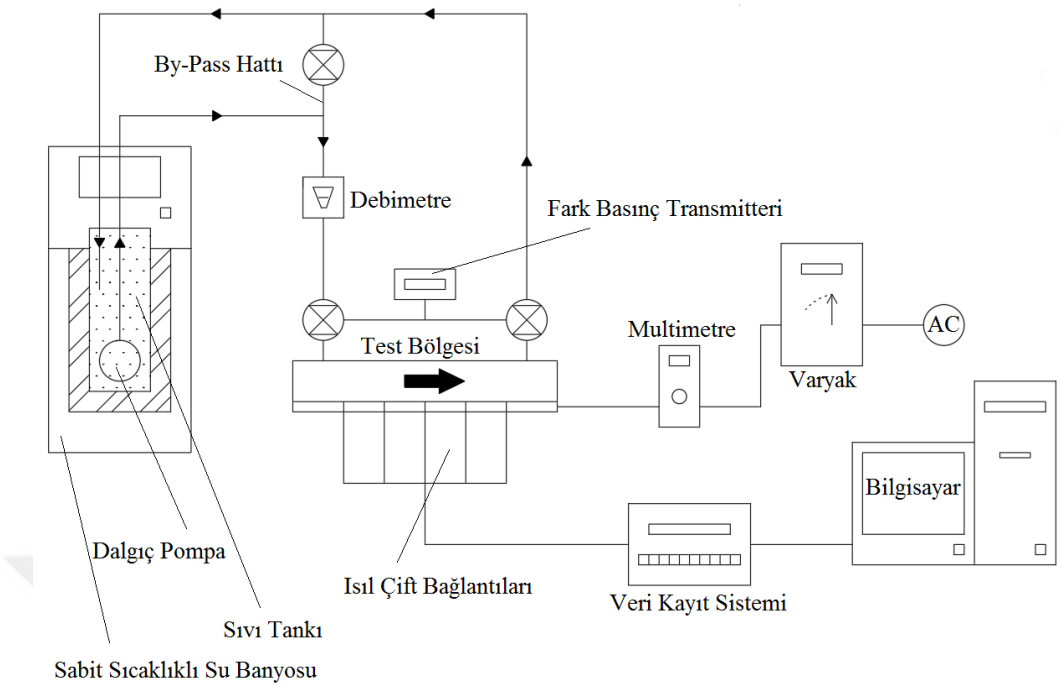
Aşağıdaki bölümlerde, deney düzeneğinin tüm tasarım, montaj ve kontrol aşamaları verilmiş olup kullanılan her bir ölçüm elemanının yerleşim yerleri ve özellikleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

a. Deney düzeneği,

Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcı kullanımı kapsamında kurulan deney düzeneğinin görünümü Şekil 3.8'da, şematik çizimi ise Şekil 3.9'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere deney düzeneği sırasıyla sabit sıcaklıklı su banyosu, sıvı tankı, dalgıç pompa, by-pass hattı, debimetre, fark basınç transmitteri ve test bölgesinden meydana gelmektedir. Deney düzeneğinin montaj işlemi tamamlandıktan sonra sızdırmazlık ve kalibrasyon için kontrol ölçümleri alınmıştır. Ölçüm sonuçlarının incelenmesiyle, düzeneğin sızdırmazlığından ve ölçüm hassasiyetinden emin olunarak çalışmalara başlanmıştır.



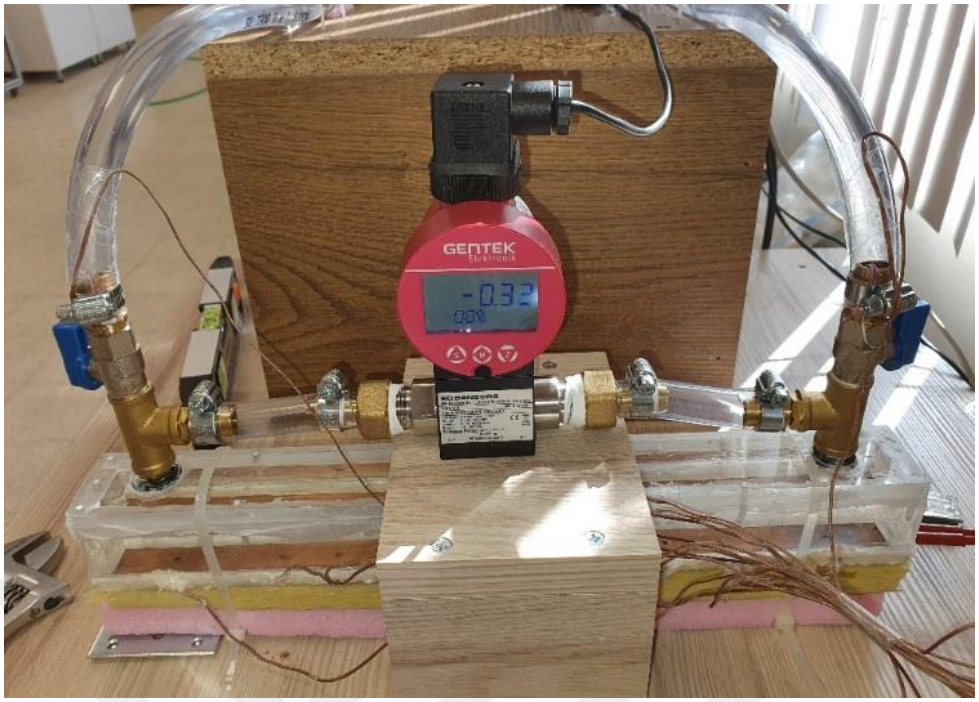
Şekil 3.8. Deney düzeneğinin görünümü, **a)** Önden görünüm; **b)** Üstten görünüm



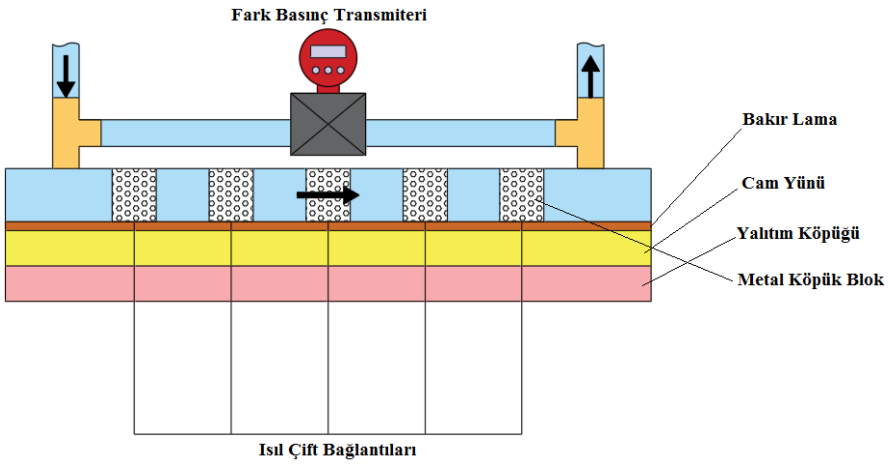
Şekil 3.9. Deney düzeneğinin şematik görünümü

b. Test bölgesi,

Tez çalışması kapsamında kurulan deney düzeneğinde, test bölgesinin tasarımında elektronik sistemlerde kullanılan ticari sıvı soğutma sistemleri dikkate alınmıştır. Bilindiği üzere elektronik sistem boyutları gelişen teknolojiyle beraber gitgide küçülmektedir. Bu kapsamda, kullanılacak olan soğutma sisteminin de olabildiğince küçük olması gerekmektedir. Ticari elektronik soğutma sistemleri göz önüne alındığında, cihaz boyutlarının küçük olması nedeniyle, kanalda hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş akış koşulları sağlanamamaktadır. Bu durumda, elektronik soğutma sistemlerinin neredeyse hepsi gelişmekte olan akış bölgesinde çalışmaktadır. Gerçek sistemlerde meydana gelen bu durum göz önüne alınarak, test bölgesinin tasarımı, gelişmekte olan akış bölgesinde olacak şekilde yapılmıştır. Test bölgesinin görünümü Şekil 3.10.'te, detaylı şematik çizimi ise Şekil 3.11'da verilmiştir. Görüldüğü üzere, 36.6x4.2x3.6 cm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde hazırlanan test bölgesinin yan ve üst kısımları pleksiglas malzemeden, alt kısmı ise termal iletkenliği yüksek bakır lamadan yapılmıştır. Çalışmada test bölgesinin alt kısmına, iletimle ısı kayıplarını gidermek amaçlı, sırasıyla cam yünü (≈250 °C, k=0,042 W/mK) ve 75 °C'ye kadar dayanıklı yalıtım köpüğü (XPS) (k=0,038 W/mK) yerleştirilmiştir. Hem cam yünü hem de yalıtım köpüğü 36.6x4.2x2.5 cm boyutlarında kesilmiştir.

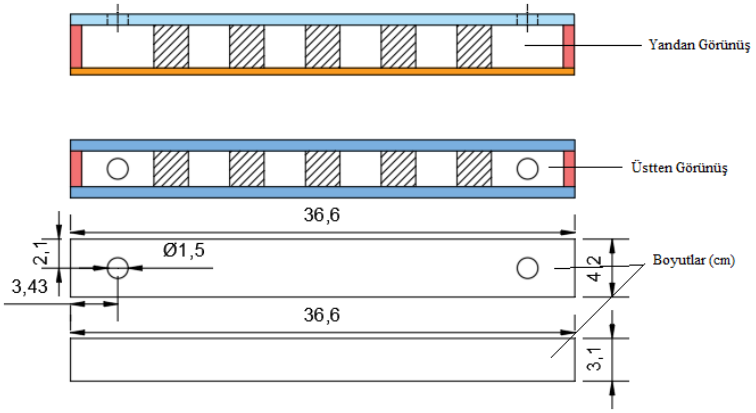


Şekil 3.10. Test bölgesinin görünümü



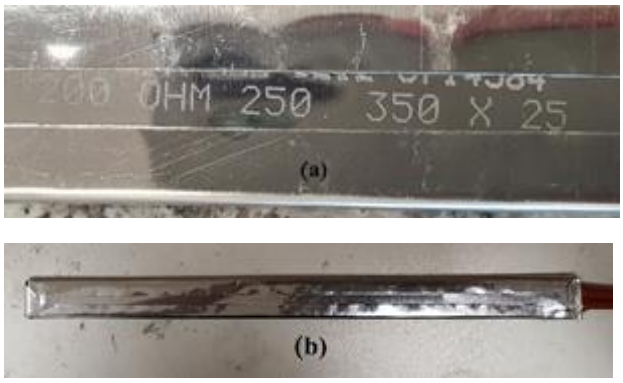
Şekil 3.11. Test bölgesinin detaylı şematik çizimi

Çalışmada pleksiglas malzemelerin birbirine ve bakır lamaya yapıştırılmasında pleksi yapıştırıcı ve beyaz silikon kullanılmış, bakır lamanın çevresine de sızdırmazlık amaçlı yüksek sıcaklığa dayanıklı sıvı conta sürülmüştür. Test bölgesinin boyutları Şekil 3.12.'te verilmiş olup, boyutlar cm cinsindendir.



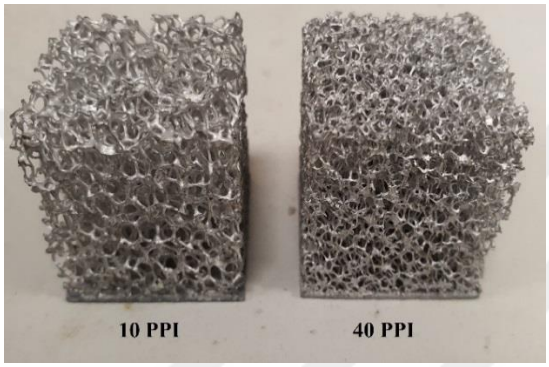
Şekil 3.12. Test bölgesinin boyutları (cm)

Akışkanın giriş ve çıkış noktaları test bölgesinin tavan kısmına yerleştirilmiştir. Her iki noktaya da pirinç malzemeden yapılmış T bağlantı yerleştirilerek, fark basınç transmitterinin test bölgesine bağlanabilmesi için gerekli alan sağlanmıştır. Bakır lamanın yüzeyine belirli aralıklarla boydan boya delikler açılmıştır. Isınan yüzeyin sıcaklığını ölçmek amaçlı 5 adet T tipi ısıl çift açılan deliklere yerleştirilmiştir. Ayrıca, 2 tane T tipi ısıl çift test bölgesinin giriş ve çıkış uçlarına akışkan sıcaklıklarını ölçmek üzere sabitlenmiştir. Çalışmada ısıl kayıpları belirlemek amaçlı, test bölgesinin altında bulunan, yalıtım köpüğünün alt ve üst yüzeylerine aralarında 15 cm mesafe ile 3'er adet olmak üzere toplamda 6 adet T tipi ısıl çift yerleştirilmiştir. Çalışmada sadece test bölgesinin alt kısmından iletimle olan ısı kayıpları dikkate alınmıştır. Test bölgesinin yan ve üst kısımlarından olan kayıplar çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Ayrıca, radyasyon kayıpları da hesaplanmış olup, ihmal edilebilir büyüklükte olduğu tespit edilmiştir. Test bölgesinin alt kısmına ısıtma amaçlı 35x2.5 cm boyutlarında 200 ohm'luk elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiştir. Bahsi geçen elektrikli ısıtıcının görünümü Şekil 3.13'da verilmiştir.



Şekil 3.13. Elektrikli ısıtıcının görünümü **a)** Özellikleri; **b)** Geniş açıdan görünümü

Tez çalışmasında ölçümler ilk olarak, nanoakışkanlara referans olması nedeniyle temel akışkan ve boş yüzeyle yapılmıştır. Daha sonra artan yüzey alanının etkisini incelemek amacıyla alan/hacim oranları yüksek olan, gözenek yoğunluğu 10 PPI ve 40 PPI alüminyum metal köpük ısı alıcılar (Al-6101) kullanılmıştır. Metal köpük ısı alıcıların görünümü Şekil 3.14'de, teknik özellikleri ise Çizelge 3.9'de verilmiştir. Kullanılan metal köpük ısı alıcılar 2.5x2.5x3 cm boyutlarında ve taban kısmında 1 mm kalınlığında düz plaka olacak şekilde imal edilmiştir. Metal köpük ısı alıcılarla yüzey arasında tam temasın sağlanması ve herhangi bir hava boşluğunun kalmaması için yüksek termal iletkenliğe sahip ARCTIC marka termal ped kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan termal pedin görünümü Şekil 3.15'de, özellikleri ise Çizelge 3.10'da verilmiştir. Termal ped 2.5x2.5 cm boyutlarında olup, metal köpük ısı alıcıların altına kesilerek yerleştirilmiştir.



Şekil 3.14. Alüminyum metal köpük ısı alıcıların görünümü

Çizelge 3.9. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Gözenek Yoğunluğu (PPI)	**10**	**40**
Malzeme	Al-6101	Al-6101
Gözeneklilik (ϵ)	0.910	0.910
Geçirgenlik (m^2)	$7.73x10^{-8}$	$2.40x10^{-8}$
Termal İletkenlik Katsayısı (W/mK)) (Katı)	218	218
Boyutlar (m) ($x10^{-3}$)	25x25x30	25x25x30

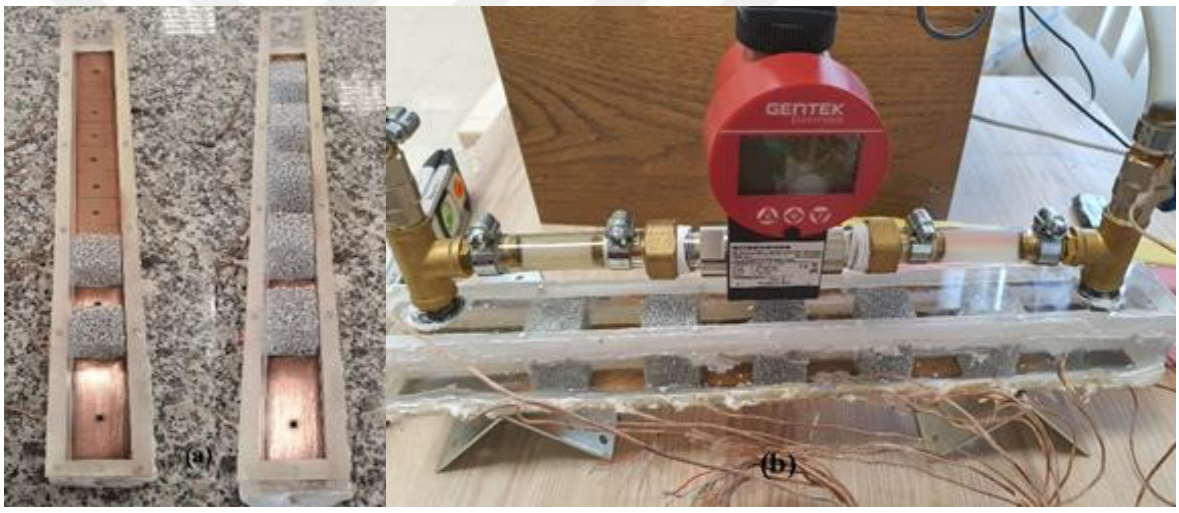


Şekil 3.15. Çalışmada kullanılan termal ped

Çizelge 3.10. Çalışmada kullanılan termal pedin özellikleri

ARCTIC Termal Ped (APT2560)	
Termal İletkenlik (W/mK)	6
Kalınlık (mm)	0.5
Boyut (mm)	100x100

Test bölgesinde öncelikli olarak, boş yüzeyde (köpüksüz) temel akışkan ve nanoakışkan için deneyler yapılmış olup, metal köpük ısı alıcılarla çalışmalara devam edilmiştir. Metal köpük ısı alıcıların rahat bir şekilde değiştirilebilmesi için test bölgesinin tavan kısmı sökülüp takılabilir olacak şekilde tasarlanmıştır. Metal köpük ısı alıcılar, bakır yüzeye aralarında 2.5 cm kalacak şekilde eşit aralıklarda ve ayrık formda yerleştirilmiştir. Test bölgesi içerisine metal köpük malzemelerin yerleşimi Şekil 3.16'de verilmiştir. Metal köpük ısı alıcılarla deneyler her bir gözenek yoğunluğu için ayrı ayrı yapılmıştır.



Şekil 3.16. Metal köpük ısı alıcıların montajı **a)** Montaj noktaları; **b)** Test bölgesinde görünümü

c. Sabit sıcaklıklı su banyosu,

Deney düzeneğinde, test bölgesine giren sıcaklığı yükselen akışkanın fazla ısısını dışarı atabilmesi için CLS (CLRC-08C) marka sabit sıcaklıklı su banyosu kullanılmıştır. Kullanılan sabit sıcaklıklı su banyosunun görünümü Şekil 3.17'te, teknik özellikleri ise Çizelge 3.11'de verilmiştir. Ölçümlerde su banyosunun sıcaklığı 20°C sabit kalacak şekilde ayarlanmıştır. Çalışmada kullanılan nanoakışkanların topaklanarak çökme ve yüzeye tutunma ihtimalleri göz önüne alınarak, su banyosunun içerisine ek bir sıvı tankı yerleştirilmiş olup, deneylerde kullanılan temel akışkan ve nanoakışkanlar bu tankın içerisinde depolanmıştır.



Şekil 3.17. Çalışmada kullanılan sabit sıcaklıklı su banyosunun önden ve yandan görünümü

Çizelge 3.11. Sabit sıcaklıklı su banyosunun teknik özellikleri

CLS (CLRC-08C)	
Volt	220 V 50 Hz
Güç	2000 W
Sirkülasyon	14 L/dk
Hacim	7.8 L
Soğutma Gazı	R507 (210 g)

d. Fark basınç transmitteri ve basınç kaybı miktarının ölçümü,

Tez çalışmasında dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri, test bölgesinin iki ucu arasındaki basınç kaybı miktarıdır. Bunun nedeni, deneysel çalışmada nanoakışkanların ve metal köpük ısı alıcıların kullanımıyla, saf su ve boş yüzeye göre sürtünmelere bağlı olarak basınç kaybı miktarında ve dolayısıyla da pompalama gücünde yükseliş meydana gelmektedir. Çalışmada basınç kaybını ölçmek amaçlı BD-Sensors marka fark basınç transmitteri kullanılmıştır. Fark basınç transmitterinin üst kısmına, ölçülen basınç farkı sinyalini okumak amaçlı, Gentek marka dijital gösterge yerleştirilmiştir. Fark basınç transmitterinin ve dijital göstergenin görünümü Şekil 3.18'de, teknik özellikleri ise Çizelge 3.12'de verilmiştir.



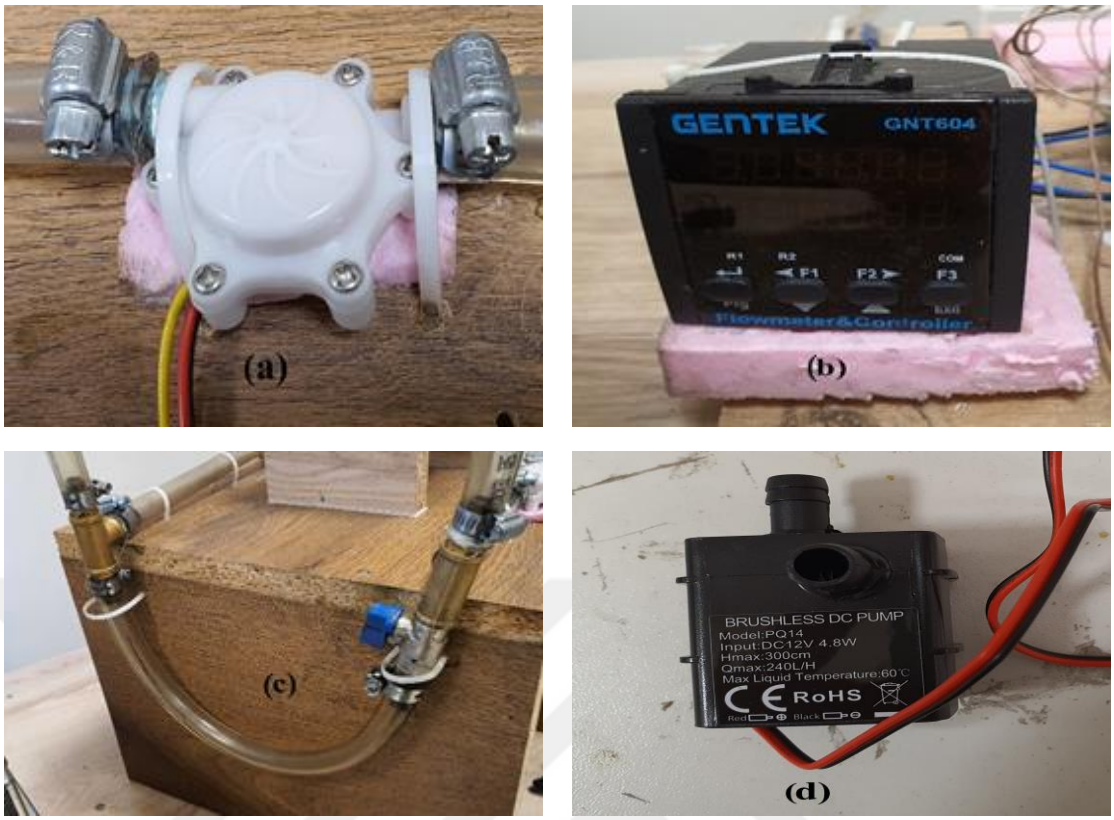
Şekil 3.18. Çalışmada kullanılan fark basınç transmitteri ve dijital göstergenin görünümü

Çizelge 3.12. Fark basınç transmitteri ve dijital teknik özellikleri

BD-Sensör (DMD 331)		**GENTEK Dijial Gösterge (LCD11)**	
Basınç	0.4 bar / maks. 1 bar	**Görüntüleme Aralığı**	-199.999 - 99999
Hassasiyet	%0.5	**Hassasiyet**	%0.1
Ölçüm Aralığı	0-40 mbar (Fark)	**Çevre Sıcaklığı**	-20 °C – 85 °C
Çıkış	4-20 mA/2-kablo	**Çevre Nem Oranı**	%20 - %80
Besleme	12-36 VDC	**Besleme**	24/3 mA

e. Debimetre ve hacimsel debi ölçümü,

Deney düzeneğinde akışkanın düzenek içerisinde sirkülasyonunu sağlamak için fırçasız 12V dalgıç pompa kullanılmıştır. Test bölgesi içerisindeki akışkanın hacimsel debisini belirlemek amaçlı WIRCON marka türbin tip debimetre kullanılmış olup, ölçüm değerlerini okumak için ORDEL marka dijital kontrol cihazından faydalanılmıştır. Çalışmada hacimsel debinin belirlenmesi ve ayarlanmasında kullanılan elemanlar ve ölçüm aletlerinin görünümü Şekil 3.19'da, teknik özelliklerin ise Çizelge 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.19. Hacimsel debinin ölçümünde kullanılan elemanlar, **a)** Türbin tip debimetre; **b)** Dijital kontrol cihazı; **c)** By-pass hattı; **d)** Dalgıç pompa

Çizelge 3.13. Türbin tip debimetre ve dijital göstergenin teknik özellikleri

Debimetre (WIRCON EF09)		**Dijital Kontrol Cihazı (ORDEL FC771)**	
Akışkan	Sıvı	**Besleme Gerilimi**	18-32 AC/DC
Çalışma Sıcaklığı	-10 °C – 80 °C	**Güç Tüketimi**	5 W, 8 VA
Maksimum Basınç	20 bar	**Doğruluk**	± %0.2
Ölçüm Aralığı	0.15-3 L/dk (9-180 L/h)	**Sensör Girişi**	Transmitter, akım, gerilim, puls, mekanik kontak
Çıkış	4200 Puls/L	**Örnekleme Zamanı**	100 ms
Hassasiyet	± %2	**Çalışma Sıcaklığı**	-10 °C – 55 °C

f. Veri kayıt sistemi ve sıcaklık ölçümleri,

Deneysel çalışmada sıcaklık ölçümleri iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi, test bölgesinin yüzey, yalıtım ve akışkan giriş-çıkış sıcaklıklarının belirlenmesinde T tipi ısıl çiftler kullanılmış olup, bu sıcaklıklar veri kayıt sistemi ve bilgisayar ile kayıt altına alınmıştır. Sıcaklık ölçümlerinin alındığı veri kayıt sisteminin (Elimko 680) görünümü Şekil 3.20'de, teknik bilgileri ise Çizelge 3.14'de verilmiştir.

İkincisi ise sabit sıcaklıklı su banyosundaki ve sıvı tankındaki akışkanların sıcaklıkları termometre kullanılarak belirlenmiştir.



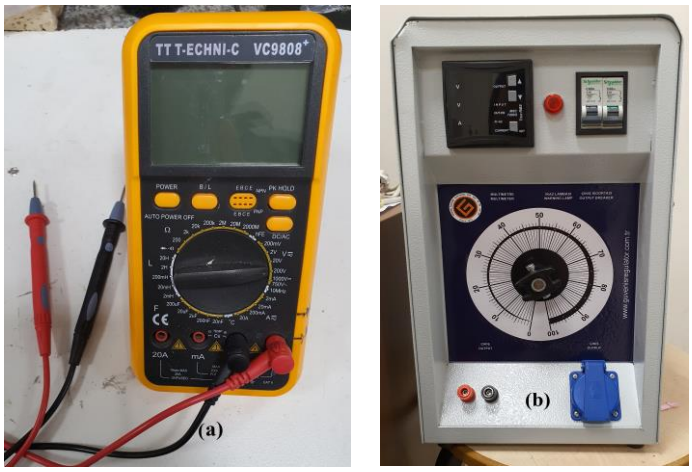
Şekil 3.20. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan veri kayıt sistemi

Çizelge 3.14. Veri kayıt sisteminin teknik özellikleri

Debimetre (WIRCON EF09)	
Çalışma Sıcaklığı	-10 °C – 55 °C
Güç Tüketimi	4 W, 7 VA
Doğruluk	Gösterge değerinin ± %0.5 yada ± 1°C (Isıl Çift)
Giriş Seçme Aralığı	0.2-9.9 sn
Gösterge Tarama Aralığı	1-99 sn

g. Yüzeye uygulanan ısı akısının kontrolü,

Tez çalışması kapsamında, ısınan elektronik elemanları modellemek amaçlı, test bölgesi sabit ısı akısına maruz bırakılmış olup, kullanılan elektrikli ısıtıcının özellikleri ve görünümü test bölgesi tanıtım kısmında verilmiştir. Bakır yüzeye uygulanan ısı akısının ayarlanmasında varyak kullanılmış olup, değerler multimetre ile ölçülmüştür. Deneyler 3267, 3750, 4267, 4817 ve 5400 W/m^2 olmak üzere 5 farklı sabit ısı akısında yapılmıştır. Çalışmada kullanılan multimetre ve varyağın görünümü Şekil 3.21'de verilmiştir. Ayrıca multimetrenin teknik özellikleri Çizelge 3.15'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan veri kayıt sistemi

Çizelge 3.15. Veri kayıt sisteminin teknik özellikleri

Multimetre (TT TECHNIC VC9808+)	Hassasiyet
DC Voltaj	±(%0.5 + 3)
AC Voltaj	±(%0.8 + 5)
DC Akım	±(%0.8 + 10)
AC Akım	±(%1.0 + 15)
Direnç	±(%0.8 + 3)

3.2. Metot

3.2.1. Deneysel parametrelerin belirlenmesi

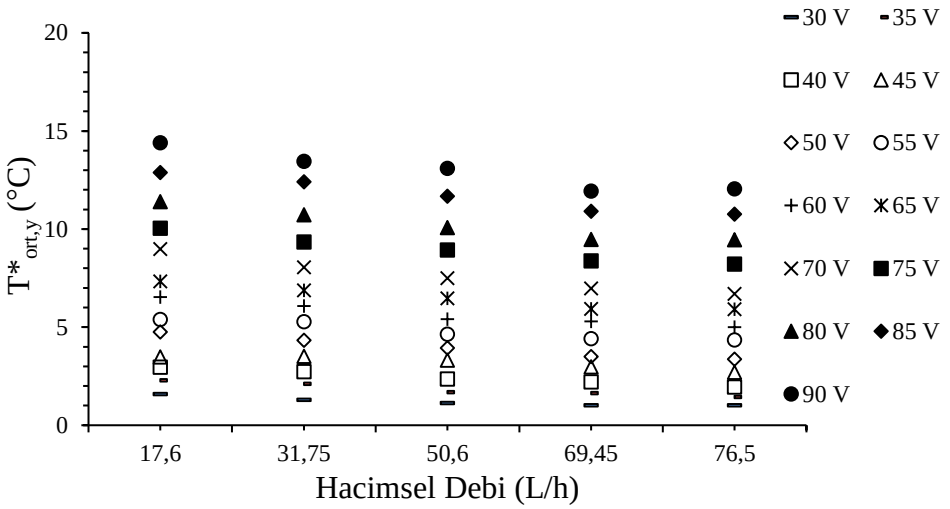
a. Isı akısı ve hacimsel debi aralıklarının belirlenmesi,

Tez çalışmasında deneylerin yapılacağı parametrelerin belirlenmesi kapsamında öncelikli olarak gerçekçi sistemlerde ve literatürde yapılan çalışmalardaki maksimum ve minimum çalışma aralıkları göz önüne alınmıştır. Daha sonra deney düzeneğinde, termofiziksel özellikleri bilinen temel akışkanla ölçümler yapılmıştır. Test bölgesinde kullanılan malzemelerin ve cihazların çalışabileceği maksimum ve minimum çalışma sınırları belirlenmiştir. Bu kapsamda ölçümler sabit ısı akısının 600 W/m^2 - 5400 W/m^2 aralığında 13 farklı değerde ve hacimsel debinin ise 17.6 L/h - 76.5 L/h aralığında 14 farklı değerde yapılmıştır.

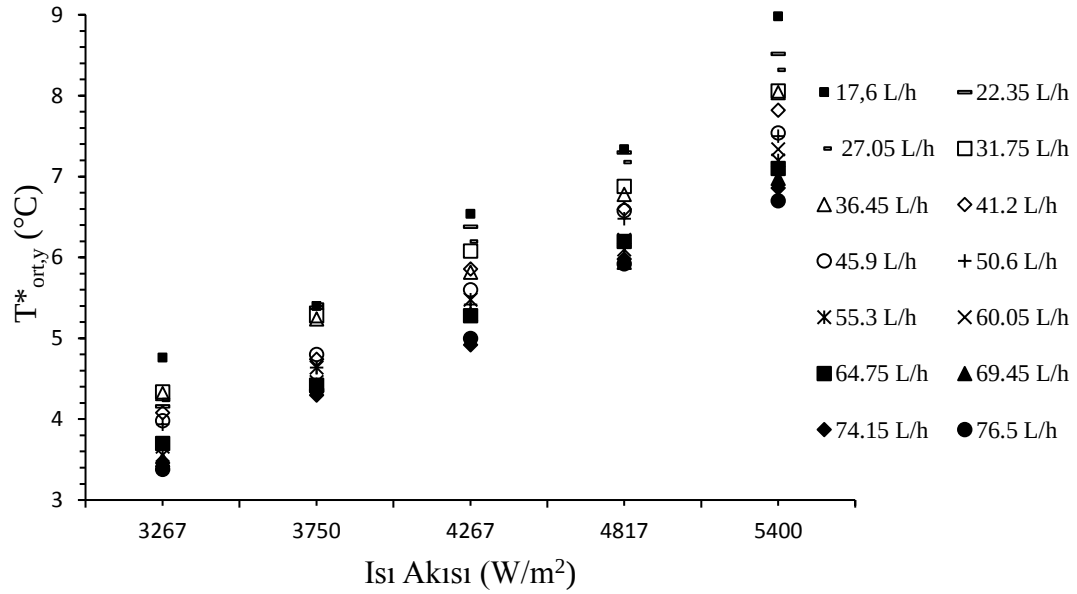
Test bölgesinin montajında kullanılan malzemelerin maksimum dayanım sıcaklıkları ve elektronik soğutma sistemlerinin maksimum çalışma sıcaklık aralığı (yaklaşık 70 °C – 75 °C) göz önüne alınarak, en yüksek sabit ısı akısı 5400 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Uygulanan ısı akısının minimum değeri ise yüzey sıcaklıklarında belirgin farkların görülmeye başladığı 3267 W/m^2 değeri kabul edilmiştir. Çünkü daha düşük ısı akılarında alınan yüzey sıcaklık değerlerinde elde edilen farklar hata payı aralığında kalmaktadır ve sonuçların doğruluğunu etkilemektedir. Ayrıca düşük ısı akılarında, yüzey sıcaklık değerlerinin oda sıcaklığına çok yakın olması nedeniyle nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcıların kullanımıyla elde edilmesi beklenen iyileştirme miktarlarının

belirlenmesi zorlaşmaktadır. Belirtilen nedenler hususunda, tez çalışmasında ısı akısının 3267 W/m^2 - 5400 W/m^2 aralığında 5 farklı değerde yapılmasına karar verilmiştir.

Benzer şekilde, deneysel çalışmanın hacimsel debi sınırlarının belirlenmesinde gerekli kontroller yapılmış olup, ölçümlerde hacimsel debinin 17.6 L/h – 76.5 L/h aralığında 5 farklı değerde yapılmasına karar verilmiştir. Parametrelerin belirlenmesi amaçlı yapılan ölçümler Şekil 3.22'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.22. Çalışma parametrelerinin belirlenmesi **a)** Sabit ısı akısı; **b)** Hacimsel debi

b. Derişim,

Derişim, nanoakışkanlarda temel akışkan içerisine kütlece veya hacimce eklenen nanopartikül miktarını belirtmede kullanılır. Temel akışkana göre, derişim oranına bağlı olarak, nanoakışkanın termofiziksel özellikleri değişmektedir. Ayrıca nanoakışkan derişiminin artması akışkanın üretim maliyetini de arttırmaktadır. Literatürde nanoakışkanlarla yapılan çalışmalar dikkate alındığında, çalışmaların bir kısmında artan hacimsel veya kütlesel derişime bağlı olarak ısı transferinde belirli bir yere kadar iyileştirme yapılabildiği belirlenmiştir. Ancak belirli bir derişim değerinden sonra, ısı transferindeki iyileşmenin yavaş yavaş düşmeye başladığını tespit edilmiştir. Bu duruma, artan derişimlere bağlı olarak nanopartiküllerin topaklanmasının ve çökmesinin öncelikli olarak neden olduğunu gözlenmiştir.

Nanoakışkanların elektronik soğutma sistemlerinde kullanılması kapsamında yapılan diğer çalışmalarda ise, artan derişim miktarına bağlı olarak ısı transferinde olumsuz bir etki görmediklerini belirtmişlerdir. Sadece artan derişim miktarına bağlı olarak basınç kaybında artış gözlemlediklerini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmalarda çelişkilerin meydana gelmesinin birçok nedeni (Nanoakışkan malzemesi, nanoakışkan derişim oranları, nanopartikül boyutu, nanopartikül şekli, test bölgesi boyutları, parametreler vb.) olabilir. Nanoakışkanın hazırlanmasında, belirtilen nedenlerden herhangi birinde meydana gelebilecek bir değişim nanoakışkanın termofiziksel davranışını doğrudan etkilemektedir. Tez çalışması kapsamında nanoakışkanlar hazırlanırken derişimler kütle miktarlarına göre belirlenmiştir. Hazırlanan nanoakışkanların kütlesel derişimlerinin belirlenmesinde yüksek performans ve düşük maliyetli bir akışkan üretimi amacıyla yola çıkılmıştır. Bu kapsamda, nanoakışkan hazırlanmasına kütlece %0.1 derişiminde başlanmıştır ve elde edilen veriler ışığında derişim miktarları yavaş yavaş arttırılmıştır.

3.2.2. Geometrik parametreler

Tez çalışmasına kullanılan nanoakışkanlar ve metal köpük ısı alıcıların termal performansları ve basınç kaybı miktarlarının belirlenmesi için öncelikli olarak bazı geometrik parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlardan ilk olanı temas yüzey (A) alanıdır. Test bölgesinde, bakır yüzeye elektrikli ısıtıcı tarafından uygulanan ısı akısının belirlenmesinde yüzey alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanında, test bölgesinin alt kısmından olan iletimle ısı kayıplarının hesabında, aynı yüzey alanından faydalanılmıştır. Aynı boyutlarda hazırlanan, bakır lama ve yalıtım köpüğünün yüzey alanı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$A = lw \tag{3.2}$$

Burada, l ve w sırasıyla bakır lamanın uzunluğu ve genişliğidir. Reynolds sayısının hesaplanmasında kullanılan hidrolik çap aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$D_h = \frac{4A_k}{P} \tag{3.3}$$

Hidrolik çapın hesaplanmasında kullanılan $A_k$ve P sırasıyla kanal kesit alanı ve çevre uzunluğudur. Kanal kesit alanı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$A_k = wH \tag{3.4}$$

Yukarıdaki eşitlikte, H kanal yüksekliğidir. Hidrolik çapın hesaplanmasında kullanılan perimetre (P), kanal kesit çevresidir ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P = 2(w + H) \tag{3.5}$$

Çalışmanın analiz kısmında kullanılacak olan geometrik boyutların detaylı bilgisi Çizelge 3.16'de verilmiştir.

Çizelge 3.16. Test bölgesinin hesaplanan geometrik parametreleri

Geometrik Parametre	Birim	Simge	Boyut
Uzunluk	m	l	0.35
Genişlik	m	w	0.025
Yükseklik	m	H	0.03
Yüzey Alanı	m^2	A	8.75×10^{-3}
Hidrolik Çap	m	D_h	0.027
Kesit Alanı	m^2	A_k	7.5×10^{-4}
Perimetre	m	P	0.11

3.2.3. Isı transfer analizi

Elektronik soğutmada nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcı kullanımının ısı transferi üzerindeki etkisinin incelenmesinde, bu kısımda verilen eşitliklerden faydalanılmıştır. Bu kapsamda öncelikli olarak akışkana aktarılan ısı miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{konv.} = \dot{Q}_{elektrik} - \dot{Q}_{kond.} \tag{3.6}$$

Eşitlik (3.6) ile verilen ifadede $\dot{Q}_{konv.}$, $\dot{Q}_{elektrik}$ ve $\dot{Q}_{kond.}$ sırasıyla akışkana aktarılan ısı transferi miktarı, elektrikli ısıtıcı tarafından verilen toplam ısı miktarı ve test bölgesinin alt kısmından olan iletimle ısı kaybıdır. Kanalın alt kısmına yerleştirilen elektrikli ısıtıcıdan alınan toplam ısı miktarı ve iletimle ısı kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{elektrik} = \frac{V^2}{R} \tag{3.7}$$

$$\dot{Q}_{kond.} = -k_{yalıtım} A \frac{\Delta T_{yalıtım}}{\Delta x} \tag{3.8}$$

Elektrikli ısıtıcıdan yüzeye aktarılan toplam ısı miktarının hesaplanmasında kullanılan V ve R ifadeleri sırasıyla uygulanan voltaj miktarı ve ısıtıcı direncidir. Eşitlik (3.8)'da verilen $k_{yalıtım}$, $\Delta T_{yalıtım}$ ve Δx sırasıyla yalıtım köpüğünün termal iletkenlik katsayısı, iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ve kalınlığıdır. Kanal içerisinde meydana gelen ısı transferinin miktarını belirlemek için akış tipinin öncelikli olarak belirlenmesi için Reynolds sayısı aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \tag{3.9}$$

Yukarıda Reynolds sayısının hesaplanmasında kullanılan μ akışkanın dinamik viskozitesi, U ise akış hızıdır. Test bölgesine giren akışkan sıcaklığında, gün içerisinde az miktarda da olsa oynamalar meydana gelmiştir. Kanal yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılmasında sağlıklı sonuçların alınabilmesi için ortalama yüzey sıcaklığından faydalanılmıştır.

$$T^*_{ort,y} = T_{ort,y} - T_g \tag{3.10}$$

Yukarıdaki eşitlikte $T_{ort,y}$, T_g sırasıyla kanal yüzey sıcaklığı ortalaması ve akışkan giriş sıcaklığıdır. Ortalama yüzey sıcaklığı hesaplanırken, kanal yüzeyindeki 5 adet T tipi ısıl çiftin okuduğu değerin ortalaması ($T_{ort,y} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5)/5$) alınmıştır.

Akışkanın taşınımla ısı transferi katsayısının (h) hesabında aşağıdaki eşitlikten faydalanılmıştır.

$$h = \frac{\dot{Q}_{konv.}}{A\,T^*_{ort,y}} \tag{3.11}$$

Yüzeyden olan ısı transferinin analizinde kullanılan Nusselt sayısının hesabında aşağıdaki eşitlikten faydalanılmıştır.

$$Nu = \frac{hD_h}{k_a} \tag{3.12}$$

Yüzeyden olan ısı transferi miktarına bağlı olarak termal dirençteki değişim aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$R_{th} = \frac{T^*_{ort,y}}{\dot{Q}_{konv.}} \tag{3.13}$$

3.2.4. Performans analizi

a. Termal performans,

Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkan ve/veya metal köpük ısı alıcısı kullanımında, termal performans değeri hesaplanırken ısı transferinde elde edilen verilerle basınç kaybı karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda elde edilen iyileştirme miktarının boş kanal ve temel akışkana göre kullanılabilirliği irdelenmiştir. Hangi parametreler altında hangi nanoakışkanın ve/veya metal köpük ısı alıcısının termal olarak daha iyi olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bulgular kısmında detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Termal performans analizinde dikkat edilen başlıca veriler, yüzeyden olan ısı transferi miktarı ve basınç kaybıdır. Performans analizinin tanımlanmasında kullanılan performans indeksi (η) ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Ho vd. 2019).

$$\eta = \frac{h_{Köpük}/h_{Boş}}{\left(\Delta P_{Köpük}/\Delta P_{Boş}\right)^{1/3}} \tag{3.14}$$

Yukarıda verilen eşitlikte ΔP test bölgesinin giriş ve çıkış uçları arasındaki basınç kaybını ifade etmektedir. Hem temel akışkanın hem de nanoakışkanın metal köpük ısı alıcılarla kullanılması sonucu performans analizleri bu eşitliğe göre hesaplanmıştır. Performans değerinin 1'den büyük çıkması durumunda, ısı transferindeki iyileştirmenin

basınç kaybına göre baskın olduğu görülmektedir. Elektronik sistemlerin soğutulmasında temel akışkan yerine nanoakışkan kullanımı sonucunda elde edilen ısı transfer etkenliği (ϵ_s) aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır (Khaleduzzaman 2017).

$$\epsilon_s = \frac{h_{na}}{h_{ta}} \tag{3.15}$$

Çalışmada nanoakışkan ve/veya metal köpük ısı alıcısı kullanımı sonucunda basınç kaybı miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısı (Pourfarzard vd. 2018) ve pompalama gücündeki artış aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$f = \frac{\Delta P}{4\left(\frac{l}{D_h}\right)\left(\frac{\rho . v^2}{2}\right)} \tag{3.16}$$

$$P_p = \dot{V}\Delta P \tag{3.17}$$

Burada, $\dot{V}$ akışkan hacimsel debisidir.

3.2.5. Belirsizlik analizi

Deneysel çalışmalarda dikkat edilmesi gereken uygulamalardan biri belirsizlik analizidir. Belirsizlik analizi, deneysel çalışmalarda hata miktarının belirlenmesi ve sonuçların doğru bir şekilde yorumlanmasında kullanılır. Özellikle deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm aletlerinde çalışma aralığı, nem, sıcaklık vb. etmenlerden dolayı sonuçlarda birtakım oynamalar meydana gelmekte olup, meydana gelen bu oynamalar hata aralığında kalırsa hesaplamaya katılmaz ve ihmal edilebilir. Ancak, birden fazla parametrenin bir arada incelendiği ve hesaplamalarda kullanıldığı çalışmalarda hata oranları birbirleri ile orantılı olarak daha da artacağı için, belirli hesaplama yöntemleriyle kontrol edilerek, ihmal edilebilir bir boyutta olup olmadığına bakılması gerekmektedir.

Deneylerde genellikle hatalar insan kaynaklı, kullanılan ölçüm aleti kaynaklı ve dış kaynaklı olarak gruplandırılır. Ölçüm sonuçlarını etkileyen yanlış okuma, yanlış kullanım, tecrübesizlik, dikkatsizlik vb. birçok etmen insan kaynaklı olarak kabul edilmektedir. Ölçüm aleti kaynaklı hatalar ise genellikle üretici firma tarafından belirlenen, çalışma koşullarına ve çalışma aralığına bağlı olarak değişen sonuç oranıdır. Dış kaynaklı hatalarda ise deney düzeneğinin zarar görmesi, parça değişimi vb. etmenlerden dolayı olan ve genellikle ihmal edilebilir sınırın dışında olan hatalardır.

Bu kapsamda deneysel çalışmalarda belirlenen sonuçların ne kadar hassas olduğunu tespit etmek amaçlı hata analizi yapılır. Yapılan analiz soncunda, gerçek

değerden ne kadar sapma olduğu belirlenir. Yapılan tez çalışmasında ölçüm aletlerinin belirsizlik değerleri Çizelge 3.17'da verilmiştir.

Çizelge 3.17. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm parametrelerin belirsizlik değerleri

Ölçüm Parametreleri	**Hata Miktarı (%)**
Nanoakışkan Karakterizasyonu	
Yoğunluk	± 0.1
Viskozite	± 1
Özgül Isı	± 2
Isıl İletkenlik	± 2
Sıcaklık Ölçümleri	
Termometre	± 0.1
Isıl Çift	± 1.5
Veri Kayıt Sistemi	± 0.5
Voltaj Ölçümü	
AC Voltaj	± (0.8 +5)
Direnç	± (0.8 +3)
Basınç Ölçümü	
Basınç Farkı	± 0.5
Debi Ölçümü	
Hacimsel Debi	± 2

Deneysel ölçümlerin sonucunda yukarıdaki hata miktarları göz önünde bulundurularak, $\dot{Q}_{elektrik}$, Re, Nu değerleri hesaplanmıştır (Holman 1994). Hesaplanan parametrelerin belirsizlik oranları Çizelge 3.18'de verilmiştir.

$$w_f = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} w_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} w_y\right)^2 + \cdots\right]^{1/2} \tag{3.18}$$

Çizelge 3.18. Hesaplanan parametrelerin belirsizlik oranı

Hesaplama Parametreleri	**Belirsizlik**
$\boldsymbol{\dot{Q}_{elektrik}}$	%12.9
$\boldsymbol{Nu}$	%15.9
$\boldsymbol{Re}$	%3.57

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

İçerisinde ayrık gözenekli ısı alıcılar bulunan bir kanalda nanoakışkan kullanımının ısı transferine etkisinin incelenmesi konusunda hazırlanan bu tez çalışmasında, deneysel ölçümler sonucunda elde edilen tüm bulgular ve değerlendirmeler bu kısımda sunulmuştur.

4.1. Deneysel Ölçümler ve Verilerin Analizi

Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcı kullanımının ısı transferi ve basınç kaybınadüşümüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi kapsamında kurulan deney düzeneğinde, materyal ve metot kısmında belirtildiği gibi, ölçümler 5 farklı sabit ısı akısında (3267, 3750, 4267, 4817 ve 5400 W/m^2) ve 5 farklı hacimsel debi (17.6, 31.75, 50.6, 69.45 ve 76.5 L/h) değerlerinde yapılmıştır. Test bölgesine elektrikli ısıtıcı vasıtasıyla sabit ısı akısı uygulanmış olup, elektronik sistemlerin soğutulmasında termal akışkana göre daha verimli bir soğutma akışkanı geliştirmek üzere toplamda 19 farklı nanoakışkanla ölçümler yapılmıştır. Temel akışkana göre daha iyi ısı transferine sahip nanoakışkanı bulmak amaçlı ilk olarak deneyler boş yüzeyde yapılmıştır. Daha sonra, ısı transferi açısından daha etkili sonuçların alındığı nanoakışkanlarla (NA 16, NA 17, NA 18), içerisinde 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcı bulunan kanalda ölçümler ayrı ayrı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tüm yüzeylerde temel akışkanla karşılaştırılmıştır.

Test bölgesinde ölçümler sürekli rejim şartında alınmış olup, her bir ölçüm için sabit sıcaklı su banyosu 20°C'ye ayarlanmıştır. Su banyosuyla tank arasındaki sıcaklık aynı olduğunda, belirtilen ısı akılarında ve hacimsel debilerde ölçümlere başlanmıştır. Her bir ısı akısında test bölgesinde sürekli rejimin sağlanması için minimum 1 saat beklenerek sıcaklık, debi ve basınç ölçüm değerleri alınmıştır.

Bu kısımda, tez çalışması kapsamında kurulan deney düzeneğinden farklı akışkan ve ölçüm parametrelerinde alınan verilerin analizi yapılmıştır. Gerekli görüldüğü yerlerde incelenen parametreler, birden fazla grafikle gösterilerek detaylı karşılaştırması yapılmıştır. EK-1'de çalışmadan elde edilen örnek bir set için veriler ve hesaplama sonuçları verilmiştir.

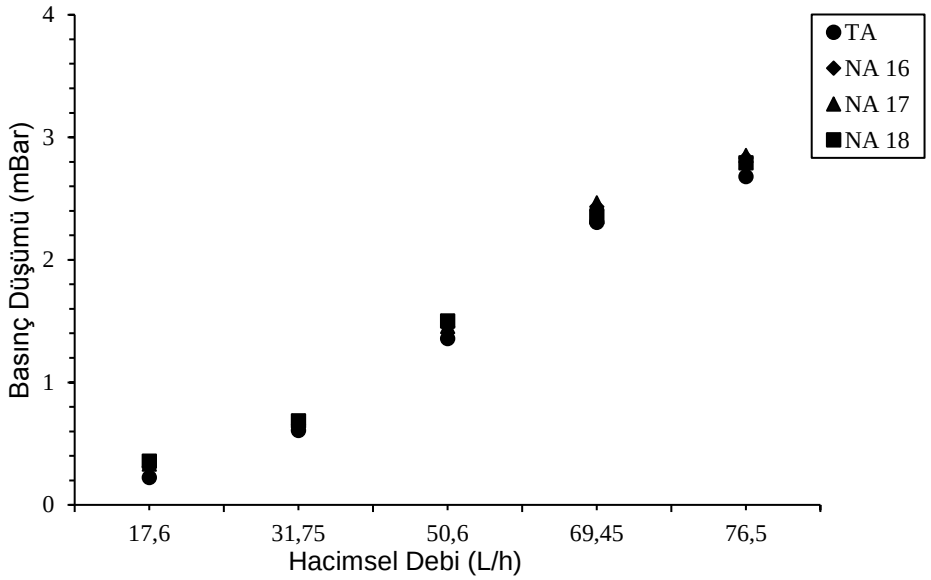
Çalışmada, temel akışkan ve ısı transferi açısından daha etkili sonuçların alındığı nanoakışkanların hacimsel debiye göre Reynolds sayısı değişimi Çizelge 4.1'de verilmiştir. Temel akışkanın Reynolds sayısı, belirtilen hacimsel debilerde yaklaşık olarak 181.3 – 792.8 aralığında değişirken, nanoakışkan kullanımında ise 125.5 – 548.6 değerleri arasında değişmektedir.

Çizelge 4.1. Hacimsel debiye göre Reynolds sayısının değişimi

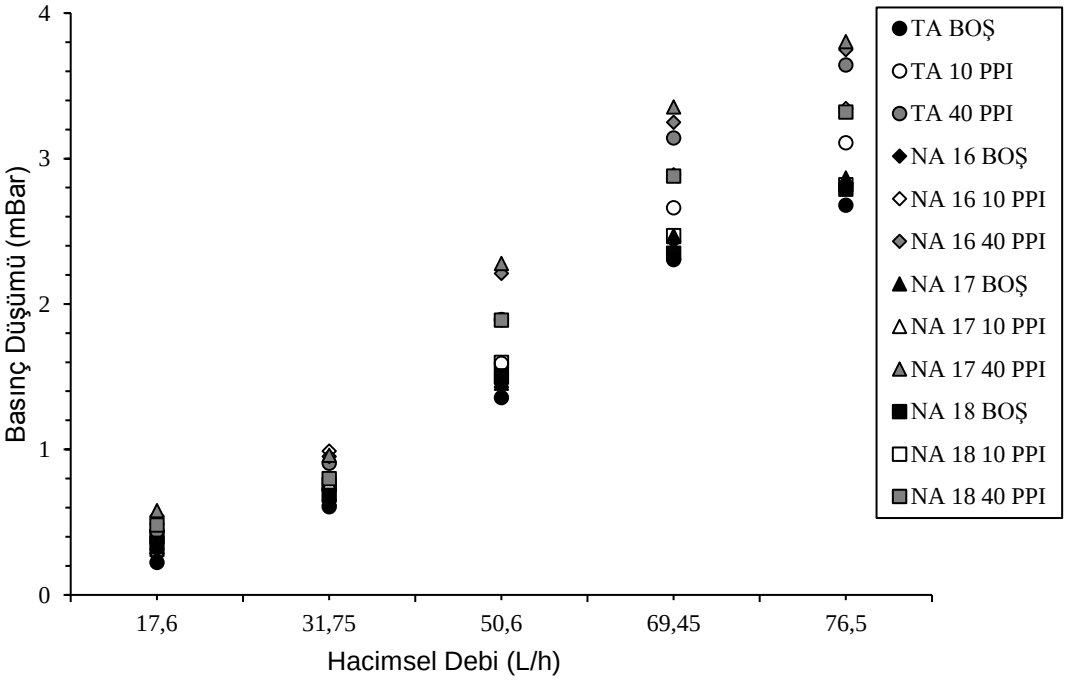
Reynolds Sayısı	**Hacimsel Debi (L/h)**				
	17.6	**31.75**	**50.6**	**69.45**	**76.5**
Temel Akışkan	181.3298	327.6206	522.4132	718.0421	792.7935
NA 16	125.4962	225.8826	359.7076	493.3511	543.6976
NA 17	125.5416	226.1815	360.365	494.5967	544.8132
NA 18	126.3058	227.8455	363.0625	498.1508	548.6636

NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81) **NA 17:** %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67) **NA 18:** %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15)

Elektronik soğutmada, termal performansı arttırmak için temel akışkana yapılan işlemler sonucunda hazırlanan nanoakışkanların termal iletkenliği artarken, birtakım dezavantajlar meydana gelmektedir. Bunlardan en önemlisi, test bölgesinin giriş ve çıkış bölgeleri arasındaki basınç kaybıdır. Isı transferi açısından en etkili sonuçların elde edildiği akışkanların hacimsel debiye göre basınç kaybı Şekil 4.1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm akışkanlardan elde edilen basınç kaybı miktarı ise Çizelge 4.2'de verilmiştir. Kanal içi akıştaki basınç kaybı ve pompalama gücündeki artış, öncelikli olarak kanal uzunluğuna ve akışkanın viskozitesine bağlıdır (Çengel ve Cimbala 2006). Buna göre, şekil ve çizelgeler incelendiğinde, kanal içerisinde artan akışkan viskozitesine bağlı olarak basınç kaybı miktarında artış gözlenmiş olup, tüm nanoakışkanlarda temel akışkana göre basınç kaybının arttığı tespit edilmiştir. Bu basınç kaybı, nanoakışkanların içerisinde bulunan nanopartikül derişimi, nanopartikül boyutu, surfaktan türü, surfaktan miktarı ve nanopartikül yüzeydeki Ag miktarına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla, tüm akışkanlarda (TA, NA 16, NA 17 ve NA 18) artan gözenek yoğunluğuna bağlı olarak basınç kaybında belirgin bir artış gözlenmiştir. Gözenek yoğunluğunun daha fazla olması nedeniyle 40 PPI metal köpük ısı alıcıda en yüksek basınç kaybı miktarı ölçülmüştür. 40 PPI metal köpük kanal ve tüm akışkanlar karşılaştırıldığında ise en yüksek basınç kaybı NA 17 (%0.1 CuO-H_2O-%0.03 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm partikül boyutu) nanoakışkanı kullanımında elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Isı transferi açısından olumlu sonuçların alındığı nanoakışkanlarla hacimsel debiye göre basınç kaybı **a)** Boş yüzey; **b)** Tüm yüzeyler

Çizelge 4.2. Hacimsel debiye göre basınç kaybındaki değişim, **a)** Tüm akışkanlar ve boş yüzey; **b)** Isı transferi açısından daha etkili sonuçların alındığı nanoakışkanlar ve tüm yüzeyler

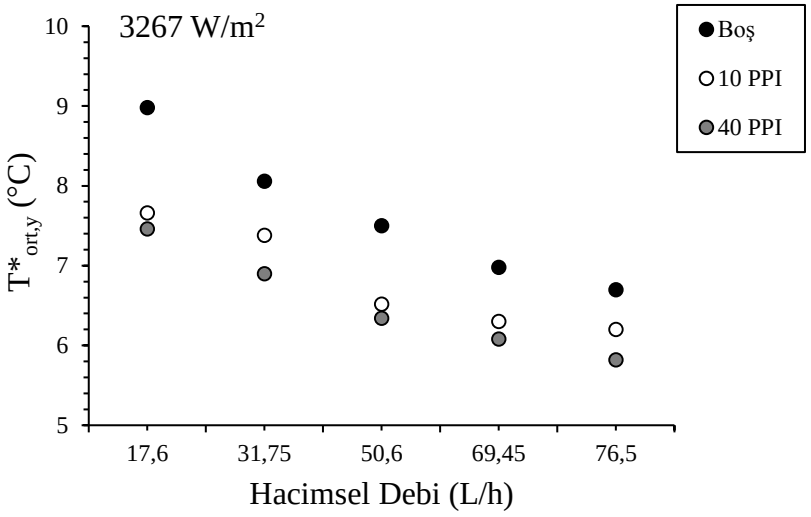
a) Boş yüzey ve tüm akışkanlar

Hacimsel Debi (L/h)	Basınç Kaybı Miktarı (mBar)							
	TA	**NA 1**	**NA 2**	**NA 3**	**NA 4**	**NA 5**	**NA 6**	**NA 7**
17,6	0.224	0.254	0.272	0.256	0.25	0.242	0.356	0.3
31,75	0.606	0.632	0.636	0.638	0.636	0.622	0.7	0.6
50,6	1.356	1.368	1.368	1.38	1.352	1.364	1.192	1.3
69,45	2.306	2.348	2.338	2.342	2.4	2.396	2.212	2.3
76,5	2.68	2.71	2.738	2.766	2.808	2.806	2.684	2.6
	NA 8	**NA 9**	**NA 10**	**NA 11**	**NA 12**	**NA 13**	**NA 14**	**NA 15**
17,6	0.43	0.4	0.28	0.468	0.268	0.268	0.44	0.432
31,75	0.7	0.6	0.69	0.712	0.672	0.592	0.736	0.728
50,6	1.35	1.31	1.31	1.444	1.34	1.216	1.352	1.34
69,45	2.35	2.2	2.21	2.2	2.424	2.268	2.296	2.248
76,5	2.63	2.64	2.61	2.648	2.68	2.64	2.536	2.556
	NA 16	**NA 17**	**NA 18**	**NA 19**				
17,6	0.312	0.332	0.355	0.36				
31,75	0.655	0.664	0.658	0.72				
50,6	1.453	1.456	1.5	1.56				
69,45	2.434	2.464	2.35	2.4				
76,5	2.83	2.852	2.79	2.84				

b) Isı transferi açısmdan sonuçların alındığı nanoakışkanlar ve tüm yüzeyler

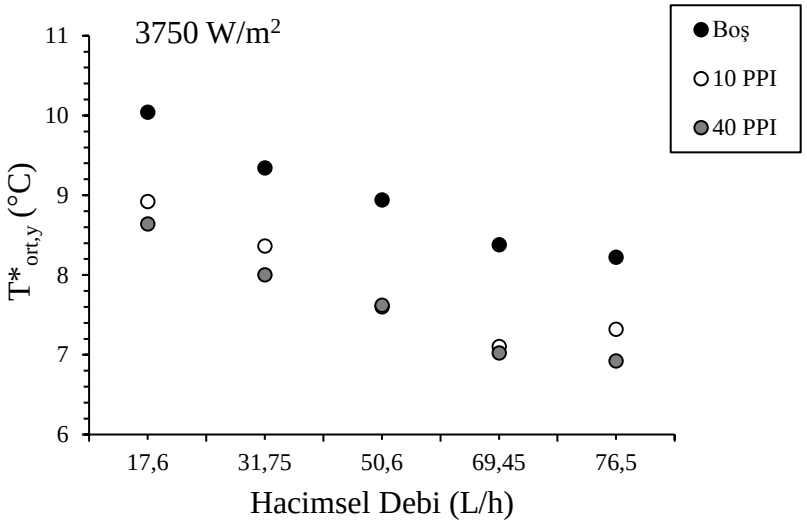
Hacimsel Debi (L/h)	TA (mBar)			NA 16 (mBar)		
	Boş Kanal	**10 PPI Kanal**	**40 PPI Kanal**	**Boş Kanal**	**10 PPI Kanal**	**40 PPI Kanal**
17,6	0.224	0.29	0.44	0.312	0.487	0.543
31,75	0.606	0.73	0.906	0.655	0.989	0.953
50,6	1.356	1.593	1.893	1.453	1.889	2.21
69,45	2.306	2.663	3.143	2.434	2.888	3.25
76,5	2.68	3.11	3.643	2.83	3.344	3.75
	NA 17 (mBar)			**NA 18 (mBar)**		
17,6	0.332	0.313	0.58	0.355	0.4	0.48
31,75	0.664	0.766	0.96	0.658	0.76	0.8
50,6	1.456	1.473	2.28	1.5	1.6	1.89
69,45	2.464	2.47	3.356	2.35	2.47	2.88
76,5	2.852	2.86	3.804	2.79	2.82	3.32

Referans oluşturması açısından deneylerde ilk olarak temel akışkanın kullanıldığı sırasıyla boş yüzey, 10 PPI ve 40 PPI metal köpük bulunan yüzeylerde ölçümler yapılmıştır. Tüm yüzeylerde farklı ısı akılarında yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiye göre değişim grafikleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Tüm ısı akılarında ortalama yüzey sıcaklıkları, hacimsel debinin artmasıyla azalmaktadır. Düşük ısı akılarında metal köpük ısı alıcılar ve boş yüzeyden elde edilen ortalama yüzey sıcaklıkları arasındaki fark birbirine yakın iken, ısı akısının artmasıyla birlikte bu farklar artmaktadır. Kanal içerisinde 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla ortalama yüzey sıcaklıklarında boş yüzeye göre belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Metal köpük ısı alıcıların yüksek temas yüzey alanına sahip olması nedeniyle, ısınan yüzeyden akışkana konveksiyonla geçen ısı miktarı artmıştır. Artan gözenek yoğunluğuyla birlikte temas yüzey alanının artması sonucunda 40 PPI metal köpük ısı alıcıda, 10 PPI metal köpük ısı alıcıya göre, yüzey sıcaklıklarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. 40 PPI metal köpük malzemenin yüksek gözenekliliğe, yüksek temas yüzey alanına ve sık ağ yapısına sahip olması nedeniyle akışkana olan iletim ve taşınımla ısı transfer miktarını arttırmış oluğu düşünülmektedir.

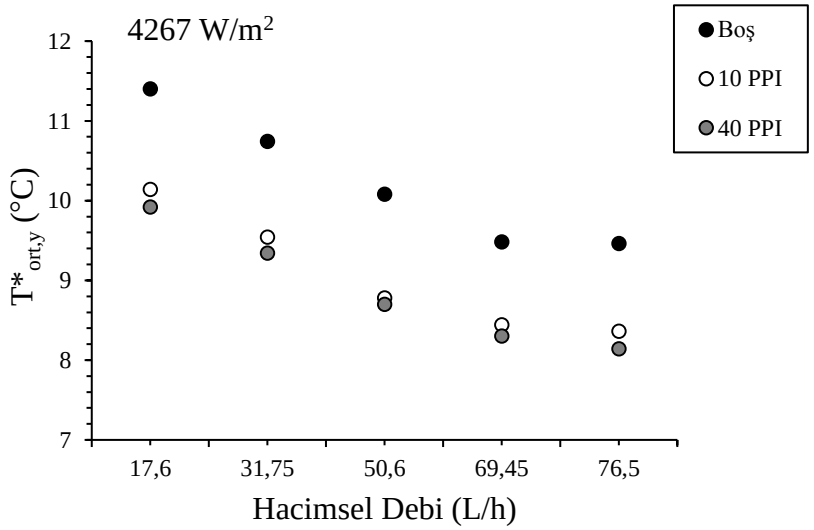


(a)

Şekil 4.2. Temel akışkan ve tüm yüzeylerde, hacimsel debiye göre yüzey sıcaklıklarının değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

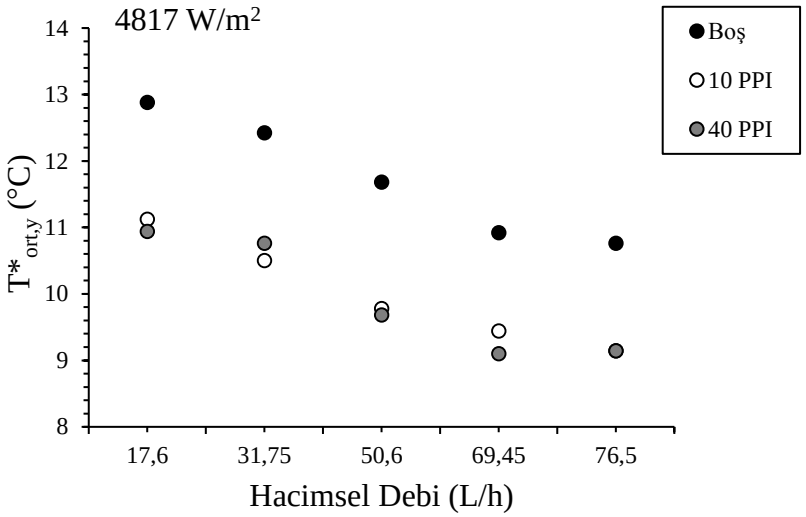


(b)

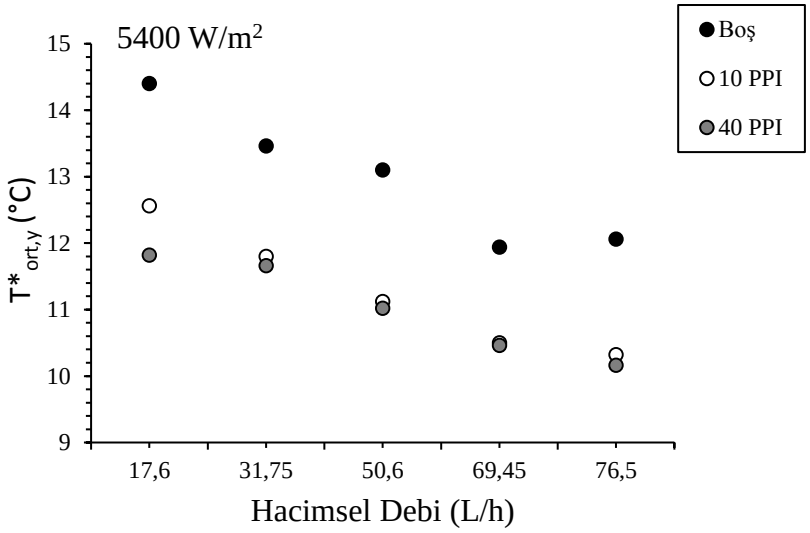


(c)

Şekil 4.2.'nin devamı



(d)



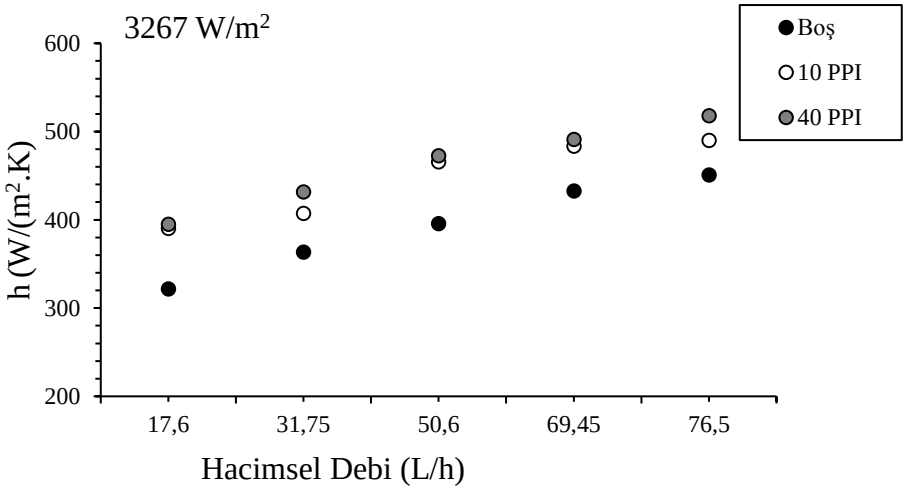
(e)

Şekil 4.2.'nin devamı

Kanal içerisinde metal köpük ısı alıcıların kullanılması sonucunda, farklı ısı akılarında hacimsel debiye göre taşınımla ısı transferi katsayısındaki değişim Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, artan hacimsel debiyle birlikte tüm yüzeylerde taşınımla ısı transferi katsayısı artmıştır. 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla boş yüzeye göre, taşınımla ısı transferi katsayısında daha belirgin bir artış gözlenmiştir. Taşınımla ısı transferi katsayısında elde edilen en yüksek değerler ise 40 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında tespit edilmiştir. Bu duruma metal köpük ısı alıcıların boş yüzeye göre daha yüksek temas yüzey alanına sahip olması neden

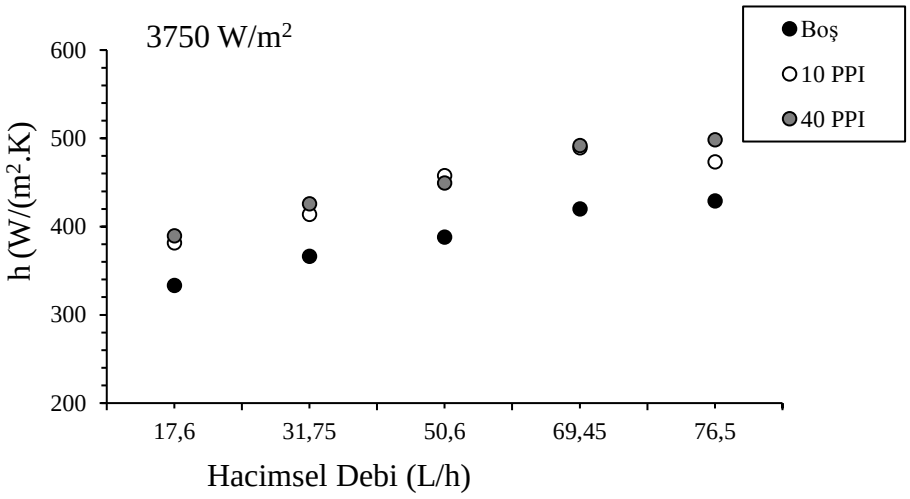
olmaktadır. Ayrıca, metal köpük ısı alıcılarda geçirgenlik ne kadar yüksek olursa, akışkan köpük içerisinden o kadar kolay geçmekte ve yüzey ile ısı transferi açısından yeterli süre temas edememektir. Dolayısıyla, geçirgenlik ne kadar yüksek olursa yüzeyden olan ısı transferi o kadar düşük olmaktadır. Bu kapsamda, yüksek gözenek yoğunluğuna, düşük gözenekliliğe ve düşük geçirgenliğe sahip olan 40 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında hem boş hem de 10 PPI yüzeye göre daha yüksek taşınımla ısı transferi katsayısı değerleri elde edilmiştir. Benzer sonuçlar, Pourfarzad vd. (2018), Qi vd. (2020) ve Li vd. (2021)'nin çalışmalarında elde edilmiştir.

Kanal içerisinde metal köpük ısı alıcıların kullanılması sonucu, hacimsel debiye göre Nusselt sayısındaki değişim Şekil 4.4'te verilmiştir. Tüm yüzeyler için hacimsel debinin artmasıyla birlikte Nusselt sayısında artış meydana gelmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcılarda boş yüzeye göre, Nusselt sayısında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Nusselt sayısında meydana gelen en yüksek artış ise 40 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında elde edilmiştir. Daha yüksek ağ yapısına, daha yüksek temas yüzey alanına ve daha yüksek gözenek yoğunluğuna bağlı olarak akışkanı daha fazla karıştırıcı özelliğe sahip olması nedeniyle 40 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında daha yüksek ısı transferi değerleri elde edilmiştir. Tüm yüzeylerde, farklı ısı akılarında alınan ortalama yüzey sıcaklıkları, düşük hacimsel debilerde birbirlerine yakın iken, artan hacimsel debiyle birlikte aralarındaki fark artmıştır.

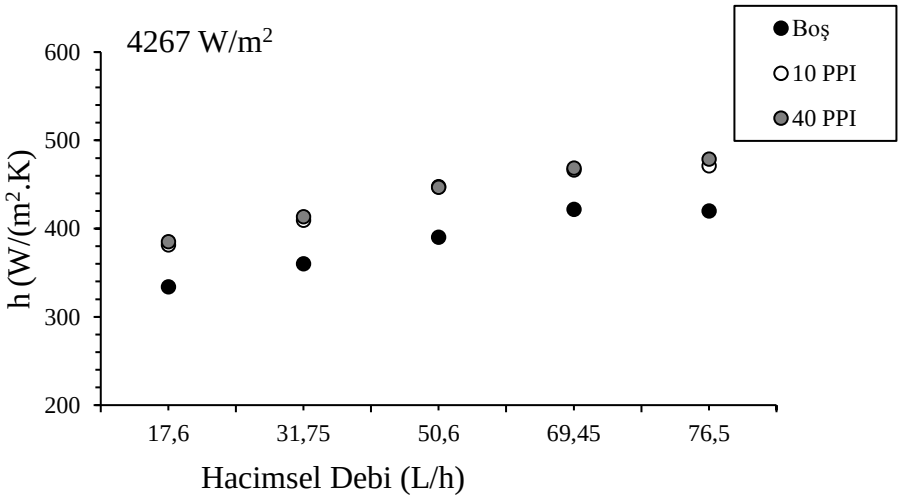


(a)

Şekil 4.3. Temel akışkan ve tüm yüzeylerde, hacimsel debiye göre taşınımla ısı transferi katsayısının değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

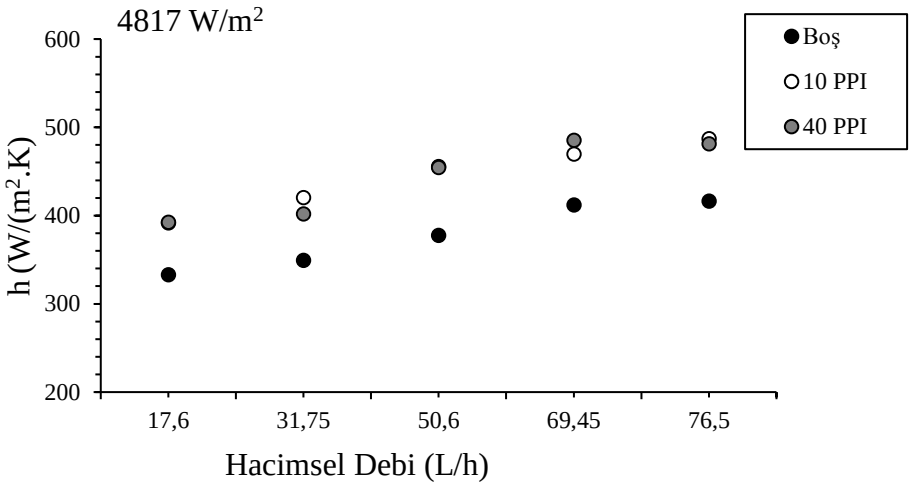


(b)

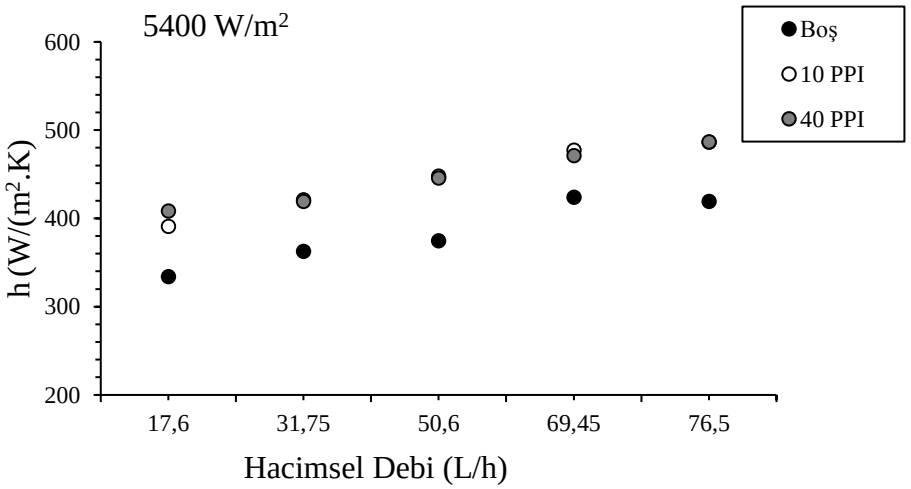


(c)

Şekil 4.3.'ün devamı

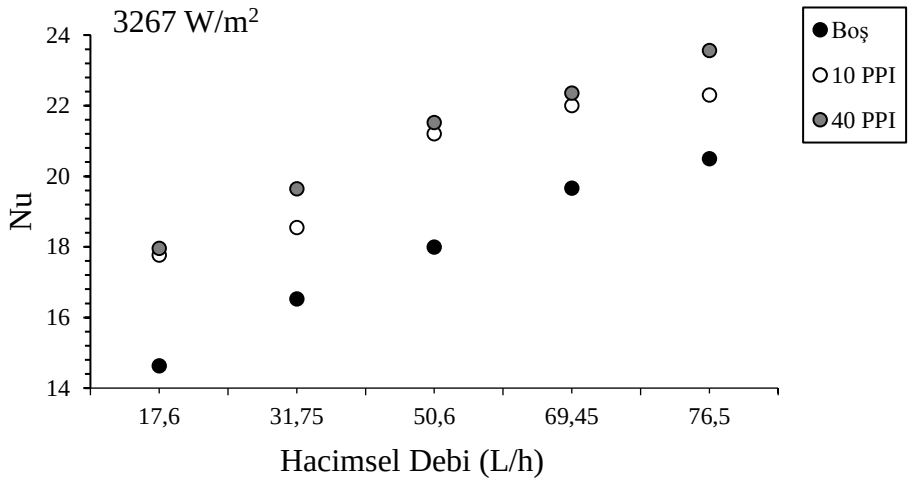


(d)

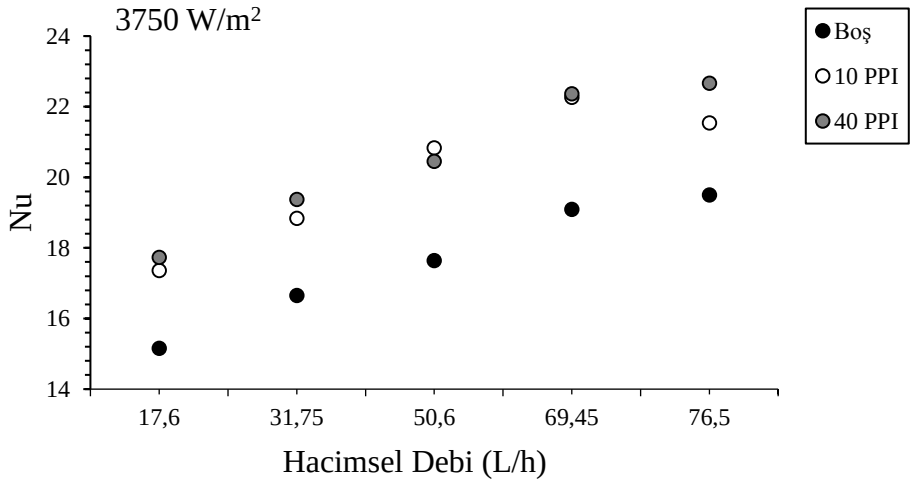


(e)

Şekil 4.3.'ün devamı

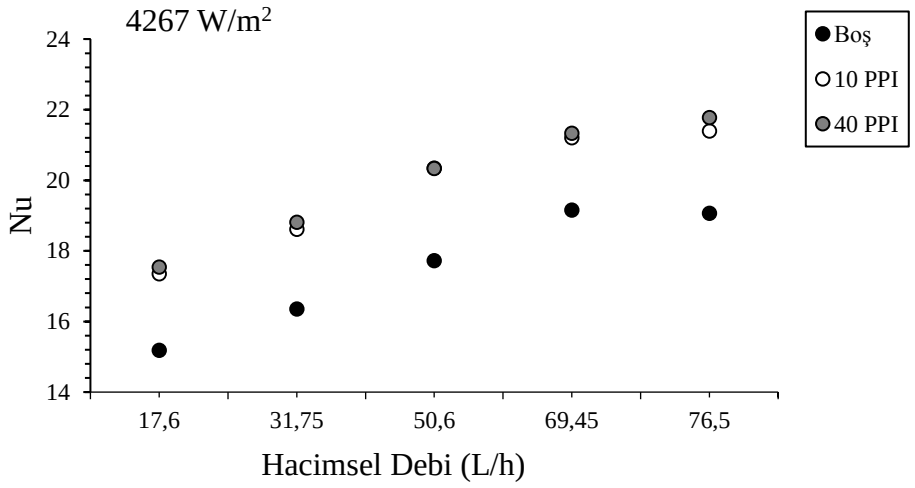


(a)

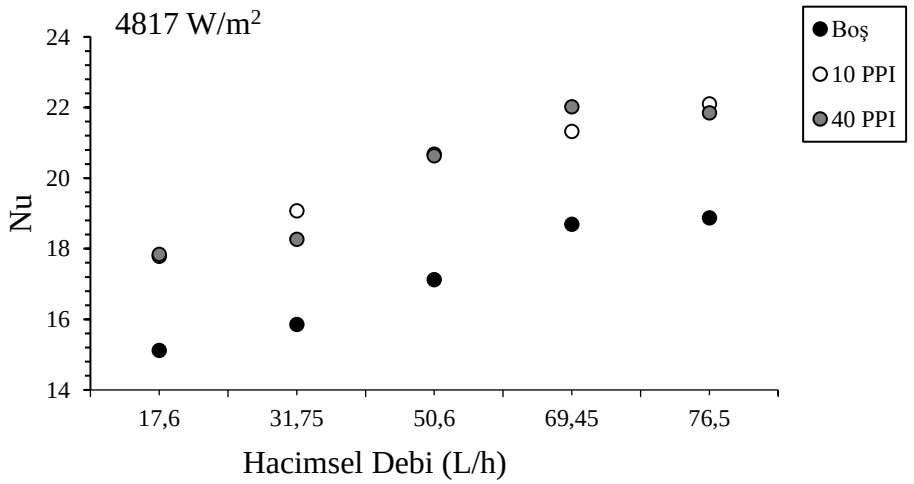


(b)

Şekil 4.4. Temel akışkan ve tüm yüzeylerde, hacimsel debiye göre Nusselt sayısının değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

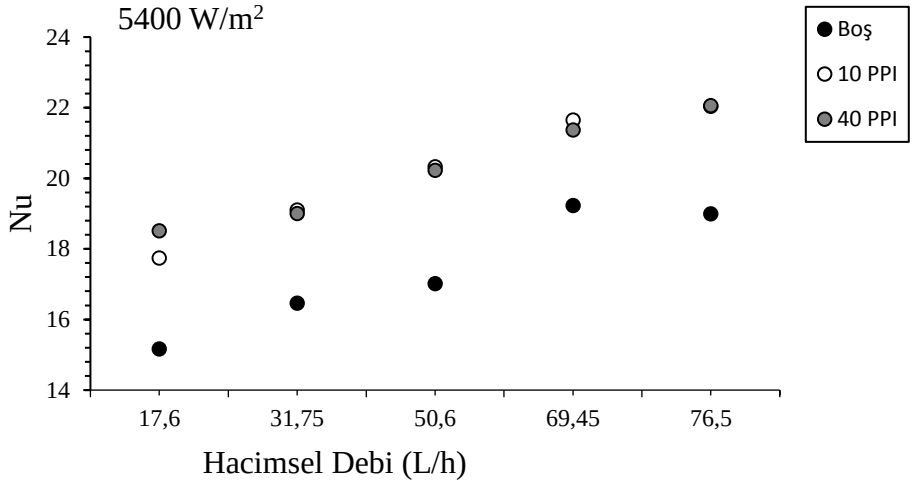


(c)



(d)

Şekil 4.4.'ün devamı

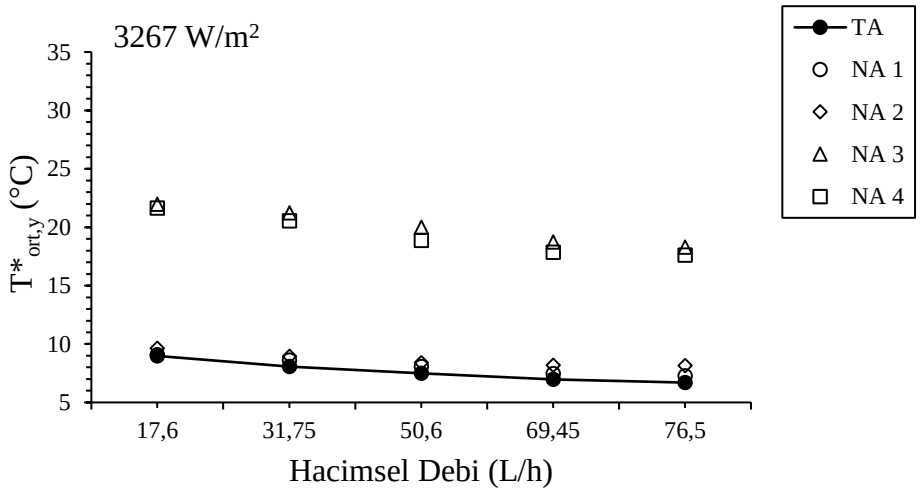


(e)

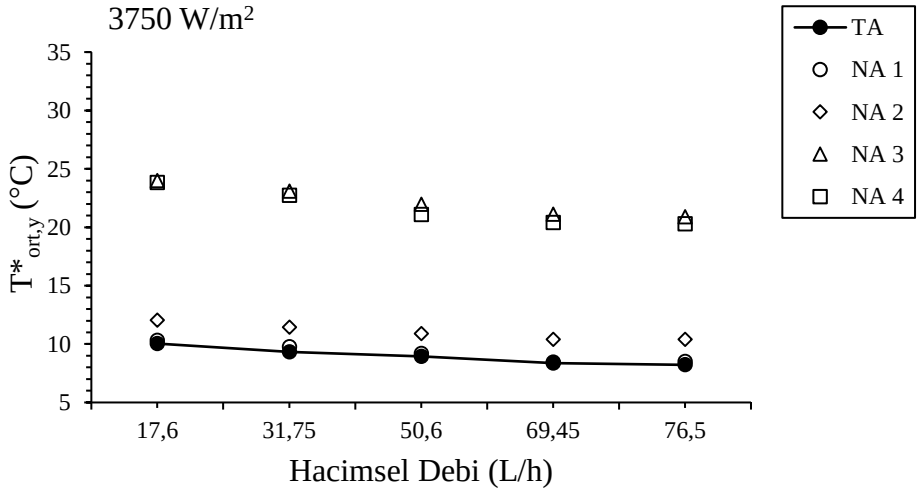
Şekil 4.4.'ün devamı

Bu kısımdan itibaren, elektronik sistemlerin soğutulmasında, temel akışkana göre termal performansı yüksek bir nanoakışkanın geliştirilmesi için çalışmalarda yapılmıştır. Hazırlanan akışkanların termal performansını incelemek amacıyla, deneyler her bir akışkan için boş yüzeyde yapılmış olup, elde edilen sonuçlar temel akışkanla karşılaştırılmıştır. Deneylerde literatürde nanoakışkanların yüzey soğutmada kullanımı kapsamında yapılan çalışmalara benzer olarak öncelikle kütlesel derişiminin etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, kütlece %0.1, %0.5, %1 ve %2 derişiminde CuO-H_2O nanoakışkanı hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan 4 farklı derişiminde CuO-H_2O nanoakışkanlarının kullanımıyla, farklı ısı akılarında hacimsel debiye göre yüzey sıcaklıklarının değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Görüldüğü üzere, hacimsel debinin artmasıyla tüm akışkanlarda ortalama yüzey sıcaklıklarında düşüş görülmüştür. Ancak, kütlesel derişiminin artmasıyla birlikte temel akışkana göre, yüzey sıcaklıklarında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde ısı akısının artmasıyla ortalama yüzey sıcaklıklarında artış tespit edilmiştir. Temel akışkan kullanımında elde edilen sonuçlara en yakın değerler kütlece %0.1 nanoakışkan kullanımında görülmüştür.

Nanoakışkanlarla yapılan ısı transferi uygulamalarında karşılaşılan en büyük zorluk nanopartiküllerin topaklanması ve çökmesidir. Nanopartiküllerin çökmesi sonucu, nanoakışkan termal iletim davranışını sağlayamaz. Ayrıca, akışkan içerisinde artan nanopartikül derişimine bağlı olarak viskozitedeki artışla birlikte, yüzeye daha fazla tutunma olmakta ve bunun sonucu olarak da yüzey sıcaklıkları artırmaktadır. Nanoapartiküllerin yüzeye tutunması yüzeyle akışkan arasında bir ara yüzey oluşturmakta ve yüzeyden akışkana yeterli miktarda ısı aktarılmasına engel olmaktadır. Benzer sonuçlar, Bayomy ve Saghir'in (2017) çalışmalarında da görülmüştür.

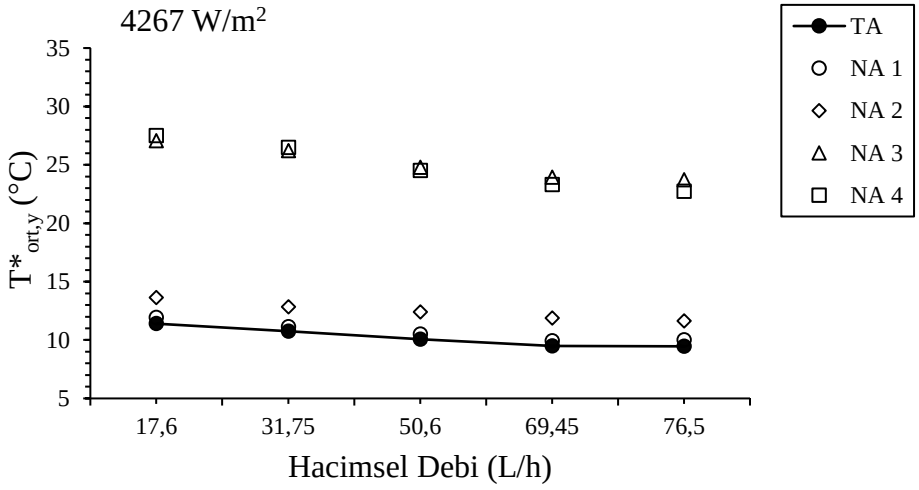


(a)

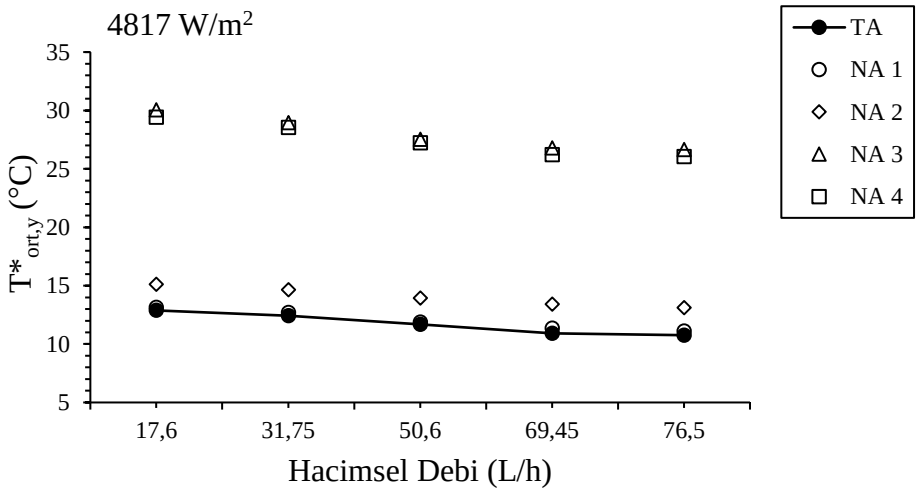


(b)

Şekil 4.5. Farklı kütlesel derişimlerde nanoakışkan kullanımı sonucu, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiye göre değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

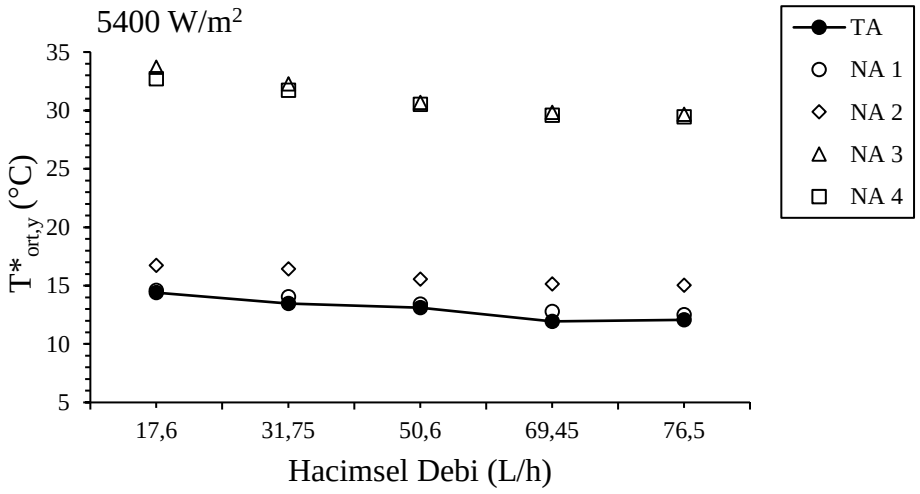


(c)



(d)

Şekil 4.5.'in devamı



(e)

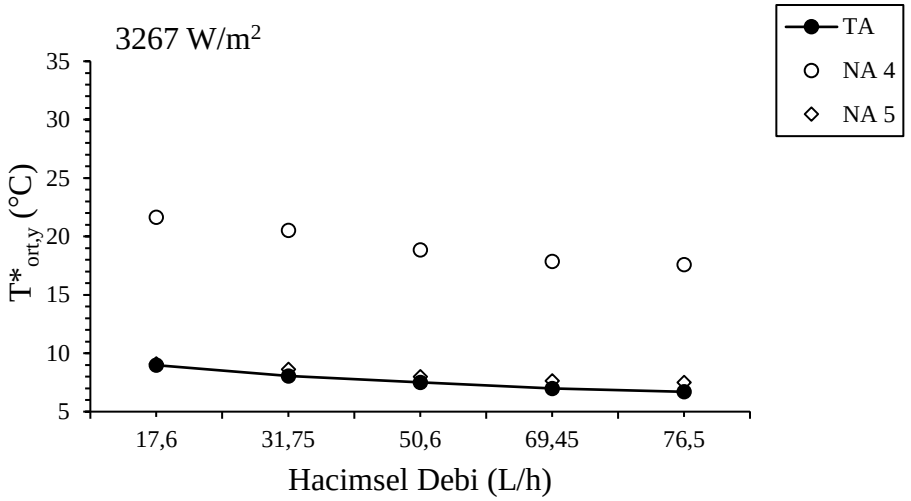
NA 1: %0.1 $CuO-H_2O$ **NA 2:** %0.5 $CuO-H_2O$ **NA 3:** %1 $CuO-H_2O$ **NA 4:** %2 $CuO-H_2O$

Şekil 4.5.'in devamı

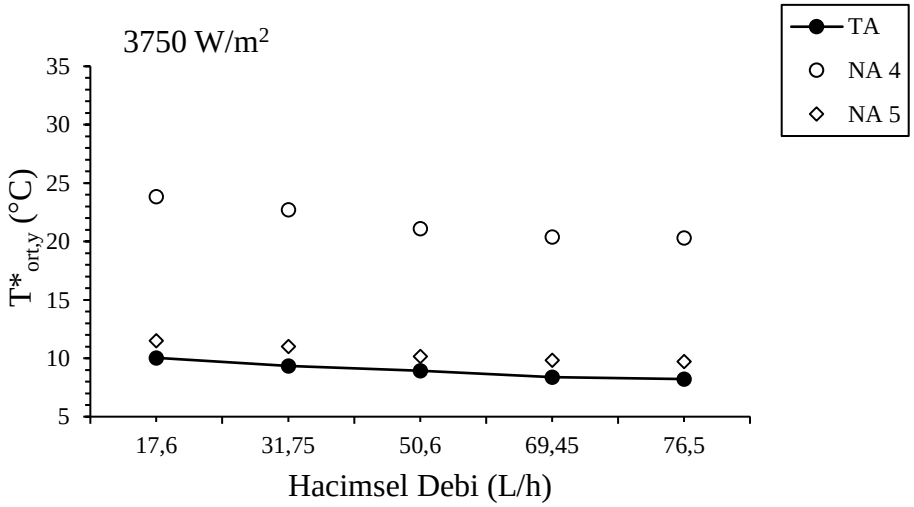
Görüldüğü gibi yukarıda verilen grafiklerde nanoakışkan kütle derişiminin artmasıyla yüzey sıcaklıklarında belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu problemin giderilmesi amacıyla, nanopartiküllerinin çökmesini azaltmak ve akışkan içerisindeki homojen yapıyı korumak amacıyla içerisine belirli oranlarda surfaktan eklenmesine karar verilmiş olup, kütlece %2 derişime sahip $CuO-H_2O$ nanoakışkanına 1:1 oranında olacak şekilde CTAB surfaktanı eklenmiştir. Şekil 4.6'da nanoakışkan içerisinde surfaktan kullanımının hacimsel debiye göre yüzey sıcaklığına etkisi farklı ısı akılarında verilmiştir. Görüldüğü üzere, nanoakışkan içerisine 1:1 oranda CTAB surfaktanı eklenmesiyle yüzey sıcaklıklarında belirgin bir düşüş sağlanmıştır. Bu sayede, nanopartiküllerin akışkan içerisinde daha uzun süre homojen bir yapıda kalması sağlanırken, viskozitenin düşürülmesiyle birlikte yüzey sürtünmeleri de azaltılmıştır.

Surfaktan kullanımının yüzey sıcaklıklarını düşürmede etkili olduğu görülmüş olup, buradan itibaren hazırlanan tüm nanoakışkanlarda belirli oranlarda surfaktan kullanılarak çalışmalara devam edilmiştir. Çalışmada hem temel akışkana en yakın sonuçları vermesi, hem de kullanılan nanopartikül miktarına bağlı olarak üretim maliyetinin daha düşük olması nedeniyle, kütlece %0.1 derişim oranına sahip nanoakışkan kullanılması uygun görülmüştür. Temel akışkana göre termal performansı daha da iyileştirmek ve yüzey sıcaklıklarını daha da düşürmek için nanoakışkan içerisine çeşitli derişimlerde farklı surfaktan malzemesi (CTAB, PEI) eklenerek, CuO nanoparcağının yüzeyine belirli kütlesel derişimlerde Ag atomu motifiyesi uygulanmıştır. Bu kapsamda hazırlanan çeşitli nanoakışkanların hacimsel debiye göre ortalama yüzey sıcaklığına etkisi Şekil 4.7'de verilmiştir. Çeşitli surfaktan, Ag motifiyesi ve derişim oranlarına bağlı olarak hazırlanan nanoakışkanlarla yapılan ölçümler sonucu, bütün ısı akılarında yakın sonuçlar elde edildiği için veriler tek bir ısı akısında (5400 W/m^2) sunulmuştur. Görüldüğü üzere, nanoakışkan içerisinde PEI surfaktanın kullanılması

sonucunda, yüzey sıcaklıklarında temel akışkana göre belirgin düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni, kullanan PEI surfaktanının CTAB surfaktanına göre akışkan içerisinde nanopartiküllerle daha kuvvetli ikincil bağlar kurmasıdır. Böylece, nanopartiküller akışkan içerisinde çok daha uzun süre homojen yapıda kalabilmekte olup, topaklanma veya çökme sorunun önüne geçilmiştir.

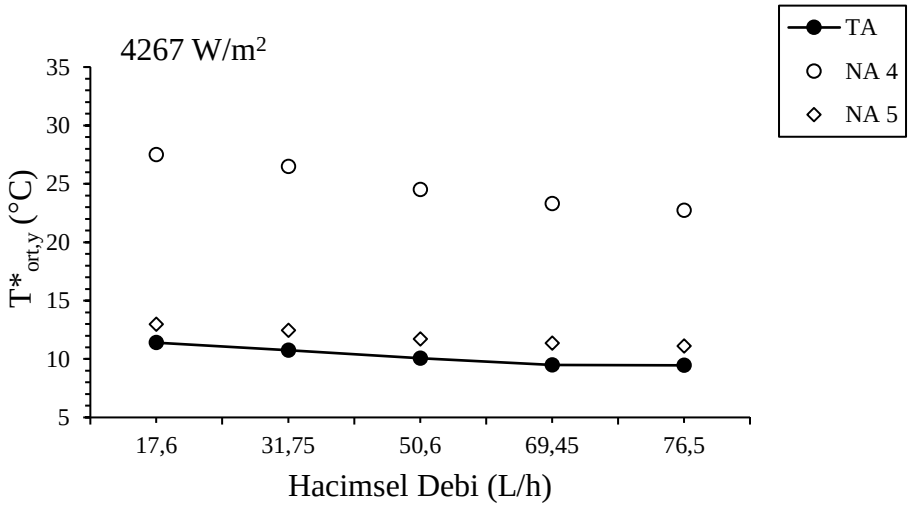


(a)

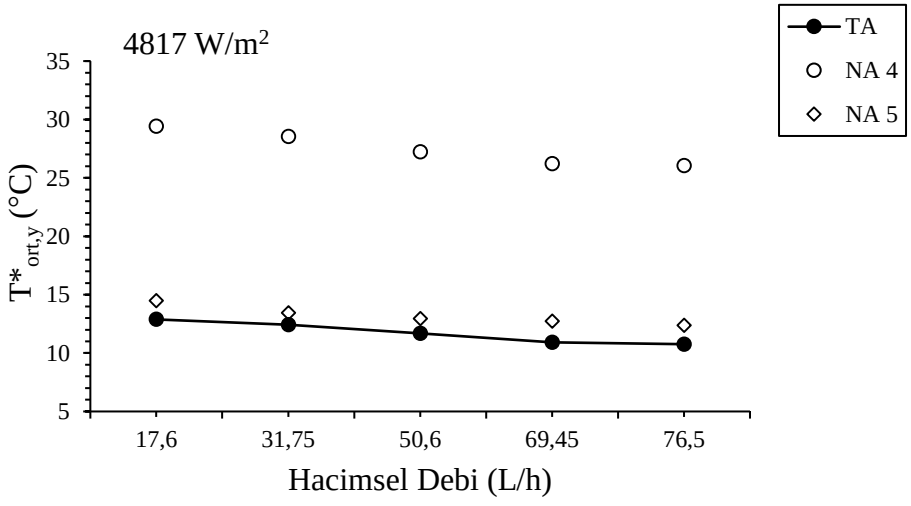


(b)

Şekil 4.6. Surfaktan kullanımı sonucunda, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiye göre değişimi **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

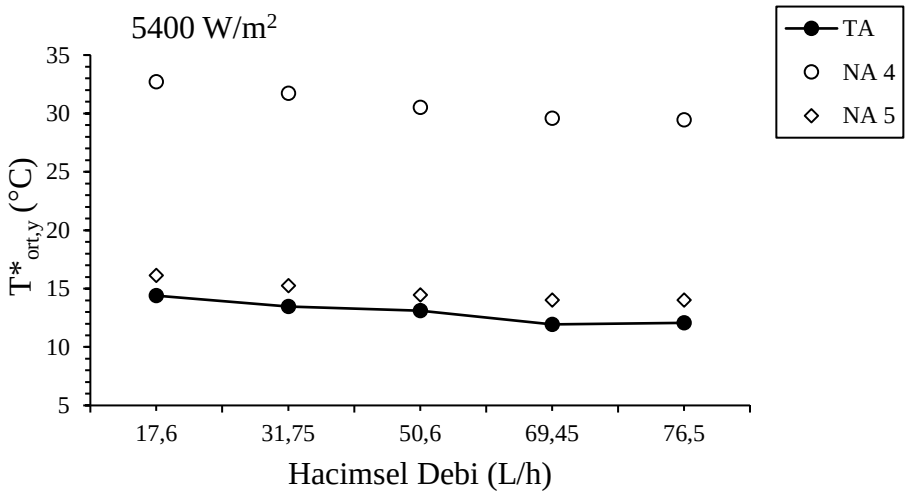


(c)



(d)

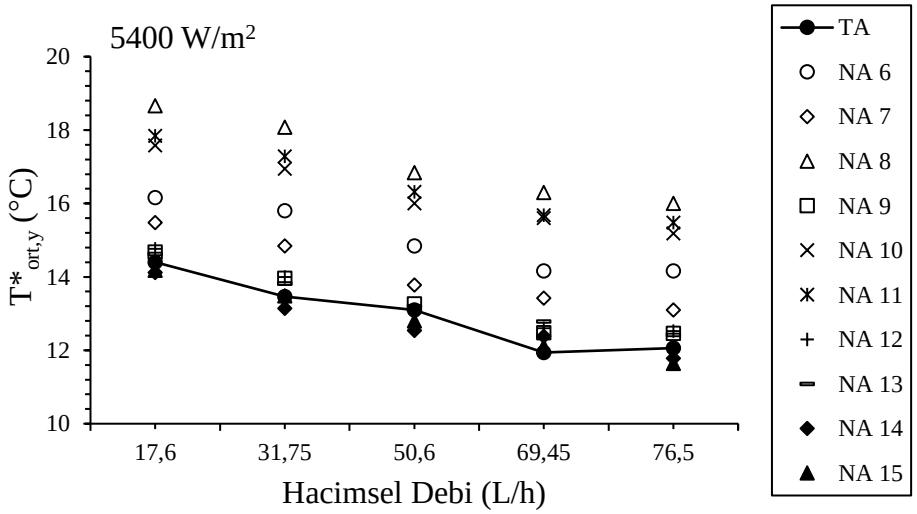
Şekil 4.6.'nın devamı



(e)

NA 4: %2 CuO-H_2O **NA 5:** %2 CuO-H_2O / %2 CTAB

Şekil 4.6.'nın devamı



NA 6: %0.1 $CuOSiO_2$-H_2O - %0.003 Ag / %0.1 CTAB **NA 7:** %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %0.1 CTAB **NA 8:** %0.1 CuO-H_2O - %1 Ag / %0.1 CTAB **NA 9:** %0.1 CuO-H_2O - %1 Ag / %1 CTAB

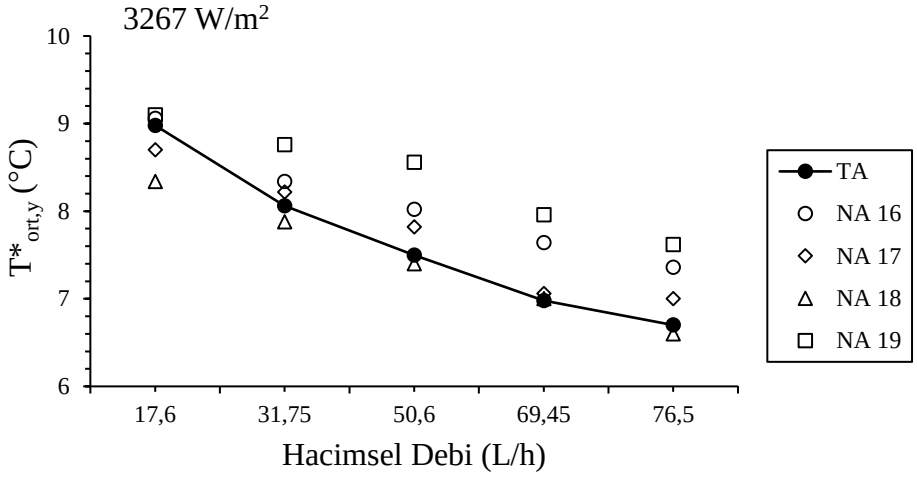
NA 10: %0.1 CuO-H_2O - %1 Ag / %1.5 CTAB **NA 11:** %0.1 CuO-H_2O - %1.5 Ag / %1 CTAB **NA 12:** %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %1 CTAB **NA 13:** %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 CTAB

NA 14: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI **NA 15:** %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI

Şekil 4.7. Farklı surfaktan ve Ag motifiye kütlesel oranlarında hazırlanan nanoakışkanların kullanımında, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiye göre değişimi

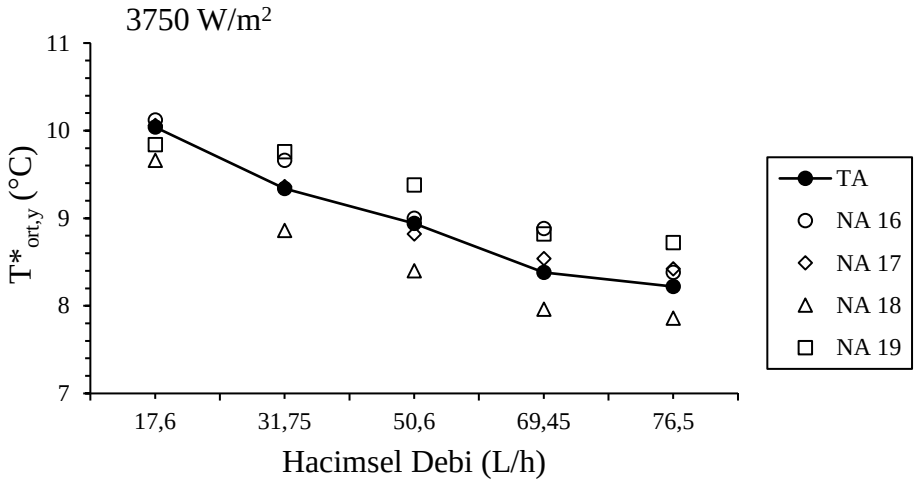
Literatürde yapılan çalışmalarda partikül boyutunun küçültülmesinin ısı transferini olumlu yönde etkilediği belirtilmekte olup, bu kapsamda yukarıda çalışılan

nanoakışkanlarda kullanılan nanopartikül boyutları 7.81 ±0.81 nm (NA 16) düşürülmüş olup yüzeye uygulanan kütlece %0.03 ve %0.05 Ag motifiye miktarına bağlı olarak sırasıyla NA17 nanoakışkanında 11.49 ±3.67 nm, NA18 nanoakışkanında ise 19.77 ±7.15 nm olarak değişmektedir. Farklı surfaktan ve Ag motifiye içeriğine sahip nanoakışkanlarla yapılan ölçümler sonucunda, temel akışkana göre en düşük yüzey sıcaklıklarının elde edildiği akışkanlar Şekil 4.8'de verilmiştir. Görüldüğü üzere tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları artan hacimsel debiyle birlikte azalırken, ısı akısının artmasıyla yükselmektedir. Şekil 4.7'de belirtilen Partikül boyutu 7.81 ±0.81 nm olan NA16, 11.49 ±3.67 nm olan NA17 ve 19.77 ±7.15 nm olan NA 18 nanoakışkanların kullanımıyla temel akışkana göre, ortalama yüzey sıcaklıklarında daha fazla düşüş meydana gelmiştir. Nanopartikül boyutunun küçültülmesiyle, yine %0.1 derişimindeki nanoakışkana içerisinde bulunan katı miktarı artmıştır. Böylece, temel akışkan ve daha büyük partikül boyutuna sahip nanoakışkanlara göre, akışkanın viskozitesi yükselmiş olup, sürtünmelerin etkisiyle yüzeyle olan temas süresi artmıştır. Ayrıca, nanopartikül boyutunun küçülmesi ile aynı derişim miktarında artan partikül sayısına bağlı olarak, daha fazla CuO atomunun yüzey ile teması sağlanmış ve ortalama yüzey sıcaklıklarında daha fazla düşüş elde edilmiştir. Bu sıcaklık düşüş miktarını arttırmak amacıyla nanoakışkana bir uygulama daha yapılarak, içerisindeki CuO nanopartiküllerinin yüzeyine sırasıyla kütlece %0.03 ve %0.05 derişiminde Ag atomu motifiye edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda ortalama yüzey sıcaklıkları bir önceki akışkan uygulamalarına göre daha da düşmüştür. Ancak, kütlece Ag motifiye derişiminin %0.1'e çıkarılması durumunda, bu sefer yüzey sıcaklıklarında belirgin bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bütün ısı akılarında, %0.1 CuO-H_2O-%0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm partikül boyutu) nanoakışkanının kullanımıyla, temel akışkana göre en düşük ortalama yüzey sıcaklıkları elde edilmiştir.

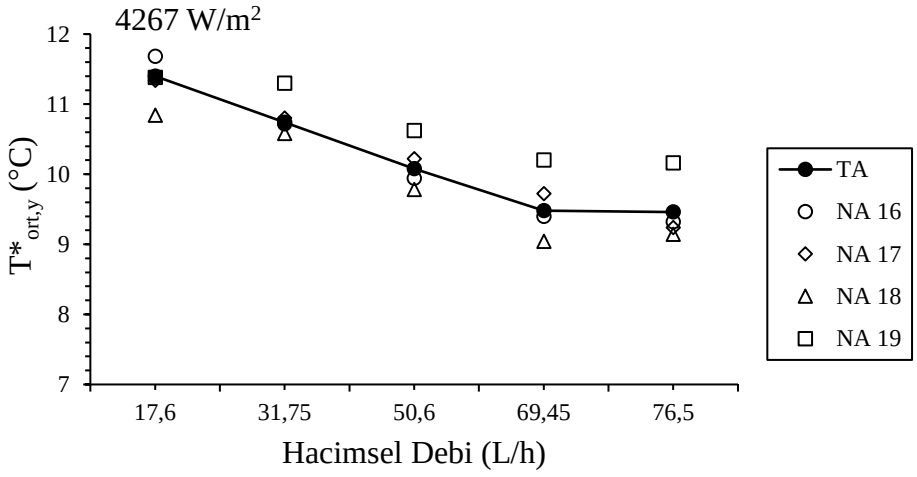


(a)

Şekil 4.8. Farklı surfaktan ve Ag motifiye kütlesel oranlarında hazırlanan nanoakışkanların kullanımında, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiyle değişimi, **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

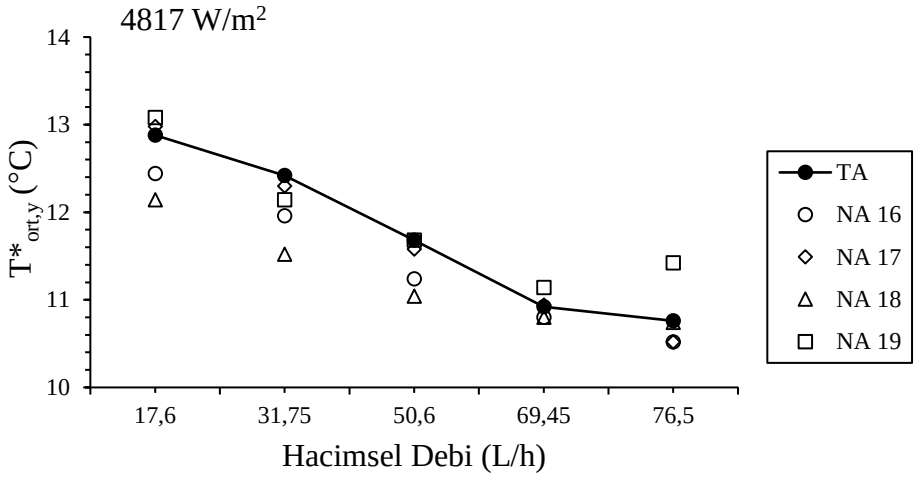


(b)

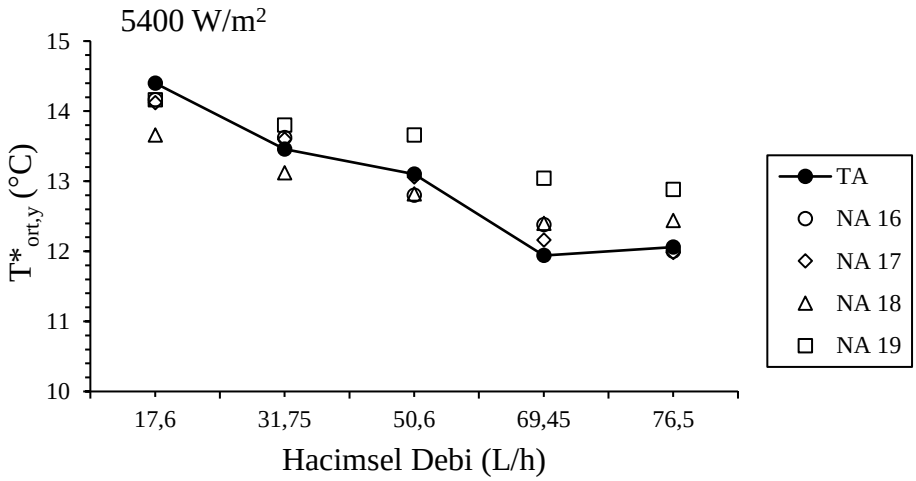


(c)

Şekil 4.8.'in devamı



(d)



(e)

NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

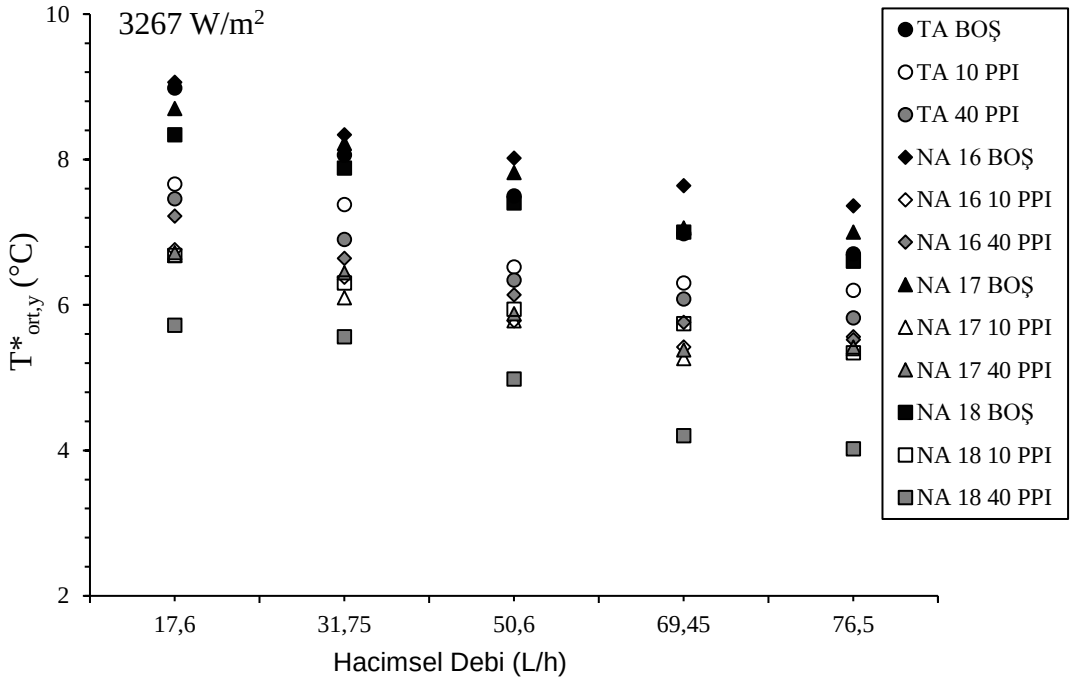
NA 19: %0.1 CuO-H_2O - %0.1 Ag / %2 PEI

Şekil 4.8.'in devamı

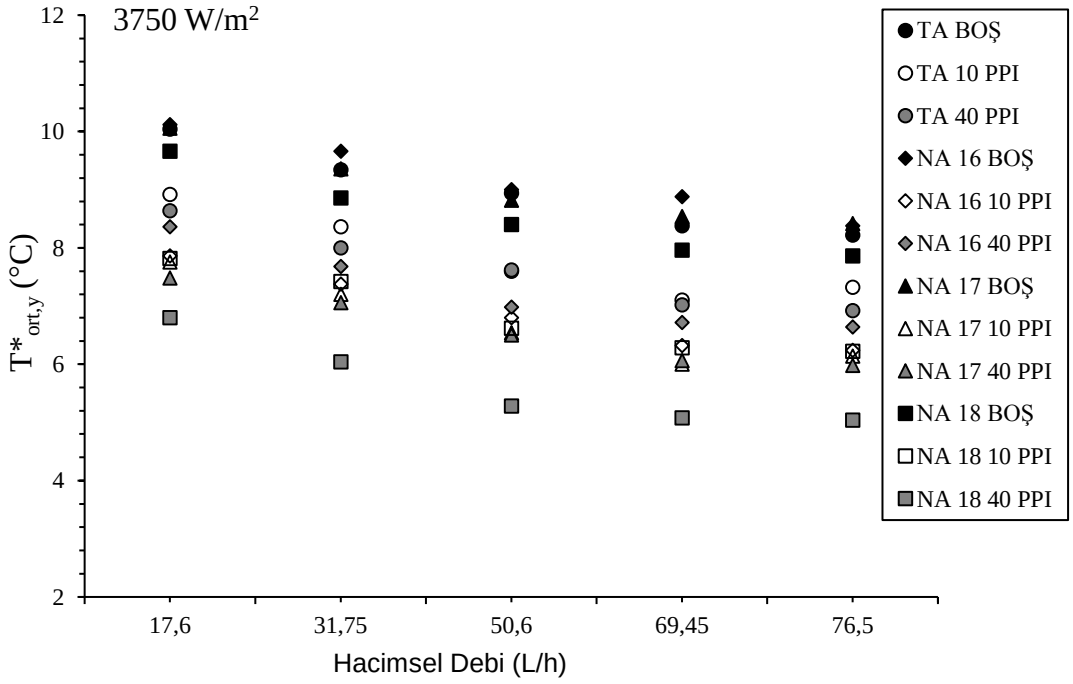
Boş yüzeyde nanoakışkan kullanımıyla ortalama yüzey sıcaklıklarının temel akışkana göre düşürülmesinin ardından, alan/hacim oranları yüksek ve ısı transferinde etkili olduğu belirlenen (Özbalcı 2015), 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların nanoakışkanla kullanımının ısı transferine etkisi bu kısımda incelenmiştir. Temel akışkana göre daha düşük ortalama yüzey sıcaklıkları elde edilen, NA16, NA17 NA18 nanoakışkanlarının metal köpük ısı alıcılarla kullanımı sonucu, farklı ısı akılarında hacimsel debiye göre ortalama yüzey sıcaklıklarının değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir.

Verilerin detaylı bir şekilde görülebilmesi için her bir akışkanın ayrı ayrı metal köpük ısı alıcılarla kullanımı ise 4817 W/m^2 ısı akısında Şekil 4.10'da verilmiştir. Görüldüğü üzere, metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla boş yüzeye göre, tüm akışkanlarda ortalama yüzey sıcaklıkları belirgin bir şekilde düşmüştür. 40 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında, tüm akışkanlarda ortalama yüzey sıcaklıkları 10 PPI ve boş yüzeye göre daha düşük olduğu görülmüştür. Özellikle nanoakışkanların metal köpük ısı alıcılarla birlikte kullanılması sonucu, temel akışkan kullanımına göre, yüzey sıcaklıklarındaki düşüş miktarı daha belirgin hale gelmiştir. Bu duruma, nanoakışkanların temel akışkana göre, hem daha yüksek termal iletkenlik katsayısına sahip olması, hem de viskozitesinin yüksek olması sonucu artan sürtünmelerle birlikte yüzeyle temas süresinin artmasının neden olmaktadır.

Nanoakışkanlarda, partiküllerin akışkan içerisindeki rastgele hareketliliğinin (Brownian hareketleri) artmasıyla doğrudan katı-katı arasındaki ısı transferi miktarı artmaktadır ve bu durum termal iletkenliği yükseltmektedir. (Angayarkanni ve Philip 2015) Şekiller göz önüne alındığında, metal köpük ısı alıcıların nanoakışkanlarla birlikte kullanılmasıyla artan yüzey sürtünmeleri ve Brownian akışının etkisiyle yüzeyden akışkana olan ısı transferi miktarı arttığı görülmüştür. Buna ek olarak, 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların gözenekli yapıları boş yüzeye göre kanal içerisinde akışkanın daha fazla çalkantıya uğramasına, ayrık olarak yerleştirilmeleri nedeniyle de akışkanın ivmelenmesine sebep olmaktadır. Bu şekilde oluşan türbülans ile hem akışkanın yüzeyle daha fazla teması sağlanmış, hem de Brownian etkisi artmıştır. Çalışmada en düşük yüzey sıcaklıkları, %0.1 CuO-H_2O-%0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm nanopartikül boyutu) nanoakışkanı ve gözenek yoğunluğu 10 PPI'a göre daha yüksek olan 40 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında elde edilmiştir. Kanal içerisinde nanoakışkan ve/veya metal köpük ısı alıcıların kullanımıyla yüzey sıcaklıklarında elde edilen ortalama iyileştirme miktarları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

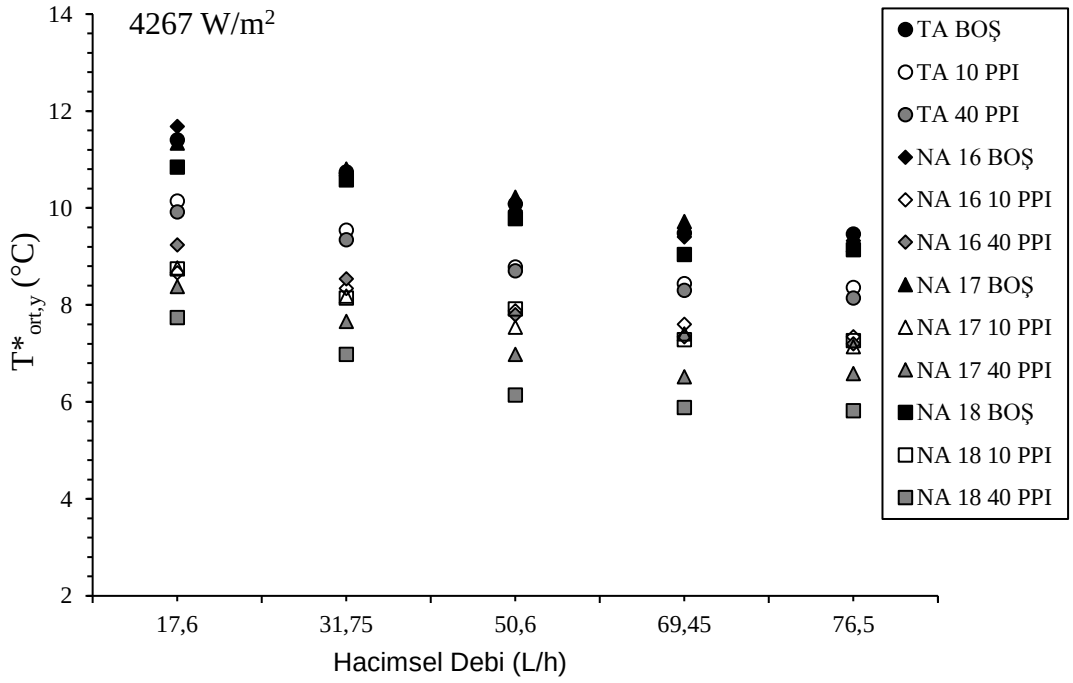


(a)

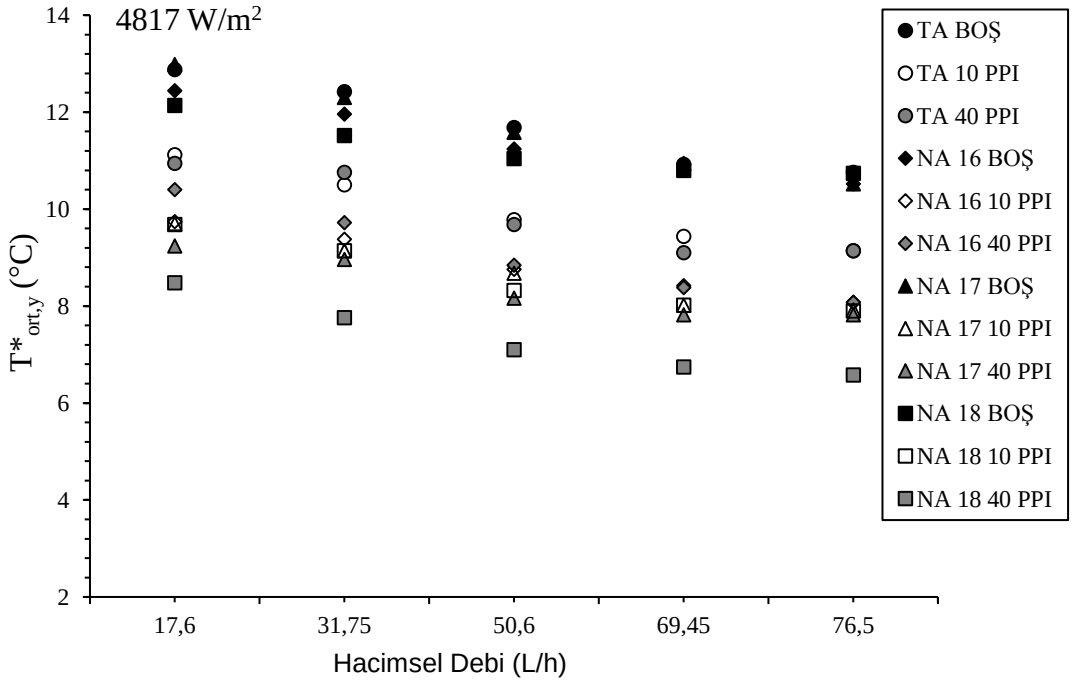


(b)

Şekil 4.9. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılması sonucu, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiyle değişimi, **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

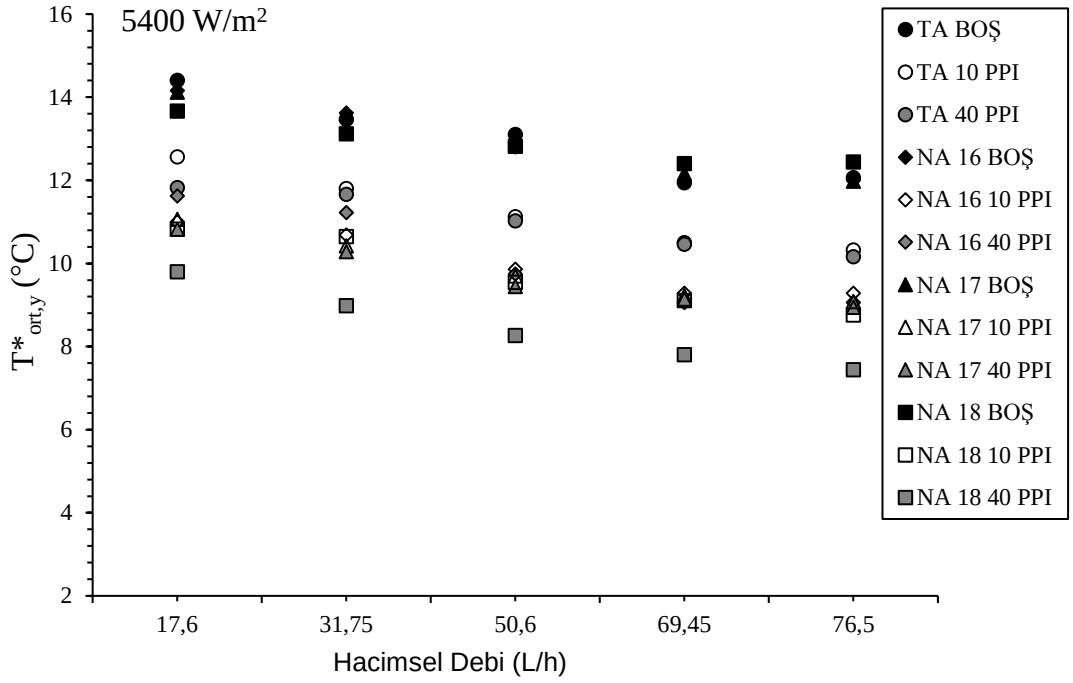


(c)



(d)

Şekil 4.9.'un devamı



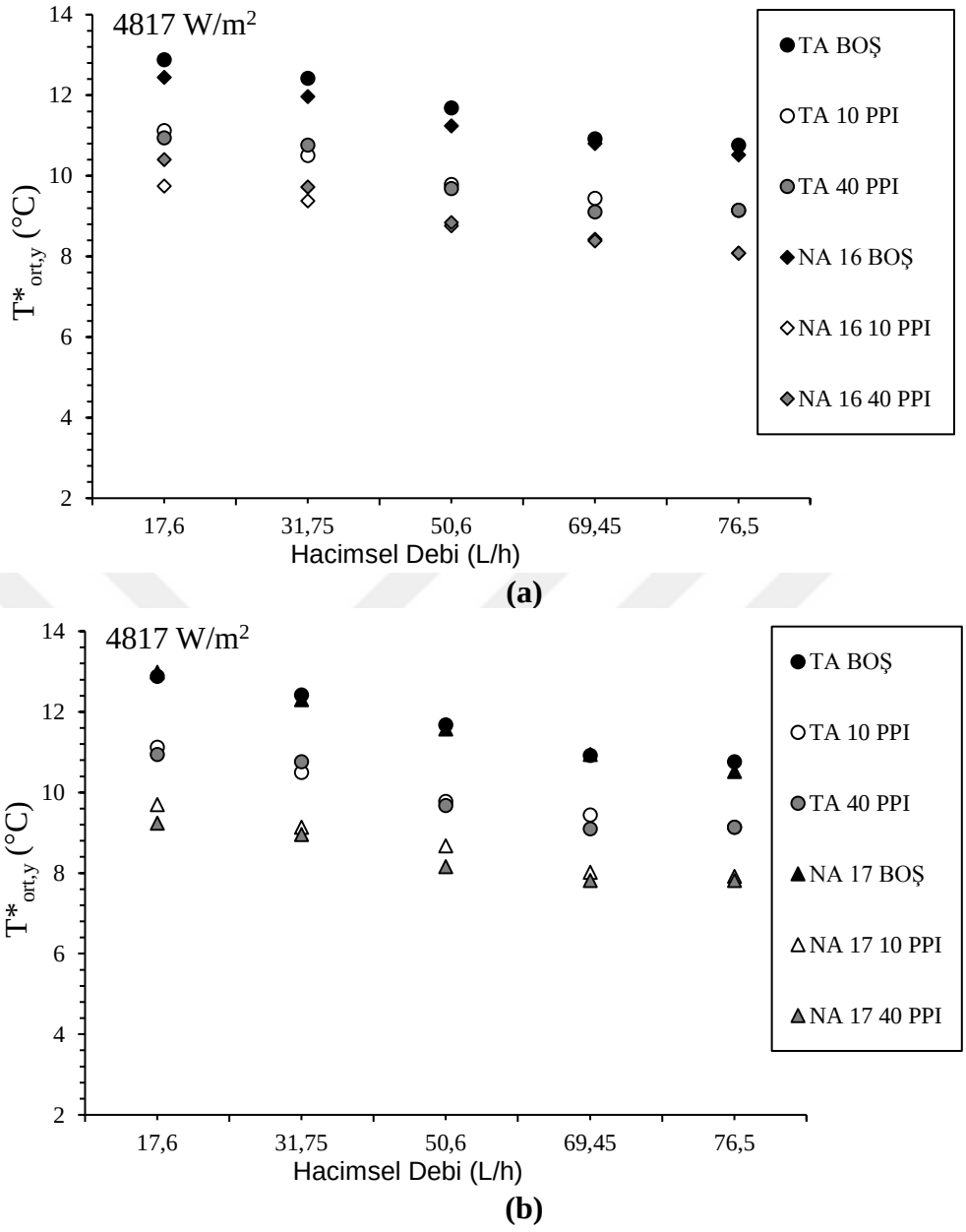
(e)

NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

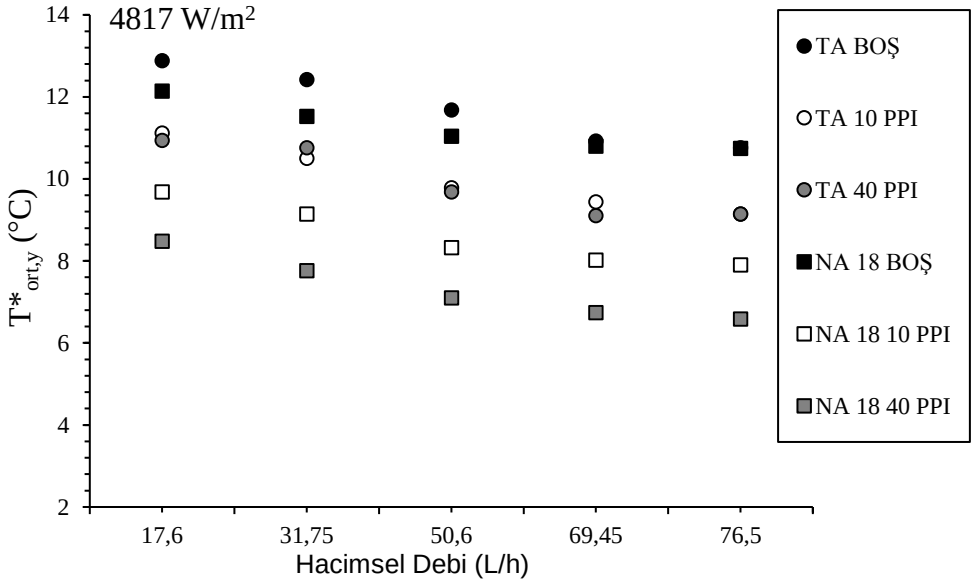
NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.9.'un devamı



Şekil 4.10. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, yüzey sıcaklıklarının hacimsel debiylee değişimi, **a)** NA 16; **b)** NA 17; **c)** NA 18



(c)

NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

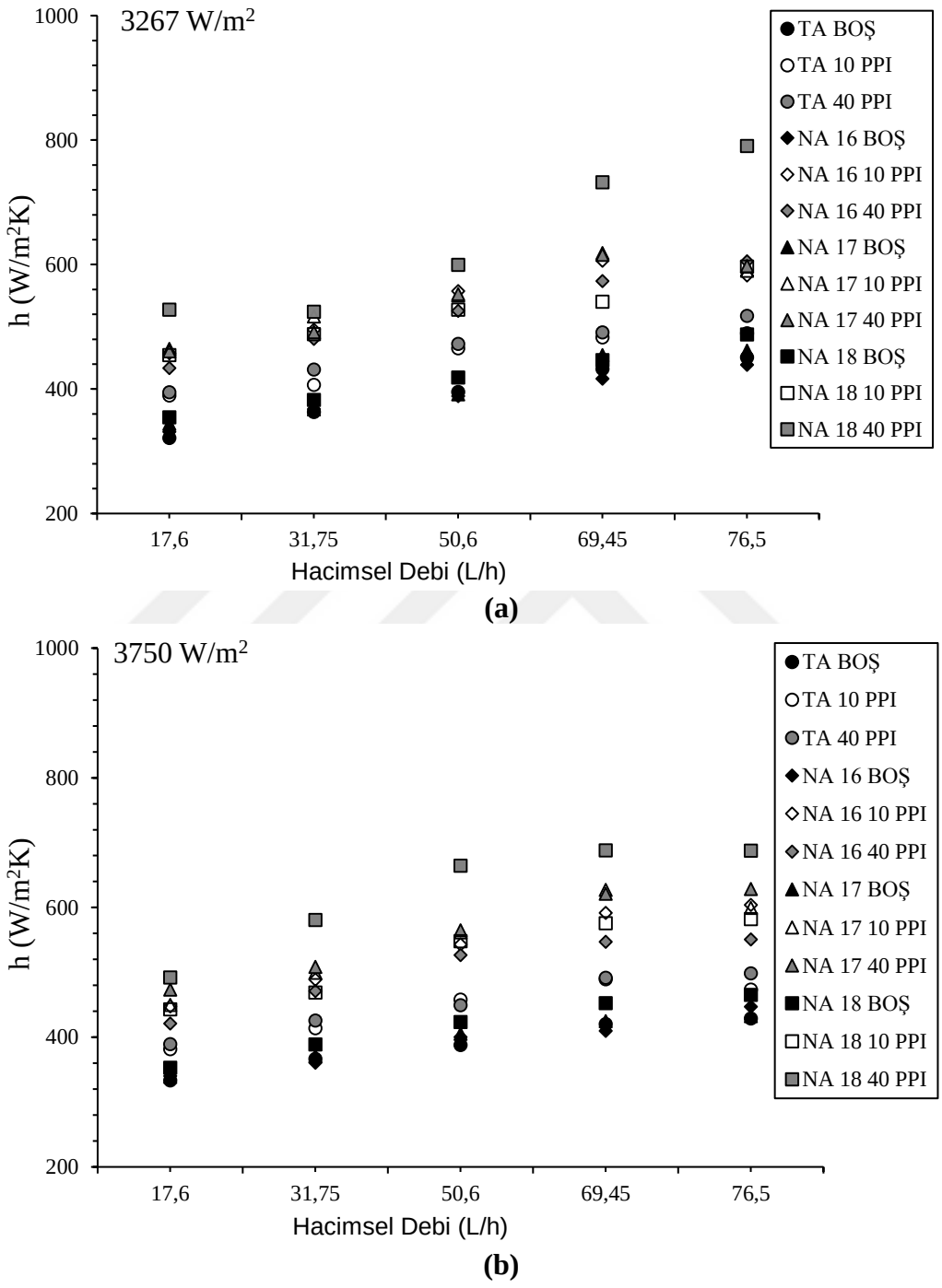
Şekil 4.10.'un devamı

Çizelge 4.3. Nanoakışkan ve/veya metal köpük ısı alıcısı kullanımı sonucu boş yüzey ve temel akışkana göre yüzey sıcaklıklarındaki ortalama iyileştirme miktarı

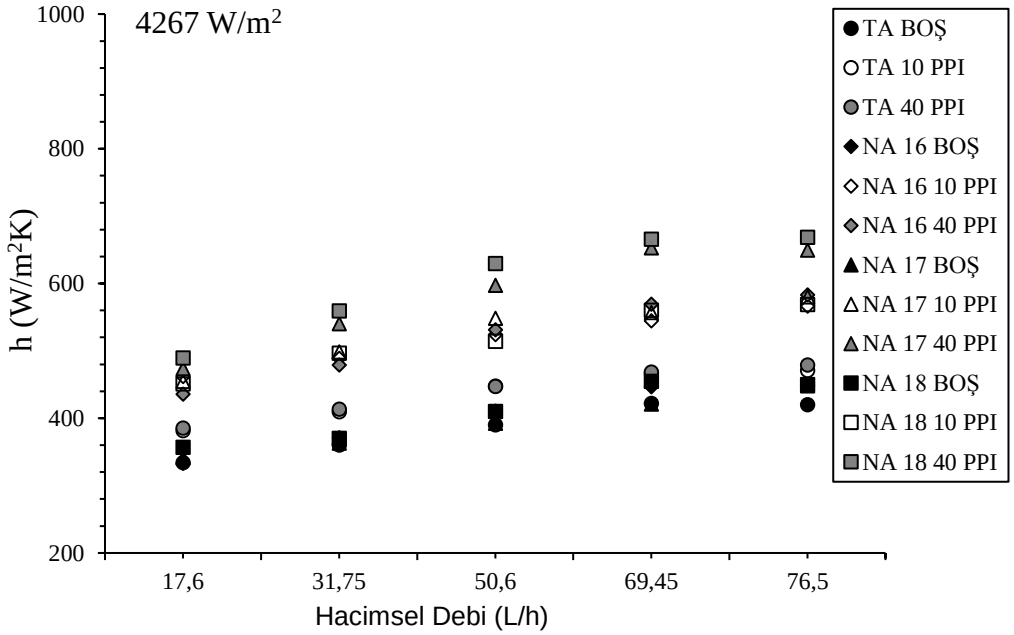
İyileştirme Miktarı (%)	TA	NA 16	NA 17	NA 18
Boş Yüzey	-	1.11	1.98	3.22
10 PPI Yüzey	14.47	29.58	32.40	31.53
40 PPI Yüzey	17.22	26.32	35.84	57.87

Kanal içerisinde nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcıların kullanılması sonucu, farklı ısı akılarında hacimsel debiye göre taşınımla ısı transferi katsayısının değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Tek bir ısı akısında (4817 W/m^2), metal köpük ısı alıcılarla nanoakışkanların ayrı ayrı kullanımı sonucu, taşınımla ısı transferi katsayısının değişimi Şekil 4.12'de verilmiştir. Bütün ısı akılarında, hacimsel debinin artmasıyla taşınımla ısı transferi katsayısında artış olduğu görülmektedir. Tüm akışkanlarda ve tüm yüzeylerde artan ısı akısına bağlı olarak taşınımla ısı transferi katsayısı değerleri birbirine yaklaşmıştır. Boş kanalda, temel akışkan yerine nanoakışkan kullanımıyla yüzeyden olan ısı transferi miktarında artış gözlenmiştir. Bunun yanında, tüm akışkanlarla birlikte metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla taşınımla ısı transferi katsayısında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Özellikle metal köpük ısı alıcılarının kullanımı ve artan gözenek yoğunluğuyla birlikte, taşınımla ısı transferi katsayısında boş kanala göre artış gözlenmiştir. NA 18 (%0.1 CuO-H_2O-%0.05 Ag / %2 PEI (~12-30 nm boyutunda) nanoakışkanın ve 40 PPI metal köpük ısı alıcısının birlikte kullanımıyla taşınımla ısı transferi katsayısının en yüksek değerlere ulaşılmıştır. Kanal içerisinde nanoakışkan

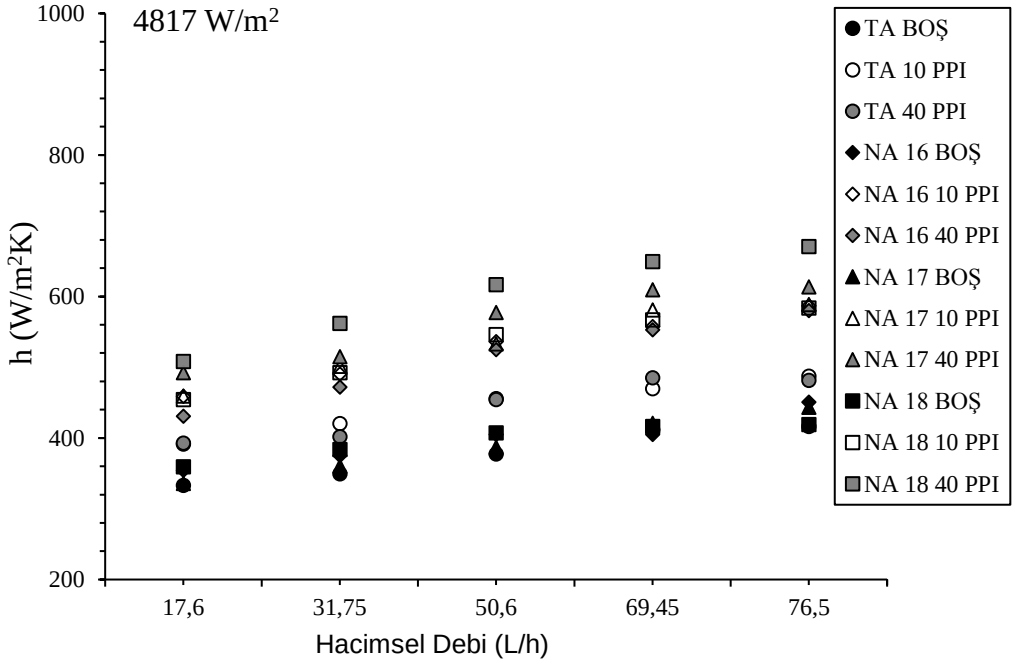
ve/veya metal köpük ısı alıcıların kullanımıyla taşınımla ısı transferi katsayısında elde edilen ortalama iyileştirme miktarları Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.11. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, taşınımla ısı transferi katsayısının, hacimsel debiyle değişimi, **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

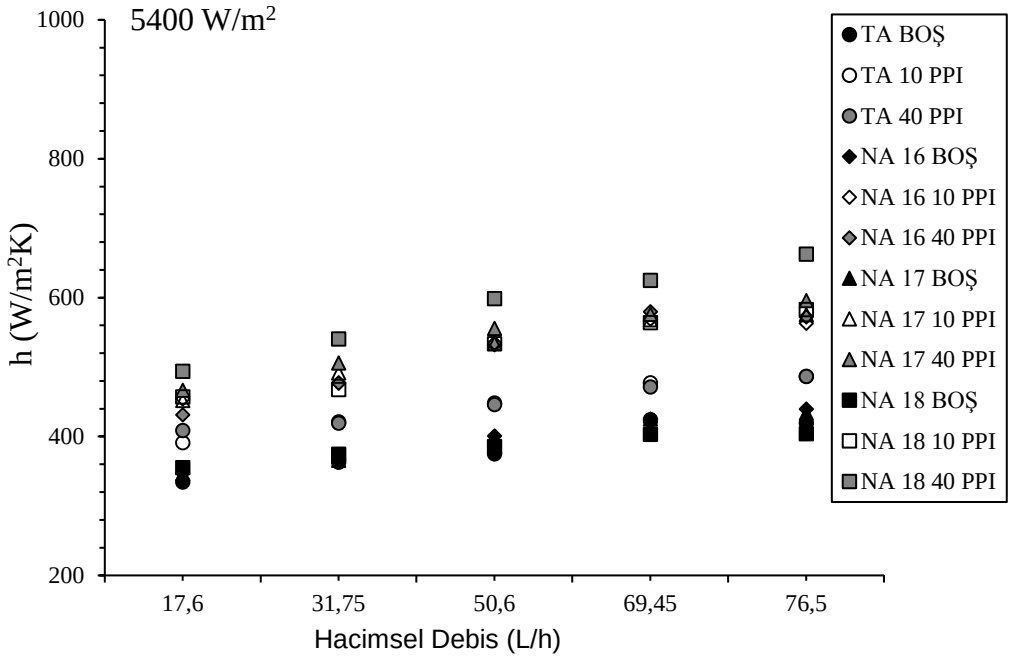


(c)



(d)

Şekil 4.11.'nin devamı



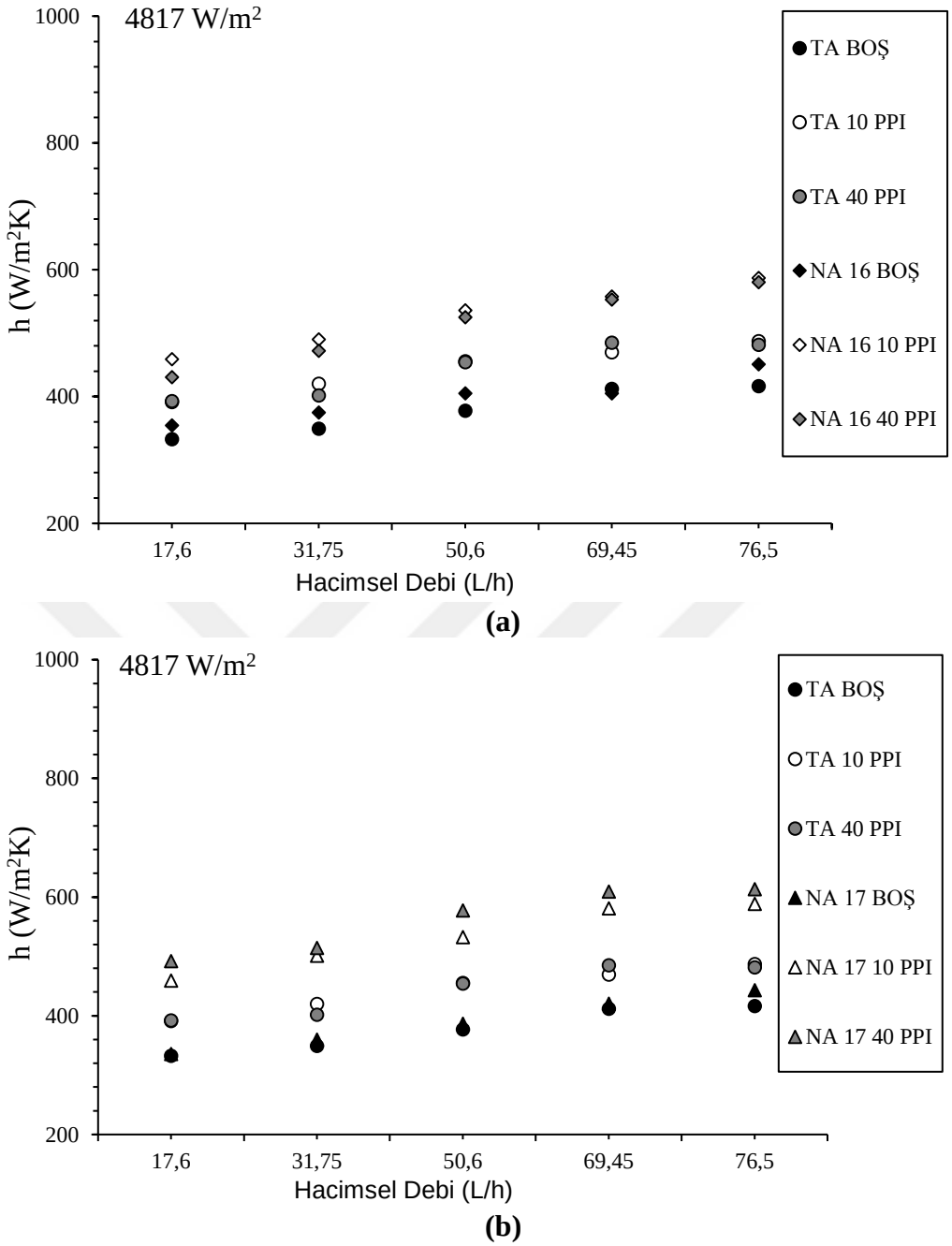
(e)

NA 16: %0.1 $CuO-H_2O$ / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

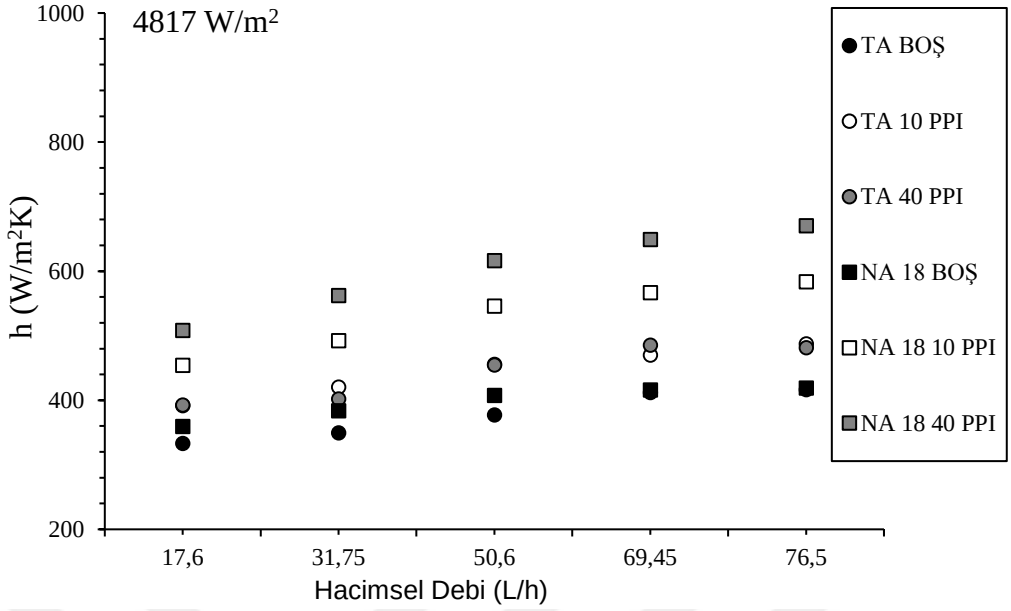
NA 17: %0.1 $CuO-H_2O$ - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 $CuO-H_2O$ - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.11.'in devamı



Şekil 4.12. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, taşınımla ısı transferi katsayısının hacimsel debiyle değişimi, **a)** NA 16; **b)** NA 17; **c)** NA 18



(c)

NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.12.'nin devamı

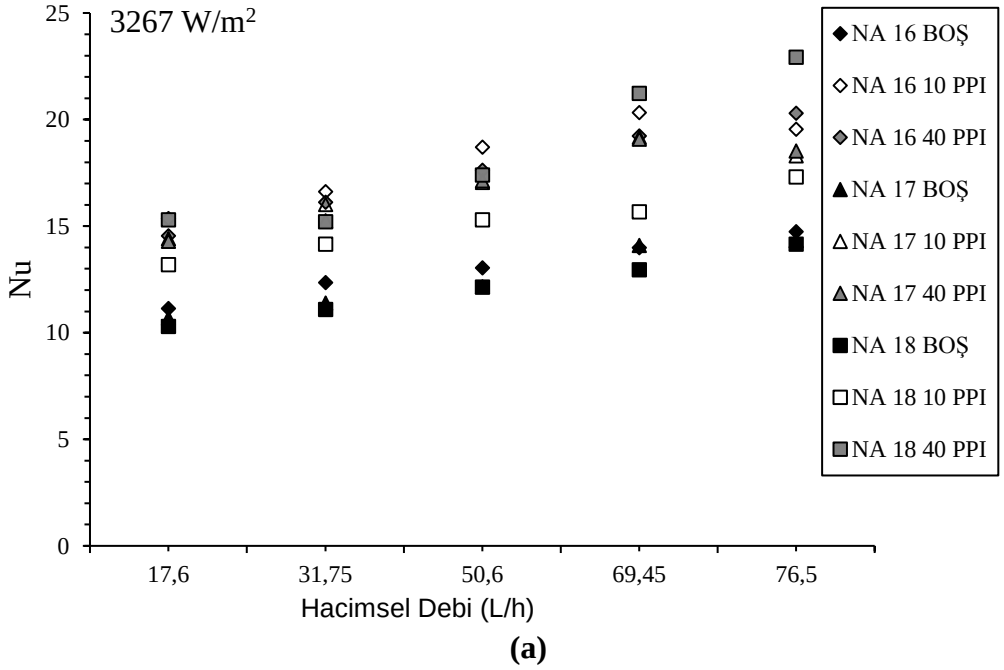
Çizelge 4.4. Nanoakışkan ve/veya metal köpük ısı alıcısı kullanımı sonucu boş yüzey ve temel akışkana göre taşınımla ısı transferi katsaysında elde edilen ortalama iyileştirme miktarı

İyileştirme Miktarı (%)	TA	NA 16	NA 17	NA 18
Boş Yüzey	-	2.66	2.39	5.23
10 PPI Yüzey	15.19	37.01	39.19	35.75
40 PPI Yüzey	16.47	33.72	44.69	57.75

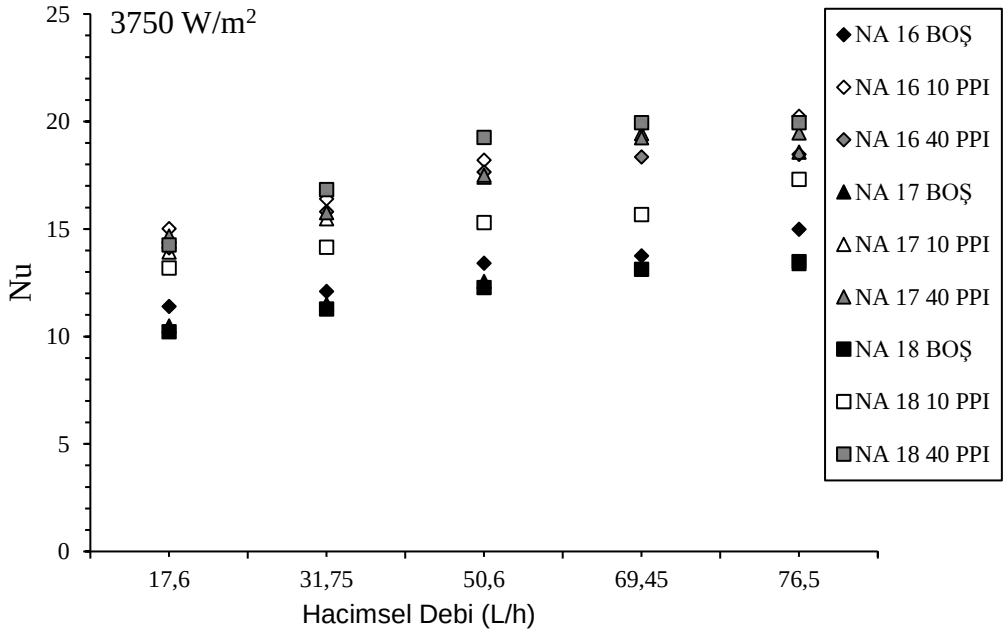
Nusselt sayısı, ısı transferi uygulamalarında çoğunlukla tercih edilen bir boyutsuz parametre olup, nanoakışkanlarla yapılan çalışmalarda uygun bir karşılaştırma ölçütü olmamaktadır. Nanoakışkanlar, içerisinde farklı derişimlerde bulunan nanopartiküllerin etkisiyle, temel akışkana göre daha yüksek termal iletkenlik katsayısına sahiptirler. Bu durum, nanoakışkan kullanımında elde edilen Nusselt sayısının temel akışkana göre daha düşük olmasına neden olmaktadır. Temel akışkana göre, daha yüksek termal iletkenlik katsayısına sahip olan nanoakışkanlarla yapılan ısı transferi uygulamalarında genellikle taşınımla ısı transferi katsayısı dikkate alınır. Bu kapsamda, Şekil 4.13'te sadece ısı transferi açısından daha etkili olan nanoakışkanlar ve metal köpük ısı alıcıların kullanımı sonucunda hacimsel debiye göre Nusselt sayısının değişimi verilmiştir. Ayrıca, 5400 W/m^2 ısı akısında, tüm yüzeylerde her bir nanoakışkanın ayrı ayrı hacimsel debiye göre Nusselt sayısıının değişimi, Şekil 4.14'te verilmiştir. Görüldüğü üzere tüm nanoakışkanlarda ve tüm ısı akılarında artan hacimsel debiyle birlikte Nusselt sayılarında

artış gözlenmiştir. Termal iletkenlik katsayısı diğer akışkanlara göre daha yüksek olan NA 18 nanoakışkanın kullanımıyla, genel olarak, tüm ısı akılarında, yüzeyden olan ısı transferi miktarı belirgin bir şekilde artmıştır. Artan ısı transferi miktarına bağlı olarak NA 18 nanoakışkanında diğer akışkanlara göre daha yüksek Nusselt sayıları elde edilmiştir.

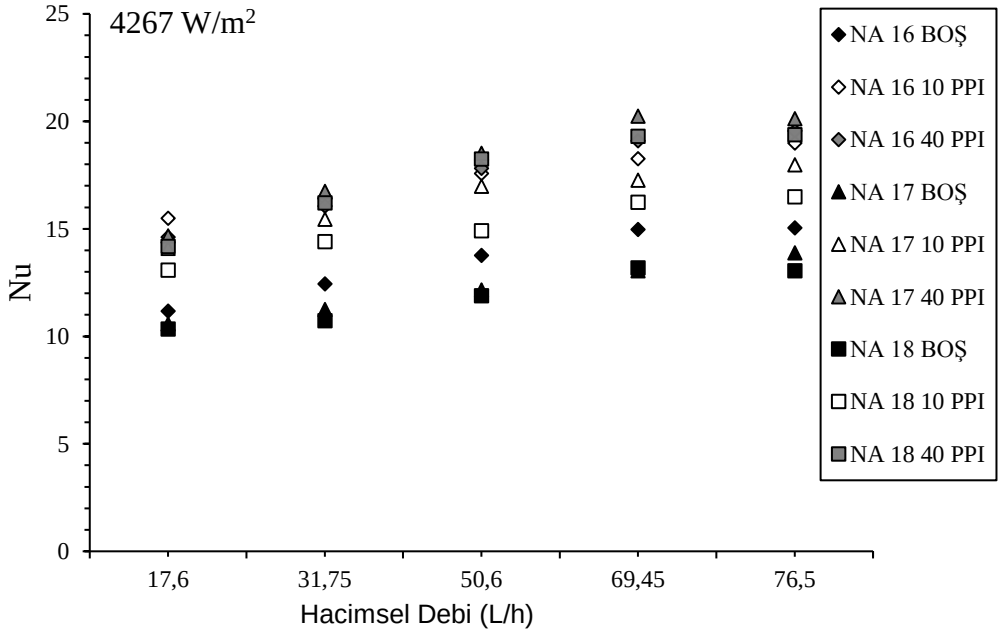
Nanoakışkanlarla birlikte metal köpük ısı alıcıların kullanımıyla birlikte tüm ısı akılarında, boş yüzeye göre Nusselt sayısında artış meydana gelmiştir. Özellikle, 40 PPI metal köpük ısı alıcısı kullanımında daha yüksek Nusselt sayıları elde edilmiştir. Bu duruma, daha önce bahsedilen kanal içerisinde metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla birlikte sürtünmelerin artması sonucunda, akışkanın yüzeyle daha uzun süre temas halinde olması neden olmaktadır. Ayrıca, gözenekli yapıların kullanılmasıyla birlikte, akışkan kanal içerisinde daha fazla çalkantıya uğratılarak Brownian etkisi de arttırılmıştır. Artan Brownian etkisi sonucunda da akışkan içerisinde katı-katı ısı transferi miktarı artırılmıştır.



Şekil 4.13. En iyi sonuçların alındığı nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, Nusselt sayısının hacimsel debiyle değişimi, **a)** 3267 W/m^2; **b)** 3750 W/m^2; **c)** 5267 W/m^2; **d)** 4817 W/m^2; **e)** 5400 W/m^2

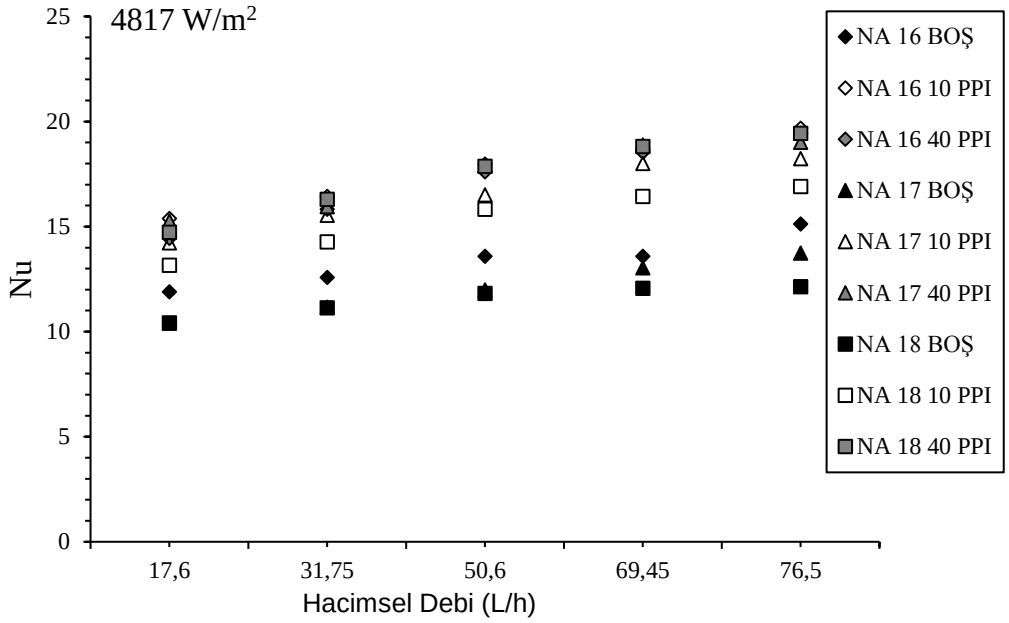


(b)

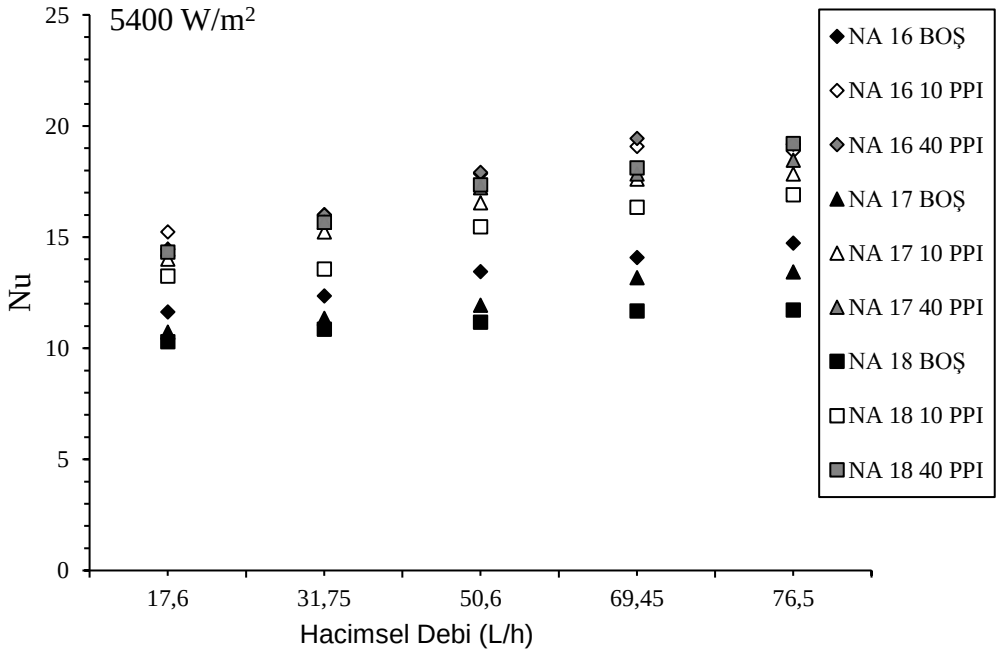


(c)

Şekil 4.13.'nin devamı



(d)



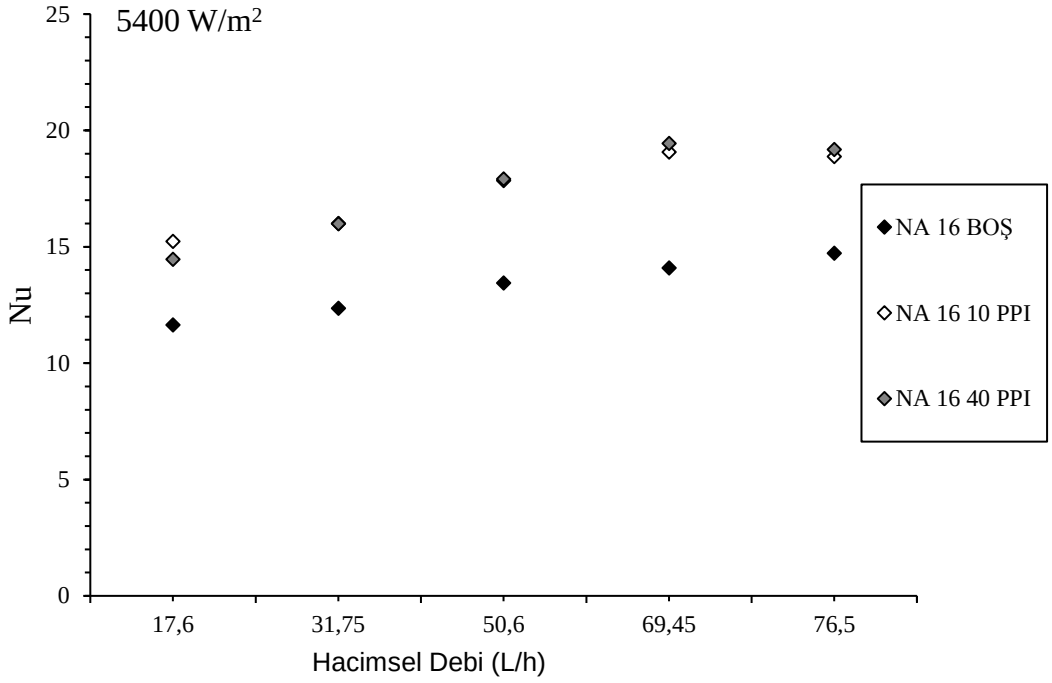
(e)

NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

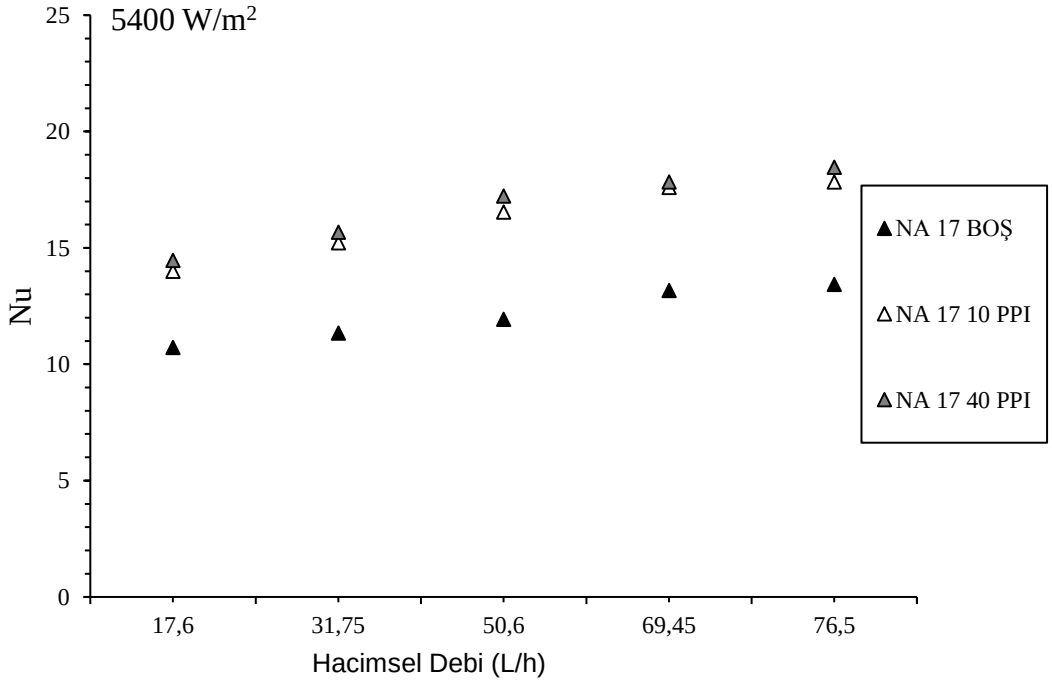
NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.13.'ün devamı

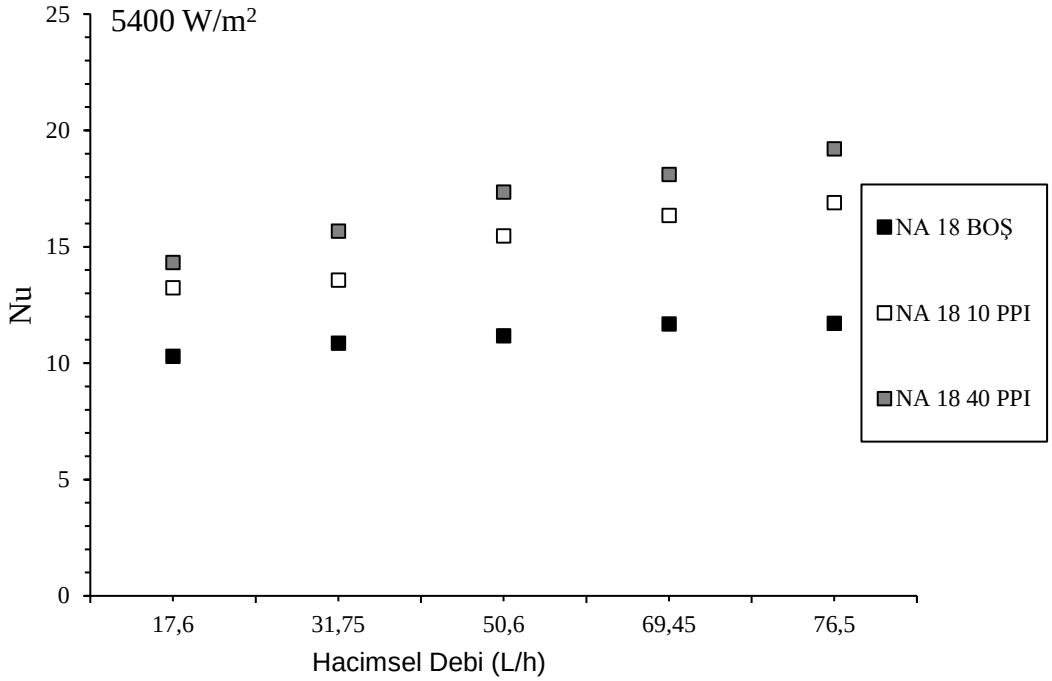


(a)



(b)

Şekil 4.14. 5400 W/m^2 ısı akısında nanoakışkanlarla, metal köpük ısı alıcılarının kullanılmasıyla, Nusselt sayısının hacimsel debiyle değişimi, **a)** NA 16; **b)** NA 17; **c)** NA 18



(c)

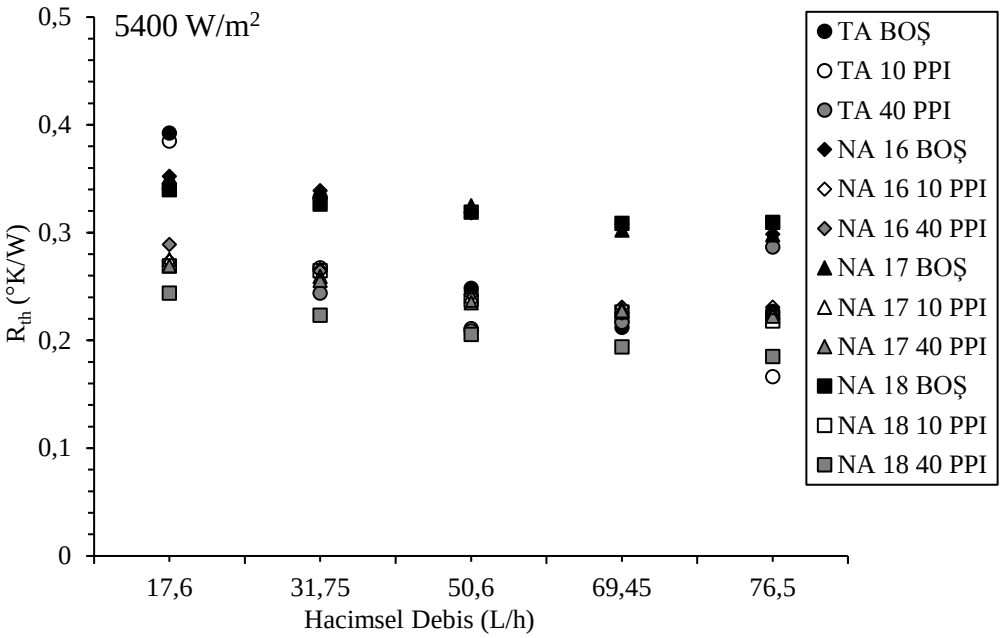
NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.14.'ün devamı

Kanal içerisinde, metal köpük ısı alıcılar ve nanoakışkan kullanımında, hacimsel debiye göre termal direncin değişimi Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, tüm akışkan ve yüzeylerde, hacimsel debinin artmasıyla birlikte termal dirençte azalma meydana gelmiştir. Bilindiği gibi, termal direnç, soğutma sisteminin ısıyı uzaklaştırma kapasitesinin bir ölçüsü olup, doğrudan yüzey sıcaklığı ve aktarılan ısı miktarına bağlıdır. Metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla birlikte artan gözenek yoğunluğuna bağlı olarak ısı transferinin etkisi artmıştır (Pourfarzad vd. 2018). Bu kapsamda, yüzeyden olan ısı transferinin en yüksek olduğu yerlerde (Metal köpük ısı alıcısı ve nanoakışkan), termal direnç en düşük değerlerini alırken, ısı transferinin azaldığı yerlerde (Boş yüzey) en yüksek değerlerini almıştır.



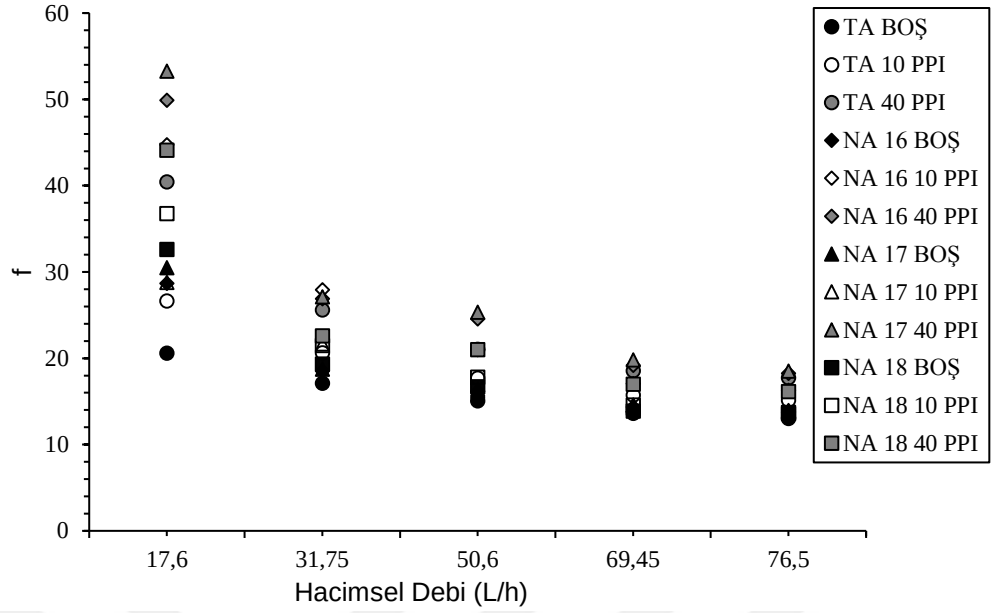
NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

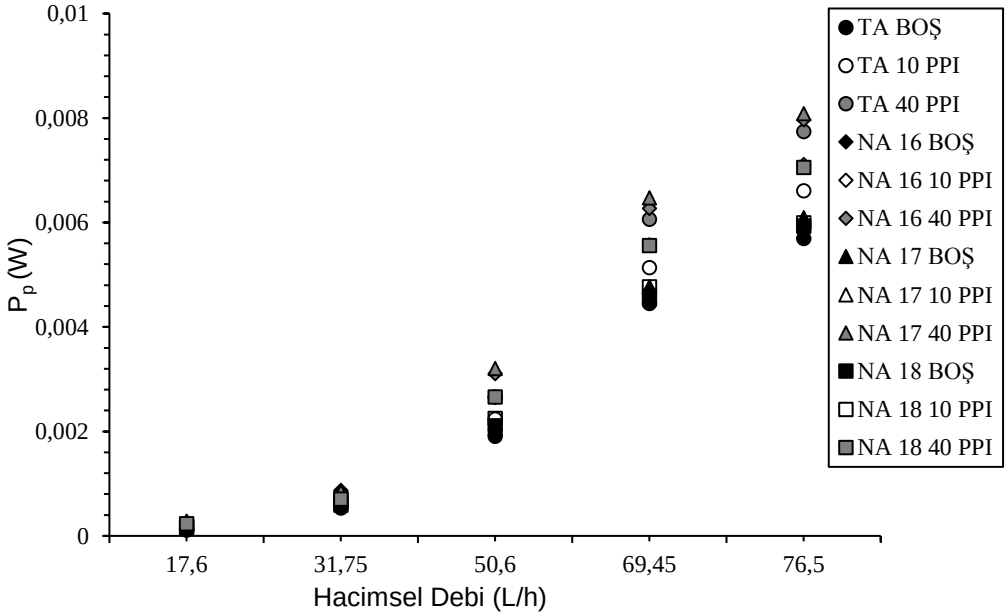
NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.15. Nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcısının kullanılması sonucu termal direncin hacimsel debiye göre değişimi

Elektronik sistemlerde, nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcıların kullanılması sonucu, sürtünme katsayısı ve pompalama gücünün hacimsel debiye göre değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.16 (a) incelendiğinde, gözenek yoğunluğunun artmasıyla tüm akışkanlarda hacimsel debiye göre, sürtünme katsayısı yükselmiştir. Temel akışkana göre, nanopartikül ve çeşitli eklentilerle yoğunluk ve viskozitesi artan nanoakışkanların kullanımıyla, sürtünme katsayısında ve pompalama gücünde artış meydana gelmiştir. Kanal içerisinde hacimsel debinin artmasıyla birlikte, pompalama gücü artarken sürtünme katsayısında düşüş meydana gelmiştir. Şekil 4.16 (b)'de ise kullanılan metal köpük ısı alıcılarla, gözenek yoğunluğunda meydana gelen artış, pompalama gücünü arttırdığı görülmüştür. Bu duruma, gözenek yoğunluğunun artması sonucu geçirgenliğin azalması ve sürtünmelerin artması neden olmuştur. Ayrıca, nanoakışkan kullanımı sonucunda temel akışkana göre artan basınç kaybına bağlı olarak pompalama gücünde de artış gözlenmiştir.



(a)



(b)

NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

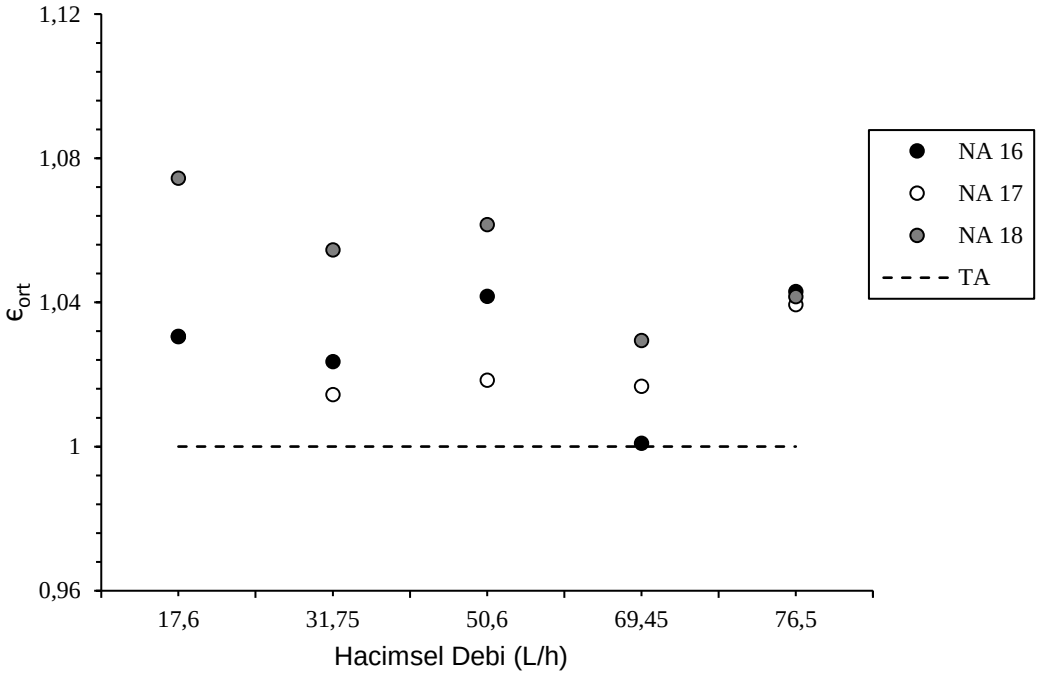
NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.16. Nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcısının kullanılması sonucu hacimsel debiye göre, **a)** Sürtünme katsayısı değişimi; **b)** Pompalama gücü değişimi

Çalışmada ısı transferi açısından daha etkin sonuçların alındığı nanoakışkanların, temel akışkana göre ısı transfer etkenliği Şekil 4.17'de verilmiştir. Nanoakışkanların temel akışkana göre ısı transfer etkenliği değişimini net bir şekilde verebilmek amacıyla boş yüzeyde tüm sabit ısı akılarından elde edilen ısı transfer etkenliği değerlerinin ortalaması alınmıştır. Hacimsel debinin artmasıyla birlikte, nanoakışkanarın ısı transfer etkenlik değerleri birbirlerine yaklaşmakta olup, ısı transfer etkenlikleri 1'den yüksek

çıkmıştır. Bu durum, temel akışkanla kıyaslandığında, nanoakışkanların yüzey soğutmada termal olarak daha etkili olduğunu göstermektedir. Nanoakışkanlar kendi aralarında karşılaştırıldığında ise, temel akışkana göre NA 18 nanoakışkanında ısı transfer etkenliğinin en yüksek değere ulaştığı görülmüştür.



NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm) **NA 17:** %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

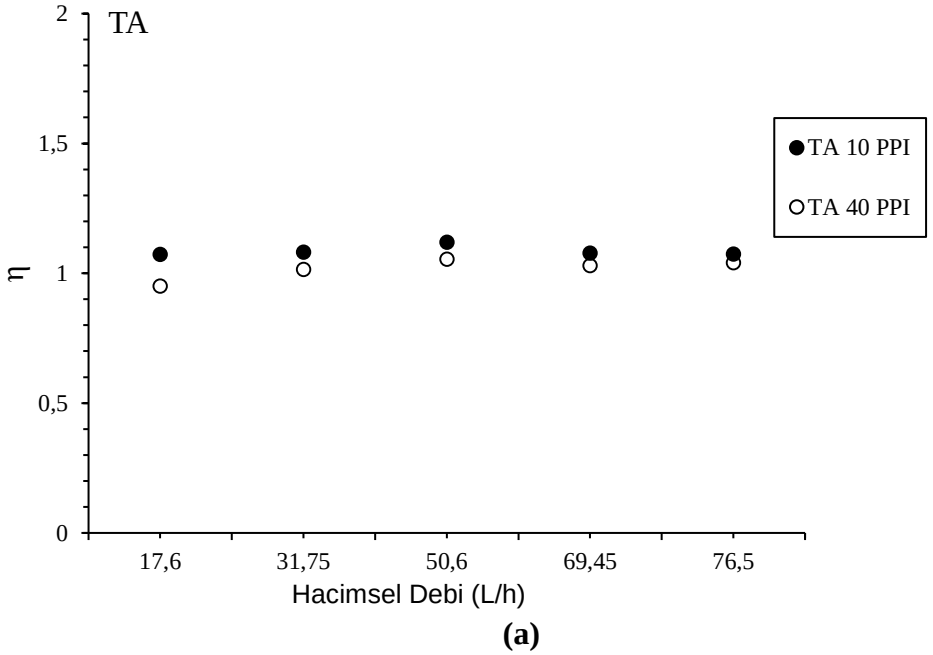
NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.17. Nanoakışkanların hacimsel debiye göre ısı transferi etkenliği değişimi

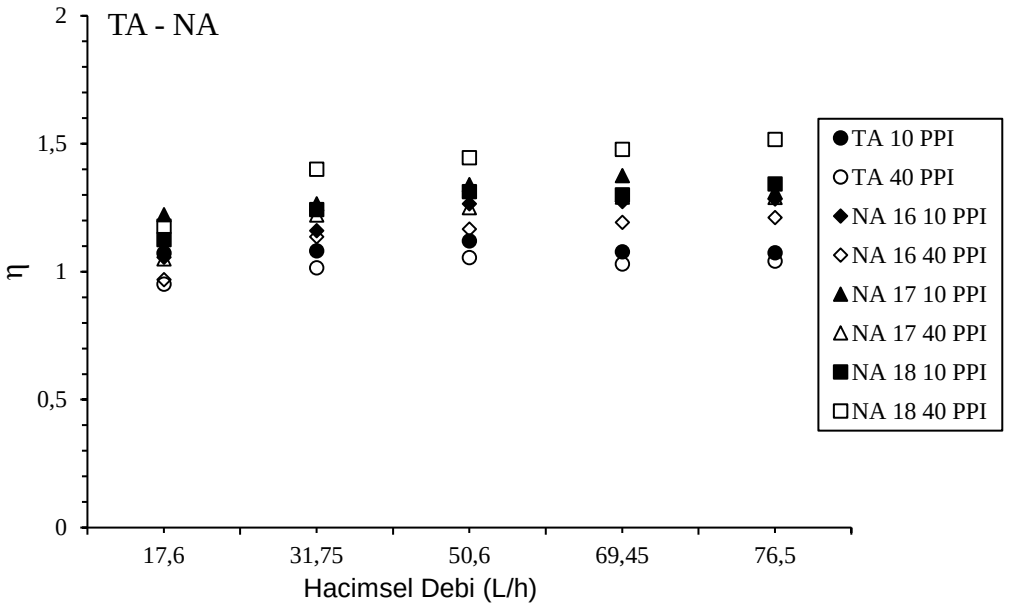
Buraya kadar yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler neticesinde, kanal içerisinde nanoakışkan kullanımının, temel akışkana göre ısı transferini iyileştirerek yüzey sıcaklıklarını düşürdüğü belirlenmiştir. Isı transferini daha fazla arttırabilmek amacıyla, nanoakışkanlarla birlikte, kanal içerisine metal köpük ısı alıcılar yerleştirilerek, ısı transferinde elde edilen iyileştirme miktarının daha da arttığı görülmüştür. Ancak, kanal içerisinde metal köpük ısı alıcıların kullanımıyla birlikte tüm akışkanlarda basınç kaybı miktarında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Basınç kaybında meydana gelen bu artış, temel akışkan kullanımında daha az iken nanoakışkan kullanımında daha yüksektir. Bu durumda, ısı transferinde elde edilen iyileştirme miktarının basınç kaybında meydana gelen artışa göre kabul edilebilir olup olmadığının incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kanal içerisinde metal köpük ısı alıcıların kullanımıyla hem temel akışkan hem de nanoakışkanların termal performanslarının hacimsel debiye göre değişimi Şekil 4.18'de verilmiştir. Metal köpük ısı alıcıların kullanıldığı, Şekil 4.18 (a) grafiğinde temel akışkanın, Şekil 4.18 (b) grafiğinde tüm akışkanların ve Şekil 4.18 (c) grafiğinde ise çalışmada en düşük yüzey sıcaklıklarının elde edildiği NA 18 nanoakışkanının termal

performansı verilmiştir. Bilindiği üzere, termal performans değerinin 1'den büyük çıkan değerlerinde ısı transferi basınç kaybına göre daha baskın iken, 1'den küçük çıkan değerlerinde ise basınç kaybının ısı transferine göre daha baskındır. Bu kapsamda, Şekil 4.18 (a)'da içerisinden temel akışkan geçirilen kanalda 10 PPI metal köpük ısı alıcısı kullanımında ısı transferi etkileri baskınken, 40 PPI metal köpük ısı alıcısı kullanımında ise basınç kaybının baskın olduğu görülmektedir. Daha önce bahsi geçen grafiklerde termal olarak incelendiğinde, temel akışkan kullanımında, 40 PPI metal köpük ısı alıcılı kanalda ısı transferi miktarının, 10 PPI metal köpük ısı alıcılıya göre yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, artan gözenek yoğunluğuna bağlı olarak 40 PPI metal köpük ısı alcıda elde edilen ısı transferi miktarı, basınç kaybındaki artışa karşı zayıf kalarak termal performans değerinin 1'den küçük çıkmasına neden olmuştur.

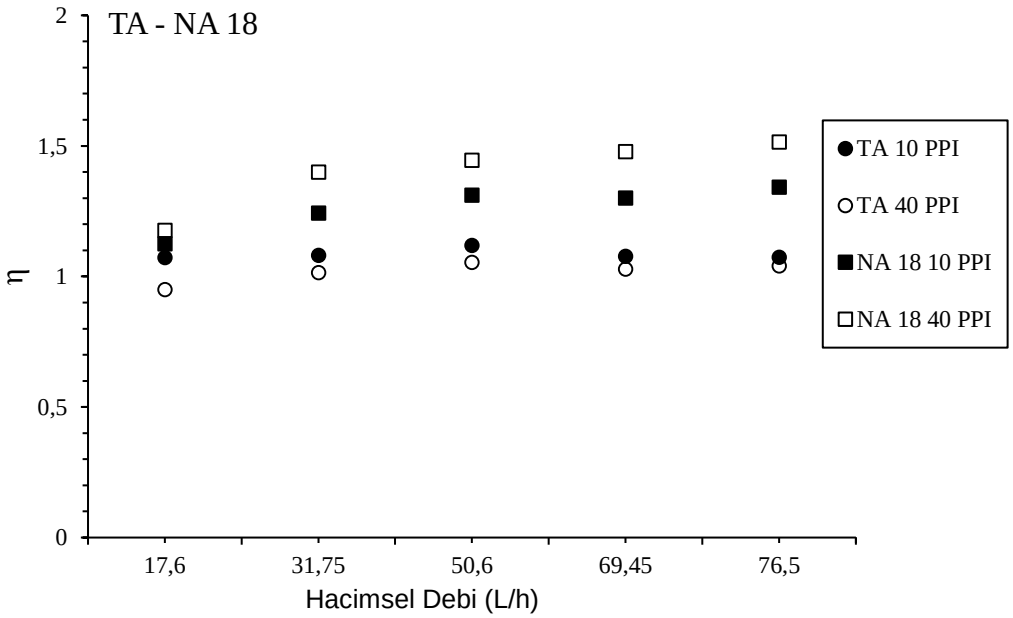
Şekil 4.18 (b) incelendiğinde ise, kanal içerisinde hem 10 PPI hem de 40 PPI metal köpük ısı alıcının nanoakışkanlarla birlikte kullanımında, termal performans değerleri artan hacimsel debiye göre 1'den yüksek değerler almıştır. Buna göre hem nanoakışkan hem de metal köpük ısı alıcıların kanal içerisinde kullanımında ısı transferinde elde edilen iyileştirme miktarının, basınç kaybında meydana gelen artışa baskın olduğu söylenebilir. Şekil 4.18 (c)'de en yüksek ısı transferi miktarının elde edildiği NA 18 nanoakışkanının temel akışkana göre, artan hacimsel debiye göre termal performans değişimi verilmiştir. NA 18 nanoakışkanının metal köpük ısı alıcılarla birlikte kullanımında termal performans değerleri tüm hacimsel debilerde, temel akışkana göre belirgin bir şekilde yüksek çıkmıştır. Özellikle, temel akışkanda basınç etkilerinin baskın olarak görüldüğü 40 PPI metal köpük ısı alıcıda, NA 18 nasnoakışkanın kullanılmasıyla ısı transferi etkileri daha baskın hale gelerek, en yüksek termal performans değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcısı kullanımının hacimsel debiye göre termal performans değişimi



(b)



(c)

NA 16: %0.1 CuO-H_2O / %2 PEI (7.81 ±0.81 nm)

NA 17: %0.1 CuO-H_2O - %0.03 Ag / %2 PEI (11.49 ±3.67 nm)

NA 18: %0.1 CuO-H_2O - %0.05 Ag / %2 PEI (19.77 ±7.15 nm)

Şekil 4.18.'in devamı

5. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmada, elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcı kullanımının ısı transferine ve basınç kaybına etkisi detaylı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca, literatürde nanoakışkanlarla ilgili, hala net bir şekilde açıklanamayan bazı konularla ve literatürde yer almayan nanopartikül yüzeyine termal iletim katsayısı yüksek bir metal atomunun ilavesinin ısı transferine etkisi konusunda açıklamalarda bulunulmuştur. Elde edilen sonuçların, elektronik soğutma uygulamalarında hem araştırmacılara hem de tasarımcılara farklı bir bakış açısı sunması beklenmektedir. Deneysel çalışmada, 5 farklı hacimsel debide (17.6, 31.75, 50.6, 69.45 ve 76.5 L/h) ve 5 farklı ısı akısında (3267, 3750, 4267, 4817 ve 5400 W/m^2) ölçümler yapılmıştır. Kanal içerisinde soğutma akışkanı olarak temel akışkan ve 19 farklı CuO-H_2O nanoakışkanı kullanılmıştır. Çalışmada çeşitli kütlesel derişimlerde hazırlanmış CuO-H_2O nanoakışkanlarının farklı tür ve derişimde surfaktan eklenmesinin yanı sıra, nanopartikül yüzeylerine farklı kütle oranlarında Ag atomu ilavesiyle uygulamaları yapılmıştır. Temel akışkan ve ısı transferi açısından daha etkin sonuçların alındığı NA16, NA17 ve NA18 nanoakışkanlarıyla yüzeye ayrık olarak yerleştirilen 10 PPI ve 40 PPI gözenek yoğunluğuna sahip alüminyum (Al-6101) metal köpük ısı alıcılarla deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, temel akışkan ve boş yüzeyden alınan verilerle karşılaştırılmıştır ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Elektronik sistemlerin soğutulması kapsamında yapılan deneysel çalışmada hem temel akışkan hem de nanoakışkanın kullanıldığı durumlarda, hacimsel debinin artmasıyla, yüzey sıcaklıklarında tüm yüzeylerde (boş, 10 PPI ve 40 PPI) ve tüm ısı akılarında düşüş meydana gelmiştir.

- Boş kanalda, kütlece %0.1'den %2'ye derişime sahip CuO-H_2O nanoakışkanlarının kullanılmasıyla temel akışkana göre, yüzey sıcaklıklarında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Kütlesel derişiminin artmasıyla, akışkanın termal iletkenlik katsayısında meydana gelen artış, yüksek viskoziteden dolayı artan sürtünme etkilerine karşı zayıf kalmıştır. Bunun sonucu olarak, akışkan içerisinde nanopartiküller topaklanmaya ve çökmeye başlamış olup, homojenlik bozulmuştur. Çökme miktarına bağlı olarak, yüzeyde nanopartiküllerden oluşan bir tabaka meydana gelmiştir. Yüzeyde oluşan bu tabaka kalınlığına bağlı olarak, akışkana karşı termal bir direnç oluşarak aktarılan ısı miktarı azalmış ve yüzey sıcaklıkları belirgin bir şekilde yükselmiştir.

- Nanopartiküllerin çökmesini azaltmak ve akışkanın homojenliğini korumak amacıyla farklı surfaktan türü (CTAB ve PEI) ve derişimlerinde deneyler yapılmıştır. Nanoakışkan içerisine kütlesel derişime bağlı olarak surfaktan eklenmesinin hazırlanan akışkanın homojenliğini korumada ve ısı transferini iyileştirmede daha etkili olduğu görülmüştür ve özellikle PEI surfaktanının kullanılmasıyla, akışkanla nanoapartiküller arasında daha kuvvetli fiziksel bağların oluşması sağlanmıştır. Bunun sonucu olarak kararlılık süresinde nitelikli bir artış olması sağlanmıştır.

- Nanopartikül boyutunun yaklaşık 10 nm'ye küçültülmesiyle elde edilen NA16 nanoakışkanının kullanılmasıyla, temel akışkana göre basınç kaybında artış meydana gelmiştir. Bunun yanında, birim alandaki nanopartikül miktarının artması ve viskoziteye bağlı olarak yüzeyle akışkan arasındaki temas süresinin uzamasıyla, yüzey sıcaklıklarında temel akışkana göre belirgin bir düşüş gözlenmiştir.

- 7.81 ±0.81 nm boyutundaki CuO nanopartiküllerin yüzeyine %0.03 ve %0.05 derişimlerinde Ag atomunun motiflenmesiyle oluşturulan, sırasıyla 11.49 ±3.67 nm ve 19.77 ±7.15 nm boyutlarındaki yeni nanopartiküllerle hazırlanan nanoakışkanın kullanımında, yüzey sıcaklıklarında temel akışkana göre belirgin düşüş gözlenmiştir. Ancak, nanopartikül yüzeydeki Ag atomu ilavesinin %0.1 kütlesel derişime çıkartılmasıyla, yüzey sıcaklıklarında temel akışkana göre artış gözlenmiştir. Bu kapsamda, CuO nanopartikülüne %0.05 kütlesel derişiminde Ag atomu ilave edilmesiyle, en düşük yüzey sıcaklıklarına erişilmiştir.

- Yüksek gözenek yoğunluğuna ve yüksek alan/hacim oranlarına sahip 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların yüzeye ayrık olarak yerleştirilmesiyle, kanal içerisinde geçen akışkanın karıştırılması ve ivmelenmesi sağlanmıştır. Bunun sonucu olarak ortalama yüzey sıcaklıkları boş yüzeye göre belirgin bir şekilde düşmüştür. Özellikle, 40 PPI metal köpük ısı alıcıyla, tüm akışkanlarda boş yüzeye göre en düşük ortalama yüzey sıcaklıkları elde edilmiştir.

- Kanal içerisinde nanoakışkanların (NA16, NA 17 ve NA18) kullanımıyla, temel akışkana göre basınç kaybında artış meydana gelmiştir. Ancak, basınç kaybında meydana gelen bu artış ihmal edilebilir bir büyüklüktedir. Tüm akışkanlarda, kanal içerisine metal köpük ısı alıcıların yerleştirilmesiyle birlikte basınç kaybı miktarında belirgin bir artış görülmüştür. Özellikle, nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcıların bir arada kullanılmasıyla, en yüksek basınç kaybı miktarları elde edilmiştir.

- Boş yüzeyde NA 16, NA 17 ve NA 18 nanoakışkanlarının kullanımıyla temel akışkana göre, yüzey sıcaklıklarında elde edilen ortalama iyileştirme miktarı sırasıyla %1.11, %1.98 ve %3.22 olarak belirlenmiştir.

- 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların temel akışkanla kullanımıyla boş yüzeye göre, yüzey sıcaklıklarında elde edilen en yüksek iyileştirme miktarı sırasıyla %14.47 ve %17.22 olarak belirlenmiştir. Nanoakışkanların metal köpük ısı alıcılarla birlikte kullanımıyla temel akışkana göre, yüzey sıcaklıklarında elde edilen iyileştirme miktarı daha belirgin hale gelmiştir. Bu kapsamda, 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların nanoakışkanlarla birlikte kullanımıyla, yüzey sıcaklıklarında elde edilen ortalama iyileştirme miktarları sırasıyla NA 16 için %29.58 ve %26.32, NA 17 için %32.40 ve %35.84, NA 18 için %31.53 ve %57.87 olarak belirlenmiştir.

- Boş yüzeyde NA 16, NA 17 ve NA 18 nanoakışkanlarının kullanımıyla temel akışkana göre, taşınımla ısı transferi katsayısında elde edilen ortalama iyileştirme miktarı sırasıyla %2.66, %2.39 ve %5.23 olarak belirlenmiştir.

- Taşınımla ısı transfer katsayılarında 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların temel akışkanla kullanımıyla boş yüzeye göre sırasıyla %15.19 ve 16.47 iyileştirme elde edilmiştir. Benzer şekilde 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alçıların nanoakışkanlarla birlikte kullanımıyla, taşınımla ısı transferi katsayısında elde edilen en yüksek iyileştirme miktarları sırasıyla NA 16 için %37.01 ve %33.72, NA 17 için %39.19 ve %44.69, NA 18 için %35.75 ve %57.75 olarak belirlenmiştir.

  Boş yüzey için yapılan deneylerde, NA16, NA17 ve NA18 nanoakışkanlarında temel akışkana göre, artan basınç kaybına bağlı olarak sürtünme katsayısı ve pompalama gücünde artış meydana gelmiştir. Nanoakışkanların kullanımıyla sürtünme faktörü ve pompalama gücünde meydana gelen bu artış miktarı, metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla birlikte daha da belirgin hale gelmiştir.

- Çalışmada farklı metal köpük ısı alıcılarla nanoakışkanların artan hacimsel debiye göre, termal performansı incelendiğinde termal performans değerleri genel olarak 1'den yüksek çıkmıştır. Bu kapsamda, kanal içerisinde nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcısı kullanımıyla, ısı transferinde elde edilen iyileştirmenin basınç kaybına baskın olduğu söylenebilir. Özellikle, NA 18 nanoakışkanın termal performans değerleri 10 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında 1.12-1.34 ve 40 PPI metal köpük ısı alıcı kullanımında ise 1.17-1.51 aralığında değişmektedir. Buna göre, NA 18 nanoakışkanı ve metal köpük ısı alıcıların birlikte yüzey soğutmada kullanımının termal açıdan daha uygun olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar neticesinde, elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkan ve metal köpük ısı alıcıların kullanılması kapsamında gelecekte yapılacak çalışmalara yol göstermek amaçlı bazı öneriler aşağıda verilmiştir.

- Mevcut çalışmada, nanoakışkan partikül boyutunun küçültülmesiyle, yüzeyden olan ısı transferinde artış olduğu belirlenmiştir. Partikül boyutunun azalmasıyla birlikte, aynı derişimde akışkan içerisinde daha fazla nanopartikül bulunacağı için viskozite ve yüzey sürtünmelerine bağlı olarak basınç kaybı miktarında artış olacağı unutulmamalıdır. Bu kapsamda, nanopartikül boyutunun ısı transferine etkisi, daha geniş bir aralıkta, daha fazla partikül boyutunda detaylı bir şekilde ele alınmasıyla termal performansın değişimi araştırılabilir.

Yüksek güçte çalışan elektronik sistemlerin (Güç santralleri, askeri ve sanayi uygulamaları vb) çalışma koşulları göz önüne alınarak, mevcut çalışmada en iyi sonuçların alındığı NA 18 nanoakışkanı ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların, daha yüksek ısı akıları altında ve daha geniş akışkan debi aralığında termal performansları araştırılabilir.

- 10 PPI ve 40 PPI metal köpük ısı alıcıların kullanılmasıyla, tüm akışkanlarda yüzey sıcaklıklarının boş yüzeye göre belirgin bir şekilde düştüğü görülmüştür. Özellikle, 40 PPI metal köpük ısı alıcıda tüm akışkanlarda boş yüzeye göre düşük yüzey sıcaklıkları elde edilmiştir. Bu kapsamda, metal köpük ısı alıcıların yüksek alan/hacim oranları nedeniyle elektronik sistemlerin soğutulmasında özellikle de dar hacimlerde yüksek performans göstereceği anlaşılmaktadır.

- Nanoakışkanların yüksek termal özellikleri nedeniyle elektronik sistemlerin soğutulmasında gelecek vaat eden akışkanlar olduğu düşünülmektedir. Ancak, zaman içerisinde topaklanma ve çökelme eğilimleri nedeniyle daha fazla araştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda, nanoakışkanların ticari olarak kullanılabilesi için akışkanın homojenliğini korumak ve zaman içerisinde topaklanıp çökmesini tam olarak engelleyici bazı katkı veya uygulamalar araştırılabilir.

- Termal performans değeri en yüksek olan NA18 nanoakışkanı ve 40 PPI metal köpük ısı alıcısının birlikte kullanımının ticari soğutma sistemlerinde uygulanabilmesi için nanoakışkan ve metal köpük ısı alıkçıların daha düşük maliyetli üretim yöntemlerinin araştırılması gerekmektedir. Özellikle alüminyum metal köpük ısı alıcıların birçok uygulamada kullanımında mevcut malzemelere göre daha fazla avantaja sahip olmasına rağmen üretimindeki zorluk ve maliyeti nedeniyle ticari uygulamaları oldukça kısıtlıdır.

6. KAYNAKÇA

Abadi G. B. and Kim K. C. 2017. Experimental heat transfer and pressure drop in a metal-foam filled tube heat exchanger. *Experimental thermal and fluid science*, 82: 42-49.

Alfaryjat A., Miron L., Pop H., Apostol V., Stefanescu M. F. and Dobrovicescu A. 2019. Experimental investigation of thermal and pressure performance in computer cooling systems using different types of nanofluids. *Nanomaterials*, 9: 1-21.

Alhusseny A. N. M., Nasser A. G. And Al-zurf N. M. J. 2018. High-porosity metal foams: Potentials, applications and formulations, Porosity – process, Technologies and applications, Chapter 8, pp. 181-200.

Ali H. M. and Arshad W. 2015. Thermal performance investigation of staggered and inline pin fin sinks using water based rutile and anatase TiO_2 nanofluids. *Energy conversion and management*, 106: 793-803.

Ali H. M. and Arshad W. 2017. Effect of channel angle of pin-fin heat sink on heat transfer performance using water based graphene nanoplatelets nanofluids. *International journal of heat and mass transfer*, 106: 465-472.

Aliabadi M. K., Sartipzadeh O., Pazdar S. and Sahamiyan M. 2017. Experimental and parametric studies on a miniature heat sink with offset-strip pins and Al_2O_3/water nanofluids. *Applied thermal engineering*, 111: 1342-1352.

Amani M., Ameri M. and Kasaeian A. 2017. The experimental study of convection heat transfer characteristics and pressure drop of magnetite nanofluid in a porous metal foam tube. *Transp. Porous med.*, 116: 959-974.

Anandan S. S. and Ramalingam V. 2008. Thermal management of electronics: A review of literatüre. *Thermal science*, 12(2): 5-26.

Angayarkanni S. A. and Philip J. 2015. Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. *Advantages in colloid and interface science*, 225: 146-176.

Anonim 1: https://www.cactus-tech.com/wp-content/uploads/2019/03/Commercial-and-Industrial-Grade-Products.pdf [Son erişim tarihi: 22.04.2022].

Anoop K. B., Sundararajan T. and Das K. 2009. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluids in the developing region. *International journal of heat and mass transfer*, 52: 2189-2195.

Bahiraei M., Mazaheri N. and Daneshyar M. R. 2021. Employed elliptical pin-fins and nanofluid within a heat sink for cooling of electronic chips regarding energy efficiency perspective. *Applied thermal engineering*, 183: 1-17.

Banhart J. 2013. Light metal foams – History of innovation and technology challanges. *Advanced engineering materials*, 15(3): 82-111.

Barbés B., Páramo R., Blanco E. and Casanova C. 2014. Thermal conductivity and specific heat capacity measurement of CuO nanofluids. *J. therm. anal. calorim.*, 115: 1883-1891.

Bayda S., Adeel M., Tuvvinardi T., Cordani M. and Rizzolio F. 2020. The history of nanoscience and nanotechnology from chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 12(112): 1-15.

Bayomy A. M. and Saghir M. Z. 2016. Heat transfer characteristics of aluminum metal foam subjected to a pulsaiting/steady water flow: Experimental and numerical apptoach. International journal of heat and mass transfer. 97: 318-336.

Bayomy A. M. and Saghir M. Z. 2017. Experimental study of using γ-Al_2O_3-water flow through aluminum foam heat sink: Comparison with numerical approach. *International journal of heat and mass transfer*, 107: 181-203.

Bayomy A. M. and Saghir Z. 2017. Experimental and Numerical study of the heat transfer characteristics of aluminum metal foam (With/without channels) ssssssubjected to steady water. *Pertanika J. sci & technol*, 1: 221-246.

Bayomy A. M. and Saghir Z. 2020. Thermal performance of finned alıminum heat sink filled wiht ERG alıminum foam:Experimental and numerical appoach. *International journal of Energy research*, 44: 4411-4425.

Bayomy A. M., Saghir M. Z. and Yousefi T. 2017. Electronic cooling using water flow aluminum metal foam heat sink. *International journal of thermal sciences*, 109: 182-200.

Black J. R. 1969. Electromigration – A brief survey and some recent results. *IEEE Transactions on electron devices*, 16(4): 338-347.

Behnampour A., Akbari O. A., Safaei M. R., Ghavami M., Marzban A., Shabani G. A. S., Zarringhalam M. and Mashayekhi R. 2017. Analysis of heat transfer and nanofluid flow in microchannel with trapezoidal, rectangular and triangular shaped ribs. *Physica E*, 91: 15-31.

Bergles A. E. 2003. Evolution of cooling technology for electrical, electronic and microelectronic equipment. *IEE Transactions on components and packaging Technologies*, 26(1): 6-15.

Bhattacharya A. and Mahajan R. L. 2002. Finned metal foam heat sinks for electronics cooling in forced convection. *Journal of electronic packaging*, 124: 155-163.

Bhuyam M. H. 2016. History of Electronics. *1st Bangladesh Electronics Olympiad 2015*, 21-29.

Boomsma K., Poulikakos D. and Zwick F. 2003. Metal foams as compact high performance heat exchangers. *Mechanics of materials*, 35: 1161-1176.

Chand P., Gaur A., Kumar A. and Gaur U.K. 2015. Effect of NaOH molar concentration on morphology, optical and ferroelectric properties of hydrothermally grown CuO nanoplates. *Materials science in semiconductor processing*, 38; 72-80.

Chevalier J., Tillement O. and Ayela F. 2007. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. *Applied physics letters*, 91: 1-3.

Chikh S., Boumedien A., Bouhadef K. and Lauriat G. 1998. Analysis of fluid flow and heat transfer in channel with intermittent heated porous blocks. *Heat and mass transfer*, 33: 405-413.

Çengel Y. A. and Cimbala J. H. 2006 Fluid mechanics: fundementals and applications. Fluid mechanics. Mc Graw-Hill Education, United states. ss. 929

Delissle C. S., Welsford C. A. and Saghir M. Z. 2020. Forced convection study with microporous channels and nanofluid: Experimental and numerical. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 140: 1205-1214.

Dogan A. and Ozbalci O. 2017. Experimental investigation of the effect of metal foam material on CPU cooling. *Journal of engineering technology and applied sciences*, 2(3): 113-120.

Dogan A. and Ozbalci O. 2018. Experimental investigation of free convection from heat sinks in inclined rectangular channel. *Cumhuriyet science Journal CSJ*, 39(3): 756-765.

Duangthongsuk W. and Wongwises S. 2015. A comparison of the heat transfer performance and pressure drop of nanofluid-cooled heat sinks with different miniature pin fin configurations. *Experimental thermal and fluid science*, 69: 111-118.

El-Shorbagy M. A., Eslami F., Ibrahim M., Barnoon P., Xia W. F. and Toghraie D. 2021. Numerical invesigation of mixed convection of nanofluid flow in a trapezoidal channel with different aspect ratios in the presence of porous medium. *Case studies in thermal engineering*, 25: 1-14.

Ersoz M., Işıtan A. ve Balaban M. 2018. Nanoteknoloji 1, Manoteknolojinin Temelleri. BilalOfset Basım-Yayın & Matbaacılık. Denizli, 272 s.

Feng S. S., Kuang J. J., Wen T., Lu T. J. and Ichimiya K. 2014. An experimental and numerical study of finned metal foam heat sinks under impinging air jet cooling. *International journal of heat and mass transfer*, 77: 1063-1074.

Feng S., Li F., Zhang F. and Lu T. J. 2018. Natural convection in metal foam heat sinks with open slots. *Experimental thermal and fluid science*, 91: 354-362.

Ghasemi S. E., Ranjibar A. A. and Hosseini M. J. 2017. Experimental evulation of cooling performance of circular heat sinks for heat dissipation from electronic chips using nanofluid. *Mechanics research communications*, 84: 85-89.

Ghorab M. G. 2015. Modelling mixing convection analysis of discrete partially filled porous channel for optimum design. *Alexandria engineering journal*, 54: 853-869.

Guarnieri M. 2016. The unreasonable accuracy of Moore's law. *IEE Industrial Electronics Magazine*, 40-43.

Guerroudj N. and Khalerras H. 2010. Mixed convection in a channel provided with heated porous blocks of various shapes. *Exenrgy conversion and management*, 51: 505-517.

Gupta M., Singh V., Kumar R. and Said Z. 2017. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer. *Renewable and sustainable energy reviews*, 74: 638-670.

Haghighi A., Albojamal A. and Vafai K. 2020. Heat removal enhancement in a channel with a single or an array of metallic foam obstacles. *International journal of thermal sciences*, 149: 1-15.

Han X. H., Wang Q., Park Y. G., T'joen C., Sommers A. and Jacobi A. 2012. A review of metal foam and metal matrix composites for heat exchangers and heat sinks. *Heat transfer engineering*, 33(12): 991-1009.

Hasan M. I. 2014. Investigation of flow and heat transfer characteristics in micro pin fin heat sink with nanofluid. *Applied thermal engineering*, 63: 598-607.

Hashemzadeh S. and Hormozi F. 2020. An experimental study on hydraulic and thermal performances of hybrid nanofluids in mini-channel. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 140: 891-903.

Hassani S. M., Aliabadi M. K. and Mazloumi S. H. 2018. Influence of chevron fin interruption on thermo-fluidic transport characteristics of nanofluid-cooled electronic heat sink. *Chemical engineering science*, 191: 436-447.

He Y., Jin Y., Chen H., Ding Y., Cang D. and Lu H. 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO_2 nanoparticles (Nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International journal of heat and mass transfer*, 50: 2272-2281.

Ho C. J., Hsu S. T., Yang T. F., Chen B. L., Rashidi S. and Yan W. M. 2021. Cooling performance of mini-channel heat sink with water-based nano-PCM emulsion – an experimental study. *International journal of thermal sciences*, 164: 1-9.

Ho C. J., Liao J. C., Li C. H., Yan W. M. and Amani M. 2019. Experimental study of cooling characteristics of water-based alümina nanofluid in a minichannel heat sink. *Case studies in thermal engineering*, 14: 1-9.

Holman J. P. 1994. Experimental methods for engineers. The McGraw-Hill companies, Singapore City, 739 s.

Hwang K. S., Jang S. P. and Choi S. U. S. 2009. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al_2O_3 nanofluids in fully developer laminar flow regime. *International journal of heat and mass transfer*, 52: 193-199.

Incropera F. P. Dewitt D. D., Bergman T. L. and Lavine A. S. 2011. Fundemantals of heat and mass transfer. United states of America, 1048 s.

Keblinski P., Phillpot S. R., Choi S. U. S. and Eastman J. A. 2002. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (Nanofluids). *International journal of heat and mass transfer*, 45: 855-863.

Khaleduzzaman S. S., Mahbulbul I. M., Sohel M. R., Saidur R., Selvaraj J., Ward T. A. and Niza M. E. 2017. Experimental analysis of energy and friction factor for titanium dioxide nanofluid in a water block heat sink. *International Journal of heat and mass transfer*, 115: 77-85.

Khaleduzzaman S. S., Sohel M. R., Saidur R. and Sevaraj J. 2015. Convective performance of %0.1 volume fraction of TiO_2/water nanofluid in an electronic heat sink. *6th BSME International conference on thermal engineering (ICTE 2014)*, 105: 412-417.

Khaleduzzaman S. S., Sohel M. R., Saidur R., Mahbulbul I. M., Akash B. A. and Selvaraj J. 2014. Energy and exergy analysis of alümina-water nanofluids for an electronic liquid cooling system. *International communications in heat and mass transfer*, 57: 118-127.

Khayargoli P., Lya V., Lefebve L. P. and Medraj M. 2004. The impact of microstructure on the permeability of metal foams. *CSME 2004*, 220-228.

Kim S., Tserengombo B., Choi S. H., Noh J., Huh S., Choi B., Chung H., Kim J. and Jeong H. 2019. Experimental investigation of heat transfer coefficient with Al_2O_3 nanofluid in small diameter tubes. *Applied Thermal Engineering*, 146: 346-355.

Korpys M., Rashed M. A., Dzido G. and Wojcik J. 2013. CPU heat sink cooled by nanofluids and water: Experimental and numerical stuy. 23rd European symposium on computer aided process engineering – ESCAPE 23, ss. 409-414, June 9-12, Lappeenranta, Finland.

Kumawat K. Optimal CPU & GPU temperature (PC & laptops). https://www.techcenturion.com/optimal-temperature-of-cpu-and-gpu [Son erişim tarihi: 22.04.2022].

Li C., Huang J., Shang Y. and Huang H. 2020. Study on the flow and heat dissipation of water-based alümina nanofluids in microchannels. *Case studies in thermal enginnering*, 22: 1-12.

Li X. F., Zhu D. S., Wang X. J., Wang N., Gao J. W. and Li H. 2008. Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H_2O nanofluids. *Thermochimica*, 469: 98-103.

Li Y., Gong L., Ding B., Xu M. and Joshi Y. 2021. Thermal management of power electronics with liquid cooled metal foam heat sink. *International journal of thermal sciences*, 163: 1-12.

Li Y., Gong L., Xu M. and Joshi Y. 2020. Enhancing the performance of aluminum foam heat sinks through integrated pin fins. *International Journal of heat and mass transfer*, 151: 1-11.

Mashaei P. R. and Hosseinalipour S. M. 2014. A numerical study of nanofluid forced convection in a porous channel with discrete heat sources. *Journal of porous media*, 17(6): 549-561.

Mohaparta S. C. An overview of liquid coolants for electronic cooling. https://www.electronics-cooling.com/2006/05/an-overview-of-liquid-coolants-for-electronics-cooling/ [Son erişim tarihi: 22.04.2022].

Morales P. F., Montoya C. A. C., Mesa J. A. P. and Navecerrada M. A. 2017. Thermal and permeability properties of metal aluminum foams for functional applications. *Bioengineering and chemical engineering*, 21(1): 1-12.

Nair S. C. 2014. An overview of recent nanofluid research. *International research journal of pharmacy*, 5(4): 239-243.

Nazari M., Ashouri M., Kayhani M. H. and Tamayol A. 2015. Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid through a pipe filled with metal foam. *International journal of thermal sciences*, 88: 33-39.

Nazari M., Karami M. and Ashouri M. 2014. Comparing the thermal performance of water, ethylene glycol, alümina and CNT nanofluids in CPU cooling: Experimental study. *Experimental thermal and fluid science*, 57: 371-377.

Nguyen C. T., Desgranges F., Galanis N., Roy G., Mare T., Boucher S. and Mintsa H. A. 2008. Viscosity data for Al_2O_3-water nanofluids-hysteresis: Is heat transfer enhacement using nanofluids reliable?. *International journal of thermal sciences*, 47: 103-111.

Nguyen C. T., Roy G., Galanis N. and Suiro S. 2006. Heat transfer enhancement by using Al_2O_3-water nanofluid in a liquid cooling system for microprocessors. 4th WSEAS, Int. conf. on heat transfer, thermal engineering and environmet, ss. 103-108, april 21-23, Elounda, Greece.

Ozbalci O. and Dogan A. 2018. Forced convection heat transfer from porous heat sinks placed in partially open cavity: Some case studies. *Experimental heat transfer*, 31(3): 183-193.

Ozbalci O. 2015. Kısmi açık bir hacim içerisine yerleştirilmiş metal köpük bloklardan ısı transferinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 58 s.

Pak C. B. and Cho Y. I. 2007. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental heat transfer an intarnational journal*, 11: 151-170.

Pang C., Jung J. Y., Lee J. W. and Kang T. Y. 2012. Thermal conductivity measurement of methanol-based nanofluids Al_2O_3 and SiO_2 nanoparticles. *International journal of heat and mass transfer*, 55: 5597-5602.

Pourfarzad E., Ghadiri K., Behrangzade A. and Ashjaee M. 2018. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop of alümina-water nano-fluid in a porous miniature heat sink. *Experimental heat transfer*, 1-18.

Pradhan N. R., Duan H., Liang J. and Lannacchione G. S. 2009. The specific heat and effective thermal conductivity of composites containing single-wall and multi-wall carbon nanotubes. *Nanothecnology*, 20: 1-7.

Qi C., Chen T., Tu J. and Yan Y. 2020. Effect of metal foam on exergy and entropy of nanofluids in a heat sink applied for thermal management of electronic components. *International journal of energy research*, 44: 10628-10621.

Rabbani P., Hamzehpour A., Ashjaee M., Najafi M. and Houshfar E. 2019. Experimental investigation on heat transfer of MgO nanofluid in tubes partially filled with metal foam. *Powder technology*, 354: 734-742.

Rafati M., Hamidi A. A. and Niaser M. S. 2012. Application of nanofluids in computer cooling systems (Heat transfer performance of nanofluids). *Applied thermal engineering*, 45-46: 9-14.

Ranut P. and Nobile E. 2014. On the effective thermal conductivity of metal foams. *Journal of physics: Conference series*, 547: 1-11.

Rasam H., Roy P., Savoldi L. and Ghahremanian S. 2020. Numerical assessment of heat transfer and entropy generation of a porous metal heat sink for electronic cooling applications. *Enegies*, 13: 1-19.

Rudyak V. Y. and Minakov A. V. 2018. Thermophysical properties of nanofluids. *The european physical journal e*, 41(5): 1-12.

Sadeghi E., Hsieh S. and Bahrami M. 2011. Thermal conductivity and contact resistance of metal foams. *Journal of physics d: Applied physics*, 44: 1-7.

Saeedinia M., Akhavan-Behabadi M. A and Razi P. 2012. Thermal and rhelogical of CuO-base oil nanofluid flow inside circular tube. *International comminications in heat and mass transfer*, 39: 152-159.

Saghir M. Z. and Rahman M. M. 2020. Forced convection of Al_2O_3-Cu, TiO_2-SiO_2, FWCNT-Fe_3O_4 and ND-Fe_3O_4 hybrid nanofluid in porous media. *Energies*, 13: 1-19.

Sajid M. U., Ali H. M. and Bicer Y. 2020. Exergetic performance assessment of magnesium exide-water nanofluid in corrugated minichannel heat sinks: An experimental study. *International journal of energy research*, 1-17.

Sajid M. U., Ali H. M., Sufyan A., Rashid D., Zahid S. U. and Rehman W. U. 2019. Experimental investigation of TiO_2-water nanofluid flow and heat transfer inside wavy mini-channel heat sinks. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 137: 1279-1294.

Scott W. A., 1974. Cooling of electronic equipment. John wiley and sons – interscience. New York, USA.

Sertkaya A. A. 2013. Metal köpük ısı değiştiriciler, *Mühendis ve makine*, 54(646): 22-26.

Selvakumar P. and Suresh S. 2012. Convective performance of CuO/water nanofluid in an electronic heat sink. *Experimental thermal and fluid science*, 40: 57-63.

Seyf H. R. and Feizbakhshi M. 2012. Computational analysis of nanofluid effects on convective heat transfer enhancement of micro-pin-fin heat sinks. *International journal of thermal sciences*, 58: 168-179.

Sreelakshmy K. R., Aswathy S. N., Vidhya K. M., Saranya T. R. and Sreeja C. N. 2014. An overview of recent nanofluid research. *International research journal of pharmacy*, 5(4): 239-243.

Sung H. J., Kim S. Y. and Hyun J. M. 1995. Forced convection from an isolated heat source in a channel with porous medium. *Int. J. heat and fluid flow*, 16(6): 527-535.

Teng T. P. and Hung Y. H. 2012. Estimation and experimental study of the density and specific heat for alümina nanofluid. *Journal of experimental nanoscience*, 9(7): 2014.

Trutassanawin S. and Groll E. A. Reviev of refrigeration Technologies for high heat dissipation electronics cooling. *International refrigeration and air conditioning conference*, ss. 11. July 12-15, 2004. Purdue, ABD.

Turgut A., Sağlanmak Ş. Ve Doğanay S. 2016. Nanoakışkanların ısıl iletkenlik ve viskozitesinin deneysel incelenmesi: tanecik boyutu etkisi. *Journal of the faculty of engineering and architecture of Gazi University*, 31(1); 95-103.

Wang B. X., Zhou L. P. and Peng X. F. 2006. Surface and size effects on the specific heat capacity of nanoparticles. *International journal of thermophysics*, 27(1): 140-151.

Welsford C. A., Delisle C. S. and Saghir M. Z. 2019. Effects of nanofluid concentration and channeling on the thermal effectiveness of highly porous open-cell foam metals: a numerical and experimental study. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 1-11.

Wilson J. Cooling Solutions in the past decade. https://www.electronics-cooling.com/2005/11/cooling-solutions-in-the-past-decade/ [Son erişim tarihi: 22.04.2022].

Xie H., Wang J., Xi T., Liu Y. and Ai F. 2002. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alümina particles. *Journal of applied physics*, 91(7): 4568-4572.

Xu H., Gong L., Huang S. and Xu M. 2015. Flow and heat transfer characteristics of nanofluid flowing through metal foams. *International journal of heat and mass transfer*, 83: 399-407.

Yang K., Huang W., Li X. and Wang J. 2020. Analytical analysis of heat transfer and entropy generation in a tube filled with double-layer porous media. *Entropy*, 22: 1-23.

Yu W., France D., Timogeeva E. V., Singh D. and Routbort J. L. (2010). Thermophysical property-related comparison criteria for nanofluid heat transfer enhancement in turbulent flow. *Applied physics letters*, 96: 1-3.

Zhang Z., Wang X. and Yan Y. 2021. A review of the state of art in electronic cooling. *E-prime – Advantages in electrical engineering, electronics, energy*, 1: 1-26.

Zhao N., Guo L., Qi C., Chen T. and Cui X. 2019. Experimental study on thermo-hydraulic performance of nanofluids in CPU heat sink with rectangular grooves and cylindrical bugles based on exergy efficiency. *Exergy conversion and management*, 181: 235-246.

Zhu D., Li X., Wang N., Wang X., Gao J. and Li H. 2009. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al_2O_3-H_2O nanofluids. *Current applied physics*, 9: 131-139.

7. EKLER

EK – 1 Deney seti için örnek veriler ve analiz sonuçları

Çizelge 7.1. Örnek veriler ve analiz sonuçları (4817 W/m^2 ısı akısında, 50,6 L/h hacimsel debi)

Akışkan	Yüzey	T_g (°C)	$T_{ort,y}$ (°C)	R (Ohm)	$\dot{V}$ (L/h)	Re	h (W/m^{2}K)
TA	BOŞ	21.2	32.88	200	50.6	528.212	377.34
	10 PPI	21.2	30.98			527.010	455,51
	40 PPI	21	30.68			525.219	454,26
NA 16	BOŞ	21	32.24	200	50.6	364.362	405.02
	10 PPI	21.1	29.86			363.070	535.83
	40 PPI	20.5	29.34			359.669	577.33
NA 17	BOŞ	20.6	32.18	200	50.6	360.090	386.64
	10 PPI	20.5	29.18			359.669	532.77
	40 PPI	21.6	29.76			368.736	368.73
NA 18	BOŞ	21.2	32.24	200	50.6	365.228	407.30
	10 PPI	20.9	29.22			362.641	545.92
	40 PPI	21.3	28.4			365.663	616.36

Akışkan	Yüzey	Nu	R_{th} (K/W)	f	P_p (W)	ϵ	η
TA	BOŞ	17.12	0.221	15.069	0.001906	1	1
	10 PPI	20,67	0.238	17.703	0.002239	-	1.144
	40 PPI	20,63	0.206	21.037	0.002661	-	1.077
NA 16	BOŞ	13.58	0.313	16.147	0.002042	1.073	-
	10 PPI	17.97	0.244	20.993	0.002655	-	1.271
	40 PPI	17.60	0.246	24.560	0.003106	-	1.182
NA 17	BOŞ	11.98	0.322	16.180	0.002046	1.024	-
	10 PPI	16.50	0.242	16.373	0.002071	-	1.279
	40 PPI	17.88	0.227	25.338	0.003205	-	1.300
NA 18	BOŞ	11.80	0.304	16.669	0.002108	1.079	-
	10 PPI	15.82	0.232	17.781	0.002249	-	1.369
	40 PPI	17.86	0.198	21.004	0.002657	-	1.462

EK – 2 CPU ve GPU'ların maksimum ve optimum çalışma sıcaklık aralığı

Çizelge 7.2. Farklı modellerde, **a)** CPU (Intel Modelleri); **b)** CPU (AMD Modelleri); **c)** GPU (Nvidia ve AMD) maksimum çalışma sıcaklıkları (Kumawat 2022)

a) Intel Marka İşlemciler		
Nesil	**Seri Modeli**	**Maksimum Sıcaklık (°C)***
10. Nesil	i9 İşlemciler	86-94
	i7 İşlemciler	100
	i5 İşlemciler	100
	i3 İşlemciler	100
	Pentium Modelleri	100
	Celeron Modelleri	100
9. Nesil	i9 İşlemciler	84-100
	i7 İşlemciler	95-100
	i5 İşlemciler	100
	i3 İşlemciler	100
	Pentium Gold Modelleri	100
	Celeron Modelleri	100
8. Nesil	i9 İşlemciler	100
	i7 İşlemciler	100
	i5 İşlemciler	100
	i3 İşlemciler	82-105
	Pentium Gold Modelleri	88-100
	Celeron Modelleri	88-100
7. Nesil	i9 İşlemciler	94,102
	i7 İşlemciler	80-100
	i5 İşlemciler	80-100
	i3 İşlemciler	92-100
	M3 Modelleri	100
	Pentium Modelleri	92-100
	Pentium Silver Modelleri	105
	Celeron Modelleri	92-105

Çizelge 7.2.'nin devamı

6. Nesil	i7 İşlemciler	64-71 (6700K, 7685R, 6700, 6785R, 6700 v 6700T İskelet Sıcaklığı), 100 (Diğer)
	i5 İşlemciler	64-71 (6600K, 6685R, 6600, 6585R, 6500, 6402P, 6400, 6600T, 6500T, 6400T İskelet Sıcaklığı), 100 (Diğer)
	i3 İşlemciler	65-66 (6320, 6300, 6100, 6300T, 6100T, 6098P İskelet Sıcaklığı), 100 (Diğer)
	M7 Modelleri	100
	M5 Modelleri	100
	M3 Modelleri	100
	Pentium Modelleri	100
	Celeron Modelleri	100
5. Nesil	i7 İşlemciler	105
	i5 İşlemciler	105
	i3 İşlemciler	105
	Pentium Modelleri	105
	Celeron Modelleri	105
	M Modelleri	95
b) AMD Marka İşlemciler		
Nesil	**Seri Modeli**	**Maksimum Sıcaklık (°C)***
Ryzen 4000 Serisi (Zen 3 ve Zen 2)	Ryzen 7	105
	Ryzen 5	105
	Ryzen 3	105
Ryzen 3000 Serisi (Zen 2 ve Zen +)	Threadripper	95
	Ryzen 9	95
	Ryzen 7	95-105
	Ryzen 5	95-105
	Ryzen 3	95-105
Ryzen 2000 Serisi (Zen + ve Zen)	Threadripper	68
	Ryzen 7	85-105
	Ryzen 5	95-105
	Ryzen 3	105
Ryzen 1000 Serisi (Zen)	Threadripper	68
	Ryzen 7	95
	Ryzen 5	95
	Ryzen 3	95
Bristol Ridge	A12	90
	A10	90
	A8	90
	A6	90

Çizelge 7.2.'nin devamı

c) Nvidia GPU		
Seri	**Model**	**Maksimum Sıcaklık (°C)**
GeForce 20 Serisi	Titan RTX	89
	RTX 2090 Ti	89
	RTX 2080 Super	89
	RTX 2080	88
	RTX 2070 Super	88
	RTX 2070	89
	RTX 2060 Super	89
	RTX 2060	88
GeForce 16 Serisi	GTX 1660 Ti	95
	GTX 1660	95
	GTX 1650	92
GeForce 10 Serisi	TITAN V	91
	TITAN Xp	94
	GTX 1080 Ti	91
	GTX 1080	94
	GTX 1070 Ti	94
	GTX 1070	94
	GTX 1060	94
	GTX 1050 Ti	97
	GTX 1050	97
	GTX 1030	97
GeForce 900	TITAN X	91
	GTX 980 Ti	92
	GTX 980	98
	GTX 970	98
	GTX 960	98
	GTX 950	95
GeForce 700	GTX TITAN Z	95
	GTX TITAN Black	95
	GTX 780 Ti	95
	GTX 780	95
	GTX 770	98
	GTX 760	97
	GTX 750 Ti	95
	GTX 750	95
	GT 740	98
	GT 730	98
	GT 720	98
	GT 710	95

Çizelge 7.2.'nin devamı

GeForce 600	GTX 690	98
	GTX 680	98
	GTX 670	97
	GTX 660 Ti	97
	GTX 660	97
	GTX 650 Ti	105
	GTX 650	98
	GT 640	98
	GT 630	98
	GT 620	98
	GT 610	102
AMD GPU		
Seri		**Maksimum Sıcaklık (°C)**
AMD Radeon Serileri		90-95

(* Verilen sıcaklıklar, aynı nesil ve işlemci modelinde bulunan, farklı serideki işlemcilerin maksimum çalışma sıcaklık değerleridir.)

Çizelge 7.3. Intel ve AMD marka işlemcilerden populer olan modellerin optimum çalışma sıcaklığı aralığı (Kumawat 2020)

İşlemci Serileri	**Ortalama Sıcaklık Aralığı (°C)**
Intel Core i7	50-65
Intel Core i5	50-62
Intel Core i3	50-60
Intel Core 2 Duo	45-55
Intel Pentium Pro	75-85
Intel Pentium Mobile	70-85
Intel Pentium 4	45-65
Intel Pentium 3	60-85
Intel Celeron	67-85
AMD A10	50-60
AMD A6	45-57
AMD Athlon	85-95
AMD Athlon 64	45-60
AMD Athlon FX	45-60

EK – 3 Bilinen bazı HDD (Geleneksel bellek) ve SSD (Yüksek hızlı bellek) modellerinin optimum çalışma sıcaklık aralığı

Çizelge 7.4. Bilinen bazı HDD (Geleneksel bellek) ve SSD (Yüksek hızlı bellek) modellerinin optimum çalışma sıcaklık aralığı (Kumawat 2020)

Cihaz İsmi	**Çalışma Sıcaklığı (°C)**
WD Blue HDD	0-60
Seagate Barracuda HDD	0-60
ADATA Ultimate SU800 SSD	0-70
Samsung Evo 860 SSD	0-70
WD Green SSD	0-70
Samsung Evo 960 m.2 SSD	0-70
Intel Optane Memory	0-70

ÖZGEÇMİŞ

OĞUZHAN ÖZBALCI

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2015-2022	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2012-2015	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2008-2012	Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Uşak

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi **2015-2022**	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. Dogan A., Ozbalci O. and Atmaca İ. (2016). Experimental investigation of natural convection from porous blocks in a cavity. Journal of porous media. 19(12), 1023-1032. Doi: 10.1615/jpormedia.v19.i12.10

2. Ozbalci O. and Dogan A. (2018). Forced Convection heat transfer from porous heat sinks placed in partially open cavity: Some case studies, Experimental heat transfer. 31(2), 183-193. Doi: 10.1080/08916152.2017.1397820.