

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**OTOMOBİL RADYATÖRÜNDE  $TiO_2$  ESASLI NANOAKIŞKAN  
KULLANIMININ ISI TRANSFER PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**Sezgi KOÇAK SOYLU**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**HAZİRAN 2018**

**ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**OTOMOBİL RADYATÖRÜNDE  $TiO_2$  ESASLI NANOAKIŞKAN  
KULLANIMININ ISI TRANSFER PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**Sezgi KOÇAK SOYLU**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**HAZİRAN 2018**

**ANTALYA**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOBİL RADYATÖRÜNDE  $TiO_2$  ESASLI NANOAKIŞKAN  
KULLANIMININ ISI TRANSFER PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**Sezgi KOÇAK SOYLU  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
DOKTORA TEZİ**

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon  
Birimi tarafından FDK-2016-1499 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**HAZİRAN 2018**

**T.C.**  
**AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOBİL RADYATÖRÜNDE  $TiO_2$  ESASLI NANOAKIŞKAN**  
**KULLANIMININ ISI TRANSFER PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**Sezgi KOÇAK SOYLU**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**  
**DOKTORA TEZİ**

Bu tez 27/06/2018 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İbrahim ATMACA (Danışman) .....

Prof. Dr. Meltem ASİLTÜRK .....

Doç. Dr. Ayla DOĞAN .....

Doç. Dr. Ahmet COŞKUN .....

Doç. Dr. Orhan EKREN .....

## ÖZET

### OTOMOBİL RADYATÖRÜNDE $TiO_2$ ESASLI NANOAKIŞKAN KULLANIMININ ISI TRANSFER PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Sezgi KOÇAK SOYLU

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim ATMACA

Haziran 2018; 148 Sayfa

Bu tez çalışması kapsamında otomobil radyatörlerinde nanoakışkan kullanımının ısı transfer performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. 4 farklı türde nanopartikül, nanoakışkanlarda kullanılmak üzere hazırlanmıştır; (i) saf  $TiO_2$ , (ii) %0.1  $Ag$  katkılı  $TiO_2$ , (iii) %0.3  $Ag$  katkılı  $TiO_2$ , (iv) %0.1  $Cu$  katkılı  $TiO_2$ . İlgili nanopartiküller temel akışkan içerisine (hacimce 50:50 oranında etilen glikol – su çözeltisi) %0.3, 0.5, 1 ve 2 oranlarında eklenmiştir. Deneyler gerçek bir otomobil radyatörünün kullanıldığı ve uygulamadaki sistemlere mümkün olan en yakın şartlarda tasarlanmış bir düzenekte farklı debi değerleri (17, 19, 21, 23 ve 25 l/dk) için gerçekleştirilmiştir. İlgili debi değerlerine karşılık gelen Reynolds sayıları ( $Re$ ); temel akışkan için 337 – 496 aralığında değişirken, nanoakışkanlar ise 370 – 830 aralığında değerler almıştır. Radyatörün hava tarafında ise 3500  $m^3/h$ 'lik sabit debi ( $Re = 930$ ) ile çalışılmıştır. Deney düzeneğinde performansı test edilen akışkanların aynı şartlar altında karşılaştırılabilmesi için tüm deneyler yaklaşık 8.6 kW sabit ısıtıcı gücü ile yapılmıştır.

Tez çalışmasının ana hedefi, otomobil radyatörlerinde kullanılan geleneksel soğutma sıvılarının yerine nanoakışkanlar kullanarak ısı transfer performansını artırılmasıdır. Böyle bir çalışma gerçekleştirerek ulaşılmaya çalışılan fayda ise motor soğutma sistemlerinin boyutlarını küçülterek, daha hafif ve daha az yakıt tüketen araçlar geliştirilmesine katkı sağlamaktır. Böylece ulaşım endüstrisi gibi çok geniş bir kullanım alanına yönelik önemli bir iyileştirme yapılmış olacaktır. Bu hedefe yönelik olarak yapılan çalışmada, birçok yenilikçi yaklaşım ile hareket edilmiştir.

Metal katkılanmış metal oksit yapıların saf hallerine kıyasla daha iyi veya tamamen farklı özellikler sergilediği bilinmektedir. Ancak  $Cu$  ve  $Ag$  gibi yüksek ısı iletim katsayısına sahip metallerin katkılı olduğu  $TiO_2$  temelli nanoakışkanların hazırlanması ve bunların ısı transfer sistemlerinde kullanılmasına dair bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu tip yeni tür nanoakışkanların, nanoakışkan kullanımının bile henüz çok yeni olduğu otomobil radyatörü model soğutma sisteminde denenmesi ve partikül özelliği – motor soğutma sistem parametreleri ilişkilerinin incelenmesi bütünüyle yeni, özgün ve kapsamlı bir çalışmadır.

Nanoakışkanlar gerek içerdikleri nanopartiküller gerekse hazırlanma yöntemleri açısından birbirlerinden oldukça farklıdır. Dolayısıyla termofiziksel özelliklerin ampirik denklemler ile tespiti oldukça zordur ve önemli hatalara yol açar. Bu nedenle tez çalışması kapsamında özgün olarak hazırlanıp kullanılan tüm nanopartikül ve nanoakışkanların

termofiziksel özellikleri, sıcaklığa bağlı değişimleri de göz önünde bulundurularak deneysel ölçümler ile tespit edilmiş, hesaplarda hassas şekilde kullanılmış ve literatüre kazandırılmıştır. Nanoakışkanlar hazırlanırken kararlılık sağlamak amacıyla ek kimyasallar kullanılmamıştır. Çünkü süspansiyon içerisine eklenen her yeni kimyasal, karışıma başka özellikler kazandırarak incelenmek istenen nanoakışkanı sadelikten uzaklaştırmaktadır. Bu yönleriyle mevcut tez çalışması, literatürde karşılaşılan çalışmaların büyük bir çoğunluğundan ayrılmaktadır.

Çalışmanın sonuçları hem deneysel hem de teorik analizler ile değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre konsantrasyon artışına bağlı olarak ısı iletkenliğinde net bir değişim gözlenen grup %0.3 *Ag* katkılı nanoakışkanlar olmuştur. İlgili nanoakışkanlarda nanopartikül konsantrasyonu arttıkça, logaritmik ortalama sıcaklık farkı düşmüş, toplam ısı transfer katsayısı artmıştır. En büyük artış, %1 ve %2 konsantrasyona sahip akışkanlarda sırasıyla %5.615 ve %11.094 olarak tespit edilmiştir. Isı transferindeki artışı basınç kayıpları ile bir arada değerlendiren performans analizinin sonuçlarına göre, deneysel performans faktörünün 1'den büyük olduğu ( $\eta > 1$ ) akışkanlar, aynı akışkanlar olmuştur.

Uygulamada yaşanan problemlerin çözülmesi halinde nanoakışkanların ulaşabilecekleri maksimum potansiyelin tespiti amacıyla teorik analizler gerçekleştirilmiştir. Akışkanları termofiziksel özellikleri temelinde kıyaslayan Mouromtseff sayısına göre, 13 nanoakışkanın tamamının, temel akışkandan daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu potansiyel en düşükten en yükseğe doğru olmak üzere saf  $TiO_2$ 'den % 0.1 ve %0.3 katkılı akışkanlara doğru sıralanmaktadır. *Ag* katkısının sentezlenen nanopartiküllerin ısı transfer özelliklerini iyileştirmede en başarılı olduğu ve katkı oranı arttıkça sağlanan faydanın arttığını söylemek mümkündür. Akışkanların ısı iletkenlik ölçümleri de bu sonuçları destekler niteliktedir. Teorik analiz sonuçlarına göre taşınım katsayısındaki artışlar %0.3 *Ag* katkılı %1 ve %2'lik nanoakışkanlarda sırasıyla %26.15 ve %27.72 olarak tespit edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Isı transferi, katkılama, nanoakışkan, otomobil radyatörü, otomotiv, termofiziksel özellikler

**JÜRİ:** Doç. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Meltem ASİLTÜRK

Doç. Dr. Ayla DOĞAN

Doç. Dr. Ahmet COŞKUN

Doç. Dr. Orhan EKREN

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF $TiO_2$ BASED NANOFLUID USAGE ON HEAT TRANSFER PERFORMANCE IN AUTOMOBILE RADIATOR

Sezgi KOÇAK SOYLU

PhD. Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim ATMACA

June 2018, 148 pages

In the context of this thesis, effects of using nanofluids on heat transfer performance in automobile radiators was investigated. 4 different types of nanoparticles were prepared to be used in nanofluids; (i) pure  $TiO_2$ , (ii)  $TiO_2$  doped with 0.1%  $Ag$ , (iii)  $TiO_2$  doped with 0.3%  $Ag$ , (iv)  $TiO_2$  doped with 0.1%  $Cu$ . These nanoparticles added into base-fluid (50:50 ethylene glycol – water mixture by volume) with ratios of 0.3, 0.5, 1 and 2%. The experiments were carried out for different flow rates (17, 19, 21, 23 and 25 l/min) in an experimental setup where a real automobile radiator was used and specifically designed to simulate the real – environment as best as it could. With the given flow rates, Reynolds number ( $Re$ ) were calculated for base-fluid and nanofluids and found to be varying from 337 to 496 (base fluid) and from 370 to 830 (nanofluids). Air side of the radiator had constant air flow rate ( $\dot{V} = 3500 \text{ m}^3/h, Re = 930$ ). To compare heat transfer performance of each nanofluid under same conditions, all experiments were conducted with a constant power heat source (8.6 kW).

The main goal of this thesis is to substitute the traditional cooling fluids that are used in automobile radiators with nanofluids to increase thermal performance. The benefit of this study is to contribute to the development of an automobile with lesser weight and thus lesser fuel consumption due to the downsizing of its cooling system. In a broader scope, outcomes of this thesis will aid to transportation industry. To achieve this goal, several innovative approaches were taken.

It is known that metal oxides doped with another metal show completely different and sometimes better characteristics when compared to their pure forms. However, literature is in absence of studies that are focused on preparation of nanofluids based on  $TiO_2$  doped with metals with high heat transfer coefficient such as  $Cu$  and  $Ag$  and usage of these nanofluids in cooling systems. Applications of new types of nanofluids in model engine cooling system (automobile radiator) where even the usage of nanofluids are innovative, investigation of relationship between particle features and engine cooling system parameters ensures this thesis to be innovative, unique and comprehensive.

Each nanofluid is different than the other one. This is can be due to their nanoparticle composition or their chosen preparation method. Thus, it is difficult to calculate their thermophysical properties with empirical equations and this often leads to serious errors. Due to this threat, thermophysical properties of nanofluids and nanoparticles that prepared and used in context of this thesis are calculated from experimental observations while considering changes in the temperature and used for

precise calculations and presented to the scientific community. In the process of preparation of nanofluids, no additional chemicals are used to increase stability. As any chemical that is used adds a new feature to the mixture departs nanofluids from simplicity. With all these aspects, this thesis is different than the majority of the literature.

Results of this study evaluated as both experimentally and theoretically. According to experimental results a net change was observed in thermal conductivity of 0.3% Ag doped nanofluids. Increase in nanoparticle concentration of nanofluids decreased the log mean temperature difference and total heat transfer coefficient is increased. The highest increase for nanofluids with concentrations of 1% and 2% was found to be 5.615% and 11.094%, respectively. According to the results of performance analysis where increase in heat transfer and pressure losses are considered together, same nanofluids also fulfill  $\eta > 1$  condition (i.e. performance factor) experimentally.

Theoretical analyses were conducted to deduce the maximum potential of nanofluids in the absence of operational problems. According to Mouromtseff number where nanofluids are compared on thermophysical property basis, all 13 nanofluids are determined to be better than the base-fluid. This potential can be order ascendingly from pure  $TiO_2$  to 0.1% doped nanofluids and to 0.3% doped nanofluids. It is safe to say that doping with Ag improves heat transfer features of nanoparticles, and this improvement is consistent with increase in doping amount. Measured thermal conductivity of nanofluids also support these results. According to the results of the theoretical analysis, increase in convective heat transfer coefficient were determined to be 26.15% and 27.72% for 0.3% Ag doped nanofluids with concentration of 1% and 2%, respectively.

**KEYWORDS:** Automobile radiator, automotive, doping, heat transfer, nanofluid, thermophysical properties

**COMMITTEE:** Assoc. Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Meltem ASİLTÜRK

Assoc. Prof. Dr. Ayla DOĞAN

Assoc. Prof. Dr. Ahmet COŞKUN

Assoc. Prof. Dr. Orhan EKREN



## ÖNSÖZ

Büyük bilim insanlarından ilham alınarak bilim dünyasına kazandırılan, birçok alanda önemli buluşlar yapılmasına ve mevcut teknolojilerin geliştirilmesine olanak sağlamış nanoteknoloji hem günümüz hem de geleceğin tartışmasız en önemli ve öncelikli araştırma alanlarından bir tanesidir. Benzer şekilde insanların en temel ihtiyaçlarından biri olan ulaşım da sürekli olarak geliştirilmeye ihtiyaç duyulan ve bu alanda yapılan her çalışmanın önemli yaygın etkilerinin olduğu bir sektördür.

Bu iki önemli konuyu ortak bir noktada birleştirerek hem termodinamik hem de malzeme bilim dallarındaki araştırmalara katkı sağlamasını umut ettiğim bu doktora tez çalışmasının, nanoakışkanlar ile çalışan bilim insanlarına ve otomobil radyatörlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalara ve uygulamalara faydalı olması beni onurlandıracaktır.

Kelime kökeni ile “*bilgelik sevgisi*” nden gelen doktoramı; bilimsel kriterlere ve etiğe uygun bir şekilde, şartların zorluğu karşısında yılmadan mücadele ederek, her zaman sahip olduğum araştırma, yeni bir şeyler öğrenme merakımı kaybetmeden ve ilkelerimden vazgeçmeden tamamlamanın mutluluğu içerisindeyim.

İyi bir akademisyen olabilme hayali ile çıktığım bu yolda, ilk günden beri öğrendiğim her şeyi borçlu olduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. İbrahim ATMACA’ya; bilimsel bilgi, beceri ve tecrübesinin yanında insanlığı ile de bu zorlu süreçte hayatım boyunca minnettar kalacağım çok önemli değerler kazanmamı sağladığı, her yönüyle örnek bir danışman olduğu için sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca; bu tez çalışmasına gönülden inanarak sahiplenen ve tüm aşamaları merakla takip edip bilgi ve desteğini esirgemeyen, akademisyen kişiliğine büyük hayranlık duyduğum değerli hocam Prof. Dr. Meltem ASİLTÜRK’e, kendisi de aynı süreçten geçmesine ve kısıtlı zamanına rağmen teknik ve manevi destekleri için Dr. Fatih GÜVEN’e, nanopartikül sentezi ve nanoakışkanların hazırlanmasındaki emeklerinin yanında tüm iyi niyeti ile gösterdiği arkadaşlık için Dr. Zerin YEŞİL ACAR’a, tezin içeriğinde kullanılan fotoğrafların oluşturulmasında vermiş olduğu profesyonel destek için Sayın Ahmet Sait YILDIZ’a, bugüne kadar edindiğim tüm kıymetli bilgiler için öğrenim hayatım boyunca bana katkısı olmuş adını tek tek sayamadığım tüm öğretmenlerime ve sevgili annem, babam ve ablam başta olmak üzere canım ailemin tüm fertlerine bana her zaman inandıkları, koşulsuz destekledikleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak hayat arkadaşım İnanç SOYLU’ya, sonsuz sabrı, sevgisi, anlayışı ve beni ben yapan her şey için, hayatımın her noktasında tarifi mümkün olmayan desteği ile yolumu aydınlattığı için tüm kalbimle teşekkür ederim. Bu yolda senin ışığın olmadan yürüyemezdim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	5
ABSTRACT.....	7
ÖNSÖZ.....	i
AKADEMİK BEYAN.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	7
2.1. Nanoakışkanlar.....	7
2.1.1. Nanopartikül sentezi ve nanoakışkan hazırlama yöntemleri.....	7
2.1.1.1. Tek aşamalı metot.....	7
2.1.1.2. İki aşamalı metot.....	7
2.1.2. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri.....	8
2.1.2.1. Isıl iletkenlik.....	8
2.1.2.2. Viskozite.....	9
2.1.2.3. Yoğunluk.....	10
2.1.2.4. Özgül ısı.....	10
2.1.3. Nanoakışkanların uygulama alanları.....	11
2.1.4. Nanoakışkan uygulamalarında aşılması gereken problemler.....	12
2.2. Isı Değiştiricileri.....	13
2.2.1. Isı değiştiricilerinin sınıflandırılması.....	13
2.2.2. Kompakt ısı değiştiricileri.....	15
2.2.3. Isı değiştiricilerinin ısı analizi.....	16
2.2.3.1. İç akışa ilişkin bazı önemli kavramlar.....	16
2.2.3.2. Analiz yöntemleri.....	22
2.3. Otomobillerde Motor Soğutma Sistemleri.....	29
2.3.1. Hava soğutmalı sistemler.....	29
2.3.2. Sıvı soğutmalı sistemler.....	29
2.4. Otomobil Radyatörlerinde Nanoakışkan Kullanımına Yönelik Çalışmalar.....	31
2.4.1. Sabit Re sayısı yaklaşımı kullanılarak yapılmış çalışmalar.....	35

2.4.2. Sabit pompa gücü yaklaşımı kullanılarak yapılmış çalışmalar.....	40
2.4.3. Sabit hacimsel debi yaklaşımı kullanılarak yapılmış çalışmalar .....	40
2.4.4. Çeşitli deneysel parametrelerin değişimine göre ısı transfer performansını inceleyen çalışmalar.....	43
2.4.5. Farklı grup nanopartiküller kullanılarak yapılan çalışmalardan örnekler....	45
2.5. Tezin Amacı, Katkısı ve Yenilikleri.....	47
3. MATERYAL VE METOT .....	51
3.1. Materyal.....	51
3.1.1. Tez çalışmasında kullanılan akışkanlar .....	51
3.1.2. Partiküllerin sentezi ve karakterizasyonu .....	53
3.1.2.1. Saf $TiO_2$ sentezi .....	53
3.1.2.2. Metal iyonu katkılı $TiO_2$ sentezi .....	53
3.1.2.3. X Işınlari kırınımı analizi.....	54
3.1.2.4. Partikül boyut dağılımı analizi.....	55
3.1.2.5. Partikül yüzey alanı dağılımı analizi (BET analizi).....	55
3.1.2.6. Geçirmeli elektron mikroskopi analizi (TEM analizi).....	57
3.1.2.7. Partiküllerin termofiziksel özellik analizleri.....	60
3.1.3. Nanoakışkanların hazırlanması ve karakterizasyonu.....	63
3.1.3.1. Nanoakışkanların hazırlanması .....	63
3.1.3.2. Nanoakışkanların termofiziksel özellik analizleri .....	64
3.1.4. Deney düzeneği ve elemanları.....	71
3.2. Metot .....	88
3.2.1. Deneysel parametrelerin belirlenmesi .....	88
3.2.2. Geometrik parametrelerin belirlenmesi .....	93
3.2.3. Isı transfer analizi .....	97
3.2.3.1. Verilerin doğruluğunun ve güvenilirliğinin araştırılması .....	98
3.2.3.2. Deneysel analiz .....	104
3.2.3.3. Belirsizlik analizi .....	105
3.2.3.4. Teorik analiz (Potansiyel araştırması) .....	107
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	111
4.1. Doğruluk ve Güvenilirlik Analizinden Elde Edilen Sonuçlar.....	111
4.2. Deneysel Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar .....	112

4.3. Teorik Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar (Potansiyel Araştırması).....	122
5. SONUÇLAR .....	131
6. KAYNAKLAR .....	137
7. EKLER.....	146
EK – 1 Literatür çalışmalarının karşılaştırılması .....	146
EK – 2 rnek bir deney seti için veriler ve analiz sonuçları.....	147
EK – 3 rnek bir teorik hesaplama için veriler ve analiz sonuçları.....	148

## AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Otomobil Radyatöründe  $TiO_2$  Esaslı Nanoakışkan Kullanımının Isı Transfer Performansı Üzerine 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.

...../...../.....

.....

Sezgi KOÇAK SOYLU

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$A$	: Toplam alan [ $m^2$ ]
$C$	: Isıl kapasitans [ $W/^\circ C$ ]
$c_p$	: Özgül ısı [ $J/kgK$ ]
$D$	: Genişlik [ $m$ ]
$D_h$	: Hidrolik çap [ $m$ ]
$F$	: Düzeltme faktörü
$Gz$	: Graetz sayısı
$h$	: Isı taşınım katsayısı [ $W/m^2K$ ]
$H$	: Yükseklik [ $m$ ]
$k$	: Isı iletim katsayısı [ $W/mK$ ]
$L$	: Uzunluk [ $m$ ]
$m$	: Kütle [ $kg$ ]
$\dot{m}$	: Kütleli debi [ $kg/s$ ]
$Mo$	: Mouromtseff sayısı
$n$	: Adet
$Nu$	: Nusselt sayısı
$p$	: Hatve [ $m$ ]
$Pr$	: Prandtl sayısı
$\dot{Q}$	: Isı transferi [ $W$ ]
$Re$	: Reynolds sayısı
$R_w$	: Duvarın ısı iletim direnci [ $K/W$ ]
$s$	: Kalınlık [ $m$ ]
$T$	: Sıcaklık [ $K$ ]
$u$	: Hız [ $m/s$ ]

$U$	: Toplam ısı transfer katsayısı [ $W/m^2K$ ]
$V$	: Hacim [ $m^3$ ]
$\dot{V}$	: Hacimsel debi [ $l/dk$ ]
$X_H$	: Hidrodinamik giriş uzunluğu [ $m$ ]
$X_T$	: Isıl giriş uzunluğu [ $m$ ]
$\Delta P$	: Basınç farkı [ $bar$ ]
$\eta_k$	: Bir kanatçığın verimi
$\mu$	: Dinamik viskozite [ $Pa \cdot s$ ]
$\varepsilon$	: Etkenlik
$\alpha$	: Isıl yayılım katsayısı [ $m^2/s$ ]
$\nu$	: Kinematik viskozite [ $m^2/s$ ]
$\phi$	: Konsantrasyon
$\Delta T_{ln}$	: Logaritmik ortalama sıcaklık farkı
$\eta$	: Performans faktörü
$\sigma$	: Serbest akış alanının ön yüzey alanına oranı
$\delta$	: Sınır tabaka kalınlığı [ $m$ ]
$\eta_o$	: Toplam yüzey verimi
$\rho$	: Yoğunluk [ $kg/m^3$ ]
$\beta$	: Yüzey alanı yoğunluğu

### **Alt indisler**

$a$	: Yassı kesitli boru tarafı
$b$	: Boru
$\zeta$	: Çıkış
$g$	: Giriş
$h$	: Hava

<i>i</i>	: İletim
<i>k</i>	: Kanatçık
<i>na</i>	: Nanoakışkan
<i>ön</i>	: Ön yüzey
<i>p</i>	: Partikül
<i>r</i>	: Radyatör
<i>sa</i>	: Serbest akış
<i>ta</i>	: Temel akışkan
<i>y</i>	: Yüzey

### **Üst indisler**

\* : Birim hücreye ait geometrik özellikler

### **Kısaltmalar**

ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
A.Ü.	: Akdeniz Üniversitesi
BET	: Brunauer – Emmett – Teller
CNDG	: Nitrojen katkılı grafen nano levha
CNT	: Karbon nanotüp
LMTD	: Logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemi
PID	: Oransal integral türevsel
PLC	: Programlanabilir mantıksal denetleyici
SSR	: Katı hal röle
TEM	: Geçirmeli elektron mikroskobu
t.a.	: Tam aralık



XRD : X ışınları kırınımı

$\epsilon$ -NTU : Etkenlik geçiş birimi sayısı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 2.1.</b> Isı değiştiricilerin farklı yaklaşımlara göre sınıflandırılması.....	14
<b>Şekil 2.2.</b> Farklı tiplerde genişletilmiş yüzeyle sahip ısı değiştiricileri: a) düz levha kanatlı, yassı borulu b) düz levha kanatlı, dairesel borulu c) dairesel kanatlı, dairesel borulu d) tek geçişli levha kanatlı e) ok geçişli levha kanatlı (Incropera vd. 2011) .....	15
<b>Şekil 2.3.</b> Dairesel bir boruda laminer akış için hidrodinamik sınır tabakanın gelişimi.....	17
<b>Şekil 2.4.</b> Dairesel bir boruda laminer akış için ısıl sınır tabakanın gelişimi .....	18
<b>Şekil 2.5.</b> Boru içerisinde taşınım katsayısının değişimi .....	20
<b>Şekil 2.6.</b> Boru içerisinden laminer akışta ısıl ve birleşik giriş bölgeleri için yerel Nu sayılarının değişimi (Kays ve Crawford 1980) .....	21
<b>Şekil 2.7.</b> Isı değiştiricilerde kullanılan çeşitli akış düzenlemelerinde oluşan sıcaklık dağılımları: a) ters yönlü, b) aynı yönlü, c) apraz (karışmayan).....	27
<b>Şekil 2.8.</b> rnek bir sıvı soğutmalı motor soğutma sistemi (“ <a href="https://oxychemcorporation.com.ph/radiator-coolant/">https://oxychemcorporation.com.ph/radiator-coolant/</a> ”).....	30
<b>Şekil 3.1.</b> Saf, Ag ve Cu katkılanmış $TiO_2$ nanopartiküllerinin XRD spektrumları .....	54
<b>Şekil 3.2.</b> Saf, Ag ve Cu katkılanmış $TiO_2$ nanopartiküllerinin partikül boyut dağılımı eğrileri.....	56
<b>Şekil 3.3.</b> Saf $TiO_2$ nanopartiküllerine ait TEM fotoğrafı .....	57
<b>Şekil 3.4.</b> %0.1 Ag katkılanmış $TiO_2$ partiküllerine ait TEM fotoğrafı .....	58
<b>Şekil 3.5.</b> %0.1 Cu katkılanmış $TiO_2$ partiküllerine ait TEM fotoğrafı .....	58
<b>Şekil 3.6.</b> %0.3 Ag katkılanmış $TiO_2$ partiküllerine ait TEM fotoğrafı .....	59
<b>Şekil 3.7.</b> %0.3 Cu katkılanmış $TiO_2$ partiküllerine ait TEM fotoğrafı .....	59
<b>Şekil 3.8.</b> Saf $TiO_2$ partikülleri için özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	61
<b>Şekil 3.9.</b> %0.1 Ag katkılanmış $TiO_2$ partikülleri için özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	61
<b>Şekil 3.10.</b> %0.1 Cu katkılanmış $TiO_2$ partikülleri için özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	62
<b>Şekil 3.11.</b> %0.3 Ag katkılanmış $TiO_2$ partikülleri için özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	62
<b>Şekil 3.12.</b> Radyatörün çeşitli açılardan ekilmış fotoğrafları: a) n b) arka .....	72

<b>Şekil 3.13.</b> Radyatörde kullanılan kanatçık tipini gösteren detay fotoğraflar.....	72
<b>Şekil 3.14.</b> Radyatöre ait teknik resim .....	72
<b>Şekil 3.15.</b> Yassı kesitli boru detayı .....	73
<b>Şekil 3.16.</b> Kanatçık detayı .....	73
<b>Şekil 3.17.</b> Pervane tip anemometre .....	75
<b>Şekil 3.18.</b> Hava hızı kalibrasyon bloğunun çeşitli açılardan çekilmiş fotoğrafları .....	75
<b>Şekil 3.19.</b> Ölçüm cihazlarının deney düzeneği üzerindeki yerleşimleri.....	77
<b>Şekil 3.20.</b> Depo ve rezistansı çeşitli açılardan gösteren fotoğraflar .....	78
<b>Şekil 3.21.</b> Pompanın by-pass hattı ile beraber bağlantı şekli .....	80
<b>Şekil 3.22.</b> Debimetrenin sistem üzerindeki bağlantı şekli.....	81
<b>Şekil 3.23.</b> Otomasyon panosuna ait fotoğraflar.....	82
<b>Şekil 3.24.</b> Otomobil radyatörü model sisteminin şematik gösterimi.....	84
<b>Şekil 3.25.</b> Otomobil radyatörü model sisteminin üretim öncesi tasarım çizimleri; a) ön görünüş, b) arka görünüş.....	85
<b>Şekil 3.26.</b> Üretim aşamalarına ait çeşitli fotoğraflar .....	85
<b>Şekil 3.27.</b> Üretim ve montajı tamamlanan deney düzeneğine ait çeşitli açılardan çekilmiş fotoğraflar; a) ön görünüş, b) arka görünüş.....	86
<b>Şekil 3.28.</b> Üretim ve montajı tamamlanan deney düzeneğine ait çeşitli açılardan çekilmiş fotoğraflar; c) sağ görünüş, d) sol görünüş.....	87
<b>Şekil 3.29.</b> Farklı hava debilerine karşılık radyatör yüzey ile ortalama hava ve akışkan sıcaklıklarının değişimi .....	91
<b>Şekil 3.30.</b> Logaritmik ortalama sıcaklık farkı ifadesinin şematik gösterimi .....	100
<b>Şekil 4.1.</b> Saf su için deneysel taşınım katsayılarının literatürde önerilen denklemlerden elde edilen değerler ile karşılaştırması .....	112
<b>Şekil 4.2.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan akışkana aktarılan ısı miktarı karşılaştırılması.....	113
<b>Şekil 4.3.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan logaritmik ortalama sıcaklık farkı değerlerinin karşılaştırılması: tüm akışkanlar .....	114
<b>Şekil 4.4.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan logaritmik ortalama sıcaklık farkı değerlerinin karşılaştırılması: %0.3 Ag katkılı nanoakışkanlar .....	114

<b>Şekil 4.5.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan toplam ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması: tüm akışkanlar.....	115
<b>Şekil 4.6.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan toplam ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması: temel akışkana göre artış gösteren nanoakışkanlar.....	116
<b>Şekil 4.7.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan taşınım katsayılarının karşılaştırılması: tüm akışkanlar .....	118
<b>Şekil 4.8.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan taşınım katsayılarının karşılaştırılması: temel akışkana göre artış gösteren nanoakışkanlar .....	118
<b>Şekil 4.9.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için pompanın giriş ve çıkışı arasında ölçülen basınç farkları .....	119
<b>Şekil 4.10.</b> Deneysel sırasında ölçülen pompalama güçleri.....	119
<b>Şekil 4.11.</b> Deneysel verilerden elde edilen verilere göre akışkanların performans analizi.....	121
<b>Şekil 4.12.</b> Teorik analizden elde edilen verilere göre nanoakışkanların Mo sayılarının değişimi .....	123
<b>Şekil 4.13.</b> Temel akışkan için deneysel taşınım katsayılarının literatürde önerilen denklemlerden elde edilen değerler ile karşılaştırılması .....	124
<b>Şekil 4.14.</b> NA13 için deneysel taşınım katsayılarının literatürde önerilen denklemlerden elde edilen değerler ile karşılaştırılması .....	124
<b>Şekil 4.15.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan teorik taşınım katsayılarının karşılaştırılması: tüm akışkanlar.....	126
<b>Şekil 4.16.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan teorik taşınım katsayılarının karşılaştırılması: nanoakışkanlar .....	126
<b>Şekil 4.17.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan teorik toplam ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması: tüm akışkanlar .....	127
<b>Şekil 4.18.</b> Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan teorik toplam ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması: nanoakışkanlar .....	127
<b>Şekil 4.19.</b> Teorik analizden elde edilen verilere göre akışkanların performans analizi .....	129
<b>Şekil 4.20.</b> $\epsilon$ -NTU analizinden elde edilen radyatör etkinliğinin karşılaştırılması: tüm akışkanlar .....	130
<b>Şekil 4.21.</b> $\epsilon$ -NTU analizinden elde edilen radyatör etkinliğinin karşılaştırılması: nanoakışkanlar.....	130

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 1.1.</b> Çeşitli katı ve sıvı malzemelerin ısı iletim katsayıları.....	3
<b>Çizelge 2.1.</b> Bazı akış durumları ve akışkan çiftleri için yaklaşık $U$ değerleri (Incropera vd. 2011).....	25
<b>Çizelge 3.1.</b> Kullanılan kimyasal maddelere ait özellikler .....	53
<b>Çizelge 3.2.</b> Sentezlenen partiküllerin ortalama kristal boyutları.....	55
<b>Çizelge 3.3.</b> Sentezlenen partiküllerin yüzey alanları (BET analizi).....	56
<b>Çizelge 3.4.</b> Nanopartiküllerin yoğunluk değerleri.....	60
<b>Çizelge 3.5.</b> Deneysel çalışmada kullanılan akışkanlara ait detaylı açıklamalar.....	63
<b>Çizelge 3.6.</b> Temel akışkan yoğunluk değerleri .....	64
<b>Çizelge 3.7.</b> Akışkanların farklı sıcaklıklar için ölçülen dinamik viskozite değerleri....	66
<b>Çizelge 3.8.</b> Nanoakışkanların 25°C sabit sıcaklıkta bağlı ısı iletim katsayısı değerleri.....	66
<b>Çizelge 3.9.</b> Sentez ve karakterizasyon işlemlerinde yararlanılan üniversite laboratuvarları ve cihazların listesi .....	67
<b>Çizelge 3.10.</b> 25 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri .....	68
<b>Çizelge 3.11.</b> 23 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri .....	69
<b>Çizelge 3.12.</b> 21 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri .....	69
<b>Çizelge 3.13.</b> 19 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri .....	70
<b>Çizelge 3.14.</b> 17 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri .....	70
<b>Çizelge 3.15.</b> Radyatöre ait geometrik boyutlar .....	74
<b>Çizelge 3.16.</b> Pervane tip anemometreye ait teknik özellikler .....	75
<b>Çizelge 3.17.</b> Pt – 1000 Sıcaklık ölçerlere ait teknik özellikler.....	76
<b>Çizelge 3.18.</b> T – tipi ısı çifti ait teknik özellikler .....	76
<b>Çizelge 3.19.</b> Kızgın tel hava hızı ölçüm probuna ait teknik özellikler.....	76

<b>Çizelge 3.20.</b> Piezodirençli basınç transmitterlerine ait teknik özellikler .....	77
<b>Çizelge 3.21.</b> Pompaya ait teknik özellikler .....	79
<b>Çizelge 3.22.</b> Debimetreye ait teknik özellikler.....	80
<b>Çizelge 3.23.</b> Kanal tipi fana ait teknik özellikler .....	81
<b>Çizelge 3.24.</b> Otomasyon sisteminde kullanılan elemanların teknik özellikleri.....	83
<b>Çizelge 3.25.</b> Düşük debi aralığında yapılan deneylerde temel akışkan sıcaklığının değişimi .....	89
<b>Çizelge 3.26.</b> Değişken ısıtıcı güçlerini örnekleyen deneysel veriler .....	92
<b>Çizelge 3.27.</b> Çalışma kapsamında araştırılan deneysel parametreler .....	92
<b>Çizelge 3.28.</b> Hesaplamalardan elde edilen geometrik karakteristikler.....	98
<b>Çizelge 3.29.</b> Deneysel ölçümlerden elde edilen belirsizlik değerleri.....	106
<b>Çizelge 3.30.</b> Sonuç parametreleri için hesaplanan belirsizlik değerleri .....	107
<b>Çizelge 4.1.</b> Saf su deneylerinden elde edilen bazı önemli büyüklükler .....	111
<b>Çizelge 4.2.</b> Örnek bir deney seti için ( $V_a = 25 \text{ l/dk}$ ) hava tarafı hesaplamalarından elde edilen bazı önemli büyüklükler .....	117
<b>Çizelge 7.1.</b> Farklı yaklaşımlar ile yapılmış literatür çalışmalarında elde edilen bazı örnek sonuçların karşılaştırılması .....	146
<b>Çizelge 7.2.</b> Örnek bir deney seti (25 l/dk yassı kesitli boru içi akışkan debisi ve 3500 m <sup>3</sup> /h sabit hava debisi) için deneylerden elde edilen veriler ve analiz sonuçları .	147
<b>Çizelge 7.3.</b> Örnek bir teorik hesaplama (25 l/dk yassı kesitli boru içi akışkan debisi ve 3500 m <sup>3</sup> /h sabit hava debisi) için veriler ve analiz sonuçları .....	148

## 1. GİRİŞ

*“Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopaedia Britannica on the head of a pin?”*

Richard P. Feynman

Nanoteknoloji kavramı, 29 Aralık 1959’da Nobel ödüllü büyük bilim insanı Richard P. Feynman’ın klasik konuşması *“There’s Plenty of Room at the Bottom”* da yukarıdaki soru ilk kez sorulduğundan beri insanlık ve bilim tarihine kazandırılmıştır (Feynman 1992). Her ne kadar “nanoteknoloji” terimi literatüre ilk kez 1974 yılında Prof. Norio Taniguchi’nin tanımı (Taniguchi 1974) ile girmiş olsa da kavramsal temeller 1959’da atılmıştır. O günlerden günümüze kadar fizik, kimya ve biyoloji alanlarındaki devrim niteliğindeki gelişmeler, Feynman’ın malzemelerin özelliklerini çok küçük boyutlarda değiştirmek üzerine olan bu düşüncelerinin uygulamaları olmuştur. Nanoteknoloji kavramı, uygulandığı alana göre zaman zaman farklı şekillerde tanımlansa da çoğunlukla 100 nm ’nin altındaki nanometrik boyutlarda malzemelerin anlaşılması, kontrolü ve temelde yeni özellikler ve fonksiyonlar kazandırılmak amacıyla tekrar inşa edilmesi olarak ifade edilmektedir (Sanchez ve Sobolev 2010).

“Nano” ön eki yunanca “nanos” yani “cücüler” kelimesinden gelmektedir ve bilimsel literatürde çok çok küçük olan şeyleri tanımlamakta kullanılır. Matematiksel olarak nano, bir büyüklüğün bir milyarda biri anlamındadır. Örneğin; 1 nanometre 1 metrenin 1 milyarda biri iken, 1 nano saniye 1 saniyenin 1 milyarda biridir. Bu büyüklük yaklaşık olarak 6 adet karbon atomunun veya 10 adet su molekülünün genişliğine karşılık gelir (Sahoo vd. 2007).

Nanoteknoloji, tüm bilim dallarını kapsayan gerçek anlamda disiplinler arası bir çalışma alanıdır. Yapıların ve sistemlerin nano boyuttaki fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, bireysel atomik ve moleküler etkileşimlerden dolayı makro boyuttaki benzerlerinden büyük oranda farklıdır. Bu farklılıklar, bu boyuttaki malzemelere emsalsiz özellikler kazandırır. Parçacığın boyutu nanometrik değerlere doğru küçüldükçe, yüzey / hacim oranında çok büyük bir artış gerçekleşir ve bu da partikülün reaktifliğini, yani kimyasal tepkimelere girme eğilimini artırarak mekanik, elektriksel ve optik özelliklerini değiştirir (Neethirajan ve Jayas 2011).

Nanoteknolojinin açmış olduğu bu kapı ve sağlamış olduğu bu sınırsız olanaklar sayesinde hem akademik dünyada hem de yatırımcılar, devletler ve endüstri kademelerinde ilk günden beri büyük bir ilgi çekmekte ve beklenti yaratmaktadır. Emsalsiz özellikleri, birçok farklı uygulama alanına hizmet etmek üzere yeni malzemelerin ve cihazların hali hazırda üretilmesini sağlamıştır. Nanoteknoloji sayesinde belki bundan yıllar önce hayali bile kurulamayan birçok teknoloji bugün uygulamaya geçilmiş ya da geçilme noktasında büyük ilerleme kaydetmiştir. Bu alanların en önemlilerinden bazıları şu şekilde örneklenebilir;

- **Sağlık biliminde;** nanoteknolojinin belki de en büyük katkı sağladığı alanlardan bir tanesi tıbbi uygulamalar olmuştur. Bazı teknikler yalnızca tasarım aşamasında olsa dahi bazıları çeşitli test aşamalarından geçmekte hatta günümüzde gerçek uygulamalarda kullanılmaktadır. İlgili uygulamalardan

geliştirme aşamasında olanlardan bir tanesi, nanopartiküllerin belirli bir çeşit hücreye (örneğin kanser hücresi) istenilen ilaç, ısı, ışık veya başka içerikleri o hücreyi tanıyarak özel olarak ilemesi çalışmalarıdır. Burada amaç, nanopartikülü doğrudan hasta hücreye bağlayarak ilgili hücrenin tedavi edilmesini sağlamaktır. Bu sayede hem vücuttaki diğer sağlıklı hücrelerin korunması sağlanıp hem de hastalıkların erken teşhisi konusunda önemli bir adım atılmış olacaktır. Ayrıca girişimsel olmayan görüntüleme tekniklerinde, diş tedavilerinde, ortopedik uygulamalarda, gen terapilerinde ve daha birçok tıbbi uygulamada nanoteknolojinin etkilerini görmek mümkündür.

- **Gıda ve biyoproses endüstrisinde;** yüksek kalitede ve güvenli gıdaların verimli ve sürdürülebilir üretimi için birçok mühendislik probleminin çözümü de nanoteknolojidir. Biyosensörler kullanılarak bakteri ve gıda kalitesi tespiti, akıllı, gıda paketlenme sistemleri ve biyoaktif gıda bileşenlerinin nano kapsülleme işlemleri gibi uygulamalar nanoteknolojik çözümlere bazı örnekler olarak gösterilebilir (Neethirajan ve Jayas 2011).
- **Elektrikli araçların batarya malzemelerinde;** her geçen gün kullanımı artan elektrikli araçların ihtiyaçlarını karşılamak üzere hem akademi hem de endüstride birçok araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Elektrot malzemelerinin tasarımı ve üretiminde nanoteknoloji tabanlı yaklaşımların gelişmiş enerji ve güç yoğunluğu, yeniden kullanılabilirlik ve güvenlik açısından sayısız faydalarının olduğu görülmüştür (Lu vd. 2016).
- **Sürdürülebilir enerji için nanoteknoloji;**

Günümüz problemlerinin en önemlilerinden bir tanesi, dünyanın sınırlı miktarda bulunan doğal kaynaklarının artan ihtiyaçları karşılayamaz duruma gelecek olması ve bunun yarattığı endişe olarak tanımlayabileceğimiz enerji krizidir. Doğal kaynaklar kendiliğinden oluşmalarına rağmen, kaynakların yenilenmesi yüzlerce hatta binlerce yıl almaktadır. Ülkeler ve bu konuda endişe duyan çeşitli organizasyonlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve doğal kaynakların sorumsuzca tüketiminin azaltılması için çalışmalar yürütmektedir.

Enerji krizinin birçok sebebi olmakla birlikte dünya geneline bakıldığında aşırı tüketim, aşırı nüfus, yetersiz altyapı ve dağıtım sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının yetersiz kullanımı, enerji israfı ve savaşlar bu nedenlerin başında gelmektedir. Elbette bu problemlere çözüm yöntemleri de mevcuttur. Örneğin alternatif enerji kaynaklarına yönelimin artırılması, enerji verimli ürünlerin kullanımı, aydınlatma için tüketilen enerji miktarının azaltılması için otomasyondan faydalanılması, bina enerji simülasyonlarının kullanılması ve tüm ülkeler arasında sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik ortak bir iklim değişikliği standardının getirilmesi bu yapılabileceklerin yalnızca bir kısmıdır.

İnsanların enerji ihtiyaçlarının büyük bir çoğunluğunu karşıladıkları temel kaynaklar, fosil ve mineral yakıtlar ile nükleer ve hidroelektrik santrallerden oluşmaktadır. Ancak bu kaynaklar ne yazık ki küresel ısınma ve ozon tabakasının incilmesi gibi ciddi ekolojik hasarlara yol açmaktadır. Uzun zamandır bilinen bu probleme çözüm arayışları ise devam etmektedir. Enerji verimliliğinin artırılmasına



yönelik çözüm önerilerine nanoteknolojik yaklaşımlar açısından bakıldığında, nanoteknolojinin enerji üretimi, depolanması ve kullanımına getirdiği yenilikler ile problemin çözümüne önemli bir katkı sağlama potansiyeli olduğu görülmektedir. Yapılan araştırmalarda en çok umut vaat eden uygulamaların fotovoltaiik teknolojiler, hidrojen dönüşümleri ve termoelektrik cihazlar olduğu öngörülmektedir (Serrano vd. 2009). *Nanoteknolojinin bir ısı transfer uygulaması olan “nanoakışkanlar” ise hızla gelişen teknolojiye bağlı olarak birçok farklı sistemde artan soğutma ihtiyacının, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek verimle karşılanma ihtiyacından doğmuştur.*

Nanoakışkanlar en genel tanımıyla; nanometrik boyuttaki (1-100 nm) katı partiküllerin bir temel akışkan içerisinde dağıtılması ile oluşturulan akışkanlardır. Böyle bir yapı oluşturmaktaki amaç, ısıl iletkenliği temel akışkanın ısıl iletkenliğinden daha yüksek olan bir nanomalzemeyi (metal, metal oksit veya yüksek yüzey alanlı karbonik yapılar) akışkan içerisine karıştırarak, akışkanın ısıl iletkenliğini arttırmaktır. Burada katıların ısıl iletkenliklerinin sıvılardan daha yüksek olduğu temel prensibine göre hareket edilir. Temel akışkan olarak genellikle su, etilen glikol ve çeşitli yağlar kullanılmaktadır. Çeşitli katı ve sıvıların ısı iletim katsayıları Çizelge 1.1’den görülebilir.

**Çizelge 1.1.** Çeşitli katı ve sıvı malzemelerin ısı iletim katsayıları

<i>Malzeme Grubu</i>	<i>Örnek</i>	<i>k [W/mK]</i>
Metalik katılar	<i>Cu</i>	401
	<i>Al</i>	237
Metalik olmayan katılar	Silikon	148
	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	40
Sıvı metaller	<i>Na</i> (644 K de)	72.3
Metalik olmayan sıvılar	Su	0.613
	Etilen Glikol	0.253
	Motor yağı	0.145

Nanoakışkanların ısı iletim katsayıları her ne kadar geleneksel ısı transfer akışkanlarından yüksek olsa da başlangıçta bu akışkanları ısıl sistemlerde kullanmak kolay olmamıştır. Çünkü bu alanda yapılan ilk çalışmalarda, milimetre ve mikrometre boyutlarında parçacıklar ile bu süspansiyonlar hazırlanmış ve bu şekilde hazırlanan süspansiyonların kullanıldığı sistemlerde partiküller hızla çökerek sistemlerin tıkanmasına neden olmuştur. 1990’ların ilk yarısından sonra Choi ve Eastman (1995), 100 nanometre ve altı boyutta metal partiküllerin temel akışkan içerisinde dağıtılması ile oluşan akışkanın oldukça yüksek ısıl iletkenlik gösterdiği ve ısı transfer artışı için büyük bir potansiyele sahip olduğunu bulmuşlardır. Araştırmacılar böylece, “*nanoakışkan*” adını verdikleri yeni bir akışkan sınıfının ortaya çıkmasını sağlamışlardır.

Sahip oldukları yüksek ısıl iletkenlik, bu akışkanları birçok farklı mühendislik alanındaki uygulamalar ve özellikle ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar için çekici hale getirmektedir. Nanoakışkanların yüksek ısıl iletkenliklerinin yanında, farklı

uygulamalara göre değiştirilebilen özellikleri de en önemli avantajlarından biridir. Nanoakışkanlar üzerine yapılan araştırmalar 2000’li yıllardan itibaren ivme kazanmış, uygulandığı alanlarda hala incelenmesi gereken kısımlar bulunan ve henüz uygulamalarının yapılmadığı birçok sistemin bulunduğu bir araştırma konusudur. Literatür araştırmaları, nanoakışkanların nanopartikül dünyasındaki gelişmeleri daha geriden takip ettiğini göstermektedir. Mevcut nanoakışkanların yeni alanlara uygulanması ve performanslarının sistem parametrelerine bağlılığının incelenmesi bilimsel bir gerekliliktir. Ayrıca bazı metal, metal oksit ve farklı bileşikler üzerine odaklanılan bu alanda, yeni nanopartiküller ile yapılacak çalışmalara da ihtiyaç vardır.

Nanopartikülün başta ısıl iletkenliği olmak üzere tüm özellikleri kristal tipi, boyutu, şekli ve gözenekli yapısına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla nanoakışkanın özellikleri, kullanılacak nanopartikülün özellikleriyle kontrol edilebilir. Bu noktada nanopartikül özelliklerini değiştiren en yeni yöntemlerden bir tanesi, nanopartikül içerisine metal katkılanmasıdır ve katkılama işlemi partikülün elektrik, optik ve ısıl özelliklerini değiştirir. “*Doping (katkılama)*” adı verilen bu olayda, kristal içerisine yerleştirilecek olan türün özellikleri ve katkılama derecesi, sonuç ürünün özelliklerini belirgin şekilde etkiler.

Ulaşım, günlük hayatın sürdürülebilirliği için vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. İnsanlar iş – ev arasında, aile ve arkadaş ziyaretlerinde ve acil sağlık ihtiyaçlarının giderilmesi gibi durumlarda günlük olarak çeşitli metotlar ile seyahat ederler. Ancak ulaşım ağı, kişisel ihtiyaçların çok ötesinde amaçlar için de kullanılmaktadır. Örneğin işletmeler, ürettikleri malın üreticiden kullanıcıya aktarımını kamyon, gemi, tren ve uçak gibi ulaşım araçları ile sağlarlar. Bütün bu kapsam, ulaşım sektörünün alanına girmektedir. Böylesine geniş bir kullanım alanına hitap eden bir sektörün enerji tüketim değerleri de oldukça önemlidir.

Ulaşım metotları arasında en yüksek paya sahip olan kara ulaşımının vazgeçilmez bir unsuru olan otomobiller, gelişen sektörden en çok etkilenen gruptur. Otomotiv endüstrisi, bu gelişmelere ayak uydurabilmek için daha yüksek verimli araçlar üretmeye çalışmaktadır. Bu araçların en önemli parçalarından bir tanesi de motorlardır ve verimlerinin artırılması birçok faktöre bağlıdır. Yüksek verimli motorlar, yalnızca performanslarına göre değil aynı zamanda yakıt tüketimine ve emisyon oranlarına göre değerlendirilmektedir. Çünkü tüm dünyada artan petrol fiyatları ve daha da önemlisi karbon emisyonlarının çevreye verdiği zararlar, mühendislik alanında yapılan araştırmaların enerji tüketimlerini azaltan yönde, sürdürülebilir ve çevre dostu uygulamalar olmasını gerektirmektedir (Leong vd. 2010).

Otomobillerde performansı artırırken enerji tüketimini azaltmaya yönelik yapılabilecek iyileştirmelerden bir tanesi otomobillerdeki motor soğutma sistemlerinin ısıl performansını arttırmaktır. İlgili sisteminin en temel parçası olan radyatör, iki akışkanın karşılıklı ısı transferinin gerçekleştiği kompakt bir ısı değiştiricisidir. Dolayısıyla bir kompakt ısı değiştiricisinde ısı transferi iyileştirmesi yapabilmek için bilinen yöntemler, otomobillerde bu amaca ulaşmak için de ilk akla gelenler olacaktır. Bu yöntemlerden bazıları şu şekilde sıralanabilir;

- Isı transfer yüzey alanının artırılması
- Akış hızının artırılması
- Soğuk ve sıcak akışkanlar arasındaki sıcaklık farkının artırılması

Bu yöntemlerin bir çok avantaj ve dezavantajı bulunmakla birlikte, kompakt ısı değiştiricilerde, kanatçık ilavesi gibi yüzey artırımına yönelik geleneksel yöntemlerle ısı transferini artırma çalışmalarının artık limitlerine ulaştığı düşünülmektedir (Leong vd 2010). Ayrıca bu yöntemin uygulanmasında, malzemelerin yüzeye montajı, malzeme sarfiyatı, sistem içinde kayda değer hacim kaplanması, artan ağırlık ve yüksek maliyet gibi dezavantajlar söz konusudur. Dolayısıyla otomobil radyatörleri açısından düşünüldüğünde, yüzey artırımına yönelik yapılacak bir iyileştirme uygun bir tercih olarak gözükmemektedir. Çünkü burada öncelikli hedeflerden bir tanesi, soğutma sistemlerini küçülterek daha hafif otomobiller geliştirmektir.

Otomobil radyatörlerinde kullanılan ısı transfer akışkanlarının doğası gereği ısı transfer özellikleri yeteri kadar iyi değildir. Bu durum ise mühendislik ekipmanlarının küçültülmesi ve performanslarının artırılmasında sınırlamalara sebep olmaktadır. Dolayısıyla soğutma sisteminde yapılabilecek en uygun iyileştirmenin tasarım özelliklerinin değil, ısı değiştiricisinde kullanılan akışkanın ısı özelliklerinin geliştirilmesine yönelik atılacak adımlar olduğu görülmektedir. Bu amaçla otomobil radyatörlerinin ısı performanslarını arttırmak için nanoakışkan kullanımı oldukça iyi bir alternatif olarak gözükmemektedir.

Nanoakışkanların ısı sistemlere uygulanabilirliği üzerine çalışmalar yaklaşık son 10 yılda ivme kazanmıştır. Yeni tip (farklı nanopartiküller içeren), performansı iyileştirilmiş nanoakışkanların geliştirilmesi, farklı ısı sistemler için özelliklerinin değerlendirilmesi ve bu sistemlerde kullanımı üzerine oldukça fazla sayıda çalışma olmasına karşın, otomobil radyatörlerinde soğutma sıvısı olarak kullanımı son derece yeni bir kullanım alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alanda yapılan araştırmalar incelendiğinde, literatürde ilk karşılaşılan çalışmanın Argonne Ulusal Laboratuvarı (A.B.D.) tarafından ağır vasıtaların soğutma sistemlerini iyileştirmeyi hedefleyen bir proje olduğu görülmektedir (Timofeeva vd. 2009). Araştırmacılar, kamyon, tır gibi büyük tonajlı araçlarda gerekli olan yüksek soğutma ihtiyacının giderek artan ön yüzey alanı ile karşılanmaya çalışılmasının yarattığı yüksek aerodinamik direnç kuvvetlerine çözüm üretmeye çalışmışlardır. Bu amaçla radyatörün yüzey alanını küçültmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, nanoakışkanların beklenen yüksek ısı performansı gösterdiği ve nanoakışkanların soğutma sistemleri için umut vadeden akışkanlar olduğunu göstermiştir. Ancak aynı çalışmada nanoakışkan teknolojisinin uygulamaya aktarılabilmesi için henüz aşılması gereken birçok engel ve araştırılması gereken konular olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, birçok araştırmacının konuyu farklı yönlerden incelemelerine ve motor soğutma sistemlerinde nanoakışkan kullanımının bilimsel olarak araştırılmasına öncelik etmiştir.

Tüm bu nedenlerle, mevcut tez çalışmasının kapsamı belirlenirken, bilim dünyasında birçok farklı uygulama alanında ilgi gören ve son yıllarda en önemli teknolojik gelişmelerin yaşandığı nanoteknoloji araştırmalarının takip edilmesi ve bu araştırmalara dahil olma gerekliliği düşüncesi ön plana çıkmıştır. Bu geniş araştırma alanının termodinamik uygulamalarından bir tanesi olan nanoakışkanların ısı sistemlerde yüksek performans ile kullanılabilirliğinin araştırılmasının çok önemli yaygın etkileri bulunmaktadır. Tüm dünyada yaşanan enerji krizi ve her yönden araştırılan enerji verimliliği çalışmalarına nanoteknolojik bakış açısıyla yaklaşılan mevcut çalışmada, ulaşım sektörü gibi çok geniş bir kullanım alanına hitap eden bir iyileştirme yapılması hedeflenmiştir.

Otomobil radyatörlerinde geleneksel soğutma sıvıları yerine saf ve çeşitli metal iyonları ile katkılanarak özellikleri iyileştirilmiş  $TiO_2$  nanopartiküllerinden oluşturulan nanoakışkanların kullanılması ile radyatörün ısıl performansının artırılması, ana hedeftir. Çalışmanın çıkış noktası, motor soğutma sisteminin boyutlarını küçülterek, daha hafif ve daha az yakıt tüketen taşıtlar geliştirerek geniş bir kullanım alanına yönelik önemli bir iyileştirme sağlamaktır. Böylece düşük emisyon oranları ile hem çevre dostu hem de enerji verimli araçlar üretmek mümkün olabilir. Çalışmada kullanılan temel akışkanın seçiminde gerçek sistemlerde kullanılan geleneksel akışkanlar göz önünde bulundurulmuştur. Bu akışkanlar üzerinde yapılacak bir iyileştirmenin, nanoakışkanların gerçek sistemlere entegrasyonunu kolaylaştıracağı düşünülmüştür. Seçilen  $TiO_2$  nanopartikülü, literatürde görece daha az çalışılmış olmasının yanında, nanoakışkan kullanımında çeşitli avantajlara da sahiptir. Örneğin  $TiO_2$  insanlar ve hayvanlar için sağlık açısından güvenilir bir malzemedir, kolay üretilebilir ve bu sayede endüstriyel boyutlarda üretime elverişlidir. Aynı zamanda kararlılığı yüksek olduğundan, nanoakışkan hazırlarken katkı maddelerine daha az ihtiyaç duyulur. Çalışma kapsamında tüm elemanları detaylı araştırmalar ile seçilerek kurulan deney düzeneği, olanaklar dahilinde gerçek sistemlerdeki koşulları mümkün olduğunca yansıtabilecek şekilde tasarlanmıştır. Çünkü böyle bir düzenek ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçların, gerçek sistemlerde elde edilecek değerlere yakın olacağı, dolayısıyla bilimsel çalışmaların uygulamaya dönüşümünde yaşanan sorunların azaltılabileceği düşünülmektedir.

Literatürde nanoakışkanların ısı transfer davranışlarının incelendiği yüzlerce ve otomobil radyatöründe kullanımlarına yönelik ise onlarca çalışma olmasına rağmen hala üzerinde tam bir anlaşma sağlanamamış, çelişkiler bulunan veya henüz araştırılmamış birçok konu bulunmaktadır. Bunun yanı sıra araştırmaların hangi koşullar altında yapıldığı ve çalışmaların sonuçlarının ne şekilde değerlendirildiği hususlarında da önemli farklar bulunmaktadır. Bu noktada nanoakışkanların performanslarının gerçekçi yaklaşımlar ile değerlendirilmesi ve uygulamada karşılaşılan problemlerin doğru şekilde tespit edilerek çözüm yollarının önerilmesi, bu alanda yapılan bilimsel çalışmalarda en çok ihtiyaç duyulan noktalardan bir tanesidir. Bu hedefler doğrultusunda mevcut tez çalışması kapsamında çalışılan nanoakışkanların hem deneysel hem de teorik analizleri gerçekleştirilmiş, deneysel sonuçlardan edinilen tecrübe doğrultusunda aşılması gereken problemler ve çözüm önerileri de çalışmanın sonuçları arasında sunulmuştur.

## 2. KAYNAK TARAMASI

### 2.1. Nanoakışkanlar

#### 2.1.1. Nanopartikül sentezi ve nanoakışkan hazırlama yöntemleri

Nanoakışkanlar daha önce de açıklandığı üzere 100 nm'den daha küçük partiküllerin belirli bir temel akışkan içerisinde dağıtılması ile oluşturulan yeni nesil ısı transfer akışkanlarıdır. Nanoakışkanların ısı transfer kabiliyetlerini belirleyen termofiziksel özellikleri hem temel akışkanın hem de partiküllerin özelliklerine bağlıdır ve bu özellikler malzemelerin üretim yöntemlerinden doğrudan etkilenir. Nanopartiküller genellikle katı bir çekirdek ve bu çekirdeğin yüzeyine kimyasal olarak bağlanmış veya adsorbe edilmiş şekilde bulunan bir kabuk veya kaplamadan oluşur. Çekirdek kısmı; ısı, elektriksel, manyetik ve optik gibi temel özellikleri belirlerken kaplama; nanopartikülün kararlılığını ve hidrofilik veya hidrofobik davranışını belirler (Bigdeli vd. 2016).

Nanoakışkanlar ile yapılan deneysel çalışmalarda ilk adım, nanopartiküllerin sentezlenmesi ve ardından nanoakışkanların hazırlanması sürecidir. Kararlı akışkanların hazırlanması nanoakışkanların ısı uygulamaları için büyük önem taşır. Nanoakışkanlar yalnızca basit bir katı – sıvı karışımı değildir. Nanometre boyutundaki katı partiküllerin akışkan içerisinde iyi bir şekilde yayılması gerekir. Doğru şekilde hazırlanmayan nanoakışkanlar katı – sıvı formunda çok fazlı ısı transfer davranışı gösterebilecekleri gibi, aşırı kümeleşerek nanometrik boyutlardan mikrometrik boyutlara doğru büyüyerek nanoakışkan davranışından da çıkabilirler. Akışkanda oluşabilecek bu kararsızlıklar sistem içerisinde tortu oluşumuna neden olarak borular, pompalar ve diğer sistem elemanlarına zarar verebilirler (Wang ve Mujumdar 2007). Nanoakışkanların hazırlanmasında genellikle tercih edilen iki yöntem aşağıda kısaca açıklanmıştır.

##### 2.1.1.1. Tek aşamalı metot

Bu metotta nanopartiküllerin sentezi ve temel akışkan içerisinde disperse edilme işlemi eş zamanlı olarak gerçekleştirilir. Yani partiküller doğrudan temel akışkan içerisinde sentezlenir. Yöntemin avantajı, sentezlenen parçacıkların oksidasyonuna engel olmasıdır. Bu nedenle metalik partiküller için uygun olduğu söylenebilir. Aynı zamanda kurutma, depolama, taşıma ve partiküllerin dispersiyon aşamaları olmadığından hem maliyetler azalır hem de kümeleşme sorunu daha az olur ve akışkanın kararlılığı artar (Ganvir vd. 2017). Ancak bu metot ile üretilen nanoakışkan miktarı sınırlıdır. Çünkü yalnızca düşük buhar basıncına sahip akışkanlar bu proses ile nanoakışkan hazırlamaya uygundur.

##### 2.1.1.2. İki aşamalı metot

İki aşamalı metotta partiküller ayrı olarak sentezlenir ve temel akışkana istenilen oranlarda fiziksel olarak eklenerek nanoakışkanlar oluşturulur. Nanopartiküllerin sentezinde kimyasal buhar çökeltme, soy gaz yoğunlaştırma, fiziksel gaz çökeltme veya mekanik alaşımlama gibi metotlar kullanılır. Bu yöntemlerin biri ile elde edilen nano tozlar, temel akışkan içerisinde disperse edilir. Bu metot genellikle seramik esaslı (çeşitli oksitler ve karbürler) malzemeler için tercih edilir. Mevcut durumda iki aşamalı yaklaşım büyük miktarlarda nanoakışkan üretimi için daha düşük maliyetlidir (Bigdeli vd. 2016).

### 2.1.2. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

Isı transfer analizlerinde akışkanların termofiziksel özellikleri performansın belirlenmesinde önemli yer tutar. Bu durum klasik akışkanlarda olduğu gibi nanoakışkanlarda da geçerlidir. Akışkanların Re, Prandtl (Pr) ve Nusselt (Nu) sayıları termofiziksel özelliklerinin fonksiyonudur ve bu boyutsuz sayılar akışkanların taşınım katsayılarını doğrudan etkiler. Bu duruma ek olarak bir sistemde belirli bir ısı transferi sonucu meydana gelen basınç kayıpları ve sistemde ihtiyaç duyulan pompalama güçleri de kullanılan akışkanın Re sayısına, dolayısıyla da termofiziksel özelliklerine bağlıdır.

Nanoakışkanlarda termofiziksel özellikler genel olarak kullanılan nanopartikülün malzemesi, büyüklüğü, şekli, temel akışkan içerisindeki miktarı ile beraber kullanılan temel akışkanın özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu özellikler aynı zamanda geleneksel ısı transfer akışkanlarında olduğu gibi sıcaklığa da bağlıdır. Dolayısıyla nanoakışkanlar ile yapılan ısı analizlerin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, bu akışkanların termofiziksel özelliklerinin hangi parametrelere bağlı olduğu ve akışkan özelliklerinin ilgili parametrelerden nasıl etkilendiğinin bilinmesi önemlidir.

#### 2.1.2.1. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik akışkanların öncelikli olarak belirlenen termofiziksel özelliğidir ve temel akışkana göre ısı iletkenliğinin artırılması nanoakışkanların hazırlanmasında ana prensiptir. Nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin değişimini inceleyen birçok teorik ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenliğin deneysel olarak belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Geçici kızgın tel metodu, ısı parametre analiz cihazları, sıcaklık titreşimi ve  $3\omega$  metodu bu metotlardan bazılarıdır.

Nanoakışkanların yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasına neden olan en temel mekanizmanın, partiküllerin "*Brownian Hareketi*" olduğu düşünülmektedir (Jang ve Choi 2004). Brownian hareketi, bir sıvıda yüzen veya asılı duran mikroskobik parçacıkların etraflarını çevreleyen ortamın moleküllerinden kaynaklanan rastgele hareketidir. Bu konuyu 1827 yılında ilk kez çalışan İskoçyalı botanikçi Robert Brown'ın ismiyle anılmaktadır. Bu mekanizma temel akışkan içerisindeki nanopartiküller düşünüldüğünde oldukça benzerdir.

İkinci olarak ara yüzey katmanlarının (yani nanokatmanların) ısı iletkenlik üzerinde etkin bir mekanizma olduğu tespit edilmiştir. Bu katmanlar partiküllerin yüzeyine yakın yerlerde bulunurlar ve nanopartikül ile akışkan kütlesi arasında bir ısı köprü oluştururlar (Gupta vd. 2017). Birçok farklı parametreye bağlı olarak ısı iletkenliğinin hangi mertebelere kadar artırılabilceği değişmektedir. Bu parametreler; partikül ve temel akışkan malzemesi, partikül boyut ve şekli, sıcaklık, asitlik değeri (pH), kümeleşme ve ek kimyasallar olarak sıralanabilir.

Nanopartiküller 100 nanometrenin altında olacak şekilde farklı boyutlarda sentezlenebilirler. Nanopartikül boyutunun ısı iletkenlik üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmalarda (Paul vd. 2010; Teng vd. 2010), partikül boyutu küçüldükçe iletkenliğin arttığı gözlenmiştir.

Nanopartiküllerin boyutu kadar şekilleri de ısı iletkenliklerini önemli oranda etkiler. Argonne Ulusal Laboratuvarı tarafından gerçekleştirilen proje kapsamında şekil etkisi detaylı olarak araştırılmış, ısı iletkenliğinin nanopartikül şekline bağı olarak değıştiğı ancak değışimin klasik teorilerin tahmin ettiğı şekilde olmadığı belirlenmiştir. Çalışmada karşılaştırılan nanopartikül şekilleri, deneysel ısı iletkenliklerine göre yüksek ten düşüğe doğru şu şekilde sıralanmıştır; silindir, tuğla, yassı tanecik  $\approx$  yassı silindir (Timofeeva vd. 2009).

Nanoakışkanların sıcaklığı, nanopartiküllerin Brownian hareketini ve kümeleşme davranışlarını etkilediğinden, ısı iletkenliklerini de doğrudan etkiler. Parametrenin önemi nedeniyle bu alanda birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiş ve nanoakışkanların sıcaklığa karşı ısı iletkenlikleri anlaşılmaya çalışılmıştır. Oldukça geniş bir literatürün olduğu bu konu, başlı başına bir araştırma alanıdır. İlgili çalışmaların derlendiğı bir araştırmada bir araya getirilen bilgiler incelendiğinde (Gupta vd. 2017), bazı çalışmalarda sıcaklık artışının ısı iletkenliği arttırdığı, bazılarında ise olumsuz etki ettiğı görülmüştür. Yani sıcaklık etkisi, literatürde henüz üzerine ortak yargıya varılamamış ve değerlendirilmesi gereken bir parametredir.

Nanoakışkanların pH değerlerinin çözeltinin kararlılığını ve termofiziksel özelliklerini etkilediğı bilinmektedir. Partiküllerin aşırı kümeleşmesini önlemek adına genellikle akışkanların izoelektrik noktadan uzak olmasını sağlayan bir pH değerine sahip olması istenir. Nanoakışkanların uzun dönem kararlılıklarını sağlamak ve nanopartiküllerin çökmesini engellemek üzere kullanılan çeşitli kimyasallar, çözeltinin kimyasal ve fiziksel yapısını değıştirerek özelliklerini önemli oranda etkilemektedir. Kullanılan yüzey etken maddelerin konsantrasyonuna bağı olarak akışkanların ısı iletkenlikleri önemli oranda etkilenir. Kullanılan nanopartikülün ve temel akışkanın çeşidine göre doğru kimyasalın uygun miktarda eklenmesi önemlidir.

Literatürdeki çalışmalarda, yukarıda açıklanan parametrelere ilişkin zaman zaman bazı çelişkiler ve açıklanması zor durumlar ile de karşılaşılmıştır. Örneğın partikül boyutunun küçülmesine bağı olarak bazı çalışmalarda artan katı-sıvı ara yüzey etkilerinden dolayı iletkenliğın azaldığı gözlenirken, diğeri çalışmalarda partiküllerin rastgele hareketindeki artış gerekçe gösterilerek ısı iletkenlikte de artış olduğu iddia edilmiştir. (Bigdeli vd. 2016). Bu durumların belirtilmesinde de yarar olduğu düşünülmektedir. Çalışmalarda bu ve benzeri çelişkilerin olmasının nedeni, nanoakışkan teknolojisinin gelişmekte olan bir konu olması ve nanopartiküllerin fiziksel davranışlarının henüz çözülememiş olmasıdır. Fiziksel mekanizmanın tam olarak anlaşılabilmesi, elde edilen sonuçların da çoğu zaman iyi anlaşılabilmesine yol açmaktadır.

### 2.1.2.2. Viskozite

Viskozite, ısı transfer uygulamaları için bir diğeri önemli özelliktir. Akışkanların neden oluşu basınç düşüşleri ve bu akışkanları pompalamak için gerekli pompalama güçleri, akışkanların viskozitelerine bağıdır. Nanoakışkanların viskoziteleri, boyut, şekil ve katı fazın konsantrasyonu gibi partikül özellikleri ile beraber kullanılan temel akışkanın özellikleri ve sıcaklık gibi ortam şartlarından da etkilenir.

Sayılan özellikler içerisinde nanopartikül konsantrasyonu, viskoziteyi doğrudan etkilediği için en önemli parametrelerden bir tanesidir. 10 nm'den daha büyük nanopartiküllerden oluşturulan nanoakışkanlarda konsantrasyon arttıkça viskozite artmakta, sıcaklık yükseldikçe ise düşmektedir. Bununla birlikte nanoakışkanın sahip olduğu viskozite değeri her zaman temel akışkana kıyasla daha yüksek olmaktadır. Belirli bir konsantrasyon için nanopartiküllerin boyutlarının küçültülmesi, daha yüksek katı yüzey alanı oluşturduğu için viskoziteyi arttırmaktadır. Akışkanların viskoziteleri üzerinde önemli etkileri olan kayma gerilmesi davranışları incelendiğinde, %4'den daha az konsantrasyona sahip nanoakışkanların Newton tipi akışkanlar oldukları belirlenmiştir (Azmi vd. 2016).

İlgili özelliklerin akışkan viskozitesini ne yönde değiştirdiği üzerine yapılan çalışmalarda gerek farklı nanoakışkan hazırlama teknikleri gerekse farklı ölçüm yöntemleri kullanılmasına bağlı olarak sonuçlarda çelişkiler bulunmaktadır. Örneğin bazı araştırmacılar partikül boyutunun viskoziteyi arttırdığını söylerken bir grup araştırmacı ise bunun tam tersini iddia etmektedir (Bigdeli vd. 2016).

### 2.1.2.3. Yoğunluk

Yoğunluk, akışkanların Re ve Nu sayıları ile sürtünme faktörleri ve buna bağlı olarak basınç kayıplarını ilgilendiren bir özelliktir. Nanoakışkanların yoğunluklarının belirlenmesinde kullanılan eşitlik ilk kez Pak ve Cho (1998) tarafından önerilmiştir. Araştırmacıların önerdiği eşitlik, nanoakışkanın yoğunluğunu akışkan içerisindeki katı partikül ve temel akışkan konsantrasyonlarına bağlı olarak belirlenmesi prensibine dayanır. Katıların yoğunluğunun sıvılardan fazla olduğu düşünüldüğünde, akışkan içerisindeki nanopartikül konsantrasyonunun artması, doğal olarak süspansiyonun da yoğunluğunu arttıracaktır. Bu durum çeşitli deneysel çalışmalarda yapılan ölçümler ile de desteklenmiştir (Vajjha vd. 2009; Teng ve Hung 2014; Ganeshkumar vd. 2015).

Nanoakışkanların yoğunluğu üzerine literatürde daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır. Pak ve Cho (1998)'in önerdiği karışım teorisinin hangi durumlar için en uyumlu sonuçları verdiği daha detaylı olarak araştırılmalı ve diğer fiziksel özelliklerin yoğunluğa olan etkisi de bu teoriye dahil edilmelidir.

### 2.1.2.4. Özgül ısı

Viskozite ve ısı iletkenlik ile kıyaslandığında, akışkanların özgül ısıları belki de araştırmacılar tarafından en az ilgi gören konulardan biri olmuştur. Ancak bu özellik nanoakışkanların soğutma uygulamalarındaki performansları konusunda çok önemli bilgiler verir. Çünkü özgül ısı bir maddenin sıcaklığını 1 °C arttırmak için gerekli enerjiyi tanımlar ve dolayısıyla malzemelerin sahip oldukları özgül ısı değerleri belirli bir sıcaklık farkında ne kadar ısı transfer edebileceklerinin bir ölçüsüdür.

Nanoakışkanların özgül ısıları, diğer termofiziksel özelliklerine benzer olarak nanopartiküllerin boyut ve şekil özellikleri ile partikül malzemesinden ve nanoakışkanın konsantrasyonu ve sıcaklığından etkilenir. Nanoakışkanların özgül ısılarının araştırıldığı birçok teorik ve deneysel çalışma mevcuttur. İlgili çalışmalardan derlenerek farklı özelliklerin özgül ısı üzerine etkisinin karşılaştırmalı olarak açıklandığı Shahrul vd. (2014)'e ait değerli çalışmada, çeşitli parametrelerin etkisi ile ilgili önemli bilgiler



sunulmuştur. İlgili çalışmaya göre, nanopartikül konsantrasyonunun artması özgül ısıyı düşürmekte, aynı nanoakışkan için artan nanopartikül çapı ve dağıtıcı kimyasallar eklenmesi ise özgül ısıyı arttırmaktadır.

Özgül ısı üzerine sıcaklığın etkisi ise literatürde yine oldukça tartışmalı bir durum olarak kalmış ve tek bir cümle ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir yapıya sahiptir. Ancak araştırmacılar özetle şu yargıya varabilmişlerdir; eğer nanopartiküllerin özgül ısısı temel akışkandan daha düşükse, o zaman sıcaklık artışı nanoakışkanın özgül ısını düşürecektir. Ters durumda ise özgül ısıda artış beklenmelidir.

### 2.1.3. Nanoakışkanların uygulama alanları

Nanoakışkanlar, geleneksel ısı transfer akışkanlarına kıyasla gelişmiş termofiziksel özellikleri ve ısı transfer performansları ile birçok farklı ısı transfer uygulamasında kullanılmak üzere araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu uygulamalardan bazıları nanoakışkanların ilgili kullanım alanına özgü sağlayabilecekleri faydalar ile beraber aşağıda örneklenmeye çalışılmıştır.

- **Güneş enerjisi uygulamaları;** güneş enerjisinin ısı uygulamalarında nanoakışkan kullanımı, fosil yakıt kullanımına bağlı yaşanan problemler dolayısı ile alternatif enerji kaynaklarına yönelimin bir sonucu olarak ortaya çıkan yöntemlerden biridir. Nanoakışkanlar güneş enerjisinin ısı uygulamalarında çoğunlukla güneş kolektörlerinde ve güneş enerjili sıcak su sistemlerinde tercih edilmiştir. Bunun haricinde birkaç enerji depolama ve güneş pili uygulaması da literatürde mevcuttur. Güneş kolektörleri ile yapılan uygulamalarda nanoakışkan kullanımının ısı performansı arttırdığı tespit edilmiştir. Ekonomik ve çevresel bakış açısı ile değerlendirildiğinde bu uygulamanın  $CO_2$  emisyonlarını düşürmeye yardımcı olduğu, yıllık elektrik ve yakıt tasarruflarını arttırdığı görülmüştür (Mahian vd. 2013).
- **Elektronik soğutma;** elektronik uygulamalarda soğutma sisteminin performansını artırırken bunun için gerekli yüzey alanını azaltmak önemli bir zorluktur. Bu ihtiyaç, işlemci güçlerinin sürekli olarak artması ancak elektronik cihazların buna karşın küçültülmeye çalışılmasından doğmaktadır. Bu kısıtlı koşullar altında nanoakışkanlar, yüksek ısı iletim özellikleri sayesinde önemli bir alternatif sunmaktadır. Ancak elektronik soğutmada kullanmak üzere nanoakışkan seçimi yapılırken bazı noktalara dikkat edilmelidir. Seçilecek akışkan kararlı olmalı, soğutma sistemi üzerinde korozif bir etkisi olmamalı, daha iyi ısı iletkenliğe sahip olmalı ve ekonomik olarak kullanılabilir olmalıdır (Ganvir vd. 2017).
- **Uzay ve savunma sanayi;** yüksek teknoloji uygulamaların olduğu bu alanda nanoteknolojiye sıklıkla rastlanmaktadır. Büyük oranda soğutma ihtiyacına sahip bazı güç elektronikleri, enerji silahları ve askeri cihazlar bu gruba girer. Nanoakışkanlar bu ihtiyacın giderilmesi konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Bazı durumlarda savunma sanayi uygulamalarında nanoakışkan kullanımı, birden fazla fonksiyonu yerine getirmek üzere tasarlanmıştır. Örneğin bilinen özelliklerinin yanında enerji depolama veya kimyasal

reaksiyonlar sırasında enerji toplama gibi (Yu vd. 2007) uygulamalar söylenebilir.

- **Kameralar, mikro cihazlar ve ekranlar;** yeni yapılan çalışmalarda nanoakışkanların elektrik alanlara maruz kaldıklarında daha yüksek performans ve kararlılık gösterdikleri görülmüştür (Saidur vd. 2011). Bu özelliğin, yeni tip minyatür kamera lenslerinin, cep telefonu ekranlarının ve diğer bazı küçük ölçekli sıvı yapıdaki cihazların geliştirilmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmalar, nanoakışkanların mikro veya nano boyuttaki cihazların tahrik düzeneklerinde kullanılabilme imkanını ortaya koymuştur.
- **Talaşlı imalatta soğutma sıvısı olarak;** talaşlı imalat esnasında açığa çıkan ısı ve sürtünme, kullanılan takımların ömrü açısından her zaman önemli bir problem olmuştur. Kesme sıvıları bu sorunu çözmek için kullanılan geleneksel yöntemlerdir. Ancak bu sıvıların çevreye verdikleri zararlar kullanımlarının sınırlandırılmasına neden olmuştur. Bu noktada nanoakışkanlar, ısı transfer karakteristikleri ve yağlama özellikleri ile bu problemin çözümünde alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır (Srikant vd. 2009).

Burada bahsedilen uygulama alanlarının dışında, farklı ısı değiştiricilerinin kullanıldığı ısıtma ve soğutma uygulamalarında da geleneksel ısı transfer akışkanlarının yerine nanoakışkanların kullanılması mümkündür. Ayrıca bu akışkanların faz değişim davranışları da araştırılmakta (Park ve Jung 2007; Bi vd. 2008), böylece buhar sıkıştırımlı mekanik çevrimlerde kullanım potansiyeli ortaya çıkmaktadır.

#### 2.1.4. Nanoakışkan uygulamalarında aşılması gereken problemler

Nanoakışkanların ısı sistemlerinde ticari olarak kullanılabilmesi için araştırılması gereken birçok konu ve aşılması gereken problemler bulunmaktadır. Bu konulardan literatür araştırması kapsamında tespit edilebilenler bu kısımda sunulmuştur. Öncelikle bu alanda yapılan çalışmalarda karşılaşılan çelişkilerin kaynağı araştırılmalı ve benzer parametrelerin farklı durumlar için neden farklı sonuçlar verdiği üzerinde durulmalıdır. Literatürdeki çalışmalarda çelişkiler bulunan durumların, partiküllerin ve akışkanların iyi bir şekilde karakterizasyonunun yapılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Eksik veya yanlış yöntemler kullanılarak yapılan karakterizasyon işlemleri, nanoakışkan davranışının açıklanmasında da hatalı yorumlamalara yol açmaktadır.

Termofiziksel özelliklerin tespiti konusunda tüm akışkanları kapsayan genel bir teorik model henüz oluşturulamamış ve klasik yöntemler nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini belirlemede kullanılamamaktadır. Bu nedenle akışkanların artan ısı transfer performanslarını da genel ifadeler ile açıklamak mümkün olmamaktadır. Çeşitli mekanizmalar bu durumu açıklamak üzere önerilmiş olsa da termofiziksel özelliklerin değişimi üzerine sistematik bir açıklama getirilememiştir. Bu nedenle nanoakışkanlar ile yapılan çalışmalarda ilgili özelliklerin deneysel tespiti gereklidir. Ancak yapılan çalışmalarda prosesler detaylı olarak sunulması halinde, sistematik çözümlerin de zamanla gelişme imkânı olabilir. Bu süreçte ilgili özellikler için bir özellik veri tabanının oluşması, araştırmaların hızlanması ve belirli bir standartta yapılması açısından faydalı olacaktır.

Nanoakışkanların artan viskozitelerine bağlı olarak kullanıldıkları sistemlerde neden oldukları basınç düşüşleri ve artan pompalama güçleri önemli bir sorundur. Bu artışlar incelenen sisteme bağlı olarak ısı performanstaki artıştan daha az olduğunda nanoakışkanın kullanılabilir olduğu varsayılmaktadır. Ancak bu durum her sistem için geçerli olmamakta ve büyük potansiyele sahip olan nanoakışkanların kullanılmasına engel olmaktadır. Bu nedenle nanoakışkanların viskozite artışlarını belirli limitlerde tutacak şekilde sentez ve / veya nanoakışkan hazırlama yöntemlerinin geliştirilmesine ve bu alanlarda yapılacak çalışmalara ihtiyaç vardır.

Düşük maliyetli, uzun dönem kararlılıkları iyi olan ve tekrarlanabilir nanoakışkanların büyük miktarlarda üretilmesi için gerekli teknolojilerin geliştirilmesi, bu alandaki en önemli eksikliklerden bir tanesidir. Çünkü mevcut yöntemler, ticari boyutta nanopartikül sentezi ve nanoakışkan üretimi için uygun değildir.

Nanoakışkanların tribolojik özelliklerinin araştırılması, bu akışkanların kullanıldıkları sistemlerdeki uzun dönem etkilerinin bilinmesi açısından önemlidir. Özellikle metal ve/veya metal oksit nanopartikülleri kullanılarak hazırlanan nanoakışkanların kullanıldıkları sistemlerde metal yüzeyler üzerindeki sürtünmeden doğan olası aşınma ve korozyon etkilerinin değerlendirilmesi ve olası hasarlara karşı önlemler alınması, daha fazla araştırılması gereken bir konudur.

## 2.2. Isı Değiştiricileri

Isı değiştiricileri, mühendislik uygulamalarında en sık karşılaşılan problemlerden biri olan farklı sıcaklıklarda birbiriyle temas halindeki iki veya daha fazla akışkan arasında ısı aktarımını sağlamak üzere geliştirilmiş cihazlardır. Isı değiştiricilerinde çevreye ısı ve iş geçişi olmadığı kabul edilir. Pratikte ısı aktarımının gerekli olduğu her alanda kullanımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

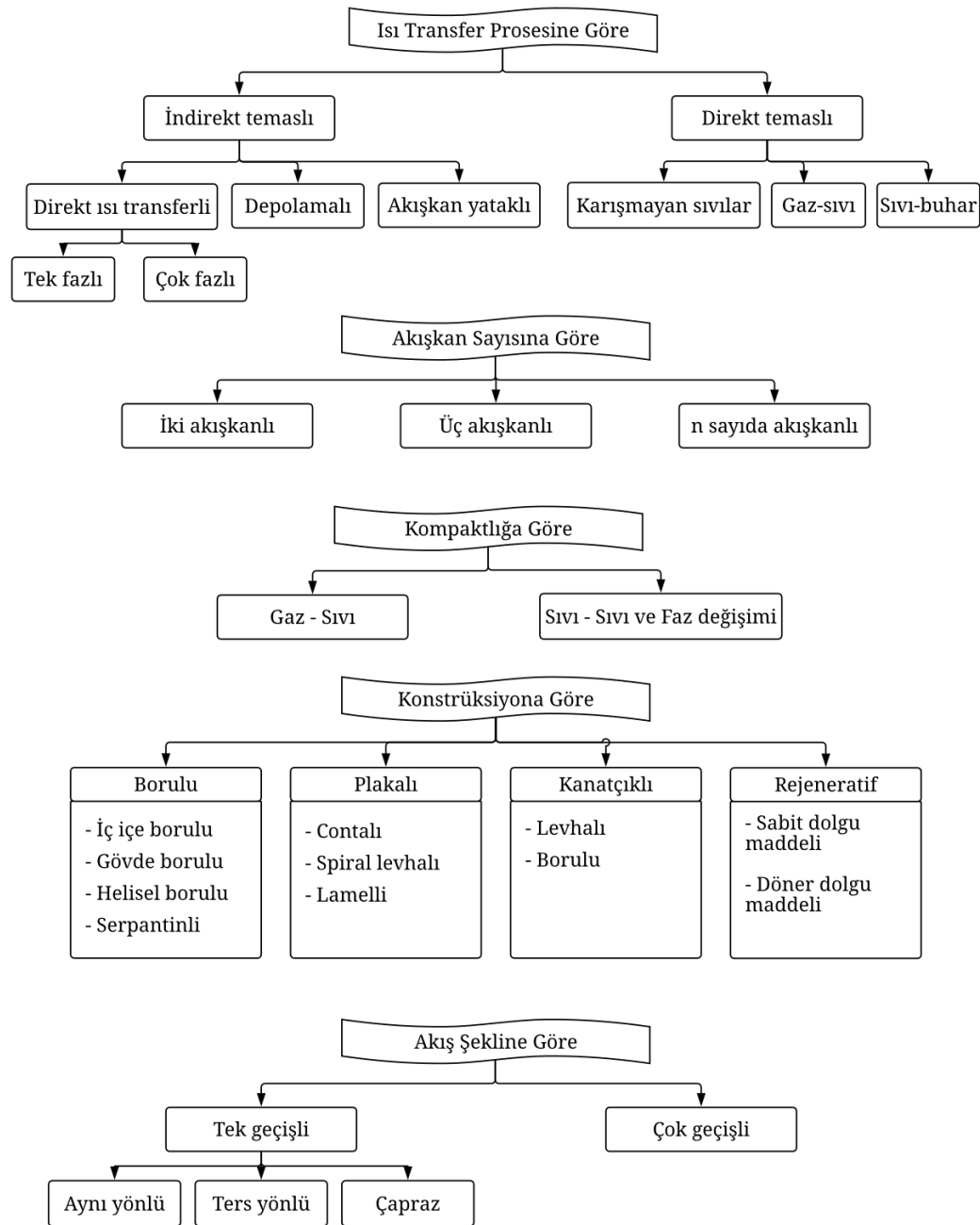
### 2.2.1. Isı değiştiricilerinin sınıflandırılması

Isı değiştiricilerin sınıflandırılması, ısı transfer prosesi, akışkan sayısı, kompaktlık, konstrüksiyon, akış düzenlemesi ve ısı transfer mekanizması gibi birçok farklı yaklaşıma göre yapılabilir. Ancak genellikle ısı değiştiricileri, kullanım amacına göre rejeneratör, reküparatör, kondenser ve evaporatör gibi farklı adlarla karşımıza çıkar. Isı değiştiricilerinin farklı isimlerle kullanılmasının nedeni ise kullanıldığı sistem ve sistemdeki ısı değiştirme şekline yani ısı transferi yapan akışkanların birbirleriyle temas edip etmediği prensibine göre sınıflandırılmalarındandır.

Reküparatör; ısı transfer edecek akışkanların bir ısı transfer yüzeyi ile ayrıldığı ve birbirleriyle karışmadığı, yani akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiriciler için kullanılan isimlendirmedir. Dolayısıyla bu tip ısı değiştiricilerde ısı transferi direkt olarak gerçekleşir. Rejeneratörler; ısı geçişinin doğrudan olmayıp, genellikle önce bir dolgu malzemesi tarafından ısının depolandığı daha sonra ikincil akışkana aktarıldığı sistemlerdir. Bu nedenle in-direkt tip olarak da bilinirler.

Kondenser ve evaporatörler; genellikle soğutma sistemlerinde kullanılan ve içerisinden geçen akışkanın yoğunlaşma veya buharlaşmasını sağlayan faz değişiminin olduğu ısı değiştiricileridir. Bu sınıflandırmalar ve ilgili sınıflandırmalara göre ısı

değiştiricisi çeşitleri Şekil 2.1’de verilmiştir. Burada kullanılan sınıflandırma, Shah ve Sekulic (2003) referans alınarak oluşturulmuştur. Isı değiştiricileri, oldukça geniş kapsamda incelenebilecek, başlı başına bir araştırma konusudur. Ancak mevcut tez çalışmasının kapsamı tüm ısı değiştiricilerin tanıtılması ve performanslarının incelenmesini içermemektedir. Bu nedenle bu kısımda tüm ısı değiştiricileri ayrı ayrı detaylandırılarak açıklanmamıştır. Tez çalışması kapsamında performansı incelenen otomobil radyatörü, Şekil 2.1’de verilen sınıflandırma dikkate alındığında gaz – sıvı arasında ısı geçişinin olduğu tek geçişli çapraz akışlı kompakt ısı değiştiricileri sınıfına girmektedir. Tez kapsamında araştırılması nedeniyle yalnızca bu tip ısı değiştiricileri için bazı detaylı bilgiler sunulmuştur.

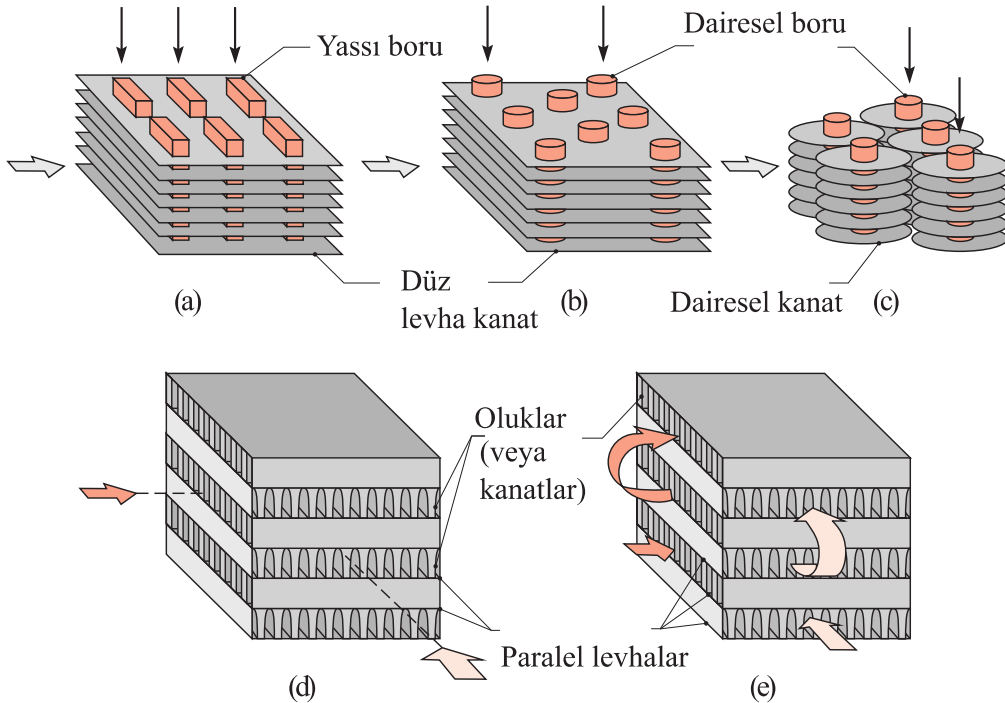


Şekil 2.1. Isı değiştiricilerin farklı yaklaşımlara göre sınıflandırılması

### 2.2.2. Kompakt ısı değiştiricileri

Kompaktlık bilinen tanımı ile birim hacimdeki yüzey alanı  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 'den büyük olan ısı değiştiriciler için yapılan bir sınıflandırmadır. Bilinen en kompakt ısı eşanjörü  $20000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  kompaktlık değeri ile insan akciğeridir (Shah ve Sekulic 2003). Kompakt ısı değiştiricileri, kanatçıklar vasıtasıyla genişletilmiş yüzeylere sahiptir. Bu tip ısı değiştiricilerde, akışkanlardan hangisinin ısı taşınım katsayısı daha düşük ise kanatçıklar o tarafa yerleştirilir. Genellikle gaz – sıvı arasındaki ısı transferinde bu tip ısı değiştiriciler tercih edilmektedir. Kompakt ısı değiştiricilerde yüzey artışı sağlamak üzere farklı kesit geometrilerinde boru ve kanatçıklar kullanmak mümkündür. Plakalı kanatçıklı ve kanatçık borulu sistemler bu tip eşanjörlerde en sık tercih edilen geometrilerdir. Bu geometrilerde bazı örnekler Şekil 2.2'de verilmiştir.

Genişletilmiş yüzeylere sahip ısı değiştiriciler olarak da bilinen kompakt ısı değiştiricilerin ısı hesapları yapılırken kanat geometrileri ile ilgili bazı önemli parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Kanatçıkların boruların iç veya dış yüzeyine yerleştirilmiş olması, kanat yoğunluğu ve aralığı gibi çeşitli parametreler ısı transfer katsayılarını doğrudan etkiler. Kompakt ısı değiştiricilerinin yüksek ısı transfer yüzey alanı / ısı değiştirici hacmi oranından dolayı ilk geliştirilme amaçları ve kullanım yerleri uzay ve deniz sektöründe olmuştur. Ancak günümüzde otomobil radyatörleri de bu tip ısı değiştiricilerin tercih edildiği bir uygulama haline gelmiştir. Çünkü gelişen otomotiv teknolojileri ile beraber artan soğutma ihtiyaçları dolayısıyla motor soğutma sistemlerinde kısıtlı bir alanda büyük yüzey alanı ve yüksek ısı transferi ihtiyacı vardır.



**Şekil 2.2.** Farklı tiplerde genişletilmiş yüzeylere sahip ısı değiştiricileri: a) düz levha kanatlı, yassı borulu b) düz levha kanatlı, dairesel borulu c) dairesel kanatlı, dairesel borulu d) tek geçişli levha kanatlı e) çok geçişli levha kanatlı (Incropera vd. 2011)

### 2.2.3. Isı değiştircilerinin ısı analiz

Mühendislik uygulamalarında genellikle iki çeşit ısı değiştircisi analiz problemi ile karşılaşılır. Bunlardan bir tanesi tasarım veya boyutlandırma problemi iken diğeri ısı değiştircisinin performansının belirlenmesi işlemidir. Yıllar içerisinde çeşitli araştırmacılar tarafından her iki problemin çözümleri için de iyi sonuçlar veren ve birbirine kıyasla avantajları olan analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Ancak bu analiz yöntemlerinin açıklanabilmesi için öncelikle bazı temel prensiplerden bahsedilmesi gerekmektedir.

Tez çalışması kapsamında nanoakışkanlar ile performans analizi gerçekleştirilen ısı değiştircisi, en genel tanımı ile yassı borulu kanatçıklı ve çapraz akışlı bir ısı değiştircisidir. Soğutma sıvısı borular içerisinden akarken, hava boruların dış yüzeyinde bulunan kanatçıkların arasından geçer ve boru cidarı üzerinden ısı transferi gerçekleşir. Dolayısıyla radyatör boruları içerisinden geçen akışkanın ısı transfer davranışı, bir boru ve kanallar içinde zorlanmış akışta ısı taşınımı problemidir. Bu nedenle de bu problemin analizinde, öncelikle i akışa ilişkin bazı temel kavramların açıklanması gerekmektedir.

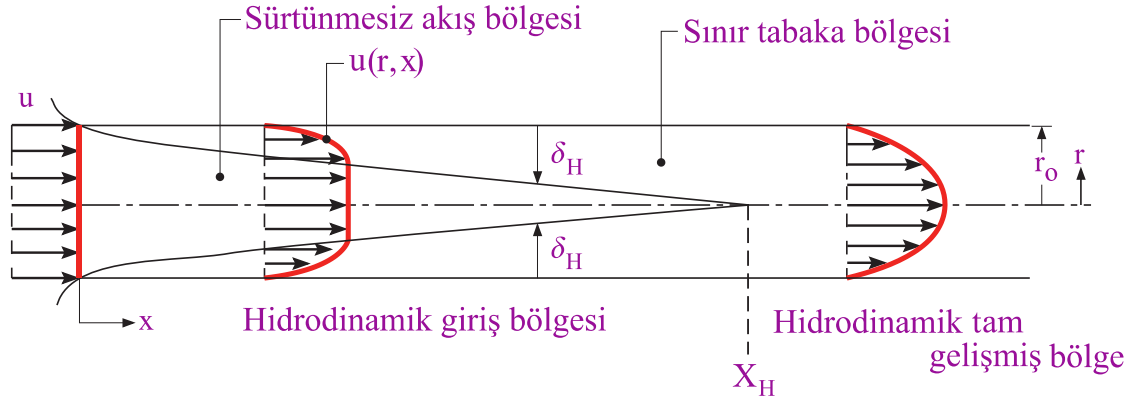
#### 2.2.3.1. İ akışa ilişkin bazı önemli kavramlar

Boru veya kanallar içerisinden olan i akışta, akışkan belirli sınırlar ile çevrelenmiştir. Dolayısıyla akışkanın hız ve sıcaklık profillerinin gelişimi de bu sınırlara göre şekillenir. Akışkanların hidrodinamik ve ısı davranışları ile kullanım şartlarına bağlı olarak Nu sayıları ve dolayısıyla taşınım katsayılarında meydana gelen değişimler incelenerek, ısı analizlerde dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar açıklanmaya çalışılmıştır. Bu kısımda kullanılan tüm eşitlikler Incropera vd. (2011)'den alınmıştır.

##### *i. Hidrodinamik davranış*

Bir akışkanın dairesel kesitli borudaki hidrodinamik davranışı Şekil 2.3 yardımı ile açıklanmaya çalışılacaktır. Şekilde gösterildiği gibi boruya sabit  $u$  hızıyla giren akışkan, boru boyunca ilerledikçe bir hız profili gelişir. Bu durum boru cidarında sürtünme kuvvetlerinin neden olduğu kaymama koşulundan kaynaklanır. Akışkan boru içerisinde ilerledikçe sınır tabaka gelişmektedir. Cidara yakın olan ve akış hızlarının azaldığı bölge “sınır tabaka bölgesi”, viskozite etkilerinin ihmal edilebilir mertebelere indiği bölge ise “sürtünmesiz akış bölgesi” olarak tanımlanır. Cidardan itibaren, akış hızının sürtünmesiz akış hızının %99'una eşit olduğu tabakaya kadar olan mesafe ise sınır tabaka kalınlığı ( $\delta_H$ ) olarak adlandırılır. Boru içerisinde ilerledikçe sürtünmesiz akış bölgesi giderek daralır ve bir noktada tamamen ortadan kalkar. Bu noktadan sonra borunun her noktasında sürtünme etkileri görölmeye başlanır. Borunun girişinden bu noktaya kadar olan bölge hidrodinamik giriş bölgesi olarak adlandırılırken, artık hız profiline  $x$  yönünde değişmediği bu noktadan sonraki kısım ise hidrodinamik tam gelişmiş bölge olarak ifade edilir.

Gelişmekte olan akış bölgesinde akış iki boyutludur ve hız hem  $x$  hem de  $r$ 'ye bağlı olarak değişir. Ancak tam gelişmiş bölgede akış artık bir boyutludur ve yalnızca  $r$  ile değişir. Şekil 2.3'de verilen akış profili incelendiğinde, hidrodinamik tam gelişmiş laminer akış için parabolik bir yapı olduğu görölebilir. Bu profilin, akışın türbölanslı olması halinde daha dolgun ve yassı olacağı unutulmamalıdır.



**Şekil 2.3.** Dairesel bir boruda laminer akış için hidrodinamik sınır tabakanın gelişimi

İç akışların hidrodinamik analizinde ilk önce belirlenmesi gereken, akışın laminer mi türbülanslı mı olduğudur. Bu bilgiye akışın  $Re$  sayısı hesaplanılarak ulaşılabilir. Boru veya kanallar içinden akış için boyutsuz  $Re$  sayısı şu şekilde ifade edilir;

$$Re = \frac{u D}{\nu} = \frac{\text{Atalet kuvvetler}}{\text{Viskoz kuvvetler}}$$

Yukarıda verilen ifadede  $u$ , boru kesitindeki ortalama hız,  $D$  boru çapı,  $\nu$  ise akışkanın ortalama sıcaklığındaki kinematik viskozite değeridir.  $Re$  sayısının küçük değerlerinde viskoz (sürtünme) kuvvetlerin, büyük değerlerinde ise atalet kuvvetlerinin etkili olduğunu söylemek mümkündür. Bu ifade yardımıyla elde edilen  $Re$  değeri eğer 2300'ün üzerinde ise atalet kuvvetlerinin, viskoz kuvvetleri yendiği ve akış içerisinde vorteks hareketleri oluşarak akışın türbülanslı olduğu söylenir. Uygulamada akışkanın tam türbülanslı olarak kabul edildiği aralık  $Re$  sayısının 10000'den büyük olduğu değerlerdir. Eğer tam türbülanslı koşullarda çalışılmak isteniyorsa bu değer üzerine çıkılması tavsiye edilir.

Akış türü belirlendikten sonra akışın gelişme durumu incelenmelidir. Boru içerisinden laminer akışta hidrodinamik giriş uzunluğu ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$X_H = 0.05 Re D$$

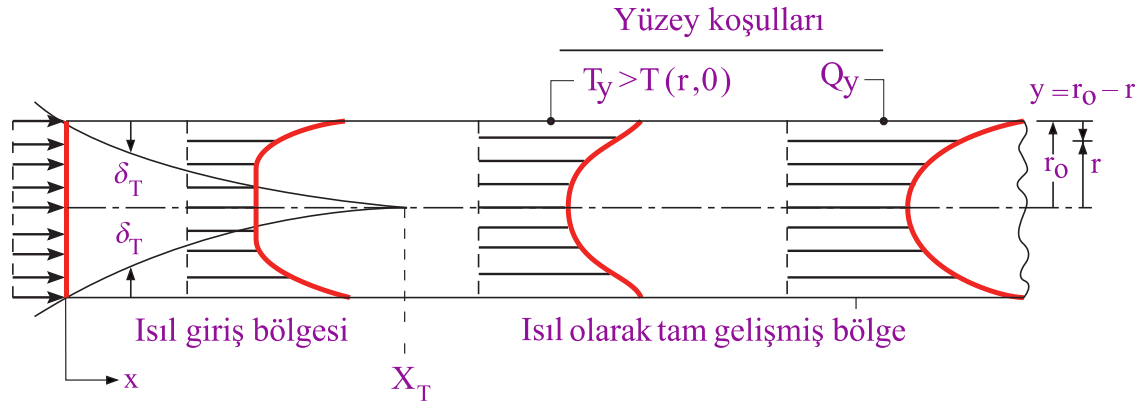
Türbülanslı akışlarda ise giriş uzunluğunun  $Re$  sayısından bağımsız olduğu görüşü hakimdir ve genellikle aşağıda verilen kabul ile kontrol yapılır;

$$10 \leq X_H/D \leq 60$$

## ii. Isıl davranış

Bir akışkanın boru içerisindeki akışında, akışkan sıcaklığı ile borunun yüzey sıcaklığı arasında bir sıcaklık farkı varsa taşınım ile ısı transferi gerçekleşir. Bu ısı geçişine bağlı olarak ise bir ısıl sınır tabaka gelişmeye başlar. Şekil 2.4’de gösterildiği gibi borunun yüzeyinde sabit sıcaklık veya sabit ısı akısı olması, yalnızca tam gelişmiş sıcaklık profilinin şeklini değiştirir. Her iki durumda da bir ısıl giriş bölgesi ve yeterli boru uzunluğu olması halinde bir tam gelişmiş bölge oluşacaktır. Isıl sınır tabaka kalınlığının ( $\delta_T$ ) girişten belirli bir uzaklıkta boru merkezine vardığı noktadan itibaren akış tam gelişmiş hale gelir. Buraya kadar olan kısma ısıl giriş uzunluğu adı verilir. Laminer akış için ısıl giriş bölgesinin uzunluğunu belirleyen ifade şu şekilde tanımlanır;

$$X_T = 0.05 Re Pr D$$



Şekil 2.4. Dairesel bir boruda laminer akış için ısıl sınır tabakanın gelişimi

Hidrodinamik ve ısıl sınır tabakaların birbirlerine göre ne şekilde geliştiğini ifade eden boyutsuz sayı,  $Pr$  sayısıdır ve momentum yayılımının ısıl yayılıma oranı olarak tanımlanır. İlgili ifadede  $\alpha$ , ısıl yayılım katsayısıdır ve  $k/\rho c_p$  olarak ifade edilebilir;

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\text{Momentum yayılımı}}{\text{Isıl yayılım}}$$

Yukarıdaki ifadeden de açıkça anlaşıldığı üzere;

- $Pr > 1$  olması durumunda, hidrodinamik sınır tabaka ısıl sınır tabakadan önce gelişir ve  $X_H < X_T$  dir (örn; yağlar).
- $Pr \approx 1$  olması durumunda, her iki sınır tabakanın beraber gelişir ve  $X_H \approx X_T$  dir (örn; gazlar).



- $Pr < 1$  olması durumunda, ısı sınır tabaka hidrodinamik sınır tabakadan önce gelişir ve  $X_H > X_T$  dir (örn; sıvı metaller).

Pratikte boru içerisinde ısı taşınım problemlerinde farklı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Yukarıdaki örnekte açıklanan durumdan farklı olarak eğer ısı transferi boru girişinden itibaren başlamıyor ve borunun belirli bir noktasından sonra gerçekleşiyorsa, bu durumda öncelikle hidrodinamik sınır tabaka gelişir. Daha sonra yüzeyde sıcaklık farkının veya sabit ısı akısının olduğu bölgeye gelindiğinde ısı sınır tabaka gelişmeye başlar. Bu tür durumlarda genellikle ısı sınır tabakanın gelişmeye başladığı bölgede akış, hidrodinamik olarak tam gelişmiş hale ulaşmıştır.

Boru ve kanallar içerisinde akışta taşınım ile ısı transferinde bir diğer önemli boyutsuz sayı ise Nusselt sayısıdır. Nu sayısı, ısı taşınım katsayısının belirlenmesinde kullanılır ve boru içinden zorlanmış akışta aşağıdaki parametrelerin bir fonksiyonudur;

$$Nu = f(Re, Pr, Geometri)$$

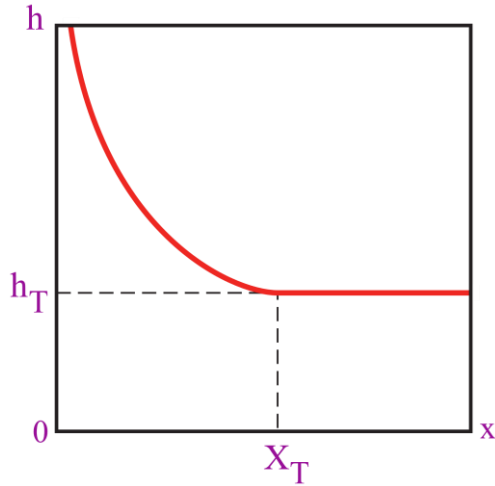
Nu sayısı karakteristik uzunluk içinde taşınım ile ısı transferinin iletimle ısı transferine oranıdır ve şu şekilde ifade edilir;

$$Nu = \frac{h D}{k} = \frac{\text{Taşınım ile ısı transferi}}{\text{İletimle ısı transferi}}$$

Burada  $h$ , akışkanın taşınım katsayısı,  $D$  çap,  $k$  ise akışkanın ısı iletim katsayısıdır. Nu sayısının fiziksel anlamı incelendiğinde, iletimin taşınımına eşit olduğu  $Nu = 1$  durumunda ısı transferinin yalnızca iletimle gerçekleştiği yani akışkanın durgun olduğu söylenebilir. Bu halin dışında iletim ve taşınım mekanizmalarından hangisi daha baskın ise Nu sayısının değeri buna göre oluşacaktır. Nu sayısının çok büyük değerlerinde ısı transferinin tamamen taşınım ile gerçekleştiğini ve iletim etkilerinin ihmal edilebileceğini söylemek mümkündür.

Boru ve kanallar içerisinde laminer zorlanmış akışta ısı ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış için hız ve sıcaklık profilleri tam olarak oluştuğundan, analitik inceleme kolaydır. Sürtünme faktörleri ve ısı taşınım katsayıları tespit edilerek, ısı transferi ve basınç düşüşü hesaplarının yapıldığı ilgili incelemeler, literatürde birçok kaynakta detaylı bir şekilde bulunmaktadır (Shah ve Sekulic 2003; Incropera vd. 2011; Çengel 2014). Giriş bölgesi olarak da adlandırılan ve hız ve / veya sıcaklık profillerinden biri ya da ikisinin birden gelişmediği bölgede ise tam gelişmiş akış bölgelerinden farklı analizler yapılması gerekir. Bu kısımda üzerinde durulmak istenen konu, gelişmekte olan akış bölgeleridir. Çünkü tez çalışması kapsamında da incelenen yassı kesit geometrisine sahip borularda (çok küçük hidrolik çapa sahip) yüksek viskoziteli akışkanların laminer zorlanmış akışı söz konusudur. Bu tip akışların ısı taşınım probleminin analizinde, hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan durum ile karşılaştırılmıştır. Dolayısıyla bu özel duruma ait detayların sunulmasında fayda olduğu düşünülmektedir.

Çok uzun borularda genellikle ihmal edilebilen giriş bölgesi, bazı akış durumlarında önemlidir ve ısı transferinde belirleyici rol oynar. Giriş bölgesinin önemi, bu bölgede taşınım katsayılarının çok daha yüksek olmasıdır. Boru içerisinde giriş bölgesinden tam gelişmiş bölgeye doğru ısı taşınım katsayısının değişimi Şekil 2.5'ten görülebilir. Şekilden de görüldüğü üzere taşınım katsayısı  $x$ 'e bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Daha önce Şekil 2.4'de gösterildiği gibi borunun tam girişinde ısı sınır tabaka kalınlığı sıfırdır. Bu nedenle boru girişinde taşınım katsayıları çok büyüktür. Ancak ısı sınır tabaka geliştikçe, taşınım katsayısı da azalır ve tam gelişmiş koşullara ulaşıldığında sabit değerine ulaşır. Bu noktadan sonra taşınım katsayısı konumla değişmez.



Şekil 2.5. Boru içerisinde taşınım katsayısının değişimi

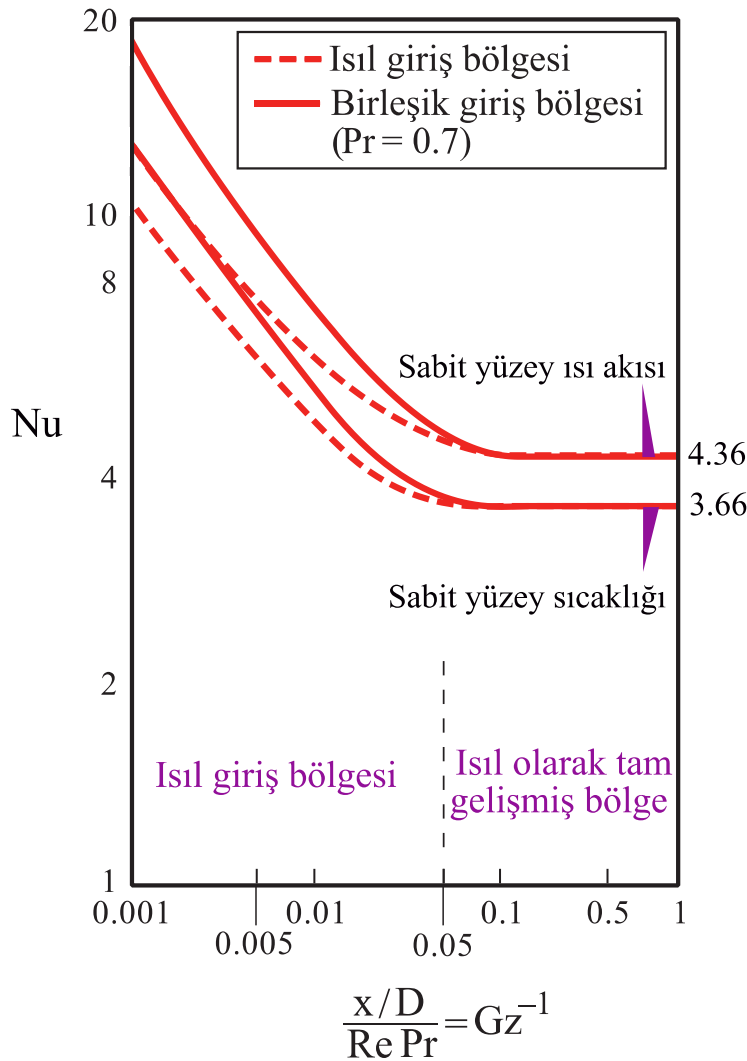
Giriş bölgesi ile ilgili problemler genellikle iki şekilde ortaya çıkabilir. İlk durumda ısı giriş bölgesi söz konusudur ve problemde öncelikle hız profilinin geliştiği, daha sonra ısı koşulların oluşmaya başladığı durum için çözüm yapılır. Bu durumun oluşabilmesi için ya borunun girişinde izotermal bir bölgenin olması ya da Pr sayıları büyük olan yağlar gibi akışkanların kullanıldığı bir sistem olması gerekir. İkinci durum ise birleşik giriş bölgesi problemidir. Isıl olarak tam gelişmiş, hidrodinamik gelişmekte olan üçüncü ihtimal hiçbir zaman gerçekleşemez. Çünkü bir akışkanın sıcaklık dağılımı hız dağılımına bağlıdır ve hız değişmeye devam ettiği sürece ısı koşulların tam gelişmiş hale ulaşması mümkün değildir.

Sabit yüzey sıcaklığına sahip dairesel kesitli bir boruda laminer akış için ısı giriş bölgesine ait klasik çözüm literatüre Özişik (1977)'nin de belirttiği gibi Graetz tarafından kazandırılmıştır (Graetz 1885). İlgili durum "Graetz problemi" olarak bilinir. Gerçekleştirilen sayısal analizler, yeni bir boyutsuz sayının tanımlanmasını gerektirmiş ve bu boyutsuz sayı probleme adını veren araştırmacıdan dolayı Graetz sayısı adını almıştır;

$$Gz = \frac{Re Pr D}{x}$$

Bu çalışmalar sayesinde hem ısıl hem de birleşik giriş problemi için birçok farklı çözüm elde edilmiştir. Bu çözümlerin bir kısmı Şekil 2.6'da verilen grafik yardımıyla sunulmuştur. İlgili çözümde birleşik giriş bölgesi için yapılan analitik hesap,  $Pr = 0.7$  için gerçekleştirilmiştir. Graetz problemi farklı araştırmacılar tarafından çeşitli sınır koşulları ve geometriler için geliştirilmiş, literatüre birçok analitik çözüm kazandırılmıştır.

Mevcut tez çalışması için akışın durumu ve deneysel koşullara bağlı olarak hidrodinamik ve ısıl olarak hangi durumda olduğu belirlendikten sonra literatürden uygun  $Nu$  ifadeleri seçilerek analizlerde kullanılmıştır. İlgili hesaplamalar ve seçilen denklemlere ait detaylı bilgiler "Materyal ve Metot" bölümünde sunulmuştur.



**Şekil 2.6.** Boru içerisinden laminer akışta ısıl ve birleşik giriş bölgeleri için yerel  $Nu$  sayılarının değişimi (Kays ve Crawford 1980)

### 2.2.3.2. Analiz yöntemleri

#### i. Toplam ısı transfer katsayısı ( $U$ )

Sıcak ve soğuk akışkanların belirli bir yüzey vasıtasıyla ayrıldığı durumlarda, yüzeyin her iki tarafında da hareketli akışkanların olması durumunda tanımlanan ve iki akışkan arasındaki ısı geçişinde toplam direnç ifadesini veren kavram toplam ısı transfer katsayısıdır. Isı değiştiricilerin ısıl analizinde bu kavram önemli bir yer tutar. Toplam ısı transfer katsayısı, akışkanlar arasındaki taşınım ve çeşitli iletim dirençlerini göz önüne alır. Genel durum için ifade şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_{sıcak}A_{sıcak}} = \frac{1}{U_{soğuk}A_{soğuk}} = \frac{1}{(hA)_{sıcak}} + R_w + \frac{1}{(hA)_{soğuk}}$$

Bu ifadede  $R_w$  duvarın ısı iletim direncidir. Bu ifade temiz ve kanatsız bir yüzey için yazılmıştır. Isı değiştiricilerinde kullanıma bağlı olarak zamanla oluşacak kirlilik faktörleri ihtiyaç duyulması halinde denkleme ilave edilmelidir. Kirlilik faktörleri ısı değiştiricilerinin kullanıldıkları ortama ve kullanım süresine bağlı olduğu için oldukça değişken bir konudur. Literatürde bu konu ile ilgili yapılmış çalışmalardan daha detaylı bilgilere ulaşmak mümkündür.  $UA$  terimi hem sıcak hem soğuk akışkan tarafı için aynı değerdedir. Ancak toplam ısı transfer katsayısı hesaplanmak istendiğinde akışkanların ısı transfer yüzey alanları farklı olduğundan ısı transfer katsayılarının da farklı olacağı unutulmamalıdır. Bu nedenle ısı değiştiricilerinde toplam ısı transfer katsayısı hesabı yapılırken referans alınan yüzey alanı mutlaka belirtilmelidir.

Arttırılmış yüzeyler için ısı transfer analizlerinde kullanılmak üzere her iki tarafa da kanatçık eklenmesi durumu için genel ifade genişletilerek yazılırsa şu şekli alır;

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(\eta_o hA)_{sıcak}} + R_w + \frac{1}{(\eta_o hA)_{soğuk}}$$

Denklemden yer alan  $\eta_o$  ifadesi toplam yüzey verimini ifade eder ve bir kanatçığın verimi ( $\eta_k$ ) kullanılarak hesaplanabilir. Burada  $A$  ise toplam ısı transfer yüzey alanıdır.

Toplam yüzey verimi ve kanatçık verimi ifadelerinin açıklanabilmesi için, öncelikle arttırılmış yüzeyler ile ilgili bazı temel kavramların anlaşılması gerekmektedir. Arttırılmış yüzey terimi; bir yüzeyden olan ısı transferini arttırmak amacıyla o yüzeye eklenen elemanları ifade etmektedir. Bu elemanlar genellikle kanatçık olarak adlandırılır.

Bir yüzeye kanatçık eklendiğinde bu uygulamanın ısı transferini kesin olarak arttıracığını söylemek mümkün değildir. Çünkü her ne kadar kanatçık eklemek ısı transfer yüzey alanını arttırsa da aynı zamanda kanatçıklardan kaynaklı olarak yüzeyin iletim direnci de artmaktadır. Bu durumu değerlendirmek ve kanatçık kullanımının faydalı olup olmadığını tespit etmek için çeşitli kavramlar tanımlanmış ve bir yüzeye kanatçık eklenmesi için gerekli koşullar belirlenmiştir.

İlk kavram *kanatçık etkenliğidir*;

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{Q}_{kanat}}{h A_{taban,k} (T_t - T_\infty)} = \frac{\text{Kanatçıklardan ısı transferi}}{\text{Kanatçık olmasaydı aynı dip alandan olan ısı trf.}}$$

Burada  $A_{taban,k}$ , kanatçık tabanında kanatçığın kesit alanı,  $T_t$  taban sıcaklığı ve  $T_\infty$  ortam sıcaklığıdır. Bir tasarımın gerçekçi olabilmesi ve kanatçık kullanımının önerilmesi için, kanatçık etkenliğinin mümkün olan en yüksek değerde olması istenir ve sınır değer  $\varepsilon_k \geq 2$  dir.

Gerçekte kanatçık eklenen yüzeyin bulunduğu taraftaki ısı taşınım katsayısı, kanatçıkların yapısından yerleşim şekline kadar birçok parametreye bağlı olarak değişir. Ancak uygulamada bu değişimler çok fazla dikkate alınmaz. Bu nedenle kanatçıklı yüzeyin taşınım katsayısı kanatçiksiz yüzeyinkine eşit kabul edilir ve kanat etkenliği şu şekilde ifade edilebilir (Incropera vd. 2011);

$$\varepsilon_k = \left( \frac{k \zeta}{h A_{taban,k}} \right)^{1/2}$$

Yukarıda verilen ifadede,  $k$  kanatçıkların ısı iletim katsayısı ve  $\zeta$  kanatçık kesitinin çevresidir. Bu ifadeden çeşitli çıkarımlar yapmak mümkündür;

- Kanatçık etkenliği, kanatçık malzemesinden yani ısı iletim katsayısından doğrudan etkilenir. Kullanılan malzemenin ısı iletim katsayısı ne kadar yüksek ise etkenlik de o kadar yüksek olacaktır.
- Kanatçık çevresinin taban alanına oranı arttıkça etkenlik artmaktadır. Bu kavramın uygulamadaki karşılığı, ince fakat sık aralıklar ile kanat yerleşimi yapmaktır.
- Bir diğer önemli sonuç, taşınım katsayısı ile alakalıdır. İfadeden açıkça anlaşıldığı üzere, taşınım katsayısının küçük olduğu yerlerde kanatçık kullanmak kanatçık etkenliğini arttıracaktır. Örneğin otomobil radyatörlerinde olduğu gibi gaz – sıvı arası ısı transferinin gerçekleştiği durumlarda gaz akışkan tarafına kanatçık eklemek daha yararlıdır.

Kanatçıkların ısıl performansı ile ilgili bir diğer önemli parametre *kanatçık verimidir*. Kanatçık verimi ifadesi kanatçıktan gerçekte olan ısı transferinin, olabilecek potansiyel maksimum ısı transferine oranıdır. Bu maksimum ısı transferi, kanatçıklar bağlı oldukları taban ile aynı sıcaklıkta olduğunda, yani maksimum sıcaklık farkı oluştuğunda gerçekleşir;

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_{kanat}}{\dot{Q}_{maksimum}} = \frac{\dot{Q}_{kanat}}{h A_{y,k} (T_t - T_\infty)}$$

Burada  $A_{y,k}$ , kanatçıkların toplam yüzey alanıdır. Uygulamada genellikle geçerli olan sabit kesitli ucu yalıtılmış (adyabatik uçlu) bir kanatçık için kanatçık verimi ifadesi aşağıda verilen eşitlik yardımıyla bulunabilir;

$$\eta_k = \frac{\tanh(ml)}{ml}$$

Bu ifadede  $l$ , kanat uzunluğudur ve çeşitli kanat profilleri için kanadın ucundan olan ısı transferini de dikkate alan düzeltilmiş kanat uzunluğu kavramı tanımlanmıştır. Literatürde birçok profil için özel olarak tanımlanan ifadeler mevcuttur.  $m$  ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$m = \sqrt{\frac{h \zeta}{k A_{kesit,k}}}$$

Bu ifadedeki  $A_{kesit,k}$ , kanatçığın kesit alanıdır.

Tek bir kanatçığın veriminin tanımlanması ile birlikte, bir yüzeyde dizi halinde kullanılan kanatçıklar için o yüzeyin ısı davranışını ifade eden *toplam yüzey verimi* kavramı açıklanabilir;

$$\eta_o = \frac{\dot{Q}_{toplam}}{\dot{Q}_{maksimum}} = \frac{\dot{Q}_{toplam}}{h A (T_t - T_\infty)}$$

$A$  toplam yüzey alanı, kanatçıklı ve kanatçiksiz alanların toplamıdır.  $\dot{Q}_{toplam}$  ise bu alandan gerçekleşen ısı transferidir. Böylece toplam yüzey verimi ifadesini bir kanatçığın verimine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazmak mümkündür;

$$\eta_o = 1 - \frac{A_k}{A} (1 - \eta_k)$$

Literatürde bilinen bazı akış durumları ve akışkan çiftleri için toplam ısı transfer katsayılarının yaklaşık değerleri, farklı tipte ısı değiştiricileri için bu değerlerin hangi mertebelerde olduğuna dair referans olması amacıyla Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

**Çizelge 2.1.** Bazı akış durumları ve akışkan çiftleri için yaklaşık  $U$  değerleri (Incropera vd. 2011)

<i>Akışkan Çifti</i>	<i><math>U</math> [<math>W/m^2K</math>]</i>
Su – su	850-1700
Su – yağ	110-350
Boru içinde su buharı yoğuşması	1000-6000
Boru içinde amonyak yoğuşması	800-1400
Boru içinde alkol yoğuşması	250-700
Kanatlı borulu ısı değiştiricilerinde (hava -su çapraz akış durumu)	25-50

### *ii. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemi (LMTD)*

Sıcak ve soğuk akışkanın giriş – çıkış sıcaklıkları ile debilerinin bulunduğu durumlarda ısı değiştiricisinin boyutlarını belirlemek için en uygun yöntemdir. Genellikle bu yöntemin kullanılmasındaki amaç, ihtiyaç duyulan ısı transfer miktarını karşılayacak ısı değiştiricisinin seçimini yapmak veya sıfırdan tasarımını gerçekleştirmektir.

Bu metotta işlem sırası öncelikle ısı değiştiricisinin çeşidini belirlemekle başlar. Daha sonra sıcaklık ve debi bilgileri kullanılarak ısıl denge denklemleri ile ısı transfer miktarı belirlenir. Ardından logaritmik ortalama sıcaklık farkı hesaplanarak ısı değiştiricisinin akış şekline bağlı olarak  $F$ , düzeltme faktörü bulunur. Daha sonra toplam ısı transfer katsayısına ulaşılarak ısı değiştiricisinin ısı transfer yüzey alanı belirlenmiş olur. Açıklanan yöntemde ihtiyaç duyulan eşitlikler işlem sırasına göre aşağıda açıklanmıştır.

Isı değiştiricisinden çevreye ısı kaybının olmadığı, potansiyel ile kinetik enerjilerin ihmal edildiği sürekli akışlı bir sistemde enerjinin korunumu, sıcak ve soğuk akışkanlara uygulanır ve ilgili denklemler faz değişiminin olmadığı durum için sabit özgül ısıda yazılırsa;

$$\dot{Q} = \dot{m}_{sıcak} c_{p,sıcak} (T_{sıcak,g} - T_{sıcak,ç})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{soğuk} c_{p,soğuk} (T_{soğuk,ç} - T_{soğuk,g})$$

elde edilir. Yukarıdaki denklemlerde “g” alt indisi akışkanların giriş sıcaklığını, “ç” alt indisi ise çıkış sıcaklıklarını ifade etmektedir.

Isı değiştiricilerinin yzey alanlarının tespit edilmesi amacıyla, Newton'un Soğuma Kanunu'nun geliştirilmiş hali olan ve taşınım katsayısı yerine toplam ısı transfer katsayısı ile tanımlanan, sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki sıcaklık farkına bağlı bir ilişki kuran ifade yazmak mkmkündür. Ancak boru içerisindeki akışkan ile diğer akışkan arasındaki sıcaklık farkı, konuma bağlı değişmektedir. Bu nedenle öncelikle bu değişken sıcaklık farkını ifade eden bir tanıma ihtiyaç duyulmuştur. Metodun adını da aldığı logaritmik ortalama sıcaklık farkı şu şekilde hesaplanır;

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{maks} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{maks}}{\Delta T_{min}}}$$

Böylece toplam ısı transfer katsayısı ile beraber tanımlanan ısı geçişi ifadesi şu hali alır;

$$\dot{Q} = U A \Delta T_{ln} F$$

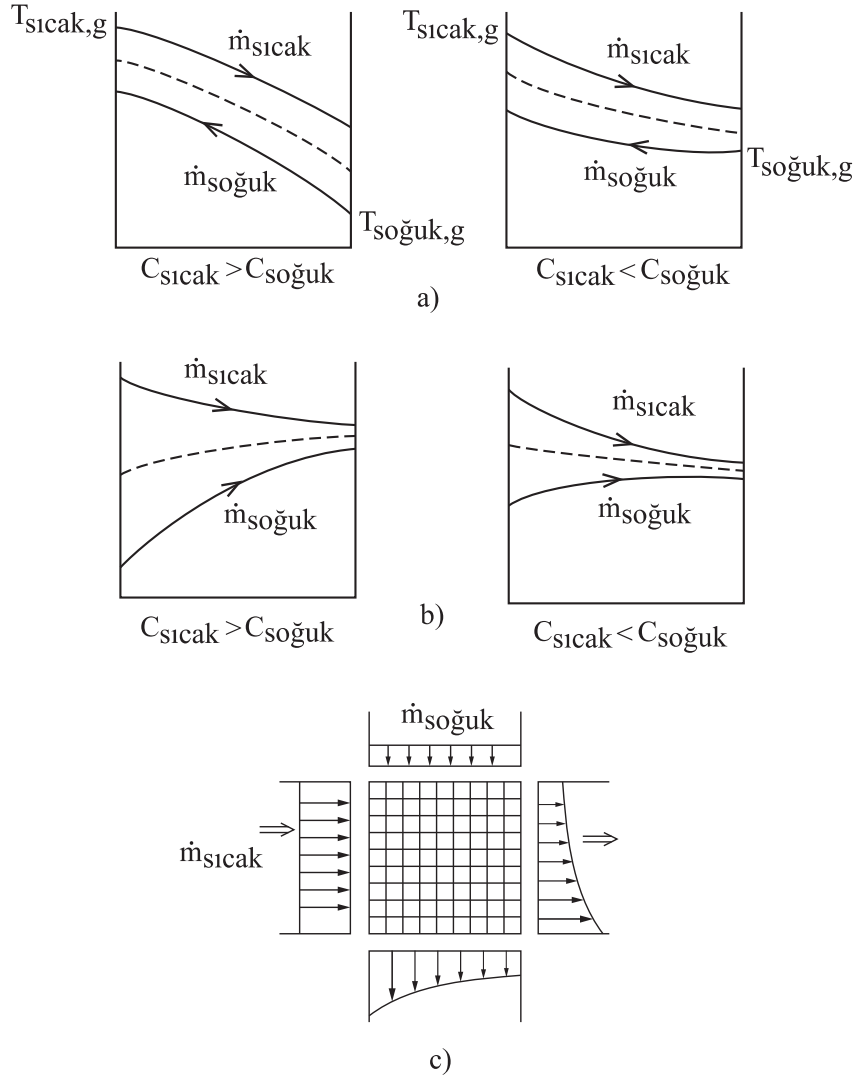
Bu ifadedeki  $F$ , düzeltme faktörü, aynı veya ters yönlü paralel akış düzenine sahip olmayan ısı değiştiricilerinde logaritmik ortalama sıcaklık farkının hesabında meydana gelen hatanın düzeltilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Çok gövde, çok boru geçişli veya çapraz akış düzenine sahip olan ısı değiştiriciler ters akışlı olarak kabul edilerek  $\Delta T_{ln}$  hesaplandıktan sonra  $F$  düzeltme faktörü ile çarpılarak ilgili değer düzeltilmeye çalışılır. Bu değer ısı değiştiricilerinin geometrileri, sıcak ve soğuk akışkanların giriş ve çıkış sıcaklıklarına göre literatürde bulunan ve "Bowman Diyagramları" olarak bilinen diyagramlar (Bowman 1936) veya denklemlerden belirlenir. Isı değiştiricilerin düzeltme faktörlerinin hesaplanmasında önem taşıyan çeşitli akış düzenlemeleri ve bu akış düzenlemelerinde meydana gelen sıcaklık dağılımları şekil 2.7'de verilmiştir.

### iii. $\epsilon$ -NTU yöntemi

Isı değiştiricilerinin analizinde karşılaşılan bir diğer problem, giriş sıcaklıkları ve debileri bilinen akışkanlar için ısı değiştiricisinde elde edilen ısı transfer miktarının ve akışkanların çıkış sıcaklıklarının belirlenmesidir. Bu durum ile genellikle özellikleri bilinen mevcut bir ısı değiştiricisinin analizi yapılmaya çalışıldığında karşılaşılır. Dolayısıyla ısı değiştiricisinin ısı transfer yzey alanı bellidir ancak performansı bilinmediğinden akışkanların çıkış sıcaklıklarına ilişkin bir bilgi yoktur.

Bu problemin analizinde LMTD metodunun kullanılması mkmkündür ancak oldukça zahmetli iterasyon işlemleri gerektirir dolayısıyla pratik değildir. Bu duruma bir çözüm üretmek adına literatüre kazandırılan  $\epsilon$ -NTU yöntemi, ilk kez 1952 yılında yayımlanan ve daha sonra yıllar boyunca kompakt ısı değiştiricilerin analizlerinde önemli bir başvuru kaynağı haline gelen Kays ve London (1984)'in önemli kitabı "Kompakt Isı Değiştiricileri" nde kullanılmıştır.





**Şekil 2.7.** Isı değiştiricilerde kullanılan çeşitli akış dzenlemelerinde oluşan sıcaklık dağılımları: a) ters yonlu, b) aynı yonlu, c) cıpraz (karışmayan)

Bir ısı değiştiricisinde maksimum ısı transferi, ya soğuk akışkan sıcak akışkanın giriş sıcaklığına kadar ısıtıldığında ya da sıcak akışkan soğuk akışkanın giriş sıcaklığına kadar soğutulduğunda gercekleşir. Akışkanların ısıl kapasitansları birebir aynı olmadıkça bu iki durumun eş zamanlı olarak gercekleşmesi moomkun değildir. Genellikle pratikte karışılaşılan durum da zaten akışkanların farklı ısıl kapasitanslarının olmasıdır. Buna bağlı olarak akışkanlardan ısıl kapasitansı kucuk olan daha buyuk bir sıcaklık değişimine maruz kalacağı iwin ulaşabileceği maksimum sıcaklık değerine de ilk ulaşan akışkan olacaktır. Dolayısıyla da sistemde transfer edilebilecek ısı transferini de o belirleyecektir. Buyece bir ısı değiştiricisinde moomkun olan maksimum ısı transferini şu şekilde tanımlamak moomkundur;

$$\dot{Q}_{maks} = C_{min}(T_{sıcak,g} - T_{soğuk,g})$$

Burada  $C_{min}$ ,  $C_{sıcak} = \dot{m}_{sıcak} c_{p,sıcak}$  ve  $C_{soğuk} = \dot{m}_{soğuk} c_{p,soğuk}$  değerlerinden küçük olana karşılık gelir.

Isı değiştiricisinde transfer edilen ısı miktarını aşağıdaki eşitlik ile hesaplamak mümkündür;

$$\dot{Q} = C_{sıcak}(T_{sıcak,g} - T_{sıcak,ç}) = C_{soğuk}(T_{soğuk,ç} - T_{soğuk,g})$$

Etkenlik – transfer birimi sayısı olarak Türkçeye çevrilebilecek yöntemde etkenlik kavramı, ısı değiştiricisinde transfer edilen ısı miktarının transfer edilebilecek olan maksimum miktara oranı olarak açıklanabilir. Yukarıda açıklanan ısı transfer ifadeleri yardımıyla matematiksel olarak tanımlanmak istenirse etkenlik ifadesi şu şekilde yazılabilir;

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{maks}} = \frac{C_{sıcak}(T_{sıcak,g} - T_{sıcak,ç})}{C_{min}(T_{sıcak,g} - T_{soğuk,g})} = \frac{C_{soğuk}(T_{soğuk,ç} - T_{soğuk,g})}{C_{min}(T_{sıcak,g} - T_{soğuk,g})}$$

Etkenlik boyutsuz bir büyüklüktür ve ancak  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  değerleri arasında değişen değerler alabilir. Bir ısı değiştiricisinin etkenliği ve akışkanların giriş sıcaklıkları biliniyorsa, ısı değiştiricisinin ne kadar ısı transfer edebileceği de kolaylıkla hesaplanabilir. Bu nedenle etkenlik oldukça faydalı bir büyüklüktür. Etkenlik değeri aşağıdaki değerlerin bir fonksiyonudur;

$$\varepsilon = f(NTU, C^*, \text{akış şekli})$$

Etkenlik hesabında gerekli olan “geçiş birimi sayısı (NTU)” aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$NTU = \frac{U A}{C_{min}}$$

Daha sonra akışkanların ısı kapasitanslarının oranı olan ( $C_{min}/C_{maks}$ ) ve genellikle  $C^*$  ile gösterilen değere ihtiyaç vardır. Elde edilen  $NTU$  ve  $C^*$  değerleri kullanılarak ısı değiştiricilerine göre özel olarak tanımlanmış denklemlerden veya ilgili denklemlerin elde edildiği grafiklerden etkenlik değerlerine ulaşılır. Bahsedilen denklem ve grafikler oldukça geniş bir kapsamda birçok farklı referansta mevcut olduğundan burada ayrıca sunulmamıştır.

### 2.3. Otomobillerde Motor Soğutma Sistemleri

Otomobillerde kullanılan motor soğutma sisteminin temel görevi, aracın tüm kullanım şartlarında motorun güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktır. Bir motorun verimli çalışabilmesi için ideal çalışma sıcaklık aralığında bulunması gerekir. İçten yanmalı motorlarda yanma esnasında açığa çıkan ısı, uzaklaştırılmadığı takdirde motor parçalarına zarar verebilecek kadar yüksektir (yaklaşık 1500 – 2000°C). Bu yüksek ısı ayrıca motor yağının oksitlenmesine ve işlevini yerine getirememesine de yol açabilir. Motorun aşırı ısınması halinde karşılaşılabilecek bir diğer problem de motor bloğu ve çevresi arasında meydana gelecek yüksek sıcaklık farkıdır. Bu sıcaklık farkı motor bloğunda ısı gerilmelerin yükselmesine ve motor parçalarında şekil bozukluğu hasarlarının oluşmasına yol açabilir. Bu nedenle sıcaklık farklarının da belirli bir aralıkta tutulması gereklidir. Motorda soğutma işlevini yerine getirmek amacıyla kullanılan iki tip sistem bulunmaktadır. Bu sistemler aşağıda açıklanmıştır.

#### 2.3.1. Hava soğutmalı sistemler

Hava soğutmalı sistemlerde direkt olarak motor üzerine yerleştirilmiş kanatçıklar vasıtasıyla yüzey alanı arttırılmakta ve bir fan aracılığıyla motorda soğuma işlevi gerçekleştirilmektedir. Bilindiği üzere bu yöntemle transfer edilebilecek ısı miktarı, kullanılan kanatçıkların toplam yüzey alanına, havanın hızına ve miktarına aynı zamanda sıcaklığına bağlıdır. Hava soğutmalı sistemler genellikle motosiklet, mobilet, küçük otomobiller ve küçük uçak motorları gibi düşük beygir güçlerine sahip taşıtlarda tercih edilir. Düşük soğutma kapasitesine sahip olmalarına rağmen aşağıda sayılan çeşitli avantajları da bulunmaktadır;

- Tasarımları ve uygulamaları basittir,
- Sıvı soğutmalı sistemlere kıyasla daha az eleman içermelerinden dolayı oldukça hafiftirler,
- Üretim, bakım ve onarım maliyetleri yine sıvı soğutmalı sistemlere kıyasla daha düşüktür,
- Donma riski taşımazlar.

#### 2.3.2. Sıvı soğutmalı sistemler

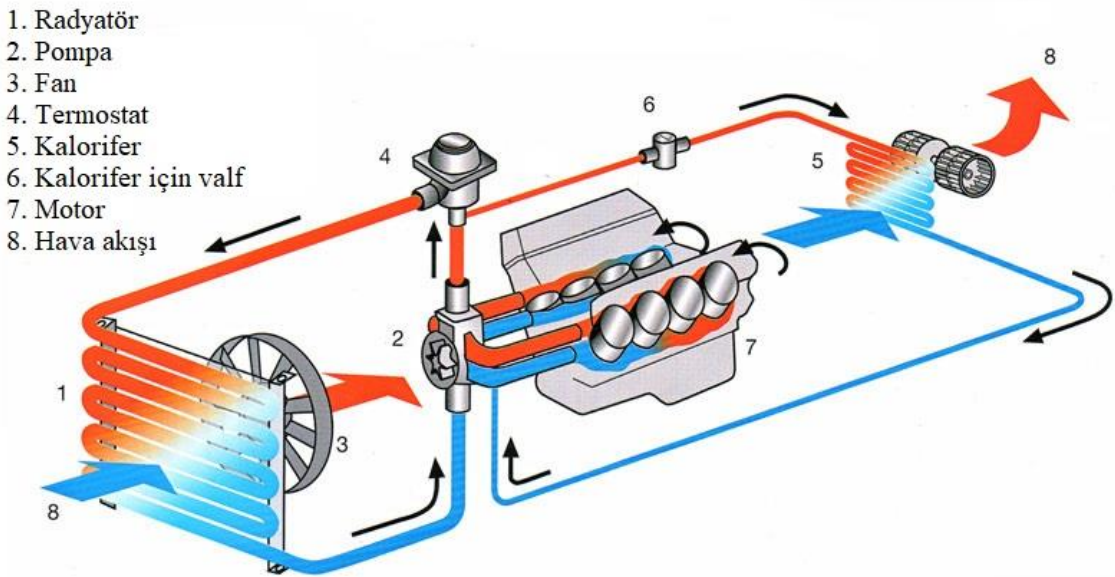
Birkaç farklı sıvı soğutmalı sistem bulunmakla birlikte, günümüz otomobillerinde kullanılan klasik bir sıvı soğutmalı sistem; radyatör, fan, akışkan pompası, akışkan deposu, termostat ve hem radyatör hem de kalorifer tarafı için gerekli borulamalardan oluşur. Motorun ilk çalıştırıldığı ısınma sürecinde soğutma sıvısı alt depolama tankından motor bloğuna doğru pompalanır ve burada silindirlere hareketi dolayısıyla ısınır. Soğutma sıvısı motor çalışma sıcaklığına ulaşana kadar termostat devreye girmez. Bu sıcaklığa ulaştığında ise devreye giren termostat sayesinde bu kez radyatöre gönderilen akışkan yassı borulardan geçerken ısınıp havaya verir ve motora geri döner. Standart termostatlar 70 ile 75°C arasında açılmaya başlayacak ve 82°C’de tamamen açık konuma gelecek şekilde dizayn edilirler. Bu değerler yüksek sıcaklık termostatlarında daha fazladır. Soğutma sıvısının çalışma sıcaklığı ise genellikle yaklaşık 90 °C’dir.

Sistemde bulunan fanın görevi, radyatörde yeteri kadar soğuma sağlanamaması ve aşırı ısınma riskinin oluşması hallerinde devreye girerek ısı transferine yardımcı olmaktır. Bu duruma ek olarak soğutma sıvısında toplanan ısı enerjisi, ikinci bir devre yardımıyla otomobili ısıtmakta kullanılabilir.

Radyatörler soğutma sisteminin en temel elemanı olup, bakır veya pirinç malzemeden üretilmekle beraber son yıllarda alüminyumdan yapılan modelleri de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bakır ve pirinç radyatörlerin tamiri kolaydır. Aşınma oluşmadığı için tercih edilmektedir. Ancak bu radyatörler oldukça ağırdır. Bu sebeple son yıllarda otomobillerin hafifletilme çalışmalarının bir parçası olarak yerlerini alüminyumdan yapılan modellere bırakmışlardır (Canbolat vd. 2014). Otomobil radyatörleri, yassı borulu kanatlı tip çapraz akışlı ısı değiştiricileridir ve ana görevleri motorda oluşan yüksek ısıyı uzaklaştırmaktır. Bu sayede motorların güvenli bir sıcaklıkta ve yüksek performansta çalışması sağlanır. Soğutma sisteminin bir diğer önemli elemanı, sistem içerisindeki basıncı kontrolünü sağlayan radyatör kapağıdır. Soğutma sıvısının sıcaklığı yükselmeye başladıkça sistem içerisinde artan basıncı dengelemeye yarar.

Motor soğutma sistemlerindeki boru tesisatlarında yüksek sıcaklık dayanımlı plastik borular kullanılmaktadır. Ana hortumlar üst ve alt radyatör hortumları olarak adlandırılır, yaklaşık olarak 1.5-2 inç çapındadır ve motor ile radyatör arasında soğutma sıvısının dolaşımını sağlar.

Sistemde kullanılan sirkülasyon pompaları genellikle silindir bloğunun ön kısmına yerleştirilirler. Soğutma işleminin sağlıklı bir şekilde gerçekleşebilmesi için radyatör ve motor bloğu arasında akışkanın hareketi de iyi bir şekilde sağlanmalıdır. Bu dolaşım sirkülasyon pompası tarafından sağlanır. Tüm bu elemanları ve birbirleri ile bağlantılarını gösteren örnek bir sıvı soğutmalı sistem Şekil 2.8’de sunulmuştur.



Şekil 2.8. Örnek bir sıvı soğutmalı motor soğutma sistemi (“<https://oxychemcorporation.com.ph/radiator-coolant/>”)

## 2.4. Otomobil Radyatörlerinde Nanoakışkan Kullanımına Yönelik Çalışmalar

Araçların aerodinamik dizaynlarının geliştirilmesi, yakıt ekonomisinin ve aracın performansının eş zamanlı olarak artırılabilmesi için, araç tasarımlarında geliştirilmesi gereken noktalar bulunmaktadır. Örneğin aracın hareketi sırasında maruz kaldığı yüksek rüzgâr dirençlerini yenmek için harcanan enerjinin azaltılabilmesi için aracın ön bölümünde aerodinamik iyileştirmeler yapılması gereklidir. Ancak bu tasarım iyileştirmesinin önündeki en büyük engellerden bir tanesi, motorlardaki yüksek soğutma ihtiyacı nedeniyle aracın ön kısmına yerleştirilmek durumunda kalınan büyük radyatörlerdir. Bu radyatörlerin performanslarını koruyarak (hatta arttırarak) yüzey alanlarında yapılabilecek bir azaltmanın birçok açıdan aracın performansını arttıracığı açıktır.

Mevcut tez çalışması kapsamında da bu hedefe ulaşma amacıyla nanoakışkanların otomobil radyatörlerindeki kullanımını araştırılmıştır. Ancak bu konu elbette daha önce başka araştırmacıların da ilgisini çekmiş ve çeşitli sayısal ve deneysel çalışmalarda araştırılmıştır. Bu nedenle literatürde hali hazırda ilgili konu üzerine bu noktaya kadar yapılan araştırmaların incelenmesi ve bu araştırmalardaki eksik ve / veya çelişkili yanların belirlenerek literatüre sağlanabilecek katkıların ortaya konulması tez çalışmasının özgülüğü açısından önemlidir.

Tez çalışması kapsamında hem deneysel parametrelerin belirlenmesi sürecinde hem de elde edilen sonuçların değerlendirilmesi aşamalarında bilimsel kriterlere uygun, yanlıtıcı olmayan bir yol izlenmeye çalışılmıştır. Nanoakışkanlarda ısı transferi, literatürde üzerine oldukça fazla araştırma yapılmış olmasına rağmen hala çelişkilerin olduğu ve bazı yanlış yaklaşımlar ile değerlendirildiğinde yanlıtıcı sonuçlara varılabilen bir çalışma alanıdır. Bu nedenlerle nanoakışkanların temel akışkan ile performans kıyaslaması yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli konular bulunmaktadır. Tüm bu nedenlerle literatürdeki mevcut çalışmalardan bahsedilmeden önce bu konulara açıklık getirilmesinde fayda görülmektedir. Bu kısımda birkaç farklı yaklaşım, avantajları ve dezavantajları ile karşılaştırılarak tez çalışması kapsamında tercih edilen yaklaşım gerekçeleri ile açıklanmaya çalışılacaktır. Daha sonra mevcut literatür de aynı yaklaşımlara göre sınıflandırılarak değerlendirilecektir.

Nanoakışkanların ısı transfer performanslarının değerlendirilmesinde kullanılması gereken metotlar ve uygun başarı ölçütleri üzerine literatürde yapılmış önemli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalara öncülük eden ve ısı transfer analizi yapılırken kullanılan karşılaştırma kriterine göre sonuçların tamamıyla farklı çıkabileceğini ön gören ilk çalışma Pak ve Cho (1998)'e aittir. Araştırmacılar dairesel kesitli bir boruda su içerisinde dağıtılmış çok küçük boyutlarda metal oksit parçacıkların, türbülanslı sürtünme ve ısı transfer davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan metal oksit parçacıklar ortalama çapları sırasıyla 13 ve 27 nm olan  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$ 'dir. Bu çalışmada öne çıkan en çarpıcı sonuçlardan bir tanesi, yapılan viskozite ölçümleridir. İlgili sonuçlarda, hacimsel olarak %10 konsantrasyonda hazırlanan akışkanların viskozite değerlerinin suya kıyasla  $Al_2O_3$  partikülü içeren çözeltide 200,  $TiO_2$  partikülü içeren çözeltide ise 3 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Isı transfer analizinin sonuçlarına göre tam gelişmiş türbülanslı akış koşulları için akışkanların Nu sayıları, hacimsel konsantrasyonun ve Re sayılarının artması ile artış

göstermiştir. Ancak aynı karşılaştırma akışkan hızı sabit tutularak yapıldığında Nu sayıları artmamış, hatta saf suya kıyasla taşınım katsayılarında %12 düşüş yaşanmıştır.

Yu vd. (2010), su temelli nanoakışkanların temel akışkana kıyasla ısı transfer performansını değerlendirmek için birçok farklı kriteri incelemişlerdir. Araştırmacılar, sabit Re, sabit hacimsel debi ve sabit pompalama gücü yaklaşımları ile hesaplamalar gerçekleştirerek elde ettikleri sonuçları birbiriyle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, nanoakışkan etkenliğinin değerlendirilmesinde kullanılabilir en iyi metodun, sabit pompa gücü yaklaşımı olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde akışkan debisinin sabit tutulduğu karşılaştırmanın da genel olarak uygun bir kriter olduğu gözlenirken, sabit Re yaklaşımının değerlendirme kriteri olarak kullanılmasının yanlış sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

Yu vd. (2010)'un elde etmiş olduğu sonuçlar ile tutarlı değerlendirmelere ulaşan Haghghi vd. (2014), çalışmalarını hem  $Al_2O_3$  hem de  $TiO_2$  nanopartiküllerinden oluşan nanoakışkanlar için teorik ve deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, aynı 3 yaklaşım ile yaptıkları incelemelerde sabit pompalama gücünün en doğru kriter olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre  $Al_2O_3$  içeren nanoakışkanlarda sabit Re sayısına göre yapılan değerlendirmede taşınım katsayıları %15 oranında artarken, sabit pompalama gücü yaklaşımı sonuçlarına göre temel akışkana kıyasla kayda değer bir artış gözlenememiştir.  $TiO_2$  içeren nanoakışkanlarda ise durum daha dramatik bir hal alarak temel akışkana kıyasla %10'luk bir azalma ile sonuçlanmıştır.

Nanoakışkanların bilim dünyasına kazandırılmasında önemli çalışmalar gerçekleştiren “Argonne Ulusal Laboratuvarı (A.B.D.)” nın 2011 yılında “Karbon Nano Malzemeler ve Uygulamaları Çalıştayı” kapsamında yayınlamış oldukları nanoakışkanların taşınım ısı transfer özelliklerinin değerlendirilmesi raporunda, bu kargaşayı çözmek adına 3 önemli konu üzerinde durulmuştur;

1. Karşılaştırma temeli: Nanoakışkanların temel akışkana göre ısı transfer performanslarının karşılaştırıldığı koşulları belirleyen sabit parametrelerdir.
2. Başarı ölçütü: Isı transfer performansını karakterize eden ve temel akışkana göre faydasını belirleyen büyüklüktür.
3. Faydalı nanoakışkanlar: Bir nanoakışkanın bir sistemde kullanılabilmesi için faydalı olarak nitelendirilmesi gerekir. Bir nanoakışkanın faydalı olarak nitelendirilebilmesi için ise nanoakışkanın başarı ölçütünün temel akışkana oranla 1'den büyük olması istenir.

Bu konuların her biri hem literatürdeki mevcut yöntemler hem de ilgili rapor kapsamında önerilen yöntemler açısından değerlendirilmiştir. Yukarıda bahsedilen konular arasında ilk ve akışkanların performanslarının doğru değerlendirilebilmesi açısından en önemli olduğu düşünülen konu, karşılaştırma temeli olarak adlandırılan uygun parametreye seçimidir. Bu bölümün devamında, literatürde bu amaçla kullanılan çeşitli yaklaşımlar, iyi ve kötü yanlarıyla beraber karşılaştırılmıştır. Daha sonra mevcut çalışmalar tercih etmiş oldukları karşılaştırma temeline göre gruplandırılarak değerlendirilmiştir.

***i. Sabit Re sayısı yaklaşımı:***

Reynolds sayısı, belirli koşullar altında bir akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranı olarak tanımlanır ve akışkanlar mekaniğinde farklı akış rejimlerinin karakteristiğinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Bu boyutsuz sayı, literatürde karşılaştırma unsuru olarak en çok tercih edilen yöntem olmuştur. Ancak ne yazık ki Re sayısı farklı akışkanların ısı transfer performanslarının değerlendirilmesinde uygun olmayan bir seçimdir. Çünkü sabit Re sayısı yaklaşımı ile yapılan bir değerlendirmede;

- Daha yüksek dinamik viskoziteye sahip akışkanlarda (nanoakışkanlar) aynı Re sayısını sağlayabilmek için daha yüksek akış hızlarına ihtiyaç duyulmaktadır ki bu durum yüksek viskoziteli akışkanlara avantaj sağlamaktadır.
- Böylece normal beklentinin tersine olacak şekilde, nanoakışkanların taşınım katsayılarında dinamik viskozite artışına rağmen artış gözlemlendiği iddia edilmektedir.
- Ayrıca daha yüksek viskoziteli akışkanları daha yüksek hızda pompalamaktan kaynaklanan pompa gücü artışları da bu bakış açısıyla görmezden gelinmektedir.

***ii. Sabit pompa gücü yaklaşımı:***

Bu yaklaşımda eğer nanoakışkanı pompalamak için belirli bir miktarda pompa gücü varsa, aynı miktarda gücün temel akışkanı pompalamak için de var olduğu düşünülmektedir. Böylece aynı pompalama gücü altında yapılan karşılaştırmanın mantıklı bir seçim olacağını aşağıdaki nedenlere dayanarak söylemek mümkündür;

- Bu yöntem farklı akışkanları aynı miktarda pompa gücü kullandıkları koşullar için karşılaştırır.
- Bu şekilde yapılan bir karşılaştırmada iki önemli değişkeni bir arada değerlendirmek mümkündür: ısı transfer katsayısındaki artış ve pompalama gücündeki değişim.
- Pompa gücü değişmediğinden, daha yüksek viskoziteli akışkanın akış hızının daha düşük olmasına neden olur.
- Böylece bu yaklaşım nanoakışkanlardan alınacak fayda konusunda en ılımlı, açık ve belirsizliğe mahal vermeyen sonuçları sunar.

***iii. Sabit hacimsel debi yaklaşımı:***

Bu yaklaşım da sabit pompalama gücü yaklaşımına oldukça yakın olup, bazı küçük farklılıklar içermektedir;

- Farklı akışkanların aynı koşullar altında aynı akış hızına sahip olmaları sağlanır.
- Bu durumda daha yüksek viskoziteye sahip akışkanlarda daha fazla pompalama gücü gereksinimi oluşacaktır.
- İncelenen sistem belirli bir maksimum akış hızı ile çalışmak üzere tasarlanmış ve pompalama gücü sistemin toplam güç tüketiminin yalnızca küçük bir kısmını oluşturuyor ise bu yaklaşım oldukça yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmesini sağlar.

İkinci önemli konu *başarı ölçütünün* ne olması gerektiğidir. Çünkü çalışma doğru yaklaşım ile yapılmış olsa dahi sonuçları uygun kriterlere göre değerlendirilmediğinde ısı transfer performansı doğru şekilde karakterize edilmeyebilir. Bu kısımda literatürde tercih edilen çeşitli başarı ölçütleri açıklanacaktır.

### *i. Nusselt sayısı*

Boyutsuz Nu sayısı oldukça sık tercih edilen ancak nanoakışkanların karşılaştırılmasında aslında çok da uygun olmayan bir başarı ölçütüdür. Çünkü ısı iletkenlikleri farklı olan iki veya daha fazla akışkan karşılaştırılırken;

- Önemli olan taşınım katsayısındaki değişimdir, Nu sayısı taşınımın iletme oranını verir.
- Düşük Nu sayısına sahip bir akışkan aslında yüksek taşınım katsayısına sahip olabilir. Ancak aynı zamanda sahip olduğu yüksek ısı iletkenlik, Nu sayısının düşmesine neden olmuş olabilir (nanoakışkanlarda olduğu gibi).

### *ii. Taşınım katsayısı*

Taşınım katsayısı, akışkanların ısı transfer kabiliyetlerini doğrudan yansıtan bir değerdir. Bu nedenle iki akışkan ısı transfer performansı açısından kıyaslanmak istendiğinde, uygun bir tercih olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel akışkanlar için söylenebilecek olan bu durum nanoakışkanlar için de herhangi bir olumsuz veya yanıltıcı bir değerlendirmeye yol açmayacak şekilde geçerlidir. Dolayısıyla akışkanların teorik hesaplamalarından elde edilen taşınım katsayıları, deneysel sonuçlardan elde edilen değerler ile karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılabilir.

### *iii. Mouromtseff sayısı*

Başarı ölçütleri karşılaştırmasında alternatif bir yöntem ise tüm termodinamik özelliklerdeki değişimleri birlikte değerlendiren Mouromtseff sayısıdır.

- Genellikle çeşitli akışkanların teorik olarak tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılmasında kullanılır.
- Sabit akış hızı altında karşılaştırılan akışkanlar için oranlandırıldığında ısı taşınım katsayısı ile eşdeğer değere sahiptir.



Uygun yaklaşım ile deneysel olarak incelenen ve doğru kritere göre değerlendirilen nanoakışkanın sistemde kullanılabilirliğinin nihai kararı ise *performans faktörüne* göre verilir. Burada göz önünde bulundurulması gereken durum, ısı transferindeki artışa bağlı olarak elde edilen pozitif etkinin, pompalama güçlerinde yaşanan artışlardan kaynaklanan negatif etkiler ile kıyaslanarak toplamda sağlanan faydanın değerlendirilmesidir.

Tüm bu bilgiler ışığında, literatürde nanoakışkanların otomobil radyatörlerinde kullanımı üzerine yapılan çalışmalar araştırılmış ve bu çalışmalar tercih etmiş oldukları yaklaşıma göre gruplandırılarak değerlendirilmiştir. Literatürdeki çalışmaların değerlendirilmesinde bu tip bir gruplamanın önemli olduğu düşünülmektedir. Çünkü çalışmalardan elde edilen sonuçların bu alanda çalışan / çalışmayı hedefleyen bilim insanlarına ışık tutması, yanıltıcı olmaması ve bilim dünyasına katkı sağlaması hedefine ulaşabilmesi ancak bu yolla mümkündür.

Literatür araştırması verilmeden önce bu kısımda değinilen çalışmaların otomobil radyatörlerinde metal / metal oksit nanopartikülleri içeren nanoakışkanların kullanımına ait sayısal ve deneysel çalışmalardan derlendiğini belirtmekte fayda görülmektedir. Bu durumun nedeni, tez çalışmasında kullanılan nanoakışkanlar ile sağlıklı bir kıyaslama yapabilmektir. Nanoakışkan dünyası oldukça geniş ve kullanılan partikülün kimyasal yapısından, sentez yöntemine kadar birçok değişkene bağlı olarak çok farklı sonuçların elde edildiği bir alandır. Bu nedenlerle aynı grup kimyasal özelliklere sahip partiküllerin (metal / metal oksitler) oluşturduğu nanoakışkanların kullanıldığı çalışmaların referans alınması uygun görülmüştür. Bu bakış açısı ile literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, tez çalışmasının yayınlandığı sürece kadar toplam 41 adet sayısal ve deneysel çalışmaya ulaşılmıştır. İlgili çalışmalar belirtilen gruplandırma yöntemine ve yayınladıkları tarih sırasına göre sunulmuştur.

#### 2.4.1. Sabit Re sayısı yaklaşımı kullanılarak yapılmış çalışmalar

Yaklaşımlar karşılaştırılırken de bahsedildiği üzere sabit Re sayısı, literatürde karşılaştırma unsuru olarak en çok tercih edilen (41 çalışmadan 21'i) yöntem olmuştur. Ancak nanoakışkanlarda olduğu gibi yüksek viskoziteli akışkanlara avantaj sağlayan bu durum, bu yöntemi kullanan çalışmalarda oldukça yüksek performans artışları elde edilmesini sağlamıştır. Bu tip artışlar ise nanoakışkanlar ile çalışmayı düşünen araştırmacılar için ulaşılması güç ve gerçekçi olmayan hedefler konulmasına neden olmakta ve araştırmacıları yanlış yönlendirmektedir. Aşağıda bu grup çalışmalardan örnekler sunulmuştur.

Peyghambarzadeh vd. (2011a, b, 2013) ve Vermahmoudi vd (2014) bu yaklaşımı kullanılarak bir çok çalışma gerçekleştiren, aynı araştırmacılardan oluşmuş bir gruptur. Bu araştırmacılar çalışmalarında hemen hemen aynı deney düzeneğini kullanarak farklı parametrelerin değişimini incelemişlerdir. Bu nedenle bu gruba ait çalışmalar bir arada değerlendirilmiştir. Araştırmacılar depolama tankı, elektrikli ısıtıcı, taze hava fanı, çapraz akışlı kanatlı boru tipi ısı değiştirici ve santrifüj pompadan oluşan bir deney düzeneği kurarak araçlardaki soğutma çevrimine benzer bir sistem elde etmişler ve sistem üzerinde debimetre, sıcaklık kontrol üniteleri, direnç termometreleri ve ısı çiftleri vasıtasıyla ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Kurmuş oldukları sistemde nanopartikül olarak  $Al_2O_3$ ,  $CuO$  ve  $Fe_2O_3$  kullanırken, temel akışkan olarak ise su ( $H_2O$ ), etilen glikol (EG) ve

su/etilen glikolün çeşitli oranlarda karışımlarını tercih etmişlerdir. Tüm çalışmalarda; çeşitli termofiziksel özellikler, konsantrasyon ve akışkan debisinin akışkanın giriş çıkış sıcaklıkları gibi sistem parametreleri üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Ancak sistemin nanoakışkan kullanımına bağlı olarak değişen ısı transfer performansı, sabit Re sayısı yaklaşımı ile incelenmiştir. Araştırmacılar literatürdeki ilk çalışmalarında, saf su, saf EG ve bu akışkanların çeşitli karışım oranlarında kullanıldığı  $Al_2O_3$  nanopartikülleri içeren nanoakışkanlar ile deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarında sabit Re sayısına karşılık nanopartikül konsantrasyonu arttıkça nanoakışkanın Nu sayısında temel akışkana kıyasla artış olduğunu bulmuşlardır. Çalışmanın öne çıkan sonucu, su veya saf EG temel akışkanına %1 hacimsel oranda  $Al_2O_3$  eklenmesi halinde nanoakışkanın Nu sayısının temel akışkana kıyasla %40 oranında artmış olmasıdır.  $Al_2O_3$  ve saf su ile gerçekleştirdikleri ikinci çalışmada ise yine %1 konsantrasyonda artış %45 olarak belirlenmiştir. Son iki çalışmalarında ise deney düzeneğinde küçük bir değişiklik yaparak ısı değiştiriciyi bir hava kanalı içerisine almışlar ve fanın havayı radyatör üzerinden geçirecek bu kanal içerisinden dışarıya vermesini sağlamışlardır. Bu düzenekle yaptıkları çalışmalarda,  $CuO$  ve  $Fe_2O_3$  nanopartiküllerini, su temel akışkanı içerisinde kullanarak deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarda da toplam ısı transfer katsayısında %9 ve %13'lük, ısı transfer miktarında ise %11.5'lik bir artışa ulaşıldığı söylenmektedir.

Bu konu üzerine hem deneysel hem de sayısal birçok çalışma gerçekleştiren ve aynı yaklaşımı tercih eden bir başka grup ise, Hussein vd. (2013, 2014a, b, c) olmuştur. Bu araştırmacıların çalışmalarında tercih ettiği nanopartiküller  $TiO_2$  ve  $SiO_2$ 'dir. Temel akışkan olarak ise saf su kullanmışlardır. Araştırmacılar sayısal analizlerini ticari bir yazılım olan ANSYS 12.1'in Fluent modülü ile gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarını yaptıkları düzenek ise 1500 W gücünde bir elektrikli ısıtıcı içeren ve motorun işlevini gören bir depo, debimetre, sirkülasyon pompası, bakır borulu bir radyatör ve çeşitli ölçüm sensörlerinden oluşmaktadır. Araştırmacıların çalışmalarında belirledikleri temel amaç, çeşitli parametrelerin değişimine bağlı olarak sistemin ısı transfer performansının incelenmesidir. Bununla beraber çalışmaların özelinde incelenen çeşitli ek değişkenler de mevcuttur. Örneğin gerçekleştirdikleri ilk sayısal çalışmada (Hussein vd. 2013), nanoakışkan konsantrasyonunun hacimsel olarak %1.0 - 2.5 aralığındaki değişimi ve çeşitli boru kesit geometrilerine (dairesel, eliptik ve yassı) bağlı olarak ısı transfer performansı ve sürtünme katsayısındaki değişim araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, artan nanopartikül konsantrasyonuna bağlı olarak ısı transferinin arttığını ancak aynı zamanda sürtünme katsayısının da arttığını göstermiştir. Araştırmacılar sürtünme katsayısındaki artışın nedenini, akışkanın artan viskozitesine bağlamaktadır. Kesit geometrisi için yapılan karşılaştırmanın sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek ısı transfer katsayısının sırasıyla yassı, eliptik ve dairesel kesit geometrilerinde elde edildiği görülmüştür. Ancak buradaki problem yine bu sonuçları elde ederken tüm farklı konsantrasyondaki akışkanları ve temel akışkanı sabit Re sayısında karşılaştırmak olmuştur. Deneysel ve sayısal çalışmanın bir arada olduğu ve  $SiO_2$  – su nanoakışkanı için yapılan çalışmada (Hussein vd. 2014a), temel akışkana kıyasla Nu sayısındaki en yüksek artışın %56 olduğu ifade edilmektedir. Araştırmacılar son deneysel çalışmalarında ise (Hussein vd. 2014b, c) artık yavaş yavaş bu yaklaşımdan uzaklaşmaya başlamışlardır. Deney düzeneğinin doğruluğu ve elde edilen Nu sayılarında yine sabit Re sayısı ile karşılaştırma yapmış olsalar dahi çalışmaya farklı debi, sıcaklık ve konsantrasyonlarda elde edilen Nu sayılarına dair sonuçları da eklemişlerdir.

Buraya kadar örneklenen 8 çalışmanın dışındaki 13 çalışmanın her biri bağımsız gruplar tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle çalışmalardan ayrı ayrı ve tarih sırasına göre bahsedilecektir. Buna göre bahsedilecek olan ilk çalışma, aslında literatürde de bu alanda yapılan ilk çalışmadır (Leong vd. 2010). İlgili çalışmada, Re sayısındaki değişimin etkisi detaylı olarak hava ve boru içi akışkan tarafı için ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmada, *CuO/EG* nanoakışkanı için otomobil radyatörünün performans analizi yapılarak, radyatördeki mevcut iyileştirme potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada farklı konsantrasyonlar denenmiş, sistemin analizi, hava tarafı Re sayısı 4000 – 6000 arasında, boru içi akışkan tarafı Re sayısı ise 5000 –7000 arasında olacak şekilde çeşitli değerler için yapılmıştır. Ek olarak sistemdeki basınç düşüşü ve pompalama gücündeki değişim de bu çalışmada incelenen parametreler arasındadır. Yapılan analizler sonucu, sistemde %2 oranında *CuO* partikülleri kullanılarak oluşturulan nanoakışkan kullanılması halinde hava tarafı yüzey alanını %18.7 oranında küçülterek aynı miktarda ısı transferi sağlamanın mümkün olduğu bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları nanoakışkan tarafındaki Re sayısının radyatörün ısı performansında kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Re sayısı doğru belirlenmediğinde, motorda aşırı ısınma veya soğuma riski oluşacağı belirtilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre hava tarafı Re sayısının 4000 değeri için %2 konsantrasyona sahip *CuO/EG* nanoakışkanı temel akışkana kıyasla %42.7 ısı transfer artışı gösterirken, bu artış Re sayısı 6000'e yükseltildiğinde %45.2'ye kadar yükselmiştir.

Bir sonraki çalışma, Bozorgan vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen Chevrolet Suburban model bir aracın radyatörünün nümerik analizidir. Çalışmada  $Al_2O_3$  – su nanoakışkanının türbülanslı akış koşullarında otomobil radyatöründe kullanılması halinde toplam ısı transfer katsayısı ve pompalama gücündeki değişimler incelenmiştir. Sonuçlarda farklı akışkanların Re sayıları arttıkça toplam ısı transfer katsayısında artış olduğu görülmüştür. En yüksek artış %11.11 olarak tespit edilmiş, buna karşın pompalama güçleri bu artışı da aşarak %29.17 olarak hesaplanmıştır.

Bir başka sayısal çalışmada Huminic ve Huminic (2013), etilen glikol temel akışkanı içerisinde *CuO* nanopartikülünün %0 ile 4 arasında değişen farklı konsantrasyonları için 10, 25, 50, 75, 100 ve 125 Re sayılarında ısı transfer analizlerini gerçekleştirmiş ve Nu sayısının değişimini incelemişlerdir. Çalışma, otomobil radyatörlerinde kullanılan yassı borularda laminer 3 boyutlu akış için sabit ısı akışı şartlarında gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlar artan konsantrasyon ve Re sayısına bağlı olarak ısı taşınım katsayısının önemli oranda arttığını göstermiştir. Örneğin araştırmacıların elde etmiş oldukları sonuçlara göre, Re 10 değerinde %4 *CuO* konsantrasyonuna sahip akışkan için ısı taşınım katsayısı %19 oranında artmaktadır.

Chavan ve Pise (2014), çalışmalarında saf su ve farklı konsantrasyonlarda  $Al_2O_3$  nanopartiküllerinin saf suya eklenmesi ile oluşturulan nanoakışkanların otomobil radyatöründeki performansını incelemişlerdir. İlgili çalışmada nanopartikül hacimsel konsantrasyonu %0 ile 1 arasında değişmektedir. Deneysel sistemde eliptik kesite sahip 33 adet alüminyum borudan oluşan radyatör kullanılmıştır. Sistemde dolaşan akışkanın 8000 – 22000 Re sayısı aralığında çalışabilmesi için 3 ile 8 l/dk arasında değişken debi değerlerinde çalışıldığı söylenmektedir. Saf su ve nanoakışkanların performansı sabit Re sayısı için karşılaştırılmış ve %1 konsantrasyona sahip akışkanın taşınım katsayısında %40-45 oranında artış gözlenmiştir.

Delavari ve Hashemabadi (2014)'e ait bir başka sayısal çalışmada  $Al_2O_3$ /su-EG nanoakışkanının yassı kesit geometrisine sahip bir boruda hem tek hem de iki fazlı yaklaşımlar için laminer ve türbülanslı üç boyutlu akış analizi yapılmıştır. Nanoakışkan içerisindeki nanopartikül konsantrasyonunun en fazla %1 oranında olduğu ve nanoakışkan sıcaklığının 35 ile 60°C arasında değiştiği kabul edilmiştir. Analizler sonucunda Re sayısı ve konsantrasyon artışının, Nu sayısını da arttırdığı görülmüştür. Çalışmada tek fazlı ve iki fazlı modellerden alınan sonuçların karşılaştırması yapılmış, iki fazlı modelin sonuçlarının tek fazlı modele kıyasla farklı konsantrasyonlar için %10'dan %45'e kadar daha yüksek değerlerde olduğu ve daha önceki çalışmalar ile uyumlu şekilde iki fazlı modelin Nu sayısını daha iyi tahmin ettiği söylenmiştir.

Heris vd. (2014), 60 nm boyutundaki  $CuO$  nanopartiküllerinin EG-su çözeltisine karıştırılması ile hazırlanan çeşitli konsantrasyonlara (%0.05 ile 0.8 arası) sahip nanoakışkanların ısı transfer performansını incelemiştir. 4 – 8 l/dk nanoakışkan debisi, 35, 44 ve 54°C giriş sıcaklığı aralıklarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çeşitli sonuçlara yer verilmiş olsa da nanoakışkanın performansını ortaya koyan asıl kıyaslamalar temel akışkana göre olanlardır ve bu kıyaslamalar sabit Re sayısında yapılmış, artışlar buna göre gösterilmiştir. Bu prensip ile sundukları sonuçlarda ise en iyi deneysel şartlarda Nu sayısındaki artışın, %0.8 konsantrasyonda  $CuO$  içeren nanoakışkanda temel akışkana kıyasla %55 oranında olduğunu ifade etmişlerdir.

Samira vd. (2015) çalışmalarında daha çok basınç düşüşü ve sürtünme faktörü etkilerine odaklanmışlardır. Bu çalışma bir önceki paragrafta bahsedilen çalışmanın devamı niteliğindedir. Dolayısıyla ilgili çalışma için bahsedilen tüm deneysel şartlar bu çalışma içinde birebir aynı şekilde kullanılmıştır. Sonuçlar, basınç düşüşü ve bu kavramı içeren performans faktörü çerçevesinde değerlendirilmiş, Re sayısı ve konsantrasyon arttıkça artan viskoziteden dolayı basınç düşüşünün arttığı belirtilmiştir.

Gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada Sonage ve Mohanan (2015), otomobil radyatörünün yüzey alanını  $Zn$ /su ve  $ZnO$ /su nanoakışkanları ile küçültmeye çalışmışlardır. Bu amaçla nanoakışkanların ısı transfer katsayıları ve basınç düşüşü, su temel akışkanı ile kıyaslanmıştır. Çalışmada 6 farklı nanopartikül konsantrasyonu kullanılmış, en iyi performans %0.5  $Zn$ /su ile yakalanmıştır. Araştırmacılar, ilgili nanoakışkanın kullanılması halinde radyatör yüzey alanının %24 oranında azaltılabileceğini söylemektedirler. Deney düzeneğinde diğer çalışmalardan farklı bir yaklaşım ile komple bir radyatör kullanmak yerine tek bir paslanmaz çelik boru ile kurulan düzenekte testlerin gerçekleştirilmesi tercih edilmiştir. Tüm akışkanlar için Re sayısı aralığı 4000 ile 20000 arasında olacak şekilde ayarlanmış, karşılaştırılan tüm parametreler için nanoakışkanların ısı transfer performansı açısından daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Sıradaki çalışmada (Devireddy vd. 2016), mevcut tez çalışması kapsamında kullanılan nanopartikül ve temel akışkana oldukça yakın olarak  $TiO_2$  nanopartikülleri ve [3:2] oranında [ $EG:H_2O$ ] karışımı tercih edilmiştir. Araştırmacılar akışkanın radyatöre giriş çıkış sıcaklığı gibi deneysel ölçüm sonuçlarını sabit hacimsel debiye göre vermeyi tercih ederlerken, ısı transfer analizlerinde ise nanoakışkanları temel akışkanı ile sabit Re sayısına göre karşılaştırmayı uygun bulmuşlardır. Ancak bunun sonucu olarak aynı Re sayısını deneysel olarak sağlayabilmek adına nanoakışkanlar büyük bir olasılıkla daha yüksek hacimsel debide çalıştırılmıştır. Bu nedenle de nanoakışkanların %37 oranında

daha yüksek olarak tespit edilen Nu değerlerinin kaynağını değerlendirebilmek zordur. Çünkü Nu sayılarındaki bu artışın, nanoakışkan kullanımına bağlı olarak artan ısı iletim katsayısı etkisinden mi yoksa akışkanın artan hacimsel debisine bağlı olarak taşınım etkisinden mi olduğunu ayırt etmek güçtür.

Otomobil radyatörünün boyutlandırılması üzerine yapılan bir başka sayısal çalışma Elsebay vd. (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, radyatörün soğutma performansı su yerine  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  nanopartikülleri içeren su temelli nanoakışkanlar kullanılarak artırılmak istenmiş, bu sayede radyatörde optimum boyutlandırma yapılarak yakıt tasarrufu elde edilmesi hedeflenmiştir. Analizlerde kullanılan yassı kesitli borulara sahip tasarım, literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırılarak doğruluğu kontrol edilmiştir. Araştırmacılar artan ısı transferine bağlı olarak radyatör hacminde önemli bir azaltma sağlamışlar ancak buna karşılık pompalama gücünde artış ile karşılaşmışlardır. Çalışmanın sonuçları yerel taşınım katsayıları ve sürtünme faktörlerini içerecek şekilde boru boyunca değişimi gösteren grafikler ile verilmiş olsa da ortalama değerlere geçildiğinde taşınım katsayısı ve sürtünme faktöründeki artışların sabit Re sayısına göre değerlendirildiği görülmektedir. İlgili artışlar taşınım katsayıları için  $Al_2O_3/su$ 'da %45 ve  $CuO/su$ 'da %38 olarak tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısı ve basınç düşüşü için bulundan değerler ise sırasıyla  $Al_2O_3/su$  için %271 ve %267 ile  $CuO/su$  için %266 ve %226 olmuştur.

Geçtiğimiz yıl içerisinde yayınlanan yeni çalışmalardan bir tanesi, Goudarzi ve Jamali (2017)'ye aittir. Araştırmacılar bu deneysel çalışmada  $Al_2O_3/EG$  nanoakışkanının ve boru içerisine eklenen farklı geometrilerdeki tellerin ısı transferine etkisini bir arada değerlendirmişlerdir. Çalışmada iki farklı geometride tel ve %0.08, %0.5 ve %1 konsantrasyona sahip nanoakışkanlar kullanılmıştır. Sonuçlar, boru içerisine yerleştirilen tellerin %9'luk bir ısı transfer artışı sağladığını göstermiş, eş zamanlı nanoakışkan kullanılması durumunda ise %5'lik bir artışa ulaşılmıştır.

$Al_2O_3/su$  ve  $CuO/su$  nanoakışkanlarının, yassı kesitli otomobil radyatöründeki ısı ve akış performansı sayısal olarak araştırılmıştır (Elbadawy vd. 2018). Benzer şekilde burada da araştırmacıların hedefi radyatör hacmini küçültmek yönünde olmuş ve bunu önemli oranda başardıklarını ifade etmişlerdir. Çalışmada 250 ile 1750 Re sayısı aralığında ve %1, 3, 5, 7 hacimsel konsantrasyonlarda değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, ortalama ısı transfer katsayısındaki artışın nanopartikül konsantrasyonuna bağlı olduğu ve konsantrasyon arttıkça, ısı transferinin de arttığı anlaşılmaktadır. Bu artışların en iyi durumda  $Al_2O_3/su$  ve  $CuO/su$  için sırasıyla, %45 ve %38 olarak belirlendiği görülmektedir. Radyatör boru uzunluklarındaki azalmalar ise yine aynı akışkanlar için %11.7 ve %9.8 olarak tespit edilmiştir. Araştırmacılar aynı zamanda %7 konsantrasyona çıkıldığında pompalama güçlerindeki artışın %75 ve 80'e ulaştığını söylemişler ve bu tür bir uygulamanın faydalı olmayacağını vurgulamışlardır.

Bu grup çalışmalar içerisinde incelenen son araştırma, Sokhal vd. (2018)'e aittir. Otomobil radyatörüne ait bir adet yassı kesitli dikey boruda 40 – 90 °C giriş sıcaklığında ve 12000 ile 30000 Re sayısı aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmada, su temelli  $Al_2O_3$  nanopartikülleri içeren nanoakışkanların performansı araştırılmıştır. Akışkanının giriş sıcaklığı, konsantrasyon, Re sayısı ve hava tarafı hızın artırılmasına bağlı olarak ısı transfer katsayısında %31'lik bir artışa ulaşılmıştır.

### 2.4.2. Sabit pompa gücü yaklaşımı kullanılarak yapılmış çalışmalar

Bu yaklaşım, literatürde otomobil radyatörü için yapılan çalışmalarda en az tercih edilen yöntem olmuştur. Aslında aynı pompa gücü ile sisteme verilen akışkanların ısı transfer performanslarının incelenmesinde en mütevazî yaklaşım olması ile en çok tavsiye edilen yöntem olmasına rağmen araştırmacılar bu yaklaşımı çok fazla kullanmamışlardır. Bu durumun sebebi tam olarak bilinmemekle beraber bazı tahminlerde bulunmak mümkündür. Öncelikle uygulama açısından bakıldığında bir sistemde sabit pompalama gücünü sağlamak kolay değildir. Ayrıca sabit güçte sisteme gönderilen akışkanların sıcaklığında dolayısıyla da termofiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimler nedeniyle hacimsel debileri de sürekli olarak değişmektedir. Bu değişimler, değişken akışkan hızlarına yol açarak  $Re$ ,  $Nu$  gibi boyutsuz parametrelerin hesabını karmaşık hale getirmektedir. Tüm bu sebeplerle her ne kadar son derece doğru bir yaklaşım olsa da sonuçların değerlendirilmesine işlemleri bir derece daha karmaşık hale getirmesinden dolayı tercih edilmemiş olduğu tahmin edilmektedir. Belirli bir debi aralığında çalışan ve pompa gücünün sistemin toplam güç tüketimi içinde küçük bir kısmı temsil ettiği düşük kapasiteli sistemlerde, aynı oranda doğru sonuçlar veren sabit hacimsel debi yaklaşımı, genellikle bu yöntem yerine tercih edilmiştir. Ayrıca literatüre kronolojik olarak bakıldığında, sabit  $Re$  yaklaşımının kullanılmasının hatalı olduğuna dair değerlendirmelerin 2010 ve 2011 yıllarında literatürde yer almaya başladığı ve bu yaklaşımdan uzaklaşan ilk çalışmaların ise 2013 yılında görülmeye başladığı düşünüldüğünde, ilerleyen zamanlarda sabit pompa gücü yaklaşımını kullanan çalışmaların artması beklenebilir. Sabit pompa gücü ile çalışılan bir adet örnek çalışma ile ilgili detaylar aşağıda sunulmuştur.

Sajedi vd. (2016), tarafından yapılan deneysel araştırmada, nanoakışkanların ısı olarak değerlendirilmesinde uygun bir kriter bulunması üzerine çalışılmıştır. Araştırmacılar bu konu üzerine çalışmanın gerekçesi olarak, literatürde ısı transferi artışı değerlendirilirken genellikle artan basınç kayıpları gibi hidrolik özelliklerin dikkate alınmadığı ve bunun yanıltıcı sonuçlar doğurabileceği yargısı üzerinden hareket etmişlerdir. Bu probleme bir çözüm getirebilmek amacıyla, sabit  $Re$  sayısı ve pompalama gücü sağlayan bir deney düzeneği tasarlayarak  $SiO_2$ /su nanoakışkanın su temel akışkanı ile performans olarak karşılaştırıldığı deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre sabit  $Re$  sayısı yaklaşımının yanıltıcı olabileceği bulunmuştur. Çünkü ısı transferindeki iyileşmenin nedeninin,  $Re$  sayısını sabit tutmak için artan viskoziteye karşı arttırılan akış hızı ve dolayısıyla nanopartikül etkisi yerine artan taşınım etkisi olduğu düşünülmektedir. Sabit pompa gücü ile yapılan deneylerin ise ısı transferi artışında nanopartikül etkisini net bir şekilde ortaya koyduğu görülmüştür.

### 2.4.3. Sabit hacimsel debi yaklaşımı kullanılarak yapılmış çalışmalar

Mevcut tez çalışması kapsamında da tercih edilen sabit hacimsel debi yaklaşımı ile literatürde gerçekleştirilen çalışma örneklerinden ilki Naraki vd. (2013)'e aittir. Deneysel çalışmada  $CuO$ /su nanoakışkanı otomobil radyatöründe laminer akış koşullarında ( $100 \leq Re \leq 1000$ ) test edilmiştir. Kullanılan nanoakışkanların kararlılığı pH kontrolü ve yüzey etken madde kullanımı ile sağlanmaya çalışılmıştır. %0.4'e kadar arttırılan hacimsel konsantrasyon ile toplam ısı transfer katsayısı artarken,  $50^\circ C$ 'den  $80^\circ C$ 'ye kadar artan sıcaklıkla azalmıştır. Toplam ısı transfer katsayısındaki en yüksek artış %8 olarak tespit edilmiştir. Araştırmacılar, konsantrasyon artışının ısı transferini

arttırmasına; ısı iletkenlikteki artış, iletimle ısı transfer mekanizmalarının devreye girmesi ve ısı sınır tabakanın incelmelerini gerekçe göstermektedir. Naraki vd. (2013)'ün çalışmasında sunduğu önemli bir değerlendirme, deneysel parametrelerin ısı transferine olan etkisinin karşılaştırılmasıdır. Buna göre ısı transferine etkileri çoktan aza göre olmak üzere deneysel parametreler şu şekilde sıralanabilir; hava debisi, soğutma sıvısının debisi, giriş sıcaklığı ve nanopartikül konsantrasyonu. Ayrıca önerilen optimum çalışma koşulları; minimum sıcaklık ile maksimum konsantrasyon, hava ve akışkan debileridir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak yapılan sayısal bir çalışmada araştırmacılar,  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanının performansını incelemiştir (Angadi vd. 2014). Simülasyonlar 2 ile 5 l/dk arasında değişen akışkan debileri ve %1, 3, 4 ve 6 nanoakışkan konsantrasyonları için gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre radyatör etkenliği ve sistemin ısı performansı artmıştır. En iyi durumda toplam ısı transfer katsayısındaki artış %3.28 olmuştur. Ancak araştırmacılar aynı zamanda nanoakışkanların kararlılık ve çökme problemlerinin de üzerinde durulması ve bu konular ile ilgili çalışmalar yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Nieh vd. (2014),  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$ 'in iki aşamalı metot ile sentezlenerek su-EG karışımı içerisinde farklı konsantrasyonlarda karıştırılması ile elde edilen nanoakışkanlar ile deneyler gerçekleştirmişlerdir. İlk önce farklı konsantrasyonlar ve örnek sıcaklıklarda akışkanların ısı iletkenlik, viskozite ve özgül ısıları belirlenmiş, daha sonra ısı transfer kapasiteleri, basınç düşüşü ve pompalama güçlerinin tespiti için farklı hacimsel debi ve giriş sıcaklıklarında deneyler yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre her iki nanoakışkanın da ısı transfer kapasitesi temel akışkandan fazladır ve sonuçların büyük bir çoğunluğunda  $TiO_2$  içeren nanoakışkanlarda bu artış daha fazla olmuştur. Isı transfer kapasitesi, basınç düşüşü, pompalama gücü ve performans faktöründeki maksimum artışlar yüzde olarak sırasıyla şu şekilde olmuştur; 25.6, 6.1, 2.5 ve 27.2.

Sharma vd. (2014), deneysel çalışmalarında  $Al_2O_3$ /su-EG nanoakışkanı kullandığı otomobil radyatörü deney düzeneğinde, motorun ilk ısınma süresini kısaltmayı hedeflemişlerdir. Hacimsel olarak farklı miktarlarda nanopartikül kullanmanın ısı transfer katsayısını arttırdığı, buna bağlı olarak akışkanın taşıdığı ısı miktarı artarak ısınma süresinin düştüğü bulunmuştur. Bu tür bir iyileştirmenin araçlarda yakıt tüketimini azaltmaya katkı sağlayacağı ve karbon emisyonlarını düşüreceği ifade edilmiştir. Araştırmacılar ayrıca, nanoakışkan kullanımı ile radyatörün yüzey alanının %12 ile 18 arasında azaltılabileceğini ifade etmişlerdir.

H. M. Ali vd. (2015a)'de  $ZnO$ /su nanoakışkanının otomobil radyatöründeki performansı deneysel olarak araştırılmıştır. İlgili çalışmada alüminyumdan yapılmış, 32 adet yassı kesitli kanatçıklı boruya sahip radyatör kullanılmış, ancak deneylerde bu boruların yalnızca merkezdeki 12 tanesi aktif olarak kullanılmıştır. Radyatörden geçen akışkan 700-800 d/d kapasiteli bir fan ile soğutulmuştur. Deneyler 7, 8, 9, 10 ve 11 l/dk akışkan debisinde ve 55°C sabit giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Transfer edilebilen ısı miktarındaki [W] artış en yüksek %0.2 konsantrasyonda %46 olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, ısı transfer davranışının nanopartikül konsantrasyonundan doğrudan etkilendiğini göstermiştir. Belirli bir noktaya kadar konsantrasyondaki artışla beraber artan ısı transferi bir noktada düşme eğilimine geçmiştir. Araştırmacılar bu durumu, konsantrasyondaki artışa bağlı olarak artan viskozitenin sınır tabaka kalınlığını arttırması ile açıklamışlardır.

H. M. Ali vd. (2015b) tarafından aynı yıl başka bir ekip ile gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, temel akışkan olarak su ve nanopartikül olarak ise  $MgO$  tercih edilmiştir. Araştırmada %0.06, %0.09 ve %0.12 hacimsel konsantrasyonlarda hazırlanan nanoakışkanların, otomobil radyatörünün ısı transfer performansı üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, tüm nanoakışkanların temel akışkana göre daha yüksek performansa sahip olduğunu göstermiş ve en yüksek ısı transfer iyileştirmesi %31 oranında %0.12'lik akışkanda sağlanmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında akışkan giriş sıcaklığının ısı transferine etkisinin oldukça az olduğunu gözlemlemişlerdir. Giriş sıcaklığındaki 8°C'lik bir artış, ısı transferini yalnızca %6 oranında arttırmıştır.

R. R. Sahoo vd. (2017), çalışmalarında farklı bir yaklaşım deneyerek, otomobil radyatörlerinde kullanılabilecek alternatif soğutma sıvılarının performansını bir arada karşılaştırmışlardır. Bu akışkanlar; su, etilen glikol, propilen glikol,  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı ve şeker kamışı suyudur. Akışkanların performans karşılaştırması, birçok farklı parametreye göre değerlendirilmiş, radyatör boyutu, ağırlığı, maliyeti ve motor verimi ile yakıt tüketimi gibi konular da göz önünde bulundurulmuştur. Şeker kamışı suyunun su ve nanoakışkandan bir miktar, EG ve propilen glikolden ise çok daha iyi ısı transfer özelliği gösterdiği bulunmuştur. Aynı miktarda ısı transferi için pompalama gücü ihtiyacı da en azdan en çok olana doğru şeker kamışı suyu, nanoakışkan, su, EG ve propilen glikol olarak sıralanmaktadır. Araştırmacılar,  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanının radyatörün yüzey alanını yalnızca %2 oranında azaltabildiğini söylemektedirler.

$Al_2O_3$ /su-EG nanoakışkanının bir kez daha araştırıldığı bir diğer deneysel çalışma, Sheikzadeh vd. (2017) tarafından gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nanoakışkanlar hacimce 0.003, 0.006, 0.009 ve 0.012 oranlarında nanopartikül içermektedir. Araştırmacılar çalışmalarında taşınım ısı transferinin laminer bölgesini çalışmak istemişler, bu doğrultuda deneylerde araştırılmak üzere 3 farklı akışkan debisi (9, 11 ve 13 l/dk) belirlemişlerdir. Akışkanların termofiziksel özellikleri çalışmada literatürde yakın zamanda yayınlanmış sıcaklığa bağlı modeller ile hesaplanmıştır. Sonuçlara göre akışkanın debisi ve nanopartikül konsantrasyonu arttıkça hem taşınım katsayısı hem de Nu sayısı yaklaşık %9 oranında artmıştır. Araştırmacılar en yüksek artışı 0.012 konsantrasyon ve 13 l/dk akışkan debisinde elde etmişlerdir. Çalışmanın önemli sonuçlarından bir tanesi,  $Al_2O_3$ /su-EG nanoakışkanları için yassı boru kesitli otomobil radyatöründe laminer gelişmekte olan akış bölgesinde kullanılmak üzere maksimum %3 hata oranına sahip bir korelasyon geliştirilmiş olmasıdır.

Bu gruptaki son çalışma olan Subhedar vd. (2017), yine  $Al_2O_3$  nanopartiküllerinin tercih edildiği bir çalışma olmuştur. İlgili çalışmada temel akışkan olarak EG-su, 50:50 oranlarında kullanılmıştır. Akışın laminer olması ve deneysel düzeneğin otomobillerdeki soğutma sistemine benzer şekilde kurulması sağlanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre nanoakışkan kullanımı ile temel akışkana kıyasla toplam ısı transfer katsayısı artmaktadır. Bu artış, nanoakışkanların konsantrasyonu arttıkça önemli oranda yükselmiştir. Toplam ısı transfer katsayısındaki artışa en büyük katkıyı yapan bir diğer parametre ise nanoakışkan debisidir. Nanoakışkan giriş sıcaklığının 65°C'den 85°C'ye yükselmesi ile toplam ısı transfer katsayısında düşüş yaşandığı belirtilmiştir. Araştırmacıların çalışmanın sonuçları arasında dikkat çektikleri bir başka konu ise %0.2 oranında nanopartikül konsantrasyonuna sahip nanoakışkan kullanılarak radyatörün ısı transfer yüzey alanının %36.69 oranında azaltılabileceği olmuştur.



#### 2.4.4. Çeşitli deneysel parametrelerin değişimine göre ısı transfer performansını inceleyen çalışmalar

Bazı grup araştırmacılar sabit  $Re$ , pompalama gücü veya hacimsel debi ana yaklaşımları haricinde sistemin ısı transfer performansını önemli oranda etkilediğini düşündükleri bazı deneysel parametreleri özel olarak incelemeyi tercih etmişlerdir. Azımsanamayacak sayıda olan bu tip çalışmalar da bu başlık altında bir arada değerlendirilmiş ve edinilen önemli sonuçlar bu kısımda sunulmuştur. Burada bahsedilen parametreler içerisinde özellikle öne çıkanlar, nanoakışkanların nanopartikül konsantrasyonları ile akışkanların radyatöre giriş sıcaklıkları olmuştur. Bu iki parametrenin değişimine bağlı olarak nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimler ve dolayısıyla sistem performansında yaşanan değişimler hem sayısal hem de deneysel araştırmalar ile değerlendirilmiştir.

İlgili çalışmalardan ilki, Kole ve Dey (2010a) tarafından literatüre kazandırılan ve  $Al_2O_3$  nanopartiküllerinin %50-50 propilen glikol-su ticari otomobil soğutma sıvısının içerisinde dağıtılarak hazırlandığı, nanoakışkanın viskozite değerlerini 10 – 50°C sıcaklık aralığında ve çeşitli konsantrasyonlara bağlı olarak değişiminin incelendiği bir çalışmadır. Araştırmacılar temel akışkanın ilgili sıcaklık aralığında Newtonian davranış gösterirken, çok küçük miktarda  $Al_2O_3$  eklenmesi ile beraber non-Newtonian davranış gösterir hale geçtiğini tespit etmişlerdir. Nanoakışkan viskozitesinin ise nanopartikül konsantrasyonu arttıkça arttığı, sıcaklık arttıkça ise düştüğü gözlenmiştir. Çalışmadaki önemli sonuçlardan bir tanesi, viskozite hesaplamak için sıklıkla kullanılan klasik modellerin, ölçüm sonuçlarını oldukça düşük şekilde tahmin etmesi olmuştur. Ancak partikül konsantrasyonunu ve dolayısıyla Brownian hareketini dikkate alan modeller, viskozite hesaplarında daha başarılı olmuştur. Kole ve Dey (2010b), aynı yıl içerisinde gerçekleştirdikleri bir başka çalışmada, aynı nanoakışkanın bu kez viskozite ile beraber ısı iletkenliğinin tespitini de çalışmaya dahil etmişler ve çalışmadaki sıcaklık aralığını 10 – 80°C'ye genişletmişlerdir. Araştırmacılar, yalnızca 0.035 hacimsel konsantrasyonda partikül içeren nanoakışkanın dahi ısı iletkenliğinin temel akışkana kıyasla daha yüksek (%10.41) olduğunu bulmuşlardır.

Vajjha vd. (2010), bu sayısal çalışmada kanatlı boru tipi otomobil radyatöründeki üç boyutlu laminer akış ve ısı transferini, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile incelemiştir. Çözümlerde parçacık konsantrasyonu ve sıcaklığına bağlı olarak viskozite ve ısı iletkenliğinin değişimini veren ifadelerden yararlanılmıştır. Analizlerde nanopartikül olarak  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  kullanılmış, temel akışkan olarak ise etilen glikol/su karışımı tercih edilmiştir. Seçilen nanopartiküllerin çeşitli konsantrasyonları için hesaplamalar yapılmıştır. Sayısal analizlerde farklı  $Re$  sayıları için ısı transfer katsayısının değişimi incelenmiş, çalışmanın sonucunda hem giriş bölgesi hem de tam gelişmiş bölge için yassı borularda nanoakışkanların ısı transferi için yeni  $Nu$  ifadeleri sunulmuştur.

M. Ali vd. (2014), deney düzeneğinde  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı ile çalışmış, hava ve nanoakışkan debisinin yanında ısıtıcı gücünü de performansa etki eden parametreler arasında dikkate almıştır. Deney düzeneğinde kullandıkları radyatör 2007 model bir Toyota Yaris araca ait olup, 8, 12 ve 16 kW'lık yükler altındaki 3 farklı durum için LTMD ve  $\varepsilon$ -NTU metotları ile hesapladıkları ısı transfer performans parametrelerini karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre hacimsel konsantrasyon olarak 0.01 değerine ulaşana kadar konsantrasyon artışının ısı transferini arttırdığı, bu değer ise

optimum değer olduğu görülmüştür. Bu noktadan sonra konsantrasyon artışının olumsuz etkileri olmaktadır. Ayrıca 3 farklı ısıtıcı gücü senaryosundan alınan veriler, daha yüksek ısıtma yüklerinde daha fazla ısı transferi gerçekleştiğini göstermiştir. Isı transferi, ısı transfer katsayısı ve Nu sayısındaki en yüksek yüzdeler sırasıyla 14.79, 14.72 ve 9.51 olarak bulunmuştur.

Ray ve Das (2014), aynı temel akışkan için 3 farklı nanopartikülün ( $Al_2O_3$ ,  $CuO$  ve  $SiO_2$ ) performansını karşılaştırmıştır. Kullanılan temel akışkan 60:40 oranında EG-su karışımıdır. Çalışmada  $\epsilon$ -NTU metodu ile MATLAB programı kullanılarak analizler yapılmıştır. İncelenen parametreler; pompalama gücü, hava ve boru tarafı taşınım katsayıları, toplam ısı transfer katsayısı, etkenlik ve NTU değerleridir. Sonuçlara göre %1 konsantrasyona sahip akışkanlar daha yüksek konsantrasyonlara kıyasla daha iyi performans göstermektedir. Radyatörün optimum çalışma koşullarında eşit ısı transfer miktarı için temel akışkan ile kıyaslama yapıldığında,  $Al_2O_3$  içeren nanoakışkan kullanılması halinde aynı miktarda ısı transferinin %7.4 daha az yüzey alanı veya aynı yüzey alanında %35 daha az pompalama gücü ile gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. Bu değerler  $CuO$  içerenlerde biraz daha düşük olarak %7.2 ve %33.1'de kalmıştır. En düşük performans ise %5.2 ve %26.2 ile  $SiO_2$ 'li nanoakışkanlardadır. Analizler otomobil radyatörü için gerçekleştirilmiş olsa da sonuçların tüm gaz – sıvı arasında ısı transferi olan ısı değiştiricilere uyarlanabilir olduğu da ifade edilmiştir.

Elias vd. (2014) bir başka deneysel çalışmada yine  $Al_2O_3$ /su-EG nanoakışkanının çeşitli hacimsel konsantrasyonları (%0 – 1) ve giriş sıcaklıkları ( $10^\circ C - 50^\circ C$ ) için analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, konsantrasyon artışına bağlı olarak akışkanın ısı iletkenlik, viskozite ve yoğunluğunun arttığını ancak özgül ısısının azaldığını göstermiştir. Sıcaklık ile olan değişim incelendiğinde ise ısı iletkenlik ve özgül ısının arttığı, buna karşılık viskozite ve yoğunlukta düşüş gözlemlendiği belirlenmiştir.

Bir diğer önemli sayısal çalışmada,  $Al_2O_3$ /su-EG ve  $CuO$ /su-EG nanoakışkanlarının üç boyutlu sayısal analizi türbülanslı akış koşulları için gerçekleştirilmiş, yassı borulu otomobil radyatöründeki ısı transfer performansları incelenmiştir (Vajjha vd. 2015). Analizler, nanoakışkanların %6'ya kadar olan konsantrasyonları ve gerçek otomobil radyatörlerinde karşılaşılan Re sayısı aralıkları için yapılmıştır. Daha önceki deneysel çalışmalardan elde edilen uygun yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve ısı iletkenlik denklemlerinden konsantrasyon ve sıcaklığa bağlı olarak termofiziksel özellikler belirlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları ilk önce tek fazlı akışkanlar için gerçekleştirilerek elde edilen Nu ve sürtünme katsayısı değerleri bilinen denklemlerden elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve modelin doğruluğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar daha sonra boru boyunca yerel taşınım ve sürtünme katsayılarının değişimini nanoakışkanlar için incelemiştir. Sonuçlara göre  $Al_2O_3$  için %3 ve  $CuO$  için %2 konsantrasyona kadar nanoakışkanlar daha yüksek ısı transfer katsayıları sağlamaktadırlar. Çalışmada ayrıca hem giriş hem de tam gelişmiş bölge için Nu ifadeleri önerilmiştir.

Bir başka deneysel çalışmada (Abdolbaqi vd. 2016), bioglikol (BG)-su temel akışkanı içerisine çeşitli hacimsel oranlarda (%0.5 – 2)  $Al_2O_3$  nanopartikülleri eklenerek hazırlanan nanoakışkanların hem ısı hem de elektriksel iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada temel akışkanın da farklı karışım oranları kullanılmış ve bu durumun ısı transferine etkisi gözlenmiştir. Aynı koşullar altında 40:60 BG-su karışımı

ile yapılan deneylerde 60:40 BG-su karışımına kıyasla iki kat daha fazla ısı iletkenlik artışı elde edilmiştir. Elektriksel iletkenliğin ise çözelti içerisindeki nanopartikül konsantrasyonu arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarının temel akışkan içerisindeki glikol türevi organik bileşiklerin oranının ısı transferine etkisini göstermesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

Khan ve Dil (2017) gerçekleştirmiş oldukları sayısal çalışmada, temel akışkanı su olan nanoakışkanların ısı transferine olan etkisini otomobil radyatörü uygulaması için incelemiştir. Çalışmada  $CuO$ ,  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$  olmak üzere 3 farklı tip nanopartikül dikkate alınmıştır. Radyatör içerisindeki akış dinamikleri kısmi diferansiyel denklemler ve sınır koşulları ile tanımlanmıştır. Araştırmacılar, farklı fiziksel parametrelerin sınır tabaka içerisindeki hız ve sıcaklık profillerini nasıl etkilediğini incelemiştir. Ek olarak, nanopartikül konsantrasyonundaki artışın yerel sürtünme katsayısı ve Nu sayısı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlarda su temelli  $CuO$  içeren nanoakışkanların,  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$  içerenlere göre ısı transferini daha çok arttırdığı görülmüştür. Diğer çalışmalarla benzer olarak bu çalışmada da konsantrasyon artışının ısı transferine olumlu yönde etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu grup çalışmalar içerisinde literatüre eklenen son ve en yakın tarihli çalışma ise Tijani ve Sudirman (2018)'e ait bir sayısal çalışmadır. Analizler için ticari yazılım olan ANSYS'in Fluent modülünden yararlanılmıştır. Temel akışkan olarak EG – su karışımı, nanopartikül olarak ise  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  için analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen konsantrasyon aralıkları %0.05, 0.15 ve 0.3 iken akışkanın yassı kesitli borular içerisindeki kütledebisi sabit olarak alınmıştır. Sonuçlara göre en yüksek ısı transfer performansını sergileyen nanoakışkan  $CuO$  nanopartikülünü içerenler olmuştur. Nu sayısı 208.71 olarak hesaplanırken ısı transfer miktarı 28.45 W olarak bulunmuştur. Buna karşılık aynı değerler  $Al_2O_3$  içeren nanoakışkanda sırasıyla 173.19 ve 28.25 W'dır.

#### 2.4.5. Farklı grup nanopartiküller kullanılarak yapılan çalışmalardan örnekler

Farklı türlerde nanopartiküller kullanılarak yapılan çalışmalarını mevcut tez çalışmasının sonuçları ile doğrudan kıyaslamak mümkün değildir. Ancak nanoakışkanlar hazırlanırken tercih edilebilecek farklı nanopartikül türlerinin olduğunun bilinmesi önemlidir. Farklı tür partiküllerin birbirlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle literatürde bu özellikte nanoakışkanların otomobil radyatöründe kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmalara da bu bölümde kısaca yer verilmiştir.

İlgili nanopartikül gruplarının en çok araştırılan ve birçok farklı uygulama alanı olanlarından bir tanesi karbon nanotüplerdir (carbon nanotubes, CNT). Karbon nanotüplerin birçok farklı çeşidi olmakla beraber genel olarak tek-duvarlı ve çok-duvarlı olarak sınıflandırılırlar. Tek duvarlılar görüntü olarak bir pipete benzerken, çok-duvarlılar iç içe geçmiş sürekli artan çapa sahip birçok katmandan oluşurlar. Karbon nanotüplerin en popüler kullanım alanı yapısal güçlendirme uygulamalarıdır. Yüksek dayanım ve düşük ağırlık özelliklerinin esnek yapıları ile birleşmesi ile bu tip uygulamalarda öne çıkmışlardır. Ayrıca karbon nanotüplerin uzunlukları boyunca ısıyı iletir, borunun ekseni boyunca iletmemesi özellikleri, ısı izolasyon uygulamalarında iki yönlü kullanılabilme imkânı sağlar.

Proton Kelisa marka 1000cc motora sahip otomobilin soğutma sistemi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmada M'hamed vd. (2016), klasik radyatör soğutma sıvısı yerine çok duvarlı karbon nanotüp (multi-walled carbon nanotube, MWCNT) kullanmışlardır. Nanoakışkanlar hazırlanırken farklı nanopartikül konsantrasyonları (%0.1, 0.25 ve 0.50) ve 50:50 EG-su temel akışkanı kullanılmıştır. Akışkan debisi 2, 4 ve 6 l/dk olarak ayarlanarak laminer akış koşullarında çalışılmıştır. Deneylein sonuçları, ortalama ısı transfer katsayısının nanopartikül konsantrasyonu ve akışkanın Re sayısı ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar ayrıca ısı transfer katsayısındaki maksimum artışın %0.5 konsantrasyona sahip nanoakışkanda %196.3 olarak gerçekleştiğini belirlemiştirlerdir.

Diğer bir çalışma ise Amiri vd. (2016)'nın gerçekleştirdiği bir deneysel araştırmadır. Çalışmada kullanılan nano parçacık, nitrojen-katkılı grafen nano levha (crumpled nitrogen-doped graphene nanosheet, CNDG) olarak adlandırılan ve karbon temelli nano levha grubuna giren farklı tip bir partiküldür. Çalışmada deneysel analizler 3-7 l/dk akışkan debisi, %0-0.01 nanopartikül hacimsel konsantrasyonu, Re sayısının 2000-8000 aralığı ve 35, 45, 55°C akışkan giriş sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, nitrojen-katkılı grafen nano levha partikülleri ve su-EG temel akışkanı kullanılarak hazırlanan nanoakışkanların üstün elektriksel, ısıl ve reolojik özellikleri olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar, artan ısı transferini nitrojen-katkılı grafen nano levhaların yüksek yüzey alanı ve ısıl sınır tabakasının incelenmesi ile açıklamaktadır. Bu sayede bu tip nanoakışkanların da otomobil radyatörlerinde alternatif soğutma sıvısı olma potansiyellerinin olduğu gösterilmiştir.

Karbon nanotüpler haricinde bir diğer farklı grup ise hibrit nanoakışkanlar olarak adlandırılır. Bu akışkanlar oldukça yenidir ve iki veya daha fazla nanopartikülün aynı anda temel akışkan içerisinde dağıtılması ile hazırlanırlar. Bir temel akışkanda birden fazla nanopartikül kullanılmasındaki amaç, farklı malzemelerden gelen çeşitli kimyasal ve fiziksel özelliklerden eş zamanlı olarak yararlanmaktır. Çünkü tek bir malzemenin belirli bir amaca uygun olarak tüm iyi özelliklere aynı anda sahip olması genellikle pek mümkün değildir. Örneğin malzemeler çoğunlukla ya iyi ısıl özelliklere ya da iyi reolojik davranışa sahip olmaktadır ve uygulamada bu özelliklerin biri tercih edilmek durumunda kalınmaktadır. Ancak hibrit nanoakışkanlar bu soruna bir çözüm geliştirerek birden fazla iyi özelliği bünyesinde barındırmak üzere geliştirilmişlerdir (Sarkar vd. 2015).

Hibrit nanoakışkan kullanımına bir örnek Rashmi R. Sahoo ve Sarkar (2017)'nin gerçekleştirmiş oldukları simülasyon çalışmasıdır. Bu çalışmada araştırmacılar EG temelli çeşitli hibrit nanoakışkanlar ile çalışmışlardır. Çalışmada incelenen hibrit akışkanlar, %0-1 arasında değişen konsantrasyona sahip  $Al_2O_3$  nanopartikülü içeren nanoakışkanlara *Ag*, *Cu*, *SiC*, *CuO* ve *TiO\_2* eklenmesi ile oluşturulmuştur. İlgili akışkanların ısı transfer performansları, otomobil radyatörü için incelenmiştir. Farklı nanopartikül kombinasyonlarının ve çalışma parametrelerinin termofiziksel özellikler, ısı transferi, etkenlik, pompalama gücü ve performans indeksleri üzerine etkisi araştırılan konular arasındadır. İncelenen hibrit nanoakışkanlar arasında en yüksek ısı transferi, etkenlik ve aynı zamanda pompalama gücü %1'lik *Ag* (%0.5 *Ag* ve %0.5  $Al_2O_3$ ) akışkanında gözlenmiştir. Buna karşılık maksimum performans indeksi ise *SiC* –  $Al_2O_3$  akışkanında tespit edildiğinden, en iyi soğutkan olarak bu akışkan tavsiye edilmiştir. Araştırmacılar, aynı akışkan debisi ve ısı transfer oranı için karşılaştırma yapıldığında *Ag*

içeren hibrit akışkanların radyatör alanının küçülmesini sağladığını tespit etmişlerdir. Her ne kadar hibrit akışkanların hazırlanmasında yöntem olarak katkılamadan tamamen farklı bir yaklaşım izlense de seçilen metal iyonu açısından bakıldığında, *Ag* iyonunun en iyi performansı vermesi dikkat çekicidir.

Çeşitli araştırmacıların farklı yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilmiş oldukları çalışmalardan elde ettikleri ve literatüre sundukları sonuçlar, sabit *Re* yaklaşımı ve sabit hacimsel debi yaklaşımları için karşılaştırmalı olarak  $EK - 1$ 'de sunulmuştur.

## 2.5. Tezin Amacı, Katkısı ve Yenilikleri

Mevcut literatür incelendiğinde ve uygun karşılaştırma temeli ve başarı ölçütlerine göre değerlendirilen çalışmalar referans alındığında, geleneksel radyatör soğutma sıvılarına kıyasla daha yüksek performans gösterebilen nanoakışkanlar olduğu görülmektedir. Ancak bu nanoakışkanların ulaşım endüstrisi için gelecek vaat eden akışkanlar olduğunu söyleyebilmek ve yaygın olarak kullanılabilmesi için hala araştırılması gereken çok fazla konu bulunmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında literatürde henüz cevaplanmamış veya tam olarak netlik kazanmamış konulara imkanlar dahilinde açıklık getirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada farklı tür ve özelliklerde sentezlenen nanopartiküllerden hazırlanan nanoakışkanlar kullanılarak, sistem parametrelerinin adı geçen partikül özellikleri ile değişimi incelenmiş ve sistematik bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. İlgili nanopartikül ve nanoakışkanlara ait detaylı açıklamalar çalışmanın “Materyal ve Metot” bölümünde sunulmuştur.

Bu çalışmanın temel amacı, binek araçlardaki mevcut soğutma sisteminde ısı transferini iyileştirerek bu sistemlerin boyutlarını küçültmektir. Temel hedef daha küçük bir soğutma sistemi elde edebilmek olduğundan, geleneksel yöntemler ile yüzey alanını arttırarak (kanatçık ilavesi gibi) ısı transferini iyileştirmeye çalışmak burada hedeften uzaklaşmaya neden olacaktır. Bu nedenle çalışmada nanoteknolojideki gelişmelerden faydalanılarak geliştirilen nanoakışkanlar ile hedefe ulaşmak istenmiştir.

Bu hedefe ulaşabilmek için kurulan deneysel sistemde performans değerlendirmesi yapılırken iki farklı değişken grubu dikkate alınmıştır. Bunlardan bir tanesi nanopartikül sentezi ve nanoakışkanların hazırlanma şekline bağlı olarak değişen parametreler iken (konsantrasyon, katkılama oranı, partikül özellikleri, ısıl iletkenlik, viskozite, özgül ısı gibi) diğer grup ise sistemde değişen çalışma koşullarını (hava ve akışkan debileri, akışkanın radyatöre giriş sıcaklığı, akışın türü) içermektedir.

Nanoakışkanlar kullanılarak ısı transferinde elde edilen iyileştirmeler, basınç kayıpları da dikkate alınmak kaydıyla bir arada değerlendirilmiştir. Unutulmamalıdır ki ısı transferini iyileştirmek adına yapılan her çalışmada (akışkan hızının arttırılması veya yüzeye kanatçık ilavesi gibi) doğal olarak bir miktar daha yüksek basınç kaybı yaşanacaktır. Ancak bu durum, ısı transfer performansını iyileştirmek adına yapılan çalışmalar için bir engel teşkil etmez. Önemli olan, sistemde yapılan değişikliklerde bu kayıpların etkisini göz ardı etmeden mühendislik yaklaşımıyla optimum noktaya ulaşmaya çalışmaktır.

Tüm bu açıklamalar çerçevesinde tez çalışmasının amacı, özgün yanları, bilimsel literatüre getirdiği katkı ve yenilikler, gerekçeleri ile beraber aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Hazırlanan nanoakışkanlarda temel akışkan olarak etilen glikol – su karışımı tercih edilmiştir. İlgili akışkanın tercih sebebi gerçek otomobil radyatörlerinde kullanılan soğutma sıvısı olmasıdır. Akışkanın karışım oranı %50 etilen glikol %50 su şeklindedir. Bu karışım oranı Türkiye’de kış mevsimindeki en düşük ortalama sıcaklıklar dikkate alınarak seçilmiştir.
- Metaller (*Cu, Ag*) ve bazı oksitlerin (*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>*) yoğun olarak kullanıldığı nanoakışkan dünyasında, metal katkılanmış metal oksitlerin kullanımına yönelik çalışmalara rastlanmamaktadır. Oysaki farklı kullanım alanları için metal katkılanmış yapıların daha iyi veya tamamen farklı özellikler sergilediği bilinmektedir. Bu nedenle yüksek ısı iletim özelliği göstermesi beklenen saf *TiO<sub>2</sub>* ve saf *TiO<sub>2</sub>*’nin *Ag* ve *Cu* metalleri ile katkılanmış hallerinin çalışmada kullanılması tercih edilmiştir.
- *TiO<sub>2</sub>* bir yarı iletken olup, üstün özelliklerinden dolayı pek çok alanda üzerinde en çok çalışma yapılan oksitlerden biridir. Su ve su – etilen glikol temel akışkanı içerisinde *TiO<sub>2</sub>*’nin ( $k = 8.4 W/mK$ ) dağıtılmasıyla hazırlanan nanoakışkanların ısı özellikleri üzerine partikül boyutu (Abbasian Arani ve Amani 2013), şekli (Mo vd. 2012), miktarı (Teng vd. 2011), kararlılık yaratacak ortamların hazırlanması (Mahian vd. 2013) ve dispersiyonu arttıracak ek fiziksel işlemlerin (Rayatzadeh vd. 2013) etkisine dair çok sayıda çalışma yapılmıştır. ***Ancak, Cu ve Ag gibi yüksek ısı iletim katsayısına sahip metallerin katkılı olduğu TiO<sub>2</sub> temelli nanoakışkanların hazırlanması ve bunların ısı transfer işlemlerinde kullanıldığına dair bir yayına literatürde rastlanmamıştır. Ag/TiO<sub>2</sub> (Chakraborty vd. 2012) ve Cu/TiO<sub>2</sub> (Iranidokht vd. 2013) ile yapılan çalışmalar TiO<sub>2</sub> ile hazırlanan nanoakışkan içerisine nanometal ilavesinin etkisini gözlemlemek şeklindedir. Daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olması beklenen yeni tür nanoakışkanların, nanoakışkan kullanımının bile henüz çok yeni olduğu otomobil radyatörü model soğutma sisteminde denenmesi, sistem parametrelerinin optimizasyonu ve partikül özelliği – soğutma sistem parametreleri ilişkilerinin incelenmesi bütünüyle yeni, özgün ve kapsamlı bir çalışmadır.***
- Yapılan literatür araştırması göstermiştir ki nanoakışkanların otomobil radyatörlerindeki uygulamalarına ait çalışmalarda akışkanların termofiziksel özellikleri ya detaylı bir şekilde incelenmemiş ya da özelliklerin değişimi ampirik formüller ile belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak akışkanların termofiziksel özellikleri, önceki bölümlerde detaylı olarak açıklandığı üzere ısı transfer davranışlarını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Nanoakışkanlar gerek içerdikleri nanopartiküller gerekse hazırlanma yöntemleri açısından büyük farklılıklar içerdiğinden termofiziksel özelliklerin ampirik denklemler ile tespiti oldukça zordur ve önemli hatalara yol açmaktadır. Bu nedenle ilgili özelliklerin deneysel ölçümler ile tespit edilmesi yapılan çalışmaların hassasiyetini arttırmaktadır. ***Bu doğrultuda tez çalışması kapsamında özgün***

*olarak hazırlanıp kullanılan tüm nanopartikül ve nanoakışkanların ısı hesapları için gerekli termofiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı değişimleri de göz önünde bulundurularak deneysel ölçümler ile tespit edilmiştir.* Böylelikle nanopartiküllerin katkılanması yöntemi ile elde edilen özgün nanopartiküller ve bunlardan hazırlanan nanoakışkanlar için yoğunluk, özgül ısı, viskozite ve ısı iletkenlik gibi birçok özelliğin deneysel sıcaklık aralığında belirlenen gerçek değerleri hem hesaplarda kullanılmış hem de literatüre kazandırılmıştır.

- Tez çalışması kapsamında kullanılan nanopartiküllerin tamamı çalışmaya özel olarak sentezlenmiş, deneylerde araştırmak istenilen parametrelerin kontrollü olarak değiştirildiği malzemelerdir. Bu yönüyle literatürde karşılaşılan çalışmaların büyük bir çoğunluğundan ayrılmaktadır. Çünkü literatürdeki çalışmalarda araştırmacılar genellikle ticari olarak satın alınan nanopartiküllerden oluşturdukları nanoakışkanları kullanmışlar hatta çoğu zaman doğrudan akışkanın kendisini hazır olarak temin etme yoluna gitmişlerdir. Bu tip bir yaklaşımda karşılaşılabilecek en önemli sorun, akışkanın detaylı içeriğine ve hazırlama prosedürlerine ait bilgilere ticari gizlilik nedeniyle ulaşılamamasıdır. Bu bilgiler akışkanların karakterizasyonu ve dolayısıyla da performanslarını doğrudan etkilediğinden çalışmaların sonuçlarında da sağlıklı olmayan verilerin elde edilmesine yol açabilmektedir. Mevcut tez çalışmasının en önemli üstünlüklerinden bir tanesinin bu husus olduğu düşünülmektedir. Sentez ve nanoakışkan hazırlama işlemlerinin tamamı, çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir.
- Nanoakışkanlar, karışımlar kimyasında “kolloid” grubuna girmektedir. Kolloidal bir sistemin kararlılığı, sıvı içerisinde dağılan partikülün yüzey yükü ile ilişkili olup,  $\pm 30$  mV ve üzeri yüklere sahip partiküllerin kararlı bir kolloid oluşturacağı bilinmektedir. Yüzey yükü kararlı kolloidal sistem oluşturmaya yetmeyecek kadar küçük olan partiküllerin ise temel akışkan içerisinde dağılmasını sağlayacak birden fazla kimyasal yaklaşım söz konusudur. Örneğin kolloidal sistemin hazırlanmasında disperse edici kimyasalların kullanılmasıyla da kararlı sistemler hazırlanmaktadır. Bu yaklaşım literatürdeki neredeyse tüm nanoakışkan çalışmalarında kullanılan bir yöntemdir. Çalışmaların önemli bir kısmı, ticari ürünlerin temel akışkan içerisinde disperse edici bir ajan varlığında dağıtılması ve farklı akış ortamlarında denenmesi şeklindedir. Oysaki uygulanacak model sistemin gerektirdiği özelliklere sahip nanoakışkanlar kullanılmak üzere nanopartikül sentezi kısacası tümünden gelim yaklaşımı daha verimli ürünlerin elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca süspansiyon içerisine eklenen her yeni kimyasal, karışıma başka özellikler kazandırarak incelenmek istenen nanoakışkanı sadelikten uzaklaştırmaktadır. Bu yönüyle de herhangi bir disperse edici kimyasal maddenin kullanılmadığı nanoakışkanın hazırlanarak kullanılmış olması, tez çalışmasının yenilikçi bir yönüdür.
- Çalışma, nanoteknolojideki gelişmelerden ulaşım sektöründe faydalanmayı hedeflediğinden, farklı konstrüksiyon ve akış şekillerindeki ısı değiştiricilerin performansı bir parametre olarak ele alınmamış, doğrudan gerçek bir otomobil

radyatörü kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Otomobil radyatörü olarak kullanılan kompakt ısı değiştiricilerinin karmaşık geometrilerinden dolayı, literatürde bu alanda çok fazla deneysel çalışma olmadığı bilinmektedir (Peyghambarzadeh vd. 2013). Dolayısıyla hem gerçek modele uygunluğu koruyarak elde edilen sonuçların ticari uygulama şansını arttırmak hem de literatürde var olan bilimsel araştırma ihtiyacına katkı sağlamak amacıyla nanoakışkanların yassı borulu dalgalı panjur tip kanatçıklı çapraz akışlı gerçek bir ısı değiştiricisi kullanılarak test edilmesi, gerçekleştirilen bilimsel çalışmanın sanayiye uygulanabilirliğini arttırmaktadır.

- Otomobillerin çalışma prensibi gereği her zaman aynı hızla ve motor gücünde hareket etmeleri mümkün değildir. Sürüş esnasında yol durumuna bağlı olarak farklı motor güçlerine ihtiyaç duyulmakta, aracın hızı değişmekte ve radyatörden geçen hava miktarı da değişmektedir. Bu durum soğutma sistemlerinin tasarımını da karmaşık hale getirmektedir (Jang ve Choi 2006). Örneğin yokuş yukarı gidilen bir anda motor yüksek devirde çalıştığından fazla ısınmakta, motora giren soğutma sıvısının sıcaklığı yükselmekte, ancak araç yavaş hareket ettiği için radyatörden geçen havanın hızı düşmekte, yani çekilen ısı azalmaktadır. Ters durumda ise yokuş aşağı bir harekette düşük devir ve yüksek hava hızında artan ısı transferi oluşacaktır. Bu değişken durum, motorun aşırı ısınması ya da soğuması gibi problemlere neden olabilir. Doğru şekilde tasarlanmayan bir soğutma sistemi, araçta çeşitli sorunlara yol açar. Motorun olması gereken sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda çalıştırılması durumunda motorun ısı verimi düşer, kötü yanmaya sebep olur, tüketim artar, çevre daha çok kirlenir. Sıcaklığın aşırı yükselmesi ise motor parçalarında yıpranmalara sebep olur. Parçaların mekanik dayanımları azalır, motorun ömrü kısalmaktadır. Tüm bu nedenlerle aracın soğutma sıvısını başka bir akışkan ile değiştirirken tüm çalışma koşulları da mutlaka göz önüne alınmalıdır. Dolayısıyla deneysel çalışmada, hava tarafında da geniş bir aralıkta çalışılmış, farklı koşullar altında nanoakışkanın davranışı test edilerek optimum çalışma koşulları belirlenmiştir.



### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Materyal

Bu kısımda öncelikle mevcut çalışma kapsamında kullanılmak üzere seçilen temel akışkan, nanopartiküller ve hazırlanan nanoakışkanlar ile ilgili bazı genel bilgiler verilerek seçim kriterlerine değinilecek, daha sonra nanopartiküllerin sentez aşamaları ve karakterizasyonu ile nanoakışkan hazırlama prosedürü ve karakterizasyonu açıklanacaktır. Tez çalışması kapsamında kullanılan nanopartiküllerin sentez işlemleri ile akışkan hazırlama prosedürlerinin tamamı Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. İlgili partiküllerin ve akışkanların karakterizasyon işlemleri ise imkanlar dahilinde yine öncelikli olarak aynı bölüm laboratuvarlarında ve ihtiyaca bağlı olarak da bazı analizler için çeşitli üniversite laboratuvarlarından hizmet alımı yoluyla yapılmıştır. Hangi analizin nerede ve ne şekilde yapıldığı bölüm içerisinde detaylı olarak açıklanmıştır.

Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneğine ait detaylı bilgiler ise başta incelenen radyatör olmak üzere düzenekte kullanılan tüm elemanlar için yine bu bölümde sunulmuştur. Deney düzeneği tasarlanırken, gerçeğe mümkün olduğunca yakın bir model oluşturmak hedeflenmiştir. Bu bakış açısıyla tasarlanıp, üretimi yapılan ve kurulumunun ardından deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin tüm tasarım ve üretim aşamaları ile kullanılan cihaz ve malzemelerin detaylı özellikleri açıklanmıştır. İlk önce sistemde kullanılacak olan elemanlara karar verilmiş, daha sonra bu elemanlar bilgisayar ortamında bir araya getirilerek üretime geçilmeden önce sistem üzerinde doğru şekilde yerleştiklerinden emin olunmuştur. Sistemin tasarımının bütünüyle tamamlanmasının ardından üretim ve montaj aşamaları gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1.1. Tez çalışmasında kullanılan akışkanlar

##### *i. Temel Akışkan (TA)*

Temel akışkan olarak EG – su karışımı tercih edilmiştir. Bu karışımlar gerçek otomobil radyatörlerinde kullanılan soğutma sıvılarıdır. İlgili akışkanı su ve etilen glikolün farklı hacimsel oranlarında hazırlamak mümkündür. Karışımındaki EG miktarı, çözeltinin donma noktasının değerini belirler. EG oranı arttıkça; karışımın donma noktası düşmekte, ısı iletkenlik azalmakta, özgül ısı azalmakta, viskozite artmakta dolayısıyla da ihtiyaç duyulan pompalama gücü artmaktadır. Etilen glikolün ısı transferi açısından olumsuz etkileri nedeniyle mümkün olan en az oranda kullanmak, ısı performans açısından yararlı olmaktadır. Ancak burada belirleyici faktör, EG – su karışımının soğutma sıvısı olarak kullanıldığı otomobil radyatörünün çalıştırılacağı iklim şartlarıdır. Çok soğuk iklimler için tercih edilen karışım oranı, hacimce [3:2] [EG: H<sub>2</sub>O] şeklindedir ve bu karışımın donma noktası -45 °C'dir (ASHRAE 2007). Mevcut tez çalışması kapsamında Türkiye'deki donma noktaları göz önünde bulundurularak, yaygın olarak kullanılan hacimce [1:1] oranında [EG: H<sub>2</sub>O] karışımı tercih edilmiştir. İlgili akışkanın donma noktası -38 °C'dir. Farklı çalışmalarda karışımındaki etilen glikol oranının ısı transferine etkisinin araştırıldığı da görülmüştür (Peyghambarzadeh vd. 2011). Her bir deney seti için 11 litre akışkan hazırlanmıştır. Bu miktar, sistem içerisinde 3 litre akışkanın dolaşımını ve daldırma tip rezistansın akışkan seviyesinin üzerinde kalmasını sağlayacak şekilde deponun yaklaşık %37'sini doldurmaktadır.

## ii. Nanoakışkanlar (NA)

Çalışma kapsamında 5 farklı türde nanopartikül sentezi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Partiküllerden biri saf  $TiO_2$  iken, diğer 4 tanesi saf  $TiO_2$  partikülü içerisine çeşitli oranlarda  $Ag$  ve  $Cu$  metal iyonlarının katkılanması ile oluşturulmuştur. İlgili katkılama oranları her iki metal iyonu için de %0.1 ve %0.3 şeklinde belirlenmiştir. Katkılama, saf  $TiO_2$  partikülünün sahip olduğu özellikleri daha da iyileştirmeye çalışmak için yapılan bir işlemdir. Çalışma kapsamında araştırılan nanoakışkanlarda katkılanan elementin ve katkılama oranının etkisi incelenmiştir.

Sistemde kullanılmak üzere hazırlanan nanoakışkanlarda ise sentezlenen 5 farklı türde nanopartikülden 4'ü kullanılmıştır. Bu 4 nanopartikül; saf  $TiO_2$ , %0.1  $Ag$  katkılanmış  $TiO_2$ , %0.1  $Cu$  katkılanmış  $TiO_2$ , ve %0.3  $Ag$  katkılanmış  $TiO_2$  nanopartikülleridir. %0.3  $Cu$  katkılanmış  $TiO_2$  nanopartikülünün ise sentezi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiş, ancak bu nanopartikül nanoakışkan hazırlamada kullanılmamıştır. Bu durumun bazı nedenleri;  $Cu$  katkılı nanopartiküllerin temel akışkana kıyasla ısı iletkenliklerinde önemli bir artış gözlenememiş olması (ilerleyen bölümlerde ısı iletkenlik sonuçlarında görüleceği üzere) ve hazırlanan örnek numunede dahi kararlılık sağlamada güçlük çekilmesi nedeniyle büyük miktarlarda senteze devam etmenin faydalı olmadığı tespit edilmesidir. Ancak ilgili nanopartikülün karakterizasyon sonuçlarında bazı önemli noktalar bulunduğundan, deneylerde kullanılan nanoakışkanlarda tercih edilmemiş olmasına rağmen karakterizasyon bilgisinin sunulmasında fayda görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında nanopartikül olarak  $TiO_2$  ve  $TiO_2$ 'in çeşitli metal iyonları ile katkılanmış şekillerinin kullanılmasının çeşitli sebepleri bulunmaktadır. Bu sebeplerden bazıları şu şekilde sıralanabilir (Chen vd. 2007; He vd. 2007);

- $TiO_2$  insanlar ve hayvanlar için genellikle güvenli bir malzeme olarak kabul edilmekte, hatta çeşitli kozmetik ürünleri ile su arıtma işlemlerinde kullanılmaktadır.
- $TiO_2$  nanopartiküllerinin üretimi kolaydır ve çok büyük endüstriyel miktarlarda elde edilebilirler.
- Herhangi bir stabilizör kullanılmasa dahi  $TiO_2$  nanopartikülleri kullanılarak hazırlanan nanoakışkanlarının kararlılığı oldukça iyidir.
- $TiO_2$  gibi metal oksit nanopartikülleri metalik benzerlerine kıyasla kimyasal olarak çok daha kararlıdır.

Bu özelliklerine ek olarak  $TiO_2$  nanopartikülü, literatür araştırmasında da bahsedildiği gibi bu alanda sıklıkla kullanılan diğer bazı metal oksitlere ( $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $Fe_2O_3$ ) kıyasla oldukça az sayıda çalışmada araştırılmış, bu nedenle de özgül değeri oldukça yüksek bir metal oksittir.  $TiO_2$  metal oksitinin çeşitli metal iyonları ile katkılanarak kullanılması ise çalışmaya literatürde daha önce uygulaması olmayan bambaşka bir boyut kazandırmaktadır.

### 3.1.2. Partiküllerin sentezi ve karakterizasyonu

Nanopartiküllerin sentezinde sol-jel reaksiyonları temeline dayanan “reflux yöntem” kullanılmıştır. Yöntem en basit tanımı ile sulu veya susuz çözücüler varlığında çözülen metal alkoksit ve/veya metal tuzlarının geri-soğutucu altındaki kimyasal çöktürme işlemidir. Sentezlenen malzemeye bağlı olarak, kristal yapı için ilave ısıl işlem gerektirebilir. Isıtma işleminde su, yağ veya kum banyosu kullanılmaktadır. Sentez işleminde kullanılan kimyasallar ve reaksiyon hızlarının kontrolü ile nanometrik boyuta sahip partiküller sentezlenebilmektedir (Burunkaya vd. 2013). Açıklanan prensibe göre gerçekleştirilen sentez işlemlerinde kullanılan kimyasallar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan kimyasal maddelere ait özellikler

<i>Kimyasalın Adı</i>	<i>Kimyasal Formül</i>	<i>Saflık [%]</i>	<i>Üretici Firma</i>
Titanyum(IV) n-bütoksit	$Ti(OBu^n)_4$	98	Abr
Bakır(II) Nitrat Trihidrat	$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	$\geq 99.5$	Merck
Gümüş Nitrat	$AgNO_3$	-	Merck
Hidroklorik asit	$HCl$	36.5-38	Sigma aldrich
Nitrik asit	$HNO_3$	$\geq 65$	Sigma aldrich
n-Propanol	$C_3H_8O$	99	Merck
Etilen Glikol	$C_2H_6O_2$	$\geq 99$	Sigma aldrich
Amonyak	$NH_3$	25	Merck

#### 3.1.2.1. Saf $TiO_2$ sentezi

20 g (0.057 mol)  $Ti(OBu^n)_4$ , 250 ml  $n - PrOH$  içerisinde 15 dk karıştırılıp oda sıcaklığında çözülerek homojen alkoksit solü hazırlanmıştır. Sol üzerine 1.125 g (0.0114 mol)  $HCl$  ve 22 ml  $n - PrOH$ ’den oluşan çözelti büret ile damla damla ilave edilmiştir [TBT/ $HCl$  = 0.2]. Daha sonra karışım üzerine 50.6 g (2.81 mol)  $H_2O$  ve 154 ml  $n - PrOH$ ’den oluşan çözelti büret ile damla damla ilave edilmiş ve  $130^\circ C$ ’de 6 saat boyunca geri soğutucu altında bekletilerek partiküller çöktürülmüştür. Çöktürülen partiküller santrifüj ile çözelti ortamından ayrıldıktan sonra  $50^\circ C$ ’de vakum etüvünde kurutulmuştur.

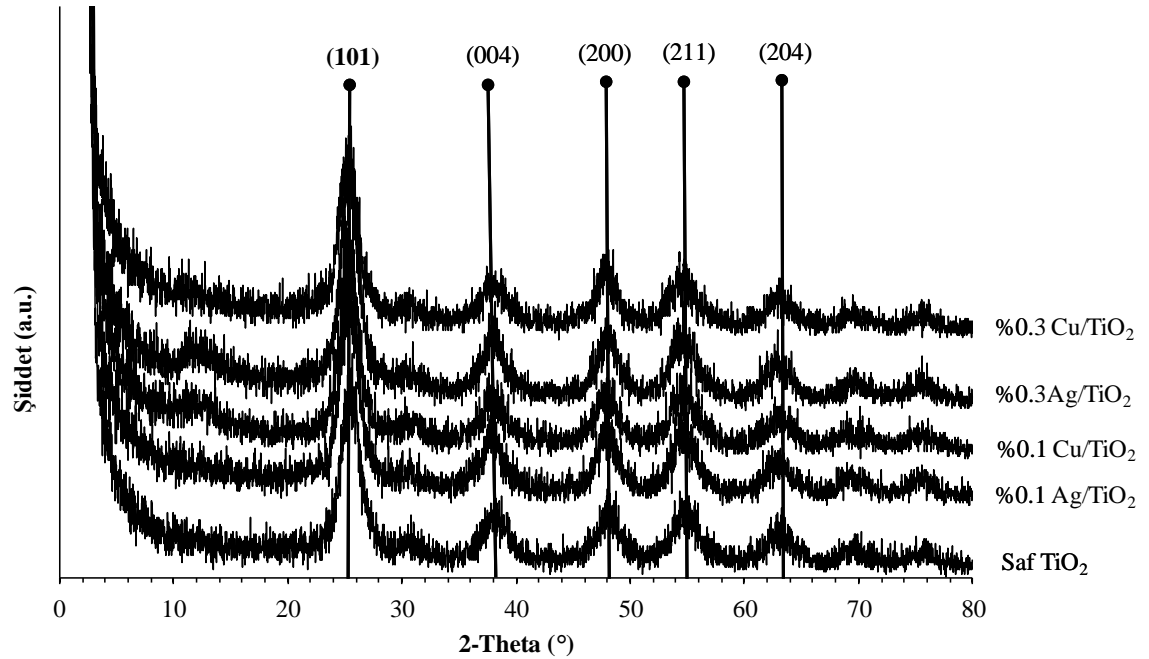
#### 3.1.2.2. Metal iyonu katkılı $TiO_2$ sentezi

20 g (0.057 mol)  $Ti(OBu^n)_4$ , 200 ml  $n - PrOH$  içerisinde 15 dk karıştırılıp oda sıcaklığında çözüldükten sonra üzerine 50 ml  $n - PrOH$  içerisinde çözülmüş metal tuzu çözeltisi (metal iyonları  $Ag^{+2}$  ve  $Cu^{+2}$ ; [metal iyonu /  $Ti(OBu^n)_4$ ] ağırlıkça %1 ve %3) ilave edilmiştir. Sol üzerine,  $Cu$  katkılı  $TiO_2$  sentezinde 1.125 g (0.0114 mol)  $HCl$  ve 22 ml  $n - PrOH$ ’den oluşan çözelti;  $Ag$  katkılı  $TiO_2$  sentezinde ise 1.110 g (0.0114 mol)  $HNO_3$  ve 22 ml  $n - PrOH$ ’den oluşan çözelti büret ile damla damla ilave edilmiştir [TBT/asit = 0.2]. Daha sonra karışımlara 50.6 g (2.81 mol)  $H_2O$  ve 154 ml  $n - PrOH$ ’den oluşan çözelti büret ile damla damla ilave edilmiş ve  $130^\circ C$ ’de 6 saat boyunca geri soğutucu

altında bekletilerek partiküller çöktürülmüştür. Çöktürülen partiküller santrifüj ile çözelti ortamından ayrıldıktan sonra 50°C’de vakum etüvünde kurutulmuştur.

### 3.1.2.3. X Işınları kırınımı analizi

Partiküllerin kristal yapısı X-ışını kırınımı tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Analiz süresince  $CuK\alpha$  ışını kullanılmış olup  $2\theta$  değerleri 0-80°, tarama hızı ise 0.04 cm/s seçilmiştir. XRD analizleri, İnönü Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan “Rigaku Geigerflex D Max/Bmodel X-Ray difraktometresinde” yaptırılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre saf ve hem  $Ag$  hem de  $Cu$  için iki farklı oranda katkılama yapılmış  $TiO_2$  partiküllerinin kristal yapısına dair XRD spektrumları Şekil 3.1’de verilmiştir. İlgili şekil incelendiğinde, tüm örnekler için en şiddetli pikin yaklaşık  $2\theta:25.5^\circ$ ’de olduğu gözlenmiştir. Spektrumdaki en şiddetli bu pik,  $Ag$  ve  $Cu$  metali katkılanmasıyla önemli bir değişiklik göstermemiştir. Diğer piklerin ( $\sim 38.32^\circ$ ,  $48.22^\circ$ ,  $54.76^\circ$  ve  $63.34^\circ$ ) varlığı da  $TiO_2$  nanopartiküllerinin anataz kristal yapısına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1. Saf,  $Ag$  ve  $Cu$  katkılanmış  $TiO_2$  nanopartiküllerinin XRD spektrumları

Sentezlenen saf ve metal katkılanmış  $TiO_2$  nanopartiküllerinin ortalama kristal boyutları, anataz yapının saçılma karakteristiğinin Scherrer eşitliğine uygulanması ile hesaplanmaktadır. İlgili eşitlik aşağıda verilmiştir ve bu eşitlikte  $D$  nanometre cinsinden ortalama kristal boyutunu,  $K$  kristal form faktörünü (0.94),  $\lambda$  X ışınının dalga boyunu,  $\beta$  maksimum saçılma pikinin yarı yüksekliğinin sahip olduğu genişliği,  $\theta$  pik noktasını (Bragg açısı) ifade etmektedir;

$$D = \frac{K \times \lambda}{\beta_{1/2} \times \cos\theta} \quad (3.1)$$

Saf ve metal katkılı  $TiO_2$  nanopartiküllerinin Scherrer eşitliğinden hesaplanan kristal boyutları Çizelge 3.2'den görülebilir. Metal ilavesi yapıldıkça  $TiO_2$  nanopartiküllerinin kristalite boyutlarının arttığı belirlenmiştir. Bu değişim,  $Ag^{1+}$  (115 pm) ve  $Cu^{2+}$  (73 pm) metallerinin ilavesi ile  $TiO_2$  kristal kafesinde bir miktar genişleme olmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 3.2.** Sentezlenen partiküllerin ortalama kristal boyutları

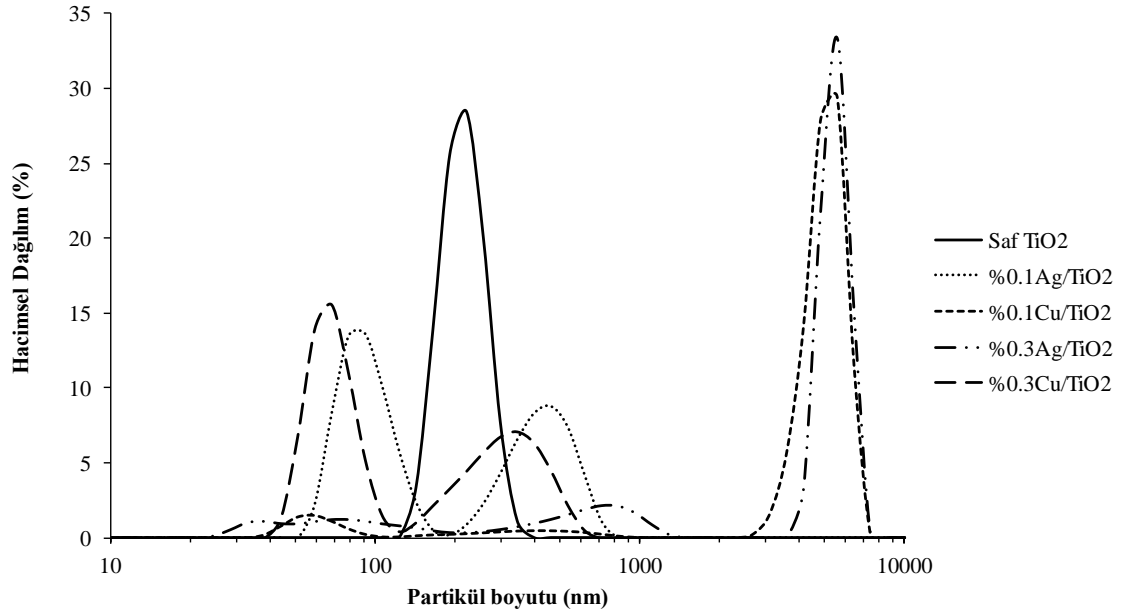
Örnek	$TiO_2$	%0.1	%0.1	%0.3	%0.3
		$Ag/TiO_2$	$Cu/TiO_2$	$Ag/TiO_2$	$Cu/TiO_2$
Kristal boyutu (nm)	6.76	7.98	6.95	7.22	7.82

#### 3.1.2.4. Partikül boyut dağılımı analizi

Tez çalışması kapsamında geliştirilen nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan temel akışkan içerisindeki nanopartiküllerin davranışlarının incelenmesi amacıyla hidrodinamik çap ve boyut dağılımı ölçülmüştür. Analizlerde kullanılan tüm numunelerde nanopartikül konsantrasyonu %0.1'dir. Partiküllerin tanecik boyut ve dağılımları, dinamik ışık saçılımı esaslı partikül boyut analizörü ile belirlenmiştir. Boyut analizleri, İnönü Üniversitesi'nde bulunan "Malvern Zeta sizer Nano-ZS" marka cihazda yaptırılmıştır. İlgili analizlerden elde edilen saf  $TiO_2$  ile iki farklı oranda  $Ag$  veya  $Cu$  katkılanmış  $TiO_2$  nanopartiküllerine ait partikül boyut dağılımlarını gösteren eğriler Şekil 3.2'de verilmiştir. Nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde hacimsel dağılım davranışlarını gösteren ve hidrodinamik boyutu hakkında bilgi veren bu eğrilere göre, saf  $TiO_2$  nanopartikülleri temel akışkan içerisinde monodispers (bireysel olarak disperse olmuş) dağılım sergilemekte olup çapları 100-500 nm aralığında değişmektedir. Bu durum, partiküllerin yoğun kümeleşmiş formda olduğunu işaret etmektedir. Metal katkısı oldukça iki farklı boyuta sahip partikül dağılımlarının oluştuğu görülmektedir. Metal oranı etkisiyle partikül hidrodinamik çapları arasında orantısal bir değişim yoktur.

#### 3.1.2.5. Partikül yüzey alanı dağılımı analizi (BET analizi)

Tez kapsamında kullanılmak üzere sentezlenen nanopartiküllerin toplam yüzey alanı ve hacim ölçümleri Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan "Micromeritics Tristar II Plus" model yüzey alanı tayin cihazı vasıtasıyla 77 K'de  $N_2$  adsorpsiyonu – desorpsiyonu temelli BET tekniği ile belirlenmiştir. Analizden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3'de verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Saf, Ag ve Cu katkılanmış  $TiO_2$  nanopartiküllerinin partikül boyut dağılımı eğrileri

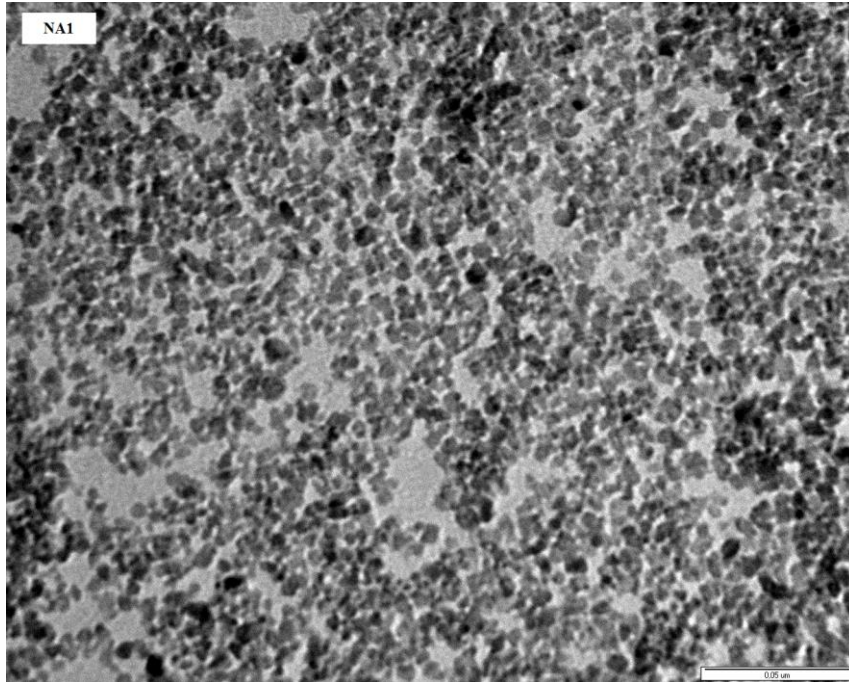
**Çizelge 3.3.** Sentezlenen partiküllerin yüzey alanları (BET analizi)

Örnek	$S_{BET}$ [ $m^2/g$ ]	$V_{top}$ [ $cm^3/g$ ]	$d_p$ [ $nm$ ]
$TiO_2$	212.647	0.155869	0.76281
%0.1 Ag/ $TiO_2$	227.102	0.209281	0.76607
%0.1 Cu/ $TiO_2$	219.227	0.190624	0.69413
%0.3 Ag/ $TiO_2$	248.623	0.222736	0.85487
%0.3 Cu/ $TiO_2$	270.464	0.202438	0.76396

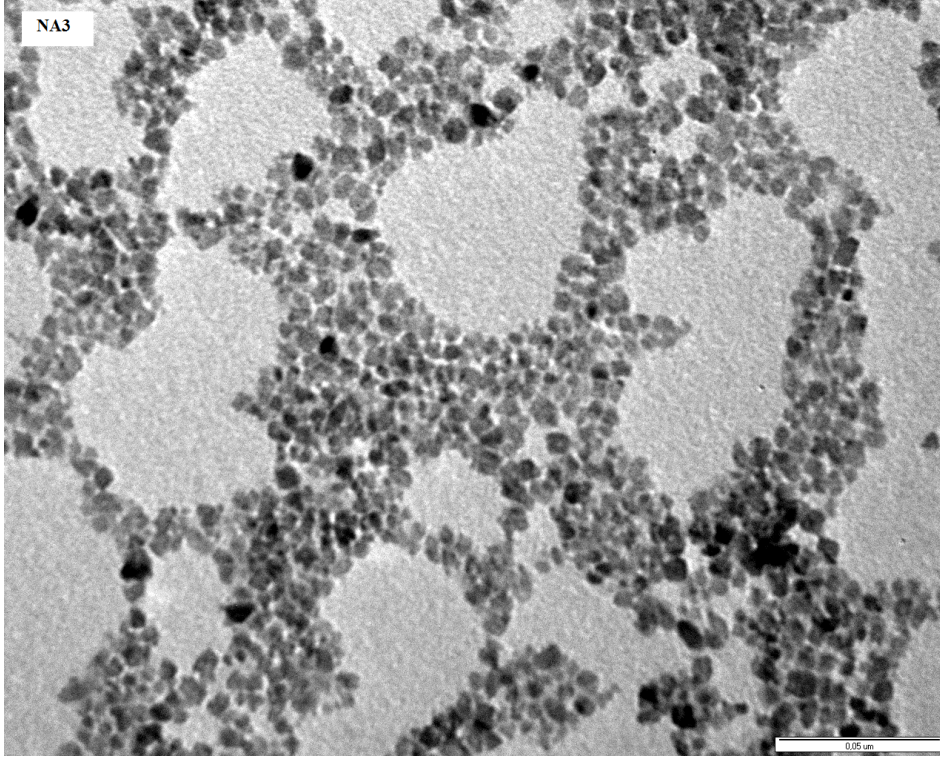
Nanopartiküllerin üstün özellikleri yüzey alanı/hacim oranlarının diğer boyuttaki partiküllerden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.  $S_{BET}$ , 1 gram nanopartikülün sahip olduğu toplam yüzey alanını  $m^2$  cinsinden ifade etmektedir. Toplam yüzey alanı hem dış yüzey alanı hem de partiküllerin sahip olduğu gözeneklerden kaynaklı iç yüzey alanının toplamını vermektedir. Benzer şekilde,  $V_{top}$  ise mikro ve mezo gözenek içeren 1 gram nanopartikülün sahip olduğu toplam hacimdir. Çizelge 3.3'den görüldüğü üzere, saf  $TiO_2$  nanopartiküllerinin yüzey alanı Ag veya Cu iyonlarının katkılanmış nanopartiküllere kıyasla daha düşüktür. Metal katkı oranı arttıkça hem yüzey alanı hem de gözenek hacimleri artmıştır. Gözenek boyutlarında ( $d_p$ ) görülen artış metal katkısıyla birlikte gözeneklerde genişlemenin olduğunu göstermektedir. Esas olarak, metal katkısının  $TiO_2$  kristal kafesinde bir miktar değişmeye yol açmasından dolayı gözlenen bu durum, teori ile uyum içindedir.

### 3.1.2.6. Geçirmeli elektron mikroskopi analizi (TEM analizi)

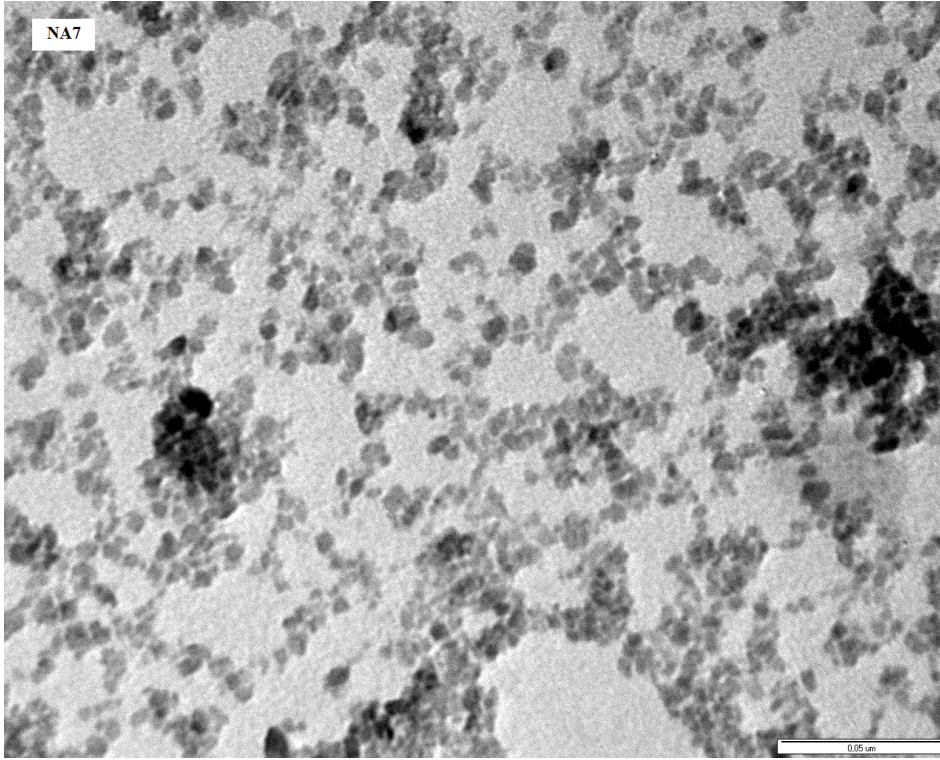
Partikül boyutları, gerçek parçacık boyutunun belirlenmesi amacıyla Akdeniz Üniversitesi Tıp Fakültesi bünyesinde yer alan “Geçirmeli Elektron Mikroskobu (TEM)” aracılığıyla incelenmiştir. İlgili cihaz tungsten filaman ile çalışmaktadır. Çözünürlüğü 3.5 nm olup, çalışma voltaj aralığı 200V ile 30 kV arasındadır. Cihazın büyütme aralığı 15 kattan 300.000 kata kadardır. Görüntüleme işlemlerinde kullanılmak üzere sentezlenen 5 farklı örneğin (saf  $TiO_2$ , iki farklı oranda  $Cu$  ve  $Ag$  katkılanmış  $TiO_2$  nanopartikülleri) temel akışkan içerisinde kütlece %0.1’lik solları (çözeltileri) hazırlanmıştır. Hazırlanan sollerden karbon kaplı  $Cu$  grid (Electron Microscopy Sciences, CF200-CU 200 mesh) üzerine kaplama yapıldıktan sonra 40°C’de vakum etüvünde kurutulup geçirmeli elektron mikroskobunda analizler gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında kullanılmak üzere sentezlenen saf  $TiO_2$  ile iki farklı mol oranında  $Ag$  ve  $Cu$  metal iyonları katkılanmış  $TiO_2$  nanopartiküllerine ait 218000 büyütmede alınan TEM resimleri Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de sunulmuştur. Görüntülerden de anlaşılacağı üzere, saf ve metal katkılanmış partikül şekilleri eşdeğer olup herhangi bir bozulmaya uğramamıştır. Tüm partikül boyutları 10 nm’nin altındadır. TEM’den bulunan partikül boyutları “dinamik ışık saçılımı” prensibine dayalı partikül boyut analizöründen bulunan sonuçlardan daha farklı değerlendirilmektedir. Temel akışkan içerisinde kütlece %0.1’lik nanopartikül sollarının analizi sonucu elde edilen boyutlar, çözücü molekülleri ile sarılmış partikül boyutlarını (ki buna hidrodinamik çap adı verilir); TEM analizlerinden elde edilen boyutlar ise salt parçacık boyutunu ifade eder. Hidrodinamik çap her durumda salt parçacık boyutundan daha yüksektir. Kararlı dağılım oluşturabilecek yüzey yüküne ulaşmamış partiküller ( $30 \leq d \leq 50 mV$ ,  $d$ : parçacık boyutu) buldukları çözücü ortamında aglomera (kümeleşme) eğilimindedirler. İstenilen yüzey yüküne ulaşıldığı durumda aynı yüklü partiküllerin birbirini itmesinden dolayı partiküller çözücü içerisinde askıda kalabilmektedir.



Şekil 3.3. Saf  $TiO_2$  nanopartiküllerine ait TEM fotoğrafı

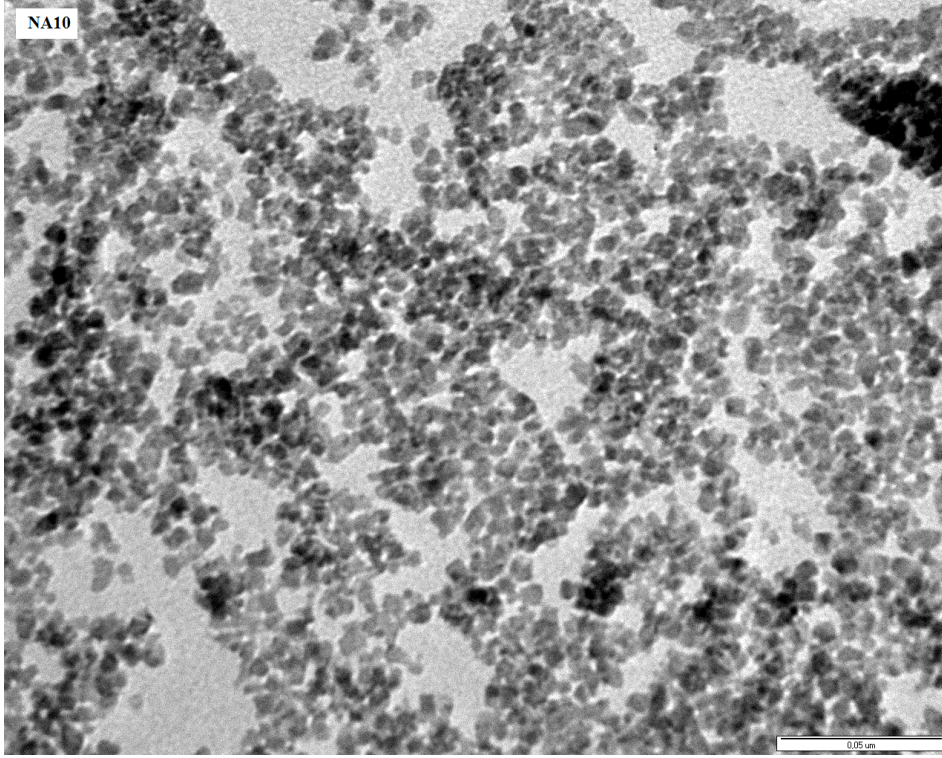


Şekil 3.4. %0.1 *Ag* katkılanmış  $TiO_2$  partiküllerine ait TEM fotoğrafı

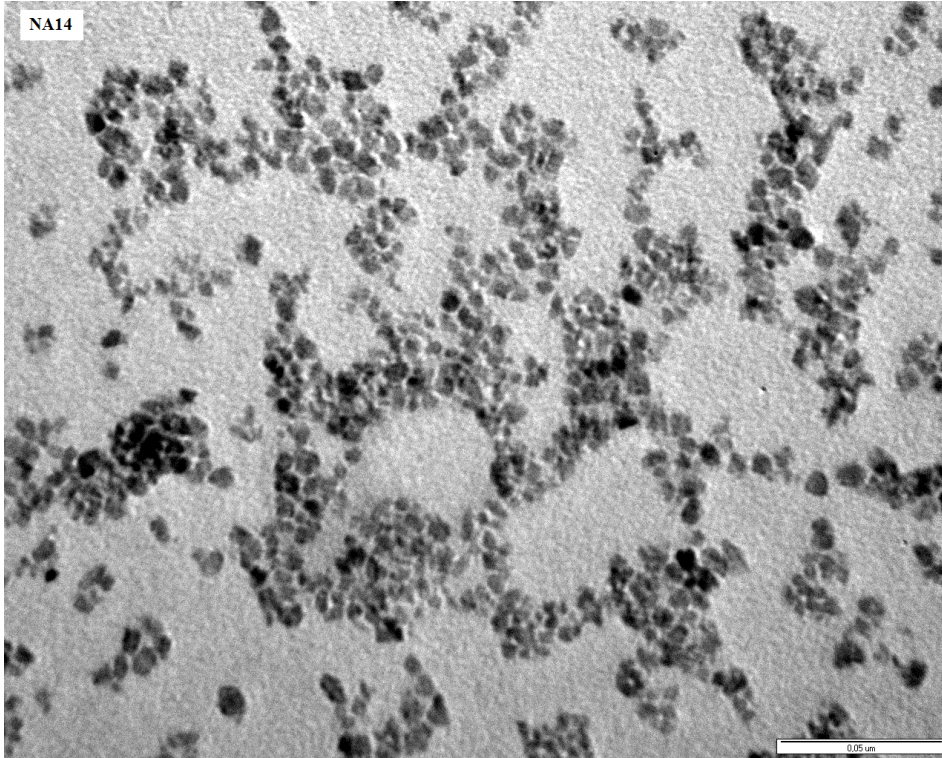


Şekil 3.5. %0.1 *Cu* katkılanmış  $TiO_2$  partiküllerine ait TEM fotoğrafı





Şekil 3.6. %0.3 *Ag* katkılanmış  $TiO_2$  partiküllerine ait TEM fotoğrafı



Şekil 3.7. %0.3 *Cu* katkılanmış  $TiO_2$  partiküllerine ait TEM fotoğrafı

### 3.1.2.7. Partiküllerin termofiziksel özellik analizleri

#### i. Yoğunluk

Partiküllerin hacim ve gerçek yoğunlukları, Arşimet'in akışkan taşması prensibinin ve Boyle Kanunu'nun kullanıldığı helyum piknometresi ile belirlenmiştir. Yoğunluk analizleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Ar-Ge Eğitim ve Ölçme Merkezi'nde bulunan "Quanto Krom Ultra Piknometresinde" 4 farklı nanopartikül grubu için yaptırılmıştır. İlgili analizlerden partiküllerin ağırlık, hacim ve yoğunluk değerlerine ulaşılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

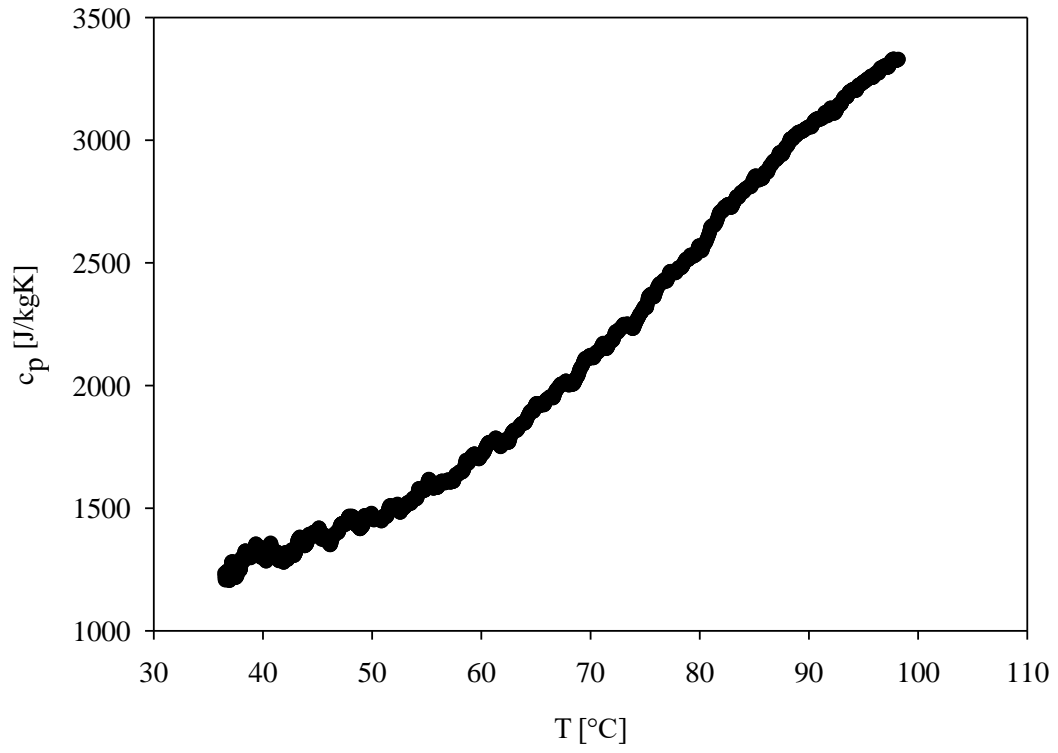
**Çizelge 3.4.** Nanopartiküllerin yoğunluk değerleri

Örnek	$T$ [°C]	$m_p$ [g]	$V_p$ [cm <sup>3</sup> ]	$\rho_p$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Saf $TiO_2$	21.2	3.3801	1.2221	2.7658
%0.1 $Ag - TiO_2$	21.2	3.4016	1.2032	2.8717
%0.1 $Cu - TiO_2$	20.6	4.0452	1.4661	2.7591
%0.3 $Ag - TiO_2$	20.6	3.6690	1.2776	2.8272

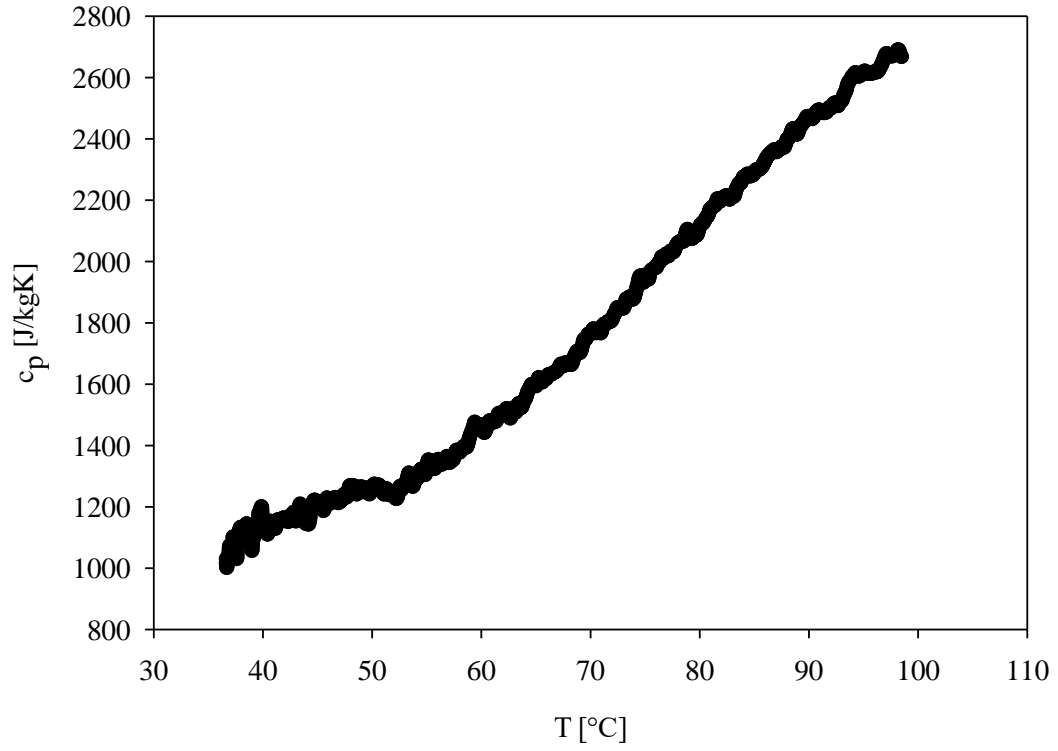
#### ii. Özgül Isı

Nanopartiküllerin özgül ısı değerlerinin tespiti için mevcut literatür oldukça yetersizdir. Saf  $TiO_2$  partikülleri için sentez yöntemi, nanopartikül boyut ve yüzey alanı gibi birçok parametreye bağlı olarak özellikler değişmekte, bu nedenle literatürden elde edilebilecek olan değerler tam olarak araştırmada kullanılan partiküllerin değerlerini karşılamamaktadır.  $Ag$  ve  $Cu$  katkılanmış partiküller ise tez çalışması kapsamında araştırılmak üzere özgün olarak sentezlendiği için bu partiküllere ait özellikler literatürde bulunmamaktadır. Özgül ısı bir malzemenin ısı transfer kabiliyetini önemli oranda etkileyen bir parametredir. Bu nedenlerle tez çalışmasında kullanılan tüm özgün nanopartiküller için özgül ısı değerlerinin oldukça geniş bir sıcaklık aralığında (36 – 98°C) 0.02°C sıklıkla deneysel olarak ölçümü gerçekleştirilmiştir. İlgili ölçümler, Dumlupınar Üniversitesi İLTEM'de bulunan "Setaram marka LABSYS Evo Tga model" termal analiz cihazında gerçekleştirilmiştir.

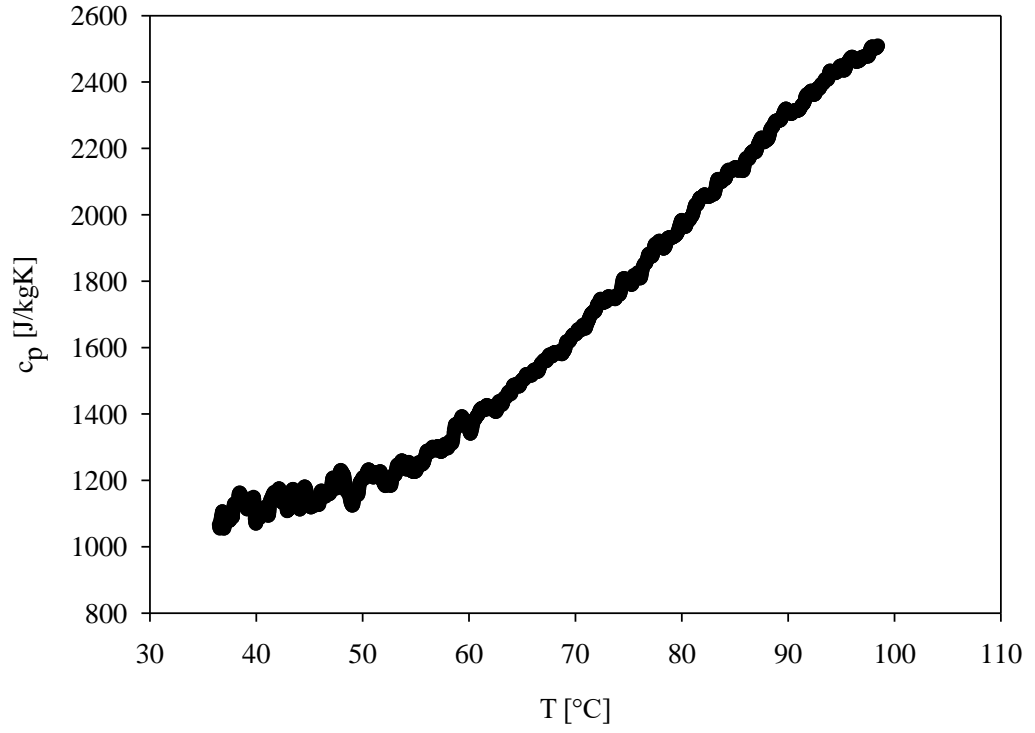
Ölçüm verilerinden elde edilen grafikler her bir nanopartikül grubu için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'da sunulmuştur. Her grafik 1948 adet veri içermektedir. İlgili ölçüm sonuçlarından ısı transfer hesaplarını etkileyebilecek bazı önemli veriler elde edilmiştir. Aynı oranda (%0.1) katkılanan  $Ag$  ve  $Cu$  metal iyonları birbirlerine yakın özgül ısı değerlerine sahipken saf  $TiO_2$  partikülü ile kıyaslandığında, her ikisinin de daha düşük kaldığı görülmektedir. %0.1  $Cu$  katkılı nanopartikülün ayrıca kütlesi ve hacmi de diğer partikül gruplarına göre %20 daha fazla artış göstermiştir (Çizelge 3.4). %0.3  $Ag$  katkılı nanopartiküller incelendiğinde ise özellikle deneysel sıcaklık aralığı olan 40 – 60°C aralığında saf  $TiO_2$  partikülünün özgül ısı değerlerinden daha yüksek özgül ısıya sahip oldukları görülmektedir.



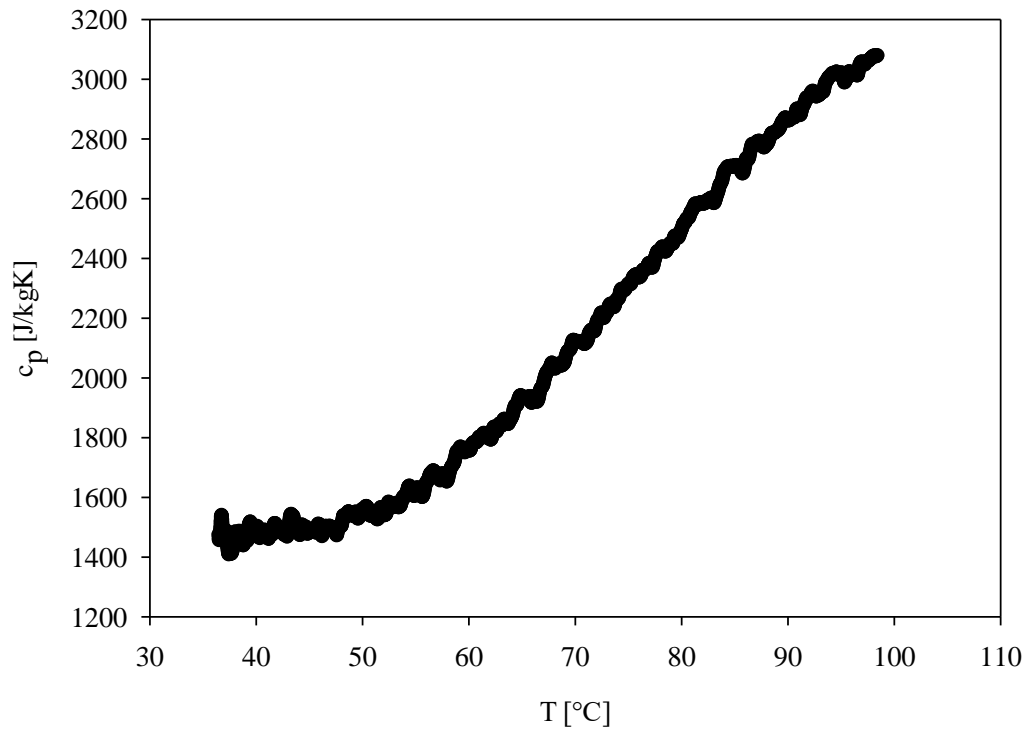
**Şekil 3.8.** Saf  $TiO_2$  partikülleri için özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi



**Şekil 3.9.** %0.1  $Ag$  katkılanmış  $TiO_2$  partikülleri için özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi



**Şekil 3.10.** %0.1 *Cu* katkılanmış *TiO<sub>2</sub>* partikülleri için özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi



**Şekil 3.11.** %0.3 *Ag* katkılanmış *TiO<sub>2</sub>* partikülleri için özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi

### 3.1.3. Nanoakışkanların hazırlanması ve karakterizasyonu

#### 3.1.3.1. Nanoakışkanların hazırlanması

Çalışmada kullanılan nanoakışkanların hazırlanma prosedürü temel olarak nano boyuta sahip  $TiO_2$ ,  $Cu$  katkılı  $TiO_2$  ve  $Ag$  katkılı  $TiO_2$  partiküllerinin hacimce [1:1] oranında [ $EG:H_2O$ ] karışımı içerisinde sollarının hazırlanması işlemidir. Bunun için, nanopartiküllerin üzerine sol oluşturmak amacıyla [ $EG:H_2O$ ] karışımı ilave edilerek ultrasonik banyoya yerleştirilmiştir. Daha sonra karışım üzerine %25'lik  $NH_3$  çözeltisinden pH 7 olana kadar (nötr ortam için) damla damla ilave edilmiştir.

Mevcut çalışmada nanoakışkanlar hazırlanırken hem nanopartikül konsantrasyonu hem de partikül içerisindeki metal iyonların katkılanma oranı değiştirilerek farklı özelliklerin ısı transferine etkisinin araştırılması sağlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan akışkanlara ait detaylı açıklamalar Çizelge 3.5'de mevcuttur. İlgili çizelgede belirtildiği üzere tüm akışkanlar bir kısaltma ile tanımlanmıştır ve çalışmanın devamında akışkanlar ifade edilirken bu kısaltmalardan yararlanılacaktır. Nanoakışkanların hazırlanması esnasında konsantrasyon ve katkılanma oranlarına karar verilirken ısı iletkenlik ölçümlerinin yanı sıra çalışma aralığındaki sıcaklıklar için yoğunluk, özgül ısı ve viskozite gibi termofiziksel özellikleri de göz önüne alınmıştır.

**Çizelge 3.5.** Deneysel çalışmada kullanılan akışkanlara ait detaylı açıklamalar

<i>Kısaltma</i>	<i>Temel Akışkan*</i>	<i>Partikül</i>	<i>Konsantrasyon</i> [ $\phi_m$ ]	<i>Katkılanan Metal İyonu</i>	<i>Katkılama Oranı</i>
TA	$EG:H_2O$	-	-	-	-
NA1	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%0.3	-	-
NA2	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%0.5	-	-
NA3	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%0.3	$Ag$	%0.1
NA4	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%0.5	$Ag$	%0.1
NA5	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%1	$Ag$	%0.1
NA6	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%2	$Ag$	%0.1
NA7	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%0.3	$Cu$	%0.1
NA8	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%0.5	$Cu$	%0.1
NA9	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%1	$Cu$	%0.1
NA10	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%0.3	$Ag$	%0.3
NA11	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%0.5	$Ag$	%0.3
NA12	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%1	$Ag$	%0.3
NA13	$EG:H_2O$	$TiO_2$	%2	$Ag$	%0.3

\*(50:50 hacimsel oranda hazırlanmıştır)

Çalışmada kullanılan nanoakışkanlarda herhangi bir katkı maddesi veya yüzey etken madde kullanılmamış ve partiküllere yüzey modifikasyon işlemi uygulanmamıştır. Bu tip bir yaklaşımda bulunulmasının sebebi, hazırlanan nanoakışkanları dış faktörlerden mümkün olduğunca uzak tutmaktır. Çünkü nanoakışkan içerisine eklenen ekstra her madde, akışkanın özelliklerini dolayısıyla da performansını değiştirebilmektedir (Pak ve Cho 1998; Sheikhzadeh vd. 2017). Mevcut çalışma kapsamında gerçek otomobillerde karşılaşılan koşullara mümkün olduğunca yakın bir ortam oluşturmak hedeflenmiştir. Ancak bilindiği üzere bu işlemler nanoakışkanların kararlılığını sağlamak üzere yapılmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan malzemelerin özelliği gereği nötr pH değerinde çalışmak durumunda kalındığı da göz önünde bulundurulduğunda, akışkanların kararlılığı ve çökme davranışları da deneylerde gözlemlenen parametreler arasında olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre yeni yaklaşımlar ve çözüm önerileri sunulmuştur.

### 3.1.3.2. Nanoakışkanların termofiziksel özellik analizleri

Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerin tespitinde doğrudan ölçümü yapılabilen özelliklerin deneysel olarak ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu grup özellikler dinamik viskozite ve ısı iletim katsayısıdır. Yoğunluk ve özgül ısı değerleri ise nanopartiküller üzerinden alınan ölçümler kullanılarak literatürde kabul görmüş eşitlikler yardımıyla nanoakışkanlar için hesaplanmıştır.

#### i. Yoğunluk

Temel akışkanın yoğunluk tespiti için deneysel sıcaklık aralığı olan 40 – 60°C için ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen değerler Çizelge 3.6'dan görülebilir. Temel akışkan ve nanopartiküller için elde edilen deneysel ölçüm sonuçları, nanoakışkanların farklı sıcaklıklardaki yoğunluk değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Hesaplamalarda nanopartiküllerin akışkan içerisinde iyi bir şekilde dağıldığı kabulü ile genellikle iki fazlı akışkanlar için kullanılan klasik formüllerden yararlanılmıştır. Bu amaçla oluşturulan eşitlik şu şekildedir (Pak ve Cho 1998);

$$\rho_{na} = \rho_p \phi_v + (1 - \phi_v) \rho_{ta} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte  $\phi_v$  hacimsel konsantrasyondur ve eşitlikteki “ta”, “na” ve “p” alt indisleri sırasıyla temel akışkan, nanoakışkan ve partikülü ifade etmektedir.

**Çizelge 3.6.** Temel akışkan yoğunluk değerleri

$T$ [°C]	$\rho_{ta}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
40	1062.08
45	1058.41
50	1055.60
55	1054.27
60	1049.81

### ii. Özgül ısı

Akışkanların özgül ısı değerlerinin belirlenmesi sırasında birkaç farklı yöntem kullanılmıştır. Temel akışkan glikol grubuna ait oldukça bilinen bir karışım olduğu için literatürde kabul görmüş sıcaklığa bağlı özellik tablolardan faydalanılmış (ASHRAE, 2007), ayrıca ölçüm yapılmasına gerek duyulmamıştır.

Nanoakışkanların özgül ısı değerlerinin hesaplanmasında ise Xuan ve Roetzel, (2000) tarafından geliştirilen eşitlik kullanılmıştır. İlgili eşitlik aşağıda verildiği gibidir;

$$c_{p,na} = \frac{\rho_p \phi_v c_{p,p} + (1 - \phi_v) \rho_{ta} c_{p,ta}}{\rho_{na}} \quad (3.3)$$

### iii. Viskozite

Akışkanların dinamik viskoziteleri Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan "Fungilab Alpha model Viskozimetre" ile tayin edilmiştir. Ölçümler deneysel çalışma aralığı olan 40 – 60°C sıcaklık aralığı için gerçekleştirilmiş, her bir ölçüm 5 kez tekrarlanarak ölçüm hassasiyeti belirlenmiştir. Çizelge 3.7'den de görülebileceği üzere ölçümlerde en fazla  $\pm 0.11$ 'lik bir değişim oluşmuştur.

### iv. Isı İletim Katsayısı

Hazırlanan temel akışkan ve nanoakışkanların ısı iletim katsayısı ölçümleri Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde ilgili ekip tarafından hazırlanan deneysel düzeneğe, 3 $\omega$  yöntemi kullanılarak 25 °C sabit sıcaklıkta ısı iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yöntemin ve kullanılan düzeneğin detayları ilgili araştırmacıların yayımlarından detaylı olarak görülebilir (Turgut vd. 2016).

Mevcut tez çalışması kapsamında hazırlanan süspansiyonlar, deney düzeneğinde herhangi bir korozyona sebebiyet vermemek için nötr pH'dadır ve akışkanlar hazırlanırken herhangi bir yüzey etken madde kullanılmamıştır. Akışkanların bu özelliklerinin, ölçüm için alınan örnekte dispersiyon ve çökme problemine neden olduğu düşünülmektedir. Çizelge 3.8'de verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde, hazırlanan nanoakışkanların bazılarında temel akışkana kıyasla fark gözlenmediği, bazılarında ise beklenenden daha düşük bir fark ölçüldüğü görülmektedir. Bu durumun ölçüm örneğindeki dispersiyon probleminden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Ayrıca araştırmacıların da belirttiği üzere kurulan düzenekteki hata oranı  $\pm 2\%$ , ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliği %0.3 ve hassasiyeti ise %0.1 mertebelerindedir.

Çalışma kapsamındaki tüm sentez, karakterizasyon ve nanoakışkan hazırlama işlemlerinde kullanılan cihaz bilgileri ve hizmet alınan üniversite laboratuvarlarının listesi Çizelge 3.9'da bir arada verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Akışkanların farklı sıcaklıklar için ölçülen dinamik viskozite değerleri

<i>Akışkan</i>	$\mu$ [cP]				
	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
TA	2.34±0.03	2.11±0.01	1.88±0.02	1.73±0.01	1.57±0.01
NA1	2.48±0.01	2.18±0.03	1.95±0.03	1.76±0.04	1.61±0.02
NA2	2.98±0.02	2.65±0.03	2.40±0.01	2.17±0.01	1.98±0.01
NA3	2.39±0.03	2.18±0.01	1.95±0.00	1.77±0.01	1.60±0.02
NA4	2.43±0.02	2.15±0.02	1.93±0.02	1.76±0.01	1.62±0.02
NA5	2.53±0.02	2.25±0.02	1.99±0.02	1.77±0.01	1.66±0.01
NA6	4.10±0.11	3.62±0.06	3.26±0.06	2.93±0.02	2.74±0.04
NA7	2.49±0.01	2.21±0.01	1.98±0.02	1.80±0.02	1.65±0.02
NA8	2.49±0.04	2.19±0.02	2.03±0.03	1.84±0.02	1.71±0.03
NA9	2.47±0.02	2.33±0.05	2.08±0.02	1.92±0.06	2.21±0.02
NA10	2.36±0.02	2.12±0.02	1.88±0.04	1.74±0.01	1.59±0.01
NA11	2.38±0.02	2.12±0.00	1.90±0.02	1.74±0.01	1.60±0.02
NA12	2.65±0.02	2.31±0.05	2.03±0.02	1.85±0.01	1.74±0.02
NA13	2.74±0.11	2.96±0.04	2.95±0.05	2.88±0.03	2.72±0.03

**Çizelge 3.8.** Nanoakışkanların 25°C sabit sıcaklıkta bağıl ısı iletim katsayısı değerleri

<i>Akışkan</i>	<i>Bağıl Isı İletim Katsayısı</i> ( $k_{na}/k_{ta}$ )
NA1	1.000
NA2	1.000
NA3	1.007
NA4	1.009
NA5	1.011
NA6	1.000
NA7	1.000
NA8	1.000
NA9	1.002
NA10	1.005
NA11	1.007
NA12	1.019
NA13	1.024



**Çizelge 3.9.** Sentez ve karakterizasyon işlemlerinde yararlanılan üniversite laboratuvarları ve cihazların listesi

<i>Kullanılan Cihaz</i>	<i>Cihazın Marka / Model Bilgisi</i>	<i>Cihazın Kullanım Amacı</i>	<i>İlgili Laboratuvar</i>
Terazi	Precisa XB 1220 M	Tartım işlemleri	A.Ü. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü
Hassas terazi	Mettler Toledo TLE204	Tartım işlemleri	
Magnetik karıştırıcı	IKA RCT Basic (ısıtıcı)	Karıştırma ve ısıtma işlemleri	
Geri soğutucu düzeneği	Markasız cam düzeneği	Partiküllerin sentezi	
Santrifüj	Hermle Z 326K	Partiküllerin ayrılması	
Etüv	Heratherm	Ön kurutma işlemleri	
Vakum etüvü	Binder	Kurutma işlemleri	
Ultrasonik banyo	Elma S100H	Nanoakışkanların hazırlanması	
Saf su cihazı	Mp Minipure Marka Dest up	Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan saf suyun üretilmesi	
Yüzey alanı ölçüm cihazı	Micromeritics TriStar II Plus	Partiküllerin yüzey alanı ve gözenek dağılımlarının belirlenmesi	
Viskozimetre	Fungilab Alpha model	Nanoakışkanların viskozitelerinin belirlenmesi	
Geçirmeli elektron mikroskobu	ZEISS-LEO 1430	Partikül çaplarının belirlenmesi	A.Ü. Tıp Fakültesi
Partikül boyut ölçüm cihazı	Malvern Zeta Sizer Nano series Nano ZS	Partiküllerin boyut analizi	İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi
X-ışını kırınımı cihazı	Rigaku Geigerflex DMax B Model	Partiküllerin kristal yapısının tanımlanması	

\*(devamı arkada →)

**Çizelge 3.9.** 'un devamı

Helyum piknometresi	Quantachrome Ultracycrometer 1000	Partiküllerin gözenek hacimlerinin ve yoğunluklarının belirlenmesi	ODTÜ Merkezi Laboratuvar
Termal analiz cihazı / Cp analizi	Setaram LABSYS Evo Tga	Partiküllerin ısı kapasitesinin belirlenmesi	Dumlupınar Üniversitesi İLTEM
3ω Prensibi ile çalışan deney düzeneği	Markasız / özel üretim (Turgut vd., 2016)	Nanoakışkan ısıl iletim katsayısı ölçümü	Dokuz Eylül Üniversitesi

Buraya kadar sunulan değerler, belirli sıcaklık aralıkları için yapılan deneysel ölçümler sonucu elde edilen genel verilerdir. Isı transfer hesaplamaları yapılırken, her bir deneyde akışkanların ulaştıkları ortalama sıcaklık değerleri belirlenmiş, akışkanların bu sıcaklıklarda sahip oldukları termofiziksel özellikler hesaplamaların hassasiyetinin artırılması amacıyla ayrıca tespit edilmiştir. İlgili sıcaklıklar ve özellikler her bir deney seti için ayrı ayrı olmak üzere Çizelge 3.10, Çizelge 3.11, Çizelge 3.12, Çizelge 3.13 ve Çizelge 3.14'de sunulmuştur. Bu özellikler hem deneysel hem de teorik ısı transfer analizlerinde kullanılmıştır.

**Çizelge 3.10.** 25 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri

<i>Akışkan</i>	$T_{ort}$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]
TA	41.90	1060.70	0.00225	3368.08
NA1	42.05	1244.84	0.00236	2869.97
NA2	42.05	1366.87	0.00284	2613.62
NA3	42.55	1248.71	0.00228	2842.84
NA4	41.75	1374.08	0.00233	2566.26
NA5	42.25	1683.10	0.00240	2071.95
NA6	39.60	2290.81	0.00414	1472.44
NA7	41.40	1245.01	0.00241	2830.80
NA8	41.15	1366.90	0.00242	2538.77
NA9	40.15	1669.17	0.00247	2013.52
NA10	42.35	1247.15	0.00225	2919.12
NA11	41.75	1371.18	0.00229	2692.30
NA12	40.95	1677.99	0.00259	2251.78
NA13	42.50	2278.60	0.00285	1761.67

**Çizelge 3.11.** 23 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri

<i>Akışkan</i>	$T_{ort}$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]
TA	42.35	1060.40	0.00223	3370.11
NA1	43.85	1243.68	0.00225	2888.50
NA2	43.20	1366.13	0.00277	2636.76
NA3	43.90	1247.82	0.00223	2849.06
NA4	42.50	1373.58	0.00229	2570.39
NA5	43.30	1682.64	0.00235	2084.40
NA6	40.80	2290.50	0.00402	1469.38
NA7	42.05	1244.56	0.00238	2838.37
NA8	41.95	1366.40	0.00237	2562.08
NA9	39.90	1669.30	0.00247	2034.19
NA10	43.95	1246.08	0.00217	2926.12
NA11	40.90	1371.68	0.00233	2681.86
NA12	41.95	1677.46	0.00252	2270.41
NA13	43.90	2278.26	0.00291	1769.73

**Çizelge 3.12.** 21 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri

<i>Akışkan</i>	$T_{ort}$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]
TA	42.80	1060.00	0.00221	3372.15
NA1	44.10	1243.50	0.00223	2891.12
NA2	44.30	1365.47	0.00270	2654.69
NA3	44.40	1247.55	0.00221	2848.47
NA4	42.95	1373.33	0.00226	2577.97
NA5	43.75	1682.37	0.00232	2095.02
NA6	41.05	2290.43	0.00400	1472.11
NA7	42.85	1244.02	0.00233	2835.39
NA8	42.20	1366.32	0.00236	2570.59
NA9	40.70	1668.91	0.00245	2023.81
NA10	43.70	1246.26	0.00218	2928.23
NA11	42.25	1370.85	0.00226	2687.55
NA12	41.40	1677.79	0.00255	2256.09
NA13	44.40	2278.17	0.00293	1775.22

**Çizelge 3.13.** 19 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri

<i>Akışkan</i>	$T_{ort}$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]
TA	42.45	1060.30	0.00223	3370.57
NA1	45.40	1242.61	0.00216	2900.24
NA2	43.55	1365.96	0.00275	2646.00
NA3	45.25	1246.92	0.00217	2857.63
NA4	43.55	1373.00	0.00223	2587.84
NA5	44.00	1682.24	0.00231	2065.32
NA6	41.90	2290.23	0.00392	1488.01
NA7	42.90	1244.02	0.00233	2832.50
NA8	41.70	1366.57	0.00239	2564.37
NA9	41.85	1668.33	0.00242	2060.34
NA10	44.10	1245.99	0.00216	2922.59
NA11	43.55	1370.11	0.00220	2706.96
NA12	42.00	1677.46	0.00251	2269.39
NA13	45.20	2277.97	0.00297	1761.49

**Çizelge 3.14.** 17 l/dk akışkan debisinde yapılan deneyler için akışkanların termofiziksel özellikleri

<i>Akışkan</i>	$T_{ort}$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]
TA	41.95	1060.60	0.00225	3368.30
NA1	45.90	1242.25	0.00213	2897.88
NA2	45.50	1364.73	0.00262	2650.94
NA3	45.65	1246.65	0.00215	2856.55
NA4	44.75	1372.26	0.00216	2597.12
NA5	44.10	1682.24	0.00230	2070.36
NA6	42.25	2290.12	0.00388	1486.20
NA7	42.40	1244.29	0.00236	2835.09
NA8	42.70	1365.99	0.00233	2559.60
NA9	42.65	1667.94	0.00240	2046.62
NA10	44.85	1245.45	0.00213	2923.73
NA11	43.90	1369.86	0.00218	2695.60
NA12	42.65	1677.13	0.00247	2260.54
NA13	45.85	2277.80	0.00300	1774.26

### 3.1.4. Deney düzeneği ve elemanları

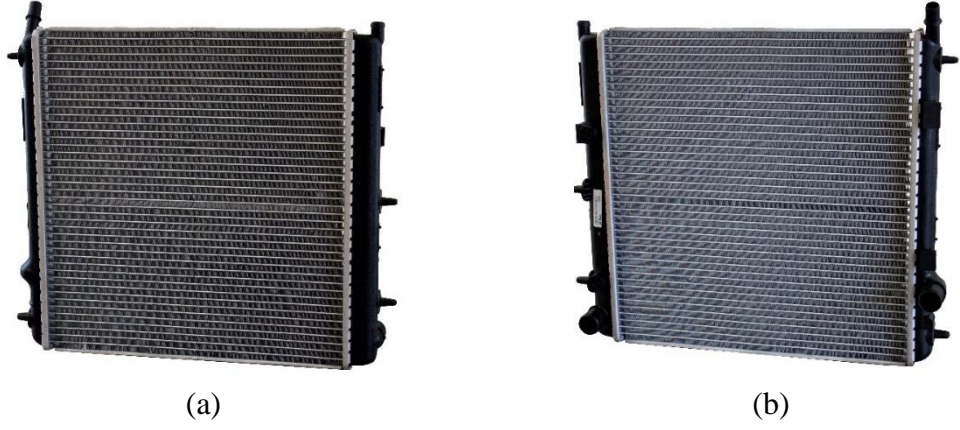
Çalışmanın kaynak taramaları bölümünde araçlardaki motor soğutma sistemlerinin elemanları ve çalışma prensibi detaylı olarak açıklanmıştır. Kısaca hatırlatılmak istenirse temel prensip, motorda yanma sonucu oluşan yüksek ısı enerjisinin son yıllarda özellikle sıvı soğutmalı olarak tercih edilen sistemler ve aracın ön kısmında bulunan menfezden içeri alınan hava ile uzaklaştırılmasıdır. Bu amaçla kullanılan soğutma sistemleri, radyatör, termostat, kalorifere giden ısıtıcı hortumları, sirkülasyon pompası, soğutma fanı ve üst / alt radyatör hortumları gibi elemanlardan oluşmaktadır.

Tez çalışması kapsamında kullanılan deney düzeneği tasarlanırken, gerçeğe mümkün olduğunca yakın bir model oluşturmak hedeflenmiştir. Çünkü deneysel sistem, uygulamada kullanılan soğutma sisteminin boyut ve yapısına ne kadar yakın olursa, bilimsel sonuçların ürüne dönüşme şansının da o kadar artacağı düşünülmektedir. Bu bakış açısıyla tasarlanıp, üretimi yapılan ve kurulumunun ardından deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin tüm tasarım ve üretim aşamaları ile kullanılan cihaz ve malzemelerin detaylı özellikleri bu kısımda açıklanmıştır. İlk önce sistemde kullanılacak olan elemanlara karar verilmiş, daha sonra bu elemanlar bilgisayar ortamında bir araya getirilerek üretim öncesinde doğru şekilde yerleşimlerinin yapıldığından emin olunmuştur. Ölçüm cihazlarının yerleşimleri de dahil olmak üzere sistemin tasarımının tamamlanmasının ardından üretim ve montaj aşamaları gerçekleştirilmiştir.

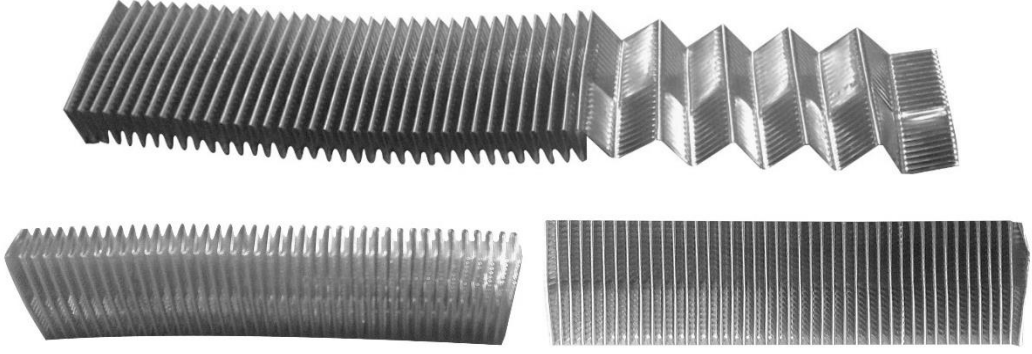
#### *i. Radyatör*

Mevcut çalışmada performansı test edilmek için seçilen otomobil radyatörü, B segmenti bir aracın soğutma ihtiyacını karşılayabilecek büyüklükte dalgalı panjur kanatçıklı (corrugated louver fin) alüminyum bir radyatördür. Mümkün olan en küçük yüzey alanına sahip radyatör seçilmeye çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan radyatöre ve bu radyatörde bulunan kanatçık tipine ait çeşitli açılardan çekilmiş fotoğraflar sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de verilmiştir. İlgili radyatöre ait teknik resim Şekil 3.14, boru detayı Şekil 3.15 ve kanatçık detayı ise Şekil 3.16’dan görülebilir.

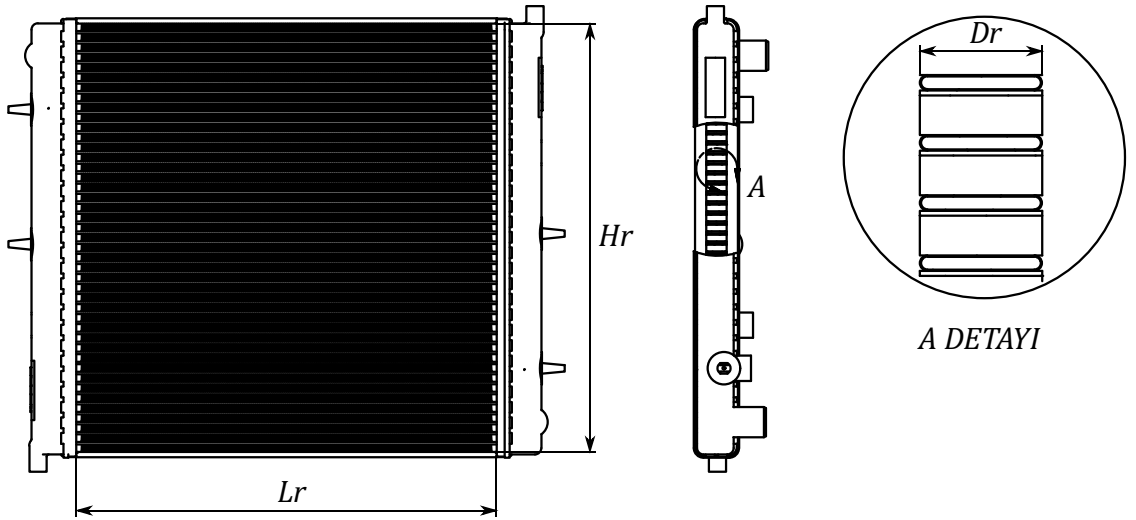
Verilen teknik ve detay resimler üzerinde yassı kesitli boru, kanatçık ve radyatöre ait önemli geometrik boyutlar gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında kullanılan radyatör için ilgili geometrik boyutların değerleri ise Çizelge 3.15’de verilmiştir. Radyatör boyutlarının ısı transfer hesaplarında ihtiyaç duyulan geometrik karakteristiklerin belirlenmesinde nasıl kullanıldığı ise tez çalışmasının metot bölümünde hava ve yassı kesitli boru içi akışkan tarafı için ayrı ayrı olmak üzere detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



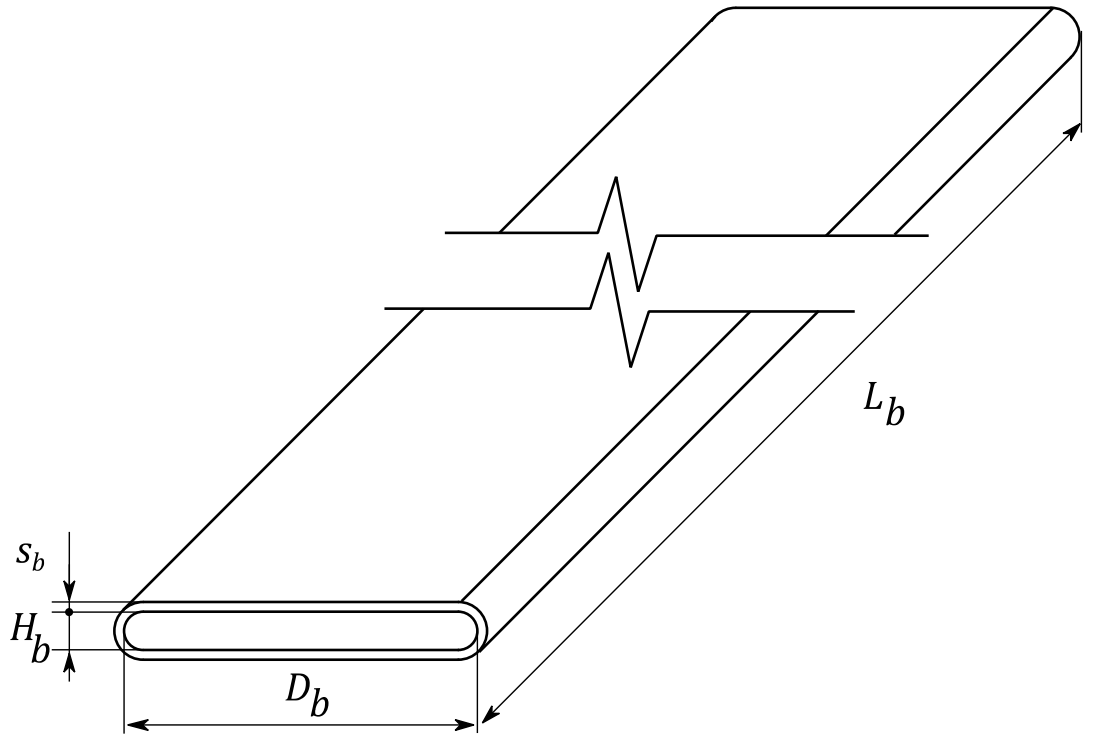
Şekil 3.12. Radyatörün çeşitli açılardan çekilmiş fotoğrafları: a) ön b) arka



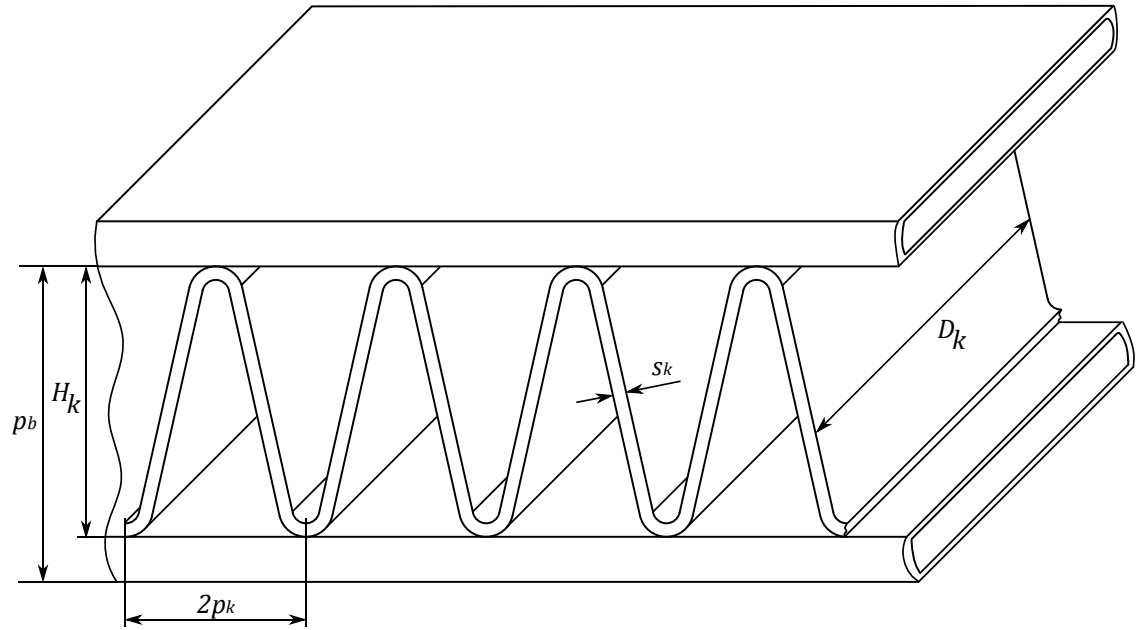
Şekil 3.13. Radyatörde kullanılan kanatçık tipini gösteren detay fotoğraflar



Şekil 3.14. Radyatöre ait teknik resim



Şekil 3.15. Yassı kesitli boru detayı



Şekil 3.16. Kanatçık detayı

**Çizelge 3.15.** Radyatöre ait geometrik boyutlar

<i>Büyüklik</i>	<i>Simge</i>	<i>Radyatör</i>	<i>Yassı Kesitli Borular</i>	<i>Kanatçıklar</i>
Yükseklik	H	0.409	0.002	0.00755
Uzunluk	L	0.380	0.380	-
Genişlik	D	0.0185	0.018	0.0185
Kalınlık	s	-	0.0002	0.00009
Adet	n	-	42	14792 (43 sıra)
Hatve	p	-	0.00955	0.001

\* Şekillerde radyatör için “*r*”, yassı kesitli boru için “*b*”, kanatçıklar için “*k*” alt indisleri kullanılmıştır.  
\*\* Tüm birimler metre cinsindedir.

Radyatörde gerçekleşen ısı transferinin analizi için çeşitli büyüklüklerin deneysel olarak ölçümünün yapılması gerekmektedir. Bu amaçla sistem üzerinde ihtiyaç duyulan noktalara gerekli ölçüm cihazları yerleştirilmiştir. Havanın özelliklerinin tespit edilebilmesi için radyatör bir kanal içerisine alınmıştır. Detaylı bilgiler aşağıdaki gibidir;

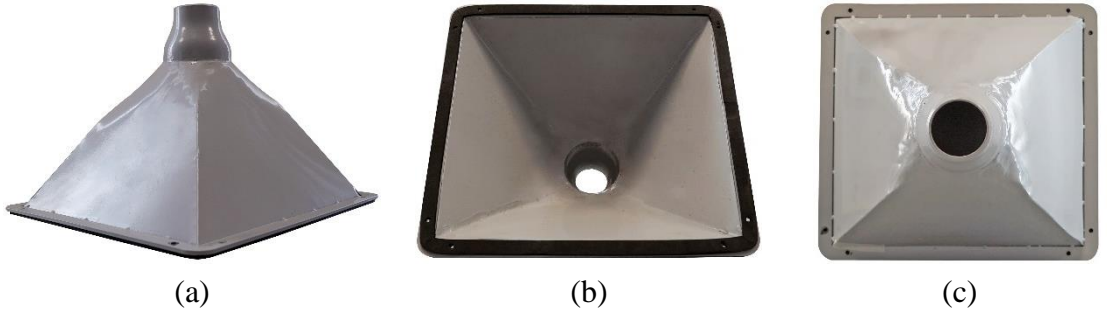
- Hava sıcaklığının ölçümü Pt-1000 sıcaklık sensörleri ile gerçekleştirilmiştir.
- Kanalın girişinde henüz radyatör ile temas etmemiş olan ve yaklaşık ortam sıcaklığındaki havanın sıcaklık kontrolü, kanalın merkez noktasına yerleştirilen bir adet sensör ( $T_1$ ) ile yapılmıştır.
- Radyatör üzerinden geçtikten sonra ısınan havanın sıcaklığı ise radyatörün arka tarafında 9 farklı noktadan ölçülmüş ( $T_2 - T_{10}$ ) ve bu değerlerin ortalaması alınarak havanın çıkış sıcaklığı belirlenmiştir.
- Hava hızının ölçümü kızgın tel hava hızı ölçüm probu ile yapılmıştır. Prob, radyatörün arka tarafına kanalın merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Ancak bilindiği üzere tek noktadan hız ölçümü yapılması ortalama hava hızı konusunda yeterli bilgiyi vermez. Bu nedenle Extech marka AN200 model pervane tip bir anemometre (Şekil 3.17) ve kalibrasyon bloğu (Şekil 3.18) yardımıyla tek noktadan alınan ölçümün kalibrasyonu yapılmıştır.
- Radyatörden geçen akışkanın sıcaklık değişiminin tespiti için radyatörün girişine ( $T_{a,g}$ ) ve çıkışına ( $T_{a,c}$ ) birer adet Pt-1000 sensör yerleştirilmiştir.
- Radyatör yüzey sıcaklığının ölçümü, 9 adet ısı çifti ile ( $T_{11} - T_{19}$ ) gerçekleştirilmiştir.
- Radyatördeki basınç kayıplarının hesaplanabilmesi için piezodirençli basınç transmitterleri ile giriş ve çıkıştan ölçüm alınmıştır.



Kullanılan ölçüm cihazlarına ait detaylı teknik özellikler Çizelge 3.16, Çizelge 3.17, Çizelge 3.18, Çizelge 3.19 ve Çizelge 3.20’de sunulmuştur. Ölçüm cihazlarının deney düzeneği üzerindeki yerleşimleri ise Şekil 3.19’dan görülebilir.



Şekil 3.17. Pervane tip anemometre



Şekil 3.18. Hava hızı kalibrasyon bloğunun çeşitli açılardan çekilmiş fotoğrafları

Çizelge 3.16. Pervane tip anemometreye ait teknik özellikler

<i>Teknik özellikler</i>	<i>Aralık</i>	<i>Çözünürlük</i>	<i>Hassasiyet</i>
Hava hızı	0.40 ... 30 m/s	0.01 m/s	± %3 m/s
Hava sıcaklığı	-10 ... +60°C	0.1°C	±3°C
Hava akışı	0 ... 999999 CMM m <sup>3</sup> /dk.	0.1	

**Çizelge 3.17.** Pt – 1000 Sıcaklık ölçerlere ait teknik özellikler

Teknik özellikler	
Tip	2 telli
Ölçüm aralığı	-20 ... +300°C
Nominal değeri	0°C’de 1000Ω
Direnç artışı	~3.85 Ω/K
Hassasiyet	±0.35°C

**Çizelge 3.18.** T – tipi ısı çifti ait teknik özellikler

<i>Teknik özellikler</i>	
Marka / Model	Elimko
Standart	DIN 43710 ve IEC 584
Standarta göre tip	T tipi
İçerdiği elemanlar	Bakır (+) Konstantan (-)
Ölçüm aralığı	-200 ... +300°C
Hassasiyet	±1°C
Duyarlılık	~43 mV/°C

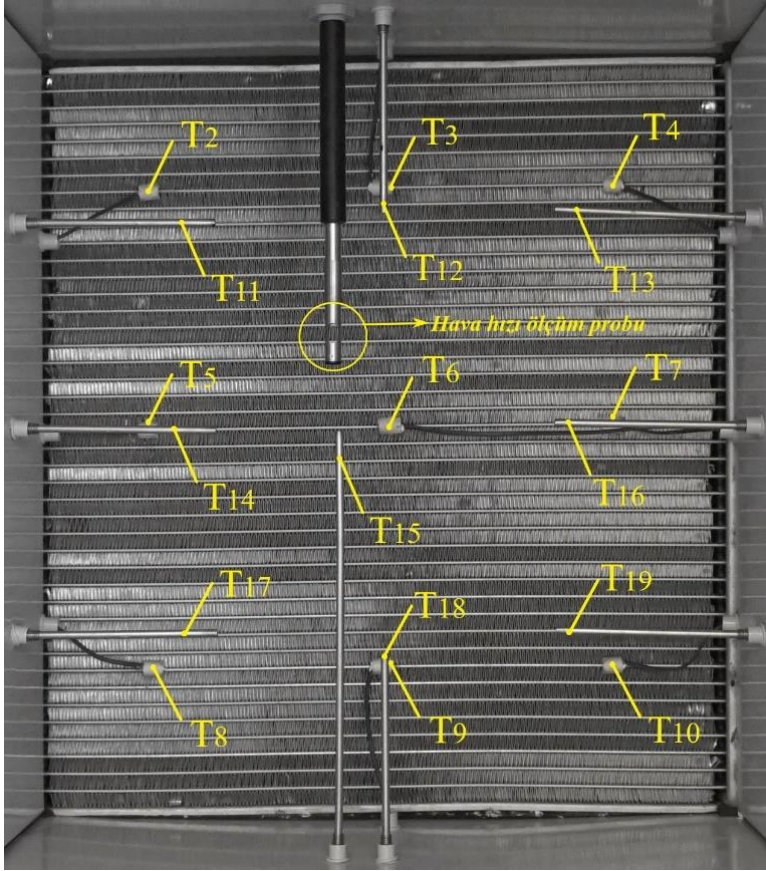
**Çizelge 3.19.** Kızgın tel hava hızı ölçüm probuna ait teknik özellikler

<i>Teknik özellikler</i>	
Marka / Model	Delta OHM / HD 403TS 1
Standart ölçüm aralığı	0.20 ... 40.0 m/s
Hassasiyet	± (0.2 m/s +%3 t.a.)
Çalışma sıcaklığı	
<i>Elektronik aksam</i>	0 ... +60°C
<i>Prob</i>	0 ... +80°C
Depolama sıcaklığı	-10 ... +70°C
Elektronik koruma sınıfı	IP67
Prob çalışma koşulları	Temiz hava, bağıl nem <%80
Standart kablo uzunluğu	2m

Çizelge 3.20. Piezodirençli basınç transmitterlerine ait teknik özellikler

<i>Teknik özellikler</i>	
Marka / Model	Keller / 21Y
Tip	2 kablolu
Basınç aralığı	2 ... 30 bar (t.a.)
Sinyal çıkışı	4 ... 20 mA
Doğrusallık <sup>(1)</sup>	typ. $\pm$ %0.25 t.a. maks. $\pm$ %0.5 t.a.
Toplam hata bandı <sup>(2)</sup>	
0 ... 50°C	maks. $\pm$ %1.0 t.a.
-10 ... 80°C	maks. $\pm$ %1.5 t.a.
Çalışma sıcaklığı	-40 ... 100°C

<sup>(1)</sup> Histerezis ve tekrarlanabilirlik dahil  
<sup>(2)</sup> Doğrusallık + histerezis + tekrarlanabilirlik + sıcaklık katsayısı + ömür toleransı dahil



Şekil 3.19. Ölçüm cihazlarının deney düzeneği üzerindeki yerleşimleri

## ii. Depo

Akışkanın elektrikli ısıtıcılar sayesinde istenilen sıcaklığa getirildiği ve bu sıcaklığın kontrolünün sağlandığı, gerçek sistemlerdeki motorun işlevini model sistemde gören elemandır. Deponun kapasitesi, mevcut otomobillerde kullanılan motor soğutma sistemleri ile uyumlu boyutlarda ve deneysel çalışma kapsamında kullanılan akışkanların istenilen sıcaklık ve debide dolaşımının sağlanacağı şekilde 35 litre olarak seçilmiştir. Nanoakışkanların deponun yüzey özelliklerinden olumsuz etkilenmemesi amacıyla, tankın iç yüzeyi *Cr-Ni* kaplama yapılmıştır.

- Motorda farklı güçlerde çalışma durumunda farklı ısınma ve dolayısıyla motordan farklı akışkan çıkış (radyatöre giriş) sıcaklıkları oluşmaktadır. Bu durumu deneylerde sağlamak üzere depo içerisindeki akışkanın sıcaklığını 40-95°C aralığında istenilen sıcaklığa getirebilecek şekilde, 3 adet her biri 3 kW kapasiteye sahip daldırma tip ısıtıcı rezistans kullanılmıştır (Şekil 3.20).
- Rezistanslar PID (oransal integral türevsel) kontrollü olup, her biri ayrıca bir adet SSR (katı hal röle) ile kontrol edilmektedir. Bu sayede depo sabit sıcaklıkta tutulabilmektedir. Ancak ilgili röle çalışma prensibi gereği bu işlemi rezistansın çektiği akımı değiştirerek yapmaktadır.
- Otomasyon panosundan akışkanın ulaşması istenen set sıcaklığı belirlenmiş, bu sıcaklığın kontrolü ise depo çıkışına yerleştirilen bir adet Pt-1000 sensörden ( $T_{depo}$ ) alınan bilgi yardımıyla gerçekleştirilmiştir.
- Tankın kapak bölümüne bir adet emniyet ventili yerleştirilmiş, kapalı devre çalışan sistemde oluşabilecek aşırı basınca karşı önlem alınmıştır.
- Tüm sistem basınçlı yıkamaya elverişli halde kurulmuş, deponun alt kısmına bağlı olan drenaj hattından tahliye edilebilir durumda tasarlanmıştır. Bu tasarımın yapılmasındaki hedef, farklı nanoakışkanlar ile çalışılan deney düzeneğinde akışkanlar arasındaki geçişler sırasında sistemde mümkün olan en az miktarda partikül kalmasını sağlayarak hassasiyetin artırılmasıdır.



Şekil 3.20. Depo ve rezistansı çeşitli açılardan gösteren fotoğraflar

### *iii. Pompa*

Sistemdeki akışkanın dolaşımının farklı debilerde sağlanabilmesi için bir adet ıslak rotorlu sirkülasyon pompası kullanılmıştır. 3 m<sup>3</sup>/h maksimum debiyi sağlayacak güçte, genellikle sıcak kullanım suyu için tercih edilen bir pompadır. İhtiyaca göre 3 farklı kademe çalışabilmektedir.

- Sistemin debi ayarının hassas olarak yapılabilmesi için pompanın bulunduğu hat üzerine bir by-pass hattı yerleştirilmiştir. Böylelikle pompanın dönüş hattı tamamen açık tutularak, sistem istenilen debiye gidiş hattı üzerindeki by-pass vanası yardımıyla ayarlanmıştır.
- Pompadaki basınç kayıplarını ölçebilmek için pompanın giriş ve çıkışına basınç transmitterleri (radyatörde kullanılan transmitterler ile aynı tipte) yerleştirilmiştir.
- Pompanın tükettiği güç ise dijital bir güç ölçer yardımı ile takip edilmiştir.

Sistemde kullanılan pompanın bazı önemli teknik özellikleri Çizelge 3.21’de verilmiştir. Pompanın sistem üzerindeki bağlantı hattını by-pass hattı ve basınç transmitterleri ile beraber gösteren fotoğraf ise Şekil 3.21’den görülebilir.

**Çizelge 3.21.** Pompaya ait teknik özellikler

<i><b>Teknik özellikler</b></i>	
Marka / Model	Calpeda / NCS3 ...-70
Bağlantı tipi	inline
Kademe sayısı	3 kademe
Gövde malzemesi	Bronz
Akışkan sıcaklığı	+5 ... +110°C
Ortam sıcaklığı	40°C’ye kadar
Maksimum izin verilen çalışma basıncı	10 bar
Minimum emme basıncı	0.05 bar (50°C’de)

### *iv. Debimetre*

Sistemdeki mevcut debinin tespiti ve farklı debi aralıklarında deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için bir debimetreye ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla radyatörün dönüş hattı üzerine dikey olarak yerleşecek şekilde bir adet Bürkert marka türbin tip çarklı debimetre kullanılmıştır. Debimetre, elektronik sinyalin gönderildiği kafa kısmı ve tesisat üzerine montajın sağlandığı bağlantı parçası olmak üzere 2 bölümden oluşmaktadır. İlgili debimetreye ait teknik özellikler Çizelge 3.22’de sunulmuştur. Debimetrenin sistem üzerindeki bağlantısı ise Şekil 3.22’den görülebilir.



**Şekil 3.21.** Pompanın by-pass hattı ile beraber bağlantı şekli

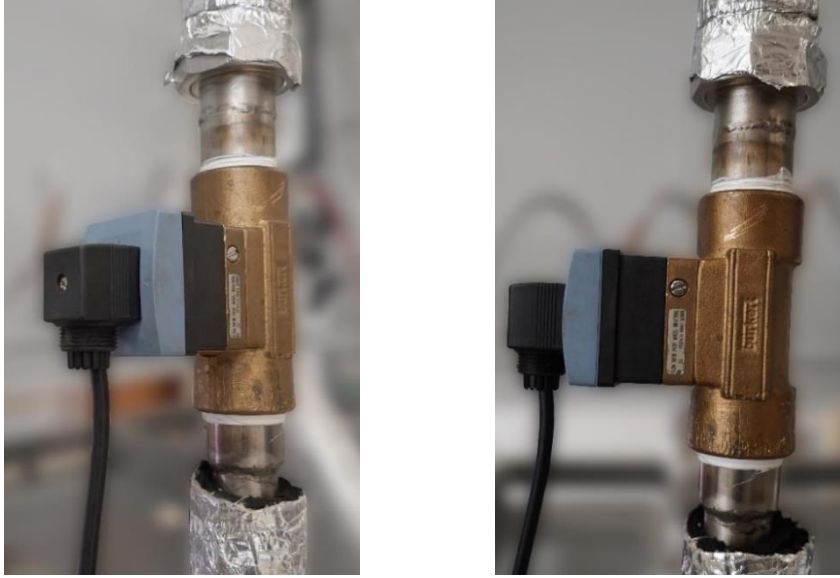
**Çizelge 3.22.** Debimetreye ait teknik özellikler

***Teknik özellikler***

Marka / Model	Bürkert / 8030
Tür	Türbin tip, çarklı
Bağlantı şekli	PNP, NPN
Sensör bağlantısı	S030, bronz
Ortam sıcaklığı	0 ... +60°C
Bağıl nem	≤ %80, yoğuşma olmadan
Ölçüm aralığı	0.5 ... 1200 l/dk (0.3 ... 10 m/s)
Maksimum akışkan sıcaklığı	80 °C
Maksimum akışkan basıncı	PN16
Viskozite	maks. 300 cSt.
Hassasiyet	≤ ± %0.5 t.a. <sup>(2)</sup> + %2.5 okuma <sup>(1)</sup>
Doğrusallık	≤ ± %0.5 t.a. <sup>(2)</sup>
Tekrarlanabilirlik	≤ ± %0.4 okuma <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Referans şartlar altında: akışkan su, ortam ve akışkan sıcaklığı 20°C, minimum giriş-çıkış kot farkı, uyumlu boru iç çap boyutları

<sup>(2)</sup> Tam skala: 10 m/s



**Şekil 3.22.** Debimetrenin sistem üzerindeki bağlantı şekli

#### v. Fan

Otomobillerde hareket ile birlikte ön tarafta bulunan menfezden giren hava, radyatör üzerinden geçer ve radyatörden akan akışkan ile arasında çapraz akış oluşarak soğuma sağlanır. Deney düzeneğinde de radyatörde dolaşan akışkanın soğutulması için farklı hızlarda çalışabilen ve otomobilde elde edilen maksimum ve minimum hava hızı değerlerini sağlayabilen bir adet Fanexfan marka geriye eğik seyrek kanatlı dikdörtgen kanal tipi fan kullanılmıştır. Bu tip fanlar alçak basınçlı radyal fanlardır. Genellikle montaj yerlerinin limitli olduğu dikdörtgen kesitli kanallarda tercih edilirler. Deney düzeneğinde de radyatörün boyutlarına göre özel olarak dizayn edilmiş kanal boyutları bulunduğundan bu tip bir fanın kullanılması uygun görülmüştür. Fanın devir ayarı otomasyon panosu üzerinden değiştirilebilmektedir. İlgili fana ait çeşitli teknik özellikler Çizelge 3.23’de mevcuttur.

**Çizelge 3.23.** Kanal tipi fana ait teknik özellikler

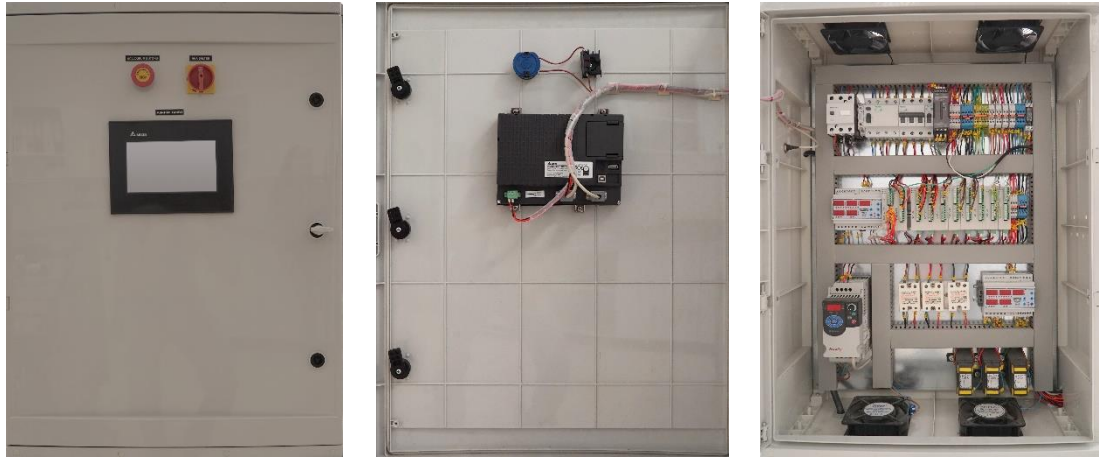
<b>Teknik özellikler</b>	
Model	FDKF 80-50
Gerilim	400 V/ 50 Hz
Güç	815 W
Akım	2.50 A
Devir	1375 d/d
Debi	8000 m <sup>3</sup> /h
Ses	86 DBA

### *vi. Borulama hattı*

Deney düzeneğinde kullanılan borulamalar temel olarak radyatör ve depo arasındaki akışkan sirkülasyonun sağlanması amacıyla yapılmıştır. İlgili hat üzerinde depo çıkışında bir adet by-pass hattı, pompa, debimetre ile çeşitli sıcaklık ve basınç ölçerler bulunmaktadır. Borular paslanmaz çelik malzemeden olup, ısı kayıplarının önlenmesi amacıyla izole edilmiştir.

### *vii. Veri toplama sistemi*

Tüm ölçüm elemanlarından gelen bilgiler, bir veri toplama sistemi yardımıyla hem anlık olarak gözlenmiş hem de istenilen zaman aralığında kayıt edilmiştir. Elde edilen veriler daha sonra sistematik bir yaklaşımla değerlendirilerek sistemin analizinde kullanılmıştır. Veri toplama sisteminde tamamı Delta marka olmak üzere bir adet ana PLC modül, Pt-1000 sensörler için 4 adet sıcaklık ölçüm modülü, ısı çiftleri için 3 adet sıcaklık ölçüm modülü, analog sinyal üreten basınç transmitterleri ve hava hızı ölçüm probu için ise 2 adet analog giriş modülü kullanılmıştır. İlgili elemanların yerleştirildiği otomasyon panosu, dış kapak üzerinde bulunan bir dokunmatik ekran yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Otomasyon panosunun iç ve dış yerleşimlerini gösteren ilgili fotoğraflar Şekil 3.23'den görülebilir. Tüm modüllerin önemli teknik özellikleri ise Çizelge 3.24'de bir arada sunulmuştur.



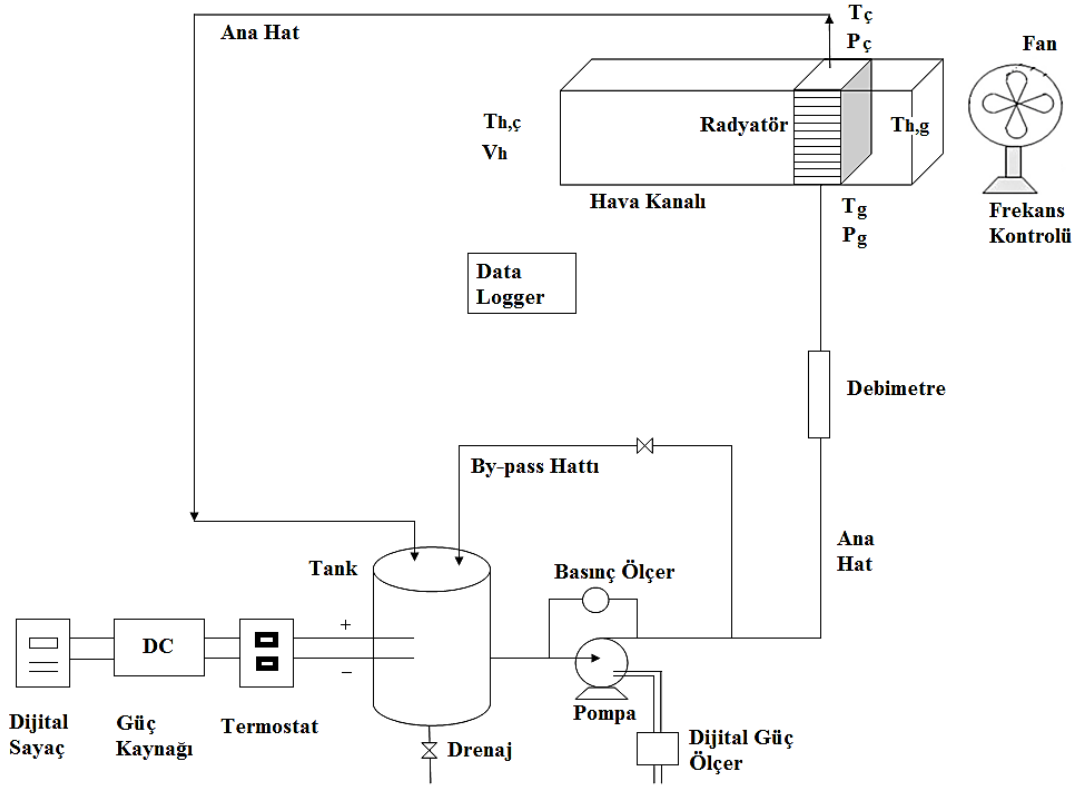
**Şekil 3.23.** Otomasyon panosuna ait fotoğraflar

Tüm elemanları detaylı bir şekilde açıklanan otomobil radyatörü model sisteminin çalışma prensibini ifade edebilmek için sistemin şematik olarak gösterimi yapılmıştır (Şekil 3.24). İlgili şema incelendiğinde, temel olarak depoda ısıtıcılar yardımıyla istenilen sıcaklığa getirilen akışkanın pompa vasıtasıyla radyatöre gönderildiği, burada kanal içerisine fan ile gönderilen hava tarafından soğutulduğu ve tekrar tanka döndüğü görülmektedir.



**Çizelge 3.24.** Otomasyon sisteminde kullanılan elemanların teknik özellikleri

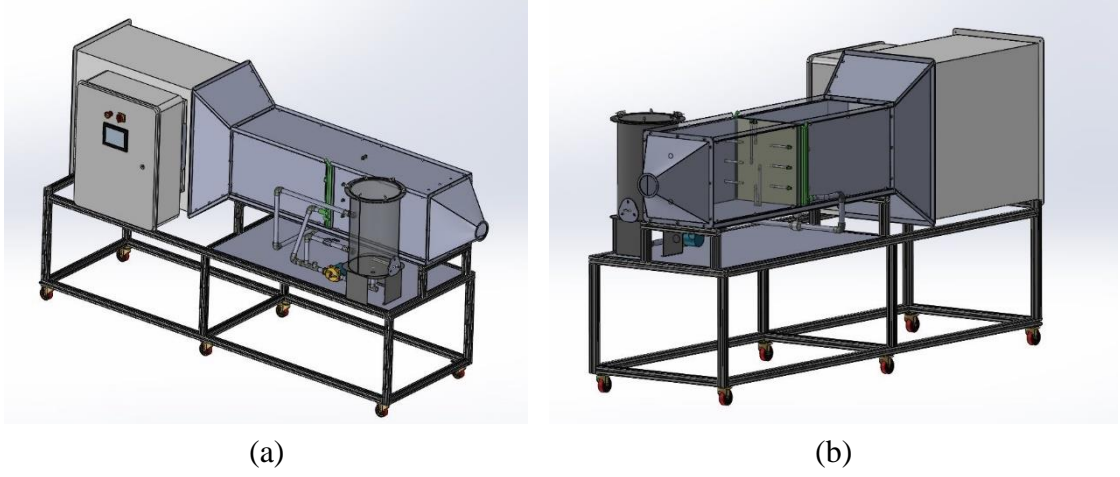
<i>Modül</i>	<i>Model</i>	<i>İşlev</i>	<i>Elektriksel Özellikler</i>	<i>Fonksiyonel Özellikler</i>
PLC	DVP-SS2	Kontrol birimi	24V DC besleme	
Sıcaklık Ölçüm	DVP04PT-S	Pt-1000 bağlama birimi	24V DC besleme	2 kablolu Sıcaklık aralığı: -180 ... 800°C Çözünürlük: 16 bit (0.1°C) Doğruluk: ±%0.6 t.a. (0~55°C'de)
Sıcaklık Ölçüm	DVP04TC-S	Isıl çift bağlama birimi	24V DC besleme	Sıcaklık aralığı: -100 ... 350°C Çözünürlük: 16 bit (0.1°C) Doğruluk: ±%0.5 t.a. (25°C'de) ±%1 t.a. (0~55°C'de)
Analog Giriş	DVP04AD-S	Analog sinyali dijital sinyale dönüştüren birim	24V DC besleme	Sıcaklık aralığı: -100 ... 350°C Çözünürlük: 13 bit (1 <sub>LSB</sub> = 5µA) Doğruluk: ±%0.5 t.a. (25°C'de) ±%1 t.a. (0~55°C'de)



Şekil 3.24. Otomobil radyatörü model sisteminin şematik gösterimi

Radyatöre gönderilen akışkanın debisi pompa hattı üzerine yerleştirilen bir by-pass hattı ile kontrol edilmiş, gerekli ayar bu hat üzerindeki bir küresel vana yardımıyla yapılmıştır. Sistem üzerinde gerekli noktalardan alınan sıcaklık ve basınç ölçümleri bir veri toplama sistemi yardımıyla hem sürekli olarak takip edilmiş hem de sistem sürekli rejime girdikten sonra ilgili deney için değerler kaydedilmiştir. Sistemin çalışması esasında ilgili deney için talep edilen çeşitli sınır değerler (örneğin; gerekli fan ayarı, tankın set sıcaklığı, ısıtıcı kademesi gibi) otomasyon panosu üzerinden kontrol edilmiştir.

Deney düzeneğinin montajı için ihtiyaç duyulan taşıyıcı yapının imalatı yapılmadan önce, elemanların ve ölçüm sistemlerinin yerleşimi ve bağlantılarının kontrolü tasarım yoluyla yapılmıştır. Tasarım çizimleri (Şekil 3.25) üzerinden sistemin doğru şekilde yerleştiğinden emin olunduktan sonra imalat ve montaj aşamalarına geçilmiştir. Bu aşamalardan çeşitli örnek fotoğraflar Şekil 3.26'dan görülebilir. İmalatı ve kurulumu tamamlanan deney düzeneğine ait çeşitli açılardan çekilmiş fotoğraflar ise Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de verilmiştir.



**Şekil 3.25.** Otomobil radyatörü model sisteminin üretim öncesi tasarım çizimleri; a) ön görünüş, b) arka görünüş



**Şekil 3.26.** Üretim aşamalarına ait çeşitli fotoğraflar

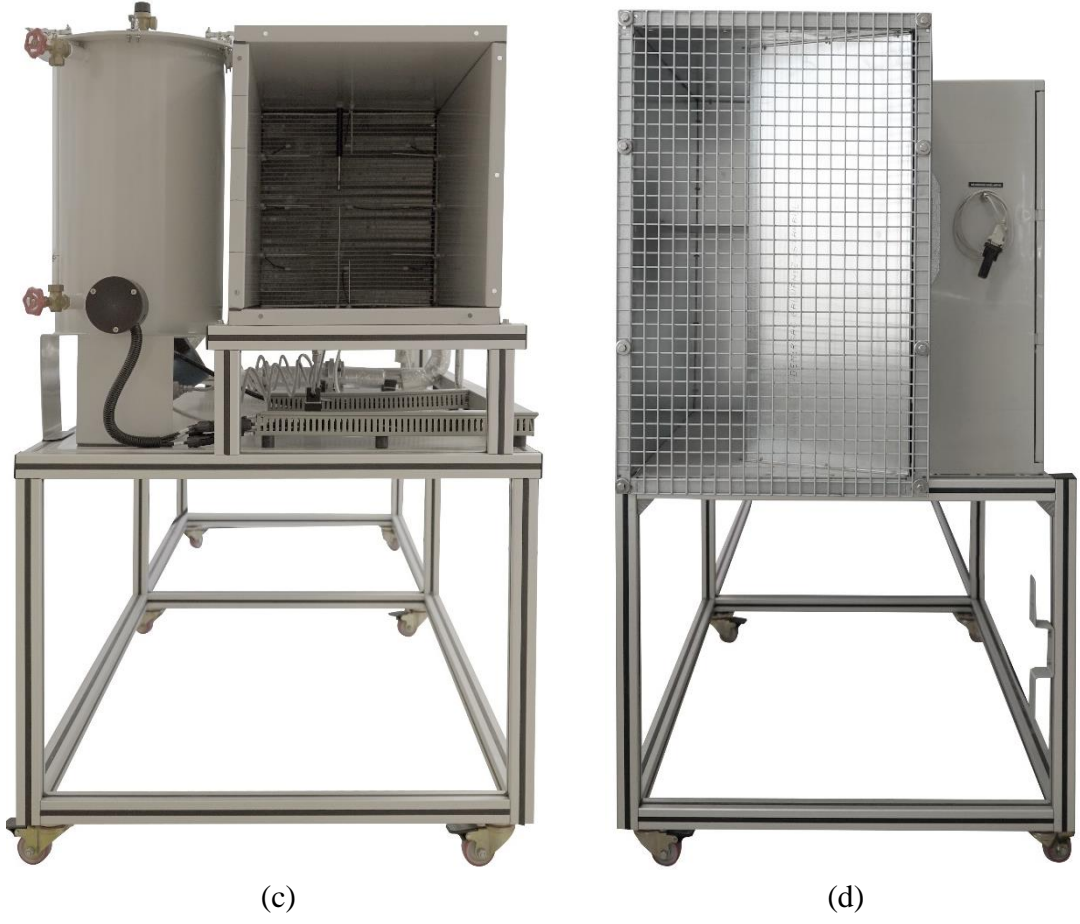


(a)



(b)

**Şekil 3.27.** Üretim ve montajı tamamlanan deney düzeneğine ait çeşitli açılardan çekilmiş fotoğraflar; a) ön görünüş, b) arka görünüş



**Şekil 3.28.** Üretim ve montajı tamamlanan deney düzeneğine ait çeşitli açılardan çekilmiş fotoğraflar; c) sağ görünüş, d) sol görünüş

## 3.2. Metot

### 3.2.1. Deneysel parametrelerin belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında araştırılan parametrelerin belirlenmesi sürecinde üç önemli kriter göz önünde bulundurulmuştur. İlk önce gerekli literatür taraması yapılarak mevcut çalışmaların güçlü ve eksik yanları belirlenmiş, bu bakış açısıyla literatüre kazandırılabilir özgün araştırma alanları tespit edilmiştir. İkinci aşama olarak, çalışılmak üzere tespit edilen ilgili parametreler için oldukça geniş aralıklarda deneyler gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamanın sonuçlarına göre son adımda ise mevcut deney düzeneğinde nanoakışkanların ısı transfer özelliklerinin araştırılması için optimum olduğu düşünülen bazı aralıklara karar verilmiş ve çeşitli akışkanlar için ilgili koşullar altında deneyler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kısımda üç aşamalı süreç sonunda optimum parametrelere nasıl karar verildiği ve bu parametrelerin neler olduğu gerekçeleri ile beraber açıklanmıştır. İlgili parametrelerden elde edilen sonuçlar ise tez çalışmasının “Bulgular ve Tartışma” kısmında sunulmuştur.

#### *i. Konsantrasyon*

Konsantrasyon, nanoakışkanlar için hacimsel veya kütleli olarak tanımlanabilen ve nanoakışkanlar hazırlanırken temel akışkan içerisine eklenen nanopartikül miktarını ifade eden bir terimdir. Bu parametrenin önemi, konsantrasyona bağlı olarak akışkanların ısı iletkenlik, viskozite, Pr sayısı gibi termofiziksel özelliklerinin değişmesi; bu değişimin ise performanslarında değişikliğe neden olmasıdır. Nanoakışkan içerisindeki nanopartikül konsantrasyonu, kullanılan nanopartiküllerden veya temel akışkandan bağımsız olarak literatürde bu alanda yapılan çalışmaların hemen hemen tamamında bulunan ve genellikle ilk araştırılan parametre olmuştur. Araştırmacıların üzerinde ortak olarak birleştikleri nokta, belirli bir orana kadar nanopartikül konsantrasyonundaki artışın akışkanların ısı iletim katsayılarını arttırması, dolayısıyla ısı transferini olumlu yönde etkilemesidir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken, kullanılan nanoakışkan için uygun konsantrasyonun belirlenmesi işlemidir. Çünkü belirli bir miktardan sonra konsantrasyondaki artış, çökme kaynaklı problemler nedeni ile akışkanın performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Benzer şekilde çok küçük miktarlardaki nanopartikül katkıları ise kayda değer bir değişim sağlamamaktadır. Mevcut çalışma kapsamında kütlece %0.3, 0.5, 1 ve 2 oranlarında nanopartikül konsantrasyonlarına sahip nanoakışkanlar ile deneyler gerçekleştirilerek, çalışma kapsamında kullanılan nanoakışkanlar için en uygun oran tespit edilmeye çalışılmıştır.

#### *ii. Temel akışkan / nanoakışkan debisi (Reynolds Sayısı)*

Kurulan prototip sistem için en uygun temel akışkan / nanoakışkan debisi belirlenirken oldukça geniş bir aralıkta çalışılarak yassı kesitli boru içi akışkan debisinin, sistemin ısı transfer performansı üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Bilindiği üzere sabit ısı yük altında akışkan debisinin azaltılması, radyatördeki sıcaklık düşüşünü arttırarak akışkanın radyatörden çıkış sıcaklığını düşürecektir. Azalan debi dolayısıyla azalan boru içi akış hızları da borularda daha az “süpürme hareketi (scrubbing action)” ne neden olacağından, ortalama akışkan sıcaklığı da artacaktır. Düşük debi aralığı, ilk grup deneylerde tercih edilen aralık olmuş ve bahsedilen durumlar ile karşılaşılmıştır (Çizelge 3.25). Başlangıçta bu tip bir yaklaşım ile deneylerin gerçekleştirilmesinin nedeni, mevcut

rezistans kapasitesi ile mümkün olan en yüksek giriş sıcaklığı değerlerine ulaşarak, deneysel sistemin gerçek sistemler ile uyumunu sağlamaktır. Ancak akışkanın giriş ve çıkışı arasında oluşan yüksek sıcaklık farkı, uygulamada önemli problemlere neden olmaktadır. Burada karşılaşılan en önemli sorun, motordan yüksek sıcaklıkta çıkarak radyatöre gelen soğutma sıvısının çok düşük sıcaklıkta motora geri gönderilmesi halinde motor bloğunda yaratacağı mekanik problemlerdir. Bu nedenle radyatörün giriş ve çıkışı arasında belirli bir sıcaklık farkının korunması önemlidir. Bu noktada  $\Delta T \cong 10^\circ\text{C}$  kabul edilebilir maksimum sıcaklık farkı olarak düşünülebilir.

**Çizelge 3.25.** Düşük debi aralığında yapılan deneylerde temel akışkan sıcaklığının değişimi

<i>Akışkan debisi</i> [l/dk]	<i>Radyatör Giriş</i> <i>Sıcaklığı [°C]</i>	<i>Radyatör Çıkış</i> <i>Sıcaklığı [°C]</i>	$\Delta T$	$T_{ort}$ [°C]
9.12	58.1	42.0	16.10	50.05
7.96	58.5	40.4	18.10	49.45
6.80	66.0	44.7	21.30	55.35
5.64	69.9	43.2	26.70	56.55
4.48	75.6	39.9	35.70	57.75
3.32	88.7	35.6	53.10	62.15

Dolayısıyla motor soğutma sistemleri için daha yüksek performansa sahip soğutma sıvısı geliştirmek üzere yapılan bir çalışmada, sistem parametrelerinin uygunluğu çok önemlidir. Aksi halde uygun olmayan parametreler altında test edilen akışkanlar gerçek sistemlerde kullanılmak istendiğinde beklenen performansı göstermeyebilir. Tüm bu nedenlerle akışkanların giriş çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın uygun şekilde oluşacağı debi değerleri seçilmeye çalışılmıştır. Buna göre düşük debi aralığının uygun olmadığı anlaşıldığından, debinin yükseltilmesine karar verilmiştir.

Akışkan debisi arttırıldığında, akışkanın radyatörden çok hızlı geçip, soğuma için yeterince süre geçmeden radyatörü terk edeceği düşünülebilir. Ancak bu doğru bir yaklaşım değildir. Sabit ısıtma yükü altında debinin artmasının, sıcaklık farkını azaltacağı açıktır. Daha iyi süpürme hareketinin de sonucu olarak ortalama akışkan sıcaklığı azalır ve soğutma verimi artar. Ancak akışkan debisini arttırırken bazı durumları da göz önünde bulundurmakta fayda vardır. Örneğin debiyi aşırı derecede arttırmak akışkan içerisine hava girmesine ve köpüklenmeye neden olarak radyatörde basınç düşüşüne ve pompada kaviteasyona yol açabilir. Bu durumlar kontrol altında tutularak belirli limitler dahilinde çalışmak önemlidir.

Yüksek debi aralıklarının seçilmesindeki bir diğer gerekçe ise nispeten daha yüksek Re sayısı aralıklarında çalışabilme imkanındır. Radyatörde oldukça fazla sayıda ve çok küçük hidrolik çapa sahip yassı kesitli borulara ayrılan toplam akışkan debisi, Re sayılarının da düşmesine neden olmaktadır. Aralıklar belirlenirken deney düzeneğinde kullanılan debimetrenin hassasiyeti de göz önünde bulundurulmuştur. Debimetrenin ölçüm aralığına göre yüksek hassasiyette ayar imkânı olan bölgede ve değişken debilerde çalışılmış, akışkan debisinin performansa olan etkisi incelenmiştir. Tüm bu anlatılan

kriterlere göre belirlenen debi değerleri 25, 23, 21, 19 ve 17 l/dk olmuştur. Bu debi değerlerine karşılık elde edilen Re sayıları, temel akışkan için 496, 466, 425, 383 ve 337 olarak belirlenmiştir. Nanoakışkanlar için ise hem debi hem de nanoakışkanların özelliklerine bağlı olarak Re sayıları değişkenlik gösterdiğinden 370 ile 830 aralığında farklı değerler aldığı söylenmek mümkündür.

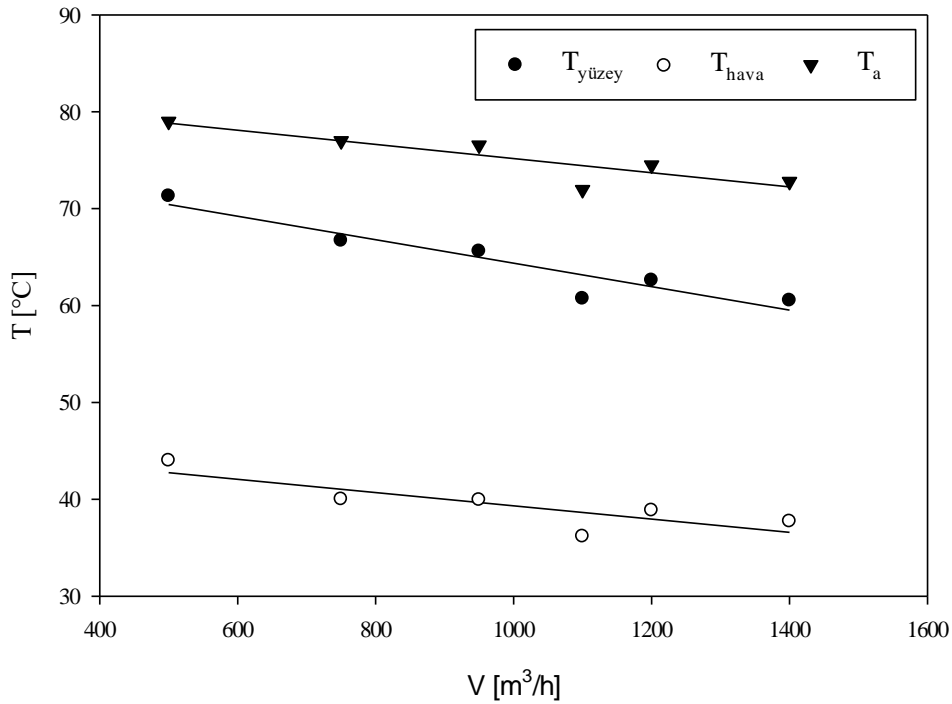
### iii. Hava debisi (Reynolds sayısı)

Çapraz akışlı bir eşanjör olan radyatöre ortam sıcaklığında giren hava, radyatör üzerinden geçtikten sonra belirli bir sıcaklığa kadar ısınır. Radyatörden havaya ısı aktarılabilmesini sağlayan mekanizma, ortalama akışkan sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki farktır. Hava radyatörden ne kadar yavaş geçerse, çıkış sıcaklığı ve dolayısıyla da ortalama sıcaklığı o kadar yüksek olacaktır. Havanın ortalama sıcaklığının artması, akışkandan havaya aktarılacak olan ısı miktarını azaltacaktır. Buna karşılık havanın radyatör üzerinden daha hızlı bir şekilde geçmesi, geçtiği yol boyunca sıcaklığının daha az artmasına böylece çıkış ve ortalama sıcaklığının daha düşük olmasına neden olur. Hava hızındaki artışın bir başka sonucu, hava tarafından taşınabilen ısı miktarını arttırmasıdır. Böylece sıcak akışkandan havaya olan ısı transferi artar ve soğutma sıvısının çıkış sıcaklığı da düşer (Junjanna vd. 2012). Bu durum radyatördeki akışkanın ortalama sıcaklığı ile havanın ortalama sıcaklığı arasındaki farkın yükselmesini ve bu sayede ısı transferinin artmasını sağlar.

Hava hızı veya debisi, sistemin toplam ısı transfer katsayısı üzerine temel / nanoakışkan debisine kıyasla çok daha fazla etki etmektedir. Bu durum açıklanan temel ısı transfer prensiplerinin yanı sıra çalışmada kullanılan radyatörün oldukça kompakt olmasından da kaynaklanmaktadır. Hava tarafında yüzey alanını arttırma amaçlı kullanılmış olan kanatçıklar, önemli oranda basınç kaybı yaratmakta ve çok düşük hava hızlarında yeterli ısı transferi sağlanamamasına neden olmaktadır. Mevcut çalışmada farklı hava hızlarının ısı transferine etkisini görebilmek ve nanoakışkanların incelenebileceği en uygun aralığı bulabilmek için 500 m<sup>3</sup>/h'den 3500 m<sup>3</sup>/h'e kadar değişen geniş bir aralıkta deneyler gerçekleştirilmiş ve ısı transferini doğrudan etkileyen bazı sıcaklık değerleri gözlemlenerek optimum sabit hava debisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla değişimi incelenen sıcaklıklar; radyatör yüzey sıcaklığı ( $T_{yüzey}$ ) ile havanın ( $T_{hava}$ ) ve akışkanın ( $T_a$ ) ortalama sıcaklık değerleridir.

Ön deneylerde kullanılan ve %0.1 oranında saf  $TiO_2$  nanopartikülü içeren nanoakışkanla sabit yassı kesitli boru içi akışkan debisinde (5.64 l/dk) ve değişken hava debilerinde (500, 750, 950, 1100, 1200, 1400 m<sup>3</sup>/h) gerçekleştirilen deneylerde ilgili sıcaklıkların değişimi Şekil 3.29'dan görülebilir. Şekil 3.29 incelendiğinde, teoride gerçekleşmesi ön görülen değişimlerin doğrulandığı belirlenmiştir. Böylece hava tarafındaki hız arttıkça; radyatörün yüzey sıcaklığının azaldığı, havanın ortalama sıcaklığının düştüğü ve hava ile akışkanın ortalama sıcaklığı arasındaki farkın açıldığı net olarak anlaşılmaktadır. Yani, hava hızındaki artışın ısı transferine birçok yönden olumlu yönde etki ettiğini söylemek mümkündür. Tüm bu değerlendirmeler ışığında, deney düzeneğinde akışkanların giriş sıcaklıkları da düşünülerek hava tarafı direnci zayıflatmak adına çalışılacak en uygun fan ayarının %70 olduğuna karar verilmiştir. İlgili fan ayarı yaklaşık olarak 3500 m<sup>3</sup>/h'lik bir hava debisi sağlamaktadır. Bu debi tüm deneyler için sabit olarak kullanılmış olup, hava tarafı Re sayısı yaklaşık 930 olarak hesaplanmıştır.





**Şekil 3.29.** Farklı hava debilerine karşılık radyatör yüzey ile ortalama hava ve akışkan sıcaklıklarının değişimi

#### iv. Temel akışkan / nanoakışkan sıcaklığı (radyatör giriş)

Nanoakışkanların sıcaklığa bağlı davranışı, literatürde üzerine en çok tartışma yaşanan konulardan bir tanesidir. Çoğu çalışma nanopartiküllerin Brownian hareketi nedeniyle yüksek sıcaklıklarda daha yüksek ısı iletkenlik göstereceği görüşünde olsa da (Ray ve Das 2014) bazı araştırmalarda sıcaklığa bağlı performans artışının, akışkanın laminer veya türbülanslı akış özelliği göstermesine bağlı olarak değişeceği iddia edilmektedir (Vajjha ve Das 2012).

Literatürde bulunan bu çelişki üzerine araştırma yapılabilmesi adına mevcut sistemde akışkanların radyatöre giriş sıcaklıkları da bir parametre olarak incelenmek istenmiştir. Ancak sağlanmak istenilen sabit giriş sıcaklığı yaklaşımının, farklı akışkan ve hava debilerinde rezistansın farklı güçte çalışmasına neden olduğu temel akışkan ile yapılan deneylerde görülmüştür (Çizelge 3.26). Isıtıcının deneyler arasında farklı güçlerde çalışması ise akışkanların aynı koşullar altında (sabit ısı güç) değerlendirilmesini imkânsız kılmaktadır. Ayrıca düşük akışkan debilerinde sağlanabilen bazı giriş sıcaklığı değerlerine yüksek akışkan debilerinde rezistans kapasitesinin yetersiz gelmesi nedeniyle ulaşılamamıştır.

Tüm bu nedenlerle deneyler arasında eşdeğer bir karşılaştırma yapılabilmesi için sabit sıcaklık yaklaşımı yerine sabit ısıtıcı gücü yaklaşımının kullanılmasının daha doğru olacağına karar verilmiştir. Sistemde bulunan depo içerisindeki 3 adet rezistans bağımsız olarak devreye alınabilmekte, bu da 3 kademeli bir ısıtıcı gücü elde edilmesine imkân vermektedir. Her kademe için elde edilen güç değerleri yaklaşık olarak şu şekildedir;

- 1. Kademe (yaklaşık 2800 W)
- 2. Kademe (yaklaşık 5600 W)
- 3. Kademe (yaklaşık 8600 W)

**Çizelge 3.26.** Değişken ısıtıcı güçlerini örnekleyen deneysel veriler

<i>Akışkan Debisi [l/dk]</i>	<i>Fan hızı [%]</i>	<i>T<sub>set</sub> [°C]</i>	<i>T<sub>giriş</sub> [°C]</i>	<i>Q<sub>ısıtıcı</sub> [W]</i>
3.32	60	60	60.4	2511
	40		60.1	5174
	20		60.7	6386
9.12	60	60	60.3	6934
	40		60.4	7865
	20		60.1	8470

#### v. Akış türü (laminer / türbülanslı)

Hava tarafında sabit fan ayarında elde edilen kanal içi hacimsel debi 3500 m<sup>3</sup>/h'dir. Bu debi hava tarafında laminer akış koşullarının oluşmasını sağlamıştır. Yassı kesitli boru tarafında ise farklı debilerde çalışılmış ancak en yüksek debide dahi benzer şekilde ancak laminer koşullara ulaşılabilmektedir. Radyatördeki boru sayısı fazla, hidrolik çaplar ise oldukça küçük olduğundan deneysel sistemde türbülanslı akış koşullarını oluşturmak oldukça zordur. Sistemden alınan sonuçların doğrulanması ile birlikte, ilerleyen çalışmalarda türbülanslı akış durumundaki performans nümerik olarak analiz edilebilir.

Temel ısı transfer prensipleri ve ön deneylerden elde edilen bulgular yardımıyla mevcut deney düzeneği için en uygun olduğu düşünülen çalışma aralıkları belirlenmiş ve bu koşullar altında biri temel akışkan olmak üzere toplamda 14 adet akışkanın performansı değerlendirilmek üzere deneyler gerçekleştirilmiştir. İlgili deneysel parametreler Çizelge 3.27'de bir arada görülebilir.

**Çizelge 3.27.** Çalışma kapsamında araştırılan deneysel parametreler

<i>Parametre</i>	<i>Hava Tarafı</i>	<i>Yassı Kesitli Boru İçi Akışkan Tarafı</i>
<i>Akışkan Debisi</i>	3500 [m <sup>3</sup> /h]	17 – 19 – 21 – 23 – 25 [l/dk]
<i>Akışkan Hızı [m/s]</i>	9.27	0.193 – 0.218 – 0.240 – 0.265 – 0.285
<i>Re Sayısı Aralığı</i>	930	370 – 830
<i>Konsantrasyon, <math>\phi_m</math> [%]</i>	-	0.3 – 0.5 – 1 – 2
<i>Isıtıcı Gücü [W]</i>	-	≈8600

### 3.2.2. Geometrik parametrelerin belirlenmesi

Otomobil radyatörleri, hava tarafında dalgalı panjur kanatçık yapısına, boru tarafında ise yassı kesitli borulara sahip çapraz akışlı ısı değiştiricileridir. Bu tip ısı değiştiricilerin oldukça karmaşık olan geometrisi için, ısı transfer hesaplarında kullanılmak üzere başlıca geometrik karakteristiklerin belirlenmesi gerekmektedir. İlgili karakteristikler hava ve boru tarafı için ayrı ayrı incelenmiştir. Geometrik karakteristikler belirlenirken hava tarafı değerlerde “h” alt indisi kullanılmış, yassı kesitli boru tarafı için ise kolaylık olması açısından yalnızca “a” alt indisinin kullanılması tercih edilmiştir.

#### *i. Hava tarafı*

Tez çalışması kapsamında kullanılan radyatörün hava tarafı geometrisinin belirlenmesinde Shah ve Sekulic (2003)’in önerdiği yöntemin kullanılması tercih edilmiştir. Dalgalı tip kanatçıklarda, kanatçıkların birincil yüzeye lehimlenmesi esnasında uygulanan basınca ve yüzeyler arasında oluşan lehim dolguların miktarına bağlı olarak geometrik özelliklerde birçok farklılıklar oluşabilmektedir. Ancak bu olası farklılıkların araştırılması oldukça geniş bir konu olup, tüm geometrik konfigürasyonlar için çözüm üretilmemiştir. Önerilen yöntemde tek bir birim hücrenin basit, idealleştirilmiş geometrisinden faydalanılmıştır. Bu geometride birim hücre için lehim dolguları ve kanatçıklar üzerindeki panjur yapısından kaynaklanan yüzey alanı ihmal edilmiştir. Shah ve Sekulic (2003)’e göre yapılan bu ihmal standart bir endüstriyel uygulamadır ve yüksek kanatçık yoğunluğuna sahip ince kanatçıklara sahip radyatörlerde bu alan, toplam kanatçık yüzey alanının %2’den daha az bir kısmını oluşturmaktadır.

Yöntemin temel prensibi, tüm geometrik karakteristiklerin tanımlanan birim hücre için hesaplanması, daha sonra incelenen radyatördeki kanatçık veya birim hücre sayısına göre toplam miktarların belirlenmesidir. İlgili birim hücre daha önce Şekil 3.16’da tanımlandığı gibidir ve birim hücreye ait tüm geometrik karakteristikler (\*) üst indisi ile ifade edilmiştir. Bu kısımda verilen eşitliklerin tamamı hava tarafı için tanımlanmıştır;

Birincil (boru) yüzey alanı:

$$A_{y,b}^* = 2 D_b (p_k - s_k) + 2 p_k H_b \quad (3.4)$$

Kanatçık yüzey alanı:

$$A_{y,k}^* = 2 D_k \left[ (H_k^2 + p_k^2)^{1/2} - s_k \right] \quad (3.5)$$

Toplam ısı transfer yüzey alanı:

$$A_y^* = A_{y,b} + A_{y,k} \quad (3.6)$$

Serbest akış alanı:

$$A_{sa}^* = p_k H_k - s_k \left[ (H_k^2 + p_k^2)^{1/2} - s_k \right] \quad (3.7)$$

Ön yüzey alanı:

$$A_{ön}^* = p_k (H_k + H_b) \quad (3.8)$$

Serbest akış alanının ön yüzey alanına oranı:

$$\sigma_h = \frac{A_{sa}^*}{A_{ön}^*} \quad (3.9)$$

Hava tarafı hidrolik çap:

$$D_{h,h}^* = \frac{4 A_{sa}^* D_k}{A_y^*} \quad (3.10)$$

Birim hücrenin hacmi:

$$V^* = p_k p_b D_k \quad (3.11)$$

Yüzey alanı yoğunluğu:

$$\beta = \frac{A_y^*}{V^*} \quad (3.12)$$

Her bir birim hücrenin duvar iletim alanı:

$$A_{duvar}^* = D_b L_b \quad (3.13)$$

Yukarıda birim hücre için hesaplaması verilen değerlerden  $\sigma$ ,  $D_{h,h}^*$  ve  $\beta$ , radyatörün tamamı için de aynı olacaktır. Diğer değerler için ise toplam kanatçık veya birim hücre sayısının ( $n_k$ ) bilinmesi gereklidir. Bu değer çalışma kapsamında kullanılan radyatör için toplam 14792 (*bir sırada 344 kanatçık x 43 sıra*) adettir. Toplam kanatçık sayısı kullanılarak radyatörün tamamı için geçerli olan geometrik karakteristikleri hesaplamak mümkündür. Yalnızca toplam duvar iletim alanı bulunurken toplam boru sayısı kullanılır. İlgili hesaplamalar aşağıda verildiği gibidir:

$$A_{y,b} = n_k A_{y,b}^* \quad (3.14)$$

$$A_{y,k} = n_k A_{y,k}^* \quad (3.15)$$

$$A_{y,h} = n_k A_y^* \quad (3.16)$$

$$A_{sa,h} = n_k A_{sa}^* \quad (3.17)$$

$$A_{ön,h} = n_k A_{ön}^* \quad (3.18)$$

$$A_{duvar,h} = n_b A_{duvar}^* \quad (3.19)$$

Radyatörün toplam hacmi ise klasik olarak bulunabilir:

$$V_r = H_r L_r D_r \quad (3.20)$$

Isıl hesaplamalar için önemli bir ifade toplam ısı transfer yüzey alanının toplam ısı değiştirici hacmine oranıdır ve hava tarafı için şu şekilde yazılabilir:

$$\alpha_h = \frac{\beta H_k}{H_k + H_b + 2s_b} \quad (3.21)$$

Radyatörün hava tarafı geometrik karakteristiklerinde alan ve hacim hesaplamaları dışında bir diğer önemli özellik ise, kanatçık verimlerinin bulunmasında kullanılan boyutlardır. Panjurlu kanatçık tipine sahip radyatörlerde birincil yüzey alanının her iki tarafında da üniform ısı akışı olduğu ve iki boru arasındaki mesafenin tam orta noktasında adyabatik bir düzlem oluştuğu kabul edilmektedir. Buna göre kanatçık iletim uzunluğu;

$$l_{k,i} = \frac{1}{2} (H_k^2 + p_k^2)^{1/2} - s_k \quad (3.22)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Kanatçık verimi için gerekli olan bir diğer ifade olan  $ml_{k,i}$  ise aşağıda verilen eşitlik yardımıyla bulunabilir;

$$ml_{k,i} = \left[ \frac{2 h_n}{k_k s_k} \left( 1 + \frac{s_k}{D_k} \right) \right]^{1/2} \left[ \frac{1}{2} (H_k^2 + p_k^2)^{1/2} - s_k \right] \quad (3.23)$$

### *ii. Yassı kesitli boru içi akışkan tarafı*

Radyatörün yassı kesitli boru içi akışkan tarafı geometrisine ait hesaplamalar Kays ve London (1984)'dan alınmıştır. Radyatörün boru girişleri düşünüldüğünde bu kısımda yalnızca boruların bulunduğu ve hava tarafındaki gibi ayrıca bir kanatçık geometrisinin olmadığı görülmektedir. Kays ve London (1984)'ün literatüre kazandırmış olduğu yöntemde bir birim hücre tanımlaması yoktur ve gerekli hesaplamalar doğrudan geometrinin tamamı için yapılmaktadır. İlgili çalışmaya göre yassı kesitli boru içi akışkan tarafı geometrik karakteristikler aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla bulunabilir. İlgili eşitliklerde yassı kesitli boru içi akışkana ait geometrik karakteristikler sadelik açısından "a" alt indisi ile gösterilmiştir.

Toplam ısı transfer yüzey alanı:

$$A_{y,a} = n_b L_r [2 (D_b - H_b) + \pi H_b] \quad (3.24)$$

Serbest akış alanı:

$$A_{sa,a} = n_b \left[ (D_b - H_b) H_b + \frac{\pi}{4} H_b^2 \right] \quad (3.25)$$

Ön yüzey alanı:

$$A_{\text{ön},a} = H_r D_r \quad (3.26)$$

Serbest akış alanının ön yüzey alanına oranı:

$$\sigma_a = \frac{A_{sa,a}}{A_{\text{ön},a}} \quad (3.27)$$

Yassı kesitli boru içi akışkan tarafı hidrolik çap:

$$D_{h,a} = \frac{4 \left[ (D_b - H_b) H_b + \frac{\pi}{4} H_b^2 \right]}{2 (D_b - H_b) + \pi H_b} \quad (3.28)$$

Isı transfer yüzey alanının toplam ısı değiştirici hacmine oranı akışkan tarafı için:

$$\alpha_a = \frac{A_{y,a}}{V_r} \quad (3.29)$$

Her iki akışkan tarafı için de detaylı olarak açıklanan hesaplama yöntemlerine göre belirlenen geometrik karakteristikler, hava ve boru tarafı için Çizelge 3.28'de sunulmuştur. İlgili değerler ısı transfer hesaplarında kullanılmıştır.

### 3.2.3. Isı transfer analizi

Nanoakışkanların otomobil radyatöründeki ısı transfer performanslarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen tez çalışmasında ısı analizler 3 aşamada gerçekleştirilmiştir;

1. İlk önce, kurulmuş olan deney düzeneğinden alınan verilerin doğruluğunun ve güvenilirliğinin tespiti amacıyla termofiziksel özellikleri ve ısı transfer davranışı kesin olarak bilinen saf su ile testler gerçekleştirilmiştir.
2. İkinci aşamada deneysel verilerin analizi yapılmıştır. Isı transfer analizi için önemli parametreler olan hava ve akışkan tarafı taşınım ve toplam ısı transfer katsayıları belirlenmiş, sistemde meydana gelen basınç kayıpları tespit edilerek akışkanların performans faktörleri ve kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Bu aşamada uygulamada karşılaşılan problemlerin tespiti de gerçekleştirilmiştir.

3. Üçüncü aşamada ise akışkanların teorik analizleri gerçekleştirilmiştir. Benzer ısı transfer parametreleri bu kez teorik ifadeler ile hesaplanarak temel akışkana göre performans kıyaslaması yapılmıştır. Bu tip bir analiz yapılmasındaki amaç, uygulamada var olan problemlerin çözüldüğü ve ortadan kaldırıldığı bir senaryoda akışkanların teorik maksimum potansiyellerini araştırabilmektir. Böylelikle ilerleyen çalışmalarda geliştirilmek üzere optimum akışkan seçimi yapmak mümkün olabilecektir.

**Çizelge 3.28.** Hesaplamalardan elde edilen geometrik karakteristikler

<i>Büyüklik</i>	<i>Birim</i>	<i>Simge</i>	<i>Hava tarafı</i>	<i>Yassı boru tarafı</i>
Birincil (boru) yüzey alanı	$m^2$	$A_{y,b}$	0.544	-
Kanatçık yüzey alanı	$m^2$	$A_{y,k}$	4.120	-
Toplam ısı transfer yüzey alanı	$m^2$	$A_y$	4.664	0.611
Serbest akış alanı	$m^2$	$A_{sa}$	0.102	$1.476 \times 10^{-3}$
Ön yüzey alanı	$m^2$	$A_{ön}$	0.141	$7.567 \times 10^{-3}$
Duvar iletim alanı	$m^2$	$A_{duvar}$	0.287	-
Hidrolik çap	$m$	$D_h$	$1.613 \times 10^{-3}$	0.0037
Radyatörün toplam hacmi	$m^3$	$V_r$		$2.875 \times 10^{-3}$
Hava kanalının alanı	$m^2$	$A_{kanal}$		0.1596
Toplam ısı transfer yüzey alanının toplam radyatör hacmine oranı	$m^2/m^3$	$\alpha$	1354	213
Yüzey alanı yoğunluğu	$m^2/m^3$	$\beta$	1784	-
Serbest akış alanının ön yüzey alanına oranı	$m^2$	$\sigma$	0.720	0.194

### 3.2.3.1. Verilerin doğruluğunun ve güvenilirliğinin araştırılması

Verilerin doğruluğunun ve güvenilirliğinin araştırılabilmesi için, çalışma kapsamında araştırılan parametrelere uygun olarak saf su ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçların analizi ise yine tez çalışmasında kullanılmasına karar verilen analiz yöntemi ile yapılmıştır. İlgili metot ile analiz edilen verilerden elde edilen taşınım katsayıları, literatürde önerilen çeşitli eşitliklerden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu kısımda ilk önce deneysel hesaplama metodu açıklanacak, daha sonra kullanılan eşitliklerden bahsedilecektir.



Hava tarafı toplam ısı transfer yüzey alanı ( $A_{y,h}$ ) temel alınarak hesaplanan toplam ısı transfer katsayısı aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir;

$$\dot{Q}_a = U_{dış} A_{y,h} \Delta T_{ln} F \quad (3.30)$$

Bu ifadede  $\dot{Q}_a$ , radyatörde dolaşan akışkandan havaya aktarılan ısı miktarıdır. Eşitlikteki  $F$ , daha önceki kısımlarda da açıklandığı üzere düzeltme faktörünü belirtir. Mevcut sistemde kullanılan ve her iki tarafta da akışkanın karışmadığı çapraz akışlı bir ısı değiştiricisinde bu değer, deneysel şartlar altında yaklaşık olarak 1 değerini almaktadır. İlgili değere, Bowman diyagramları arasından mevcut geometriye uygun olarak verilmiş diyagram yardımıyla ulaşılmıştır (Incropera vd. 2011)  $\dot{Q}_a$ , duyulur ısı geçişi ifadesi ise şu şekilde hesaplanabilir;

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,g} - T_{a,ç}) \quad (3.31)$$

Toplam ısı transfer katsayısı hesabında akışkan tarafı ısı geçiş miktarının kullanılmasının nedeni, kayıpların da dikkate alındığı minimum ve sabit ısı aktarımı durumunda oluşabilecek deneysel koşullar ile hesapları gerçekleştirmektir. İlgili ifadede ihtiyaç duyulan  $\dot{m}_a$ , akışkanın kütleli debisini ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\dot{m}_a = \dot{V}_a \rho_a \quad (3.32)$$

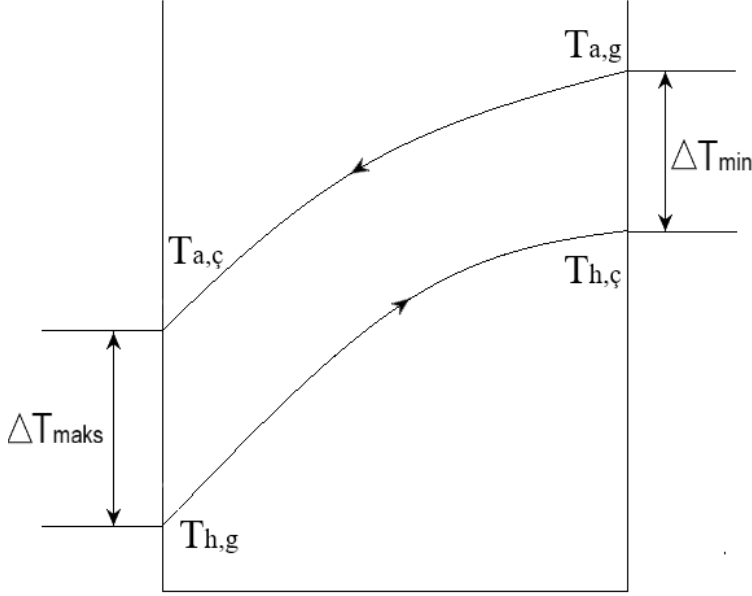
Burada  $\dot{V}_a$  ilgili deney setindeki hacimsel debi,  $\rho_a$  ise akışkanın o deney koşullarındaki yoğunluğudur. Eşitlik (3.30) ile verilen ifadede  $\Delta T_{ln}$ , hava ve yassı kesitli boru içindeki akışkan arasındaki logaritmik ortalama sıcaklık farkıdır ve Şekil 3.30'da şematik olarak  $\Delta T_{ln}$  için gerekli sıcaklıkların oluşumu gösterilmiştir.  $\Delta T_{ln}$  hesabında sıcaklık farklarından hangisinin maksimum ve minimum olduğu belirlenir ve hesaplamalar buna göre yapılır;

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{maks} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{maks}}{\Delta T_{min}}} \quad (3.33)$$

Toplam ısı transfer katsayısının hesaplanmasının ardından hava tarafı için uygun Nu ifadesi kullanılarak hava tarafı taşınım katsayısı belirlenir. Mevcut çalışma kapsamında hava tarafı taşınım katsayısı hesabında kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir (Vithayasai vd. 2006);

$$Nu = [10.145 \ln(Re_h - 46.081)] Pr_h^{0.33} \quad (3.34)$$

$$100 \leq Re_h \leq 600$$



Şekil 3.30. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı ifadesinin şematik gösterimi

Havanın Pr sayısı hava için bilinen termofiziksel özellik tabloları kullanılarak belirlenebilir. Re sayısı hesabı ise radyatörün hava tarafı serbest akış alanı ( $A_{sa,h}$ ) kullanılarak hava tarafındaki maksimum hızın tespiti yoluyla yapılmaktadır. Bu amaçla ilk önce hava kanalı içerisindeki hacimsel debi belirlenir ve bu debi serbest akış alanına bölünerek maksimum hız hesaplanır. İlgili denklemler şu şekildedir;

$$\dot{V}_{kanal} = u_{kanal} A_{kanal} \quad (3.35)$$

Bu ifadede  $u_{kanal}$  [m/s] biriminden hava hızıdır ve daha önce teknik özellikleri verilen kızgın tel hava hızı ölçüm probu yardımıyla kanalın merkez noktasından yapılan ölçüm ile tespit edilir. Kanalın kesit alanı kullanılarak kanal içerisindeki hacimsel debinin belirlenmesi ile birlikte radyatördeki maksimum hava hızı bulunabilir;

$$u_{maks,h} = \frac{\dot{V}_{kanal}}{A_{sa,h}} \quad (3.36)$$

Böylece radyatördeki maksimum hava hızı kullanılarak hava tarafı  $Re$  sayısını hesaplamak mümkündür;

$$Re_h = \frac{u_{maks,h} D_{h,h}}{\nu_h} \quad (3.37)$$

Eşitlik (3.37) ile verilen ifadede  $\nu_h$ , havanın ilgili sıcaklıktaki kinematik viskozite değeridir.

Bilindiği üzere boyutsuz  $Nu$  sayısı aynı zamanda taşınımın iletme oranı olarak da ifade edilir ve matematiksel olarak şu şekilde tanımlanabilir;

$$Nu = \frac{h D}{k} \quad (3.38)$$

Yukarıdaki ifade  $Nu$  sayısı için genel ifadedir ve hesaplama yapılan geometriye göre karakteristik uzunluk ( $D$ ) değişim gösterebilir. Mevcut çalışmada hava tarafı taşınım katsayısının hesaplanabilmesi için ilgili ifadede karakteristik uzunluk yerine hava tarafı hidrolik çap ( $D_{h,h}$ ) yazılmalı ve uygun sıcaklıkta havanın ısı iletim katsayısı ( $k$ ) kullanılmalıdır. Böylece hava tarafı taşınım katsayısı,  $h_h$  bulunabilir.

Daha önce genel tanımı yapılan toplam ısı transfer katsayısı mevcut sistem için dirençler yardımıyla ifade edilmek istenirse (Kays ve London, 1984);

$$\frac{1}{U_{dış}} = \frac{1}{\eta_o h_h} + \frac{1}{(\alpha_a/\alpha_h) h_a} \quad (3.39)$$

şeklinde yazılabilir. İlgili ifadede duvarın iletim direnci cidarın çok ince ve cidar malzemesinin iletim katsayısının çok yüksek olmasından dolayı ihmal edilmiştir. Ayrıca kirlilik dirençleri de dikkate alınmamıştır.

Denklemden  $\eta_o$ , ile ifade edilen değer toplam yüzey verimidir ve tek bir kanatçığın verimi ( $\eta_k$ ) kullanılarak analizi yapılan sistem için aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$\eta_o = 1 - \frac{A_{y,k}}{A_{y,h}} (1 - \eta_k) \quad (3.40)$$

Bir kanatçığın verimi ise daha önce geometrik karakteristiklerin açıklandığı bölümde kanatçık verimlerinin hesaplanmasında kullanılan çeşitli ifadelerden yararlanılarak (Eşitlik (3.22) ve (3.23)) bulunabilir;

$$\eta_k = \frac{\tanh(ml_{k,i})}{ml_{k,i}} \quad (3.41)$$

Eşitlik (3.30) yardımıyla hesaplanan  $U_{dış}$ , (3.34) ile elde edilen  $h_h$  ve verim ifadelerinin yardımıyla akışkan tarafı *deneysel taşınım katsayısı* ( $h_a$ ) belirlenmiş olur.

Deneysel taşınım katsayısının karşılaştırmasının yapılacağı teorik değerlerin hesaplanabilmesi için sisteme ait bazı şartların öncelikli olarak belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü bu şartlar akışkan tarafı için kullanılacak Nu ifadelerinin seçiminde kullanılacaktır. Burada ilk adım deney şartlarına ve radyatör geometrisine bağlı olarak akışın borular içerisinde hidrodinamik ve ısı olarak gelişip gelişmediğinin tespitidir. Bunun için de hidrodinamik ve ısı giriş uzunluklarının tanımlanması gereklidir. Daha önce genel ifade olarak verilen hidrodinamik giriş uzunluğu, problem geometrisi için şu şekilde tanımlanabilir;

$$X_H = 0.05 Re_a D_{h,a} \quad (3.42)$$

Isıl giriş uzunluğu da benzer şekilde mevcut geometriye uygun olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$X_T = 0.05 Re_a Pr_a D_{h,a} \quad (3.43)$$

Hem giriş uzunluklarının hesabında hem de korelasyonlarda kullanılacak olan akışkan tarafı boyutsuz sayılar daha önce hava tarafı için tanımlanan ifadeler ile oldukça benzerdir;

$$Re_a = \frac{u_{maks,a} D_{h,a}}{\nu_a} \quad (3.44)$$

Yalnızca burada kullanılan maksimum hız, hidrolik çap ve kinematik viskozite ifadelerinin tamamı akışkan tarafı için hesaplanan değerleri ifade etmektedir. Akışkan tarafındaki maksimum hızın bulunması için şu eşitlik kullanılmıştır;

$$u_{maks,a} = \frac{\dot{m}_a}{A_{sa,a} \rho_a} = \frac{\dot{V}_a}{A_{sa,a}} \quad (3.45)$$

Bu ifadede  $A_{sa,a}$  ile verilen akışkan tarafı serbest akış alanı, aynı zamanda akışkan tarafındaki minimum kesit alanını ifade etmektedir. Saf su ile yapılan deneyler için Pr sayıları ise literatürdeki doymuş su tablolarından belirlenebilir.

Mevcut tez çalışması kapsamında deneysel parametrelerin belirlenmesi kısmında da açıklandığı üzere tüm deney şartlarında laminar akış koşullarında çalışılmıştır. Bu nedenle literatürde önerilen eşitliklerden de yalnızca laminar akış koşullarına uygun olanlara yer verilmiş türbülanslı koşullar için olan eşitlikler değerlendirmeye alınmamıştır.

Değerlendirmeye alınmak üzere tercih edilen ilk eşitlik, kullanılan sistemdeki deneysel çalışma koşulları ile uyumlu olarak sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı ve laminar akış koşulları için Sieder ve Tate, (1936) tarafından önerilen korelasyondur;

$$\overline{Nu} = 1.86 \left( \frac{Re_a Pr_a D_{h,a}}{L_b} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_{ort}}{\mu_y} \right)^{0.14}$$

$$0.48 \leq Pr_a \leq 16700$$

$$0.0044 \leq \left( \frac{\mu_{ort}}{\mu_y} \right) \leq 9.75$$

$$\left( \frac{Re_a Pr_a}{L_b D_{h,a}} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_{ort}}{\mu_y} \right)^{0.14} \geq 2$$
(3.46)

Burada  $\mu_{ort}$ , ortalama akışkan sıcaklığındaki,  $\mu_y$  ise ortalama yüzey sıcaklığındaki dinamik viskozite değerleridir. Eşitlik dairesel kesitli borularda hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan akış durumu için geliştirilmiştir.

Bir diğer eşitlik Dehghandokht vd. (2011) tarafından literatüre kazandırılmış ve araştırmacılar çalışmalarını su ve etilen glikol – su karışımları ile yassı kesitli bir boruda gelişmekte olan akış koşulları için gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan eşitlik ve kullanım şartları şu şekildedir;

$$\overline{Nu} = 0.951 (Re_a)^{0.173} (Pr_a)^{1/3}$$
(3.47)

$$550 \leq Re_a \leq 1850$$

Su ile yapılan hesaplamalarda kullanılmak üzere seçilen üçüncü ve son eşitlik literatürde Hausen korelasyonu olarak bilinir (Özışık 1977);

$$\overline{Nu} = 3.66 + \frac{0.19 (Re_a Pr_a D_{h,a})^{0.8}}{1 + 0.117 (Re_a Pr_a D_{h,a})^{0.467}}$$
(3.48)

İlgili eşitlik literatürde “Graetz problemi” olarak bilinen ve sabit yüzey sıcaklığına sahip dairesel kesitli borularda tam gelişmiş hız profiline sahip laminer akış için ısı giriş bölgesini temsil eden durum için geliştirilmiştir. Özışık (1977)’nin de belirttiği üzere bu eşitlik özellikle ısı giriş bölgesinin uzun olduğu durumlar için iyi sonuçlar vermektedir. Saf su ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerin analizi sonucu hesaplanan deneysel taşınım katsayıları ile ilgili Nu eşitlikleri yardımıyla hesaplanan teorik taşınım katsayılarının karşılaştırılması ile verilerin doğruluk ve güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. İlgili sonuçlar bulgular bölümünde sunulmuştur.

### 3.2.3.2. Deneysel analiz

İkinci aşama olarak gerçekleştirilen deneysel analizde, bir önceki bölümde toplam ısı transfer katsayısı, hava ve akışkan tarafı taşınım katsayılarının hesabı için açıklanan yöntem kullanılmıştır. Ancak bu kısımda ilk bölümden farklı olarak deneysel analizler saf su için değil, çalışma kapsamında deneylerin gerçekleştirildiği akışkanlar olan temel akışkan ve 13 adet nanoakışkan için gerçekleştirilmiştir.

Burada bir diğer önemli ayırt edici nokta, saf su için kullanılabilen literatürdeki tablo değerlerinin artık kullanılamıyor oluşudur. Materyal bölümünde açıklanan termofiziksel özellikler kullanılarak akışkanların  $Re_a$  ve  $Pr_a$  değerleri belirlenmelidir. Akışkanların  $Pr_a$  sayılarının belirlenmesinde aşağıda verilen ifadeden yararlanılabilir;

$$Pr_a = \frac{\mu_a c_{p,a}}{k_a} \quad (3.49)$$

Deneysel analizlerde ısı transfer katsayılarına ek olarak sistemde meydana gelen basınç kayıpları da tespit edilerek akışkanların performans faktörleri ve kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Deney düzeneği üzerinde hem radyatörün hem de pompanın giriş ve çıkışına daha önce detaylı bilgileri sunulan basınç transmitterleri yerleştirilmiş ve basınç kayıpları tespit edilmiştir. Basınç kayıpları analizinden elde edilen verilerden hem akışkanların karşılaştırılmasında hem de performans analizinde yararlanılmıştır.

Isı transferi ve basınç kayıpları analizleri sistemin performansındaki değişimin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için bir arada düşünülmelidir. Bu nedenle bu iki kriteri de içeren performans analizi gerçekleştirilmiştir. Performans analizi için tanımlanan verim ifadesi (performans katsayısı) şu şekildedir (Razi ve Saedinia 2011);

$$\eta = \frac{h_{na}/h_{ta}}{\Delta P_{na}/\Delta P_{ta}} \quad (3.50)$$

Bu ifadenin sonucunda elde edilen değerlerde  $\eta > 1$  olması durumunda ısı transferindeki iyileştirmenin, basınç kayıpları artışını yendiği ve değişikliğin faydalı olduğu yorumu yapılabilir.

### 3.2.3.3. Belirsizlik analizi

Deneysel analizin en önemli aşamalarından bir tanesi de uygulamada karşılaşılan problemlerin tespitidir. Deneylerde karşılaşılan uygulama güçlükleri, çeşitli problemler ve akışkanların ürüne dönüşmesi yönündeki engeller deneylerden elde edilen sonuçların yorumlanması yoluyla belirlenmeye çalışılmıştır. Bu noktada deneysel analizlerden elde edilen sonuçların sağlıklı bir şekilde yorumlanabilmesi ve bilimsel çalışmaların güvenilirliği için deneylerden elde edilen verilerin belirsizlik analizinin gerçekleştirilmesi gereklidir. Genellikle ölçüm ekipmanlarının hassasiyetlerinin yüksek olması durumunda deney sonuçlarının doğrudan güvenilir olabileceği gibi bir algı olsa da en hassas sistemlerde dahi çeşitli hatalar oluşabilmekte ve gerçek değerlerin tespitine engel olabilmektedir. Deneylerde karşılaşılabilen hatalar genel olarak üç grupta toplanabilir;

- *Birinci grup*; dikkatsizlik ve tecrübesizlikten kaynaklanan hataları içerir ve ölçme cihazlarının yanlış seçimi ile ölçme sistemlerinin yanlış dizaynından kaynaklanan hatalar bu grupta değerlendirilir.
- *İkinci grup*; sabit veya sistematik olarak adlandırılan hatalardır. Bunlar genel olarak tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla bilinmeyen hatalardır.
- *Üçüncü grup*; bu grup hatalar ise genellikle rastgele hatalardan oluşur. Deneyi yapan elemanın değişmesinden, dikkatinin zamanla azalmasından, elektrik gerilimindeki değişimlerden veya cihazların ısınması gibi nedenlerden kaynaklanabilir.

Pratikte özellikle sistematik hatalar için bazı teorik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller temel olarak deneysel ölçümlerden elde edilen belirsizlikleri (akışkan debisi, sıcaklıklar, hava hızları, basınç kayıpları gibi.), nihai olarak ulaşılmak istenen parametrelere (ısı transfer miktarı, Re ve/veya Nu sayıları, taşınım katsayıları gibi) dahil ederek bu parametrelerdeki hataları tespit etmeyi hedefler (Kline ve McClintock 1953; Moffat 1988; Holman 1994). Çünkü sonuçların genellikle doğrudan ölçüm ile elde edilmesi mümkün olmamaktadır ve sonuç parametreleri birden fazla farklı ölçüme ve parametreye bağlı olarak oluşur. Bu nedenle de birbirinden bağımsız şekilde fonksiyonda yer alan değişkenler sistem üzerinde ayrı belirsizlikler oluştururlar. Bu belirsizliğin tahmin edilmesi için denklem içerisinde bulunan her bir bağımsız değişkenden kaynaklanan hatanın hesaplanıp sonuç fonksiyonuna taşınması gerekir (Dieck vd. 2005). Bu amaca uygun olarak Holman (1994)'ün önerdiği metoda göre  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  bağımsız değişkenlerine bağlı bir  $R$  fonksiyonu tanımlansın;

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.51)$$

Farklı bağımsız değişkenlere bağlı olarak ortaya çıkan  $W_R$  belirsizliği aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir;

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.52)$$

Açıklanan metoda göre öncelikle giriş parametreleri olan deneysel ölçümlerdeki belirsizlikler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla hem mevcut deney düzeneği üzerinde kullanılan ölçüm elemanlarının hata oranları hesaplanmış, hem de akışkanların termofiziksel özelliklerinin ölçümü süreçlerinde kullanılan cihaz ve yöntemlerden kaynaklanan hatalar dikkate alınmıştır. Daha sonra ısı transfer hesaplamaları ve sistemin performans analizleri için önem arz eden çeşitli sonuç parametrelerinin belirsizliği değerlendirilmiştir. Dikkate alınan sonuç parametreleri; akışkanların transfer ettikleri ısı miktarları, Re sayıları, Nu sayıları ve basınç düşüşü miktarları olmuştur. Deneysel ölçümlerde tespit edilen hatalar çeşitli hata kaynaklarına göre gruplandırılarak Çizelge 3.29'da sunulmuştur. Isı transfer ve performans hesaplarında önemli olan çeşitli sonuç parametreleri için elde edilen belirsizlik miktarları ise temel akışkan ve nanoakışkanlar için ayrı ayrı olmak üzere Çizelge 3.30'dan görülebilir.

**Çizelge 3.29.** Deneysel ölçümlerden elde edilen belirsizlik değerleri

<i>Hata kaynağı</i>	<i>Hata miktarı [%]</i>
<b>Fiziksel özellik ölçümleri</b>	
Yoğunluk	± 0.022
Viskozite	± 0.99
Özgül ısı	± 2
Isıl iletkenlik	± 2
<b>Sıcaklık ölçümleri</b>	
Hava giriş ( $T_{h,g}$ )	± 1.47
Hava çıkış ( $T_{h,ç}$ )	± 1.06
Radyatör giriş ( $T_{a,g}$ )	± 0.76
Radyatör çıkış ( $T_{a,ç}$ )	± 0.88
Radyatör yüzey ( $T_y$ )	± 2.82
Depo ( $T_d$ )	± 0.76
<b>Debi ölçümü</b>	
Hacimsel debi	± 5.38
<b>Basınç ölçümü</b>	
Pompa giriş ve çıkışı	± 1.80
Radyatör giriş ve çıkışı	± 1.80
<b>Hız ölçümü</b>	
Hava hızı	± 3.38



Belirsizlik analizinin sonuçları ölçüm elemanları açısından değerlendirildiğinde, en yüksek belirsizliğin %5.38 ile debi ölçümünden kaynaklandığı görülmektedir. Ancak debi ölçümü bu tip sistemlerde literatürdeki çalışmalarda da genellikle en çok problemin yaşandığı eleman olmuştur (Peyghambarzadeh vd. 2011; Nieh vd. 2014; Subhedar vd. 2017). Sıcaklık ölçümlerinde ise dikkati çeken hata, yüzey sıcaklığı ölçümündedir. Sonuç parametrelerinde ise debi ölçümünde yaşanan belirsizliklerden doğrudan etkilenen  $Re$  sayısı ile ısı transfer miktarlarının hesabında bir miktar hata oluşmuştur. Basınç kayıpları ise yalnızca basınç transmitterlerinin hassasiyeti ve analog – dijital sinyal dönüşümü esnasında gerçekleşen kayıplardan etkilendiği için daha hassastır. Nu sayılarındaki belirsizlikler analiz için seçilen ifadelerden elde edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasında oluşan farklar üzerinden verilmiştir.

**Çizelge 3.30.** Sonuç parametreleri için hesaplanan belirsizlik değerleri

<i>Sonuç parametresi</i>	<i>Belirsizlik</i>
$Q_{ta}$	%10.04
$Q_{na}$	%10.21
$Re_{ta}$	%5.47
$Re_{na}$	%5.47
$Nu_{ta}$	%6.02
$Nu_{na}$	%13.43

### 3.2.3.4. Teorik analiz (Potansiyel araştırması)

Nanoakışkanların potansiyellerini en sağlıklı şekilde ortaya koyan boyutsuz sayılardan bir tanesi Mouromtseff sayısıdır ( $Mo$ ). Bu sayı, ısı transfer akışkanları için bir başarı ölçütüdür ve en genel formda aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$Mo = \frac{k^a \rho^b c_p^d}{\mu^e} \quad (3.53)$$

Bu denklemdeki  $a, b, d$  ve  $e$  katsayıları, incelenen ısı transfer koşullarına ve kullanılan denkleme göre değişmektedir. Mevcut tez çalışması kapsamında olduğu gibi eğer temel akışkana göre yapılan kıyaslama sabit akışkan debisine karşılık gerçekleştiriliyorsa, Yu vd. (2010)'un önerdiği üzere  $Mo$  sayısı aşağıdaki formu alır;

$$Mo = \left( \frac{h_{na}}{h_{ta}} \right)_{\dot{V}} = \left( \frac{\rho_{na}}{\rho_{ta}} \right)^{4/5} \left( \frac{c_{p,na}}{c_{p,ta}} \right)^{2/5} \left( \frac{\mu_{na}}{\mu_{ta}} \right)^{-2/5} \left( \frac{k_{na}}{k_{ta}} \right)^{3/5} \quad (3.54)$$

Bu hesaplamayı akışkanların yalnızca termofiziksel özelliklerini belirleyerek yapmak mümkündür ve 1'in üzerinde çıkan sonuçlar henüz teori aşamasında akışkanların ön potansiyellerinin belirlenmesine olanak sağlar. Bu nedenle teorik analizin ilk aşamasında akışkanlar Mo sayısına göre değerlendirilmiştir.

Teorik analizin ikinci aşamasında ise literatürde önerilen eşitliklerden hangisinin kullanılacağına karar verebilmek için, saf su deneylerinde izlenen metoda benzer şekilde temel akışkan ve bir adet nanoakışkan için (NA13) deneysel taşınım katsayılarının hesabı gerçekleştirilmiş, elde edilen değerler literatürde önerilen eşitlikler ile karşılaştırılarak uygun korelasyonlar belirlenmiştir. Bu noktada temel akışkan, su ile yakın özellikler göstermesi ve Nu sayısının bağlı olduğu parametreler açısından değişkenlik göstermemesi açısından daha önce su için önerilen denklemler ile incelenebilmektedir. Bu nedenle temel akışkan için farklı Nu ifadeleri önerilmemiş, hesaplamalarda daha önce saf su için verilen eşitliklerden yararlanılmıştır.

Nanoakışkanlar için ise durum bilinen klasik yaklaşımlardan biraz farklıdır. Nanoakışkanlar için Nu ifadeleri, klasik ısı transfer akışkanlarından farklı olarak karakteristik uzunluk, Re sayısı ve Pr sayılarına ek olarak bazı farklı değişkenlere de bağlıdır. Bu nedenle nanoakışkanlar için kullanılacak Nu ifadelerinin de bu akışkanlar ile yapılan sayısal veya deneysel çalışmalar sonucu geliştirilen özel denklemler olması gerekmektedir. Bu değişkenler şu şekilde sıralanabilir (Xuan ve Roetzel 2000);

- Hem temel akışkan hem de nanopartiküllerin ısı iletkenliği,
- Partikül konsantrasyonu,
- Partiküllerin boyut ve şekil özellikleri.

Nanoakışkanlar için özel olarak geliştirilen bu denklemlerin bazılarında nanoakışkanın hacimsel konsantrasyonu ve bunun taşınım katsayıları üzerine olan etkisi de dikkate alınmıştır. Nanoakışkanlar kütlece yüzdelik oranlarda hazırlandığından, öncelikle bu değerlerin hacimsel konsantrasyon karşılığının hesaplanması gerekmektedir. Nanoakışkanların konsantrasyon miktarları belirlenirken izlenen adımlar şu şekildedir;

- İlk önce hazırlanmak istenen konsantrasyon oranına göre ihtiyaç duyulan katı miktarı kütlece belirlenir ( $m_{katı}$ ).
- Daha sonra sistemde kullanılmasına karar verilmiş olan 11 litre temel akışkanın kütlece miktarı hesaplanır.
- Bu iki değer kullanılarak çözeltinin toplam kütlesi bulunur.

Böylece çözeltinin kütlece karışım oranı aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir;

$$\phi_m = (m_{katı}/m_{çözelti}) \times 100 \quad (3.55)$$

Kütlesel konsantrasyonun belirlenmesi ile Nu ifadelerinde ihtiyaç duyulan hacimsel konsantrasyonun da hesaplanması mümkündür;

$$\phi_v = \frac{1}{(100/\phi_m) (\rho_p/\rho_{ta}) + 1} \times 100 \quad (3.56)$$

Nanoakışkanların analizinde kullanılmak üzere seçilen ilk ifade, Vajjha vd. (2010) tarafından yassı kesit geometrisine sahip borularda ısıl giriş bölgesi ve nanoakışkanlar için tanımlanmış ve iki farklı kullanım şartı için önerilmiş olan ifadedir;

$$Nu = 1.9421 \left( Re_a Pr_a \frac{D_{h,a}}{z} \right)^{0.3} \quad (3.57)$$

$$\left( Re_a Pr_a \frac{D_{h,a}}{z} \right) \geq 33.33$$

$$Nu = 6.1 + 0.003675 \left( Re_a Pr_a \frac{D_{h,a}}{z} \right) \quad (3.58)$$

$$\left( Re_a Pr_a \frac{D_{h,a}}{z} \right) < 33.33$$

Araştırmacıların geliştirmiş oldukları ifade ısıl giriş bölgesi için tanımlandığından, z mesafesine bağlı yerel bir ifadedir. Boru içerisinden akışta toplam boru uzunluğu için ortalama  $\overline{Nu}$  ifadesi ise Özışık (1977)'nin de ifade ettiği şekilde aşağıda tanımlanan integral yardımıyla bulunabilir;

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L_b} \int_0^{l_b} Nu \, dz \quad (3.59)$$

İlgili integralin, deneysel şartlara uygun olan eşitlik (3.57)'ye uygulanması ile aşağıda verilen ortalama  $\overline{Nu}$  ifadesi elde edilmiştir;

$$\overline{Nu} = 2.7744 \left( Re_a Pr_a \frac{D_{h,a}}{L_b} \right)^{0.3} \quad (3.60)$$

$$\left( Re_a Pr_a \frac{D_{h,a}}{L_b} \right) \geq 33.33$$

Nanoakışkanların laminer zorlanmış taşınımı için sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında tanımlanan bir başka ifade ise şu şekildedir (Maïga vd. 2005);

$$\overline{Nu} = 0.28 (Re_a)^{0.35} (Pr_a)^{0.36} \quad (3.61)$$

$$Re_a \leq 1000 \quad 6 \leq Pr_a \leq 753 \quad \phi_v \leq \%10$$

Nanoakışkanlar için test edilecek olan son eşitlik otomobil radyatörlerinin yassı kesitli borularındaki gelişmekte olan laminer akış için oluşturulmuştur. İlgili eşitlik literatüre Sheikhzadeh vd. (2017) tarafından kazandırılmış ve şu şekilde ifade edilmiştir;

$$\overline{Nu} = 0.8028 \phi_v^{0.0305} (Re_a)^{0.2252} (Pr_a)^{0.3472} \quad (3.62)$$

$$200 \leq Re_a \leq 400 \quad 0.3 \leq \phi_v \leq 1.2$$

Temel akışkan ve nanoakışkanlar için belirlenen eşitlikler ile elde edilen taşınım katsayıları, daha önce hava tarafı için deneysel olarak ele edilen değerler ile beraber denklem (3.39) yardımıyla toplam ısı transfer katsayısının hesaplanmasında kullanılmıştır. Sistemin performansı ise deneysel analizde olduğu gibi teorik analizde de performans katsayıları ile belirlenmiş ek olarak eşanjör etkenliği ( $\varepsilon$ ) açısından da değerlendirilmiştir. Eşanjör etkenliğinin hesaplanmasında her iki tarafta da karışmayan çapraz akışlı eşanjör için tanımlanan denklemden faydalanılmıştır (Incropera vd. 2011);

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{1}{C^*}\right) (NTU^{0.22}) [\exp(-C^*(NTU^{0.78})) - 1] \quad (3.63)$$

Bu denklemde bulunan  $C^*$  ve  $NTU$  değişkenleri aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$C^* = C_{min}/C_{maks} = (\dot{m}c_p)_{min}/(\dot{m}c_p)_{maks} \quad (3.64)$$

$$NTU = \frac{U A}{C_{min}} \quad (3.65)$$

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmadan elde edilen tüm bulgular bu bölümde sunulmuş ve tartışılmıştır. Analizler, net olarak ifade edilebilmek adına daha önce yapılan sınıflandırmaya göre verilecektir.

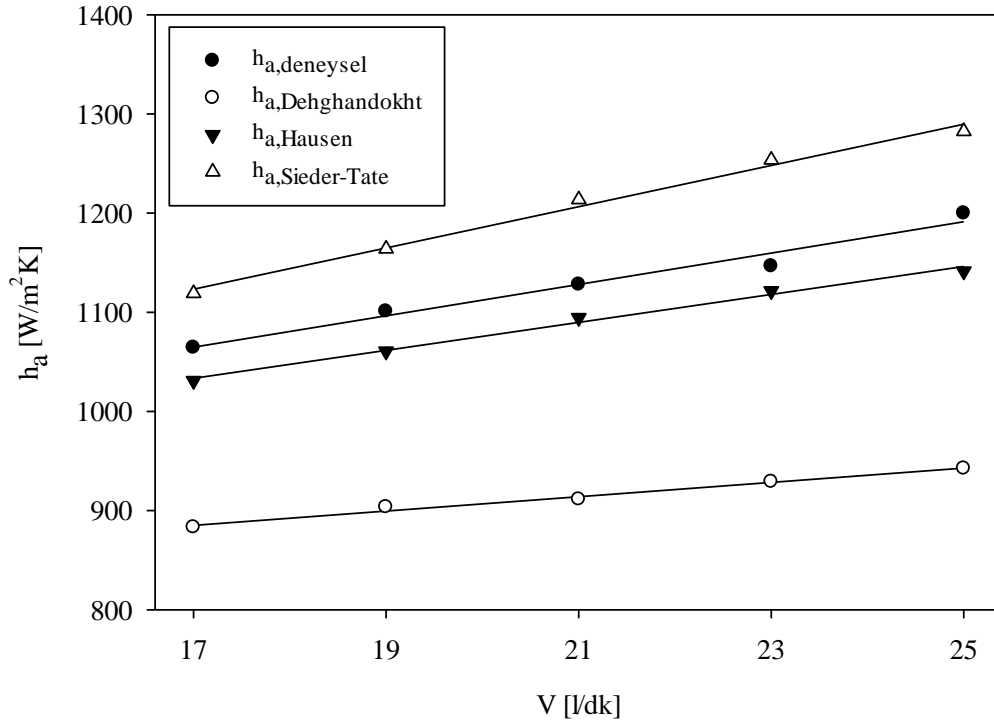
##### 4.1. Doğruluk ve Güvenilirlik Analizinden Elde Edilen Sonuçlar

Saf su ile gerçekleştirilen deneylerden alınan bazı önemli ölçüm sonuçları, akışkanın hidrodinamik ve ısı olarak gelişme durumunu gösteren değerler ve Nu ifadelerinde kullanılmak üzere hesaplanan boyutsuz sayılar Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Çizelge 4.1’deki veriler incelendiğinde, saf su ile yapılan deneylerde akışkanın tüm deney şartları için laminer aralıkta kaldığı, boru uzunluğunun 0.38 m olduğu düşünüldüğünde ise hidrodinamik ve ısı girişi uzunluğu hesaplamalarına göre akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısı olarak ise gelişmekte olduğu anlaşılmaktadır.

**Çizelge 4.1.** Saf su deneylerinden elde edilen bazı önemli büyüklükler

<i>Deney</i>	$\dot{V}$ [l/dk]	$T_{ort,a}$ [°C]	$T_y$ [°C]	$u_{maks,a}$ [m/s]	$Re_a$	$Pr_a$	$X_H$ [m]	$X_T$ [m]
1	25	43	39	0.285	1685.43	4.074	0.312	1.270
2	23	44	40	0.265	1598.54	3.992	0.296	1.181
3	21	45	41	0.240	1475.18	3.910	0.273	1.067
4	19	40	35	0.218	1223.70	4.320	0.226	0.978
5	17	41	36	0.193	1102.65	4.238	0.204	0.865

Deneyler sonucu elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan deneysel ve teorik taşınım katsayıları, Şekil 4.1’den görülebilecek grafik yardımı ile karşılaştırılmıştır. İlgili sonuçlar incelendiğinde, grafikte teorik ve deneysel taşınım katsayıları için oluşan eğilimlerin oldukça benzer olduğu görülmektedir. Saf suya ait deneysel taşınım katsayılarına en yakın teorik sonuçlara, Hausen denklemi (3.48) kullanılarak ulaşılmıştır. İlgili denklemden elde edilen değerlerde 25 l/dk akışkan debisi için deneysel sonuçlar ile maksimum %4.87’lik bir fark oluşurken tüm deneyler ile yalnızca ortalama %3.37’lik bir fark meydana gelmiştir. Sieder – Tate (3.46) ile elde edilen sonuçlar ise deneysel verilerden %6.93 daha yüksek çıkarken Dehghandokht (3.47) deneysel verileri %18.9 gibi oldukça farklı bir oranla daha düşük değerlerde tahmin etmiştir. Bu iki korelasyondan elde edilen sonuçlar literatürde Vermahmoudi vd. (2014) ve Naraki vd. (2013) tarafından ortaya konulan sonuçlar ile oldukça benzerdir. Deneysel sonuçlar ve literatürdeki denklemlerden elde edilen değerler arasında oluşan farklılıkların nedenlerinden bir tanesi, çalışmada kullanılan boruların yassı kesitli olması ancak teorik değerlerin hesaplanmasında kullanılan denklemlerin dairesel kesitli borular için geliştirilmiş olmasıdır. Benzer çalışmalarda da bu durumlar yaşanmıştır (Sheikhzadeh vd. 2017). Dolayısıyla özellikle ısı girişi bölgesi için tanımlanan Hausen denkleminden alınan sonuçlar göz önüne alındığında deneysel verilerin doğruluğu ve güvenilirliği konusunda herhangi bir problem olmadığı kolaylıkla söylenebilmektedir.



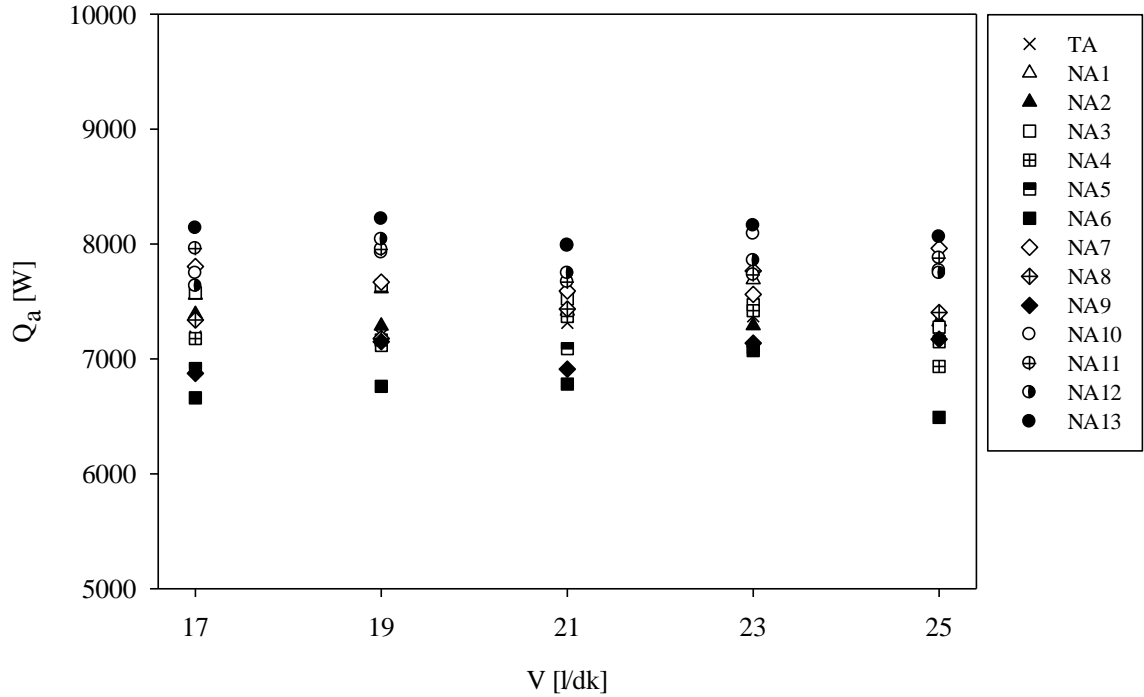
**Şekil 4.1.** Saf su için deneysel taşınım katsayılarının literatürde önerilen denklemlerden elde edilen değerler ile karşılaştırması

#### 4.2. Deneysel Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında araştırılan biri temel akışkan olmak üzere toplamda 14 farklı akışkan ile yapılan deneylerden elde edilen veriler ve analizler bu kısımda sunulmuştur. Çalışmanın sonuçlarının aktarılması sırasında gerekli görülen yerlerde yorumlama kolaylığı ve detayların daha rahat anlaşılabilmesi için grafikler ikili şekilde verilmiştir. Detay grafiklere ihtiyaç duyulan yerlerde ilk grafik, tüm nanoakışkanların temel akışkana kıyasla ilgili parametre açısından hangi mertebede olduğunu göstermek adına temel akışkan ile karşılaştırmalıdır. İkinci grafikte ise aynı parametre için yalnızca detaylı olarak incelenmek istenen ve önemli olduğu düşünülen akışkanlara ait değerler yeniden sunulmuştur. Bu kısımda verilen grafikler haricinde örnek bir deney seti için deneylerden elde edilen detaylı veriler ve analiz sonuçları da EK – 2’de mevcuttur.

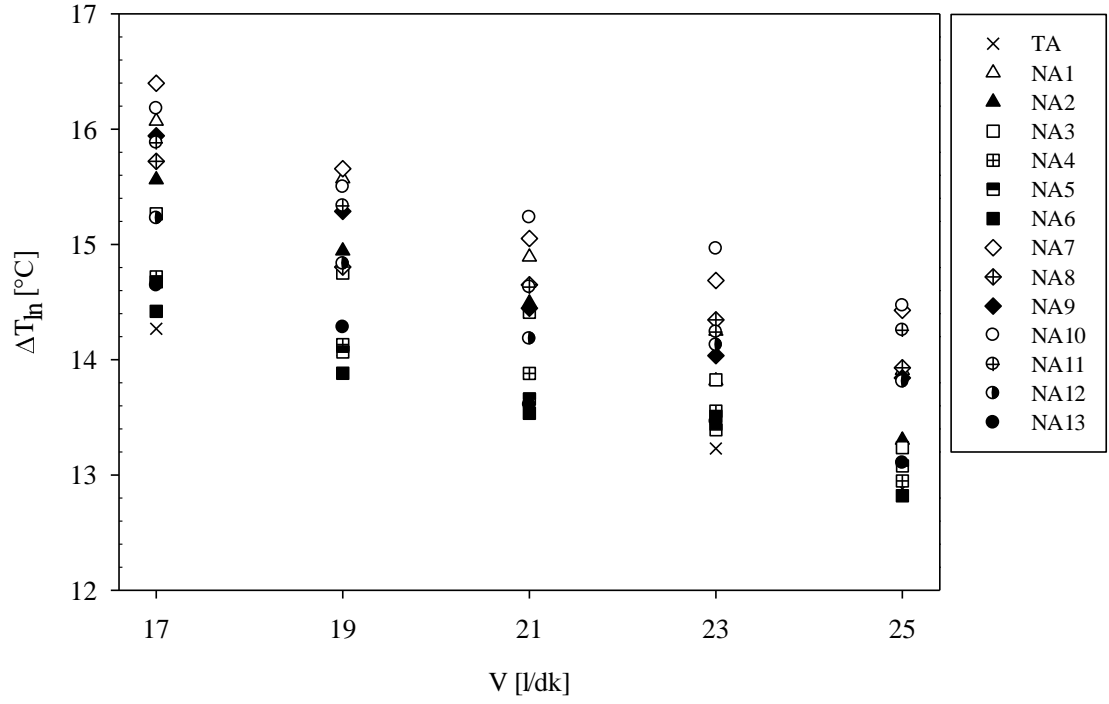
Daha önce deneysel parametrelerin belirlenmesi bölümünde de açıklandığı üzere, tüm deneyler sabit ısıtıcı gücü altında gerçekleştirilmiştir. Sistemde yer alan 3 adet rezistans, deneyler esnasında tam kapasitede sürekli olarak çalıştırılmıştır. Rezistansların ürettiği ısının ne kadarının akışkana aktarılabilmesinin tespit edilebilmesi için  $\dot{Q}_a$  değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.2’de sunulmuştur. Şekil 4.2 incelendiğinde tüm akışkanlar için tüm deney şartlarında akışkana aktarılan ısı miktarının belirli bir aralıkta ve birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Deney düzeneği üzerindeki borulama sistemi iyi bir şekilde izole edilmiş durumdadır. Ancak tanktan ve hat üzerinde bulunan çeşitli ölçüm elemanlarından yaşanan kayıplar, akışkana aktarılan ısı miktarında çeşitli dalgalanmalara neden olmuştur. Ayrıca şebeke akım ve voltajında meydana gelen anlık değişimler de bu

dalgalanmanın sebepleri arasındadır. Sistemin kapasitesinin büyüklüğü ve toplamda kullanılan yüksek rezistans gücü nedeniyle deney düzeneğinde varyak kullanımı mümkün olmamıştır. Sistemde tüm deneyler için rezistanslardan akışkana ortalama 7.5 kW'lık bir ısı güç aktarıldığını söylemek mümkündür.

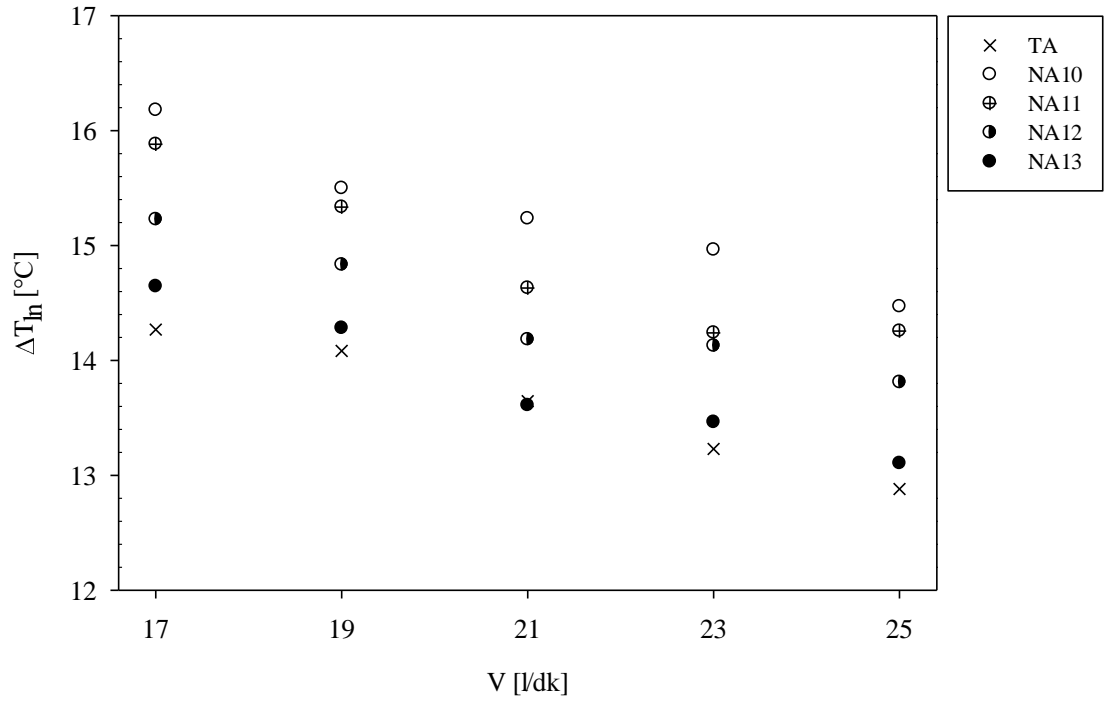


**Şekil 4.2.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan akışkana aktarılan ısı miktarı karşılaştırılması

Newton'un Soğuma Kanunu düşünüldüğünde, aynı ısı güç ve yüzey alanı için toplam ısı transfer katsayısının artmasının, logaritmik ortalama sıcaklık farkının azalması ile mümkün olduğu bilinmektedir. Deneylerde logaritmik sıcaklık farkının azalışı, hacimsel debinin artması ile gerçekleşmektedir (Şekil 4.3). Hacimsel debinin, bir başka deyişle de akışkan hızının artışının doğal bir sonucu olarak  $\Delta T_{ln}$  değerleri tüm akışkanlar için azalmıştır. Deneysel analizlerden elde edilen değerler akışkanlar açısından karşılaştırıldığında ise  $\Delta T_{ln}$  değerlerini azaltan bir diğer etkenin, akışkanların artan konsantrasyonları olduğu görülmektedir. Konsantrasyon artışı, akışkanın tür ve özelliğine bağlı olarak belirli bir sınıra kadar ısı iletkenliği arttırmaktadır (Çizelge 3.8). Artan ısı iletkenlik ise nanoakışkanların temel akışkana kıyasla daha iyi ısı transfer özellikleri göstermesinin nedenlerinden bir tanesidir. Çalışma kapsamında kullanılan akışkanlardan, konsantrasyon artışına bağlı olarak ısı iletkenliğinde net bir değişim gözlenen grup %0.3 Ag katkılı nanoakışkanlar olmuştur. Bu grup akışkanların logaritmik ortalama sıcaklık farklarının değişimi Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.4'de NA10'dan NA13'e doğru gidildikçe artan konsantrasyon etkisine bağlı olarak logaritmik sıcaklık farkındaki düşüş her debi değeri için açıkça görülmektedir.



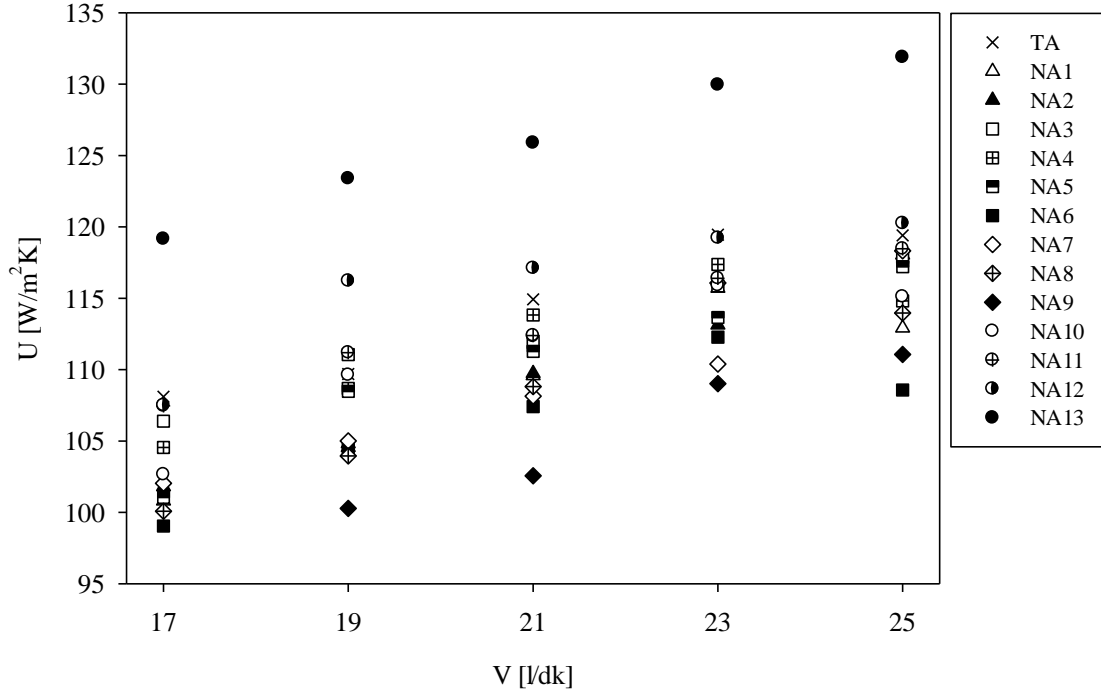
**Şekil 4.3.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan logaritmik ortalama sıcaklık farkı değerlerinin karşılaştırılması: tüm akışkanlar



**Şekil 4.4.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan logaritmik ortalama sıcaklık farkı değerlerinin karşılaştırılması: %0.3 Ag katkıli nanoakışkanlar



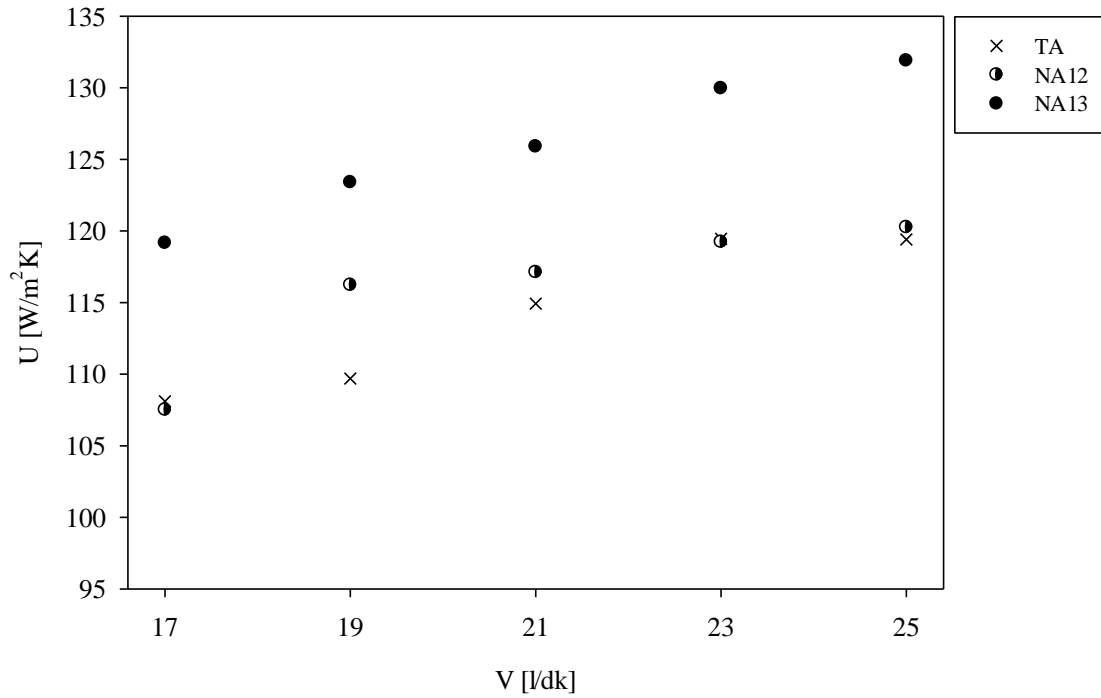
Newton'un Soğuma Kanunu'ndan yola çıkılan ön görüş ile azalan  $\Delta T_{ln}$  değerlerinin sistemin performansına olumlu yönde etki etmesi beklenmektedir. Bu durumu toplam ısı transfer katsayısındaki değişimleri inceleyerek araştırmak mümkündür. Şekil 4.5'den görülebileceği üzere, sabit ısı güç ve yüzey alanına sahip bir sistemde akışkan debisinin artmasına bağlı olarak azalan logaritmik ortalama sıcaklık farkları tüm akışkanlar için toplam ısı transfer katsayısının artışı ile sonuçlanmıştır.



**Şekil 4.5.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan toplam ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması: tüm akışkanlar

Sabit debi için akışkanlar birbirleri ile kıyaslandığında ise iki grup akışkanın temel akışkandan daha yüksek değerlere ulaşabildiği, ancak diğer akışkanların temel akışkan ile elde edilen toplam ısı transfer katsayılarını aşamadıkları görülmüştür. Bu durumun nedenleri, diğer deneysel sonuçların da verilmesinin ardından çözüm önerileri ile beraber bu bölümün sonunda sunulacaktır. Temel akışkandan daha yüksek ısı transfer özelliği gösterdiği deneysel olarak tespit edilen akışkanların detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla Şekil 4.6 sunulmuştur.

Şekil 4.6 incelendiğinde hem NA12 hem de NA13'ün aynı deney koşulları altında temel akışkana kıyasla toplam ısı transfer katsayısında en büyük artışı gösterdiği nokta 19 l/dk akışkan debisinde gerçekleşmiştir. Bu noktada NA12 %5.615 artış gösterirken NA13 %11.094 artışa kadar ulaşmıştır. NA12'nin zaman zaman temel akışkan ile yaklaşık aynı performansı gösterdiği görülmektedir. Ancak NA13 tüm deneylerde daha yüksek performansa ulaşmayı başarmış ve deneylerin ortalamasına bakıldığında toplam ısı transfer katsayısında %9.323'lük bir artış sağlanmıştır.



**Şekil 4.6.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan toplam ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması: temel akışkana göre artış gösteren nanoakışkanlar

Toplam ısı transfer katsayılarının hesaplanmasının ardından tez çalışmasının “Materyal ve Metot” bölümünde detayları ile açıklanan yöntemler kullanılarak hava tarafı taşınım katsayıları tespit edilmiştir. Deneysel hava tarafı akışkan debisi sabit tutulduğundan, hava tarafı hesabından elde edilen değerler tüm deneylerde yaklaşık olarak aynı değerde alınabilir. Ancak havanın ortalama sıcaklığı ve buna bağlı değişen termofiziksel özellikleri ile hava hızı ölçümlerindeki küçük değişimlere bağlı olarak deneyler arasında bir miktar farklılık olmaktadır. Hesaplamaların hassasiyeti için tüm deneylerde hava tarafı hesaplar da deneydeki ortalama sıcaklık değerine göre yeniden yapılmıştır. Hava tarafına ait deneysel çalışma koşulları ve hesaplamalardan elde edilen değerler, örnek bir deney seti için (25 l/dk akışkan debisinde tüm akışkanlar için) Çizelge 4.2’de detaylı olarak sunulmuştur.

Hava tarafı taşınım katsayılarının tespit edilmesinin ardından dirençler yardımıyla yazılan toplam ısı transfer katsayısı ifadesinden akışkan tarafı deneysel taşınım katsayılarına ulaşılmıştır. Yassı kesitli boru içi taşınım katsayılarının hesabında bu tip bir yol izlenmesinin nedeni, radyatör geometrisinden kaynaklı olarak boru yüzey sıcaklıklarının tespitinde yaşanan güçlüklerdir. Otomobil radyatörleri, dalgalı panjur tip kanatçıklı borulara sahiptir ve bu kanatçıklar yassı kesitli borular üzerine oldukça sık aralıklar ile tutturulan çok ince kanatçıklardır. Bu tip bir geometride ısı çiftleri boru üzerine doğru şekilde temas edecek halde yerleştirmek ve hava ile temasını kesmek de uygulamada önemli zorluklar içermektedir. Tüm bu sebepler ile Pt-1000 problar vasıtasıyla daha hassas ölçüm alınmasının mümkün olduğu hava ve akışkanların giriş çıkış sıcaklıkları kullanılarak logaritmik ortalama sıcaklık farkı ile işlemler gerçekleştirilmiştir.

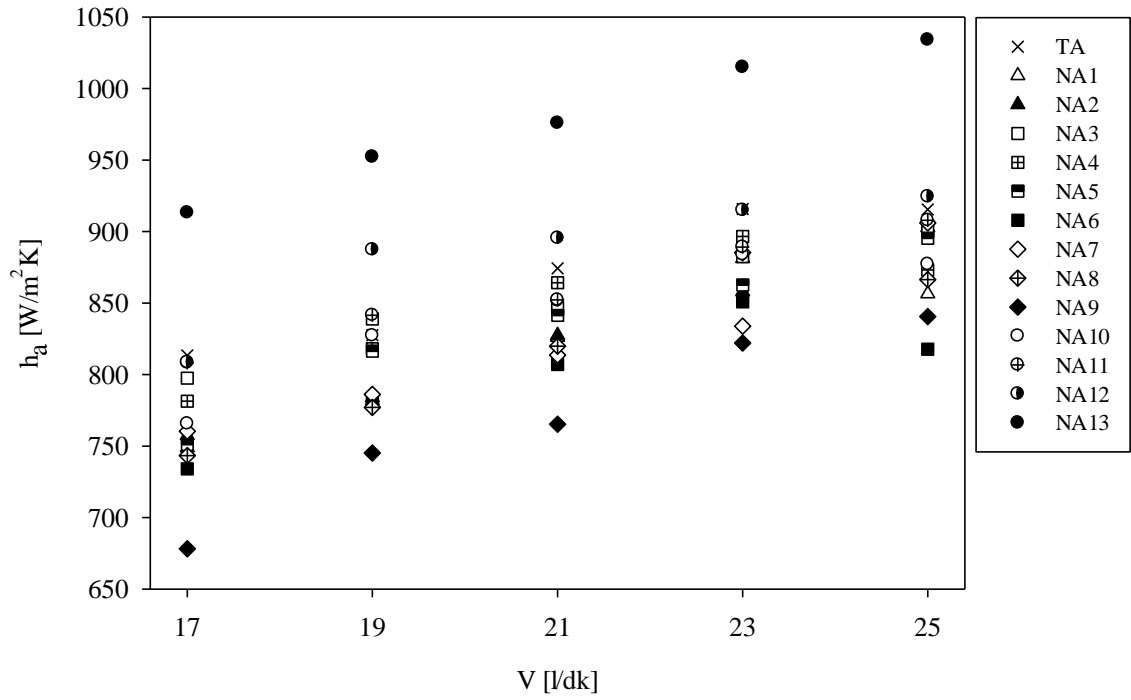
**Çizelge 4.2.** Örnek bir deney seti için ( $\dot{V}_a = 25 \text{ l/dk}$ ) hava tarafı hesaplamalarından elde edilen bazı önemli büyüklükler

	$T_{ort}$ [K]	$u_{kanal}$ [m/s]	$u_{maks}$ [m/s]	$Re_h$	$Nu_h$	$h_h$ [W/m <sup>2</sup> K]
TA	301	5.99	9.37	939.53	61.475	1008.07
NA1	302	5.97	9.34	942.25	61.507	1005.53
NA2	302	6.00	9.39	941.10	61.491	1008.33
NA3	302	5.99	9.37	939.53	61.475	1008.07
NA4	302	6.03	9.44	945.80	61.538	1009.11
NA5	302	5.98	9.36	937.96	61.459	1007.81
NA6	300	5.96	9.33	946.65	61.555	1003.65
NA7	300	5.95	9.31	945.06	61.539	1003.39
NA8	300	5.90	9.23	937.12	61.459	1002.08
NA9	299	5.85	9.15	934.47	61.439	999.10
NA10	301	5.73	8.97	904.37	61.116	999.15
NA11	301	5.77	9.03	910.68	61.182	1000.23
NA12	300	5.80	9.08	921.24	61.296	999.43
NA13	302	5.78	9.04	906.59	61.135	1002.50

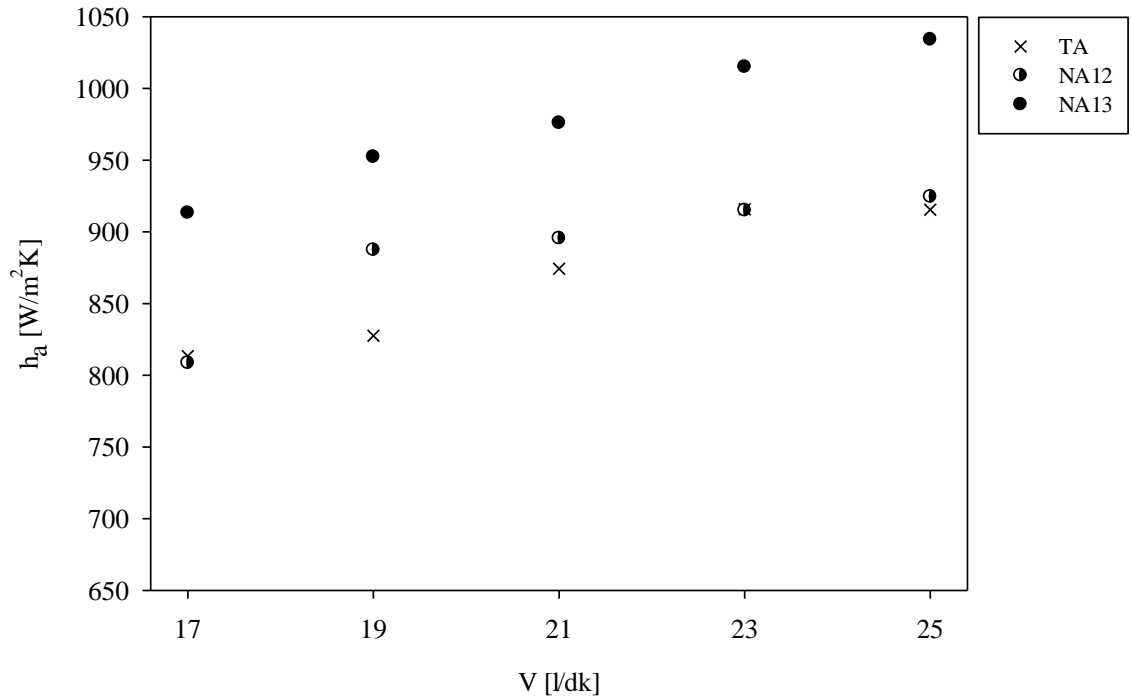
Akışkan tarafı için elde edilen taşınım katsayısı değerleri tüm akışkanlar (Şekil 4.7) ve temel akışkana göre artış gösterdiği belirlenen nanoakışkanlar için özel olarak (Şekil 4.8) sunulmuştur. İlgili grafikler incelendiğinde, bir önceki grafiklerde toplam ısı transfer katsayısı ile benzer sonuçlar ile karşılaşılmıştır. İlgili grafikler, tez çalışması kapsamında kullanılan nanoakışkanlar ile mevcut deney düzeneği ve deneysel koşullar altında ulaşılabilen deneysel taşınım katsayılarının hangi mertebelerde olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Elde edilen değerler literatürde bu alanda yapılan benzer çalışmalar ile kıyaslandığında, kullanılan nanoakışkanlardan doğan farklılıklar haricinde laminer şartlar altında yapılan ve sabit debi için karşılaştırılan çalışmalarda elde edilen sonuçların yakın değerlerde olduğu görülmektedir (Nieh vd. 2014; Sheikhzadeh vd. 2017).

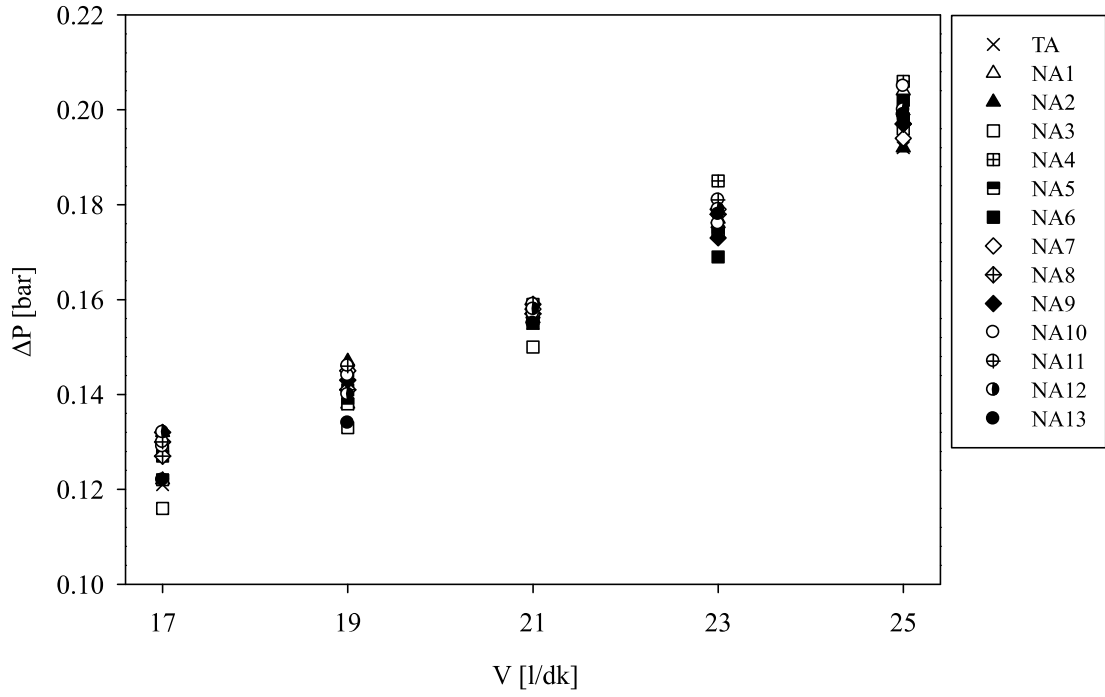
Isıl sistemler için akışkanlar ile performans artırımı yapılmak istenirken daha önce de açıklandığı üzere yalnızca ısı transfer özelliklerinin iyileştirilmesi yeterli değildir. Akışkanlar üzerinde yapılan değişikliklerin viskozite ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklere, dolayısıyla da sürtünme katsayıları ve pompalama güçlerine olan etkisi oldukça önemlidir. Çünkü yapılan ısıl iyileştirme sistemde önemli oranda basınç kaybına neden oluyor ise artan pompalama güçleri nedeniyle toplam fayda açısından bakıldığında sistemde performans artışı gözlenmeyebilir. Tüm bu nedenlerle farklı akışkanlar ile yapılan deneylerde pompanın girişi ve çıkışı arasındaki basınç farkı ve pompalama güçlerindeki olası artışlar sürekli olarak ölçülerek takip edilmiştir. İlgili ölçüm sonuçlarından elde edilen veriler Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'dan görülebilir.



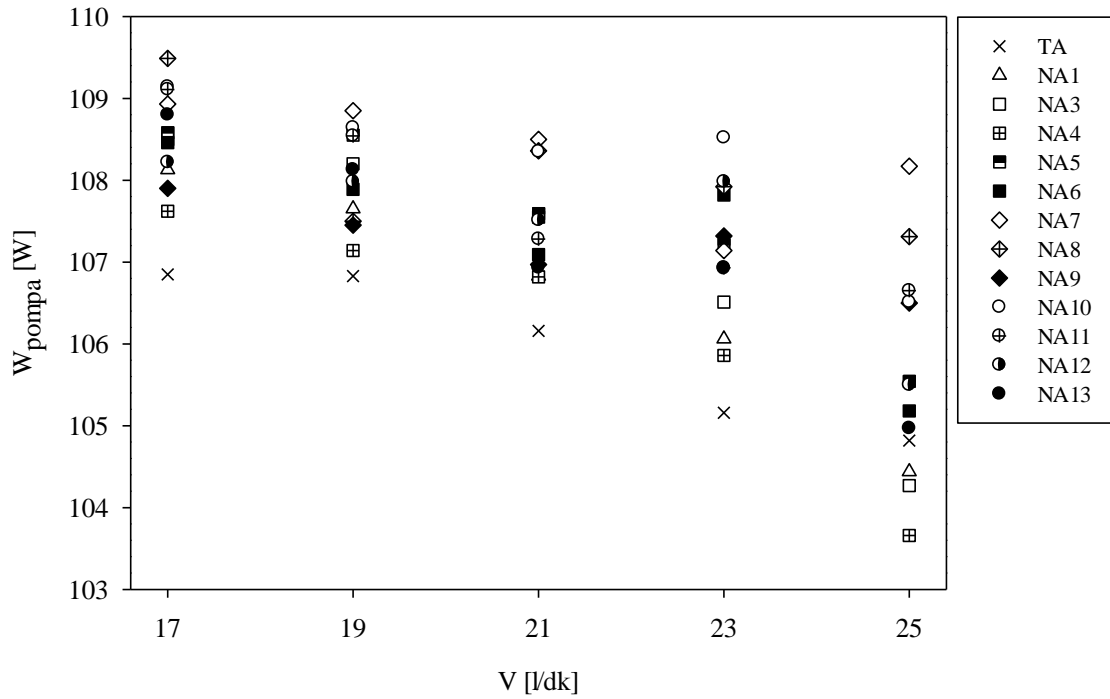
**Şekil 4.7.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan taşınım katsayılarının karşılaştırılması: tüm akışkanlar



**Şekil 4.8.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan taşınım katsayılarının karşılaştırılması: temel akışkana göre artış gösteren nanoakışkanlar



**Şekil 4.9.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için pompanın giriş ve çıkışı arasında ölçülen basınç farkları



**Şekil 4.10.** Deneysel süreçte ölçülen pompalama güçleri

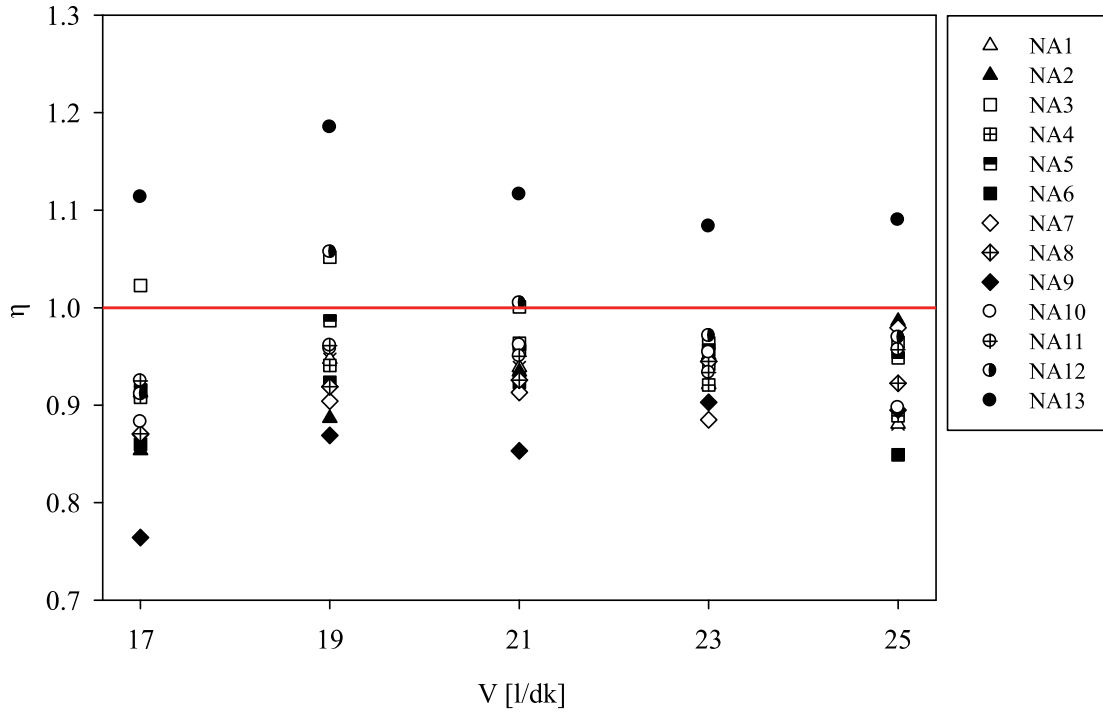
Boru içerisinde laminar akışta basınç kayıpları akışkanın viskozitesi ile doğru orantılıdır ve sürtünmenin olmadığı durumlar için basınç kayıplarının sıfır olduğu düşünülür. Dolayısıyla boru içerisinde bir noktadan diğerine gerçekleşen basınç kaybı, yalnızca viskoz kuvvetlerin etkisi altındadır (Çengel ve Cimbala 2006). Bu ifadelerle ilgili olarak tüm akışkanlar için basınç kayıplarının yakın değerlerde değiştiğini söylemek mümkündür. Temel akışkana kıyasla en yüksek basınç farkının gözlemlendiği ilk üç nanoakışkan NA10, NA11 ve NA12 olmuştur. Bu akışkanlar arasında NA12'nin ısı performans açısından da en iyi akışkanlardan biri olduğu göz önüne alınarak performans değerlendirmesi bu duruma göre yapılmalıdır.

DeneySEL sonuçlarda akışkanların hacimsel debileri arttıkça pompanın giriş – çıkışı arasındaki basınç farkının da arttığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur ve deneysel parametreler veya gerçek sistemlerin çalışma koşulları belirlenirken mutlaka dikkate alınması gerekir. Çünkü deneysel parametrelerin belirlenmesi bölümünde de bahsedildiği üzere yüksek debi aralıkları sistem performansı için faydalı olsa dahi her zaman basınç kayıpları dikkate alınarak sınırlar belirlenmelidir.

Şekil 4.10'da yer alan tüm akışkanlarda temel akışkana kıyasla daha yüksek pompalama gücü ihtiyacı olduğu açıkça görülebilmektedir. Bu durum nanoakışkanların temel akışkanlara kıyasla sahip oldukları yüksek yoğunluk ve viskozitelerinden kaynaklanmaktadır. İlgili grafikte dikkat çeken önemli bir diğer husus ise ihtiyaç duyulan güçler arasındaki farkların debi arttıkça daha çok açılmasıdır. Sistemde kullanılan sirkülasyon pompası 3 kademelidir ve tüm akışkanlar ile yapılan deneylerde pompanın 2. kademedeki çalışması sağlanmıştır. Bu sayede aynı şartlarda çalışan pompa için tüketilen güç karşılaştırması yapılabilmektedir. Yalnızca bir akışkan ile yapılan deneylerde (NA2) pompa 3. kademedeki çalıştırılmak durumunda kaldığından ilgili akışkana ait sonuçlar bu kısımda sunulmamıştır. 3. kademedeki çalıştırma ihtiyacının voltaj, akım değerleri gibi anlık deneysel koşullardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Akışkanların ısı transfer katsayılarındaki artışların ve neden oldukları basınç kayıplarının temel akışkana göre bağıl olarak kıyaslandığı ve daha önce eşitlik (3.50) ile tanımlanan performans faktörüne göre deneysel sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçların sunulduğu Şekil 4.11 incelendiğinde, nanoakışkanlardan yalnızca 2'sinin (NA12 ve NA13)  $\eta > 1$  koşulunu sağladığı ve otomobil radyatöründe performans artırma potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.

Ancak, deneysel verilerin analizinden elde edilen sonuçların bu çalışma için tek başına belirleyici faktör olmadığı düşünülmektedir. Elbette uygulamada doğrudan ulaşılan artışlar akışkanların potansiyeli hakkında bir fikir vermektedir. Hatta mevcut çalışma kapsamında nanoakışkanlar hazırlanırken herhangi bir ek madde kullanılmaması nedeniyle akışkanlar en gerçekçi durumları için test edilmiştir. Yine bu tercih sebebiyle uygulamalar sırasında bazı problemler oluşmuştur. Akışkanlara başka kimyasallar eklemekten ve yüzey modifikasyonları gibi ek kimyasal aşamalardan geçirmeden nanoakışkan kararlılığını sağlamanın yolu, akışkanları ultrasonik banyoda bekletmektir. Ancak ultrasonik banyo, dispersiyon sağlamada bazen yetersiz kalabilmektedir. Dolayısıyla artan konsantrasyon ve katkı oranlarına bağlı olarak nanoakışkanlarda hacimsel partikül dağılım davranışları yüksek kümeleşme eğiliminde olmuştur. Nanoakışkan içerisinde iyi bir şekilde dağılmayan nanopartiküller ise çökme eğiliminde olduklarından, sistemde kullanılan akışkanlarda çökme sorunu ile karşılaşmıştır.



**Şekil 4.11.** Deneylelerden elde edilen verilere göre akışkanların performans analizi

Uygulamada karşılaşılan bu tip problemlerin, akışkanların gerçek potansiyellerinin araştırılmasına engel olduğu düşünülmektedir. Çünkü teorik analizde daha detaylı açıklanacağı üzere, akışkanların sahip oldukları ısı transfer kabiliyetleri, tüm deneysel şartlarda temel akışkandan daha iyidir. Deneysel verilerin analizi sonucu uygulamada karşılaşıldığı düşünülen çeşitli problemler ve bu problemlere getirilebilecek çözüm önerileri şu şekilde sıralanabilir;

- Çökme problemi;
  - ✓ Akışkanların pH değerleri asidik veya bazik ortama doğru taşınarak, partiküllerin çözelti içerisinde daha rahat askıda kalması sağlanabilir.
  - ✓ Sentezlenen partiküllere yüzey modifikasyon işlemleri uygulanabilir.
  - ✓ Akışkan içerisine belirli oranlarda yüzey etken madde eklenebilir.
  - ✓ Ultrasonik banyo süreleri akışkanlara göre optimize edilerek kümeleşmenin önüne geçecek ideal süreler bulunmaya çalışılabilir.
- Büyük hacimlere uygulanma problemi;
  - ✓ Bu sorunun çözümü için Malzeme Bilimi alanındaki gelişmelerin takip edilmesi gereklidir.

### 4.3. Teorik Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar (Potansiyel Araştırması)

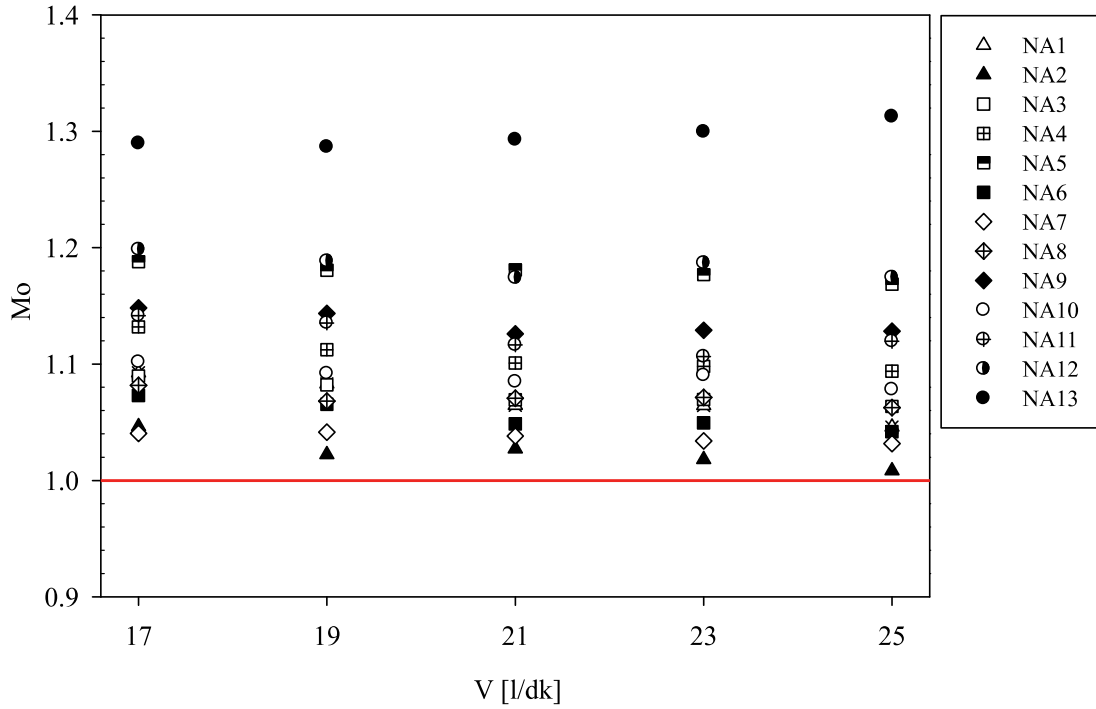
Teorik analizler daha önce de açıklandığı üzere, nanoakışkanların maksimum ısı potansiyellerini gösterebilmek adına yapılmıştır. Bu potansiyele ancak akışkanlar ısı sistemlerinde kullanılırken uygulamada yaşanan problemler ortadan kaldırılırsa ulaşılabilir. Tez çalışması kapsamında sentezlenip, detaylı karakterizasyonu gerçekleştirilen özgün akışkanların deneysel sistemde birçok farklı koşul altında testleri gerçekleştirilmiş, bu sayede karşılaşılan problemler belirlenerek bu akışkanların gerçek otomobillerde kullanılabilirliğinin önündeki engeller ve çözüm yöntemleri belirlenmiştir. Farklı tür ve özelliklerde sentezlenerek geniş bir konsantrasyon aralığında hazırlanan özgün nanoakışkanların teorik potansiyellerinin belirlenmesi, ilerleyen çalışmalar için en yüksek potansiyel vaat eden akışkanın belirlenmesi açısından önemlidir. Gerçek sistemlerde kullanılabilirliğin araştırılabileceği çalışmalarda ilgili nanoakışkanlara uygulanacak olan çözüm yöntemleri büyük hacimlerdeki akışkanlara uygulandığında pahalı ve zorlu süreçlerdir. Bu nedenle uygulama için en iyi akışkan / akışkanlar belirlenerek, araştırmalara bu şekilde devam edilmesinde fayda görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan nanoakışkanlar sabit akışkan debisi altında incelendiği için buna uygun olarak tanımlanan  $Mo$  sayısı ile değerlendirilmişlerdir. İlgili değerlendirme sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir. Akışkanları termodinamik özellikleri temelinde kıyaslayan bu başarı ölçütüne göre, sentezlenen ve karakterize edilen 13 nanoakışkanın tamamı,  $Mo$  sayısının 1’den büyük bir değere ulaşması ile temel akışkandan daha iyi bir potansiyele sahip olduklarını göstermişlerdir. Ancak sıralamaya dikkat edildiğinde potansiyel artışı saf  $TiO_2$  partikülünü içeren akışkanlardan 0.1 ve 0.3 katkılı akışkanlara doğru ilerlemektedir. En yüksek artış ise %0.3  $Ag$  katkılı %2 konsantrasyona sahip akışkanda (NA13) görülmektedir.

%0.3  $Ag$  katkısına sahip akışkanların diğer akışkanlara kıyasla daha yüksek ısı performans göstermelerinin nedeninin termodinamik özellikleri temelinde dayandığı düşünülmektedir. Örneğin %0.1 katkılı numunelerin  $c_p$  değerleri incelendiğinde saf  $TiO_2$  partiküllerine kıyasla daha düşük özgül ısıya sahip oldukları görülmektedir. Bir maddenin özgül ısı, transfer edebileceği ısı miktarını doğrudan etkileyen bir parametredir. Dolayısıyla 4 farklı tür ve özellikte sentezlenen partiküller birbiri ile özgül ısı açısından kıyaslandığında, katkılamanın saf partiküle göre daha faydalı olabilmesi için %0.3 değeri ve üzerine çıkması gerektiği görülmektedir. Bu durum da ısı performansına doğrudan yansımaktadır. Ancak bu akışkanların hacimsel partikül boyut dağılım eğrileri incelendiğinde ve partiküllerin yüzey alanı sonuçları da göz önüne alındığında, kümeleşme ve çökme nedeniyle sahip oldukları gerçek potansiyeli de tam olarak yansıtamadıklarını söylemek mümkündür.

Nanoakışkanların teorik analizleri, temel akışkan ve nanoakışkanlar için literatürde özel olarak oluşturulmuş ifadeler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak bu hesaplamaların yapılabilmesi için ilk önce ilgili akışkanlar için hangi  $Nu$  ifadesinin sistem için en uygun olduğunun ve deneysel sonuçlar ile uyumlu değerler verdiğinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, tez çalışmasının “Materyal ve Metod” bölümünde önerilen eşitlikler vasıtasıyla hesaplamalar gerçekleştirilmiş, deneysel ve teorik taşınım katsayıları karşılaştırılmıştır. İdeal eşitliklerin tespit edilmesinin ardından akışkanlar; taşınım, toplam ısı transfer ve performans katsayıları ile radyatör etkinliği açısından kıyaslanmıştır.

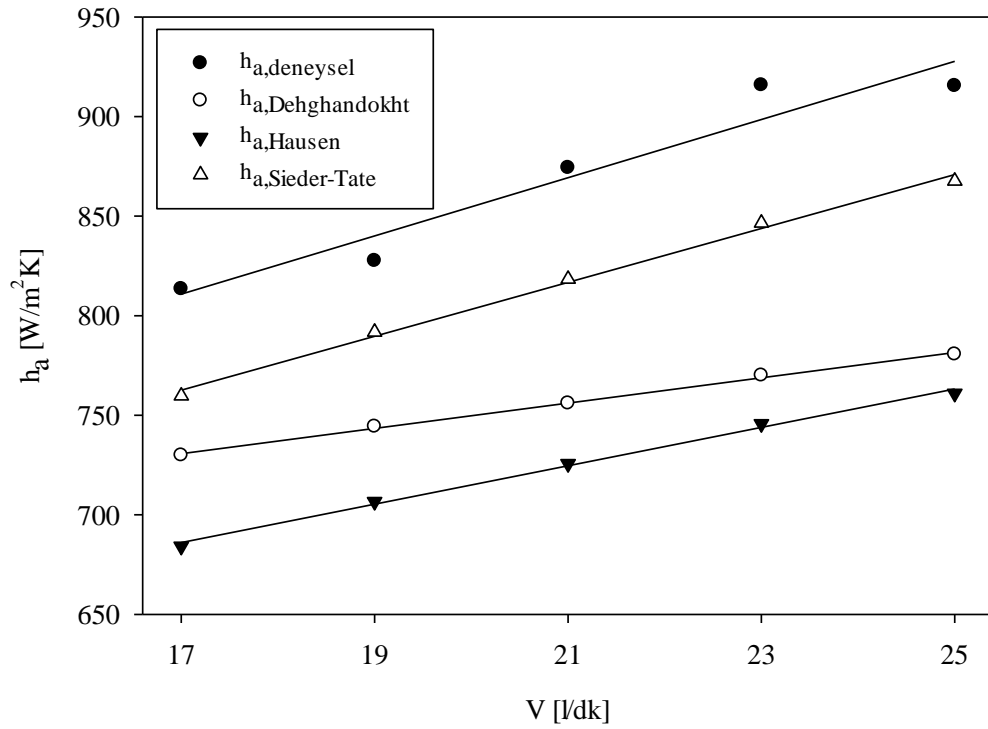




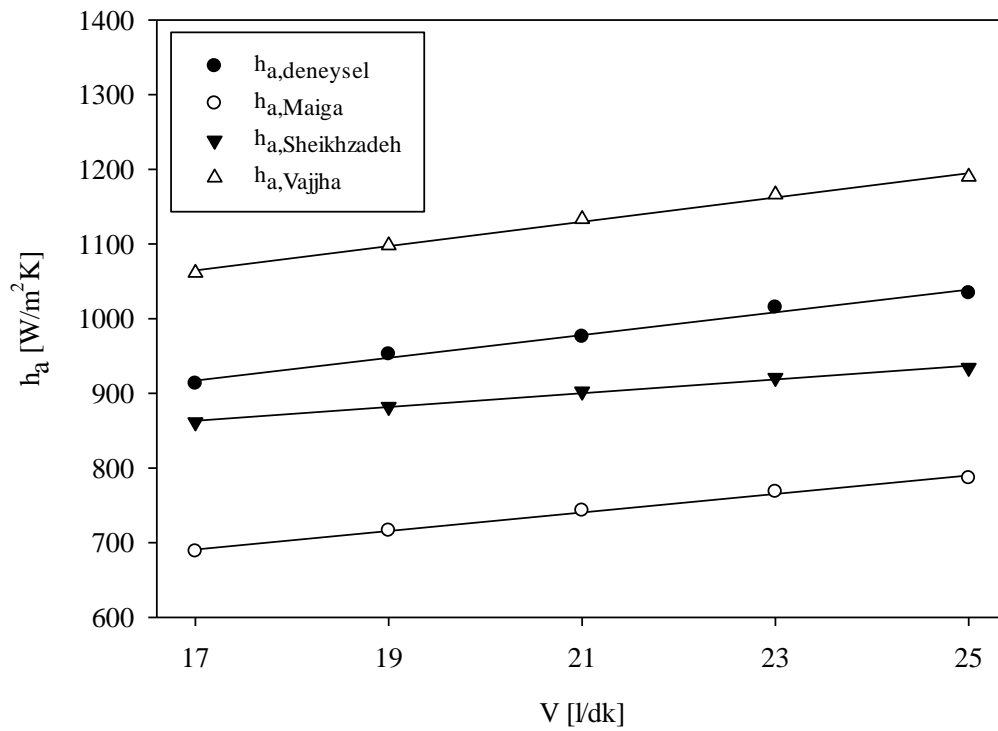
**Şekil 4.12.** Teorik analizden elde edilen verilere göre nanoakışkanların Mo sayılarının değişimi

Temel akışkan için 3 adet korelasyon ile hesaplamalar yapılmış, elde edilen değerlerin deneysel taşınım katsayıları ile kıyaslaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13). İlgili sonuçlar incelendiğinde, deneysel taşınım katsayılarının tüm deney şartlarında teoride ön görülen değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Dehghandokht vd. (2011) tarafından önerilen denklemden elde edilen değerlere dikkat edildiğinde, artan debi ile beraber belirgin bir artış eğilimi göstermediği anlaşılmaktadır. Bu durumun önerilen diğer iki eşitlik ve deneysel sonuçlardan elde edilen eğriler ile kıyaslandığında gerçekçi olmadığı açıktır. Eşitlik (3.48) ile verilen Hausen ifadesi ise deneysel sonuçları oldukça düşük tahmin etmektedir. Bu durumun nedeni olarak EG – saf su karışımında hidrodinamik giriş uzunluğunun saf suya göre daha kısa, ısıl giriş uzunluğunun ise daha uzun olduğu gösterilebilir. Çünkü yassı kesitli borunun hemen girişe yakın bölgesinde (yaklaşık 9 cm’de) akışkan hidrodinamik olarak tam gelişmiş hale gelmektedir. Su ile yapılan deneylerde bu uzunluk neredeyse borunun tüm boyudur. Tüm bu nedenler ile temel akışkanın teorik hesaplamalarında kullanılmak üzere en iyi sonuç veren ifadenin, (3.46) eşitliği ile tanımlanan Sieder – Tate bağıntısı olduğu anlaşılmaktadır.

Benzer şekilde nanoakışkanlar için literatürde önerilen eşitliklerin NA13 için değerlendirildiği grafik Şekil 4.14’de sunulmuştur. Grafikte ilk bakışta göze çarpan sonuç, Sheikhzadeh vd. (2017) tarafından verilen denklem ile elde edilen değerlerin deneysel sonuçlar ile oldukça yakın (ortalama %7.9) aralıkta olduğudur. Ancak hesaplamalar yapıldığında nanoakışkanların  $Re$  sayılarının 370 ile 830 değerleri arasında değiştiği görülmüştür. İlgili denklemin önerdiği kullanım aralığı ise  $200 \leq Re_a \leq 400$ ’dür.



**Şekil 4.13.** Temel akışkan için deneysel taşınım katsayılarının literatürde önerilen denklemlerden elde edilen değerler ile karşılaştırması



**Şekil 4.14.** NA13 için deneysel taşınım katsayılarının literatürde önerilen denklemlerden elde edilen değerler ile karşılaştırması

Şekil 4.14’de incelenen alternatif ifadeler birbirleri ile kıyaslandığında ise Maïga vd. (2005)’nin önerdiği eşitlik ile deneysel sonuçlar arasında %24.30 oranında bir sapma gözlenirken, Vajjha vd. (2010) eşitliğinde bu oran %13.43’de kalmıştır. Bu nedenle alternatifler arasından en uygun olanın Vajjha vd. (2010) olduğuna karar verilmiştir. Teorik analizlerde kullanılmasına karar verilen eşitliklerin belirlenmesinin ardından bu eşitlikler kullanılarak hesaplamalara devam edilmiş ve akışkanların performansları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda ilk önce ilgili Nu ifadelerinden elde edilen taşınım katsayıları sunulmuştur. Şekil 4.15 nanoakışkanların temel akışkana kıyasla taşınım katsayılarının değişimi konusunda bilgi verirken, Şekil 4.16 ise detayların daha net anlaşılabilmesi için yalnızca nanoakışkanları kendi arasında kıyaslamaktadır.

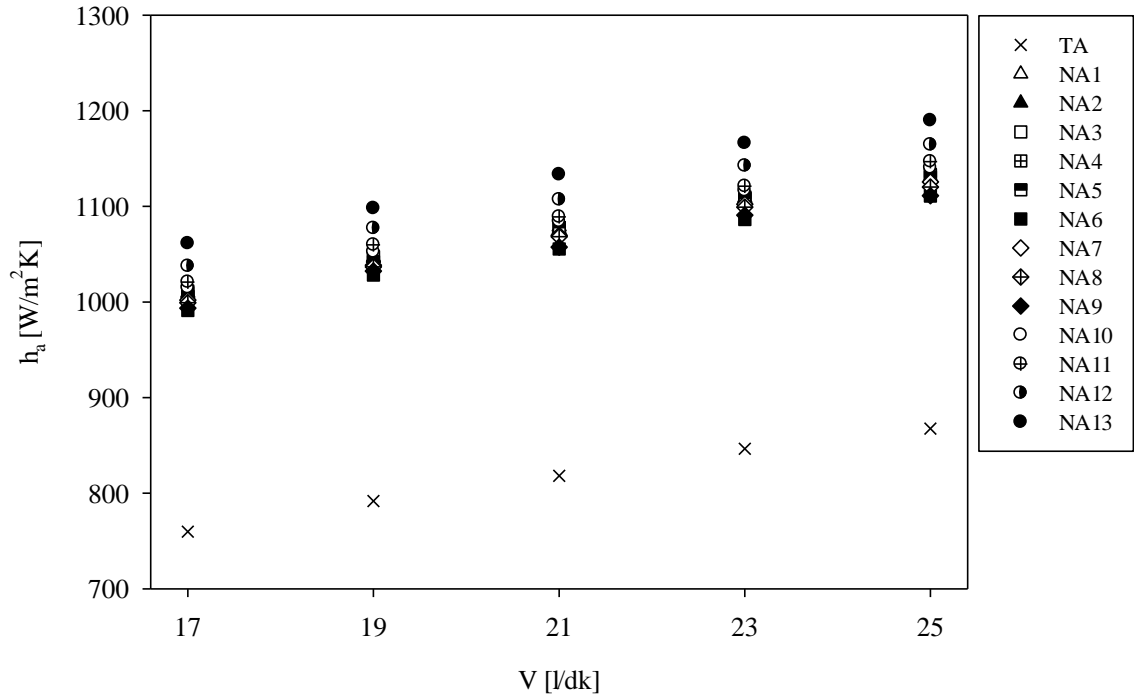
Tüm akışkanların her durumda temel akışkandan daha iyi olduğu Şekil 4.15’de açıkça gözükmemektedir. Bu durum deneysel taşınım katsayıları açısından yapılan önceki karşılaştırmalarda ne yazık ki yalnızca NA12 ve NA13 için gözlenebilmiştir. Diğer akışkanlarda deneysel koşullar altında uygulamada karşılaşılan problemler nedeniyle ulaşılamayan potansiyelin aslında var olduğu böylelikle ortaya çıkmaktadır. Kaldı ki deneysel olarak artışın görülebildiği NA12 ve NA13’de dahi teorik potansiyelin oldukça altında kalmıştır. Taşınım katsayısındaki deneysel artışlar NA12 için %1.88 ve NA13 için %11.13 mertebelerinde iken bu akışkanların teorik potansiyel artışları sırasıyla %26.15 ve %27.72 seviyelerine ulaşmaktadır.

Şekil 4.16 yardımıyla nanoakışkanlar birbirleri ile kıyaslandığında, hacimsel debi arttıkça tüm akışkanlar için taşınım katsayılarının arttığını söylemek mümkündür. Çalışmada nanoakışkanlarda kullanılan 4 farklı tür nanopartikül, elde edilen sonuçlara göre birbiri ile kıyaslandığında taşınım katsayıları şu şekilde sıralanmaktadır;

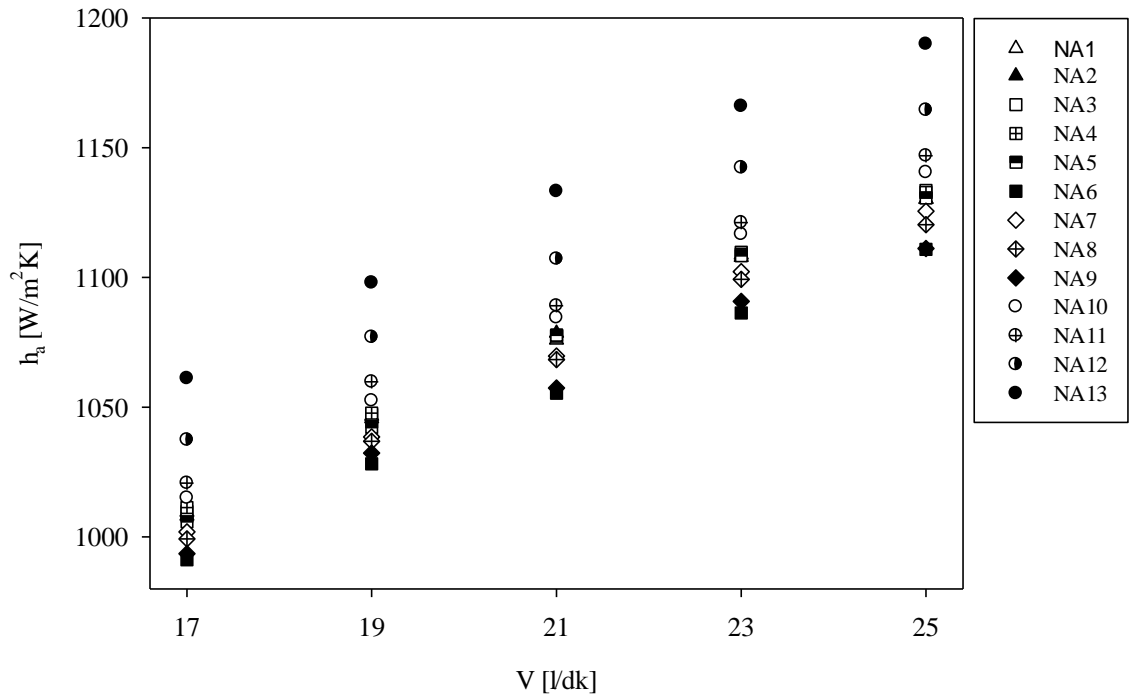
$$- \quad \%0.3 \text{ Ag katkı} > \%0.1 \text{ Ag katkı} > \text{Saf } TiO_2 > \%0.1 \text{ Cu katkı}$$

Bu sonuçlara göre, *Ag* katkısının sentezlenen nanopartiküllerin ısı transfer özelliklerini iyileştirmede daha başarılı olduğu ve katkı oranı arttıkça da sağlanan faydanın arttığını söylemek mümkündür. Akışkanların ısı iletkenlik ölçümleri de bu sonuçları destekler niteliktedir. Çizelge 3.8’de verilen değerler hatırlanırsa, temel akışkana kıyasla en yüksek artışın %0.3 *Ag* katkıli numunelerde, daha sonra ise %0.1 *Ag* katkıli numunelerde olduğu gözlenmiştir. Saf  $TiO_2$  ve %0.1 oranında *Cu* katkıli numunelerde nerdeyse hiç artış görülememiştir. Akışkanların konsantrasyon artışına bağlı olarak ısı taşınım katsayılarının değişimi de değişkenlik göstermektedir. Sabit debi için kıyaslama yapıldığında saf  $TiO_2$  ve %0.3 *Ag* katkıli nanopartiküller kullanılarak hazırlanan nanoakışkanlarda akışkan içerisindeki nanopartikül konsantrasyonunun %0.3’ten %2’ye doğru artışı, taşınım katsayılarını da arttırmıştır. Ancak bu durum %0.1 *Ag* ve *Cu* katkıli numunelerde tam ters olarak gözlenmekte ve konsantrasyon arttıkça akışkanların taşınım katsayıları düşmektedir. Akışkanların sergilemiş oldukları bu farklı eğilimler, partiküllerin akışkan içerisindeki hacimsel dağılım davranışları, sahip oldukları yüzey alanları ve metal oksit – katkılanan metal iyonu etkileşimleri ile açıklanabilir.

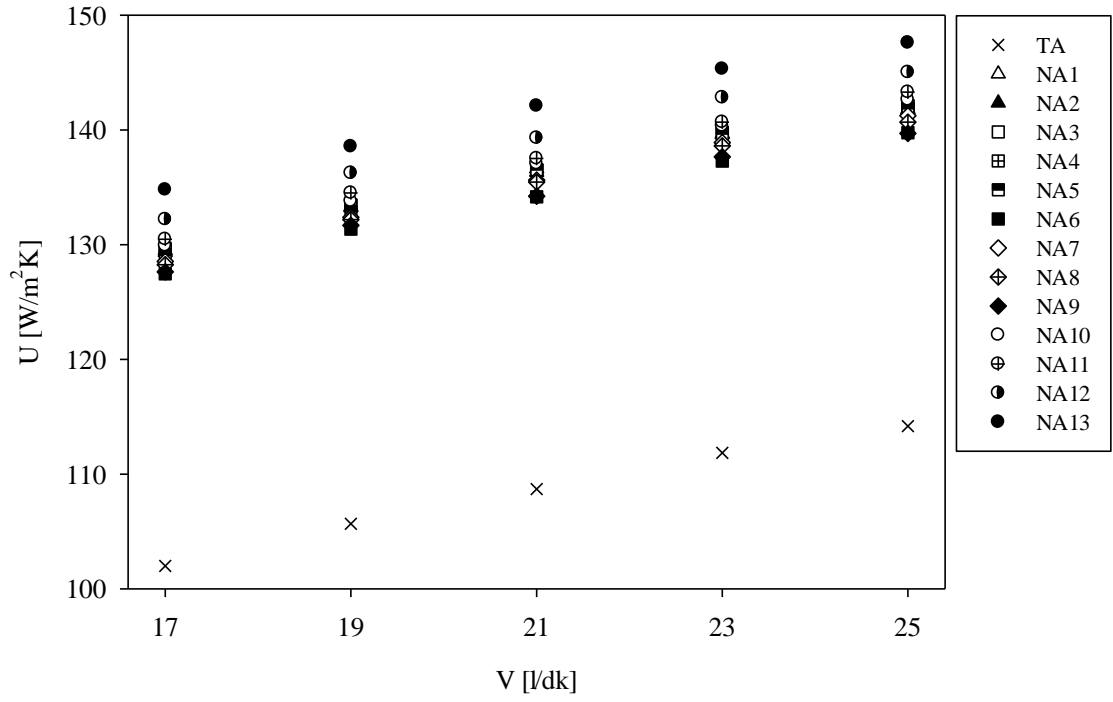
Elde edilen taşınım katsayıları yardımıyla akışkanların toplam ısı transfer katsayıları da hesaplanmıştır. Benzer şekilde grafikler öncelikle temel akışkan ile kıyaslama (Şekil 4.17) daha sonra nanoakışkanların detaylarını gösteren ikinci bir grafik (Şekil 4.18) şeklinde sunulmuştur.



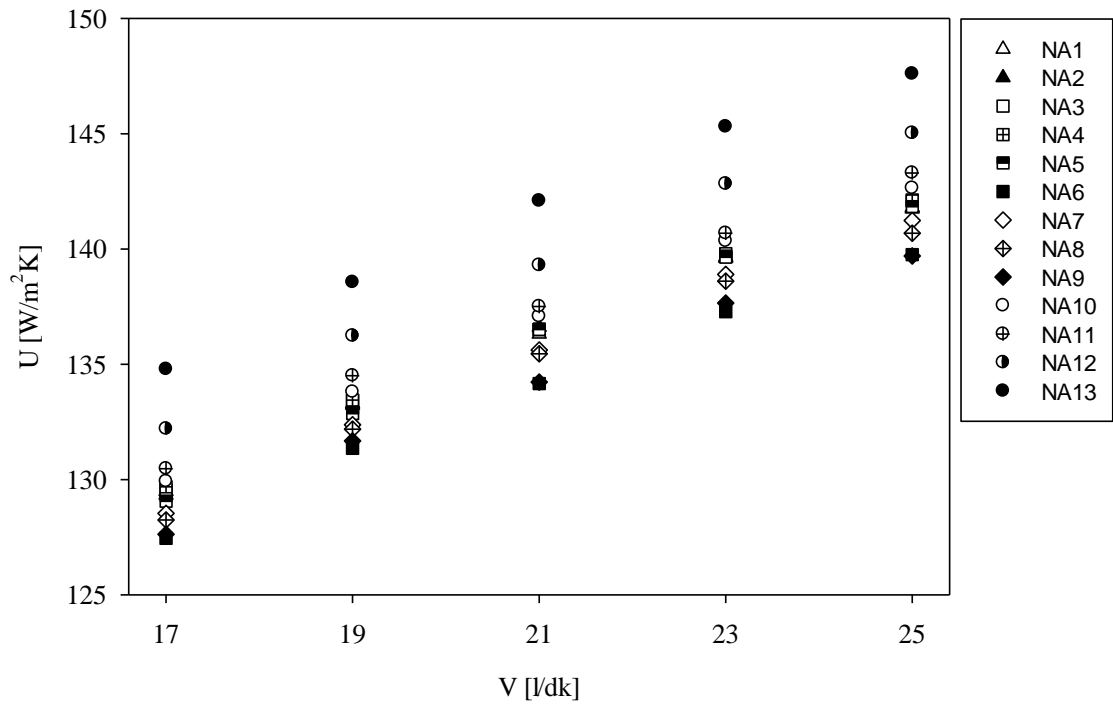
**Şekil 4.15.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan teorik taşınım katsayılarının karşılaştırılması: tüm akışkanlar



**Şekil 4.16.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan teorik taşınım katsayılarının karşılaştırılması: nanoakışkanlar



**Şekil 4.17.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan teorik toplam ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması: tüm akışkanlar



**Şekil 4.18.** Temel akışkan ve nanoakışkanlar için hesaplanan teorik toplam ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması: nanoakışkanlar

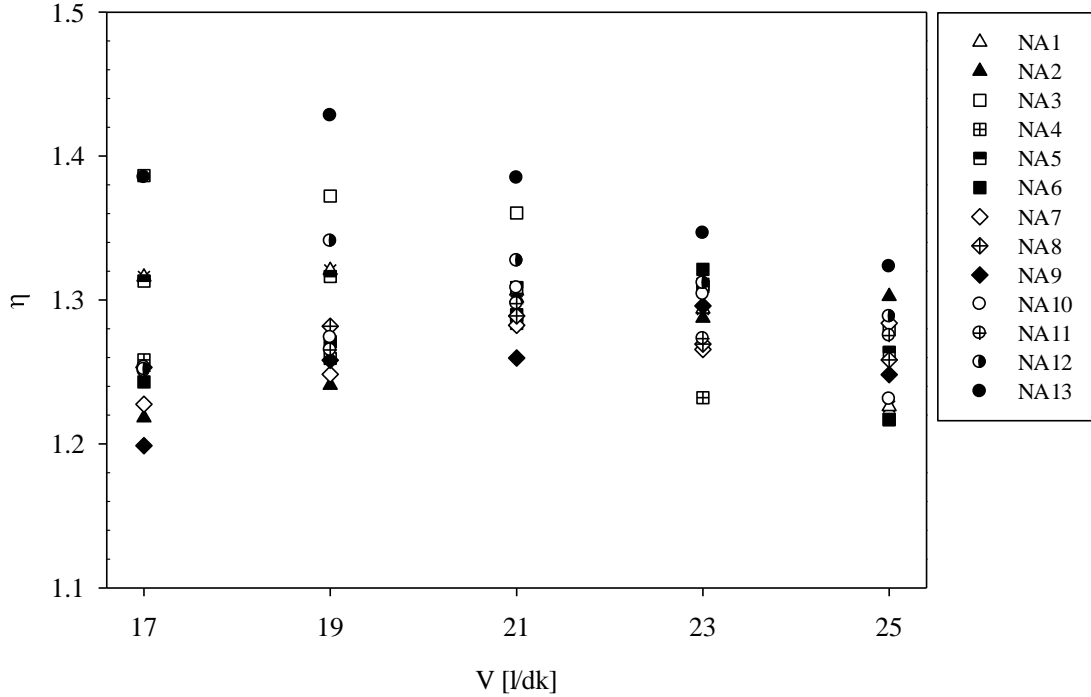
Tüm deneyler dış ortam şartlarının yaklaşık sabit koşulları altında gerçekleştirildiğinden ve hava tarafına ait deneysel parametreler değiştirilmediğinden, hava tarafı taşınım katsayıları deneyler arasında çok büyük değişimler göstermemektedir. Bu nedenlerle deneysel yöntemden elde edilen hava tarafı taşınım katsayıları bu kısımda da toplam ısı transfer katsayılarını belirlemede kullanılmıştır. Toplam ısı transfer katsayılarına ait sonuçlar hava tarafının sabit olmasının doğal bir sonucu olarak akışkanların taşınım katsayılarında elde edilen sonuçlara benzer eğilimler sergilemektedir. Şekil 4.17’den de görülebileceği üzere, deneysel çalışma aralığına göre temel akışkanın teorik toplam ısı transfer katsayıları minimum  $101.99 W/m^2K$  ile maksimum  $114.18 W/m^2K$  değerlerini almıştır. Bu değerlerin en iyi performansı gösteren nanoakışkan için (NA13) karşılıkları ise sırasıyla  $134.78 W/m^2K$  ve  $147.59 W/m^2K$  olmuştur.

Akışkanların yalnızca karakterizasyon sonuçlarının kullanıldığı Mo sayılarına göre kullanılabilir oldukları açık olsa dahi, basınç kayıplarını da dikkate alan bir yaklaşım ile performanslarının teyit edilmesinin ısı sistemlerinde kullanılabilirlikleri açısından olmazsa olmaz olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle akışkanların kullanılabilirliği konusunda net bilgiler veren ve daha önce eşitlik (3.50) ile tanımlanan performans faktörüne göre yapılan karşılaştırma Şekil 4.19 ile sunulmuştur. İlgili kıyaslamaya göre akışkanların kullanımının faydalı olması için ısı performansındaki artışın basınç kayıplarını yenmesi ve verim faktörünün 1’in üzerine çıkması gereklidir.

Performans analizi sonuçları, tüm akışkanlarda açıkça bu durumun sağlanabildiğini göstermektedir. Bu hesaplamalar yapılırken, deneylerden elde edilen basınç kayıpları verilerinin kullanıldığını belirtmekte yarar vardır. Basınç kayıpları için ayrıca teorik hesaplama yapılmadan doğrudan deneysel veriler kullanılarak performans katsayılarının hesaplanmasının, daha gerçekçi bir yaklaşım olduğu düşünülmüştür. Çünkü akışkanların potansiyel ısı transfer katsayısı artışları, sistemdeki gerçek basınç kayıpları ile değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarında önemli bir nokta, artan debi ile beraber akışkanların taşınım katsayılarında sürekli bir artış gözlenirse de performansın aynı süreklilik ile artmıyor oluşudur. Belirli bir debi değerinin üzerine çıkıldığında, basınç kayıplarındaki artışlar ısı transferindeki artışların önüne geçmeye başladığından, verim faktörü de azalan yönde bir eğilime dönmüştür. Mevcut çalışma kapsamındaki akışkanlar ve deneysel şartlar için en kötü durumda dahi en düşük teorik performans artışı %20 olarak belirlenmiştir. Ancak Şekil 4.19’den edinilen ön görüş, debinin aynı şekilde arttırılmaya devam edilmesi halinde neden olacağı basınç kayıplarının ısı transfer performansının önüne geçeceği yönündedir. Bu nedenle akışkanların kullanılacağı çalışma şartlarının belirlenmesinde performans faktörü önemli bir yol göstericidir.

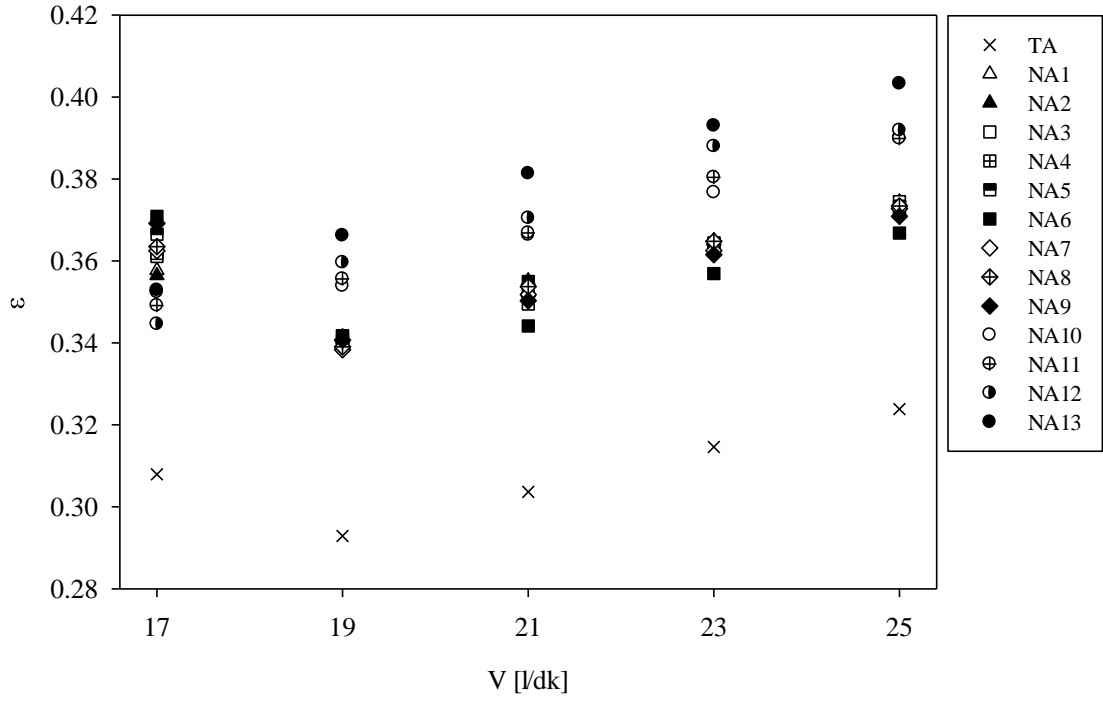
Etkenlik bilindiği üzere bir ısı değiştiricisinin ısı performansının ölçüsüdür. Herhangi bir ısı değiştiricisi ve akış düzenlemesi için sıcak akışkandan soğuk akışkana aktarılan ısı miktarının termodinamik olarak aktarılacak maksimum ısı miktarına oranı olarak tanımlanır (Shah ve Sekulic 2003). Maksimum ısı transfer miktarını belirleyen faktörler ise minimum ısı kapasitans (sıcak veya soğuk akışkandan hangisinde ise) ve  $NTU$  değeridir.  $NTU$ , bir dizayn parametresidir ve ısı değiştiricisinin boyutsuz ısı transfer büyüklüğünü belirtir. Başka bir deyişle  $NTU$ , ısı değiştirici boyutları için toplam ısı transfer katsayısı ve toplam yüzey alanını içeren birleştirilmiş bir parametre sunar.  $NTU$ ’nun küçük değerleri için etkenliğin de düşük olduğunu söylemek mümkündür.

Hesaplamalar sonucu bulunan  $NTU$  değerleri 0.4 ile 0.6 arasında değişmektedir. Bu değerler oldukça düşük gözükse de gerçek uygulamalarda da otomobil radyatörleri için Shah ve Sekulic (2003)  $NTU \approx 0.5$  değerinin oluştuğunu belirtmiş ve bu değer de yaklaşık olarak %40 civarında bir eşanjör etkenliğine karşılık geleceğini ifade etmiştir.

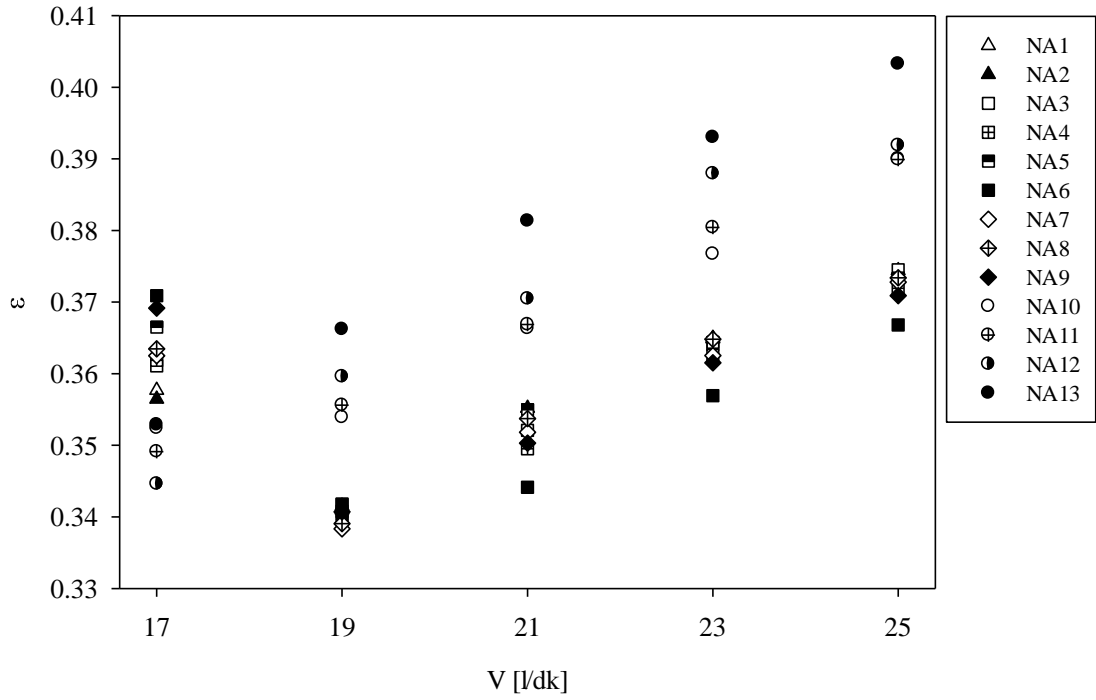


**Şekil 4.19.** Teorik analizden elde edilen verilere göre akışkanların performans analizi

Çalışmada kullanılan otomobil radyatörü için yapılan etkenlik hesabının sonuçları Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de daha önce sunulan grafiklere benzer şekilde temel akışkan ile karşılaştırmalı ve nanoakışkanlar için detayların gösterildiği grafikler şeklinde verilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre mevcut sistemin etkenlik değerlerinin literatürde ön görülen aralıklarda olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.20'de verilen karşılaştırmada temel akışkan kullanılması durumunda tüm nanoakışkanlara kıyasla daha düşük bir performans sergileneceği anlaşılmaktadır. Bu durum, sabit yüzey alanına sahip radyatör ve sabit ortam koşulları için karşılaştırma yapıldığı düşünüldüğünde, temel akışkanın ısı transfer özelliklerinin incelenen nanoakışkanlardan daha kötü olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca tüm akışkanlarda başlangıçta debi artışına bağlı olarak etkenlikte bir miktar azalma olsa da daha sonra akışkan hızının artışına bağlı olarak eşanjör etkenliği de yükselmiş ve literatürde ön görülen %40 değerine ulaşılmıştır. Nanoakışkanların performansları detaylı olarak değerlendirildiğinde ise (Şekil 4.21), diğer tüm sonuçlar ile paralel olarak burada da en yüksek değerlerin %0.3  $Ag$  katkılı nanopartikül grubunu içeren nanoakışkanlarda olabileceği görülmektedir. İlgili akışkanlarda etkenlik değeri konsantrasyon artışına bağlı olarak da düzenli bir şekilde artmıştır. Diğer partikül gruplarından elde edilen değerlerin ise birbirlerine oldukça yakın olacağı hesaplanmıştır. EK – 3'de detaylı analizler mevcuttur.



**Şekil 4.20.**  $\epsilon$ -NTU analizinden elde edilen radyatör etkinliğinin karşılaştırılması: tüm akışkanlar



**Şekil 4.21.**  $\epsilon$ -NTU analizinden elde edilen radyatör etkinliğinin karşılaştırılması: nanoakışkanlar



## 5. SONUÇLAR

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar yardımıyla otomobil radyatörlerinde nanoakışkanların kullanımına yönelik literatürde yer almayan veya henüz tam olarak netlik kazanmamış birçok nokta açığa kavuşturulmaya çalışılmıştır. Sonuçların hem nanoakışkanlar ile çalışan teorisyenler hem de ilgili mühendislik camiası tarafından ilgi görmesi beklenmektedir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda deneysel ve teorik analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

- Tez çalışması kapsamında hem deneysel hem de teorik analizleri gerçekleştirilen nanoakışkanların ısı transfer performansları, içermiş oldukları nanopartikül türüne göre karşılaştırıldığında sıralama şu şekilde oluşmuştur;

$$\%0.3 \text{ Ag katkı} > \%0.1 \text{ Ag katkı} > \text{Saf } TiO_2 > \%0.1 \text{ Cu katkı}$$

Sıralamanın bu şekilde oluşmasının nedeni, partiküllerin termofiziksel analiz sonuçlarına bakılarak anlaşılabilir.

- Özgül ısılar açısından bakıldığında aynı sıcaklık aralığında en yüksek özgül ısıya sahip grubun %0.3 *Ag* katkıli partiküller olduğu görülmüştür. Dolayısıyla *Ag* ile katkılamanın faydalı olduğu ve katkı oranı arttıkça iyileştirmenin arttığını söylemek mümkündür. *Cu* katkılamada ise hem özgül ısılar saf *TiO<sub>2</sub>*'ye göre azalmış, hem de kütlesi ve hacim diğer partikül gruplarına göre %20 artış göstermiştir. Dolayısıyla 4 farklı tür ve özellikte sentezlenen partiküller birbiri ile özgül ısı açısından kıyaslandığında, katkılamanın saf partiküle göre daha faydalı olabilmesi için katkılamada *Ag* metal iyonunun kullanılması ve katkılama oranında %0.3 değeri ve üzerine çıkılması gerektiği görülmektedir.
- Bir diğer belirleyici termofiziksel özellik olan ısı iletkenlik ölçümleri de bu sonuçları destekler niteliktedir. Temel akışkana kıyasla en yüksek artış, %0.3 *Ag* katkıli numunelerde, daha sonra ise %0.1 *Ag* katkıli numunelerde gözlenmiştir. Saf *TiO<sub>2</sub>* ve %0.1 oranında *Cu* katkıli numunelerde ise nerdeyse hiç artış görülememiştir.
- Akışkanlar dinamik viskozite değerleri açısından kıyaslandığında, temel akışkana göre tüm nanoakışkanların daha yüksek viskoziteye sahip olduğu görülmüştür. Konsantrasyon artışına bağlı olarak viskozite artışından en çok etkilenen grup, %0.1 *Ag* katkıli nanopartiküllerden oluşturulan nanoakışkanlar olmuştur. Katkılama oranının viskoziteye etkisi değerlendirildiğinde ise %0.1 *Ag* katkısından %0.3 *Ag* katkısına çıkıldığında aynı sıcaklıkta akışkanların viskozitelerinde önemli bir artış yaşanmadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla akışkanların viskoziteleri metal iyonu katkısından değil akışkan içerisindeki nanopartikül konsantrasyonundan doğrudan etkilenmektedir.

- Partiküllerin sentez aşamasında kazandıkları özelliklerin yanında nanoakışkan içerisindeki davranışları da önemlidir. Çünkü partikül özellikleri ne kadar iyi olursa olsun, temel akışkan içerisinde iyi bir şekilde dağılmadığında, partiküller bu özelliklerini akışkana kazandıramaz. Nanopartiküllerin dağılım davranışlarının tespiti amacıyla yapılan partikül boyut dağılım analizlerinin sonuçlarına göre, saf  $TiO_2$  partikülleri monodispers bir dağılım sergilemekte olup çapları 100-500 nm arasında değişmektedir. Metal katkısı ise bu dağılım yapısını değiştirmiş ve iki farklı boyuta sahip dağılımın olduğu görülmüştür.
- Deneysel düzeneğinde en yüksek belirsizliğe neden olan elemanın debimetre olduğu belirlenmiştir. Sistemde kullanılan debimetre, türbin tip çarklı bir mekanik debimetredir ve içerisinden geçen akışkanın neden olduğu yer değiştirme miktarına bağlı olarak oluşan çark hareketinden yola çıkarak akışkan debisinin belirlenmesi prensibi ile çalışır. Bu tip debimetrelerde hassasiyet yüksek olmadığı gibi, zaman içerisinde çarklarda biriken malzemeler nedeniyle de okuma sorunu yaratabilmektedirler. Dolayısıyla nanoakışkanlar gibi içerisinde her ne kadar nanometrik boyutlarda olsalar da hali hazırda metal partiküller barındıran ve çalışma koşullarına bağlı olarak çökme riski taşıyan akışkanlar ile çalışılan bir ortamda mekanik debimetrelerin kullanılması tavsiye edilmemektedir. Bunun yerine kütleli debi ölçümü yapan “Coriolis tip debimetre” bu tip sistemler için en ideal çözümdür. Ancak çalışma kapsamında olanaklar dahilinde bu tip bir debimetrenin kullanılması mümkün olmamıştır.
- Deneysel parametrelerin belirlenmesi ve nanoakışkanlar için optimum test koşullarına karar verilmesi, araştırmanın daha sağlıklı koşullar altında yapılması için önemlidir. Bu amaçla saf su, temel akışkan ve en düşük konsantrasyona sahip örnek bir nanoakışkan ile ön deneyler gerçekleştirilmiş ve optimum çalışma aralıklarının belirlenmesi ile beraber farklı nanoakışkanlar için deneylere devam edilmiştir. Tez çalışması kapsamında odaklanılan noktalardan bir tanesi çalışmada test edilen nanoakışkan çeşitliliğini mümkün olduğunca arttırmaktır. Literatürdeki çalışmalarda genellikle sadece bir ya da iki çeşit nanoakışkan kullanılırken, mevcut çalışmada 13 adet nanoakışkanın performansı karşılaştırılmıştır.
- Ön deneylerden deney düzeneğinin çalışma koşullarına ve ısı transfer davranışlarına dair bazı önemli veriler elde edilmiştir. İncelenen ilk parametre olan konsantrasyon değerlendirildiğinde, çalışma kapsamında incelenen %0.3, 0.5, 1 ve 2 oranlarında kütleli konsantrasyon miktarlarının farklı tür nanopartikül gruplarında farklı etkiler yarattığı görülmüştür. %0.1 *Ag* ve *Cu* katkılı gruplarda nanopartikül konsantrasyonundaki artış ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir. Saf  $TiO_2$  ve %0.3 *Ag* katkılı gruplarda ise durum tam tersidir. Bu sonuçlar hem deneysel taşınım ve toplam ısı transfer katsayıları hem de teorik analiz ile elde edilen *Mo* sayısı ve benzer şekilde taşınım katsayısı ifadelerine ait sonuçlarda gösterilmiştir.

- Deneysel parametrelerden yassı kesitli boru tarafı akışkan debisi, çalışma kapsamında temel parametre olarak ele alınmış ve oldukça geniş bir debi aralığında çalışılmıştır. Düşük debi aralığı için, akışkanların giriş çıkış sıcaklığı arasındaki farkın uygulamada kabul edilebilir değerlerin ( $\Delta T \cong 10^\circ C$ ) çok üzerine çıktığı görülmüştür. Bu nedenle boru tarafı akışkan debisi, kullanılan rezistansların ısıtma kapasitesinin izin verdiği ölçüde artırılarak  $\Delta T$  düşürülmüştür. Bu sayede radyatör borularının çok küçük hidrolik çapları ve boru sayısının fazlalığından dolayı oluşan düşük Re sayıları da artırılmış ve çalışmada 370 – 830 Re sayısı aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir.
- Sistemde aynı zamanda farklı hava hızlarına karşılık ısı transfer davranışında gerçekleşen değişimler de araştırılmıştır. Otomobil radyatörleri, hava tarafı yüzey alanı oldukça yüksek olan kompakt ısı değiştiricilerdir. Bu nedenle de hava tarafı akışkan debisi, sistemin ısı transfer performansına yassı kesitli boru içine kıyasla çok daha fazla etki etmektedir. Örneğin düşük hava debilerinde kanatçıkların yarattığı basınç kayıplarını yenmek zorlaşmakta, havanın akışkandan çekebildiği ısı miktarı azalarak radyatörün yüzey sıcaklıkları yükselmektedir. Hava hızının artırılması ile beraber bu kez radyatörün yüzey sıcaklığının azaldığı, havanın ortalama sıcaklığının düştüğü ve akışkanın ortalama sıcaklığı ile arasındaki farkın açıldığı net olarak anlaşılmaktadır. Böylece artan hava hızlarının ısı transferine olumlu etkisi gösterilmiştir.
- Nanoakışkanların sıcaklığa bağlı ısı transfer davranışları, literatürde üzerine en çok anlaşmazlığın yaşandığı parametrelerden biridir. Sıcaklık değişimine bağlı olarak termofiziksel özelliklerdeki değişimler ve aynı zamanda nanopartiküllerin akışkan içerisindeki hareketinde meydana gelen farklılıklar bu parametrenin incelenmesini oldukça karmaşık hale getirmektedir. Birçok faktörden etkilenebilen böylesine hassas bir parametrede meydana gelen değişimlerin doğru şekilde değerlendirilebilmesi için mümkün olan en eşdeğer koşullarda kıyaslanması gerekir. Ancak mevcut tez çalışmasında olduğu gibi büyük ve karmaşık sistemlerde farklı akışkanlar için farklı deney koşullarında sabit giriş sıcaklığını sağlamak oldukça zordur. Bu nedenle mevcut çalışmada sabit ısıtıcı gücü yaklaşımı ile çalışılmış ve akışkanlar aynı ısı gücü altında karşılaştırılmıştır.
- Akışkanlar ile yapılan deneysel analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, sabit ısı gücü altında artan akışkan debisi ve konsantrasyon ile beraber akışkanların logaritmik ortalama sıcaklık farklarında düşüş gözlenmiştir. Bu yönde bir değişim, ısı transferini arttırmaktadır. Bu değişimin deneysel olarak en etkin gözlemlendiği grup NA10'dan NA13'e kadar tanımlanmış olan %0.3 Ag katkılı nanopartikül grubundan oluşturulan nanoakışkanlardır. Bu grup akışkanlar arasından NA12 ve NA13, deneysel taşınım ve toplam ısı transfer katsayıları açısından da temel akışkana kıyasla artış göstermişlerdir. Özellikle NA13'de bu artış %11.094 kadardır.

- Sistemde yaşanan basınç kayıplarının incelenmesi sonucu debi artışına bağlı olarak artan akış hızlarının doğal bir sonucu olarak tüm akışkanlarda basınç kayıplarının arttığı görülmüştür. Ayrıca sistemde nanoakışkan kullanımı ile beraber pompalama güçlerinde de artış yaşanmıştır.
- Unutulmamalıdır ki ısı transferini iyileştirmek adına yapılan her çalışmada (akışkan hızının artırılması veya yüzeye kanatçık ilavesi gibi) doğal olarak bir miktar basınç kaybı yaşanacaktır. Ancak bu durum, sistemlerin ısı transfer performansını iyileştirmek adına yapılan çalışmalar için bir engel teşkil etmez. Önemli olan, sistemde yapılan değişikliklerde bu kayıpların etkisini göz ardı etmeden mühendislik yaklaşımıyla optimum noktaya ulaşmaya çalışmaktır. Bu hedefe ulaşma amacıyla sistemdeki basınç kayıpları ısı transferindeki değişimler ile bir arada değerlendirilmiş ve akışkanların kullanılabilirliği performans faktörü olarak adlandırılan bir kriter gereğince belirlenmiştir. İlgili kriterin deneysel analiz sonuçları yalnızca NA12 ve 13 için olumlu değerler verse de teorik analizden elde edilen sonuçlara göre tüm nanoakışkanların uygulamadaki problemler aşılabilir şekilde kullanılması halinde kullanılabilirlik faktörlerinin 1'in üzerinde olacağı anlaşılmaktadır.
- Çalışma kapsamında akışkanların deneysel analizlerine ek olarak teorik potansiyellerinin araştırması da gerçekleştirilmiştir. İlgili potansiyel araştırmasında akışkanlar Mo sayıları, taşınım ve toplam ısı transfer katsayıları, performans faktörü ve radyatör etkenliği açısından değerlendirilmiştir. Teorik analiz sonuçları, tüm parametreler açısından çalışma kapsamında araştırılan tüm nanoakışkanların temel akışkana kıyasla daha iyi özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçların deneysel analizlerde elde edilememesinin nedeni başta çökme problemi olmak üzere uygulamada yaşanan sorunlardır.

Elde edilen sonuçlar ışığında öncelikli olarak nanoakışkanların otomobil radyatörlerinde kullanımı ve daha geniş bir perspektifle de nanoakışkanların ısı uygulamaları konularında ilerleyen çalışmalara yol göstermesi ümit edilen bazı önemli noktalar ve çözüm önerileri ise şu şekilde sıralanabilir;

4. Parametrelerin optimizasyon gerekliliğinden dolayı sabit tutulan hava hızı, nanopartikül şekil ve boyut etkisi ile akışkanların giriş sıcaklıkları hala literatürde üzerinde karar birliği oluşmamış ve araştırma ihtiyacının olduğu bir eksiklik olarak bulunmaktadır. Mevcut çalışmanın sonuçlarına göre en yüksek potansiyele sahip nanoakışkan NA13 olarak belirlenmiştir. Araştırma ihtiyacının bulunduğu konular optimum deneysel şartlar altında NA13 kullanılarak araştırılmalıdır.

5. Nanoakışkanların özellikle sıcaklığa bağlı davranışlarının ısı transfer çalışmaları için oldukça önemli olduğu düşünülmektedir. Mevcut çalışma kapsamındaki deneysel koşullar ilgili parametrenin araştırılmasına olanak sağlamamış olsa da bu parametrenin ilerleyen çalışmalarda veya farklı araştırmacılar tarafından daha küçük ve hassas sıcaklık kontrolü yapılabilen düzenekler ile mutlaka araştırılması ve akışkanların termodinamik yönden incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.
6. Analizlerde önemli bir parametre de akışın türüdür. Radyatör geometrisinin ve akışkan özelliklerinin sonucu olarak boru tarafında akış hidrodinamik olarak gelişmiş, ısıl olarak gelişmekte olan laminer akış durumundadır. Kullanılan akışkanların Pr sayıları oldukça yüksek olduğundan ısıl giriş uzunlukları da uzamaktadır. Bu nedenlerle akışkanların ısı transfer performansları incelenirken gelişmekte olan bölgeler için oluşturulan ifadelerin kullanılmasına dikkat edilmeli ve bu bölgedeki akışkan davranışlarının tam gelişmiş bölgeden farklı olacağının unutulmaması gerekmektedir.
7. Akışkanlarda kararlılığı sağlamak üzere herhangi bir kimyasal madde kullanılmamasının sonucu olarak özellikle katkılanmış partiküllerde katkılama ile artan kristal kafes boyutları ve yüzey alanları nedeniyle partiküllerin dağılım davranışlarında boyutsal artışlar gözlenmiştir. Bu durum ilgili akışkanlardaki nanopartiküllerin kümeleşerek çökme eğilimlerinin arttığını göstermektedir. Karakterizasyon sonucu oldukça iyi özellikler gösteren bu akışkanların dağılım davranışları konusunda iyileştirmeler yapılması halinde ısı transfer performanslarının önemli oranda artacağı düşünülmektedir.
8. Nanoakışkanların teorik analizlerden elde edilen potansiyellerine deneysel çalışmalarda ulaşamamasının birçok farklı sebepten kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeplerin başında da çökme sorunu gelmektedir. Çökme problemine karşılık uygulanabilecek çözüm yöntemleri mevcuttur ve bu yöntemlerin uygulanması halinde akışkanların gerçek potansiyellerine ulaşacakları düşünülmektedir.
9. Çökme sorununa çözüm olarak; akışkanların pH değerlerinin nötrden asidik veya bazik ortama doğru taşınarak, partiküllerin çözelti içerisinde daha rahat askıda kalması sağlanabilir, sentezlenen partiküllere yüzey modifikasyon işlemleri uygulanabilir, ultrasonik banyo süreleri akışkana göre optimize edilerek kümeleşme davranışının önüne geçilebilir ve akışkan içerisine belirli oranlarda yüzey etken madde eklenebilir.

10. Performansının iyi olduğu düşünölen akışkanların gerçek sistemlerde ticari olarak kullanılabilmesi için bu akışkanların tekrarlanabilirlik analizlerinin yapılması gereklidir. Bu analizler; aynı akışkan kullanılarak aynı koşullar altında gerçekleştirilecek olan deneyi 1 hafta, 1 ay, 3 ay gibi uygun zaman aralıkları ile tekrarlayarak elde edilen sonuçları karşılaştırmak yoluyla yapılmalıdır. Geçen süre zarfında sonuçlarda meydana gelen olası değişimler değerlendirilerek akışkanların kullanımları test edilmelidir. Yüksek verimli soğutma sıvılarının ticari olarak kullanımının sağlanması, otomobillerdeki soğutma sisteminin boyutlarının küçültülmesine ve dolayısıyla daha düşük yakıt tüketimi elde edilerek ulaşım endüstrisi gibi çok geniş bir kullanım alanına yönelik önemli bir iyileştirme yapılmasına da olanak sağlayacaktır. Elbette geliştirilen bir ürünün ticari kullanılabilirliği için gerekli bir diğer inceleme de ekonomik analizdir. Tüm maliyetler dikkate alınarak yapılacak bir ekonomik analiz, ürüne dönüşme sürecinde oldukça önemli olacaktır. Mevcut tez çalışmasının sonuçları dikkate alındığında, diğer akışkanlar ile kıyaslandığında her yönden en iyi performansı verdiği belirlenen %2 konsantrasyona sahip %0.3 *Ag* katkı *TiO<sub>2</sub>* içeren nanoakışkan (NA13) için bu analizlerin gerçekleştirilmesi durumunda, ilgili akışkanın gerçek sistemlerde kullanılma potansiyelinin yüksek olduğu düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abbasian Arani, A. A. and Amani, J. 2013. Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 520–533. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.08.014>
- Abdolbaqi, M. K., Azmi, W. H., Mamat, R., Sharma, K. V. and Najafi, G. 2016. Experimental investigation of thermal conductivity and electrical conductivity of BioGlycol-water mixture based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 102, 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.074>
- Ali, H. M., Ali, H., Liaquat, H., Bin Maqsood, H. T. and Nadir, M. A. 2015a. Experimental investigation of convective heat transfer augmentation for car radiator using ZnO-water nanofluids. *Energy*, 84, 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.103>
- Ali, H. M., Azhar, M. D., Saleem, M., Saeed, Q. S. and Saieed, A. 2015b. Heat transfer enhancement of car radiator using aqua based magnesium oxide nanofluids. *Thermal Science*, 19(6), 2039–2048. <https://doi.org/10.2298/TSCI150526130A>
- Ali, M., El-Leathy, A. M. and Al-Sofyany, Z. 2014. The effect of nanofluid concentration on the cooling system of vehicles radiator. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2014/962510>
- Amiri, A., Shanbedi, M., Chew, B. T., Kazi, S. N. and Solangi, K. H. 2016. Toward improved engine performance with crumpled nitrogen-doped graphene based water-ethylene glycol coolant. *Chemical Engineering Journal*, 289, 583–595. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.12.083>
- Angadi, V. M., Nagaraj, R. and Hebbal, O. D. 2014. CFD Analysis of heat transfer enhancement of a car radiator using nanofluid as a coolant. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(8), 1058–1063.
- ASHRAE. 2007. Physical properties of secondary coolants (brines). *Ashrae Handbook*, 1, 1953.
- Azmi, W. H., Sharma, K. V., Mamat, R., Najafi, G. and Mohamad, M. S. 2016. The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1046–1058. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.081>
- Bi, S. shan, Shi, L. and Zhang, L. li. 2008. Application of nanoparticles in domestic refrigerators. *Applied Thermal Engineering*, 28(14–15), 1834–1843. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.11.018>
- Bigdeli, M. B., Fasano, M., Cardellini, A., Chiavazzo, E. and Asinari, P. 2016. A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1615–1633. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.027>
- Bowman, R. A. 1936. Mean temperature difference correction in multipass exchangers, (4). <https://doi.org/10.1021/ie50317a009>
- Bozorgan, N., Krishnakumar, K. and Bozorgan, N. 2013. The performance evaluation of

- overall heat transfer and pumping power of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / water nanofluid as coolant in automotive diesel engine radiator. *EFTİMİE MURGU*, (1), 35–48.
- Burunkaya, E., Akarsu, M., Erdem Çamurlu, H., Kesmez, Ö., Yeşil, Z., Asiltürk, M. and Arpaç, E. 2013. Production of stable hydrosols of crystalline TiO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized at relatively low temperatures in diverse media. *Applied Surface Science*, 265, 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.003>
- Canbolat, A. S., Türkan, B., Yamankaradeniz, R., Can, M. ve Etem, B. 2014. Otomobil radyatörlerinde boru sayısının ısı performansına ve etkinliğe etkisinin incelenmesi. *7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi* (ss. 1–7).
- Çengel, Y. 2014. Heat and mass transfer: fundamentals and applications. <https://books.google.com.tr/books?id=AHdzCgAAQBAJ>
- Çengel, Y. and Cimbala, J. M. 2006. Fluid mechanics: fundamentals and applications. *Fluid Mechanics: with problems and solutions, and an Aerodynamic Laboratory*. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Chakraborty, S., Mukherjee, J., Manna, M., Ghosh, P., Das, S. and Denys, M. B. 2012. Effect of Ag nanoparticle addition and ultrasonic treatment on a stable TiO<sub>2</sub> nanofluid. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(5), 1044–1050. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.01.016>
- Chavan, D. and Pise, A. T. 2014. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid as a coolant. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6.
- Chen, H., Ding, Y., He, Y. and Tan, C. 2007. Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids. *Chemical Physics Letters*, 444(4–6), 333–337. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2007.07.046>
- Choi, S. U. S. and Eastman, J. A. 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 66(March), 99–105. <https://doi.org/10.1115/1.1532008>
- Dehghandokht, M., Khan, M. G., Fartaj, A. and Sanaye, S. 2011. Flow and heat transfer characteristics of water and ethylene glycol-water in a multi-port serpentine meso-channel heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(8), 1615–1627. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.03.004>
- Delavari, V. and Hashemabadi, S. H. 2014. CFD simulation of heat transfer enhancement of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ethylene glycol nanofluids in a car radiator. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 378–388.
- Devireddy, S., Mekala, C. S. R. and Veeredhi, V. R. 2016. Improving the cooling performance of automobile radiator with ethylene glycol water based TiO<sub>2</sub> nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.002>
- Dieck, R., Steele, W. and Osolsobe, G. 2005. Test Uncertainty. *American Society of Mechanical Engineers (ASME PTC 1)*. New York:
- El Bécaye Maïga, S., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G. and Galanis, N. 2005. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26(4 SPEC. ISS.), 530–546.



- Elbadawy, I., Elsebay, M., Shedid, M. and Fatouh, M. 2018. Reliability of nanofluid concentration on the heat transfer augmentation in engine radiator. *International Journal of Automotive Technology*, 19(2), 233–243.
- Elias, M. M., Mahbubul, I. M., Saidur, R., Sohel, M. R., Shahrul, I. M., Khaleduzzaman, S. S. and Sadeghipour, S. 2014. Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles suspended in car radiator coolant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 54, 48–53.
- Elsebay, M., Elbadawy, I., Shedid, M. H. and Fatouh, M. 2016. Numerical resizing study of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *Applied Mathematical Modelling*, 40(13–14), 6437–6450. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.01.039>
- Feynman, R. P. 1992. There's Plenty of Room at the Bottom. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1(1), 60–66. <https://doi.org/10.1109/84.128057>
- Ganvir, R. B., Walke, P. V. and Kriplani, V. M. 2017. Heat transfer characteristics in nanofluid-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(November 2016), 451–460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.010>
- Goudarzi, K. and Jamali, H. 2017. Heat transfer enhancement of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-EG nanofluid in a car radiator with wire coil inserts. *Applied Thermal Engineering*, 118, 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.016>
- Graetz, L. 1885. Ueber die Wärmeleitungsfähigkeit von Flüssigkeiten. *Annalen der Physik*, 261(7), 337–357. <https://doi.org/10.1002/andp.18852610702>
- Gupta, M., Singh, V., Kumar, R. and Said, Z. 2017. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(March), 638–670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.073>
- Haghighi, E. B., Utomo, A. T., Ghanbarpour, M., Zavareh, A. I. T., Poth, H., Khodabandeh, R. and Palm, B. E. 2014. Experimental study on convective heat transfer of nanofluids in turbulent flow: Methods of comparison of their performance. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.05.019>
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D. and Lu, H. 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(11–12), 2272–2281. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024>
- Heris, S. Z., Shokrgozar, M., Poorpharhang, S., Shanbedi, M. and Noie, S. H. 2014. Experimental Study of Heat Transfer of a Car Radiator with CuO/Ethylene Glycol-Water as a Coolant. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 35(5), 677–684. <https://doi.org/10.1080/01932691.2013.805301>
- Holman, J. P. 1994. Experimental methods for engineers. *Experimental Thermal and Fluid Science* (C. 9). [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(94\)90118-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(94)90118-X)  
[https://oxychemcorporation.com.ph/radiator-coolant/\(y.y.\)](https://oxychemcorporation.com.ph/radiator-coolant/(y.y.))  
<https://oxychemcorporation.com.ph/radiator-coolant/> [Erişim: 18.05.2018].
- Huminc, G. and Huminc, A. 2013. Numerical analysis of laminar flow heat transfer of nanofluids in a flattened tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.03.003>

- Hussein, A. M., Bakar, R. A. and Kadirgama, K. 2014a. Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2013.12.001>
- Hussein, A. M., Bakar, R. A., Kadirgama, K. and Sharma, K. V. 2014b. Heat transfer augmentation of a car radiator using nanofluids. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 50(11), 1553–1561. <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1369-2>
- Hussein, A. M., Bakar, R. A., Kadirgama, K. and Sharma, K. V. 2014c. Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 53, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.003>
- Hussein, A. M., Sharma, K. V., Bakar, R. A. and Kadirgama, K. 2013. The effect of cross sectional area of tube on friction factor and heat transfer nanofluid turbulent flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 47, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.06.007>
- Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. and DeWitt, D. P. 2011. Fundamentals of heat and mass transfer. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Iranidokht, V., Hamian, S., Mohammadi, N. and Shafii, M. B. 2013. Thermal conductivity of mixed nanofluids under controlled pH conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 74, 63–71.
- Jang, S. P. and Choi, S. U. S. 2004. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, 84(21), 4316–4318. <https://doi.org/10.1063/1.1756684>
- Jang, S. P. and Choi, S. U. S. 2006. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 26(17–18), 2457–2463. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.036>
- Kays, W. M. and Crawford, M. E. 1980. Convective heat and mass transfer. *McGraw-Hill*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kays, W. M. and London, A. L. 1984. Compact heat exchangers. *McGraw-Hill, New York, USA*. [https://doi.org/McGraw-Hill series in mechanical engineering](https://doi.org/McGraw-Hill%20series%20in%20mechanical%20engineering)
- Khan, M. S. and Dil, T. 2017. Heat transfer enhancement of automobile radiator using H<sub>2</sub>O-CuO nanofluid. *AIP Advances*, 7(4). <https://doi.org/10.1063/1.4982669>
- Kline, S. J. and McClintock, F. A. 1953. Uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*.
- Kole, M. and Dey, T. K. 2010a. Thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid based on car engine coolant. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(31). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/31/315501>
- Kole, M. and Dey, T. K. 2010b. Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(6), 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.12.009>
- Leader, T., Services, F. T. and Nadu, T. 2012. Performance Improvement of a louver-finned automobile radiator using conjugate thermal CFD analysis, 1(8), 1–13.
- Leong, K. Y., Saidur, R., Kazi, S. N. and Mamun, A. H. 2010. Performance investigation

- of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). *Applied Thermal Engineering*, 30(17–18), 2685–2692. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.019>
- Lu, J., Chen, Z., Pan, F., Curtiss, L. A. and Amine, K. 2016. The role of nanotechnology in the development of battery materials for electric vehicles. *Nature Nanotechnology*, 11, 1031–1038.
- Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I. and Wongwises, S. 2013. A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 582–594.
- Mahian, O., Pop, I., Sahin, A. Z., Oztop, H. F. and Wongwises, S. 2013. Irreversibility analysis of a vertical annulus using TiO<sub>2</sub>/water nanofluid with MHD flow effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.001>
- Mo, S., Chen, Y., Jia, L. and Luo, X. 2012. Investigation on crystallization of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids and deionized water. *Applied Energy*, 93(100), 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.014>
- Moffat, R. J. 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), 3–17. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X)
- Naraki, M., Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H. and Vermahmoudi, Y. 2013. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. *International Journal of Thermal Sciences*, 66, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.013>
- Neethirajan, S. and Jayas, D. S. 2011. Nanotechnology for the food and bioprocessing industries. *Food and Bioprocess Technology*, 4(1), 39–47. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0328-2>
- Nieh, H. M., Teng, T. P. and Yu, C. C. 2014. Enhanced heat dissipation of a radiator using oxide nano-coolant. *International Journal of Thermal Sciences*, 77, 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.11.008>
- Özışık, M. N. 1977. Basic heat transfer. *McGraw-Hill, New York, USA*. McGraw-Hill. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(90\)90027-3](https://doi.org/10.1016/0307-904X(90)90027-3)
- Pak, B. C. and Cho, Y. I. 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151–170. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>
- Park, K. J. and Jung, D. 2007. Boiling heat transfer enhancement with carbon nanotubes for refrigerants used in building air-conditioning. *Energy and Buildings*, 39(9), 1061–1064. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.12.001>
- Paul, G., Pal, T. and Manna, I. 2010. Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. *Journal of Colloid and Interface Science*, 349(1), 434–437. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.05.086>
- Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Hoseini, S. M. and Jamnani, M. S. 2011. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based

- nanofluids as a new coolant for car radiators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(9), 1283–1290.
- Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Jamnani, M. S. and Hoseini, S. M. 2011. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 31(10), 1833–1838. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.02.029>
- Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Naraki, M. and Vermahmoudi, Y. 2013. Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.013>
- Ray, D. R. and Das, D. K. 2014. Superior performance of nanofluids in an automotive radiator. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6(4), 041002. <https://doi.org/10.1115/1.4027302>
- Rayatzadeh, H. R., Saffar-Avval, M., Mansourkiaei, M. and Abbassi, A. 2013. Effects of continuous sonication on laminar convective heat transfer inside a tube using water-TiO<sub>2</sub> nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 48, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.01.016>
- Razi, P. and Saedinia, M. 2011. Pressure drop and thermal characteristics of CuO-base oil nanofluid laminar flow in flattened tubes under constant heat flux. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(7), 964–971. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.04.010>
- Sahoo, R. R., Ghosh, P. and Sarkar, J. 2017. Performance comparison of various coolants for louvered fin tube automotive radiator. *Thermal Science*, 21(6), 2871–2881. <https://doi.org/10.2298/TSCI150219213S>
- Sahoo, R. R. and Sarkar, J. 2017. Heat transfer performance characteristics of hybrid nanofluids as coolant in louvered fin automotive radiator. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 53(6), 1923–1931. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1951-x>
- Sahoo, S. K., Parveen, S. and Panda, J. J. 2007. The present and future of nanotechnology in human health care. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 3(1), 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2006.11.008>
- Saidur, R., Leong, K. Y. and Mohammad, H. A. 2011. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1646–1668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>
- Sajedi, R., Jafari, M. and Taghilou, M. 2016. An experimental study on the effect of conflict measurement criteria for heat transfer enhancement in nanofluidics. *Powder Technology*, 297, 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.018>
- Samira, P., Saeed, Z. H., Motahare, S. and Mostafa, K. 2015. Pressure drop and thermal performance of CuO/ethylene glycol (60%)-water (40%) nanofluid in car radiator. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(4), 609–616. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0244-7>
- Sanchez, F. and Sobolev, K. 2010. Nanotechnology in concrete - A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060–2071.

- Sarkar, J., Ghosh, P. and Adil, A. 2015. A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.023>
- Serrano, E., Rus, G. and García-Martínez, J. 2009. Nanotechnology for sustainable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2373–2384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.003>
- Shah, R. K. and Sekulic, D. P. 2003. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Shahrul, I. M., Mahbubul, I. M., Khaleduzzaman, S. S., Saidur, R. and Sabri, M. F. M. 2014. A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.081>
- Sharma, V., Kumar, R. N., Thamilarasan, K., Bhaskar, G. V. and Devra, B. 2014. Heat reduction from IC engine by using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid in engine cooling system. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 03(04), 173–177.
- Sheikhzadeh, G. A., Fakhari, M. M. and Khorasanizadeh, H. 2017. Experimental investigation of laminar convection heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ethylene glycol-water nanofluid as a coolant in a car radiator. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10(1), 209–219. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.73.238.25768>
- Sieder, E. N. and Tate, G. E. 1936. Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. *Industrial and Engineering Chemistry*, 28(12), 1429–1435. <https://doi.org/10.1021/ie50324a027>
- Sokhal, G. S., Gangacharyulu, D. and Bulasara, V. K. 2018. Heat transfer and pressure drop performance of alumina–water nanofluid in a flat vertical tube of a radiator. *Chemical Engineering Communications*, 205(2), 257–268. <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1387853>
- Sonage, B. K. and Mohanan, P. 2015. Miniaturization of automobile radiator by using zinc-water and zinc oxide-water nanofluids. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(5), 2177–2185. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0438-x>
- Srikant, R. R., Rao, D. N., Subrahmanyam, M. S. and Krishna, V. P. 2009. Applicability of cutting fluids with nanoparticle inclusion as coolants in machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 223(2), 221–225. <https://doi.org/10.1243/13506501JET463>
- Subhedar, D. G., Ramani, B. M. and Gupta, A. 2017. Experimental investigation of overall heat transfer coefficient of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water–Mono ethylene glycol nanofluids in an automotive radiator. *Heat Transfer - Asian Research*, 46(7), 863–877. <https://doi.org/10.1002/htj.21247>
- Taniguchi, N. 1974. On the basic concept of nanotechnology. *Proceedings of the International Conference on Production Engineering* (ss. 18–23). Tokyo: Japan Society of Precision Engineering.
- Teng, T. P., Hung, Y. H., Jwo, C. S., Chen, C. C. and Jeng, L. Y. 2011. Pressure drop of TiO<sub>2</sub> nanofluid in circular pipes. *Particuology*, 9(5), 486–491. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2011.05.001>

- Teng, T. P., Hung, Y. H., Teng, T. C., Mo, H. E. and Hsu, H. G. 2010. The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 30(14–15), 2213–2218.
- Tijani, A. S. and Sudirman, A. S. bin. 2018. Thermos-physical properties and heat transfer characteristics of water/anti-freezing and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO based nanofluid as a coolant for car radiator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.083>
- Timofeeva, E., Smith, D., Yu, W., Routbort, J. and Singh, D. 2009. Nanofluid development for engine cooling systems.
- Turgut, A., Sağlanmak, Ş. ve Doğanay, S. 2016. Nanoakışkanların ısı iletkenlik ve viskozitesinin deneysel incelenmesi: tanecik boyutu etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(1), 95–103.
- Vajjha, R. S. and Das, D. K. 2012. A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(15–16), 4063–4078. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.048>
- Vajjha, R. S., Das, D. K. and Mahagaonkar, B. M. 2009. Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory. *Petroleum Science and Technology*, 27(6), 612–624. <https://doi.org/10.1080/10916460701857714>
- Vajjha, R. S., Das, D. K. and Namburu, P. K. 2010. Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31(4), 613–621. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.016>
- Vajjha, R. S., Das, D. K. and Ray, D. R. 2015. Development of new correlations for the Nusselt number and the friction factor under turbulent flow of nanofluids in flat tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 353–367. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.018>
- Vermahmoudi, Y., Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H. and Naraki, M. 2014. Experimental investigation on heat transfer performance of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in an air-finned heat exchanger. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 44, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2013.10.002>
- Vithayasai, S., Kiatsiriroat, T. and Nuntaphan, A. 2006. Effect of electric field on heat transfer performance of automobile radiator at low frontal air velocity. *Applied Thermal Engineering*, 26(17–18), 2073–2078.
- Wang, X. Q. and Mujumdar, A. S. 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>
- Xuan, Y. and Roetzel, W. 2000. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701–3707. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00369-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00369-5)
- Yu, W., France, D., Choi, S. and Routbort, J. 2007. Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications. *Renewable Energy*, Medium: ED. <https://doi.org/10.2172/919327>

- Yu, W., France, D. M., Timofeeva, 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(21). <https://doi.org/10.1063/1.3435487>

## 7. EKLER

## EK – 1 Literatür çalışmalarının karşılaştırılması

Çizelge 7.1. Farklı yaklaşımlar ile yapılmış literatür çalışmalarında elde edilen bazı örnek sonuçların karşılaştırılması

Sabit Reynolds Sayısı			Sabit Hacimsel Debi		
Çalışma	Parametre	Artış veya Azalış [%]	Çalışma	Parametre	Artış veya Azalış [%]
Peyghambarzadeh vd. (2011a)	$Nu$	40 ↑	Naraki vd. (2013)	$U [W/m^2K]$	8 ↑
Hussein vd. (2014a)	$Nu$	56 ↑	Angadi vd. (2014)	$U [W/m^2K]$	3.28 ↑
Leong vd. (2010)	$A_{yüzey} [m^2]$	18.7 ↓	Sharma vd. (2014)	$A_{yüzey} [m^2]$	12 - 18 ↓
Chavan ve Pise (2014)	$h [W/m^2K]$	45 ↑	Nieh vd. (2014)	$\eta$	27.2 ↑
				$W_{pompa} [W]$	2.5 ↑
Heris vd. (2014)	$Nu$	55 ↑	H. M. Ali vd. (2015a)	$Q_{akışkan} [W]$	46 ↑
Sonage ve Mohanan (2015)	$A_{yüzey} [m^2]$	24 ↓	H. M. Ali vd. (2015b)	$Q_{akışkan} [W]$	31 ↑
Devireddy vd. (2016)	$Nu$	37 ↑	R. R. Sahoo vd. (2017)	$A_{yüzey} [m^2]$	2 ↓
Sokhal vd. (2018)	$h [W/m^2K]$	31 ↑	Sheikhzadeh vd. (2017)	$Nu$	9 ↑
Elbadawy vd. (2018)	$h [W/m^2K]$		Subhedar vd. (2017)	$A_{yüzey} [m^2]$	36.69 ↓
	$Al_2O_3/su$	45 ↑			
	$CuO/su$	38 ↑			



**EK – 2** Örnek bir deney seti için veriler ve analiz sonuçları

**Çizelge 7.2.** Örnek bir deney seti (25 l/dk yassı kesitli boru içi akışkan debisi ve 3500 m<sup>3</sup>/h sabit hava debisi) için deneylerden elde edilen veriler ve analiz sonuçları

<i>Akışkan</i>	$T_g$ [°C]	$Q_{akışkan}$ [W]	$\Delta T_{ln}$ [°C]	$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	$h_{akışkan}$ [W/m <sup>2</sup> K]	$k_{akışkan}$ [W/mK]	$Nu_{akışkan}$	$\Delta P_{pompa}$ [bar]	$\eta$
TA	44.3	7173.63	12.881	119.41	915.40	0.384000	8.82	0.192	-
NA1	44.5	7323.34	13.907	112.91	856.41	0.384000	8.25	0.204	0.881
NA2	44.5	7322.99	13.302	118.04	902.75	0.384000	8.70	0.192	0.986
NA3	45.0	7276.69	13.236	117.87	901.30	0.386688	8.62	0.196	0.965
NA4	44.1	6933.20	12.948	114.81	873.16	0.387456	8.34	0.206	0.889
NA5	44.7	7148.37	13.077	117.20	895.20	0.388224	8.53	0.198	0.948
NA6	41.9	6490.92	12.819	108.57	817.71	0.384000	7.88	0.202	0.849
NA7	44.1	7961.52	14.427	118.32	906.02	0.384000	8.73	0.194	0.980
NA8	43.7	7403.73	13.929	113.97	866.42	0.384000	8.35	0.197	0.922
NA9	42.7	7170.50	13.843	111.06	840.53	0.384768	8.08	0.197	0.895
NA10	44.9	7767.18	14.468	115.11	877.14	0.385920	8.41	0.205	0.897
NA11	44.3	7876.08	14.254	118.47	907.84	0.386688	8.69	0.199	0.957
NA12	43.4	7745.21	13.810	120.25	924.44	0.391296	8.74	0.200	0.969
NA13	44.9	8060.42	13.104	131.89	1034.07	0.393216	9.73	0.199	1.090

**EK – 3** Örnek bir teorik hesaplama için veriler ve analiz sonuçları

**Çizelge 7.3.** Örnek bir teorik hesaplama (25 l/dk yassı kesitli boru içi akışkan debisi ve 3500 m<sup>3</sup>/h sabit hava debisi) için veriler ve analiz sonuçları

<i>Akışkan</i>	<i>Re</i> <sub>akışkan</sub>	<i>Pr</i> <sub>akışkan</sub>	<i>X<sub>H</sub></i> [cm]	<i>X<sub>L</sub></i> [cm]	<i>Nu</i> <sub>akışkan</sub>	<i>h</i> <sub>akışkan</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	<i>U</i> [W/m <sup>2</sup> K]	<i>η</i>	<i>ε</i>	<i>Mo</i>
TA	496.34	19.73	9.18	181.21	8.36	867.61	114.18	-	0.324	-
NA1	555.36	17.64	10.27	181.22	10.89	1130.14	141.74	1.226	0.374	1.0460
NA2	506.73	19.33	9.37	181.21	10.89	1130.13	141.79	1.303	0.374	1.0083
NA3	571.54	16.91	10.57	178.81	10.85	1133.50	142.13	1.280	0.375	1.0636
NA4	612.63	15.64	11.33	177.27	10.82	1132.80	142.08	1.217	0.372	1.0939
NA5	722.39	13.09	13.36	174.96	10.78	1130.60	141.83	1.264	0.373	1.1686
NA6	564.30	16.39	10.44	171.10	10.70	1110.82	139.76	1.217	0.367	1.0419
NA7	544.23	17.76	10.07	178.77	10.85	1125.54	141.23	1.284	0.373	1.0316
NA8	595.22	15.99	11.01	176.02	10.79	1120.32	140.68	1.259	0.373	1.0626
NA9	712.53	12.91	13.18	170.14	10.69	1111.17	139.70	1.248	0.371	1.1284
NA10	580.55	17.11	10.74	183.75	10.93	1140.52	142.64	1.231	0.390	1.0782
NA11	625.46	16.07	11.57	185.95	10.97	1146.89	143.30	1.275	0.390	1.1196
NA12	673.40	15.10	12.46	188.08	11.01	1164.53	145.03	1.289	0.392	1.1745
NA13	826.13	13.01	15.28	198.84	11.20	1189.94	147.59	1.323	0.403	1.3129

## ÖZGEÇMİŞ

**SEZGİ KOÇAK SOYLU**

**sezgikocak@akdeniz.edu.tr**



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2012-2018	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2009-2012	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2004-2009	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi 2010 – 2018	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
------------------------------------	--

### ESERLER

**Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler (SCI, SSCI, Arts and Humanities)**

- Koçak Söylü S.**, Atmaca İ., "A Study on Air-Cooled Chillers with Evaporatively Cooled Condenser for 3 Types of Climate", *Journal of Thermal Science and Technology*, vol.36, pp.1-8, 2016.

2. Atmaca İ., **Koçak Soylu S.**, "Theoretical Energy and Exergy Analyses of Solar Assisted Heat Pump Space Heating System", *Thermal Science*, vol.18, pp.417-427, 2014.
3. Yıldırım C., **Koçak Soylu S.**, Atmaca İ., Solmuş İ., "Experimental Investigation of a Portable Desalination Unit Configured by a Thermoelectric Cooler", *Energy Conversion and Management*, vol.85, pp.140-145, 2014.
4. Ünal N., Çamurlu H.E., **Koçak Soylu S.**, Duztepe G., "Effect of External Ultrasonic Treatment on Hypereutectic Cast Aluminium-Silicon Alloy", *International Journal of Cast Metals Research*, vol.25, pp.246-250, 2012.

#### **Diğer dergilerde yayımlanan makaleler**

1. Atmaca İ., **Koçak Soylu S.**, Kemer M., "İklmlendirilen Ortamlarda Soğuk Yüzeylerin Isıl Konfor Üzerine Etkisinin İncelenmesi", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, cilt.159, ss.84-94, 2017.
2. **Koçak Soylu S.**, Atmaca İ., Doğan A., "Investigation of Evaporative Cooling Effectiveness on the Performance of Air-Cooled Chillers", *The Online Journal of Science and Technology*, vol.6, pp.36-39, 2016.
3. Atmaca İ., **Koçak Soylu S.**, "İşletmelerde Farklı Metabolik Aktivite Düzeylerinde Çalışanlar İçin Isıl Konfor Bölgelerinin Tespiti", *Mühendis ve Makina*, cilt.54, ss.26-32, 2013.
4. **Koçak Soylu S.**, Şaşmaz C., Atmaca İ., "Farklı Derece-Gün Bölgeleri için TS825'e Uygun Olarak Yalıtılan Bir Alışveriş Merkezinin Teknik ve Ekonomik Yönden İncelenmesi", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, cilt.128, ss.76-88, 2012.

#### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler**

1. **Koçak Soylu S.**, Çarkacı Ç., Atmaca İ., Doğan A., "Investigation of a Solar Assisted Water Source Heat Pump System for Different Solar Radiations", *12<sup>th</sup> REHVA World Congress: CLIMA 2016*, Aalborg, DENMARK, 22-25 May 2016, vol.3, pp.1-1.
2. **Koçak Soylu S.**, Atmaca İ., Doğan A., "Investigation of Evaporative Cooling Effectiveness on the Performance of Air - Cooled Chillers", *International Science and Technology Conference ISTEK 2015*, St. Petersburg, RUSSIA, 2-4 September 2015, pp.803-806.

3. **Koçak Soylu S.**, Atmaca İ., Doğan A., "An Assessment of the Heat Transfer Applications of Nanofluids", *3<sup>rd</sup> International Scientific Conference on Engineering Manufacturing and Advanced Technologies MAT 2014*, Mostar, BOSNIA-HERZEGOVINA, 18-20 September 2014, pp.46-53.
4. Atmaca İ., **Koçak Soylu S.**, Doğan A., "Determination of The Optimum Thermal Comfort Zone for Work Safety of The Employees Working in Manufacturing Sector", *International Science and Technology Conference ISTEK 2013*, Rome, ITALY, 25-27 June 2013, pp.359-364.
5. **Koçak Soylu S.**, Atmaca İ., "Investigation of Heating Load Effects on Solar Assisted Heat Pump System Performance with Simulation", *2<sup>nd</sup> International Scientific Conference on Engineering Manufacturing and Advanced Technologies MAT 2012*, Antalya, TURKEY, 22-24 November 2012, pp.157-168.
6. Atmaca İ., **Koçak Soylu S.**, "Determination of Optimum Collector Surface Area for Solar Assisted Heat Pump System with Simulation: Energy and Exergy Analysis", *International Science and Technology Conference ISTEK 2012*, Dubai, THE UNITED ARAB EMIRATES, 13-15 December 2012, pp.347-353.

#### **Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler**

1. **Koçak Soylu S.**, Şenel A., Atmaca İ., "Kontrollü Atmosfere Sahip Soğuk Hava Deposu Tasarımında Fotovoltaik Panel Desteğinin İncelenmesi", *9. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, YEKSEM, ANTALYA, TÜRKİYE*, 3-5 Kasım 2017, ss.9-16.
2. Özçelik M.Y., **Koçak Soylu S.**, Atmaca İ., "Örnek Bir Ağaç Sanayi Tesisinde Vanaların Aerojel İle Yalıtımının İncelenmesi", *IV. Enerji Verimliliği Kongresi, KOCAELİ, TÜRKİYE*, 13-14 Ekim 2017, ss.179-186.
3. Özçelik M.Y., **Koçak Soylu S.**, Atmaca İ., "Endüstriyel Bir Tesiste Aerojel ile Yalıtımın Teknik ve Ekonomik Analizi", *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İZMİR, TÜRKİYE*, 19-22 Nisan 2017, ss.2189-2199.
4. Atmaca İ., **Koçak Soylu S.**, Kemer M., "İklimlendirilen Ortamlarda Soğuk Yüzeylerin Isıl Konfor Üzerine Etkisinin İncelenmesi", *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İZMİR, TÜRKİYE*, 19-22 Nisan 2017, ss.1115-1126.

5. Atmaca İ., **Koçak Soylu S.**, "Fiziksel Risk Etmenlerinden Isıl Konforun Mevcut Standartlar ve Çalışmalar ile Değerlendirilmesi", *IX. Ulusal İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Kongresi*, ADANA, TÜRKİYE, 30 Kasım-2 Aralık 2017, ss.1-9.
6. Atmaca İ., **Koçak Soylu S.**, Çağlar A., "Klima Dış Ünitesi Giriş Havaasının Evaporatif Soğutulmasında Kullanılması Planlanan Sistem Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi", *2. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu ve Sergisi*, Balıkesir, TÜRKİYE, 23-25 Ekim 2014, ss. 578-587.
7. Çağlar A., **Koçak Soylu S.**, Atmaca İ., "Isıl Dalga Adsorpsiyonlu Soğutma Sisteminde Adsorban Yataktaki Isı Transferinin Kanatçık Kullanılarak İyileştirilmesi", *2. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu ve Sergisi, Balıkesir*, TÜRKİYE, 23-25 Ekim 2014, ss. 654-660.
8. Atmaca İ., Çarkacı Ç., **Koçak S.**, "Düşük Işınım Şiddetinde Güneş Enerjisi Destekli Su Kaynaklı Bir Isı Pompası Sisteminin Deneysel Performans Analizi", *19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi ULIBTK'13*, Samsun, TÜRKİYE, 9-12 Eylül 2013, ss. 1478-1483.
9. Atmaca İ., **Koçak S.**, "İklimlendirilen Hacimlerde Ortam Işınım Sıcaklığının Isıl Konfor Üzerine Etkisinin Teorik ve Deneysel olarak İncelenmesi", *XI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi TESKON*, İzmir, TÜRKİYE, 17-20 Nisan 2013, ss. 2057-2075.
10. **Koçak S.**, Şaşmaz C., Atmaca İ., "Farklı Derece Gün Bölgeleri İçin TS825'e Uygun Olarak Yalıtılan Bir Alışveriş Merkezinin Teknik ve Ekonomik Yönden İncelenmesi", *III. Ulusal İklimlendirme Kongresi ve Fuarı İKLİM 2011*, Antalya, TÜRKİYE, 18-20 Kasım 2011, ss. 451-466.
11. Atmaca İ., **Koçak S.**, "TS 825'e Uygun Olarak Yalıtılan Bir Binanın Teknik ve Ekonomik olarak İncelenmesi", *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi TESKON*, İzmir, TÜRKİYE, 13-16 Nisan 2011, ss. 239-249.

## **Projeler**

1. "Otomobil radyatöründe TiO<sub>2</sub> esaslı nanoakışkan kullanımının ısı transfer performansı üzerine etkisinin incelenmesi", BAP Doktora, FDK-2016-1499, Araştırmacı, 2018.

2. "Yassı Borulu Kanatlı Tip Çapraz Akışlı Eşanjörde Yüzey Alanını Azaltma Amaçlı Nanoakışkan Kullanımının Deneysel Araştırılması", BAP Araştırma Projesi, FBA-2016-1256, Araştırmacı, 2018.
3. "Termoelektrik Soğutuculu ve Güneş Enerjili Portatif Su Damıtma Sisteminin Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelemesi", BAP Araştırma Projesi, 2012.01.0102.018, Araştırmacı, 2014.
4. "Hacim Isıtma Amaçlı Güneş Enerjisi Destekli Su Kaynaklı Isı Pompası Çevriminin Teorik Analizi", BAP Y. Lisans, 2011.02.01.21.034, Araştırmacı, 2012.

### **Bilimsel ve Mesleki Kuruluşlara Üyelikler**

1. TMMOB Makine Mühendisleri Odası

### **Ödüller**

1. **Koçak Soylu S**, Atmaca İ., Asiltürk M., Doğan A., "Enerji – Makine – İnşaat – Malzeme Teknolojileri Kategorisi Birincisi", Antalya OSB AR-GE ve İnovasyon Proje Pazarı, Mart 2018
2. **Koçak Soylu S**, "Bölüm İkinciliği", Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Haziran 2009.