

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NANOAKIŞKAN BAZLI SOĞUTUCU SIVI KULLANILARAK ARABA
RADYATÖRLERİNİN SOĞUTMA PERFORMANSININ
İYİLEŞTİRİLMESİ**

ÇAĞATAY KAPTAN

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANOAKIŞKAN BAZLI SOĞUTUCU SIVI KULLANILARAK
ARABA RADYATÖRLERİNİN SOĞUTMA PERFORMANSININ
İYİLEŞTİRİLMESİ

ÇAĞATAY KAPTAN

Doç.Dr. Müslüm ARICI
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof.Dr. Hasan KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç.Dr. Kasım BAYNAL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç.Dr. Semra BORAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi
Dr.Öğretim Üyesi Cemil Yiğit
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi



The image shows four handwritten signatures in blue ink, each placed above a horizontal dotted line. The signatures are: 1. Müslüm Arıcı, 2. Hasan Karabay, 3. Kasım Baynal, and 4. Semra Boran. The signature of Cemil Yiğit is not visible in the image.

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde nanoteknoloji, çoğu mühendislik uygulamalarında yerini almış ve verimlilik artışında, optimizasyon çalışmalarında ve performans iyileştirici alanlarda kullanılmasına başlanmıştır. Ayrıca, nanoteknolojinin bir alanı olan nanoakışkanlar, araç teknolojilerinde motor soğutma sıvılarının performansının iyileştirilmesinde çoğu araştırmacı tarafından incelenmektedir ve innovasyonu yapılmaktadır.

Fen Bilimleri Enstitüsü'ndeki çalışma hayatım boyunca, üzerimdeki emekleri için minnettar olduğum Fen Bilimleri Enstitüsü çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Arabalardaki motor soğutma performansının iyileştirilmesi ve en uygun yöntemin geliştirilmesi için bana çalışma fırsatı veren değerli danışmanın Doç.Dr. Müslüm ARICI'ya teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca beni destekleyen eşim Esra DELİBAŞ KAPTAN ve oğlum Mehmet Poyraz KAPTAN'a sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Mayıs – 2018

Çağatay KAPTAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ.....	1
1. TEZ ÇALIŞMASININ AMACI	2
1.1. Pazar ve Gelecek Teknoloji Araştırması.....	4
1.2. Çalışmanın Genel Hatları	6
1.3. Isı Eşanjörleri ve Kullanım Alanları.....	6
1.3.1. Isı eşanjörleri ve araç radyatör tasarımı	9
1.4. Taguchi Metodu	13
1.5. Literatür Araştırması.....	15
2. PROBLEMİN TANIMI VE SAYISAL YÖNTEM.....	25
2.1. Problemin Tanımı ve Radyatör Tasarımı.....	26
2.2. Çalışmada Kullanılacak Radyatörün Teknik Özellikleri.....	29
2.3. Radyatörün Modellenmesi ve En Uygun Ağ Seçimi.....	30
2.4. Çalışmada Kullanılan Sınır Koşulları ve Kabuller	32
2.5. Temel Sıvı ve Nanoparçacık Seçimi ve Termofiziksel Özellikleri.....	33
2.6. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Hesaplanması.....	34
2.7. Sonlu Hacimler Metodu ve Sayısal Analiz	36
2.8. Sayısal Modelin Doğrulanması.....	40
2.9. Taguchi Deney Deseninin Oluşturulması	42
3. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA UYGULANMASI	46
3.1. Isı Transferi Performansının Hesaplanması	46
3.2. Basınç Düşümü, Sürtünme Faktörü ve Güç Tüketiminin Hesaplanması	47
3.3. Taguchi Metodu ile Optimizasyon Yapılması.....	49
3.4. Fizibilite ve Uygulanabilirlik Çalışması.....	55
3.5. Radyatörün Boyutlarının Küçültülmesi ve Boyut Küçültmenin Arabaya Etkileri.....	58
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	69
ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Radyatör performansına etki eden parametreler.....	6
Şekil 1.2.	Konstrüksiyon yapılı ısı eşanjörleri.....	7
Şekil 1.3.	Akış şekillerine göre ısı eşanjörleri.....	8
Şekil 1.4.	Isı eşanjörleri tasarım metodolojisi.....	12
Şekil 2.1.	Çalışması yapılan radyatörün geometrisi	26
Şekil 2.2.	Teorik model.....	27
Şekil 2.3.	Çalışması yapılan radyatör geometrisinin boyutları.....	29
Şekil 2.4.	Düzenli 150 x 150 x 20'luk ağ yapısı.....	30
Şekil 2.5.	Düzensiz ve sınır tabakalı ağ yapısı	30
Şekil 2.6.	y+ değeri	31
Şekil 2.7.	Sınır koşulları şematiği	32
Şekil 2.8.	Soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı modelin doğrulama sonuçları.....	40
Şekil 2.9.	%0,1 ve %0,5 hacim konsantrasyonunda Su - Al ₂ O ₃ için farklı Reynolds sayılarında Nu _{ort} değerleri.....	41
Şekil 3.1.	Isı taşınım katsayısı etkinlik grafiği.....	51
Şekil 3.2.	Basınç düşümü etkinlik grafiği	52
Şekil 3.3.	K değerinin hava taşınım katsayısına göre değişimi	60

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Taguchi Metodu deney tasarımları	15
Tablo 2.1. Radyatör geometrik boyutları.....	29
Tablo 2.2. Farklı ağ yapıları için h, Nu değişimi ve gerekli hesaplanma süresi.....	31
Tablo 2.3. Temel sıvıların 40°C'deki termofiziksel özellikleri.....	33
Tablo 2.4. Nanoparçacıkların termofiziksel özellikleri	34
Tablo 2.5. Taguchi deney tasarımı faktör ve seviyeler	43
Tablo 2.6. Taguchi L16 deney deseni kodlaması.....	44
Tablo 2.7. Taguchi L16 deney deseni parametreleri.....	45
Tablo 3.1. Taguchi Deseni Nu _{ort} ve h sonuçları.....	47
Tablo 3.2. Basınç düşümü ve güç tüketimi sonuçları	48
Tablo 3.3. Temel etki tablosu parametreleri.....	49
Tablo 3.4. Taguchi S/N oranı hesaplanması.....	49
Tablo 3.5. Isı taşınım katsayısı S/N etki hesabı	50
Tablo 3.6. Basınç düşümü S/N etki hesabı	51
Tablo 3.7. Basınç düşümü ve ısı iletim katsayısı için optimizasyon hesabı.....	53
Tablo 3.8. Basınç düşümü ve ısı iletim katsayısı ($\Delta P+h$) S/N oranı etkileşim hesabı	54
Tablo 3.9. Etkinlik değeri sonuçları.....	56
Tablo 3.10. Performans değerlendirme indeksi	57
Tablo 3.11. Boru uzunluğu hesabı.....	59
Tablo 3.12. Farklı hava hızlarında ısı direnci hesabı	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

\emptyset	: Yüzdellik hacim konsantrasyonu, (%)
μ	: Dinamik viskozite, (kg/m.s)
ρ	: Yoğunluk, (kg/m ³)
η	: Eşanjör verimi
δ	: Nanoparçacıklar arası mesafe, (nm)
ΔP	: Basınç farkı, (Pa)
ΔT_m	: Ortalama sıcaklık farkı, (K)
A	: Isı eşanjörü toplam yüzey alanı, (m ²)
A_p	: Çevresel alan, (m ²)
A_t	: Soğutucu akışkan boru giriş alanı, (m ²)
C	: Doğrulama faktörü
\bar{C}_f	: Boru içi yüzey sürtünmesi
D_h	: Hidrolik boru çapı, (m)
d_p	: Nanoparçacık çapı, (nm)
h	: Entalpi, (kJ/kg)
K_b	: Boltzmann sabiti, (J/K)
k_{nf}	: Nanoakışkan ısı iletim katsayısı, (W/m.K)
L	: Boru uzunluğu, (m)
\dot{m}	: Kütleli debi, (kg/s)
N	: Radyatördeki tüp sayısı
Nu	: Nusselt Sayısı
Pr	: Nusselt Sayısı
Re	: Reynolds Sayısı
\dot{Q}_c	: Soğuk sıvı ısı, (W)
\dot{Q}_h	: Sıcak sıvı ısı, (W)
S/N	: Sinyal gürültü oranı
T_b	: Ortalama akışkan giriş ve çıkış sıcaklığı, (K)
T_c	: Soğuk sıvı sıcaklığı, (K)
T_g	: Boru içi akışkan giriş sıcaklığı, (K)
T_h	: Sıcak sıvı sıcaklığı, (K)
T_o	: Boru içi çıkış akışkan sıcaklığı, (K)
T_{fr}	: Donma noktası sıcaklığı, (K)
T_w	: Boru cidar sıcaklığı, (K)
U	: Toplam ısı geçişi katsayısı, (W/m ² .K)
v	: Akışkan hızı, (m/s)
v_a	: Hava hızı, (m/s)
V_B	: Brownian hareketi, (m/s)
V_t	: Soğutucu akışkan boru içi hızı, (m/s)
W	: Pompa gücü, (W)

Kısaltmalar

Ar-Ge	: Araştırma Geliştirme
bf	: Base Fluid (Temel Sıvı)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
EG	: Etilen Glikol

LTMD : Logaritmik Temperature Mean Difference (Logaritmik Ort. Sıcaklık Farkı)
nf : Nanofluid (Nanoakışkan)
NTU : Isı Transfer Ünite Sayısı (Number of Transfer Unit)



NANOAKIŞKAN BAZLI SOĞUTUCU SIVI KULLANARAK ARABA RADYATÖRLERİNİN SOĞUTMA PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Genel olarak metal ve metal oksit parçacıkları içeren nanoakışkanlar, arabalarda, radyatörün soğutma performansının iyileştirilmesinde yaygınca kullanılmaktadır. Nanoakışkanlar ısı transferini arttırırken, diğer taraftan, basınç düşümünü arttırır ve dolayısıyla soğutma pompasının güç tüketimi de artar. Bu yüzden, optimizasyon gereklidir. Bu çalışmada temel sıvı, nanoparçacık tipi, nanoparçacık hacim yüzdesi ve Reynolds sayısının radyatör soğutma performansına olan etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Akış ve ısı transferi karakteristiği sonlu hacimler metodu esasına dayanan, ticari bir kodla (Ansys Fluent 15.0) elde edilmiştir. Mevcut çalışmadaki model, literatürdeki deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Hesaplamalar Al_2O_3 , CuO, Fe_3O_4 ve SiO_2 olmak üzere dört farklı nanoparçacık için yapılmıştır. Nanoakışkanın viskozite ve efektif ısı iletim katsayısı deneysel verilerden oluşturulan modeller baz alınarak hesaplanmıştır. Akış türbülanslı akış olarak, Reynolds sayısı; 9350 ile 23000 arasında incelenmiştir ve nanoparçacık hacimsel yüzdesi; %0,1 ile %1 arasında hesaba katılmıştır. Optimizasyon için, etkili bir deneysel teknik olan Taguchi Metodu, hem optimum sonuca ulaşmak hem de toplam deney sayısını azaltmak için kullanılmıştır. Sonuçlar soğutma performansına ve yakıt tüketimine etki eden taşınım ısı transferi katsayısı ve basınç düşümü üzerinden değerlendirilmiştir. Bu değerler arasındaki fizibilite ilişkisi ise etkinlik değeri ve performans etki kriteri ile incelenmiştir. Böylece hem Taguchi metodu ile optimizasyon yapılmıştır hem de bu değerlerin gerçek koşullardaki uygulanabilirliği incelenmiştir. Sonuç olarak soğutma performansının iyileşmesiyle radyatörün boyutlarının küçültülmesinin sağlamış olduğu hacimsel yer kazanımı, aerodinamik direnç kuvvetini azaltarak yakıt ekonomisine sağladığı katkı ve ağırlık düşümü hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Yanıtlı Taguchi Metodu, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Isı Transferi, Nanoakışkan, Radyatör.

PREDICTION OF OPTIMUM COOLING PERFORMANCE IMPROVEMENT FOR CAR RADIATOR APPLICATIONS

ABSTRACT

Nanofluids have been most commonly used in car radiators in order to improve the cooling performance. While nanoparticles are increasing the heat transfer rate, on the other hand, addition of nanoparticles into the base fluid increases the pressure drop as well which results in an increase in pump power. Therefore, optimization is required. This study aims to explore the effect of different parameters which are on the cooling performance of a car radiator numerically by using commercial code(ANSYS Fluent 15.0). The numerical procedure employed in the present work is validated by comparing the obtained results with the experimental results available in the literature. Computations are carried out for different nanoparticles (namely Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 and SiO_2). The influence of Reynolds number is between 9350 and 23000 and the nanofluid volume fraction in the range of %0,1 and %1. For the analysis, Taguchi method, which is a powerful experimental technique, is used to reduce the number of trials, to determine the relation between the considered parameters and to identify the optimum combinations of the studied parameters and shorten the design phase. The results are presented and discussed on the basis of cooling performance index. As a result, the effect of improvement of cooling performance is to gain a space for designer because of minimized radiator. The effect of minimized radiator is calculated for fuel economy and weight reduction additionally.

Keywords: Taguchi Methodology, Computational Fluid Dynamics, Heat Transfer, Nanofluid, Radiator.

GİRİŞ

Otomotiv sektörü sürekli gelişen ve teknolojiye öncülük eden bir sektördür. Günümüzdeki eğilim çevre dostu ve sürücüsüz araçlara doğru gitmektedir. Bunun için aracın yönetilmesi çok önemlidir, içten yanmalı motorları yönetmek çok zor olduğu için yönelim elektrikli araçlara doğrudur. Çevre dostu araçlar için de ağırlık azaltma ve performans iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Özellikle dizel araçların ilerleyen yıllarda sayısının azaltılması bile düşünülmektedir. Nanoteknoloji ise günümüzde otomotiv sektöründe çoğu alanda kullanılmaktadır. Bu alanlardan birisi ise nanoakışkanlardır. Nanoakışkanlar soğutma performansının iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında nanoakışkanların radyatör soğutma performansının iyileştirilmesi ve optimizasyonu Taguchi Metodu ile incelenecektir.

Bölüm 1’de tez çalışmasının amacı, otomobil sektöründeki son durum ve pazar araştırması, çalışmada kullanılacak ısı eşanjörünün tanımı, çeşitleri ve kullanım koşulları verilmiştir. Ayrıca, radyatör tasarımı ve tez çalışmasının genel hatları belirtilmiştir. Taguchi Metodu ve optimizasyon için gerekli deney deseninin tanımını bu bölümde ele alınmıştır. Bölüm 1’in son kısmında, nanoakışkanlar ve literatür araştırması detaylı olarak incelenmiştir. Bölüm 2’de ise, radyatörün teknik özelliklerine, modellenmesine ve en uygun ağ modelinin seçimine değinilmiştir. Ayrıca çalışma kullanılacak sınır koşullarının tanımlaması ve nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin hesaplanması bu kısımda incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılacak denklemlerin seçimi ve sayısal analiz de bu bölümde ele alınmıştır. Bu bölümün son kısmında çalışmada kullanılacak modelin deneysel ve teorik çalışmalarla doğrulanması ile Taguchi Deney tasarımının oluşturulması anlatılmıştır. Bölüm 3’de, Nanoakışkanların soğutma performansının hesaplanması ve basınç düşümü ile ilişkisi incelenmiştir. Ayrıca Taguchi Metodu ile oluşturulan deney deseninden hesaplanan optimum koşul da bu bölümde sunulmuştur. Nanoakışkanların uygulanabilirliği ile fizibilitesi ve soğutma performansı ile elde edilen iyileşmenin araca sağladığı katkılar bu bölümde hesaplanmıştır. Son kısım olan Bölüm 4’de, radyatör tasarımı yapılırken nanoakışkanın kullanımı için tasarımcıya öneriler sunulmuştur. Ayrıca nanoakışkanların radyatördeki küçülme ile sağlamış olduğu hacimsel yer kazanımı, yakıt tüketimine katkısı ve ağırlık düşümü incelenmiştir.

1. TEZ ÇALIŞMASININ AMACI

Otomobil sektöründe devam eden teknolojik gelişmeler, günümüzde araç içinde daha fazla hacimsel yere, daha hafif parçalara ve yakıt ekonomisi üzerine odaklıdır. Bu etkenler üzerinde yapılan çalışmalardan bir tanesi ise motor soğutma performansının iyileştirilmesidir. Bunun için, radyatörden geçen soğutucu akışkanın, ortam ile ısı transferinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca optimizasyon çalışması yapılarak daha hafif, boyutları küçültülmüş radyatör elde etmek mümkündür. Böylece, araçta hacimsel yer kazanmanın yanında ağırlık azaltımı ve aerodinamik direnç katsayısının düşürülmesi, radyatörlere dikkate değer iyileştirici bir katkı sunmaktadır [1].

Son yıllardaki kapsamlı çalışmalar, nanoakışkanlardaki (Temel sıvı içindeki 100 nm 'den daha küçük metal veya metal oksit parçacıkları) ısı transferi üzerine yoğunlaşmıştır [2]. Nanoakışkanların ısı özelliklerindeki bu önemli artış, son yıllardaki araştırmacıların dikkatlerini çekmektedir. Nanoakışkanlar için önemli bir uygulama alanı ise araçlardaki motor soğutma sistemidir.

Temel sıvıya ilave edilen belli miktardaki nanoparçacıklar, dikkate değer bir şekilde temel sıvının efektif ısı iletim katsayısını arttırmaktadır ve sonuç olarak ısı transferi karakteristiğini yükseltmektedir. Nanoakışkanlar mikrometre ve/veya milimetre ebatlı parçacık içeren geleneksel katı-sıvı karışımlarına göre oldukça farklı ve belirgin bir karakteristik göstermektedir. Bu belirgin özelliklerden en önemlisi nanoparçacıklarda çökmenin ihmal edilebilecek kadar çok az olmasıdır. Bu özellik de nanoakışkanları, heterojen karışımlardan ayırmaktadır [3].

Araba radyatörlerinde soğutucu akışkan olarak antifriz kullanılır. Hava, zorlanmış taşınım tarafından kanatçıklar üzerinden geçerken; soğutucu akışkan, soğutma boruları ile motora doğru pompalanır, bu esnada motordaki yanma ile ortaya çıkan ısı, piston hareketi dâhil çoğu mekanik harekette sürtünmeleri engellenmek için kullanılan motor yağına tesir eder. Bu yüksek sıcaklık etkisi de motor yağının özelliğini kaybetmesine sebebiyet verir. Soğutucu akışkan motor yağının ısınmaması için motor yağına soğutma görevi yapar. Ayrıca radyatörler kapalı çevrim ile çalışan sistemlerdir ve hava-sıvı etkileşiminin gerçekleştiği bir ısı alışverişine sahiptirler. Radyatördeki ısı transferine tesir eden havanın hızı, fanın

devri, radyatör kanatçıklarının şekli ve malzemesi, radyatör boyutları, aracın hava giriş ön ızgara genişliği, soğutucu akışkan ve pompanın gücü gibi birçok parametre vardır. Eğer motordan radyatöre gelen yüksek sıcaklıktaki soğutucu akışkan, ısını radyatörden ortama atamazsa, araçta günümüzde “hararet” olarak terimlendirilen aşırı ısınma problemi olur ve araç hareket edemez hale gelir.

Motor performansı için artan iyileştirme çalışmaları, motorlarda daha iyi bir soğutma performansı gereksinimini gelecek yıllarda dikkate değer bir şekilde hissettirecektir. Bu gereksinim için gereken iyileştirmeler; radyatördeki soğutucu akışkanın ısı transferi performansının iyileştirilmesi, daha verimli kanatçıkların kullanılması ya da radyatör malzemesinin iyileştirilmesiyle mümkündür [4]. Bu tip iyileştirme çalışması yapılırken diğer etkenler de düşünülmelidir. Bu etkenlerden birisi de pompaya düşen yük ve dolayısıyla yakıt tüketimidir. Bu yüzden optimizasyon çalışması yapılmalıdır. Optimizasyon yaparken denemeler yapılır ve bu denemelerin ise getirmiş olduğu bir zaman süreci ve deney sayısı olmaktadır. Deney sayısı arttıkça maliyet artmakta, ayrıca uzayan deney süresi ise aracın pazara sürülme zamanı ertelenmektedir. Bu olumsuz etkilerden kurtulmak için sistematik bir optimizasyon metodu gerekmektedir. Günümüzde, en çok kullanılan optimizasyon metotlarından birisi Taguchi Metodudur [5].

Bu çalışmada radyatörün soğutma performansının iyileştirilmesi, iyileştirme yaparken optimum koşulların belirlenmesi ve bu optimum koşulların fizibilitesinin incelenmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda pompa tüketiminin yakıt tüketimine olumsuz etkisi, basınç düşümü ile hesaplanarak dikkate alınmıştır. Soğutucu akışkan içine nanoparçacıklar ilave edilerek, soğutucu akışkanın ısı transferi üzerindeki etkisi hesaplanmıştır ve radyatörün soğutma performansı sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca, deneme sayısının fazlalığından kaynaklanacak zaman ve maliyet dengesi için Taguchi Metodu kullanılarak, nanoakışkanların araba radyatörleri için günümüzde ya da gelecekte uygulanabilirliği ve fizibilitesi araştırılmıştır. Son olarak, bu çalışmada nanoakışkan kullanımının, soğutma performansını iyileştirmesiyle radyatörün boyutlarının küçültülmesi ve bu küçülmenin etkisi ile elde edilen hacimsel yer kazancı, aerodinamik direnç kuvvetindeki azalmanın sağlamış olduğu yakıt ekonomisi, araçtaki ağırlık düşümü incelenmiştir.

1.1. Pazar ve Gelecek Teknoloji Araştırması

Otomotiv sanayisi, tüm gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde ekonominin öncü sanayilerinden biridir. Bunun temel nedeni, ekonominin diğer sanayileri ile bağlantılı ve zincirleme olan ilişkisidir. Otomotiv sanayisi; tekstil, demir-çelik, petro-kimya veya imalat sanayisi ile tedarik ağı olan ve bu sanayi alanlarındaki teknolojik gelişmeleri de tetikleyen bir sektördür. Ayrıca turizm, lojistik ve ulaştırma gibi sektörlerin ihtiyaçlarını karşılamaya destek olur. Otomotiv sanayisi ayrıca savunma sanayisi ile birlikte ortak projeleri olan geniş alandır [6].

Küresel pazar ve rekabet koşullarından dolayı, sürekli bir gelişmeye sahip olan otomotiv sektörü, 60'dan fazla ülkede üretime sahip olmuş olsa da, dünya çapında otomotiv üretimi belli başlı ülkeler ve firmaların elinde bulunmaktadır. Bunun diğer nedeni ise bu ülkelerin teknolojiyi geliştiren ülkeler olmaları ve sahip oldukları birikimle birlikte elde etmiş oldukları patentlerdir. Bunun yanında ise dünyanın her yerinde aynı kalite ve standartlarda araç üretmek gerekmektedir. Düşük maliyette, kaliteli, performansı yüksek, konforlu araç talebi ve bu taleplerin yarattığı yoğun Ar-Ge çalışmaları, firmalar arasındaki rekabeti ve düşük kar marjlarını doğurmuştur. Bu nedenle, sektördeki şirket sayısı azalmıştır ve azalmaya devam etmektedir [7]. Bu sürecin önümüzdeki yıllarda da sürmesi beklenmektedir. Diğer taraftan, küresel düzeyde alternatif üretim merkezleri de giderek artmaktadır. Yaşanan bu gelişmelere bakıldığında Türk otomotiv sektörünü yoğun bir rekabetin beklediğini söylemek kaçınılmazdır [8]. Bu yüzden "Türkiye Otomotiv Sanayi Strateji Belgesi 2011-2014" raporu kapsamında gerçekleştirilen ayrıntılı güçlü yönler ve zayıf yönler ile fırsatlar ve tehditler analizi aşağıdaki maddelerde belirtilmiştir:

- Şirketlerin tasarım, üretim, markalaşma beceri ve kapasitelerinin artırılması
- AR-Ge faaliyetlerinin iyileştirilmesi
- Otomotiv sanayisinde iç ve dış pazarların geliştirilmesi
- Hukuki ve idari düzenlemelerin iyileştirilmesi
- Fiziki altyapıların geliştirilmesi
- İnsan kaynaklarının geliştirilmesi
- Gerekli ham maddelerin yerli temin edilmesi için çalışmaların yapılması

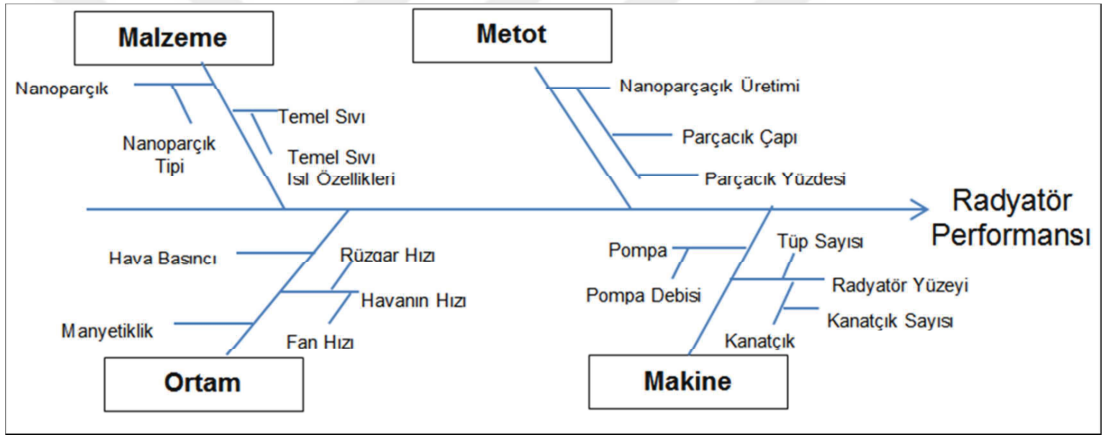
7 temel politika önceliği bu şekilde belirtilmiştir. Bu politikalardan da anlaşılacağı gibi otomotiv sektöründeki yüksek rekabette ayakta kalabilmenin yolları maliyetlerin düşürülmesi, verimliliğin artırılması ve yenilikçi ürünlerinin geliştirilmesidir.

Ekonomi ve teknolojideki gelişmeler ayrıca, otomotiv sektöründeki gelişmeleri de etkilemektedir. Bu yüzden geçmişten bugüne otomotiv sektörü sürekli kendini geliştiren, inovatif ve teknoloji ile birlikte ilerleyen sektördür. Türkiye, dünya otomotiv endüstrisindeki değişimi günlük olarak takip etmektedir. Çünkü Türkiye’de otomotiv sektörü hem istihdamda hem de ihracatta öncü sektörlerdendir. Son yıllarda malzeme bilimindeki ilerlemelerle, yeni ve hafif malzeme teknolojisinin yaygınlaşması ile şaside yapılan ağırlık hafifletme çalışmaları ve elektronik sistemlerin motorlu araçlara giderek daha fazla kullanılması, otomotiv sektöründeki çoğu üretim standartlarını değiştirirken, beraberinde tüketici alışkanlıklarının da hızlı bir şekilde değişmesine neden olmuştur. Artık son kullanıcı kendi beklentisine göre aracı seçebilmektedir. Ayrıca firmaların vermesi gereken satış sonrası hizmetler ise önem kazanmaktadır. Küresel ısınma ile birlikte artan çevrecilik bilinci, otomotiv endüstrisinin yönünü tayin edecek kadar önemli bir dinamiktir. Son yıllarda gelişmiş ya da gelişmekte olan çok sayıda ülkede, çevre standartlarının ağırlaştırıldığı görülmektedir. Özellikle emisyon standartlarına getirilen ağır ve zorlayıcı koşullar bunun en önemli örneğidir. Artan çevrecilik bilinci ile birlikte teknolojik çalışmalara yoğunlaşmış ve yakıt tasarrufu yüksek motor teknolojileri sektördeki önemini artırmıştır. Otomotiv sektöründe ya da otomotiv yan sanayisinde Ar-Ge faaliyetleri çevreye duyarlılık doğrultusunda şekillenmektedir. Bu faaliyetlerin diğer bir kanıtı ise, şehirleşme ve eğitilmiş kullanıcıların artması, çevreye olan duyarlılığı ve çevre dostu araçlara olan talebi artırmasıdır. Özellikle ABD ve Avrupa’da çevre dostu otomobillerin yaygınlaşması, otomotiv sektörünün geleceği ile ilgili önemli bir ipucu vermektedir. Ayrıca günümüzdeki araba üreticileri artık elektrikli araçlara yönelmişlerdir [9].

Sonuç olarak, günümüzde çevreye duyarlı ve daha verimli araçlar oluşturmak için gerekli inovasyon çalışmalarından birisi de nanoteknolojidir. Nanoteknoloji, son zamanlarda otomotiv sektöründeki uygulamalara en çok rastlanan branşlardan birisidir. Başlıca çalışma alanları; nanokompozitler, boya ve kaplama alanları, nano metal, aküler ve yakıt hücreleri, sürtünmeyi azaltan yağlar ve soğutucu sıvılar üzerinedir. Araçlarda son zamanlarda araştırmalarda kullanılan nanoakışkanlar, motor soğutma performansını arttırmaktadır [1-5]. Aynı şekilde elektrikli araçlar için akülerde soğutmayı etkin sağlamak, akü etkinliğini de önemli bir ölçüde arttıracaktır.

1.2. Çalışmanın Genel Hatları

Motor soğutma performansına etki eden çalışmalar incelendiğinde birçok etkenin olduğu ortaya çıkmıştır. Bu etkilerin hepsi bir kök neden olduğu için Şekil 1.1'deki balık kılıçığı diyagramında özetlenmiştir. Radyatör soğutma performansına etki eden parametrelerden birisi olan soğutucu sıvının ısı transferi performansı, nanoakışkanlar ile aracın rekabet koşullarında yerini alabilmesi için; maksimum etki ve minimum maliyet hedefiyle Taguchi Metodu kullanılarak optimizasyonun yapılarak, son kullanıcı olan sürücülere, beklentilerini karşılayacak şekilde sunulmasını veren uygun koşulların kapsamı araştırılacaktır. Bu çalışmada radyatörün performansına etki eden davlumbaz tasarımı, fan etkisi ve aracın ön açıklığı gibi etkenler hesaba katılmamıştır. Sadece radyatörün iç akışı ve direkt temas ettiği çevrenin hava koşulları dikkate alınmıştır.



Şekil 1.1. Radyatör performansına etki eden parametreler [1-5]

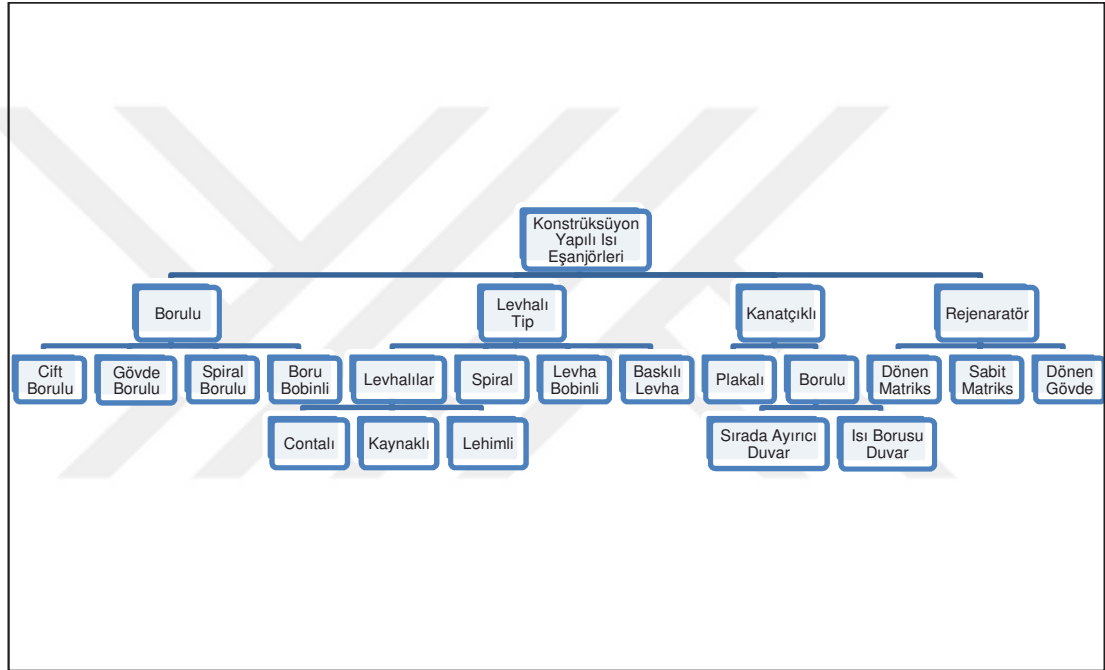
Soğutucu sıvının; farklı yüzdeli nanoparçacıklarda, türbülanslı akıştaki ısı transferi performansı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile sayısal olarak analiz edilip, Taguchi Metodu ile en uygun radyatör performansının, deney sayısı azaltılarak ve zaman süreci kısaltılarak hesaplanması hedeflenmiştir. Böylece ısı transferine direkt etki eden parametreler altında, optimum radyatör koşulları elde edilerek, daha küçük ebatlı radyatörler, soğutma performansının iyileştirilmesi, daha uygun pompa seçimi, daha düşük güçte fan seçimi, ağırlık azalımı gibi araçta iyileştirmeler gerçekleştirilebilecektir.

1.3. Isı Eşanjörleri ve Kullanım Alanları

Isı eşanjörleri farklı sıcaklıktaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı transferini sağlayan sistemlerdir ve enerji santrallerinde, boyahanelerde, elektronik sistemlerin

soğutmalarında, klimalarda, havalandırma sistemlerinde ve otomobil sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

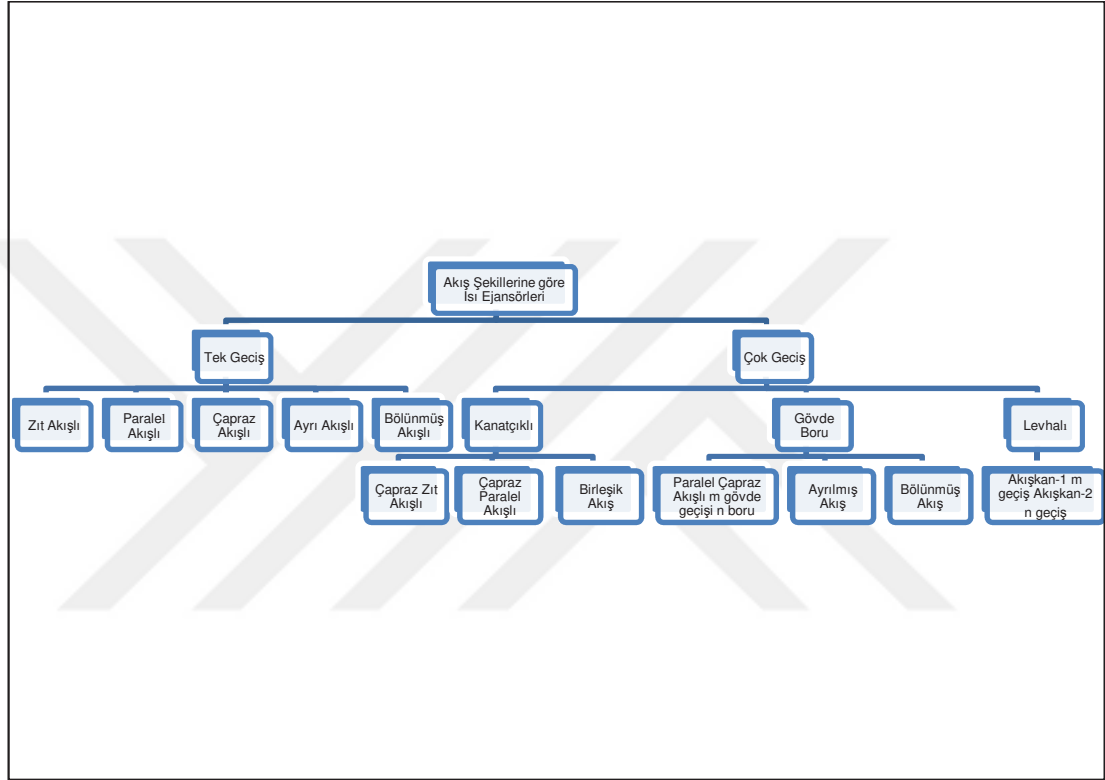
Isı eşanjörlerinde ısı transferi prosesi; şekline göre, akış düzeni, yüzey yapısı, akışkan sayısı ve ısı transferi mekanizmasına göre Şekil 1.2'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir [10]. Isı eşanjörleri, araba radyatörleri ele alınacağı için konstrüksiyon yapılı ve akış düzenine göre Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'deki gibi incelenmiştir. Bu çalışmada incelenecek radyatör tipi Şekil 1.2'de gösterilen konstrüksiyon yapılı ısı eşanjörlerine göre incelenmiştir.



Şekil 1.2. Konstrüksiyon yapılı ısı eşanjörleri [10]

Konstrüksiyon yapılı ısı eşanjörleri kullanım alanına göre seçilmektedir. Bunun temel nedeni ise uzun vadeli ve problem yaşamadan, en iyi verimi almaya çalışmaktır. Bu yüzden ısı eşanjörün kullanım yeri, toplam hacmi ve ısı transferi yapılacak ortamın koşulları, öncesinden çok iyi bilinmesi ve tespit edilmesi gerekmektedir. Ayrıca kullanılacak olan ısı eşanjörünün, maksimum sıcaklık ve basınçtaki çalışma koşulları, toplam yüzey alanı ve kompaktlığı, bakım ve servis koşulları, korozyon direnci, eşanjör sıvısının kimyasal uyumu ve sızdırma testleri gibi kriterleri sağlaması gerekmektedir. Ancak ilk önce düşünülmesi gereken ve en önemli olan koşul, akışkan ve eşanjör malzemesi arasındaki kimyasal uyumdur. Bunun için günümüzde eşanjör malzemesinin korozyon direncini artırması için bazı uygulamalar geliştirilmiştir. Teflon ya da grafit gibi korozyon direnci yüksek ısı

eşanjörleri kullanılmaktadır ya da borulara kaplama yapılarak korozyonun önüne geçilmeye çalışılmaktadır. İkinci kriter olarak kirlenmenin iyi bir şekilde öngörülmesidir. Genelde ısı eşanjörleri tasarlanırken kirlenme faktörü hesaplama çok dikkatli bir şekilde katılmaz. Ancak eşanjörün çalışacağı süredeki etki hesaba katıldığında, kirlenme kullanım süresi arttıkça hem eşanjörün veriminin düşmesine hem de eşanjör ömrünün kısalmasına sebebiyet vermektedir [11].



Şekil 1.3. Akış şekillerine göre ısı eşanjörleri [10]

Diğer bir önemli seçim kriteri ise, ısı eşanjörlerinin, akışkanın basınç ve sıcaklık farkından dolayı oluşabilecek ısıl gerilmelere karşı dayanımının hesaba katılmasıdır. Örneğin kapalı çevrimli ısı eşanjörlü soğutma sistemlerinde, basınç ve sıcaklık farkından dolayı gerçekleşen sıvıdaki hacim değişikliği, genleşme tankı tarafından tolere edilerek, eşanjördeki kaynak ve lehim noktalarına fazla basıncın gelmesi engellenmektedir ve olası sızdırma probleminin de önüne geçilmektedir [10].

Son seçim kriteri olarak, gözden kaçırılmaması gereken diğer bir etken ise basınç düşümüdür. Basınç düşümü, çoğu eşanjör ile uğraşan üreticiler tarafından ısı transferi performansı için ödenen bedel olarak yorumlanır. Basınç düşümünün, tasarım maliyeti üzerinde çok büyük etkisi olduğundan, tasarım şartlarını ve maliyetlerini direkt etkileyen bir faktördür. Örneğin, basınç düşümü arttıkça,

pompanın tüketmesi gereken güç de artacağı için pompa seçiminde daha yüksek debili pompaların seçilmesine sebep olur. Bu da çoğu üretici ve müşteri tarafından maliyeti arttırdığı için istenmeyen bir durumdur [10].

Eğer bir ısı eşanjörünün temel olarak ısı geçişi hesaplanacak olursa, ısı eşanjöründeki entalpi dengesi aşağıdaki Eşitlik (1.1) ve (1.2)'deki gibidir:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c (h_{c2} - h_{c1}) \quad (1.1)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h (h_{h2} - h_{h1}) \quad (1.2)$$

Özgül ısının sabit olması ve faz değişiminin olmaması halinde Eşitlik (1.1) ile (1.2); Eşitlik (1.3) ve (1.4) olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{Q}_c = (\dot{m}c_p)_c (T_{c2} - T_{c1}) \quad (1.3)$$

$$\dot{Q}_h = (\dot{m}c_p)_h (T_{h2} - T_{h1}) \quad (1.4)$$

Enerji denkleminde, alınan ısı verilen ısıya eşit olduğu için $\dot{Q}_c = \dot{Q}_h = \dot{Q}$ olarak hesaba alınabilir. Tüm ısı transferi katsayısı, U ile gösterilecek olunursa ve ortalama sıcaklık farkı ΔT_m alınırsa. Genel formül Eşitlik (1.5)'deki gibi olmaktadır;

$$\dot{Q} = UA\Delta T_m \quad (1.5)$$

A, ısı eşanjörünün toplam yüzey alanıdır ve ΔT_m , Eşitlik (1.6)'da gösterildiği gibi sıcak akışkan ile soğuk akışkanların giriş ve çıkış sıcaklıklarının bir fonksiyondur;

$$\Delta T_m = f(T_{h1}, T_{h2}, T_{c1}, T_{c2}) \quad (1.6)$$

Yukarıdaki eşitlikler temel olarak ısı eşanjöründe kullanıldıktan sonra, ısı eşanjörü tasarımında kullanılan iki metot vardır. Bunlar transfer üniteleri metodu (NTU) ve logaritmik ortalama sıcaklık farkı (LMTD) metodudur. Bu metotlar radyatöre giren ve çıkan sıvının sıcaklık bilgilerinin bilinmesine göre tercih edilir.

1.3.1. Isı eşanjörleri ve araç radyatör tasarımı

Isı eşanjörleri tasarımı; eşanjörün kullanım alanına, maliyetine, kapladığı alana göre kısacası müşterinin istemiş olduğu özelliklere göre belirlenir. Daha sonra akış düzeni, malzeme seçimi, konstrüksiyonlu yapı, kanatçık şekli ve kullanılacak sıvılar belirlenir. Bu tanımlamalar yapıldıktan sonra, istenilen soğutma ya da ısıtma

çalışması için gereken hedef sıcaklık değerleri, mühendislik paket programları ile öncesinde hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizi ile bilgisayar ortamında yapılır ve sonrasında gerçek koşullardaki standart ömür testleri gerçekleştirilir.

Tasarım yapılırken en önemli kriter, ısı eşanjörünün kullanım koşullarıyla ilgili; çünkü ortam sıcaklığı, montaj koşulları, ileride arıza durumundaki servis koşulları için uygun bir ortam, nem, korozyona karşı dayanıklılık, gerekliyse boruların izolasyonu ve titreşim gibi dış koşulların hesaba katılması gerekmektedir. Yukarıda da belirtildiği üzere, ısı eşanjörlerinin çok geniş kullanım alanı bulunmaktadır. Isı eşanjörleri iklimlendirme, soğutma, ısıtma, alternatif enerji, enerji santralleri, otomobil sektörü, fabrikalar, boyahane fırınları, evlerde sıcak su temini gibi geniş bir kullanım alanında yer almaktadır. Günlük hayattan çok sık kullanılanlara örnek olarak; araçların motor soğutma sisteminde kullanılan radyatörler, buzdolaplarında ve soğutma sistemlerinde kullanılan evaporatörler, klima sistemlerinde kullanılan kondenser sistemi ve yüksek sıcaklıkta termofiziksel özelliğini kaybetmemesi için uygulanan yağ soğutma sistemleri çok rastlanan uygulamalardan birkaçıdır.

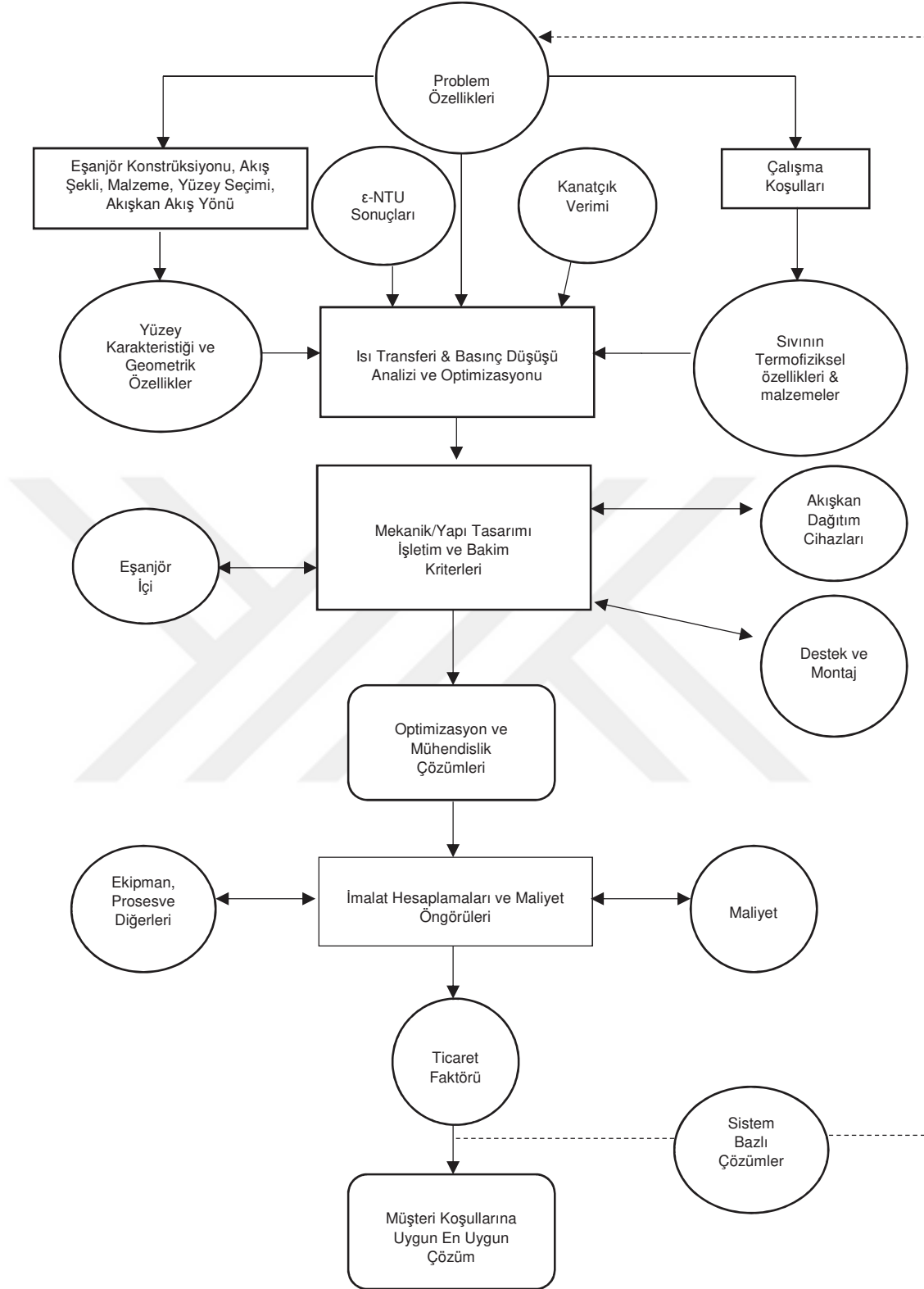
Günümüzde ısı eşanjörlerinin tasarımında en sık kullanılan iki metot vardır. Bunlar; etkin transfer üniteleri metodu ve logaritmik ortalama sıcaklık farkı metotlarıdır. Logaritmik ortalama sıcaklık metodu; eğer, bir ısı değiştiricisinin bütün giriş ve çıkış sıcaklıkları biliniyorsa, eşanjörün boyutlarının belirlenmesinde en uygun metottur. Bu sıcaklıklar bilinmediği takdirde, bilinmeyen sıcaklık iterasyonu yardımıyla performans analizi yapılabilir. Fakat tahmin edilen sıcaklıklardaki küçük değişimler performansı etkileyeceğinden bu iterasyonu başarıyla sonlandırmak zor ve oldukça zaman alan bir işlemdir. Akışkan çıkış sıcaklıkları bilinmiyorsa daha öncede belirtildiği gibi iteratif bir çözüm yapmak gerekmektedir. Isı değiştiricisinde akışkan çıkış sıcaklıkları bilinmiyor ise etkin transfer üniteleri metodu yöntemini kullanmak performans analizi için büyük kolaylıklar sağlamaktadır [12].

Yeni bir ısı eşanjörünün temel tasarım kriterleri Şekil 1.4'de gösterildiği gibi; proses / tasarım özellikleri, ısı ve hidrolik tasarımı, mekanik tasarımı, imalat / maliyetler koşulları ile ticari ve sistem bazlı optimizasyonu içerir [13].

Otomobillerde, yakıt ve hava karışımıyla oluşan yanmanın sonucu olarak güç elde edilir. Sadece bu üretilen toplam gücün bir kısmı aslında araca hareket sağlar. Geri kalan enerji ise ısıya dönüşerek egzoz gazı ile boşa harcanan güç olarak kullanılır. Eğer bu aşırı ısı motor tarafından atılamazsa, motorun sıcaklığı artar ve bu yüksek

sıcaklık motorun yağlanması için kullanılan motor yağının viskozitesini düşürür ve ayrıca motorun metal parçalarındaki mukavemet düşüşüne sebebiyet verir. Bu etkenlerden dolayı motor kullanılamaz hale gelir. Bu yüzden motor soğutma sistemi aşırı ısıyı tahliye etmek için kullanılır.

Otomobil soğutma sistemlerinin çoğu radyatör, su pompası, elektrikli soğutma fanı, genişleme tankı, ısıtıcı ve termostattan oluşur. Bu bileşenlerden, radyatör, soğutma sisteminin en önde gelen parçalarından biridir; çünkü radyatör motor bloklarında dolaşan ve motordaki ısıyı toplayan soğutucu sıvının ısını, ısı transferiyle atmosfere atmasını sağlamaktadır. Soğutucu sıvının sıcaklığı, belirli bir eşik değerin üstüne çıkarsa, soğutucu akışkanı radyatöre doğru yönlendiren termostat valfi açılır. Soğutucu sıvı, radyatörün boruları arasından geçerken, ısı, boruların cidarlarından iletim ve kanatçıklardan havaya taşınım ile transfer edilir [14]. Daha sonra radyatörde soğutulan soğutucu akışkan, radyatörden çıkarak tekrardan motora gönderilir ve devir daim sağlanır. Soğutucu akışkandaki sıcaklık farklılıklarından dolayı, soğutma sisteminde buharlaşma sürekli gerçekleşmektedir. Bu buharlaşmadan dolayı oluşan gazlarda yüksek basınçta oluşan genişleme radyatörün lehimlerine ve borularına olumsuz etki etmektedir. Bundan dolayı kapalı sistem olan soğutma sistemlerinde tüm gazları toplayan bir genişleme tankı bulunmaktadır.



Şekil 1.4. Isı eşanjörleri tasarım metodolojisi

Radyatörde eğer çıkış sıcaklığı belli değilse etkin transfer üniteleri metodu kullanılmaktadır. Günümüzde de ayrıca en çok kullanılan metot olan etkin transfer

üniteleri metodu radyatördeki maksimum ısı geçişi ile Eşitlik (1.7)'deki gibi hesaplanabilir;

$$q_{\max} = C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (1.7)$$

Burada, C_{\min} ısı kapasite debisi, C_c veya C_h değerlerinden hangisi küçükse o değere eşit olarak alınır. Etkinlik ya da kısaca ε değeri Eşitlik (1.8)'deki gibi belirtilir;

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{c,i})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (1.8)$$

Etkinlik değeri $0 \leq \varepsilon \leq 1$ arasında değişen bir büyüklüktür. O halde, ısı transferi Eşitlik (1.9)'daki gibi ifade edilir;

$$q = \varepsilon C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (1.9)$$

Etkinlik değeri ayrıca fonksiyonel olarak Eşitlik (1.10)'daki gibi ifade edilir;

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad (1.10)$$

Etkin transfer üniteleri metodu ile gösterilen geçiş birimi sayısı, ısı değiştiricilerinin ve dolayısıyla radyatörlerin çözümlenmesinde yaygın olarak kullanılmakta olup Eşitlik (1.11)'deki gibi gösterilir;

$$NTU \equiv \frac{UA}{C_{\min}} \quad (1.11)$$

C_r için C_{\min} ve C_{\max} oranı olmak üzere, akış rejimine göre etkinlik değeri belirlenir.

1.4. Taguchi Metodu

Taguchi metodu, deney tasarımlarının oluşturulmasında kullanılan verimli, deney sayısını azaltan, ürünün tasarım aşamasında maliyetini düşüren, değişkenleri azaltan ve günümüzde çok sık kullanılan bir metottur. Optimizasyon için kullanılan metotlardandır.

Taguchi'nin deney tasarımı, kendisinin oluşturduğu yedi temel kalite noktasına dayanır. Taguchi'nin kalite felsefesi, yedi noktada aşağıdaki gibi özetlenebilir [15]:

1. Ürün kalitesinin önemli bir boyutu, o ürünün kalitesizliğinin, toplumda yol açabileceği toplam kayıp olarak ifade edilebilir.
2. Rekabetçi bir ekonomide işletmenin varlığını sürdürebilmesi için kaliteyi sürekli olarak geliştirmesi ve maliyetleri düşürmesi gereklidir.
3. Sürekli kalite geliştirme programları, ürünün performans karakteristiklerinin hedef değerlerden sapmalarının kayda değer miktarda azaltılmasını içermelidir.
4. Ürün performansındaki değişim sonucunda ortaya çıkan ve müşterilerin katlandığı kayıp, yaklaşık olarak, performans karakteristiğinin hedef değerden sapmasının karesi ile doğru orantılıdır.
5. Ürünün nihai kalite ve maliyeti, önemli oranda ürünün ve imalat sürecinin mühendislik tasarımları tarafından belirlenir.
6. Ürün ve sürecin performans değişkeni, ürün ve süreç parametrelerinin performans karakteristikleri üzerindeki eğrisel etkileri giderek azaltılabilir.
7. İstatistiksel olarak planlanmış deneyler performans değişkenini azaltan ürün veya süreç parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Kalite, birçok kimse tarafından; "toleransları sağlamak", "sıfır hata" veya "müşteri tatmini" olarak tanımlanmıştır. Fakat bu tanımlamalar kalite ve maliyet arasındaki ilişkiye ait bir yöntem bilim ortaya koyamamıştır. Ancak Taguchi'nin kalite anlayışı, kalite ile maliyet arasında ilişki kurmayı sağlamıştır. Bu ilişki (kalite - maliyet ilişkisi) sadece üreticiyi ilgilendiren bir ilişki değil aynı zamanda müşteriye ve hatta toplumu ilgilendiren bir ilişkidir [16].

Taguchi metodu özetlenecek olunursa, üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım metodudur. Bu metod; ürünlerin kalitesinin iyileşmesinde etkili olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkânını vermektedir. Bunun yanında felsefe olarak, kalitenin tasarım ve proseste sağlanmasını ön görmektedir [17].

Taguchi deney tasarımı, deneye tesir eden faktörler ve değişkenlere(seviyelere) göre çeşitli deney desenlerine ayrılır. Deney desenleri aşağıdaki Tablo 1.1'deki gibi sınıflandırılabilir;

Tablo 1.1. Taguchi Metodu deney tasarımları

Model	Seviye	Faktör	Deney Sayısı
L4 2³	2	3	4
L8 2⁷	2	7	8
L12 2¹¹	2	11	12
L16 2¹⁵	2	15	16
L32 2³¹	2	31	32
L64 2⁶³	2	63	64
L9 3⁴	3	4	9
L27 3¹³	3	13	27
L27 3²²	3	22	27
L16 4⁵	4	5	16
L25 5⁶	5	6	25
L18 2¹	2	1	18
L18 3⁷	3	7	18
L36 2³	2	3	36
L36 3¹³	3	13	36
L36 2¹¹	2	11	36
L36 3¹²	3	12	36
L54 2¹	2	1	54
L54 3²⁵	3	25	54
L50 2¹	2	1	50
L50 5¹¹	5	11	50

Sonuç olarak, Taguchi deney tasarımı, günümüzde ürün geliştirme aşamasında maliyet düşürücü etkisi ve kaliteyi önceliklendirmesi yönüyle birçok araştırmacı tarafından kullanılan bir metottur. Çoğu istatistiksel bazlı yazılımlarda ise hesaplama metodu olarak yerini almaktadır.

1.5. Literatür Araştırması

Nanoteknoloji bilimi, 1 ile 100 nanometre arasındaki maddelerin araştırılmasını ve onların karakteristiğini inceler. Nanoakışkanlar ise nanoteknolojinin bir alanı olarak yer almaktadır. Nanoakışkanları sadece sıvı-katı karışımı olarak değerlendirmek doğru değildir; çünkü nanoakışkanların bazı özel şartları yerine getirmesi gerekmektedir. Bu şartlar; nanoakışkanın kararlı olması, çok az nanoparçacık kümelenmesinin gözlemlenmesi ve kimyasal değişimi göstermemesi olarak sıralanabilir.

Nanoakışkan kısaca, sürekli akışkan fazındaki oluşmuş iki fazlı karışımı işaret eden temel sıvı içine dağılmış nanoparçacıklardır. Günümüzde, nanoakışkanlar ısı transferi performansını arttıran yeni nesil ısı transferi akışkanları olarak gösterilmektedir [18].

Nanoakışkanların üretiminde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bunlar; iki-adım ve tek-adım teknikleridir. İki adım tekniği, ilk adımda fiziksel veya kimyasal ayrıştırma yöntemi ile nanoakışkanların üretilmesini sağlar ve nanoakışkanlar sonrasında ana akışkan içine dağıtılır. Genelde oksit nanoparçacıklı nanoakışkanların üretiminde kullanılır. İki-adım tekniğinin avantajları, soy gaz yoğunlaşma tekniği kullanılmasıdır. Bu tekniğin kullanımı daha ekonomiktir; böylece yüksek miktarda nanoparçacık üretilebilir. Tek-adım yönteminde ise, nanoparçacıkların eş zamanlı üretimi ve temel sıvının içine dağıtılması söz konusu olmaktadır. Yüksek iletkenlikteki metallere sahip nanoakışkanların üretiminde oksidasyonu önlemek amacıyla iki adım yöntemine göre, tek-adım yöntemi daha avantajlıdır. Havuz kaynama tekniği de ayrıca bulunmaktadır [19-20].

Isı iletkenliği, bir maddenin ısı transferi performansını gösterir ve nanoakışkanlarda bu özellik birçok faktöre bağlıdır. Bunlar; nanoparçacık çeşidi, nanoparçacık şekli, yüzdesel hacim oranı, temel akışkanın cinsi, sıcaklık, nanoparçacık çapı ve asitlik derecesidir. Nanoparçacıkların temel sıvıda sağladığı Brownian hareketi, sıvı-katı ara yüzeyindeki sıvının moleküler seviyedeki tabakası, nanoparçacık içindeki ısı transferinin doğası ve nanopartiküllerin çökme yapmadan dağılımının etkisi, nanoakışkanların ısı transferi performansının, temel sıvılara göre daha yüksek olmasına sebebiyet verir. Isı transferi amaçlı uygulamalarda, nanoakışkanlar için en çok yapılan araştırma ısı iletkenliğinin geliştirilmesi üzerine olmuştur. Bu yüzden, parçacık boyutu, parçacık konsantrasyonu, parçacık tipi, temel akışkan ve çalışma sıcaklığı gibi birçok parametre incelenmektedir [21].

Nanoakışkanların ısı transfer katsayısındaki kazanımlarına ilişkin çalışmalar laminar ve türbülanslı akış ile kaynama koşullarındaki akışkan durumlarına göre incelenmektedir. Nanoakışkanlarda elde edilmesi istenen katma değer; temel sıvının içine eklenen mümkün olan en küçük konsantrasyonda ve mümkün olabilecek en büyük ısı özelliklerinde dağılım ve kararlılıktır [22].

Metaller (Ag, Cu, Fe ve Au), metal oksitler (Al_2O_3 , CuO), nitrit seramikler veya karbon nanotüpler, nanoakışkanların üretiminde genellikle kullanılan

nanoparçacıklardır. Bunlardan en çok kullanılanlar maliyet, üretim kolaylığı ve ısı iletim özelliklerine göre Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiC , TiC , Ag , Au , Cu ve Fe nanoparçacıklarıdır. Nanoakışkanlarda çoğunlukla küresel parçacıklar kullanılmaktadır. Nanoparçacığın çapı hem ısı transfer performansını hem de üretim yönteminden dolayı nanoakışkanın maliyetini etkilemektedir [23].

Son dönemlerde, nanoakışkanların termofiziksel davranışlarının belirlenmesi için birçok deneysel ve teorik araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların sonucunda oldukça küçük nanoparçacık hacim oranlarında, ısı iletim iyileştirmelerinde, oldukça yüksek başarı sağlandığı görülmüştür. Deneysel verilerden elde edilen sonuç, nanoakışkanların ısı iletim özellikleri parçacık boyutu küçüldükçe artmaktadır. Çünkü nanoparçacıkların Brownian hareketi ve nanoparçacıklar etrafındaki sıvı tabaka ısı transferini arttırmaktadır [4].

Isı transferinde, konvansiyonel akışkanlar olarak genellikle; su, yağ ve etilen glikol gibi akışkanlar kullanılmaktadır. Mühendislikte kullanılan pek çok cihazların performansının yükseltilmesi ve boyutlarının küçültülmesinde, bu akışkanların düşük ısı transfer performansına sahip olmaları temel engeli oluşturmaktadır. Bu engeller, yüksek ısı iletim özelliklerine sahip akışkanların geliştirilmesi için, nanoakışkanlar konusunda çalışmaların yapılmasına sebebiyet vermiştir. Konvansiyonel akışkanların, ısı transfer karakteristiklerinin artırılmasında kullanılan tekniklerden birisi de akışkan içerisine, ısı iletim özellikleri akışkanlara göre daha yüksek olan katı partiküllerin ilave edilmesidir [24].

Nanoakışkanları günümüzde bu kadar önemli kılan en önemli özellik ise nanoparçacıklarda çökme durumunun ihmal edilebilecek kadar çok düşük olmasıdır. Mikro yapıları parçacıklarda bu durum gözlemlenmektedir, bu yüzden bu tip karışımlar heterojen karışım özelliğine sahip olarak ısı transferine bir katkısı yoktur. Nanoparçacıklar, bu yüzden temel sıvının termofiziksel özelliklerini etkilemektedirler [25]. Isı transferi nanoakışkanlarda, doğal taşınım, zorlanmış taşınım ve birleşik taşınım olarak üç farklı durumda gerçekleşebilir. Etilen glikol, su veya yağ gibi temel sıvılardan farklı bir özel sıvı olan nanoakışkanlar, nanoparçacık ve temel sıvının oluşturduğu bir karışımdır. Literatürde bazı araştırmacılar çalışmalarını nanoakışkanlarda tek fazlı olarak yaparken, bazı bilim adamları ise araştırmalarını çift fazlı olarak gerçekleştirmektedirler.

Özetle, yapılan çalışmalara göre nanoakışkanların avantajları aşağıdaki gibidir [26];

- Parçacıkların nano seviyedeki parçacık çapları yüksek ısı transferi alanı oluşturur.
- Yüksek dağılım kararlılığı Brownian hareketi oluşmasına sebebiyet verir.
- Azalan parçacık tıkanması ve artan ısı transferi katsayısı taşınım ve iletim ısı transferini arttırmaktadır
- Nanoakışkanlar çevre dostu malzemelerdir.

Serrano ve diğerleri [27] nanometre çizelgesi oluşturarak milimetre, mikrometre ve nanometreleri sınıflandırmıştır. Nanoakışkanlar, temel sıvıdan farklı oldukları için termofiziksel özellikleri de farklıdır. Bu yüzden günümüzde nanoakışkanların yoğunluk, ısı iletim katsayısı, ısı kapasitesi, dinamik viskozitesi ve ısı yayılım katsayısı gibi termofiziksel özelliklerini hesaplamak için hem deneysel hem de nümerik formülasyonlar ve yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Nanoakışkanlar hem doğal konveksiyon hem de zorlanmış konveksiyon üzerinde kullanılmaktadır. Khanafer [2], bakır ve sudan oluşan nanoakışkan üzerinde doğal konveksiyon çalışmaları yapmıştır ve oluşturduğu model ile deneysel veriler ile yakın sonuçlar elde ederek birçok araştırmacıya kaynak olmuştur. Bu çalışmada nanoakışkanların ısı transferini iyileştirici etkisi gözlemlenmiştir. Nasrin [28], Khanafer [2]'in yapmış olduğu çalışmayı geliştirmiş ve kare şeklindeki geometrinin merkezine eşkenar dörtgen ekleyerek çalışmasını yorumlamıştır. Bu çalışmada Al_2O_3 ve Cu kıyaslanmıştır ve nanoakışkanın ısı transferini iyileştirdiği bulunmuştur. Mahmoodi ve Saeed, Nasrin [28] ve Khanafer [2]'in çalışmalarının üzerine ek bir çalışma yaparak adyabatik kare bir geometrinin ortasına farklı boyutlarda şekil koyarak doğal konveksiyonda nanoakışkanları incelemiştir. Alinia ve diğerleri [29], kare şeklindeki açılı geometride karışık taşınım incelemiştir. Karenin üst ve alt kenarlar adyabatik olarak tanımlanmış, sol kenar yüksek sıcaklık ve sağ kenar düşük sıcaklık olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak nanoakışkanların karışık taşınımında uygulanabilir olduğu gözlemlenmiştir. Balaji ve diğerleri [30], nanoakışkanların karışık taşınımında sayısal çalışmalarda kullanılabilmesi için bir metot geliştirmişlerdir.

Termofiziksel özelliklerden en önemlisi ve ısı transferi performansına direkt etki eden ısı iletim katsayısı için birçok bilim insanı detaylı araştırmalarda ve yaklaşımlarda bulunmuştur. Bu çalışmalardan model olarak literatürde en çok kullanılanları; Hamilton ve Crosser [24], Wasp [31], Maxwell ve Garnett [32], Bruggeman [33] ve Wang ve diğerleri [34] tarafından önerilen modellerdir.

Nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayılarını ifade etmek üzere alternatif bir model Yu ve Choi [35] tarafından son yıllarda önerilmiştir. Yu ve Choi nanoakışkanlarda katı sıvı yüzeyinde oluşan sıvı tabakanın sıvı ve katı arasında bir termal köprü görevini gördüğünü ifade etmiş ve ısı iletkenlik katsayısındaki önemli artışları bu etkiye bağlamıştır ve model sonuçlarını nanoakışkanlar için yapılmış pek çok deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar, sonuç olarak modellerinin ısı iletkenlik katsayısını ifade etmede oldukça başarılı olduğunu görmüşlerdir. Corcione [36] ısı iletim katsayısını, deneysel çalışmalar neticesinde %1,8 hata payı ile 10 – 150 nm çapındaki nanoparçacıklar için, %0,2 – %9 hacimsel oranda ve 294 K – 324 K arasında kullanılan bir model önermiştir. Nanoparçacık hacim yüzdesi arttıkça ısı iletim katsayısı artmaktadır. Bu artışın da ısı transferi performansına olumlu etkisi vardır. Ancak nanoparçacık yüzdesinin ısı transferi iyileştirmesi ele alınırken aynı basınç düşümü de ele alınmalıdır.

Nanoparçacığın boyutları azaldıkça efektif taşınım ısı iletim katsayısına olumlu katkısı bulunmaktadır [37 - 38]. Beck ve diğerleri [39], Al_2O_3 ile su ve Al_2O_3 ile etilen glikolden oluşan nanoakışkanlar için farklı nanoparçacık çaplarında denemeler yaparak 8 nm ve 282 nm arasındaki boyutlarda ısı transferinde artış gözlemlemiştir. Hwang ve diğerleri [40], 33 nm CuO ile 12 nm SiO_2 'i ısı transferi performanslarını kıyaslamışlardır.

Nanoparçacık şekli, Liu ve diğerleri [41] tarafından incelenmiştir. Silindirik şekilli nanoparçacıklar küresel şekilli nanoparçacıklı nanoakışkanlara göre daha yüksek ısı transferi performansı göstermiştir. Nanoparçacık boyutlarının yanında nanoparçacık şekli yüzey alanı artışından dolayı ısı transferine etkisi vardır. Aynı zamanda yüzey şeklinin çok karmaşık olmaması gerekmektedir; çünkü üretim prosesinde maliyete etki eder.

Diğer önemli termofiziksel özellik ise viskozitedir. Viskozite özellikle boru içi akışlarda dikkate alınması gereken çok önemli bir etkidir; çünkü basınç düşümünü arttırmaktadır. Basınç düşümüne göre de pompa seçimleri yapılarak kurulacak olan sistemin maliyetleri belirlenir. Nanoakışkanlarda viskoziteye etki eden birçok etken vardır [42]. Bunlar;

- Nanoparçacık boyutları
- Nanoparçacık şekli
- Nanoparçacık çeşidi
- Temel sıvı
- Parçacık hacim yüzdesi

- Sıcaklık

Nanoakışkanlarda viskozite hesaplamaları için çeşitli araştırmalar ve deneyler yapılmıştır. Literatür araştırmalarında en çok rastlanan çalışmalar ise; Einstein modeli [43], Brinkmann modeli [44], Vajjha ve diğerleri [45], Pak ve Cho viskozite modeli [46] ve Masoumi ve diğerleri [47] modelidir. Bunlardan Einstein, Pak ve Cho modeli ve Brinkmann, Brownian hareketini hesaba katmadığı için artık günümüzde çok kullanılmamaktadırlar. Masoumi modeli hem Brownian hareketini hem de nanoparçacığın boyutunu hesaba kattığı için gerçeğe yakın değerler vermektedir. Ayrıca Masoumi modeli nanoparçacıkların çapını hesaba katarak viskoziteye etkisini ele alır. Ancak, bu model sadece CuO ve Al₂O₃ gibi nanoparçacıkların kullanımı ile sınırlıdır. Günümüzde araştırmacılar tarafından türetilen farklı temel sıvılarda ve farklı nanoparçacıklarda birçok model vardır. Bu modeller farklı nanoparçacık hacim yüzdesinde ve farklı sıcaklıklarda kullanım alanlarına sahiptir. Tüm çalışmalar incelendiğinde en gerçeğe yakın değerler, deneysel çalışmalardan türetilmiş ve Brownian hareketinin dikkatine alındığı modellerdir.

Yoğunluk ve ısı kapasitesi, nanoparçacıkların temel sıvıya ilavesiyle birlikte diğer etkilenen termal özelliklerdir. Nanoparçacık oranı temel sıvıda arttıkça nanoakışkanın yoğunluğu da artmaktadır. Isı kapasitesi, nanoparçacık oranı ile ters orantılıdır. Nanoparçacık hacim yüzdesi arttıkça ısı kapasitesi düşmektedir [24].

Nanoakışkanların ısı transferine sağlamış olduğu iyileştirici katkı ve gerçek koşullardaki kullanılabilirliği, farklı alanlarda kullanılmasına sebebiyet vermiştir. Bu kullanım alanları; ısı eşanjörleri, araba radyatörleri ve pompalama sistemleri gibi birçok alandaki uygulamalardır.

Nanoakışkanlar ısı eşanjörlerinde birçok uygulamalarda denenmiştir ve ısı transferi performansında dikkate değer bir iyileşme gözlemlenmiştir. Aynı zamanda eşanjör verimi incelenmiş ve eşanjör verimine olumlu katkısı tespit edilmiştir. Eşanjör uygulamalarında en önemli faktörlerden biri de basınç düşümdür. Isı transferi iyileştirmesi incelenirken aynı zamanda basınç düşümünün de hesaba katılması gerekmektedir [48]. Godson ve diğerleri [49], nanoakışkanların ısı eşanjörlerindeki, ısı transferine etkisini dikkate değer bir şekilde belirtmişlerdir. Pantzali ve diğerleri [50], sayısal ve deneysel olarak nanoakışkanların ısı transferi performansına etkisini incelemiştir. Su içindeki hacimsel oranı %4 CuO olan nanoakışkan ısı iletim katsayısını arttırdığı, ısı kapasitesini düşürdüğü ve viskoziteyi arttırdığını

belirtmişlerdir. Ayrıca düşük debilerdeki ısı transferi performansı yüksek hızlara göre daha yüksektir. Bu çalışmaların yanında basınç düşümünün nanoparçacık oranı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Kwon ve diğerleri [51], laminar akışta deneysel olarak ZnO ve Al₂O₃ bazlı nanoakışkanların basınç düşümünü, ısı transferi performansını ve termofiziksel özelliklerini ölçmüştür. Sonuç olarak iki nanoakışkanda da ısı transferine olumlu katkı gözlemlenmiştir. Isı eşanjörlerindeki en önemli dikkat edilmesi gereken durum ise nanoparçacık oranı arttıkça, viskozite artışından dolayı kaynaklanan basınç düşümüdür. Çünkü basınç düşümünün güç tüketimine olumsuz etkisi vardır. Nanoparçacık yüzdesi ısı transferini iyileştirirken paralelinde basınç düşümünü de artırır. Bu durumda en iyi yöntem optimizasyon çalışmalarıdır.

Radyatörler hava ile su arasındaki ısı alışverişini sağlayan eşanjörlerdir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi otomotiv sektöründeki devam eden teknolojik gelişmeler yüksek verimli motorlara olan yüksek talebe doğru eğilim göstermektedir. Yüksek verimli motor sadece yüksek performans değil, aynı zamanda daha iyi yakıt ekonomisi, hacimsel alanı iyi kullanma ve daha düşük emisyonudur [52]. Isı transferi radyatörde hava ve düşük ısı iletkenliklerine sahip soğutucu sıvı arasında gerçekleşir. Sonuç olarak yeni ve yenilikçi bir soğutucu akışkanın ısı transferini iyileştirmek için araç radyatörlerinde kullanılması bir gereksinimdir [53]. Mevcut soğutucu sıvıların yerine kullanılan nanoakışkanlar ile ısı transferinin yüksek değerde artmasını sağlanmıştır. Bu muhteşem karakteristik ile bir araba radyatörünün boyutları, yüz alanı ve ağırlığı azaltılabilir. Araç radyatöründeki boyutsal azalma, aracın aerodinamik özelliğine de olumlu bir etkisi vardır. Aerodinamik direnç kuvveti azalarak yakıt tüketimi iyileşir [54]. Nanoakışkan kullanımı soğutma performansı iyileştirerek performansın artmasına yardımcı olurlar. Diğer yandan basınç düşümü sebebiyle yakıt tüketimini etkilerler. Sabeel ve Dil [55], CuO, TiO₂ ve Al₂O₃'den oluşan su bazlı nanoakışkan ile radyatör performansının iyileştirilmesini sayısal olarak incelemiştir. Sonuç olarak üç nanoparçacık için ısı transferinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Ebrahimi ve diğerleri [56], SiO₂ ve sudan oluşan nanoakışkanın radyatördeki performansını deneysel olarak farklı giriş sıcaklıklarında, farklı Re sayısında ve %0,4 hacim yüzdesinde incelemiştir. Leong ve diğerleri [57], araçlarda antifriz sıvısının karışımını oluşturan bir sıvı olan etilen glikolün, Cu ilavesiyle radyatördeki performansı incelenmiştir. Bu çalışmanın en önemli özelliği ise hem basınç düşümünün hem de ısı transferinin birlikte ele alınmış

olmasıdır. Cu hacimsel yüzde oran %2'ye kadar kademeli olarak çıkartılmış ve nanoparçacık yüzdesi arttıkça basınç düşümü de artar sonucuna ulaşılmıştır.

Delevari ve Hashembadi [58], etilen glikol ile suyun, Al₂O₃ nanoparçacık ilavesiyle oluşturulmuş nanoakışkanın ısı transferi ve basınç düşümü performansını sayısal olarak incelemiştir. Bu çalışmada 9350 - 23000 Re arasında ve %0,1 ile %1 hacim yüzdesinde ısı transferi performansında artış gözlemlenmiştir. Basınç düşümünün etkisi nanoparçacık yüzdesi ile doğru orantılıdır. Ayrıca bu çalışmada oluşturulan sayısal ağ modeli, deneysel bir çalışmaya doğruladığı için referans olarak kullanılan modellerdendir. Samira ve diğerleri [59], antifriz karışımında çalışma yapmak için %60 etilen glikol ve %40'lık sudan oluşan temel sıvı içine CuO ilave ederek çalışmalarını yapmıştır. Üç farklı akışkan giriş sıcaklığında hem basınç düşümünü hem de yüzey sürtünme faktörünü incelemiştir. Sonuç olarak Re sayısı ve parçacık yüzdesinin ısı transferini iyileştirdiği gösterilmiştir. Ancak basınç düşümüne olumsuz etkisi vardır. Nanoakışkanların ısı transferine yapmış olduğu iyileştirmeler ile radyatörün yüzey alanında %10'luk bir azalma gözlemlenmiştir. Yüzey alanı azaldıkça aerodinamik direnç %5 oranında düşmektedir. Bu etkinin yakıt ekonomisine olumlu bir etkisi vardır [60]. Muhammad ve diğerleri [61], %0,01, %0,2 ve %0,3 nanoparçacık hacimsel yüzdesinde, 7 ile 11 l/s hacimsel debide, 17500 - 27600 Reynolds sayısındaki ZnO sayısının ısı transferi performansını incelemiştir. Sonuç olarak ısı transferi performansı nanoakışkanlarda temel sıvı olan suya göre daha iyi bir soğutma performansı gözlemlenmiştir.

Nanoakışkanlar iyileştirme çalışmalarında kullanılıncaya optimizasyon çalışmaları da paralelinde dikkat çekmektedir. Çünkü optimum koşullar birbiriyle ters orantılı olan ısı transferi ve basınç düşümü arasında uygun bir ilişkiyi tanımlar. Günümüzde nanoakışkan optimizasyon çalışmalarında en çok kullanılan metotlardan birisi Taguchi Metodu 'dur [17]. Günümüzdeki rekabet koşullarından dolayı optimizasyona otomobil sektöründe büyük ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, araba radyatörlerinin soğutma performansının iyileştirilmesinde ve nanoakışkan uygulamalarında, Taguchi Metodu araştırmacıların dikkatini çekmektedir [62]. Taguchi deney deseni, toplam etki eden faktörlerin birbiriyle olan kombinasyonundan oluşan tüm deneylerin neticelenmesini beklemek yerine, deney sayısını aza indirerek hem maliyeti düşürür hem de zamanı kısaltarak yapılan tasarımı daha rekabetçi duruma getirir.

Sonuç olarak, Taguchi Metodunun avantajları aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- Deneş sayısı azaltarak, zamandan tasarruf sağlar.
- “En düşükü daha iyi” ve “En yüksekü daha iyi” koşullarını gürültü-sinyal oranları ile çıkartarak en uygun koşulların bulmasında yardımcı olur.
- Deneş sayısındaki azalma maliyet açısından olumlu bir katkı sağlar.
- Birden fazla faktörün birbirleriyle etkileşimini hesaplayarak optimum koşulun bulunmasında önemli bir fayda sağlar.
- Her sayıdaki faktör ve seviye uygun deneş deseninin seçilebiliyor olması deneş kombinasyonu açısından avantaj sağlamaktadır.

Naraki ve diğeri [60], deneşsel olarak CuO'in laminar akıştaki ısı transferi performansını incelemiştir. %0,4'lik nanoparçacık hacimsel yüzdesinde %4'lük bir artış görülmüştür. Taguchi metodu da bu çalışmada optimum değeri bulmak için kullanılmıştır. Kannan ve diğeri [63], Al₂O₃ nanoparçacıklarını %0,25 ve %0,5 ile suya ilave edip ısı transferi performansını, 35 °C ve 59 °C derece aralığında 0,05 kg/s ve 0,15 kg/s kütleşel debilerde incelemiştir. L9, Taguchi deneş desenini kullanarak optimizasyon çalışmasını gerçekleştirmiştir. Topuz ve diğeri [64], 13 nm boyutunda Al₂O₃, 10 - 25 nm büyüklüğünde TiO₂ ve 18 nm büyüklüğünde ZnO nanoparçacıklarını temel sıvı olan suda %0,5, %0,7 ve %1,0'lik hacimsel yüzde de denemişlerdir. Çalışma 400 µm, 750 µm ve 1000 µm'deki mikro kanallarda deneşsel olarak yapılmıştır. Farklı sıcaklıktaki denemeler sonucunda ısı transferinde %15'e varan bir artış gözlemlenmiştir. Optimizasyon için Taguchi Metodu bu deneşsel çalışmada kullanılmıştır.

Nanoakışkan kullanılarak yapılan radyatörün ısı transferi performansının iyileştirilmesi çalışmalarında, Taguchi Metodu ile elde edilen optimum koşulların fizibilitesinin ve gerçek hayattaki uygulanabilirliğinin incelenmesi gerekmektedir. Bunun için etkinlik sayısı ve performans değerlendirme kriteri baz alınmaktadır [65]. Böylece yapılan olan iyileştirmenin uygulanabilirliği incelenebilmektedir.

Sonuç olarak motor soğutma sistemlerinde, geleceğin soğutucu akışkanı olarak görülen nanoakışkanlar, devam edecek olan deneşsel çalışmaların sonucu ile bir araç ömrü boyunca kullanılacak seviyeye getirilirse, devir daim pompasına ve soğutma borularına aşınma problemi yaratmayacak şekilde sistemler tasarlanırsa, gelecekte tüm araçlarda göreceğimiz bir akışkan olarak yerini alacaktır. Ayrıca Taguchi metodu optimizasyon çalışmalarında kullanılırsa hem deneş sayısının düşürülmesinde hem de zamanın kısaltılmasında olumlu katkılarda bulunacaktır.

Literatür araştırmasından görüldüğü üzere hem deneysel hem de sayısal çalışmalar mevcuttur. Bu yüzden nanoakışkan soğutma sıvılı radyatör tasarımı yapılırken aşağıdaki noktalar öncelikli olarak ve hedeflenen değerlere göre dikkate alınmalıdır;

- Basınç düşümü yakıt tüketimini arttırdığı için nanoparçacık hacimsel yüzdesi artırılırken hesaba katılmalıdır.
- Temel sıvı seçilirken, kısacası etilen glikol su karışımında viskoziteye dikkat edilmelidir ve ona göre karışım oranı belirlenmelidir. Ayrıca nanoakışkanın da donma noktası gerçek koşulları yansıtması için önemlidir.
- Nanoakışkanın termal özellikleri hesaplanırken mutlaka Brownian hareketi ve nanoparçacık boyutu hesaba katılmalıdır.
- Nanoparçacık seçerken çok küçük boyutlarda seçmek avantajlıdır ama diğer yandan yüksek imalat maliyeti vardır. O yüzden optimizasyon yapılmalıdır.
- Taguchi Metodu optimizasyon çalışmalarında zaman ve toplam deney sayısı azlığı nedeniyle kullanılmalıdır.
- Performans değerlendirme indeksi ve etkinlik değerleri uygulanabilirlik için değerlendirmesi tasarımcısı tarafından yapılırken Taguchi değerleri ile birlikte değerlendirilmelidir.

2. PROBLEMİN TANIMI VE SAYISAL YÖNTEM

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile akışkanlar mekaniği arasındaki ilişkiyi anlamak için öncelikle akışkanlar mekaniğinin incelenmesi gerekmektedir. Akışkanlar mekaniği, akışkanın (sıvı veya gaz) durgun veya hareketli durumundaki davranışını inceleyen bilim dalıdır. Sıvılar buldukları kabın şeklini alan akışkan olarak tanımlanırken, gaz ise buldukları kabın tamamına genişleyen akışkan olarak tanımlanır. Sıvılara örnek olarak yağ, gliserin, alkol ve su verilebilir. Gazlara ise hava, oksijen, helyum ve hidrojen örnek olarak verilebilir. Akışkanların özellikleri belirli bir sıcaklık ve basınçtaki, yoğunluk, viskozite, özgül ağırlık değerleriyle tanımlanır.

Akışkanlar mekaniği üç ayrı branşa ayrılır. Bunlar; hız, ivme ve kütle arasındaki ilişkiyi inceleyen akışkanlar dinamiği, kuvvetleri dikkate almadan, sadece hız ve akışı dikkate alan akışkanlar kinematiği ve akışkanları hareketsiz yani hidrostatik olarak inceleyen durağan akışkanlar mekaniğidir.

Akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde temel denklemler kullanılır. Bu denklemler aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- Kütle korunumu – süreklilik denklemi
- Newton'un ikinci yasası – hareket kanunu
- Enerjinin korunumu yasası

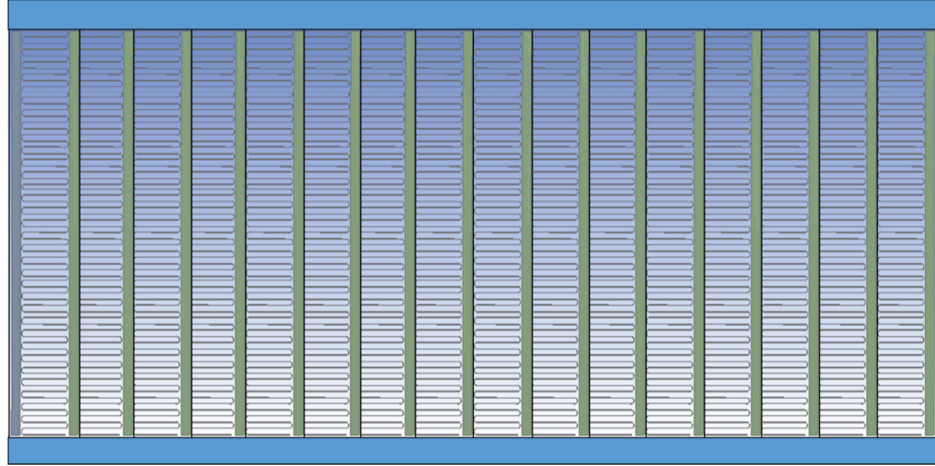
Yukarıdaki temel denklemleri kullanırken aşağıdaki durumları da göz önünde bulundurmak gerekmektedir:

- Her problemde, tüm temel denklemler kullanılmayabilir.
- Bazı durumlarda yukarıdaki denklemlere ek olarak ideal gaz denklemi kullanılabilir.
- Hesaplamanın gerçekleştiği ortamdaki sınır koşullarını iyi tanımlamak ve akışkanın 1., 2. veya 3. boyuttan hangisinde ele alınacağını incelemek gerekmektedir.

Sonuç olarak, mühendislik hesaplamalarında, analitik ve direkt hesaplanamayan karmaşık modeller için yöntemler; ısı transferi, basınç kayıpları, akış hızları hesaplamalarında, hem zaman olarak hem de maliyet olarak yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden hesaplamalı akışkanlar dinamiği, ilgili alanda detaylı hesaplamaların yapılabildiği, akış alanı ve diğer fiziksel detayların gösterilebildiği, bilgisayar tabanlı olarak kullanılan bir mühendislik yöntemidir. Bu analizlerin sonuçları, simülasyon tabanlı, ürün tasarım sürecinde ürünün çalışmasını, varsa problemleri bilgisayar ortamında analizini ve ürün performansını optimize etmekte önemli faydalar sağlamaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde modelin kurulması için ise sonlu farklar, sonlu hacimler ve sonlu elemanlar gibi yöntemler kullanılarak analiz yapılacak model ağlara ve elemanlara ayrılır.

2.1. Problemin Tanımı ve Radyatör Tasarımı

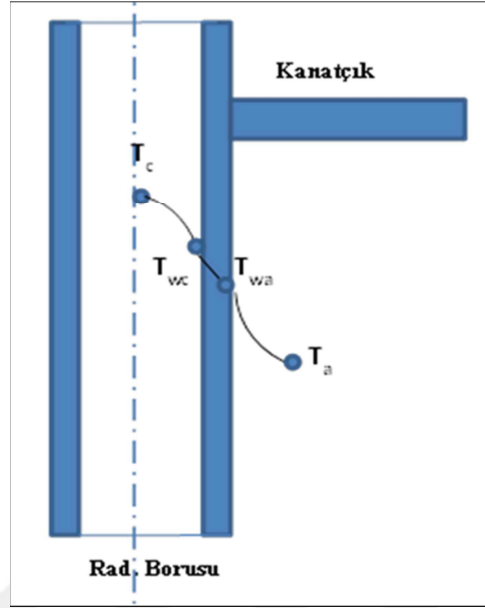
Çalışmada kullanılan radyatör, hava ile ısı alışverişinin yapıldığı, düz kanatçıklara sahip dikey yassı borularından oluşur. Bu tip ısı eşanjörleri boru tasarımından dolayı daha iyi performanslı ve verimlidir ve borulardan ortama daha düşük basınç düşümü gerçekleşir. Bu yüzden, bu çalışmada, Şekil 2.1'de gösterilen, alüminyum malzemeden oluşan 34 borudan oluşan yassı borulu radyatör model olarak alınmıştır [58].



Şekil 2.1. Çalışması yapılan radyatörün geometrisi

Soğutma performansının iyileştirilmesi için nanoparçacık ilave edilen soğutucu akışkan, motorda ısınarak radyatörün üst haznesine gelir, daha sonra radyatörün borusunun içinden geçerek alt hazneye geçer ve tekrardan motora pompalanır. Üst haznedeki alt hazneye geçerken ortamdaki gelen hava ile soğuma işlemi

gerçekleşmektedir. Bu durumu hesaplamak ve analiz etmek için bu çalışmada kullanılan model Şekil 2.2'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Teorik model

Şekil 2.2'deki modelden oluşturulan direnç değerleri Eşitlik (2.1)'deki gibi gösterilmiştir;

$$\frac{1}{U.A} = \frac{1}{h_c A_i} + \frac{\square}{k_t A_t} + \frac{1}{\eta h_a A_o} \quad (2.1)$$

Cidar kalınlığı çok düşük olduğu için, iletim ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Böylece eşitliğin son durumu Eşitlik (2.2)'deki gibidir;

$$Q = h_c A_i (T_w - T_c) = \eta h_a A_o (T_a - T_w) \quad (2.2)$$

Modelde duvar sıcaklığı ve taşınım katsayısı, sayısal analizden sonra sonuçları elde edilecek olan değerlerdir. Bu çalışmada, radyatörün borularından geçen akışkanın karakteristiği inceleneceği için, analizi basitleştirmek için şekil tek borudan geçen akışkanın iç akışı incelenerek, çıkan sonuç, radyatördeki toplam 34 boru için yorumlanmıştır.

Radyatör tasarımındaki önemli bir parametre ise kanatçıklardır. Kanatçıklar sağladıkları ekstra yüzey alanıyla radyatörün içinden geçen akışkanın daha çabuk ısını ortama atmasını sağlar. Kanatçığın yüzey geometrisi ve sayısı, radyatörün borularından ortama transfer edilen ısıya direkt tesir eder. Bu yüzden radyatör

tasarımı yapılırken, kanatçık sayısının ve geometrisinin maliyetleri de göze alınarak optimum sayılarda ve ebatlarda tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada iç akış incelendiği için kanatçık verimi ile ortamın taşınım ısı transferi katsayısı deneysel verilerden alınarak toplam değer olarak analizde kullanılmıştır.

Radyatör tasarımına tesir eden diğer bir etken ise soğutucu akışkanın radyatörün içinden geçmekte olduğu radyatör borularıdır. Soğutucu akışkan, borulardan geçerken ortama ısını atarak soğutucu akışkanın soğuması sağlanır. Bu süreçte ısı transferine etki eden en önemli parametreler; borunun ısı iletim katsayısı, çapı, sayısı ve uzunluğudur. Bu çalışmada yassı tip borulu radyatör seçilmiştir.

Radyatör tasarımında, hesaba katılması gereken en önemli etkenlerden bir tanesi de basınç düşümdür. Bu yüzden akışkan dolaşımı, pompa veya fanın yapısına ihtiyaç duyar, yetersiz tasarımın sonucunda ekstradan maliyete sebebiyet verir. Basınç düşümü hesaplamaları, hem akışkanın akış düzeni hem de iki iç akış ya da bir iç, bir dış akış gibi çok karşılaşılan akış durumlarında yapılması gereklidir. Basınç düşüşü akışın tipi(laminar veya türbülanslı) ve akışın geçtiği yerin uzuluğundan etkilenmektedir [59].

Nanoparçacıkların yüzdelik konsantrasyonları temel sıvıda artarsa, basınç düşümü de artar. Dolayısıyla pompalama gücü artarak yakıt tüketimine tesir eder [58].

Radyatörlerde basınç düşümü Eşitlik (2.3)'deki gibi ifade edilir;

$$\Delta P = \bar{C}_f \frac{4L}{D_h} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.3)$$

\bar{C}_f değeri yüzey sürtünmesini ifade eder ve Darcy sabiti ile ilişkisi $f = 4 \cdot \bar{C}_f$ 'dir.

Soğutma pompasının, pompalama gücünün hesaplaması, Eşitlik (2.4) ile hesaplanır;

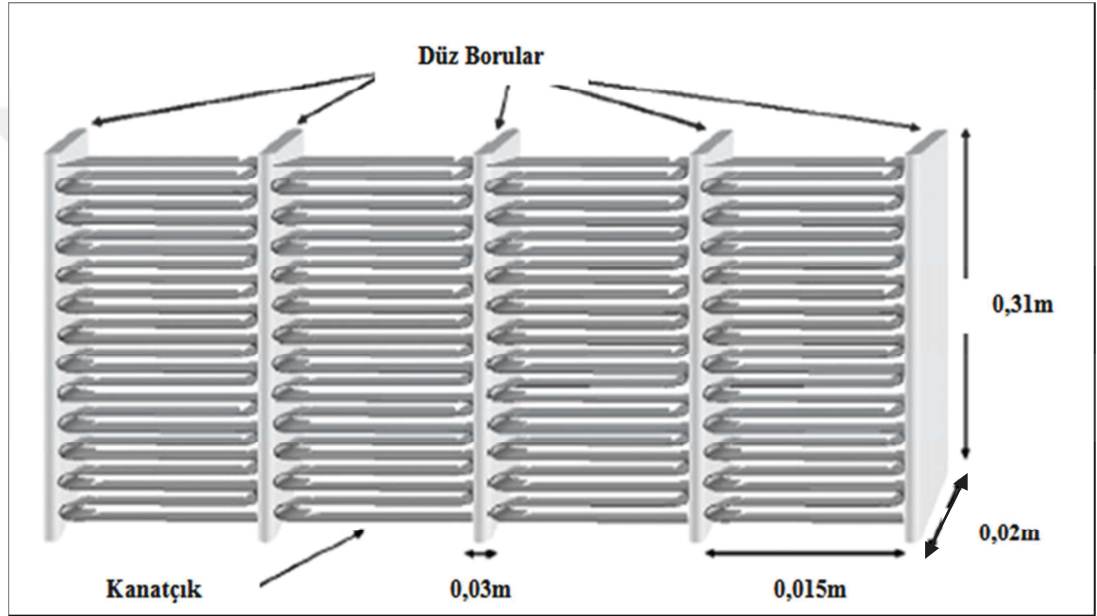
$$W = AV(\Delta P)N \quad (2.4)$$

A, soğutucu sıvının giriş alanını; V, akışkanın hızını ve N, radyatördeki tüp sayısını ifade eder.

Eşitlik (2.4)'den de anlaşılacağı üzere basınç düşümünün, aracın güç tüketimine ve yakıt tüketimine negatif bir etkisi vardır. Tasarım yaparken debinin hesaplanmasının yanında basınç düşümünün de dikkate alınması çok önemlidir.

2.2. Çalışmada Kullanılacak Radyatörün Teknik Özellikleri

Radyatörler araçlarda genellikle, klima sisteminin bir parçası olan kondenserin arkasında bulunmaktadır. Radyatörün arkasında, radyatörün çevresindeki hava dolaşımını arttıran ve soğutucu akışkanın daha çok soğumasını sağlayan fan ve akış bölgesini daha düzenli hale getiren davlumbaz bulunmaktadır. Bu çalışmadaki radyatör geometrik olarak binek araçlarda kullanılan, içinden soğutucu akışkanın geçtiği ve 34 adet borudan oluşan, hava ile temas yüzeyini arttıran düz kanatçıklardan oluşmaktadır.



Şekil 2.3. Çalışması yapılan radyatör geometrisinin boyutları [58]

Bu çalışmadaki radyatörün, bir kesiti -5 tüplü kısmı- geometrik ölçülendirme olarak Şekil 2.3'deki gibi belirtilmiştir. Tüm radyatörün teknik bilgileri ayrıca Tablo 2.1'de detaylı olarak verilmiştir.

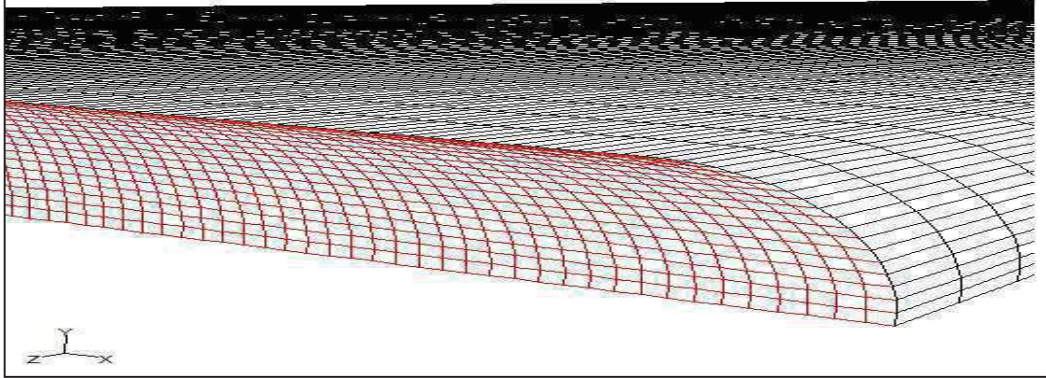
Tablo 2.1. Radyatör geometrik boyutları [58]

Boyut	Gösterim	Değer(m)
Radyatör Uzunluğu	L_{rad}	0,364
Radyatör Boyu	H_{rad}	0,310
Radyatör Eni	W_{rad}	0,020
Boru Uzunluğu	L_t	0,020
Boru Boyu	H_t	0,310
Boru Eni	W_t	0,003
Boru Hidrolik Çapı	d_h	0,0053

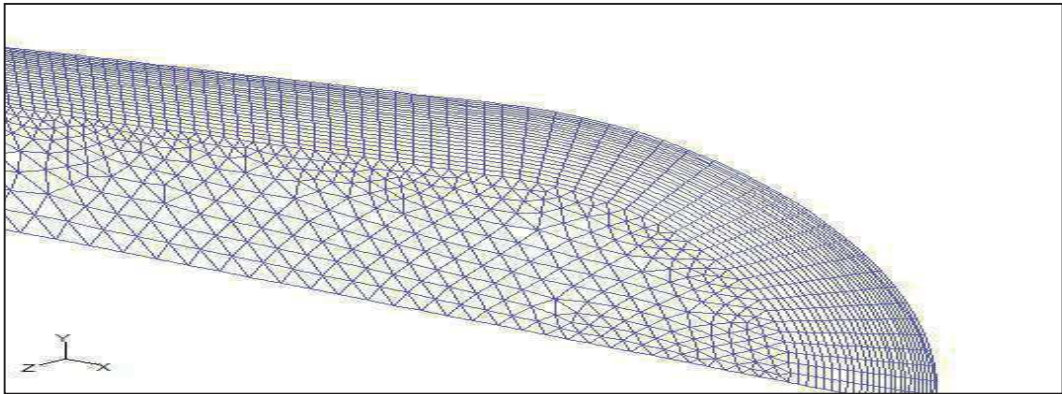
2.3. Radyatörün Modellenmesi ve En Uygun Ağ Seçimi

Radyatörlerde gerçekleşen yüksek hızdaki ve dolayısıyla yüksek Re sayısındaki akışlar, boru içerisinde türbülanslı akışa sebebiyet verir. Türbülanslı akışlarda, akışkanın karakteristiğini gözlemlemek için sonlu hacimlerdeki ağ ve eleman sayısının önemi çok büyüktür. Sonlu hacimlere ayrılmış üç boyuttaki geometrinin ağ ve eleman kalitesi ne kadar yüksek olursa, modeldeki analiz sonuçları da o kadar gerçeğe yakın çözümler elde edilebilir. Öte yandan, ağ yapısının incelenmesiyle çözüm süreci artar. Dolayısıyla sonuçların ağ yapısına bağlı olmadığı optimum ağ yapısı bulunmalıdır.

Bu çalışmada, birçok ağ denenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile karşılaştırılıp doğrulaması yapılmıştır. Bu sonuçlara istinaden uygun ağ ve eleman modeli seçilmiştir. Kalite olarak "Ansys Fluent - 15" paket programında, düşük kaliteden yüksek kaliteye doğru 0 - 1 arasında olması gereken kalite değerlendirmesinde 0,6 - 1 arasındaki kaliteye sahip modeller hesaplamaya alınmıştır.



Şekil 2.4. Düzenli 150 x 150 x 20'luk ağ yapısı



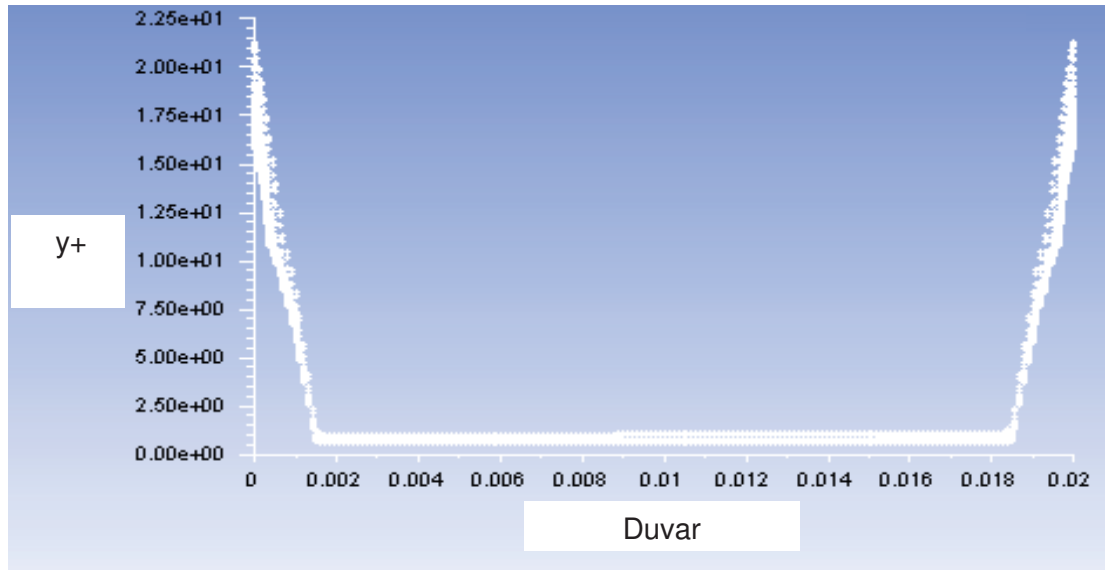
Şekil 2.5. Düzensiz ve sınır tabakalı ağ yapısı

Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de yapılan ağ model denemeleri gösterilmiştir. Çözümler akışkan hızı, 23000 Re - en yüksek değer- için yapılmıştır. Bu denemelerdeki amaç hangi modelin daha uygun olduğunu belirlemek için uygun ağ yapılarını bulmaktır. Sonuç olarak en uygun model, Tablo 2.2’de gösterildiği gibi 150x150x20 düzenli elemanlı ağ modelidir. Bu şekilde 2 GHz CPU ve 4 GB RAM’e sahip bilgisayarın çözüm zamanı da dikkate alınmıştır.

Tablo 2.2. Farklı ağ yapıları için h, Nu değişimi ve gerekli hesaplanma süresi

Elemanlar	Nu	h [W/ m ² K]	Zaman [dk.]
Yapısız Model-1 (15904 Ağ – 11320 Eleman)	6635	3249	15
Yapısız Model-2 (132319 Ağ – 111708 Eleman)	1516	3097	20
Yapısız Model-Sınır Tabakalı (123012 Ağ – 115000 Eleman)	227	463	60
80x80x10	213	435	75
118x118x15	159	325	110
150x150x20	139,7	285	200
250x250x30	138,6	284	350

Bu çalışmada türbülanslı akış çalışıldığı için modelin ağ ve eleman kalitesi Y^+ boyutsuz değeri ile Şekil 2.6’daki gibi incelenmiştir. Duvara yakın bölgelerdeki ağın uygun boyutlarda olup olmadığını anlamada ve belirlemede yardımcı olur. Buna göre kaba yapılı ağ ya da ince yapılı ağ kullanılır.

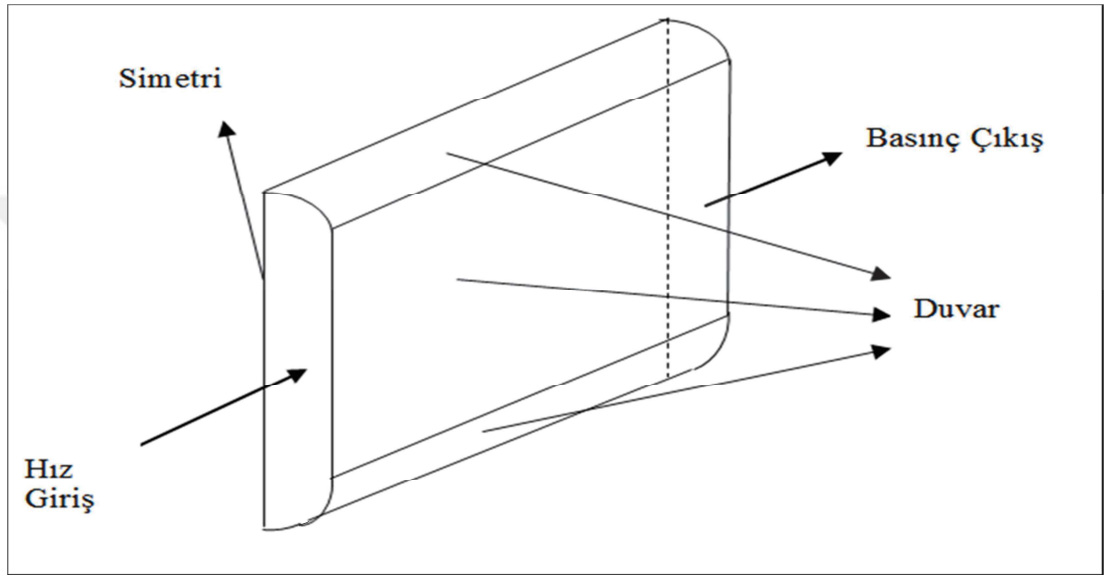


Şekil 2.6. y^+ değeri

Sonuç olarak y^+ değeri, türbülanslı akışta kabul edilen bir sınır değer olan 1 değerine yakın bir değere sahip olduğu için bu çalışmada kullanılabilir seviyededir.

2.4. Çalışmada Kullanılan Sınır Koşulları ve Kabuller

Model doğrulanması yapıldıktan sonra, analizin başlatılması için öncelikle sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Sınır koşulları Şekil 2.7'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Sınır koşulları şematiği

- Hız giriş sınır koşulu seçilmiştir; çünkü boru giriş hızı ve sıcaklığı (313 K) bilinmektedir. Türbülans şiddeti %10 ve hidrolik çapı 0,0053 m olarak alınmıştır.
- Boru simetrik bir boru olduğu için hesaplamada kolaylık sağlaması ve zaman kazandırması için simetri sınır koşulu kullanılmıştır.
- Konveksiyon sınır koşulu kullanılmıştır ve radyatör çevresindeki havanın sıcaklığı 303 K ve hava taşınım katsayısı $150 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınmıştır.
- Çözüm kolaylaştırmak ve sıkıştırılamaz akış sebebiyle basınç çıkış olarak seçilmiştir.

Boru içindeki nanoparçacıklı soğutucu akışkanın için hesaba katılan kabuller aşağıdaki gibidir;

- Akış tek fazlı akış olarak kabul edilmiştir.
- Sıkıştırılamaz sıvı olarak düşünülmüştür.
- Nanoparçacık çökme durumu ihmal edilmiştir.
- Radyatör çevresindeki havanın sıcaklığı ve hızı sabit olarak alınmıştır

- Boruya giren sıvının hızı ve sıcaklığı sabit olarak hesaba katılmıştır.
- Radyatörün haznesinden geçen ve tüm borulara dağılan akışkanın sıcaklığı her yerde aynı olarak kabul edilmiştir.
- Boru içinden geçen sıvının davranışı Newtonian tipi sıvı olarak alınmıştır.
- Yoğunluk temel sıvılar için basınç altında sabit olarak hesaba katılmıştır.
- Daimi akış olarak kabul edilmiştir.

2.5. Temel Sıvı ve Nanoparçacık Seçimi ve Termofiziksel Özellikleri

Soğutucu sıvı, nanoparçacıklardan ve temel sıvıdan oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında temel sıvı olarak su, etilen glikol ve etilen glikol - su karışımı (antifriz) kullanılmıştır ve bu temel akışkanların, 40 °C sıcaklıktaki termofiziksel özellikleri kullanılmıştır.

Temel sıvı seçimi günümüzdeki araç sürüş koşulları göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Ayrıca sadece su ile yapılan çalışmalar ise en ideale yakın durumdaki şartları referans almak için yapılmıştır; çünkü diğer sıvılara göre viskozitesi en küçük, ısı iletim katsayısı en yüksek sıvıdır. Bu yüzden hem yakıt tüketimine hem de ısı transferine olumlu etkisi vardır. Bu tez çalışmasında, araç, en düşük hava sıcaklığı -35 °C'de hareket edeceği düşünülerekten %60 etilen glikol ve %40 su karışımından oluşan EG60, -24 °C'de donma sıcaklığına sahip %40 etilen glikol ve %60 su karışımı EG40, -8 °C'de donma sıcaklığına sahip ve eğilimi çıkartmak için kullanılan %20 etilen glikol ve %80 su karışımından oluşan EG20'nin ısıl özellikleri Tablo 2.2'deki gibi gösterilmiştir. Ayrıca temel sıvı seçimi ara değerleri tahmin edebilmek için antifrizdeki etilen glikol miktarı %20 olarak kademeli artırılarak yapılmıştır.

Tablo 2.3. Temel sıvıların 40 °C'deki termofiziksel özellikleri

Temel Sıvı/Özellik	Yoğunluk [kg/m ³]	Dinamik Viskozite [kg/m.s]	Isı İletim Katsayısı [W/m.K]	Isıl Kapasite [J/kg.K]	Donma Noktası [K]
Su [60]	992	0,00065	0,633	4174	273
EG20 [66]	1010	0,001014	0,520	4020	265
EG40 [67]	1050,63	0,001752	0,431	3535,1	249
EG60 [67]	1076	0,002641	0,382	3212,1	220

Nanoparçacık seçiminde ise hem maliyet hem de uygulanabilirlik düşünülmüştür. Bu yüzden, literatürdeki en çok kullanılan nanoparçacıklar seçilmiştir ve ısı iletim

katsayıları dikkate alınmıştır. Bu tez çalışmasında Fe₃O₄, CuO, Al₂O₃ ve SiO₂ kullanılmıştır ve bu nanoparçacıkların termofiziksel özellikleri Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Nanoparçacıkların termofiziksel özellikleri

Temel Sıvı/Özellik	Yoğunluk [kg/m ³]	Parçacık Çapı [nm]	Isı İletim Katsayısı [W/m·K]	Isıl Kapasite [J/kg·K]
Fe ₃ O ₄ [68]	5200	47	6	670
Al ₂ O ₃ [69]	3970	20	40	765
CuO [70]	6400	60	76,5	531
SiO ₂ [71]	2220	20	1,4	745

Nanoparçacıklar, malzeme olarak metaloksit ihtiva eden parçacıklardan seçilmiştir. Amaç metal parçalarda yaşanan manyetiklenme ve oksitlenme problemini engellemektir veya azaltmaktır. Bu çalışmada kullanılan ve tasarım için seçilen dört nanoparçacık içinden en iyi ısı transferi ve en düşük basınç düşümü performansına sahip olan nanoparçacık ilerideki çalışmalar için önerilmiştir.

2.6. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Hesaplanması

Nanoakışkanlar, nanoparçacık ile temel sıvının karışımı olduğu için termofiziksel özelliklerinin hesaplanması için birçok model geliştirilmiştir. Bu metotlar teorik veya deneysel, yıllarca geliştirilmiştir. Temel sıvıya ve nanoparçacık tipine göre değişen birçok model günümüzde bulunmaktadır. Bu çalışmada hem ısı iletim katsayısında hem de viskozitede Brownian hareketi dikkate alındığı için nanoparçacık çapı ve deneysel olarak türetilen formüller hesaba katılmıştır.

Isı iletim katsayısı için deneysel çalışmalar neticesinde %1,8 hata payı ile 10 - 150 nm çapındaki nanoparçacıklar için uygun, %0,2 - %9 hacimsel orandaki karışımlar ve 294 K - 324 K sıcaklıkları arasındaki koşullar için kullanılan Corcione[36] metodu Eşitlik (2.5)'deki gibi kullanılmıştır;

$$k_{nf} = \left(1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \phi^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_{bf}} \right)^{0.03} \right) k_{bf} \quad (2.5)$$

Bu eşitlikteki Re sayısı ise nanoparçacıkları hesaba katarak Eşitlik (2.6)'daki gibi belirtilmiştir;

$$Re = \frac{2\rho_{bf}K_B T}{\pi\mu_{bf}^2 d_p} \quad (2.6)$$

T değeri nanoakışkan sıcaklığını (K), K_B değeri Boltzmann sabitini (J/K) gösterir.

Viskoziteyi belirlemek için, günümüzde Brownian hareketini ve nanoparçacığın çapını hesaba katan Masoumi viskozite modeli Eşitlik (2.7)'deki gibi kullanılmıştır [47];

$$\mu_{eff} = \mu_{bf} + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72C\delta} \quad (2.7)$$

Burada, C doğrulama faktörüdür. V_B Brownian hareketini temsil eder ve Eşitlik (2.8)'deki gibi açıklanır;

$$V_B = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18K_B T}{\pi\rho_p d_p}} \quad (2.8)$$

Ana sıvı içindeki nanoparçacıkların oluşturduğu karışım, homojen karışım olarak düşünüldüğü için parçacıklar arasında bir etkileşim yoktur. Parçacıkların merkezleri arasındaki mesafe Eşitlik (2.9)'daki gibi hesaplanır;

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi} d_p} \quad (2.9)$$

Mousimi modeli sadece Al_2O_3 ve CuO nanoparçacıkları için geçerli olduğu için sadece bu parçacıkların oluşturdukları nanoakışkanlar için kullanılmıştır.

Fe_3O_4 ile oluşturulan nanoakışkanlar için başka bir viskozite modeli kullanılmıştır. EG20 ve EG40 için 288 veri noktası incelenerek türetilmiş ve %6,1'lik sapması olan Sundar ve diğerleri [66] denklemi Eşitlik (2.10)'daki gibi verilmiştir;

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + \phi)^{0,68} \quad (2.10)$$

Fe_3O_4 için EG60 temel sıvısında Sundar ve diğerleri [66] 144 deneysel veriden türetilen viskozite formülünü %8'lik ortalama hata ile Eşitlik (2.11)'deki gibi belirtmiştir;

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + \phi)^{1.205} \quad (2.11)$$

SiO₂ için Vajjha ve diğerleri [70] tarafından türetilmiş viskozite Eşitlik (2.12)'deki gibidir:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (A_1 e^{(A_2 \phi)}) \quad (2.12)$$

A₁ ve A₂ değerleri SiO₂ için türetilmiş sabitlerdir ve sırasıyla 1.092 ve 5.954'dür.

Diğer bir özellik olarak yoğunluk ve ısı kapasitesidir. Nanoakışkanlar için Eşitlik (2.13) ve (2.14)'deki gibi hesaplanmıştır [34];

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_{bf} \quad (2.13)$$

$$Cp_{nf} = (1 - \phi) \left(\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \right) Cp_{bf} + \phi \left(\frac{\rho_p}{\rho_{nf}} \right) Cp_p \quad (2.14)$$

2.7. Sonlu Hacimler Metodu ve Sayısal Analiz

Sonlu hacimler metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin detaylı olarak çözülmesinde kullanılan bir sayısal metottur. Sonlu hacimler metodundaki ana düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte; ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması mümkün olmaktadır. Mevcutta bulunan konvansiyonel matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu hacimler metodu kullanılabilecek bir metot olmaktadır.

Hesaplamalı modellemede üç önemli olmazsa olmaz proses adımı vardır; bunlar, problemin tanımlanması, matematik modelleme ve bilgisayardaki simülasyondur. Bu adımlardan da en önemlisi problemin tanımı doğru da yapılsa matematik modellemedir. Çünkü matematik modellemede kullanılacak olan denklemler ve sınır koşulları sonucu direkt etkilemektedir. Örneğin, akışkan analizinde laminar ya da düşük Re sayılarında Navier-Stokes denklemlerinin kullanılması akış hareketi için daha hassas sonuçlar vermektedir; ancak akışın tipi türbülanslı akış olunca çözüm için türbülans modeline ihtiyaç duyulur. Sayısal çözümlerde günümüzde çok sık kullanılan üç metot vardır. Bunlar; sonlu farklar metodu, sonlu hacimler metodu ve

sonlu elemanlar metodudur. Sonlu hacimler metodunda, kısmi diferansiyel denklemlerinin cebirsel denklemler ile ele alınması ve çözülmesidir. İlk paragraflarda başlangıç olarak anlatılan sonlu elemanlar yöntemi ise kısmi diferansiyel denklemleri problemi fonksiyon haline getirerek diferansiyel denklemlere yaklaşık çözüm bulmaktadır. Kısmi diferansiyel denklemlerdeki hacimsel integraller, sapma teorimi kullanılarak yüzey integrallerine çevrilir. Bu yüzden sonlu hacimler metodu genellikle akışkanlar mekaniği hesaplamalarında kullanılmaktadır. Burada en önemli durum kullanılacak modelin kesinlikle bir deneysel çalışma ile doğrulanması ve zaman açısından en uygun ağ modelinin bulunmasıdır. Analiz yapılırken çıkan sonuçların güvenilirliği modelin doğrulanmasına ve belirlenen sınır koşullarına direkt olarak bağlıdır.

Bir üç boyutlu gerçekleşen akışta ısı denge ifade edilecek olursa; süreklilik denklemi, momentum denklemi ve enerji denklemi aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilecektir.

Süreklilik denklemi [71] üç boyutlu radyatör içi akışta Eşitlik (2.15)'deki gibi ifade edilir;

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.15)$$

Momentum denklemi [71] kararlı durumlar için Eşitlik (2.16)'daki gibi ifade edilir;

$$\rho(\nabla \cdot \mathbf{V})\mathbf{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2.16)$$

Bu denklemde P nanoakışkanın hidrodinamik basınç kuvvetini belirtmektedir.

Enerjinin korunumu [71] denklemi ise Eşitlik (2.17)'deki gibi ifade edilir;

$$\rho c_p (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = k \nabla^2 T \quad (2.17)$$

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde, türbülanslı akış problemleri için üç ana türbülans modeli kullanılır. Bu modeller sırasıyla; Doğrudan Sayısal Çözüm Metodu (DNS), Ölçeğe Bağlı Yaklaşım Metodu (LES) ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS)'dır.

Doğrudan Sayısal Metot yaklaşımında, herhangi bir türbülans modeli kullanılmamaktadır ve üç türbülans modeli arasında en detaylı ve en doğru sonucu veren yöntemdir. Kararsız Navier-Stokes denklemleri sayısal olarak çözülür; ancak çok hassas bir ağ yapısı gerektirir. Bunun temel sebebi, problem çözüm alanı

içerisindeki her bir çözüm ağ noktasında, değişkenlerin kabul yapılmadan direkt olarak çözülmesidir. Bu yüzden, hesaplama maliyetleri çok yüksektir ve endüstriyel uygulamalar için zaman alan aynı zamanda tercih edilen bir çözüm yöntemi değildir. Ölçeğe Bağlı Yaklaşım Metodu, Doğrudan Sayısal Çözüm Metodu'na göre, çözümlenmeleri daha az maliyetlidir. Çünkü, problemdeki değişkenleri çözerken Navier – Stokes denklemlerini direkt olarak çözmez ve bazı sayısal kabuller yapar. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes metodu ise, türbülanslı akıştan dolayı meydana gelen karmaşık akış yapılarının tüm detaylarını çözmek yerine, ortalama akış parametre değerlerini ve dalgalanma değerlerini göz önüne alarak hesaplar. Bu yöntem uygulamalarda en çok kullanılan yöntemdir ve hesaplama maliyeti en düşük olan yöntemidir. Çalışmada kullanılan akış tipi türbülanslı akış olduğu için sayısal hesaplama için k - ε modeli kullanılmıştır. Burada k değeri türbülans kinetik enerjisini, ε değeri ise türbülans yitim oranını ifade eder. k değeri Eşitlik (2.18)'deki gibidir;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (2.18)$$

Eşitlik (2.18)'de ifade edilen k değeri türbülans akış kinetik enerjisini, ε değeri akış kinetik enerji yitimini, G_k değeri ortalama hız gradyanından kaynaklanan kinetik enerji üretimini, σ_k değeri türbülans kinetik enerji Prandtl sayısını μ_t değeri ise akış türbülans viskozitesini tanımlar.

Türbülanslı akış için kinetik enerji yitimi Eşitlik (2.19)'daki gibidir;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.19)$$

ε değeri türbülans kinetik enerji yutulumunu, σ_ϵ türbülans yutulum Prandtl sayısını, $C_{1\epsilon}$ ve $C_{2\epsilon}$ değerleri model katsayılarıdır.

Bu katsayılar sırasıyla; $\sigma_k=1$, $C_{1\epsilon}=1,44$, $C_{2\epsilon}=1,92$ ve $\sigma_\epsilon=1,3$ 'dir. Ayrıca türbülans viskozite değeri Eşitlik (2.20)'deki gibidir;

$$\mu^t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.20)$$

Taşınım ısı transferi katsayısı [72] denklemi Eşitlik (2.21)'deki gibi ifade edilir;

$$h_{nf} = \frac{C_{p,nf} \rho_{nf} V_t A_t (T_o - T_i)}{A_p (T_w - T_b)} \quad (2.21)$$

Isı transferi için en önemli boyutsuz sayı olan Nusselt sayısı [73] Eşitlik (2.22)'deki gibi belirtilmiştir;

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D_h}{k_{nf}} \quad (2.22)$$

Deneysel çalışma, teorik çalışmaya göre daha yavaş ve maliyetlidir. Çünkü deneysel çalışmada bir deney düzeneği vardır. Deneyleri, deney düzeneği tek olduğu için sıralı gerçekleştirmek gerekmektedir. Ancak, sayısal çalışmalarda bir bilgisayarda birden fazla farklı durum için denemeler yapılmaktadır. Bu da zaman açısından çok kazançlı bir durumdur. Deneyde karşılaşılan cihaz arızalanması gibi olumsuz bir durumun telafisi çok zorken, bilgisayarda bu tip durumların telafisi sadece küçük zaman kayıplarına neden olmaktadır. Bu yüzden deneysel çalışmalara başlanmadan önce nümerik bazlı çalışmalar ile öngörü çalışması yapıp ona göre deney tasarımı yapılmalıdır. Böylece hem deney sayısı azalmış olur hem de zamandan kazanç elde edilmiş olunur.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile yapılan çalışmalarda problemlerin çözüm aşamaları aşağıdaki gibidir;

1. Problemin tanımlanması
2. Modelin oluşturulması
 - Gerekli denklemlerin tanımlanması
 - Sınır koşullarının tanımlanması
 - CAD modelin oluşturulması
 - Analizde kullanılacak modelin seçilmesi
3. Modelin deneysel verilerle doğrulanması ve kurulması
4. Analizin gerçekleştirilmesi
5. Sonuçların değerlendirilmesi

Bugün otomotiv ve havacılık ile çalışmakta olan birçok firma hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapan paket programları kullanmaktadırlar. Böylece deneysel çalışmalar yerine nümerik bazlı çalışmalarını kullanarak maliyetlerini düşürmektedirler. Sonuç olarak sonlu hacimler metodu günümüzde paket programların ve bilgisayar

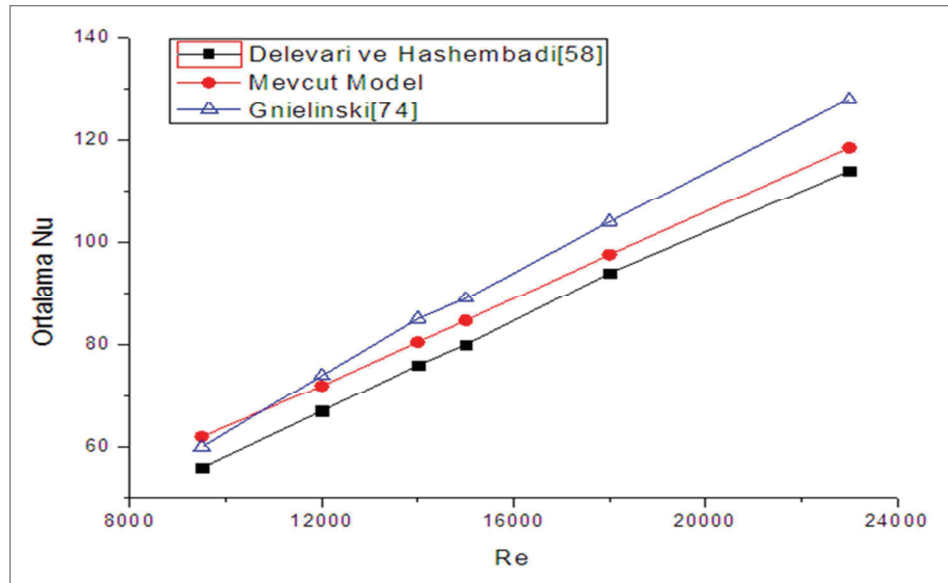
teknolojisinin gelişmesiyle mühendislik alanında problemlerin çözülmesinde en çok kullanılan metotlardan birisidir.

2.8. Sayısal Modelin Doğrulanması

Her sayısal çalışmada yapıldığı gibi, yeni oluşturulan bir modelin, doğruluk kontrolünün ve sağlamlasının kabul edilebilir bir hata payı ile yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada oluşturulan modelin doğruluğu hem su için hem de nanoakışkan için ayrı ayrı yapılmıştır. Suyun akışkan olarak kullanıldığı model için doğrulama çalışması, literatürde en çok kullanılan modellerden birisi olan Gnielinski Modeli [74] ve Delevari ve Hashembadi [58]'nin yapmış olduğu çalışmalar ile yapılmıştır. Şekil 2.8'de de görüldüğü gibi oluşturulan yeni modeldeki değerler, hedeflenen ve doğrulaması yapılan değerler için hata oranı kabul edilebilir seviyededir. Bu neticelere istinaden, bu çalışmada kullanılan ve Şekil 2.8'de doğrulaması yapılan model temel sıvılar için kullanılabilir düzeydedir. Bu yüzden bir sonraki adım olan nanoakışkan bazlı soğutucu sıvılar için de model sağlamlası gereklidir. Gnielinski Modeli [74] Eşitlik (2.23)'deki gibi gösterilmiştir;

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{0,5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.23)$$

$$f = (0,79 \ln(Re_D) - 1,64)^{-2} \quad (2.24)$$



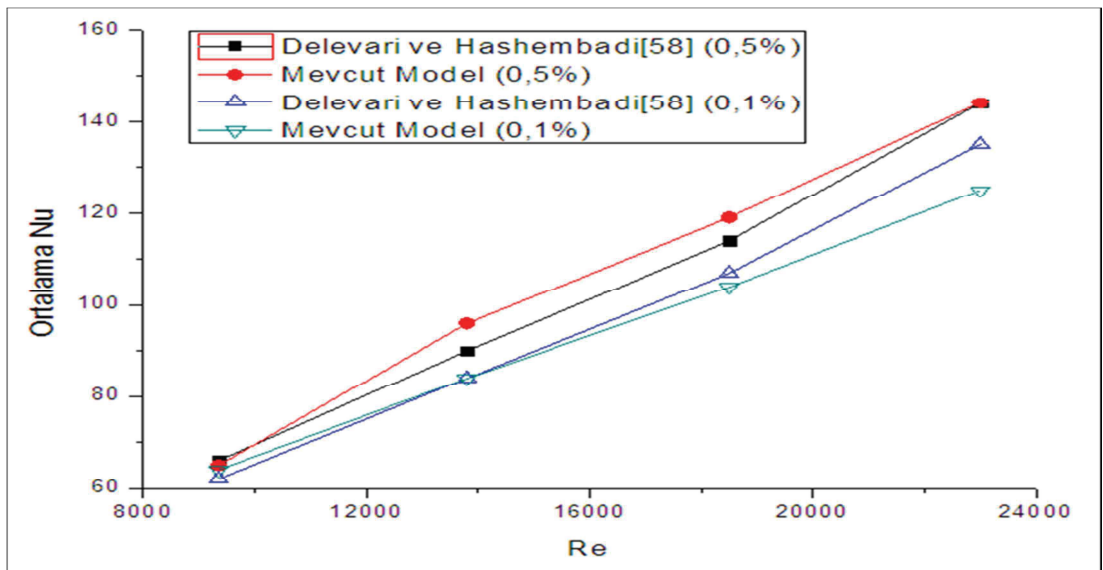
Şekil 2.8. Soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı modelin doğrulama sonuçları

Türbülans modelleri için korelasyon çalışmalarında sıklıkla kullanılan bir teorik model olan Gnielinski modeli aşağıdaki koşullar için kullanılmaktadır;

- $0,5 \leq Pr \leq 2000$
- $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$

Nanoakışkanlar, hem temel sıvılardan farklı termofiziksel özellikler gösterdikleri için hem de termofiziksel özelliklerinin hesaplanmasında birden fazla teorik ve deneysel yaklaşıma sahip olduklarından dolayı model doğrulaması gerekmektedir. Radyatörlerde soğutucu akışkan olarak nanoakışkanları kullanarak, radyatörlerin ısı transferinin iyileştirilmesi için çalışmalarda bulunan, Delevari ve Hashembadi [58]'in çalışmaları model olarak seçilmiştir. Delevari ve Hashembadi çalışmalarında radyatörün tümünü değil sadece tek bir tüpünü baz alarak bütün radyatördeki ısı transferini hesaplamışlardır. Böylece hem hesaplama ve analiz için gerekli olan zamanı azaltmıştır hem de radyatörün tümünün çizilmesi için gerekli olan iş gücünü azaltmıştır. Ayrıca radyatör hava ile sıvının etkileşimi ile çalışan bir ısı eşanjörü olduğu için, Delevari ve Hashembadi çalışmalarında, sınır koşullarında iç akışa etkisini alarak, hava taşınım katsayısı ve sıcaklığını ortam koşulu olarak baz aldıkları için analizin uzamasından kaynaklanan zaman kaybını engellemişlerdir.

Delevari ve Hashembadi'nin sayısal çalışmasının oluşturulan modelle sağlanması Şekil 2.9'daki gibi %0,1 ve %0,5 hacim konsantrasyonunda ve Su - Al_2O_3 nanoakışkanında gösterilmiştir. Grafikteki sonuçlara istinaden tez çalışmasında kullanılan modelin, hedef modeldeki değere yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.9. %0,1 ve %0,5 hacim konsantrasyonunda Su - Al_2O_3 için farklı Reynolds sayılarında Nu_{ort} değerleri

%0,1 hacim konsantrasyonundaki Su - Al₂O₃ model korelasyonundan sonra %0,5 konsantrasyonundaki Su - Al₂O₃ nanoakışkan model doğrulaması yapılmıştır. Bu sonuçlar Şekil 2.9'dan da anlaşıldığı gibi, hedef değerler ile mevcut değerler arasında çok farklılık gözlemlenmediği hata oranı kabul edilebilir seviyededir. Bu şekilde, nanoakışkanlar için hem %0,1 hem de %0,5 hacim konsantrasyonunda model doğrulaması yapılarak mevcut yeni modelin güvenilirliği ve sağlanması nanoakışkan bazlı soğutucu sıvılar için yapılmıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında kullanılacak olan yeni tasarım modeli, literatürde kullanılan ve doğruluğu ispatlanmış olan hedef modeller ile sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçlar arası sapma ve farklılık kabul edilebilir hata payı seviyesindedir. Bu sonuçlara istinaden yeni oluşturulan tasarım modeli bu tez çalışmasında kullanılabilir.

2.9. Taguchi Deney Deseninın Oluşturulması

Bu çalışmada, radyatörün performansına etki eden dört önemli parametre olan nanoparçacık tipi, nanoparçacık hacim yüzdesi, temel sıvı çeşidi ve Re sayısı farklı kombinasyonlarda farklı ısı transferi performansını göstermektedir. Burada önemli olan mühendislik gereği en kısa zamanda, en düşük maliyette optimum ısı transferi performansı sonucunu bulabilmektir. Optimum sonucu bulabilmek için bir hedef değer gereklidir. Otomobil firmaları, bu hedef değerlerini, araçlarını satışa sundukları pazar durumuna göre farklı tutarlar. Örneğin çok lüks bir araba üreticisi için performans, maliyetten önce gelir, bu yüzden çok iyi bir motor soğutma performansı ister, eğer orta gelirli düzeydeki müşterilere araç satışı yapan bir araba markasıysa ya aracın ağırlığının azaltılmasını ya da düşük maliyetli bir verim artırımı ister. Aracın tasarım süreci ne kadar uzun sürerse, aracın pazara sunulma zamanı da o kadar artar. Rekabet koşullarında, yeni model aracı, en önce piyasaya sunabilen bir araç üreticisi her zaman bir adım öndedir. Örneğin günümüzde ilk SUV modeli öne süren firmanın pazardaki payı öncekine göre çok daha yüksektir.

Günümüzde otomobil sektöründe yaşanan rekabetçi koşullar göz önüne alındığında ve proje yönetimde yaşanan zaman sıkışıklığı hesaplandığında bir önceki paragrafta belirtilen dört önemli parametrenin birbirleriyle etkileşimi Tablo 2.4'de belirtilmiştir. Sonuçlarını görmek ve tüm kombinasyonların değerlendirmesini yapmak için $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ adet denemeye ihtiyaç vardır. Bu kadar nümerik analiz için denemeler yapmak hem zaman kaybı hem de çok yüksek bir maliyet getirecektir.

Bu yüzden bu tez çalışmasında, optimum sonuca ulaşmak için günümüzde çok sık kullanılan, deney sayısını azaltarak hedeflenen değerler için çok iyi bir öngörü veren Taguchi deney tasarımı [17] Tablo 2.5'deki gibi kullanılmıştır.

Tablo 2.5. Taguchi deney tasarımı faktör ve seviyeler

$\emptyset(\%)$	Re	Temel Sıvı	Nanoparçacık
0,1	9350	%20 EG + %80 Su	Fe ₃ O ₄
0,3	13800	%40 EG + %60 Su	Al ₂ O ₃
0,7	18500	%60 EG + %40 Su	CuO
1	23000	Su	SiO ₂

Tablo 2.5'deki deney tasarımı parametreleri incelendiğinde, deneme dört faktörden ve her bir faktör dört seviyeden oluşmaktadır. Bu yüzden, Taguchi L16 deney tasarımı, bu deney desenine uygun bir model olarak seçilmiştir. Deney analizleri ve değerlendirmeleri "Minitab 14" yazılımı vasıtası ile yapılmıştır.

Tablo 2.6 kodlamalı ve Tablo 2.7'deki L16 deney deseni bu çalışmada yapılacak optimizasyon çalışmasının temeli olarak baz alınmıştır ve nümerik analizler L16 deney deseninde oluşturulan kombinasyona göre yapılmıştır. Bu kombinasyonlar ile çıkarılan ısı transferi performansı, basınç düşümü ve güç tüketimi optimizasyon için değerlendirilip, en düşük basınç farkı ile en yüksek ısı transferi değeri baz alınmıştır. Bu yüzden Taguchi Metodu'nda kullanılan S/N gürültü oranları ile hesaplanan basınç düşümü "En düşüğü daha iyisi" ve ısı transferi "En yükseği daha iyisi" şeklinde ele alınmıştır.

Basınç düşümünün yakıt tüketimine negatif etkisi olduğu için en düşük basınç düşümü radyatör tasarımı için uygun olacağı için "En düşüğü daha iyisi" metodu ile Eşitlik (2.25)'deki gibi hesaplanmaktadır;

$$SN_S = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.25)$$

Isı transferindeki iyileştirmeyi incelemek için taşınım ısı transferi katsayısı h ve Nusselt sayısı "En yükseği daha iyisi" metodu ile Eşitlik (2.26)'daki gibidir;

$$SN_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.26)$$

Taguchi deney deseni istatistiksel bazlı yazılım olan “Minitap” programında bir bölüm olarak bulunmaktadır ve verilen faktör ile seviye değerlerine göre otomatik olarak deney deseni oluşturulmaktadır. Bu desen oluşturulurken etki eden faktörler ve seviyeler kodlanır ve o şekilde hesaplama dâhil edilir. Tablo 2.6’da L16 deney deseni bu çalışmada kullanılacak faktör ve seviyelerin kodlanmış haliyle oluşturulmuştur. Burada A, nanoparçacık hacim yüzdesini, B, Re sayısını, C, temel sıvıyı ve D ise nanoparçacık tipini göstermektedir.

Tablo 2.6. Taguchi L16 deney deseni kodlaması

Deneme	A	B	C	D
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C3	D3
4	A1	B4	C4	D4
5	A2	B1	C2	D3
6	A2	B2	C1	D4
7	A2	B3	C4	D1
8	A2	B4	C3	D2
9	A3	B1	C3	D4
10	A3	B2	C4	D3
11	A3	B3	C1	D2
12	A3	B4	C2	D1
13	A4	B1	C4	D2
14	A4	B2	C3	D1
15	A4	B3	C2	D4
16	A4	B4	C1	D3

Kodlamaların kullanılması problem çözümlerini basitleştirmektedir. Bu uygulama Taguchi metodunda kullanılan bir metottur ve aynı zamanda konuya hakim olmayan birisinin konuya vakıf olma durumunu yükseltmektedir. Tablo 2.7 ise bu kodlamaya denk gelen faktör ve seviyeleri değersel olarak göstermektedir.

Tablo 2.7. Taguchi L16 deney deseni parametreleri

Deney	ϕ (%)	Re	Temel Sıvı	Nanoparçacık
1	0,1	9350	EG20	SiO ₂
2	0,1	13800	EG40	Al ₂ O ₃
3	0,1	18500	EG60	CuO
4	0,1	23000	Su	Fe ₃ O ₄
5	0,3	9350	EG40	CuO
6	0,3	13800	EG20	Fe ₃ O ₄
7	0,3	18500	Su	SiO ₂
8	0,3	23000	EG60	Al ₂ O ₃
9	0,7	9350	EG60	Fe ₃ O ₄
10	0,7	13800	Su	CuO
11	0,7	18500	EG20	Al ₂ O ₃
12	0,7	23000	EG40	SiO ₂
13	1	9350	Su	Al ₂ O ₃
14	1	13800	EG60	SiO ₂
15	1	18500	EG40	Fe ₃ O ₄
16	1	23000	EG20	CuO

3. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, modelin oluşturulmasından sonraki adım olan seçilen uygun modelin doğrulaması ele alınmıştır. Model doğrulama çalışması için literatür araştırması sonucunda, nümerik bazlı analizlerde sık kullanılan çalışmaların sonuçları ile tez çalışmasındaki değerler karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan sayısal model, deneysel sonuçlardaki veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Hem nanoakışkan için hem de sadece temel sıvı için doğrulama yapılmıştır. Model doğrulanması yapıldıktan sonra, “Taguchi Metodu” ile oluşturulan deney desenindeki denemeler analiz edilmiştir ve optimum koşullar belirlenmiştir. Analizler sonucunda ortalama Nusselt sayısı, ısı taşınım katsayısı ve basınç düşümü hesaplanmıştır. Ayrıca basınç düşümü ve yüzey sürtünmesinin etki ettiği güç tüketimi ele alınıp yakıt tasarrufu ile ilişkisi incelenmiştir. Bu değerlendirmeler radyatörün ısı transferi performansı, tasarımı ve optimizasyonu hakkında önemli bilgiler vermiştir. Optimizasyona etki eden en az maliyetli ve soğutma performansına en çok etki eden parametreler için, temel sıvının, ısı transferi performans etkisi olan etkinlik değeri de hesaplanmıştır. Sonuç olarak bu hesaplamalar ve değerlendirmeler ısı transferi performansına etki eden optimum koşullar hakkında öngörü ve fikir vermiştir.

3.1. Isı Transferi Performansının Hesaplanması

Taguchi deney desenini oluşturan on altı denemenin analiz sonuçları, ortalama Nu sayısı ve ısı taşınım katsayısı Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu değerler radyatörün soğutma performansına etki eden sonuçlar olduğu için ısı transferi performansı h_{nf}/h_{bf} ile değerlendirilir. Buradaki sonuçlar neticesinde nanoakışkanlarda ısı transferinde dikkate değer bir iyileşme görülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli etken ise basınç düşümünün de ısı transferi ile beraber değerlendirilmesidir. Daha sonrasında ise en uygun tasarımın belirlenmesidir.

Tablo 3.1. Taguchi deseni Nu_{ort} ve h sonuçları

Deney	ϕ (%)	Re	Temel Sıvı	Nanoparçacık	Nu_{ort}	h_{nf} [W/ m ² K]	h_{nf}/h_{bf}
1	0,1	9350	EG20	SiO ₂	102,60	176,80	1,071
2	0,1	13800	EG40	Al ₂ O ₃	202,11	296,90	1,186
3	0,1	18500	EG60	CuO	296,30	410,31	1,051
4	0,1	23000	Su	Fe ₃ O ₄	154,50	316,90	1,112
5	0,3	9350	EG40	CuO	155,20	232,34	1,263
6	0,3	13800	EG20	Fe ₃ O ₄	127,90	226,00	1,032
7	0,3	18500	Su	SiO ₂	120,56	256,07	1,080
8	0,3	23000	EG60	Al ₂ O ₃	340,40	582,50	1,254
9	0,7	9350	EG60	Fe ₃ O ₄	145,40	262,68	1,150
10	0,7	13800	Su	CuO	106,70	229,00	1,225
11	0,7	18500	EG20	Al ₂ O ₃	206,60	384,90	1,354
12	0,7	23000	EG40	SiO ₂	286,66	471,81	1,179
13	1	9350	Su	Al ₂ O ₃	93,05	208,67	1,459
14	1	13800	EG60	SiO ₂	195,11	427,52	1,383
15	1	18500	EG40	Fe ₃ O ₄	216,66	353,25	1,131
16	1	23000	EG20	CuO	251,76	461,08	1,382

Sonuç olarak, Taguchi deney tasarımındaki ısı transfer performansı sonuçları incelendiğinde, konvansiyonel sıvılara göre ısı transferi performansında çeşitli nanoakışkanlarda dikkate değer iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu iyileştirmelerden de görüldüğü gibi deney tasarımındaki deney sonuçları, aracın kullanım koşullarına, satılacak pazara, maliyet öngörüsüne ve soğutma sistemine göre yorumlanabilir ve kullanılabilir.

3.2. Basınç Düşümü, Sürtünme Faktörü ve Güç Tüketiminin Hesaplanması

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, radyatörün ısı transferini iyileştiren parametrelerin motor soğutma performansına olumlu bir etkisi varken, diğer taraftan da aracın yakıt tüketimine, kısacası pompanın güç tüketimini arttırdığı için, olumsuz etkisi bulunmaktadır. Bu yüzden optimum sonuçlara ulaşmaya çalışırken, yakıt tasarrufu ve dolayısıyla güç tüketimi, aracın satılmasında ve piyasaya sürülmesinde, önemli bir yere sahip olduğu için öncelikli olarak dikkate alınması gerekmektedir.

Re sayısının artması, debiyi arttıracak için pompanın güç tüketimini de artırır, nanoakışkanın viskozitesi hızı etkilediği için pompanın gücüne direkt etkisi vardır. Ayrıca nanoparçacık yüzdesi artarsa, basınç düşümü de artar [43]. Bu yüzden ısı transferi iyileştirmesi için en uygun değer bulunmaya çalışılırken aynı zamanda iyileştirmeyi yapan parametrelerin de yakıt tüketimine etkisinin incelenmesi gerekmektedir.

Basınç düşümü; yüzey sürtünmesi, boru uzunluğu ve hızın karesiyle doğru orantılıdır, hidrolik çap ile ters orantılıdır. Basınç düşümü ile doğru orantılı olan güç tüketimi ise Eşitlik (3.1)'deki gibi hesaplanır.

$$W=AV(\Delta P) \times 34 \quad (3.1)$$

Taguchi deney tasarımıdaki analiz sonuçları incelendiğinde basınç düşümü ve güç tüketimi sonuçları Tablo 3.2'deki gibi gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Basınç düşümü ve güç tüketimi sonuçları

Deney	ϕ (%)	Re	Temel Sıvı	Nanoparçacık	ΔP_{nf} [Pa]	W [W]	C_f
1	0,1	9350	EG20	SiO ₂	3663,13	14,038	0,00820
2	0,1	13800	EG40	Al ₂ O ₃	23221,36	233,930	0,00722
3	0,1	18500	EG60	CuO	72423,36	1378,007	0,00615
4	0,1	23000	Su	Fe ₃ O ₄	8163,01	54,549	0,00610
5	0,3	9350	EG40	CuO	13115,91	91,115	0,00847
6	0,3	13800	EG20	Fe ₃ O ₄	5308,70	27,085	0,00663
7	0,3	18500	Su	SiO ₂	4806,00	24,008	0,00643
8	0,3	23000	EG60	Al ₂ O ₃	151266,11	4079,154	0,00638
9	0,7	9350	EG60	Fe ₃ O ₄	19633,33	164,644	0,00840
10	0,7	13800	Su	CuO	3973,59	17,929	0,00630
11	0,7	18500	EG20	Al ₂ O ₃	20750,46	215,588	0,00620
12	0,7	23000	EG40	SiO ₂	50908,59	820,708	0,00615
13	1	9350	Su	Al ₂ O ₃	4215,21	17,093	0,00834
14	1	13800	EG60	SiO ₂	44073,19	636,984	0,00645
15	1	18500	EG40	Fe ₃ O ₄	25987,41	288,914	0,00640
16	1	23000	EG20	CuO	33954,28	445,967	0,00615

Tablo 3.2'deki sonuçlar gösteriyor ki, Reynolds sayısı, nanoparçacık yüzdesinin ve viskozitenin; basınç düşümü ve güç tüketimine direkt etkisi vardır. Bu yüzden ısı

transferi performansı incelenirken ısı transferini arttıran parametrelerin sürekli arttırılamayacağı buradan gözlemlenmektedir.

3.3. Taguchi Metodu ile Optimizasyon Yapılması

L16'lık Taguchi deney tasarımı ve her bir denemenin ısı transferi sonuçlarının değerlendirilmesi temel etki tablosu ve S/N oranları ile bu tez çalışmasında analiz edilmiştir. Optimizasyon için temel etki tablosu ile bağımlı değişkenlerin faktörler ve seviye arasındaki ilişkileri gözlemlenerek tasarım için fikir belirlemede kullanılmıştır. Tablo 3.3'de temel etki tablosunun parametreleri oluşturulmuştur. Kısacası A, hacim konsantrasyonunu; B, Re sayısını; C, temel sıvıyı; D, nanoparçacığı göstermektedir. Her bir faktörün seviyeleri sırasıyla 1,2,3,4 ile gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Temel etki tablosu parametreleri

Seviye\Faktör	A	B	C	D
	\emptyset (%)	Re	Temel Sıvı	Nanoparçacık
1	0,1	9350	EG20	SiO ₂
2	0,3	13800	EG40	Al ₂ O ₃
3	0,7	18500	EG60	CuO
4	1	23000	Su	Fe ₃ O ₄

Tablo 3.1'deki ısı transferi performansı sonuçları ve Tablo 3.2'deki basınç düşümü sayısal sonuçlarının sinyal-gürültü oranları Tablo 3.4'deki gibi hesaplanmıştır. Bu sonuçlar değerlendirilirken dört faktörün sonuçlara etkisinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden hedeflenen optimum değer en yüksek ısı transferi performansını sağlayan koşul ile en düşük basınç düşümünü sağlayan koşuldur.

Tablo 3.4. Taguchi S/N oranı hesaplanması

Deney	A	B	C	D	h [W/ m ² K]	ΔP [Pa]	h-S/N	ΔP -S/N
1	A1	B1	C1	D1	176,80	3663,13	44,94965	-71,27705122
2	A1	B2	C2	D2	296,90	23221,36	49,4522	-87,31775143
3	A1	B3	C3	D3	410,31	72423,36	52,26226	-97,19757282
4	A1	B4	C4	D4	316,90	8163,01	50,01844	-78,23700791
5	A2	B1	C2	D3	232,34	13115,91	47,32248	-82,35597133
6	A2	B2	C1	D4	226,00	5308,70	47,08217	-74,49975827
7	A2	B3	C4	D1	256,07	4806,00	48,16717	-73,63567395

Tablo 3.4.(Devam)Taguchi S/N oranı hesaplanması

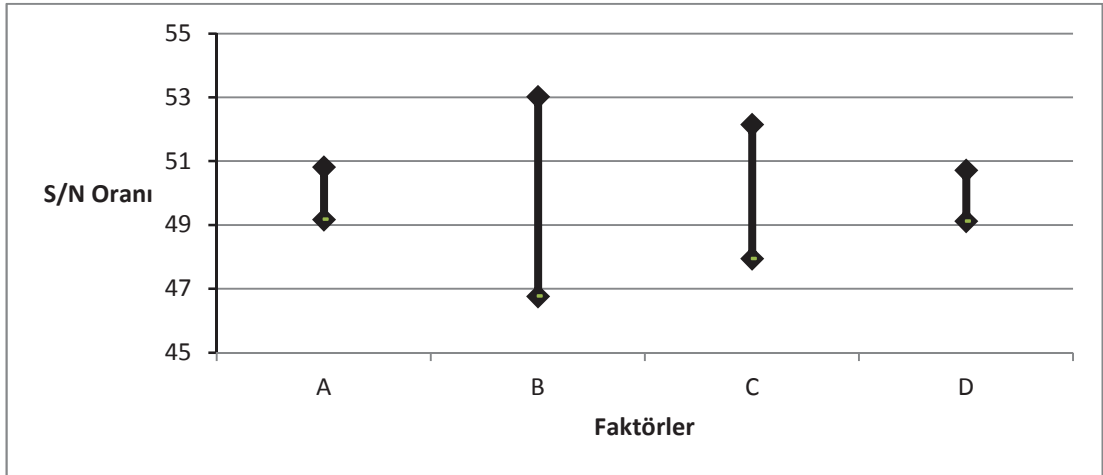
8	A2	B4	C3	D2	582,50	151266,11	55,30592	-103,5948325
9	A3	B1	C3	D4	262,68	19633,33	48,38854	-85,85988039
10	A3	B2	C4	D3	229,00	3973,59	47,19671	-71,98366916
11	A3	B3	C1	D2	384,90	20750,46	51,70696	-86,34055523
12	A3	B4	C2	D1	471,81	50908,59	53,47534	-94,13582169
13	A4	B1	C4	D2	208,67	4215,21	46,38912	-72,49638957
14	A4	B2	C3	D1	427,52	44073,19	52,61908	-92,88348991
15	A4	B3	C2	D4	353,25	25987,41	50,96164	-88,2952584
16	A4	B4	C1	D3	461,08	33954,28	53,27543	-90,61788926

S/N değerleri, “En yükseği en iyisi” ve “En düşüğü en iyisi” olarak h ve ΔP değerleri için hesaplandıktan sonra faktörlerin etkisinin hesaplanması gerekmektedir. Tablo 3.5’de taşınım ısı transferine etki eden faktörlerin etki sıralaması oluşturulmuştur. Bu değerler L16 deney deseninden ısı transferine etki eden deneylerin Tablo 3.4’deki gibi hesaplanan S/N değerlerinin ortalamasından oluşturulmuştur. Aynı seviyedeki gürültü oranları arasındaki fark ne kadar fazla olursa, o seviyenin etkisi diğer seviyelere göre daha yüksektir.

Tablo 3.5. Isı taşınım katsayısı S/N etki hesabı

	A	B	C	D
1	49,17064	46,76244553	49,25355	49,80281
2	49,46944	49,08754008	50,30292	50,71355
3	50,19189	50,77450972	52,14395	50,01422
4	50,81132	53,01878443	47,94286	49,1127
Fark	1,640678	6,256338892	4,201089	0,910739
Etki Sırası	3	1	2	4

Sonuçlardan da görüleceği gibi ısı transferi performansına en çok etki eden parametre Re sayısıdır. Bir sonraki en yüksek etki ise temel sıvıdır. Temel sıvıdaki değerlerin etkinlik durumu ve grafiği Şekil 3.1’de özet olarak görülmektedir.



Şekil 3.1. Isı taşınım katsayısı etkinlik grafiği

Sonuç olarak, hem etkinlik tablosundan hem de etki hesabından görüleceği üzere;

- Isı transferi, nanoakışkanlarda Re sayısı arttıkça artmaktadır.
- Isı transferi oranı, nanoparçacık yüzdesi arttıkça artmaktadır.
- Isı transferi performansı nanoakışkanlarda temel sıvı seçimine kesinlikle bağlıdır.
- Nanoparçacık tipinin ısı transferine etkisi vardır.

Taguchi Metodundan ve sonuçlardan da görüleceği üzere ısı transferine en yüksek tesir eden koşul A4B4C3D2'dir. %1 hacim yüzdeli, 23000 Re sayısında, EG60 ve Al₂O₃ karışımından oluşan nanoakışkan en yüksek ısı transferi performansına sahiptir.

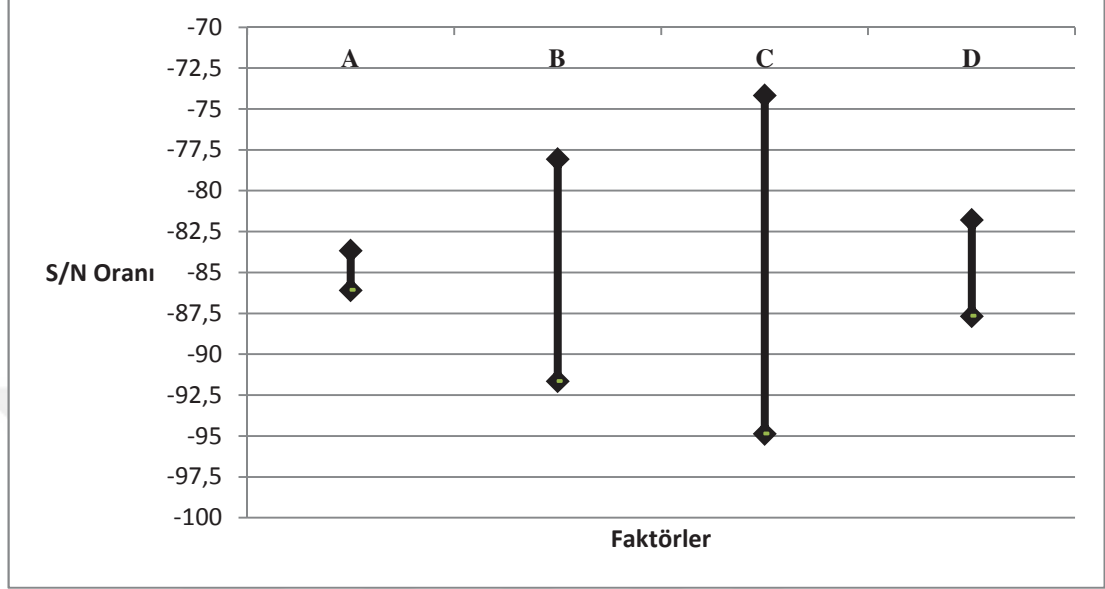
Tablo 3.6'da basınç düşümünün S/N etki hesabı değerlendirilmiştir. Basınç düşümü güç tüketimiyle ilgili olduğu için pompa seçimine direkt etki eden bir faktördür.

Tablo 3.6. Basınç düşümü S/N etki hesabı

	A	B	C	D
1	-83,5073	-77,9973	-80,6838	-82,983
2	-83,5216	-81,6712	-88,0262	-87,4374
3	-84,58	-86,3673	-94,8839	-85,5388
4	-86,0733	-91,6464	-74,0882	-81,723
Fark	2,565911	13,64906	20,79576	5,714406
Etki Sırası	4	2	1	3

Sonuçlardan da görüleceği gibi basınç düşümüne en çok etki eden parametreler temel sıvı ve Re sayısıdır. Temel sıvının etkisinin, Re sayısından daha yüksek

gelmesinin nedeni su ile etilen glikol-su karışımı arasındaki farktan kaynaklı olmasıdır. Diğer etkiler ise parçacık yüzdesi ve parçacık tipidir. Bu değerlerin etkinliği Şekil 3.2'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Basınç düşümü etkinlik grafiği

Sonuç olarak, hem etkinlik tablosundan hem de etki hesabından görüleceği üzere basınç düşümü;

- Nanoakışkanlarda Re sayısı arttıkça artmaktadır.
- Nanoparçacık yüzdesi arttıkça artmaktadır.
- Temel sıvının viskozitesine direkt bağlıdır.
- Nanoparçacık tipinin basınç düşümüne etkisi vardır.

Taguchi Metodundan ve sonuçlardan da görüleceği üzere basınç düşümüne en düşük tesir eden koşul A1B1C4D4'dir. Kısacası %0,1 hacim yüzdeli, 9350 Re sayısında, Su - Fe₃O₄ karışımından oluşturulmuş nanoakışkan en düşük basınç düşümünü vermektedir.

Basınç düşümü araçta istenmeyen bir durum olan yakıt tüketimi ile doğru orantılıdır ve basın düşümü azaldıkça pompaya düşen yük azalır. Isı transferi artışı ise soğutma performansı ile doğru orantılıdır ve ısı transferi ne kadar iyileştirilirse soğutma performansı o kadar iyi olur. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'den de görüleceği üzere Re sayısı arttıkça hem ısı transferi iyileşmekte hem de basınç düşümü artmaktadır. Ayrıca parçacık yüzdesi arttıkça ısı transferi ile birlikte basınç düşümü artmaktadır. Bu yüzden hem basınç düşümünü düşük tutmak hem de ısı transferi yüksek tutmak

gerekmektir. Hem basınç düşümünü hem de ısı transferini optimize etmek için Tablo 3.7'deki gibi h ve ΔP değerleri etki oranına göre birlikte değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme ile optimum değere ulaşılmıştır. Taguchi metodu ile, birbirinden farklı olan parametrelerin birbiri ile olan ilişkisi kolaylıkla incelenebilmektedir. Bu inceleme ile optimizasyon kolaylıkla hesaplanabilmektedir. h' ve $\Delta P'$ değerleri Tablo 3.4'den alınmıştır.

Tablo 3.7. Basınç düşümü ve ısı taşınım katsayısı için optimizasyon hesabı

Deney	\emptyset (%)	Re	Temel Sıvı	Nanoparçacık	h'	$\Delta P'$	$h' + \Delta P'$
1	0,1	9350	EG20	SiO ₂	1	1	2
2	0,1	13800	EG40	Al ₂ O ₃	0,90895	0,816295	1,725246
3	0,1	18500	EG60	CuO	0,860077	0,733321	1,593398
4	0,1	23000	Su	Fe ₃ O ₄	0,898661	0,911040	1,809701
5	0,3	9350	EG40	CuO	0,949857	0,865475	1,815332
6	0,3	13800	EG20	Fe ₃ O ₄	0,954705	0,956742	1,911447
7	0,3	18500	Su	SiO ₂	0,933199	0,967969	1,901168
8	0,3	23000	EG60	Al ₂ O ₃	0,812745	0,688037	1,500782
9	0,7	9350	EG60	Fe ₃ O ₄	0,928931	0,830155	1,759087
10	0,7	13800	Su	CuO	0,952389	0,990184	1,942572
11	0,7	18500	EG20	Al ₂ O ₃	0,869314	0,825534	1,694847
12	0,7	23000	EG40	SiO ₂	0,840568	0,757172	1,59774
13	1	9350	Su	Al ₂ O ₃	0,968969	0,983181	1,95215
14	1	13800	EG60	SiO ₂	0,854245	0,767381	1,621626
15	1	18500	EG40	Fe ₃ O ₄	0,882029	0,807258	1,689287
16	1	23000	EG20	CuO	0,843721	0,786567	1,630289

Tablo 3.7'deki S/N hesaplaması yapıldıktan sonra her bir faktör için alınan ortalama değerler Tablo 3.8'de sunulmuştur. Sonuç olarak, Tablo 3.3'deki etki değerlerinin optimize edilmiş basınç düşümü ve ısı transferi performansının birlikte etkileşimi Tablo 3.8'de gösterilmektedir.

Tablo 3.8. Basınç düşümü ve ısı taşınım katsayısı ($\Delta P' + h'$) S/N oranı etkileşim hesabı

	A	B	C	D
1	1,78209	1,8816	1,8091	1,7801
2	1,78218	1,8002	1,7069	1,7183
3	1,74856	1,7197	1,6187	1,7454
4	1,72334	1,6346	1,9014	1,7924
Etki Sırası	2	1	4	4

Tablo 3.8'deki sonuçlar değerlendirildiğinde aşağıdaki gözlemler yapılabilir;

- Re sayısı belli bir seviyeye kadar arttırılabilmektedir. Çünkü pompa güç tüketimi artmaktadır.
- Parçacık yüzdesi de Re sayısı gibi belli bir yüzdeye kadar yükseltilebilmektedir. Çünkü ısı transferinin arttırmasına rağmen basınç düşümüne negatif etkisi vardır.
- Nanoparçacık tipi için ısı taşınım katsayısı ve nanoparçacık çapı yüksek olan parçacık hem basınç düşümüne etkisi hem de ısı transferine etkisinden dolayı optimizasyonla seçilebilmektedir.
- Temel sıvı için ise öne çıkan faktör direkt viskozitedir. Viskozitenin düşük olması pompaya olan direnci düşürdüğü için güç tüketimine olumlu katkısı vardır.

Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'deki sonuçlar değerlendirildiğinde, optimizasyon için çıkan sonuç A2B1C4D4 kombinasyonudur. Kısacası %0,3 parçacık yüzdesinde, 9350 Re sayısında, Su - Fe₃O₄ nanoakışkanındaki değer optimum değerdir.

Taguchi deney tasarımındaki analiz sonuçları incelendiğinde, nanoparçacığın; temel sıvı, Re sayısı ve hacim konsantrasyonu ile etkileşiminde nanoparçacık seçiminin öncelikli olmadığı gözükmektedir. Buradan nanoparçacık tipi ısı transferini performansını etkilemez diye bir sonuç anlaşılmalıdır. Kısacası tablodaki sonuçlardan anlaşılacağı üzere nanoparçacık seçimi diğer faktörler ile etkileşim halindeyken öncelikli değil anlamına gelmektedir. Nanoparçacık malzemesi seçilmeden önce diğer faktörlerin etkileşimini değerlendirmek çok daha önemlidir. Çünkü ısı transferi performansında iyileştirme çalışması yapılması gerekiyorsa, sonuçlardan da görülebileceği üzere önce Re sayısı ve temel sıvı hesaba katılmalıdır. Örneğin, nanoparçacık olarak en yüksek ısı iletim katsayısına sahip olan metallere biri olan Au-su nanoakışkanı seçmek yerine, daha düşük maliyetli ve daha düşük ısı iletimli bir nanoparçacık seçip, hacim konsantrasyonu arttırmak

veya temel sıvıda değişiklik yapıp daha düşük maliyetle aynı hedeflenen ısı transferi performansını elde etmek mümkündür.

Sonuç olarak Taguchi deney tasarımı optimizasyon için öngörüsü yüksek fikirler ve sonuçlar sunmaktadır. Böylece 256 tane deneme yapmak yerine 16 tane deneme yaparak hem maliyetten hem de zamandan tasarruf edilmiş olunur. Taguchi deney tasarımı, ayrıca hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile kullanılırsa, tasarım aşamasında üretimi yapılacak olan test prototipinin hem maliyetini düşürür hem de adetini düşürür. Ayrıca, aracın tasarım sürecinin daha kısa sürmesi için gerekli optimizasyon, bu tez çalışmasında önerilen Taguchi deney tasarımı ve CFD analizi yapan paket programlarının kullanılması ile yapılmıştır. Taguchi deney tasarımı optimizasyon için direkt fikir vermektedir.

3.4. Fizibilite ve Uygulanabilirlik Çalışması

Nanoakışkanlar ile radyatörlerdeki soğutma performansının iyileştirilmesi uygulamalarında dikkate alınması gereken en önemli durum ise fizibilite çalışmasıdır. Yapılan iyileştirme gerçek hayatta uygulanabilir mi uygulanamaz mı sorusunun cevabı bu adımda verilmektedir.

Isı transferinde çok yüksek seviyelerde bir iyileşme görülmüş olunabilir ama aynı zamanda basınç düşümü de yükseleceği için güç tüketimine negatif bir etkisi olacaktır. Bu yüzden, Taguchi Metodu ile yapılan optimizasyon çalışması neticesinde ortaya çıkan sonuçların ayrıca uygulanabilirlik olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Günümüzde uygulanabilirlik için sıklıkla kullanılan iki adet metot vardır. Bunlardan birisi performans değerlendirme indeksi (PEC), diğeri ise etkinlik değeridir.

Etkinlik değeri (η), ısı transferi artış oranı ile güç tüketimi artış oranı arasındaki bağlantıdır ve Eşitlik (3.2)'deki gibi gösterilmiştir [73];

$$\eta = \frac{h_{nf}/h_{bf}}{W_{nf}/W_{bf}} \quad (3.2)$$

Güç tüketimleri arasındaki oran ise Eşitlik (3.3)'deki gibi belirtilmiştir;

$$\frac{W_{nf}}{W_{bf}} = \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \right)^2 \quad (3.3)$$

Etkinlik değeri eğer $\eta > 1$ ise, yapılan deney çalışması uygulanabilirlik olarak kabul değerindedir.

Diğer bir etkinlik göstergesi ise performans değerlendirme indeksidir. Bu değerlendirme kriteri ise aynı temel sıvı üzerinde denenen farklı nanoparçacık tiplerinden hangisinin en uygun olduğunu belirlemek için kullanılır ve Eşitlik (3.4)'deki gibi gösterilir [65];

$$PEC = \frac{\dot{m}c_p(T_c - T_g)}{\dot{V}\Delta P} \quad (3.4)$$

Tablo 3.9'daki etkinlik değerleri incelendiğinde nanoakışkanların radyatörlerde kullanılması uygulanabilir görünmektedir. Taguchi Deney desenindeki 16 denemeden değerler 1,006 ile 1,30 arasındadır. Sonuç olarak tüm değerler $\eta > 1$ olduğu için nanoakışkanların radyatörler için uygulanabilirliği görünmektedir ve bu da nanoakışkanlar üzerine yapılan birçok çalışmanın nedenini kanıtlamaktadır. Burada en önemli olan kriter optimizasyondur. Örneğin deneme 3, %5'lik bir ısı transferi iyileştirmesi yapmasına rağmen, basınç düşümü yüksek olduğu için yatırım yapılacak kadar uygulanabilir değildir.

Tablo 3.9. Etkinlik değeri sonuçları

Deney	A	B	C	D	h_{nf}/h_{bf}	W_{nf}/W_{bf}	η
1	0,001	9350	EG20	SiO ₂	1,071	1,026	1,044
2	0,001	13800	EG40	Al ₂ O ₃	1,186	1,048	1,132
3	0,001	18500	EG60	CuO	1,051	1,042	1,009
4	0,001	23000	Su	Fe ₃ O ₄	1,112	1,055	1,054
5	0,003	9350	EG40	CuO	1,263	1,082	1,167
6	0,003	13800	EG20	Fe ₃ O ₄	1,032	1,026	1,006
7	0,003	18500	Su	SiO ₂	1,080	1,034	1,044
8	0,003	23000	EG60	Al ₂ O ₃	1,254	1,084	1,157
9	0,007	9350	EG60	Fe ₃ O ₄	1,150	1,057	1,089
10	0,007	13800	Su	CuO	1,225	1,171	1,046
11	0,007	18500	EG20	Al ₂ O ₃	1,354	1,159	1,168
12	0,007	23000	EG40	SiO ₂	1,179	1,049	1,124
13	0,01	9350	Su	Al ₂ O ₃	1,459	1,234	1,182

Tablo 3.9.(Devam) Etkinlik değeri sonuçları

14	0,01	13800	EG60	SiO ₂	1,383	1,060	1,305
15	0,01	18500	EG40	Fe ₃ O ₄	1,131	1,082	1,045
16	0,01	23000	EG20	CuO	1,382	1,155	1,197
A4B4C3D2	0,01	23000	EG60	Al ₂ O ₃	1,880	1,227	1,532
A1B1C4D4	0,001	9350	Su	Fe ₃ O ₄	1,098	1,055	1,041
A2B1C4D4	0,003	9350	Su	Fe ₃ O ₄	1,119	1,073	1,043

Tablo 3.9'deki diğer bir önemli sonuç ise Taguchi Metodunun optimizasyona ve uygulanabilirliğe olan olumlu katkısıdır. Örneğin, Taguchi metodu ile hesaplanan en düşük basınç düşümüne sahip A1B1C4D4 kombinasyonu ile optimum değer olarak türetilen A2B1C4D4 değerleri karşılaştırıldığında aynı nanoakışkanda ve aynı Re sayısında, hacimsel nanoparçacık yüzdesinin bir kademe artırılması optimizasyon için önerilen bir kombinasyondur. Değerler incelendiğinde, basınç düşümü artmasına rağmen ısı transferindeki %2'lik artış da etkinliği düşürmemiştir ve etkinlik değeri de artarak η , 1,029'dan 1,031'e çıkmıştır.

Performans değerlendirme indeksi kısacası ısı transferi iyileştirmesi için ne kadarlık bir güç harcanır onun bize cevabını vermektedir. Değerlendirme kriterinde sınır veya eşik değeri olmadığı için bu yöntem kıyaslamalı yöntem ile değerlendirilmektedir. Tablo 3.10'da gösterilen sonuçlar bu yüzden temel sıvı ile kıyaslaması verilmiş değerlerdir. Temel sıvıya göre kıyaslandığında en iyi performansı veren nanoparçacık ise Taguchi Metodunda da gözlemlenen değer olan Fe₃O₄'dür.

Tablo 3.10. Performans değerlendirme indeksi

Deney	A	B	C	D	PEC _{nt} /PEC _{bf}
1	0,001	9350	EG20	SiO ₂	0,831
2	0,001	13800	EG40	Al ₂ O ₃	0,638
3	0,001	18500	EG60	CuO	0,447
4	0,001	23000	Su	Fe ₃ O ₄	0,736
5	0,003	9350	EG40	CuO	0,657
6	0,003	13800	EG20	Fe ₃ O ₄	0,969
7	0,003	18500	Su	SiO ₂	0,845
8	0,003	23000	EG60	Al ₂ O ₃	0,576
9	0,007	9350	EG60	Fe ₃ O ₄	0,853

Tablo 3.10.(Devam) Performans değerlendirme indeksi

10	0,007	13800	Su	CuO	0,577
11	0,007	18500	EG20	Al ₂ O ₃	0,441
12	0,007	23000	EG40	SiO ₂	0,768
13	0,01	9350	Su	Al ₂ O ₃	0,301
14	0,01	13800	EG60	SiO ₂	0,731
15	0,01	18500	EG40	Fe ₃ O ₄	0,985
16	0,01	23000	EG20	CuO	0,404
A4B4C3D2	0,01	23000	EG60	Al ₂ O ₃	0,305
A1B1C4D4	0,001	9350	Su	Fe ₃ O ₄	0,854
A2B1C4D4	0,003	9350	Su	Fe ₃ O ₄	0,829

Tablo 3.9 ve 3.10'daki değerler incelendiğinde çok önemli bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Eğer Taguchi Metodu olmasaydı ve sadece performans veya etkinlik değeri incelenseydi en iyi değer için deneme 14 önerilecekti. Çünkü η değeri 1,305 ile 16 deneme içinde en yüksek değerdirdi. Taguchi Metodundan bulunan ve en yüksek değeri en iyidir yaklaşımıyla sonuçlanan ısı transferi için A4B4C3D2 kombinasyonunun η değeri 1,532'dir. Bu değere ulaşabilmek için 256 deneme yani tüm kombinasyonlar yapılmalıydı. Bu da hem zaman kaybı hem de ekstradan test maliyeti olacaktı. Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi, etkinlik değeri ve performans değerlendirme kriterleri ölçülebilir önemli değerlerdir ama optimizasyon çalışmalarında kullanılan Taguchi Metoduyla birlikte kullanılmalıdır.

3.5. Radyatörün Boyutlarının Küçültülmesi ve Boyut Küçültmenin Arabaya Etkileri

Bölüm 3.1'de belirtildiği gibi ısı transferinde dikkate değer bir iyileşme gözlemlenmiştir ve Bölüm 3.4'de açıklandığı gibi nanoakışkanlar radyatörler için ısı transferi iyileştirmelerinde uygulanabilir. Isı transferinde iyileşme gözlemlendiği için radyatörlerin boyutlarında küçültme yapıp hacimsel yer kazanma, aerodinamik direnç değerinin azaltılması ve ağırlık düşümü sağlanabilir. Araç ağırlığının azaltılması; eylemsizlik momenti ve tekerlek sürtünmesinden kaynaklı kayıpları azaltır. Yüzey alanının azaltılması, aerodinamik direnç katsayısındaki kayıpları bir miktar düşürür. Hacimsel yer kazanma ise günümüzde tasarımcı için parça koyma ya da yerleştirmede rahat bir çalışma imkanı sağlar. Bölüm 3.3'de Taguchi Metodu ile bulunan optimum değerlerin etkisi bu çalışmada ele alınmıştır. Öncelikle, Eşitlik

(2.1) ve (2.2)'den yapılan hesaplamalara istinaden nanoakışkan ve temel sıvı arasındaki toplam ısı direnç karşılaştırması Tablo 3.11'de yapılmıştır. Nanoakışkandaki toplam ısı direnç artışı, temel sıvıdaki değere eşitlenmesi için radyatör borusunun uzunluğu kısaltılmıştır. Böylece radyatörün aerodinamik dirence kısacası yakıt tüketimine de olumsuz etki eden iz düşüm yüzey alanı %11 azaltılmıştır. Sonuç olarak, radyatörün boyutları azaltılmıştır. Böylece araçta radyatör çevresi için hacimsel bir yer kazancı olmuştur. Bu kazanç hem tasarımcının çalışma kabiliyetini arttırırken hem de başka parçalar için yer kazanımı sağlamıştır.

Tablo 3.11. Boru uzunluğu hesabı

Akışkan Tipi\Özellik	Toplam Isıl Direnç [W/Km ²]	Boru İçi Alan [m ²]	Boru Uzunluğu [mm]	Radyatör İz Düşüm Yüzey Alanı [m ²]
Nanoakışkan	77,82	0,4977	277	0,165
Temel Sıvı	70,48	0,5569	310	0,185

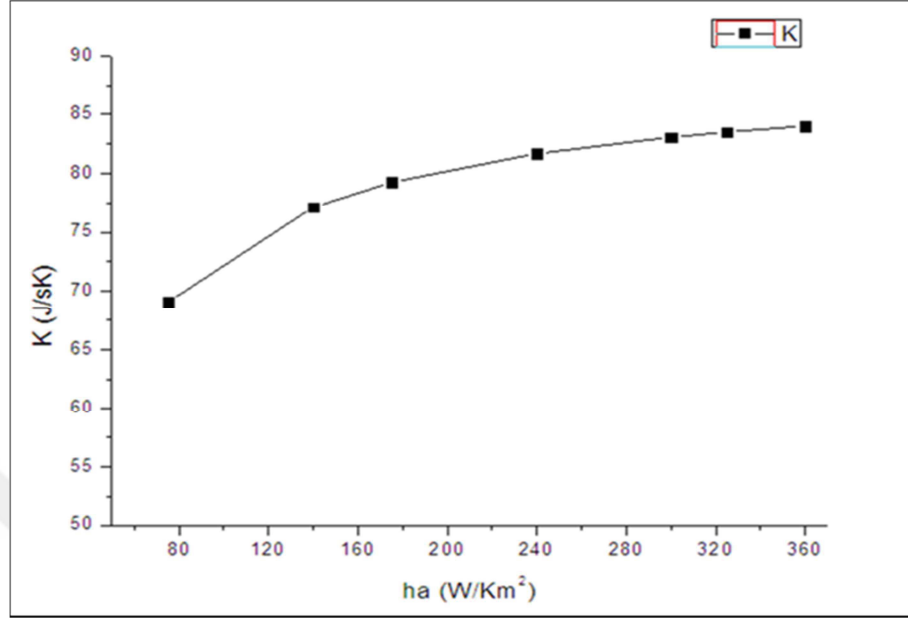
Ayrıca bu çalışmada yapılan ısı transferindeki direnç hesaplamasında iyileştirme yapılacak bölgenin ve potansiyelin iç akış mı dış akış mı olduğunu belirlemek için boru için ısı direnç değeri ve radyatör çevresi ısı direnç değeri Tablo 3.12'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 3.12. Farklı hava hızlarında ısı direnci hesabı

v_a [75] (m/s)	h_a [75] (W/m ² K)	K(U.A) (W.K)	Hava Isı Direnci (K/W)	Boru İçi Direnci (K/W)
2,5	75	69,08523	0,003252033	0,011222841
5	140	77,13073	0,00174216	0,011222841
7,5	175	79,26085	0,001393728	0,011222841
10	240	81,70535	0,00101626	0,011222841
12,5	300	83,08512	0,000813008	0,011222841
15	325	83,5191	0,000750469	0,011222841
17,5	360	84,03116	0,000677507	0,011222841

Tablo 3.12'deki değerler incelendiğinde, bu çalışmada, sınır koşullarında bir girdi parametresi olarak kullanılan havanın taşınım katsayısı 150 W/m²K değeri, literatürde belirtilen deneysel verilere göre alınmıştır [75]. Bu değer seçilmesinin temel sebebi ise Şekil 3.3'de grafikte açıklanan havanın hızının en düşük olabileceği aralıkta olmasıdır. Ayrıca Şekil 3.3'deki değerler literatürde ve çoğu araç üreticisi firmada radyatörün tasarım aşamasındaki en kötü koşulu temsil eden değerlerle örtüşmektedir. Motor soğutma tasarımındaki aracın en kötü koşulu, yüksek hava

sıcaklığı, düşük hava hızı, yüksek motor deviri(düşük vitesler), tamamen dolu halde, klima açık ve yokuş çıkarkenki durumudur [76].



Şekil 3.3. K değerinin hava taşınım katsayısına göre değişimi

Günümüzde yakıt ekonomisi, sürücüler için öncelikli seçim kriterlerinden bir tanesidir. Araçlarda yakıt tüketimine etki eden faktörler; tekerleklerin sürtünme direnci, aerodinamik direnç, eylemsizlik momenti, elektrikle çalışan parçaların harcadığı enerji, rölanti ve frenlemede harcanan enerji ve son olarak güç aktarma organlarındaki kayıplar olarak sıralanır [77]. Radyatörün yüzey alanındaki azalmanın aerodinamik direnç katsayısına etkisini [78] ve yakıt ekonomisi ile ilişkisi hesapladığında yakıt tüketimindeki değişim %0,3 - %0,4 arasındadır. Ayrıca radyatördeki boyutsal küçültmeden dolayı araçta yaklaşık 1,5 kg'lık bir ağırlık azaltımı olmuştur.

Yukarıdaki sonuçlar değerlendirildiğinde, nanoakışkan kullanarak radyatörün boyutlarını daha küçülterek araçta hacimsel olarak yer avantajı sağlamaktadır. Bu yer kazancı da tasarımcı tarafından istenen durumdur. Ayrıca aracın aerodinamik direncinin bir miktar azalttığı gözlemlenmiştir. Bunun da sonucunda aracın yakıt ekonomisinde yaklaşık %0,4 - %0,5 arasında bir iyileşme gerçekleşmiştir. Ağırlık azalımı da radyatörün boyutlarının küçülmesiyle düşük bir seviyede 1,5 kg olarak gerçekleşmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, araç radyatörlerinde nanoakışkan bazlı soğutucu sıvı kullanarak, araçların soğutma performanslarının en uygun şekilde iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak, radyatöre giren nanoparçacık takviyeli soğutucu sıvının giriş ve çıkış sıcaklıkları sabit tutulup, radyatördeki ısı transferi performansı sayısal olarak incelenmiştir. En uygun performans koşulunu elde etmek, denemelerin aldığı zaman ve deneme çokluğundan kaynaklanacak prototip veya deneme sıklığı maliyetini azaltmak için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Böylece, hem deney sayısı azaltılıp hem de zamandan tasarruf edilerek nanoakışkanların radyatör performansına etkisi, en uygun koşul için incelenmiştir. Ayrıca belirlenen optimum koşulun radyatörün boyutlarını ne kadar küçülttüğü ve bunun neticesi olarak hacimsel yer kazanıldığı belirtilmiştir. Yakıt ekonomisine etkisi ve ağırlık düşümü kısaca incelenmiştir.

Nanoakışkanların araba radyatörlerinde ısı transferini iyileştirdiği, bu tez çalışmasında yapılan analizler sonucunda da ayrıca ortaya çıkmıştır. Böylece, ilerleyen teknoloji ile birlikte gelecek zamanda nanoparçacık üretim maliyetleri düşeceği için; nanoakışkanlar, soğutucu akışkan olan konvansiyonel sıvıların yerini alacaklardır. Çünkü başta araçta hacimsel yer kazandırarak araç tasarımcılarına avantaj sağlarken, paralelinde aerodinamik direnç katsayısını ve az da olsa ağırlığı düşürerek üreticilere avantaj sunmaktadır. Ayrıca Taguchi Metodu ile tasarım sürecinin kısa ve deneme sayılarının azalması sağlanmıştır. Aynı zamanda optimizasyon yapılarak en uygun koşul bulunmuştur.

Diğer bir ölçüt, yakıt tüketimine olumsuz etki eden basınç düşümünün dikkate alınması en önemli parametredir. Bu yüzden basınç düşümü hızın karesiyle orantılı olduğu için Re sayısını, optimizasyon yaparken en öncelikli ölçüt olarak ele almak gerekmektedir. Çünkü Re sayısı bir yandan ısı transferini iyileştirirken, diğer taraftan basınç düşümünü arttırmaktadır. Basınç düşümünü ve ısı transferi oranını arttıran diğer faktör ise hacim konsantrasyonudur. Hacim konsantrasyonu arttıkça basınç düşümü artar. Bu yüzden Re sayısı ve hacimsel yüzde aracın hedeflerine seçilmelidir.

Yapılan optimizasyon çalışması için seçilen dört farklı nanoparçacık için SiO_2 , CuO , Al_2O_3 ve Fe_3O_4 içinden en kullanılabilir parça Fe_3O_4 'dür. İleride yapılacak çalışmalarda farklı nanoparçacıklar farklı hacimsel yüzdelerde bu metot ile kullanılabilir. Önemli olan viskozite ve ısı iletim katsayısı modelleri, deneysel değerleri ve Brownian hareketini baz almasıdır. Bu şekilde hesaplanan değerler basınç düşümü ve ısı transferi için hesaplamalarda gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Aynı zamanda Taguchi Metodunda doğru optimizasyon yapılmasını sağlamaktadır.

Optimizasyon hesabı sonucunda ortaya çıkan %0,3 hacim yüzdeliği, 9350 Re sayısında, Su - Fe_3O_4 nanoakışkanındaki kombinasyon araçta radyatörün boyutlarının düşürülmesini sağlamıştır ve radyatörün yüzey alanı %11 azalmıştır. Bu azalmanın en önemli etkisi araç tasarımı için hacimsel yer kazandırmasıdır. Diğer bir etki ise aracın toplam aerodinamik direnç katsayısı 0,3500'den 0,3476'ya düşmüş olmasıdır. Bu düşüşün aracın yakıt tasarrufuna etkisi 100 km/sa hızda %0,4 - %0,5 arasındadır. Bu değer, farklı boyutlardaki radyatörlerde, farklı Re sayılarında, daha farklı hacim yüzdelerinde ve farklı nanoakışkan tiplerinde aerodinamik etki ile değişecektir. Ayrıca ağırlık olarak araçta 1,5 kg'lık bir düşüş sağlanmıştır. Bu yüzden radyatör tasarımı yapılırken bu etkenlerin de hesaplanması ve dikkate alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak, yukarıdaki bulgular ele alındığında, Taguchi deney tasarımının araç radyatör tasarımı ve optimizasyon çalışmalarında kullanılması, hem maliyeti düşürdüğü hem de tasarım sürecini kısalttığı için tüm soğutma sistemleri için çalışan firmalarına önerilmektedir. Ayrıca aracın motor soğutma performansının iyileştirilmesinde, basınç düşümünün de hesaba katılması rekabet koşulları için tavsiye edilmektedir. Re sayısı, nanoparçacık, temel sıvı ve hacim konsantrasyonu faktörleri ile yapılan tasarımlarda, öncelikli hedef Re sayısını en düşük, temel sıvı viskozitesini belli bir seviyeye kadar düşük tutup, nanoparçacık hacim yüzdesini kademeli olarak arttırmak en uygun yöntemdir. Ayrıca nanoakışkanlar araçlarda yakıt tüketimini arttırmadan araçta hacimsel yer kazandırdığı ve tasarımcılara kolay bir çalışma imkanı sunduğu için, nanoakışkanların soğutma sistemlerinde kullanımı önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Hussein A. M., Bakar R. A., Kadirgama K., Study of Forced Convection Nanofluid Heat Transfer in the Automotive Cooling System, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2014, **2**(5), 50-61.
- [2] Khanafer K., Vafai K., Lightstone M., Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2003, **46**(19), 3639-3653.
- [3] Khorasanizadeh H., Nikfar M., Amani J., Entropy Generation of Cu - Water Nanofluid Mixed Convection in a Cavity, *Eur. J. Mech. B-Fluid*, 2013, **37**(2), 143-152.
- [4] Peyghambarzadeh S. M., Hashemabadi S. H., Hoseini S. M., Seifi M., Experimental Study of Heat Transfer Enhancement Using Water/Ethylene Glycol Based Nanofluids as a New Coolant for Car Radiators, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2011, **38**(9), 1283-1290.
- [5] Jitendra K. P., Himanshukumar D. P., Dipendra A. T., Optimization of Shell and Tube Heat Exchanger Enhanced by Taguchi Method, *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2015, **2**(8), 118-132.
- [6] Ülengin F., Önsel Ş., Aktaş E., Kabak Ö., *Türkiye Otomotiv Sektörü Rekabet Gücü*, 1. Baskı, Dergipark, İstanbul, 2010.
- [7] Tezer E., Gönül A., Otomotiv Sanayi Çalışma Grubu Raporu, *T.C. Kalkınma Bakanlığı*, UCID-733, 605-978, 2014.
- [8] Özdamar G., Albeni M., Türkiye Otomotiv Sanayisi Dış Ticaret Rekabet Gücü Üzerine Bir İnceleme, *Journal of Süleyman Demirel University Institute of Social Sciences*, 2011, **1**(13), 193-216.
- [9] Sinan Y., Taştan K., Ecek N., Çınar E., Otomotiv Sektörünün Dünyadaki ve Türkiye'deki Değişimi, *Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 2017, **7**(3), 685-695.
- [10] Shah R. K., Sekulic D. P., *Handbook of Heat Transfer*, 3rd ed., McGraw Hill, Kentucky, 1998.
- [11] Fatih T., Deniz B., Barış D., Typical Applications of Tubular and Plate Heat Exchangers, *Mühendis ve Makine*, 2013, **54**(646), 68-74.
- [12] Kocaman Y., Tosun H., Kanatlı Borulu Isı Değiştiricileri, *Mühendis ve Makine*, 2013, **54**(646), 27-36.
- [13] Cengel A. Y., *Heat Transfer a Practical Approach*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, 2004.

- [14] Sheikhzadeh G., Hajilou M., Jafarian H., Analysis of Thermal Performance of a Car Radiator Employing Nanofluid, *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 2014, **2**(4), 47-51.
- [15] Kackar R. N., Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary, *Quality Progress*, 1984, **12**(19), 3-21.
- [16] Phadke S. M., *Introduction to Quality Engineering*, 1st ed., Asian Productivity Organization, Dearborn, 1989.
- [17] Şırvancı M., *Kalite İçin Deney Tasarımı, Taguçi Yaklaşımı*, 1. Baskı, Literatür Yayınları, İstanbul, 1997.
- [18] Büyük Ö. E., Eğik Kare Kapalı Bir Bölge İçindeki Su Bazlı Nanoakışkanların Doğal Taşınım İle Isı Transferi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 2010, **1**(30), 23-33.
- [19] Yu W., Xie H., A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms and Applications, *Journal of Nanomaterials*, 2012, **46**(8), 1-17.
- [20] Chinmay M. P., Satisch G. K., Review of the Manufacturing Techniques for Porous Surfaces Used in Enhanced Pool Boiling, *Heat Transfer Engineering*, 2014, **35**(10), 887-902.
- [21] Pantzali M. N., Kanaris A. G., Antoniadis K. D., Mouza A. A., Paras S. V., Effect of Nanofluids on the Performance of a Miniature Plate Heat Exchanger with Modulated Surface, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2009, **30**(4), 691-699.
- [22] Yu W., David M. F., Jules L. R., Stephen U., Choi S., Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements, *Heat Transfer Engineering*, 2008, **29**(5), 432-460.
- [23] Wang X. Q., Mujumdar S. A., Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review, *Heat Transfer Engineering*, 2007, **46**(1), 1-19.
- [24] Hamilton R. L., Crosser O. K., Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems, *I & EC Fundamentals*, 1962, **1**(3), 187-191.
- [25] Sivashanmugam P., *Application of Nanofluids in Heat Transfer*, 1st ed., Intech, London, 2012.
- [26] Choi S. U. S., Singer D. A., Wang H. P., Development and Application of Non-Newtonian Flows, *Asmefed*, 1995, **66**, 99-105.
- [27] Serrano E., Rus G., Martínez J. G., Nanotechnology for Sustainable Energy, *Renew Sust Energy*, 2009, **13**(9), 2373-2384.
- [28] Nasrin R., Alim M. A., Free Convective Flow of Nanofluid Having Two Nanoparticles inside a Complicated Cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **63**, 191-198.

- [29] Alinia M., Ganji D. D., Gorji-Bandpy M., Numerical Study of Mixed Convection in an Inclined Two Sided Lid Driven Cavity Filled with Nanofluid Using Two-phase Mixture Model, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, **38**(10), 1428-1435.
- [30] Balaji C., Hölling M., Herwig H., A General Methodology for Treating Mixed Convection Problems Using Asymptotic Computational Fluid Dynamics (ACFD), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, **34**(6), 682-691.
- [31] Wasp F. J., *Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation*, 1st ed., Trans. Tech. Publ., Berlin, 1977.
- [32] Maxwell G. J. C., Colours in Metal Glasses and in Metallic Films, *Philos. Trans. Roy. Soc.*, 1906, **205**, 237-288.
- [33] Bruggeman D. A. G., Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen, *Annalen der Physik*, 1935, **416**(7), 636-679.
- [34] Wang B. X., Zhou L. P., Peng X. F., A Fractal Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Liquid with Suspension of Nanoparticles, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2003, **46**(14), 2665-2672.
- [35] Yu W., Choi S. U. S., The Role of Interfacial Layer in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model, *J. Nanoparticles Res.*, 2003, **5**(2), 167-171.
- [36] Corcione M., Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids, *Energy Conversion and Management*, 2011, **52**(1), 789-793.
- [37] Mohamed M. T., Experimental Studies of Nanofluid Thermal Conductivity Enhancement and Applications: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **75**, 1239-1253.
- [38] Lee S. S., Choi S. U. S., Li S., Eastman J. A., Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, *J. Heat Transfer*, 1999, **121**(2), 280-289.
- [39] Beck M. P., Yuan Y., Warriar P., Teja A. S., The Effect of Particle Size on the Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids, *J. Nanoparticle Res.*, 2009, **11**(5), 1129-1136.
- [40] Hwang Y., Lee J. K., Lee C. H., Jung Y., Cheong S. I., Lee C. G., Stability and Thermal Conductivity Characteristics of Nanofluids, *Thermochim Acta*, 2007, **455**(2), 70-74.
- [41] Liu M. S., Lin M. C. C., Huang I. T., Wang C. C., Enhancement of Thermal Conductivity with Carbon Nanotube for 16 Nanofluids, *International Communications Heat Mass Transfer*, 2005, **32**(9), 1202-1210.

- [42] Paul N. N., Josua M., Mohsen S., A Review and Parametric Investigation into Nanofluid Viscosity Models, *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 2015, **5**(3), 1-11.
- [43] Einstein A., *Investigation on the Theory of Brownian Motion*, 1st ed., Courier Corporation, New York, 1956.
- [44] Brinkman H. C., The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *J. Chem. Phys.*, 1952, **20**(4), 571-581.
- [45] Sahoo B. C., Vajjha R. S., Ganguli R., Chukwu G. A., Das D. K., Determination of Rheological Behavior of Aluminum Oxide Nanofluid and Development of New Viscosity Correlations, *Petrol. Sci. Technol.*, 2009, **27**(15), 1757-1770.
- [46] Pak B. C., Cho Y., Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submission Metallic Oxide Particle, *Experimental Heat Transfer*, 1998, **11**(2), 151-170.
- [47] Masoumi N., Sohrabi N., Behzadmehr A., A New Model for Calculating the Effective Viscosity of Nanofluids, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2009, **42**(5), 1-6.
- [48] Jitendra K. P., Himanshukumar D. P., Dipendra A. T., Optimization Of Shell And Tube Heat Exchanger Enhanced By Taguchi Method, *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2015, **2**(8), 118-132.
- [49] Godson R. L., Mohan L. B., Wongwises D. S., Enhancement of Heat Transfer Using Nanofluids an Overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(2), 629-641.
- [50] Pantzalia M. N., Kanarisa A. G., Antoniadisb K. D., Mouza A. A., Paras S. V., Effect of Nanofluids on the Performance of a Miniature Plate Heat Exchanger with Modulated Surface, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009, **30**(4), 691-699.
- [51] Kwon Y. H., Kim D., Li C. G., Lee J. K., Hong D. S., Lee J. G., Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Nanofluids in a Plate Heat Exchanger, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2011, **11**(7), 5769-5774.
- [52] Kulkarni D. P., Vajjha R. S., Das D. K., Oliva D., Application of Aluminum Oxide Nanofluids in Diesel Electric Generator as Jacket Water Coolant, *Applied Thermal Engineering*, 2008, **28**(15), 1774-1781.
- [53] Yu W., France D. M., Choi S. U. S., Routbort J. L., Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications, *Energy System Division*, 2007, **7**(9), 1-78.
- [54] Xuan Y., Rötzel W., Conceptions of Heat Transfer Correlation of Nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, **43**(19), 3701-3707.
- [55] Sabeel K. M., Dil T., Heat transfer Enhancement of Automobile Radiator Using H₂O-CuO Nanofluid, *Aip Advances*, 2017, **8**(5), 1-10.

- [56] Ebrahimi M., Farhadi M., Sedighi K., Akbarzade S., Experimental Investigation of Force Convection Heat Transfer in a Car Radiator Filled with SiO₂ - Water Nanofluid, *International Journal of Engineering*, 2014, **27**(2), 333-340.
- [57] Leong K. Y., Saidur R., Kazi S. N., Mamun A. H., Performance Investigation of an Automotive Car Radiator Operated with Nanofluid-based Coolants (Nanofluid as a Coolant in a Radiator), *Applied Thermal Engineering*, 2010, **30**(17), 2685-2692.
- [58] Delavari V., Hashemabadi S. H., CFD Simulation of Heat Transfer Enhancement of Al₂O₃/Water and Al₂O₃/Ethylene Glycol Nanofluids in a Car Radiator, *Applied Thermal Engineering*, 2014, **73**(1), 380-390.
- [59] Samira P., Saeed Z. H., Motahare S., Mostafa K., Pressure Drop and Thermal Performance of CuO/Ethylene Glycol (%60) - Water (%40) Nanofluid in Car Radiator, *Korean J. Chem. Eng.*, 2014, **32**(4), 609-616.
- [60] Naraki M., Peyghambarzadeh S. M., Hashemabadi S. H., Vermahmoudi Y., Parametric Study of Overall Heat Transfer Coefficient of CuO/Water Nanofluids in a Car Radiator, *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, **66**, 82-90.
- [61] Muhammad A. H., Hassan A., Hassan L., Hafiz T. B. M., Malik A. N., Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Augmentation for Car Radiator Using ZnO and Water Nanofluids, *Energy*, 2015, **84**, 317-324.
- [62] Chandrakant B., Arakerimath R. R., Sonawane S. B., Taguchi Method for Turbulent Analysis of Water-Al₂O₃ Nanofluid, *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2015, **2**(7), 1791-1799.
- [63] Kannan C., Vijayakumar T., Influence of Physicochemical Properties of Al₂O₃ Nanofluid as Coolant in Automotive Radiator Test Rig and Multi Response Optimization of Heat Transfer Rate Using Taguchi's Orthogonal Array, *International Journal of Chem. Tech. Research*, 2015, **8**(6), 315-323.
- [64] Topuz A., Engin T., Özalp A. A., Erdoğan B., Mert S., Yeter A., Experimental Investigation of Optimum Thermal Performance and Pressure Drop of Water-based Al₂O₃, TiO₂ and ZnO Nanofluids Flowing inside a Circular Microchannel, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, **131**(3), 2843-2863.
- [65] Ferrouillat S., Bontemps A., Poncelet O., Soriano O., Gruss J. A., Influence of Nanoparticle Shape Factor on Convective Heat Transfer and Energetic Performance of Water-based SiO₂ and ZnO Nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 2013, **51**(2), 839-851.
- [66] Sundar L. S., Ramana E. V., Singh M. K., De Sousa A. C. M., Viscosity of Low Volume Concentrations of Magnetic Fe₃O₄ Nanoparticles Dispersed in Ethylene Glycol and Water Mixture, *Chemical Physics Letters*, 2012, **554**(3), 236-242.

- [67] Sharma K. V., Seshu K. V., Habib K., Kamal S., Influence of Ethylene Glycol and Water Mixture Ratio on Al_2O_3 Nanofluid Turbulent Forced Convection Heat Transfer, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2016, **7**(6), 123-128.
- [68] Sheikholeslami M., Ellahi R., Vafai K., Study of Fe_3O_4 -Water Nanofluid with Convective Heat Transfer in the Presence of Magnetic Source, *Alexandria Engineering Journal*, DOI:10.1016/j.aej.2017.01.027.
- [69] Oztop H. F., Abu-Nada E., Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled with Nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, **29**(5), 1326-1336.
- [70] Vajjha R. S., Debendra K. D., 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*, 2012, **55**(16), 4063-4078.
- [71] Davarnejad R., Jamshidzadeh M., CFD Modeling of Heat Transfer Performance of MgO-Water Nanofluid under Turbulent Flow, *Engineering Science and Technology*, 2015, **18**(4), 536-542.
- [72] Hsien H. T., Shuhn-Shyurng H., Numerical Study of Laminar Flow and Convective Heat Transfer Utilizing Nanofluids in Equilateral Triangular Ducts with Constant Heat Flux, *Materials*, 2016, **9**(7), 1-17.
- [73] Ahmad A., Sadri R., Shanbedi M., Ahmadi G., Kazi S. N., Chew B. T., Nashrul M., Zubir M., Synthesis of Ethylene Glycol-treated Graphene Nanoplatelets with One-pot, Microwave-assisted Functionalization for Use as a High Performance Engine Coolant, *Energy Conversion and Management*, 2015, **101**, 767-777.
- [74] Gnielinski V., *Wärmeübertragung in Rohren*, 6th ed., VDI-Wärmeatlas, Düsseldorf, 2002.
- [75] Çetin S., Motorlu Taşıt Radyatörlerinde Kullanılan Panjur Tip Kanatlarda Isı Transferi ve Akışın İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 154848.
- [76] Ray T. B., *Engine Cooling Systems*, 1st ed., Penguin Grup, Amerika Birleşik Devletleri, 2007.
- [77] Sovran G., Bohn M., Formulae for the Tractive Energy Requirements of Vehicles Driving the EPA Schedules, *SAE Transactions*, 1981, **90**(1), 746-757.
- [78] Smalley W. M., Lee W. B., *Assessment of an Empirical Technique for Estimating Vehicle Aerodynamic Drag from Vehicle Shape Parameters*, 1st ed., The Aerospace Corporation, Michigan, 1978.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] Arıcı M., Öğüt E. B., **Kaptan Ç.**, Numerical Simulation of Mixed Convection of Nanofluids in a Square Cavity with an Adiabatic Block in The Center, *THERMAM and 3rd Rostoker Symposium on Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics*, Izmir, Turkey, 12-15 June 2014.
- [2] **Kaptan Ç.**, Arıcı M., Karabay H., Numerical Investigation on Mixed Convection of Nanofluids in a Trapezoidal Cavity with Adiabatic Square Block at Center, *8TH Ege Energy Symposium and Exhibition*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, 11-13 Mayıs 2016.
- [3] Arıcı M., **Kaptan Ç.**, Karabay H., Mixed Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Trapezoidal Cavity Having an Adiabatic Square Body at Its Center, *Research on Engineering Structures & Materials*, 2017, **3**(2),155-162.
- [4] **Kaptan Ç.**, Arıcı M., Karabay H., Baynal K., Prediction of Optimum Cooling Performance Improvement for Car Radiator Applications, *ICPAT 2018 International Conference on Progresses in Automotive Technologies 2018*, Istanbul, Turkey, 10-12 May 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Samsun'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Samsun'da tamamladı. 2004 yılında girdiği Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği(İngilizce) Bölümü'nden ve mühendislik öğrenimi süresinde 2006 - 2007 yılları arasında okumaya hak kazandığı Erasmus öğrenci değişim programı altında Almanya Hannover Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği(Almanca) bölümünden öğrenimini tamamladıktan sonra makine mühendisi olarak 2010 yılında mezun oldu. 2010-2012 yılları arasında, Bursa Bosch Organize Sanayi ve Ticaret A.Ş'de, Benzinli Sistemler Bölümü'nde üretim mühendisliği yapmıştır. 2012-2014 yıllarında Ford Otosan Otomotiv Sanayi A.Ş. şirketinde Isı yönetimi ve Aerodinamik Sistemler Bölümü'nde Ar-Ge test mühendisi olarak görev yapmıştır. Şu anda ise 2014 yılından itibaren ZF Sachs Süspansiyon Sistemleri Sanayi ve Ticaret A.Ş firmasında Ar-Ge Tasarım ve Proje Mühendisi olarak görevine devam etmektedir. Ayrıca 2013 yılından itibaren Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrencisi olarak öğrenimine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.