

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV FREN DİSK TASARIMI İÇİN ISI TRANSFER
KARAKTERİSTİĞİ İNCELENMESİ**

ÖZNUR ÇETİN GİRAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ÖZDEN AĞRA**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV FREN DİSK TASARIMI İÇİN ISI TRANSFER KARAKTERİSTİĞİ
İNCELENMESİ**

Öznur ÇETİN GİRAY tarafından hazırlanan tez çalışması 02.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA
Trakya Üniversitesi

Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana her zaman destek olan, değerli bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, yol gösterici bakış açısı ile yoluma ışık tutan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Özden AĞRA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca teknik bilgisi ve kıymetli vaktini ayıran, güler yüzü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekte çalışma hayatımda değerli tecrübesinden yararlanacağımı düşündüğüm Dilek BAYRAK AKÇA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın yoğun ve zorlu geçen süreci boyunca her zaman destek olan eşim Cem Barış GİRAY'a ve bugünlere gelmemde emeği olan AİLEME sonsuz teşekkürler.

Ayrıca tez çalışmam süresince bana destek olan ve olumlu önerileri ile beni geliştiren çalışma arkadaşlarıma ve Ford OTOSAN ailesine teşekkür ederim.

Ağustos, 2019

Öznur ÇETİN GİRAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
FREN SİSTEMİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	4
2.1 Fren Sistemi Çeşitleri	6
2.1.1 Kampana Fren	7
2.1.2 Disk Fren.....	8
2.2 Disk ve Kampana Fren Karşılaştırması.....	10
2.3 Fren Sisteminde Tasarıma Göre Disk Çeşitleri	12
2.3.1 Düz Kanatçık Yapısında Merkezkaç Kanat Tasarımı	14
2.3.2 Radyal Kanatlı Merkezkaç Kanat Tasarımı	14
2.3.3 Geriye Eğik Kanat Tasarımı.....	14
2.3.4 Geriye Eğik Açılabilir Kanat Tasarımı	15
2.3.5 Öne Eğik Kanatlı Merkezkaç Kanat Tasarımı	15
2.3.6 Aerofoil Kanat Tasarımı.....	15
2.4 Günümüzde Ticari Araçlar İçin Yapılan Disk Tasarım Çalışmaları.....	15
2.5 Fren Sisteminin Aşırı Isınması ile Ortaya Çıkan Problemler	17

2.5.1	Fren Bitmesi (Fren Kaybı)	19
2.5.2	Fren Sıvısının Buharlaşması	20
2.5.3	Fren Komponentlerinin Aşırı Isınması	20
2.5.4	Sıcaklık Sebebiyle Oluşan Titreşim	20
BÖLÜM 3		
LİTERATÜR ÇALIŞMASI		22
3.1	Disk Kanatçık Tasarımını Konu Alan Çalışmalar	22
BÖLÜM 4		
DİSK ISI TRANSFERİ TEORİK İNCELENMESİ		34
4.1	Frenleme Sırasında Ortaya Çıkan Enerjinin Hesaplanması	34
4.2	Taşınım Isı Transferi ile Fren Soğutma	35
4.2.1	Düz Disk İçin Isı Transferi Teorik Hesaplanması	36
4.2.2	Havalandırma Kanallı Disk İçin Isı Transferi Teorik Hesaplanması	36
BÖLÜM 5		
FREN DİSK ISI TRANSFERİ İNCELENMESİ		40
5.1	Disk Isı Transferi Matematiksel Hesap ile İncelenmesi	41
5.1.1	Düz Disk Isı Transferi Katsayısı Matematiksel Hesap ile İncelenmesi	41
5.1.2	Havalandırma Kanatlı Disk Isı Transferi Katsayısı Matematiksel Hesap ile İncelenmesi	42
5.2	Disk Isı Transferi HAD Analizi ile İncelenmesi	44
5.3	Araç Seviyesi Disk Isı Transferi HAD Analizi	54
5.4	Testler	57
BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER		62
KAYNAKLAR		65
ÖZGEÇMİŞ		67

SİMGE LİSTESİ

A_g	Hava giriş alanı	$[m^2]$
$A_ç$	Hava çıkış alanı	$[m^2]$
C	Eşitlik düzeltme sabiti	
C_a	Havanın özgül ısısı	$[Nm\ kg/K]$
D	Dış çap	$[m]$
d_h	Hidrolik Çap	$[m]$
E_b	Frenleme enerjisi	$[Nm]$
h	Taşınım ısı transferi katsayısı	$[W/m^2K]$
I	Dönen parçalar için tanımlanan kütle atalet momenti	$[kgm^2]$
k	Dönen parçalar için tanımlanan düzeltme katsayısı	
k_a	Havanın termal iletkenliği	
L	Kanatçık profili uzunluğu	$[m]$
m	Aracın kütlesi	$[kg]$
m_a	Kütle akış hızı	$[m^3/s]$
m_d	Isı transfer düzeltme sabiti	
Nu	Nusselt Sayısı	
n	Isı transfer denklemi düzeltme sabiti	
n_T	Devir sayısı	$[rpm]$
P_b	Fren sırasında ortaya çıkan güç	$[Nm/s]$
P_r	Prandtl sayısı	
R	Lastik Yarı çapı	$[m]$
Re	Reynolds Sayısı	
t	Süre	$[s]$
t_1	Yavaşlamanın başladığı an	$[s]$
t_2	Yavaşlamanın bittiği an	$[s]$
S	Mesafe	$[m]$
$V(t)$	Hız	$[m/s]$
V_1	Aracın ilk hızı	$[m/s]$
V_2	Aracın son hızı	$[m/s]$
ω_1	Frenleme başlangıcında dönen parçaların açısal hızı	$[r/s]$
ω_2	Frenleme sonunda dönen parçaların açısal hızı	$[r/s]$
μ_a	Havanın viskozitesi	$[kg/ms]$
ρ_a	Havanın yoğunluğu	$[kg/m^3]$

KISALTMA LİSTESİ

HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MRF	Moving Reference Frame

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Sabit hız-zaman grafiği	5
Şekil 2. 2 Durma sürecindeki hız-zaman grafiği	6
Şekil 2. 3 Disk ve kampana fren görseli	7
Şekil 2. 4 Kampana fren kesit görseli	8
Şekil 2. 5 Disk fren Çizimi	9
Şekil 2. 6 Disk fren sistemi komponentleri	9
Şekil 2. 7 Sıcaklık ve fren pad sürtünme katsayısı ilişkisi	11
Şekil 2. 8 Disk ve kampana fren sürtünme yüzey alanı karşılaştırması	11
Şekil 2. 9 Havalandırma kanatlı ve düz disk görseli	12
Şekil 2. 10 Fren sistemi ve ısı transferi yöntemleri	13
Şekil 2. 11 Farklı kanatçık tasarımındaki diskler	14
Şekil 2. 13 Performans araçları için geliştirilen havalandırma kanatlı disk tasarımı	16
Şekil 2. 14 Açılı kanatçıklı disk tasarımı	16
Şekil 2. 15 Disk fren ve komponentleri	17
Şekil 2. 16 Dinamometre testinde yüksek sıcaklıktaki fren disk	18
Şekil 2. 17 Dinamometre testi,aşırı ısınmış fren disk çizimi	18
Şekil 2. 18 Termal titreşimden dolayı görülen konikleme (coning) etkisi ile bozulan geometri çizimi	18
Şekil 2. 19 Termal titreşimden dolayı görülen dalgalanma etkisi ile oluşan geometri çizimi	19
Şekil 3. 1 Kanatçık tasarımına göre disk tasarımı a) dairesel b) açılı konik radyal c) elmas sütunlu	23
Şekil 3. 2 Disk kanat tipine göre hız dağılımı	23
Şekil 3. 3 Kanatçık tasarımına göre a) Düz b)düz eliptik kanatlı c) arkaya doğru açılı kanatlı d) öne doğru açılı disk	24
Şekil 3. 4 Disk kanatçık sayısı ve ısı transfer katsayısı etkisi	25
Şekil 3. 5 a) Düz b) Açılı konik radyal c) Elmas sütunlu d) Dairesel sütunlu disk kanat tasarımı	26
Şekil 3. 6 '1800 rpm' disk dönme hızında hava hız dağılımı	27
Şekil 3. 7 Düz kanatçık profili ve açılı modifiye edilmiş kanatçık profili	28
Şekil 3. 8 Dairesel sütunlu disk ve elmas sütunlu disk kesiti	29
Şekil 3. 9 Disk hızı ve ısı transferi	30
Şekil 3. 10 Hava hız vektörleri dağılımı sırasıyla 44, 88 , 120 rpm disk dönme hızı	30

Şekil 3. 11	Nusselt Sayısı dağılımı sırasıyla 44,88,120 rpm disk dönme hızında	30
Şekil 3. 12	Disk kesiti ve kanatçık profili görseli	31
Şekil 3. 13	Disk ısı transfer katsayısı a) düz b) havalandırma kanatlı disk	31
Şekil 3. 14	Disk tipi ve zamana bağlı sıcaklık dağılımı	32
Şekil 3. 15	Düz ve havalandırma kanallı disk tasarımı için sıcaklık dağılımı	32
Şekil 3. 16	Düz disk ısı akısı dağılımı a) X b) Y c) Z eksenı boyunca	33
Şekil 3. 17	Havalandırma kanatlı disk ısı akısı dağılımı a) X b) Y c) Z eksenı boyunca	33
Şekil 4. 1	Pas sebebiyle soğutma hava akışının azaldığı disk kanatları	37
Şekil 4. 2	Kesit A-A	38
Şekil 4. 3	Havalandırma fren disk kesiti	38
Şekil 5. 1	Düz (havalandırma kanatları bulunmayan) disk görseli	41
Şekil 5. 2	Düz kanatçıklı disk kesit görseli	42
Şekil 5. 3	Disk taşınım katsayısı ve dönme hızı matematiksel hesaplama sonucu	44
Şekil 5. 4	Sarip. ve diğerleri tarafından yapılan çalışma sonucu	44
Şekil 5. 5	a) Düz disk b) Düz kanatçıklı disk c) Elmas sütunlu disk	45
Şekil 5. 6	Disk Detayı Görseli	45
Şekil 5. 7	Disk ve kampana görseli	48
Şekil 5. 8	Hacim , disk sınır şartlarını içeren model, 989662 nodes, 4692130 element	48
Şekil 5. 9	Disk, Sınır Şartları içeren görsel	48
Şekil 5. 10	Isı akısı dağılımı	49
Şekil 5. 11	Hava hız vektörleri dağılımı	49
Şekil 5. 12	Disk yüzeyinde hız dağılımı a) düz kanatçıklı disk b) elmas sütunlu disk ..	49
Şekil 5. 13	'30 km/h ve 70 km/h' araç hızında disk tipine göre ısı transfer katsayısı karşılaştırması	51
Şekil 5. 14	Düz kanatlı ve elmas sütunlu disk yüzey alanı	51
Şekil 5. 15	Kanaldaki havanın akış karakteristiği	52
Şekil 5. 16	Rajagopal ve diğerleri tarafından yapılan araştırma, disk dönme hızı ve hava akış hızı etkisi	53
Şekil 5. 17	Kütle akış hızı ve araç hızı	54
Şekil 5. 18	Araç üzerindeki lastik ve jant sistemi parçalarını içeren görsel	55
Şekil 5. 19	Tekerlek sistemi ve fren sistemi kesiti	55
Şekil 5. 20	Disk kesitinde hava hız vektörleri dağılımı a) düz kanatçıklı b) elmas sütunlu disk	56
Şekil 5. 21	Kanat profilinde havanın dağılımı a) düz kanatçıklı b) elmas sütunlu disk ..	56
Şekil 5. 22	Disk kanatçık tipi ve ısı transfer oranı, 30 km/h araç hızında	57
Şekil 5. 23	Potansiyel hata modu , disk yüzeyinde termal çatlak oluşumu	58
Şekil 5. 24	Test sırasında fren sistemi ve disk görseli	59
Şekil 5. 25	Fren dinamometre test düzeneği ve komponentleri	59
Şekil 5. 26	Dinamometre testi çevrim sayısı ve sıcaklık tablosu	60
Şekil 5. 27	Test sonunda elmas sütunlu disk yüzeyi ve çatlak kontrolü	61
Şekil 6. 1	Fren disk performansı termal hasar akış diyagramı	62
Şekil 6. 2	Disk tipi – taşınım katsayısı matematiksel hesap ve araç analizi karşılaştırması	63

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Disk hızının kütle akış hızına etkisi	23
Çizelge 3. 2 Disk tipi ve ısı transfer oranı.....	24
Çizelge 3. 3 Fin sayısının Reynolds Sayısına etkisi	25
Çizelge 3. 4 Fin sayısının Nusselt Sayısına etkisi.....	26
Çizelge 3. 5 Disk çeşidi ve ısı transferi (1800 rpm disk dönme hızında).....	27
Çizelge 3. 6 Disk hızı ve kütle akış hızı çizelgesi.....	29
Çizelge 5. 1 Disk malzeme ve hava termodinamik özellikleri.....	46
Çizelge 5. 2 Araç yük kapasitesi ve disk geometri ölçüleri	46
Çizelge 5. 3 Sınır koşullar	47

OTOMOTİV FREN DİSK TASARIMI İÇİN ISI TRANSFER KARAKTERİSTİĞİ İNCELENMESİ

Öznur ÇETİN GİRAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özden AĞRA

Günümüzde, ağır ticari araçlarda yük taşıma kapasitesindeki artış talepleri ve zorlayıcı kullanım koşulları, araç sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bir araçta fren sistemi en kritik aktif güvenlik sistemlerinden biri olarak tanımlanmaktadır. Fren sistemi tasarımı, zorlayıcı yükleme şartlarında yeterli dayanımı sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Ayrıca, sistem çalışma şartlarında yüksek sıcaklıklara ulaştığı için ısının ortamdaki uzaklaştırılması, dayanıklılık ve performans için önemli bir konudur.

Fren sistemi tasarımında değerlendirilen diğer önemli bir konu ise ağırlıktır. Araçların yakıt tüketimi azaltma hedefi doğrultusunda, sistemlerde ağırlık azaltma gereksinimleri ortaya çıkmaktadır. Sistemlerin dayanıklı ve aynı zamanda hafif olması için otomotiv üreticileri kapsamlı çalışmalar yapmaktadır.

Araçlarda; frenleme sonrasında kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşümü ile birlikte fren sistemindeki tüm komponentlerin sıcaklığı yüksek değerlere ulaşmaktadır. Oluşan ısının ortamdaki uzaklaştırılması yüksek oranda taşınım yoluyla gerçekleşmektedir. Fren diskinde hedeflenen ısı transferi oranı; disk komponentinin tasarımının optimizasyonu ile önemli ölçüde artırılabilir; dolayısıyla fren sisteminin çalışma kapasitesi ve performansı artırılmış olur.

Disk yüzeyinden ısının homojen olarak uzaklaştırılması da önemlidir. Aksi halde disk yüzeyinde sıcaklık farkı oluşur, bu sebeple iç yapıda termal gerilmeler ve mikroçatlaklar

oluşabilir. Bu durum fren sisteminin performansı ve disk dayanımının dūřmesine sebep olur. Fren sistemi parçalarında termal iletkenlik , özgül ısı kapasitesi , yüksek sıcaklıklara dayanıklı yüksek mukavemet , dūřük yoğunluk gibi özellikler sistem tasarımında önem teşkil etmektedir.

Bu çalışmada: ağır ticari araçlarda kullanılan fren disk tasarımı incelenmiştir. Üzerinde havalandırma kanatları olmayan ‘düz disk’ ve üzerinde havalandırma kanatları bulunan ‘düz kanatçıklı’ ve ‘elmas sütunlu’ disk tasarımları, 2 farklı araç hızında; 30 km/h ve 70 km/h disk yüzeyinden ısı transferi miktarı, disk yüzeyindeki hava hız vektörlerinin homojen dağılımı, havanın kütleel debisi; teorik ve bilgisayar destekli analiz (HAD) yöntemiyle incelenmiştir. Havalandırma kanallı 2 disk tasarımı termal yükleme altında test edilerek, deneysel olarak doğrulanması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Disk fren, kanatçık şekli, elmas sütunlu disk, ısı transferi, zorlanmış taşıyım



INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTIC FOR AUTOMOTIVE BRAKE DISC DESIGN

Öznur ÇETİN GİRAY

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Özden AĞRA

Nowadays, demands for increased load capacity in heavy commercial vehicles, increasing transport demands such as demanding conditions of use, it requires an increase in the capacity of the basic systems of vehicles. In a vehicle; the braking system is defined as one of the most critical active safety system. The design of the brake system must be created in such a way as to provide sufficient strength. In addition, as the system reaches high temperatures under operating conditions, removing heat is an important issue for durability and performance.

Another important consideration in the design of the brake system is weight. The goal of reducing fuel consumption of vehicles, weight reduction requirements arise in the systems. Automotive manufacturers work intensively to ensure that the systems are durable and lightweight at the same time.

After braking activity; kinetic energy of vehicle converts to heat energy, so the temperature of all components in the braking system reaches high values. In order to remove the heat from disc surface; convection heat transfer should be increased on disc surface. Heat transfer rate which is target level; can be significantly increased by optimization of the disc component. Hence, the operating capacity and performance of the braking system is increased. Brake system components must have thermal

conductivity, specific heat capacity, high temperature resistance high strength, low density.

The brake discs rotate in the air at high speeds in the moving vehicle, so that the heat is removed via high rate convection heat transfer. It is critical that the disc cools homogeneously. Due to the temperature difference on the disc surface, thermal stresses and micro cracks may be occurred on the disc surface.

In this study; brake disc design used in heavy commercial vehicles is investigated. Solid disc design(without ventilation pillars) and straight vane and diamond pillar disc design on two different vehicle speeds; 30 km/h and 70 km/h heat transfer, homogeneous distribution of air velocity vectors on disc surface, mass flow of air were examined by theoretical and computational fluid dynamics analysis method. Two ventilated types; as 'straight vane' and 'diamond pillar' discs were tested under thermal loading and discs strenght were examined.

Keywords: Disc brake, diamond pillar disc, cooling characteristic, convection heat transfer , forced convection.

1.1 Literatür Özeti

Otomotiv sektöründe; yeni bir araç ya da sistem geliştirme çalışmalarında güvenlik kriteri öncelikli olarak ele alınmaktadır. Araçlarda bulunan her bir sistem için zorlayıcı şartları içeren güvenlik testleri detaylı olarak çalışılmaktadır.

Günümüzde otomotiv sektöründe, düşük yakıt tüketimi ve daha güvenli araç taleplerinden dolayı temel sistemleri geliştirme amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda; araç üretimi sırasında kullanılan her bir sistem, malzeme ya da tasarım geliştirmeleri çalışılarak araçlarda ağırlık azaltma hedeflenmektedir.

Araçta bulunan temel sistemleri; hava yastığı, süspansiyon, direksiyon ve fren sistemi olarak sıralayabiliriz.

Fren sistemi: hareket halindeki bir araç için kontrollü olarak sürücünün araç hızını azaltmasını veya ani durumlarda aracı durdurmasını sağlayan temel güvenlik sistemidir.

Sürtünme temelli fren sistemlerinde çalışma prensibi: fren anında aracın kinetik enerjisinin sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürülmesi ile hızın azaltılması şeklindedir. Sürtünme temelli fren sistemleri disk ve kampana olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Sürtünmeden dolayı ortaya çıkan ısı enerjisinin fren sistemindeki bileşenlere zarar vermemesi ve sistemin görevini yerine getirebilmesi için oluşan ısının ortamdaki uzaklaştırılması gerekmektedir.

Fren sıcaklığı aracın yükleme şartları, bulunduğu yolun eğimi ve en önemlisi aracın hızına göre frenleme anında çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir.

Hareket halinde olan araçta fren diskindeki ısı; iletim ve ışıyım gibi transfer yöntemlerine kıyasla yüksek oranda zorlanmış taşınım ile ortamdan uzaklaşmaktadır.

Isının diskin tüm yüzeylerinde her bölgeden homojen olarak uzaklaştırılması yani 'homojen soğuma' disk dayanımı için en önemli etkidir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada disk fren sistemi kullanılan 4x2 Çekici tip bir araçtaki disk tasarımının ısı transferine etkisi; üzerinde havalandırma kanatları olmayan 'düz disk' ve üzerinde havalandırma kanatları bulunan 'düz kanatçıklı' ve 'elmas sütunlu' disk için; 2 farklı araç hızında; '30 km/h' ve '70 km/h' disk yüzeyinden ısı transferi miktarı, havanın kütsel debisi, hız vektörleri dağılımı ve termal gerilme sebebiyle oluşan maksimum gerilme incelenmiştir.

Çalışma kapsamında taşınım ısı transfer katsayısı teorik formüller kullanılarak ve bilgisayar destekli analiz yöntemi ile hesaplanmıştır.

Ayrıca araç üzerindeki tüm komponentlerin dahil olduğu durumda (lastik, jant ve poyra), 30 km/h araç hızında HAD analizi ile düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk ısı transferi incelenmesi hedeflenmiştir.

Son bölümde: havalandırma kanatlı disk tasarımları (düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk) için çevrimsel termal yükleme altında fren dinamometre testi yapılarak, termal dayanım incelenmesi planlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada ağır ticari araçta kullanılan fren disk kanatçık tasarımı ve araç hızı değiştirilerek; disk yüzeyindeki ısı transferi ve dağılımı araştırılmıştır.

Fren disk tasarımında kullanılan; disk havalandırma kanatlarında homojen hava akımı, elmas sütunlu disk tasarımında düz kanatçıklı yapıya göre daha iyidir.

Ayrıca diskin ısı transferi oranı; farklı kanatçık tasarımı ve araç hızlarında, parça ağırlık azaltma hedefi doğrultusunda incelenmiştir.



FREN SİSTEMİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Hareket halindeki bir araç ile yol arasındaki tek bağlantı, sürtünme ve çekiş kuvveti oluşturan lastikler ile yola aktarılmaktadır. Frenleme, direksiyon manevrası ve hızlanması sırasındaki ivmelenme yine lastikler aracılığıyla araç ve zemin arasındaki yüzeyde meydana gelmektedir. Motorlu bir taşıtın güvenli kullanım şartı, değişen trafik koşullarında hızının ayarlanabilmesi olarak tanımlanmaktadır. Frenler, lastikler ve direksiyon sistemleri bir aracın güvenlik sistemlerinin en başında gelmektedir.

Fren sisteminin temel işlevi; öngörülen kullanım koşulları altında tasarlanarak, düşük maliyet ve yeterli kullanım ömrü ile birlikte; yönsel stabilite ve lastik-yol arasındaki sürtünmeyi sağlıyor olmasıdır. Aynı zamanda tüm güvenlik standartlarına uygun olarak tasarlanmalı ve kullanıma sunulmadan önce zorlu şartlarda test edilmelidir [1].

Fren sistemi komponentleri bir araçtaki en temel güvenlik sistemlerini oluşturmaktadır. Aracın kullanımı sırasındaki hızının belli bir hedef değere azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Sürtünme temelli fren sistemlerinin ortak özelliği hareket sırasındaki kinetik enerjinin fren anında sürtünme yoluyla fren pad ve disk yüzeyi arasında ısı enerjisine dönüştürmesidir. Isı enerjisi oluşumu sonrasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar fren sıvısının, sızdırmazlık elemanlarının ve diğer parçaların aşırı ısınmasına sebep olmaktadır. Fren sisteminin görevini yerine getirmesi temelde; sistemin yeterli soğumasına; yani zorlanmış taşıtın ile oluşan ısının uzaklaştırılmasına ve tasarım aşamasında belirlenen parametrelerden biri olan sistemin termal kapasitesine bağlıdır [2].

Araçlarda; hızın azaltılması ya da durdurulması sırasında çoğunlukla servis freni (fren pedalı) kullanılarak sağlanmaktadır.

Hareket Denklemi Tanımı:

Frenleme sırasında araç hızının azaltılması temel olarak; mesafe, zaman, hız ve yavaşlama ivmesine bağlı gelişen bir harekettir.

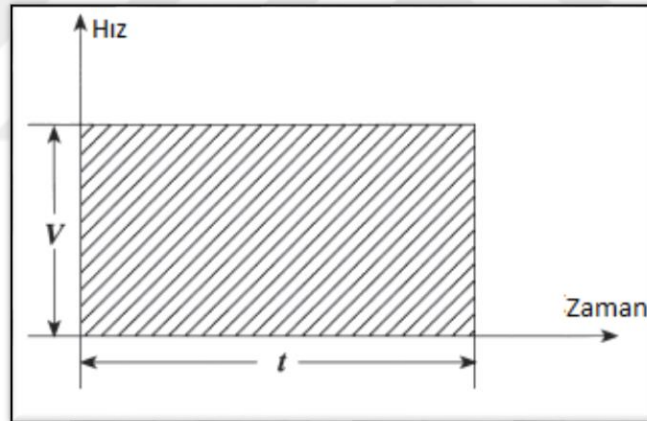
$$V = S/t , (m/s) \quad (2.1)$$

Yavaşlama ivmesi: aracın hızının süreye bölümü ile elde edilmektedir. Eşitlik 2.2’de tanımlanmıştır.

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \quad (m/s^2) \quad (2.2)$$

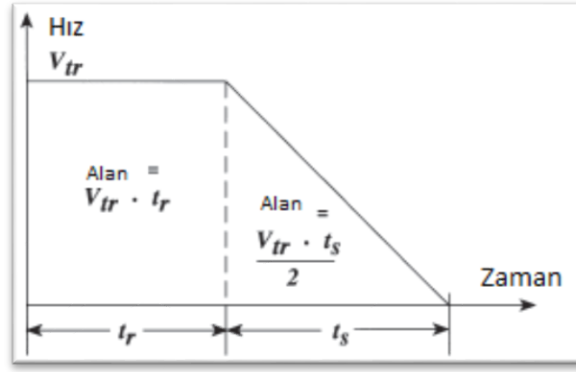
Fren anında durma mesafesi basit olarak tanımı aşağıdaki gibidir:

Hareket halinde sabit hızlı bir araç hız-zaman grafiği Şekil 2.1’de paylaşılmıştır. Hız çizgisi altında kalan alan, zaman çizgisi doğrultusunda incelendiğinde alınan yolu vermektedir.



Şekil 2. 1 Sabit hız-zaman grafiği [1]

Sabit yavaşlayan bir aracın hareket grafiği Şekil 2.2’deki gibi oluşmaktadır. Sürücünün t_r süresinden sonra hızı sabit ivme ile azalmaktadır. Bu sürede durma mesafesi eşitlik 2.3’de olduğu gibi hesaplanır.



Şekil 2. 2 Durma sürecindeki hız-zaman grafiği [1]

$$S_{total} = V_{tr}t_r + \frac{V_{tr}t_s}{2} \quad m \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.2 bağlantısı eşitlik 2.3’de yerine yazılırsa: $t_2 - t_1 = t_s, t_s = \frac{V_{tr}}{a}$

$$S_{total} = V_{tr}t_r + \frac{V_{tr}^2}{2a} \quad (m) \quad (2.4)$$

frenleme anında toplam alınan yol elde edilir.

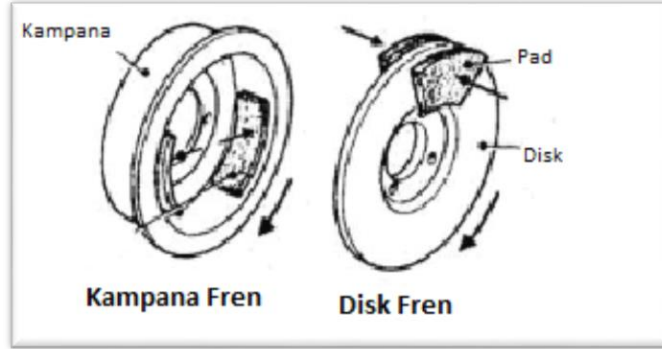
Fren sistemi tasarım ve geliştirilmesinde; dayanıklılık, güvenlik ve seçilen komponentlerin görevini yerine getirme şartı, maliyet ve hafiflik kriterleri doğrultusunda incelenmektedir. Malzemelerin seçilmesinde; yüzey kalitesi ve çalışma şartları boyunca yüzey uygunluğunun kalıcı olması önemli bir tasarım parametresidir. Ayrıca parçaların üretilebilir olması, montaj kolaylığı sağlaması, bakım ve onarım maliyetinin düşük olması da değerlendirilmektedir [1].

2.1 Fren Sistemi Çeşitleri

Ağır ticari araçlarda yaygın olarak kullanılan sürtünme temelli fren sistemleri; kampana ve disk fren olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki sistem de, kampana veya diskin hareketine karşı sabitlenmiş fren pabucu ve padlerden oluşmaktadır. Sürtünme yüzeyleri arasındaki direnci artırmak için tasarımda sürtünme özelliği olan parçalar sabitlenmektedir.

Daha önceki teknolojiye fren sistemi için gerekli sürtünme özelliği yüksek oranda asbest kullanılmaktaydı ancak asbest tozu sağlık açısından zararlı olduğu için günümüzde

kullanılmamaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte asbest içermeyen sürtünme özelliği olan ve yüksek sıcaklığa dayanıklı kompozit malzemeler kullanılmaktadır [1].



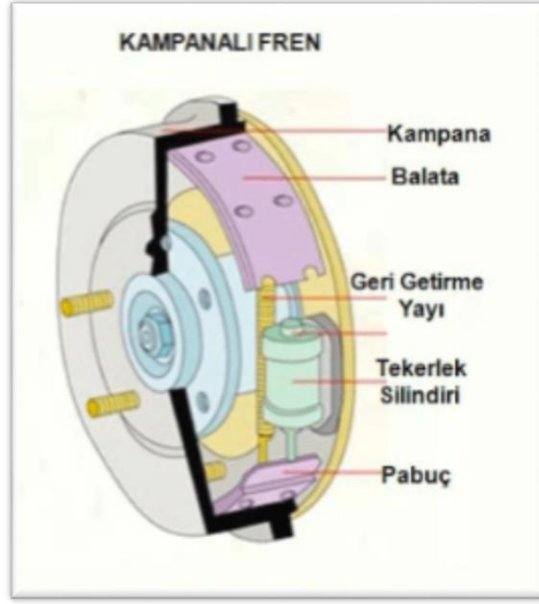
Şekil 2. 3 Disk ve kampana fren görseli [1]

2.1.1 Kampana Fren

Temelde daire şeklindeki bir kampana yuvasının içine konumlanan komponentlerden oluşmaktadır. Bunlar; aks saplamalarına sabitlenen plaka ve içine konumlanan pabuçlardır.

Sürtünme, kampana sisteminin içinden genişleyerek çalışması ile sağlanmaktadır. Pabuçların konumlanmasına göre kesiti 'T' şeklindedir. Sürtünme çizgisi pabuçların dış yüzüne sabitlenmektedir. Pabucun bir ucu sürücünün kullanımında olan pedala sabitlenmiştir, böylece ihtiyaç anında pabuçlar genişleyerek fren aktif hale gelmektedir. Fren anında; pabuçların genişletilmesi için kam sistemi kullanılmaktadır; fakat günümüzde yeni teknoloji ile birlikte; araçlarda hidrolik olarak kontrol edilen bir sistem ile pabuçlar genişletilmektedir.

Pabuç bağlantısı arka plandaki plakaya sabit bir şekilde tutturulmuştur. Sistemin çalışması sırasında pabuçların arasından geçen uzun bir pinin şeklini almaktadır. Yaylar pabuçları çeker ve fren uygulandıktan sonra eski halini almasını sağlar. Bazı tasarımlarda sistemde bulunan ekstra yaylar ayrılma ve sistemin ilk haline gelmesini sağlamaktadır.

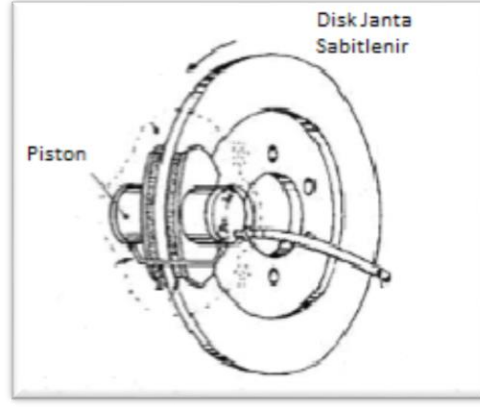


Şekil 2. 4 Kampana fren kesit görseli [3]

2.1.2 Disk Fren

Artan kullanım şartları ile birlikte; kampana frenin geliştirilmesi amacıyla disk fren çeşidi oluşturulmuştur. Frederick William Blanchester tarafından icat edildiği bilinmektedir. Kampana fren tipinden farklı olarak poyra flanşına konumlanan disk komponenti kullanılmaktadır. Fren hareketi 2 tane sürtünme pedinin diske kuvvet uygulaması ile oluşmaktadır. Pedler genelde; hidrolik pistonlar ile aktif hale getirilmektedir, hidrolik pistonlar aksın sabit bir kısmına konumlanan kalipere tutturulmuştur.

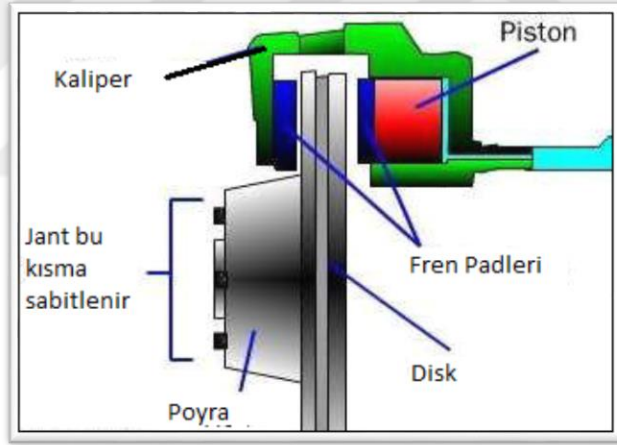
Dökme demirden yapılmış olan disk yüzeyine hidrolik basınç kuvveti vasıtasıyla sürtünme pedleri ile dönme yönüne zıt yönde kuvvet oluşturulur. Sırasıyla diskin dönme hızı azalır; hareketi yavaşlar ve hareket enerjisi diske iletilerek ortaya ısı enerjisi çıkar. Dönmekte olan diskin büyük bir kısmı hava ile temas halinde olduğu için; oluşan ısı taşınım yoluyla uzaklaştırılır. Böylece fren sistemine zarar veren ısı ortamdan uzaklaştırılarak; komponentler uzun periyot boyunca kullanılabilir.



Şekil 2. 5 Disk fren Çizimi [3]

Disk fren kullanımında; genel olarak kampana frene göre daha yüksek pedal basıncı gerekmektedir. Pedlerin aşınma ayarlanması disk fren sisteminde otomatiktir, ayrıca kullanıcı tarafından kolaylıkla kontrol edilerek pedlerin yenilenmesi sağlanabilir [4].

Disk fren sistemi komponentleri temel olarak; disk, pedler, piston, kaliperdir.



Şekil 2. 6 Disk fren sistemi komponentleri [3]

Bir araç sisteminde; disk jant üzerine monte edilmektedir ve hızı jant ile aynı olmak üzere dönen bir parçadır. Fren pedleri diskin yüzeyine temas edecek şekilde kaliper üzerinden sabitlenmektedir. Pistonun itilmesi ile padler rotor üzerine basmakta ve fren sistemi aktif olarak görevini yerine getirmektedir. Pistonun ve fren sisteminin çalışması hidrolik sıvı ile sağlanmaktadır.

Frenleme sırasında: fren pedleri ve disk arasında sürtünme sebebiyle ısı açığa çıkmaktadır, bu ısı enerjisi öncelikle disk üzerinde absorbe edilmekte ardından taşınım ile uzaklaştırılmaktadır.

Disk üzerinde biriken ısı, temel ısı transfer yöntemleriyle ortamdan uzaklaşmaktadır. Isının ortamdan uzaklaşması; iletim, taşınım ve radyasyon yoluyla olmaktadır. Hareket halindeki araçta ortam havası disk yüzeyine temas etmektedir böylece iletim ve taşınım kıyasla yüksek oranda zorlanmış taşınım yoluyla ortamdan uzaklaştırılmaktadır [1].

2.2 Disk ve Kampana Fren Karşılaştırması

Disk fren sisteminin en büyük avantajı yüksek sıcaklıklarda fren performansını kaybetmeden görevini yerine getirmesidir. Bu sıcaklık 1173 K'e kadar ulaşmaktadır.

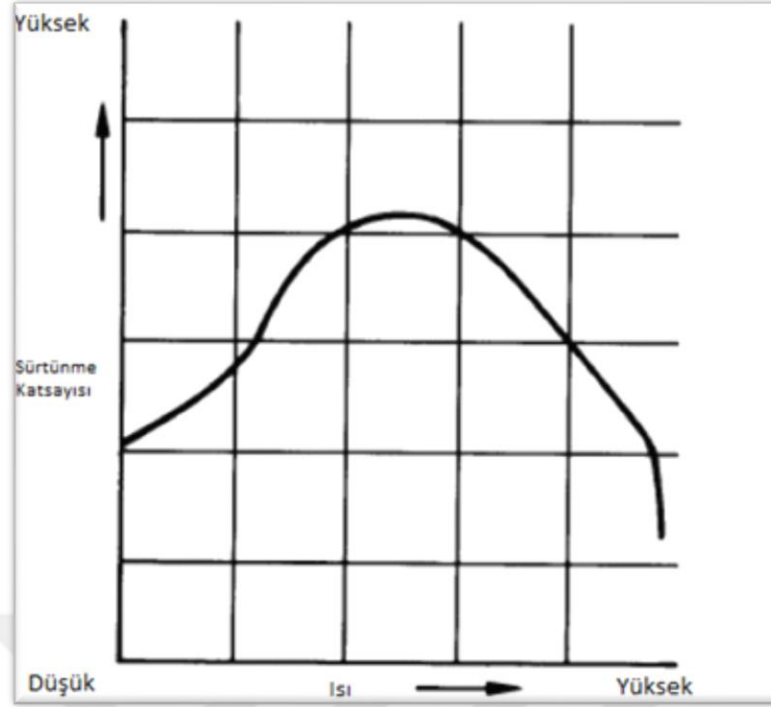
Disk fren performansı Almanya'da 80 km/h ve 50 km/h hız limitli araçlarda yapılan araştırmaya göre kampana fren ile eşdeğerdir; ancak Amerika'da 80 km/h ve üzeri hızlarda yapılan ağır ticari araç kullanımında disk fren performansı kampana frene göre oldukça iyidir.

Fren torku ve ped/disk arasındaki sürtünme katsayısının liner bağlantısı disk fren sisteminin diğer önemli bir avantajıdır. Örneğin: %10 pad sürtünme katsayısı artırıldığında fren torku da %10 artmaktadır.

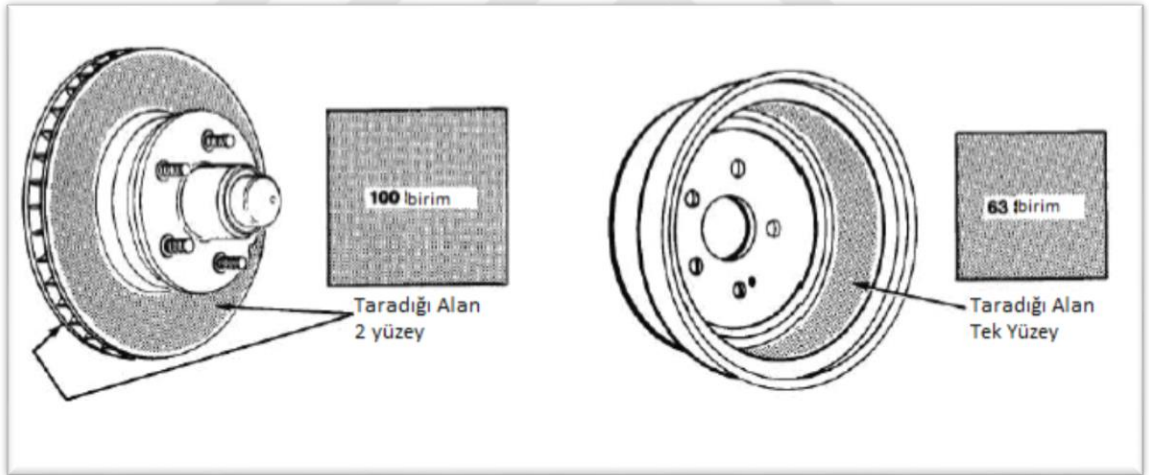
Kampana frenler sıcaklığa aşırı duyarlıdır. Maksimum 673 K ve 700 K sıcaklığını geçmemelidir. Sıcaklık artışı durumunda sadece sürtünme katsayısı etkilenmez aynı zamanda kampana çap artışı da etkilenmektedir. Kampana frenli bir binek araç için; 648K'deki çap artışı 1 - 1,5 mm arasında değişmektedir. Buna bağlı olarak; tekerlek silindiri piston hareketi pedal mesafesini frenler soğukken olan normal değere göre %30-40 aralığında artırmaktadır. Ayrıca genişleyen kampana çapı balata ve kampana arasında uygun olmayan mesafeye sebep olacaktır [1].

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi frenleme sonrasında sıcaklık artışı ile birlikte disk ve padler arasındaki sürtünme katsayı ciddi oranda azalmaktadır [5]. Bu durum sistemin tekrar kullanılabilirliğini riske atmaktadır.

Frenlerin aşırı ısınması ve ısının ortamdan uzaklaştırılmaması sonucunda; ciddi hasarlı trafik kazaları meydana gelmektedir. Bu sebeple frenlerin tasarım aşamasında ele alınan soğuma kriteri çalışma şartları için önemli bir parametredir. 100 °C'den 400 °C'ye çıktığında disk ve kampana fren için fren kuvveti azalması sırasıyla %10 ve %60'dır [5].



Şekil 2. 7 Sıcaklık ve fren pad sürtünme katsayısı ilişkisi [5]



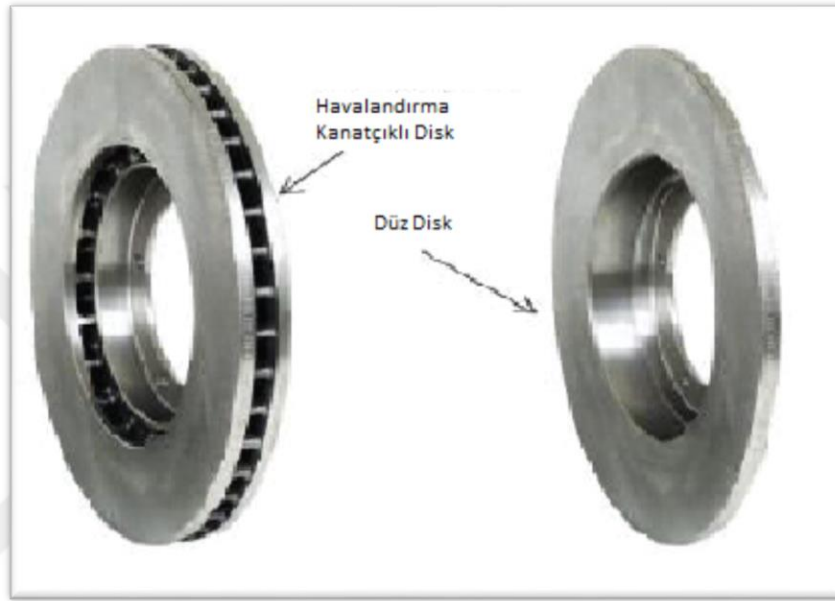
Şekil 2. 8 Disk ve kampana fren sürtünme yüzey alanı karşılaştırması [5]

Araçlarda yeterli sürede ve yüklü şartlarda frenleme sağlanabilmesi için absorbe edilen ısı fren sisteminde uygun bir şekilde yayılabilmelidir. Aksi halde oluşan yüksek ısı enerjisi fren sistemi parçalarına zarar vermektedir. Oluşan ısının transferi bu kapsamda kritik bir rol oynamaktadır.

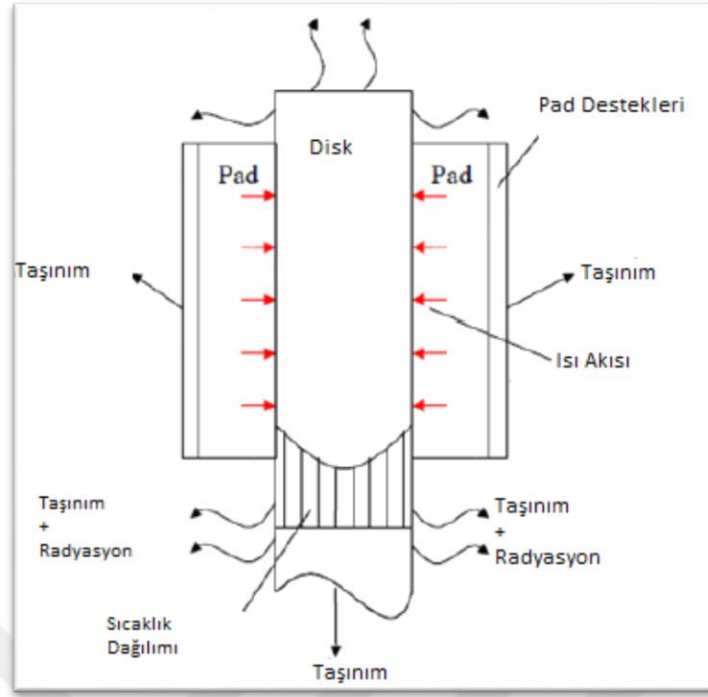
2.3 Fren Sisteminde Tasarıma Göre Disk Çeşitleri

Geçmişten günümüze kadar disk tipi incelendiğinde; düz ve havalandırma kanatlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gelişen teknoloji ve imalat yöntemleri ile birlikte günümüzde yaygın olarak havalandırma kanatlı disk tasarımları kullanılmaktadır.

1. Havalandırma kanatlı disk tasarımı
2. Düz (Üzerinde havalandırma kanatları olmayan) disk tasarımı



Şekil 2. 9 Havalandırma kanatlı ve düz disk görseli

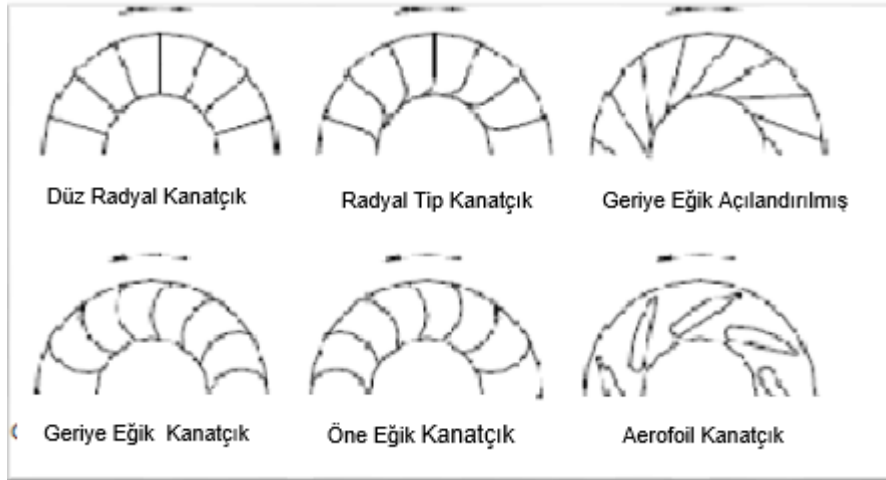


Şekil 2. 10 Fren sistemi ve ısı transferi yöntemleri

Disk'in iç yüzeyine eklenen havalandırma kanatları merkezkaç fan benzeri şekilde hava akışı oluşturulması amacıyla tasarlanmıştır. Böylece yüzey alanı artışı ile ısı transferinin artırılması hedeflenmiştir. Hava akışı hareket halindeki araçta akışın yönlendirilmesi ve tasarıma bağlı olarak akışın merkezkaç kuvveti birleşimi ile elde edilmektedir. Disk havalandırma kanallarındaki akışı iyileştirmek amacıyla turbo makine teorisi ve merkez kaç fan tasarımı teorisi Hudson ve Ruhl tarafından çalışılmıştır [6]. Kanat konfigürasyonu merkezkaç fanlarda çok önemlidir; ancak basit tasarım ve üretim kolaylığı sağlamak için fren diskleri genellikle radyal-düz kanatçık konfigürasyonuna sahiptir.

Merkezkaç fan kanat yapıları çoğunlukla disk dökülürken üretilmektedir, bu sebeple bazı merkezkaç fan tasarımları avantajları fren disklerine kolaylıkla aktarılamayabilir. Temel kanatçık çeşitleri ve fren disklerindeki kullanımına uygunluk fırsatları aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

Bu bölümde Şekil 2.11’de yer alan disk tasarımlarından bahsedilecektir.



Şekil 2. 11 Farklı kanatçık tasarımındaki diskler [6]

2.3.1 Düz Kanatçık Yapısında Merkezkaç Kanat Tasarımı

Bu kanatçık tasarım çeşitleri sıklıkla fren disklerinde kullanılmaktadır. Düz kanat tasarımı aynı disk tasarımının aracta sağ ve sol tarafında ortak kullanımını sağlamaktadır. Düz kanatçık tasarımı döküm prosesinde üretim kalıplarının ortaklaştırılması ile üretim kolaylığı sağlamaktadır. Kanatlar akış sırasında kendini temizlemektedir; ancak uç kısımda açılı olmayan bir yapı olduğu için hava akışının içeri çekilememesi sebebiyle verimliliği düşüktür.

2.3.2 Radyal Kanatlı Merkezkaç Kanat Tasarımı

Bu tip disk kanatçık tasarımlarında havanın giriş yaptığı ön uçları eğimlidir, büyük boyutlu (çapı 750 ile 1500 mm aralığında olan) fanlarda bu tasarım yaygın kullanılmaktadır. Tasarımın bir diğer avantajı fan kanatlarının dairesel şekilde tasarlanmış uçlarının parçayı kendiliğinden temizlemesidir. Sıklıkla yüksek sıcaklık ve yüksek oranda katı madde içeren alanlarda kullanılır.

2.3.3 Geriye Eğik Kanat Tasarımı

Geriye doğru eğik şekilde tasarlanmış kanatçıkları içeren tasarımdır. Kanatçıklar dönme yönüne zıt olarak açılı şekilde konumlandırılmıştır. Aerofoil kanat tasarımına kıyasla

verimleri daha düşüktür. Bu kanatçık tasarımları hava tahliye sistemlerinde indüklenmiş ve zorlanmış çekiş sistemli kazanlarda kullanılmaktadır.

2.3.4 Geriye Eğik Açlandırılmış Kanat Tasarımı

Bu tip kanatçık tasarımları diğer tasarımlara kıyasla en ekonomik olanlardan biridir. Mekanik verim ve yapısal dayanım kriterleri düşüktür; ancak performansı geriye eğik merkezkaç kanatçık tasarımları ile yakın seviyededir.

2.3.5 Öne Eğik Kanatlı Merkezkaç Kanat Tasarımı

Kanatçık tasarımları dönme yönüne doğru eğimli ve geniş bir yönlendirici kanal açısına sahiptir. Diğer merkezkaç fan tasarımlarına kıyasla çok daha yüksek hava akış hızına ulaşmaktadır. Ayrıca fren disk kanat tasarımlarında kompaktlık verimlilikten daha önemlidir ve fren disk tasarımlarında kullanılması için uygundur.

2.3.6 Aerofoil Kanat Tasarımı

Bu tip fan kanatçık tasarımları diğer tasarımlarla karşılaştırıldığında en yüksek mekanik verime sahiptir, ancak verim fren diskleri için çok önemli olmayan bir husustur. Soğutma kapasitesinin yüksek olmasıyla yüksek oranda hava akışı sağlamak ve verimlilik konusundan diğer tasarımlara kıyasla daha ağır basmaktadır. Ancak bu tip kanatlı fan yapısı yüksek verim avantajı ile havalandırma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

2.4 Günümüzde Ticari Araçlar İçin Yapılan Disk Tasarım Çalışmaları

Disk frenler günümüzde araç üreticileri ve kullanıcılar tarafından oldukça popülerdir. Disk tasarımlarında araçların fren performanslarının iyileştirilmesi amacıyla farklı yüklemeler ve çalışma koşullarını değerlendirerek optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Ayrıca üretici firmalar parça hafifletme hedefi doğrultusunda malzeme karakterizasyonu ve havalandırma kanatlı disklerin termal ve yapısal dayanımı ile ilgili çalışmalar yapmaktadır.

İtalya merkezli bir firma disk fren alanındaki yenilikçi teknolojilerde yoğun çalışmalar yapmaktadır. Ürünleri yüksek performans araçları, ağır ticari araçlar ve motosikletlerin

fren sistemlerini kapsamaktadır. Disk alanında yaptığı detaylı ve yenilikçi çalışmalar sonunda bugüne kadar birçok patent aldığı bilinmektedir.



Şekil 2. 12 Performans araçları için geliştirilen havalandırma kanatlı disk tasarımı

Amerika merkezli bir üretici firma tasarım geliştirme amacıyla farklı geometrilerde disk tasarımları çalışmaktadır. Disk malzemesi olarak kullanım alanına göre yüksek dayanımlı çelik, dökme demir ve yeni teknoloji metodu ile üretilen seramik kompozitler kullanılmaktadır. Kompozit tasarımlı diskler hafiflik avantajı sağladığı için tercih edilmektedir.



Şekil 2. 13 Açılı kanatçıklı disk tasarımı

Almanya merkezli bir diğer üretici firmanın disk kanatçık tasarımı Şekil 2.15'te paylaşılmıştır. Ürün seçenekleri binek araç ve ağır ticari araçları kapsamaktadır ayrıca disk fren sistemine ilave olarak kampana fren için de yeni teknolojiler geliştirmektedir. CO₂ emisyonunu düşürmek ve yakıt ekonomisi sağlamak amacıyla sürtünme karakteristiği geliştirilmiş ve hafif malzeme kombinasyonu seçenekleri sunmaktadır [7].



Şekil 2. 14 Disk fren ve komponentleri

2.5 Fren Sisteminin Aşırı Isınması ile Ortaya Çıkan Problemler

Frenleme sırasında ulaşılan sıcaklık çok yükselirse ve yeterli soğutma sağlanamazsa fren komponentlerinde hasar oluşur ve araçta frenleme performansında düşüş meydana gelir. Yüksek sıcaklık sebebiyle fren sisteminin ihtiyaç halinde fonksiyonunu yerine getirememesi fren kaybı olarak adlandırılmaktadır.

Motorlu araçlarda fren kaynaklı meydana gelen kazalarda kaza sonrasında kök sebebin tespit edilmesi kolay değildir; çünkü yüksek sıcaklık bir süre sonra düşecek ve normal seviyelere ulaşacaktır.

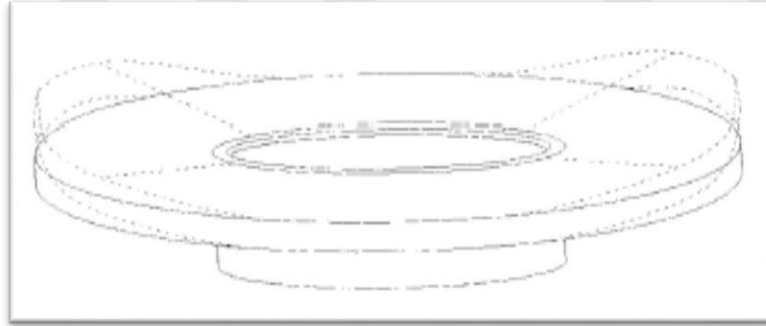
Fren sistemi parçalarının aşırı ısınması ile ortaya çıkan diğer problemler: disk yüzeyinin aşınarak bozulması, termal hasar sebebiyle ortaya çıkan titreşim, sızdırmazlık elemanlarının zarar görmesi, fren sıvısı buharlaşması, jant yatağına ve dolaylı yoldan lastiğe zarar vermesidir [6].

Fren disk tasarımı geliştirme sürecinde kapsamlı olarak tasarımın önemini anlamak için farklı termal hasar modlarının detaylı olarak incelenmesi gereklidir. Şekil 2.16'da aşırı ısınmış fren diskisi örnek olarak verilmiştir.

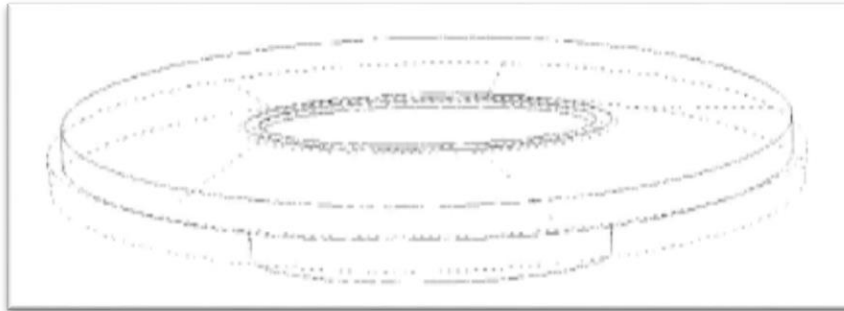


Şekil 2. 15 Dinamometre testinde yüksek sıcaklıktaki fren disk [8]

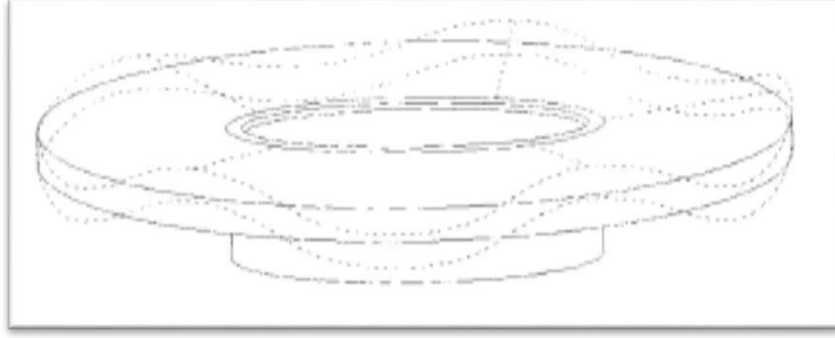
Padler sürtünme oluşturmak için disk yüzeyine konumlanmaktadır. Düzensiz temas kuvveti ya da fren padleri ve disk yüzeyi arasında aşırı ısınma meydana geldiğinde disk hareketi sırasında titreşim görülebilmektedir. Termal titreşim soğuk titreşimden farklı olarak fren disk malzemesinin termal düzensizliğinden meydana gelmekte, genelde yetersiz dayanımda ve kalınlıkta olan disk tasarımından kaynaklıdır. Aşağıda sırasıyla geometrik bozulma etkisi ile görülen hasar modları ve disk geometrisinde görülen değişimler çizimlerle tanımlanmıştır.



Şekil 2. 16 Dinamometre testi, aşırı ısınmış fren disk çizimi [8]



Şekil 2. 17 Termal titreşimden dolayı görülen konikleme (coning) etkisi ile bozulan geometri çizimi [8]



Şekil 2. 18 Termal titreşimden dolayı görülen dalgalanma etkisi ile oluşan geometri çizimi [8]

Fren disk malzemesinde yüzeyde ve kanatçıklar arasında homojen olmayan soğuma ve ısı dağılımı etkisi ile çatlak görülebilir. Düzensiz sıcaklık dağılımı oluştuğunda; fren disk düzensiz şekilde genişler ve gerilme konsantrasyonları oluşur. Bu durum sonucunda çatlak başlangıcı ve ilerlemesi ile disk zarar görüp fren sistemi fonksiyonunu yerine getirememektedir. Yüksek sıcaklık noktalarının oluşmasını önlemek ve bunu eşit hale getirmek için ısı dağılımını en üst seviyeye çıkarmak ve sıcaklık dağılımını düzenli formda oluşacak şekilde disk tasarımı yapılmalıdır [8].

Fren sıcaklığının aşırı yükselmesiyle ilişkili ortaya çıkan temel problemler aşağıdaki gibidir:

2.5.1 Fren Bitmesi (Fren Kaybı)

Fren sistemi fonksiyonunu yerine getirememesi yani ihtiyaç halinde yeterli sürtünmenin oluşmamasıdır. Sürtünme malzemelerinde yüksek sıcaklık sebebiyle oluşan geçici bir durumdur. Yüksek sıcaklık etkisi sürtünme malzemelerinde ve disk yüzeyindeki sürtünmeyi olumsuz etkilemekte ve fren verimliliğini azaltmaktadır. Bu durum fren hasarı ile sonuçlanmaktadır.

Genelde fren kaybı oluşmaması ve aşırı yüksek sıcaklıkta yanma riskini düşürmek için sürtünme malzemelerinin yanma sıcaklıklarının altında tasarlanır. Normal frenleme sırasında uygun bir fren sisteminde ısının uzaklaştırılması ile fren sıcaklığı kritik sıcaklığın altına düşmektedir.

2.5.2 Fren Sıvısının Buharlaşması

Ağır ticari araçlar hariç genellikle fren sistemleri hidrolik temelli olarak çalışmaktadır. Frenleme sırasında sıcaklık aşırı yükselirse hidrolik sıvının buharlaşarak azalması mümkündür. Bu durumda hidrolik devrede buhar kilidi oluşacaktır. Gaz sıvıya göre daha sıkıştırılabilir olduğundan pedal stroğu gazı sıkıştırmadan freni aktive edecektir. Fren sistemi hidroskopiktir ve zamanla atmosferden su absorbe etmektedir. Böylece fren sıvısının kaynama sıcaklığının düşmesine neden olabilir, bunu engellemek ve olası kazaların önüne geçmek için araç üretici firmalar tarafından fren sıvısının periyodik olarak değiştirilmesi önerilmektedir.

2.5.3 Fren Komponentlerinin Aşırı Isınması

Fren sistemindeki yüksek sıcaklıklar diskin termal deformasyonuna neden olarak düzensiz aşınma ve eşit olmayan fren yüklerine sebep olmaktadır. Sürtünme komponentlerinin ömrü sıcaklığa bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda sürtünme malzemesi kimyasal reaksiyon sonucu mekanik dayanımı azalmakta ve frenleme verimi düşerek hızlı aşınmaya neden olmaktadır. Sürtünme malzemesinin aşınması yüzeydeki temas basıncı ile doğru orantılıdır ancak sıcaklık ile üst katsayı ilişkisi vardır. Bu sebeple sıcaklık arttıkça aşınma daha hızlı ilerleyerek sistemin çalışmasına bir risk oluşturacaktır.

2.5.4 Sıcaklık Sebebiyle Oluşan Titreşim

Frenleme sırasında araçta sürücü tarafından fark edilen düşük frekanslı titreşimler meydana gelebilir. Titreşim sürücü tarafından kabinde veya direksiyonda hissedilebilir ya da vızıltı şeklinde duyulabilir. Bu durumun fren kaynaklı titreşim olması muhtemeldir.

İki çeşit fren titreşimi vardır. Bunlar; sıcak (termal) ve soğuk titreşim. Soğuk titreşim; disk yüzeyine konumlanan pad basıncının değişimi ile ortaya çıkar ve disk kalınlığındaki bölgesel değişkenlik titreşime sebep olur.

Termal titreşim ise; yüksek sıcaklık sebebiyle görülmektedir ve diskin termal deformasyonundan kaynaklanır. Soğuk disk kalınlığı varyasyonunu içeren bir disk frenlemeye maruz kaldığında daha kalın parçadaki temas basıncı ince parçaya kıyasla

daha büyük olur. Bu durum sonucunda kalın kısım daha sıcak hale gelir ve hızlanarak artan kararsızlık sonucu düzensiz termal genleşme oluşur.

Termal titreşimler disk yüzeyinde yüksek sıcaklık noktası şeklinde tanımlanan kritik bölgelerin oluşması ile görülmektedir. Yüksek sıcaklık noktaları pad ve disk arasındaki yüzeyde oluştuğunda ve 700 °C'den yüksek olduğunda disk kalınlığında varyasyona neden olmaktadır. Şekil 2.19'da termal titreşim sebebiyle meydana gelen geometri değişimini gösteren disk çizimi paylaşılmıştır.

Dökme demirler için temelde hızlı bir şekilde soğutma yapıldığında perlitten martenzite dönüşen ani faz değişimi sebebiyle disk kalınlığında varyasyon oluşmaktadır. Çünkü martenzit perlitte kıyasla hacim olarak daha büyük ve daha çok yer kaplamaktadır. Bu sebeple soğuk disk kalınlığında değişim olur [6]. Disk kalınlığında görülen değişim ve termal hasarları engellemek için çalışma şartlarına uygun tasarımlar yapılmalı, disk yüzeyinde yeterli soğutma sağlanmalıdır.

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu bölümde tez kapsamında çalışılan fren sisteminin kritik parçasından biri olan diskin; ısı transfer oranını etkileyen kanatçık tasarımı, araç hızı ve akış tipi gibi temel parametreleri içeren literatür araştırması ve özeti sunulmuştur.

Fren disklerinin taşınım ile soğutulması tarih boyunca deneysel ve teorik yöntemlerle çalışılmıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru modern hesaplama yöntemlerinin geliştirilmesiyle optimizasyon çalışmaları artmıştır.

Günümüzde basit kullanımı olmamasına rağmen, akışkanlar dinamiği ve ısı transferinin temellerinin anlaşılmasını gerektiren bilgisayar destekli (HAD) analiz yöntemleri otomotiv endüstrisinin tasarım sürecinde öncelikli olarak tercih edilmektedir. Aksi taktirde çok zahmetli ve zaman alan deneysel çalışmalara ihtiyaç duyularak akış ve ısı transferinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak fren diski taşınım ile ısı transfer analizi ve optimizasyonu günümüzde HAD analiz yöntemi ile yapılmaktadır.

3.1 Disk Kanatçık Tasarımını Konu Alan Çalışmalar

Rajagopal ve diğerleri Ansys 12.1 programı ile havalandırma kanallı fren disk tasarımında akışı ve ısı transferi karakteristiğini incelemiştir [9]. Dairesel, açılı konik radyal ve elmas sütunlu kanatçık tasarımı için 800 rpm ve 1400 rpm disk hızlarındaki kütle akış debisi incelenmiş ve daha önce yapılan çalışmaların literatür sonuçları ile sapma oranı karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. 1 Kanatçık tasarımına göre disk tasarımı a) dairesel b) açılı konik radyal c) elmas sütunlu [9]

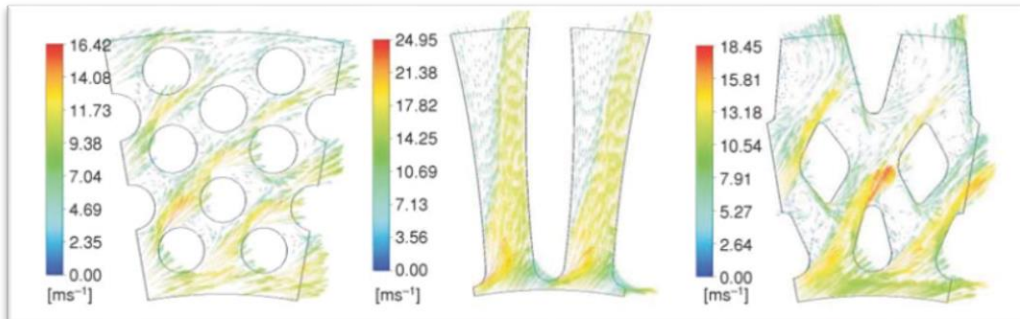
Çizelge 1’de HAD analizinde 800 rpm’den 1400 rpm’e çıkıldığında kütle akışı 0,7g/sn’dan 1,37 g/sn’e artmıştır.

Çizelge 3. 1 Disk hızının kütle akış hızına etkisi [9]

Hız	Hesaplanan kütle akış hızı	Literatür kütle akış hızı	Hata oranı
rpm	g/s	g/s	%
800	0,70	0,72	-2,80
1000	0,98	0,96	2,10
1200	1,18	1,23	-4,10
1400	1,37	1,32	3,80

Yapılan çalışmada dairesel, açılı konik radyal ve elmas sütunlu kanatçık yapısında disk tasarımları incelenmiştir.

Kütle akış hızı açılı konik radyal sütünlü tasarım için diğer 2 tasarıma göre en yüksektir. Elmas sütunlu tasarım için ısı transferi diğer 2 tasarıma göre %25 daha yüksektir.



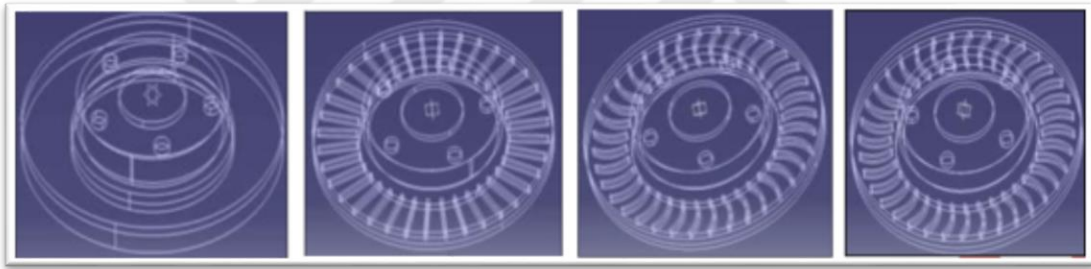
Şekil 3. 2 Disk kanat tipine göre hız dağılımı [9]

Dairesel sütunlu disk tasarımı için basınç ve hız dağılımı uniform olduğu saptanmıştır. Böylece termal hasar oluşumunun önüne geçilmektedir.

Çizelge 3. 2 Disk tipi ve ısı transfer oranı [9]

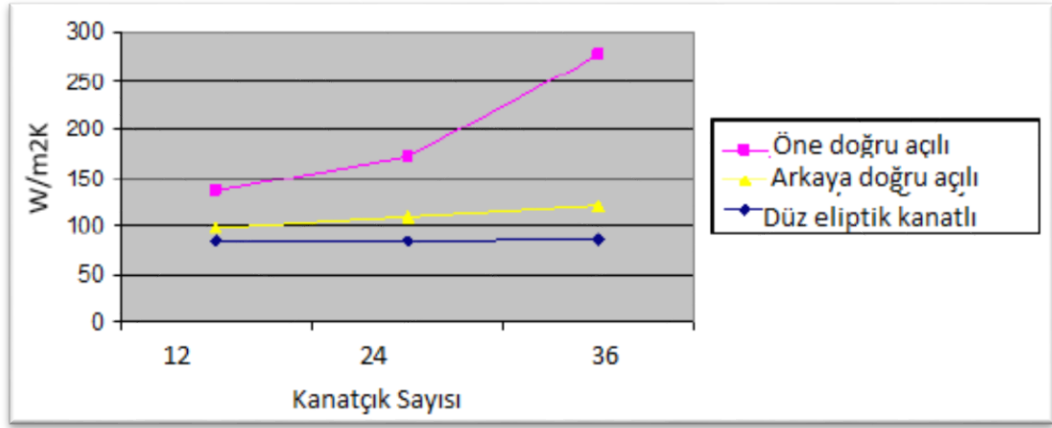
Kanatçık Profili	Kütle akış hızı	Isı Atılımı
-	g/s	W
Dairesel Sütunlu	0,98	238,50
Açılı Konik Radyal	3,19	245,00
Elmas Sütunlu	1,59	301,70

Reddy ve Sri tarafından yapılan çalışmada farklı fren disk tasarımları için ısı transferi karakteristiği incelenmiştir [10]. Çalışmada 4 farklı tasarım için ANSYS-FLUENT programı ile değerlendirme yapılmıştır. Düz disk (üzerinde hava kanalı olmayan), düz eliptik kanatları olan, arkaya doğru açılı kanatları olan ve öne doğru açılı kanatları olan disk tasarımı incelenmiştir.



Şekil 3. 3 Kanatçık tasarımına göre a) Düz b) düz eliptik kanatlı c) arkaya doğru açılı kanatlı d) öne doğru açılı disk [10]

Çalışmada kanatçık sayısının 12,24,36 olarak değiştirilerek ısı transferine etkisi Nusselt ve Reynolds sayısı elde edilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca disk dönme hızının etkisini incelemek amacıyla 40 ve 50 mph hızlarında analiz tekrarlanmıştır.



Şekil 3. 4 Disk kanatçık sayısı ve ısı transfer katsayısı etkisi [10]

Değerlendirme sonucunda ısı transferine etki eden parametre fin sayısı ve yapısındaki açı (yönlendirme) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3. 3 Fin sayısının Reynolds Sayısına etkisi [10]

	Fin Sayısı	Yüzeydeki Reynolds Sayısı 40 mph	Yüzeydeki Reynolds Sayısı 50 mph
Düz		1422	1582
Düz eliptik kanatlı	12	1602	1730
	24	1628	1742
	36	1656	1787
Arkaya doğru açılı kanatlı	12	1602	1826
	24	1628	1859
	36	1656	1902
Öne doğru açılı kanatlı disk	12	1739	1915
	24	1812	2095
	36	1930	2313

Çizelge 3. 4 Fin sayısının Nusselt Sayısına etkisi [10]

	Fin Sayısı	Yüzeydeki Nusselt Sayısı 40 mph	Yüzeydeki Nusselt Sayısı 50 mph
Düz		3230	4038
Düz eliptik kanatlı	12	3620	4525
	24	3680	4600
	36	3752	4690
Arkaya doğru açılı kanatlı	12	4215	5269
	24	4712	5890
	36	5213	6516
Öne doğru açılı kanatlı disk	12	5814	7268
	24	7000	11640
	36	11000	15784

Öne doğru açılı kanatçık yapısındaki disk, diğer tasarımlara kıyasla yüksek Reynolds ve Nusselt sayısına ulaşmaktadır. Artan disk hızıyla birlikte Reynolds sayısı artışına bağlı olarak Nusselt sayısı artmakta ve bu da ısı transfer katsayısını olumlu etkilemektedir.

Kudal ve Chopade radyal ve sütunlu disk tasarımlarında termal hasarların sadece yüksek sıcaklık kaynaklı olmadığına, aynı zamanda disk kanallarındaki hava akışının homojen dağılımının da etkisi olduğuna değinmiştir [11]. Çalışmada hava akışı ve ısı transferi karakteristiği etkisi incelenmiştir.



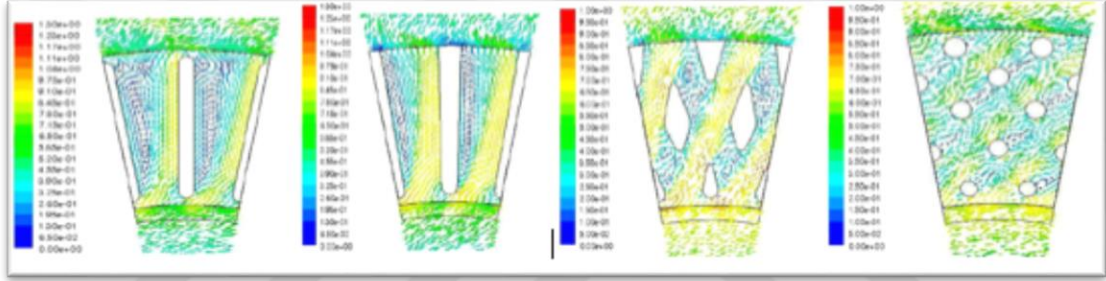
Şekil 3. 5 a) Düz b) Açılı konik radyal c) Elmas sütunlu d) Dairesel sütunlu disk kanat tasarımı [11]

Çizelge 3. 5 Disk çeşidi ve ısı transferi (1800 rpm disk dönme hızında) [11]

Disk Tipi	Kütle akış hızı	Isı Transfer Katsayısı	Isı Atılımı ²
-	g/s	W/m ² K	W
Düz Radyal	1,40	32,81	217,12
Açılı Konik Radyal	2,04	45,26	295,12
Elmas Sütunlu	1,51	42,11	279,15
Dairesel Sütunlu	0,72	32,71	216,13

Çalışma sonucunda; elmas sütunlu tasarım için kütle akış hızı, açılı radyal kanatlı tasarıma göre %26 düşük çıkmıştır.

Elmas sütunlu disk için kütle akış hızı düşük olmasına rağmen ısı transfer oranı radyal kanatlı diske yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 3. 6 ‘1800 rpm’ disk dönme hızında hava hız dağılımı [11]

Diğer tasarımlara kıyasla elmas sütunlu disk üzerinde hava akışı homojen olarak dağılmaktadır. Bu sebeple ısı transferi avantajı yanında homojen ısı dağılımı da elde edildiği için önerilmektedir.

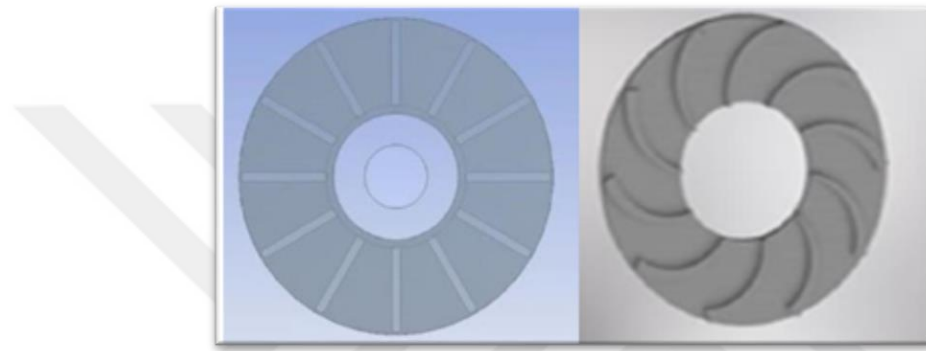
Yohannan tarafından yapılan çalışmada disk fren kanatçık modifikasyonu ve ısı transferi iyileştirmesi ANSYS programı ile incelenmiştir [12]. Akış dağılımı ve havanın giriş açısının kütle akış hızında önemli bir etkisi olduğu ve bu doğrultuda ısı transferini etkilediği elde edilmiştir. Çalışmada düz kanatçık profili ve açılı modifiye edilmiş kanatçık profilinin ısı transferi etkisi incelenmiştir.

Bu kapsamda disk yüzey alanı kanatçık şeklinin ısı transfer etkisi HAD yöntemiyle incelenmiştir.

Disk hasarlarının temel sebebi olarak aşırı ısınma ve yüksek termal gerilme olduğuna değinilmiş, termal gerilmenin yüksek olduğu noktalarda ısı transferinin verimsiz olduğu saptanmıştır.

Disk üzerindeki 36 kanatçık üç mm eğim verilerek revize edilmesi sonucunda ısı transferi düz kanatçık profiline göre %8,76 artmıştır. Aynı yapının üç mm eğimli ve kanatçık adetinin 53 olarak artırıldığı durumda ısı transferi %11,03 oranda artmıştır.

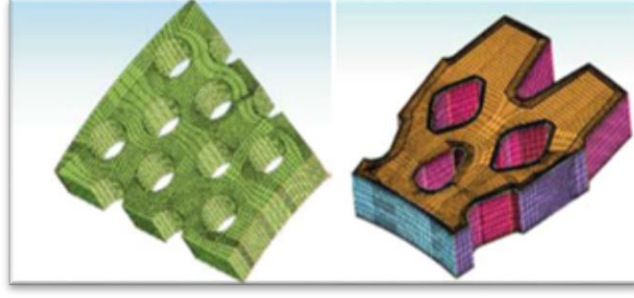
Analiz sırasında ısı transferi oranı en yüksek tasarım bu şekilde elde edilmiştir ve yapısal süreklilik ayrıca üzerinde durulması gereken bir nokta olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. 7 Düz kanatçık profili ve açılı modifiye edilmiş kanatçık profili [12]

Çalışmada ısı transferi karakteristiği analizinde sistematik bir karşılaştırma yapılması için üç farklı disk tasarımı incelenmiştir. Bunlar; dairesel, açılı radyal kanatçıklı ve elmas sütunludur. Elmas sütunlu diskin kütle akış hızı dairesel sütunlu disk tasarımına göre daha yüksek elde edilmiştir. Disk yüzeyinden ısı uzaklaştırma anlamında elmas sütunlu tasarım diğer iki tasarıma göre %25 yüksektir.

Dairesel sütunlu disk tasarımında disk hava akış yüzeyindeki basınç ve hız dağılımının diğer iki tasarıma göre homojen olduğu gözlemlenmiştir. Hız ve basınç dağılımının homojen olması kanatçık etrafındaki sıcaklık düşüşünü etkilemekte ve homojen soğuma sağlanmasında kritik rol oynamaktadır.



Şekil 3. 8 Dairesel sütunlu disk ve elmas sütunlu disk kesiti [12]

Elde edilen analiz doğrultusunda dairesel sütunlu disk tasarımı, modifiye edilmiş kanatçık yapısı ve elmas sütunlu disk tasarımına kıyasla önerilmektedir.

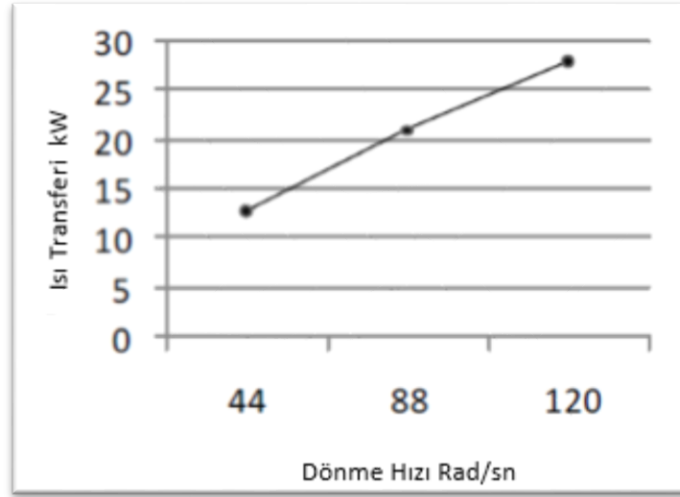
More ve Sivakumar'ın havalandırma kanallı fren diski ile ilgili yaptığı çalışmada farklı araç hızlarında diskin aero-termal performansı incelenmiştir [13]. 44 rad/sn, 88 rad/sn ve 120 rad/sn disk hızları solidworks ile modellenen disk tasarımlarında ICEM CFD ile mesh atılmış ve Fluent programı ile çözdürülmüştür.

Yapılan analizde disk hızının artması ile birlikte kütle akış hızının arttığı görülmüştür. Çizelge 3.6'da artan disk dönme hızına bağlı olarak oluşan kütle akış hızı tablosu paylaşılmıştır. Hızın iki katına artışı ile birlikte kütle akış hızı da doğrusal olarak %47 oranında arttığı tespit edilmiştir.

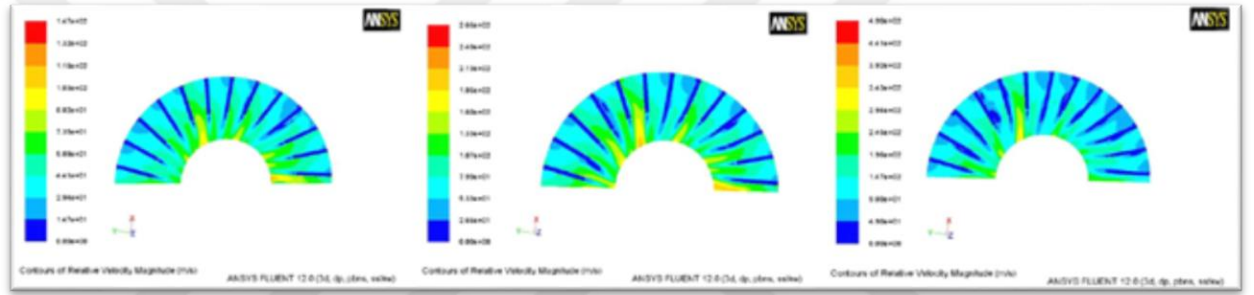
Ancak Şekil 3.8'den görüleceği gibi hızın 88 rad/sn'den 120 rad/sn'e artışında kütle akış hızı aynı oranda artmamıştır; artışın doğrusal olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 3. 6 Disk hızı ve kütle akış hızı çizelgesi [13]

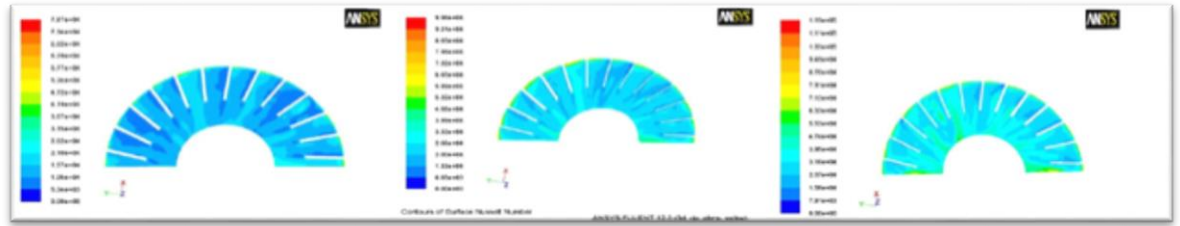
Disk Dönme Hızı	Çıkış Hızı	Kütle Akış Hızı
rad/s	m/s	kg/s
44	148,00	0,163
88	269,00	0,313
120	494,00	0,456



Şekil 3. 9 Disk hızı ve ısı transferi [13]



Şekil 3. 10 Hava hız vektörleri dağılımı sırasıyla 44, 88 , 120 rpm disk dönme hızında [13]



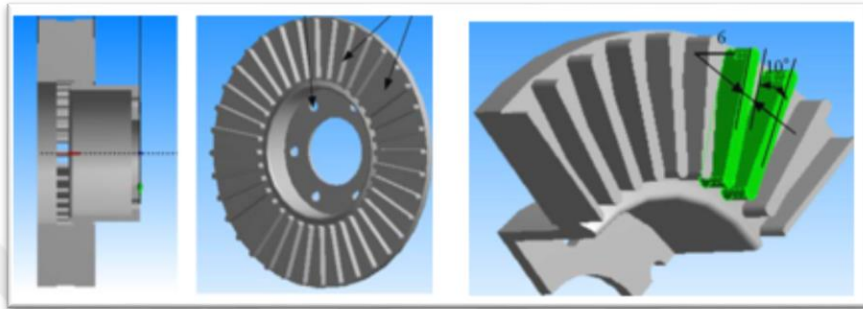
Şekil 3. 11 Nusselt Sayısı dağılımı sırasıyla 44,88,120 rpm disk dönme hızında [13]

Çalışmada disk hızı arttıkça ısı transfer oranının arttığı net bir şekilde görülmüştür. Bunun temel sebebi kütle akış hızının artmasıdır. Kütle akış hızı tek başına yeterli değildir, ilave olarak Nusselt sayısı dağılımı her hız değeri için analiz edilmiştir.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de farklı hızlardaki diskin orta kesitinde elde edilen hız vektörleri dağılımı ve Nusselt Sayısı dağılımı paylaşılmıştır. Hız arttıkça arka kenardaki difüzyonun

azaldığı ve böylece ısı transfer hızının iyileştiği gözlemlenmiştir; fakat artan hız ile birlikte girişteki ayrılmalar artmakta ve emme tarafındaki ısı transfer hızını etkilemektedir.

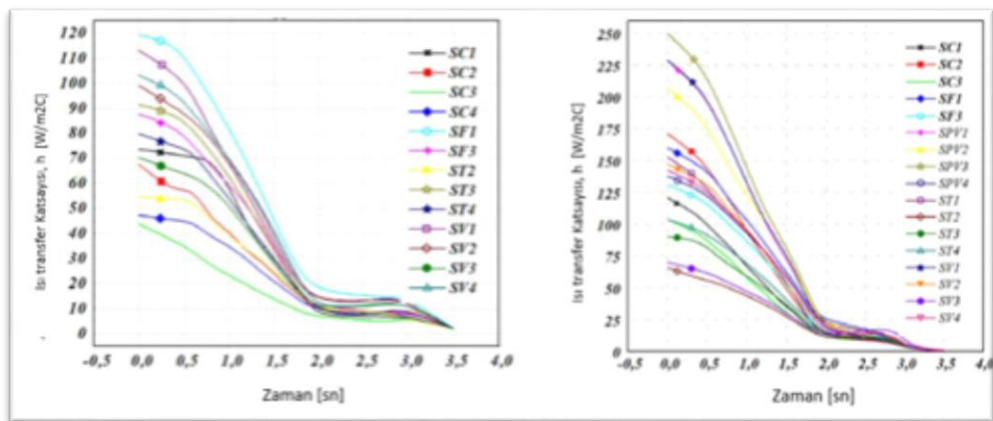
Belhocine ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada frenleme sırasında kinetik enerjinin termal enerjiye dönüşümü ile ortaya çıkan ısı enerjisinin disk üzerindeki sıcaklık dağılımı ANSYS programı kullanılarak incelenmiştir [2]. Disk tasarımının ısı transferi etkisini incelemek amacıyla düz (havalandırma kanatları olmayan) ve üzerindeki havalandırma kanatları olan 2 farklı tasarım değerlendirilmiştir.



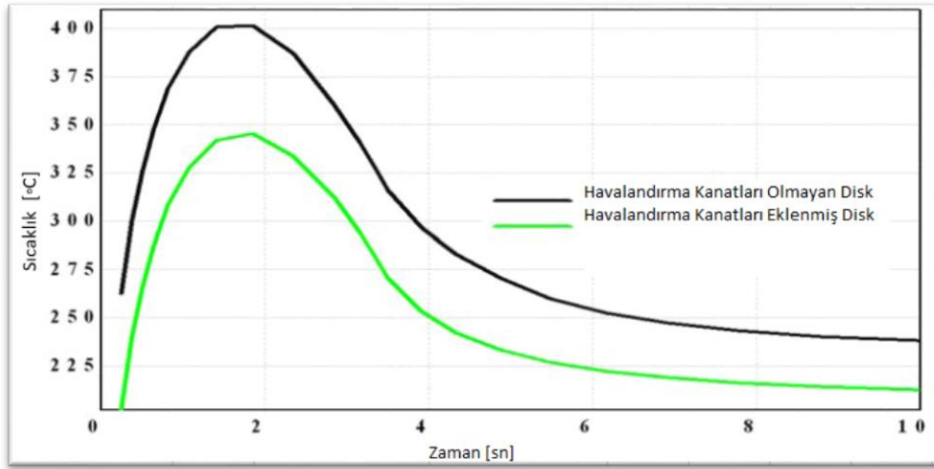
Şekil 3. 12 Disk kesiti ve kanatçık profili görseli [2]

Ayrıca iki farklı disk tasarımı için ısı akışı dağılımı detaylı ve transient yani zamana bağlı olarak incelenmiştir.

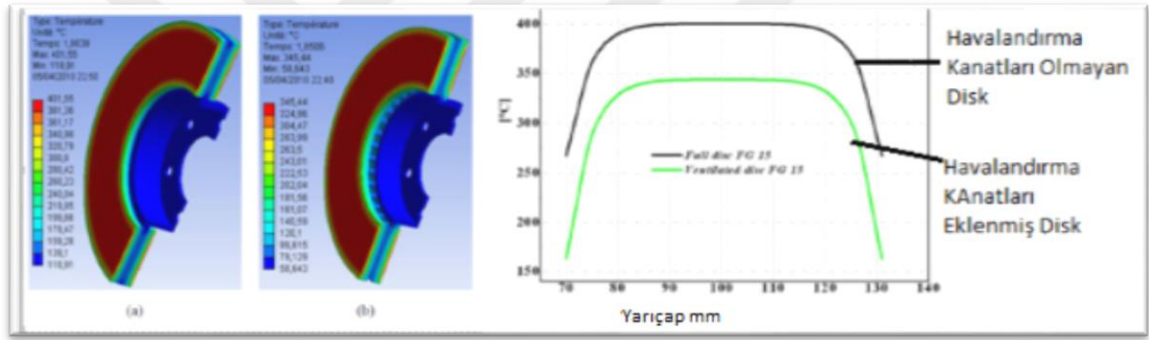
Yapılan çalışmada düz tasarıma kıyasla üzerinde havalandırma kanatları olan tasarımın ısı transferinin kanatların etkisi ile daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Aşağıdaki çizelgede her iki disk tasarımı için sıcaklık değeri verilmiş, düz disk tasarımının sıcaklık değeri üzerinde havalandırma kanatları olan tasarıma göre farkedilir seviyede yüksektir.



Şekil 3. 13 Disk ısı transfer katsayısı a) düz (üzerinde havalandırma kanatları olmayan)
b) havalandırma kanatlı disk [2]

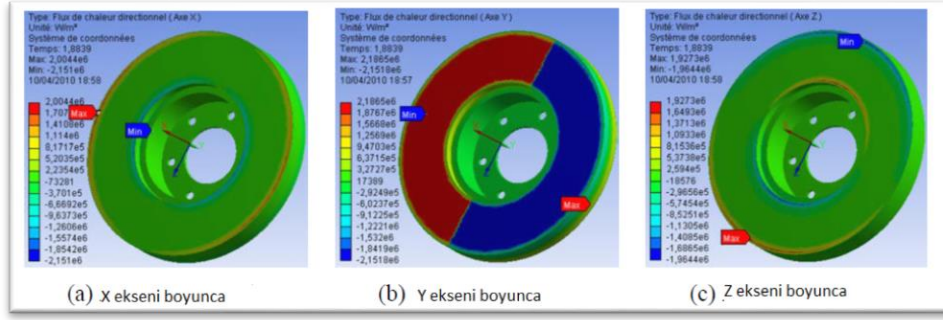


Şekil 3. 14 Disk tipi ve zamana bağlı sıcaklık dağılımı [2]

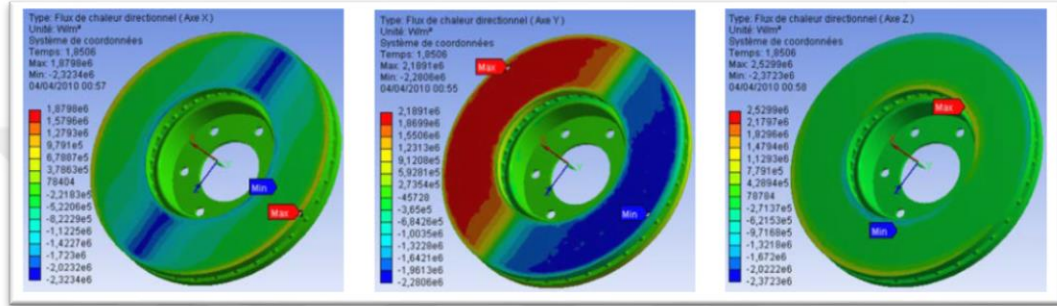


Şekil 3. 15 Düz (üzerinde havalandırma kanatları olmayan) ve havalandırma kanatlı disk tasarımı için sıcaklık dağılımı [2]

Yapılan analizde disk tasarımında eklenen radyal havalandırma kanatlarının taşınım ile soğutulmasında kritik rol oynadığı görülmüştür. Düz disk ısı akısı, havalandırma kanatlı tasarımdaki ısı akısı dağılımına kıyasla 'radyal' ekseninde homojen olarak dağılmamaktadır.



Şekil 3. 16 Düz (havalandırma kanatları olmayan) disk ısı akısı dağılımı a) X b) Y c) Z eksenı boyunca [2]



Şekil 3. 17 Havalandırma kanatlı disk ısı akısının dağılımı a) X b) Y c) Z eksenı boyunca [2]

Çalışmanın ilerleyen aşamasında disk tasarımının termomekanik kısıtlarının incelenmesi deney yapıp numerik model ile doğrulanması planlanmıştır [2] .

DİSK ISI TRANSFERİ TEORİK İNCELENMESİ

Fren sistemleri aracın durma ya da hızının azaltılması sırasında kinetik enerjisini sürtünme yüzeylerinde ısı enerjisine dönüştürmektedir. Sürtünme sonucunda enerji ısı olarak ortaya çıkmaktadır.

Son durumda fren sistemindeki sıcaklık değeri; ped ve disk arasındaki sürtünme hızı ve disk ile ped arasındaki sürtünme katsayısının bir sonucudur. Fren sistemi komponentleri ped, balata, disk ve kampanalar olmak üzere tüm sistemin güvenli olarak fonksiyonunu yerine getirmesine uygun olarak tasarlanmalıdır. Güvenlik açısından önemli bir sistem olduğu için tasarımın çalışma sıcaklığı belirli bir seviyenin altında tutacak şekilde üretilmelidir. Öngörülen çalışma koşulları altında sistemin güvenli olarak çalışacağından emin olmak için ses mühendisliği analizleri, komponent dayanım ve araç testleri yapılmalıdır [1].

4.1 Frenleme Sırasında Ortaya Çıkan Enerjinin Hesaplanması

Yavaşlayan bir aracın yüksek hızdan V_1 , düşük hıza V_2 ulaşması sırasında E_b frenleme enerjisi açığa çıkmaktadır ve aşağıdaki gibi eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır.

$$E_b = \left(\frac{m}{2}\right) (V_1^2 - V_2^2) + \left(\frac{I}{2}\right) (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (4.1)$$

Fren hareketi sonrasında araç tamamen duruyorsa $V_2 = \omega_2 = 0$

$$E_b = (mV_1^2/2) + (I\omega_1^2/2) \quad (4.2)$$

Tüm dönen parçalar tekerlek devir sayısına göre eşitlikte yerine yazılarak eşitlik 4.3 elde edilir.

$$E_b = \left(\frac{m}{2}\right) \left(1 + \frac{I}{R^2 m}\right) (V_1^2) \sim \frac{kmV_1^2}{2} \quad (4.3)$$

k = dönen parçalar için tanımlanan düzeltme katsayısı [$k \sim 1 + I/(R^2 m)$]

Binek araçlar için k değeri 1.05 ve 1.15 arasında değişmektedir. Ağır ticari araçlar için 1.03 ile 1.6 arasında değişmektedir.

Fren sırasında ortaya çıkan güç, ortaya çıkan enerjinin zamana bölümü ile elde edilmektedir.

$$P_b = \frac{d(E_b)}{dt} \quad (4.4)$$

Frenleme sırasında yavaşlama ivmesi sabit ise $V(t)$:

$$V(t) = V_1 - at \quad (4.5)$$

$$P_b = kma (V_1 - at), \quad \frac{Nm}{s} \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6'ya göre fren gücü frenleme sırasında sabit değildir. Fren başlangıcında ($t=0$) güç maksimum değerdedir, sonrasında araç durana kadar azalmakta ve sıfır olmaktadır.

T_s süresinde duran bir araç için ;

$$T_s = \frac{V_1}{a} \quad (4.7)$$

T_s süresinde ortaya çıkan ortalama fren gücü aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{b \text{ ortalama}} = k m_a \frac{V_1}{2} \quad (4.8)$$

4.2 Taşınım Isı Transferi ile Fren Soğutma

Hareket halindeki bir aracın durması sırasında elde edilen fren sistemi sıcaklığının hesaplanması için farklı hızlardaki taşınım ısı transferi katsayısı gereklidir. Çoğu durumda bazı ortalama hızlarda ısı transfer katsayısı kabul edilerek problemlere mühendislik yaklaşımları yapılmaktadır. Taşınıma ilave olarak fren sistemi iletim ve radyasyon ile de ısı transferine maruz kalmaktadır.

Taşınım ısı transferi katsayısının hesaplanması fren sisteminden uzaklaştırılan ısı transeri oranı ile ilgili yaklaşık sonuçlar verecektir. Genel olarak tahmin edilen ve test ile ölçölen değeri arasında %10-30 fark kabul edilebilir seviyededir.

Soğutma analizi deneysel sonuçları boyutsuz sayılar ile hesaplanarak elde edilmektedir.

$$Nu = h Re^{m_d} Pr^n \quad (4.9)$$

$$Pr = 3600 C_a m_a / k_a \quad (4.10)$$

$$Re = V \rho L / \mu_a \quad (4.11)$$

Özerinde havaladıırma kanatları bulunan diskler için ‘h’ ısı transferi değeri kanatçıkların şekline bağlı olarak değışkenlik göstermektedir. m_d ısı transferi düzeltme katsayısı akış tipine göre türbölant, laminar ya da geçiş tipi olmasına bağlıdır. Çoğu pratik çalışma için m_d araç hızı ve diskin açısıal hızına bağlı olarak değışmektedir. n ısı transferi parametresi çevre havanın basınç, sıcaklık gibi termodinamik özellikleri ile değışmektedir. Çünkü bu özellikler sıcaklığın bir fonksiyonudur. Prandlt sayısı etkisi genellikle sabittir ve denklemdede sabit dahil edilir.

4.2.1 Düz Disk İçin Isı Transferi Teorik Hesaplanması

Düz, yani özerinde havalandıırma kanalları bulunmayan disk için ısı transfer katsayısı laminar akış ile ilişkisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$h = 0.70 \left(\frac{k_a}{D} \right) Re^{0.55} \quad (4.10)$$

Reynolds sayısı $> 2,4 \times 10^5$, akış karakteristiği türbölant olarak değışmektedir ve ısı transfer katsayısı hesabı aşağıdaki gibidir:

$$h = 0,40 \left(\frac{k_a}{D} \right) Re^{0.8} \quad (4.11)$$

4.2.2 Havalandıırma Kanallı Disk İçin Isı Transferi Teorik Hesaplanması

Havalandıırma kanatlı disk frenler genellikle özerinde havalandıırma kanatları bulunmayan disk tasarımlarına kıyasla yaklaşık iki katı oranda ısı transfer katsayısına sahiptir. İç kanatçıklarla ilişkilendirilen soğutma etkinliği yüksek hızlarda havanın durgun basıncının artmasıyla bir miktar azalma eğilimindedir. şekil 4.1’den göröleceği gibi pas

ya da çamur gibi kullanım sırasında ortaya çıkan faktörler ısı transferi karakteristiğini olumsuz etkileyerek azaltmaktadır.



Şekil 4. 1 Pas sebebiyle soğutma hava akışının azaldığı disk kanatları

Fren diski kanatçıklarındaki ısı transfer katsayısı yaklaşık olarak aşağıdaki denklemlere hesaplanabilir:

$$h = 0.023 \left[1 + \left(\frac{dh}{l} \right)^{0.67} \right] Re^{0.8} Pr^{0.33} (k_a/d_h) \quad (4.12)$$

d_h =hidrolik çap, m

L = kanatçık profil uzunluğu, m

$Re = (\rho_a d_h / m_a) V_{ortalama}$

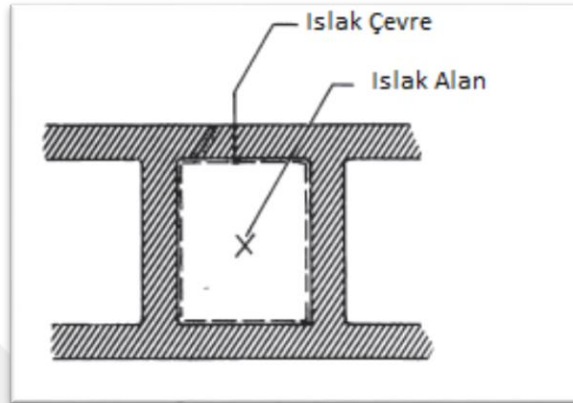
$V_{ortalama}$ =ortalama hız , m/s

$Re > 10^4$ ise akış tipi türbülanslı akıştır. Hidrolik çap akış kesit alanının dört katının kesit çevresine bölümü olarak tanımlanmaktadır. Değişken kesit alanına sahip kanatçık yapısı için kanatçık giriş ve çıkış ölçülerinden ortalama bir hidrolik çap kabulü ile işlem yapılmaktadır.

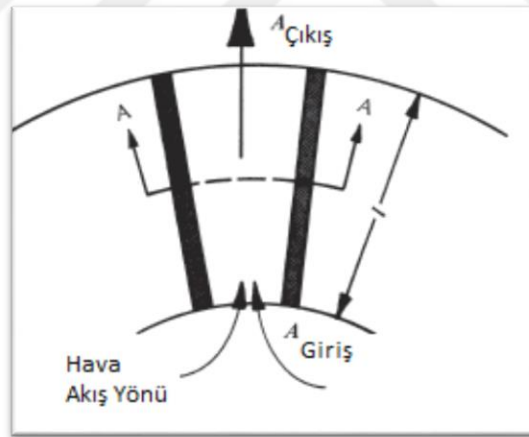
Hız Reynolds sayısı ile ilgilidir ve kanatlardaki havanın akış hızı akış karakteristiğini doğrudan etkilemektedir.

Düşük hızlarda kanatçıklardaki akış tipi laminardır. $Re < 10^4$, taşınım ısı transferi yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [1].

$$h = 1.86 (RePr)^{1/3} (d_h / l)^{0.33} (k_a / d_h) \quad (4.13)$$



Şekil 4. 2 Kesit A-A



Şekil 4. 3 Havalandırılmalı fren disk kesiti

Disk kesitindeki her bir kanatçık arasındaki kanalda ortaya çıkan ortalama hava hızı, kanatlara giren ve çıkan hava hızının ortalaması alınarak hesaplanmaktadır:

$$V_{ortalama} = \frac{V_{in} + V_{out}}{2} \text{ m/s} \quad (4.14)$$

$$A_{in} = \text{Hava giriş alanı, } m^2$$

A_{out} =Hava çıkış alanı, m^2

d = iç çap, m

D = dış çap, m

n_T = devir sayısı, dev/dk

$$V_{in}=0,0158n_T (D^2 - d^2)^{1/2} , \text{ m/s} \quad (4.15)$$

$$V_{out}= V_{in} (A_{in} / A_{out}), \text{ m/s} \quad (4.16)$$

Kütle Akış hızı m_a aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$m_a = 0,00147 n_T [(D^2 - d^2) A_{in}]^{1/2} \quad (4.17)$$

Bu bölümde paylaşılan ısı transferi denklemleri kullanılarak, Bölüm 5'teki teorik taşınım ısı transferi katsayısı hesaplanmış ve disk kanatçık tasarımına göre karşılaştırma yapılmıştır.

FREN DİSK ISI TRANSFERİ İNCELENMESİ

Otomotiv üreticileri kullanıcıların kapasite artışı, araç hafifletme gibi taleplerini karşılayabilmek ve güvenli bir taşımacılık sağlayabilmek amacıyla detaylı çalışmalar yapmaktadır. Fren sistemi ve komponentleri araçlardaki aktif güvenlik sistemleri arasında başta gelmektedir. Fren soğuması fren diskinin dayanım ve performansı için incelenmesi gereken önemli bir husustur.

Fren sistemi tasarlanırken soğuma ve dayanım performansı ile birlikte maliyet, üretilebilirlik, montaj ve ağırlık kriterlerini gözönünde bulundurulmalıdır.

Hareket halindeki bir araçta frenleme anında ortaya çıkan yüksek ısının ortamdaki uzaklaştırılması iletim ve radyasyon ile olan ısı transferine kıyasla yüksek oranda taşınım ile gerçekleşmektedir. Taşınım ile ısı transferi oranı arttıkça diskin sıcaklığının normal çalışma şartlarına gelmesi aynı oranda hızlı olacaktır.

Fren diskinde gerçekleşen ısı transferi oranı teorik hesaplama yöntemi ile hesaplanırken gelişen programlama yöntemleri ile bilgisayar destekli analiz yöntemleri otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Frenleme anında aracın kinetik enerjisi sürtünme vasıtasıyla ısı enerjisine dönüşmektedir.

Tez kapsamında ağır ticari bir araç için frenleme sırasında oluşan ısının uzaklaştırılmasında fren disk kanat tasarımı ve araç hızının etkisi matematiksel hesap ve bilgisayar destekli analiz yöntemi ile incelenmiştir.

5.1 Disk Isı Transferi Matematiksel Hesap ile İncelenmesi

İlk olarak Bölüm 4’de detayları anlatılan denklemler kullanılarak disk yüzeyi taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Disk iç ve dış çap, kanatçıkların geometrisi ve havanın aktığı kanal geometrisi gibi kriterlerin taşınım ısı transferine etkisi matematiksel hesaplama yöntemi ile incelenmiş, literatür araştırmasında elde edilen bilgilerle desteklenmiştir.

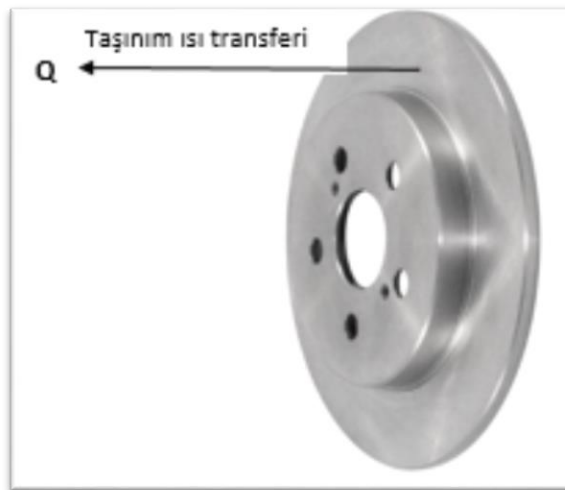
5.1.1 Düz Disk Isı Transferi Katsayısı Matematiksel Hesap ile İncelenmesi

Taşınım katsayısı ısı transferi miktarını doğrudan etkileyen bir parametredir. Disk geometrisine ve kanallardaki akışın (laminar akış, türbülanslı akış gibi) tasarımına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Düz (üzerinde havalandırma kanatları olmayan) disk kesitinde ilave kanat içeren bir yapı olmadığı için ısı transferi havanın temas ettiği disk yüzeyinden gerçekleşmektedir.

Taşınım katsayısını etkileyen bir parametre havanın hızına bağlı olarak boyutsuz Reynolds Sayısıdır, $Re = \rho VL/\mu$ olarak tanımlanmaktadır. Havalandırma kanallı bir yapı olmadığı için hava disk yüzeyinden akmaktadır ve düz yüzeyler için de kullanılan hesaplama yöntemi ile ‘Reynolds Sayısı’ hesaplanmıştır.

Hesaplanan Reynolds sayısı $2,4 \times 10^5$ ’den küçük olduğu için 4.10 numaralı eşitlik kullanarak ‘h’ taşınım ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır.



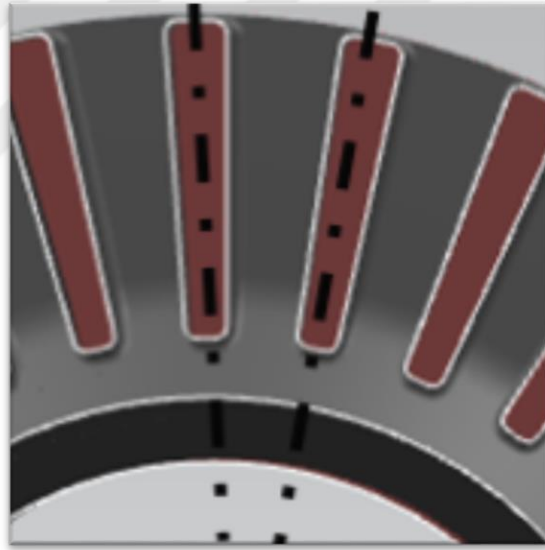
Şekil 5. 1 Düz (havalandırma kanatları bulunmayan) disk görseli

5.1.2 Havalandırma Kanatlı Disk Isı Transferi Katsayısı Matematiksel Hesap ile İncelenmesi

Artan yükler ve yüksek sıcaklık altında çalışma koşulları gözönüne alındığında, ısının fren sisteminden uzaklaştırılması büyük önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda disk orta kesitine havalandırma kanalları eklenerek geliştirilen tasarımlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Matematiksel hesap formülleri incelendiğinde taşınım ısı transferi disk geometrisinde aşağıdaki parametrelere bağlı olduğu bilgisine ulaşılmıştır.

1. Kanatçık sayısı ve geometrisi
2. Disk kesit yüksekliği
3. Disk dış ve iç çap ölçüsü



Şekil 5. 2 Düz kanatçıklı disk kesit görseli

Taşınım katsayısının hesaplanması için ilk olarak kanal girişi hava hızı aşağıdaki 4. Bölüm’de paylaşılan eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Havanın disk kesitindeki ortalama hızı giriş ve çıkış ucundaki hızın ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Reynold Sayısı $Re > 10^4$ ’den düşük olduğu için akış laminar olarak tanımlanmaktadır. 4.13 numaralı eşitlik kullanılarak taşınım katsayısı 2 farklı araç hızı için hesaplanmıştır.

Bölüm 4’te detaylı olarak paylaşılan eşitlikler kullanılarak düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk için sırasıyla araç hızı 30 km/h ve 70 km/h taşınım katsayıları teorik olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan taşınım katsayısı değerleri Şekil 5.3’de paylaşılmaktadır.

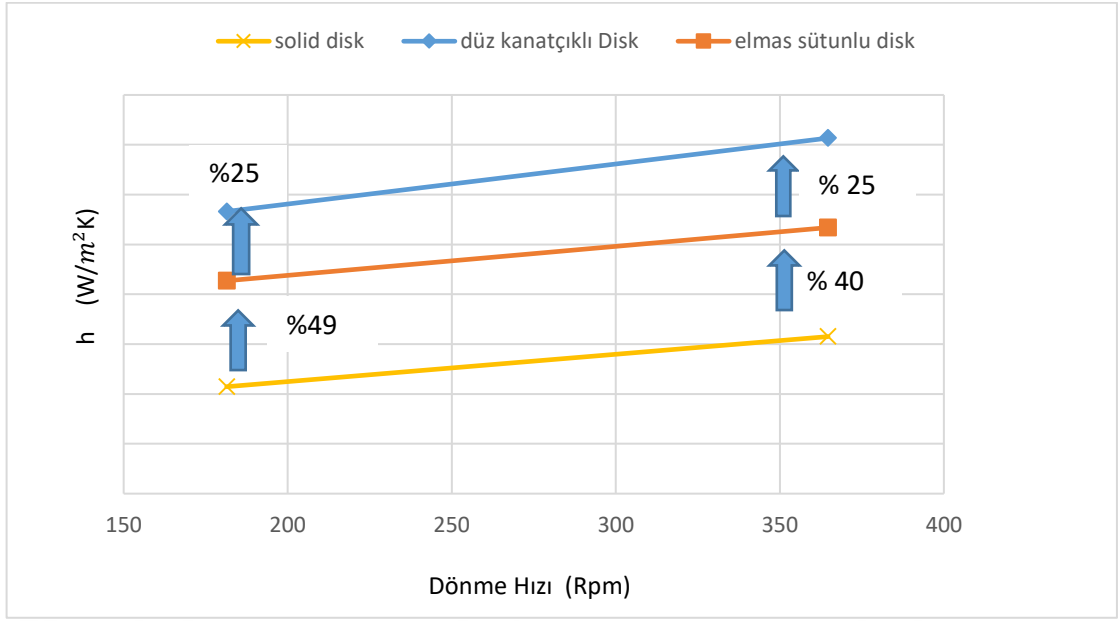
Teorik hesap ile yapılan yaklaşımda; düz (üzerinde havalandırma kanalları bulunmayan) ve havalandırma kanatları eklenmiş diskler aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Artan disk dönme hızı ile birlikte ' V_{in} ' havanın giriş hızı artmaktadır. Artan hava giriş hızı akış karakteristiğini iyileştirmekte ve Reynolds sayısı artırarak ısı transferini iyileştirmektedir.
- Disk yüzeyine eklenen ve yüzey alanını arttıran kanatçıklar ile düz kanatçıklı disk taşınım katsayısı üzerinde havalandırma kanatları olmayan disk’e kıyasla dönme hızına bağlı olarak sırasıyla 30 km/h ve 70 km/h için % 62 ve % 56 oranında artırılmıştır.
- Elmas sütunlu disk taşınım katsayısı üzerinde havalandırma kanatları olmayan disk’e kıyasla % 49,7 oranında da yüksektir.
- Elmas sütunlu disk tasarımında elde edilen taşınım katsayısı düz kanatçıklı disk’e göre ortalama % 25 daha düşük olduğu saptanmıştır.
- Düz kanatçıklı disk tasarımının ısı transferi katsayısının diğer 2 disk tasarımına kıyasla yüksek olduğu tespit edilmiştir.

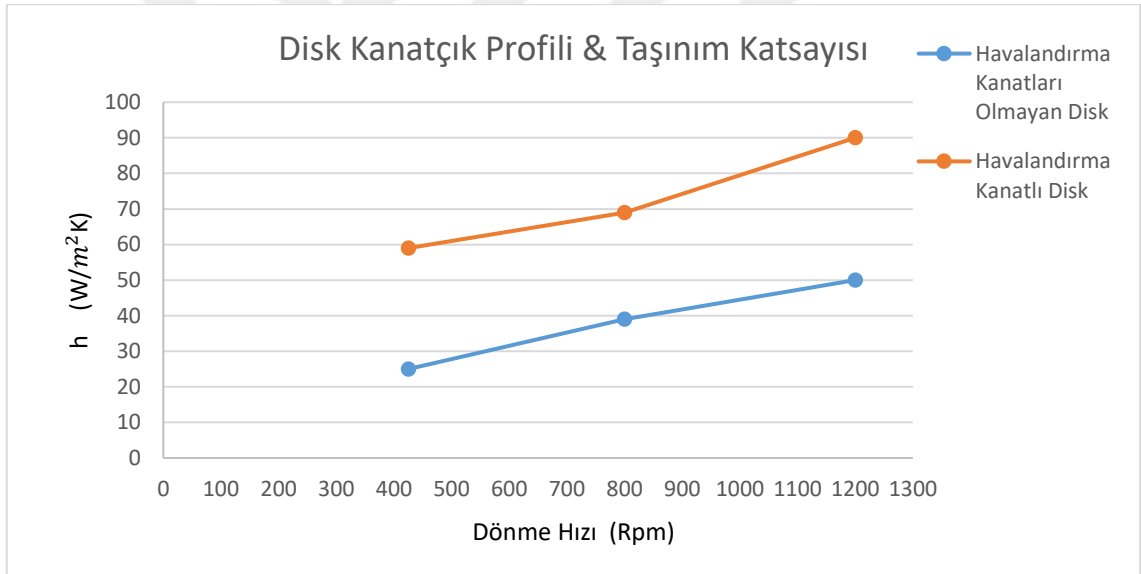
Literatür araştırmasında; Sarip ve diğerleri [24] tarafından yapılan çalışmada araç hızı ve disk geometrisi incelenmiştir. Artan araç hızı ile birlikte ısı transferinin arttığı ve havalandırma kanatlı diskin ısı transferi artış oranı Şekil 5-4’de paylaşılmıştır.

Yapılan matematiksel hesap sonucunda elde edilen ısı transfer katsayısı Şekil 5-3’de paylaşılmıştır. ısı transfer oranında literatür ile benzer oranda iyileştirme elde edilmiştir.

Otomotiv sektöründe uzun yıllardır ağırlık avantajı ve taşınım ile oluşan ısı atılımını arttırdığı için düz disk tasarımına kıyasla havalandırma kanallı disk tasarımları kullanılmaktadır.



Şekil 5. 3 Disk taşınım katsayısı ve dönme hızı matematiksel hesaplama sonucu

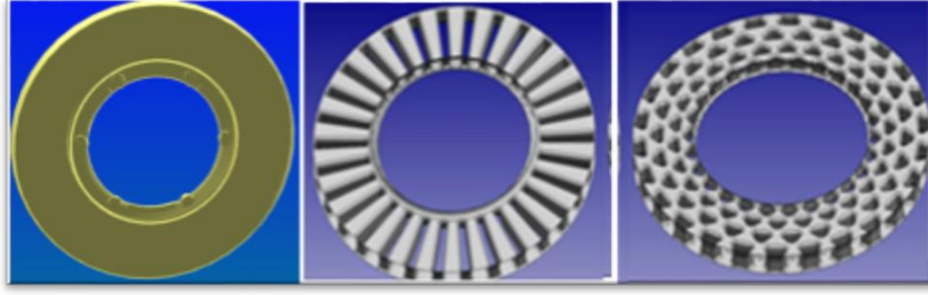


Şekil 5. 4 Sarip. ve diğerleri tarafından yapılan çalışma sonucu [14]

5.2 Disk Isı Transferi HAD Analizi ile İncelenmesi

Bu bölümde üzerinde havalandırma kanatları olmayan düz disk ve düz kanatçıklı, elmas sütunlu disk olmak üzere havalandırma kanatlı üç farklı disk tasarımı için ısı transferi hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle incelenmiştir.

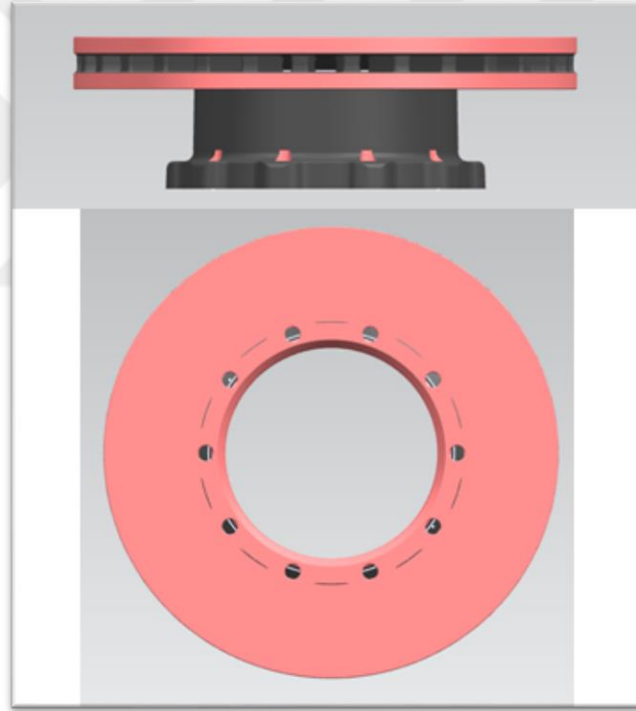
Ayrıca disk dönme hızının taşınım ısı transferine etkisini incelemek amacıyla çalışma 30 km/h ve 70 km/h gibi 2 farklı araç hızı için yapılmıştır.



Şekil 5. 5 a) Düz disk b) Düz kanatçıklı disk c) Elmas sütunlu disk

HAD Analizi ve Disk Modeli

Çalışma kapsamında düz , düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk tasarımlarının ısı transferi ve kanatçıklar arasındaki hava akışı ANSYS Fluent 18.0 programı kullanılarak ile incelenmiştir.



Şekil 5. 6 Disk Detayı Görseli

Sınır Şartlar:

HAD analizleri 30 km/h ve 70 km/h araç hızlarına karşılık gelen '182 rpm' ve '365 rpm' disk dönme hızlarında yapılmıştır. Analiz koşulu, zamandan bağımsız kararlı dengeli durum için tanımlanmıştır.

Başlangıçta panik fren yapmış bir aracın disk sıcaklığı gözönünde bulundurularak tüm kanatçık ve disk yüzeyi sabit sıcaklığı 300 °C olarak tanımlanmıştır.

Taşınım ile ısı transferi disk yüzeyinden akan hava ile sağlanmaktadır, havanın termodinamik özellikleri atmosfer basıncı 101325 Pa ve 27 °C olarak alınmıştır. Taşınım ısı transferi katsayısını hesaplanması için; k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Disk malzemesi olarak yüksek dayanım, sürtünme direnci ve maliyet avantajı doğrultusunda gri dökme demir kullanılmaktadır. Genel olarak otomotiv sektöründe benzer şekilde dökme demir kullanılmaktadır. Ansys Fluent programına disk malzemesi dökme demir olarak tanımlanmıştır. Çizelgede tanımlanan dökme demir malzeme yoğunluk ve özgül ısı değerleri paylaşılmıştır.

Çizelge 5. 1 Disk malzeme ve hava termodinamik özellikleri

Disk Dökme Demir Özellikleri	Hava Özellikleri
Isıl iletkenlik, $k=27-46 \text{ W/m-K}$	Isı transfer katsayısı, $h=5-25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (doğal taşınım)
Yoğunluk, $\rho = 6800 - 7800 \text{ kg/m}^3$	$25-200 \text{ W/m}^2\text{K}$ (zorlanmış taşınım)
Özgül ısı, $c=460 \text{ J/kg-K}$	

Araç ve fren diski özellikleri aşağıdaki Çizelgedeki gibi alınmıştır:

Çizelge 5. 2 Araç yük kapasitesi ve disk geometri ölçüleri

Araç Özellikleri	Fren Diski Özellikleri
Ağır Ticari Araç	Disk kalınlığı : 45 mm
Aks yükü: 11500 kg	Disk tipi : Düz Disk ve Havalandırma Kanallı Disk
	Disk iç Çap: 250 mm
	Dış Çap: 428 mm

	Konum: Ön aks
--	---------------

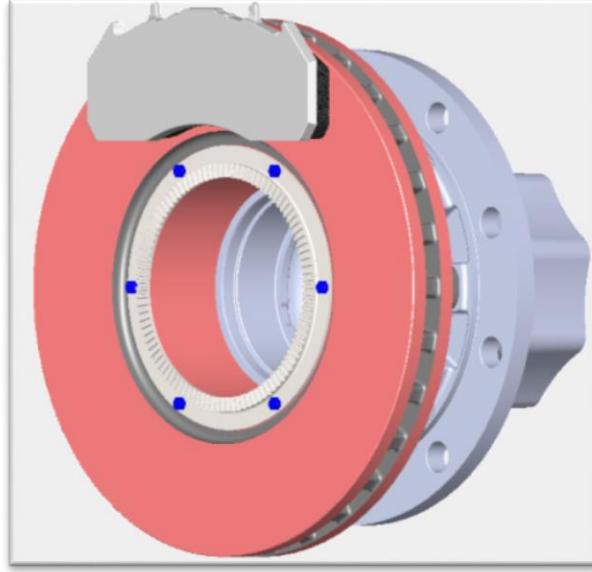
Çizelge 5. 3 Sınır koşullar

Sınır Tanımı	Sınır Koşulları	Parametreler
Giriş	Giriş Basıncı	Atmosfer basıncı, sıcaklığı
Çıkış	Çıkış Basıncı	Atmosfer basıncı, sıcaklığı
Hacim	Simetri	Simetri
Disk yüzeyi	Duvar	573 K sıcaklık, gri dökme demir malzeme termal özellikleri

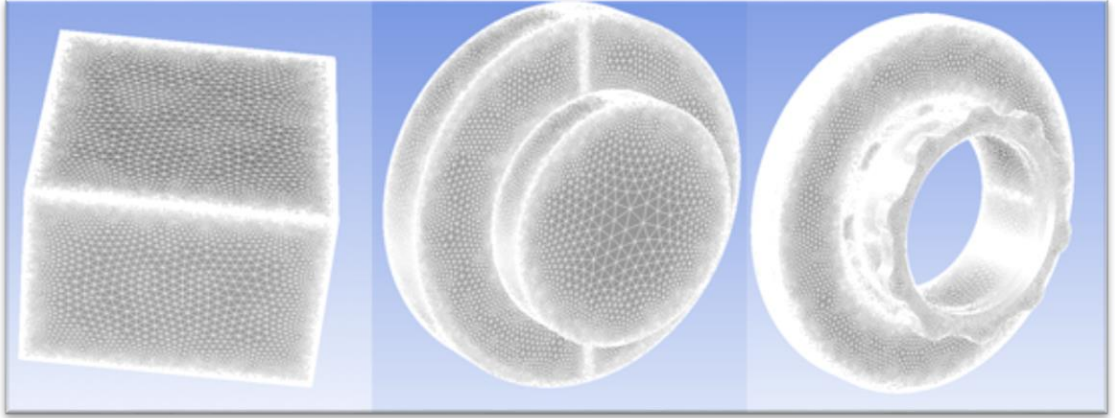
Havalandırma kanatlı disklerin çalışma prensibi santrifuj çark'ın çalışmasına benzetilmektedir, hava radyal yönde disk boşluğundan giriş yapmakta ve dönme sırasında oluşan santrifüj kuvveti ile disk içindeki kanaldan ilerlemektedir. Aynı zamanda disk dönmekte olduğu için kanat profillerinin tasarımı akışı yönlendirmede büyük önem taşımaktadır.

Disk tasarımları oluşturulurken aynı zamanda parçanın hafifletilmesi de gözönüne alınmıştır.

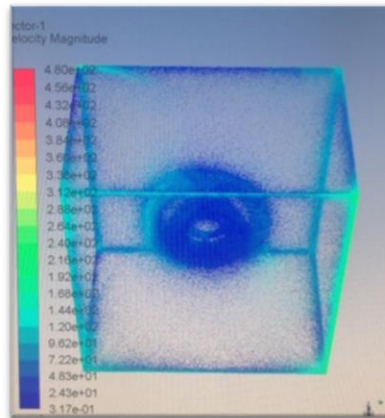
Elmas sütunlu disk tasarımında parça hafifliği sağlanırken ısı transferinde önemli bir parametre olan yüzey alanları her iki disk tipi için kanatçık ve yüzey olarak ayrı ayrı incelenmiştir.



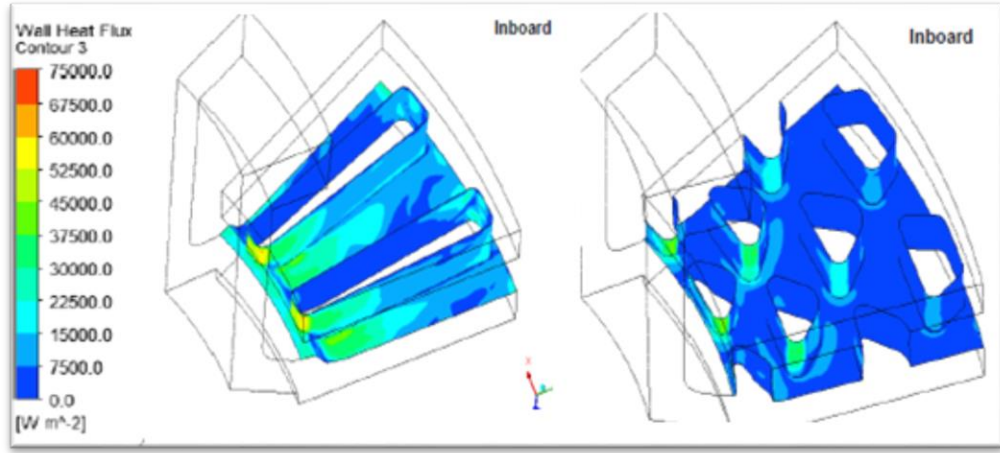
Şekil 5. 7 Disk ve kampana görseli



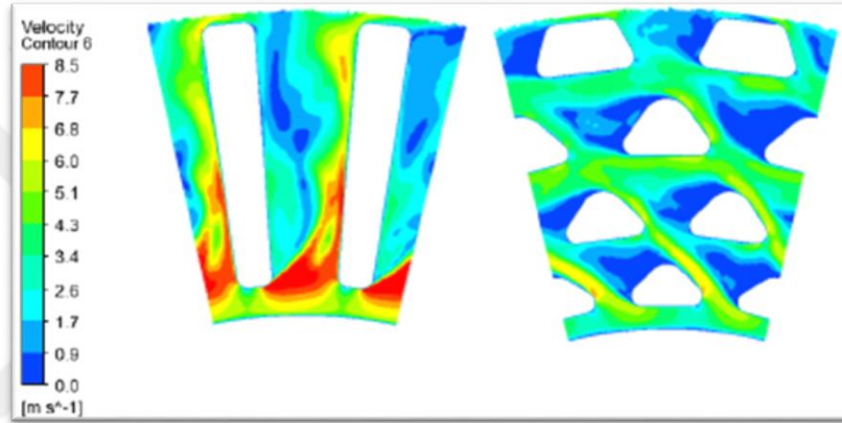
Şekil 5. 8 Hacim , disk sınır şartlarını içeren model, 989662 nodes, 4692130 element



Şekil 5. 9 Disk, Sınır Şartlarını içeren görsel

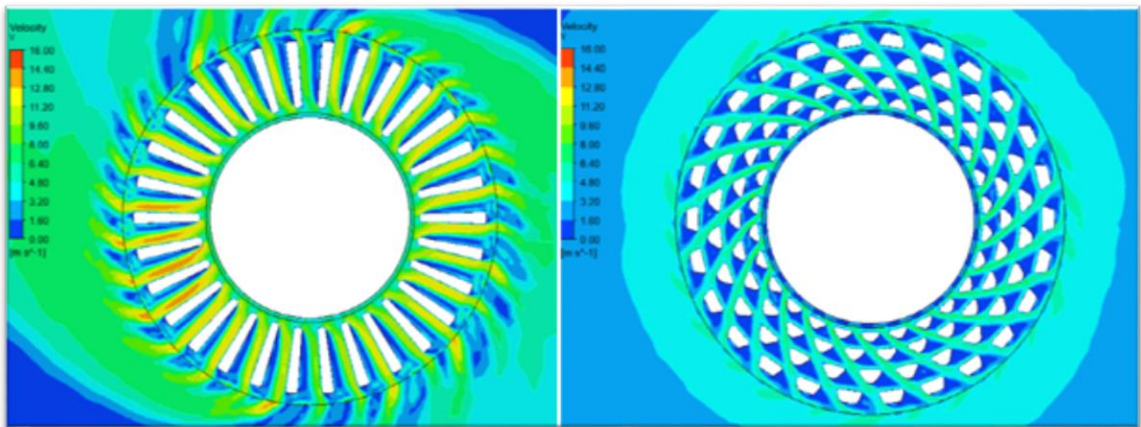


Şekil 5. 10 Isı akısı dağılımı



Şekil 5. 11 Hava hız vektörleri dağılımı

Şekil 5.10 ve 5.11’de disk havalandırma bölgesinden havanın akışı sırasında oluşan hava hızı dağılımı incelenmiştir, elmas sütunlu kanatçık yapısı düz kanat yapısına göre homojen bir dağılıma sahiptir.



Şekil 5. 12 Disk yüzeyinde hız dağılımı a) düz kanatçıklı disk b) elmas sütunlu disk

Parçanın ısı transferi ile birlikte termal gerilme değerleri de Ansys programı ile ayrıca incelenmiştir. Termal gerilme analizinde başlangıç şartı olarak; hız 90 km/h'den 4,3 saniye süresinde durdurulması sonucunda ortaya çıkan ısı akısı disk yüzeyinden uygulanmıştır. Isı akısı pedlerin temas ettiği yüzey alanında diske aktarılmıştır.

Isının ortamdaki uzaklaştırılması ve diskin ısı dayanımı havalandırma kanatlarından geçen hava akış miktarına ve kanaldaki dağılımına bağlıdır.

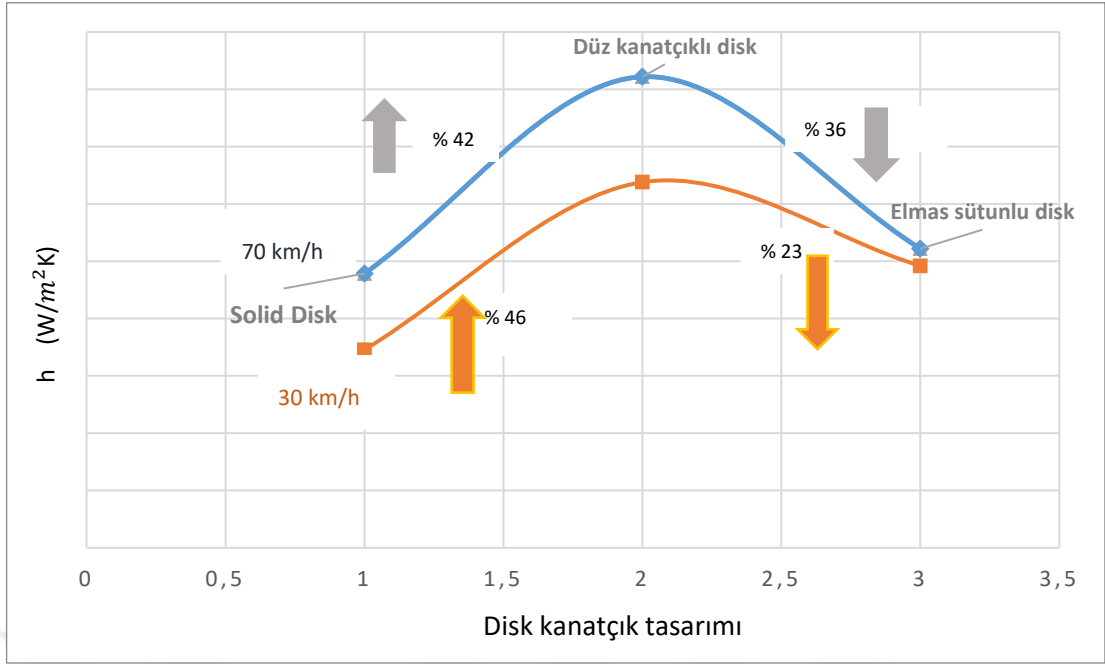
Çalışmanın başında bahsedildiği gibi sadece yüksek sıcaklık termal hasara sebep olmamaktadır aynı zamanda disk yüzeyindeki bölgesel sıcaklık düşüşü de disk dayanımını olumsuz etkilemektedir.

Sonuçlar:

- Üzerinde havalandırma kanatları olmayan disk, düz ve elmas sütunlu disk için taşınım ısı transfer katsayısı 30 km/h ve 70 km/h hızları için ayrı ayrı hesaplanarak Şekil 5.13'te karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır.

30 km/h için ısı transfer katsayısı düz kanatçıklı disk için en yüksek değere ulaştığı elde edilmiştir, üzerinde havalandırma kanatları olmayan diskin düz kanatçıklı disk'e kıyasla taşınım katsayısı % 46 oranında düşüktür. Elmas sütunlu disk ile düz kanatçıklı disk arasındaki fark %23'dür.

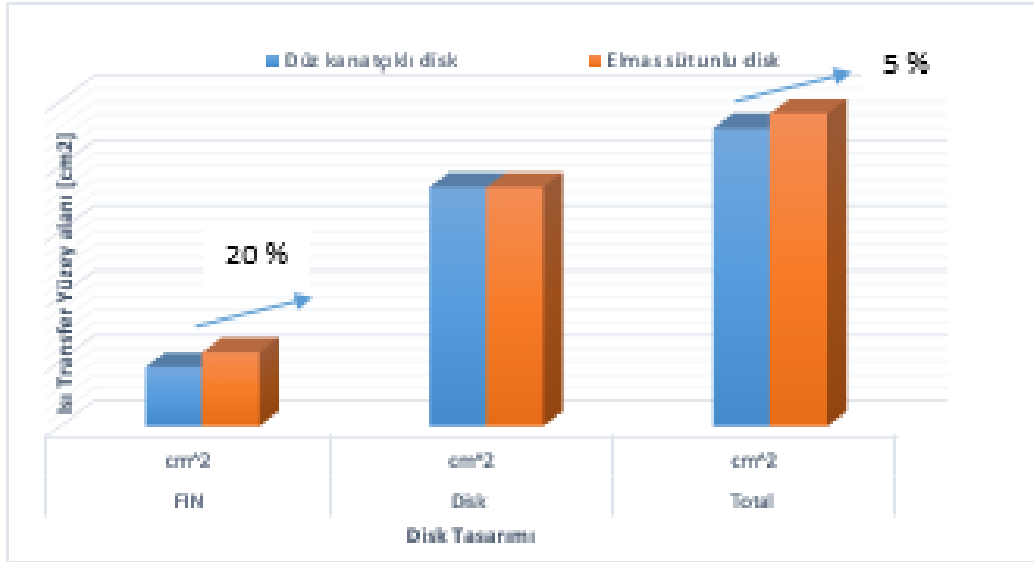
70 km/h araç hızında düz kanatçıklı disk in sırasıyla üzerinde havalandırma kanatları olmayan ve elmas sütunlu disk'e kıyasla ısı transfer katsayıları karşılaştırması; %42 ve %36'dır.



Şekil 5.13 '30 km/h ve 70 km/h' araç hızında disk tipine göre ısı transfer katsayısı karşılaştırması

- Elmas sütunlu disk tasarımında kanatçık yüzey alanı düz kanatçıklı disk kanatçık yüzey alanına kıyasla %20 artırılmıştır.

Toplam yüzey alanı elmas sütunlu disk için %5 oranında yüksektir.



Şekil 5. 14 Düz kanatlı ve elmas sütunlu disk yüzey alanı

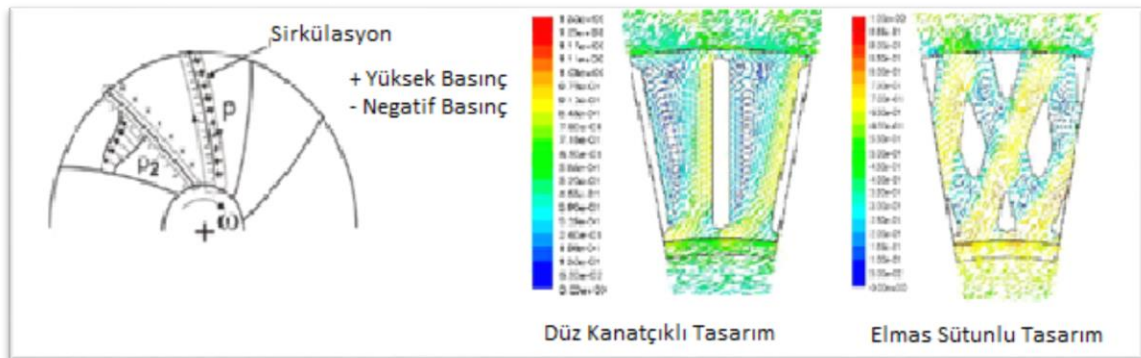
- Yüzey alanı artışı sağlanarak yüksek sıcaklık noktalarındaki ısı transferinin homojen bir şekilde ortamdan uzaklaştırılması hedeflenmiştir. Şekil 5.10'da disk kesitindeki ısı akısı dağılımı paylaşılmıştır.

Düz kanatlı disk için ısı akısı kanatların ucuna doğru azalarak yüzeyde sıcaklık farkına sebep olurken, elmas sütunlu disk için sıcaklık dağılımı homojendir.

•Diskin hareketi sırasında ısı ortamdan zorlanmış taşınım ile uzaklaştırılmaktadır, disk yüzeyindeki kanatçıklardan geçen havanın homojen dağılımı homojen sıcaklık düşüşü ve ısının uzaklaştırılması için önemli rol oynamaktadır. Şekil 5.11’de 70km/h hız için disk yüzeyinde oluşan hava hız vektörleri paylaşılmıştır. Her 2 tasarım için de havanın giriş bölgesinde hız dağılımı yüksektir. Düz kanatçıklı disk tasarımında kanatçıklar arasındaki hız ortadan kenara doğru artmaktadır. Kanatçıklar arasındaki yüksek sıcaklık ve kısmi olarak hızın homojen olmayan dağılımı termal hasarlara yol açabilmektedir.

Elmas sütunlu disk tasarımı için hız vektörü dağılımı düz kanatçıklı tasarıma göre daha homojen yapıdadır. Bu sebeple elmas sütunlu disk tasarımı önerilmektedir. Böylece kanat yüzeyleri iç hava geçişi bölgesinde homojen termal dağılım ve soğuma elde edilecektir.

Kudal ve Chopade tarafından yapılan çalışmada düz radyal kanatçık tasarımı, açılı radyal kanatçık tasarımı ve elmas sütunlu disk tasarımının ısı transfer karakteristiği hava akışı ile birlikte detaylı olarak incelenmiştir [11]. Radyal kanatçık tasarımında havanın kanatçıklar arasındaki dağılımının eşit olmadığı görülmüştür. Ön kenarın çıkışında hava kütle akışının azaltılmasına sebep olan sirkülasyon bölgesi vardır. Homojen olmayan hava basınç dağılımı yüksek termal gerilmelere sebep olmaktadır. Kanatçıklar arasındaki hava geçişi elmas sütunlu disk tasarımında radyal tasarıma kıyasla homojen ve simetrik olduğu elde edilmiştir.

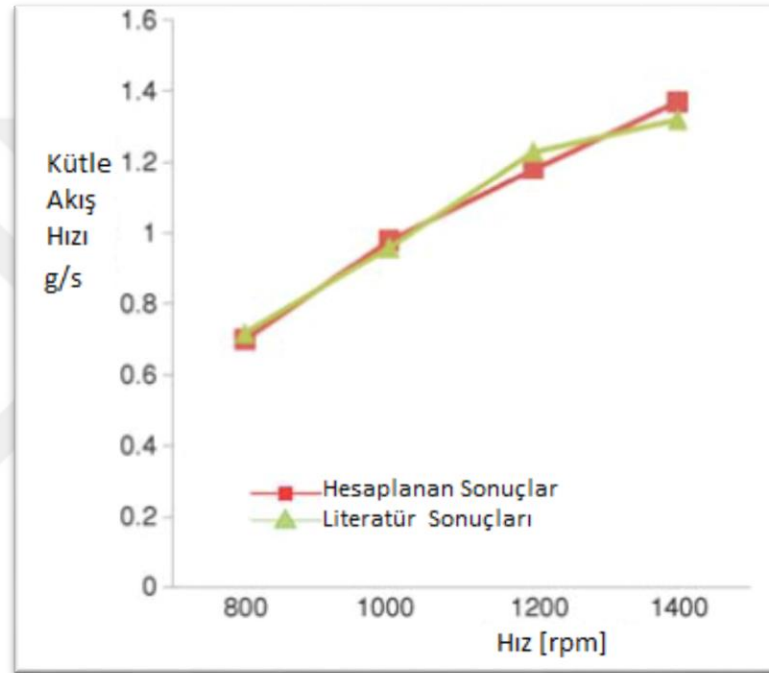


Şekil 5. 15 Kanaldaki havanın akış karakteristiği

- Araç hızının artışı ile birlikte disk yüzeyine temas eden hava ısı transfer oranı da artırmaktadır.

Düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk ısı transfer oranı karşılaştırıldığında sırasıyla; 30 km/h ve 70 km/h araç hızı için; düz kanatçıklı disk'in ısı transfer oranı elmas sütunlu disk tasarımına göre %18 , %32 oranında yüksektir.

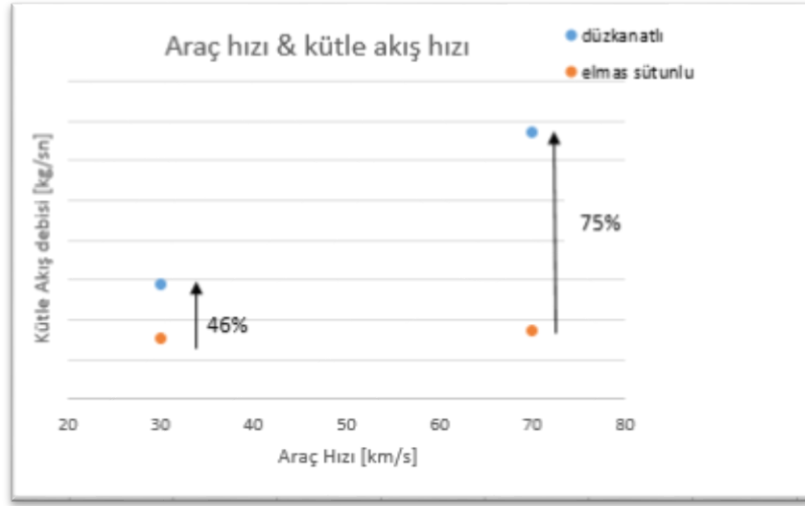
Literatürde Rajagopal ve diğerleri [9] tarafından yapılan çalışmada benzer şekilde artan disk dönme hızı ile birlikte kütle akış hızının arttığı ve artan hava hızının ortamdan daha çok ısı uzaklaştırdığı bilgisi elde edilmiştir.



Şekil 5. 16 Rajagopal ve diğerleri tarafından yapılan araştırma, disk dönme hızı ve hava akış hızı etkisi [9]

Literatürde yapılan araştırmalarda Reddy ve Sri benzer şekilde disk hızının ısı transfer karakteristiğine etkisini incelemiştir. Artan disk hızı ile birlikte Reynolds sayısının artarak ısı transferini arttırdığını elde etmiştir [10].

- Disk kanatçık profili ve kütle akış hızı araç hızı ile orantılı olarak artmaktadır. Düz kanatçıklı disk elmas sütunlu disk'e kıyasla %46 oranında fazla hava girişi sağlamaktadır.



Şekil 5. 17 Kütle akış hızı ve araç hızı

- Düz kanatçıklı disk tasarımının elmas sütunlu disk tasarımına kıyasla yüksek kütle akış hızı ve ısı transfer oranı sağladığı elde edilmiştir.
- Düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk tasarımı soğutma performansı sadece ısı transfer oranına bağlı değildir. Disk yüzeyi ve kanat profillerinde termal yükleme sebebiyle oluşan gerilmeler de diğer önemli parametredir. Yapılan çalışmada disk kanatçık bölgesindeki havanın homojen akışı ve sıcaklığın kanatçık etrafından ucuna kadar olan bölgedeki dağılımı sonucunda düz kanatçıklı disk kanat çevresi gerilme değeri elmas sütunlu tasarıma kıyasla %32 oranında yüksektir.
- Elmas sütunlu disk tasarım ağırlığı düz kanatçık disk tasarımına kıyasla % 2,5 daha hafiftir.

5.3 Araç Seviyesi Disk HAD Analizi

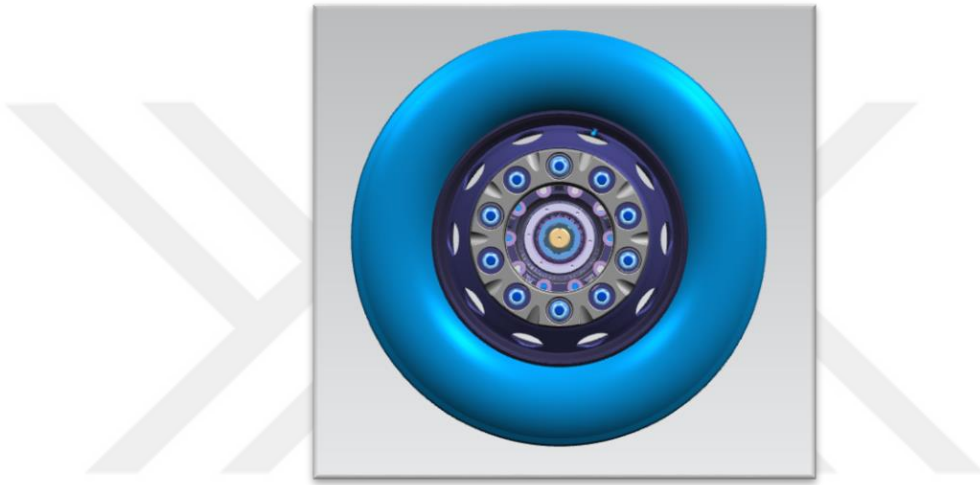
Araç üzerinde disk etrafındaki parçalar ile temas halindedir, disk poyra üzerindeki saplamalara konumlanan ve etrafında lastik, jant gibi diğer parçalarla birarada bulunmaktadır ve hareket sırasında bir araçta dönmekte olan disk diğer komponentlerden kalan alanda hava akışına maruz kalmaktadır böylece ortaya çıkan ısı enerjisi transfer olmaktadır.

Bu bölümde araç üzerindeki tüm parçaların dahil edildiği durumda oluşan ısı transferi oranı ve taşınım katsayısı sınır şartları aynı tutularak Ansys Fluent programı ile incelenmiştir.

Disk ile jant arasındaki ısı transferi oranı araç hareket halindeyken yüksek oranda taşınım ile sağlanmaktadır. Araç hızının 30 km/h olduğu durumda taşınım ile ısı transferi incelenmiştir.

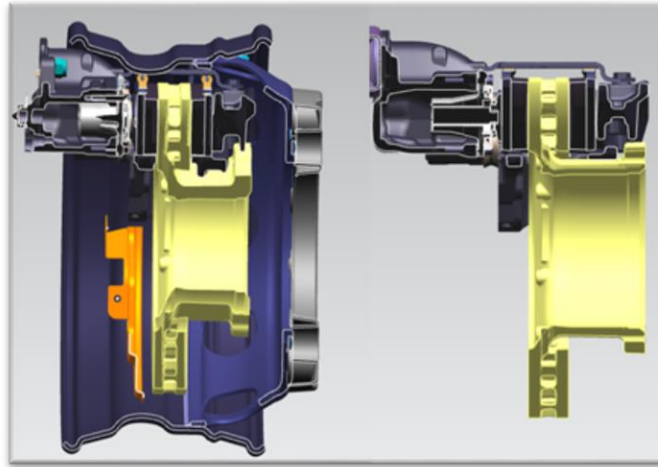
Modellenen parça ve literatür araştırmalarında da incelendiği gibi; diskin hareketi sırasında hava içinde döndüğü kabul edilmiştir. MRF yöntemi ile ayrı bir hacim tanımlanarak uygun açısal hız uygulanmıştır.

Jant konumu itibari ile hava ile temas eden dış yüzeyde olduğu için aldığı ısıyı havaya aktarmaktadır.



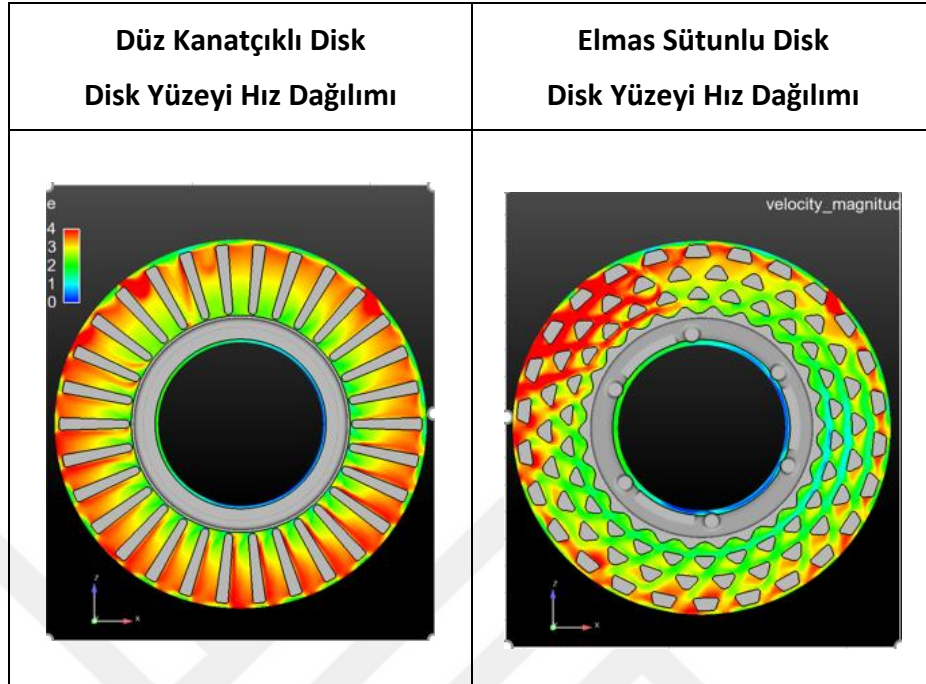
Şekil 5. 18 Araç üzerindeki lastik ve jant sistemi parçalarını içeren görsel

Araç hareketi sırasında jant havalandırma boşuklarından ve araç iç kısmından giren hava fren sisteminin soğutulması sırasında önemli bir rol almaktadır.

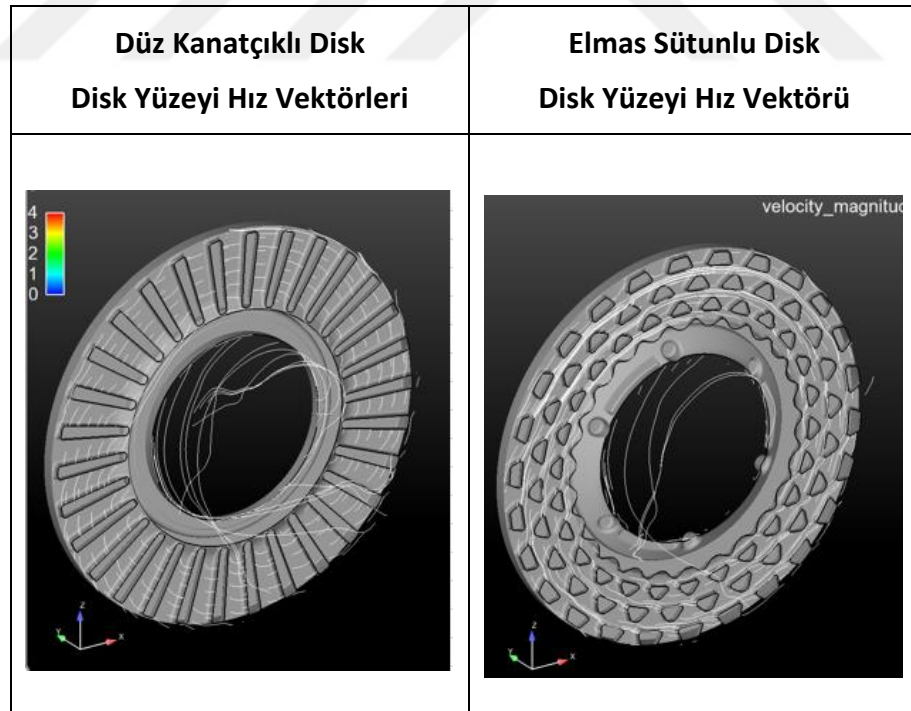


Şekil 5. 19 Tekerlek sistemi ve fren sistemi kesiti

Araç analizi disk komponent analiz sonucu ile karşılaştırılmak amacıyla 30 km/h araç hızında yapılmıştır.



Şekil 5. 20 Disk kesitinde hava hız vektörleri dağılımı a) düz kanatçıklı b) elmas sütunlu disk

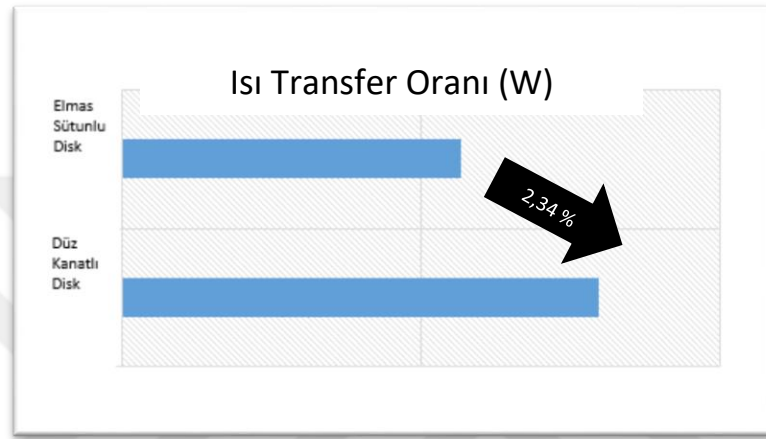


Şekil 5. 21 Kanat profilinde havanın dağılımı a) düz kanatçıklı b) elmas sütunlu disk

Araç Seviyesi HAD Analizi Sonucunda:

- ✓ Düz kanatlı disk tasarımının elmas sütunlu disk tasarımına göre taşınım katsayısı %3,7 oranında yüksek olduğu elde edilmiştir.
- ✓ Analiz ile elde edilen havanın disk havalandırma kanatçıklarındaki dağılımı, düz kanatçıklı disk’de tüm finlerin arasında dağıldığı görülmektedir.

Ancak elmas sütunlu disk tasarımında havanın kanatçıkların arasında yayılmasının düz tasarıma kıyasla daha yüzeysel olduğu elde edilmiştir.



Şekil 5. 22 Disk kanatçık tipi ve ısı transfer oranı, 30 km/h araç hızında

5.4 Testler

Dinamometre ya da kısaca ‘dyno’; kuvveti, kuvvet momentini(tork) veya gücü ölçmek amacıyla kullanılan bir cihazdır. Örneğin motor tarafından üretilen güç motor veya diğer dönen taşıyıcı parçalar tarafından üretilen güç, aynı anda tork ve dönme hızı (rpm) ölçülerek hesaplanabilir [15].

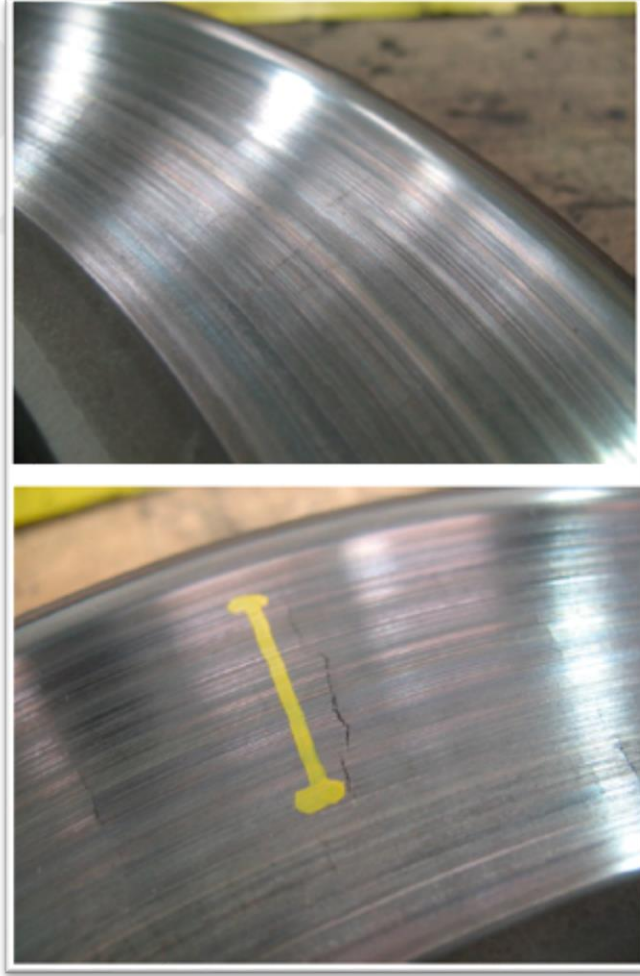
Yeni geliştirilen fren disklerinin fonksiyonel karakteristiğini tanımlamak ve regülasyon hedeflerini sağladığını onaylamak amacıyla dinamometre termal testleri yapılmaktadır [16].

Araç testleri pahalı, zaman alan ve yol ve hava şartları gibi kısıtlara bağlı olduğu için fren dinamometre laboratuvar testleri düşük maliyet ve zaman avantajı sağladığı için otomotiv sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir.

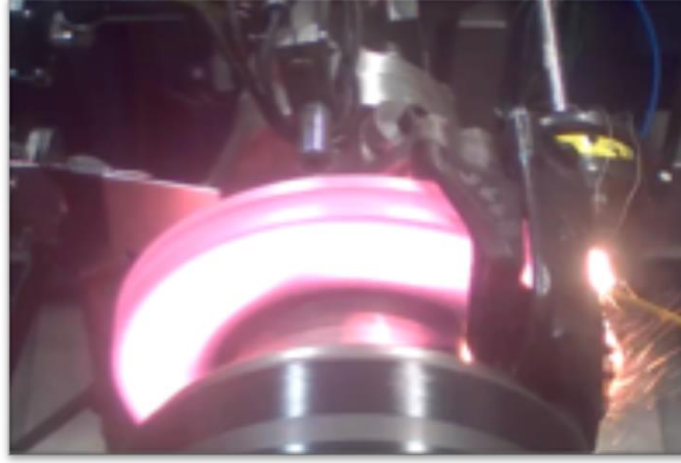
Fren dinamometre testlerinde; araç üzerinde kullanılan seviye sistem parçaları kullanılmaktadır böylece diskin araç üzerindeki kullanımı temsil edilmesi hedeflenmektedir.

Çalışma kapsamında: komponent seviyesi ve araç seviyesi HAD analizi ile ısı transferi miktarı analiz edilen disk düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk tasarımı için termal yükleme altındaki performansını incelemek için çevrimsel yükleme altında test yapılmıştır. Yapılan testin amacı diskin soğutma performansı ile birlikte termal dayanımının incelenmesidir.

Dinamometre dönen aksamı; diski hedef dönme hızına ulaştırmaktadır, fren sistemi ile uygulanan frenleme sonrasında bu dönme hareketi ile ters yönde olan fren sisteminin ürettiği tork yine disk vasıtasıyla dinamometreye aktarılmaktadır ve bu sayede fren sisteminin ürettiği tork değeri ölçülmektedir.

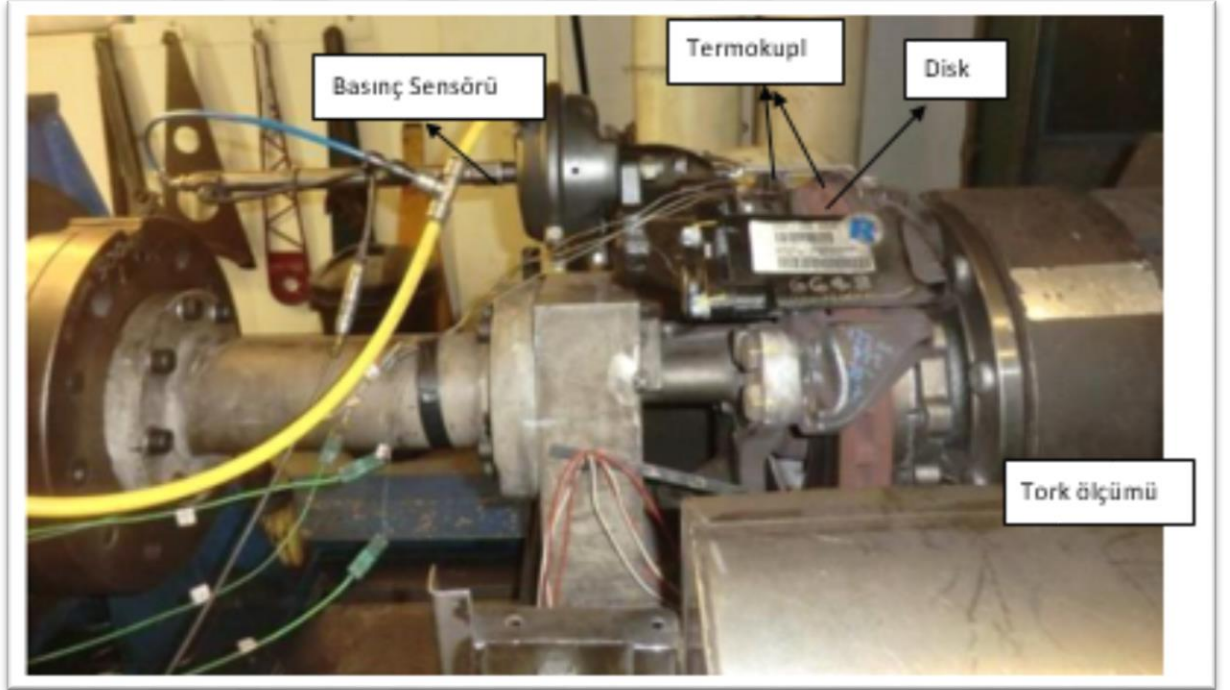


Şekil 5. 23 Potensiyel hata modu , disk yüzeyinde termal çatlak oluşumu [17]



Şekil 5. 24 Test sırasında fren sistemi ve disk görseli

Test kapsamında disk sıcaklığı kademeli olarak maksimum 400 °C'ye kadar arttırılarak disk tasarımı ve kanatçık yüzeyinden geçen soğutma havasının disk dayanımı değerlendirilmiştir.



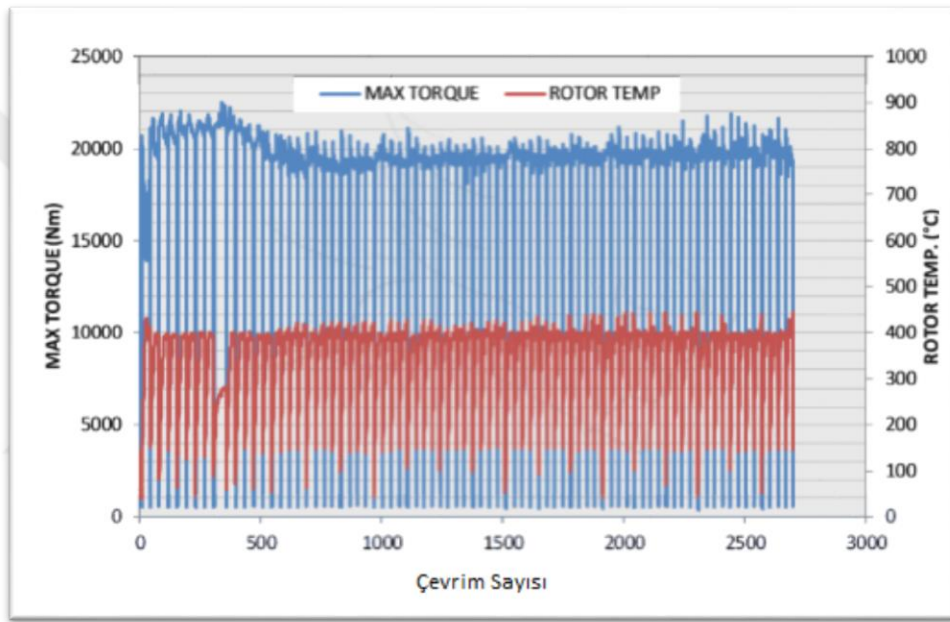
Şekil 5. 25 Fren dinamometre test düzeneği ve komponentleri

Testte fren körüğü üzerinde basınç sensörleri kullanılarak pistonlarının kontrolü ile disk yüzeyinde sürtünme yani frenleme sağlanmıştır.

Test sırasında termal yükleme altında çalışan diskin sıcaklık kontrolü ve soğumasını incelemek amacıyla termokupl kullanılmıştır.

Test aşağıdaki aşamalarda uygulanmıştır:

- Kaliperin arasına konumlanan diskin y zeeye oturması için alıştırması yapılmıştır, bedding
- Disk yavaşça ısıtılmak amacıyla hızı farklı fren basıncı ve tork altında 60 km/h'den 0 km/h'e düşürülerek 150 C'ye ısıtılmıştır. Ardından belirli s relerde sıcaklık 400  C ye artırılıp, sabit hızda hedeflenen sıcaklığa tekrar soğutulmuştur.
- Aynı  evrim tekrarlanmıştır, test sonunda disk yüzeyleri termal dayanımı incelenmiştir.



şekil 5. 26 Dinamometre testi çevrim sayısı ve sıcaklık tablosu

Test Sonuçları:

Test sonunda düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk yüzeyinde görsel olarak mikroçatlak kontrolü yapılmıştır.

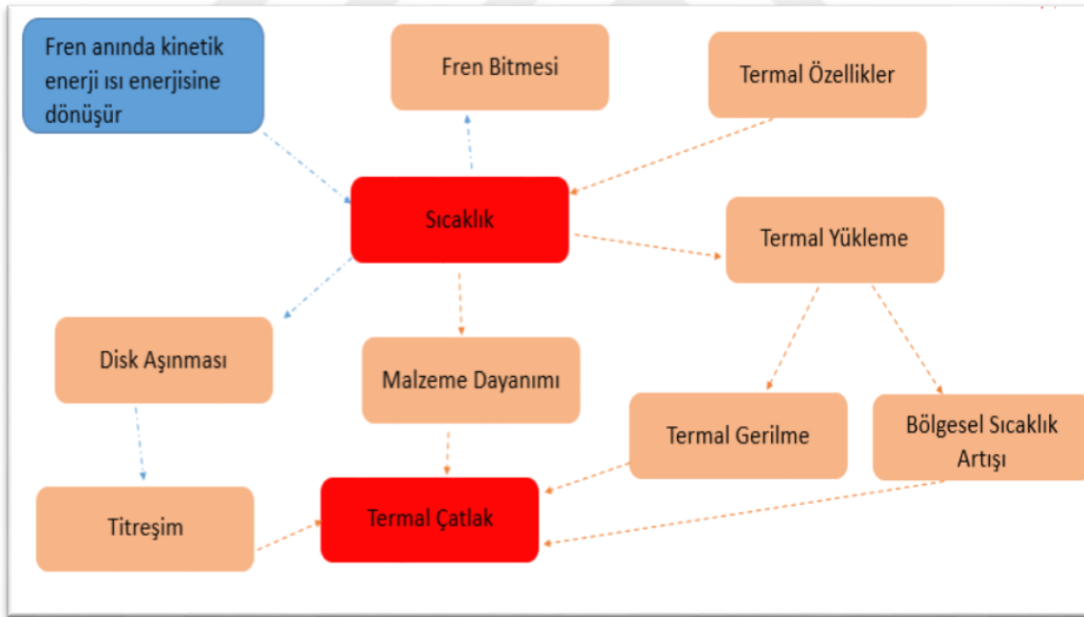
Disk yüzeylerinde bir çatlak ya da termal hasar olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5. 27 Test sonunda elmas sütunlu disk yüzeyi ve çatlak kontrolü

SONUÇ VE ÖNERİLER

Fren sisteminin çalışma prensibi temelde aracın hareket yani kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülerek hedeflenen araç hızına ulaşmasına dayanmaktadır. Sistemde ortaya çıkan ısı kaynaklı hata modları ve akış şeması Şekil 6.1’de detaylı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6. 1 Fren disk performansı termal hasar akış diyagramı

Termal kaynaklı hasarların meydana gelmemesi için;

- Disk malzemesinin dayanımını artırmak bir alternatif olabilir ancak bu seçenek disk parça maliyetini artıracığı için araç üreticileri tarafından tercih edilmemektedir.

- Temelde artan kullanım sıcaklıkları ya da özellikle ağır ticari araçlarda aşırı yüklemeler sebebiyle disklerde termal hasarlar görülmektedir. Çözüm olarak fren kullanım sıcaklıklarının hedef değerinde tutulması düşünülebilir ancak müşterinin kontrollü kullanımı bu aşamada pek mümkün değildir.

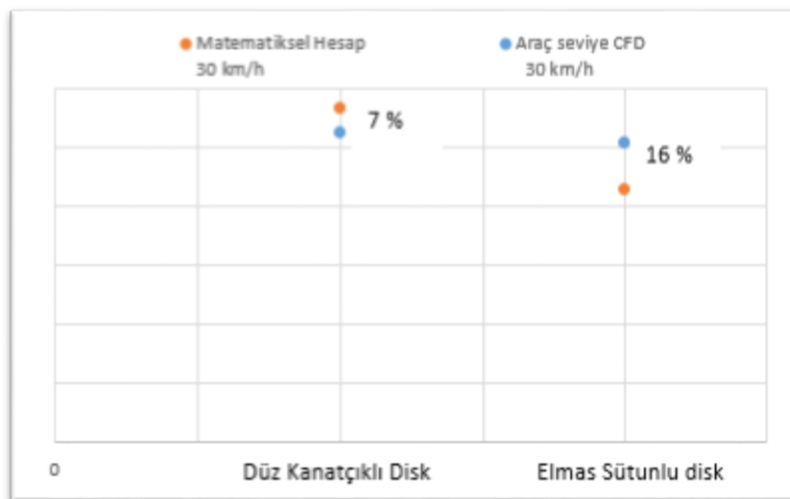
- Diğer bir seçenek ise disk tasarımının optimize edilerek yüksek sıcaklık altında çalışan parçada oluşan ısı yükünün homojen olarak uzaklaştırılmasını sağlamaktır.

Bu çalışma kapsamında havalandırma kanatlı disk için, disk kanatçık tasarımının ısı transferi ve termal dayanımı detaylı olarak incelenerek, dinamometre testi ile verifikasyonu sağlanmıştır. Ayrıca disk ağırlık düşüşü ile aracın yakıt tüketiminde iyileştirme fırsatı elde edilmiştir.

Yapılan çalışmada düz kanatçıklı ve elmas sütunlu disk tasarımının fren anında ortaya çıkan ısıнын uzaklaştırılmasındaki etkisi matematiksel hesaplama, komponent seviyesi, araç seviyesi HAD analizi ile incelenmiştir. Yapılan validasyon testi ile diskin termal yükleme altında yapısal dayanımı değerlendirilmiştir.

- Komponent seviye HAD analizi ve taşınım katsayısının matematiksel hesap ile incelendiği bölümde ve literatür araştırmalarında da vurgulandığı gibi artan araç hızının ısı transfer oranı olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

- Taşınım ısı transfer katsayısı teorik matematiksel hesap ve araç seviye analiz ile karşılaştırıldığında 30 km/h araç hızı için %7 hata ile yaklaşımda bulunulmuştur.



Şekil 6. 2 Disk tipi – taşınım katsayısı matematiksel hesap ve araç analizi karşılaştırması

- Araç seviyesi HAD analizinde 30 km/h araç hızında düz kanatçıklı disk ısı transfer oranı elmas sütunlu disk tasarımına kıyasla % 3,72 yüksek olduğu görülmüştür. Komponent seviye de bu değer % 23'tür. Fren diski etrafında tüm komponentlerle birlikte değerlendirildiğinde komponent seviyede elde edilen sonuca kıyasla düşüş görülmüştür.
- Yapılan termal dayanım testi sonucunda düz kanatçıklı disk ve elmas sütunlu disk parçasında yapısal hasar oluşmadan testi başarı ile tamamlamıştır.
- Elmas sütunlu disk düz kanatçıklı disk tasarımına kıyasla %2,5 daha hafiftir. Disk seçiminde diğer bir kriter de parçanın ağırlık etkisidir. Elmas sütunlu disk tasarımında ısıнын ortamdan uzaklaştırılması ve yapısal olarak avantajının yanında parça ağırlık etkisi ile de önerilmektedir.

Planlanan Çalışmalar:

İlerleyen çalışmalarda disk tasarımı geliştirilmesinde (disk çapı, yüksekliği, kanatçık profili ve sayısı gibi farklı etkiler) komponent seviyesi analizin, araç seviyesi analiz için ön değerlendirme adımı olarak kullanılması planlanmaktadır. Son validasyon adımı olarak; analiz ile tek sayıya indirilen tasarımın dinanometre testi yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Limpert, R., (2011). Brake Design and Safety, Third Edition, SAE International, Warrendale, PA.
- [2] Belhocine, A. ve diğerleri (2014). “Thermal analysis of both ventilated and full disc brake rotors with frictional heat generation”, Applied and Computational Mechanics, 8:5–24
- [3] Malzeme Bilimi, Fren Sistemi Çeşitleri, <https://malzemebilimi.net/fren-sistemi-cesitleri-nelerdir-hangi-malzemelerden-yapilir.html>, 17 Mart 2019.
- [4] Otomotiv Fren Sistemi, Fren Çeşitleri, <http://what-when-how.com/automobile/types-of-brake-automobile> , 17 Mart 2019.
- [5] Lök, A., (2011) , Araç Fren Sistemleri , MMO İstanbul, Kartal
- [6] Bleier, F., (1997). Fan Handbook ,Section , Application and Design, McGraw-Hill Yayınları, New York
- [7] Dalal, Y., (2017). Effect of Design Parameters on Thermal Performance of Vane Type Disc Brake Rotor, Yüksek Lisans Tezi, Western Michigan Üniversitesi, Michigan.
- [8] Thureson, A., (2014). CFD and Design Analysis of Brake Disc, Yüksek Lisans Tezi, Otomotiv Anabilim Dalı , Chalmers Teknoloji Üniversitesi, İsveç.
- [9] Rajagopal, T. ve diğerleri (2014). “Numerical investigation of fluid flow and heat transfer characteristics on the aerodynamics of ventilated disc brake rotor using CFD”, Thermal Science, 2: 667-675.
- [10] Reddy, M. ve Usha Sri, P., (2014) “ Heat transfer analysis of automotive disc brakes”, International Journal of Advance Research In Science And Engineering, 3:9.

- [11] Kudal, G., Chopade, M., (2016). "Heat Transfer Characteristics of Ventilated Disc Brake Rotor with Diamond Pillars-A Review", International Journal of Current Engineering and Technology, 2277-4106.
- [12] Yohannan, S., (2018). " Significance of Modifications on Disc Brake Vane in the Enhancement of Heat Transfer", International Journal of Research in Engineering, Science and Management, 1:7.
- [13] More,A., Sivakumar, R., (2014). "CFD Analysis of Automotive Ventilated Disc Brake Rotor", Amol V. More et al Int. Journal of Engineering Research and Applications, 4: 1-5.
- [14] Sarip., S. ve diğerleri, [2009] "Analysis of temperature and pressure distribution in brake disc for regenerative braking", UTM Razak School of Engineering and Advanced Technology, 2.
- [15] Dinamometre, fren disk testi, <https://www.setra.com/blog/test-and-measurement-dynamometer>, 17 Mart 2019.
- [16] Wiegemann, S., (2011) , "Automatic Heat Crack Detectin of Brake Discs on the Dynamometer" , EB2016-SVM:057.
- [17] SAE, (2018). J2928, Brake Rotor Thermal Cracking Procedure for Vehicles Below 4 540 kg GVWR, SAE, Warrendale, PA.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Öznur ÇETİN GİRAY
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.10.1989 , KARABÜK
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : cetin.oznurr@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lise	Fen Bilimleri	Mustafa Yazıcı Lisesi (YDA)	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013 -	Ford Otomotiv San. A.Ş.	Şaşı,Lastik,Jant Mühendisi
2012	Arçelik Ar-Ge	Uzun Dönem Stajyer

YAYINLARI

Makale

1. Çetin Giray, Ö. ve Ağra Ö., (2019). “Otomotiv Fren Disk Tasarımı İçin Isı Transfer Karakteristiği İncelenmesi”, 4.Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 1:225-235



