

T.C.  
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVA DELİKLİ FREN DİSKLERİNİN TERMAL VE MEKANİK  
GERİLME ANALİZİ VE GEOMETRİK OPTİMİZASYONUNUN  
YAPILMASI

Nilüfer CEYHUN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgü BAYRAK

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN  
2019  
Her Hakkı Saklıdır.

## Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Özgü BAYRAK danışmanlığında, Nilüfer CEYHUN tarafından hazırlanan bu çalışma 08.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği/oy çokluğu (3./3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

İmza: 

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hüccet KAHRAMANZADE

İmza: 

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Özgü BAYRAK

İmza: 

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 27 / 08 / 2019 tarih ve 34/...2... sayılı kararı ile onaylanmıştır.



**Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY**  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Hava Delikli Fren Disklerinin Termal ve Mekanik Gerilme Analizi ve Geometrik Optimizasyonunun Yapılması” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 08./08/2019

(İmza)

  
Nilüfer CEYHUN V.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### HAVA DELİKLİ FREN DİSKLERİNİN TERMAL VE MEKANİK GERİLME ANALİZİ VE GEOMETRİK OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI

Nilüfer CEYHUN

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgü BAYRAK

Fren sisteminin durumunu ve kalitesini ortaya koyması bakımından araçlarda frenleme performansı önemlidir. Frenlemeden sonra sağlanan kısa durma mesafesi fren performansının en önemli belirleyicisidir. Bu durum yavaşlama ivmesinin maksimum olması ile mümkündür. Yüksek frenleme kuvveti, birbirine sürtünen yüzeylerin önemli bir kısmını oluşturan fren diskinin tasarımı ve kalitesi ile ilgilidir. Fren sistemleri taşıtın hareket enerjisini fren sisteminin sürtünme elemanları üzerinde ısı enerjisine çeviren sistemlerdir. Isının bir kısmı dış ortama transfer edilse de bir kısmı fren elemanları üzerinde depolanır. Depolanan ısı miktarı ve depolanma süresi arttıkça frenleme performansı olumsuz yönde etkilenir. Disklerin farklı tiplerde tasarlanması fren elemanları üzerinde soğutmaya yönelik yapılan çalışmalar arasındadır. Bu çalışmada hava delikli diskler tasarlanarak soğumanın maksimum düzeyde olması amaçlanmıştır. Bunun yanında bu tasarımlar düşünülürken fren elemanları üzerinde oluşan kırılma veya çatlakların minimum düzeyde tutulması hedeflenmiştir.

**2019, 57 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Fren diski, Disk tasarımı, Sonlu eleman analizi, Disk optimizasyonu

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **THERMAL AND MECHANICAL STRESS ANALYSIS AND GEOMETRIC OPTIMIZATION OF AIR PERFORATED BRAKE DISCS**

Nilüfer CEYHUN

Erzincan Binali Yıldırım University  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Özgü BAYRAK

Braking performance is important in vehicles in order to demonstrate the stability and stability of the braking system. The short stopping distance after braking is the most important determinant of braking performance. This is possible with the maximum deceleration acceleration. The high braking force is related to the design and quality of the brake disc, which forms an important part of the friction surfaces. Brake systems are the systems that convert the movement energy of the vehicle into heat energy on the friction elements of the brake system. Although some of the heat is transferred to the outside, some of it is stored on the brake elements. Braking performance is adversely affected as the amount of heat stored and storage time increases. Different types of discs are designed for cooling on brake elements. In this study, air cooling discs are designed to provide maximum cooling. In addition, while designing these designs, it is aimed to keep the fracture or cracks on the brake elements to a minimum.

**2019, 57 Pages**

**Keywords:** Brake disc, Disc design, FEM, Disc optimization

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmasının oluőmasına bilgi ve deneyimleri ile katkıda bulunan, zor zamanlarda yol gösteren bakıő aımı zenginleőtiren danışman hocam, Sayın Dr. gr. Üyesi zgu BAYRAK' a sabrı ve özverileri için sonsuz teőekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Sönmez ve Ceyhun ailelerine özellikle eőim Alper CEYHUN' a bana bu süreçte inanarak destek oldukları için ayrıca çok teşekkür ederim.

Nilüfer CEYHUN

Temmuz, 2019



# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>3</b>
2.1. Fren Sistemi .....	3
2.2. Frenleme Esnasında Oluşan Durumlar .....	4
2.3. Frenlemeye Etki Eden Durumlar .....	5
2.4. Frenleme Esnasında Tekerlek ve Araç Üzerinde Oluşan Kuvvetler .....	5
2.5. Tekerlek Frenleri.....	7
2.5.1. Kampanalı fren sistemi .....	8
2.5.2. Disk fren sistemi .....	10
2.5.2.1. Disk fren malzemeleri.....	12
2.5.2.2. Geometrisine göre disk çeşitleri .....	18
2.5.2.3. Disk fren sisteminin diğer elemanları .....	20
2.5.3. Disk fren sisteminin çalışma prensibi .....	23
2.5.4. Disk fren ile kampanalı fren sisteminin karşılaştırılması.....	24
2.6. Bazı Bilgisayar Destekli Tasarım Programları .....	24
2.6.1. Solidworks.....	25
2.6.2. Catia .....	25
2.6.3. Pro/Engineer.....	25
2.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM).....	26
2.8. Sonlu Elemanlar Paket Programları.....	28
2.8.1. ANSYS.....	28
2.8.2. ABAQUS .....	29
2.8.3. NASTRAN.....	29
2.9. Optimizasyon Temel Bilgi .....	29

<b>3. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>31</b>
<b>4. MATERYAL ve YÖNTEM .....</b>	<b>35</b>
4.1. Yöntem.....	35
4.1.1. Solidworks yazılımı ile tasarım girdileri.....	35
4.1.2. ANSYS yazılımı analiz öncesi veri girdileri.....	37
4.1.3. Matematik modelleme ve hesaplamalar.....	40
4.1.4. Mekanik analiz için girilen sınır şartları .....	42
4.1.5. Termal analiz için girilen sınır şartları .....	43
4.1.6. Optimizasyon sınır şartları .....	44
<b>5. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>46</b>
5.1. Mekanik Analiz Sonuçları .....	46
5.2. Optimizasyon Öncesi Termal Analiz Sonuçları .....	46
5.3. Optimizasyon Sonuçları.....	48
5.4. Optimizasyon Sonrası Termal Analiz Sonuçları.....	49
5.5. Optimizasyon Öncesi ve Sonrası Termal Analiz Sonuçları Karşılaştırılması ..	50
<b>6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>51</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>52</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>57</b>
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar .....	57
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>58</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Fren Sistemi (MEB, 2013).....	3
Şekil 2.2. Frenleme Esnasında Oluşan Kuvvetler (MEB, 2013) .....	5
Şekil 2.3. Kampana ve disk fren sistemi elemanları (Güney, 2013).....	8
Şekil 2.4. Kampana fren, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Sitesi (2019) .....	10
Şekil 2.5. Disk fren (Sarıyerli, 2006) .....	11
Şekil 2.6. Normal disk (Mohd, 2013) .....	19
Şekil 2.7. Delikli disk (Mohd, 2013).....	19
Şekil 2.8. Hava kanallı-delikli disk (Çavdar vd., 2008).....	20
Şekil 2.9. Kaliper detayı (Yakut, 2016) .....	21
Şekil 2.10. Sabit kaliper (Yakut, 2016).....	21
Şekil 2.11. Yüzer kaliper (MEB, 2013) .....	22
Şekil 2.12. Tam temaslı kaliper (MEB, 2013) .....	22
Şekil 2.13. Fren balatası (Yakut, 2016).....	23
Şekil 2.14. Geometri, Yükler ve Sonlu Elemanlar Mesh Methodu .....	27
Şekil 2.15. Klasik yaklaşım tasarımı ile optimizasyonun karşılaştırılması (Kaymaz İ., 2019).....	30
Şekil 4.1. Fren diskine ait Solidworks çizimi .....	36
Şekil 4.2. Fren diski kesit görünümü .....	37
Şekil 4.3. Fren diski genel görünüm .....	37
Şekil 4.4. Parametre atanan tasarım girdileri .....	39
Şekil 4.5. Koordinat sistem tanımlama .....	39
Şekil 4.6. Mesh model görünüm .....	40
Şekil 4.7. Mekanik analiz sınır şartları.....	43
Şekil 4.8. Termal analiz sınır şartları .....	44
Şekil 4.9. Optimizasyon şartları .....	45
Şekil 5.1 Mekanik analiz sonuçları .....	46
Şekil 5.2. Optimizasyon öncesi termal analiz sonuçları .....	48
Şekil 5.3. Optimizasyon sonuçları .....	49
Şekil 5.4. Optimizasyon sonrası termal analiz sonuçları .....	50

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1 Trafik Kazalarında Araç Kusurları (KGM 2015) .....	4
Tablo 2.2. Dökme demir materyal özellikleri (Manjunath, 2013) .....	14
Tablo 2.3. Alüminyumun fiziksel özellikleri (Şahin, 2000) .....	17
Tablo 2.4. Paslanmaz çelik materyal özellikleri (Manjunath, 2013) .....	18
Tablo 4.1. Malzeme özellikleri .....	38
Tablo 4.2 Diske ait fiziksel özellikler .....	38
Tablo 5.1. Termal analiz sonuçlarının karşılaştırılması .....	50



## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Simgeler

$a$	Yavaşlama ivmesi ( $m/s^2$ )
$A$	Disk alanı ( $mm^2$ )
$b$	Paralelkenar uzunluk (mm)
$c$	Disk özgül ısı ( $J/kgK$ )
$c_p$	Isı iletim katsayısı ( $W/mm^{20}C$ )
$d_1$	Disk dış çapı (mm)
$d_2$	Disk iç çap (mm)
$d_3$	1. Delik çapı (mm)
$d_4$	2. Delik çapı (mm)
$d_5$	3. Delik çapı (mm)
$d_6$	4. Delik çapı (mm)
$\Delta E$	Toplam enerji (J)
$f$	Frekans (rad/s)
$F$	Fren kuvveti (N)
$h_b$	Paralelkenar yükseklik (mm)
$KE$	Kinetik enerji (J)
$m_t$	Tekerlek kütlesi (kg)
$m$	Araç kütlesi (kg)
$P_f$	Fren gücü (Watt)
$Q$	Toplam ısı akısı ( $W/mm^2$ )
$r_t$	Tekerlek yarıçapı (mm)
$t$	Araç durma süresi (s)
$T_i$	Disk sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
$T_0$	İlk sıcaklık(Ortam sıcaklığı) ( $^{\circ}C$ )
$V_i$	Araç son hız (m/s)
$V_0$	Araç ilk hızı (m/s)
$W$	Açısal hız (rad/s)
$X$	Durma mesafesi (m)

## 1. GİRİŞ

Fren sistemleri taşıtın hareket enerjisini fren sisteminin sürtünme elemanları üzerinde ısı enerjisine çevirerek taşıtın yavaşlaması veya durmasını sağlayan sistemlerdir. Bu nedenle bir taşıtın fren sisteminden, çok yüksek güvenilirlik ve dayanıklılık beklenmektedir.

Depolanan ısı miktarı ve depolanma süresi arttıkça frenleme performansı olumsuz yönde etkilenir. Isının bir kısmı dış ortama transfer edilse de bir kısmı fren elemanları üzerinde depolanır. Söz konusu bu ısı malzemeden hızlıca uzaklaştırılmazsa ve malzemenin ısı kapasitesinin üzerinde depolanırsa disk yüzeyinde zaman içinde parlama, camlaşma ve termal çatlaklar meydana gelmesi söz konusu olacaktır.

Yüksek sıcaklık demir esaslı malzeme üzerindeki karbonları serbest bırakmakta ve camlaşmaya neden olmaktadır. Bunun sonucunda sürtünme kuvveti azalmakta, ses ve titreşim artmaktadır. Aşınma miktarı da sürtünme derecesine bağlı olarak değişir ve homojen olmayan disk yüzeyine sebep olur. Frenleme kuvveti azalır ve disk üzerinde termal çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar aynı zamanda frenleme kuvvetini kararsızlaştırır. Diskler farklı geometrilere modellenerek çatlaklar giderilmeye çalışılmıştır. Taşıt, hızlı ve güvenli bir biçimde her türlü iklim ve yol şartlarında durabilme yeteneğine sahip olmalıdır. Disklerin farklı tiplerde tasarlanması, fren elemanları üzerinde soğutmaya yönelik yapılan çalışmalar arasındadır. Bu amaç doğrultusunda, soğutma kanallı, delikli diskler tasarlanmış, diskler üzerinde fren pedal kuvveti ve uygulama süresi değiştirilerek ısı değişimleri, disk üzerinde oluşan kusurlar ve taşıtın frenleme mesafeleri gibi değişkenler literatürde incelenmiştir. Depolanan ısı miktarı ve depolanma süresi arttıkça frenleme performansının olumsuz yönde etkilendiği bilinen bir gerçektir. (Ceyhun ve Bayrak, 2019)

Farklı geometrilere tasarlanan diskler sonlu elemanlar analizleri ile incelenmektedir. Geometrisi oluşturulmuş model, düğüm noktaları belirlenerek daha küçük parçalarına ayrılır. Parçalara ayrılan her eleman kendi düğüm noktalarına ayrılır ve her bir nokta üzerine dış yük, mesnet vb. sabitler uygulanarak noktalardaki yer değiştirmeler tespit edilir. İşlevsellik kazandıracak en uygun analiz sonuçlarını elde etmek için optimizasyon yapılır.

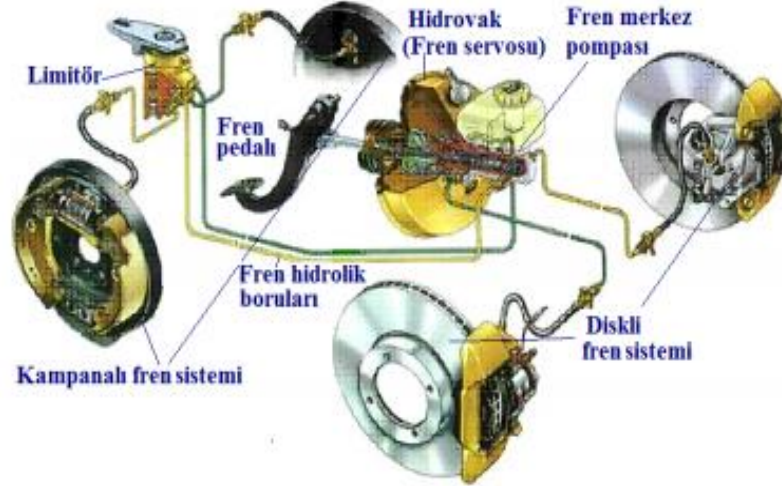
Optimizasyon yapılırken sistem temeli oluşturulur. Tasarım değişenleri belirlenir, sınırlar ve hedef fonksiyon belirlenir. En uygun optimizasyon türü seçilerek uygulanır.

Bu çalışmanın amacı, fren sisteminin işlevini ve frenleme performansını etkilemeksizin minimum ağırlıkta, yükün ve sıcaklığın sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuş model üzerindeki gerilme ve yer değiştirme etkisini araştırarak disk tasarımını optimize etmektir. Bu amaçla SOLIDWORKS yazılımı yardımı ile hava delikli fren diski tasarımı yapılmış ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımına aktarılan model üzerinde statik ve termal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda doğrudan optimizasyon yöntemi kullanılarak mümkün olan en küçük hacmi sağlayan uygun delik çapları tespit edilerek etkili bir disk tasarımı oluşturulmuştur. Optimizasyon sonucundaki yeni veriler kullanılarak yeniden modellenen fren diski üzerinde termal analiz yapılarak analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Fren Sistemi

Güvenli bir sürüş için bir araçta bulunan önemli donanımlardan, olmazsa olmazlardan biri fren sistemidir. Aracın hızını azaltarak yavaşlatan ve istendiğinde durmasını sağlayan sürüşü kontrol eden sisteme fren sistemi denilmektedir. Taşıtlardaki fren sisteminden beklenen yüksek güvenilirlik ve dayanıklılıktır. Taşıt, hangi hızda olursa olsun güvenli bir biçimde, istenilen en uygun sürede, her türlü iklim ve yol şartlarında durabilme yeteneğine sahip olmalıdır. Araçlarda taşıtların türlerine göre birçok farklı fren sistemi kullanılabilir. Hidrolik veya havalı fren sistemleri günümüzde en yaygın olarak kullanılan fren sistemlerinin başında gelir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi otomobillerde en fazla kullanılan fren sistemleri hidrolik fren sistemleridir.



Şekil 2.1. Fren Sistemi (MEB, 2013)

Fren sisteminin başlıca görevleri:

- Aracın istenmeyen şekilde hızlanmasını engellemek ve yavaşlamayı sağlamak,
- Aracı en uygun ve güvenli bir şekilde durdurmak,
- Durmakta olan aracın konumunu devam ettirmesini sağlamak.

Fren sistemleri taşıtın hareket enerjisini fren sisteminin sürtünme elemanları üzerinde ısı enerjisine çeviren sistemlerdir. Isının bir kısmı dış ortama transfer edilse de bir kısmı fren elemanları üzerinde depolanır.

Depolanan ısı miktarı ve depolanma süresi arttıkça frenleme performansı olumsuz yönde etkilenir. Tablo2.1’de görülebileceği gibi trafik kazalarına sebep olan, ölümlü ve yaralanmalı araç kusurları arasında fren 2. Sıradadır. (KGM, 2015; MEB, 2013).

**Tablo 2.1** Trafik Kazalarında Araç Kusurları (KGM 2015)

Araca Ait Kusurlar	Yerleşim Yeri		Yerleşim Yeri Dışı		TOPLAM	
	Kusur Sayısı	%	Kusur Sayısı	%	Kusur Sayısı	%
Lastik Patlaması	85	13,26	270	44,7	355	28,51
Fren	204	31,83	86	14,24	290	23,29
Arka Lambalar	23	3,59	42	6,95	65	5,22
Far	44	6,86	15	2,48	59	4,74
Direksiyon	44	6,86	11	1,82	55	4,42
Kapı	31	4,84	9	1,49	40	3,21
Rot	20	3,11	22	3,64	42	3,37
Aks	23	3,59	24	3,97	47	3,78
Dönüş Sinyali	42	6,55	3	0,5	45	3,61
Makas	15	2,34	6	1	21	1,69
Şaft	11	1,72	6	0,99	17	1,37
Şanzıman	6	0,94	11	1,82	17	1,37
Cam Sileceği	7	1,09	3	0,5	10	0,8
Klakson	0	0	1	0,17	1	0,08
Diğer	86	13,42	95	15,73	181	14,54
<b>TOPLAM</b>	<b>641</b>	<b>100</b>	<b>604</b>	<b>100</b>	<b>1245</b>	<b>100</b>

## 2.2. Frenleme Esnasında Oluşan Durumlar

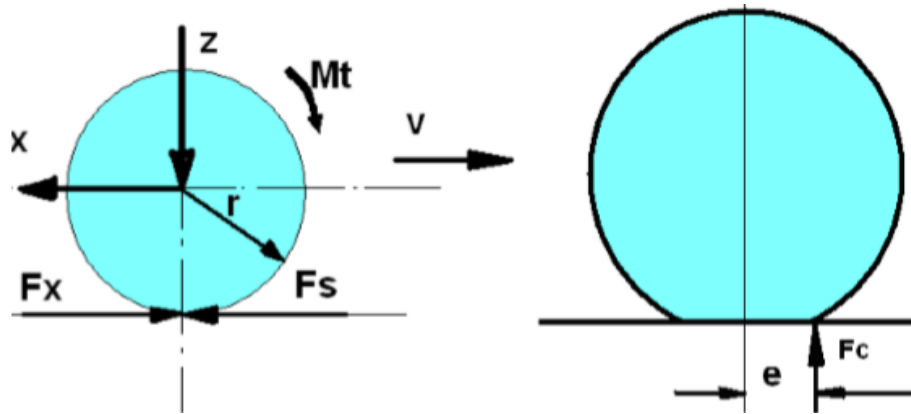
Isı malzemeden hızlıca uzaklaştırılmazsa ve kapasitesinin üzerinde depolanırsa disk yüzeyinde zamanla parlama, camlaşma ve termal çatlaklar meydana gelir. Yüksek sıcaklık malzeme üzerindeki karbonları serbest bırakmakta ve camlaşmaya neden olmaktadır. Sürtünme kuvveti bunun sonucunda azalır, ses ve titreşim artar. Aşınma miktarı sürtünme derecesine bağlı olarak değişir. Aşınmalar homojen olmayan disk yüzeyine sebep olurlar frenleme kuvveti azalır ve disk üzerinde termal çatlaklar oluşur. Aynı zamanda bu çatlaklar frenleme kuvvetini kararsızlaştırır. Diskler farklı geometrilerde tasarlanarak çatlaklar giderilmeye çalışılmıştır (Zuber ve Heidenreich, 2006).

### 2.3. Frenlemeye Etki Eden Durumlar

Frenleme sürecinin başlamasından itibaren başlayıp taşıtın durmasına kadar alınan toplam mesafeye durma mesafesi denir. Frenleme performansına etki eden temel faktörler ise; taşıtın ağırlığı, ön-arka tekerleklerin frenleme etkinliği, fren sisteminin dizaynı, fren hidrolik ve mekanik donanımının durumunu, fren sistemini etkileyebilecek çevre koşulları, lastiklerin kalitesi veya aşınma durumu, araç üzerindeki toplam yük, yol ve iklim şartları, frenleme ayarı, tekerlek – yol arasındaki sürtünme kuvveti ve tutunma katsayısıdır.

İmalatçı firmalar frenleme mesafesi konusunda seri üretime geçmeden önce yol tutuş deneyleri yapmaktadır. Fakat imal edilen tüm araçlar için bu deneyler yapılamamaktadır. Frenlemeyi etkileyen değişkenlerin sayısı oldukça fazla olduğu için, frenleme ve durma mesafesini ve frenleme verimini formüle etmek çok güçtür. Var olan matematiksel modellerde bazı kabuller yapılmıştır. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi matematiksel modeller frenleme mesafesi ve fren verimi konusunda yapılan birçok çalışma sonrasında, yavaşlama ivmesi, tepki zamanı, taşıt hızı, yol-tekerlek arasındaki sürtünme katsayısı gibi değişik faktörlere bağlı olarak geliştirilmiştir (Bayrakçeken ve Düzgün, 2005).

### 2.4. Frenleme Esnasında Tekerlek ve Araç Üzerinde Oluşan Kuvvetler



Şekil 2.2. Frenleme Esnasında Oluşan Kuvvetler (MEB, 2013)



$Z$  = Taşıtın ağırlığından tekerleğe düşen yük

$X$  = Taşıtın tekerleğe tepki kuvveti

$F_x$  = Tekerlek çevre kuvvetleri

$F_s$  = Fren sürtünme kuvveti

$r$  = Tekerlek yarıçapı

$M_t$  = Tekerlek momenti

$V$  = Hız

$F_c$  = Yolun tepki kuvveti, tekerlek yükü

$e$  = Tekerlek yükünün etkime noktasının eksenden uzaklığı

Fren uygulanan bir araca etki eden faktörler; tekerlekle yol arasındaki sürtünme, tekerlek fren mekanizmasındaki balatayla disk arasındaki sürtünme kuvveti, yolun eğiminden kaynaklanan kuvvet ve araç hızı olarak özetlenebilir.

Aracın hızı arttıkça frenleme mesafesi ve frenleme süresi de artar. Fren tekerlek mekanizmasındaki balatayla disk arasındaki sürtünme kuvveti araç üzerinde kullanılan fren mekanizmasının gücüne bağlı olarak değişir. Frenlemeyi etkileyen en önemli etkenlerden biri yol ile tekerlek arasındaki sürtünme katsayısıdır. Buzlu, kaygan veya ıslak bir yolda tekerlek yere tutunmakta zorlanacağı için frenleri zorlayacak ya da tekerlek yol üzerinde kayacak, bununla birlikte araç daha uzun bir mesafede duracak veya kazalara sebebiyet verebilecektir.

Aracın yokuş yukarı çıkması veya yokuş aşağı inmesi durumuna göre frenleme performansı değişir. Aracın ağırlığı yokuş inildiği zaman kuvvet artışına neden olur ve araç daha çok hızlanır bu da fren mesafesinin ve süresinin artmasına aracı kontrol etmekte zorlanmaya neden olur. Yokuş çıkışlarında ise araç ağırlığı frenlemeye ve aracı durdurmaya yönelik etki edeceğinden frenleme süresi istenilenden daha da kısa olabilir (Yakut, 2016).

## 2.5. Tekerlek Frenleri

Frenlerin amacı hız düşürmek veya araç yokuş aşağı giderken korumaktır. Frenler olmadan aracın hızını kontrol etmek mümkün olmayacaktır. Bununla birlikte, fren dizaynı genellikle hafife alınır. Frenlerde kısa sürede yüksek miktarda enerji dönüştürülür.

Aslında, frenleme gücü motorun gücünden birkaç kat daha yüksektir. Otomobillerde ve kamyonlarda farklı frenleme türleri kullanılır. Genellikle iki tasarım şekli kullanılır: disk ve kampanalı frenler. İhtiyaçlar, daha hafif ve daha ekonomik arabaların gelişimiyle de artacaktır. Aracın kinetik enerjisini ısıya aktarmak için aracın her tekerleğinde sürtünme frenleri yaygın olarak kullanılır. Temas alanı, ısının kaynağıdır. Soğutma yüzeyleri, çevreye ısı yayar (Hohmann vd., 1999).

Frenler aslında enerji türlerini değiştirmek için kullanılan bir mekanizmadır. Bir araba hızla hareket ettiğinde, kinetik enerjisi vardır. Frenleri, fren kampanasına veya diskinе basan balata veya pabuçlar bu enerjiyi termal enerjiye dönüştürür. Frenlerin soğutulması ile ısı dağılır ve araç yavaşlar. Bu durum, enerjinin korunması yasası olarak da bilinen termodinamiğin ilk kanunuyla ilgilidir (Jalalifar ve Talati, 2009).

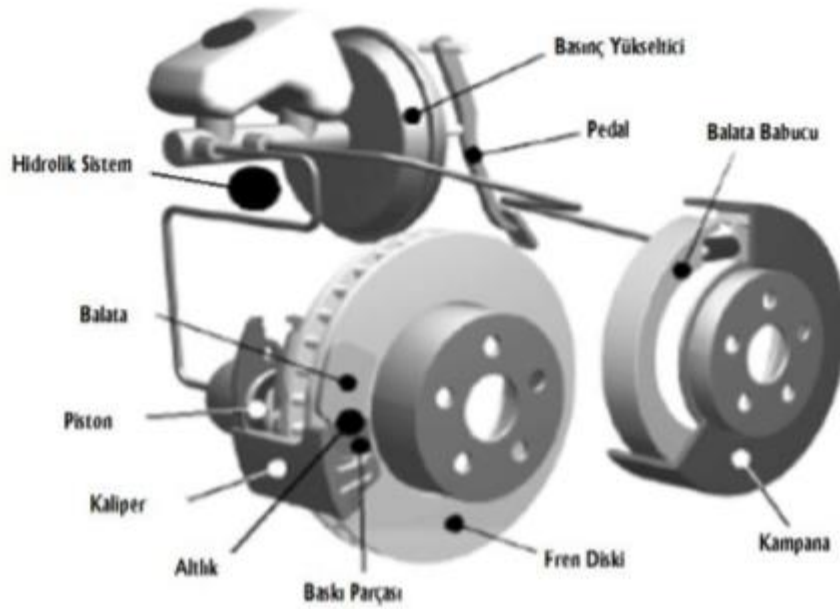
Fren sistemi kabaca iki malzemenin birbirine bastırılması sonucu sürtünme kuvveti oluşturarak hareketin durdurulmasını sağlar. Günümüz otomotiv sektöründe genel olarak kampanalı ve diskli frenler kullanılmaktadır (Keskin, 2015).

Frenleme esnasında balataya ileri yönde hareket verilerek dönmekte olan diske basınç uygulaması sağlanır ve sürtünme meydana getirir. Bu baskı sonucu oluşan sürtünme kuvvetinin etkisi ile yavaşlatma meydana gelir ve kontrollü olarak yavaşlayıp istenildiğinde durur.

Frenleme; kontrollü gücün, hızı azaltmak, durdurmak ya da aracı sabit tutmak amacıyla iki yüzeyin sürtünme oluşturacak şekilde birbirine temas etmesi ile kullanılmasını kapsamaktadır. Sürtünme temastaki iki yüzey arasında birbirlerine göre hareketlerine gösterilen direnç olarak belirtilmektedir. Balatalar, kampana ya da disk frenlerle temas ederek aracın hareketini etkileyen ve harcanan sürtünme malzemeleridir (Gültekin, 2007).

Taşıtlarda tekerlek freni olarak sürtünmeli frenler kullanılmaktadır. Kampanalı ve diskli olarak ikiye ayrılan frenlerden kampanalı frenler daha eskidir. Frenlere ait görseller Şekil 2.3'te verilmiştir.

Frenler; özetlenecek olursa genel olarak fren momentinin oluşturulması ve kinetik veya potansiyel enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi (enerji dönüşümü) işlemlerini yerine getirirler (Gökten vd., 2005).



Şekil 2.3. Kampana ve disk fren sistemi elemanları (Güney, 2013)

### 2.5.1. Kampanalı fren sistemi

Eski bir tasarım olan kampanalı frenler 1960'lara kadar her türlü araçta bulunmaktaydı. Bugün, çoğunlukla kamyonlarda ve otobüslerde kullanılmaktadır. Disk frenlerin ağır vasıtalarda da kullanılması araştırmacı ve üreticilerin gündeminde olup pazarda büyük bir yeri olacağı öngörülmektedir (Eriksson, 2000). Günümüzde hala ağır vasıtaların önemli bir kısmında kampana fren kullanılmaktadır.

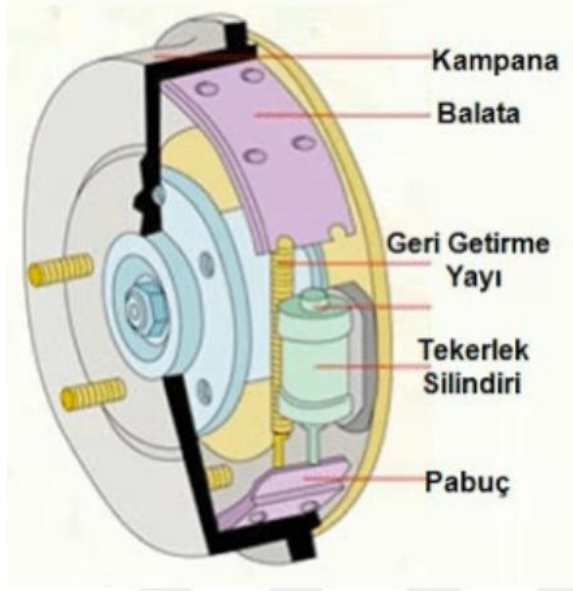
Kampanalı fren sisteminde tekerleklerle birlikte dönen bir kampananın içerisinde bulunan balataların dış çeperleri frenleme yapılmak istendiğinde, içinde bulunduğu kampananın iç çeperlerine dokundurulmuştur. Geniş bir alanda sürtünme sağlayan bu sistemlerde frenleme işlemi sadece ayakla uygulanan kuvvetle sağlanabilmiştir. Araçların

ulaşabilecekleri hızların artmasıyla ortaya çıkan ısının atılması sorun teşkil etmeye başlamıştır (Keskin, 2015).

Sürtünme malzemelerinin birbirleri ile iyi bir uyum göstermesi, tüm hava şartlarında yapısını koruması ve farklı dış etkilere karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Ayrıca dış zorlamalara karşı sürtünme katsayısı değerinin ve dağılımının büyük sapma göstermemesi ve sıcaklık karşısında yapısının bozulmaması istenir. Soğuma, kirlilik ve diğer birçok faktör göz önüne alındığında genellikle araçların ön frenlerinde disk tipi, arka frenlerinde ise kampana tipi frenler kullanılmaktadır. Sürtünme malzemesi olarak nitelendirilen balatalar kampana ya da disk frenlerle birlikte kullanılmaktadır. Fren disklerinde kullanılan tipine ‘pad’, kampana tipi frenlerde kullanılan tipine ise ‘segment ya da strip (kabuk)’ denmektedir. Ağır ticari araçlarda kullanılan tip ise ‘blok’ olarak adlandırılır (Gültekin, 2007).

Kampana fren silindirleri, silindir şeklindeki döküm gövdenin içinde iki piston, bir basınç yayı, iki lastik kapak, iki tane yuvarlak lastik pabuçtan oluşur. İki lastik kapak silindirin içine su, çamur gibi dış etkenlerin girmesini engeller. Bu tip fren silindiri her bir pistonun dışında bulunan lastik pabuçlara değen itici çubuklar ile balataları iterler (Şekil 2.4). Disk frenlerde ise fren silindiri kaliperin içine monte edilmiştir. Bütün fren silindirlerinin sistemin havasını almaya yarayan “hava tahliye rekorları” vardır.

Fren pedalına basınca, pistonlar itilir ve fren hidroliği sisteme doğru iletilir. Bu hidrolik basıncı pistonlara hareketi iletir bu da fren balatalarını ve pabuçlarını fren disklerine ve fren kampanalarına sürtünmeyi sağlar. Kampanalarda pistonlara geri çekilme hareketi vermek için yaylardan destek alınır (Ulus, 2013).



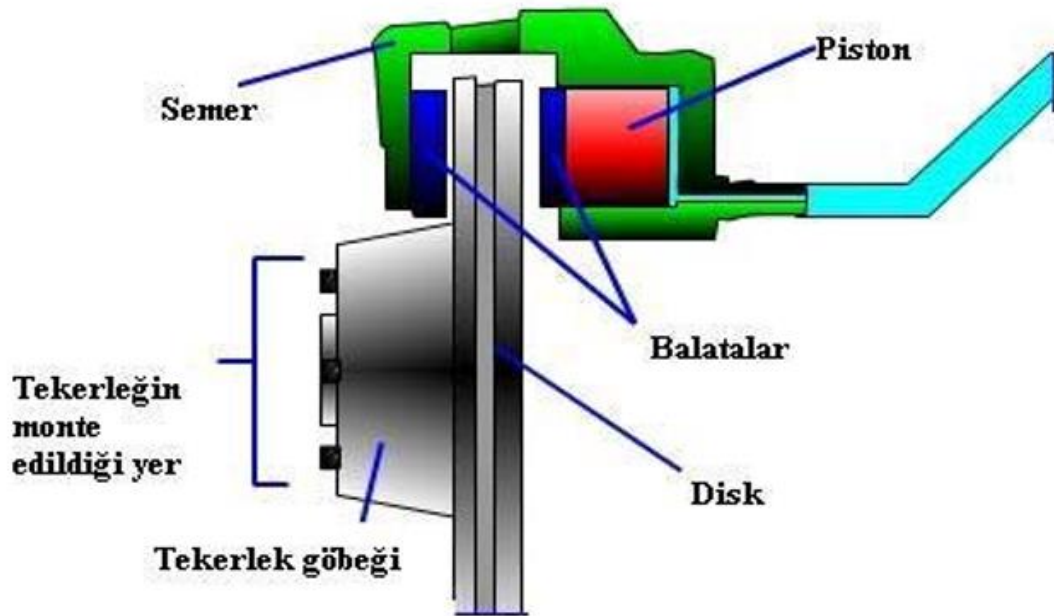
Şekil 2.4. Kampana fren, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Sitesi (2019)

### 2.5.2. Disk fren sistemi

19. yüzyılın sonlarında, trenlerin gelişmesi ve otomobil üretiminin başlamasıyla, amacı sürtünme kullanarak ve açığa çıkan ısıyı atmosfere dağıtarak kinetik enerjiyi termal enerjiye dönüştürerek aracı yavaşlatmak olan bir fren mekanizması geliştirilmenin gerekliliği ortaya çıkmıştır. İkinci Dünya Savaşı'nın başlamasından sonra, 1938'de, havacılık endüstrisindeki gerekliliği nedeniyle fren sistemi büyük bir önem kazandı. Tarihsel olarak, frenleme disklerini yapmak için kullanılan ilk malzeme, iyi ısı iletkenlik, iyi korozyon dayanımı, düşük ses, düşük ağırlık, uzun ömürlülük, sabit sürtünme gibi amaçlanan gereksinimlerine uygun bir malzeme olan gri dökme demirdi. Aynı zamanda düşük aşınma oranı ve iyi bir fiyat / fayda oranı vardır.

Otomobillerin tarihi 1700 yılında başladı. Nicholas Cugnot, Fransa kralını kullandığı topoları sürüklemek için neredeyse 10 tonluk bir araç tasarımını finanse etmeye ikna etti. Buhar kazanı ile çalışan araç, 10 km/s hıza ulaştı. Bununla birlikte mucit, ilk seferinde, icadını nasıl durduracağını düşünmemiş olduğunu keşfetti. Böylece, duyulan ilk otomobil kazası, ağır araba bir duvarı yıktığında meydana geldi. Cugnot'un aracı bugüne kadar İtalya'daki Torino Otomobil Müzesi'nde saklandı. 1886'larda, Almanya'da, Gottlieb Daimler ve Carl Benz dünyanın tarihini sonsuza dek değiştirecekti, çünkü bağımsız olarak, içten yanmalı otomobillerin ilk prototiplerini yarattılar. On yıl sonra etkin bir şekilde üretilmeye başladılar. Amerika Birleşik Devletleri'nde, 1890'da, "Hughes, (1971)" uyarınca, Amerikan Elmer Ambrose Sperry, mevcut elektromanyetik disk

“Sperry, (1894-6)” ile benzer bir fren icat etti. Manyetik fren olarak bilinen disk, bir frenleme torku uygulamak için başka bir diskle (fren diski) temas halinde yerleştirildi. İlginç olan, Sperry'in frenleme torkunun kısmen Foucault akımlarından ve kısmen de diskler arasındaki sürtünmeden kaynaklandığını fark etmesidir. “Nicholson (1995)” a göre, 1897 yılında fren balatalarında kullanılan ilk malzemenin mucidi Herbert Frood'du. Malzeme bir bitüm çözeltisi ile emprenye edilmiş pamuktan yapıldı ve hem vagon hem de ilk otomobillerde kullanıldı. Bugüne kadar fren malzemesi üreten bir firma olan Ferodo Company'nin kuruluşuna öncülük etti. Tarihçe, frenler için birçok farklı malzemenin (sürtünme malzemeleri) kullanımını kaydeder. Örneğin, vagonların frenlerinde ahşap ve deri kullanılmıştır. Bugüne kadar, birçok fren malzemesi polimer ve bitkisel lifler gibi organik bazlı elementlere sahiptir (Maluf vd., 2004).



Şekil 2.5. Disk fren (Sarıyerli, 2006)

Diskli frenler, dönme hareketini metal diskin tekerlekle eş eksenli olarak monte edilmesi sonucunda tekerlekle birlikte gerçekleştirirler. Kaliper adı verilen bir parça ile disk birbirlerine bir noktadan bağlıdırlar. Balata, kaliperin iç kısımlarında mevcuttur ve diskin iki yüzeyine yaslanan bu balatalar frenleme sırasında fren hidroliğinden aldıkları basınç kuvveti ile diskin her iki yüzeyine her iki yönden eşit kuvvetle baskı yaparlar (Şekil 2.5). Balataların dönme hareketi yapan diskin iki yüzünü sıkıştırma işlemini eşit şekilde

gerçekleştirebilmeleri için ya diskin ya kaliperin ya da her iki balatanın aksenal yönde hareket etmesi gerekir (Demir, 2011).

Günümüzde araçlarda frenlerin yaygın olarak kullanılma şekli genelleme yapılırsa ön tekerleklerde diskli frenler, arka tekerleklerde ise kampanalı frenlerin kullanılması olarak söylenebilir. Gün geçtikçe ve diskli frenler geliştirildikçe dört tekerlekte de diskli fren kullanımını yaygınlaşmaktadır.

Fren diski ve tekerlek göbeği cıvata yardımı ile birbirlerine bağlıdır ve tekerlek göbeği ile birlikte dönmektedir. Balatalar arasında sıkıştırılan fren diski taşıtın yavaşlamasını veya durmasını sağlar. Taşıtın kinetik ve ihmal edilen statik enerjisi, frenleme sırasında balata ve disk yüzeylerinin birbirlerine sürtünmesi ile ısı enerjisine dönüştürülür. Fren diskleri frenleme sırasında oluşan bu sürtünme kuvvetlerine ve aşırı ısıya karşı dayanıklı malzemeden yapılmışlardır. Fren disklerinin her iki yüzeyi de iyi bir frenleme ve tutuş sağlamak amacıyla oldukça hassas işlenmek zorundadır (BTÜ, 2013).

#### **2.5.2.1. Disk fren malzemeleri**

Farklı uygulamalar için kullanılmak üzere dizaynı ve üretimi yapılabilen malzemeler, yüzyıllardır kullanılan sıradan ve geleneksel malzemelerden (bakır, dökme demir, bronz v.s), yeni geliştirilmiş ileri teknoloji ürünü malzemelere (kompozitler, teknolojik seramikler, yüksek performanslı çelikler, vs.) kadar değişmektedir. Malzeme çeşidinin çokluğundan dolayı, en doğru üretim yöntemi ile üretilecek ve doğru uygulama sahasında kullanılacak olan doğru malzemenin seçimi oldukça zorlayıcı olmaktadır. Bütün bu malzemelerin teker teker incelenmesi ve karakterize edilmesinde çıkabilecek zorluklara ve karışıklıklara karşın, malzemelerin geniş bir sınıflandırmaya tabi tutulması gereği doğmuştur (Gültekin, 2007).

Fren malzemesinin seçimi yapılırken çalışma şartları göz önünde bulundurulur. Frenlerde sürtünmenin önemi bilinmektedir ve bu kriterler göz önüne alınır. Sürtünme elemanları belirlenirken genel olarak düşük sıcaklıklardan çok yüksek sıcaklıklara kadar sürekli değişebilen çalışma şartlarında ve sıcaklıklarında ve yüksek hızlarda çalışmalarına özen gösterilir. Mekanik gerilme kuvvetlerine ve ısıl etkenlere karşı disk ve balatadan elverişli, kullanışlı olması beklenir. Fren sistemlerinde sürtünmeden dolayı kısa zamanda oluşan sıcaklık artışının, en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılabilmesi için malzemenin uygun

tasarıma yüksek ısı iletim katsayısı ile uygun özgül ısıya sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda malzeme seçilirken sıcaklık artışı nedeni ile genişlemeye sebep olmaması ve disk yapısının bozulmaması açısından ve minimum deformasyon göstermesi için ısı genleşme katsayısının düşük olması istenir. Bununla birlikte disk malzemesinin biriken ısıyı hızlıca uzaklaştırabilmesi için yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması beklenir (Sarıyerli, 2006).

### ***Dökme Demir***

Dökme demirlerin çok geniş aralıkta değişen mukavemet, sertlik, korozyon direnci, kolay işlenebilme, aşınmaya dayanıklılık, titreşimleri yutma ve düşük maliyeti gibi özelliklerinden dolayı çok geniş alanda kullanılmaktadır. Araştırmalar sonucunda ortaya çıkan yeni malzemelerin güçlü savaşına rağmen dökme demirler çok sayıda mühendislik uygulamaları içinden halen işlevsel ve aynı zamanda ekonomik olarak tercih edilirler. Dökme demirlerde karbon miktarının büyük kısmı katılaşma sırasında ayrışır ve dökme demirin mikro yapısında ayrı bir yapı elemanı olarak görülür. Karbonun oluşturduğu şekil ve biçim dökme demirin tipini belirlemede ve böylece mekanik özelliklerine etki etmektedir. Dökme demirlerde değişik grupların oluşumunu, kimyasal kompozisyon, soğuma hızı, döküm sıcaklığı, üretim yöntemleri gibi değişkenler belirlemektedir. (Sübütay H., 2015) Yaygın olarak kullanılan disk malzemeleri; ince grafit tabakalı dökme demir, yüksek karbonlu grafit tabakalı dökme demir, alüminyum metal matris kompozit (Al-MMK), dökme çelik, karbon-karbon kompozit, genel olarak %20 SiC-Alüminyum metal matris kompozitle güçlendirilmiş, karma (Mixed) yapı ve seramikler kullanılmaktadır.

İnce karbon grafit tabakalı dökme demirlerin başlıca tercih edilme sebepleri yorulma dayanımlarının yüksek olması, sessiz çalışmaları, titreşimlerinin az olması ve düşük aşınma dirençleridir. Genel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Dökme demir diskler kendi içlerinde, titanyum alaşımlı dökme demir, kompakt grafitli demir, yüksek karbonlu dökme demir ve gri dökme demir olarak sınıflandırılmaktadır (Çavdar vd., 2008).



**Tablo 2.2.** Dökme demir materyal özellikleri (Manjunath, 2013)

Materyal Özellikleri	Dökme Demir
Isı iletim katsayısı (W/mK)	50
Yoğunluk, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	6600
Özgül ısı, $c$ (J/kg°C)	+/380
Genleşme katsayısı (10 <sup>-6</sup> /K)	0,15
Elastizite modülü GPa	110
Sürtünme katsayısı, $\mu$	0,5
Isı transfer katsayısı	120

### ***Kompozit Malzemeler***

İki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerinin, yeni ve tek bir malzemede birleştirmek amacıyla, makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelere kompozit malzeme denir. İki malzeme, mevcutta var olan orijinal malzemelerde elde edilemeyen bir özellik veya özellikler elde etmek için birleştirilir ve böylelikle kompozitler üretilmiş olur (Özdin, 2006).

Kompozit malzemeler zor bükülme, mukavemet, yüksek sıcaklığa dayanıklılık, korozyon direnci, sertlik ve iletkenlik gibi istenilen özelliklerin çoğunu elde etmek için tercih edilmektedir. Kompozit malzemede bileşenler en önemli özelliklerini kaybetmemelidirler. Farklı kimyasal yapılara sahip en az iki malzemenin birlikteliğinden oluşurlar.

Kompozit kelimesi yukarıdaki bilgiler göz önüne alınarak düşünüldüğünde çok kristalli metalleri de kapsadığı ile karıştırılabilir. Kompozit kelime anlamı bir tarafa bırakılıp daha detaylı bakıldığında kısacası tanımı kısıtlandığında şu bilgilere ulaşılır:

- Doğal yollara oluşmamalı yapay üretilmeli
- En az iki malzemenin bir araya gelmesi ile oluşabilmeli ve bu malzemeler bir ara yüzle birbirinden ayrılabilirmeli,
- Tabaka olan aynı metal malzeme kullanılarak yapılan oluşumlar kompozit olarak adlandırılmazlar.

- Kompoziti oluşturan bileşenlerden hiçbiri tek başına kompozitin sahip olduğu özellikleri göstermemelidir (Eserci, 2007).

Kompozit malzeme özelliğinin belirlenmesinde her iki bileşen de katkı sağlar. Farklı terimlerle adlandırılabilirler; sert, süreksiz, yüksek dayanım gösteren faz takviye elemanı gibi. Kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinin taşındığı ana yapıya matris denir ve bu yapının önemli görevleri bulunmaktadır. Matris kabaca hücre zarı gibi düşünülebilir. Takviye elemanlarını sararak dışarıdan gelen her türlü etkiye karşı korur, kompozit üzerine gelen yükü takviye elemanlarına eşit şekilde dağıtır ve kompozit içerisindeki hata oranını en aza indirir (Atik, 1994).

Matrisi şekil değişimine karşı koruyup, dışarıdan gelen etkileri sönmleyen takviye elemanı aynı zamanda dayanımı artırır. Yüksek akma ve kırılma gerilmesine sahip olan birçok araştırmada yer alan takviye malzemeleri özelliklerini yüksek sıcaklıklarda değiştirmemektedirler (Uygur ve Saruhan, 2004).

Şimdiye kadar belirtilen özelliklere sahip olan kompozit malzemeler genellikle, matris malzemesinin çeşidine göre; plastik, metal ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılırlar. Ayrıca takviye elemanının çeşidine göre; parçacık takviyeli, sürekli elyaf takviyeli, kısa elyaf takviyeli, rastgele düzlemsel yönlendirilmiş takviyeli, tabakalı kompozit olarak gruplandırılırlar (Özdin, 2006).

Takviye elemanlarının nasıl dağıldığı kompozitin özelliklerini belirleyen unsurların başında gelir. Örnek verilecek olunursa; parçacık şeklindeki takviyeli kompozitlerde parçacıkların matris içerisine eşit olarak dağıldığı gözlemlenirse izotropik özellikli olur (Muratoğlu ve Demirel, 2009).

Özgül ağırlıkları düşük olmasına karşın mukavemet özellikleri oldukça yüksektir. Kompozitlerin tercih edilme nedenleri arasında istenilen değer aralıklarına uygun mukavemet özelliklerinde olmaları, istenilen kombinasyonlarda bir araya getirilebilmeleri, yüksek sıcaklıklarda göstermiş oldukları dayanım özellikleri bulunmaktadır (Ekici, 2004).

### ***Metal matrisli kompozitler***

Bilimin gelişmesi eşliğinde, ekonomik ve teknik ihtiyaçlar sebebiyle yeni malzeme arayışları başlamıştır. Bu sebeple metal matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Son 40 yıl içinde malzeme bilimindeki en büyük değişik ve yeniliklerden biri MMK malzemelerin üretilmesi ve geliştirilmesidir (Buytoz ve Eren, 2007).

Kompozit malzemelerde metalik matrislerin kullanılmasının sağladığı üstünlükler, metallerin bilinen bazı özellikleriyle ilgilidir. Bunlar;

- Çekme dayanımının ve elastisite modülünün yüksek olması,
- Tokluk derecesinin yüksek olması ve uyumlu darbe özellikleri,
- Sıcaklık farklılıklarına karşı duyarlılık,
- Aşınmayı önleme kabiliyeti ve yüzeysel çatlakları önleyerek geciktirme,
- İyi ısı iletkenlik,
- Farklı yöntemlerle istenilen forma getirebilme (Gökkaya, 2005).

Metal matrisli kompozitleri çok eksenli gerilmelere maruz bırakarak mekanik özellikleri araştırıldığında sünekliğin azaldığı görülmüştür. Çok eksenli gerilmelerin matrisin içerisindeki boşluğu arttıracak varsayımı üzerinde durulmaktadır. Kompoziti oluşturan bileşenler birbirleri içerisinde çözünmezler (Atmaca, 2006).

Al, Mg, Ti ve bazı alaşımların metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak daha çok tercih edildiği görülmektedir. Her bir metalin tercih edilme nedeni farklıdır. Al ve alaşımları hafif oluşları, korozyon dirençlerinin fazla oluşu gibi nedenlerden dolayı talep edilmektedir. Hafif metal alaşımları özgül ağırlığın mukavemete oranla düşük olması göz önünde bulundurularak hafif yapı imalatlarında tercih edilirler. Aynı zamanda hava ile temasta korozyon dayanımlarının fazla oluşu tercih edilme nedenleri arasındadır. En sık kullanılan takviye elemanları SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, TiC, bor ve grafitir (Erdoğan, 2005).

Matris olarak alüminyumun demirden sonra tercih edilmesine karşın keşfedilmesi çok yenidir. Çelik imalatında deoksidan olarak kullanılma nedeni oksijenle olan uyumudur.

Aynı zamanda alüminyumun elektrik iletkenliği iyidir ve bu sebeple sık kullanılır. Fakat alüminyumun saf halinin mukavemet özelliği çok düşüktür ve diğer metallere göre yumuşaktır. Bu nedenle genellikle mühendislik alanında saf hali tercih edilmez. Alüminyuma çok iyi soğuk şekil verme işlemi yapılabilir böylelikle mukavemeti ilk duruma oranla iki kata kadar çıkartılabilir. Saf alüminyumun fiziksel özelliklerinden bazıları Tablo 2.3’de mevcuttur (Çöçen, 1997).

Alüminyum elde edilme kolaylığı, üretilmesi ve kolay taşınabilir olması sebebi ile geleceğin teknoloji malzemesidir. Ancak yüksek sıcaklıklarda kullanmak istenmesi sebebi ile yapılan işlemler mekanik özelliklerinde kötüleşmeye sebep olduğundan alüminyumun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmeye yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Üzerinde en çok yoğunlaşılacak çalışma seramik bazlı malzemeler eklenerek oluşturulan alüminyum matrisli kompozit malzemelere yapılmaktadır. Seramik katkılı malzemenin eklenme işlemi iki farklı yöntemle yapılır. Bunlar ergiyik yöntem ve toz metalürjisidir. İlk yöntemde seramik malzeme katı, alüminyum ise sıvı esastır ve birbirlerine eklenirler. İkinci yöntemde ise her iki malzeme de toz halinde katıdır ve toz metalürjisi metodu ile kompozit malzeme elde edilir. İki yöntemde temel amaç karışımı homojen şekilde yapabilmektir (Buytoz ve Eren 2007).

**Tablo 2.3.** Alüminyumun fiziksel özellikleri (Şahin, 2000)

Materyal Özellikleri	Alüminyum
Özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	36
Ergime sıcaklığı (°C)	71000
Ergime ısısı (KJ/kg)	320
Elastisite modülü (GPa)	210
Isıl genleşme katsayısı (1/K)	0,5
Isı iletim katsayısı (W/mK)	150

### ***Paslanmaz Çelik Diskler***

Bazı araçlarda diskler diğerlerine göre yüksek ısı altında daha uzun süre kalırlar. Hafif ve ağır ticari araçlarda bu sebepten ötürü ısı yorulmaya karşı dirençli diskler tercih edilmelidir. Bu disklerde kullanılan malzeme Tablo 2.4’te özellikleri verilmiş olan paslanmaz çeliktir (Demir, 2011).

**Tablo 2.4.** Paslanmaz çelik materyal özellikleri (Manjunath, 2013)

Malzeme Özellikleri	Paslanmaz Çelik
Isı iletim katsayısı (W/mK)	36
Yoğunluk, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	71000
Özgül ısı, $c$ (J/kg°C)	320
Genleşme katsayısı, $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /k)	0,12
Elastisite modülü, GPa	210
Sürtünme katsayısı, $\mu$	0,5
Isı transfer katsayısı $h$ (W/Km <sup>2</sup> )	150

### ***Seramik fren diskleri***

Performans beklentisi yüksek olan araçlarda, yarış otomobillerinde daha sık kullanılmaktadır. Fiber eklenerek performansa katkı sağlanır. Diğer disklerle kıyasla çok hafiftirler. Taşıt ağırlığını azaltmaktadırlar. Bunun yanı sıra seramik diskler 1400°C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Sıcaklığın frenleme üzerine olan olumsuz etkisini absorbe ederek kullanım ömrünü artırır. Dış etkenlerle etkileşiminde paslanma oluşmaz (Demir, 2011).

### **2.5.2.2. Geometrisine göre disk çeşitleri**

#### ***Normal diskler***

Araçlarda çoğunlukla kullanılan düz yüzlü disklerdir (Şekil 2.6). Balatalar ile temas eden yüzey alanı daha fazla olduğundan başlangıçta daha iyi bir frenleme gücü vardır. Normal disklerle ilgili problem frenleme esnasında oluşan ısının ve balata ile disk arasında açığa çıkan ısının geç uzaklaşmasıdır. Eğer diskler zayıf veya uygun olmayan balata ile kullanılırlarsa bu aşırı ısı disklerle zarar verebilir (Mohd, 2013).



Şekil 2.6. Normal disk (Mohd, 2013)

### *Delikli diskler*

Şekil 2.7’de görülebileceği üzere bu tür disklerin yüzeyine her taraftan disk boyunca delik açılmıştır. Böylece yüzey alanı artırılarak daha hızlı soğuma amaçlanmıştır. Delikler gaz birikintilerinin uzaklaşmasına yol açtıkları için fren yıpranması az da olsa önlenmiş olmaktadır. Delikli disklerle ilgili problem deliklerin çatlamaya eğilimli olması yanı sıra belli bir zaman sonra toz ve atıkları biriktirmeye eğilimli olmasıdır (Mohd, 2013).



Şekil 2.7. Delikli disk (Mohd, 2013)

### *Hava kanallı ve delikli diskler*

Bu disklerin yüzeyinde çapraz kesik çizgiler mevcuttur (Şekil 2.8). Bunun iki nedeni vardır. İlk olarak delikli disklerde olduğu gibi balataların havalandırmasını sağlayarak fren yıpranmasını önlerler. İkinci olarak ise balata tozunun çıkmasını sağlayarak balata yıpranmasını önlerler. Yüzey temiz kaldığı için daha iyi bir frenleme sağlanır. Kanallı

disklerin takılma şekli önemlidir. Disk normal yönde döndüğünde kanallar dışarı doğru açılmalıdır. Bu şekil fren tozunun dışarı atılmasını sağlar. Ters takılması fren tozunun disk göbeğinde toplanmasına sebep olabilir (Çavdar vd., 2008).

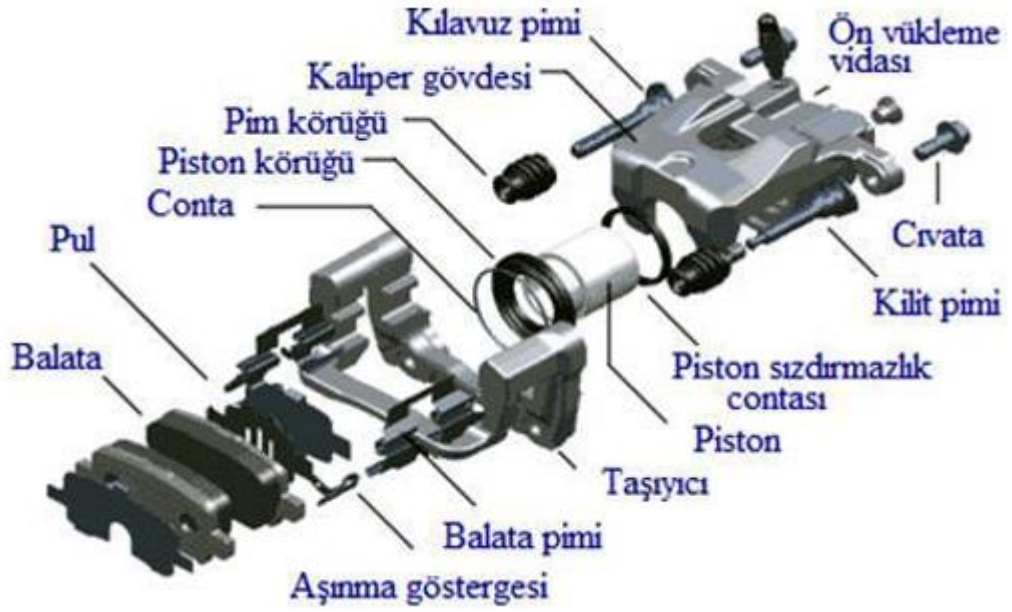


Şekil 2.8. Hava kanallı-delikli disk (Çavdar vd., 2008)

### 2.5.2.3. Disk fren sisteminin diğer elemanları

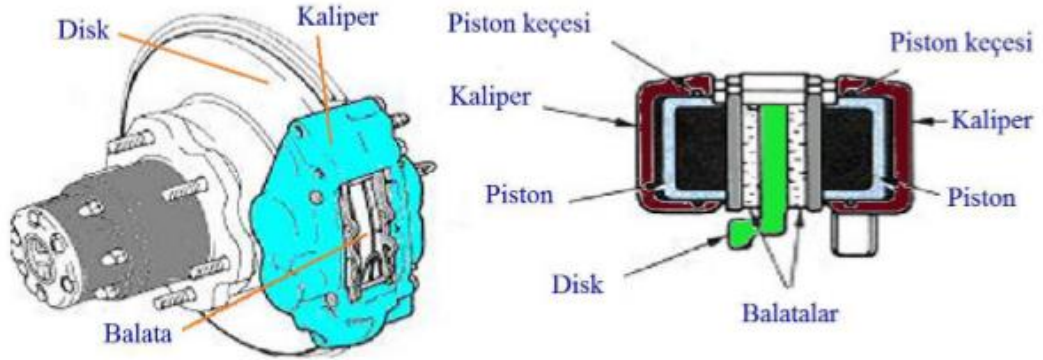
#### *Fren kaliperi*

Fren kaliperleri diske temas ederek sürtünme kuvveti ile durmayı sağlayan balataları taşıyan elemanlardır. Frenleme esnasında oluşan aşırı moment reaksiyonlarını, üzerine bağlı olduğu dingil başına iletir. Kaliperler, cıvatarla şaft başlarına tutturulmuştur. Fren kaliperi taşıdığı piston sayesinde hidrolik sıvıyı iletir. Balatalara pistonlardan iletilen bu hidrolik basınç sayesinde frenleme işlemi gerçekleştirilir (Demir, 2011). Kaliperi oluşturan parçalar Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Kaliper detayı (Yakut, 2016)

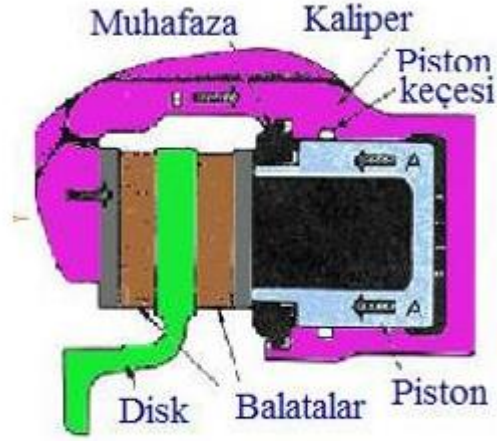
*Sabit kaliperi* (Şekil 2.10) her iki yüzeyinde pistonlar mevcuttur. Frenleme kuvveti, pistonların hidrolik baskı kuvvetini balatalara iletmesi ile olur (MEB, 2013).



Şekil 2.10. Sabit kaliper (Yakut, 2016)

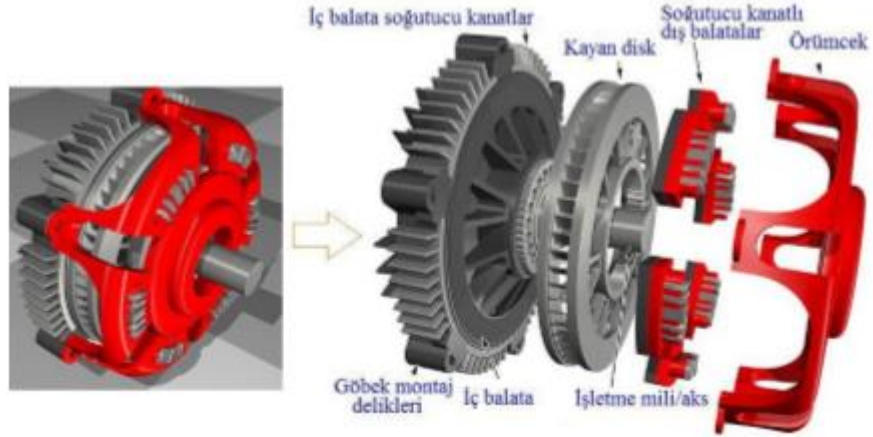
*Yüzer kaliperlerde* (Şekil 2.11) bir adet piston bulunmaktadır. Sistemden gönderilen hidrolik sıvı balataların her iki yüzeyisin kapsamaktadır ve pistonu iterek balataları diske temas ettirir (Yakut, 2016).





Şekil 2.11. Yüzer kaliper (MEB, 2013)

*Tam temaslı kaliperler* tasarım olarak çok farklıdır. Verimleri diğerlerine oranla yüksektir, soğuma sistemleri de özel olarak tasarlanmıştır. Bu kaliperler Şekil 2.12’de gösterilen kısımlardan oluşmaktadır (BTÜ, 2013).



Şekil 2.12. Tam temaslı kaliper (MEB, 2013)

### ***Fren balatası ve pabucu***

Pabuç, balata ile temas eden, kaliper içerisindeki metal bir destek plakasına sabitlenmiştir. Pabuçlar, kaliperi pimler aracılığı ile sabitlerler. Pimler de maşalar yardımı ile kalipere desteklenmiştir. Diskli frenlerde balatanın yüzey alanı küçüktür bu sebeple birim yüzeydeki fren kuvveti fazladır. Diskli frende kullanılan balatalarda sürtünme dayanımının fazla olması beklenir. Balatalardan yüksek sıcaklıklara karşı da dayanıklı

olması istenir ve buna uygun malzemeler tercih edilir. Bunların başında asbest gelir. Ayrıca bu malzemelerden ısı dayanımının yanı sıra sertleşip camlaşmaması da beklenir (BTÜ, 2013). Örnek bir fren balatası Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. Fren balatası (Yakut, 2016)

### 2.5.3. Disk fren sisteminin çalışma prensibi

Disk frenler diskten ve kalipere ait alt elemanlardan oluşurlar. Fren pedalına kuvvet uygulandığında sistem içerisindeki sıvı borulara gönderilir. Boru içerisindeki sıvının geçtiği kesit alan daraltılarak uyguladığı basınç artırılır ve kaliperin içindeki balataya aksel yönde hareket vermek sureti ile balata pistonuna iletilir. Kuvvet uygulanan alan piston üzerindeki alandan çok büyüktür ve sıvılar basıncı buldukları alanın her noktasına eşit iletilir. Böylece 2 kilogramlık kuvvet ile 2 tonluk basınç oluşturulabilir. Disk ve balata birbirine kenetlenir gibi konumlanır. Bu etkinin sonucunda çok yüksek ısı enerjisi ve sürtünme kuvveti meydana gelir. Bu sürtünme kuvveti disk rengini değiştirecek kadar etkilidir.

Özetle frenleme sistemi araçlarda kinetik enerjiiyi ısı enerjisine çevirirler. Oluşan bu yüksek ısının disklerden ve balatadan mümkün olan en hızlı şekilde ulaştırılması gerekir. Bunun üzerine yapılan çalışmalar arasında en yaygın olanı ısı transfer katsayısı yüksek disk malzemesi üretmek ve kaliperlere hava boşlukları yerleştirmek vardır (Ereke vd., 1995).

#### **2.5.4. Disk fren ile kampanalı fren sisteminin karşılaştırılması**

Disk frenlerdeki baskı kuvveti kampanalı frenlere göre yüksektir. Bu kampanalı frenin elemanlarının maruz kaldığı kuvvetin daha küçük olduğu anlamına gelir. Kampanalı fren malzemeleri daha ekonomik imal edilebilirken daha kullanışsız olmaktadır.

Kampanalı frenlerde iç çevrim oranı büyüktür bu nedenle baskı kuvveti ve buna bağlı olarak pedal kuvveti de daha düşük olduğundan otomobillerde ek bir kuvvetlendirici düzeneğe gerek yoktur. Bu da kampanalı frenlerin maliyetinin düşmesine avantaj sağlar.

Disk fren tercih edilmeyen araçların başında yol miktarı fazla olan ağır taşıtlar gelir. Balata basıncının yüksek olması aşınmaları arttırır. Aşınan balataların servis ömrü kısalmış sürekli değişim gerektirmeleri gerekir ve bunun yanı sıra tehlikeye sebebiyet verebilirler.

Disk frenler kampanalı frenlere göre daha hafiftir. Hafif olması sebebi ile disk fren ve balataları kampanalı frene kıyasla daha çabuk ve yüksek miktarda ısınırlar. Özellikle yüksek hızlardan sonra durmak istenirse bu frenlemede ortaya çıkan ısının büyük bir kısmı depolanmak zorunda kalabilir (Demir, 2011).

#### **2.6. Bazı Bilgisayar Destekli Tasarım Programları**

Bu bölümde dünyada en çok tercih edilen bilgisayar destekli tasarım programları ele alınmıştır.

Bilgisayar Destekli Tasarım alanında kullanılan birçok yazılım bulunmaktadır. Zaman içerisinde bunlara yenileri eklenmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılanlar;

- Solidworks,
- Catia,
- Pro/Engineer,
- Autodesk Inventor,
- Mechanical Desktop,

### **2.6.1. Solidworks**

Solidworks yenilikçi, kullanımı kolay, Windows için tasarlanmış 3 boyutlu tasarım programıdır. Her türlü makine, tesis, ürün tasarımında Windows'un kolaylıklarını kullanarak çok hızlı bir şekilde çizim yapmaya yardımcı olur.

Solidworks ile animasyon oluşturmak oldukça basittir. Solidworks Animator, Solidworks'e entegre edilmiş, Solidworks'un içinde çalışan bir animasyon programıdır. Dosya transferi veya dosya dönüşümüne gerek yoktur. Bunlar; dinamik olarak montaj hareketi, montajları açma/kapama animasyonları, döndürülebilir animasyonlar olabilir. Windows entegreli her tür cihazda izlenebilir. Solidworks uyumlu dizayn analiz yazılımıdır. Bu yazılım sayesinde parçaları, birleşik modelleri ve metal levha modelleri yapısal ve ısıl etkilere karşı hızlı ve etkin bir şekilde analiz edilebilir. (Yakut, 2016).

### **2.6.2. Catia**

Bilgisayarlı Grafik Destekli Üç Boyutlu İnteraktif Uygulama (CATIA) dünyanın en önde gelen Bilgisayar Destekli Tasarımı (CAD), Bilgisayar Destekli Üretimi (CAM), Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) paketlerinden biridir. Fransız şirket olan Dassault Systèmes tarafından geliştirilmiştir.

IBM tarafından dünya genelinde pazarlanan CATIA, en iyi Ürün Yaşam Çevrimi (PLM) sunar. Ürün imal etmek için tasarım ve analizi tek bir platformda toplar ve bir ürünü geliştirmeyi daha hızlı hale getirir. CATIA otomobiller, havacılık, gemi yapımı, diğer endüstriyel alanlar dahil olmak üzere çeşitli kullanım alanına sahiptir ( Pallai, 2011).

### **2.6.3. Pro/Engineer**

Pro Engineer, 1987 yılından beri geliştirilmekte olan unsur tabanlı bir bilgisayar destekli mühendislik programıdır. Pro Engineer programı mühendislik uygulamalarında genel olarak katı modelleme, model montajı, iki boyutlu izdüşüm görüntülemeleri, sonlu elemanlar analizleri, doğrudan ve paramterik modellemeler için kullanılır. Ayrıca CNC gibi nümerik kontrol üniteleri ile de uyumlu olan Pro Engineer, ülkemizde üretim ve imalat sektöründe yaygın bir kullanıma sahiptir. Daha çok otomotiv, tarım aletleri, elektrik elektronik, kalp hazırlama, savunma sanayii alanlarında kullanılan Pro Engineer programı; mühendislik tasarımı gerektiren her alanda etkin bir biçimde kullanılabilir.

Pro Engineer Creo Parametric Technology Corporation firması tarafından yaklaşık 30 yıldır geliştirilen Pro Engineer programı güncel sürümlerinde isim değişikliğine gitmiştir. 2010 yılında PTC tarafından yapılan bu değişiklik ile Pro Engineer Wildfire 5.0 sürümünden itibaren programın adı Creo olarak değiştirilerek firmanın diğer programları da tek çatı altında toplanmıştır. Bu isim değişikliğine rağmen özellikle ülkemizde program halen Pro Engineer olarak anılmaktadır.

Endüstride en çok kullanılan 3D CAD programlarının başında gelen Pro Engineer programı, parametrik modelleme alanındaki ilk programlardandır. Pro Engineer programının mühendislik programlarına kattığı parametrik modelleme özelliği sayesinde tasarımı yapılan ürün veya nesnelere boyuttan bağımsız olarak birbirleri ile açı ve oransal olarak ilişkilendirilerek modellenabilir. Böylece modeller üzerinde yapılan değişiklikler çok daha basit ve pratik olmaktadır (Cadsay, 2019).

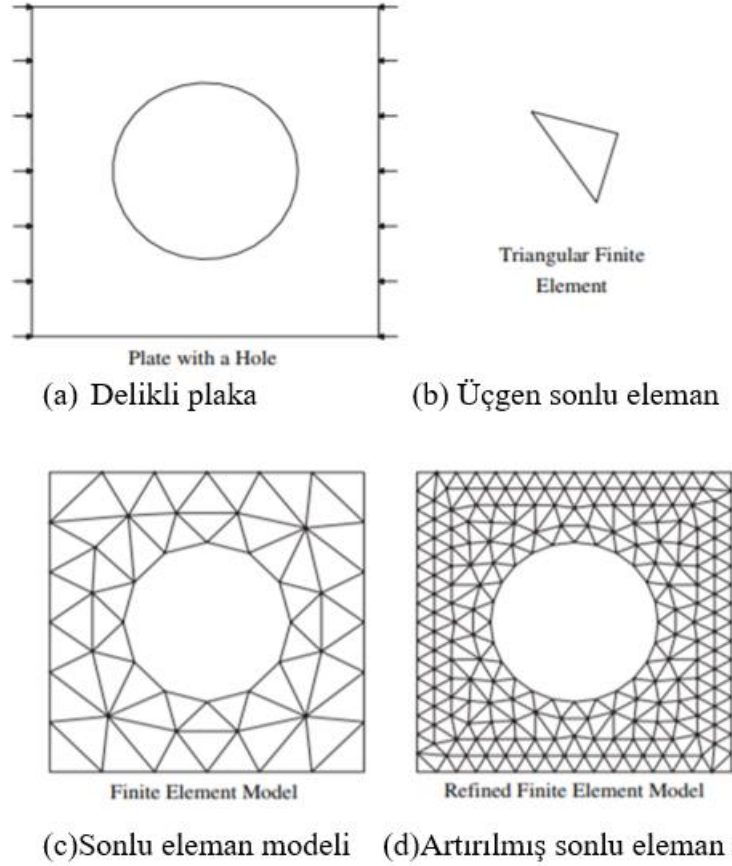
## **2.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)**

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemlerinin sayısal çözümü için güçlü bir araç haline gelmiştir. Uygulamalar uçak, bina, köprü, otomotiv yapılarında ısı analizi, akışkan akışı, manyetik akı ve diğer benzeri problemlerde deformasyon ve gerilmeye göre değişiklik gösterir. Bilgisayar teknolojisi ve CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) sistemlerinin gelişmesi ile karmaşık problemler nispeten kolaylıkla modellenabilir. İlk önce bir bilgisayarda prototip ve birkaç alternatif yapılandırma oluşturularak test edilir. Sonlu elemanlar yönteminde temel problemi anlayarak temel teoriyi, modelleme tekniklerini ve hesaplama yönlerini tayin ederek çözüm yapılır. Bu analiz yönteminde, karmaşık bir bölge süreklilik sonlu elemanlar olarak adlandırılan basit geometrik şekillere ayrılmıştır. Malzeme özellikleri ve diğer ilişkiler bu unsurlar üzerinde ele alınır ve eleman köşelerinde bilinmeyen değerler cinsinden ifade edilir. Bir montaj süreci, usulüne uygun yükleme ve kısıtlamaları göz önünde bulundurularak, bir denklem kümesiyle sonuçlanır. Bunların çözümü denklemler bize sürekliliğin yaklaşık davranışını verir (Chandrupatla ve Belegundu, 2012).

FEM' in temel yaklaşımını açıklamak için, Şekil 2.14.a'da gösterildiği gibi delikli bir plaka düşünülürse plakadaki her bir nokta için bir ısı dengesi denklemi yazmak basittir. Bununla birlikte, motor bloğu gibi bir geometride değişkenlerin klasik yöntemlerle ayrılması mümkün değildir. Geliştiriciler mühendislikte karmaşık geometri ile başa

çıkabilecek sonlu eleman programı tasarladılar. FEM' in temel düşüncesi parçayı sadece eleman olarak adlandırılan sonlu elemanlara bölmektir. Şekil 2.14.b'de gösterildiği gibi düğümlere ayırır ve yaklaşık bir çözüm elde edilir. Buna sonlu elementler denir ve mesh oluşturma işlemine mesh üretimi denir.

Sonlu elemanlar yönteminde sıcaklık alanı, bir bilgisayar programı tarafından belirlenebilir. Doğrusal problemler için çözüm bir lineer denklem sistemi çözülerek belirlenir; bilinmeyenlerin sayısı düğüm sayısına eşittir. Makul bir şekilde doğru bir çözüm elde etmek için genellikle binlerce düğüm gereklidir bu yüzden bilgisayarlar bu denklemleri çözmek için gereklidir. Genellikle elemanların (ve düğümlerin) sayısı arttıkça çözümün doğruluğu artar fakat bilgisayarda analiz zamanı ve dolayısıyla maliyet de artar. Sonlu elemanlar programı her elemandaki, her düğümdeki sıcaklığı ve ısıyı belirler. Seçilen sonuçlar grafikler gibi bilgisayar görselleştirmeleri olarak sunulur (Fish ve Belytschko, 2007).



Şekil 2.14. Geometri, Yükler ve Sonlu Elemanlar Mesh Methodu

## 2.8. Sonlu Elemanlar Paket Programları

Yapısal analiz, termal analiz, akışkanlar mekaniği CFD (Computational Fluid Dynamics), zemin mekaniği, uçak mühendisliği nükleer mühendislik, kaya mekaniği, Elektrik, elektromanyetik alanlar (Electrical / Electrostatics, Electromagnetics) ve daha sayabilecek pek çok mühendislik ve fizik problemlerinin çözümünde araç olarak kullanılmaktadır.

FEM kullanılan sektörlerden bazılarının listesi aşağıdadır.

- Havacılık
- Otomotiv
- Biyomedikal
- Köprüler ve Yapılar

Bazı FEM paket programları aşağıdaki gibidir (Demir C., 2019).

### 2.8.1. ANSYS

Bilgisayar destekli olarak mühendislik çalışmalarında analiz ve simülasyonların yapılabildiği bir bilgisayar destekli mühendislik programıdır. ANSYS programı mekanik, yapısal analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi farklı disiplinlerde etkili çalışmalara fırsat tanır.

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de en çok kullanılan CAE (bilgisayar destekli mühendislik) programlarının başında gelen ANSYS programı sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile tek parça halinde analizi çok zor olan karmaşık geometrideki cisimlerin küçük ve çok sayıda parçalara bölünerek ayrı ayrı analizleri yapılır. Sonlu sayıdaki elemanın analizi sonucu elde edilen sonuçlar birleştirilerek tek ve tutarlı bir analiz sonucu elde edilir (Cadsay, 2019).

### 2.8.2. ABAQUS

Çok sık kullanılan sonlu eleman pkaet programlarından biridir. Abaqus' ün dört ana çekirdek yazılımı vardır. Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit, Abaqus/CFD ve Abaqus/CAE. Abaqus/Standard genel amaçlı sonlu elemanlar modülüdür. Kullanıcılarına farklı uygulamalarda çözüm olanağı sağlar. Abaqus/Explicit dinamik sonlu elemanlar çözücüsüdür. Abaqus/CFD hesaplamalı akışlar dinamiği uygulamasıdır. Abaqus/CAE ise Abaqus 'un tüm modelleme, süreci yönetme ve çözüm sonuçlarını detaylama özelliklerini barındıran bir arayüzdür (A-Ztech, 2019).

### 2.8.3. NASTRAN

NASA' da geliştirilmeye başlanan Nastran, 40 yılı aşkın bir süredir geliştirilmeye devam etmektedir. Çoğu uzay mekikleri, hava araçları ve taşıtlar Nastran ile analiz edilmektedir. Nastran karmaşık mühendislik işlerinde hızlı ve hassas çözüm sunmak için optimize edilmiştir. Disiplinli çözümler sunmaktadır. Kabiliyetleri; Linear-non linear çözümler, dinamik ve titreşim analizler, termal analizler, optimizasyon, rotordynamics, akustik, temas problemleri, çarpışma-patlama analizleri, montaj parça analizleri, plastik deformasyon ve metal şekillendirme olarak sıralanabilir (Bias Mühendislik, 2019).

## 2.9. Optimizasyon Temel Bilgi

Optimizasyon, en genel tanımıyla, bir sistemde, belirlenen kısıtlar altında, belirlenmiş bir amaç fonksiyonunun değerinin iyileştirmesi temeline dayanan karar değişkenlerinin alacağı değerleri belirleme işlemidir. Başka bir şekilde ifade edilecek olunursa istenen bir çıktıyı elde etmek amacıyla, sistem girdilerinin ve/veya bu girdilerin değerlerinin ne olacağını belirleme sürecidir. Amaç fonksiyonunun en iyilenmesi demek, problemin türüne göre en küçültülmesi (minimizasyon) veya en büyütülmesi (maksimizasyon) olabilir (Küçükkoç İ., 2019).

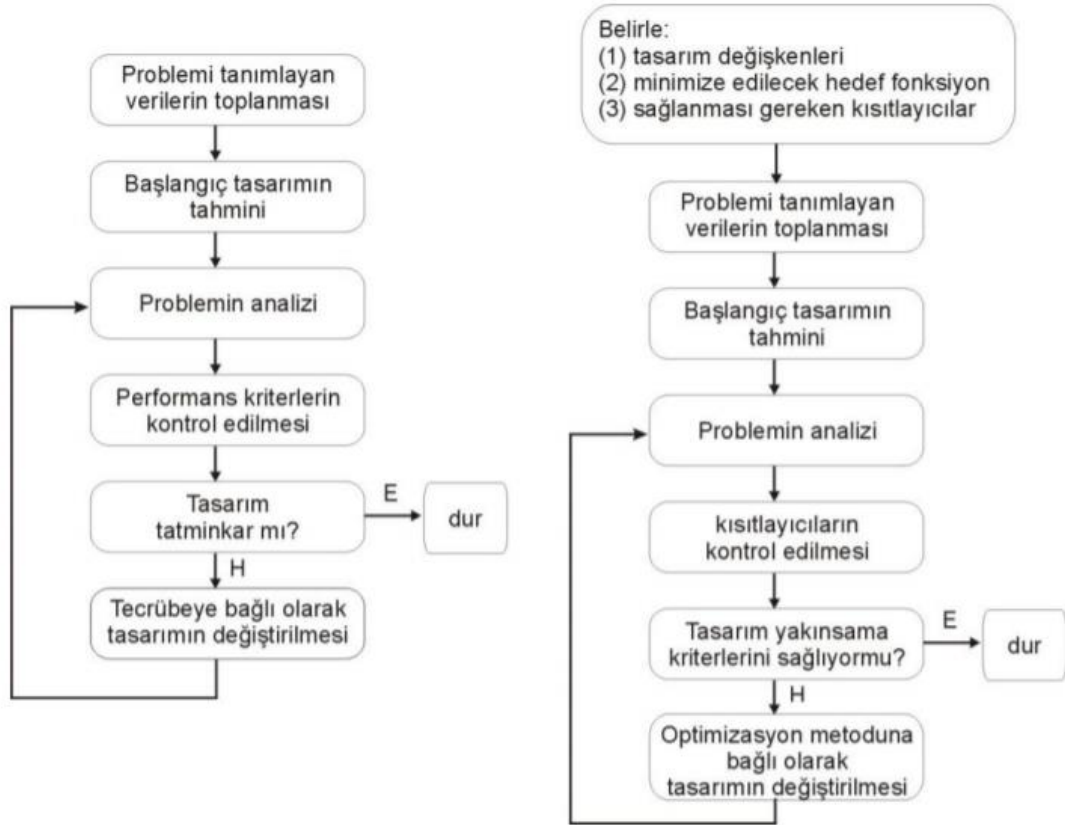
Optimizasyon teorisi, tüm mühendislik dallarında dört temel alana dayanarak hazırlanır:

- Bileşenlerin veya tüm sistemlerin tasarımı
- Mevcut operasyonların planlanması ve analizi
- Mühendislik analizi ve veri azaltma



- Dinamik sistemlerin kontrolü

Optimum bir tasarıma veya verimli bir operasyona ulaşma süreci genellikle Şekil 2.15'te gösterildiği gibi, yinelemeli bir döngüden oluşur (Ravindran A. vd. 2006).



Şekil 2.15. Klasik yaklaşım tasarımı ile optimizasyonun karşılaştırılması (Kaymaz İ., 2019)

### 3. KAYNAK ÖZETLERİ

Pateriya J. vd. (2015) Ansys Yazılımı yardımı ile Fren Disk Analizi başlıklı çalışmalarında; çeşitli malzemeler seçerek diskin gücünü artırmaya yönelik analizler yapmışlardır. Santro Xing aracının ebatları alınmış ve üç boyutlu olarak çizilmiştir. Disk freninde sınır koşullarını uyguladıktan sonra meydana gelen gerilmeleri analiz ederek deformasyonu kontrol etmişlerdir. Tüm analizlerden sonra karşılaştırma yaparak en iyi mukavemetli malzeme için bir sonuç çıkarılmıştır. Al-Ni-Co alaşımı, yapı çeliği, dökme demir, titanyum alaşımı ile çalışmışlardır.

Al-Ni-Co alaşımı ve Titanyum alaşımında gerilmenin minimum olduğu gözlemlenmiştir. İyi bir meshleme ile hataları ve olumsuz durumları ortadan kaldırmışlardır. Genel olarak bakıldığında tüm malzemeler için toplam deformasyon, gerilme, uzama disk ağırlığı minimuma indirilirken en iyi sonuçlarını vermiştir. Al-Ni-Co ve titanyum alaşımlarının en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir (Pateriya J. vd. 2015).

Jaiswal R. vd. (2016) çalışmalarında Solidworks kullanarak tasarladıkları ve ANSYS ile analiz yaptıkları fren diskleri üzerindeki gerilmeyi, deformasyonu ve termal gradyanı modelleyerek analiz etmek istemişlerdir.

Hava akış özellikleri, gövde yapısı, bileşen şekli altında önemli ölçüde değişir. Termal analiz yapmak için bir yineleme algoritması ile ölçülen soğutma katsayısından hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısını kullanarak diskin dörtte birini alıp diski çevreleyen hava alanını tanımlamışlardır. (CFD' de (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modelledikten ve sınır koşulları belirlendikten sonra hesaplama yapmışlardır.)

Sıcaklığı 207-210 °C arasında bulmuşlardır. Toplam deformasyon değerini maksimum  $2,4467e-7$  m ve Von-mises gerilme değerini maksimum  $2,3094e5$  Pa bulmuşlardır (Jaiswal R. vd. 2016).

Belhocine A. vd. (2016) yaptıkları çalışmada, disk sıcaklığını belirleyebilen sonlu elemanlar yazılımı ANSYS kullanarak tek frenleme durma olayı sırasında fren yapısal deformasyonu ve fren diskinin ve balataların temas basıncını incelemişlerdir. Çalışmada ayrıca, sabit bir kaliper, farklı sürtünme katsayıları ve diskin farklı hızları, sırasıyla disk

balatalarının gerilme konsantrasyonu, yapısal deformasyon ve temas basıncı üzerindeki etkilerini vurgulamışlardır.

Araştırmacılara göre disk freninin maruz kaldığı üç tip mekanik baskı vardır. Bunlardan birincisi, tekerlek döndüğü zaman disk freninin dönmesi nedeniyle merkezkaç etkisi tarafından oluşturulan çekme kuvvetidir ve diske frenleme kuvveti uygulanmaz. Fren işletimi sırasında, disk freninin yaşadığı iki ilave kuvvet daha vardır. İlk olarak, frenleme pabucunun yavaşlatmak için diskin yüzeyine dik basma kuvvetinin bir sonucu olarak sıkıştırma kuvveti oluşturulur. İkincisi, fren balatasının disk freninin yüzeyine sürtünmesinden dolayı yapılan frenleme hareketi, disk yüzeyinde, disk dönme yönünün tersi yönde hareket eden sürtünme veya çekiş kuvvetine çevrilir.

Hava boşluğu kullanımını açısından disk sıcaklığını karşılaştırmışlardır. Boşluklu diskte maksimum sıcaklık 345 °C iken dolu diskte ki maksimum sıcaklığı 401 °C bulmuşlardır.

Balatada zamanla değişen basıncı incelemişlerdir. 0,25 saniyeden başlayarak 45 saniyeye kadar balata üzerinde oluşan basıncı bulmuşlardır. Artan süre ile basıncın yükseldiğini görmüşlerdir.

Balatada açısal hız ile basıncın ilişkisini incelemişler ve 60, 90, 120 rad/s lik açısal hızlar ile yapılan analiz çalışmasında açısal hız değeri arttıkça basıncın arttığı sonucuna varmışlardır.

Disk üzerinde zamana bağlı basınç değerini incelemişlerdir ve 1,72 saniyeden 3,5 saniyeye kadar artış gözlemlenmiş fakat 30. saniyede azalma 45. saniyede en düşük değer aldığı sonucuna varmışlardır (Belhocine A., 2016).

Venkatramanan R. vd. (2017) yaptıkları çalışmada disk freninin termal analizi ile ilgilenmişlerdir.

Aracın ürettiği ısı ve disk freninin üzerindeki dağılımını analiz etmişlerdir. Bunun amacı rotor diskinin sıcaklık dağılımını araştırmak ve analiz etmektir. İşlemler ANSYS kullanarak yapılmıştır. Standart diskli fren modeli için termal analiz yapmışlar ve ayrıca ısı akısını, disk fren sıcaklığını hesaplamışlardır. Bunun amacı disk frenindeki basınç kuvvetini ve sürtünme kuvvetini bulmaktır.

Disk üzerine bakır astar geçirerek ve geçirmeden inceleme yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda disk rotorundaki bakır astarın sıcaklık dağılımına yardımcı olduğu tespit edilmiştir. Bakır astar kullanılan disklerde sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir. Astar kullanılmayan disk sıcaklığı 603,5 °C iken astar kullanıldıktan sonraki değer 335 °C olmuştur (Venkatramanan R., 2017).

Talati F. vd. (2009) çalışmalarında uzay ve zamana bağlı disk ve balata için geçerli ısı denklemleri çıkarmayı amaçlayarak çalışmalarını denklem çıkarma üzerine yoğunlaştırmışlardır. Disk freninin bir araçtaki ısıl davranışını tanımlamak için matematiksel bir model sunmaktadırlar. Isı denklemlerinin türetilmesinde, fren süresi, araç ağırlığı, hız, geometri, disk fren rotorunun ve balatasının malzemeleri gibi parametreleri dikkate almışlardır. Disk ve balatanın sürtünmesi nedeni ile ısı açığa çıktığı sonucuna varmışlardır ve ısının bir bölümü çevreye yayılsa da çok aşırı ısınabileceğinden disk ve balata için önlemler alınması gerektiği sonucuna varmışlardır (Jalalifar ve Talati, 2009).

Rawool D. S. vd. (2017) çalışmalarında fren diski üzerindeki sıcaklık dağılımlarını bulmayı amaçlamışlardır. Tekerleğin yavaşlaması, fren balatalarına dış kuvvet uygulanarak elde edilir. Fren sürtünme prensibiyle çalıştığı için ısı dağılımı bulmak, diskin ısıl davranışı ve fren verimliliğini arttırmak için önemli bir parametredir. Hareketli araçlar disk ve fren balataları arasında ısı üretmeye sebep olurlar. Bu aşırı ısı üretimi fren yüzey deformasyonuna, fren gıcırdamasına ve çatlak oluşumuna yol açar. Bu arızaların fren performansı üzerinde büyük etkisi vardır.

Disk için kullanılan Gri Dökme Demir ile yaptıkları çalışmada fren gücünü 2.220 W, toplam ısı akısını 22.201 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplamışlardır. Ayrıca ısı dağılımını 48°C ile 76°C arasında bulmuşlardır. Isı dağılımı değerini paslanmaz çelik için de hesaplamışlar ve 49°C ile 64°C aralığında değerler elde etmişlerdir.

Farklı malzemeler ile çalışarak dökme demirde maksimum ısınma gözlemlenmiştir. Dökme demir, disk malzemesi olarak daha fazla tercih edilmektedir fakat temas ettiğinde daha çok aşınır ve nemden etkilenir. Bu nedenle bu çalışmanın neticesinde paslanmaz çeliğin tercih edilmesi gerektiği vurgulamışlardır (Rawool D. S. vd. 2017).

Durgude A. vd. (2006) çalışmalarında MATLAB ve ANSYS kullanarak fren diskinin optimum boyutlarını elde etmeyi amaçlamışlardır. MATLAB ve ANSYS uygulamalarından elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Öncelikle regresyon analizi ile matematik model oluşturmuşlardır. Sınır şartlarını belirleyerek model analiz, termal analiz, gerilme analizi denklemlerini kullanmışlardır. Disk malzemesi olarak gri dökme demir kullanılmış olup, açısız hız 250 rad/s, fren kuvveti 16.406 kN, diske uygulanan basıncı, 10.495 MPa ve ayrıca disk üzerindeki ısı akısını  $1,5395e6 \text{ W/m}^2$  olarak hesaplamışlardır (Durgude A., 2016).

Bu tez çalışmasında hava delikli fren diski tasarlanarak termal ve mekanik analizler yapılmış ve delik çapları mekanik analiz sonuçlarına göre optimize edilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası termal analizler yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

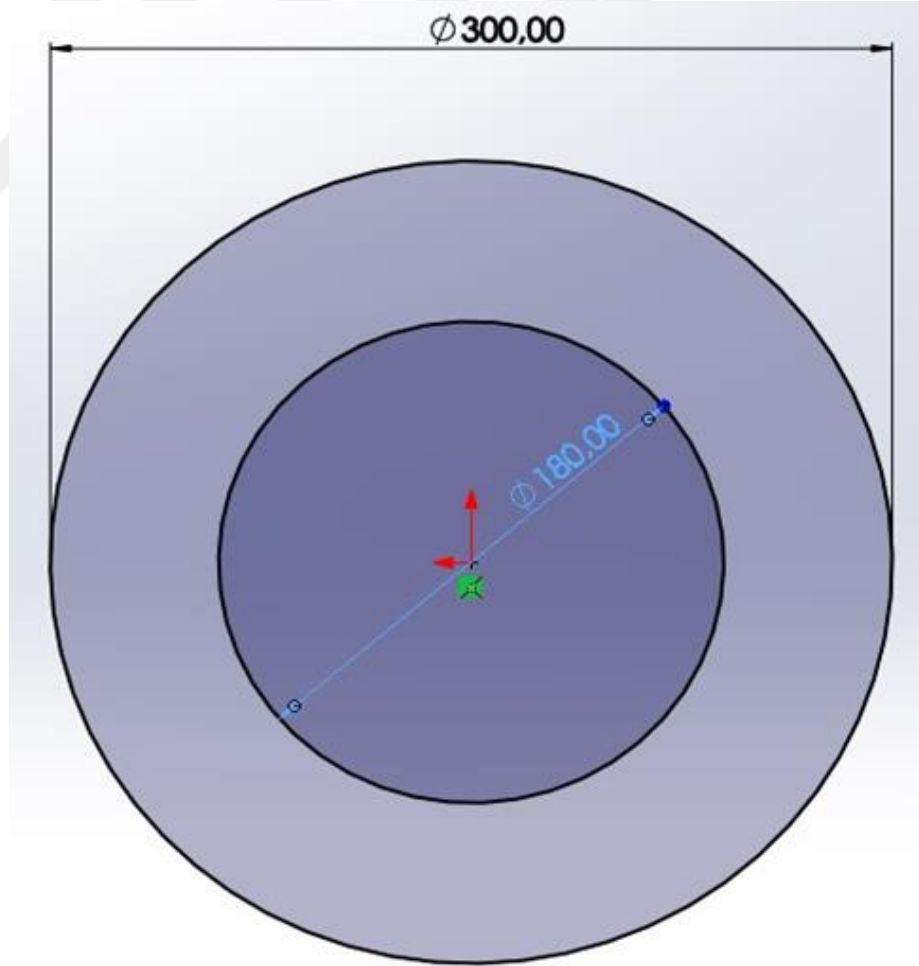
## 4. MATERYAL ve YÖNTEM

### 4.1. Yöntem

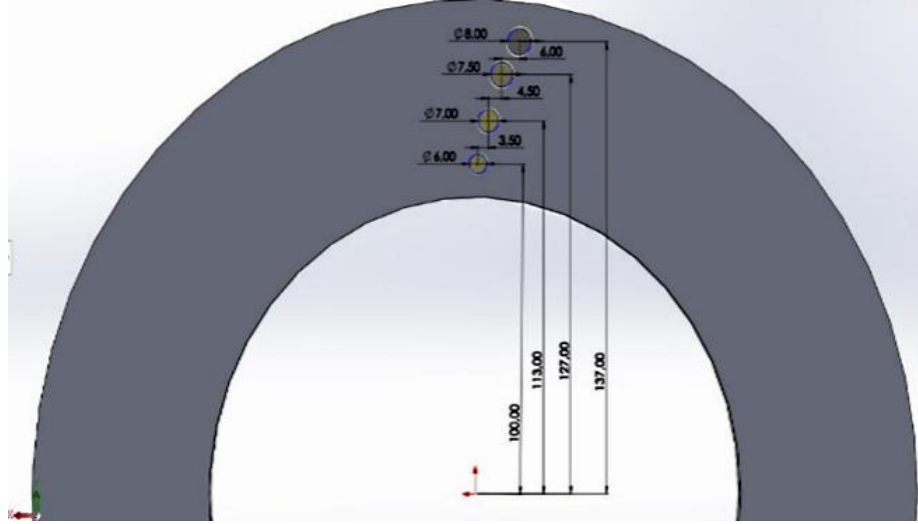
Tez çalışması kapsamında fren diskine ait geometrik tasarımlar Solidworks 2018 yazılımı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik ve termal analizler ANSYS Workbench 19.0 sonlu elemanlar analiz yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Optimizasyon işlemi yine ANSYS yazılımı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1.1. Solidworks yazılımı ile tasarım girdileri

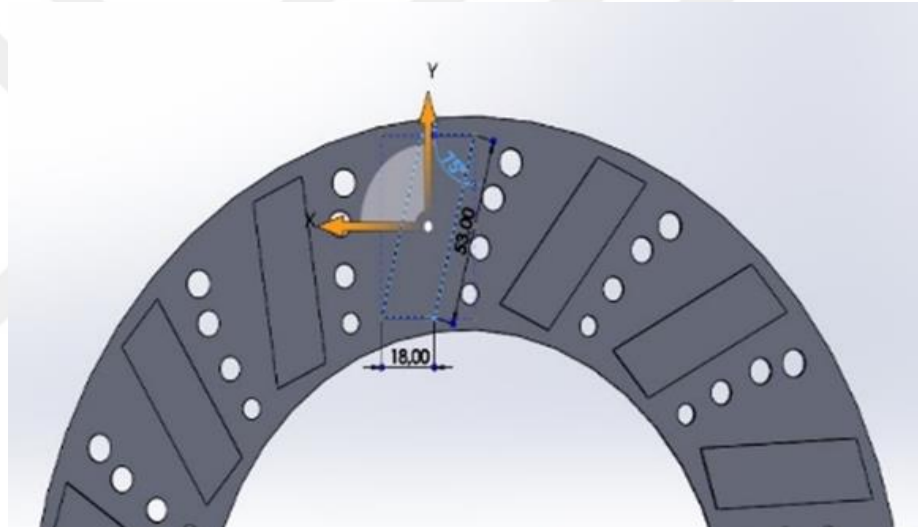
Tez çalışmasında kullanılan fren diskine ait dış çap ve göbek ölçüleri (Şekil 4.1.a) ticari olarak satışı yapılan diskler ile uyumlu olması açısından standarda yakın değerler seçilerek tasarlanmıştır.



(a) Disk çapı



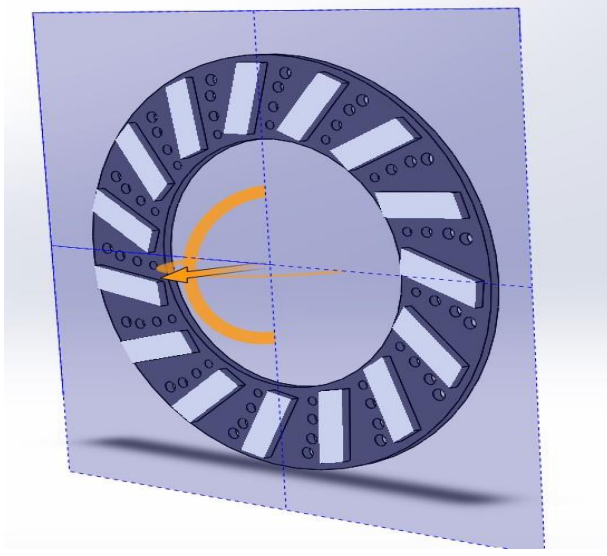
(b) Delik çapları



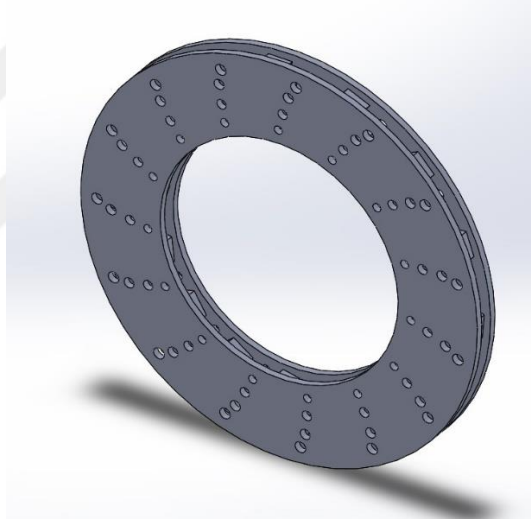
(c) Kanal boyutları

**Şekil 4.1.** Fren diskinde ait Solidworks izimi

Fren diskinde 6; 7; 7,5 ve 8 mm çaplarında (Şekil 4.1.b) 60 adet delik bulunmaktadır. Ayrıca 15 adet 18 mm genişlik, 53 mm uzunlukta (Şekil 4.1.c) soğutma kanalı oluşturmak için tasarlanan çıkıntılar mevcuttur. Soğutma kanalı oluşturmak için yapılan elemanların kalınlığı 10 mm olup diskin genel kalınlığı 20 mm'dir.



**Şekil 4.2.** Fren diski kesit görünümü



**Şekil 4.3.** Fren diski genel görünüm

Şekil 4.2’de diske ait kesit görüntüsü bulunmaktadır. Genel görünüm Şekil 4.3’te mevcuttur.

#### **4.1.2. ANSYS yazılımı analiz öncesi veri girdileri**

Mekanik analiz için ANSYS sonlu elemanlar yazılım programında Static Structural modülü kullanılmıştır. Engineering Data kısmından Gray Cast Iron seçilerek malzeme tanımlaması yapılmıştır. Malzeme özellikleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Diske ait fiziksel özellikler Tablo 4.2’de mevcuttur.



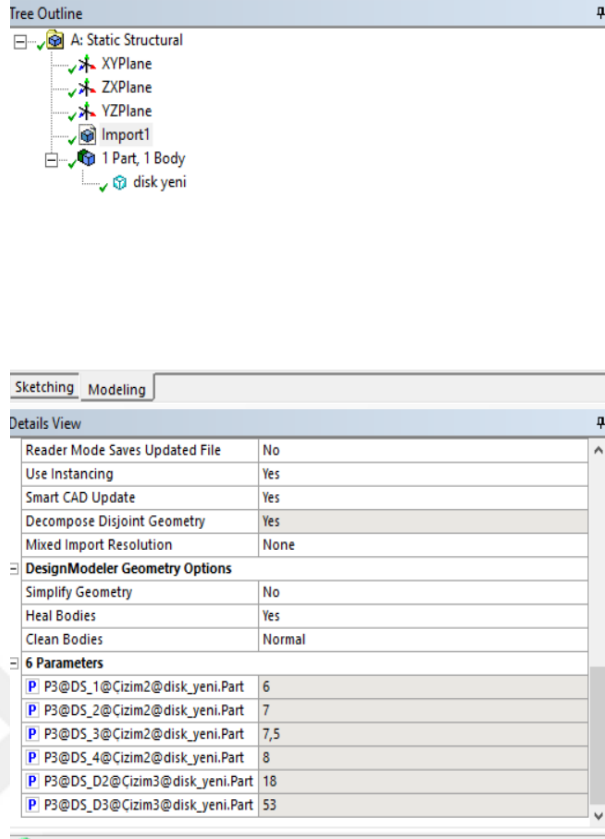
**Tablo 4.1.** Malzeme özellikleri

Materyal Özellikleri	Gri Dökme Demir
Isı iletim katsayısı (W/m°C)	52
Yoğunluk, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7.200
Özgül ısı, $c$ (J/kg°C)	447
Elastisite modülü (GPa)	110
Poisson oranı	0,28
Isı transfer katsayısı	120

**Tablo 4.2** Diske ait fiziksel özellikler

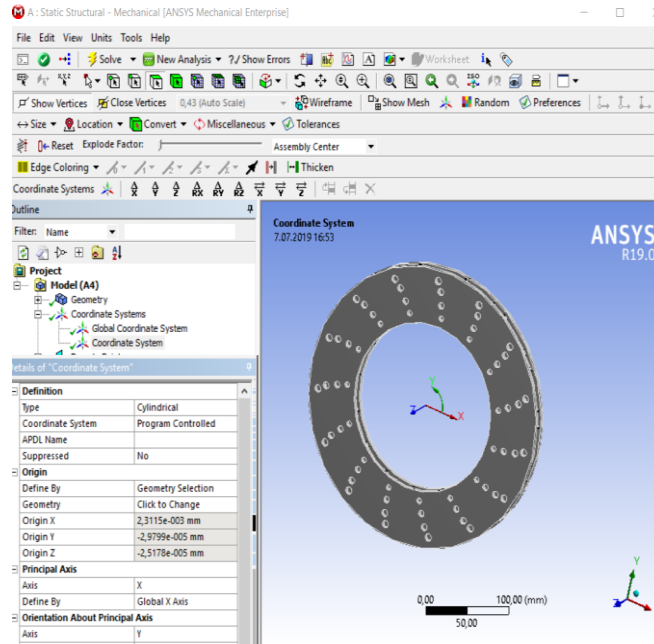
Fiziksel özellikler	Değeri
Dış çap (mm)	300
İç çap (mm)	180
Delik çapları (mm)	6-7-7,5-8
Disk et kalınlığı (mm)	5×2
Soğutma kanalı	18-53-10 (75°)

Solidworks'te tasarlanan ve ANSYS'e aktarılan çizimde Solidworks'te parametre atanan, ANSYS ile optimize edilecek hava delikleri ve soğutma kanalları ölçüleri Şekil 4.4'teki gibidir.



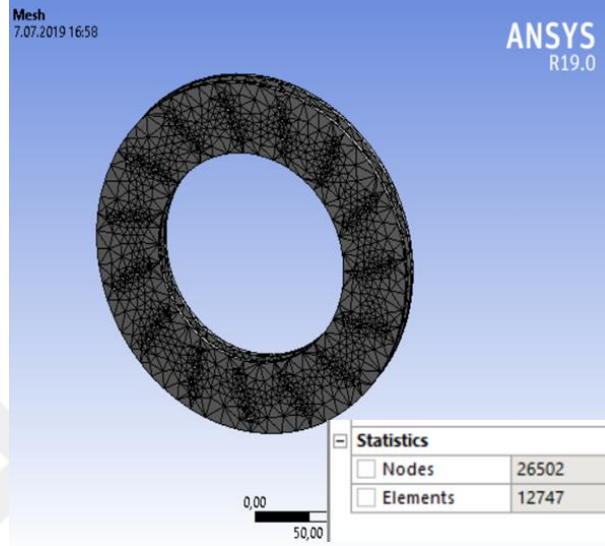
Şekil 4.4. Parametre atanan tasarım girdileri

Fren diski dönme hareketi yapacağı için Şekil 4.5'deki gibi yeni bir silindirik koordinat sistemi atanmıştır. Bu sekme ile diske dönme hareketi verilebilir.



Şekil 4.5. Koordinat sistem tanımlama

Modele ait mesh örgüsü ANSYS yazılımı tarafından otomatik olarak yapılmıştır. Kalitesi incelenen mesh örgüsünün uygun olduğu ve değişiklik veya inceltmeye ihtiyaç olmadığı görülmüştür. Şekil 4.6’da gösterilen mesh örgüsünde node ve element sayıları sırasıyla 26.502 ve 12.747 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.6. Mesh model görünüm

#### 4.1.3. Matematik modelleme ve hesaplamalar

Matematik hesaplamalara başlamadan önce dikkate alınacak formülasyonda kullanılacak değerler Tablo 4.3’te belirtilmiştir.

**Tablo 4.3.** Araca ve fren diskine ait genel özellikler

Genel özellikler	
Araç kütlesi $m$	1.500
Tekerlek kütlesi $m_t$ (kg)	6
Araç ilk hızı $V_i$ (m/s)	110
Araç son hızı $V_o$ (m/s)	0
Lastik çapı (m)	0,38
$T_o$ (°C)	30

1. Yavaşlama ivmesi

$$a = \frac{V_1 - V_0}{t_1 - t_0} \quad (3.1)$$

a= 6,4 m/sn<sup>2</sup> bulunur.

2. Durma mesafesi

$$X = \frac{1}{2}at^2 \quad (3.2)$$

X= 80,5 m bulunur.

3. Frekans

X metrede, t saniyede tekerleğin attığı tur sayısı durma mesafesinin tekerleğin çevresine bölünmesi ile elde edilir.

$$f = \frac{X}{2\pi r t} \quad (3.3)$$

Tekerleğin 1 saniyede attığı tur sayısı ise

$$f = \frac{X}{2\pi r t}$$

f= 13,5 rad/s olarak bulunur.

4. Açısal hız

$$w = 2\pi f \quad (3.4)$$

w= 85 rad/s

5. Kinetik enerji

$$KE = \frac{1}{2}mV^2 + 4\left(\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}m_t V^2\right)\right) \quad (3.5)$$

KE= 774.144 J

6. Fren kuvveti

$$F = \frac{KE}{X} \quad (3.6)$$

F= 9.677 N

7. Fren gücü

$$P_f = \frac{KE}{t} \quad (3.7)$$

$$P_f = 154.829 \text{ W}$$

8. Alan

$$A = \pi(d_1^2 - d_2^2) - 15\pi(d_3^2 + d_4^2 + d_5^2 + d_6^2) + 15ah_a \quad (3.8)$$

$$A = 38.843 \text{ mm}^2$$

9. Toplam ısı akısı

$$Q = \frac{P_f}{A} \quad (3.9)$$

$$Q = 3,98 \text{ W/mm}^2$$

10. Disk son sıcaklık

$$\Delta E = m_d c \Delta T \quad (3.10)$$

$$T_i - T_0 = \frac{\Delta E}{m_d c}$$

$$T_i = \frac{\Delta E}{m_d c} + T_0$$

$$T_i = 184 \text{ }^\circ\text{C}$$

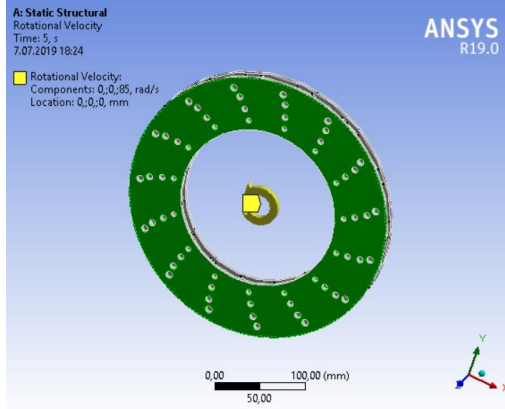
#### 4.1.4. Mekanik analiz için girilen sınır şartları

Mekanik analiz yapılmadan önce ANSYS yazılımının Static Structural modülünden Remote point ile dönme noktası belirlenir.

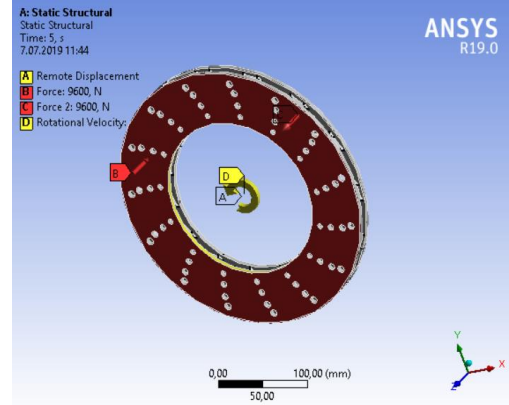
Formüllerden bulunan açısal hız değeri ile Remote Displacement sekmesinden yalnızca Rotation Z değerine serbestlik verilir. Diğer koordinat yönlerine 0 değeri girilerek fren diskine diğer hareketlerde kısıtlama, Z eksenini etrafında dönme yönünde serbestlik verilir. (Şekil 4.7.c)

Rotational Velocity sekmesinden ise Rotation Z değerine “Eş. 3.4” te hesaplanan 85 rad/s değeri yazılır. (Şekil 4.7.a)

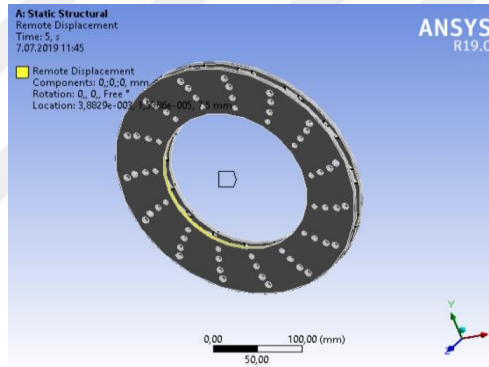
“Eş. 3.6” da 9.677 N olarak hesaplanan kuvvet değeri Force sekmesinden fren diskinin 2 yüzüne etki edecek şekilde girilir. (Şekil 4.7.b)



(a) Rotational Velocity



(b) Force

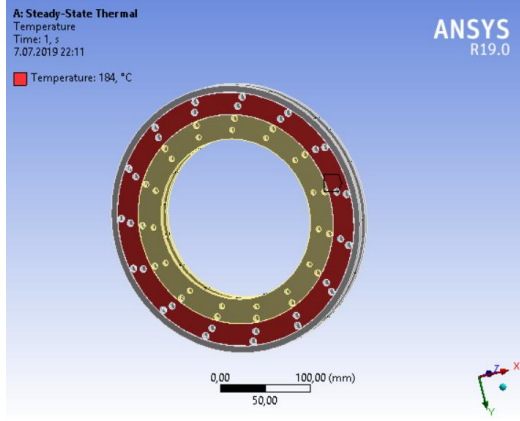


(c) Remote Displacement

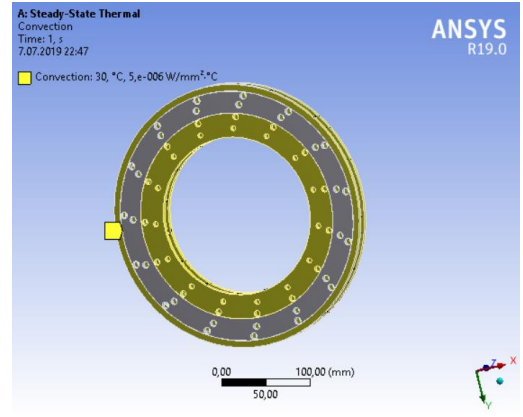
Şekil 4.7. Mekanik analiz sınır şartları

#### 4.1.5. Termal analiz için girilen sınır şartları

Termal analiz mekanik analizden bağımsız olarak ANSYS yazılımının Steady-State Thermal sekmesinden yapılmıştır. “Eş. 3.10” denkleminde hesaplanan sıcaklık değeri 184 °C temperature sekmesine girilir. Convection sekmesine ise ısı iletim katsayısı 5,e-006 W/mm<sup>2</sup> değeri yazılır. Ayrıca ortam sıcaklığı 30 °C olarak kabul edilmiştir. (Şekil 4.8)



(a) Temperature



(b) Convection

Şekil 4.8. Termal analiz sınır şartları

#### 4.1.6. Optimizasyon sınır şartları

Şekil 4.9.a'da görüldüğü gibi P7 hacim değeri minimize edilecek parametre olarak tanımlanmıştır. Diskte kuvvetler altında plastik şekil değişimi olmaması istendiği için P9 maksimum eşdeğer elastik gerilme değeri malzemenin akma sınırı olan 200 MPa'nın altında kalacak şekilde sınırlandırılmıştır. Aynı şekilde elastik şekil değişim maksimum değeri P8 de, belirgin akma göstermeyen metaller için kabul edilen sınır olan %0,02'yi aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Table of Schematic B2: Optimization							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Minimize P7	P7 - disk yeni Volume	Minimize		No Constraint		
4	Minimize P8; P8 <= 0,0002 mm mm <sup>-1</sup>	P8 - Equivalent Elastic Strain Maximum	Minimize		Values <= Upper Bound		0,0002
5	Minimize P9; P9 <= 200 MPa	P9 - Equivalent Stress Maximum	Minimize		Values <= Upper Bound		200
*		Select a Parameter					

(a) Sınır şartları

Table of Schematic B2: Optimization				
	A	B	C	D
1	Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P1 - P3@DS_1@Çizim2@disk_yeni.Part	5,4	6,6	
4	P2 - P3@DS_2@Çizim2@disk_yeni.Part	6,3	7,7	
5	P3 - P3@DS_3@Çizim2@disk_yeni.Part	6,75	8,25	
6	P4 - P3@DS_4@Çizim2@disk_yeni.Part	7,2	8,8	
7	P5 - P3@DS_D2@Çizim3@disk_yeni.Part	16,2	19,8	
8	P6 - P3@DS_D3@Çizim3@disk_yeni.Part	47,7	58,3	
9	Parameter Relationships			
10	Name	Left Expression	Operator	Right Expression
11	P1 <= P2	P1	<=	P2
12	P2 <= P3	P2	<=	P3
13	P3 <= P4	P3	<=	P4
14	2*P5 <= P6	2*P5	<=	P6
*	<i>New Parameter Relationship</i>	<i>New Expression</i>	<=	<i>New Expression</i>

(b) Değer aralıkları

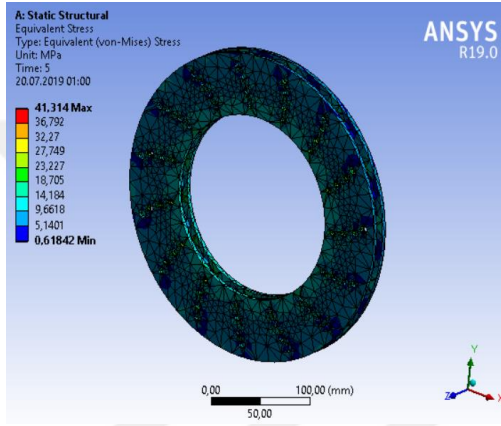
Şekil 4.9. Optimizasyon şartları



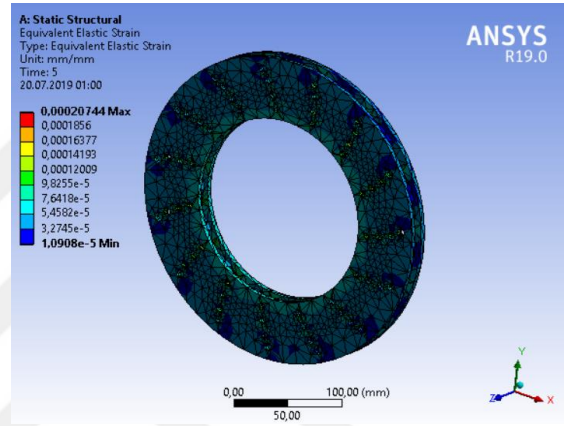
## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 5.1. Mekanik Analiz Sonuçları

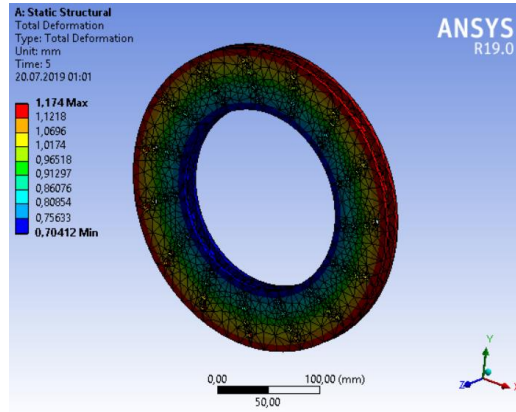
Sınır şartları ANSYS Workbench yazılımında uygulandıktan sonra çözüm istenmiştir. Von-mises gerilimi maksimum 41,31 MPa (Şekil 5.1.a), elastik uzama 0,00020 mm (Şekil 5.1.b) toplam deformasyon 1,174 mm (Şekil 5.1.c) olarak bulunmuştur. Bu değerler için daha sonra optimizasyon yapılırken sınır şartı uygulanacaktır.



(a) Von-mises stress



(b) Elastik uzama

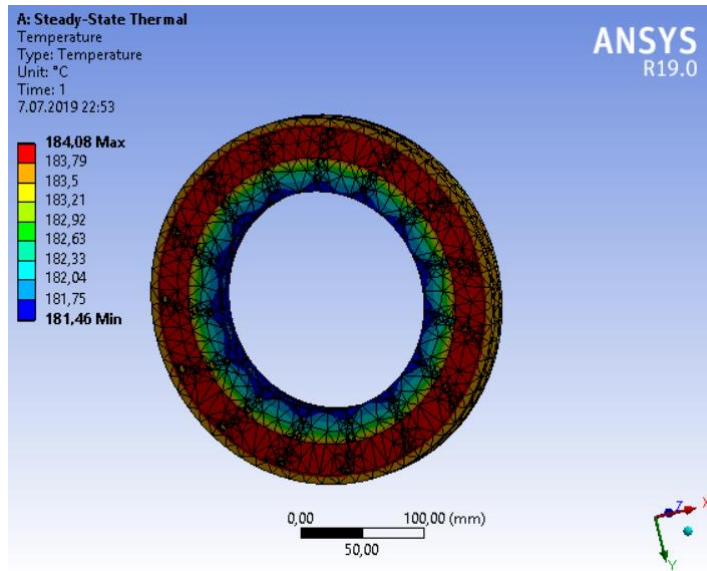


(c) Toplam deformasyon

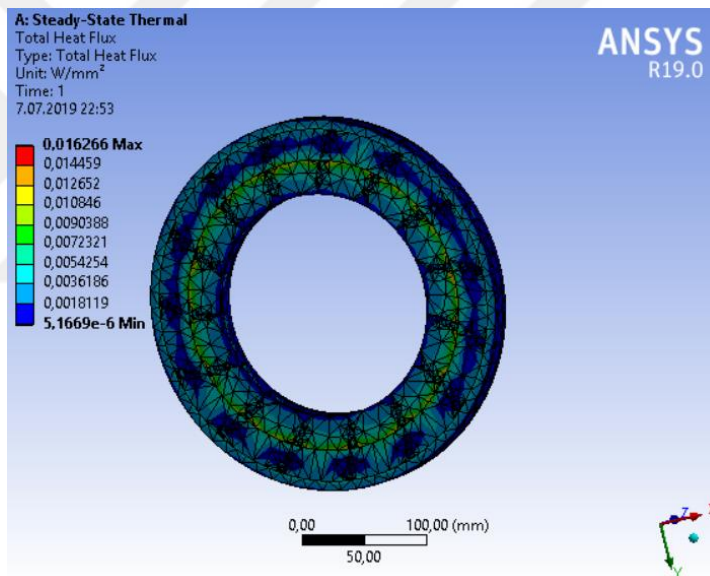
Şekil 5.1 Mekanik analiz sonuçları

### 5.2. Optimizasyon Öncesi Termal Analiz Sonuçları

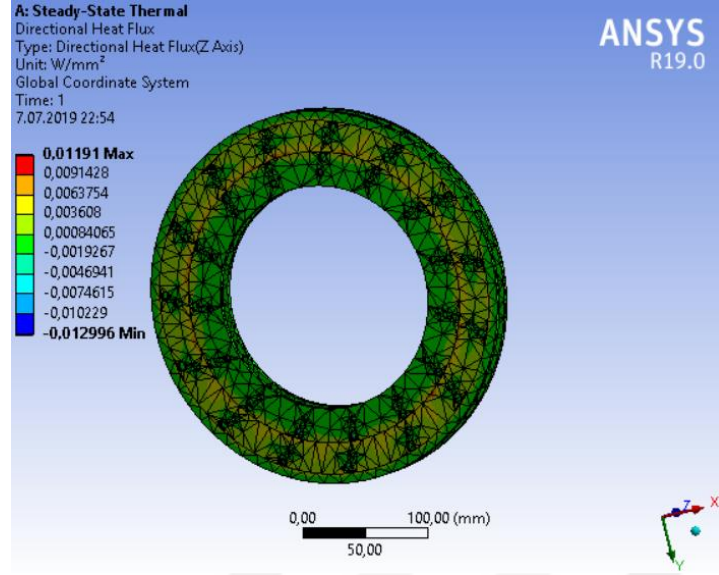
Sıcaklık değerinin 181 °C ve 184 °C arasında değişiklik gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.2.a). Şekil 5.2.b'de toplam ısı akısı maksimum 0,01266 W/mm<sup>2</sup>, Z yönündeki ısı akı değeri (Şekil 5.2.c) ise maksimum 0,001191 W/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



(a) Temperature



(b) Total heat flux



(c) Directional heat flux

Şekil 5.2. Optimizasyon öncesi termal analiz sonuçları

### 5.3. Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon işlemi neticesinde ANSYS yazılımı en iyi üç durumu “Candidate Point” olarak ifade edilen aday noktalar şeklinde vermektedir. Candidate point 1 değerinde hacim  $566.430 \text{ mm}^3$  değerinden  $546.140 \text{ mm}^3$  ye düşmüştür. Aynı şekilde stres ve strain değerlerinde de azalma görülmektedir. Bu sebeple Candidate 1 seçilerek tasarım yeniden yapılmıştır.

Şekil 5.3.b’de ise Şekil 5.3.a’daki değerleri elde edebilmemiz için önerilen delik ve kanal ölçüleri mevcuttur. 6; 7; 7,5 ve 8 olarak girilen tasarım değerleri 5,7; 6,4; 6,7 ve 8,2 olarak kanal değerleri ise 16 ve 48 olarak girilerek fren diski yeniden tasarlanmıştır.

Table of Schematic B2: Optimization , Candidate Points								
	A	B	I	J	K	L	M	N
1	Reference	Name	P7 - disk yeni Volume (mm <sup>3</sup> )		P8 - Equivalent Elastic Strain Maximum (mm mm <sup>-1</sup> )		P9 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	
2			Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	<input checked="" type="radio"/>	Candidate Point 1	★★ 5,4614E+05	%0,00	★★ 0,00017465	%0,00	★★ 34,711	%0,00
4	<input type="radio"/>	Candidate Point 2	★★ 5,4282E+05	-%0,61	★★ 0,00018077	%3,50	★★ 35,977	%3,65
5	<input type="radio"/>	Candidate Point 3	★★ 5,4239E+05	-%0,69	★★ 0,00018429	%5,52	★★ 36,674	%5,65
*		New Custom Candidate Point						

(a) Candidate points

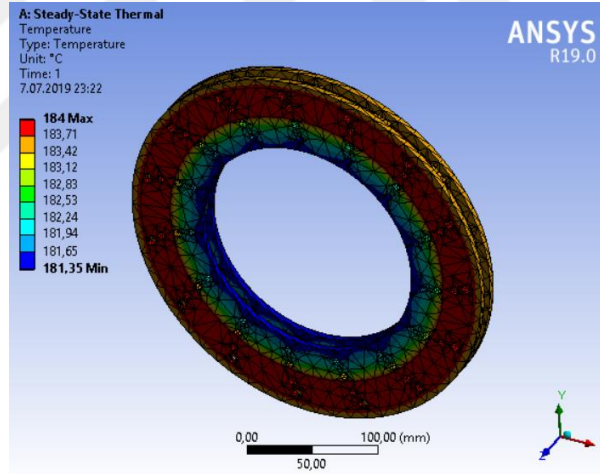
Table of Schematic B2: Optimization , Candidate Points								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Reference	Name	P1 - P3@DS_1@C... .Part	P2 - P3@DS_2... .Part	P3 - P3@DS_3... .Part	P4 - P3@DS... .Part	P5 - P3@DS... .Part	P6 - P3@DS_D3@... .Part
2								
3	☉	Candidate Point 1	5,7838	6,4941	6,7577	8,204	16,667	48,023
4	☉	Candidate Point 2	5,6843	6,4844	6,7903	8,2711	16,291	47,739
5	☉	Candidate Point 3	5,4175	6,5118	6,995	8,2731	16,227	47,754
*		<i>New Custom Candidate Point</i>	6	7	7,5	8	18	53

(b) Candidate points 2

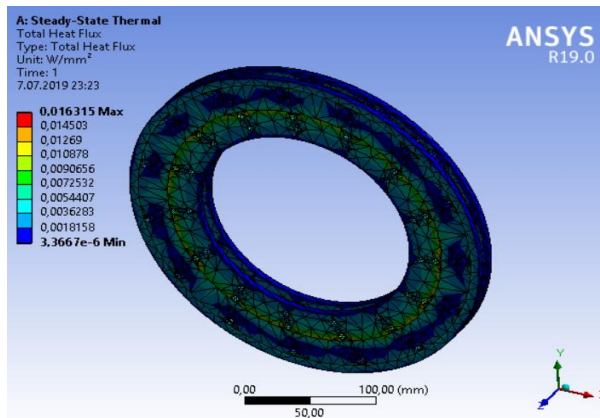
Şekil 5.3. Optimizasyon sonuçları

#### 5.4. Optimizasyon Sonrası Termal Analiz Sonuçları

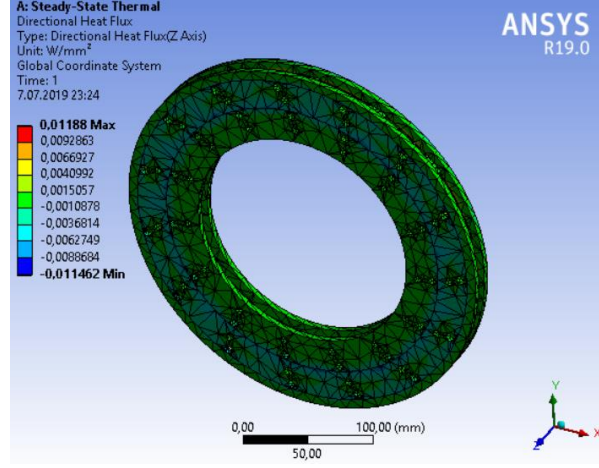
Sıcaklık değerinin 181 °C ve 184 °C arasında değişiklik gösterdiği görülür. Şekil 5.4.b'de toplam ısı akısı maksimum 0,016315 W/mm<sup>2</sup>, Z yönündeki ısı akı değeri ise maksimum 0,001188 W/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



(a) Temperature



(b) Total heat flux



(c) Directional heat flux

Şekil 5.4. Optimizasyon sonrası termal analiz sonuçları

### 5.5. Optimizasyon Öncesi ve Sonrası Termal Analiz Sonuçları Karşılaştırılması

Yazılımdan elde edilen tasarım öncesi ve sonrası termal analiz değerleri Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Toplam ısı akısı değerinde artış gözlemlenirken, Z yönündeki değerde azalma tespit edilmiştir.

**Tablo 5.1.** Termal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

	Sıcaklık	Directional Heat Flux	Total Heat Flux
<b>Optimizasyon öncesi</b>	184 °C	0,001191 W/mm <sup>2</sup>	0,01266 W/mm <sup>2</sup>
<b>Optimizasyon sonrası</b>	184 °C	0,001188 W/mm <sup>2</sup>	0,01631 W/mm <sup>2</sup>

## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Genel olarak bakıldığında Von-misses gerilmesi maksimum 41,31 MPa, elastik uzama miktarı 0,00020 mm, toplam deformasyon 1,174 mm, ısı akısı değeri 0,016315 W/mm<sup>2</sup> bulunmuştur. Matematiksel hesaplar özetlenecek olursa açısal hız değeri 85 rad/s, fren kuvveti 9.677 N, fren gücü 154.829 W, toplam ısı akısı 3,98 W/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Optimizasyon sonrası X yönündeki ısı akısında azalma tespit edilmiştir fakat genel olarak bakıldığında bir artış söz konusudur.

Hacim değeri 566.430 mm<sup>3</sup> değerinden 546.140 mm<sup>3</sup> değerine minimize edildiği için birim yüzeye düşen ısı enerjisi miktarı artıyor olarak yorumlanabilir. Yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında disk malzemesi disk çapı gibi bazı parametrelerin genel olarak aynı seçildiği görülse de diskte özgün tasarımlar kullanıldığı için analiz sonuçlarında farklılıklar söz konusu olmuştur. Genel olarak bakıldığında yaklaşık değerler elde edildiği fark edilmektedir.

Bu çalışmayı takip eden çalışmalarda CFD yöntemi kullanılarak hava akışının da hesaba katılması ile gerçeğe yakın bir soğutma simülasyonu sayesinde daha optimum sonuçlar elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Abu Bakar, A.R. and Ouyang, H., (2005) “Prediction Of Disc Brake Contact Pressure Distributions By Finite Element Analysis” *Jurnal Teknologi*, 43, 21– 36.
- Atik, E., (1994) “Yaşlandırılabilir bir Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitinde aşınma dayanımı açısından optimum mekanik özelliklerin ve üretim şartlarının belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 4-13.
- Arıkan, S., (2005) “Sonlu elemanlar metodunun mühendislikte uygulamaları” **Orta Doğu Teknik Üniversitesi CAD/CAM Merkezi**, Ankara, 8-10.
- Atmaca, A., (2006) “Çelik fiber takviyeli alüminyum metal matrisli kompozit plakaların elasto-plastik gerilme analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-27.
- A-ZTECH. “Sonlu Elemanlar Paket Programları Abaqus”  
<http://www.a-ztech-tr.com/>  
Son erişim tarihi: 24.07.2019.
- Bayrakçeken, H. ve Düzgün, M., (2005) “Taşıtlarda Fren Verimi ve Frenleme Mesafesi Analizi”, *Politeknik Dergisi*, 8, 153-160.
- Belhocine, A., Bakar, A. and Bouchetara, M. (2016) “Thermal and structural analysis of disc brake assembly during single stop braking event”, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 26-38.
- BİAS. “Nastran”  
<https://bias.com.tr/10/15/yapisal/msc-nastran-sonlu-elemanlar.php>  
Son erişim tarihi: 24.07.2019.
- Buytoz, S., (1999) “Al matrisli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit malzemelerin katı hal birleştirme teknikleri ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 35-42.
- Buytoz, S., ve Eren, H., (2007) “Al metal matris kompozitlerin abrasiv aşınma performansına takviye elemanlarının etkisi”, *Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 19, 209-216.
- BTÜ, (2013) “Hidrolik servo fren sistemi”, Bursa Teknik Üniversitesi Doğa Bilimleri Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, *Bursa*, 2-6.
- CADSAY. “ANSYS nedir?”  
<https://cadsay.com/ansys-nedir>  
Son erişim tarihi: 24.07.2019.
- CADSAY. “Pro-engineer”  
<https://cadsay.com/pro-engineer>  
Son erişim tarihi: 16.06.2019.



- Chandrupatla, T. and Belegundu, A., (2012) Introduction to Finite Elements in Engineering, *Pearson Education Limited*, England, 17.
- Çavdar, A., Demir, A. ve Kılıçaslan, İ., (2008) “Frenleme zayıflama sınırının tespiti ve iyileştirme çalışmaları”, *4. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, 2-4.
- Çöçen, Ü., (1997) “Sürekli katkılı metal matrisli kompozitler”, *Metalurji Dergisi*, 109, 46-53.
- Demir, A., (2011) “Frenler-Genel”, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, *İstanbul*, 42-59.
- Demir, C., (2019) “Makine Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi”, İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, *İstanbul*, 17-20.
- Durgude, A., Vipradas A., Kishore, S. and Nimse, S. (2016) “Design Optimization Of Brake Disc Geometry”, Final Report, *Arizona State University*, 15-18.
- Düzgün, M., (2014) “Hava soğutma kanallı fren disklerinin termo-mekanik özelliklerinin sonlu eleman analizi kullanılarak geliştirilmesi”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29, 627.
- Ekici, R., (2004) “Alüminyum esaslı SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi”, Yüksek lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 19-47.
- Erdoğan, M., (2005) “Çelik takviyeli alüminyum kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 3-33.
- Ereke, M., Gökten, A.G. ve Güney, A., (1995) “Taşıt Frenleri”, İTÜ Makine Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı, *İstanbul*, 27-28.
- Eriksson, M., (2000) “Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal”, *Acta Universitatis Upsaliensis*, Uppsala, 11-13.
- Eserci, D., (2007) “Alümina, zirkonya ve alümina-zirkonya kompozit malzeme üretimi, karakterizasyonu ve etkin difüzyon sabitinin bulunması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-19.
- Fish, J. and Belytschko, T., (2007) A First Course In Finite Elements, *John Wiley & Sons, Ltd*, England, 2-3.
- Gültekin, D., (2007) “Metal matrisli kompozit fren diski, balatası üretimi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 45-50.
- Güney, B., (2013) “Kaplanmış otomotiv fren diskinin frenleme performansına etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 23-24.



- Gönen, F. ve Aksu, Z., (2010) “Melas Sakkarozu İçeren Besin Ortamında C. utilis Mayasına Bakır(II) Biyobirikiminin RSM ile İstatiksel Analizi”, **9. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi**, Bildiri Özetleri Kitabı, Ankara, 1-2.
- Hohmann, C., Schiffner, K., Oerter, K. and Reese, H. (1999) “Contact analysis for drum brakes and disk brakes using adina”, **Computers and Structures**, 72, 185-198.
- İstanbul Teknik Üniversitesi. “Taşıt Konstrüksiyonu”, <http://web.itu.edu.tr/~goktan/TK/tk04.pdf>  
Son erişim tarihi: 25.08.2015.
- Jaiswal R., Jha R. A., KarkiA., Das D., Jaiswal P., Rajgadia S. and Basnet A. (2016) “Structural and Thermal Analysis Of Disc Brake Using Solidworks and ANSYS”, **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, 67-77.
- Jalalifar, S. and Talati, F., (2009) “Analysis of heat conduction in a disk brake system”, **Heat Mass Transfer**, 45, 1047-1059.
- Karaoğlu, S. ve Özses, Ç., (2008) “Dip klapesinin ANSYS ile tasarım optimizasyonu”, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 14, 155-156.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. “Trafik Kazaları Özeti 2015”, <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Trafik/TrafikKazalariOzeti2015.pdf>  
Son erişim tarihi: 25.08.2015.
- Kaymaz, İ., (2019) “Optimizasyon Teknikleri”, **Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, Erzurum, 2-4.
- Keleşoğlu, E. ve Ölmez, S., (2016) “Alüminyum silisyum alaşımlarının yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının incelenmesi” **Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 4, 32.
- Keskin, G., (2015) “Diskli fren sistemlerinde disk üzerindeki sıcaklığın analitik olarak hesaplanması”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul 1-2, 5-6.
- Küçükkoç, İ., (2018) “Optimizasyon Teknikleri”, **Balıkesir Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü**, Balıkesir, 2-3.
- Koç, O., Mutlu, İ. ve Taşgetiren, S., (2009) “Fren Balata Sisteminde Sürtünme Sonucu Oluşan Isı Transferi Ve Termal Gerilme Analizi”, **Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 1-11.
- Maluf, O., Angeloni, M., Milana, M.T., Spinelli, D. and Bose Filho, W.W., (2004) “**Development of Materials for Automotive Disc Brakes**”, Researchgate, 1-19.

- Malzeme Bilimi ve Mühendislik Sitesi. “Fren sistemi çeşitleri nelerdir”  
<https://malzemebilimi.net/fren-sistemi-cesitleri-nelerdir-hangi-malzemelerden-yapilir.html>  
Son erişim tarihi: 21.07.2019.
- Manjunath, T.V., and Dr. Suresh, P.M., (2013) “Structural and thermal analysis of rotor disc of disc brake”, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology* 2, 7743.
- MEB, (2013) “Fren Sistemleri (Motorlu Araçlar Teknolojisi)”, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, *Ankara*, 5-6, 11-12.
- Mohd, I., (2013) “A study on various type of rotor disc brake using fae analysis”, Bachelor of Mechanical Engineering with Automotive Engineering, *Faculty of Mechanical Engineering University Malaysia Pahang*, Malaysia, 9-11.
- Muratoğlu, M. ve Demirel, M., (2009) “Cu/Ni<sub>3</sub> Al metal matrisli kompozitin kuru kayma aşınma davranışlarının araştırılması”, *5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 759-764.
- Özdin, K., (2006) “Alüminyum esaslı SiC takviyeli kompozitlerin üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-22.
- Pallai, D., (2011) “Catia V6 Essentials”, *Kogent Learning Solutions, Inc.*, USA, 1-3.
- Pateriya, J., Yadav, R. K., Mukhraiya V. and Singh P., (2015) “Brake Disc Analysis With The Help Of Ansys”, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 114-122.
- Ravindran, A., Ragsdell, K. M., and Reklaitis, G. V., (2006) “Engineering Optimization Method and Applications”, *John Wiley & Sons, Inc.*, 2-5.
- Rawool, S.D., Satope, S. and Bote, A. (2017) “Thermal Analysis of Disc Brake”, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 3, 12.
- Sandal, R., (2009) “Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit malzeme üretimi ve difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-5.
- Sarıyerli, G., (2006) “Disk frenlerin tasarım ve tribolojik açıdan incelenmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 15-25.
- Sur, G., Şahin, Y. ve Gökkaya, H., (2005) “Ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum esaslı tanecik takviyeli kompozitlerin üretimi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20, 233-238.
- Sübütay, H., Şimşir, M., Aydın, M. ve Karaca, B., (2015) “Kam mili üretiminde kullanılan gri dökme demir ve sfero dökme demirlerde çil oluşumunun mekanik özelliklere etkisi” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22, 1-7.

- Şahin, Y., (2000) “Kompozit Malzemelere Giriş”, Gazi Kitabevi, *Ankara*, 3-52.
- Turgut, B., (2016) “İmplant uygulamasının çene kemiğinde sebep olduğu mekanik ve ısı değişimlerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üni. Fen Bil. Enst. Mak. Müh. Anabilim Dalı*, Kayseri, 27-34.
- Ulus, Ş., (2013) “Hidrolik Fren Sistemleri”, *Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Laboratuvarı 2*, Kayseri, 3-4.
- Uygur, İ. ve Saruhan, H., (2004) “Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8, 167-174.
- Yakut, N., (2016) “Özgün tasarıma sahip bir fren diskinin termal ve mekanik davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri 16-17.
- Venkatramanan, R., Kumaragurubaran, S.B., Vishnu Kumar, C., Sivakumar, S. and Saravanan, B., (2017) “Design and Analysis of Disc Brake Rotor”, *International Journal of Applied Engineering Research*, 10-19.
- Zuber, C. and Heidenreich, B., (2006) “Development of a Net Shape Manufacturing Method for Ventilated Brake Discs in Single Piece Design”, *Materials Science & Engineering Technology*, 37, 301.

## EKLER

### Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Ceyhun., N. ve Bayrak., Ö. (2019) “Hava delikli fren disklerinin termal ve mekanik gerilme analizi ve geometrik optimizasyonunun yapılması”, *Euroasia 3<sup>rd</sup> International Congress Of Applied Sciences*, Sivas, 57s.



## ÖZGEÇMİŞ

Nilüfer CEYHUN, 1987 yılında Erzincan' da doğdu. İlk ve orta eğitimi Erzincan' da tamamladı. Erzincan Anadolu Lisesi' nden mezun olduktan sonra Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2011 yılında mezun oldu. İnşaat, enerji, eğitim-öğretim gibi çeşitli alanlarda makine mühendisi olarak görev yaptı. Şu an evli ve bir çocuk annesi.

