

**FREN BALATA SİSTEMİNDE SÜRTÜNME
SONUCU OLUŞAN ISI TRANSFERİ VE TERMAL
GERİLME ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS

Osman KOÇ

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2009

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FREN BALATA SİSTEMİNDE SÜRTÜNME SONUCU OLUŞAN ISI
TRANSFERİ VE TERMAL GERİLME ANALİZİ

Osman KOÇ

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2009

ONAY SAYFASI

Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU danışmanlığında, **Osman KOÇ** tarafından hazırlanan “**FREN BALATA SİSTEMİNDE SÜRTÜNME SONUCU OLUŞAN ISI TRANSFERİ VE TERMAL GERİLME ANALİZİ**” başlıklı bu çalışma, lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 19/06/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

	Ünvanı, Adı, SOYADI	İmza
Başkan	Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN	
Üye	Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU (Danışmanı)	
Üye	Yrd. Doç. Dr. M. Reşit USAL	

Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetin Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL
Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
TEŞEKKÜR	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Literatür Bilgisi	4
2.2. Fren Malzemeleri	15
2.2.1. Fren Malzemelerinin Genel Tribolojik Özellikleri	15
2.2.2. Belli Başlı Fren Malzemeleri	16
2.3. Disk Frenler	18
2.3.1. Tarihsel Gelişimi	18
2.3.2. Disk Fren Elemanları	19
2.4. Sürtünme ve Aşınma	23
2.4.1. Sürtünmenin Tanımı	23
2.4.2. Sürtünme Teorisi	25
2.4.3. Sürtünme Katsayısı	27
2.4.4. Aşınma	29
2.4.5. Sürtünme ve Isı Oluşumu	29
2.5. Isı Transferi	32
2.5.1. Giriş	32
2.5.2. Isı Geçişi Bağıntıları	32
2.5.4. Isı Yayılım Denklemi	34
2.5.5. Isı Transfer Problemi Sınır Şartları	37
2.5.6. Sonlu Elemanlar Metodu	38
2.5.7. Isıl Gerilme Problemi	39
3. MATERYAL VE METOT	40
3.1. Malzeme	40
3.2. Problemin Geometrisi ve Sınır Şartları	42

4. BULGULAR ve TARTIŞMA	45
4.1. Sıcaklıkla İlgili Bulgular	45
4.2. Gerilme İle İlgili Bulguları	55
5. SONUCLAR	65
6. KAYNAKLAR	67
7. ÖZGEÇMİŞ	74

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FREN BALATA SİSTEMİNDE SÜRTÜNME SONUCU OLUŞAN ISI TRANSFERİ VE TERMAL GERİLME ANALİZİ

Osman KOÇ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU

Hareket halindeki taşıt kinetik enerjiye sahiptir. Taşıt hızının azaltılabilmesi için sahip olduğu kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesi gereklidir. Bu ısı enerjisi Fren balatalarının aşırı sıcaklıklara maruz kalmalarına neden olmaktadır. Balataların frenleme etkinlikleri zamanla azalmaktadır ve bazı problemler (frenlerin performansındaki azalma, hatalı çalışma, hızlı balata aşınması ve ses) ortaya çıkar.

Bu çalışmada 4 farklı kalınlıkta, 12 farklı balata malzemesi 300 s süresince sürekli olarak frenlenme işlemine tabi tutulmuş, meydana gelen sıcaklık dağılımları ve gerilme durumları ABAQUS paket programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

Balataya etki eden ısı güç balata merkezinden uzaklığa bağlı olarak değiştiğinden balatanın dış kısımlarına doğru daha büyük sıcaklık değerleri elde edilmektedir. En büyük sıcaklık değerleri balatanın diske temas ettiği yüzeyde meydana gelmektedir. Malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı ile özgül ısısı ve yoğunluğu arasında ters orantı olduğu bulunmuştur.

Gerilmelerin en büyük olduğu bölgeler balatanın tutucu yüzeyindeki köşe kısımlarında ve balatanın orta kanal kısmında yer almaktadır. Isıl genleşme katsayısı ve elastise modülü büyük olan bir balatanın gerilme değeri de büyük olmaktadır. Gerilmenin zamanla değişimi ısı ve mekanik özellikler yanında balata kalınlığı ile ilgili olduğu bulunmuştur.

Aşınma miktarı arttıkça balata yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri, sıcaklık farkı ve gerilme miktarı artmaktadır. Bu durum balatanın ömrünün doğrusal olarak değil, aşınma miktarının artmasına bağlı olarak hızlanan bir şekilde tükendiğini göstermektedir.

2009, 74 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fren Balatası, Isı Transferi, Abaqus, Termal Gerilme Analizi

ABSTRACT

M.Sc.Thesis

RESULTS OF THE FRICTION BRAKE LINING INCLUDING HEAT TRANSFER SYSTEM AND THERMAL ANALYSIS

Osman KOÇ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

Advisor: Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU

A moving vehicle has kinetic energy. In order to reduce vehicle speed, it is necessary to convert its kinetic energy into heat energy. This heat energy cause brake pads to be exposed to excessive temperature The breaking efficiency reduces in time and in this case some problems (reducing in brake performance, defect running, rapid brake pad wear and noise) occur.

In this study 12 different brake pad materials having 4 different thicknesses were subjected to braking process during 300 s. Temperature and stress occurring during braking process were investigated by using finite elements method. ABAQUS software was used for numeric solutions.

The higher temperature values are obtained toward to exterior sections due to thermal power which has effect on brake pad depend on distant from brake pad center. The highest temperature values are occurred on surfaces of brake pad which contact with disc. A inverse ratio is determined between material thermal conductivity coefficient and specific heat and density.

The highest stress zones which occurs on brake pad is casing corners and brake pad. This is in middle canal section. A brake pad which has high coefficient of thermal

expansion and elasticity module has high stress value too. It is found that variation of stress in time is depend on brake pad thickness besides thermal and mechanical properties.

By the amount of wearing increases, the amount of temperature, temperature difference and stress value increase. These case shows that the brake pad lifetime consumes not only linearly but also rapidly depend on increasing amount of wearing.

2009, 74 Page

Keywords: Brake Lining, Heat Transfer, Abaqus, Thermal Tension Analysis

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yapmış olduğu çok değerli katkı ve yönlendirmeler ile bana büyük destek veren ve elinden gelen yardımı esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN'e, danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU' ya ve Abaqus paket programı çalışırken bilgisini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Ömer SOYKASAP'a ve Araş. Gör. Şükrü KARAKAYA hocama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu güne gelmemde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Osman KOÇ

AFYONKARAHİSAR, Haziran 2009

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

A_a	Temas alanı
A_d	Diskin yüzey alanı (m^2)
A_p	Balatanın yüzey alanı (m^2)
c	Özgül ısı (J/kg K)
F_s	Sürtünme kuvveti
F_n	Normal kuvveti
E	Elastise Modülü (GPa)
E_y	Yüzeyin yayma gücü (W/m^2)
HB	Brinell sertlik değeri
h	Isı taşınım katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)
K	Isı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
K_p	Balatanın ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
K_d	Diskin ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
k_d	Diskin ısı yayılma katsayısı (m^2/s)
k_p	Balatanın ısı yayılma katsayısı (m^2/s)
P	Fren basıncı (MPa)
P_r	Diskin merkezi ile balatanın merkezi arasındaki mesafe (m)
P_t	Toplam üretilen fren gücü
r	Balata yarı çapı (m)
T_s	Yüzey sıcaklığı (K)
T_a	Akışkan sıcaklığı
V	Hız (m/s)
q	Isı geçişi (W)
q_t	Her birimde üretilmiş toplam ısı oranı
Q	Pürüzün taban açısı
W	Ağırlık
μ	Sürtünme katsayısı
μ_s	Statik sürtünme katsayısı

μ_k	Kinetik sürtünme katsayısı
q''	Isı akısı (W/m ²)
\dot{E}_i	Birim zamanda giren ısı ve mekanik enerji
\dot{E}_o	Birim zamanda çıkan ısı ve mekanik enerji
\dot{E}_g	Enerji retimi
\dot{E}_{st}	Depolanan enerji
∇	üç boyutlu del operatörü
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
α	Termal genleğme katsayısı (10 ⁻⁶ /K)
\dot{q}	Birim hacimdeki ısı retimi (W/m ³)
ω	Açısal hız (rad/sn)

2. Kısaltmalar Dizini

ABS	Anti Blokaj Sistemi
TS	Türk Standartları Enstitüsü
DIN	Alman Endüstri Normu
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1 Balatalardaki malzemelerin içyapı ve izometrik görünüşü	17
Şekil 2. 2 Disk fren elemanları	19
Şekil 2. 3 Sürtünmede temas alanları.....	24
Şekil 2. 4 Coulomb'un Sürtünme Modeli	25
Şekil 2. 5 Sürtünmenin malzeme yapısı üzerine etkisi	27
Şekil 2. 6 Kuru sürtünme modeli	27
Şekil 2. 7 Sürtünme enerjisinin dağılımı.....	30
Şekil 2. 8 Hacim elemanında ısı akım şiddeti	35
Şekil 3. 1 Balata geometri ölçüsü ve fren disk-balata görünümü.....	55
Şekil 3. 2 Balata üzerine uygulanan sınır şartları	43
Şekil 3. 3 Fren balatasının mesh görüntüsü.....	44
Şekil 4. 1 Frenleme sonunda aşınmamış balatadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları	46
Şekil 4. 2 Frenleme sonunda 3mm aşınmış balatadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları	48
Şekil 4. 3 Frenleme sonunda 6mm aşınmış balatadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları	50
Şekil 4. 4 Frenleme sonunda 9mm aşınmış balatadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları	51
Şekil 4. 5 Balata yüzeyinde alınan bir noktanın 300 saniye sürede ön ve arka yüzeyindeki sıcaklığın zamanla değişimi.....	53
Şekil 4. 6 Frenleme sonunda aşınmamış balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları	56
Şekil 4. 7 Frenleme sonunda 3mm aşınmış balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları	59
Şekil 4. 8 Frenleme sonunda 6mm aşınmış balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları	60
Şekil 4. 9 Frenleme sonunda 9mm aşınmış balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları	61
Şekil 4. 10 Balata yüzeyinde alınan bir noktanın 300 saniye sürede ön ve arka yüzeyindeki gerilmenin zamanla değişimi.....	63

RESİMLER DİZİNİ

Resim 2. 1 Diskli fren sistemi görünüşü	19
Resim 2. 2 Fren balatası	23

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1 TS 555'e göre balataların sınıflandırılması	22
Çizelge 3. 1 Balata malzemelerine ait özellikler	40

1. GİRİŞ

Bir aracın en önemli bölümlerinden biride fren sistemidir. Frenleme ile ilgili elemanların görevi taşıtı en kısa sürede emniyetli bir şekilde durdurmak, hızını azaltmaktır ve taşıtın kendiliğinden harekete geçmesini önlemektir. Ayrıca taşıtın yokuş yukarı, yokuş aşağı gibi ortam şartlarına uygun hareket etmesini sağlamaktır. Frenlemede sürtünme prensipleri geçerlidir. Frenleme işleminde sürtünme yüzeylerine uygulanan basınçtan yararlanır. Frenler enerji değişim araçlarıdır. Aracın mekanik enerjisini, sürtünme ile ısı enerjisine çevirirler. Taşıtın sürüş sırasında emniyetini sağlamada fren balatalarının önemli bir görevi bulunmaktadır. Balata, kendisi ve frenlemeye çalıştığı eş karşı yüzey arasındaki kaçınılmaz kaymayı kontrollü olarak yavaşlatmak ve nihayet durdurmak amacıyla kullanılan malzeme olarak tanımlanır. Otomobil icat edilene kadar sürtünme yüzeyi malzemeleri ve mekanizmaları konusunda çok az gelişme olmuştur. İlk otomobillerde deri sürtünme malzemeleri kullanılmıştır. Uzun yıllar kullanılan asbest esaslı sürtünme yüzeyi malzemelerinin sağlık nedenleriyle kullanımının yasaklanması sonucu bunların yerine asbest içermeyen elyaf takviyeli yeni kompozit balatalar geliştirilmiştir. Bu yönde yapılan çalışmalar sonucu son yıllarda otomotiv fren balatalarının bileşiminde büyük yenilikler olmuştur. Balata bileşimindeki bu yenilikler sonucu balataların sıcaklık dayanımı, sürtünme ve aşınma özellikleri iyileşmiştir (Domaç 2006).

Hareket halindeki taşıt kinetik enerjiye sahiptir. Taşıt hızının azaltılabilmesi için sahip olduğu enerjinin başka bir şekle dönüşümü gereklidir. Fren sistemlerinde, taşıtın kinetik enerjisi balatanın diske sürtünmesi yoluyla ısı enerjisine çevrilir. Frenlerin fonksiyonu, hareket enerjisini yutarak, ısıya çevirmek ve bu ısıyı da atmosfere yaymaktır. Eğer frenlere çevreye verebileceğinden daha fazla bir ısı verilirse fren balatalarındaki sürtünme katsayısı düşmekte ve frenlerin durdurma kabiliyetleri azalmaktadır. Bu noktadan sonra aşınma hızlanır. Fren balatalarının sürekli olarak aşırı sıcaklıklara maruz kalmaları balataların frenleme etkinliklerinin sona ermesine sebep olur. Bu durum, frenlerin performansındaki azalma, hatalı çalışma, hızlı balata aşınması ve ses olarak kendini gösterir (Domaç 2006).

Fren performansının en önemli göstergesi, frenlemeden sonra sağlanan kısa durma mesafesidir. Bu maksimum yavaşlama ivmesi ile mümkündür. Yüksek frenleme kuvveti, sürtünen yüzeylerin önemli bir kısmını oluşturan balata kalitesi ile ilgilidir.

Taşıtlarda tekerlek freni olarak sürtünmeli frenler kullanılmaktadır. Genel olarak doğrudan doğruya tekerleğe bağlı olan bu frenler; fren momentinin oluşturulması ve enerji değişiminin gerçekleşmesi olmak üzere iki ana fonksiyonu yerine getirirler. Otomotiv fren istemleri üç ana bölümden oluşmaktadır (Baruer 1995);

1. Rotor (kampana veya disk); tekerlek ile birlikte dönen kısımdır. Sürtünme çiftinin karşı yüzey parçasını oluşturur. Rotor malzemesi genellikle gri dökme demirdir.
2. Balata (pabuç veya ped); sürtünme çiftinin sürtünme yüzeyi kısmıdır. Frenleme anında, sürtünme yüzeyi, hidrolik piston aracılığıyla rotor üzerine bastırılır. Dönen kampana veya disk ile sabit balata arasındaki sürtünme kuvvetleri, kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürür. Genel olarak karşı yüzey aşınmaya karşı korunurken sürtünme yüzeyinin aşınmasına izin verilir.
3. Hidrolik sistem; fren pedalındaki frenleme kuvvetini balataya uygulanan basıncı pistonla transfer etmek ve basıncı arttırmak amacıyla kullanılan bir sistemdir. Modern fren sistemlerinde hidrolik sistem ABS (anti blokaj sistemi) sistemini de içermektedir.

Bu çalışmada fren balata malzemesinin frenleme esnasında oluşan sıcaklık ve gerilme dağılımı değişimi incelenmiştir. Daha önce literatürde balata malzemesi olarak kullanıldığı belirtilmiş olan 12 farklı balata malzemesinin ısı ve mekanik özellikleri Abaqus sonlu eleman metodu kullanılarak, balataların ısı ve mekanik davranışı belirlenmeye çalışıldı. Çalışmada ayrıca balatanın aşınma miktarının etkileri de ortaya çıkarılması amaçlandı. Abaqus paket programı kullanılarak fren sistemindeki balata modellenmiştir. Matematiksel olarak frenleme esnasında hareket enerjisinin sürtünme kuvveti yoluyla ısı enerjisine dönüşmesiyle oluşan ısı güç hesaplanmıştır.

İkinci bölümde fren sisteminde sürtünme nedeniyle dinamik kararsızlıktan dolayı kaynaklanan gürültü ve titreşim oluşumu, ısı oluşumundan kaynaklanan termoelastik dayanıksızlık, sıcaklık ve frenleme modu altında termal deformasyon değişimi ve balata-disk yüzeyleri arasında basınç dağılımının düzgün olmamasından dolayı balatada oluşan aşınma konuları hakkında literatür bilgisi verilmiştir.

Üçüncü bölüm olan materyal ve metot bölümünde kullanılmış olan malzemeler ve bunların özellikleri verilmiştir. Sonlu eleman modellenmesi gösterilmiştir.

Dördüncü bölüm olan bulgular ve tartışmalar kısmında analiz sonucunda elde edilen veriler olan ısı analiz ve gerilme bulguları yer almaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Literatür Bilgisi

Fren balata malzemesi geliştirilmesi ve geliştirilen balatanın performans ölçüm konusunda literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmaların birinci kısmında balata malzememe bileşenlerinin frenleme ve aşınmaya olan etkisi incelenmiştir.

Yamashita ve arkadaşları disk fren balataları için yüksek performanslı asbestsiz sürtünme malzemesinde tane yapı kontrolü üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda yeni geliştirilen sürtünme malzemelerinin temelde yeni bir kavramla üretildiği belirtilmiştir. Bu üretilen malzemelerde balata ile disk sürtünme ara yüzeyinde balata gözeneklerinden gazlar geçirilerek deneyler yapılmıştır. Frenleme zayıflamasını azaltmak için taneler arasındaki gözenek büyüklüğü kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Fren sesini azaltmak ve yüksek titreşim damperi sağlamak bağlayıcı reçine tabakası içeren yapı ile sağlanmıştır. Bu yeni balatanın asbest gibi güçlendirici elyaf içermediği, frenleme sırasında termal stabilite sağlandığı hem aşınma direncinde hem de fren ses seviyesi ve fren zayıflama direncinde yüksek performans gösterdiği belirtilmektedir (Yamashita *et al.* 1989).

Yamaguchi asbest elyaf takviyeli numuneler kullanarak bir dizi deneyler yapmıştır. Numunelerde bağlayıcı reçine, demir tozu, asbest, grafit, bakır, alüminyum silika kullanılmıştır. Deneyler dinamometre ve sürekli aşınma deneyleri şeklinde yapılmıştır. Bütün numunelerde artan ilk hızla ortalama sürtünme katsayısının azaldığı, frenleme süresinin arttığı görülmüştür. Yüzey basıncı arttıkça frenleme süresi kısalmaktadır. Deneme aralığı (0,1-0,4 MPa basınç aralığı) sürekli aşınma deneylerinde artan yüzey basıncıyla sürtünme katsayısında önce biraz artma daha sonra düşme olduğu görülmüştür. Artan kayma hızıyla sürtünme katsayısında bir düşme olduğunu bulmuştur. Yüzey basıncıyla frenleme momenti ve kayma hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu, artan yüzey basıncı ve kayma hızıyla frenleme momentinin arttığı görülmüştür (Yamaguchi 1990).

Vishwanath ve arkadaşları cam elyaf, karbon elyaf ve kevlar elyaf dokumaları, polivinilbütiral (PVB) ile modifiye edilerek üretilmiş fenolik reçine bağlı, kompozit

numuneleriyle yapılan deneylerde ağırlıkça %80 elyaf, %20 reçine kullanmışlardır. Aşınma deneyleri sonunda en az özgül aşınmanın kevlar dokuma takviyeli, en fazla özgül aşınmanın ise cam elyaf dokuma takviyeli kompozitlerde olduğu bulunmuştur. Kevlar elyaf kullanıldığında karşı yüzey pürüzlülüğünün azalmasının aşınma parçacıklarının abrasif etkisinin az olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Bu durum aynı zamanda kevlar'ın karşı yüzey aşındırıcılığının cam elyaf ve karbon elyaftan daha düşük olduğunu da göstermektedir (Vishwanath *et al.* 1993).

Kato ve Akira Cu, BaSO₄ ve maun ağacı tozunun fren balatalarının sürtünme ve aşınma özelliklerine etkilerini araştırmak için beş türlü katkı maddesi içeren üç grup kompozit incelemiştir. Bir bileşenin oranı sabit tutularak diğer ikisi % 0-40 arasında değiştirilmiştir. Kompozitlerin tribolojik değerlendirilmesi pim-disk tipi deney düzeneği kullanılarak iki farklı şartta yapılmıştır. Birinci grup deneyler düz yolda hafif frenleme şartlarında, ikinci grup ise uzun bayır aşağı iniş şartlarında (ağır frenleme) şartlarında yapılmıştır. Her bileşenin etkisini incelemek için birinin oranını artırıp diğerini azaltarak yapılan deneylerde aşınma oranı ve fren zayıflama dayanımları incelenmiştir. Tarama elektron mikroskobu (SEM) incelemelerinde ve elde edilen bulguların analizinden aşağıdaki sonuçlar elde etmişlerdir.

1. Bakır tozu katılması fren zayıflama dayanımını artırırken aşınma dayanımını azaltmıştır.
2. BaSO₄ ilavesi tam tersine etki yapmıştır yani fren zayıflama dayanımını azaltırken aşınma dayanımı ve mukavemet artmıştır.
3. Tarama elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri tekrarlı kaymaların sonucu aşınan yüzeylerden bir tabaka koparak ayrılmış, bu olay yüzey pürüzlülüğünü ve aşınmayı artırmıştır. Bu olay BaSO₄ katılmayan numunelerde görülmüştür.
4. Bakır tozu maun ağacı tozu karışımı katılması durumunda özgül aşınma miktarı artan bakır oranıyla yaklaşık doğrusal olarak artmıştır. En üstün fren zayıflama dayanımı ve en iyi sürtünme özellikleri her iki madde %20 oranında katıldıkları zaman elde edilmiştir.

BaSO₄ veya maun ağacı tozu içeren kompozitlerde en iyi sürtünme performansı ve fren zayıflama dayanımı %0 BaSO₄ içeren numunelerde, en az özgül aşınma değeri ise %10 BaSO₄ ve %30 maun ağacı tozu içeren numunelerde görülmüştür. Bakır tozu ile maun ağacı tozunun sürtünme oranı üzerine önemli etkisinin olduğu BaSO₄ tozunun ise önemli etki yapmadığı belirlenmiştir (Kato and Akira 1994).

Hando ve Kato, otomotiv fren balatasında kullanılması amacıyla bakır tozu, barit, Al₂O₃, Cashew dust ve grafitin kullanıldığı üç grup kompozit incelemiştir. Kompozitlerin tribolojik değerlendirilmesi pim-disk tipi deney düzeneği kullanılarak iki farklı şartta yapılmıştır. Birinci grup deneyler düz yolda hafif frenleme şartlarında, ikinci grup ise uzun bayır aşağı iniş şartlarında (ağır frenleme) şartlarında yapılmıştır. Her bileşenin etkisini incelemek için birinin oranını artırıp diğerini azaltarak yapılan deneylerde aşınma oranı ve fren zayıflama dayanımları incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri tekrarlı kaymaların sonucu aşınan yüzeylerden bir tabaka koparak ayrılmış, bu olay yüzey pürüzlülüğünü ve aşınmayı artırmıştır. Elde edilen değerlerle fenolik kompozitlerin sürtünme performansı önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Fiberler kompozitlerin maliyetini artırmaktadır. Bu yüzden çalışmada hiçbir fiber kullanılmamıştır (Handa and Kato 1996).

Kondoh ve arkadaşlarının sinterlenmiş yeni bir sürtünme malzemesi üzerine yaptığı çalışmada bakır esaslı kompozit tozlarının mekanik olarak alaşımlandırılarak geliştirildiği yüksek sürtünme kuvveti sağlamak için malzeme temasında uygun partikül sıklığı sağlanmıştır. Bu yeni sürtünme malzemesi kalın ve sert partikül içeren geleneksel sürtünme malzemelerinden daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha az aşınma özelliği göstermiştir. Bakır esaslı alaşıma mekanik ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için Ni, Fe, Zn yağlayıcı olarak grafit ve MoS₂, aşınma direncini iyileştirmek için sert parçacık olarak SiO₂, Al₂O₃ katılmıştır. (Kondoh *et al.* 1997).

Filip ve arkadaşları polimer matrisli kompozitlerde sürtünme olayının kompleksliği yüzünden sürtünme mekanizmaları tam olarak anlayamamıştır. Bu sebeple son zamanlarda polimer matrisli kompozit malzemesinin sürtünme tabakasının özellikleri ve

karakterizasyonunda gelişmeler olmuştur. Kompozit malzemelerin sürtünme performanslarını araştırmada sürtünme yüzeyi, sürtünme karakterini belirler. Sürtünme malzemesinin geri kalan kısmından farklı olarak sürtünme yüzeyinin oluşumu kimyasal kompozisyon ve yapıya bağlıdır. Sürtünme işleminde oluşan mekanik ve kimyasal etkileşim olduğu, eş yük ve sıcaklıkların uygulandığı sürtünmeye maruz kalmamış bir başka kısım ile karşılaştırıldığında, sürtünme yüzeyinin geri kalan kısmının formülasyonu arasındaki ilişkinin aynı olmadığı belirtilmiştir. Sürtünen ve sürtünmemiş kısımların kinetik ve faz dengesinin önemli miktarda farklılık gösterdiği belirtilmiştir (Filip *et al* 2001).

Morshed fren balatasının sürtünme katsayısının stabilitesi ve aşınma direnci için en iyi üretim parametrelerinin bulunması amacıyla 15 farklı malzeme içeren fren balatası üretilmiştir. Parametre düzenlemesine göre 16 farklı şartlarda üretilen fren balataları fiziksel ve tribolojik özellikler için test edilmiş ve bu çalışmanın sonucu fren balatasındaki sürtünme performansı ve fiziksel özellikleri arasında hiç bir ilgi olmadığını göstermiştir. Üstelik ağır araçlarda kullanılan dört ticari otomotiv balatasının fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmıştır. Konu ile ilgili fiziksel özellikler, yoğunluk, su emme, kabarma gibi özellikler standart test metodu kullanılarak yapılmış ve sonuçlar karşılaştırıldığında dört farklı sürtünme malzemesinin de matris olarak fenol formaldehit reçine içerdiği belirlenmiştir (Morshed 2004).

Sugözü ve Mutlu yaptıkları çalışmada farklı özelliklere sahip karışım malzemelerinin özelliklerini yitirmeden üretiminin gerçekleştirilebilmesini amaçlamışlardır. Kompozit malzemelerde homojenliğin sağlanmasında karıştırma süresi etkili olduğunu bulmuşlardır. Yaptıkları çalışmada, aynı oranlara sahip içerikler 5-10-15 dakika karıştırma süresinde hazırlanan balataların frenleme performansları deneysel olarak incelenmiş ve karıştırma süresinin performansa etkileri belirlenmiştir. 5 dakika karıştırma süresinde sürtünme katsayısı düşük çıkmıştır. 15 dakika karıştırma süresi 10 dakika karıştırma süresi ile yakın değerler göstermiştir. En uygun karıştırma süresi 10 dakika olarak belirlenmişlerdir (Sugözü ve Mutlu 2009) .

Mutlu ve arkadaşları fren balata malzemesi olarak borik asit ile birlikte karaçam kozalak tozunun kullanımı ve sürtünme katsayısındaki etkisini belirlemek için araştırma yapmışlardır. Karaçam kozalağının reçine içermesi ve sürtünme kompozitlerinde iyi bağlayıcılık özelliği gösterir. Borik asit bir bor ürünüdür, abrasyon şekillenme direnci ve ısıl direnci artırmak için borcam ve seramik endüstrisinde yaygınca kullanılır. Beş farklı içerikli yeni formüle edilmiş fren balataları sürtünme tanımlama ve tarama testi altında sürtünme katsayısı ve aşınma testine tabi tutmuşlardır. Ayrıca bu örneklerin performansını belirlemek için sürtünme yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelemişlerdi (Mutlu *vd.* 2009).

Bu konudaki çalışmaların ikinci kısmında fren balata sistemlerinin ısıl ve mekanik davranışlarının belirlenmesine yönelik olarak yapılmıştır.

Tirovic ve Day, parça geometrisi, malzeme özellikleri ve temas karakteristiklerinin basınç dağılımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Disk freninin bilgisayar ortamında basit bir üç boyutlu modeli üzerinde yaptıkları çalışmada, büyük basınç farkı ve düzgünsüzlüğünün aşınmanın yüksek olduğu balata - disk yüzeyinde oluştuğunu belirlemişlerdir (Tirovic and Day 1991).

Ripin temas basıncı üzerine çalışmıştır. Disk-balata ara yüzündeki temas etkisini göstermek amacıyla basınç dağılımını incelemiştir. Yapılan çalışmalarda en büyük aşınmanın balata öncü bölgesinde görüldüğü saptanmıştır. Düzgün olmayan bu aşınmanın sebebi öncü bölgede disk ve balata arasındaki basınç, artçı bölgeye göre daha yüksektir. Fakat bu oran teorik olarak ispat edilmemiştir. Sonlu elemanlar yöntemi, ADINA ve ANSYS gibi programlar kullanılarak model üzerinde basıncın yoğun olduğu bölgeler tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu konuda deneysel bir çalışma mevcut değildir (Ripin 1995).

Hohmann ve arkadaşları, kampana ve disk frenlerde kontak analizi yapmaya yönelik ADINA software programı kullanarak üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Yapışma ve kayma alanlarını araştırma sonuçlarında göstermişlerdir. Çalışmanın amacı iki durum için gerilme analizi yapmaya yönelik olmuştur. Hohmann ve arkadaşları birinci durum

için, frenleme yapıldıktan sonra analiz yapmışlar ve balata dış yarıçapında yüksek kontak basıncı tespit etmişlerdir. İkinci durumda, disk dönerken balata basıncı uygulanmış ve balata destek plakasında yüksek basınç tespit edilmiştir (Hohmann *et al.* 1999).

Tamari ve arkadaşları, disk fren balatalarında temas basıncının tahmini ile ilgili yaptıkları çalışmada, disk frenlerde aşınmanın düzgün olabilmesi için temas basıncının da düzgün olması gerektiğini belirtmişlerdir. Direkt olarak frenleme esnasında basıncın ölçülebilmesi deneysel olarak mümkün olmadığından bu çalışmada çeşitli ortam şartlarında basınç dağılımı tahmini için kullanılan bir metot sunulmuştur. Model statik durum için geçerli olmakla birlikte üç aşamadan oluşmuştur. Birincisi, sürtünme yüzeyi malzemesinin lineer olmayan elastiklik karakteristiklerinin elde edilmesidir. Elastiklik karakteristiklerini belirlemek için disk-balata yüzeyinde 20 bar basınçta dinamometre ile basma testi uygulanmıştır. İkincisi, testi simule etmek için sonlu elemanlar yöntemiyle fren sisteminin modelinin oluşturulmasıdır. Üçüncüsü ise, frenleme testinin simulasyonu için sonlu elemanlar yönteminin geliştirilmesidir. Elde ettikleri en önemli sonuç, aşınma karakteristikleri ile temas basınç dağılımı arasındaki sıkı ilişkinin ortaya konulmasıdır (Tamari *et al.* 2000).

Bergman ve arkadaşları, fren pedi yüzey geometrisinin, fren gürültüsüne etkilerini incelemişlerdir. Fren pedindeki öncü ve artçı bölgelerden malzeme azaltıldığında, gürültü seviyesinde azalma görülmüştür (Bergman *et al.* 2000).

Valvano ve Lee çalışmalarının kısa süreli ve kararlı durum altındaki ısıl davranışı tanımlamak için bir teknik geliştirmişlerdir. Bu teknik, gerekli termal parametreleri hesaplayan ve sonlu eleman tabanlı termal gerilim analizine girdi olarak sonuçları uygulayan bir PC tabanlı bilgisayar programından ibarettir. Geçici ve kararlı durum sıcaklıklarının ikisini de incelemişlerdir. Bu programda elde edilen verilerin Abaqus paket programına girilmesiyle çözüm gerçekleşir. Çözümde elde edilen verilerle bilgisayardaki program veri dataları karşılaştırılarak analiz programının doğruluğu ispatlanmıştır. Sürtünme ve ısı girdileri (disk ve balata için) ortalama ısı transfer katsayıları, sabit konveksiyon katsayıları program tarafından hesaplanır, disk ve balata

yüzeyinde frenleme esnasında bileşenlerin sıcaklıkları karşılaştırılır. Sonuç olarak diskin maksimum sıcaklığı, balata ile temas kurulan bölgede bulunur. Diskin maksimum sıcaklığı, tekrarlayan frenleme esnasında yükselmiş olur. Abaqus programı yardımıyla çözülen problemin analiz değerleri sayısal değerlerle birebir örtüştüğü görülmüş ve simülasyonun doğruluğu ispatlanmış olduğunu bulmuşlardır (Valvano and Lee 2000).

Arpat yaptığı çalışmada hafif ve ağır ticari araçların yüklü halde sık frenleme sonucu, kampanalı veya diskli fren sistemlerindeki balataların sürtünme yüzeyindeki sıcaklığın artmasından dolayı balatadaki aşınma miktarını incelemiştir. Belediye otobüslerinde otobüsün sık sık duraklarda durmasına bağlı olarak balata aşınmasının arttığını, balata ömürlerinin kısa olmasına ve aracın seyri sırasında frenlemenin tam yapılamamasına neden olduğunu bulmuştur. Isıl analiz hesaplamalarının yanı sıra belediye otobüsünde yol fren testi yapılmış ve sonuçları teorik verilerle karşılaştırmıştır. Frenleme anındaki sıcaklığın düşürülmesiyle balata aşınmasının azaltıldığını bulmuştur (Arpat 2001).

Severin ve Dörsch, frenlerde sürtünme mekanizmasıyla ilgili yaptıkları çalışmada, sürtünme malzemelerinin ve sürtünme tabakasının, frenleme işlemine etkilerini incelediler. Balata malzemesinin içerdiği demir oranının sürtünme katsayısının belirlenmesindeki önemi tespit edilmiştir. Deneysel olarak farklı oranlarda demir içeren balata üzerinde sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Demir oranı azaldıkça, sürtünme katsayısının da azaldığı belirlenmiştir (Severin and Dörsch 2001).

Ostermeyer, fren sistemlerindeki sürtünme ve aşınma olgusunu incelemiştir. Temas bölgesindeki aşınma ve sürtünme karakteristikleri bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Ostermeyer, sürtünme gücünün (kayıp enerji) artmasına bağlı olarak sürtünme katsayısının azaldığını görmüş, bunu fren zayıflaması olarak nitelendirmiştir. Temas bölgesindeki sıcaklık dağılımının homojen olmadığı, disk üzerinde yapılan uzun süreli deneysel çalışmalarda, periyodik sıcaklık değişimleri gözlenmiştir. Ayrıca fiziksel olarak açıklanamamasına rağmen sürtünme katsayısının zamana bağlı periyodik değişimleri tespit edilmiştir (Ostermeyer 2001).

Jearsiripongkul ve arkadaşlarının, diskli frenlerde gürültü kontrolü ile ilgili yapmış oldukları çalışmalarında, kayar semerin dinamik dengesizliğini azaltmaya yönelik model oluşturulmuştur. Dinamik dengesizliğin nedenleri ped ve disk arasındaki hareket, frenleme kuvveti ve sürtünme kuvveti olarak belirtilmiştir (Jearsiripongkul *et al.* 2002).

Bettge ve arkadaşları, disk frenlerde aşınma yüzeylerindeki temas bölgelerinin topografik özelliklerini incelemiştir. Sürtünme ve kaymaya bağlı olarak temas basıncının değişimi, aşınma miktarı, yüzey geometrisi ve disk-balata malzeme özellikleri ele alınmıştır. Çalışmanın sonucunda yüksek frenleme kuvvetlerinde, geniş temas pürüzlülüğü ortaya çıkmıştır (Bettge *et al.* 2003).

Abu Bakar ve arkadaşları, balata-disk arasındaki basınç dağılımını farklı tasarım, boyut ve malzeme kullanılarak bilgisayar ortamında modellemeye çalışmışlardır. Piston, balata ve disk geometrisinde farklı düzenlemeler uygulamışlardır. Modelleme için sonlu eleman yöntemi ve Abaqus paket programı kullanmışlardır. Çalışmada, disk ve balata arasındaki temas yüzeyinde oluşan sürtünme kuvvetinden dolayı disk-balata arasındaki basınç dağılımının asimetrik olduğunu görmüşlerdir. Asimetrik ve düzgün olmayan basınç dağılımı, düzgün olmayan aşınmaya ve balata ömrünün kısılmasına sebep olmuştur. Balata konstrüksiyonunun basınç dağılımı ve aşınma üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışmada ped ve disk arasındaki sürtünme katsayısı 0.6, basınç 2 N/mm^2 olarak alınmıştır. Çalışmanın devamında, ilk adımda basınç uygulanmış, ikinci adımda disk dönme eksenini etrafında iki farklı açısal hız ile döndürülmüştür ($\omega_1=0,1 \text{ rad/s}$ $\omega_2=6 \text{ rad/s}$). Disk döndürülmediğinde, balatanın simetri eksenine göre her iki yüzeyindeki basınç dağılımının aynı olduğu görülmüştür. Disk döndürüldüğünde, öncü bölgedeki basınç değeri daha yüksek olmuştur. Açısal hız arttırıldığında öncü ve artçı bölgelerdeki basınç farkı biraz daha artmıştır (Abu Bakar *et al.* 2003).

Yapmış oldukları başka bir çalışmada fren diski ve sonlu eleman modeli kullanarak disk ve balata yüzeylerindeki kontak basınç dağılımının 3 boyutlu analizini yapmışlardır. Yöntemin özünü asimetrik katı matrisinin iletim sertliği, diskteki ve balata ara yüzlerindeki sürtünme katsayısı oluşturmuştur. Farklı seviyelerdeki model fren diski ve

kontak basınç dağılımını araştırmışlardır. Uygun model kullanılarak fren disklerindeki ara yüzlerdeki basınç dağılımlarının tahmin edilmesi sağlanmıştır. Modifikasyon geometrisi ve disk fren parça malzemelerinin daha düzgün temas basıncı dağıtımı için araştırma yapmışlardır. Basınç dağıtımı ile balatadaki aşınma önleneceği ve böylece balataların uzun ömürlü olması sağlanacağını düşünmüşlerdir (Abu Bakar *et al.* 2005)

Başka bir çalışmada ise frenleme esnasında sürtünme nedeniyle dinamik kararsızlıktan dolayı kaynaklanan gürültü ve ses titreşimini deneysel yolla bulmuş ve verileri Abaqus paket programı kullanarak incelemiştir. Daha önceki birçok araştırmacının ihmal ettiği sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı ($T-\mu$ bağımlı) düşünülerek eksiklikleri gidermeye çalışmışlardır. Tahmin edilen sonuçlar daha sonra elde edilen $T-\mu$ katsayılarına bağlı ve bağımsız deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Abu Bakar *et al.* 2007).

Jacobsson konvansiyonel disk fren analizi yapmıştır. Buna bağlı olarak ara yüzey basıncı sabit ya da yarıçapla ters orantılı olarak alınmıştır. Dinamik şartlar altında, temas alanı ve frenleme basıncı dağılımı çeşitlilik göstermektedir. Zamana bağlı olarak ısıl bozunmalar sürtünmeden dolayı oluşmuştur. Jacobsson mekanik bozunmaların uygulanan işletme kuvvetlerinden dolayı oluştuğu sonucuna varmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, sürtünen malzeme çiftinde aşınma oluştuğu ve diskin kalınlığında azalma meydana geldiği görülmüştür (Jacobsson 2003).

Fieldhouse ve Steel, $0.5-8 \text{ N/mm}^2$ arasındaki yüzey basıncı değerlerinde yapmış oldukları deneysel çalışmada, basıncın disk-balata arasındaki sürtünme katsayısının ve semer geometrisinin disk fren gürültüsü üzerindeki etkisini incelemiştir. Sürtünme çifti arasındaki sürtünme katsayısının fren gürültüsünün oluşmasında etkili bir rol oynadığını görmüşlerdir. Ancak yaptıkları deneysel çalışmada, stabil olmayan fren sistemlerinde, gürültünün her koşulda oluştuğunu ve gürültünün sürtünme katsayısı değişikliklerinden (çeşitli sıcaklık ve basınç değerlerinde) etkilenmediğini görmüşlerdir. Frenin sessiz çalışması için yüksek sürtünme katsayısına sahip malzemenin kullanılmamasını veya malzemenin sıcaklık ve basınç değişimlerine duyarlı olmamasını tavsiye etmişlerdir (Fieldhouse and Steel 2003).

Voller ve arkadaşları, disk fren soğutma karakteristikleri analizi için bir yöntem geliştirmeye çalışmışlardır. Sonlu elemanlar ve hesaplamalı akışkan dinamiği metotları kullanılarak, fren tertibatı ve ara yüzeyleri arasındaki ısı transferi analizi yapılmıştır. Deneysel düzeneğinde optimum ısı transferinin gerçekleşmesi için disk hava kanalları tasarımı yapılmıştır (Voller *et al.* 2003).

Mosleh ve arkadaşları, çeşitli hızlarda frenlemeye tabi tutulan balatalardaki aşınma ve sürtünme davranışları ve aşındırıcı malzemelerin tribolojik özellikleri ile ilgili incelemeler yapmışlardır. Deneysel olarak yapılan testlerde fren malzemesi karakteristikleri belirlenmiştir. Fren malzemelerinin farklılığına bağlı olarak aşınma oranındaki değişimin düşük ve yüksek kayma hızlarına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir (Mosleh *et al.* 2003).

Hwang ve arkadaşları frenleme sırasında sürtünmeden kaynaklanan ısıdan oluşan termo elastik düzensizliği tanımlamışlardır. Tam bir frenleme ve tekrarlı frenleme altında sıcaklık ve ısıl deformasyon değişimini sonlu elemanlar yöntemiyle çözmeye çalışmışlardır. Disk ve balatanın, elastisite modülü, poisson oranı, ısıl genişleme katsayısı, ısıl iletkenlik, özgül ısı ve yoğunluk değeri bulunmuş Ansys programına girilerek diskin termal analizi yapılmıştır. Sonuç olarak; diskin maksimum sıcaklığı, balata ile temas kurulan bölgede bulunur. Diskin maksimum sıcaklığı, tekrarlayan frenleme esnasında ortaya çıkar. Ansys programı yardımıyla çözülen problemin analiz değerleri sayısal değerlerle birebir örtüştüğü görülmüş ve simülasyonun doğruluğu ispatlanmıştır (Hwang *et al.* 2005).

Hang ve arkadaşları fren sistemlerindeki önemli sorunlardan biri olan termoelastik indüklenmiş sıcaklık noktaları, gürültü ve titreşim arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanarak fren parçalarına uygulanan sıcaklık analizleri yapılmıştır. Daha doğru frenleme durumlarını görebilmek için iki boyutlu modelden ziyade silindirik üç boyutlu disk modeli geliştirilmiştir. Bilinen bir frenleme analizinde, yüzey basıncı ya sabit ya da yarıçapa ters orantılı olduğu varsayılır. Bununla birlikte, dinamik frenleme durumları altında, frenleme esnasında ısı oluşumu, bağlantı basınç dağılımını değiştiren termoelastik bozulmaya neden olur. Bu çalışma frenlemede

sürtünme ısı oluşumundan kaynaklanan termoelastik dayanıksızlıktan bahsedilmekte, sıcaklık, tek frenleme ve tekrarlı frenleme modu altında termal deformasyon değişimini tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak sürtünme ısısının dinamik hareket ve dağılımı, diskin maksimum sıcaklığının pedalla bağlantı bölgelerinde bulunduğu, diskin maksimum sıcaklığının tekrarlı frenleme esnasında olduğu, fakat maksimum sıcaklığın artmasının çoğu frenleme zamanını azalttı görülmüştür (Hang *et al.* 2006).

Li ve arkadaşları diskli frenlerde, frenleme esnasındaki titreşim ve gürültü oluşumunun balata yüzeyindeki basınç ve sıcaklık dağılımından kaynaklandığı üzerinde durmuşlardır. Deneysel çalışmalar ve sayısal analizler yapmışlardır. Balata yüzeyindeki sıcaklık dağılımı bulunmuş ve sıcaklık dağılımının düzgün olmadığı görülmüştür. Kontak analizi yapılarak balata yüzeyindeki basınç değerleri bulunmuştur. Sıcaklık değerinin yüksek olduğu bölgelerde yüksek basınç ortaya çıktığı görülmüştür. Sıcaklıktan etkilenen modelin titreşim seviyesinin sıcaklıktan etkilenmeyen modelden yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar sıcaklığın balata yüzeyinde oluşan gürültü ve titreşimde etkili olduğunu göstermiştir (Li *et al.* 2008)

Ho ve arkadaşları araç hidrolik fren sistemindeki ana silindir piston contasındaki deformasyonun fren sistemi üzerindeki tepkisini anlamak için sonlu eleman modeli ve hidrolik analiz sistemini birleştirerek model oluşturmuşlardır. Abaqus programıyla conta meydana gelen deformasyondan kaynaklanan hacim değişimini hesaplanmıştır. Conta deformasyonunun fren sistemi üzerindeki etkisini görmek için hidrolik benzetim kullanılmıştır. Hidrolik benzetim modelinde sistemi harekete geçiren fren pedal kuvveti tahmin edilmiştir. Sonlu eleman modelinde sıvı basıncı, malzeme özellikleri, geçiş kuvvetleri ve sızdırmaz conta bileşimindeki sürtünme katsayısı dikkate alınmıştır. Sonlu eleman modelinden elde edilen veriler deney verileriyle karşılaştırılarak doğruluğu kabul edilmiştir (Ho *et al.* 2008).

Literatürdeki çalışmalarda görüldüğü gibi çalışmalar daha ziyade dinamik kararsızlıktan kaynaklanan gürültü ve titreşim oluşumu, tam ve tekrarlı frenleme altında sıcaklık ve ısı deformasyon değişimi, frenleme esnasında balata yüzeyindeki sürtünme kuvvetiyle

sıcaklığın artmasından dolayı balatadaki aşınma miktarı ve sürtünme davranışı alanların da yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi sürtünme daima enerji dağılımı ile ilgilidir ve enerji kaybının oluşum süreci birkaç aşama halinde tanımlanır.

1. Durum. Mekanik enerji temas bölgesinde ortaya çıkar ve gerçek temas alanının oluşumuna sebep olur.

2. Durum. Mekanik enerji elastik deformasyon, plastik deformasyon, kızaklama (ploughing) ve adhezyon şeklinde gerçek temas bölgesinin içerisine doğru ilerler.

2.2. Fren Malzemeleri

Bu bölümde fren malzemelerinin tribolojik özellikleri ve fren diskleriyle balata malzemeleri hakkında bilgi verilecektir.

2.2.1. Fren Malzemelerinin Genel Tribolojik Özellikleri

Fren malzemelerinin özellikleri belirlenirken çalışma şartları göz önüne alınmaktadır. Frenlerde sürtünmenin önemi bilinmektedir. Bu nedenle sürtünme görevi yapan elemanların istenilen özelliklerde olmaları gerekmektedir. Sürtünme elemanları düşük sıcaklıklardan çok yüksek sıcaklıklara kadar sürekli değişebilen çalışma sıcaklıklarında ve yüksek hızlarda çalışmaktadır. Disk ve kampananın mekanik ve ısı zorlamalara karşı dayanıklı olması istenir. Fren sistemlerinde sürtünmeden dolayı kısa zamanda oluşan sıcaklık artışının, en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılabilmesi için karşı malzemenin yüksek ısı iletim katsayısı ile özgül ısıya sahip olması gerekmektedir. Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeniyle disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısı genleşme katsayısının küçük olması istenir. Frenleme sırasında kısa zamanda oluşan yüksek ısı miktarı, disk veya kampana tarafından alınıp, iletilerek dışarıya verileceğinden, disk malzemesinin yüksek ısı iletim kabiliyetine sahip olması gerekir (Fenton 1996).

Fren balatasını oluşturan kompozit malzemenin yüksek bir sürtünme katsayısına sahip

olması gerekmektedir. Balata üzerine uygulanan frenleme kuvvetlerine karşı dayanıklılık, iyi aşınma direnci ve sürtünme yüzeyine iyi oturma ilk bakışta istenilen özelliklerdir. Fren sistemindeki sürtünme malzemeleri homojen değildir ve anizotropiktir. Malzeme yüksek sıcaklık direnci, yüksek ısı iletkenliği, yüksek mekanik mukavemet ve iyi korozyon direncine sahip olmalıdır.

2.2.2. Belli Başlı Fren Malzemeleri

Disk ve kampana malzemesi olarak genellikle perlitik yapılı gri dökme demir kullanılmaktadır. % 2,8 – 3,2 C; % 1,6 – 1,9 Si; % 0,6 – 0,8 Mn; % 0,15 S; % 0,3 P ve bunlara ek olarak karbür, Ti, Cr ve Nikel kimyasal bileşimi oluşturur. Sertlik değeri 170-280 HB' dir. Perlitik dökme demir grafit yaprakçıkları bulundurduğundan iyi bir kayma özelliği gösterir. Yüksek işlenebilirlik, titreşimi soğurma, yüksek ısıl iletkenlik ve aşınma direnci en önemli özelliklerdendir. Bunun yanında kırılma oluşu ve dinamik yüklere karşı hassas oluşu dikkati çeker (Uzun vd. 2008).

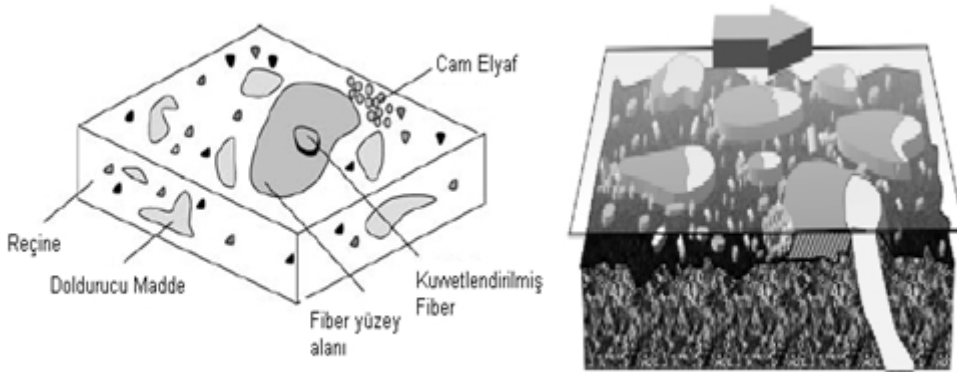
Dökme demirlere eklenen fosfor, % 0,1 - 0,2 arasında bir değere yükseltirse, bu malzemenin sürtünme katsayısı yükselir. İlave fosfor ile sürtünme katsayısının kararlılığı ve aşınma dirençleri de düzelir.

Yüksek performanslı taşıtlarda disk malzemesi olarak dökme demir tercih edilmez. Mercedes tarafından imal edilen seramik fren diskleri, dökme demir diske oranla % 60 daha hafif olmaktadır. Bu hafiflik taşıtın daha dinamik bir hal almasına olanak vermektedir. Karbon fiber, karbon tozu ve reçineden oluşan bir madde, yüksek basınçla sıkıştırılarak 1000 °C sıcaklığındaki bir fırında disk şeklini almaktadır. Disk soğuduktan sonra üzerine püskürtülen sıvı haldeki silisyum, karbon alaşımını disk tarafından tamamen emilmektedir. Bundan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon sayesinde disk seramiğe dönüşür. Ortaya çıkan yeni seramik fren diski, normal dökme demir fren disklerine oranla çok fazla avantaj sağlamaktadır. Seramiğin 1400 °C' a kadar dayanıklı olması, sürekli frene basıldığında frenin fazla ısınıp şişmesi ve kaydırması gibi durumları ortadan kaldırır (Domaç 2006).

Fren balataları çok sıkıştırılmış, bakır içeren sürtünme malzemelerinden imal edilmektedir. Su ve yağ kirlenmesinden asgari derecede etkilenmektedirler. Otomotiv disk ve kampana frenlerinde kullanılan fren balataları genellikle birçok bileşenin bileşiminden yapılıdır.

Yaygın olarak kullanılan asbestin kanser yapıcı özellikte olması iddiasından dolayı, asbestin özelliklerini sağlayacak ikame malzemelerin, hem istenen özellikleri sağlaması, hem de ekonomik olması istenmektedir. Birçok endüstri alanında kullanılan bor ürünlerinden olan borik asit, asbestin elyaf özelliğini karşılamada alternatif malzemelerden olan cam elyafın üretiminde kullanılmaktadır. Borik asit fren balata kompoziti içerisine katılmaktadır. Balata malzemesi bileşenleri beş kategoriye ayrılabilir (Kapoor vd. 2001).

- i) Bağlayıcı malzemeler,
- ii) Takviye malzemeleri,
- iii) Sürtünme ayarlayıcı malzemeler,
- iv) Dolgu malzemeleri,
- v) Madeni dolgu malzemeleri,
- vi) Temizleyiciler.



Şekil 2.1 Balatalardaki malzemelerin içyapı ve izometrik görünüşü

2.3. Disk Frenler

2.3.1. Tarihsel Gelişimi

1890'larda Amerikalı Elmer Ambrose Sperry elektromanyetik kumandalı disk tasarlamıştır. Fren mıknatısı olarak adlandırılan disk, fren diski ile moment elde etmek için temas edecek şekilde yerleştirmiştir. Sperry elde edilen momentin bir kısmının sürtünme, dolayısıyla bir kısmının da manyetik akımdan kaynaklandığını belirtmiştir. İngiliz mühendis William Lanchester, 1902 yılında disk frenin patentini almıştır. Disk freni, metal bir diskin taşıtın arka tekerleklerinden birine rijit olarak bağlanması ile tanımlanmıştır. Taşıtı yavaşlatmak için diskin bir çift tırnak ile sıkıştırılması gerekmiştir. Bu dönemde fren teknolojisinde çeşitli gelişmeler olmuştur. Newcomb ve Spurr'a göre Mercedes ve Renault 1903 yılında modern kampana fren geliştirmiştir.

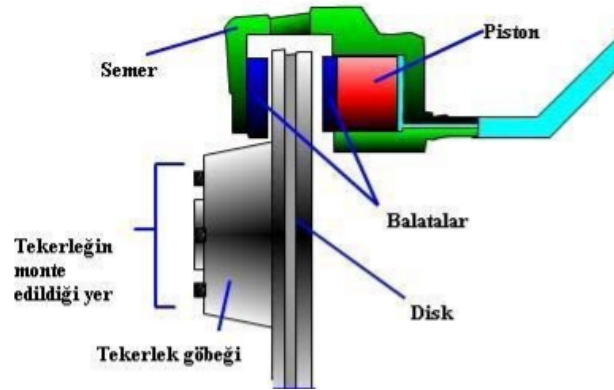
20. yüzyıl boyunca Lanchester ve Sperry'nin fren tasarımlarında gelişmeler olmuştur. Malzeme ve kumanda yöntemleri değişmiştir. Harper'a göre II. Dünya Savaşı döneminde havacılık endüstrisinin gelişmesiyle bu alanda değişimler gözlenmiştir. Uçaklarda kullanılan disk frenler kavrama tipi olarak nitelendirildi. Otomotiv endüstrisinde kullanılan disk frenlerin sürtünme balatası açısı büyüklükleri 30° ile 50° arasında değişmektedir. Kavrama tipi disk frenlerde balata ile diskin temas ettiği bölge halka biçiminde 360°'lik bir alandan oluşmuştur. Açısı büyüklükleri çok çeşitlidir. Otomotiv disk frenlerindeki en büyük ilerleme Dunlop, Girdling ve Lockheed ile 1950'lerde kaydedilmiştir. 1970 öncesi, A.B.D.'de otomobillerin ön tekerleklerinde kampana fren kullanılmaktaydı. Bu durum 1976'da Federal Motor Taşıt Güvenliği standardının belirlenmesiyle değişmiştir. Yüksek performanslı otomobil sayısının artışı A.B.D.'de disk fren sistemlerinin kullanımını yaygınlaştırmıştır (Halderman *et al.* 2000). Resim 2.1.'de diskli fren sistemi görülmektedir.



Resim 2. 1 Diskli fren sistemi görünüşü

2.3.2. Disk Fren Elemanları

Taşıtlardaki diskli fren sistemleri temel olarak üç kısımdan oluşur. Bunlar; fren diski, fren balatası ve semerden oluşur. Şekil 2.2. de disk fren elemanları görülmektedir.



Şekil 2. 2 Disk fren elemanları

Disk: Taşıtlarda prensip olarak tekerlekle eş eksenli olarak monte edilmiş olan metal bir disk bulunmaktadır. Semer adı verilen ve tekerlek askı kollarına bağlı olan bir parça diski genel olarak bir köşesinden kavrar. Semerin iç kısımlarında diskin iki yüzeyine yaslanan balatalar frenleme sırasında hidrolik basınç ile diski her iki yönden eşit kuvvetle sıkıştırırlar.

Disk in semer tarafından örtülü olmayan kısımları hava akımlarına açık bulunduğundan

kolayca soğutulmaktadır. Çamur ve balata tozları merkezkaç kuvvetle ya da hava akımı ile temizlenir. Fren cevap süresini uzatan nem oldukça hızlı buharlaştığından cevap çabuklaşır. Disk kaba kirlenmelere karşı bir çamurluk sacı ile korunmaktadır. Disk performansını etkileyen en önemli faktörler aşınma, disk kalınlık değişimi, düzgün olmayan yüzey ve yüksek sıcaklıktır. Bu faktörler titreşime sebep olmakla birlikte frenleme etkinliğini de olumsuz yönden etkiler. Düzgün olmayan aşınma ve bunun sonucu frenleme yüzeyindeki farklı kalınlık değerleri titreşime sebep olur (Harper 1998).

Disk frenleme yüzeyindeki kalınlık farkı 35 µm'yi geçmemelidir. Uzun süreli nemli ortam şartlarında çalışma disk yüzeyinde korozyon oluşturur. Normal bir çalışmadan sonra korozyon sadece frenleme yüzeyinde kalıyorsa, sorun semerden kaynaklanmaktadır. Disk yüzeyinde derin dairesel yarıklar veya çok sayıda radyal çatlaklar görülüyorsa disk değiştirilmelidir. Mavi noktalar ve siyah yamalar titreşim oluşum sebebidir. Ancak frenleme sistemi bir bütün olarak düşünülmeli ve diğer parçalar da incelenmelidir (Harper 1998).

Disk fren balataları: Tekerleğe bağlı bulunan bir fren diskinin, semer içine yerleştirilmiş iki balata arasında her iki tarafından sıkıştırılması şeklinde çalışmaktadır. Disk fren sistemlerinde sürtünme malzemesini (balata), dönen fren diskine her iki yönden bastırmak için bir piston kullanılmaktadır. Tekerleklerin dönmesi yavaşlamakta, araç da tekerlekler ile yol yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı durmaktadır. Disk balatalarının avantajları aşağıda sıralanmıştır.

* Disk ve balata yüzeyi arasında kaymalar kaçınılmazdır. Aşınma, ısınma ve yıpranmalar bu aşamada olmaktadır. Sürtünmeden ötürü açığa çıkan ısı yüzey sıcaklığını yükseltmektedir. Disk frenler bu tür etkilere karşı daha dirençlidir. Çünkü fren sistemi çevresinde hava dolaşımı daha elverişlidir. Bazı disklerin içine hava sirkülasyonlarına imkân veren kanallar açılmıştır. Zaten fren diskinin % 80'i açıktadır.

* Islak durma mümkündür. Su diskin dikey yüzeyinden kolayca akar ve balatalar

disk yüzeyine sürekli değer, bu durum su birikmesini ve frenlerin kaymasını etkili bir şekilde önler.

Balata Standartları: Balataların kullanıldıkları yapıdaki görevlerine göre belirli standartlarda üretilmesi gereklidir. Balata malzemesi üretiminde Türk standartları; TS 864 (debriyaj balataları için), TS 925 (debriyaj kaplama malzemeleri için) ve TS 555 (taşıt fren balatalarını sınıflandıran) olmak üzere üç adettir. Sürtünme esasına dayanan yapılarda sürtünme katsayısının (μ) en önemli faktör olduğu söylenebilir. Sürtünme malzemelerinin sınıflandırılmasında genellikle dört faktör göz önüne alınır. Bunlar basınç, kayma hızı, sıcaklık ve aşınma miktarıdır. Sürtünme olayı sırasında yüzey pürüzlülüğü ve yutulan enerjiler sonucu ortaya çıkan sıcaklık, sürtünme katsayısı üzerinde önemli rol oynar. Isınan malzemenin sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısı değişir ve görev yapamaz hale gelir. Sürtünme malzemelerinin karşı yüzeyle iyi bir alışma göstermesi, atmosfer şartlarında yapısını koruması, çeşitli basınçlara karşı dayanım göstermesi gerekmektedir. Dış zorlamalara karşı sürtünme katsayısı değerinin büyük sapma göstermemesi ve sıcaklık karşısında sürtünme malzemesinin yapısının bozulmaması istenir. TS 555'e göre sürtünme katsayısı, disk ve kampana ile veya disk freni ve kampana freni balatası arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır. Soğuk (normal) sürtünme katsayısı, aşınma deneyi esnasında 100, 150 ve 200 °C' de ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Sıcak sürtünme katsayısı yapılan deney sonucu A grubu sınıftaki balatalarda 300 – 350 °C ve B grubu sınıftaki balatalarda ise 350 - 400°C sıcaklıklarda ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır (TS 9076).

Sıcaklık grubu A, 350 °C' a kadar sınırlanmış sıcaklıkta ve 1050 kPa basınçta yapılan aşınma deneyine bağlı şartlardır. Sıcaklık grubu B, 400° C' a kadar sınırlanmış sıcaklıkta ve 3 MPa basınçta yapılan aşınma deneyine bağlı şartlardır (TS 9076).

Balata kalitesini belirlemede sürtünme katsayısı aralıkları ve TS 555'e göre balataların sınıflandırılması çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2. 1 TS 555'e göre balataların sınıflandırılması

Sınıf	Sürtünme katsayısı (μ)
C	0,15'e kadar
D	0,15-0,25
E	0,25-0,35
F	0,35-0,45
G	0,45-0,55
H	0,55'ten yukarı

Balata Seçimi: Bir taşıt için uygun balatanın belirlenmesinde, taşıtın teknik özellikleri ile taşıt için ideal fren kuvvet dağılımları oluşturulur. Bundan sonra taşıtta ideal dağılıma yakın fren kuvvet dağılımı sağlayacak iç fren faktörü belirlenir. İç fren faktörünün belirlenmesinden sonra, bu şartları sağlayacak balata geliştirilir. Balata sürtünme katsayısı istenen iç fren faktörünü sağlayacak şekilde olmalıdır. Sürtünme katsayısının istenenden yüksek olması tekerleklerin arzu edilenden daha düşük fren basınçlarında bloke olmasına, balataların daha çabuk aşınmasına neden olurken, sürtünme katsayısının istenenden düşük olması ise fren mesafelerinin uzamasına neden olacaktır. Bu nedenle taşıt için en uygun sürtünme katsayısını veren balata geliştirilmelidir.

Fren elemanlarının, sürtünme ve aşınma karakteristiklerini fren tasarımı, malzemeye ve balataya etkileyen şartlar belirlemektedir. Sıcaklık, kayma hızı ve basınç balata ömrünü belirleyen temel parametrelerdir. Fren sisteminde sürtünme elemanları sürekli olmayan farklı büyüklükteki basınç ve sıcaklık etkisinde çalışması nedeniyle, aşınma ve sürtünme davranışları oldukça karmaşıktır. Balataların sürtünme ve aşınmasına bilimsel ve sınıfsal ayırım getirmek karmaşık bileşenler ve birbirleriyle etkileşimleri yüzünden mümkün değildir. Ancak, farklı fren tasarımları için balata malzeme seçimi yapılabilir. Frenlemede sürtünme sırasında yüzeylerin pürüzlülüğü ve absorpsiyonu sonucu meydana gelen sıcaklık, sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkiler, sıcaklığın artması malzemede sürtünme katsayısının düşmesine neden olur ve sistem görev yapamaz hale gelir.

Balatalar bütün frenleme durumlarında sabit kalan kararlı bir sürtünme katsayısına sahip olmalıdır. Ancak uygulamada hız ve basıncın artmasıyla sıcaklığın yükselmesi sonucu sürtünme katsayısında düşme görülür. Balatalardan, her türlü çalışma şartlarında sabit sürtünme performansı, sürtünme katsayısının sıcaklık, fren basıncı ve hızdan bağımsız olması istenir. Aynı zamanda sürtünme davranışındaki değişimin az olması, yüksek sıcaklık direnci, yüksek ısı iletkenliği, iyi korozyon direnci, yüksek mekanik mukavemet, düşük gürültü seviyesi, hava koşullarından etkilenmeme, balata malzemesinin sağlığa zararsız olması, yüksek aşınma mukavemeti ve karşı malzemede düşük aşınma istenmektedir. Resim 2.3.'de fren balatası görülmektedir.



Resim 2. 2 Fren balatası

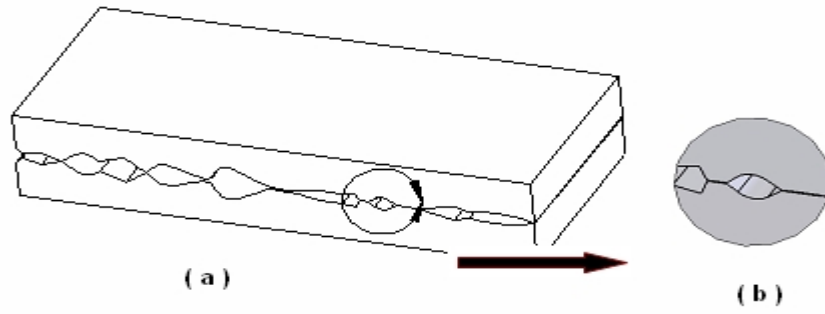
2.4. Sürtünme ve Aşınma

2.4.1. Sürtünmenin Tanımı

DIN 50281'e göre sürtünme "Birbiri üzerinde kayan, yuvarlanan veya kaymalı yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini yavaşlatan (Dinamik sürtünme) veya engelleyen (Statik Sürtünme) mekanik direnç " olarak tanımlanır. Normal atmosfer şartlarında yüzeyler arasında toz, kir, oksit vb. gibi ara elemanların olması nedeniyle pratikte tam bir kuru sürtünme elde edilemez. Bundan dolayı yağlamasız olarak meydana gelen kuru sürtünme yerine " Teknik kuru sürtünme" terimini kullanmak daha doğrudur (Mutlu 2002).

Genel anlamda, sürtünme temas halindeki yüzeylerin ve birbiri üzerinde hareket eden ya da, hareket ihtimaline karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır (Yılmaz 1997, Ashby 1996). Birbirlerine temas eden parçalarda sürtünme, kinematik bakımdan kayma, yuvarlanma veya kayma+yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur.

Şekil 2.3 (a)'da üstteki cisim alttaki cisim üzerinde sağa doğru kaymaktadır, diyagram büyütülerek gösterilen (b)'de ise yüzeysel yapışma noktaları görülmektedir.



Şekil 2. 3 Sürtünmede temas alanları

Sürtünmenin etkileri belirlendiğinden veya fonksiyonları kontrol edildiğinden beri her cihaz geliştirilirken sürtünme özellikleri dikkate alınarak cihazın ömrü ve verimliliği belirlenmektedir. Sürtünme olayı incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam madensel temiz yüzeye sahip olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır. Şekil 2.3' de görüldüğü gibi yüzeyler birbirleri ile pürüzlerinin tepelerinde temas etmektedirler. Böylece temas alanı çok küçük alanlardan meydana gelmektedir. Bu küçük temas alanlarının toplamı gerçek temas alanını oluşturur. Bu alan temas yüzeylerinin sınırlarını tayin eden geometrik alandan çok daha küçüktür.

Sürtünme, faydalı iş enerjisinin büyük bir kısmını yutması ile birlikte günlük yaşamımızda sürtünme olmazsa birçok işin gerçekleştirilemeyeceği de bir gerçektir. Örneğin, yürüme olayından taşıtın hareket ettirilmesine, elimizle kalemi tutmamızdan gözümüzü kırpmamıza kadar temas halindeki yüzeylerin sürtünmesi söz konusudur (Halliday and Resnick 1999).

Tekniğin her sahasında malzemelerin sürtünme özelliklerinden ve sürtünme kuvvetinden faydalanılarak çeşitli konstrüksiyonlar gerçekleştirilmiştir. Örneğin; kavramalarda olduğu gibi bir güç nakli, frenlerde olduğu gibi hareket halinde bulunan bir makinenin kinetik enerjisinin alınarak durdurulması, yani bir gücün yutulması veya sevk ve hareket silindirlerinde olduğu gibi bir hareketin iletilmesi gibi çok çeşitli hareketler de olabilir (Karamış 1995).

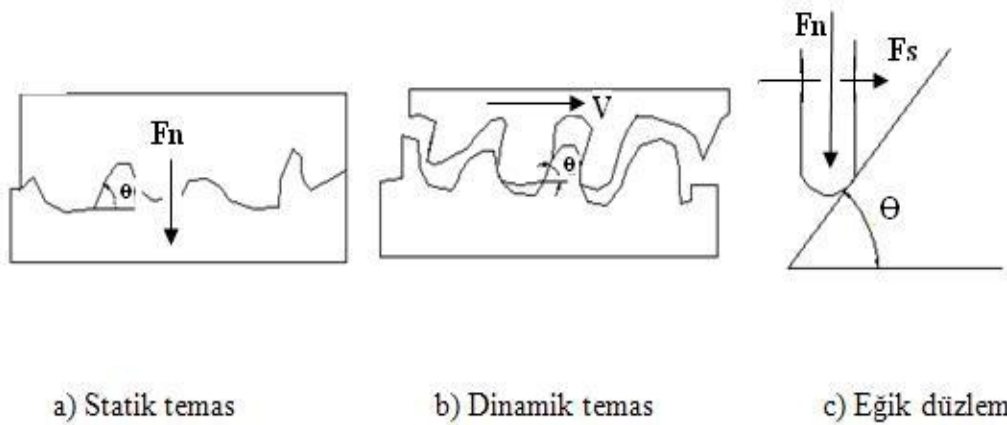
2.4.2. Sürtünme Teorisi

İlk mekanik sürtünme teorisini kuran Amontons Coulomb'un bulduğu temel sürtünme kanunları şunlardır (Halling 2000).

Sürtünme Teorisi;

1. Katı cisimler arasında sürtünme, görünen temas alanından bağımsızdır.
2. Sürtünme kuvveti normal kuvvetle doğru orantılı olup, aralarında sürtünme katsayısı olarak tanımlanan sabit bir oran vardır.
3. Kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır.

Sürtünmede en önemli faktör pürüzlerin etkileşmesidir. Buna göre sürtünme rijit yani deformasyona uğramayan pürüzlü noktaların teması sonucu meydana gelir. Şekil 2.4'de Coulomb'un sürtünme modeli görülmektedir.



Şekil 2. 4 Coulomb'un Sürtünme Modeli

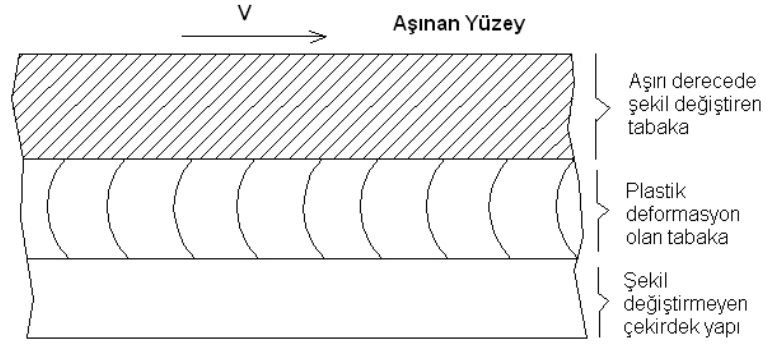
Burada F_s ; Sürtünme kuvvetini, F_n normal kuvveti ifade eder. Θ ise pürüzün taban açısıdır. Statik haldeki sürtünmenin dinamik sürtünmeden daha büyük olmasının sebebi temas başlangıcında yüzeylerdeki pürüzlerin birbirini tam kavramasına, dolayısıyla bu temasın bozulması için daha fazla sürtünme kuvveti gerektirmesine bağlanmaktadır. Dinamik sürtünmede pürüzler birbiri üzerinden sıçrayarak hareket ettikleri için daha az sürtünme kuvveti gerektirir. Ayrıca yağlayıcı ara maddeler pürüz boşluklarını doldurarak, pürüzlülüğün etkisini, dolayısıyla sürtünmeyi azaltır (Tabor 2000).

Temas alanının sürtünme esnasında büyümesi için yüzeylerin ideal temiz ve sünek olması gerekir. Rigney ve Hirth sürtünen yüzeylerden itibaren mikro yapının değiştiğini tespit etmişlerdir.

Şekil 2.5 incelendiğinde temas yüzeyinden itibaren malzeme yapısı aşırı ince taneli, plastik deforme olan ve deforme olmayan olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır. Sürtünme esnasında yüzey tabakaları içinde çok büyük kayma şekil değişimleri meydana gelerek yüzeyde yorulmalar oluşur. Katılar arasındaki sürtünmenin muhtemel iki sebebi vardır (Rigney and Hirth 2001);

1. Yüzeyler arasındaki etkileşme mekanizması
2. Yüzeyler arasındaki enerji kaybı

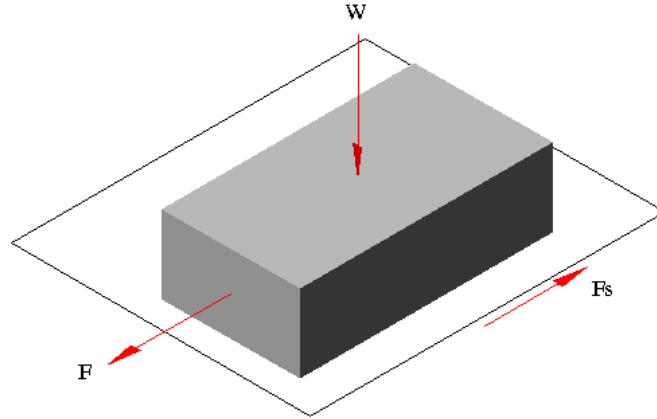
Yüzeyler arasındaki etkileşme mekanizmasının genel olarak sistem girişindeki değerleri kapsar. Temas eden iki katı cisim arasındaki bağıl sürtünme hareketi esnasında sürtünme kuvveti tarafından bir iş yapıldığından temas yüzeyinde bir enerji açığa çıkar. Bu enerji tribolojik sistemin giriş ve çıkış enerjileri arasındaki farka eşit olup, sürtünme enerjisi olarak adlandırılır (Mutlu 2002). Şekil 2.5’de sürtünmenin malzeme yapısı üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 2. 5 Sürtünmenin malzeme yapısı üzerine etkisi

2.4.3. Sürtünme Katsayısı

Kuru sürtünmeyi ifade etmek için Şekil 2.6'daki model kullanılmaktadır. Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin etkisi altında birleşen iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı sürtünme kuvveti meydana gelmektedir.



Şekil 2. 6 Kuru sürtünme modeli

Şekil 2.6'da basit temas durumunda olan W ağırlığının düz ve yatay bir düzlem üzerinde hareketsiz bulunduğu varsayılabilir. Bu kütleye küçük bir F kuvveti uygulanırsa kayma olmadığı görülür, yani cisim hareketsiz halde kalır. Bu durum Newton kanununa göre temas alanında oluşan sürtünme kuvvetlerinin diğer anlamda statik sürtünmenin, uygulanan F kuvveti ile tamamen eşit ve bu kuvvete ters yönde olduğunu açıklar.

Sürtünme olayını açıklamaya çalışan birçok teori vardır. Bunlardan gerçeğe en yakın olanı Bowden ve Tabor' un kaynak bağları teorisidir. Bu teoriye göre sürtünme iki temel faktörden kaynaklanmaktadır. Bunlardan birincisi kuvvetli adhezyondaki gerçek kontak bölgesinde oluşur. Bu bölgede kaynak bağlar meydana gelir ve bu bağların parçalanmasını sağlayan kuvvet F_s 'dir, diğeri ise sert yüzeydeki çıkıntıların yumuşak olan yüzeyde sürtünme anında açtığı yol için harcadığı (S) kuvvetinin etkisidir (Bowden and Tabor 1964).

Toplam sürtünme kuvveti $F = F_s + S$ 'dir. Genellikle "S" kuvveti ihmal edilir ve böylece $F = F_s$ olarak yazılabilir. Sürtünme kuvvetleri uygulanan kuvvetlerin bileşkesine eşit ve ters yönde olur, böylece herhangi bir yatay hareket meydana gelmez. Buna göre bağlı hareket eden ve normal bir kuvvetin (W) etkisi altında bulunan iki cismin temas eden yüzeyleri arasında harekete karşı bir F_s sürtünme kuvveti oluşur.

$$F_s = \mu \times W \quad (2.1)$$

Bu ifadedeki μ değeri iki malzeme yüzeyine bağlı olarak değişen sürtünme katsayısı değeridir. Fren ve kavrama gibi sürtünme esasına göre çalışan makine elemanları hesabı " $F_s = \mu \times W$ " denkleminde dayanır. Sürtünme kuvvetini üç kural halinde açıklayabiliriz:

* Sürtünme kuvveti, normal kuvvetle orantılıdır. Bu oran F_s / W 'nin sürtünme katsayısı μ 'yü ifade ettiği ortaya çıkar $\mu = F_s / W$ olur.

* Sürtünme kuvveti, görünür nominal temas alanına (A_a) bağlı değildir. Bu yüzden büyük ve küçük cisimlerin sürtünme katsayıları aynıdır ve sürtünme kuvveti kayma hızından (v) bağımsızdır;

* Üçüncü kuralda durum çok farklıdır, kaymayı başlatmak için gereken sürtünme kuvvetinin genellikle kaymayı sürdürmek için gereken kuvvetten büyük olduğu bilinir.

Buradan iki sürtünme katsayısı olduğu teorisine varılır, bunlar statik sürtünme katsayısı (μ_s) ve kinetik sürtünme katsayısı (μ_k) dir.

2.4.4. Aşınma

Mekanik harekete bağlı olarak malzemede istenmeyen kopma şeklinde tanımlanan aşınma, sürtünme etkisinin de kaçınılmaz bir sonucudur. Aşınma sonucu birbiriyile çalışan yüzeyler arasında meydana gelen boşluklar çalışma sırasında istenilmeyen durumlara yol açarak o oranda da istenilen fonksiyonların yerine getirilmesini zorlaştırır (Gemalmayan 1984).

Malzemelerin sürtünme ve aşınma özellikleri öncelikle sürtünme yüzeyleri arasındaki etkileşim tarafından tespit edilir (Bijwe 1997). Bu etkileşimi, fren tasarımı, balata ve rotor malzemesi, frenin daha önceki kullanım durumu, bileşim, yüzey geometrisi, yüzey enerjisi, kimyasal aktiflik, yüzeyin fiziksel ve mekanik özellikleri etkiler. Ayrıca basınç, hız, sıcaklık, uygulama sayısı gibi şartlar ve ortam yani yağlı, nemli, kumlu ve aşınma kalıntılarıyla kirlenmiş olması gibi parametrelere de bağlıdır (Dönmez 2000).

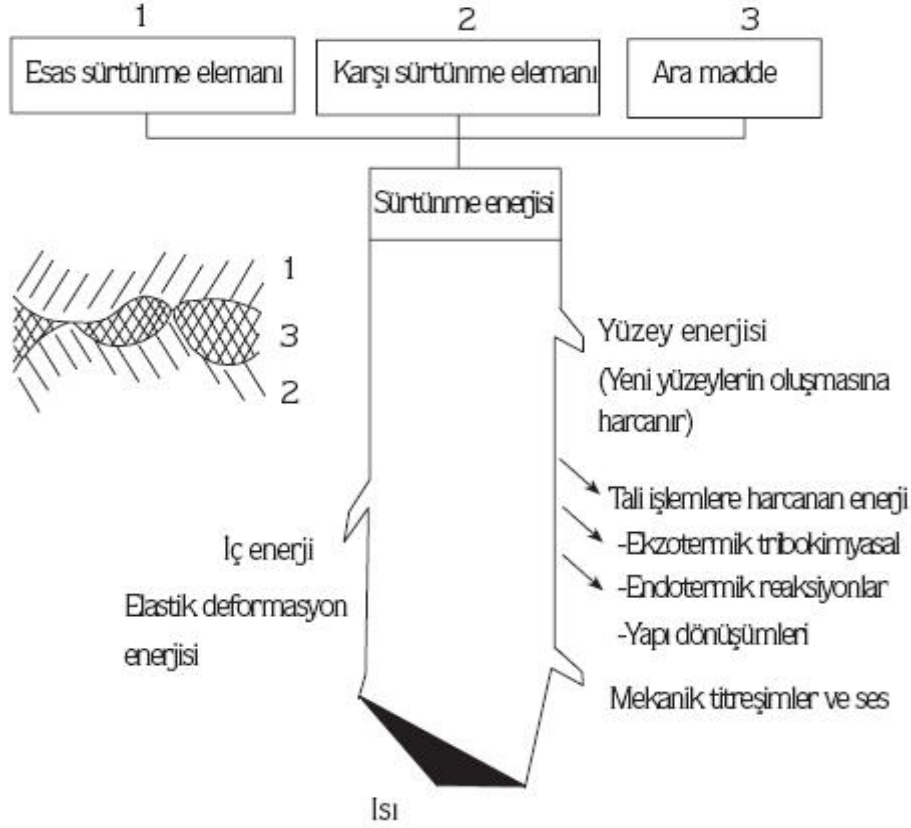
2.4.5. Sürtünme ve Isı Oluşumu

Tribolojik sistemler çevresi ile enerji ve kütle alışverişinde buldukları için termodinamik bakımdan açık sistem olarak kabul edilirler (Czichos 1977).

Tribolojik sisteme giren ve çıkan enerjiler arasındaki farka genel olarak "Enerji kaybı veya sürtünme enerjisi" adı verilmektedir (Uetz and Föhl 1978).

Bir tribolojik sistemde meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylara ait enerji dağılımı şekil 2.7'de görülmektedir (Uetz and Föhl, 1978). Bu şekilden yaklaşık bir tahminle, sürtünme enerjisinin % 75-80'inin ısı enerjisine, % 4-5'inin kırılma enerjisine, % 4-5'inin mekanik titreşim ve ses enerjisine, % 7-8'inin iç enerji ve % 4-5'inin ise tribo-kimyasal reaksiyonlara, yapı dönüşümlerine, artık gerilmelere ve diğer bir takım tribolojik olaylara dönüştüğü anlaşılır. Sürtünme ısısı sürtünen elemanların temas

yüzeylerinde sıcaklık artışı meydana getirerek malzemelerin mekanik ve metalurjik özelliklerini olumsuz yönde etkiler (Quinn 1996).



Şekil 2. 7 Sürtünme enerjisinin dağılımı

Metallerde sürtünme ısısının ana kaynağını oluşturan muhtemel mekanizmaları üçü ana gruba ayırmak mümkündür (Rigney and Hirth 1979).

Temas yüzeyinde meydana gelen deformasyonlar: Sürtünme çiftlerinin temas yüzeyindeki pürüzler elastik veya plastik şekil değiştirerek aşınan yüzeylerde sürtünme ısısı meydana getirirler. Plastik deformasyon esnasında yapılan iş geri dönmeyen bir ısı enerjisine dönüşerek açığa çıkar. Elastik deformasyon işi ise sistemde birikerek tekrar geri alınır.

Yüzey altında oluşan dislokasyonlar: Sürtünme esnasında yüzey ve yüzey altında meydana gelen dislokasyon hareketlerinin de büyük bir ısı kaynağı olduğu ve sürtünme ısısına büyük bir katkıda bulunduğu tespit edilmiştir (Nabarro 1967).

Burada şekil değişimi esnasında ortaya çıkan enerji bölgesel ısınma ve soğuma etkisi yaparak termoelastik etki meydana getirir (Burton 1980).

Gerilmeli faz dönüşümleri: Sürtünme esnasında meydana gelen diğer bir enerji kaynağının da martenzit, ikiz teşekkülü vs. gibi mikroyapıda gerilme veya sertlik artışına neden olan faz dönüşümleri ve ayrıca bu esnada bir miktar da atom diffüzyonu olduğu anlaşılmıştır (Hirth and Lothe 1968). Frenleme esnasında kinetik enerji sürtünmeden dolayı ısı enerjisine dönüştüğünden dolayı disk ile balata arasında oluşan ısı matematiksel olarak hesaplanır.

Isı Paylaşımı: Literatür araştırması sonucunda Guérin ve arkadaşları frenleme esnasında sürtünme kuvveti ile oluşan disk ve balata arasındaki ısı güç dağılımını matematiksel olarak hesaplamışlardır. Disk ve balata iki yarı sonsuz cismin sürtünme temasları hesaba katılırsa aralarındaki ısı dağılımı için Carslaw ve Jaeger denklemini aşağıdaki sınır şartları kullanılarak bulunur;

$$T_d(0,t) = T_p(0,t) \quad q_d + q_p = q_t \quad (2.2)$$

Burada q_d diskte üretilmiş ısı, q_p balatada üretilmiş ısı, q_t ise her birimde üretilmiş toplam ısı oranıdır.

Disk içine giden ısı;

$$q_d = \frac{q_t}{1 + \sqrt{k_d \cdot K_p} / \sqrt{k_p \cdot K_d}} \quad (2.3)$$

olur. Burada k_d diskin ısı yayılma katsayısı, k_p balatanın ısı yayılma katsayısı, K_d diskin ısı iletim katsayısı, K_p balatanın ısı iletim katsayısıdır.

Disk ve balatanın alanları göz önünde bulundurulursa ($A_d - A_p$), Frenleme gücü

$$q_d = P_d / A_d \quad q_p = P_p / A_p \quad P_d + P_p = P_t \quad (2.4)$$

$$P_d = \frac{P}{1 + (A_p / A_d) \cdot \sqrt{k_d \cdot K_p} / \sqrt{k_p \cdot K_d}} \quad (2.5)$$

2.5. Isı Transferi

2.5.1. Giriş

Günümüzde ısı geçişi bilinmesi gerekli bir mühendislik konusu olmanın yanı sıra, mühendislik bilimlerinin en ilgi çekici bölümünü oluşturur. Isı geçişinin, birçok endüstri ve çevre problemi üzerinde önemli etkileri vardır. Örnek olarak, çok önemli bir alan olan enerji üretimi ve dönüşümü düşünülebilir. Bu alanda, ısı geçişinden herhangi bir şekilde etkilenmeyen, bir tek uygulama dahi yoktur. Hem nükleer fizyon veya füzyon ile, hem fosil yakıtların yakılması ile, hem magneto hidrodinamik işlemlerde, hem de yer altı enerji kaynakları ile elektrik gücü üretiminde çözülmesi gereken bir çok problem vardır. Bu problemler, iletim, taşınım ve ışıyım işlemleri içerirler (Incropera *et al* 1996).

2.5.2. Isı Geçişi Bağlılıları

Isı geçişi türlerinin esaslı olan fiziksel mekanizmaların anlaşılması ve birim zamanda aktarılan enerjiyi hesaplayan temel bağıntıların kullanılabilmesi mühendisler için önemlidir.

İletim: Bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklardan daha düşük enerjili parçacıklarına, bu parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucunda enerjinin aktarılması olarak düşünülür. Etkileşim gazlarda molekül hareketleri, sıvılarda ve iletken olmayan katılarda molekül titreşimleri, iletken katılarda ise elektron hareketleri ile olur.

Gazlarda daha yüksek enerjili moleküller, daha yüksek sıcaklıktadırlar ve komşu moleküller sürekli olarak çarpışırken, daha çok enerjili moleküllerden daha az enerjili moleküllere bir enerji aktarımı gerçekleşir. Bir sıcaklık farkı olması durumunda, sıcaklığın azaldığı yönde iletim ile enerji aktarımı gerçekleşir (Incropera *et al* 1996).

Moleküller arasında daha az aralık olmasına ve moleküller arası etkileşimler daha kuvvetli ve daha sık olmasına rağmen, sıvılar içinde durum aynıdır. Benzer olarak bir katı içindeki iletimde, kafes titreşimleri şeklinde atomik faaliyetlere bağlıdır. Bir

elektrik yalıtkanında enerji aktarımı, tamamen kafes dalgaları yoluyla gerçekleşir. İletkende ise, serbest elektronların ötelenme hareketine de bağlıdır. Isı geçiş işlemlerini uygun an denklemleri ile nicelemek mümkündür. T(x) sıcaklık dağılımına sahip bir-boyutlu düz duvar için an denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

Isı akısı q_x'' ısı geçişi doğrultusunda dik birim yüzeyden, birim zamanda, x doğrultusunda gecen ısıdır ve bu doğrultudaki sıcaklık gradyanı (dT/dx) ile doğru orantılıdır. Orantı katsayısı k, ısı iletim katsayısı (W/m · K) olarak adlandırılan bir aktarım özelliğidir. Eksi işareti, ısı geçişinin, sıcaklığın azaldığı yönde gerçekleşmesinin bir sonucudur. Sıcaklık dağılımının doğrusal olduğu sürekli rejimde, sıcaklık gradyanı,

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.7)$$

Olarak ifade edilir ve ısı akısı da,

$$q_x'' = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.8)$$

olarak yazılır. Bu eşitlik ısı akısını, yani birim yüzeyden, birim zamanda gecen ısıyı verir.

Taşınım: Gaz veya sıvı haldeki akışkan ile akışkanın temas ettiği yüzey arasındaki moleküllerin mikroskobik hareketleri ile meydana gelen ısı transferi şekline denilmektedir (Yüncü 1999).

Taşınım ile ısı geçişi, akışın türüne göre sınıflandırılabilir. Akış bir fan, bir pompa veya atmosferik rüzgârlar gibi bir dış etki ile oluşuyorsa zorlanmış taşınım söz konusudur. Buna karşın, doğal (veya serbest) taşınım da akış, akışkan içindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri ile ilişkilidir. Taşınım ile ısı geçişinin tüm türleri için kullanılan denklem,

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.9)$$

şeklindedir. Burada taşınılma ısı akısı q'' (W/m^2), yüzey ve akışkan sıcaklıkları arasındaki fark $T_s - T_\infty$ ile doğru orantılıdır. Bu ifade Newton'un soğuma yasası olarak bilinir. Orantı katsayısı h ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) ısı taşınım katsayısı olarak adlandırılır. Bu değer yüzey geometrisine, akışkan hareketinin türüne ve akışkanın bazı termodinamik ve aktarım özelliklerine göre belirlenen sınır tabakadaki koşullara bağlıdır (Incropera *et al.* 1996).

Işınım: Sonlu sıcaklığa sahip bir cismin yaydığı enerjidir. Katı yüzeylerde olduğu gibi sıvı ve gazlar da ışınlama ile ısıyı yayırlar. Işınım yayma, cismin yapısından bağımsız olarak, cisim oluşturulan atom ve moleküllerin elektron düzenlerindeki değişimlere yorumlanır. Işınım alanının enerjisi, elektromagnetik dalgalar (veya fotonlar) ile aktarılır. İletim veya taşınım ile enerji aktarımı, bir maddi ortamın varlığını şart kılarken, ışınlım için bu şart yoktur. Işınım ile aktarım boşlukta daha etkin olarak gerçekleşir. Yüzeyin yaydığı ışınlım, yüzeyin sardığı cismin ısı enerjisinden kaynaklanır ve birim zamanda birim yüzeyde serbest bırakılan enerji (W/m^2) yüzeyin yayma gücü E olarak adlandırılır (Incropera *et al.* 1996). Yayma gücünün, Stefan-Boltzmann yasası ile tanımlanan bir üst sınırı vardır:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.10)$$

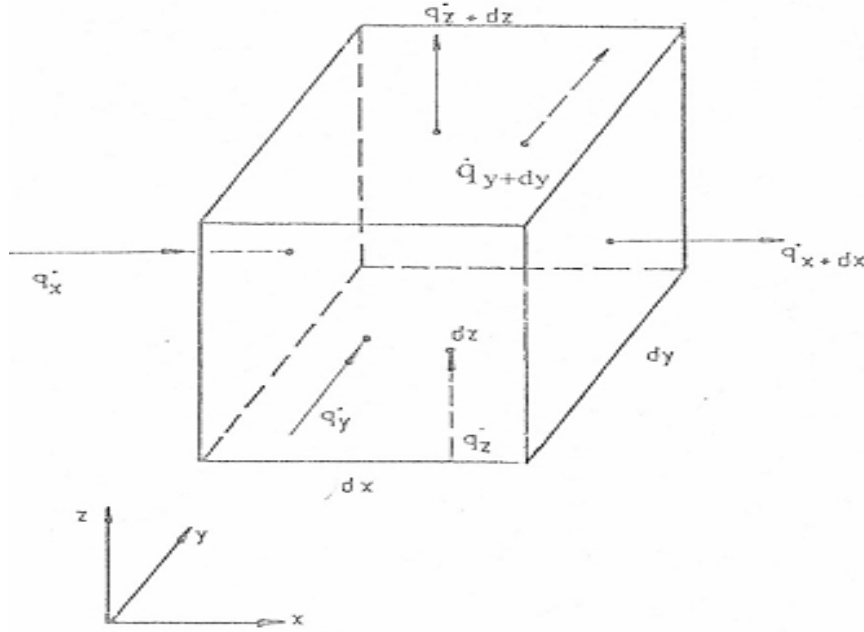
Burada T_s , yüzeyin mutlak sıcaklığı (K) olup σ , Stefan-Boltzmann sabitidir ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$). Böyle bir yüzey, ideal ışınlım yayıcı veya siyah cisim olarak adlandırılır. Gerçek bir yüzeyin yaydığı ısı akısı, aynı sıcaklıkta bulunan bir siyah cismin yaydığından daha azdır ve aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 c \quad (2.11)$$

Burada ϵ yayma oranı, c özgül ısıdır.

2.5.4. Isı Yayılm Denklemleri

Isı iletim çözümlemesinde asıl amaç, verilen sınır koşulları için bir ortamda sıcaklık dağılımını belirlemektir. Bu dağılım bilindiğinde, ortam içinde veya yüzeyinde herhangi bir noktadaki iletimle ısı akısı Fourier yasasından hesaplanabilir. Bir katı için sıcaklık dağılımı bilgisi, ısıl gerilmeler, genleşme ve yer değiştirmelerin belirlenmesi ile yapısal bütünlüğün soruşturulmasında kullanılabilir. Sıcaklık dağılımı ayrıca bir yalıtım malzemesinin kalınlığının optimize edilmesinde, malzeme ile kullanılan yapıstırıcı veya kaplamanın uyumunun birleşmesinde de kullanılabilir. İçinde kütle hareket olmayan ve $T(x,y,z)$ sıcaklık dağılımının kartezyen eksen takımında gösterildiği homojen bir ortam ele alınsın. Enerji korunumu uygulanarak şekil 2.8’de gösterildiği gibi sonsuz küçük bir kontrol hacmi $dx \cdot dy \cdot dz$ tanımlanır. Sıcaklık gradyanları varsa kontrol yüzeylerinin her biri üzerinde ısı geçişi olacaktır. x , y ve z eksenleri üzerindeki kontrol yüzeylerinin her birine dik ısı iletim sırasıyla q_x , q_y ve q_z terimleriyle gösterilir (Incropera et al. 1996).



Şekil 2. 8 Hacim elemanında ısı akım şiddeti

Karşı yüzeylerdeki ısı iletimi ise yüksek mertebeden terimlerin atıldığı bir Taylor seri açılımı ile ifade edilir.

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2.12.a)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (2.12.b)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (2.12.c)$$

Denklem 2.12a'daki ısı iletimi, x' teki değer ile dx uzunluğundaki değişimin toplamı olarak verilmektedir. Malzemede bir faz değişimi olmuyorsa gizli ısı etkileri yoktur ve enerji depolama terimi

$$\dot{E}_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.13)$$

olarak yazılır. Burada $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ ortamın ısı enerjisinin birim hacimde, birim zamanda değişimidir. Depolanan enerji terimi \dot{E}_{st} madde tarafından depolanan ısı enerjisinin değişimini gösterir.

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q} dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.14)$$

Denklem (2.12) yerine konarak,

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.14)$$

elde edilir.

Isı iletim Fourier yasası ile yazılırsa;

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.15.a)$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.15.b)$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.15.c)$$

Denklem 2.15, denklem 2.14'de yerine konur ve kontrol hacmi (dx,dy,dz) ile bölünürse,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.16)$$

olur. Denklem 2.16 ısı yayılım denkleminin Kartezyen eksen takımında ki genel biçimidir. Genellikle ısı denklemi olarak bilinen bu denklem ısı iletimi çözümlemesinin temel aracıdır. Bu denklemin çözümünde, $T(x,y,z)$ sıcaklık dağılımı zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilebilir. Bu ifade enerjinin korunumunu ortaya koyar. Bu denklem, ortamın herhangi bir noktasında birim hacme iletimle geçen enerji ile birim hacimde üretilen ısı enerjisinin toplamının hacim içerisinde depolanan ısı enerjisinin değişimine eşit olması gerektiğini ifade eder (Incropera at al. 1996).

Isı iletim katsayısı sabitse, ısı denklemi;

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17)$$

dir. Burada $\alpha = k / \rho c_p$ ısı yayılım katsayısıdır. Sürekli rejim için, depolanan enerjide değişme olmayacaktır. Bu nedenle denklem 2.16 aşağıdaki biçime dönüşür:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' = 0 \quad (2.18)$$

2.5.5. Isı Transfer Problemi Sınır Şartları

Fren balatasındaki ısı transferi zamana bağlı bir problem olup Fourier denklemi belirli başlangıç ve sınır şartı altında çözülmesini gerektirmektedir. Sınır şartları aşağıda verilmiştir.

Sabit sıcaklık sınır şartı: Belirli nokta veya bölgelerde sıcaklığın sabit olması anlamına gelir ve

$$T = T^* \quad n\Gamma_0$$

ile ifade edilir. Γ_0 yüzeyi göstermektedir.

Taşınım sınır şartı:

$$q_n = h(T - T_\infty) \quad \text{on } \Gamma_1$$

ifade edilir. Burada h ısı transfer katsayısı, T_∞ çevre sıcaklığı, Γ_1 konveksiyonla ısı akışıdır.

Sabit ısı geçişi sınır şartı:

$$q_n = q_n^* \quad \text{on } \Gamma_2$$

2.5.6. Sonlu Elemanlar Metodu

Çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin, daha basit ve kısa zamanda çözmek için bu problemlere eşdeğer ancak daha basit hale getirilmiş problemlerin çözüme gidilmesi sonlu elemanlar metodunun temelindeki fikirdir. Genellikle, basitleştirmeye gidilmesi sonucunda doğru sonuç yerine, yaklaşık bir sonuç bulunmaktadır. Günümüzde, sonlu elemanlar metodlarının bilgisayarlarda uygulanması sonucunda hemen her problem istenilen ölçüler arasında yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir. Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesinin çok sayıda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Çözüme gidilirken, sonlu elemanların hepsi çeşitli teoriler kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerin tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar bulunmaktadır (Demirsöz, 2005).

Galerkin yaklaşımına göre geçişli halde denklem 2.19'un sonlu elemanlar formülasyonu matrisinde yazılışı;

$$\mathbf{C}_T \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{KH}_T \mathbf{T} = \mathbf{R} \quad (2.19)$$

şeklinde dir. \mathbf{C}_T kapasite matrisi, \mathbf{KH}_T iletkenlik matrisi, T düğüm noktası sıcaklığı ve R ısı kaynak vektörüdür.

Denklem 2.19'u çözmek için en çok kullanılan metod, t zamanında sıcaklık T_t ve $t+\Delta t$ zamanında sıcaklık $T_{t+\Delta t}$ tahminlere dayalı direk integral metodu aşağıdaki ilişkiye sahiptir.

$$\mathbf{T}_{t+\Delta t} = \mathbf{T}_t + [(1 - \beta)\mathbf{T}_t + \beta\dot{\mathbf{T}}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (2.20)$$

$$(\mathbf{C}_T + b_1\mathbf{KH}_T)\mathbf{T}_{t+\Delta t} = (\mathbf{C}_T - b_2\mathbf{KH}_T)\mathbf{T}_t + b_2\mathbf{R}_t + b_1\mathbf{R}_{t+\Delta t} \quad (2.21)$$

değişken b_1 ve b_2 belirlenmiştir.

$$b_1 = \beta\Delta t, \quad b_2 = (1 - \beta)\Delta t \quad 0.5 \leq \beta \leq 1.0$$

2.5.7. Isıl Gerilme Problemi

Oluşturulan denklemle elastik problemler için termal genleşme yazılır.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0)$$

Burada $\boldsymbol{\sigma}$ ve $\boldsymbol{\varepsilon}_0 (= \alpha\Delta\mathbf{T})$ gerilme ve başlangıç gerilme vektörüdür. \mathbf{D} ve α ise elastisite matrisi ve termal genleşme katsayısı vektörüdür. Thermoelastik problemleri için denge denklemi,

$$\mathbf{KU} = \mathbf{P}_f + \mathbf{P}_\tau + \mathbf{P}_{\Delta T}$$

şeklindedir. Burada \mathbf{K} dirençlilik matrisi, \mathbf{U} düğüm deplasman vektörü, \mathbf{P}_f , \mathbf{P}_τ , $\mathbf{P}_{\Delta T}$ sırasıyla kütle kuvveti, yüzey kuvveti ve termal yük vektörüdür.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Malzeme

Bu çalışmada balata malzemesi olarak geliştirilen çeşitli malzemelerin ısı ve mekanik özelliklerinin balata üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla yapılan literatür çalışması sonucu farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen malzemelere ait özellikler dikkate alınmıştır. Malzemelere ait özellikler tablo 3.1’de verilmiştir. Tablodaki italik değerler kaynakta yer almamakta olup diğer değerlerin ortalaması alınarak tarafımızdan belirlenmiştir.

Çizelge 3. 1 Balata malzemelerine ait özellikler

Malzeme No	Isıl İletkenlik Katsayısı, k (W/mK)	Özgül Isı, c (J/kgK)	Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	Isıl Genleşme Katsayısı, α (10 ⁻⁶ /K)	Elastise Modülü E (GPa)	Poisson Oranı ν	Kaynak
1	50	1880	1800	0,3	50,2	0,3	Choi 2004
2	5	1000	1400	10	1	0,25	Choi 2004
3	0,5	1034	3660	30	0,53	0,25	Hwang 2005
4	5	350	4000	0,001	1	0,25	Voldrich 2007
5	5	670	2500	5	30	0,25	Guerin 1997
6	2	700	3300	5	30	0,25	Guerin 1997
7	10	1000	1900	2,5	60	0,25	Krenkel 2002
8	27	1000	2000	3,5	60	0,25	Krenkel 2002
9	40	1000	2400	3	30	0,25	Krenkel 2002
10	6	1000	1750	1,14	50	0,25	Krenkel 2002
11	90	1000	1750	2	30	0,25	Krenkel 2002
12	0,90	1880	1550	1	2,2	0,25	Abaqus V 6.6

Malzeme-1 karbon-karbon bileşikli kompozit malzemedir yapılmıştır. Tabloda görüldüğü gibi özgül ısı en yüksek olan malzemedir buna bağlı olarak yoğunluk ve ısı

iletkenlik katsayısı da yüksektir. Poisson oranı diğer malzemelere göre en yüksek olan malzemedir.

Malzeme-2 karbon-karbon bileşikli kompozit malzemedir. Isıl genleşme katsayısı olarak en yüksek ikinci malzemedir. Malzeme-1'le kıyas edildiğinde ısı iletkenlik katsayısı on kat ve elastise modülünde elli kat daha küçüktür.

Malzeme-3 elastise modülü ve ısı iletkenlik katsayısı en küçük olan malzemedir. Yoğunluk değeri olarak ikinci en yüksek malzemedir.

Malzeme-4 yoğunluk değeri en yüksek, ısı genleşme katsayısı ve özgül ısı değeri en küçük olan malzemedir.

Malzeme-5 organik flertex 664 kompozit malzemesidir. Malzeme-6'la kıyas edildiğinde ısı genleşme katsayısı, elastise modülü ve poisson oranı eşit fakat yoğunluğu küçüktür. Buna karşın ısı iletkenlik katsayısı ve özgül ısı daha yüksektir.

Malzeme-6 seramik Al_2TiO_5 kompozit malzemesinden yapılmıştır.

Malzeme-7 güçlendirilmiş lif katkılı dokuma kumaş, orthotropic malzemedir. Lif içeriği % 60 dır. SiC – Si içeriği % 30/2 arasındadır. Gözenekler % 3.5 civarındadır. Elastise modülü en yüksek olan malzemelerden biridir.

Malzeme-8 güçlendirilmiş lif tasarımlı kısa elyaf içeriklidir. Yaklaşık isotropic malzemedir. Lif içeriği % 50 dır. SiC – Si içeriği % 50-55/2-3 arasındadır. Gözenekler % 3'den küçüktür. Elastise modülü en yüksek olan malzemelerden biridir.

Malzeme-9 güçlendirilmiş lif tasarımlı kısa elyaf içeriklidir. Yaklaşık isotropic malzemedir. SiC – Si içeriği % 60/10 arasındadır. Gözenekler % 1'den küçüktür.

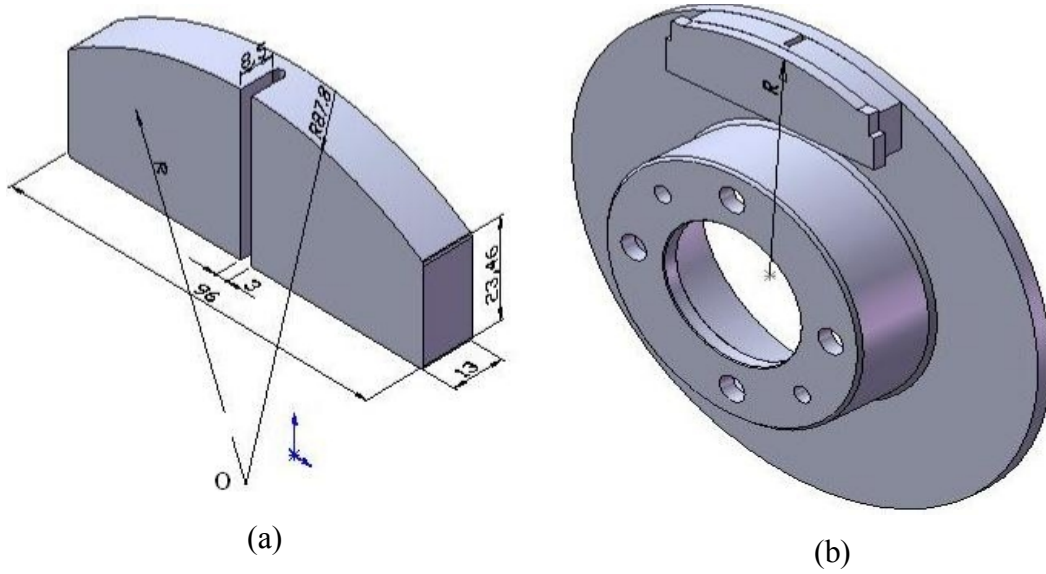
Malzeme-10 güçlendirilmiş lif tasarımlı kısa elyaf içeriklidir. Yaklaşık isotropic malzemedir. SiC – Si içeriği % 0 dır.

Malzeme-11 önceden 3 boyutlu şekillendirilmiş isotropic malzeme. SiC – Si içeriği % 0 dır. Isıl iletkenlik katsayısı en yüksek olan malzemedir.

Malzeme-12 ısı iletkenlik katsayısı en küçük olan ikinci malzemedir.

3.2. Problemin Geometrisi ve Sınır Şartları

Dikkate alınan balatanın geometrisi şekil 3.1 (a)'da verilmiştir. Bu balata 187 mm çaplı bir disk üzerinde şekil 3.1 (b)'deki gibi yer almaktadır.



Şekil 3. 1 Balata geometri ölçüsü ve fren disk-balata görünümü

Problem için tüm malzemelerde ortak bir değer olmak üzere $\mu = 0,45$ alınmıştır. Bu durumda cismin her bir düğüm noktasının merkeze uzaklığına bağı olarak

$$\dot{P} = \mu * P * A * \omega * R$$

$$\dot{P} = 0.45 * 1050000 * 0.00305 * 64,3 * R$$

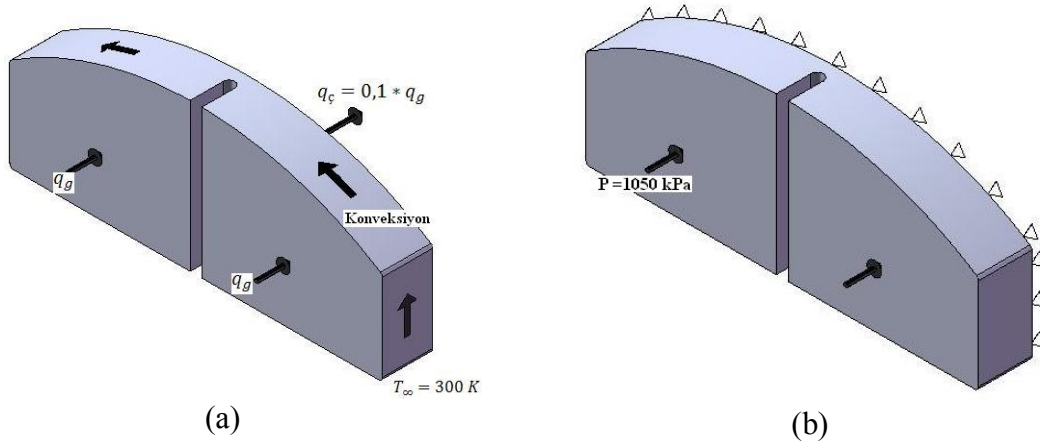
$$\dot{P} = 92800 * R \frac{N}{s}$$

şeklinde hesaplanır. Fren basıncı 1050 kPa, dönme hızı 64,3 1/s ve balata yüzey alanı 0,00305 mm² dir.

Balata başlangıçta oda sıcaklığında (300K) kabul edilmiştir. Bu şartlarda balata için uygulanan ısıl sınır şartı şekil 3.2.a'da verilmiştir. Görüldüğü gibi balata-disk arasında yarıçapa bağlı sabit ısı girdisi, balatanın arka yüzeyinden ısı girdisinin % 10 kadar sabit ısı çıktığı kabul edilmiştir.

Diğer yüzeylerden ise konveksiyonla ısı transferi bulunmaktadır. Burada $h = 28$ ($W/m^2 \cdot K$) alınmıştır.

Havanın hızı diskin dönme hızına bağlı olarak $h = 10,45 - V + 10\sqrt{V}$ formülüne göre kabul edilmiştir (Siple and Passel1945).



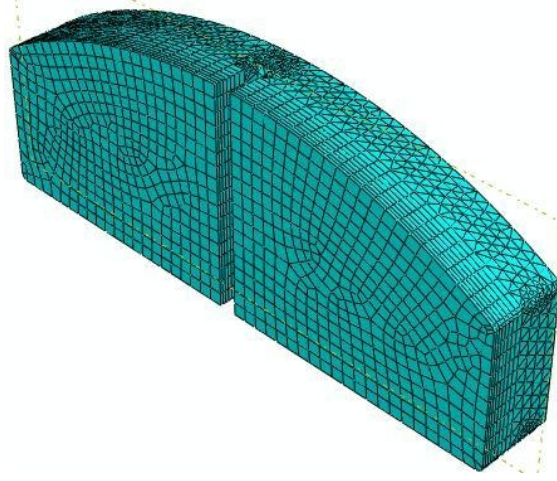
Şekil 3. 2 Balata üzerine uygulanan sınır şartları

Probleme uygulanan mekanik sınır şartları ise şekil 3.2.b'de görülmektedir. Balatalar bir altlık üzerine yapıştirılarak üretildiğinden balatanın alt kısmı sabit alınmıştır. Balata-disk arasındaki yüzeye ise 1050 kPa 'lık basınç uygulanmıştır.

Problem bu şartlar altında farklı aşınma oranları dikkate alınarak (Aşınmamış, 3,6,9 mm aşınmış) 300 sn için çözüm yapılmıştır.

Sonlu elaman ağı oluşturulurken eğri kenarların modellenmesinde en uygun elaman tipi olan üçgen geometri seçilmiş, kalınlık boyunca sıcaklık değişimi büyük olan bölgelerde daha ince eleman oluşturulması sağlanmıştır.

Elde edilen ađ yapıları Şekil 3.3'de verilmiştir. AŞınma durumlarına göre sırasıyla aşınmamış işin 11824, 3mm aşınmış işin 11774, 6mm aşınmış işin 4686 ve 9mm aşınmış işin 7398 dĞim noktası bulunmaktadır.



Şekil 3. 3 Fren balatasının mesh görüntüsü

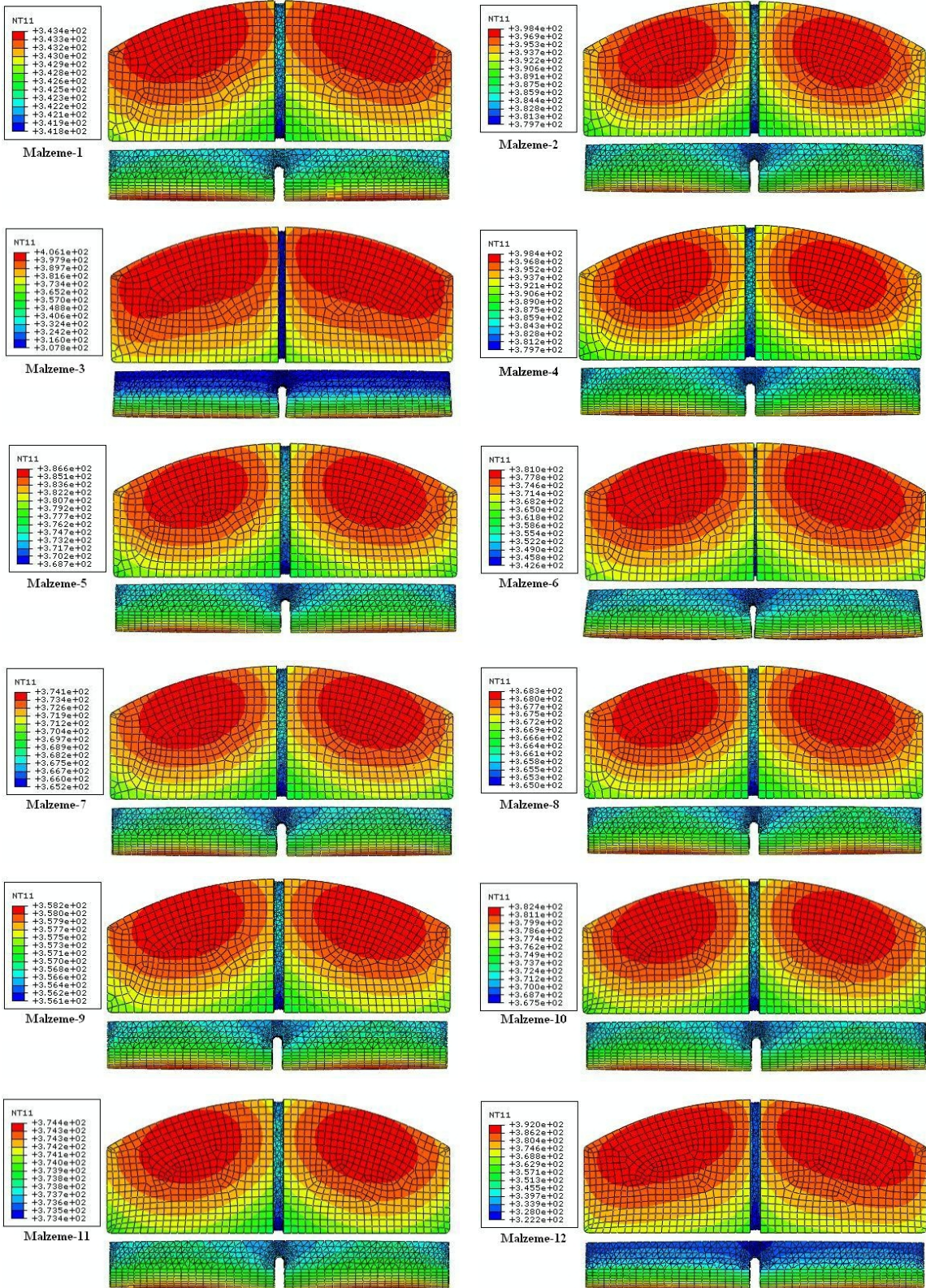
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde yapılan analizlere ait bulgular öncelikle sıcaklık analizleri için daha sonra da gerilme analizleri için olmak üzere iki bölüm halinde verilmiştir.

4.1. Sıcaklıkla İlgili Bulgular

Sıcaklıkla ilgili bulgular bölümünde öncelikle 300 s için yapılan çözüm sonucunda balatada elde edilen sıcaklık dağılımına ait şekiller verilmiş, daha sonra balatanın alt ve üst yüzeylerinden alınan bir noktanın sıcaklığının zamanla değişimi grafikler halinde sunulmuştur.

Aşınmamış balata malzemesinde meydana gelen sıcaklık değişimi ve deformasyon oluşumu 300 saniye sonundaki analiz sonuçları şekilde 4.1'de verilmiştir. Deformasyonları gösterebilmek ve karşılaştırma yapmak amacıyla tüm şekillerde gerçek deformasyonlar 10 ile çarpılarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tüm şekillerde balatanın yarıçapına bağlı olarak dış kısımda oluşan sıcaklık daha yüksek olmaktadır. Ayrıca balatanın diske temas eden yüzeyinden dışarıya doğru sıcaklığın azalmakta olduğu görülmektedir. Balata için yüzey sıcaklığının yanında sıcaklığın balata içinde yayılması da önemlidir. Bu nedenle malzemeler arasında karşılaştırma yapılırken hem maksimum ve minimum değerlere, hem de bunlar arasındaki farka dikkat etmek gerekir. Bu açıdan malzeme-3'de en yüksek yüzey sıcaklık değeri 406 K ve en düşük yüzey sıcaklık değeri ise 308 K, sıcaklık farkı ise 98 K dir. Diğer malzemelerle karşılaştırıldığında oluşan sıcaklık değerinin en yüksek bu malzemede oluşmasının sebebi ısıl iletkenlik katsayısının küçük olmasından ve özgül ısı değerinin büyük olmamasından kaynaklanır. Malzeme-1'de ısıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı ve yoğunluk değerlerinin yüksek olmasından dolayı balata yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri diğer malzemelere kıyasla küçüktür. Bu malzemede oluşan en büyük yüzey sıcaklığı 343 K, en küçük yüzey sıcaklığı ise 342 K ve en yüksek sıcaklıkla en küçük sıcaklık arasındaki fark 1 K dir. Yine malzeme-11'de ısıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı ve yoğunluk değerlerinin yüksek olmasından dolayı balata yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri en yüksek 374 K en küçük 373 K ve sıcaklıklar arasındaki fark 1 K dir.

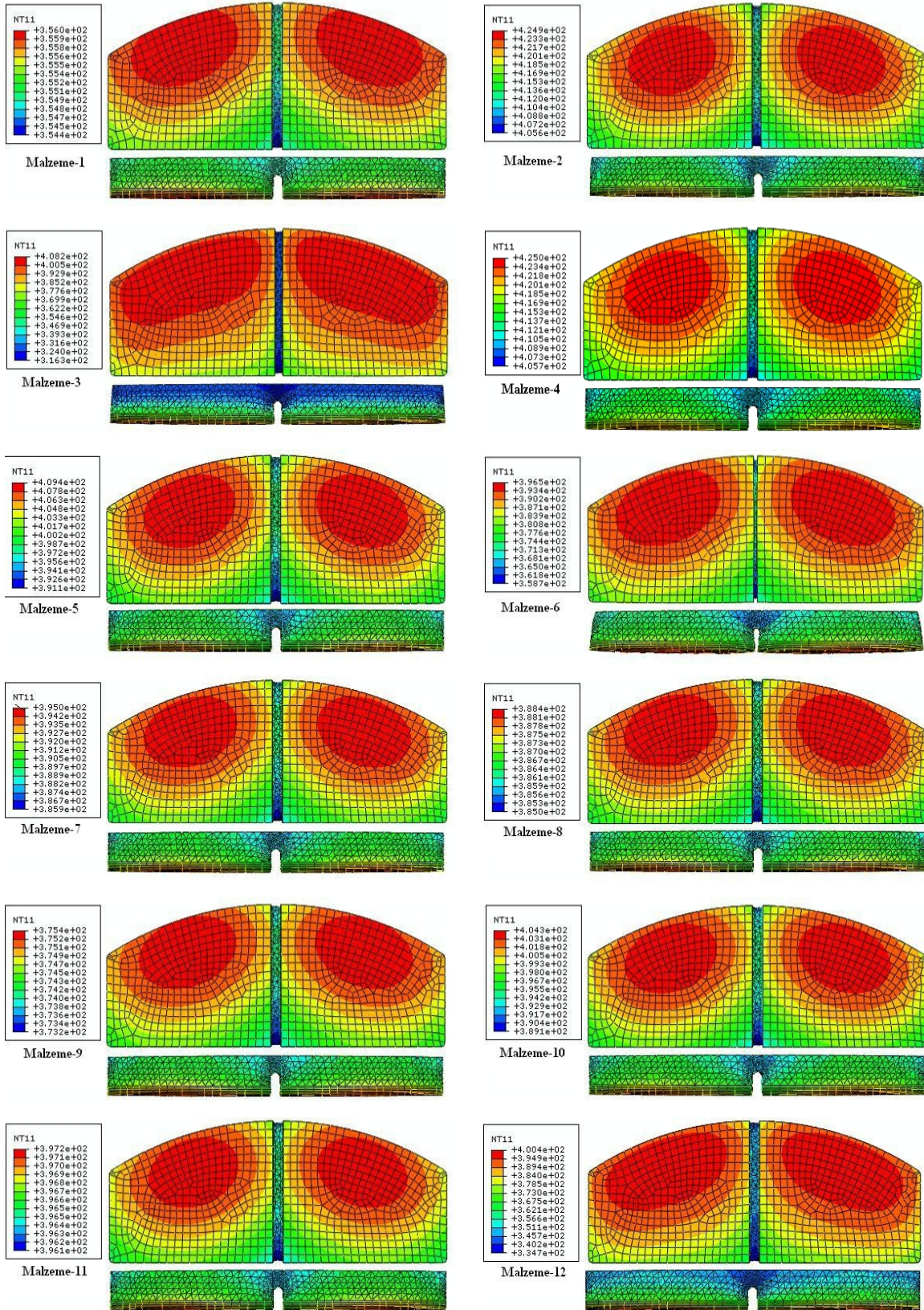


Şekil 4. 1 Frenleme sonunda aşınmamış balatadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları

Malzeme 1 ve 11 kıyaslandığında yoğunlukları eşit ama malzeme-1 ısı iletkenlik katsayısı malzeme-11 göre küçük fakat özgül ısısı daha büyüktür. Buradan malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ve yoğunluğu büyük olursa yüzeyde oluşan sıcaklık farkının küçük olmasına sebep oluyor. Malzemenin özgül ısısı ve ısı iletkenlik katsayısı küçük olursa yüzeyde oluşan sıcaklık değeri yüksek olur.

3mm aşınmış balata serilerinden 2'ci ile 4'üncü malzemelerde yüzeyde oluşan en yüksek sıcaklık değerlerinin 425 K, en küçük sıcaklık değerlerinin 405 K ve sıcaklık farkının da 20 K olduğu şekil 4.2'de görülmektedir. Malzeme-2'nin ve malzeme-4'ün ısı iletkenlik katsayıları eşittir. Fakat özgül ısısı ve yoğunluğunun farklı olduğu görülmektedir. Bu malzeme özellikleri kendi aralarında kıyaslandığında özgül ısı ile yoğunluk arasında ters orantı olduğu gözükmemektedir.

Malzeme 7'ci ile 8'ci yüzeyde oluşan en küçük sıcaklık değerleri olan 385 K göre kıyaslanırsa özgül ısılarının eşit olduğu görülmektedir. Malzeme-8'in ısı iletkenlik katsayısı ve yoğunluğu yüksek olduğundan dolayı bu balata yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri ve sıcaklık farkı malzeme-7'ye göre daha küçük olduğu görülmüştür. Yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı yüzeyde oluşan sıcaklık farkını ve oluşan en yüksek sıcaklık değerini etkilediği anlaşılmıştır. Malzeme-3'ün yüzeyinde oluşan en küçük sıcaklık değeri 316 K olarak bulunmuştur. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi balata yüzeyinde oluşan en yüksek sıcaklık farkı malzeme 3 ve 12 de görülmektedir.



Şekil 4. 2 Frenleme sonunda 3mm aşınmış balatadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları

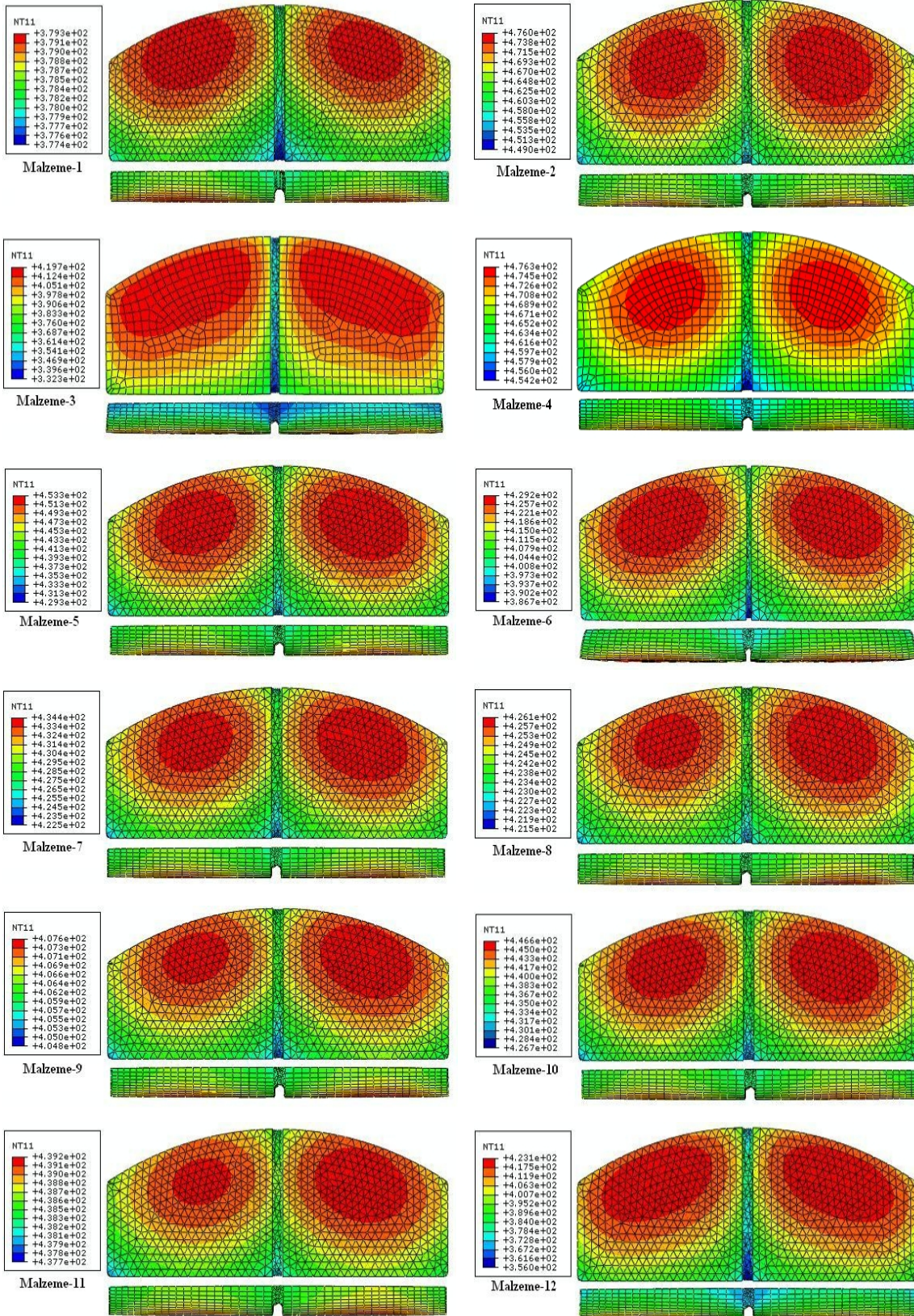
Şekil 4.3'e bakıldığında balata yüzeyinde oluşan en yüksek sıcaklık değeri malzeme-2 ve 4'de 476 K ve yüzey sıcaklıkları arasındaki fark da 27 K olarak okunmaktadır. Yüzey sıcaklığı en düşük olan malzeme ise 419 K'le malzeme-3 olduğu görülmektedir. Bu malzemede yüzey sıcaklıkları arasındaki fark en büyük değer olan 87 K dir. Aşınma miktarlarına göre kıyas yapıldığı zaman aşınmamış, 3 mm aşınmış, 6 mm aşınmış ve 9 mm aşınmış malzemelerde aşınma miktarı arttıkça yüzeyde oluşan sıcaklık değerleri ve sıcaklık farkında da artma olduğu görülmektedir. 6 mm aşınmış balatada ki malzeme-3 ve 11 kendi aralarında kıyaslandığında yüzey sıcaklıkları arasında oluşan fark 87 K ve 2 K dir. Bundan dolayı malzeme yüzeyinde oluşan sıcaklık şekillerine bakıldığında malzeme-3'de en yüksek sıcaklığın olduğu bölge daha yaygın bir alanda iken, malzeme-11de oluşan en yüksek sıcaklık bölgesi balata yüzeyinin orta noktasına yakın bir yerde olduğu görülmektedir.

Deformasyon değişimi en büyük malzeme-6 ve malzeme-3'de görülmektedir. Aşınma miktarlarına göre deformasyon durumu kıyaslanırsa en çok deformasyon değişimi aşınmamış malzeme-6'da en az ise 9mm aşınmış malzeme-6'da görülmektedir.

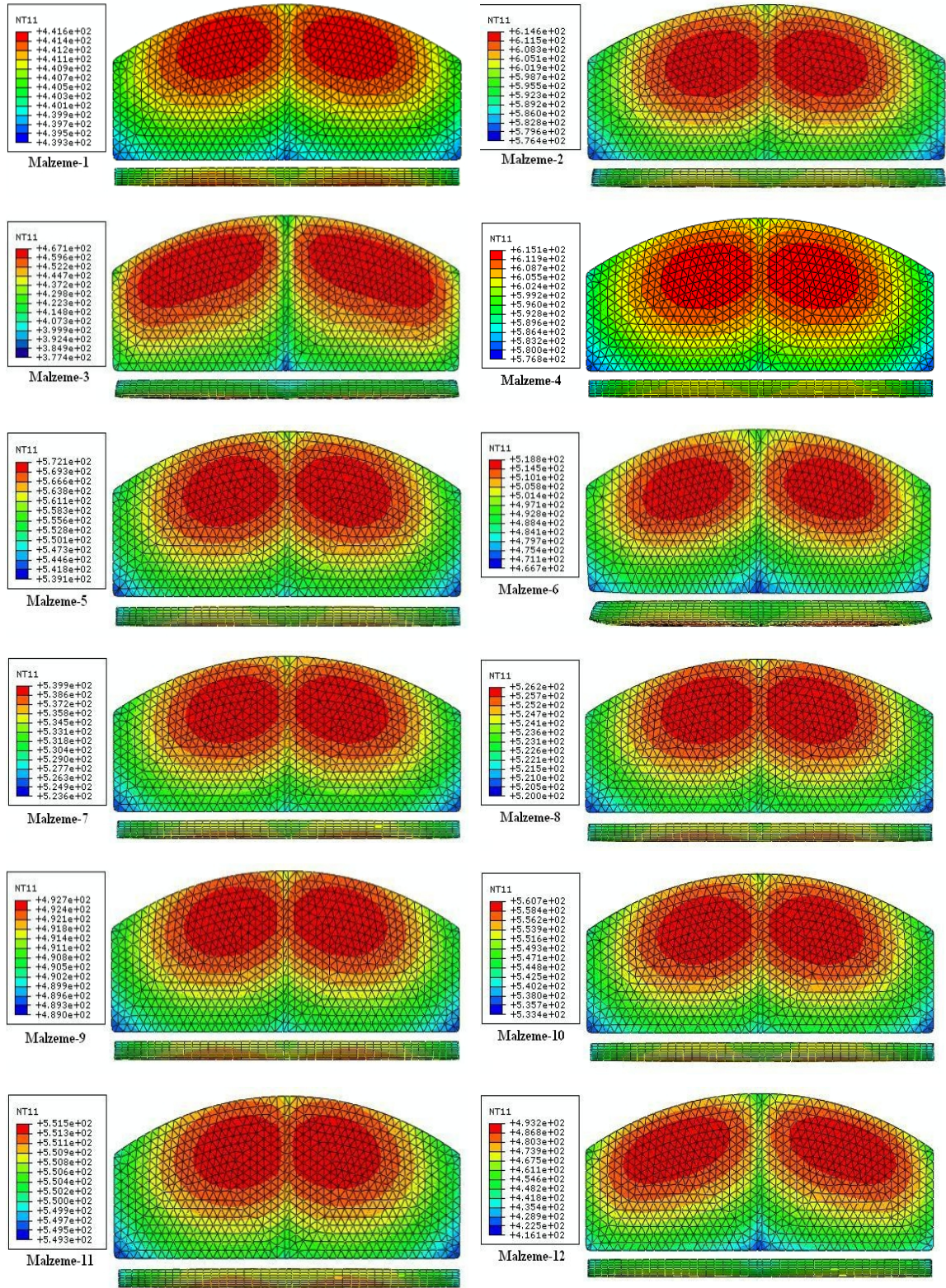
Şekil 4.4 incelendiğinde balata yüzeyinde oluşan en yüksek sıcaklık 615 K olup malzeme-3 ile 4'de oluşmaktadır. Balata yüzeyindeki en küçük sıcaklık ise 441 K'le malzeme-1de oluşur. Yüzeyler arasındaki oluşan en büyük fark ise 100 K 'le malzeme-3'de ve en küçük sıcaklık farkı ise 2 K'le malzeme-1 ve 11'de oluşur.

Balata yüzeyleri arasındaki fark malzeme-3 ve 12'de büyük olduğundan dolayı yüzeyde oluşan sıcaklık şekli diğer malzeme yüzeylerinde oluşan şekillere göre daha dağınık bir görüntü sergilemektedir. Diğer malzeme yüzeylerinde oluşan şekil balata merkezine yakın bir yerde ve yuvarlak şekil olarak görülmektedir.

Balata malzemeleri aşınma miktarlarına göre aşınmamış, 3mm aşınmış, 6mm aşınmış ve 9mm aşınmış olarak karşılaştırıldığında balata yüzeyinde oluşan en yüksek ve en düşük sıcaklık miktarının sürekli arttığı görülmektedir. Aynı zamanda balatada ki yüzey sıcaklık farklarında da sürekli bir artış gözükmektedir. Aşınma miktarı arttıkça balata yüzeyi daha fazla ısınmakta ve sıcaklık farkı artmaktadır.



Şekil 4. 3 Frenleme sonunda 6mm aşınmış balatadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları



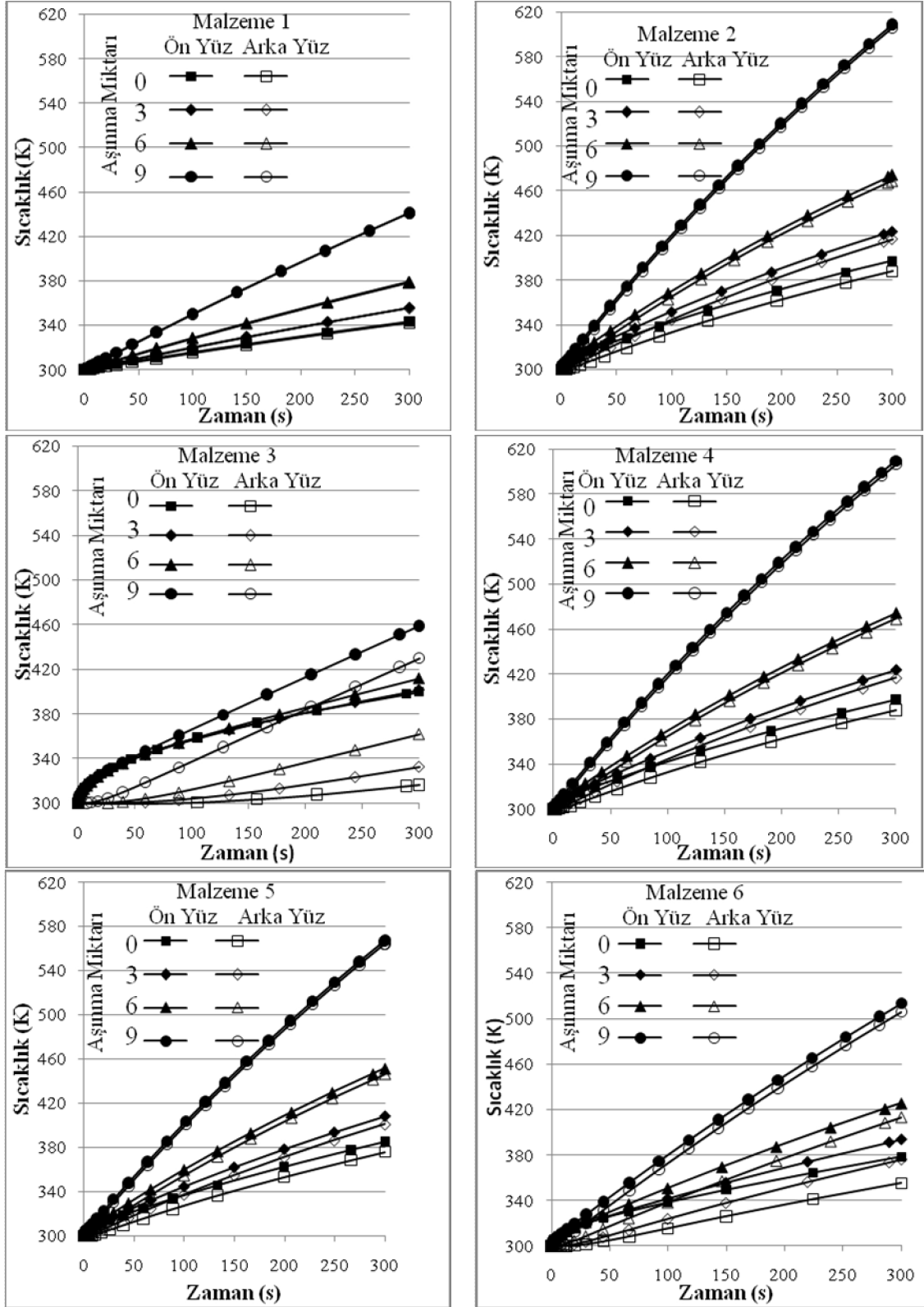
Şekil 4. 4 Frenleme sonunda 9mm aşınmış balatadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi genel olarak balata malzemelerinde aşınma miktarlarına göre balata yüzey sıcaklıklarında doğrusal bir artış bulunmaktadır. Ön ve arka yüzey sıcaklıkları arasında çoğu zaman belirleyici bir fark bulunmamaktadır. Aşınma miktarının artmasıyla bu fark daha da azalmaktadır. Aşınma miktarının artmasıyla aynı sürede balata sıcaklıklarında belirgin bir sıcaklık artışı görülmektedir.

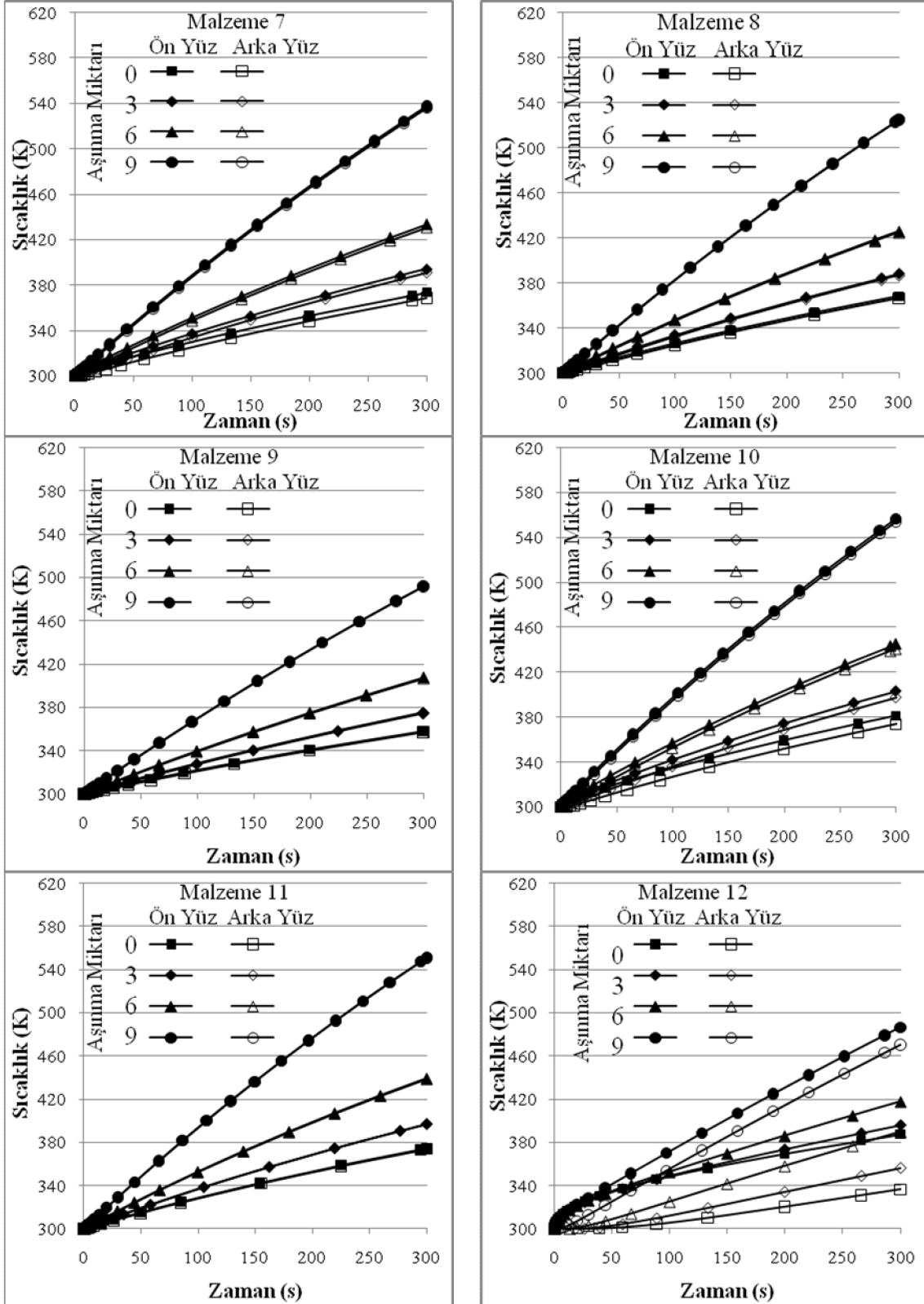
Isıl iletim katsayıları en küçük olan malzeme-3 ve malzeme-12 için ön ve arka yüzeyler arasında sıcaklık farkı en yüksek olmaktadır. Isıl iletim katsayıları en büyük olan malzeme-1, malzeme-9 ve malzeme-11 için ise balata ön ve arka yüzey sıcaklık farkı çok küçüktür. Bundan dolayı da ön yüzey sıcaklığı ile arka yüzey sıcaklığı birbirine eşit olduğu görülmektedir.

Malzeme-2 ve 4’ün ısı iletkenlik katsayısı eşit olduğu için aşınmamış ve aşınma miktarlarına göre değişen yüzeydeki bir noktanın sıcaklık değerini gösteren grafikler benzerlik göstermektedir.

Şekil 4.5’de aşınmamış balata miktarını “0”, 3mm aşınmış balata miktarını “3”, 6mm aşınmış balata miktarını “6”, ve 9mm aşınmış balata miktarını “9” göstermektedir.



Şekil 4. 5 Balata yüzeyinde alınan bir noktanın 300 saniye sürede ön ve arka yüzündeki sıcaklığın zamanla değişimi



Şekil 4.5 Balata yüzeyinde alınan bir noktanın 300 saniye sürede ön ve arka yüzeyindeki sıcaklığın zamanla değişimi (devam)

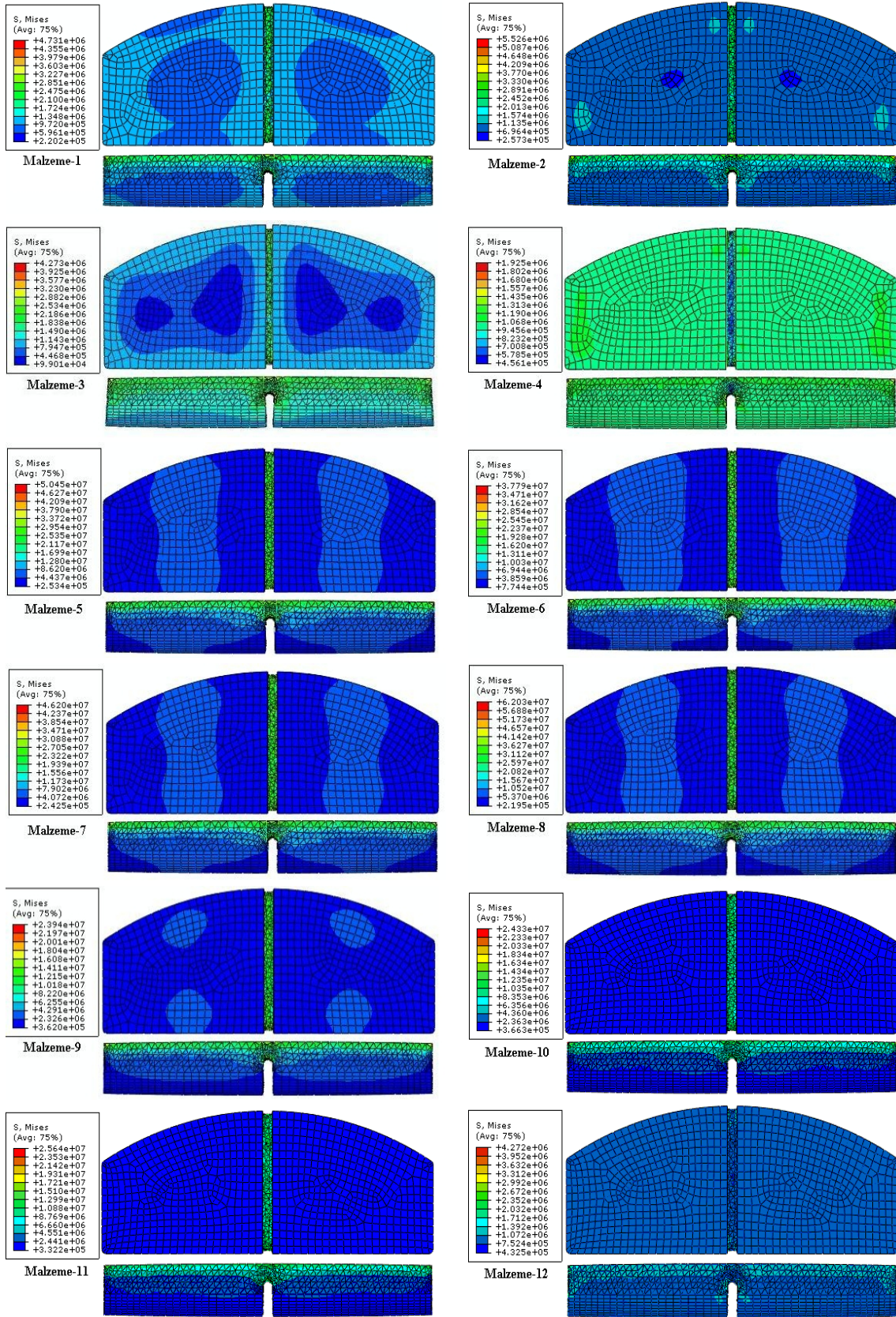
4.2. Gerilme İle İlgili Bulguları

Gerilme ile ilgili bulgular bölümünde öncelikle 300 s için yapılan çözüm sonucunda balatada elde edilen gerilme dağılımına ait şekiller verilmiş, daha sonra balatanın alt ve üst yüzeylerinden alınan iki noktanın gerilmelerinin zamanla değişimi grafikler halinde sunulmuştur.

Aşınmamış balata malzemesinde meydana gelen gerilme değişimi ve deformasyon oluşumu 300 saniye sonundaki analiz sonuçları şekilde 4.6'de verilmiştir. Gerilmelerin en büyük olduğu bölgeler balatanın tutulan yüzeyindeki köşe kısımlarında ve balatanın orta kanal kısmında yer almaktadır. Isıl gerilmeler açısından en önemli hususlar ısıl genleşme katsayısı ve elastisite modülüdür. Bu nedenle gerilmeleri karşılaştırırken malzemelerin bu özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer taraftan malzemedeki oluşan en büyük sıcaklık ve sıcaklık farkları da ısıl gerilmelerin meydana gelmesinde etkili olan unsurlardır.

Malzeme-4'ün ısıl genleşme katsayısı en küçük olduğundan dolayı diskle temas eden yüzeyde oluşan gerilme en büyüktür ve gerilme dağılımı düzgündür. Buna karşın balatada meydana gelen en büyük gerilme değeri diğer malzemelerle kıyaslandığında en küçük değer olan $1,925 \cdot 10^6$ Pa'dır. Malzeme-8'de gerilme en büyük değer olan $6,203 \cdot 10^7$ Pa olduğu görülmektedir. Bu malzemenin elastisite modülü ve ısıl genleşme katsayısı yüksektir. Malzeme-5, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11'e bakılırsa oluşan gerilmeler yüksektir bunun sebebi ise elastisite modülünün ve ısıl genleşme katsayısının yüksek olmasıdır. Elastisite modülü ve ısıl genleşme katsayısı küçük olursa oluşan gerilme değeri de küçük olduğu şekil 4.6'de görülmektedir.

Balatanın disk ile temas eden yüzeyinde meydana gelen gerilme dağılımı Malzeme 1 ve 3 dışında oldukça düzgün bir görünüm sergilemektedir. Bu iki malzemedeki kenarlarda daha yüksek, iç kısımlarda daha düşük bir dağılım görülmektedir. Bu malzemeler için elastisite modülü ile ısıl genleşme katsayısının çarpımları yaklaşık aynı değeri almaktadır.

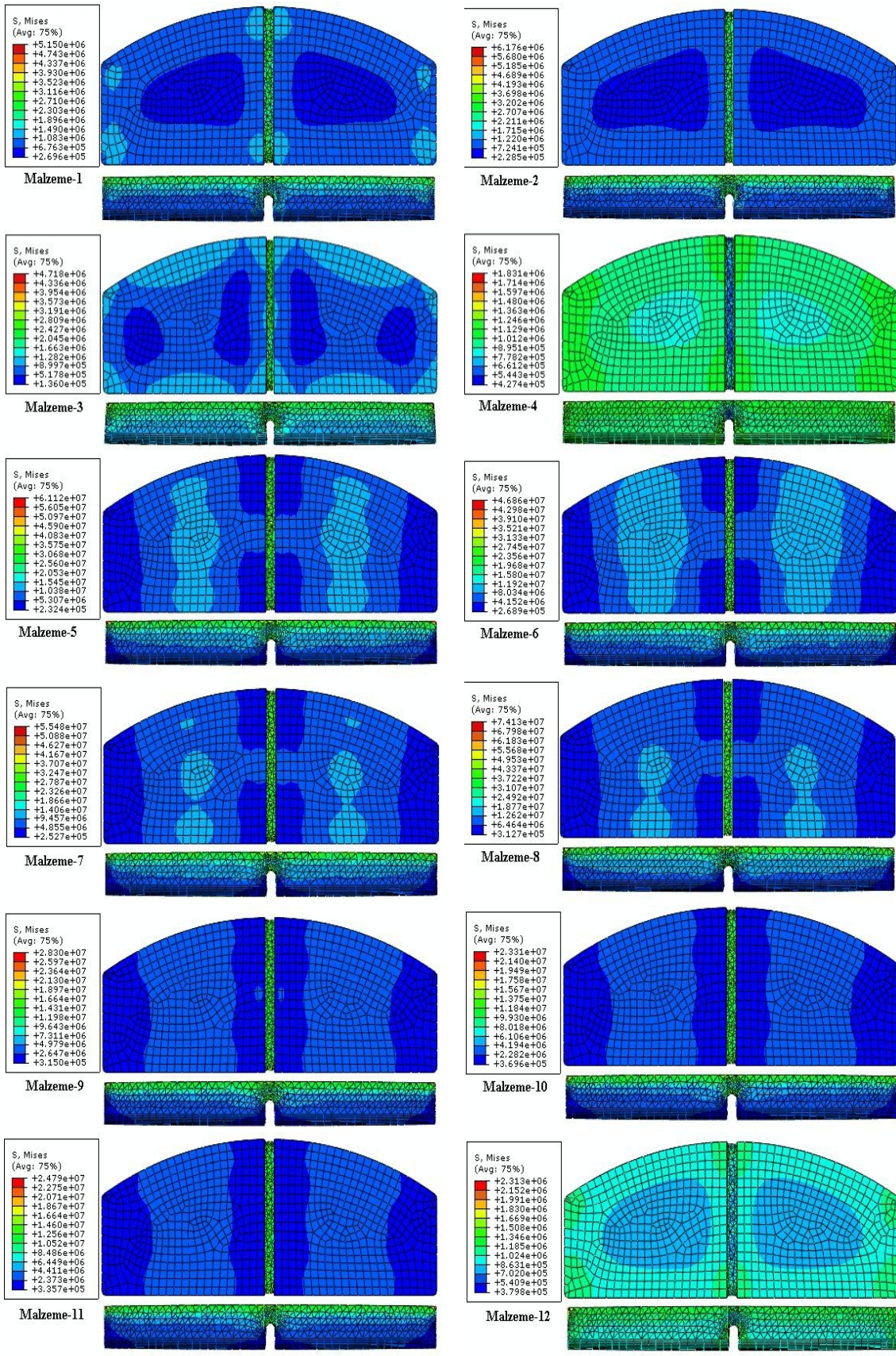


Şekil 4. 6 Frenleme sonunda aşınmamış balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları

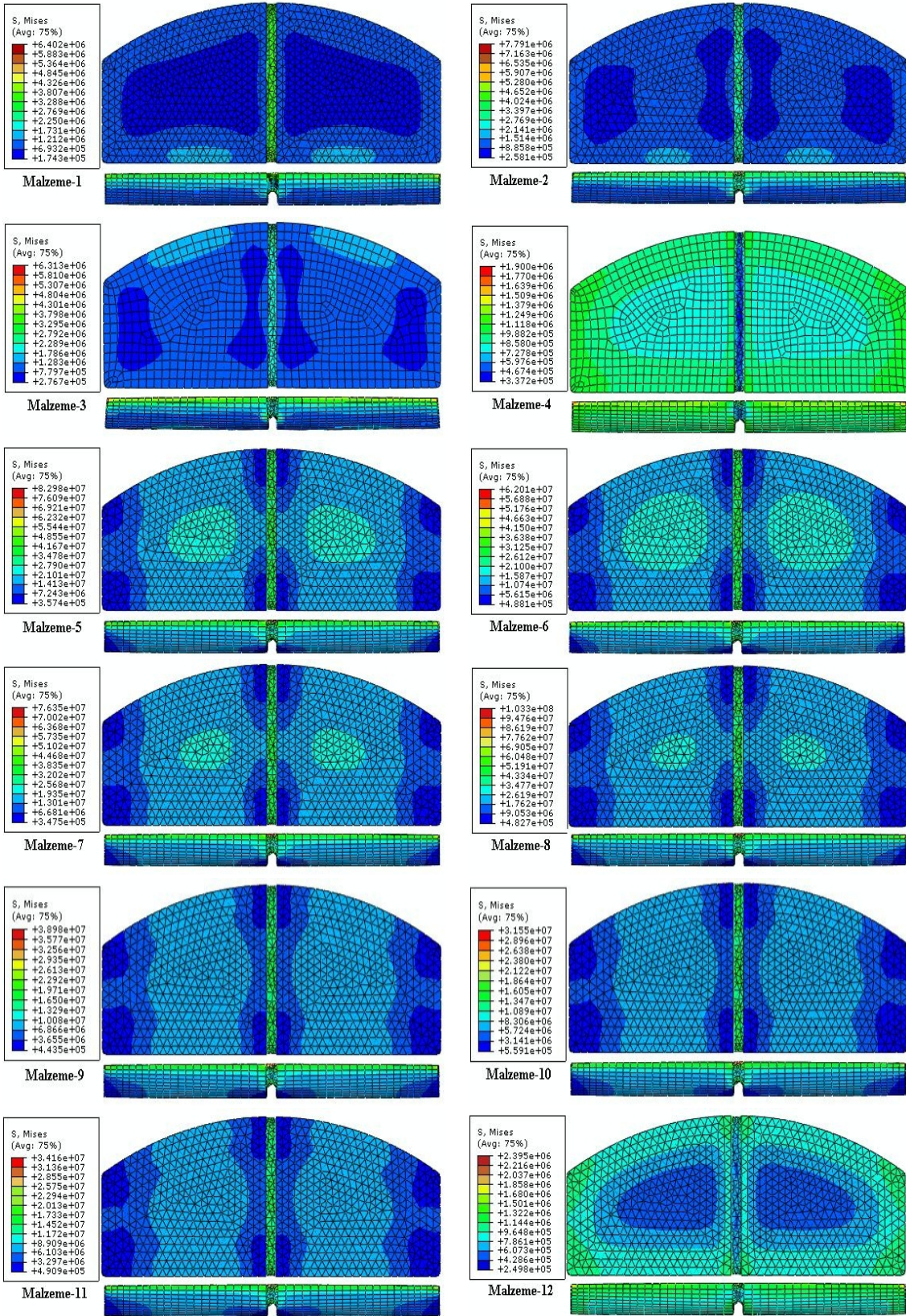
Şekil 4.7’de 3 mm aşınmış balata için gerilme dağılımı verilmiştir. Meydana gelen maksimum gerilmeler aşınmamış balata ile benzerlik göstermektedir. Ancak oluşan maksimum gerilme değerleri artış göstermiştir. Bu artış malzeme 1 için %9 iken örneğin malzeme 6 için %19 olmaktadır. Genel olarak aşınmanın artmasıyla meydana gelen en büyük gerilmeler de artış göstermektedir. Malzeme 6 daki artış 9 mm aşınmış balata için aşınmamış balataya göre 2,5 kattan fazladır.

Şekil 4.8’de 6 mm aşınmış balata için gerilme dağılımı verilmiştir. Meydana gelen maksimum gerilme malzeme-8 de $1,033.10^8$ Pa ve aynı malzemenin minimum gerilmesi ise $4,827.10^5$ dir. Şekilde görüldüğü gibi malzeme-3, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11’de balata yüzeyinde oluşan gerilme dağılımları benzerlik göstermiştir. Bunun sebebi ise bu malzemelerin elastise modülü ile ısıl genleşme katsayılarının çarpım değerinin birbirine yakın olmasıdır. Malzeme-4’de yine en düşük gerilmelerin olduğu görülmektedir. Şekil 4.8 incelendiğinde aşınma miktarının artmasıyla oluşan maksimum ve minimum gerilme değerinin arttığı görülür.

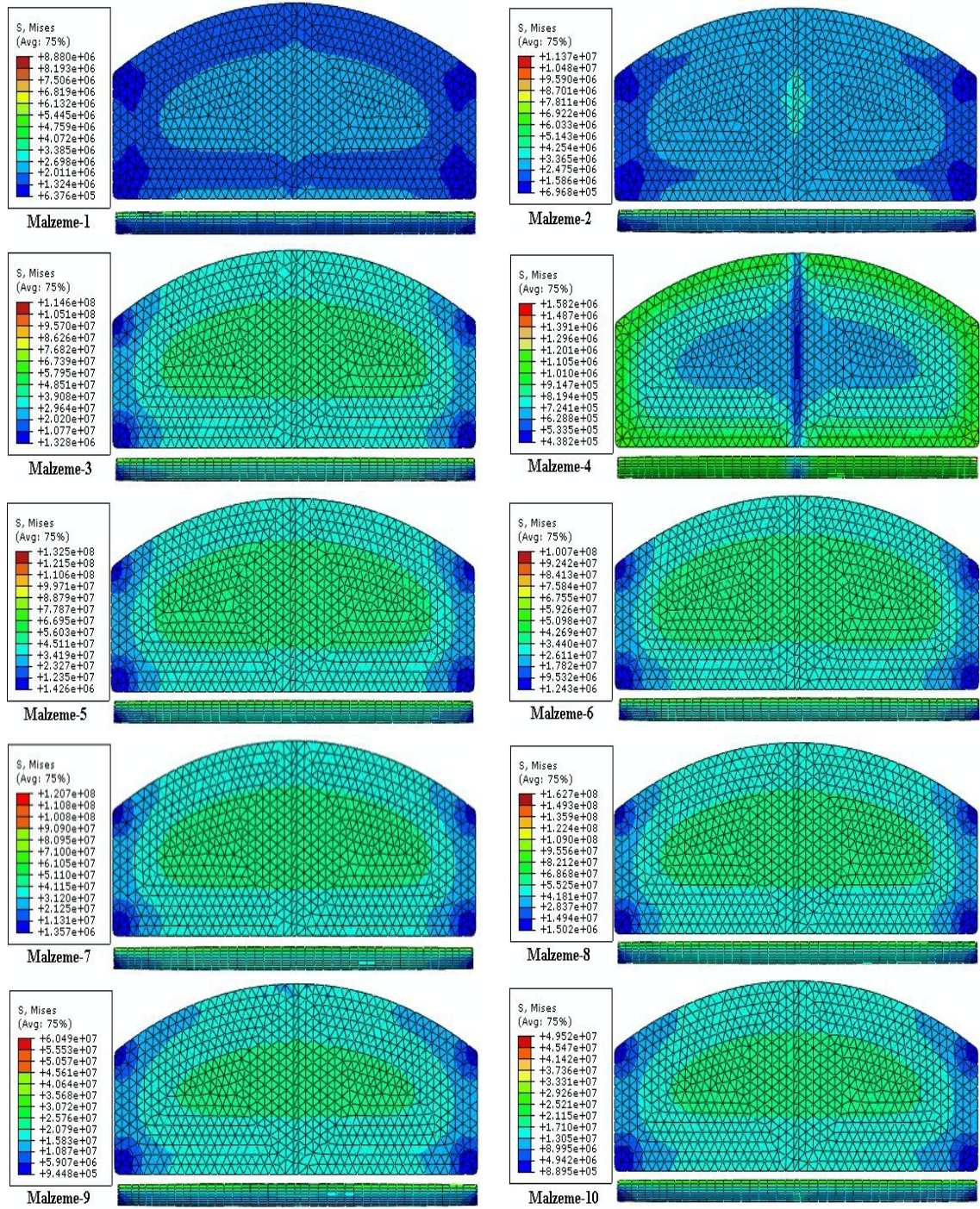
Şekil 4.9’de 9 mm aşınmış balata için gerilme dağılımı verilmiştir. Meydana gelen maksimum gerilmeler malzeme-3, 5, 6, 7 ve 8’de oluşmuştur. Bunlar kendi aralarında kıyaslandığında en büyük gerilme yine malzeme-8’de olduğu görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi malzeme-3, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11’de balata yüzeyinde oluşan gerilme dağılımları benzerlik göstermiştir.

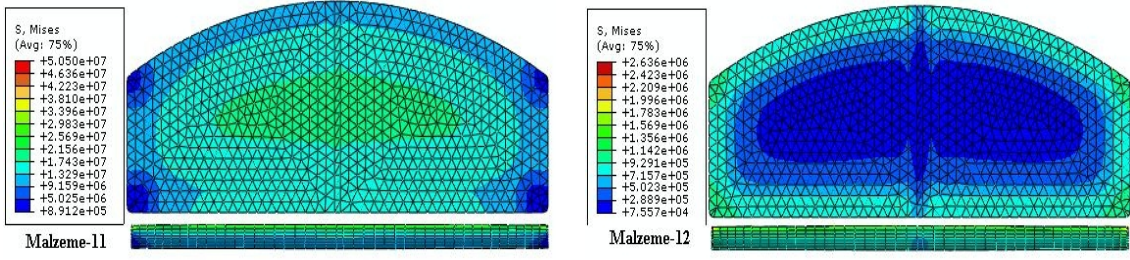


Şekil 4. 7 Frenleme sonunda 3mm aşınmış balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları



Şekil 4. 8 Frenleme sonunda 6mm aşınmış balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları



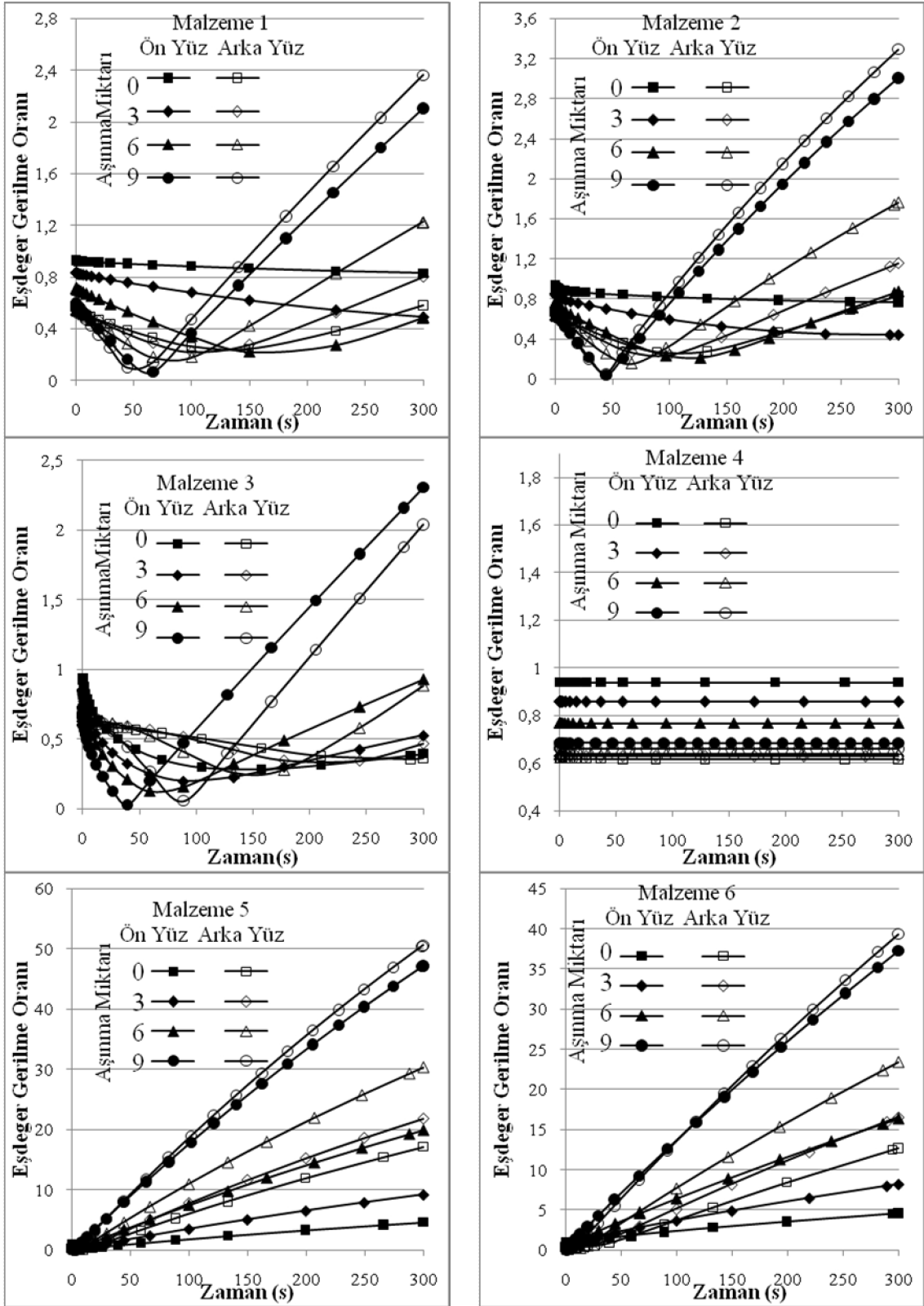


Şekil 4. 9 Frenleme sonunda 9mm aşınmış balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları

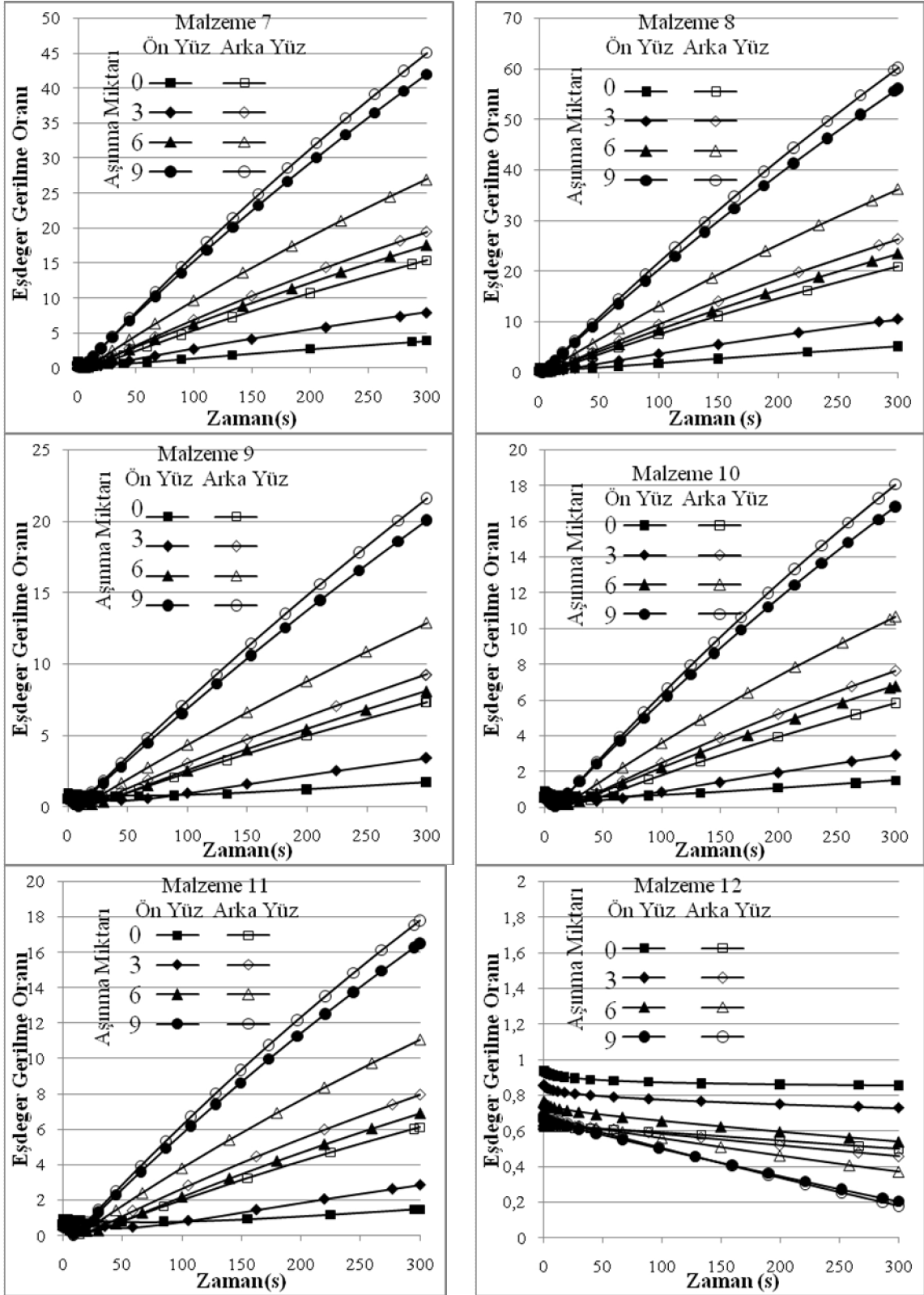
Şekil 4.10' da 12 malzemeye ait alt ve üst yüzeylerden alınan birer noktaya ait gerilmelerin zamanla değişimi verilmiştir. Bu grafikler çizilirken elde edilen gerilme değerleri yüzeye uygulanmış olan 1050 kPa gerilme değerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Her bir grafik bir malzeme için aşınma miktarlarına bağlı olarak 4 durumu birlikte göstermektedir.

Tüm balatalarda başlangıçta bir miktar azalma olmakta, daha sonra gerilmeler artmaya başlamaktadır. Bu azalma periyodu malzemelerin ısıl özelliklerine bağlı olarak kısa veya uzun olmaktadır. Örneğin ısıl kapasitesi en küçük olan 4 ve 12 numaralı malzemede frenleme süresi boyunca hiç artış olmamıştır. Diğer malzemelerde ise başlangıçta kısa veya uzun bir süre için azalma olmuş, sonra yeniden artış meydana gelmiştir. Bununla beraber 1 ve 2 numaralı malzemelerde aşınmamış olanlarda da hiç artış görülmemektedir. Bu durumda gerilmenin zamanla değişiminin ısıl ve mekanik özellikler yanında balata kalınlığı ile de ilgili olduğu söylenebilir. Bu durum 9 mm aşınmış olan 1 ve 2 numaralı malzemelerde de açıkça görülmektedir.

Aşınma miktarının artması ile meydana gelen gerilme miktarları da artmaktadır. Bu durum da balatanın ömrünün doğrusal olarak değil, aşınma miktarının artmasına bağlı olarak hızlanan bir şekilde tükendiğini göstermektedir. Malzeme 12 bu duruma bir istisna oluşturmuştur gibi görünse de bu malzemenin 600 s sürede yapılan analizinde 450 saniyeye kadar olan sürede düzgün bir şekilde gerilme değerinin azaldığı ve 450 saniyeden sonra gerilmenin arttığı görülmüştür. Bunun sebebi elastise modülü ve ısıl genleşme katsayısının diğer malzemelere göre çok küçük olmasından kaynakladığı düşünülmektedir.



Şekil 4. 10 Balata yüzeyinde alınan bir noktanın 300 saniye sürede ön ve arka yüzündeki gerilmenin zamanla değişimi



Şekil 4.10 Balata yüzeyinde alınan bir noktanın 300 saniye sürede ön ve arka yüzündeki gerilmenin zamanla değişimi (devam)

5. SONUCLAR

Bu çalışmada 12 farklı balata malzemesinin 300 s süresince sürekli olarak frenlenmesi sonucunda meydana gelen sıcaklık dağılımları ve gerilme durumları ABAQUS paket programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada ayrıca balatanın aşınmasının etkisini dikkate almak amacıyla 4 farklı kalınlıktaki balata dikkate alınmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen başlıca sonuçlar şu şekilde sıralanabilir.

1. Balataya etki eden ısı güç balata merkezinden uzaklığa bağlı olarak değiştiğinden balatanın dış kısımlarına doğru daha büyük sıcaklık değerleri elde edilmektedir.
2. En büyük sıcaklık değerleri balatanın diske temas ettiği yüzeyde meydana gelmektedir.
3. Balatada meydana gelen sıcaklık dağılımı incelenirken sadece meydana gelen en büyük sıcaklık değil aynı zamanda en büyük ve en küçük sıcaklıklar arasındaki farkta dikkate alınmalıdır.
4. Malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ile özgül ısı ve yoğunluğu arasında ters orantı olduğu bulunmuştur. Isıl iletkenlik katsayısı küçük, özgül ısı ve yoğunluğu büyük olan balata malzemesinin yüzeyinde oluşan sıcaklık ve sıcaklık farkı değeri maksimum olmaktadır. Isıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı ve yoğunluğu büyük olan balata malzemesinin yüzeyinde oluşan sıcaklık ve sıcaklık farkı değeri minimum olmaktadır.
5. Aşınma miktarı arttıkça balata yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri ve sıcaklık farkı da artmaktadır ve oluşan deformasyon değişiminin azaldığı görülmektedir.
6. Ön ve arka yüzeyler arasındaki sıcaklık farkının yüksek olmasının sebebi ısı iletim katsayısının küçük olmasından kaynaklandığı görülmektedir.
7. Gerilmelerin en büyük olduğu bölgeler balatanın tutulan yüzeyindeki köşe kısımlarında ve balatanın orta kanal kısmında yer almaktadır. Isıl gerilmeler açısından en önemli hususlar ısıl genleşme katsayısı ve elastisite modülüdür. Bu nedenle gerilmeleri karşılaştırırken malzemelerin bu özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer taraftan malzemede oluşan en büyük sıcaklık ve sıcaklık

farkları da ısı gerilmelerin meydana gelmesinde etkili olan unsurlardır. Isıl genişleme katsayısı ve elastise modülü büyük olursa gerilme değeri de büyük olur.

8. Tüm balatalarda başlangıçta bir miktar azalma olmakta, daha sonra gerilmeler artmaya başlamaktadır. Bu azalma periyodu malzemelerin ısı özelliklerine bağlı olarak kısa veya uzun olmaktadır. Bu durumda gerilmenin zamanla değişiminin ısı ve mekanik özellikler yanında balata kalınlığı ile de ilgili olduğu söylenebilir.
9. Aşınma miktarının artması ile meydana gelen gerilme miktarları da artmaktadır. Bu durum da balatanın ömrünün doğrusal olarak değil, aşınma miktarının artmasına bağlı olarak hızlanan bir şekilde tükendiğini göstermektedir.

Öneriler: Yapılan bu çalışma sürekli frenleme sonucunda balatada oluşan ısı transferi ve termal gerilme analizi incelendiğinden kesikli frenleme sonucunda balata ve diskte oluşan sıcaklık ve gerilme analiz verileri incelenebilir.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda nümerik analizle elde edilen sonuçlar deneysel yolla elde edilen verilerle karşılaştırılarak nümerik analizin gerçekliği ispatlanabilir.

Fren diskinde meydana gelen ısı transferi ve termal gerilmeler bulunabilir.

6. KAYNAKLAR

Abu Bakar, Ouyang H. ve Cao Q., 2003. "Interface Pressure Distributions through Structural Modifications", SAE Papers 01-3332, 2003

Abu Bakar and Huajiang Ouyang, 2005. "Prediction Of Disc Brake Contact Pressure Distributions By Finite Element Analysis" *Jurnal Teknologi*, 43(A) Dis. 2005: 21–36

Abu Bakar and Ouyang H. 2007. Wear prediction of friction material using the finite element method. *Wear*, doi:10.1016/j.wear.2007.08.015

Abaqus/Standard Version 6.7, User's Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. Pawtucket, RI, USA, 2004.

Ajayi O.O., Ludema K.C., 1998. "The effect of microstructure on wear modes of ceramic materials, proceedings of the international conference on wear of materials", American Society of Mechanical Engineers, pp. 307-318.

Ashby M., Jones R, H, D., 1996. "Friction and wear engineering materials", Cambridge Universtiy, England.

Bijwe J., 1997. "Composites As A Friction Material: Recent Developmets In Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials-A Reveiw", *Polimer Composites*, 18, 3, 378-396, 1997.

Bauer H., 1995. "Automotive Brake Systems", Robert Bosch GmbH

Bedir S., 2007. "Çift Yönlü Asansör Fren Bloklarının Modellenmesi ve Sonlu Elemanların Analizi", *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

- Bergman F., Eriksson M., ve Jacobson S., 2000. "The Effect of Reduced Contact Area on The Occurrence of Disc Brake Squeals for An Automotive Brake Pad", Proc. Ins. Mech. Eng. Journal of Automobile Engineering, Part D, vol.214, pp. 561-568
- Bettge D. ve Starcevic J., 2003. "Topographic Properties of The Contact Zones of Wear Surfaces in Disc Brakes", Wear vol.254, pp. 195-202
- Bowden F.P., and Tabor D., 1994. "The friction and lubrication of solids", pp. 12-16, 29-31, 52-55, 78-79, 187-191.
- Burton R.A., 1980. "Thermal Deformation in Frictionally Heated Contact" Wear 59, 1-20, 1980.
- By Walter Krenkel, Bernhard Heidenreich, Ralph Renz, 2002. "C/C-SiC Composites For Advanced Friction Systems" Advanced Engineering Materials 2002, 4, no.7 427-436, 9pp
- Childs T.C.T. and Parker I.K., 1999. "The friction cutting of sialon and silicon nitride ceramics", Proc. Japan Int. Trib. Conf., Nagoya, Japan, pp. 373-378, 12-17 july, 1999.
- Czichos H., 1997. "Towards a General Theory of Tribological Systems", Wear, , 247-264, 44 pp, 1977.
- Demirsöz R., 2005. Asansör Kılavuz Rayların Gerilme Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Dönmez A.G., 2000. "Asbest dışı elyaflarla üretilen balata malzemelerinin özelliklerinin incelenmesi", Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Domaç G.S., 2006. “Disk frenlerin tasarım ve tribolojik açıdan incelenmesi” Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Eriksson M., Lord J., Jacobson S., 2001. “Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass”, *Wear*, 249, 272–278 pp.
- Fenton, J., 1996. “Handbook of Vehicle Design Analysis”, Warrendale, 1996
- Fieldhouse J.D. ve Steel W.P., 2003. “A Study of Brake Noise and The Influence of The Centre of Pressure at The Disc/Pad Interface, The Coefficient of Friction and Caliper Mounting Geometry”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Journal of Automobile Engineering, Part D*, vol. 217, 957-973 pp.
- Filip P., Weiss Z., Rafaja D., 2001. “On Friction Layer Formation in Polymer Matrix Composite Materials for Brake Applications”, *Wear* 9028, 1-10 pp.
- Gemalmayan N., 1984. “Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi”, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Halderman J.D. ve Mitchell C.D., 2000. “Automotive Brake Systems”, 2nd Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River
- Halliday D., Resnick R., 1999. “Fiziğin temelleri”, Ayrım Yayınları, Ankara, 1999
- Halling J., 2000. “Principles of tribology”, The Macmillan Process. Ltd. 72-92. pp.
- Harper G.A., 1998. “Brakes and Friction Materials: The History and Development of Tech.”, Mec. Eng. Publications Limited, London, England
- Hohmann C., Schiffner K., Oerter K. ve Reese H., 1999. “Contact Analysis of Drum Brakes and Disc Brakes Using ADINA”, *Computers & Structures* vol.72, pp. 185-198

- Hirth J.P. and Lothe J., "Theory of Dislocations", McGraw-Hill, New York, 1968.
- Handa Y., Kato T., 1996. "Effects of Cu Powder, BaSO₄ and Cashew Dust on the Wear and Friction Characteristic of Automotive Brake Pads", Tribology Transactions, Vol.39, pp. 346-353, 1996.
- Incropera F., DeWitt D., 1996. "Fundamentals of Heat and Mass", Purdue University School of Mechanical Engineering, Book, 14 Chapter, 985s USA
- Jearsiripongkul T., Chakraborty G. ve Hagedorn P., 2002. "Stability Analysis of A New Model for Floating Caliper Disc Brake", IEEE ICIT'02, Bangkok, Thailand, pp. 535-539
- Jacobsson H., 2003. "Aspects of Disc Brake Judder", Proc. Ins. Mech. Eng. Journal of Automobile Engineering, Part D, vol. 217, pp. 419-430
- Jung ho Hwang, Heung Seob Kim, Young Choi, Byeong Soo Kim and Ki Weon Kang, 2005. "The Thermal Analysis of Brake Disc with 3-D Coupled Analysis" Key Engineering Materials Vols. 297-300 (2005) pp 305-310
- J.D. Guerin a, J.P.Bricout a, K. Laden and M.Watremez, 1997. "High thermal diffusivity materials for railway brake discs" Tribology Letters 3 (1997) 257-267, 10 pp
- Ji-Hoon Choi, In Lee, 2004. "Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes" Wear 257:1-21-2, 47-58, 11pp, Elsevier Science, 2004
- Josef Voldşich, 2007. "Frictionally excited thermoelastic instability in disc brakes Transient problem in the full contact regime" International Journal of Mechanical Sciences 49 (2007) 129–137, 8pp

- Karamış M.B., 1997. “Sürtünme ve sürtünme kuvvetinin ölçümü” Erciyes Üniv. Makine Müh. Bölümü, Triboloji, s 21-22, Kayseri.
- Kondoh K., Takano Y., Takeda Y., 1997. “Friction and Wear Properties of Integrated Composite Copper-Based Friction Materials”, SAE 970979, 1997.
- Kato T., Akira M., 1994.”The Wear of Aramid Fiber Reinforced Brake Pads, Tribology Transaction”, Vol. 37, pp.559-565, The University of Tokyo, Japan, 1994.
- Lee K. and Barber J.R., 1997. “An experimental investigation of frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk brakes under a drag brake application”, Trans. ASME J. Tribology, pp. 409- 414.
- Mimaroglu A., Çalışkan M., Calli I., 2001. “Evaluation of sintering temperature and tribological properties of ceramic materials with Cr2O3, SiO2 and MnO2 additive compounds”, Industrial Lubrication and Tribology, vol 53, pp 192-197.
- Mosleh M., Blau P. J. and Dumitrescu D., 2003. “Characteristics and Morphology of Wear Particles from Laboratory Testing of Disk Brake Materials”, Wear vol. 352, pp. 114-120
- Morshed M. M., Haseeb A. S. M. A., 2004. “Physical and chemical characteristics of commercially available brake shoe lining materials: a comparative study”, Journal of Materials Processing Technology, 155-156, 1422-1427.
- Mutlu İ., Sugözü İ., Öner C., 2009. “Borik Asit Ve Karaçam Kozalak Tozu İlaveli Fren Balatasının Sürtünme Davranışının İncelenmesi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye 994-999, 5pp

- Mutlu I., 2002. ‘‘Seramik katkılı asbestsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel incelenmesi’’, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Nabarro F.R.N., 1967. Theory of Crystal Dislocation, Oxford Univ. Press, Chapter 7. Oxford,
- Ostermeyer G.P., 2001. ‘‘Friction and Wear of Brake Systems’’, Forschung im Ingenieurwesen vol. 66, pp. 267-272
- Ping Ho H., Andrew Day J., Hussain K., Johnstone A., 2007. ‘‘Modelling and simulation of the characteristics of a hydraulic brake master cylinder’’, JUMV Automotive Conference, *University of Bradford*, 2007
- Rigney R.A. and Hirth J.P., 1979. ‘‘Plastic Deformation and Sliding Friction of Metals’’ *Wear* 53, 345-370,
- Rigney S., Hirth M., 2001. ‘‘Micro building is friction surfaces and Friction metarials’’ , Engineering Publishing, pp. 768-771.
- Ripin Z.B., 1995. ‘‘Analysis of Disc Brake Squeal Using the Finite Element Method’’, PhD Thesis, University of Leeds
- Severin D. ve Dörsch S., 2001. ‘‘Friction Mechanism in Industrial Brakes’’, *Wear* vol. 249, pp. 771-779
- Siple P. A. and Passel. C. F. 1945. ‘‘Measurement of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures’’ *Proc. Am. Phil. Soc.* 89: 177-199, 1945.
- Sugözü İ. ve Mutlu İ., 2009. ‘‘Fren Balatası Üretiminde Toz Karıştırma Süresinin Frenleme Karakteristigine Etkisinin Arastırılması’’, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye 1052-1056, 4pp

- Tabor D., 2001. "Friction the present state of our understanding", Transactions of the ASME, Journal of Lubrication Technology, 169-179, 10 pp.
- Tamari J., Doi K. ve Tamasho T., 2000. "Prediction of Contact Pressure of Disc Brake Pad", Technical Notes, Society of Automotive Engineering, Review vol.21, pp.133-141
- Tirovic M. ve Day A.J., 1991. "Disc Brake Interface Pressure Distributions", Proc. Inst. Mech. Eng. Journal of Automobile Engineering, Part D, vol. 205, pp. 137-146
- TS 9076, 1991, "Fren balataları-malzeme sürtünme özelliklerinin küçük deney parçaları ile değerlendirilmesi", T.S.E., 1. Baskı, Ankara.
- Thomas Valvano and Kwangjin Lee 2000. "An Analytical Method to Predict Thermal Distortion of a Brake Rotor", SAE 2000-01-0445 World Congress Detroit, Michigan March 6-9, 2000, vol. 109, pp. 566-571
- Uetz, H. and Föhl, J., 1978. "Wear As An Energy Transformation Process" Wear 9, 253-264, 1978
- Uzun H., Fındık F., Salman S. "Malzeme Biliminin Temelleri", 2008, 7 Bölüm 288 sayfa
- Quinn T.F.J., 1996. "Computational Methods Applied to Oxidational Wear", Wear 199, 169-180, 1996.
- Vishwanath B., Verma A.P. Kameswaro Rao C. V. S., 1993. "Effect of Reinforcement on Friction and Wear of Fabric Reinforced Polymer Composites", Wear, 167, pp. 93-99, 1993.

Voller G.P., Tirovic M., Morris R. ve Gibbens P., 2003. "Analysis of Automotive Disc Brake Cooling Characteristics", Proc. Ins. Mech. Eng. Journal of Automobile Engineering, Part D, vol.217, pp. 657-666

Yılmaz F., 1997. "Sürtünme ve aşınma", 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, s. 229-247, İstanbul.

Yüncü H., Kakaç S., Temel Isı Transferi, Bilim Yayınevi, Ankara, 1999.

Yamaguchi, Y., 1990. "Tribology of Plastic Materials", Tribology Series, Vol.16, 1st Ed., Elsevier, Netherland, 1990.

Yamashita Y., Hiroshi A., Kawase M., Iwata K., 1989. "High Performance Asbestos Free Friction Material for Disk Brake Pads with The Controlled Grain Structure", Sumitomo Electric Industries, Ltd., SAE 890861, 1989.

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Osman KOÇ
Doğum Yeri	Kangal / SİVAS
Doğum Tarihi	30 / 05 / 1983
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dili	İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	Buca Endüstri Meslek Lisesi (1997-2000)
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Tesisat (Enerji) Öğretmenliği Programı (2004-2007)
Yüksek Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı (2007-2009)

Çalıştığı Kurum / Kurumlar ve Yıl aralığı

Tübitak Projesi	2007-2008 (Proje Asistanı)
-----------------	----------------------------