



**Makale
(Article)**

Fren Balata Sisteminde Sürtünme Sonucu Oluşan Isı Transferi Ve Termal Gerilme Analizi

Osman KOÇ, İbrahim MUTLU, Süleyman TAŞGETİREN
Afyon Kocatepe Üniversitesi Tek. Eğt. Fak. Makine Eğt. Böl., Afyon/TÜRKİYE
tasgetir@aku.edu.tr

Özet

Frenleme esnasında hareketli kütlelerin kinetik enerjisi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüşür. 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 çıkarmaktadır.

Bu çalışmada ABAQUS sonlu elemanlar programı ile modellenmiş, 5 farklı balata malzemesi 300 s süresince sürekli frenlenme işlemi, meydana gelen sıcaklık dağılımları ve gerilme durumları incelenmiştir. Balatanın aşınma ile ortaya çıkan durumunu ortaya koymak açısından aynı balatanın 4 farklı kalınlığı da analizlerde dikkate alınmıştır.

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

Analysis Of The Friction Brake Lining Including Heat Transfer System And Thermal Analysis

Abstract

Kinetic energy during braking of the moving mass is converted into heat energy through friction. 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.

Five different brake pad materials were subjected to the braking process during 300 s in the study that was modeled by the ABAQUS software. The researchers investigated the temperature and stress that occurred during the braking process by using finite elements method. Moreover, in order to expose the status of brake pads after friction, four different thicknesses of the same brake pad were taken into the consideration in the analysis.

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

1. GİRİŞ

Frenler enerji değişim araçlarıdır. Aracın mekanik enerjisini, sürtünme ile ısı enerjisine çevirirler. 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 ve bu ısı atmosfere yayılır. Eğer frenlere çevreye verebileceğinden daha

Bu makaleye atıf yapmak için
Koç, O., Mutlu, İ., Taşgetiren, S., "Fren Balata Sisteminde Sürtünme Sonucu Oluşan Isı Transferi Ve Termal Gerilme Analizi", *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi* 2009, 1(2) 9-20

How to cite this article
Koç, O., Mutlu, İ., Taşgetiren, S., "Analysis Of The Friction Brake Lining Including Heat Transfer System And Thermal Analysis" *Electronic Journal of Vehicle Technologies*, 2009, 1 (2) 9-20

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 [1, 2].

Hohmann vd.[3], frenleme sonunda yapmış oldukları analiz sonucunda balata dış yarıçapında yüksek kontak basıncı ve disk dönerken balataya basıncı uygulandığında ise balata destek plakasında yüksek basınç tespit etmişlerdir. Tamari vd.[4], disk fren balatalarında temas basıncının tahmini ile ilgili yaptıkları çalışmada, diskli frenlerde aşınmanın düzgün olabilmesi için temas basıncının da düzgün olması gerektiğini belirtmişlerdir. Abu Bakar vd.[5], balata-disk arasındaki basınç dağılımını farklı tasarım, boyut ve malzeme kullanılarak bilgisayar ortamında modellemeye çalışmışlardır. Asimetrik ve düzgün olmayan basınç dağılımı, düzgün olmayan aşınmaya ve balata ömrünün kısılmasına sebep olduğunu bulmuşlardır. Balata konstrüksiyonunun basınç dağılımı ve aşınma üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Abu Bakar vd.[6], fren disk 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 disk ve kontak basınç dağılımını araştırmışlardır. Uygun model kullanılarak fren disklerindeki ara yüzlerindeki basınç dağılımlarının tahmin edilmesi sağlanmıştır. Abu Bakar vd.[7], frenleme esnasında sürtünme nedeniyle dinamik kararsızlıktan dolayı kaynaklanan gürültü ve ses titreşimini deneysel yolla bulmuş ve verileri Abaqus paket programı kullanarak incelemiştir.

Valvano ve Lee [8], çalışmalarının kısa süreli ve kararlı durum altındaki ısı davranışı incelemiştir. Diskin maksimum sıcaklığı, balata ile temas kurulan bölgede bulunur ve tekrarlayan frenleme esnasında yükselmiş olduğunu bulmuşlardır. Arpat [9], 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. Frenleme anındaki sıcaklığın düşürülmesiyle balatada aşınmanın azaldığını bulmuştur. Jacobsson [10], konvansiyonel disk fren analizi yapmıştır. Zamana bağlı olarak ısı bozunmalar sürtünmeden dolayı ve mekanik bozunmaların uygulanan işletme kuvvetlerinden dolayı oluştuğu sonucuna varmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, sürtünen malzeme çiftinde aşınma oluştuğu ve diskin kalınlığında azalma meydana geldiğini bulmuştur. Mosleh vd.[11], 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.

Hwang vd.[12], frenleme sırasında sürtünmeden kaynaklanan ısıdan oluşan termo elastik düzensizliği tanımlamışlardır. Tam bir frenleme ve tekrarlı frenleme altında sıcaklık ve ısıl deformasyon değişimini sonlu elmanlar yöntemiyle çözmeye çalışmışlardır. Diskin maksimum sıcaklığı, balata ile temas kurulan bölgede bulunduğu ve tekrarlayan frenleme esnasında ortaya çıktığını bulmuşlardır. Li vd.[13], diskli frenlerde, frenleme esnasındaki titreşim ve gürültü oluşumunun balata yüzeyindeki basınç ve sıcaklık dağılımından kaynaklandığı üzerinde durmuşlardır. Deneysel çalışmalar ve sayısal analizler sonucunda balata yüzeyindeki sıcaklık dağılımının düzgün olmadığı ve sıcaklık değerinin yüksek olduğu bölgelerde yüksek basınç ortaya çıktığı görülmüştür. Sıcaklığın balata yüzeyinde oluşan gürültü ve titreşimde etkili olduğunu bulmuşlardır.

Bu çalışmada fren balata malzemesinin frenleme esnasında oluşan sıcaklık ve gerilme dağılımı değişimi incelenmiştir. Daha önce literatürde balata malzemesi olarak kullanıldığı belirtilmiş olan 5 farklı balata malzemesinin ısı ve mekanik özellikleri Abaqus sonlu eleman programı kullanılarak, balataların ısı ve mekanik davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada ayrıca balatanın aşınma miktarının etkileri de ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Matematiksel olarak frenleme esnasında hareket enerjisinin sürtünme kuvveti yoluyla ısı enerjisine dönüşmesiyle oluşan ısı güç hesaplanmıştır. Abaqus paket programı

kullanılarak fren sistemindeki balata modellenmiştir ve hesaplanan ısı güç programı girilerek analiz sonuçları bulunmuştur[1].

2. MALZEME ve METOT

2.1. 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 çizelge 2.1’de verilmiştir[1].

Çizelge 2. 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 [14]
2	5	1000	1400	10	1	0,25	Choi [14]
3	0,5	1034	3660	30	0,53	0,25	Hwang [12]
4	5	350	4000	0,001	1	0,25	Voldrich [15]
5	0,90	1880	1550	1	2,2	0,25	Abaqus V6.6 [16]

Malzeme-1 karbon-karbon bileşikli kompozit malzemeden yapılmıştır. Tabloda görüldüğü gibi özgül ısı en yüksek olan malzemedir. Yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı da yüksektir. Poisson oranı en yüksek olan malzemedir.

Malzeme-2 karbon-karbon bileşikli kompozit malzemeden yapılmıştır. 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 ısı iletkenlik katsayısı en küçük olan ikinci malzemedir.

2.2. Problemin Geometrisi ve Sınır Şartları

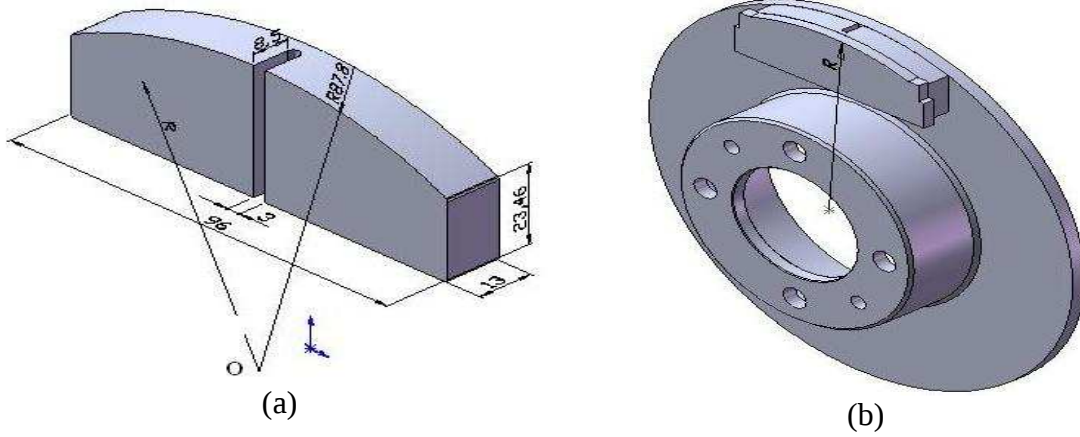
İncelenen balatanın geometrisi şekil 2.1 (a)’da verilmiştir. Bu balata 187 mm çaplı bir disk üzerinde şekil 2.1 (b)’deki gibi yer almaktadır. Problem için tüm malzemelerde ortak bir değer olmak üzere $\mu = 0,45$ alınmıştır. Bu durumda cismin her bir düğüm noktasının merkeze uzaklığına bağlı olarak ısı güç $\dot{P}$,

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

$$\dot{P} = 0.45 * 1050000 * 0.00305 * 64.3 * R$$

$$\dot{P} = 92800 * R$$

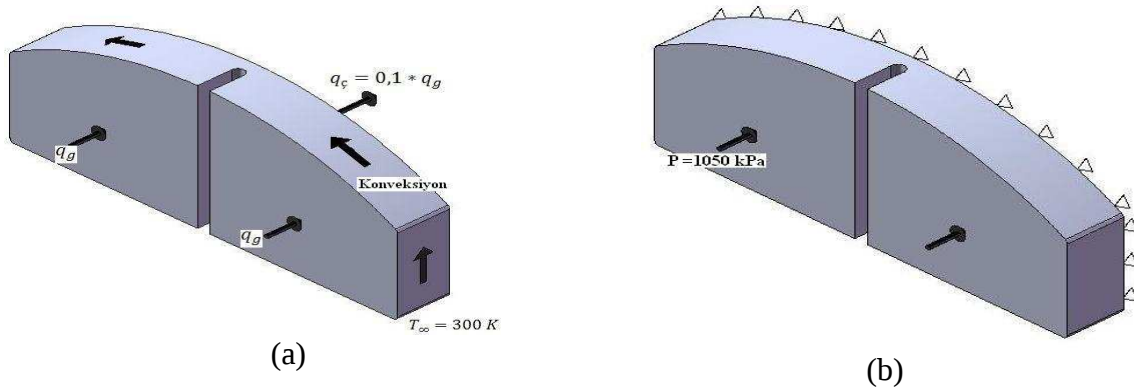
şeklinde hesaplanır. Fren basıncı (P) 1050 kPa, dönme hızı (ω) 64,3 1/s ve balata yüzey alanı (A) 0,00305 mm² dir. R incelenen noktanın balatanın merkezinden uzaklığını göstermektedir.



Şekil 2. 1 Balata geometri ölçüsü ve fren disk-balata görünümü

Balata başlangıçta oda sıcaklığında (300K) kabul edilmiştir. Bu şartlarda balata için uygulanan ısı sınır şartı şekil 2.2.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 taşınım katsayısı (h) = 28 (W/m²K) alınmıştır. Bu değer alınmasında Siple ve Passel [17] tarafından verilen $h = 10.45 - V + 10\sqrt{V}$ formülü kullanılmıştır. Hava hızı (V) diskin çevresel hızı olarak alınmıştır.



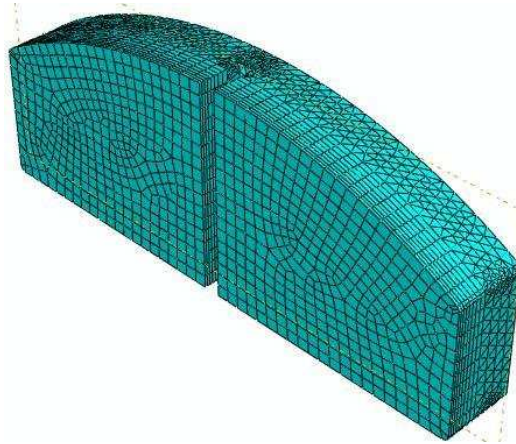
Şekil 2. 2 Balata üzerine uygulanan sınır şartları ısı (a) ve mekanik (b)

Probleme uygulanan mekanik sınır şartları ise şekil 2.2.b’de görülmektedir. Balatalar bir altlık üzerine yapıştırılarak üretildiğinden balatanın alt kısmı sabit alınmıştır. Balata-disk arasındaki yüzeye ise 1050 kPa ‘lık basınç uygulanmıştır[1].

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 piramit seçilmiş, kalınlık boyunca sıcaklık değişimi büyük olan bölgelerde daha ince elaman oluşturulması sağlanmıştır. Elde edilen ağ yapıları şekil 2.3’de verilmiştir. Aşınma durumlarına göre

sırasıyla aşınmamış için 11824, 3mm aşınmış için 11774, 6mm aşınmış için 4686 ve 9mm aşınmış için 7398 düğüm noktası bulunmaktadır[1].



Şekil 2. 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.

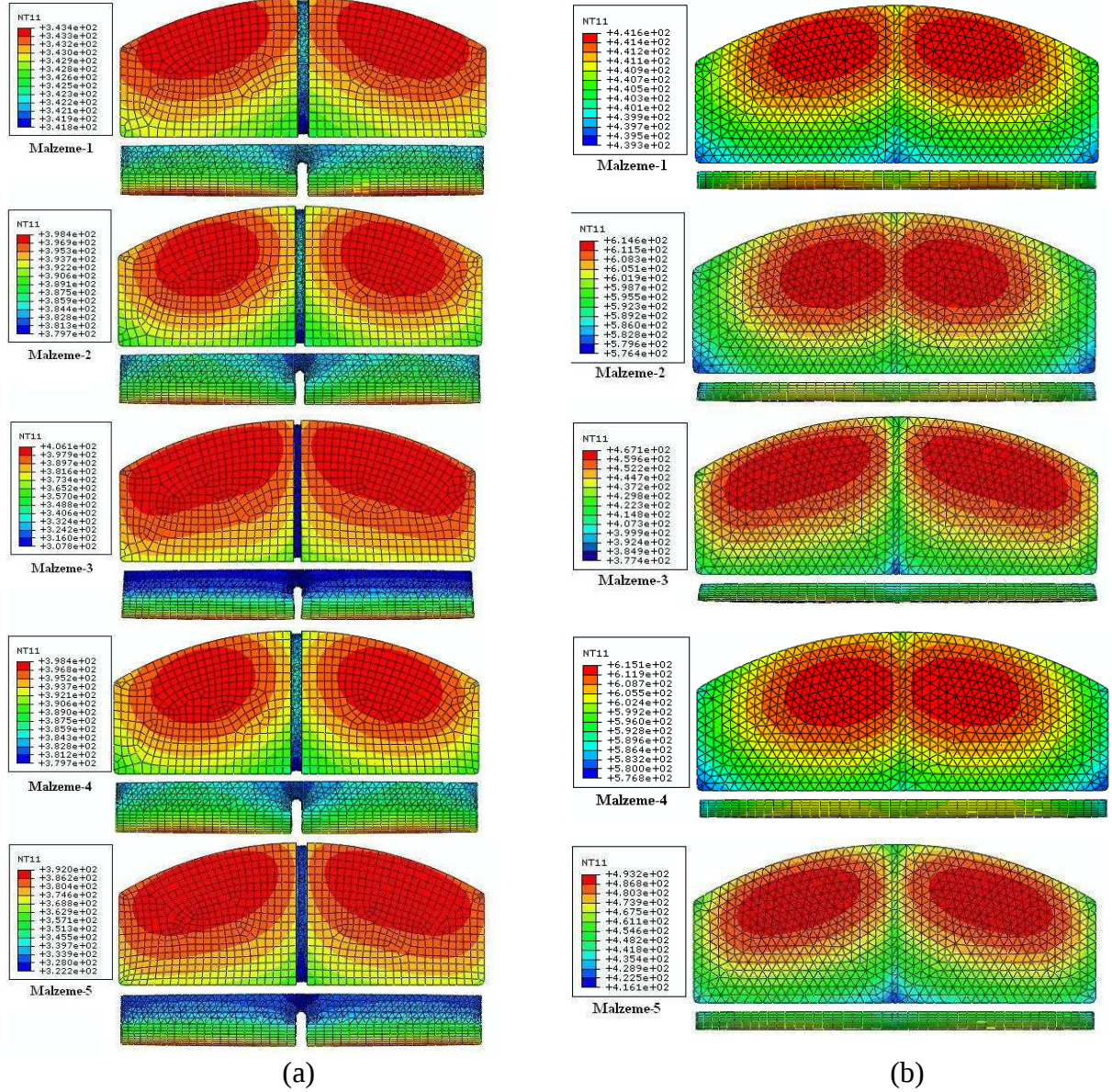
3.1. Sıcaklıkla İlgili Bulgular

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 ve 9 mm aşınmış balata malzemesinde meydana gelen sıcaklık değişimi ve deformasyon oluşumu 300 saniye sonundaki analiz sonuçları şekilde 3.1’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. Aşınmamış balata malzemesi-3’de en yüksek yüzey sıcaklık değeri 406 K ve en düşük yüzey sıcaklık değeri ise 308 K, sıcaklık farkı ise 98 K dir. Bunun sebebi ısıl iletkenlik katsayısının küçük olmasından ve özgül ısı değerinin büyük olmamasından kaynaklanır. Aşınma miktarı dikkate alınırsa 9mm aşınmış balata malzemesi-3’de yüzey sıcaklığı en yüksek 467 K ve en düşük yüzey sıcaklık değeri ise 377 K, sıcaklık farkı ise 90 K dir. Malzeme-3’de aşınma miktarı dikkate alınırsa aşınma miktarı arttığında yüzeyde oluşan sıcaklık artmaktadır ve iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır. Diğer malzemelerde ise aşınma miktarının artmasıyla balata yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri ve iki yüzey arasında oluşan sıcaklık farkı da artmaktadır. Aşınmamış balata malzeme serisinde yüzeyde oluşan en yüksek sıcaklık malzeme-3’de oluşmuştur. 9mm aşınmış balata malzeme serisinde ise yüzeyde oluşan en yüksek sıcaklık malzeme-2 ve 4’de olduğu görülmektedir. Malzeme-2 ve 4’ün özgül ısı, yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı çarpımı eşit ve malzeme-3’den büyüktür. Malzeme-1’de ısıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı ve yoğunluk değerlerinin yüksek olmasından dolayı balata yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri diğer malzeme serilerine göre kıyasla küçüktür. Bu malzemede oluşan en büyük yüzey sıcaklığı aşınmamış için 343 K, 9mm aşınmış için 441 K, en küçük yüzey sıcaklığı aşınmamışta 341 K, 9mm aşınmışta 439 K ve iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı ise 2 K dir.

Malzeme 1 ve 5 kıyaslandığında özgül ısıları eşit, fakat malzeme-1 ısıl iletkenlik katsayısı malzeme-5 göre 50 kat daha büyük ve yoğunluk değeri de daha yüksektir. Buradan malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı ve yoğunluk değeri büyük ise yüzeyde oluşan sıcaklık farkı küçük olur. Malzemenin yoğunluğu ve ısı iletkenlik katsayısı küçük olursa yüzeyde oluşan sıcaklık değeri yüksek olur.

Balata yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı malzeme-3 ve 5’de büyük olduğundan dolayı yüzeyde oluşan sıcaklık şekilleri diğer malzeme yüzeylerinde oluşan sıcaklık şekillerine göre daha dağınık bir görüntü sergilemektedir. Diğer malzeme yüzeylerinde oluşan sıcaklık şekilleri balata merkezine yakın bir yerde ve yuvarlak şekilde oluştuğu görülmektedir[1].

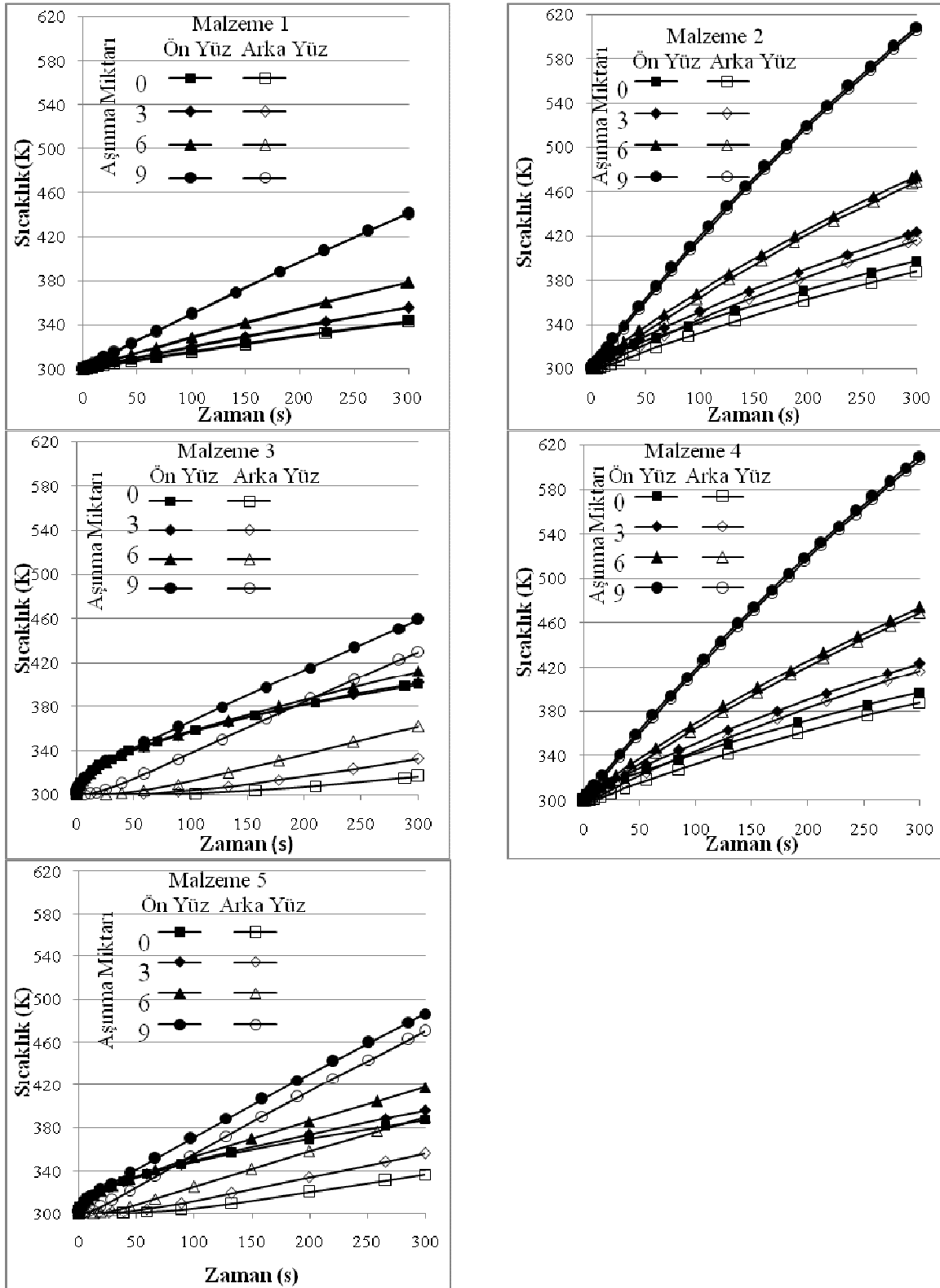


Şekil 3. 1 Frenleme sonunda aşınmamış (a) ve 9mm aşınmış (b) balataadaki sıcaklık dağılımları deformasyon durumları

Şekil 3.2’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-5 için ön ve arka yüzeyler arasında sıcaklık farkı en yüksek olmaktadır. Isıl iletim katsayıları en büyük olan malzeme-1’de 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[1].



Şekil 3. 2 Balata yüzeyinde alınan bir noktanın 300 saniye sürede ön ve arka yüzeyindeki sıcaklığın zamanla değişimi

3.2. Gerilme İle İlgili Bulgular

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 3.3'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 malzemede oluşan en büyük sıcaklık ve sıcaklık farkları da ısıl gerilmelerin meydana gelmesinde etkili olan unsurlardır.

Aşınmamış balata malzemesi-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 aşınmamış malzemelerle kıyaslandığında en küçük değer olan $1,925 \cdot 10^6$ Pa'dır. 9mm aşınmış malzeme-4'ün yüzeyinde oluşan en büyük gerilme $1,582 \cdot 10^6$ Pa'dır. 9mm aşınmış malzemelerle yüzeyinde oluşan gerilme değeri açısından kıyaslandığında en küçük değer olduğu görülmektedir. Aşınmamış ve 9mm aşınmış malzeme-4'de oluşan gerilme değerlerinin malzeme özellikleri aynı olmasına rağmen farklı çıkması yüzeyinde oluşan en büyük ve en küçük sıcaklık değeri ve bu sıcaklık değeri arasında oluşan farktan kaynaklandığı görülmektedir. Aşınmamış balata malzemesinde gerilme en büyük değer olan $5,526 \cdot 10^6$ Pa'la malzeme-2'de olduğu görülmektedir. 9mm aşınmış balata malzemesinde ise gerilme değeri en büyük malzeme-3'de $1,146 \cdot 10^8$ Pa'dır. Bu malzemenin elastisite modülü ve ısıl genleşme katsayısı çarpımı en yüksektir. Elastisite modülü ve ısıl genleşme katsayısı çarpımı küçük olan malzemelerde oluşan gerilme değerinin de küçük olduğu şekil 3.3'de görülmektedir.

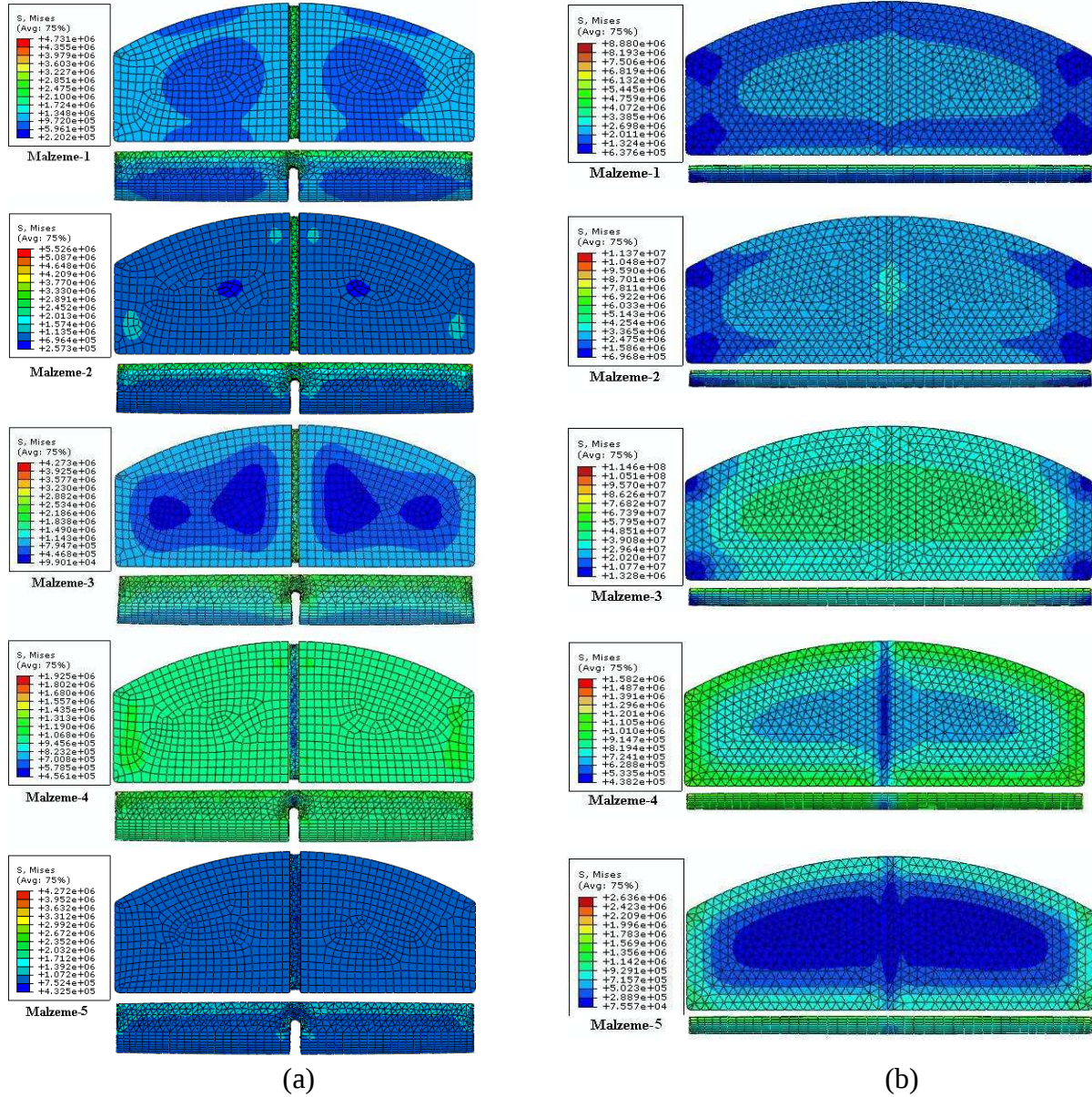
Balatanın disk ile temas eden yüzeyinde meydana gelen gerilme dağılımı Malzeme 1 ve 3 dışında oldukça düzgün bir görünüm sergilemektedir. Bu iki malzemede ise kenarlarda daha yüksek, iç kısımlarda daha düşük bir dağılım görülmektedir. Bu malzemeler için elastisite modülü ile ısıl genleşme katsayısının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

Şekil 3.4' de 5 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 5 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-5 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 olmasıdır[1].



Şekil 3. 3 Frenleme sonunda aşınmamış (a) ve 9mm aşınmış (b) balatadaki gerilme dağılımları ve deformasyon durumları

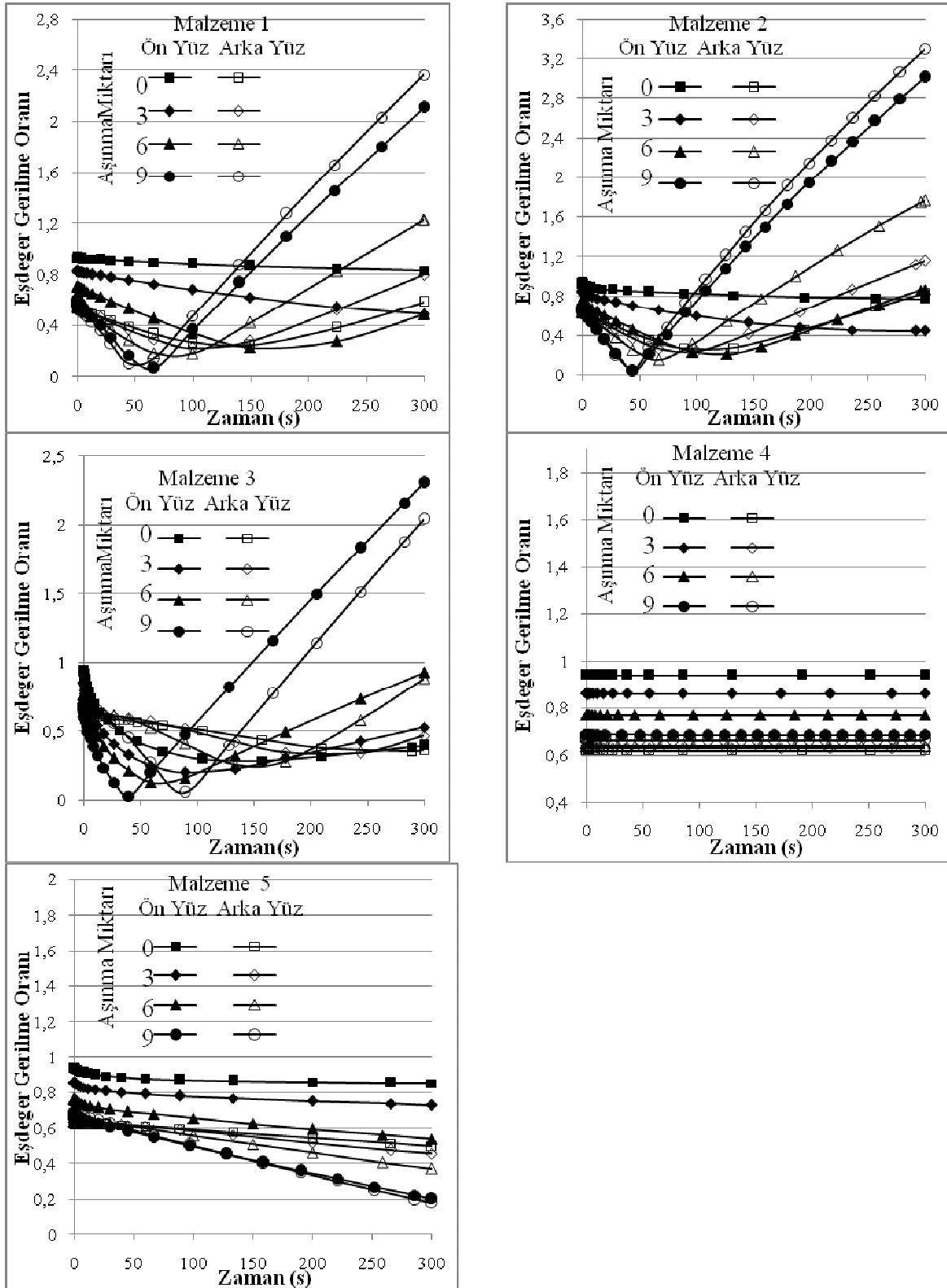
5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 5 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 ısıl 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 fark ta dikkate alınmalıdır.



Şekil 3. 4 Balata yüzeyinde alınan bir noktanın 300 saniye sürede ön ve arka yüzeyindeki gerilmenin zamanla değişimi

4. Malzemenin ısıl 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 balata tutucu yüzeyine oturan 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 ısıl gerilmelerin meydana gelmesinde etkili olan unsurlardır. Isıl genleşme katsayısı ve elastisite modülü büyük olursa gerilme değeri de büyük olur.
 8. Tüm balatalarda başlangıçta gerilmelerde bir miktar azalma olmakta, daha sonra bu gerilmeler artmaya başlamaktadır. Bu azalma periyodu malzemelerin ısıl özelliklerine bağlı olarak kısa veya uzun olmaktadır. Bu durumda gerilmenin zamanla değişiminin ısıl 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.

6. KAYNAKLAR

1. Koç, O., 2008. “Fren Balata Sisteminde Sürtünme Sonucu Oluşan Isı Transferi Ve Termal Gerilme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon
2. Domaç, G.S., 2006 “Disk frenlerin tasarım ve tribolojik açıdan incelenmesi” Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
3. 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
4. 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
5. Abu Bakar, A.R., Ouyang, H. ve Cao, Q., (2003), “Interface Pressure Distributions through Structural Modifications”, SAE Papers 01-3332, 2003
6. 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
7. 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
8. 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
9. Arpat, S.K., 2001. “Minimization Of The Pad Wear On Both Drum And Disc Brakes By Thermal Analysis”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2001

10. Jacobsson H., 2003. "Aspects of Disc Brake Judder", Proc. Ins. Mech. Eng. Journal of Automobile Engineering, Part D, vol. 217, pp. 419-430
11. 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
12. 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
13. Lijie Li, Huajiang Ouyang, Abd Rahim Abu-Bakar, 2008. "Transient Analysis of Car Disc Brake Squeal With Temperature Effects", Automotive Engineering Conference, 2008, Liverpool
14. 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
15. Josef Voldřich, 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
16. Abaqus/Standard Version 6.7, User's Manual
17. Siple, P.A., and C.F. Passel, 1945. "Measurements of Dry Atmospheric Cooling in Subfreezing Temperatures. Proceedings of the American Philosophical Society", 89 (1). 177-199