

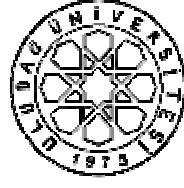
T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREN BALATA MALZEMELERİNİN
OPTİMİZASYONU VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
ANALİZİ

Rukiye ERTAN

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2008



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREN BALATA MALZEMELERİNİN
OPTİMİZASYONU VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
ANALİZİ

Rukiye ERTAN

Prof. Dr. Nurettin YAVUZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2008

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREN BALATA MALZEMELERİNİN
OPTİMİZASYONU VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
ANALİZİ

Rukiye ERTAN

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez/...../2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nurettin YAVUZ
Danışman

Prof. Dr. Ali BAYRAM
Jüri Üyesi

Prof. Dr. Recep EREN
Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
Jüri Üyesi

Doç. Dr. Enver ATİK
Jüri Üyesi

ÖZET

Bu çalışmada, binek taşıtların fren sistemlerinde kullanılan balata malzemesinin deneysel tasarım metotları kullanılarak kompozisyonunun optimizasyonu ve bu kompozisyona uygun üretim parametrelerinin deneysel olarak tespiti gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan balataların toz malzemelerinde öncelikle çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyen, tribolojik özellikleri yüksek ve maliyetleri düşük olanların seçilmesine özen gösterilmiştir. Balata kompozisyonunun optimizasyonunda her biri üç farklı komponentten oluşan yapıtaşlar, yağlayıcılar ve abrasivler olmak üzere görev bakımından üç farklı grubun oranları optimize edilmiştir. Deney sayısını azaltıp karışımlardan optimum sonucu elde etmek için 'Simplex Lattice Design' deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Optimum özellikte yeni oranlara sahip balata kompozisyonunun en uygun üretim parametrelerinin (kalıplama zamanı, kalıplama basıncı, kalıplama sıcaklığı, sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklığı) belirlenmesi aşamasında ise farklı üretim parametrelerinde üretilen balataların deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada üretilen balata malzemelerin karşılaştırılmasında sürtünme-aşınma testlerinin yanı sıra, mekanik testler ve mikroyapı karakterizasyonları da gerçekleştirilmiştir.

Özet olarak bu çalışmada deneysel ve teorik analizler ile tribolojik özellikleri ve maliyeti açısından optimum özelliklere sahip yeni bir balata kompozisyonu ve bu kompozisyona en uygun üretim parametreleri tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Fren balata malzemeleri, Simplex Lattice Design, sürtünme, aşınma, mekanik özellikler, taramalı elektron mikroskobu (SEM), yapıtaşlar, yağlayıcılar ve abrasivler.

ABSTRACT

In this study, optimization of the composition using experimental design methods and experimental determination of manufacturing parameters suitable for this composition of brake friction materials used in the vehicle's brake systems were achieved.

Powder materials composing brake pad were taken care of being selected firstly from materials which are nondestructive on environmental and human health, have high tribological properties and low costs. In brake pad optimization, three of the groups with regard to role in brake pad are reinforcements, lubricants and abrasives proportion were optimized. 'Simplex Lattice Design' experimental design method was used to decrease the number of experiments and to achieve optimum results. In stage of determination of the most suitable manufacturing parameters of brake friction material with optimized composition, experimental results of friction materials produced with different manufacturing parameters were compared. Beside friction – wear tests, there were done mechanical tests and microstructural characterization in comparison of the brake pads manufactured in the study.

Briefly, new brake pad composition and the most suitable manufacturing parameters of this composition were established with experimental and theoretical analysis on account of tribological properties and cost.

Keywords: Brake pad materials, Simplex Lattice Design, friction, wear, mechanical properties, scanning electron microscope (SEM), reinforcements, lubricants and abrasives.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAY SAYFASI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER DİZİNİ.....	xv
GİRİŞ	1
1. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
1.1. Disk-Balata Ara Yüzeyindeki Tribolojik Temasın Yapısı.....	5
1.1.1. Gerçek Temas Alanları ve Temas Bölgeleri.....	6
1.1.2. Mikro ve Makro Boyutta Şekil Adaptasyonu.....	10
1.1.3. Termal Olarak Deformasyon ve Yüzey Özelliklerinin Değişmesi.....	11
1.2. Fren Sisteminde Sürtünme ve Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler.....	12
1.2.1. Kayma Hızının Sürtünmeye Etkisi.....	13
1.2.2. Basıncın Sürtünmeye Etkisi.....	14
1.2.3. Sıcaklığın Sürtünmeye Etkisi.....	15
1.2.4. Balata Yapısının Sürtünmeye Etkisi.....	16
1.2.5. Disk Yapısının Sürtünmeye Etkisi.....	17
1.2.6. Frenleme Süre ve Sayısının Sürtünmeye Etkisi.....	19
1.3. Fren Balata Malzemelerinde Aşınma.....	19
1.4. Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyonu.....	27
1.4.1. Yapısal Malzemeler.....	31
1.4.2. Bağlayıcılar.....	33
1.4.3. Yağlayıcılar.....	34
1.4.4. Abrasivler.....	35
1.4.5. Dolgu Malzemeleri.....	36
1.5. Fren Balata Malzemelerinin Üretimi ve Üretim Parametrelerinin Etkisi.....	37
1.5.1. Toz Metalurjisi ve Parça Üretim Süreci.....	38

1.5.1.1. Toz Özellikleri.....	39
1.5.1.2. Toz Metalurjisi ile Parça Üretim Süreci.....	41
1.6. Karışımların Deneysel Tasarım Yöntemi ile Optimizasyonu.....	46
1.6.1. Simplex Lattice Design.....	47
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	52
2.1. Fren Balata Malzemelerini Oluşturan Bileşenler.....	53
2.2. Fren Balata Malzemelerinin Üretiminde Kullanılan Makinalar.....	59
2.2.1. Karıştırıcı.....	59
2.2.2. Sıcak Kalıplama Presi.....	59
2.2.3. Sinterleme Fırını.....	60
2.3. Çalışmada Yapılan Testler.....	61
2.3.1. Sürtünme - Aşınma Testleri.....	61
2.3.2. Mekanik Testler.....	63
Mikroyapı Karakterizasyonu.....	64
2.4. Optimizasyonda Kullanılan Programların Algoritması.....	64
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	66
3.1. Yeni Balata Kompozisyonun Geliştirilmesi.....	66
3.1.1. Yapısal Malzemelerin Optimizasyonu.....	67
3.1.2. Yağlayıcı Malzemelerin Optimizasyonu.....	77
3.1.3. Abrasive Malzemelerin Optimizasyonu.....	87
3.1.4. Optimizasyonu Gerçekleştirilen Numunelerin Mikrokarakterizasyonu.....	97
3.2. Yeni Üretim Parametrelerinin Geliştirilmesi.....	103
3.2.1. Kalıplama Parametrelerinin Optimizasyonu.....	104
3.2.1.1. Kalıplama süresinin optimizasyonu.....	104
3.2.1.2. Kalıplama sıcaklığının optimizasyonu.....	108
3.2.1.3. Kalıplama basıncının optimizasyonu.....	112
3.2.2. Sinterleme Parametrelerinin Optimizasyonu.....	115
3.2.2.1. Sinterleme süresinin optimizasyonu.....	115
3.2.2.2. Sinterleme sıcaklığının optimizasyonu.....	118
3.3. Sonuçların Kullanımdaki Bir Balata ile Karşılaştırılması.....	122
4. SONUÇLAR.....	125
KAYNAKLAR.....	131
EKLER.....	139
TEŞEKKÜR.....	143
ÖZGEÇMİŞ.....	144

KISALTMALAR DİZİNİ

- T/M - Toz metalurjisi
- BM - Balata malzemesi
- ÜP - Üretim parametreleri
- OB - Optimum özelliklere sahip balata malzemesi
- KB - Kullanımdaki orijinal balata malzemesi

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1	Frenleme esnasında disk-balata ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklığın sürtünme katsayısı ve pürüzlülük üzerindeki etkisi.....	14
Çizelge 1.2	Frenleme esnasında disk-balata ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklığın aşınma oranı üzerindeki etkisi.....	19
Çizelge 1.3	Aşınma partiküllerinin kompozisyonu (ağırlıkça %).....	21
Çizelge 1.4	Standart elek açıklıkları.....	37
Çizelge 1.5	Farklı araştırmacılara göre üretim parametreleri.....	44
Çizelge 1.6	Örnek bir deney tasarım verileri.....	47
Çizelge 2.1	Ön-deneylelerde kullanılmak üzere seçilmiş malzeme türleri.....	52
Çizelge 2.2	Balata tasarımı için seçilmiş fenolik reçinenin fiziksel özellikleri.....	58
Çizelge 2.3	Sürtünme cihazının özellikleri.....	61
Çizelge 2.4	Deneylelerde kullanılan GG-20 disk numunesinin kompozisyonu.....	62
Çizelge 2.5	HRS ölçüm satandardı.....	65
Çizelge 3.1	Balataların üretiminde kullanılan üretim parametreleri.....	70
Çizelge 3.2	Karışımı yapılan yapısal malzeme % ağırlıkça oranları.....	71
Çizelge 3.3	Balata kompozisyonlarının fiziksel özellikleri.....	71
Çizelge 3.4	Yapısallar için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	73
Çizelge 3.5	Yapısallar için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	74
Çizelge 3.6	Yapısalların \$/kg cinsinden fiyatları.....	76
Çizelge 3.7	Yapısalların optimizasyonunda sınır şartları.....	80
Çizelge 3.8	Yapısalların optimizasyonunda hesaplanan optimum oranlar.....	81
Çizelge 3.9	Yapısal optimizasyonu gerçekleştirilen balatanın fiziksel özellikleri.....	81
Çizelge 3.10	Yapısal optimizasyonu gerçekleştirilen balatanın tribolojik özellikleri.....	81
Çizelge 3.11	Karışımı yapılan yağlayıcı malzeme % ağırlıkça oranları.....	83
Çizelge 3.12	Balata kompozisyonlarının fiziksel özellikleri.....	83
Çizelge 3.13	Yağlayıcılar için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	86
Çizelge 3.14	Yağlayıcılar için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	87
Çizelge 3.15	Yağlayıcıların \$/kg cinsinden fiyatları.....	88
Çizelge 3.16	Yağlayıcıların optimizasyonunda sınır şartları.....	92

Çizelge 3.17	Yağlayıcıların optimizasyonunda optimum oranlar.....	93
Çizelge 3.18	Yağlayıcı optimizasyonu gerçekleştirilen balatanın fiziksel özellikleri.....	93
Çizelge 3.19	Yağlayıcı optimizasyonu gerçekleştirilen balatanın tribolojik özellikleri.....	93
Çizelge 3.20	Karışımı yapılan abrasive malzemelerin % ağırlıkça oranları.....	94
Çizelge 3.21	Balata kompozisyonlarının fiziksel özellikleri.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1	Park freni ile birlikte hidrolik bir fren sistemi.....	4
Şekil 1.2	Fren balata yüzey alanının, (a) ayrılmış temas bölgelerinin ve temas bölgelerindeki gerçek temas alanlarının şematik, (b) temas bölgelerinin tipik topografik görünüşü	7
Şekil 1.3	Bir balatanın yüzeyindeki bir mikro temasın oluşumu, gelişimi ve azalması	8
Şekil 1.4	Bir fren diski ve organik fren balatası arasındaki temas durumunun şematik gösterimi.....	9
Şekil 1.5	Bir balatanın aynı yerinde bulunan temas bölgelerinin ana hatları, 1 ve 1000 m'lik kayma durumunun sonucu bir ışık optik mikroskobunda incelenmiştir...10	10
Şekil 1.6	Balatanın ve arka tablanın (a) ısındığı zaman dış bükey eğilmesi, (b) sıcaklık düştüğünde eğik durumdaki balatada homojen olmayan aşınma.....	11
Şekil 1.7	Basınca bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimleri. (a) ve (b) artan basınçla düşen ve azalan basınçla artan sürtünme katsayısı, (c) ve (d) farklı balata malzemelerinde benzer sonuçlar.....	14
Şekil 1.8	Belirli bir bölgesi pürüzlü hale getirilmiş bir disk yüzeyindeki sürtünme katsayısı değişimi.....	18
Şekil 1.9	Her bir frenleme 120 sn'lik dinlenme aralıklarında 20 veya 30 sn'lik bir süre için uygulanmıştır,(a) ilk dört frenleme, (b) tüm 40 frenleme.....	19
Şekil 1.10	Balata aşınması ile ortaya çıkan sert partikülün temas alanındaki normal yüke etkisi.....	20
Şekil 1.11	Temas bölgelerinin yıkılması ile aşınma miktarının aniden artması.....	20
Şekil 1.12	Sürtünme malzemelerinin aşınma testinden sağlanan özgül aşınma oranları. ..	22
Şekil 1.13	Fren balata malzemesinde kullanılan farklı liflerin karşılaştırılması	31

Şekil 1.14	T/M üretiminde tozların karıştırılması için kullanılan çift konili karıştırıcı.....	42
Şekil 1.15	Tek yönlü preslemede numune kesitinde görülen yoğunluk dağılımı	43
Şekil 1.16	Üç değişkenli tasarımlarda kullanılan bazı tasarım noktaları.....	48
Şekil 1.17	Örnek bir deney tasarım verilerine göre ikinci dereceden denklem sonucu.....	50
Şekil 1.18	Özel bir bölgenin incelenmesinde oluşturulan küçültülmüş model.....	50
Şekil 2.1	Çalışmada takip edilen adımları gösteren akış şeması.....	52
Şekil 2.2	Fren balata kompozisyonunu oluşturan bileşenlerin fotoğrafik ve mikroskopik resimleri.....	56
Şekil 2.3	Fren balata kompozisyonunu oluşturan toz malzemelerin elek analizleri sonuçları.....	57
Şekil 2.4	Sıcak kalıplamada kullanılan a) alt kalıp teknik resmi ve b) oluşan balatanın fotoğrafik görüntüsü.....	60
Şekil 2.5	Siterleme sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	60
Şekil 2.6	Aşınma testlerinin gerçekleştiği aşınma cihazının a) testin gerçekleştirildiği kısım ve b) kontrol paneli.....	62
Şekil 2.7	Chase sürtünme-aşınma test cihazının şematik resmi.....	62
Şekil 2.8	Kompozisyon oranlarının optimizasyonu için oluşturulan programın algoritması.....	65
Şekil 3.1	Seçilen yapısal malzeme oranlarının üçgen modeldeki yerleri.....	67
Şekil 3.2	Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının balata kompozisyonuna göre değişimi.....	69
Şekil 3.3	Yapısallar için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	70
Şekil 3.4	Yapısallar için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	70
Şekil 3.5	Yapısallar için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.....	71
Şekil 3.6	Yapısallar için kompozisyon türüne bağlı maliyet değişimi.....	72
Şekil 3.7	Yapısalların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen sıcak sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.....	72

Şekil 3.8	Yapısalların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.....	73
Şekil 3.9	Yapısalların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen aşınma oranının malzeme oranlarına göre değişimi.....	74
Şekil 3.10	Yapısalların optimizasyonunda malzeme oranlarına göre \$/kg cinsinden maliyet değişimi.....	74
Şekil 3.11	Yapısalların optimizasyonunda elde edilen optimum bölge.....	75
Şekil 3.12	Seçilen yağlayıcı malzeme oranlarının üçgen modeldeki yerleri.....	77
Şekil 3.13	Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının balata kompozisyonuna göre değişimi.....	79
Şekil 3.14	Yağlayıcılar için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	80
Şekil 3.15	Yağlayıcılar için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	80
Şekil 3.16	Yağlayıcılar için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.....	81
Şekil 3.17	Yağlayıcılar için kompozisyon türüne bağlı maliyet değişimi.....	81
Şekil 3.18	Yağlayıcıların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen sıcak sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.....	82
Şekil 3.19	Yağlayıcıların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.....	83
Şekil 3.20	Yağlayıcıların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen aşınma oranının malzeme oranlarına göre değişimi.....	83
Şekil 3.21	Yağlayıcıların optimizasyonunda malzeme oranlarına göre \$/kg cinsinden maliyet değişimi.....	84
Şekil 3.22	Yağlayıcıların optimizasyonunda elde edilen optimum bölge.....	85
Şekil 3.23	Optimum yapısal olarak tespit edilen balatanın a) aşınmamış ve b) aşınmış yüzey yapısı.....	88
Şekil 3.24	Seçilen abrasive malzeme oranlarının üçgen modeldeki yerleri.....	89
Şekil 3.25	Abrasivler için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	90
Şekil 3.26	Abrasivler için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	90
Şekil 3.27	Abrasivler için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.....	91

Şekil 3.28	Abrasivler için kompozisyon türüne bağlı balata maliyeti değişimi.....	92
Şekil 3.29	Abrasivlerin optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen sıcak sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.....	92
Şekil 3.30	Abrasivlerin optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.....	93
Şekil 3.31	Abrasivlerin optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen aşınma oranının malzeme oranlarına göre değişimi.....	93
Şekil 3.32	Abrasivlerin optimizasyonunda malzeme oranlarına göre \$/kg cinsinden maliyet değişimi.....	94
Şekil 3.33	Abrasivlerin optimizasyonunda elde edilen optimum bölge ve optimum nokta.....	95
Şekil 3.34	SEM ile çekilmiş aşınmamış yüzey görüntüleri (a) optimum yapısal, (b) optimum yağlayıcı ve (c) optimum abrasive.....	99
Şekil 3.35	SEM ile çekilmiş optimum yapısal balatanın aşınmış yüzey görüntüleri (a) SE modunda 50x, (b) SE modunda 200x, (c) QBSD modunda 50x.....	100
Şekil 3.36	SEM ile çekilmiş optimum yağlayıcı balatanın aşınmış yüzey görüntüleri (a) QBSD modunda 50x, (b) QBSD modunda 200x.....	101
Şekil 3.37	SEM ile çekilmiş optimum abrasive balatanın aşınmış yüzey görüntüleri (a) QBSD modunda 50x, (b) QBSD modunda 200x.....	103
Şekil 3.38	Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının kalıplama süresine göre değişimi.....	105
Şekil 3.39	Farklı kalıplama süreleri için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	106
Şekil 3.40	Farklı kalıplama süreleri için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	107
Şekil 3.41	Farklı kalıplama süreleri için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.....	107
Şekil 3.42	Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının kalıplama sıcaklığına göre değişimi.....	109
Şekil 3.43	Farklı kalıplama süreleri için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	110
Şekil 3.44	Farklı kalıplama sıcaklıkları için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	111

Şekil 3.45	Farklı kalıplama sıcaklıkları için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.....	111
Şekil 3.46	Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının kalıplama basıncına göre değişimi.....	113
Şekil 3.47	Farklı kalıplama basınçları için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi...113	
Şekil 3.48	Farklı kalıplama basınçları için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	114
Şekil 3.49	Farklı kalıplama basınçları için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.....	115
Şekil 3.50	Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının sinterleme süresine göre değişimi.....	116
Şekil 3.51	Farklı sinterleme süreleri için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi....	117
Şekil 3.52	Farklı sinterleme süreleri için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	117
Şekil 3.53	Farklı sinterleme süreleri için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.....	118
Şekil 3.54	Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının sinterleme sıcaklığına göre değişimi.....	120
Şekil 3.55	Farklı sinterleme sıcaklıkları için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	120
Şekil 3.56	Farklı sinterleme sıcaklıkları için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	121
Şekil 3.57	Farklı sinterleme sıcaklıkları için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.....	122
Şekil 3.58	Optimum ve kullanımdaki bir balatanın sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.....	123
Şekil 3.59	Optimum ve kullanımdaki bir balatanın çalışma sıcaklığına bağlı sürtünme katsayıları değişimlerinin karşılaştırılması.....	123
Şekil 3.60	Optimum ve kullanımdaki bir balatanın frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayıları değişimlerinin karşılaştırılması.....	124
Şekil 3.61	Optimum ve kullanımdaki bir balatanın aşınma oranlarının karşılaştırılması..	124

SİMGELER DİZİNİ

x_i	- Karışımı oluşturan komponent
q	- Komponent sayısı
m	- Deney sayısı
η	- Regression fonksiyonu
β	- Deney sonucunda ölçülen değer
L_i	- Küçültme oranı
w	- Özgül aşınma oranı (cm^3/Nm)
R	- Dönen disk merkezi ile numune merkezi arasındaki uzaklık (m)
A	- Numunenin disk ile temas eden yüzey alanı (m^2)
n	- Diskin dakikadaki devir sayısı (d/d)
m_1	- Numunenin test öncesindeki ortalama ağırlığı (gr)
m_2	- Numunenin test sonrasındaki ortalama ağırlığı (gr)
ρ	- Balatanın yoğunluğu (g/cm^3)
f_m	- Ortalama sürtünme kuvveti (N)
μ	- Balatanın ortalama sürtünme katsayısı
F	- Balata yüzeyine gelen normal kuvvet (N)
P	- Frenleme hidrolik basıncı (MPa)

GİRİŞ

Bir fren sisteminde frenleme görevini yerine getiren temel eleman çifti balata ve disklerdir. Sistemin performansı dönen diske (veya kampanaya) karşı baskı uygulayan balata ile arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Motorlu taşıtlarda sistem arıza veya yetersizliğinden dolayı meydana gelen kazaların büyük bir kısmı fren sistemlerinden ve dolayısıyla güvenlik sınırları dışındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Fren sistemi farklı çalışma şartlarında (buzlu, ıslak veya kuru yollarda, boş veya tamamen dolu bir taşıtta, düz veya dönemeçli yollarda, yeni veya eski sürtünme elemanlarının kullanımında, ıslak veya kuru frenlerde, deneyimli veya yeni sürücü sürüşünde) güvenlik sınırlarını aşmadan görevini yerine getirmelidir. Bunun için fren sistemi içerisindeki sistemlerin birbirine uyumlu ve verimli çalışacak şekilde tasarlanmış olması gerekir.

Balata malzemeleri, disk malzemeleri ve ara yüzeydeki temas durumu hakkında yapılan bilimsel yayınların sayısı çok fazla olsa da, sistemin mikro-boyuttaki teması ve sürtünme mekanizmaları hakkındaki temel bilgiler günümüzde oldukça sınırlıdır. İki farklı malzeme ara yüzeyinde moleküler boyutta kimyasal ve mekaniksel değişimler meydana gelir ve oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu değişimler temel olarak balata malzemesinin kompozisyonu ve mikroyapısı tarafından kontrol edilmektedir. Bu bakımdan sürtünme malzemesi içindeki her bir komponentin tek başına ve başka komponentler ile bir araya gelmesi sürtünme özellikleri üzerinde birinci derecede öneme sahiptir. Ancak deneyler yaparak bu komponentlerin hepsinin tek tek veya birlikte etkisini araştırılması zaman ve maliyet açısından oldukça sıkıntılıdır. Çünkü normal bir balata malzemesinin en az 10 farklı komponentten oluştuğu düşünülürse, balatayı oluşturan komponentlerin tek tek veya gruplar halinde oranları değiştirilerek sonuçların değerlendirilmesi için yüzlerce deney yapılması gerektiği açıkça ortaya çıkar. Bu bakımdan yeni formül tasarımlarında deneysel tasarım metodlarından faydalanmak

deney sayılarını en aza indirmekte önemli bir gereksinimdir. Özellikle günümüzde geliştirilen yeni metotlar ile gerçek (deneysel) sonuçlara oldukça yakın ve bilgisayar programlarının yardımı ile de çok kısa sürede kompozisyon oranlarının optimizasyonu sağlanabilmektedir. Ancak balata malzemesinin kompozisyonunu tek başına inceleyip optimize etmek balata malzemesi optimizasyonu için yeterli değildir. Kompozisyonu oluşturan komponentlerin cinsi ve oranı ne kadar uygun seçilmiş olursa olsun doğru üretim parametreleri ile üretilmediği sürece balata malzemesi istenen frenleme performansını sağlayamaz. Bu bakımdan balata malzemesinin kompozisyonu ve üretimi bir bütün olarak incelenmeli ve optimize edilen kompozisyona en uygun üretim parametreleri tespit edilmelidir.

Bu bakımdan bu çalışmada balata malzemesinin kompozisyonu ve üretimi birlikte incelenmiş, optimize edilen balata kompozisyonuna en uygun üretim parametreleri araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında binek taşıların diskli fren sistemlerinde kullanılan balata malzemeleri ile ilgili literatürde yapılan araştırmalar incelenmiştir. Bu araştırmalara göre öncelikle insan sağlığına ve çevreye zarar vermeyen, kararlı sürtünme katsayısı üreten, yüksek aşınma dirençli ve minimum maliyetli balata malzemeleri hakkında bilgi edinilmiş ve uygun olanları deneylerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu çalışmada balata malzemesinde frenleme performansı üzerinde büyük etkisi bulunan yapıtaşlar, yağlayıcılar ve abrasiv malzeme grupları incelenmiştir. Çoğunlukla seramik (Zirkon, Fe₂O₃ Wollastonite), bakır ve organik (Aramid lifler, Fenolik reçine, Cashew tozu) esaslı malzemeler tercih edilmiştir. Seçilen malzemelerden oluşturulan kompozisyonun oranlarının optimizasyonunda deney sayısını azaltarak en doğru sonucu elde etmek amacıyla 'Simplex Lattice Design' deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Her bir grupta yer alan malzeme oranları deneysel tasarım yöntemi çerçevesinde belirlenmiş oranlarda balata malzemesi içerisine katılarak sabit koşullar altında üretilip test edilmiştir. Test sonuçlarının analizini kolaylaştırmak amacıyla "Matlab"ta yazılan bilgisayar programı kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen üçlü karışım diyagramları kullanılarak malzeme oranlarının balata performansı ve maliyet üzerindeki etkisi açıkça görülmüş ve optimum aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve maliyet değerlerini veren kompozisyon oranı tespit edilmiştir.

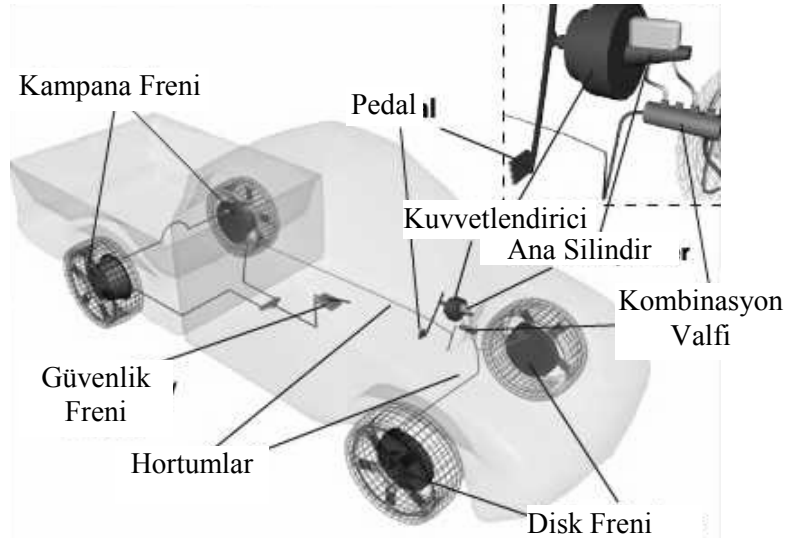
Çalışmanın ikinci aşamasında üretim parametrelerinin balata performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gerekli testler ve analizler çalışmanın ilk aşamasında optimum balata kompozisyonu olarak tespit edilen malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı değerlerde seçilen sırasıyla kalıplama süresi, basıncı ve sıcaklığı ile sinterleme süresi ve sıcaklığı gibi üretim parametrelerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Test edilen üretim parametresini değiştirerek ve diğer geri kalan üretim parametrelerini ve koşullarını sabit tutmak suretiyle her bir parametrenin etkisi incelenmiştir. Üretim parametrelerinin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırılarak en uygun parametreler tespit edilmiştir.

Çalışmada üretilen bütün balata malzemelerinin sürtünme-aşınma testleri Chase sürtünme cihazında gerçekleştirilmiştir. Balata kompozisyonunda yer alan toz halindeki malzemelerin fotoğrafları optik mikroskop ile çekilmiştir. Balata yüzeyinin mikro yapısı ise elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Bunun yanı sıra balata malzemelerinin yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi fiziksel özellikleri ölçülerek tribolojik performansa etkisi irdelenmiştir. Çalışmada sabit üretim parametrelerine sahip toplam 23 farklı kompozisyon ve tek bir kompozisyon için 20 farklı üretim parametresi test edilmiştir. Testler sonucunda optimum kompozisyon oranına ve bu kompozisyona en uygun üretim parametrelerine sahip balata malzemesi günümüz otomobillerinde kullanılan ve piyasadaki rakipleri ile karşılaştırıldığında en yüksek performansı sergileyen orijinal bir balata malzemesi ile sürtünme performansı açısından karşılaştırılmıştır.

Özet olarak, bu tez çalışması sonucunda, binek taşıtlarda kullanılan fren sistemlerine uygun çevre dostu ve sürtünme-aşınma özellikleri açısından optimum özellikler sergileyen bir kompozisyona ve ona en uygun üretim parametrelerine sahip balata malzemesi geliştirilmiştir.

1. KAYNAK ÖZETLERİ

Hareket eden cisimlerde bir yavaşlatma mekanizması üretmek ve temas ederek kayan iki cisim arasında meydana gelen sürtünme kuvvetlerinin kullanımı tarihte insanoğlunun ilk denemelerinin başına kadar dayanmaktadır. Bir sürtünme balatasının dönen bir tekerleğe veya diske karşı basınç uyguladığı bir mekanizma at arabaları taşımacılığındaki endüstriyel devrim (1750-1850) öncesinden başlamaktadır (Day 2000). Bir fren sisteminin ana fonksiyonu araç hızını yavaşlatmak, yokuş aşağı yollarda hızı sabit tutmak veya aracı tamamen durdurmaktır. Bunun için kinetik enerji, disk ve balata arasındaki sürtünme işi tarafından ısıya dönüştürülür. Disk ve balata arasında mikroskobik boyutta meydana gelen teması anlayabilmek için fren sisteminin çalışma prensibinin iyi bilinmesi gerekir. Günümüzde en çok kullanılan fren sistemlerinden biri olan çapraz devreli hidrolik fren sistemi Şekil 1.1’de verilmiştir ve özetle aşağıda anlatılmıştır. Bu konu ile ilgili ayrıntılı bilgi Güner (2002)’de bulunmaktadır.



Şekil 1.1. Park freni ile birlikte hidrolik bir fren sistemi (www.howstuffworks.com).

Sistemin çalışma prensibi kısaca; Sürücü pedala kuvvet uyguladığında pedal kutusunda bulunan baskı çubuğu bu kuvveti vakumlu kuvvetlendiriciye iletir. Vakumlu kuvvetlendirici vakum ve içerisinde bulunan yaylar yardımıyla gelen kuvveti birkaç kat arttırarak ana silindirin birinci pistonuna etki eder. Böylece fren hortumlarındaki akışkan üzerine gelen basıncı çapraz olarak ön-sağ ve arka-sol teker pistonuna iletir. Ana silindirde, birinci pistondan sonra gelen ikinci piston birinci bölmedeki basıncın etkisiyle ön-sol ve arka-sağ teker pistonlarına gelen basıncı iletir. Devrede bulunan kombinasyon valfi, arka basınç sınır değerleri aştığında devreye girer ve basıncı belirli miktarlarda düşürür. Ön ve arka teker silindirlerinde oluşan basınç nedeniyle disk-balata veya kampana-balata arasında temas meydana gelir ve teker dönme yönünün tersinde sürtünme momentleri oluşur. Sürtünme momentleri taşıtın hızını belirli ivmelerle azalarak durmasını (veya yavaşlamasını) sağlar.

Özetle çalışma prensibi anlatılan hidrolik bir fren sisteminde görüldüğü gibi fren sistemini oluşturan tüm elemanlar balata-disk ara yüzeyinde teması (veya sürtünme) gerçekleştirebilmek için geliştirilmiştir. Bu bakımdan sürtünme malzemesi olarak kullanılan balata malzemesinin seçimi ve üretimi, disk malzemesinin seçimi ve üretimi, aşınma, gürültü ve vibrasyon oluşumu gibi frenleme performansı açısından büyük önem taşıyan konularda yoğun olarak bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Bunun dışında kayma hızı, basınç ve rotor yapısının tribolojik temasa etkisi incelenmiştir.

1.1. Disk-Balata Ara Yüzeyindeki Tribolojik Temasın Yapısı

Dökme demir bir fren diski ile organik veya yarı-metalik bir fren balatası arasındaki temasın durumu bu malzeme kombinasyonları için özeldir ve diğer birçok tribolojik temastan farklıdır. Bu sistemdeki kuru temas çoğunlukla yüksek hız, yüksek temas basıncı ve balata malzemesinin etkisiyle çok çeşitli ve karmaşıktır. Özellikle kayma esnasında iki sürtünme yüzeyi arasında meydana gelen sürtünme tabakasının tribolojik temasın yapısı üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Balata ve disk arasında meydana gelen tribolojik temasın yapısı sürtünme, aşınma, gürültü ve vibrasyon gibi hem çalışma hem de konfor açısından büyük öneme sahip faktörlerin belirlenmesinde temel etmendir. Bu yüzden balata-disk temasını sağlayan gerçek temas alanları, temas

bölgeleri, mikro ve makro boyutta şekil adaptasyonu, termal deformasyon ve yüzey özelliklerinin değişimi gibi sürtünme momentinin oluşumunda ve değişiminde etkin kavramların açıklanması ve iyi bir şekilde anlaşılması gerekir.

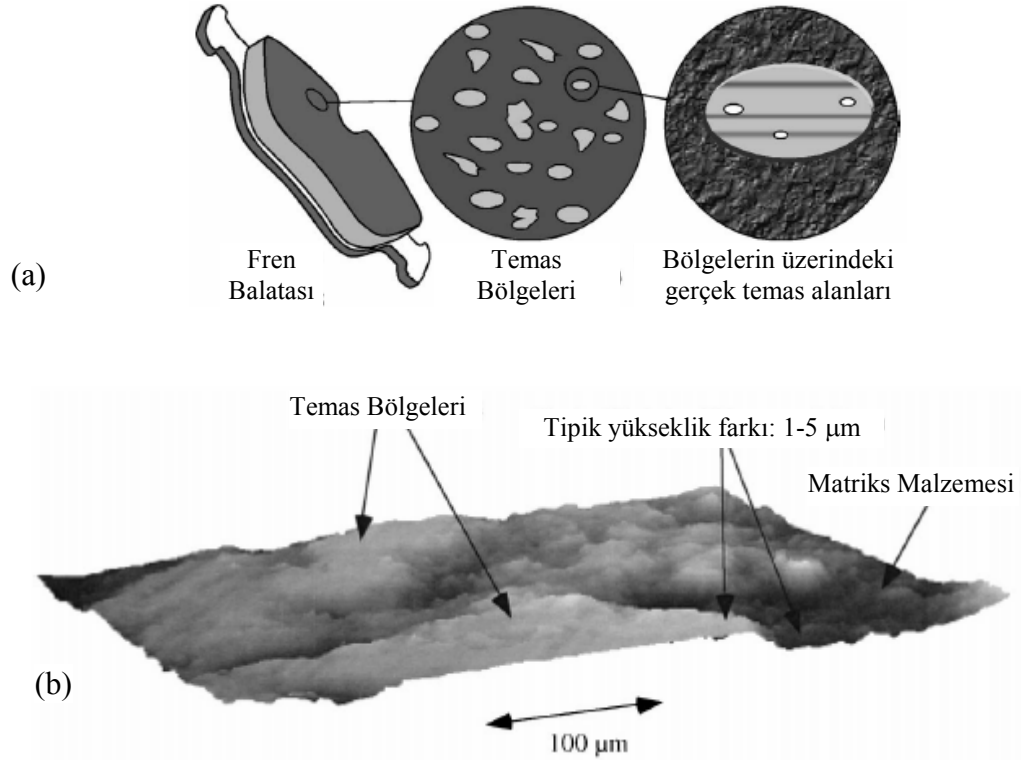
Balata malzemesi çok farklı özellik ve türdeki bileşenlerden oluşmuş kompozit bir malzemedir. İçerisinde düşük bir sertliğe sahip reçine ve katı yağlayıcıların yanı sıra, çok yüksek sertliklere sahip abrasive partiküller ve lifler de yer almaktadır. Bu bileşenlerin aşınma dirençleri de birbirine göre çok büyük farklılıklar sergiler. Malzeme özelliklerindeki bu değişkenlik karmaşık bir temas durumuna yol açar ve homojen olmayan aşınma ve yoğunluk dağılımı meydana gelir. Bu sebeple böyle bir malzemenin yüzeyinde pürüzler arasında büyük oranda yükseklik farkı görülür. Bu bölgeleri Eriksson temas platoları, Bettge temas paketleri ve Österle temas bölgeleri olarak ifade ederken, bu tez çalışması içerisinde temas bölgeleri deyimini kullanılmıştır. (Eriksson ve Jacobson 2000).

1.1.1. Gerçek temas alanları ve temas bölgeleri

Bütün kuru kayma sistemlerinde olduğu gibi, sürtünme kuvveti gerçek temas alanı aracılığı ile iletilmektedir. Gerçek temas alanlarının yerleşimi ve boyutu aşınma ve deformasyona bağlı olarak ve karşı yüzey (disk gibi) sebebiyle düzensiz bir değişim gösterir (Şekil 1.2).

Gerçek temas alanları temas bölgelerinin sınırları içerisinde toplanmıştır ve aşınma, deformasyon ve disk yüzeyindeki pürüzler sebebiyle sürekli değişim gösterirken, bu bölgeler izafi olarak uzun ömürlüdür (Eriksson ve ark. 2002). Yüzey üzerindeki alçak bölgeler meydana gelen temasın dışındadır. Disk yüzeyindeki temas bölgeleri ise balatadakilere göre hem yüksekliği hem de alanı çok küçük olduğu için önemli değildir. Buna karşın, frenlerde tribolojik temasın yapısını tanımlayan gerçek temas alanları balata yüzeyinde oldukça geniş yer tutmaktadır (toplam balata alanının %20'sini işgal etmektedir) (Eriksson ve ark. 1999). Temas bölgeleri sisteme giren gücün büyük bir kısmının sürtünme gücüne dönüşmesine neden olur. Genelde 50-500 µm genişliğinde ve çevresinden birkaç mikron yüksekliğindedir. Yapılan ölçümler temas bölgelerinin çoğunlukla sertlik değerlerinin balata kompozisyonunun sertliğine göre daha yüksek

olduğunu göstermiştir (örneğin 3000 MPa'ya karşılık 200 MPa) (Eriksson ve ark. 1999). Bölgelerin toplam sayısı 105 civarındadır ve boyutları ısı ve aşınmaya bağlı olarak değişir (Eriksson ve ark. 2002).

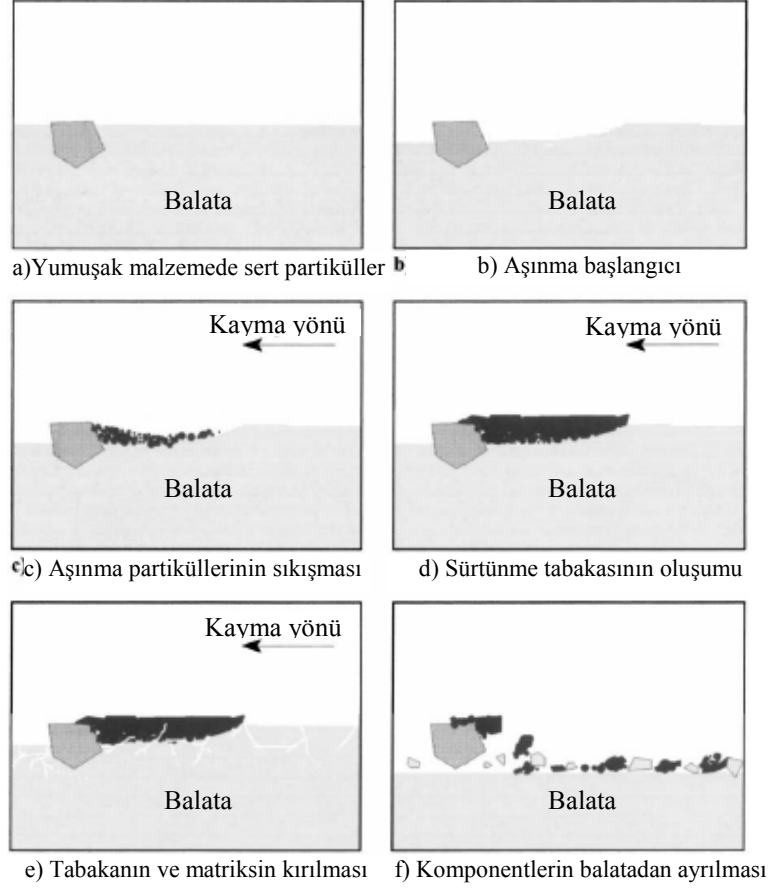


Şekil 1.2. Fren balata yüzey alanının, (a) ayrılmış temas bölgelerinin ve temas bölgelerindeki gerçek temas alanlarının şematik (Eriksson ve ark. 2002), (b) temas bölgelerinin tipik topografik görünüşü (Eriksson ve ark. 1999).

Temas Bölgelerinin Oluşumu, Büyümesi ve Dağılımı

Balata bileşenleri oldukça farklı aşınma özellikleri gösterirler. Metalik lifler gibi sert partiküller izafi olarak diske karşı yüksek bir aşınma direncine sahiptir ve sürtünme esnasında kısa bir alışma devresini takiben diğer aşınma dirençli bileşenlere göre balata yüzeyinde biraz daha yüksekte kalırlar (aşınmazlar) ve temas bölgelerinin merkezini meydana getirirler. Sabit aşınma koşullarında, birçok aşınma dirençli bileşen, yükün büyük bir kısmını taşır ve bu yolla komşu malzemeleri korur (Şekil 1.3). Alçak bölgeler ise kayma temasından hiçbir iz göstermez. Bu bölgelerden malzeme kaldırılması ancak, disk ve balata arasına kaçan aşınma parçaları tarafından gerçekleştirilen mekanik bir

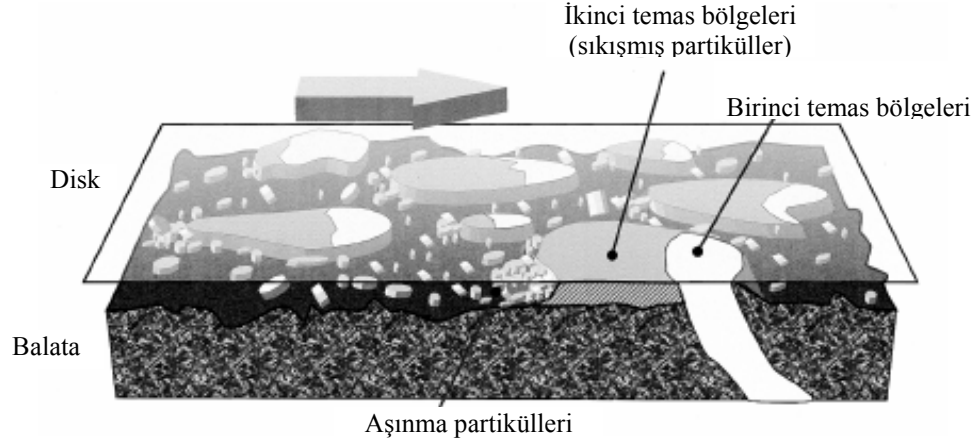
çarpışma hareketi veya organik balata bileşenlerinin mekanik bozulması ve ayrışması ile gerçekleşir (Eriksson ve ark.1999).



Şekil 1.3. Bir balatanın yüzeyindeki bir mikro temasın oluşumu, gelişimi ve dağılması (Österle ve ark. 2001).

Balata ve dönen bir cam diskin temas durumu, yüksek büyütme özelliğine sahip bir video ile Eriksson ve Jacobson (2000) tarafından incelenmiştir (Şekil 1.4). Sert partiküller sebebiyle, disk-balata arayüzeyinde labirent şeklinde bir kanal meydana gelmiştir. Hareket eden disk ile birlikte küçük partiküller halindeki aşınma kalıntıları bu labirent içerisinde sürekli bir harekete sahiptir. Sert partiküllerin etrafında aşınmış partiküllerin birikmesi ve sıkışması ile temas bölgeleri büyür. Böylece kanallardaki geçişler bloke edilir ve aşınma partiküllerinin ara yüzeyde birikmesiyle sürtünme tabakası (transfer filmi) denilen koruyucu bir tabaka meydana gelir. Basınç, kesme kuvvetleri ve sürtünme ısı etkisiyle aşınma partikülleri bir araya sıkışır ve temas

bölgeleri büyür. Aşınma partiküllerinin temas bölgesine yapışma eğilimi sıcaklığa, rutubete ve normal ve/veya kesme basınçlarının yayılma durumuna bağlıdır.



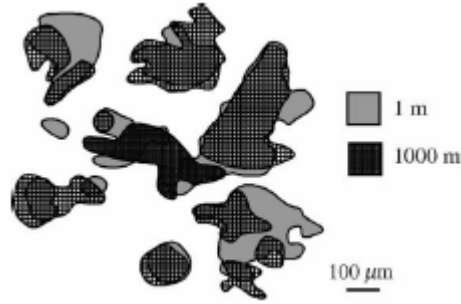
Şekil 1.4. Bir fren diski ve organik fren balatası arasındaki temas durumunun şematik gösterimi. (Eriksson ve Jacobson 2000)

Filip ve ark.'na (2002) göre oluşan sürtünme tabakasının kalınlığı sıcaklığa göre değişmektedir. Buna göre yaklaşık 200°C civarında sürtünme tabakasının kalınlığı 0-2.5 µm arasında iken, 700°C'de 0-5 µm'dir. Bunun sebebi, yüksek sıcaklıklarda aşınma oranının ve dolayısıyla aşınma partiküllerinin daha fazla olmasıdır. Böylece temas bölgelerine sıkışarak birleşen aşınma partikülleri artar ve sürtünme tabakası düşük sıcaklıklara göre daha kalın olur. Sürtünme tabakasının kalınlığının artması disk-balata temasını azalttığından sürtünmeyi ve dolayısıyla aşınma oranını azaltır.

Eriksson ve ark.'nın (1999, 2000, 2002) yaptıkları çalışmalar ile temas bölgelerinin boyutlarının basınca bağlı olarak değiştiğini göstermişlerdir. Yumuşak fren uygulamaları esnasında temas bölgeleri 50-500 µm çapında ve nominal balata alanının %10-20'sini kapsar. Yüksek sıcaklıklarda ve yüksek fren basınçlarında temas bölgelerinin boyutları milimetre boyutlarına kadar ulaşabilir ve balatanın büyük bir kısmını kapsayabilir. Bu büyüme iki mekanizma sebebiyle olabilmektedir. Bunlardan birincisi artan yük ile disk-balata arası boşluğun azalmasıdır. Labirenti oluşturan kanal duvarlarının yüksekliği azaldığında, duvarlara yapışan aşınma partiküllerinin sayısı artar ve temas bölgeleri daha hızlı büyür. İkinci mekanizmada ise artan sıcaklık ve buna sebep olan yüksek basınç ile birlikte aşınma partiküllerinin sinterlenmesi için çok

eğilimli hale gelmesidir. Yük azaldığında ise parçalanma mekanizması baş gösterir ve temas bölgelerinin boyutları azalır.

Temas bölgeleri, parçalanma ve sert aşınma partikülleri sebebiyle küçülebilir. Temas bölgesi, koruyucu lif veya partiküller (sert bileşenler) aşınıp atıldıktan sonra parçalanır. Kayma esnasında frenleme basıncının azaldığı her an sıkıştırılan alanlardan büyük parçalar pullar halinde kopar. Bununla birlikte, temas bölgeleri izafi olarak uzun bir ömür sergilemektedirler. Temas bölgeleri disk yüzeyindeki pürüzler ve pislikler tarafından da küçülebilir. Bu parçalanma bir anlıktır ve temas bölgeleri dönen disk yüzeyindeki bir hata (pürüz) ile çarpıştığında bir anda parçalanır. Balatanın belirli bir alanına tekrarlanan bir inceleme yapıldığı zaman, şekil ve boyutunda değişimler gözlenmiştir (Şekil 1.5.).



Şekil 1.5. Bir balatanın aynı yerinde bulunan temas bölgelerinin ana hatları, 1 ve 1000 m²'lik kayma durumunun sonucu bir ışık optik mikroskopunda incelenmiştir (Eriksson ve ark. 1999).

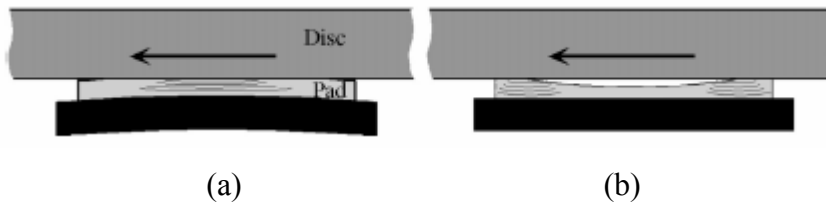
1.1.2. Mikro ve makro boyutta şekil adaptasyonu

Kararlı koşullar altında disk-balata arasındaki uyum mükemmeldir ve tüm temas bölgeleri eş çalışan parçaya temas eder. Balata üzerindeki bir temas bölgesinde yük arttığı zaman gerçek temas alanları plastik deformasyon ve aşınma sebebiyle yassılaştır. Disk ise balatadaki sert komponentler tarafından sürekli aşınır. Aşınma sonucunda parlak ve çok pürüzsüz hale gelir. Frenleme basıncındaki düzensizlikler ise temas alanının azalmasına ve eş çalışan parçalarda uyumsuz yüzey oluşumuna sebep olur.

Bettge ve Starcevic'in (2003) buldukları sonuçlara göre temas bölgelerinin çoğu balatada buldukları konuma göre yükseklik farkı meydana getirirler. Buna göre dönme esnasında önde olanlar arkadakilere göre daha yüksektir. Temas bölgelerinin bu eğilimleri için iki farklı açıklama yapılmıştır. Bunlardan birincisi, bazı temas bölgeleri ömür sürelerini daha önce doldurmuş ve balata yüzeyinde daha önce küçülmeye başlamış olabilirler. İkincisi de, kayma yönüne göre balatanın başlangıç kısmında yer alan temas bölgelerinin temassızlık sebebiyle daha yüksek kalmalarıdır. Bu yüzden balatanın son kısmında daha fazla sürtünme gücü oluşur ve sıcaklık bu bölgede daha yüksek değerlere ulaşır.

1.1.3. Termal deformasyon ve yüzey özelliklerinin değişmesi

Frenlerdeki sürtünme, disk ve balata malzemesindeki kristal düzlem bağlarının kırılmasına neden olur. Bu bağların kırılması ile yüksek derecelerde sürtünme ısıtı meydana gelir. Disk balataya göre daha sert olduğundan öncelikle balata malzemesindeki kristal bağları kırılır. Oluşan ısıdan hem balata malzemesi hem de disk malzemesi olumsuz olarak etkilenir ve balatada özellikle aşınma olayı sıcaklığın etkisiyle hız kazanır. Bunlardan başka, oluşan yüksek sıcaklıkların etkisiyle, balata yüzeyi, iç kısımlardan ve arka tabladan daha sıcak olur. Bu da balatada dış bükey olarak eğilmesine ve düzgün olmayan basınç dağılımına sebep olur (Şekil 1.6.). Basıncıdaki bu değişim homojen olmayan aşınmaya ve balatanın merkezinde et kalınlığında azalma meydana getirir.



Şekil 1.6. Balatanın ve arka tablanın (a) ısındığı zaman dış bükey eğilmesi, (b) sıcaklık düştüğünde eğik durumdaki balatada homojen olmayan aşınma (Eriksson ve ark.1999).

Tekrar düşük sıcaklıklara dönüldüğünde arka tabla düzelir, fakat eğik durumdaki balata yüzeyinde aşınma ve basınç dağılımı düzgün olmaz. Benzer durum balata ile eş çalışan diskte de meydana gelir. Termal kararsızlık lokal alanlarda yüksek sıcaklıklara

neden olur ve disk kayma yönü boyunca bükülebilir. Bununla birlikte disk ve balata frenleme esnasında ısındığı zaman yüzeylerindeki kimyasal reaksiyonlar, mekanik özellikler (termal yumuşama vb.), balata yapısı (polimer bileşenlerin yanması vb.), her iki yüzeye aşınma partiküllerinin bulaşma ve yapışma eğilimi vb. de etkiler.

1.2. Fren Sistemlerinde Sürtünme ve Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler

Frenlerde olduğu gibi, sürtünmeyi maksimum düzeye çıkarmak için yapılan çalışmaların yanında, sürtünmeyi minimum düzeye indirmek yada tercihen tamamen yok etmek için yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak her iki teknik sistemde de sürtünme ve aşınma olayları cereyan ettiğinden tribosistem olarak adlandırılırlar. Bir tribolojik sistem aşağıda sıralanan temel unsurlardan meydana gelir (Demirci 1982):

- Temel sürtünme elemanı (esas parça)
- Karşı sürtünme elemanı (karşı parça)
- Yağlama elemanı (ara maddesi)
- Çevre

Fren sistemlerinde temel eleman, sistemin fonksiyonu açısından en fazla aşınma tehlikesi gösteren balatadır. Karşı sürtünme elemanı diskli sistemlerde disk, kampanalı sistemlerde pabuçtur. Her iki eleman arasında frenleme esnasında meydana gelen sürtünme ve aşınma sonucunda bir tribofilm (sürtünme tabakası) meydana gelir. Bu film genellikle disk yüzeyinde yağlayıcı gibi bir koruma görevine sahiptir. Balatanın abrazif etkilerine karşı diski korur ve sürtünme olayının gelişiminde çok önemli bir yere sahiptir. Frenleme esnasında çevre şartları da önemlidir. Toz, kir, su, hava koşulları gibi etkenler tribolojik teması ve dolayısıyla frenleme performansını etkiler.

Dönen bir disk ve sabit balata arasındaki temasta, mikroskobik ölçeklerde yükseklikler arasındaki farklılıklar sebebiyle pürüzlü olan yüzeylerde dönme hareketine zıt yönde bir sürtünme meydana gelir. İki yüzeyin mikroskobik düzgünsüzlükleri arasındaki etkileşim sonucunda taşıtta teker dönme hareketinin engellenmesi ve taşıtın durması sonucunu doğurur. Ancak yüzey boyunca ve bu yüzey arasındaki mesafede gerçekleşen bu etkileşimlerin değişimi sabit değildir. Bu sebeple bu gibi yüzeyler

birbirine karşı bastırıldığı zaman temasın nerede ve nasıl meydana geldiğini saptamak çok zordur. Yüzeyle arasında meydana gelen sürtünme kuvveti cisme etki eden (N) normal kuvvetinin yüzeyin (μ) sürtünme katsayısına bağı olarak doğru orantılıdır ($F = \mu.N$). Bu bağıntı 1699 yılında Amontons'un yaptığı çalışmalar ile ispatlanmıştır. Günümüzde, çok iyi parlatılmış olsalar dahi katıların her zaman bir pürüzlülüğe ($\cong 0,1$ mm) sahip oldukları bilinmektedir. Sonuçta iki katı arasında meydana gelen temas da mikroalanlarla sınırlıdır. Coulomb'a (1785) göre statik sürtünme katsayısı dinamik sürtünme katsayısına göre daha büyüktür. Coulomb (1785) ve Amontons'un (1699) geliştirdikleri bu yasalar kayan metaller için doğrudur, ancak plastiklerde artan yükte meydana gelen deformasyonlar sebebiyle sürtünme katsayısı sürekli değişir.

Yaptığım çalışmada, farklı araştırmacıların frenlerde sürtünme konusundaki çalışmalarını inceledim ve sürtünmeyi etkileyen faktörleri aşağıdaki gibi sıraladım. Buna göre bu faktörler:

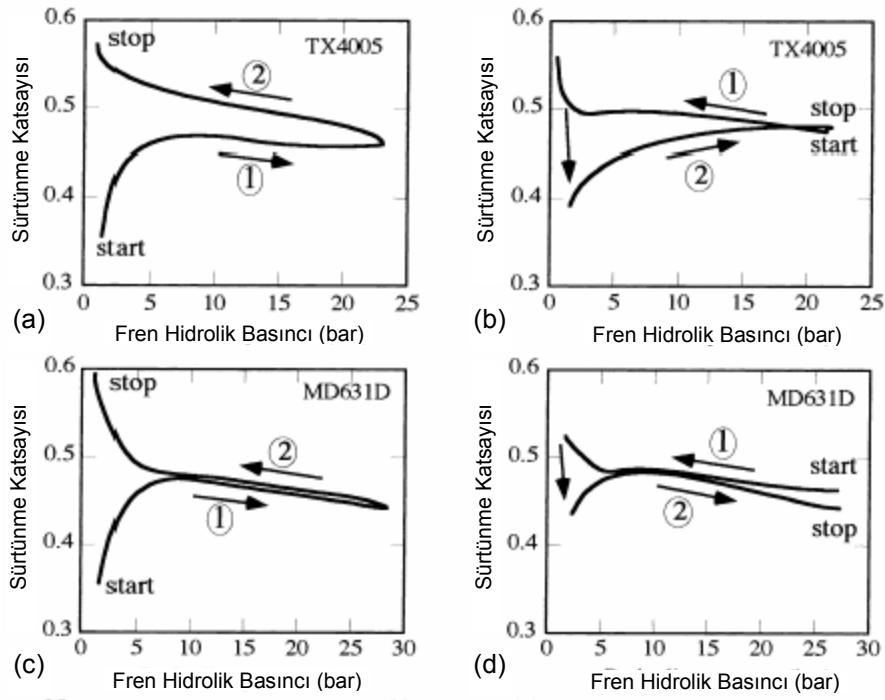
1.2.1. Kayma hızının sürtünmeye etkisi

Sürtünme malzemesinin sürtünme katsayısı genellikle kayma hızı değişimine bağı olarak değişir ve genellikle kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısı düşer. Bu konuda bir çalışma Shorowordi ve ark.(2003) tarafından farklı malzeme çiftleri ile yapılmıştır ve sürtünme katsayısının bütün malzeme çiftlerinde artan kayma hızı ile azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak disk-balata ara yüzeyinde oluşan sürtünme tabakası olduğu düşünülmüştür. Artan kayma hızıyla birlikte aşınmış partikül miktarı ve dolayısıyla sürtünme tabakasını oluşturan bileşenlerin miktarı da artmıştır. Böylece ara yüzeyde koruyucu kaplama görevi gören bu tabakanın kalınlığı artmış ve disk-balata temasını azaltmıştır. Buna bağı olarak sürtünme katsayısı da düşmüştür.

1.2.2. Basıncın sürtünmeye etkisi

Bir zemin üzerinde, aynı temas alanına sahip ağır olan bir cismi hareket ettirmek hafif bir cisme göre daha zordur. Bunun sebebi, temas yüzeylerindeki mikroskobik boyuttaki pürüzlülüklerdir. Cisim hareket ettirildiğinde, yükseklikler birbirine çarpar ve

bir kısmı birbirine kaynak olur. Daha ağır olan cisimde daha fazla yüksekliğin daha çok çarpışmasına ve basınç etkisiyle daha kolay kaynak olmasına, dolayısıyla cismin daha zor kaymasına neden olur. Frenlerde de benzer durum söz konusudur, basınç artışı ile birlikte sürtünme kuvveti de artmaktadır. Ancak frenleme esnasında basınç ve malzemenin yüzey yapısı sürekli değiştiğinden basıncın artıp azalmasına göre sürtünme katsayısı çok farklı değerler alabilmektedir.



Şekil 1.7. Basınca bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimleri. (a) ve (b) artan basınçla düşen ve azalan basınçla artan sürtünme katsayısı, (c) ve (d) farklı balata malzemelerinde benzer sonuçlar (Eriksson ve ark. 2002).

Devamlı değişen frenleme basıncını açıklayan basit bir örnek Şekil 1.7'de verilmiştir. Balata çiftlerinden biri için ortalama sürtünme katsayısı artan basınçta, azalan basınca göre daha düşüktür. Bu davranış çoğunlukla balata malzemesinin sürtünme karakteristiklerine bağlıdır. Yeni temas koşullarına kolayca adapte olan bir sürtünme malzemesi yavaş adapte olana göre daha düşük değişimler sergiler. Sürekli frenlemelerde belirli bir alışma devresinden sonra basınç artışı ile temas bölgelerinin büyümesi, aşınmış ürünlerin ve sıcaklığın artması ara yüzeydeki sürtünme tabakası kalınlığını artırır. Böylece disk-balata teması azalır ve ara yüzeydeki sürtünme katsayısı

düşüş gösterir. Basıncın düşük değerlerde tutulması durumunda ise iki yüzey arasında yeterli temas sağlanmadığından sürtünme katsayısı yine küçük olur. Ancak belirli basınç değerleri aralığında en yüksek sürtünme katsayısını elde etmek mümkündür.

1.2.3. Sıcaklığın sürtünmeye etkisi

Sürtünme işi temelde ısıya dönüşür. Bu yüzden sürtünme katsayısı normalde malzemenin adesyon ve deformasyon direncinin bir fonksiyonu olarak kayma sıcaklığı ile birlikte değişir. Fren uygulaması esnasında sıcaklık artışı ile sürtünme katsayısındaki azalma sürtünme zayıflaması (fade) olarak adlandırılır (Anderson 1992) ve yüksek sıcaklıklardaki sürtünme zayıflaması direnci sürtünme malzemeleri için kritik bir gerektir. Ara yüzeyde oluşan sıcaklığı azaltmanın yolu ise çevreye transfer edilen ısı miktarını arttırmaktır. Filip ve ark.'nın (2002) yaptıkları bir çalışmada Ek-1'de verilen fren balata malzemesine karşı gri dökme demir bir disk kullanarak sıcaklığın sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve pürüzlülük üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Frenleme esnasında disk-balata ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklığın sürtünme katsayısı ve pürüzlülük üzerindeki etkisi (Filip ve ark. 2002).

Test sıcaklığı (°C)	Sürtünme katsayısı (μ)	Pürüzlülük (Ra)
25	0.55	3.89
200	0.55	3.52
400	0.45	3.65
500	0.40	3.28
600	0.3	3.55
700	0.3	3.62

Sürtünme katsayısındaki bu düşüşün sebebi, sıcaklığın artmasıyla aşınma oranının da artmasıdır. Belirli sıcaklıkların üzerinde aşınma mekanizmaları çeşitlilik kazandığından aşınma oranı da artar. Böylece disk-balata ara yüzeyinde meydana gelen sürtünme tabakasının kalınlığı artar ve temas azaldığından sürtünme katsayısı düşer. Sıcaklığın artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının düşüşü fren balata malzemelerinin en büyük problemlerinden biridir. Toz karışımlardan oluşan fren balata malzemelerinde

yoğunluğun artmasıyla sıcaklık düşer. Porozite balata malzemesi içerisinde yalıtkan görevi görür ve sıcaklığı artırır. (Kurt ve Boz, 2004)

1.2.4. Balata yapısının sürtünmeye etkisi

Farklı malzemeler farklı tribolojik özelliklere sahiptirler. Örneğin; lastiği başka bir lastiğe sürtmek, çeliği başka bir çeliğe sürtmekten daha zordur. Malzemenin tipi sürtünme katsayısını belirler. Bunun dışında, gerilme tipine bağlı olarak da sürtünme prosesi esnasında farklı özellikler meydana gelebilmekte, yok olabilmekte veya değişebilmektedir.

Balata yapısına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi oldukça karmaşık bir kavramdır. Tüm koşullar sabit olsa dahi, testlerden elde edilen sonuçlar farklılık gösterebilmektedir. Her bir frenlemede sürtünme katsayısında artış görülmektedir. Sabit frenleme basıncına karşın sürtünme katsayısı her bir frenlemede artabilir ve frenleme sayısına bağlı olarak da belirli bir süre sonra düşebilir. Bu davranış, temas bölgelerinin oluşması, büyümesi ve sürtünme sonucunda meydana gelen sıcaklık artışı ile temas bölgelerinin dağılması (farklı aşınma mekanizmalarının meydana gelmesi) sebebiyle olabilir. Geometrik açıdan balata pozisyonundaki (veya hizasındaki) küçük sapmalar da belirli bir alışma devresi içinde sürtünme katsayısı değişiminde önemlidir.

Bu konuda yapılan araştırmalar genellikle balata içerisinde bulunan komponentlerin miktarının ya da tipinin değiştirilerek test edilmesi esasına dayanmaktadır. Balata kompozisyonunun sürtünmeye etkisi ile ilgili ayrıntılı bilgi “1.4.Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyonu” bölümünde yer almaktadır.

Balata kompozisyonu yanında balata boyutlarının da sürtünme üzerinde etkisi bulunmaktadır. Ancak bu etki oldukça düşüktür. Balata boyutlarının küçülmesi ile nominal temas alanları birbirine yakınlaşarak birleşir (Bergmann 1999). Böylece temas bölgelerinin boyutu büyür ve sayısı düşer. Yapılan bir araştırmaya göre küçük ve çok sayıda temas bölgesine sahip bir fren balatasında, büyük ve az sayıda temas bölgesine sahip olana göre gürültü oluşturma eğilimi daha fazladır (Eriksson ve ark. 1999).

1.2.5. Disk yapısının sürtünmeye etkisi

Son on yıl içinde fren rotorunun sürtünme performansını arttırmak için büyük bir çaba sarfedilmiştir. Bu amaç doğrultusunda çok farklı disk malzemeleri geliştirilmiştir. Bunların içerisinde demir içermeyen bakır alaşımları, alüminyum metal matrisli kompozitler (Shorowordi ve ark. 2003, Wycliffe 1993) ve en son geliştirilen karbon-seramik kompozitler (Gomes ve ark. 2001) bulunmaktadır. Bununla birlikte yüksek sönümleme kapasitesi, yüksek termal iletkenlik, kolay üretim ve düşük maliyet gibi etkenlerden dolayı en çok tercih edilen disk malzemesi gri dökme demirdir. Kullanılan gri dökme demir malzemesi ihtiyaçlara göre farklı karbon oranlarında ve ısıl işlem koşullarında üretilmektedir.

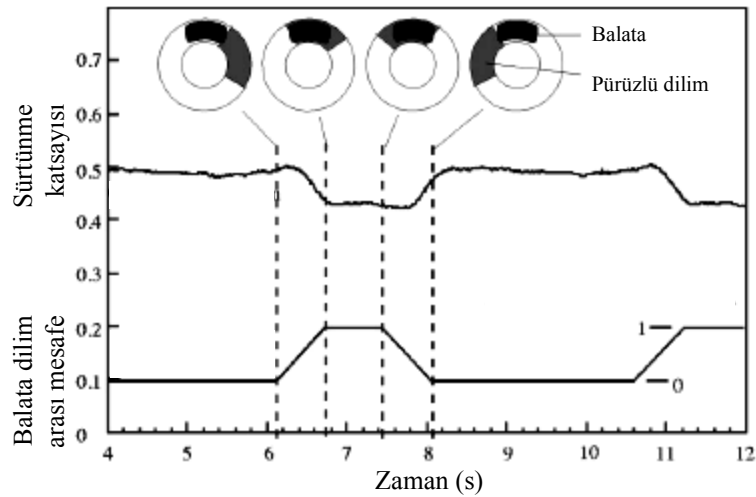
Gri dökme demir içerisinde bulunan grafit lamelleri kullanılan balata malzemesine göre sürtünme performansı üzerinde farklı etkilere sahiptir. Buna göre çelik lif içerikli balata ile karşılıklı temasta bulunan bir diskteki grafit oranı arttıkça sürtünme katsayısının arttığı, çelik içermeyen bir balata kullanıldığı takdirde grafit alanının sürtünme katsayısı üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı gözlenmiştir (Cho ve ark.'nın 2003). Gri dökme demir içinde bulunan ferritin sürtünme katsayısı üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı yapılan deneyler ile görülmüştür (Cho ve ark.'nın 2003).

Disk yapısı sadece mikroyapısal olarak değil, aynı zamanda yüzey geometrisi açısından da sürtünme katsayısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yeni bir diskin ilk çalışması esnasında sürtünme katsayısı düşüktür. Diskin yüzeyi talaşlı işleme operasyonlarından dolayı spiral izlere sahiptir. İlk frenlemelerde bu çizgiler kademeli olarak aşınır ve daha düzgün bir yüzey meydana gelir. Buna bağlı olarak sürtünme katsayısı da artar. Sürtünme katsayısında meydana gelen bu artışın sebebi birbirine temas eden yüzeylerin arasında oluşan gerçek temas alanlarının artmasıdır. Daha önce de açıklandığı gibi gerçek temas alanlarının artması ile sürtünme katsayısı da artmıştır.

Benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Bunlardan disk topografisinin gürültü oluşumuna etkisini inceleyen Bergmann (1999), pürüzlü hale getirilmiş disk yüzeyinde sürtünme katsayısının

düştüğünü tespit etmiştir. Eriksson ve ark. da 2002 yılında benzer bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler ile yapılan incelemelerde, pürüzlü yüzeyde nominal temas alanı oranının %90 azaldığı, sürtünme katsayısının da pürüzsüz duruma göre %25 daha düşük olduğu saptanmıştır.

Başka bir araştırmada diskin sadece belirli bir bölgesi partikül püskürtmek suretiyle belirli bir pürüzlülük değerine sahip olacak hale getirilmiştir (Eriksson ve ark. 1999). Bir disk-balata sistemi üzerinde yapılan testler sonucunda kayma esnasında bu bölgeden her geçişte sürtünme katsayısının düştüğü ve bu bölgeyi geçtikten sonra tekrar eski değerini aldığı gözlenmiştir (Şekil 1.8.). Buradan da anlaşıldığı üzere sürtünme katsayısı, gerçek temas alanından etkilenmektedir. Yüzeyin pürüzlü hale getirilmesi gerçek temas alanında bir düşüş sağlamıştır, böylece sürtünme katsayısı da düşmüştür.

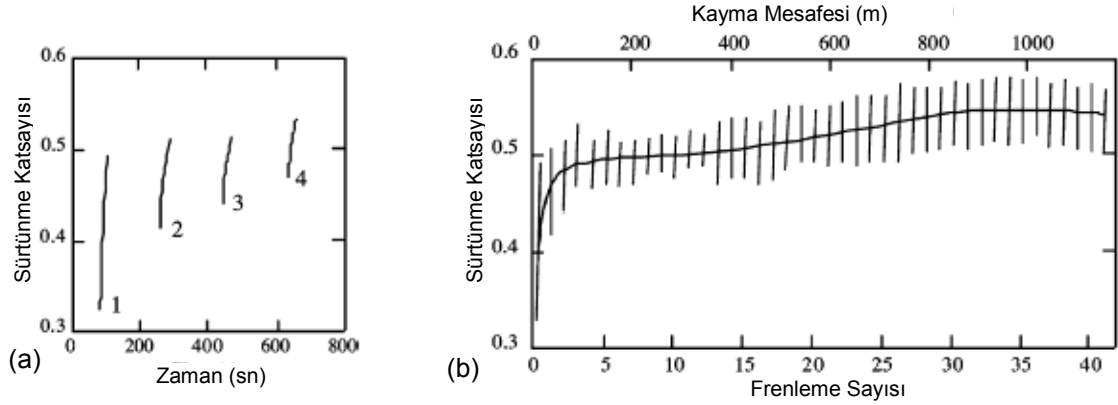


Şekil 1.8. Belirli bir bölgesi pürüzlü hale getirilmiş disk yüzeyinde sürtünme katsayısı değişimi.

1.2.6. Frenleme süre ve sayısının sürtünmeye etkisi

Sürtünme katsayısı yapılan her frenleme esnasında farklı değerler alabilmektedir. Frenlemenin başlangıç aşamasında, eş çalışan yüzeylerin zamanla birbirine uyum sağlaması ve pürüzlerin ortadan kaldırılmasıyla daha fazla temas alanına sahip olması gibi nedenlerden ötürü sürtünme katsayısı artar. Ancak basıncın sabit olmasına karşın belirli bir frenleme sayısından sonra sıcaklığın artması, temas bölgelerinin parçalanması

gibi etkenlerden dolayı sürtünme katsayısı belirli bir değerden sonra çok yavaş düşer. (Şekil 1.9.)



Şekil 1.9. Her bir frenleme 120 sn'lik dinlenme aralıklarında 20 veya 30 sn'lik bir süre için uygulanmıştır, (a) ilk dört frenleme, (b) tüm 40 frenleme (Eriksson ve ark 2002).

1.3. Fren Balata Malzemelerinde Aşınma

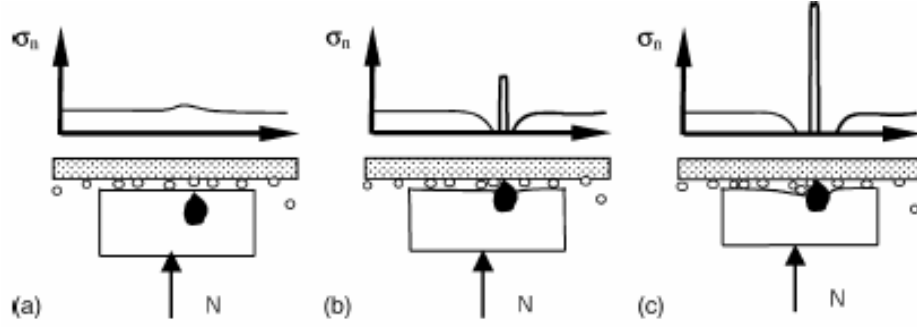
Günümüzde fren sistemlerinde en büyük sorun aşınma ve aşınma ile birlikte oluşan gürültüdür. Literatürde bu konuda çok fazla çalışma yapılmamıştır ve yapılan çalışmalar arasında da kesin sonuçlara ulaşılamamıştır. Aşınmayı karakterize eden kriterler

Demirci (1982) tarafından aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Sürtünme doğuracak bir izafi hareket söz konusudur.
- Teknik açıdan aşınma istenmeyen veya zarar verici bir olay olarak görülür.
- Yüzey bölgesinde cereyan eder ve yüzeyde şekil değişikliği (plastik deformasyon), malzeme değişikliği (sürtünme oksidasyonu gibi) veya mekanik etkilerle parçacık ayırma (aşınma tozları) şeklinde kendini gösterir.
- Aşınma prosesi yavaş ilerleyen, sürekli bir olaydır.

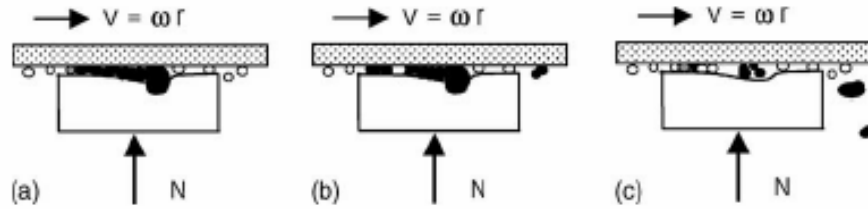
Bir fren balatası temel olarak iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan biri oldukça yumuşak bir polimer matriks, diğeri de yapı içinde gömülü olan küçük ve sert partiküllerdir. Gömülmüş olan sert partikül zamanla balata matriksinin aşınmasıyla yüzeye ulaşır ve aşınma partiküllerinin akışı bu sert bileşenden dolayı engellenir. Sert partikülün ve aşınma partiküllerinin ısı ve basınç etkisiyle birbirine yapışması sonucunda temas bölgeleri meydana gelir. Sert partikül ve disk arasındaki teğet ve

normal basınçlar artar (Şekil 1.10 (b) ve (c)). Bunun sonucunda sert partiküllerin sıcaklığı artar, alaşımın veya aşınma partiküllerinin ergimesi bile söz konusu olabilir. Sert partiküllerin üzerindeki yükün artması diskte aşınmaya neden olur ve aşınma partiküllerinin arasında metalik disk kalıntıları da yer alır (Ostermeyer 2003).



Şekil 1.10. Balata aşınması ile ortaya çıkan sert partikülün temas alanındaki normal yüke etkisi (Ostermeyer 2003).

Temas bölgesinin yapısı aşınma, ısı, gerilim ve yük sonucunda bozulur. Eğer boyutları küçük ise parçalanır, büyük ise içinde büyüyen çatlaklar meydana gelir ve bir süre sonra parçalanır (Şekil 1.11.), (Ostermeyer 2003).



Şekil 1.11. Temas bölgelerinin yıkılması ile aşınmanın aniden artması (Ostermeyer 2003).

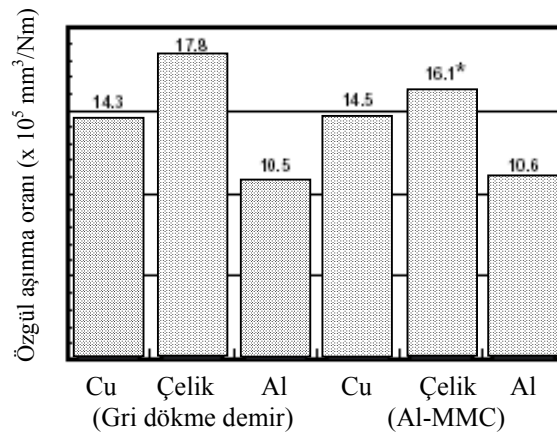
Frenlemelerde artan yük ve frenleme süresi ile birlikte sürtünme yüzeylerinde çok yüksek bir sıcaklık artışı meydana gelir. Sıcaklığın etkisiyle sürtünme malzemesinin mekanik özellikleri olumsuz etkilendiği gibi gelişen aşınma mekanizmaları ve temas konfigürasyonları da değişim gösterir. Yüksek sıcaklıklarda aşınma oranında ani bir artış meydana gelir (Filip ve ark. 2002), (Çizelge 1.3)

Çizelge 1.2. Frenleme esnasında disk-balata ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklığın aşınma oranı üzerindeki etkisi (Filip ve ark. 2002).

Test sıcaklığı (°C)	25	200	400	500	600	700
Aşınma oranı (% hacimce)	0.1	0.1	0.25	1.3	1.9	2.2

Sürtünme malzemesinin sürtünme özelliklerini kaybetmesi yaklaşık 230°C'de başlar ve 269-400°C arasında artan sıcaklık ile birlikte devam eder (Zhigao ve Xiaofei 1991). Bu sıcaklıkların üzerinde reçinenin bağlayıcılık özelliği zayıflar. Bu olay gerçekleştiği andan itibaren aşınma zamanının üstel bir fonksiyonu olarak artar, Rhee (1974), Talib ve Azhari (2000) tarafından açıklandığı gibi. Aşınma sonucunda oluşan aşınma ürünleri disk-balata ara yüzeyinde birikir ve basınç ve sıcaklığın etkisiyle sıkışarak sürtünme filmi oluşturur. Sürtünme filminin özellikleri de sürtünme çiftini oluşturan komponentlerin kayma koşullarındaki adeziv dayanımından etkilenir. Özellikle balata malzemesi içinde yer alan yapısal lifler ve katı yağlayıcılar sürtünme filmi üzerinde önemli bir role sahiptirler (Wirth ve ark., 1992 ve Kim ve ark.,2001).

Şekil 1.12'de altı farklı sürtünme çifti için özgül aşınma oranları Jang ve ark. (2003) tarafından tespit edilmiştir. Sonuçlar çelik lifli sürtünme malzemesinin hem gri dökme demir hem Al-MMC tip diskte de en büyük aşınmayı sergilediğini göstermiştir. Cu ve Al lifli sürtünme malzemelerinin özgül aşınma oranı hem gri dökme demir hem de Al-MMC disk için aynı olduğuna dikkat edilmesi gerekir. Bu, disk yüzeyindeki sürtünme filminin (veya transfer filmi) etkili bir şekilde disk ve sürtünme malzemesi arasındaki direk teması önlediğini ve aşınma oranının sürtünme malzemesi içindeki metalik lif tarafından tespit edildiğini göstermektedir (Jang ve ark. 2003).



Şekil 1.12. Sürtünme malzemelerinin aşınma testinden sağlanan özgül aşınma oranları. Aşınma testleri 100°C'lik başlangıç sic. yapılmıştır (Jang ve ark. 2003).

Oluşan aşınma partiküllerinin boyutları değişiktir ve yaklaşık 1µm (Eriksson ve ark. 2001) çapındadır. Genel olarak disk balata arasındaki boşluktan daha büyük olan

aşınma partikülleri ise teması bırakmazlar ve ara yüzeyde öğütülürler. Bu proses esnasında gözenekli matriks malzemesi de aşınır ve aşınma partikülleri oluşturur. Aşınma sonunda oluşan aşınma partiküllerinin bir kısmı disk ve balata arasında sürtünme filmini oluştururken, bir kısmı da dışarı atılır. Österle ve Urban'ın (2004) yaptığı EDX spektral analizlerde dışarıya atılan aşınma partiküllerinin çoğunlukla demir ve demiroksit içerdiği tespit edilmiştir (Çizelge 1.3).

Çizelge 1.3. Aşınma partiküllerinin oranları (ağırlıkça %) (Österle ve Urban 2004).

Element	Ağırlıkça %
Ba	0.5
Ca	1.3
Cu	7.1
Fe	41.4
Mg	1.1
S	1.0
Sb	1.2
Sn	3.4
Zn	5.3

Aşınma partiküllerinin içerisinde büyük miktarda demir oksitlerin yer alması tribooksidasyon aşınmasının sadece balatanın çelik liflerinde değil, aynı zamanda dökme demirde de meydana gelen en önemli aşınma mekanizması olduğunu ortaya koyar. Oksit tabakasının oluşumu aşınmanın azalmasına ve sürtünme katsayısının artmasına neden olur (Österle ve Urban 2004). Ancak artan sıcaklık ile birlikte oksit tabakası parçalanır ve aşınma tekrar artış gösterir.

Aşınma Mekanizmaları

Aşınma mekanizmaları tribosistem yapısı içinde, sürtünme elementleri ve özellikleriyle beraber, aşınmanın miktarı ve yönünü belirleyen en önemli unsurlardır. Fren balata malzemelerinde baş gösteren aşınma mekanizmalarının, abrasion, adhesion, tribooksidasyon, yorulma ve ablative'in çok karmaşık kombinasyonları ile meydana gelmektedir. Rhee'ye (1974) göre asbest içerikli sürtünme malzemeleri düşük sıcaklıklarda (230oC'nin altında) abrasive ve adesive aşınma mekanizmaları tarafından aşınır. Yüksek sıcaklıklarda ise ergime mekanizması ile aşınır. Diğer taraftan yarı metalik sürtünme malzemelerinin aşınması adhesive, oksidatif ve yorulma

mekanizmalarının karmaşık bir kombinasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır (Libsch ve Rhee 1977). Scieszka'ya (1980) göre frenleme esnasında önde gelen aşınma mekanizmaları abrasion, adesion ve termal aşınmadır.(Talib ve ark. 2003). Mikroyapısal testler frenleme esnasında aşağıda sıralanan beş temel aşınma mekanizmasının meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır:

Abrasiv Aşınma

Daha sert olan sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanı içerisine yüzey pürüzlülüğü mertebesinde girerek izafi hareket sırasında çizmesi ve “mikrotalaşlar” kaldırması olayıdır. Aynı etkiler karşı sürtünme elemanı yerine, daha önce elemanlardan ayrılmış aşınma partikülleri tarafından da yapılmış olabilir (Wahl 1975, Demirci 1982). Bu tip aşınma, yüzeydeki kesikler, çukurlar ve kopma prosesleriyle karakterize edilir. Cismin sert yüzeyi nerede daha pürüzlü ise aşınma miktarı orada daha yüksektir. Bu tip bir aşınma oldukça yüksek oranda aşınmaya sebep olabilir. Bununla birlikte bazı durumlarda, fren diskinden adesion ile meydana gelen malzeme transferini önlemek için abrasiv aşınmada 100-200oC arasında küçük bir artış arzu edilir (Oehl ve Paul, 1990). Disk – balata sürtünme çifti arasında meydana gelen abrasion mekanizması ikinci veya üçüncü frenlemeden sonra gözlenmez (Talib ve ark. 2003). Çünkü ilk frenleme esnasında yüksek pürüzlülüklerin birbirine çarparak kesmesi veya koparılması ile yüzeydeki yükseklik farklılıkları azalır (körelir). Abrasion mekanizmasının 100 N'dan düşük yüklerin altında meydana gelmediği gözlenmiştir (Talib ve ark. 2003). Bunun sebebi de balata yüzeyindeki sert çıkıntıları köreltmek için yeterli yüke sahip olmamasıdır. Ancak ara yüzeydeki tane sertliği iki sürtünme partnerinden birine yaklaşırsa aşınma düşük mertebeden yüksek mertebeye doğru dik bir artış alanında değişir. Pratikte bu durum daima balata malzemesinden sert dolgu malzemelerinin kaldırılması veya tribokimyasal reaksiyonlar tarafından sert aşınma partiküllerinin oluşması ile meydana gelir.

Adesiv Aşınma

En önemli aşınma komponentlerinden biri olup, sürtünme elemanlarının temas yüzeylerinde yüksek mekanik gerilimler sonucu “mikrokaynak” bölgelerin oluşması esasına dayanır (Kragelski 1971, Bowden ve Tabor 1971, Demirci 1982). Kayma esnasında balata ve disk yüzeyinden aşınan malzeme ara yüzeyde sürtünme tabakası

meydana getirir. Frenlemeye devam edilmesi durumunda da aşınma yüzeyleri sürtünme tabakası malzemesinin sıkışması, yüksek sıcaklıkların etkisiyle ergimesi, bulanması, kesilmesi ve yassılaşması sonucunda bu malzeme ile kat kat kaplanır (Talib ve ark. 2003). Frenleme prosesi ilerlemesi ile oluşan yüksek sıcaklıklar (yaklaşık 600 °C) sonucunda kayma yönünde plastik akma meydana gelir. Adesyonun derecesi artan yük ve frenleme süresi ile artış gösterir. Öncelikle adesive aşınma metal-metal çiftlerinde meydana gelir. Ancak polimer-metal çiftlerinde de meydana geldiği bilinmektedir. (Talib ve ark. 2003). Adesiv aşınma sadece sürtünme kuvvetlerinin gerektirdiği kadar oluşur. Temel olarak yüksek adesiv aşınmalar için uygun olan metalik bir parça seçiminde toplam miktar kadar metal tozları veya kullanılan liflerin kombinasyonlarına da dikkat etmek gerekir. (Oehl ve Paul, 1990)

Oksidatif Aşınma (Tribooksidasyon)

Tribooksidasyonla sürtünme çiftlerinin temas yüzeylerinde tribolojik zorlanmalar sonucu meydana gelen reaksiyonlar kastedilir. Oksijenle olan reaksiyonlarla sınırlı değildir; kükürt, klor ve fosfor gibi elementlerin sürtünme aktivasyonu ile hızlandırılan reaksiyonları da tribooksidasyon içinde incelenir (Demirci 1982). 1936 yılının başlarında sürtünme testleri çelik ve dökme demirler üzerinde yapılırken, Siebel ve Kehl düşük yük ve yavaş kayma hızında kuru sürtünmede aşınmanın çok yüksek, ağır yüklemeye ve yüksek kayma hızlarında aşınmanın oldukça düşük olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu davranış yakın geçmişteki birçok araştırma ile doğrulanmıştır. Sürtünme esnasında sürtünen yüzeylerde sıcaklığın etkisi ile oluşan oksit filmi direk metalik teması keserek ve adesyonu engelleyerek aşınmayı azaltır. Bu davranış, oksit tabakasının az veya çok yağlayıcı olarak görev aldığı tüm metallerde görülmektedir. Oksidatif aşınma öncelikle fren disk veya kampanasında yaklaşık 180°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelir. Fren diski üzerinde oksit filmi oluşumu, disk aşınmasında azalmaya ve genellikle sürtünme çiftleri arasındaki etkileşim sebebiyle balatada da aşınmanın azalmasına neden olur. Adesiv aşınmanın etkilerine karşı fren diski üzerinde oluşan oksit filminin yük kapasitesi, uygun katı yağlayıcıların eklenmesiyle önemli ölçüde iyileştirilebilir (örneğin MoS₂, Sb₂S₃, grafit gibi). Bununla birlikte fren diskinde 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda birçok yağlayıcı film adesiyona bağlı olarak bozulur. Bu durumu ortadan kaldırmak için (ağır işletme koşullarında bu durum kaçınılmazdır)

daha önce de açıklandığı gibi düşük sıcaklıklarda düşük bir abrasiv aşınma davranışı arzu edilir. (Oehl ve Paul, 1990)

Yorulma Aşınması

Yüzey bölgesinin tekrarlı tribolojik yüklenmeye maruz kalmasının bir sonucudur. Tribolojik zorlanmalar mekanik gerilimleri de beraber getirdiği için zamana veya yüzey bölgesine göre tekrarlı bir sürtünme olayı mikroçatlakların oluşmasına ve büyümesine ve sonunda aşınma partikülü olarak malzeme kopmasına yol açar. Bu özelliği ile yorulma aşınması birçok aşınma prosesine katılan bir komponenttir (Demirci 1982). Yorulma aşınması prosesinin oluşumu plastik deformasyonun meydana gelmesiyle başlar. Kaymanın ilk aşamalarında yüzeyde plastik deformasyon meydana gelir ve böylece dislokasyonlar oluşur. Dislokasyonların yığılması fren balata malzemesi içerisindeki sert partiküller ve inklüzyonlar tarafından hareketinin engellenmesiyle oluşur. Dislokasyonların yığılmasıyla yüzeyde mikroboşluklar meydana gelir (Suh 1973). Daha sonra bu boşlukların ilerlemesi veya birleşmesi ile mikroçatlaklar oluşur. Kayma ilerledikçe mikroçatlaklar kayma yönüne paralel olarak şekillenirler ve sonunda aşınma yüzeyinden kopartılırlar (Talib ve ark. 2003). Yüzey morfolojisi üzerine Talib ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada yüzeyde oluşan çatlakların sebebi dört farklı faktöre bağlı olarak meydana geldiği varsayılmıştır. Bunlar:

- Mikroboşlukların büyümesi.
- Mikroboşlukların birleşmesi.
- İkinci faz partiküllerinin birleşmesi.
- Mikroboşlukların ve ikinci faz partiküllerinin birleşmesi.

Yüzeyde oluşan mikroçatlaklar uygulanan basınç veya frenleme sayısı arttıkça büyüyerek kayma yüzeyine paralel olarak yeni mikroçatlaklar üretirler. Sonunda mikroçatlaklar büyür ve birbiriyle birleşerek daha sonraki frenlemelerde aşınma partiküllerini üretir.

Frenleme devam ettikçe meydana gelen tekrarlı plastik deformasyon sonucunda çizgisel boşluklar oluşur. Bu çizgiler ilk olarak 100-200N'luk yapılan 6 dak. frenleme esnasında görülür. Frenlemeye devam edilmesi ile bu çizgisel boşlukların büyüklüğü

artar (uygulanan yük artarsa boyutları daha da çok artar) ve mikroçatlakları meydana getirirler. Ancak uygulanan yük 200 N'ü aştığında yorulma mekanizmasına ait bir ize rastlanmadığı yapılan testler ile kanıtlanmıştır. Dolayısıyla, yorulma mekanizması uygulanan yükün 200 N veya altındaki değerlerde olduğu durumlarda görülür (Talib ve ark. 2003)

Ablativ Aşınma

Tribosublimasyon ve difüzyon sürtünme ısı ile yüzey bölgesi sıcaklığının çok yükselmesi halinde söz konusudur. Yüksek sıcaklıktaki sürtünme yüzey bölgesinden atom veya moleküllerin çevreye transferi veya karşı sürtünme elemanı içine girmesi esasına dayanan aşınma mekanizmasıdır (Demirci 1982). Ablativ aşınma 240°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kaçınılmazdır (Rhee, 1974 ve Oehl ve Paul, 1990). Polimerler veya polimer bağlı malzemeler sıcaklık artışı ile meydana gelen termal ayrışma sonucunda termal aşınmaya uğrarlar. Polimer bağlı sürtünme malzemelerinde, sürtünme balatalarında olduğu gibi, diğer aşınma tiplerinden farklı olarak ablativ aşınma çok yüksek yüzey sıcaklıklarında oluşur. Frenlerde en önemli aşınma mekanizması yüksek sıcaklık sırasında fenolik reçinenin lokal olarak azalması ile gerçekleşen, organik bağlayıcıdan dolgu partiküllerinin tabakalar halinde ayrışmasıdır.

1.4. Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyonu

Fren sistemlerinde sürtünmeyi sağlayan temel eleman fren balatasıdır. Dönen bir diske balata tarafından uygulanan basınç ile disk-balata ara yüzeyinde temas sağlanır. Diskin hızını yavaşlatmak (veya durdurmak) için kinetik enerji sürtünme işi tarafından ısıya dönüştürülmektedir. Ara yüzeyde oluşan sürtünme kuvveti sürtünme katsayısına bağlı olarak değişir. Frenlemenin en yüksek verimle yapılabilmesi için en önemli kriterlerden biri de yüksek bir sürtünme katsayısıdır. Bunun için bir fren sisteminde sürtünme katsayısını etkileyen faktörler tasarımda önemli yer tutmaktadır. Bu faktörler arasında daha önce belirtildiği gibi; kayma hızı, frenleme basıncı, sıcaklık, frenleme süresi ve sayısı, disk ve balata malzemeleri yer almaktadır. Ancak temel olarak bir fren sisteminde sürtünme ve performans balata yapısına bağlı olarak değişir. Disk

malzemesinin yüzey alanının yaklaşık %10-15'ini kaplayan balata malzemesi frenleme esnasında en yüksek verimi sağlayabilmesi için:

- Yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısına sahip olmalı,
- Aşınmaya karşı direnci yüksek olmalı,
- Disk malzemesine zarar vermemeli,
- Düşük sıkıştırılabilirliğe sahip olmalı,
- Yüksek sıcaklıklara dayanımı iyi olmalı,
- Gürültü ve vibrasyon en düşük düzeyde olmalı,
- Çevreye ve insan sağlığına zarar vermemeli,
- Kolay ve ucuz üretilebilmeli,
- Beklenen ömür süresini sağlayabilmelidir.

Bunların yanında, bir fren sisteminde balata malzemesi yeterli korozyon direncine sahip olmalıdır. Aşınma direncine ve operasyon koşullarına bağlı olarak sürtünme balataları uzun bir süre (birkaç soğuk mevsim boyunca) yerinde kalır. Yazın toza, kışın rutubet ve suya maruz kalır. Bu kötü koşullar altında frendeki mekanik elemanların fonksiyonlarını yerine getirmesi büyük ölçüde engellenmektedir. Bu gibi faktörler genellikle balata malzemesini de etkileyerek sürtünme katsayısında azalmaya ve fren sisteminin performansında düşüğe neden olur. Paslanma problemi vernik bir kaplama gibi farklı yöntemlerle baş edilebilir iken, farklı mevsim şartlarında uzun süre sabit durmaktan oluşan sürtünme yüzeyinin fren diskine yapışma problemi sadece uygun bir kompozisyon adaptasyonu ile üstesinden gelinebilir.

Fren performansı temel olarak balata malzemesinin kompozisyonu ve mikroyapısı tarafından kontrol edilmektedir. Balata malzemesini uygun kompozisyonda üreterek istenen performansa sahip frenler üretmek mümkündür. Yapılan bir araştırmaya göre Avrupalılar yüksek performansa sahip frenler tercih ederken, Amerikanlar yüksek konforu tercih etmektedirler. Bu durum balata malzemesi seçimine yansımaktadır ve Amerika'da ortalama sürtünme katsayısı 0.4 iken, Avrupa'da genellikle 0.5'i aşar.

Günümüzde balata malzemeleri asbestli ve asbestsiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Asbestli fren balataları, asbestin yüksek ve kararlı sürtünme katsayısı

yanında çok düşük aşınma oranına sahip olması balata malzemesi kullanımını son derece yaygınlaştırmıştır. Ancak frenleme esnasında oluşturduğu tozların havaya karışarak canlıların akciğerlerinde kanser oluşturması sebebiyle 25 yıldır kullanılmamaktadır.

- *Ağaç (bant yada blok tipi frenler, deri ile birlikte) balatalar:* Otomobil icat edilene kadar sürtünme mekanizmaları ve sürtünme malzemeleri konusunda çok az gelişme olmuştur. İlk otomobillerde deri sürtünme malzemeleri (balatalar) kullanılmış, 1902'de deriden daha iyi özelliklere sahip sürtünme malzemeleri üretilmeye başlanmıştır. Bu ilk balatalar zift veya zift ve kauçuk emdirilmiş pamuk dokumalardan oluşmakta, ağır kullanım şartlarında alev alıp yanmaktaydılar.

- *Metal – metal (demir pabuçlar çeliğe karşı) balatalar (1903)*

- *Asbest içerikli bakır balatalar (1908):* Yaklaşık 1980'lere kadar bütün fren balatalarının içerisinde % 40-60 civarında asbest malzemesi kullanılmıştır. Sürtünme malzemesi olarak asbest oldukça iyi özelliklere sahiptir; ucuzdur, oldukça uzun bir servis ömrüne sahiptir, rotor veya kampanaya zarar vermez ve gürültü oluşturmaz. Asbest lifleri çelik kadar yüksek bir dayanıma sahip iken çok yüksek sıcaklıklara karşı direnci de yüksektir. Asbest chysotile ve amphibole minerallerinden elde edilir ve genellikle Kanada'daki maden ocaklarından elde edilir. 1980'lerden sonra, asbestli balatalarda frenleme esnasında meydana gelen aşınma sonucunda havaya karışan asbest tozlarının insanların akciğerlerinde kanser oluşturması sebebiyle yeni balata malzemeleri üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır.

- *Metalik (Sinterlenmiş demir, bakır ve pirinç) balatalar:* Metalik balatalar uzun yıllardır ağır görev şartları altında çalışan ve otomobil yarışlarındaki taşıtlarda kullanılmışlardır. Bu balataların diğerlerine göre fade direnci en iyidir, fakat daha fazla pedal basıncına ihtiyaç duyar ve kampana ve rotor aşınması oldukça fazladır. Yüksek sıcaklıklardaki uygulamalar için çok uygun oldukları halde, soğukta oldukça yetersizdirler. (Gilles, 2005)

- *Yarı – metalik (polimer matrisli) balatalar:* Yarı metalik balatalar, önden çekiçli bazı yeni taşıtlarda orijinal ekipman olarak kullanılmaktadır. Karışımın içerisine dayanım ve sıcaklığa kaşı direnci arttıran demir tozu ve çelik yünü lifleri katılmaktadır. Yarı metalik balatalar rotor ve kampanadan ısıyı hızla absorbe etmek ve ortadan kaldırmak için idealdir. Yüksek sıcaklarda bile oldukça verimli çalışırlar ve ısı transferi balatanın servis ömrünü etkilemez. Geleneksel yarı metalik balatalar ağırlıkça %60 oranında çelik içerirler. Gürültüyü azaltmak amacıyla, özellikle Avrupa'daki taşıtlarda, % 30'dan az çelik içeren düşük metalik balataların popülaritesi artmıştır. Aşağıda yarı metalik balataların dezavantajları verilmiştir: (Gilles, 2005)

- Yarı metalik bir balata aşındığı zaman, ön tekerlerde koyu kahve renginde bir toz meydana gelir. Bu toz, balatayı oluşturan oksitlenmiş metaller ve grafitin bir kombinasyonudur.
- Gürültü yapmaya eğilimler yüksektir.
- Rotorun hızlı aşınmasına yatkındırlar.

- *Metal içermeyen (Organik) balatalar:* Bu balatalar asbest, demir ve çelik gibi içermezler, bunun yerine aramid lifleri ve cam yününden oluşurlar. NAO (Nonasbestos organic) olarak isimlendirilirler. Yarı metalik balatalara göre malzeme türü sayısı oldukça fazladır ve mühendislik araştırmaları da bu yüzden oldukça zordur. Organik balatalar genellikle düşük sıcaklıklarda alışan disk ve kampana balata malzemelerinin üretiminde kullanılır. (Gilles, 2005)

- *Seramik balatalar:* Seramik balatalar ilk olarak 1985 yılında kullanılmalarına karşın günümüzde otomobillerin neredeyse yarısında seramik balatalar orijinal ve yedek ekipman olarak yer almaktadır. Çelik yününden ziyade seramik balatalarda ısıyı kontrol etmek için seramik ve bakır lifleri kullanılır. Seramik malzemesi yarı metalik balatanın doğasında var olan gürültüyü ve vibrasyonu azaltma eğilimindedir ve frenleme esnasında aşınma sonucu oluşan tozları açık renklidir ve çelik gibi paslanmaz. Seramik balatalar yarı metaliklere göre çok daha kararlı sürtünme karakteristiklerine sahiptir. Isındıkları zaman sürtünme katsayısında ani bir düşüş meydana gelmez. Ancak üretimi ve malzemeleri pahalıdır (Gilles, 2005).

- *Karbon Lifli balatalar (CFRC-Carbon Fiber Reinforced Carbon) :* Bu balatalar

daha çok uçaklarda, polis ve yarış arabalarında kullanılır. Karbon lifli balatalar, toz yerine yüksek yoğunluklu metal lifler gömülerek kuvvetlendirilmiş bir karbon karışımından oluşan yarı metalik kompozitlerdir. Diğer balata türlerine göre çok pahalıdırlar, ancak değişen sıcaklık karşısında sürekli ve sabit sürtünme katsayısına sahiptirler. Ayrıca oldukça gürültüsüz çalışırlar ve aşınma oranı çok düşüktür.(Gilles, 2005)

Balata malzemeleri arzu edilen uygulama ve sürtünme karakteristiklerine göre çeşitlilik kazanır. Sert bir balata malzemesi daha uzun bir ömre sahip iken, gürültü oluşturmaya karşı eğilimi fazla olur. Bunun yanında, sert balataların sürtünme katsayısı düşük olduğundan durma mesafesi fazla olur. Yumuşak bir balata ise iyi bir durma mesafesi sağlamasına karşın, daha kolay aşınır ve düşük sıcaklıklarda dahi fade olayı görülür (Gilles, 2005). Şekil 1.13’de farklı liflerin özellikleri açısından karşılaştırılması verilmiştir.

FIBER SELECTION SUMMARY		SERVICE TEMP °C	FRICTION CHARACTERISTICS	COMPOSITE STRENGTH	TECHNOLOGICAL COMPATIBILITY	COST	ENVIRONMENTAL ASPECTS
FIBER GLASS	750	G	G	G	G	G	
CARBON	550	F	G	F	P	U	
CERAMIC	1,650	G	F	F	P	U	
ARAMID	500	F	G	F	F	U	
ASBESTOS	600	G	G	E	E	P	
P - POOR	F - FAIR	G - GOOD	E - EXCELLENT	U - UNKNOWN			

Şekil 1.13. Fren balata malzemesinde kullanılan farklı liflerin karşılaştırılması (Carley ve Mavrigian, 1998).

Modern bir fren balatası farklı elementlerin (tipik olarak 10-20 çeşit) bir kompozisyonudur. Ek-1’de farklı araştırmacıların tespit ettikleri balata kompozisyonlarının içerdikleri komponentlerin hacimce yüzdesi verilmiştir. Bu elementler balata malzemesi içerisinde sahip oldukları görevlere göre beş gruba ayrılmaktadır. Buna göre:

1.4.1. Yapısal malzemeler

Yapısal malzemeler öncelikle sürtünme malzemesi içindeki diğer komponentleri kuvvetlendirmek (desteklemek) için kullanılırlar. Balatada mekaniksel dayanım, sertlik, termal kararlılık, aşınma direnci ve kararlı bir sürtünme üretirler. Genellikle çelik yünü, bakır tozları, karbon, cam yünü, kaya yünü ve aramid lifler kullanılır ve çok nadiren farklı mineraller ve seramik lifler de kullanılabilir. Metal malzeme olarak bakır, çelik, demir, pirinç, bronz ve alüminyum gibi malzemeler lifler veya partiküller şeklinde sürtünme malzemesi içerisinde kullanılmaktadır.

Günümüzde, çelik lifler sürtünme malzemesi endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü çelik lifler iyi bir aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda kararlı bir sürtünme etkisi üretir. Buna karşın, çelik lifler diskte aşınma ve kalınlık değişimine neden olurlar ve frenlerde vibrasyon ve gürültüye sebebiyet verirler. Çelik liflerin bir fren rotoruna karşı olan agresivliği onların yüksek sertliği ve çelik-dökme demir arasındaki metalik adesyon sebebiyle ortaya çıkar. Bununla birlikte yapı içerisinde çelik lif oranının artmasıyla kesikli sürtünmeye olan eğilimi şiddetli bir şekilde arttırdığı gözlenmiştir (Jang ve ark. 2001). Yoğunluğu düşük komponentler ile çelik yününün birlikte kullanılması ile aşınma direncini arttırdığı gözlenmiştir. Çelik yününün disk-balata sürtünme ara yüzeyinde oluşturduğu demir içerikli sürtünme filmi sebebiyle aşınmayı azaltmada önemli bir rol oynar.(Tang ve Lu 2004)

Bakır ve bakır alaşımları sürtünme ara yüzeyinde genelde termal dağılımı iyileştirmek için eklenir. Ayrıca bakır yüksek sıcaklıklarda ara yüzeyde bakır oksit oluşturarak sürtünme katsayısını düşük tutar. Bu yüzden, bakır veya bakır alaşımları, karşıt yüzeye karşı olan agresivliğinden sakınmak ve sürtünme değişimini kontrol etmek için eklenir. Alüminyum lifler sürtünme malzemesine alüminyum metal matriksli kompozit (Al-MMC) fren rotorları kullanıldığı zaman eklenir (Jang ve ark. 2003). Bakır tozları konusunda yapılan birçok araştırmaya göre aşınma ürünü olarak havaya karıştıklarında insan sağlığına ve çevreye zararlı oldukları tespit edilmiştir.(NEWS-NOTES, 1998)

Jang ve ark. (2003) sürtünme malzemesi içindeki metalik liflerin sürtünme karakteristikleri üzerindeki etkisini belirli bir aralıktaki kayma hızı için test etmişlerdir. Disk malzemesi olarak gri dökme demir ve balata malzemesi olarak üç farklı (Cu, elik, Al lifli) lif içeren sürtünme malzemesi kullanılmıştır. Cu lifleri içeren sürtünme malzemesinde kayma hızı arttıa sürtünme katsayısı düşmüştür ve benzer durum elik lifleri içeren malzeme için de geçerlidir. Diğer taraftan, Al lifler içeren sürtünme malzemesi kayma hızı ile çok küçük bir değişim göstermiştir.

Organik yapısal malzemelerden olan aramid lifler balatanın ısı direncini ve sürtünme kararlılığını arttırır. Aramid liflerin miktarı ile ısı direnç doğru orantılı olarak artarken, sürtünme kararlılığı çok fazla değişmez. (Kim ve Jang 2000) Aramid lifler iyi bir doldurma özelliğinin yanı sıra n şekillendirme prosesi için yeterli dayanımı sağlar. Lif doğrultusunda güçlü bir kovalent bağ ve enine doğrultuda da zayıf hidrojen bağına sahip olan kristal yapısı sebebiyle yüksek derecede anizotropik özellik sergilemektedir. Aramid lif oranı yüksek olan bir balata malzemesinin sürtünme filmini oluşturan aşınma ürünlerine bakıldığında partiküllerin büyük olduğu görülür (Kim ve ark. 2001).

Düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemeler, daha iyi yalıtkanlık özellikleri sağlar. Kaya yn, yanma olayında bozulmadan kalabilen iyi bir yalıtkanlık özelliğini sahiptir. Bu bakımdan, kaya yn içinde bulunduğu malzeme kompozisyonunu ve diğer bileşenleri de yangıdan koruyabilme özelliğine sahiptir. Günümüzde kaya yn, bazı taş türlerinin eritilerek lif şekline dönüştürülmesi ile elde edilmektedir. Liflere bağlayıcı eklenerek yn haline getirilir. Bağlayıcı malzeme 250°C'nin üzerideki sıcaklıklarda özelliklerini kaybetmesine karşın, kaya yn 1000°C'ye kadar ergimeden kalabilir. Bunun yanında, iyi ses absorbe etme ve darbe seslerini etkin bir şekilde yalıtma özelliğine sahiptir. (<http://www.rockwool-marine.com/sw37847.asp>)

1.4.2. Bağlayıcılar

Bağlayıcılar, tüm bileşenleri bir arada tutmak ve termal açıdan kararlı bir matriks oluşturmak için kullanılır. Bağlayıcı malzemeleri çoğunlukla karasızdır ve yüksek

sıcaklıklara dayanıksızlığı sebebiyle sürtünme malzemesinin içinde değişimi en az tahmin edilebilen elementlerdir.

Temelde sürtünme malzemesi içerisinde bağlayıcı olarak termoset fenolik reçine bulunur ve sönümlemeyi arttırmak için lastik malzeme ile birlikte kullanılır. Ürün çeşidine göre sıvı veya katı halde bulunabilir. Sürtünme malzemelerinde genellikle novolac tipte fenolik reçineler kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı tipte olanlar en çok tercih edilenler arasındadır. Bağlayıcının ayrışma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ara yüzeyde oluşan sürtünme filminin sürekliliği sürtünme malzemesinin frenleme performansı ve aşınma direnci için oldukça önemlidir. Çünkü frenleme esnasında oluşan yüksek sıcaklıklar reçinenin yapısını bozarak ayrışmasına ve kömür haline gelerek bağlayıcılık özelliğini yitirmesine neden olur. Sürtünme kuvvetlerinde büyük düşüş meydana gelir (Kim ve ark., 2001). Bu olay frenlerde zayıflama (fade) olarak bilinir ve yüksek sıcaklıklarda frenlerin tutmamasının en başta gelen sebebidir. Bu yüzden fenolik reçinenin seçimi ve miktarı fren balata tasarımında çok önemlidir. Yüksek bir fiziksel dayanım ve sürtünme performansı için sürtünme malzemesi genellikle iki veya üç farklı bağlayıcı malzeme içermektedir.

Bir balatadaki reçine konsantrasyonunun düşük olması fiziksel özelliklerin zayıf olmasına, yüksek konsantrasyonu ise yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısının düşmesine sebep olur (Walsh ve ark. 1979, Abbasi ve ark. 2000).

1.4.3. Yağlayıcılar

Grafit ve farklı metal sülfidler (ZnS gibi) katı yağlayıcılar sürtünme katsayısını yüksek sıcaklıklarda stabilize etmek ve balata-rotor aşınma kontrolünü sağlamak için kullanılır. Katı yağlayıcılar normalde rotor yüzeyinde sürtünme filmi oluşturur (özellikle düşük sıcaklıklarda) ve bu film gürültü sönümleme performansında ve rotor aşınmasında önemli rol oynar. Bunun dışında MoS₃, Sb₂S₃ (antimon trisülfid), Cu-Sn-Sb-Zn sülfidleri, coke ve bazen de pirinç kullanılmaktadır.

Grafit, karbon elementinden oluşan bir polimorftur. Balata malzemesi içinde iyi bir yağlayıcı olması sebebiyle kullanılmaktadır. Ucuzdur ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak 700oC'nin üzerindeki sıcaklıklarda yanmaktadır. (Spurr 1972)

Fren balata malzemesini oluşturan komponentlerden Sb₂S₃ yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı görevi gören antimon oksit oluşturarak sürtünme kararlılığını artırır (Jang ve Kim 2000). Ancak son yıllarda yapılan araştırmalarda, Sb₂S₃'ün zehirli bir madde (Nicholson 1995) olduğu ve bu malzemenin kanser riski taşıdığını göstermiştir. Sb'nin frenleme esnasında bileşikten ayrılması ile bir kısmının havaya toz olarak karıştığını, bir kısmının ise oksijen ile Sb₂O₃ oluşturduğunu (Sb₂O₃ fizyolojik sıvı içerisinde çözünebilir) ve bunların insan sağlığını tehdit eden kanserojen maddeler olduğu tespit edilmiştir (Uexküll ve ark., 2005).

Coke balata malzemesi içerisinde yağlayıcı olarak görev alan ve toz karışım içerisine %5-10 civarında katıldığında sürtünme katsayısını ayarlama (kontrol etme) özelliğine sahiptir. Partikül boyutu ve malzeme içerisindeki konsantrasyonu arttıkça sürtünme katsayısını azaltma, aşınma özelliklerini iyileştirme etkisine sahiptir. Özellikle balata malzemelerinde en çok kullanılan türü petroleum coke'dır (petro-coke).

1.4.4. Abrasivler

Abrasivler, sürtünme malzemesi içinde ara yüzeyde oluşan sürtünme filmini kaldırmak ve frenleme esnasındaki sürtünme değişimini kontrol etmek için katılırlar. Abrasive partikülleri ZrSiO₄ (zirkonyum silikat), pirinç, alümina, silica ve potasyum titanat hem sürtünme katsayısını hem de disk aşınmasını artırır. Bunun dışında demir oksitleri ve diğer istenmeyen yüzey filmlerini diskten kaldırarak daha iyi aşınma yüzeyi verir. Yanmaktan koruyan katkıları arasında Sb₂O₃ ve alüminyum hidroksit bulunmaktadır.

Sürtünme malzemesinde abrasivlerin rolü sürtünme ara yüzeyindeki ısı etkisiyle oluşan sürtünme filmini kaldırmak ve frenleme esnasında sürtünme değişimini kontrol etmek bakımından oldukça önemlidir. Abrasivlerin uygunsuz seçimi genellikle frenlerde gürültü, disk kalınlığında değişim ve sarsıntı gibi problemlere yol açmaktadır.

Bu yüzden abrasivlerin seçimi çok önemlidir ve sürtünme malzemesinde belirli özellikleri sağlamak için iki veya üç farklı abrasive kullanılmaktadır.

Balata yapısı içerisinde yer alan $ZrSiO_4$, frenleme esnasında tork değişim miktarı üzerinde etkilidir. $ZrSiO_4$ miktarıyla birlikte tork değişim miktarı da artmaktadır. Tork değerinin büyük değişimler sergilemesi sürtünme tabakasının kalkmasına neden olur ve bu durum aşınma miktarını arttırdığı için istenmez. Ancak $ZrSiO_4$ miktarıyla birlikte sürtünme katsayısı belirli sıcaklık aralığında artış gösterdiğinden optimum oranda kullanılması gerekir. (Jang ve Kim 2000)

Balatada abrasiv olarak yer alan pirincin içerisindeki çinko frenleme sonrasında balata yüzeyinde ve sürtünme tabakasında yer almaz. Bunun sebebi çinkonun balata yüzeyinden diske transfer olmasıdır. Disk yüzeyi incelediğinde Zn ve O'nin homojen bir şekilde dağılmış olduğu görülmektedir. Çinko oksit yüksek sıcaklıklarda katı bir yağlayıcı olarak görev yapar (Prasad ve Zabinski 1997). Sürtünme katsayısı da bu sebeple yaklaşık 0,16-0,34 değerlerine kadar düşer. Benzer durum kalsiyum sülfatta da meydana gelir.

Potasyum titanat ($K_2O.6TiO_2$) liflerin direkt olarak sürtünme ve aşınma davranışını iyileştirdiği yapılan araştırmalarda (Halberstadt ve ark., 1977) görülmüştür. Özellikle yüksek sıcaklıklarda ($204^\circ C$ civarında) aşınmayı %40 azalttığı, sürtünmeyi de %30 arttırdığı tespit edilmiştir. Termal dayanımın (ergime sıcaklığı $1250-1310^\circ C$) yanında bağlayıcı reçine ile uyumluluğu da son on yıl içinde yapılan araştırmalarda dikkati çekmiştir. Potasyum titanat seramik poli-kristallerinden (whiskers) oluşmuştur ve izafi olarak yüksek bir modüle ve dayanıma sahiptir. Potasyum titanat oranı yüksek olan bir balata malzemesinde sürtünme filmi sürekli olduğu için sürtünme yüzeyleri de düzgün olur. Sürtünme filmini oluşturan aşınma ürünlerine bakıldığında partiküllerin küçük ve yüzeylerinin düzgün olduğu görülür (Kim ve ark. 2001).

Cashew partikülleri (Sürtüne tozu) yüksek sıcaklıklarda sürtünme dayanımını ve soğuk aşınmayı iyileştirmek için kullanılır. Jang ve ark.'nın (2001) buldukları sonuçlara göre cashew partikülleri miktarı artırılarak kesikli sürtünme azaltılabilir. Bağlayıcı

sistemin elastikiyetini arttırır ve fren gürültüsünü azaltır (Nicholson 1995). Oluşan ısıyı absorbe etme özelliğine sahip olduğu için frenleme performansını arttırır.

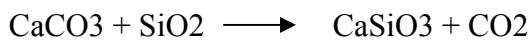
Demir oksit (Fe₂O₃) literatürde hematite olarak isimlendirilir. Genellikle balatalarda kırmızı ve siyah olmak üzere iki farklı çeşidi kullanılmaktadır. İzotropik karakter sergiler. Endüstride manyetik kayıt yapan iletişim araçlarında, parlatma malzemelerine katkı olarak ve bazı endüstriyel alanlarda boya pigmenti olarak kullanılmaktadır.

1.4.5. Dolgu malzemeleri

Dolgu malzemeleri, temelde maliyeti azaltmak ve üretilebilirliğini iyileştirmek için kullanılır. Mica ve vermiculite gibi farklı mineraller sık sık kullanılır. BaSO₄ (Baryum sülfat), aramid lifler, CaCO₃ ve Ca(OH)₂ genelde kullanılan diğer dolgu malzemeleridir.

Genelde en çok kullanılan dolgu malzemesi olan vermiculite, görünüşte mikaya benzeyen ve yapısı içerisinde su içeren doğal bir mineraldir. 870°C'nin üzerinde içerdiği su buharlaşır ve geriye kalan partiküller solucan (helisel) şeklinde yayılır. Bu olaya yayılma veya genişleme denir ve hafif malzemelerin kimyasal olarak ağır, ateşe dirençli ve kokusuz olmasına neden olur.

Baryum sülfat (BaSO₄) yoğunluğu arttırır ve aşınma direncine yardımcı olur. Yüksek sıcaklıklarda kararlıdır (Nicholson 1995). Kalsiyum Hidroksit (Ca(OH)₂) korozyonu azaltmaya, üretimi kolaylaştırmaya ve fren zayıflama sıcaklığının artmasına yardımcı olur (Nicholson 1995). Kalsiyum Karbonat (CaCO₃) Barite bir alternatif olarak kullanılır. Daha ucuzdur, ancak yüksek sıcaklıklara dayanımı düşüktür (Nicholson 1995). Wollastonite (CaSiO₃) sıcak magma halindeki calcite, CaCO₃ ve SiO₂ içeren kireç taşlarının etkileşiminden oluşmuştur. Oluşum formülü;



şeklindedir. Seramik malzemeler içinde refrakter ve dolgu malzemesi olarak en çok kullanılanlardan biridir.(www.galleries.com/minerals)

1.5. Fren Balata Malzemelerinin Üretimi

Bir fren balatası, farklı özelliklere sahip malzemelerin toz halinde getirilip preslenmesi ile oluşan kompozit bir malzemedir. Kimyasal ve mekaniksel özellikleri içerdiği komponent oranlarına göre değişmektedir. Bu yüzden bir balata malzemesi tasarımında kompozisyonu oluşturan malzemelerin ve oranlarının tespiti oldukça önemli ve karmaşık bir konudur. Kompozisyonu kadar fren balatasının üretimi de özelliklerin tespitinde ve değişiminde büyük rol oynar. Çünkü üretim esnasında malzeme özellikleri değişmekte ve kompozisyonlar aynı olsa bile farklı üretim parametreleri ile üretilen balatalar çok farklı özellikler sergileyebilmektedir.

Fren balataları konusunda yapılan çalışmalar, yeni bileşenlerle mümkün uygulamaların yanında üretim prosedürlerinde iyileştirmeyi de içerir. Özellikle fren balatasının üretim prosesleri hakkındaki teknik bilgiler her ne kadar bir fren balatasının fiziksel ve tribolojik özellikleri açısından çok önemli olsalar da, literatürde nadiren rastlanmaktadır.

Fren balataları toz metalürjisi yöntemleriyle üretilmektedir. Toz metalürjisi yöntemi, çok ince tozlar halindeki metal veya metal dışı malzemelerin karıştırılması, istenilen formda preslenmesi ve kontrollü bir atmosfer altında ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar belirlenen süre içerisinde sinterlenmesini kapsayan üretim prosesidir. Bu yöntem ile tek bir aşamada üretim yapmak mümkündür.

Fren balata üretiminde bu yöntemin tercih edilmesinin temel nedeni farklı özelliklere sahip karışım malzemelerinin özelliklerini yitirmeden üretiminin gerçekleştirilebilmesidir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı düşük olan lastik, reçine gibi malzemeler üretim esnasında yanarak özelliklerini yitirebilirler. Dolayısıyla fren balata malzemeleri yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen döküm gibi yöntemlerle üretilemez. Toz metalürjisi yöntemiyle yapılan bir fren balatası üretiminde ise balatayı oluşturan tüm malzemeler üretim esnasında özelliklerini korur, istenen boyutlara sahip gözenekli bir yapı elde edilebilir ve farklı boyut ve şekle sahip malzeme tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bunun yanında toz metalürjisi döküm yöntemine göre daha düşük enerji tüketimine ve maliyete sahip

otomatikleşmiş işlemleri verimli bir şekilde kullanır. Parça istenen boyutlarda veya çok yakın toleranslarda elde edildiği için malzeme israfı çok düşüktür. Ancak teçhizat ve ekipmanları pahalıdır. Bu yüzden orta veya yüksek kapasiteli üretim yapan işletmeler için uygundur. (Yavuz 2002)

1.5.1. Toz metalurjisi ve parça üretim süreci

Toz metalurjisi metal tozlarının karıştırılarak istenilen şekle sıkıştırılması, kontrollü atmosferde sinterlenmesi ile parça üretme yöntemidir. Diğer bir ifadeyle T/M, elementel tozların, tam ve/veya yarı ön alaşımlanmış tozların bağlayıcılar ve yağlayıcılarla birlikte harmanlanarak uygun sıkıştırma yöntemleri ve sıcaklıklar kullanılarak arzu edilen üretilmeleri süreçlerini içeren oldukça kapsamlı ve çok disiplinli malzeme üretim yöntemidir. Günümüzde ise T/M, yüksek gözenekli metal filtrelerden kendinden yağlamalı yataklara, kontrollü gözeneklilik ile sinterlenmiş parçalara ve son olarak tam yoğunluktaki mamüllere kadar geniş ürün yelpazesini içermektedir.(Boz, 2003 ve Öveçoğlu, 1997)

1.5.1.1. Toz özellikleri

Toz metalurjisinde presleme ve sinterleme işlemlerinin etkileri bakımından toz özellikleri büyük önem taşımaktadır. Tozların özelliklerini kimyasal ve fiziksel özellikler olmak üzere iki ana sınıfa ayırabiliriz.(Yavuz, 2002)

Kimyasal Özellikler

Tozlarda birçok yabancı katkı maddeleri bulunabilir. Bunlar; yabancı taneciklerin yanı sıra oksit parçacıkları, metalle bileşik haldeki yabancı maddeler veya yüzey filmi şeklindeki yabancı maddeler olabilir. Bu tanecikler tozun özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Atmosferle temas sonucu belli bir süre sonra tozlar oksitlenir ve presleme esnasında Cr, Zr, Al, Mg, Pb ve Sn gibi metallerin oksitleri kalıp yüzeylerine zarar verdiği gözlenmiştir. (Boz, 2003 ve Uygur, 1986)

Standart kimyasal analiz yöntemleri kullanılarak metal tozlarının oksijen ve asitte çözünmeyen madde miktarının tayini gerçekleştirilir. (Yavuz, 2002)

Fiziksel Özellikler

Toz Tane Boyutu: Toz parçacığının elek veya diğer metotlarla tayin edilen kritik doğrusal boyutudur. Pratik olarak maksimum tane boyutu, toz özellikleri, parça yoğunluğu ve mümkün pres kapasitesi tarafından belirlenmektedir. Metal tozlarının büyüklük dağılımının bulunmasında standart elekler kullanılır. Standart bir elek normu ASTM-B214’de ifade edilmiştir (Çizelge 1.4).

Toz partiküllerinin boyutu difüzyon mesafesini belirlediğinden homojen dağılımda önemli role sahiptir. Küçük boyutlu partiküller büyük boyutlu partiküllere göre daha üniform ve mekanik özellikleri daha üstün olan ürünler verir (Groover 1996).

Çizelge 1.4. Standart elek açıklıkları (Kurt, 1992).

Mesh No	Elek Açıklığı
30	600
40	425
50	300
60	250
80	180
100	150
140	106
200	75
230	63
325	46

Toz Tane Şekli: Toz parçacıklarının şeklini bilmeden boyutları hakkında konuşmak fazla bir anlam taşımaz. T/M işlemi için en uygun parçalar, presleme yönünde düzgün boyutlara sahip olanlardır. Parçacıklar tek boyutlu (iğne, düzgün olmayan çubuk), iki boyutlu (dendritik, pul), üç boyutlu (küresel, yumru, düzgün olmayan, köşeli, gözenekli) olarak sınıflandırılırlar. Parçacık şekli kontrolü, optik ve elektron mikroskopları ile yapılır. (Ekşi, 1996) Toz metalürjisinde kullanılan tozların geometrisi partikül boyutu, dağılımı, şekli, yüzey teksturunu ve yüzey alanı tarafından tanımlanır (Groover 1996). Toz şekli özellikle hammaddenin preslenmesi esnasındaki akış karakteristiklerini belirlediğinden önemli bir parametredir. Bu bakımdan küresel şekle sahip toz

partikülleri en düşük sürtünmeye sahip olduğundan preslemede daha üniform bir yoğunluk dağılımı sağlar. Balata malzemesi karışımı içerisinde küçük ve küresel şekilli abrasivler kullanıldığında sürtünme ara yüzeyinde transfer filmi oluşumunda avantajlı bir etkiye sahiptir ve termal olarak kararlı bir kristal yapısı sağlar.

Toz Tane İç Yapısı: Toz iç yapısı denince, tane boyu, fazların dağılımı, gözenekler anlaşılır. Mekanik ve sinterleme özellikleri açısından ince tane boyu tercih edilir. Parçacık boyu azaldığı zaman tane boyu da azalacaktır. Gözeneklilik ise presleme ve sinterleme işlemlerinden etkilenir.

Özgül Yüzey Alanı: Birim toz kütesine isabet eden yüzey alanıdır. En yüksek yüzey alanı olan tozlar kimyasal yollarla elde edilenlerdir. Yüzey pürüzlülüğü birim yüzey alanını doğrudan etkiler. Toz tane yüzey durumu tozların akış, sıkıştırılabilme, sinterlenebilme ve kimyasal aktifliğini etkiler.

Görünür Yoğunluk: Birim hacimdeki gevşek tozun ağırlığına görünür yoğunluk denir. Malzemenin teorik yoğunluğunun %20-50 kadardır. Malzemenin teorik yoğunluğu parçacık boyu ve şekli, yüzey alanı ve parçacıkların düzeni gibi faktörlere bağlıdır.

Akış Hızı: Seri üretim sırasında tozların kalıp içerisine akması mümkündür. Bu nedenle hızlı üretim için akış hızı önem taşır. Kısa bir akış süresi için yüksek görünür yoğunluk gerekir.

Sıkıştırılabilirlik: Basınç altında tozların sıkışma ve yoğunlaşma kabiliyetine denir. Düşük sıkıştırma oranları, sığ kalıp boşlukları gerektireceğinden takımların kırılma ve aşınmasını azaltacak, kısa strok ve daha hızlı dolgu sağlayacaktır.

Yanıcılık ve Zehirleyicilik: Tozların bu özellikleri sağlık açısından ciddi bir problem teşkil eder. Çünkü tozlar hava ile karıştığında asılı kalma eğilimindedir.

Yanıcılık, metal tozların yüksek yüzey/hacim oranından dolayı ani oksitlenme oksitlenme özelliğidir. Birçok toz çeşidi oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda ateşlenir (oksijenle birleşir). 50 µm'nin altındaki toz tane boyutları zararlıdır, özellikle 1 µm'nin altındakiler tehlikelidir. Tozların zehirleyici özelliği ise insan vücuduna solunum ve sindirim yoluyla girerek kalmaları ve birikmeleri sonucu olmaktadır. Fren balata malzemelerinde asbest tozlarının havaya karışıp solunmasıyla akciğere zarar vermesi örnek olarak gösterilebilir. Bunun için metal tozlarının havadaki yoğunluğu müsaade edilen değerlerin altında tutulmalı, gereken hallerde kapalı emniyet kutuları içinde çalışmalı, havalandırma, temizleme sistemleri kullanılmalıdır.

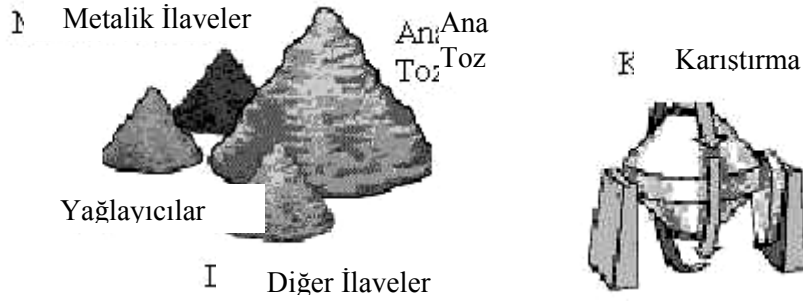
1.5.1.2. Toz metalurjisi ile parça üretim süreci

Toz metalurjisi işlemi; karıştırma, şekillendirme (kalıplama) ve daha sonra partiküllerin sinterleme yolu ile ısıl bağlanması basamaklarını içerir.

Karıştırma

Metalik sürtünme malzemeleri, metalik bir matris içerisinde sürtünme üreten bileşenlerin dağılmasıyla oluşmuştur. Üretim aşamasında homojen bir dağılım için kullanılan karıştırma yönteminin tipi çoğunlukla karıştırılacak hammaddeye bağlıdır. Örneğin lastik bağlayıcı karışımların homojen dağılımı için gerekli olan kesme kuvvetlerinin üretiminde karıştırıcı kullanılması gerekir. İzafi olarak düşük bir viskoziteye sahip olan toz ve sıvı bileşenlerin (sıvı reçineler gibi) homojenizasyonu için karıştırıcılar kesici bıçak prensibine göre çalışır.

Tozlar karıştırılmasında genellikle Şekil 1.14'de gösterilen çift konili karıştırıcılar kullanılır. Karıştırma işleminin homojen bir şekilde yapılabilmesi için tozların karıştırma esnasında serbest düşme hareketine sahip olması gerekir.



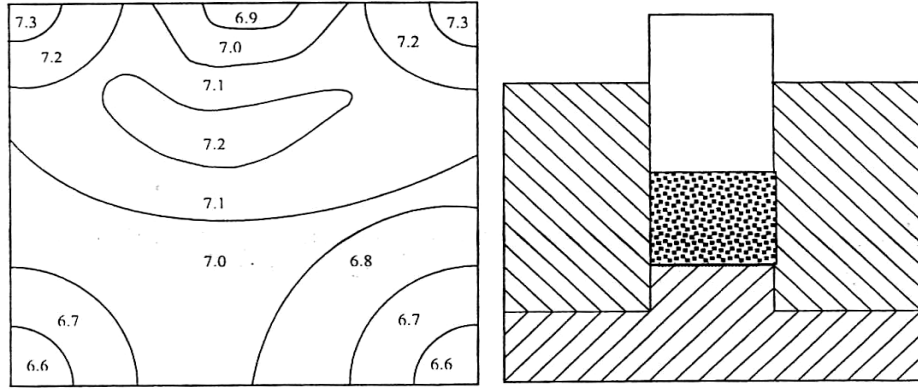
Şekil 1.14. T/M üretiminde tozların karıştırılması için kullanılan çift konili karıştırıcı. (<http://www.turkishpm.org/>)

Karıştırma işlemi yoğunlukları, partikül boyutları ve bazen yüzey karakteristikleri ve şekilleri önemli farklılıklar gösteren toz bileşenlerde zor olabilmektedir (Kuhn ve Lawley 1978). Balatalar da, çok farklı boyut ve özelliklerde toz partiküllerinden oluştuğu için bu malzemelerin karıştırma işlemleri segregasyonu önlemek açısından çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Segregasyonu önlemek için karışıma yağlayıcı eklenir (Kuhn ve Lawley 1978). Grafit balata karışımlarında kullanılan yağlayıcı özelliğine sahip malzemedir.

Kalıplama

Kalıplama işlemi, karıştırma işleminden sonra homojen olarak dağılmış olan toz partiküllerinin hidrolik veya mekanik preslerle bir kalıp içerisinde sıkıştırılması işlemidir. Tozun plastik şekil değiştirme özelliğine göre 1-10 ton/cm² arasında değişen basınç tatbik edilir. Sinterlenmiş cisimlerin fiziksel özellikleri üzerinde yapılan araştırmalarda ise bazen 30 ton /cm²'ye kadar ulaşan basınçlar da kullanılmıştır.(Ersümer, 1970 ve Boz, 2003)

Geleneksel toz sıkıştırılması işleminde Şekil 1.15'de görüldüğü gibi, tek eksen boyunca uygulanan basınç sonucu kalıbı dolduran tozlar preslenerek sıkışır. Toz doldurulduktan sonra, üst baskı plakası ile basma gerçekleşir ve sıkıştırılmış toz metal blok parça alt pistonun hareketi ile çıkartılır. Kalıp duvarlarının aşınmasını engellemek ve tozların kolay sıkışmasını sağlamak için tozlara ve kalıp duvarlarına yağlayıcılar eklenir.(Öveçoğlu, 1997 ve Boz, 2003)



Şekil 1.15. Tek yönlü preslemede numune kesitindeki yoğunluk dağılımı (Öveçoğlu, 1997).

Tek yönlü preslemede uygulanan basınç arttıkça toz kütlelerinin yoğunluğu artar. Yani bünyedeki gözeneklilik düşer. Bu yöntem ekonomik olmasına karşın, karmaşık şekillerdeki parçalar ile boy/en oranı yüksek olan metalik parçalarda istenen ham yoğunluklar gerçekleşemez. Bu yüzden karmaşık ve boy/en oranı yüksek olan parçaları basmak için soğuk izostatik presleme (SİP) ile gerçekleştirilir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen SİP işleminde, tozlar kauçuk bir kaba doldurularak yağ ile dolu bir basma hücresinin içerisine yerleştirilir. Basma pistonu sayesinde yağ, kalıba her yönden eşit baskı yapar. Böylece basılmış numunelerin her tarafı aynı yoğunlukta olur.(Öveçoğlu, 1997)

Kalıplama işlemi, parça porozite yoğunluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Porozitenin en önemli avantajı, ses ve vibrasyonu sönümlenme özelliklerine sahip olmasıdır. Porozite, kalıplama sıcaklığına duyarlıdır. Poroziteyi etkileyen sıcaklık direkt olarak sıcaklıkla akıcılığı değişen bağlayıcı reçine ile büyük ölçüde alakalıdır. Porozite kalıplama basıncı ve sıcaklığının yanı sıra tanelerin şekil ve büyüklüğüne, sinterleme sıcaklığı ve atmosferine de bağlıdır.

Fren balata malzemelerinde kalıplama karmaşık bir süreçtir ve bazen iki aşamadan oluşur:

1. Ön Şekillendirme: Bu işlem soğuk olarak gerçekleştirilmekte ve balatanın ön şeklini oluşturmak için uygulanmaktadır.
2. Sıcak Şekillendirme

Bu proses genellikle kalıplamada yoğunluk ile yakından ilgilidir. Şekillendirme burada, balatanın son boyutlarına oldukça yakın hatların oluşması anlamındadır. İşlem yaklaşık 140-250°C civarında yapılmaktadır. Kim ve ark. (2003) yaptıkları testler sonucunda kalıplama basıncı ve zamanının yüzey sertliği için önemli bir üretim parametresi olduğunu göstermişlerdir.

Sinterleme

Sinterleme, preslenmiş veya preslenmemiş toz kütesinin birbiriyle yüksek sıcaklıkta bağ kurması işlemidir (Yavuz, 2002). Sinterleme süreçlerinde kullanılan sıcaklıklar genellikle sinterlenecek olan parçada katı-hal atom yayınma ve ergime sıcaklığının altında seçilirse de özellikle çok sistemli alaşımlarda sıvı-faz sinterlemesi olarak bilinen bir sıvı fazın varlığında da gerçekleşebilir. Toz parçacıkların yüksek yüzey enerjileri aşılıp ya da ortadan kaldırılarak gerçekleşen sinterleme sonucu parçacıklar arasında tam ve mükemmel bağlar oluşur ki bu suretle iç yapıdaki gözeneklilik sıfıra düşer. Hacim başına düşen yüzey enerjisi toz parçacık çapının tersi ile doğru orantılı olduğundan, küçük toz parçacıkları büyükler göre daha kolay sinterlenirler. (Öveçoğlu, 1997)

Sinterleme, preslenmiş parçaların mukavemet kazandığı bir ısıl işlemdir. En yaygın sinterleme sıcaklığı aralığı demir esaslı alaşımlar için 1100-1150 °C'dir. Bazı durumlar için 1250 °C'ye kadar olan yüksek sinterleme sıcaklıklarına ihtiyaç duyulur. Uygulamaya bağlı olarak sıcaklıktaki bekleme zamanı 10 ile 60 dakika arasında değişir.

Eğer sinterleme sıcaklığı 1150 °C üzerinde ise sinterleme maliyetleri önemli ölçüde yükselir. Sinterleme fırını içinde oksitlenmeyi önleyen bir atmosfer gereklidir. Kırılmış amonyak, endo-gaz veya azot-bazlı atmosferler yaygınca kullanılır. Sinterlenmiş parçaların boyut toleranslarının ve mekanik özelliklerinin sağlanması için fırın ortamında kontrollü karbon potansiyeline sahip olmak önemlidir. Sinterleme işlemi yağlayıcıyı alma, sinterleme ve soğutma basamaklarını kapsar. Fırının yağlayıcı alma bölgesinde, yağlayıcı yanar. Sinterleme esnasında bir çok reaksiyon meydana gelir. Başlangıçta, fırın atmosferi tozların yüzeyindeki oksitleri indirger ve birbirleri ile temas halindeki tozlar arasında bağ oluşur. Sinterlemenin ana mekanizmaları yüzey ve hacim

difüzyonudur. Difüzyon ile metalin yapışık gövdesi oluşur ve alaşım elementleri demir içerisine yayılırlar. Termodinamik kanunlar ile ifade edilen serbest enerjiyi en aza indiren kuvvet ile gözenek küreselleşmesi meydana gelir ve küçük gözenekler yok olurlar. Sinterlenmiş parçalar fırının soğutma bölgesinde koruyucu atmosfer içinde soğutulur. Özellikle 850-500 °C sıcaklıklar arasındaki soğutma hızı malzeme içerisindeki faz dönüşümlerinden dolayı mekanik özellikleri etkiler. Sinterleme esnasında makul boyut değişimi meydana gelir. Malzemelerin bir çoğu boyutca daralır, fakat alaşım elementleri mesela bakır gibi büyümeye sebep olur. (<http://www.turkishpm.org/>)

Genellikle, fren balatalarında kullanılan reçineler için sinterleme koşulları reçine üreticileri tarafından verilir. Bununla birlikte kalıplama ve ısı davranışı fren balatasının içindeki bileşenlerin miktarı ve tipini içeren uygun tribolojik ve fiziksel özellikler meydana getirecek şekilde düzenlenmiştir. Çünkü bir balatanın fiziksel ve tribolojik özellikleri balatada bulunan bağlayıcı reçine ve diğer bileşenler arasındaki reaksiyonlar sonucunda değişmektedir. (Kim ve ark., 2003)

Balata üretiminin temeli basınç ve sıcaklık altında gerçekleştirilen kalıplama ve sinterleme ile meydana gelen fenolik reçinenin polimerizasyonu prosesine dayanmaktadır. Polimerizasyonun kimyasal prosesinde bir miktar su açığa çıkar ve bu suyun buharlaşarak uzaklaştırılmasına izin verilmelidir. Yoksa tehlikeli olabilir ve malzeme bütünlüğünü bozar. Polimerizasyon oranı veya sinterleme sıcaklıkla üstel olarak değişir. Başka bir deyişle, hızlı bir sinterleme gerçekleştirmek için çok yüksek sıcaklıklara çıkmak gerekir (250oC veya üstü). Bununla birlikte sürtünme malzemesinin ısıya karşı düşük dayanımı sıcaklık artışını sınırlı kılmaktadır. Diğer taraftan düşük bir sinterleme sıcaklığı iç bölgelerde eksik polimerizesyonuna neden olmaktadır. Reçine toz veya sıvı halde olabilir ve buna bağlı olarak karışım kuru veya yağ olabilir. Çizelge 1.5'de farklı araştırmacıların geliştirdikleri (kullandıkları) üretim parametreleri verilmiştir.

Çizelge 1.5. Farklı araştırmacılara göre üretim parametreleri.

İşlemler	Üretim Parametreleri	Kim ve ark. (2003)	Kim ve ark. (2001)	Jang ve ark. (2001)	Abbasi ve ark. (2000)	Lu ve ark. (2001)
Karıştırma	Zaman (dak)		5			1,10
Ön Şekillendirme	Zaman (dak)	1	1			
	Sıcaklık (°C)	100	100	oda sıc.		
	Basınç (MPa)	20	20	34.3		
Sıcak Şekillendirme	Zaman (dak)	6	10	10		50
	Sıcaklık (°C)	225	160	160	145	177
	Basınç (MPa)	27	35	31.36	6000 psi	
Sinterleme	Zaman (saat)	6	6	6	12	1
	Sıcaklık (°C)	200	200	210	180	140

1.6. Karışımların Deneysel Tasarım Yöntemi ile Optimizasyonu

Günümüzde endüstriyel sektörde üretilen veya kullanılan ürünlerin büyük bir kısmı, farklı boyut ve özellikteki iki veya daha fazla malzemenin birlikte karıştırılmasıyla üretilmiştir. Örneğin; toz metalurjisi yöntemleriyle üretilen parçalarda, inşaat konstrüksiyonlarında kullanılan beton, çimento v.b. karışımlarında, gıda endüstrisinde meyve suyu, kek, v.b. karışımlarında, fotoğrafçılıkta kullanılan fotoğraf filmleri gibi çok farklı alanlarda kullanılan malzemelerin büyük bir çoğunluğu karışımlardan oluşmaktadır. Üretilen bu malzemelerin bir veya daha fazla özelliği üretici veya karışımı yaparak deneyen araştırmacı tarafından önemli olmaktadır. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların mekanik veya fiziksel özellikleri önemli iken, üretilen beton veya çimentonun dayanım veya yalıtkanlığı, kekin yumuşaklığı veya kabarması, meyve suyunun kıvamı veya fotoğraf filminin renk kalitesi gibi özellikler önemli olabilir. Her bir üründe, ölçülen veya tespit edilen özellikler ürünü meydana getiren her bir malzemenin tür ve oranına bağlı olarak değişmektedir. Bu bakımdan karışımlardan meydana gelmiş olan bir ürünün istenen özellikleri sergileyebilmesi için karışımı oluşturan malzemelerin doğru olarak seçilip, uygun miktarda kullanılması gerekir.(Cornell 2002)

Balata malzemeleri konusunda yapılan çalışmalar çok fazla olmasına karşın, balatayı meydana getiren komponentler hakkındaki bilgilerimiz optimum balata formülasyonu için günümüzde henüz yeterli değildir. Balata malzemesinin en az 10 farklı komponentten oluştuğu düşünülürse bu komponentlerin her bir türünü her oranda üretip farklı kombinasyonlarda denemek için milyonlarca balata üretip test etmek gerekir. Bu

yüzden deney sayısını en aza indirip en iyi özelliklere sahip üretimlerde deney tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada da üretim sayısını azaltıp optimum balata malzemesi elde etmek için 'Simplex - Lattice Design' deney tasarım yöntemi kullanılmıştır.

1.6.1. Simplex Lattice Design

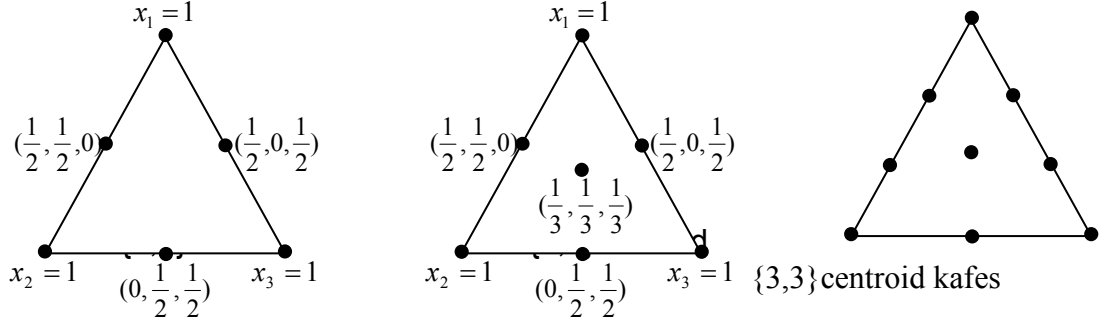
Simplex - Lattice Design yöntemi karışımlarla yapılan deneylerin sayısını sınırlayarak, karışım oranına göre ürünün özelliklerini tanımlayan bir analiz yöntemidir. Bu yöntemde, karışımı oluşturan en az (genel olarak) üç bileşenin oranları belirli sınırlar içerisinde değiştirilip, sonuçlar analiz edilerek üçlü karışım diyagramları oluşturulmaktadır.

Literatürde bu yöntemi kullanarak fren balata kompozisyonunun sürünme (frenleme esnasında çok düşük taşıt hızlarında meydana gelen düşük frekanslı sürtünme titreşimi) davranışına etkisini inceleyen Jang ve ark. (2001), farklı miktarlarda karışım komponenti içeren 29 adet balata numunesi üretilip her birinin statik, kinetik sürtünme katsayısı ve arasındaki farkı üçlü karışım diyagramları üzerinde göstermişlerdir. 12 bileşenden oluşan sürtünme malzemesinin bileşenlerinin kesikli sürtünme üzerindeki etkisini incelemiştir. Buna göre kesikli sürtünme (stick-slip) davranışını en az seviyede gösteren balata kompozisyonu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada kullanılan balata malzemesi de 5 farklı gruptan ve toplam 14 farklı malzemenin karıştırılmasıyla oluşmuştur. Bu malzemelerden yapısal, yağlayıcı ve abrasive grupları Simplex Lattice Design yöntemi ile analiz edilmiştir. Yönteme göre en az üç farklı malzemenin oluşan bir grubun (deneysel tasarım yöntemine göre belirlenmiş) farklı oranlardaki kombinasyonları test edilerek sonuçlara bağlı olarak n.dereceden bir denklem oluşturulmuştur. Simplex Lattice Design yönteminde her bir karışımdaki bileşen x_i şeklinde ifade edilmiştir ve (1.2)'de gösterildiği gibi toplamları her bir kombinasyonda 1 olmak zorundadır. x_i karışımı oluşturan komponent olmak üzere;

$$x_i \geq 0 \quad \text{ve} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (1.1)$$

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1.0 \quad (1.2)$$

Polinomial bir denklem uydurmak ve bu denklemi yüzey üzerinde ifade edebilmek için, tasarımda seçilecek noktalar belirli bir düzene göre dağılım göstermek zorundadır. Üç değişkenli tasarımlarda kullanılan örnek tasarım noktaları Şekil 1.16'da verilmiştir.



Şekil 1.16. Üç değişkenli tasarımlarda kullanılan bazı tasarım noktaları.

Bir polinomial modelde m denklemin derecesini ve q komponent sayısını ifade etmektedir. Şekil 1.16'da da gösterildiği gibi, her üç tasarımda da x_1, x_2 ve x_3 olmak üzere 3 tane komponentin değişimi incelenmiştir. Dolayısıyla $q = 3$, tür. m sayısı da x_i 'nin değişimlerinden tespit edilebilir.

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad (1.3)$$

olduğuna göre. Şekil 1.16'daki örneklerden ilk ikisinde $m = 2$, sonuncuda ise $m = 3$ olur. Bir $\{q, m\}$ simplex-lattice tasarım noktalarına göre sonuçları elde edilmiş deneylerde regression fonksiyonunun genel denklemi;

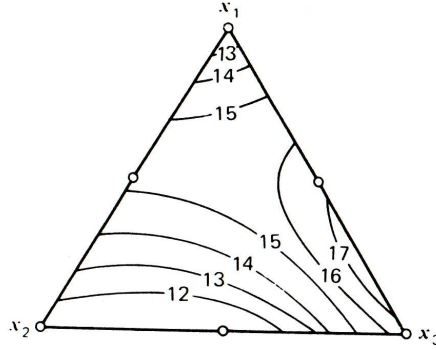
$$\eta = \beta_o + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^q \sum_{i \leq j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i \leq j \leq k}^q \sum_{i \leq j \leq k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (1.4)$$

Burada β değeri i, j ve k ile belirlenen karışımın deney sonucunu ifade etmektedir. (1.4) no'lu denklem kullanılarak Çizelge 1.6'da görülen verilere sahip bir tasarım için Şekil 1.17'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 1.6. Örnek bir deney tasarımına ait veriler.

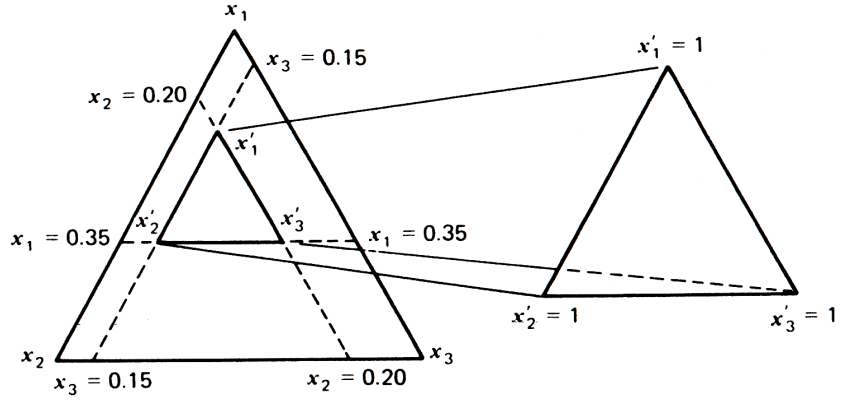
Tasarım noktaları	Komponent Oranları			Sonuçlar
	x_1	x_2	x_3	
1	1	0	0	11,7
2	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	15,3
3	0	1	0	9,4
4	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	10,5
5	0	0	$\frac{1}{2}$	16,4
6	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	16,9

Bu tasarım noktalarının üçgen model üzerindeki şekli Şekil 1.17.'de görülmektedir. (4) no'lu denkleme göre yapılan işlemlerin sonuçları bu model üzerine yerleştirildiğinde Şekil 1.17'deki sonuç elde edilir.



Şekil 1.17. Örnek bir deney tasarım verilerine göre ikinci dereceden denklem sonucu.

Deneyisel tasarımda sadece belirli bir bölge ile ilgileniliyorsa. Bu durumda Şekil 1.18 'de olduğu gibi x_1, x_2 ve x_3 yerine x'_1, x'_2 ve x'_3 noktaları alınır ve işlemler bu noktalara göre yapılır.



Şekil 1.18. Özel bir bölgenin incelenmesinde oluşturulan küçültülmüş model.

Küçültülmüş modelde polinomial denklem oluşturulurken q adet komponente sahip bir karışım için;

$$0 \leq L_i \leq x_i \quad (i = 1, 2, \dots, q) \quad (1.5)$$

$$x'_i = \frac{x_i - L_i}{1 - L} \quad (L = \sum_{i=1}^q L_i < 1) \quad (1.6)$$

Bu işlemleri Şekil 1.18 için uygularsak;

$$L = 0,35 + 0,20 + 0,15 = 0,70 \quad (1.7)$$

$$x'_1 = \frac{x_1 - 0,35}{0,3}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - 0,20}{0,30}, \quad x'_3 = \frac{x_3 - 0,15}{0,30} \quad (1.8)$$

olarak elde edilir. Buna göre elde edilen polinomial denklem;

$$\eta = \gamma_1 x'_1 + \gamma_2 x'_2 + \gamma_3 x'_3 + \gamma_{12} x'_1 x'_2 + \gamma_{13} x'_1 x'_3 + \gamma_{23} x'_2 x'_3 \quad (1.9)$$

$$\gamma_i = y_i, \quad \gamma_{ij} = 4y_{ij} - 2(y_i + y_j), \quad i < j \quad (1.10)$$

(1.8) no'lu denklem (1.9) no'lu denklemin içine yerleştirilirse;

$$\eta = \gamma_1 \frac{(x_1 - L_1)}{1-L} + \gamma_2 \frac{(x_2 - L_2)}{1-L} + \gamma_3 \frac{(x_3 - L_3)}{1-L} + \gamma_{12} \frac{(x_1 - L_1)(x_2 - L_2)}{(1-L)^2} + \gamma_{13} \frac{(x_1 - L_1)(x_3 - L_3)}{(1-L)^2} + \gamma_{23} \frac{(x_2 - L_2)(x_3 - L_3)}{(1-L)^2} \quad (1.11)$$

veya

$$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (1.12)$$

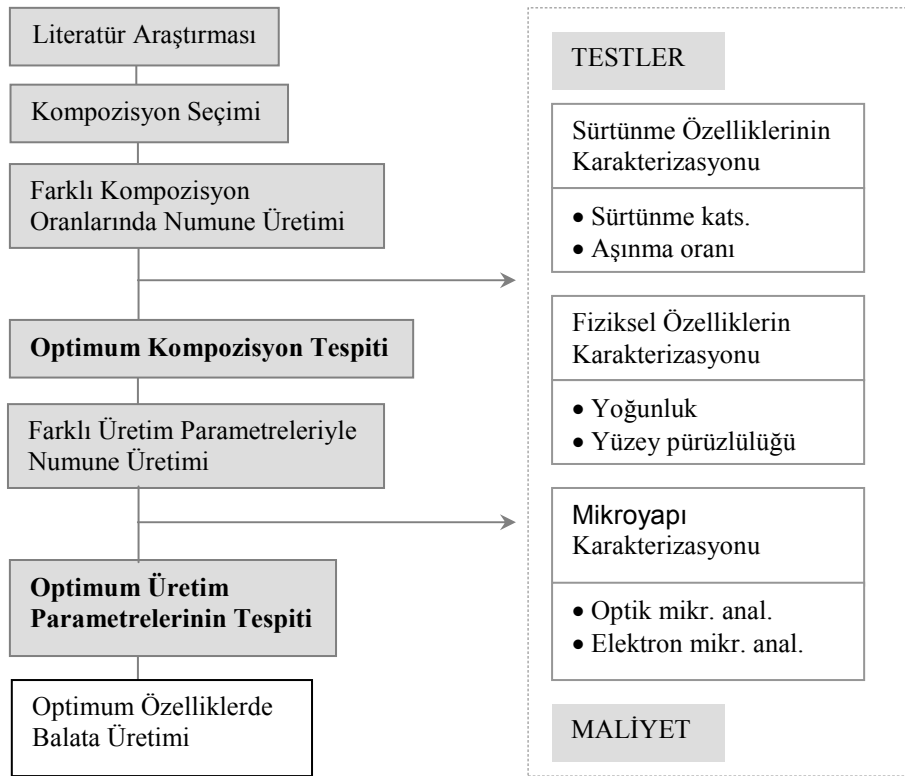
$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\gamma_{12} L_2 (L_1 - 1) + \gamma_{13} L_3 (L_1 - 1) + \gamma_{23} L_2 L_3}{(1-L)^2} + \frac{\gamma_1 - \sum_{i=1}^3 \gamma_i L_i}{1-L} \\ \beta_2 &= \frac{\gamma_{12} L_1 (L_2 - 1) + \gamma_{13} L_1 L_3 + \gamma_{23} L_3 (L_2 - 1)}{(1-L)^2} + \frac{\gamma_2 - \sum_{i=1}^3 \gamma_i L_i}{1-L} \\ \beta_3 &= \frac{\gamma_{12} L_1 L_2 + \gamma_{13} L_1 (L_3 - 1) + \gamma_{23} L_2 (L_3 - 1)}{(1-L)^2} + \frac{\gamma_3 - \sum_{i=1}^3 \gamma_i L_i}{1-L} \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

$$\beta_{ij} = \gamma_{ij} / (1-L)^2, \quad i, j = 1, 2 \text{ ve } 3, \quad i < j$$

Gerekli büyüklükler yukarıda sıralanan (1.10)...(1.13)'deki denklemlere göre hesaplanıp (1.9) no'lu denklemde yerine konursa her bir karışım oranı için üçgen model üzerinde değerler elde edilir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, binek tipi taşıtlarda kullanılmak üzere diskli fren sisteminde yer alan bir fren balatasının kompozisyon ve üretiminin deneysel ve matematiksel optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla çalışma esnasında takip edilen adımlar Şekil 2.1’de şematik olarak sıralanmıştır.



Şekil 2.1. Çalışmada takip edilen adımları gösteren akış şeması.

Akış şemasından da görüldüğü gibi bu çalışma, balata malzemesinin kompozisyonu deneysel tasarım metoduna göre belirlenen oranlarda test edilip matematiksel olarak optimize edilmiştir ve bu kompozisyona uygun üretim parametreleri deneysel olarak araştırılmıştır. İlk aşamada literatürde yapılan çalışmalardan da faydalanılarak yeni bir balata kompozisyonu oluşturulmuştur. Balata malzemesini oluşturan, görev bakımından beş farklı malzeme grubundan üçü; yapısallar, yağlayıcılar ve abrasivler çalışmada kullanılan ‘Simplex Lattice Design’ deneysel tasarım yöntemine göre karışım oranları

belirlenmiştir. Çalışmada dolgu malzemelerinin ve bağlayıcıların optimizasyonu gerçekleştirilmemiştir. Çünkü dolgu malzemelerinin balata malzemesinin sürtünme performansı üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığı literatürde yapılan çalışmalar ile ispatlanmıştır (Jang ve ar., 2001). Bağlayıcı olarak da sadece fenolik reçine ve çok düşük oranda lastik tozu kullanıldığı için bu iki malzemenin optimizasyonuna gerek duyulmamıştır. Sabit üretim parametreleri altında üretimi gerçekleştirilen kompozisyonlar Şekil 2.1’de gösterilen testlere tabi tutulmuştur ve elde edilen veriler bilgisayar programlama dilinde hazırlanan programda analiz edilerek optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda optimum kompozisyon olarak elde edilen oranlarda üretilen balatalar test edilerek optimizasyonun doğruluğu ispatlanmıştır. İkinci aşamada, ilk aşamada analizi gerçekleştirilen ve optimum özelliklere sahip olduğu tespit edilen kompozisyonlardan farklı üretim parametreleri (kalıplama süresi, basıncı ve sıcaklığı ile sinterleme süresi ve sıcaklığı) ile numuneler üretilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen bu optimizasyonda geliştirilen balata kompozisyonuna en uygun kalıplama ve sinterleme parametreleri tespit edilmiştir.

Optimize edilen balata malzemesi günümüz binek taşıtlarında kullanılan orjinal bir fren balatasıyla sürtünme özellikleri ve maliyeti açısından karşılaştırılıp üstün ve zayıf yönleri tespit edilmiştir. Balatanın mikroyapı fotoğrafları optik ve elektron mikroskopları kullanılarak elde edilmiştir. Balata malzemelerinin yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi fiziksel özellikleri ölçülerek tribolojik performansa etkisi irdelenmiştir. Böylece bu çalışma ile gri dökme demir disk malzemesine sahip binek tipi bir taşıt için uygun tribolojik özelliklere sahip, düşük maliyetli ve çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyen fren balata malzemesinin kompozisyonun oranlarının ve üretim parametrelerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir.

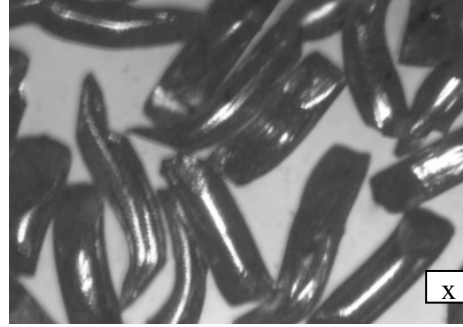
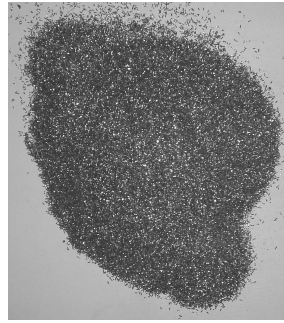
2.1. Fren Balata Malzemelerini Oluşturan Bileşenler

Literatür araştırması sonucunda araştırmacıların farklı malzeme kompozisyonları üzerinde yaptıkları testler incelenip piyasada kullanılan malzemeler gerek maliyeti gerekse de temin etme kolaylığı araştırılıp, kompozisyon Çizelge 2.1’deki gibi belirlenmiştir.

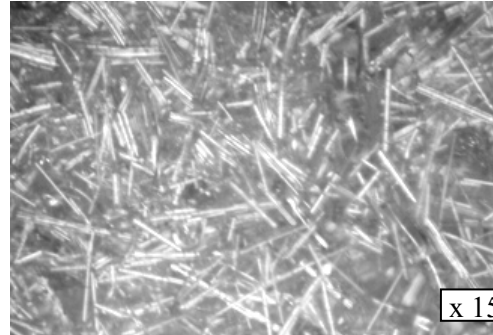
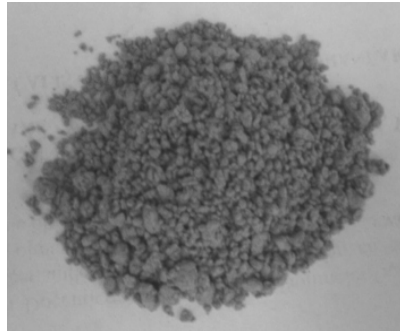
Çizelge 2.1. Tez çalışmasında kullanılmak üzere seçilmiş malzeme türleri ve \$/kg cinsinden maliyetleri.

Malzeme Grupları	Malzemeler	Maliyetler (\$/kg)
Yapısal Malzemeler	Bakır tozu	9,500
	Kaya yünü	2,000
	Aramid lifleri	26,400
Bağlayıcılar	Fenolik reçine	2,340
	Lastik tozu	0,333
Yağlayıcılar	Grafit tozu	0,496
	Coke	0,181
	ZnS	3,030
Abrasivler	ZrSiO ₄	1,200
	Fe ₂ O ₃	1,000
	Cashew tozu	1,150
Dolgu Malzemeleri	BaSO ₄	0,102
	CaCO ₃	0,067
	Wollastonite	1,000

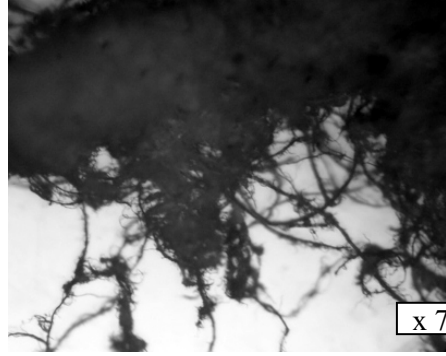
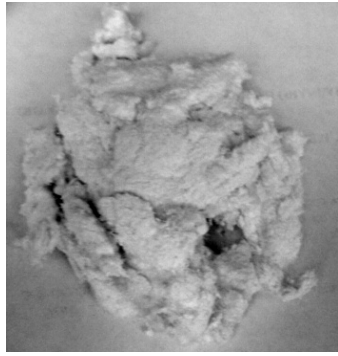
Bu çalışmada incelenen yapısal malzemelerin, yağlayıcıların ve abrasivlerin dijital fotoğraf makinesi ile çekilmiş büyütmesiz fotoğrafları ve optik mikroskopta çekilmiş fotoğrafları Şekil 2.2’de verilmiştir.



a) Bakır tozu

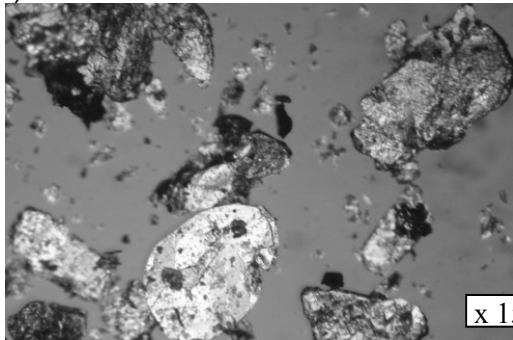
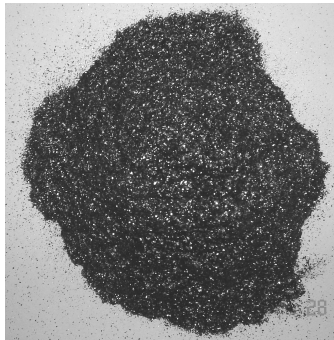


b) Kaya yünü



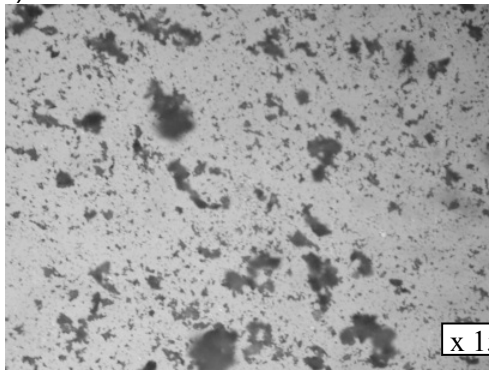
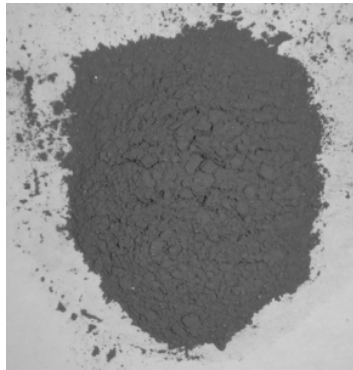
x 75

c) Aramid lif



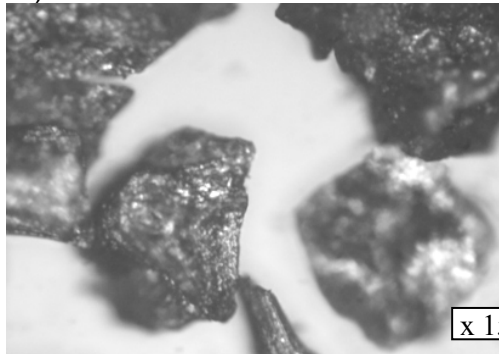
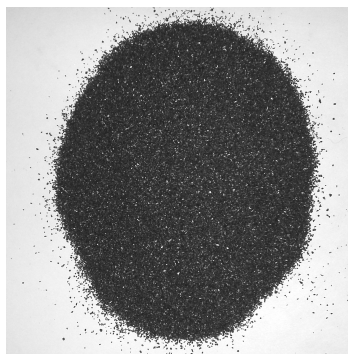
x 150

d) Grafit



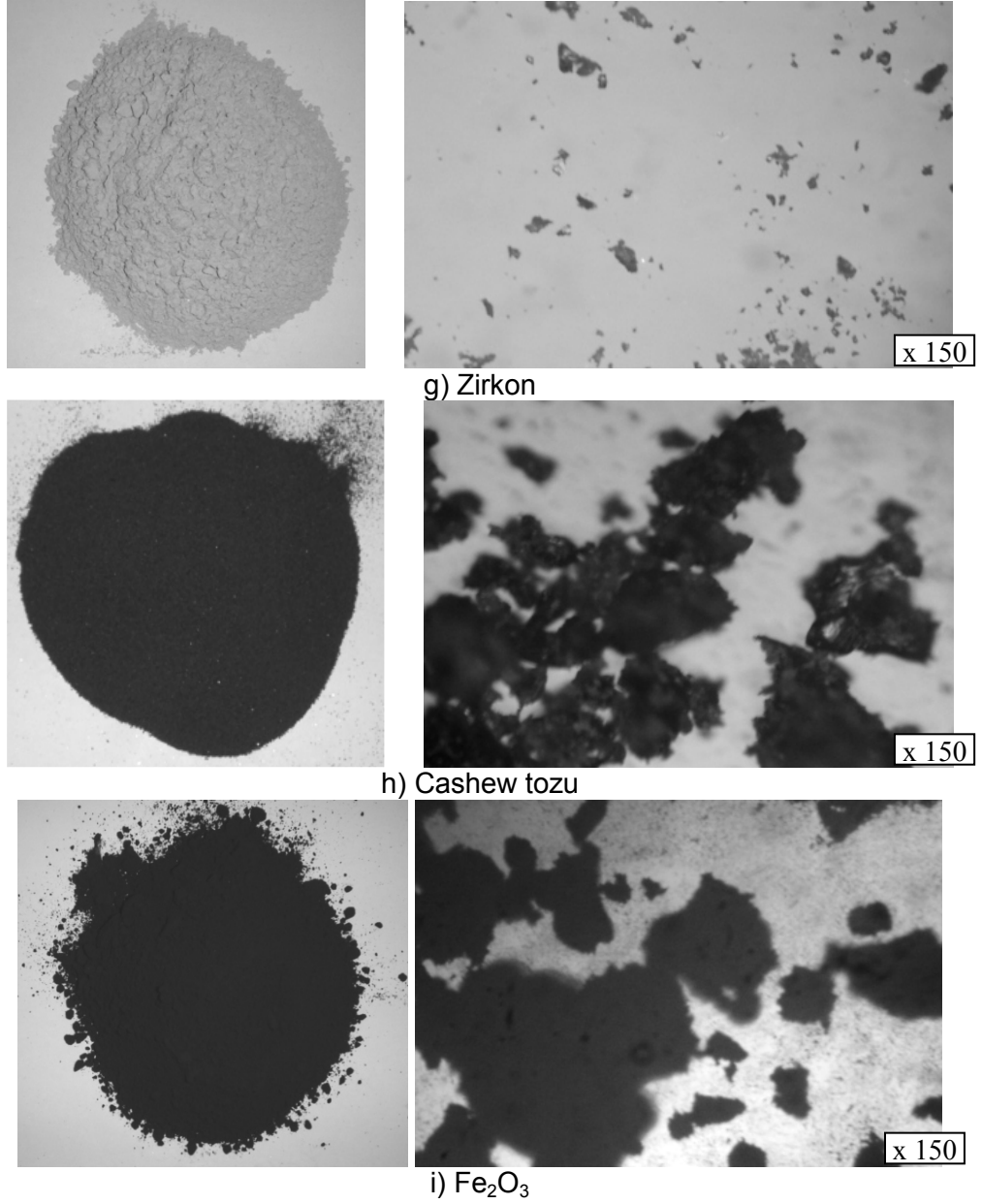
x 150

e) ZnS



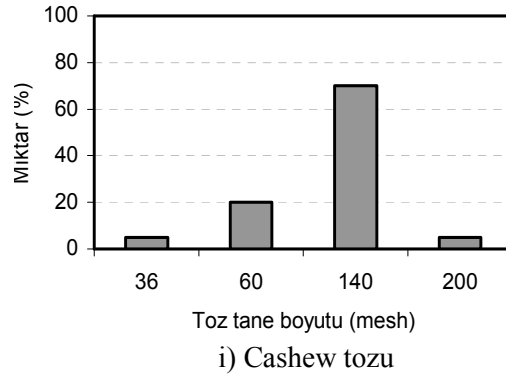
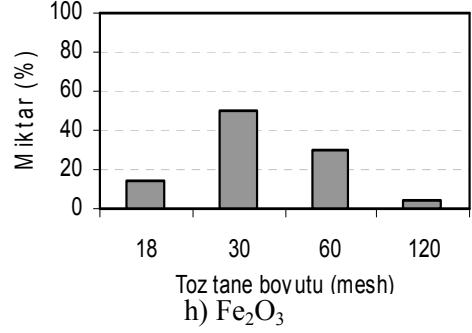
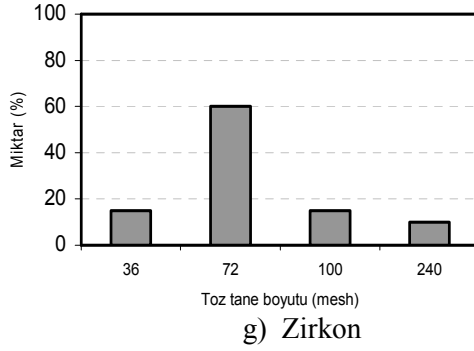
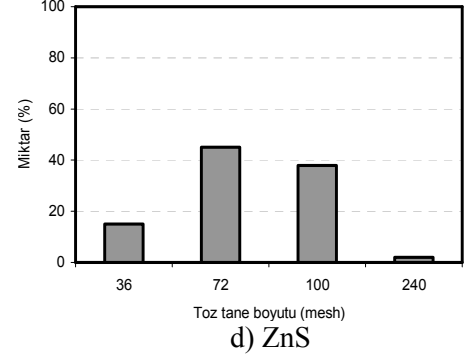
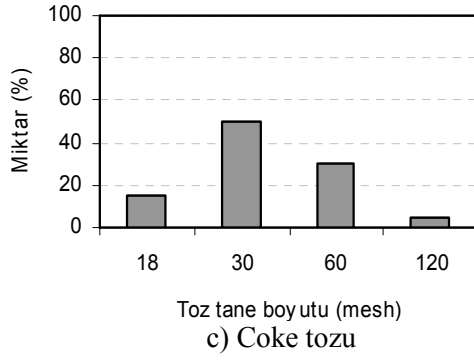
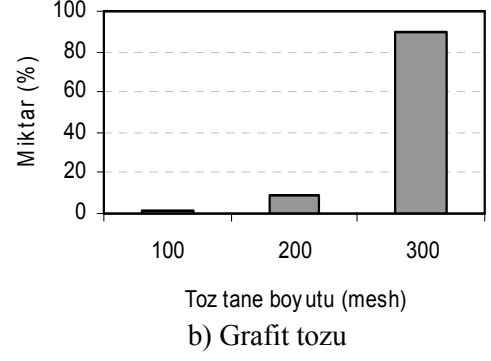
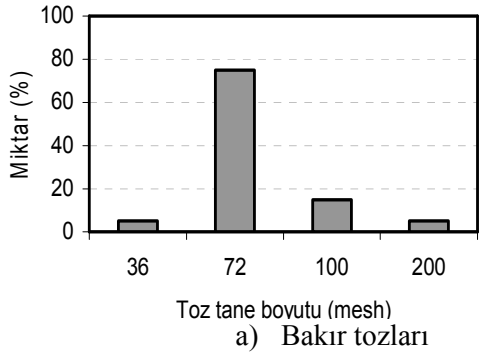
x 150

f) Coke



Şekil 2.2. Fren balata kompozisyonunu oluşturan (a-c) yapılarının, (d-f) yağlayıcıların, (g-i) abrasivlerin büyütmesiz ve optik mikroskop fotoğrafları.

Bu malzemelerin toz tane boyutları yapılan elek analizleri ile tespit edilmiştir. Elek analizleri sonucu Şekil 2.3’de verilmiştir. Aramid lifleri ve kaya yünü gibi malzemeler lifli bir yapıya sahip olduğu için bu malzemelerin elek analizleri yapılmamıştır.



Şekil 2.3. Fren balata kompozisyonunu oluşturan (a) yapıtaşlarının, (b-d) yağlayıcıların, (e-g) abradantların elek analizi sonuçları.

Fren balata malzemelerinde bağlayıcı olarak kullanılan fenolik reçinenin fiziksel özellikleri büyük önem taşımaktadır. Bunlar; akışkanlık, sertleşme zamanı, ergime noktası ve kızdırma kaybıdır. Üreticiler kullanılan reçinenin fiziksel özelliklerini göz önünde bulundurarak balatanın üretim şartlarına karar verirler. Bu çalışmada kullanılan fenolik reçinenin fiziksel özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Balata tasarımı için seçilmiş fenolik reçinenin fiziksel özellikleri.

Özellik	Sınır değerler
Akışkanlık	125°C’de 16-40 mm
Sertleşme zamanı	1saat 30 dak – 2 saat 30 dak
Ergime noktası	98-110°C
Kızdırma kaybı	max %5

Reçinede Akışkanlık Testi: 0,55 gr toz halinde reçine malzemesi 13 mm çapındaki ve 3 mm kalınlığındaki silindirik bir kalıp boşluğuna dökülerek sıkıştırılır ve tablet haline getirilir. Bu şekilde 2 tablet hazırlanır ve fırın içerisinde cam bir yüzey üzerine yerleştirilir. Sıcaklık 125oC’ye ulaştığında cam yüzeye 60o’lik açı verilir. Sıcaklığın etkisiyle akıcılığı artan reçine malzemesi uzamaya başlar. Uzama miktarı ölçülerek belirlenen sınırları aşp aşmadığı kontrol edilir.

Reçinede Sertleşme Zamanı Testi: 0,25 gr toz halinde reçine malzemesi cam deney tüpü içerisine dökülür ve daha önceden 125oC’ye kadar ısıtılmış gliserine daldırılır. Tüp içindeki malzeme bir çubuk yardımıyla sürekli karıştırılır. Toz halindeki malzeme öncelikle sıvı hale geçer ve daha sonra sertleşerek katı bir hal alır. Sertleşme hissedildiği anda kronometreden süre okunur ve belirlenen sınırları aşp aşmadığı kontrol edilir.

Reçinede Ergime Noktası Tayini: Ölçekli levha üzerinde toz numune düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa doğru hareket ettirilir. Levha üzerinde her adımda toz numune kademeli olarak ısıtılır ve ergimeye başladığı noktanın belirlenen sınırları aşp aşmadığı kontrol edilir.

Reçinede Kızdırma Kaybı Tayini: Porselen kap içerisinde 3 g toz halindeki reçine malzemesi tartılır ve 800oC’ye ısıtılmış fırında 2 saat bekletilir. Fırından çıkartılıp soğutulduktan sonra tekrar tartılarak ağırlık kaybı yüzdesi hesaplanır.

2.2. Fren Balata Malzemelerinin Üretiminde Kullanılan Makinalar

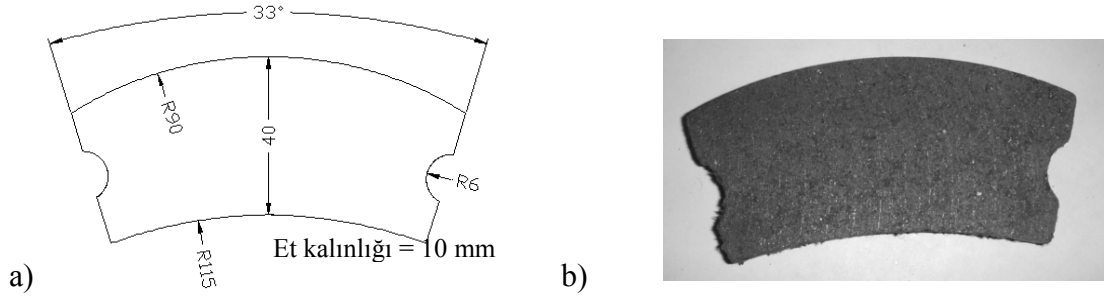
Fren balata malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üretilmektedir. Bu yöntem, sırası ile karıştırma, soğuk ve/veya sıcak kalıplama ve sinterleme aşamalarından oluşmaktadır. Bu çalışmadaki balata malzemeleri de sırasıyla karıştırıcı, sıcak kalıplama presi ve sinterleme fırından geçerek üretilmiştir. Her aşamada kullanılan üretim makinaları ve özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

2.2.1. Karıştırıcı

Karıştırma işleminde aramid lifleri ve kaya yünü malzemeleri lifli yapıya sahip oldukları için önceden bıçaklı bir mikserde belli bir hacme gelene kadar karıştırılmıştır. Balata malzemesini oluşturan diğer bileşenler ise toz halinde temin edilmiştir ve daha önceden karışımı yapılmış aramid lifleri ve kaya yünü ile birlikte laboratuvar tipi döner kollu (8'li) elektrikli mikserde 5 dak. süre ile karışım homojen bir hal alana dek karıştırılmıştır. Kullanılan mikser 36 kw güce sahip ve dönme hızı 2000 dev/dak'dır.

2.2.2. Sıcak kalıplama presi

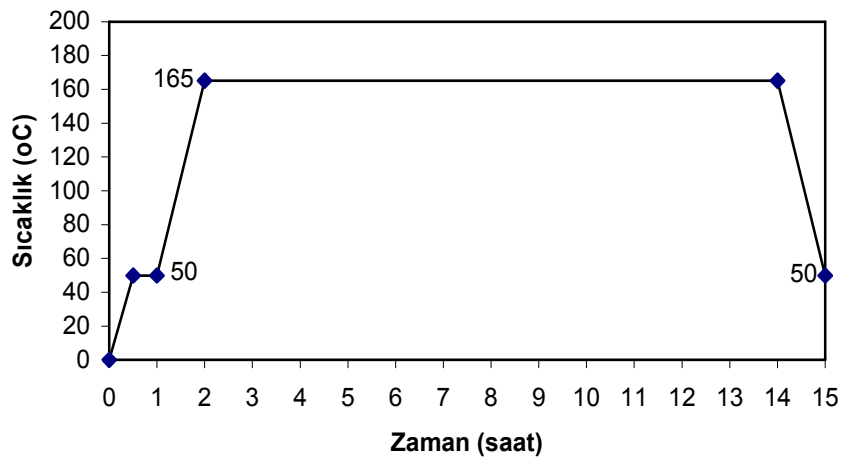
Sıcak kalıplamada basınç ve sıcaklık değerleri kontrol edilebilen hidrolik pres kullanılmıştır. Balata bileşenleri uygun oranlarda karıştırma işlemini takiben bu preslerde bulunan 8'li kalıp boşluğuna eşit ağırlıklarda (100 gr) dökülerek optimizasyon için belirlenen basınç ve sıcaklıkta 5 dak süre ile kalıplanmıştır. Kalıplama presinde alt ve üst çeneler arasındaki malzeme üst çenenin tek eksenli ve aşağı doğru hareketi ile şekillendirilmektedir. Basma işlemi esnasında iki kez yük boşaltılıp üst çene yukarı kaldırılarak kalıp boşluğunda bulunan balata malzemesinin bileşenleri arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan gazın çıkışına izin verilmiştir. Balata şeklini almış toz karışımın (Şekil 2.4) alt ve üst yüzeyleri taşlama makinasında temizlenip istenilen boyuta getirildikten sonra sinterleme fırınına verilmiştir.



Şekil 2.4. Sıcak kalıplama sonucunda oluşan balatanın a) teknik resmi ve b) fotoğraf görüntüsü.

2.2.3. Sinterleme fırını

Sinterlemede kullanılan fırın konveyörlü tipte bir sinterleme fırınıdır. Numuneler kalıplama işleminden sonra uygun sıcaklıklarda fırına verilerek tespit edilen sürelerde sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi ile preslenmiş numunelerde toz tanelerinin yüksek yüzey enerjileri minimuma indirilmiş ve tozlar arasında metalurjik bağlar oluşturulmuştur. Sinterleme fırınının giriş ve çıkış bölümlerinde balata malzemelerinin atmosferdeki oksijenden etkilenmesini önlemek amacıyla bütan gazı ile bir alev perdesi oluşturulmuştur. Ön sinterleme, sinterleme ve soğutma işlemlerini takiben balata malzemesi fırın içerisinde konveyörler üzerinde ilerleyerek sinterlenmektedir. Şekil 2.5’de bu çalışmada optimum kompozisyon oranlarının analizinde fırında konveyör üzerinde ilerleyen parçanın zamana bağlı sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Sinterleme fırınında zamana bağlı sıcaklık değişimi.

2.3. Çalışmada Yapılan Testler

Çalışmada yapılan testler genel olarak iki ana kısma ayrılmaktadır. Bunlar; balatanın tribolojik özelliklerini değerlendirmek için yapılan sürtünme – aşınma testleri Chase Sürtünme testi ve balatanın mekanik özelliklerini değerlendirmek için yapılan yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü testleridir. Bunların yanında balata malzemelerinin optik mikroskopta yüzey karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Sürtünme - Aşınma testleri

Bu çalışmada sürtünme-aşınma testleri Chase Sürtünme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Chase sürtünme-aşınma cihazı üzerinde yapılan testlerde balata numunesindeki aşınma oranı TS 555 standardına göre (2.1) no'lu denklemdeki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır;

$$w = \frac{1}{2\pi R} \times \frac{A}{f_m n} \times \frac{m_1 - m_2}{\rho} \quad (2.1)$$

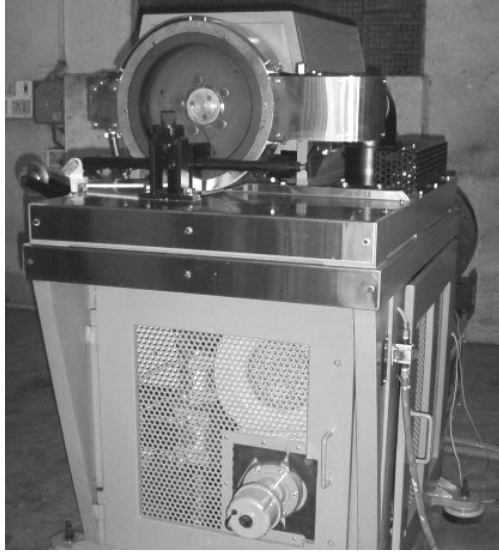
Burada; w özgül aşınma oranı (cm³/Nm), R dönen disk merkezi ile numune merkezi arasındaki uzaklık (m), A numunenin disk ile temas eden yüzey alanı (m²), n diskin dakikadaki devir sayısı, m₁ ve m₂ numunenin test öncesi ve sonrasındaki ortalama ağırlıkları (gr), ρ balatanın yoğunluğu (g/cm³) ve f_m ortalama sürtünme kuvveti (N) aşağıdaki bağıntıya (2.2) göre hesaplanmaktadır;

$$f_m = \mu \times F \quad (2.2)$$

$$F = P \times A \quad (2.3)$$

Burada; μ balatanın ortalama sürtünme katsayısı, F balata yüzeyine gelen normal kuvvet (N), P frenleme hidrolik basıncıdır (MPa).

Kullanılan sürtünme – aşınma test cihazı Pyramid Precision Engineering (2005 model) ürünü olan Chase Sürtünme cihazıdır. Bu test cihazı sürtünme malzemesini SAE J661 ve IS 2742 standartlarına göre test etmek için tasarlanmıştır (Şekil 2.6. ve Şekil 2.7.). Sistem dönen bir diske karşı uygulanan balata numunesinden oluşmaktadır.

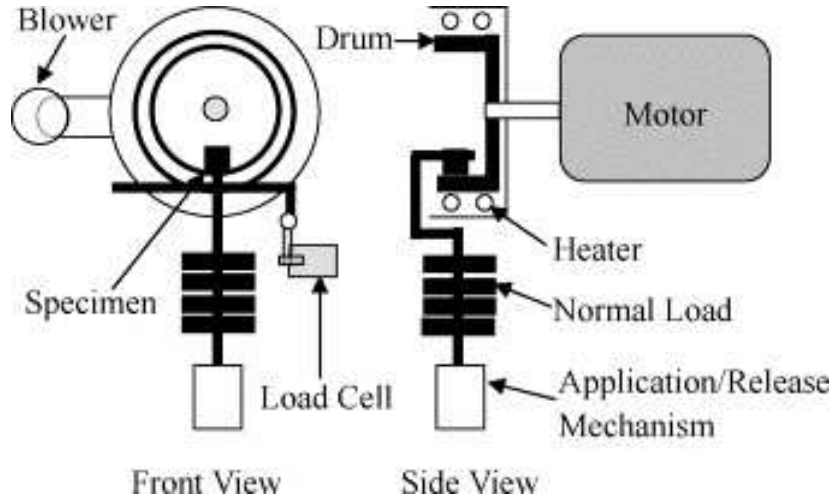


(a)



(b)

Şekil 2.6. Aşınma testlerinin gerçekleştiği aşınma cihazının a) testin gerçekleştirildiği kısım ve b) kontrol paneli.



Şekil 2.7. Chase sürtünme-aşınma test cihazının şematik resmi.

Diskin dönme hareketini 15 HP DC'lik bir motor sağlamaktadır ve hızı manyetik olarak algılanıp monitöre iletilmektedir. Disk ısıtma sistemi 2,5 kW'lık iki ısıtıcıdan oluşmakta ve ısıtma oranı sürekli değişen iki adet transformatör tarafından kontrol edilmektedir. Soğutma sistemi, dinamik olarak dengelenmiş ve pnömatrik olarak çalışan bir kelebek valfi ile ½ HP AC santrifüj üfleyici tarafından sağlanmaktadır. Soğutma oranı, manual olarak ayarlanabilen hava tampon valfi tarafından kontrol edilmektedir. Sıcaklık, diske bağlanmış J-tipi bir sıcaklık probu kullanılarak ölçülmektedir ve elektriksel sinyal olarak kontrol paneline veri göndermektedir. Çizelge 2.3'de cihaza ait diğer fiziksel özellikler tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 2.3. Sürtünme cihazının özellikleri.

Özellik	Değeri
Dönme hızı	411 d/dak
Yük	5,5-6,5 kg/cm ²

Kontrol paneli bir hard disk, floppy sürücü ve renkli ekrana sahip 12 bitlik arabirim kartı olan DOS ortamında çalışan PC'den oluşmaktadır. Test cihazından alınan veriler ve gönderilen girdiler buradan kullanılan yazılım tarafından kontrol edilmektedir. Yapılan testin sonuçları yazıcıdan çıktı olarak alınabilmektedir, Ek-3'de bir balata testine ait örnek sonuç gösterilmiştir.

Cihazda kullanılan ve balata ile eş çalışan kampana malzemesi DDL-20 (gri dökme demir) olup Ek-2'de teknik resmi verilmiştir. Kampana malzemesinin gerilme dayanımı 200 N/mm² ve sertliği Brinell Sertlik Ölçme yöntemine göre 210 HB'dir. Çizelge 2.4'de bu kampana malzemesinin kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 2.4. Deneyleerde kullanılan DDL-20 kampananın kimyasal kompozisyonu.

Malzeme	C	Si	Mn	S	P
% ağırlıkça	3,3	2,2	0,6	0,1	0,3

2.3.2. Mekanik testler

Balata malzemesinin tribolojik testlerinin yanı sıra yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik testlerinin yapılması frenleme performansını irdeleme açısından önemlidir.

Bu çalışmada Taylor-Hobson (Surtronic 3+) marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Pürüzlülük değeri 2,5 mm'lik (Lc) bir doğru boyunca iğne uçlu bir sensörün hareketiyle elde edilmektedir. Ölçülen değerın toleransı 0,2 µm'dir. Üretilen balata malzemelerinin yüzeyleri çok pürüzlü olduğundan yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sürtünme testinden sonra aşınmış yüzey üzerinden alınmıştır. Ölçümler kayma yönüne dik yönde ve her bir numuneden 3 farklı bölge üzerinden yapıp ortalaması alınmıştır.

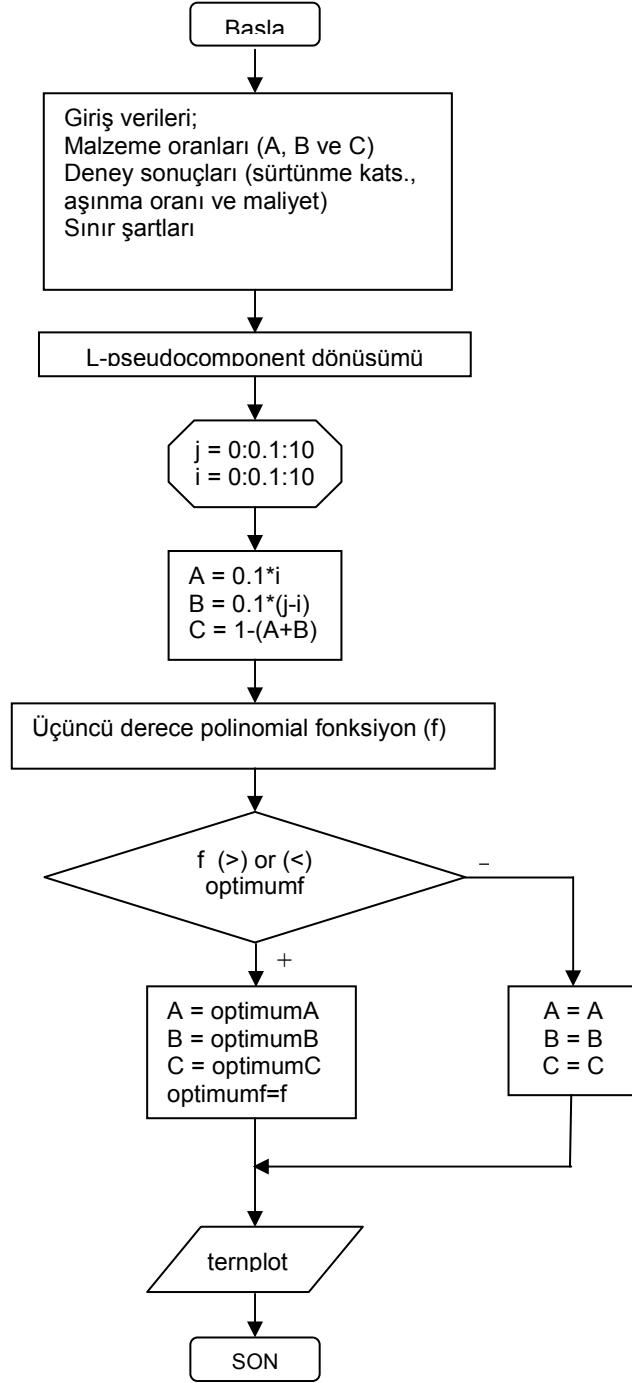
3.3.4. Mikroyapı karakterizasyonu

Çalışmada optik ve taramalı elektron mikroskobu olmak üzere iki farklı mikroskop kullanılmıştır. Kullanılan optik mikroskobun markası NIKON IO4, taramalı elektron mikroskobunun markası da Fa. LEO 1455 Vp.'dir. Balata malzemesinin metalik olmayan (organik) bileşenler içermesinden dolayı taramalı elektron mikroskobundaki görüntüler QBSD modunda çekilmiştir.

3.4. Optimizasyonda Kullanılan Programın Algoritması

Bu çalışmada teorik hesaplamalardan faydalanarak deneysel olarak optimum özelliklere sahip balata malzemesini tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu bakımdan kompozisyon oranlarının analizinde deneysel tasarım metodu kullanılarak balata malzemesi optimize edilmiştir.

Balata malzemesini oluşturan, görev bakımından beş farklı malzeme grubundan üçü; yapısallar, yağlayıcılar ve abrasivler çalışmada kullanılan 'Simplex Lattice Design' istatitiki analiz yöntemine göre oranları belirlenmiştir. Standart üretim parametreleri kullanılarak üretilen balatalar, sürtünme-aşınma testlerine tabi tutulduktan sonra, elde edilen sonuçlar 'Matlab'da hazırlanan programa girilerek analiz edilmiştir. Matlab'da oluşturulan programın algoritması Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Kompozisyon oranlarının optimizasyonu için oluşturulan programın algoritması.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışma, balata kompozisyonunun ve üretim parametrelerinin optimizasyonu olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Her iki aşamada da sürtünme katsayısı, aşınma oranı, maliyet, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi kriterler incelenerek kompozisyonlar karşılaştırılmıştır. Her bir kompozisyon numunesi “BM” (balata malzemesi) ve her bir üretim parametresi numunesi de “ÜP” olarak isimlendirilmiştir.

3.1. Yeni Balata Kompozisyonun Geliştirilmesi

Balatayı oluşturan beş malzeme grubundan üçünün (yapısal malzemeler, yağlayıcılar ve abrasivler) içerdiği bileşenlerin oranları balata malzemesi içerisine ‘Simplex Lattice Design’ deneysel tasarım metoduna göre katılarak gerekli testler yapılmıştır. Bu yöntem uygun olarak her bir malzeme grubu üç farklı bileşenden meydana gelmiştir ve her bir grup için toplam 7 farklı kompozisyon oluşturulmuştur. Her bir balata kompozisyonu Çizelge 3.1’de verilen üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir ve sürtünme-aşınma testleri ile yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Yeni balata kompozisyonunun geliştirilmesinde farklı kompozisyondaki tüm balata malzemelerinin sürtünme-aşınma testleri Chase sürtünme-aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Her bir malzeme grubunda optimum özellik sağlayan kompozisyon hesaplanarak üretimi ve üç numune test edilip ortalaması alınmıştır.

Çizelge 3.1. Balataların üretiminde kullanılan üretim parametreleri.

Üretim Aşamaları	Üretim Parametreleri	Değerleri
Karıştırma	Zaman (dak)	10
Kalıplama	Zaman (dak)	5
	Sıcaklık (°C)	150
	Basınç (MPa)	7,5
Sinterleme	Zaman (saat)	12
	Sıcaklık (°C)	165

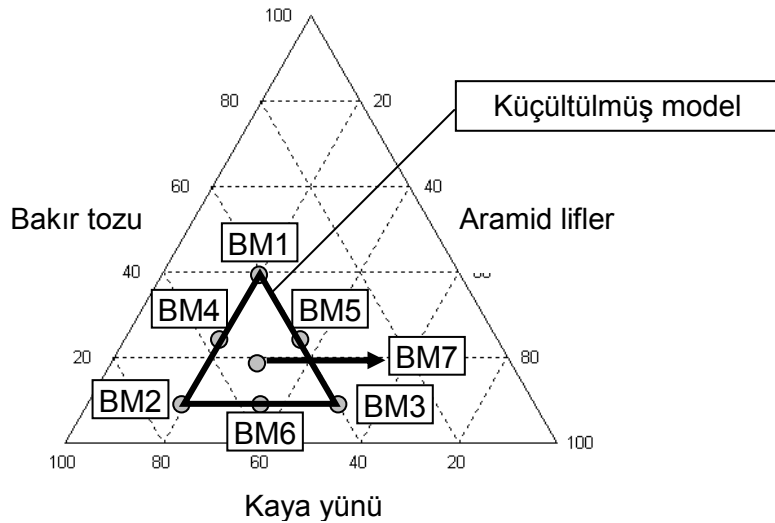
3.1.1. Yapısal malzemelerin optimizasyonu

Yapısal malzemelerin optimizasyonunda karışım, Simplex - Lattice Design metoduna göre belirlenen oranlarda (Çizelge 3.2) oluşturulmuştur. Bağlayıcı, yağlayıcı, abrasiv ve dolgu malzemelerinin oranları sabit tutulmuştur. Balataların üretimi sabit koşullarda ve Çizelge 3.1’de verilen üretim parametreleriyle üretilmiştir.

Çizelge 3.2. Balata malzemesinin kompozisyonu (% ağırlıkça oranları).

Malzemeler	BM1	BM2	BM3	BM4	BM5	BM6	BM7
Bakır tozu	10	2	2	6	6	2	4,664
Kaya yünü	10	18	10	14	10	14	12,664
Aramid lifleri	5	5	13	5	9	9	7,664
Fenolik reçine	8	8	8	8	8	8	8
Lastik tozu	2	2	2	2	2	2	2
Grafit tozu (doğal)	9	9	9	9	9	9	9
Coke	7	7	7	7	7	7	7
ZnS	4	4	4	4	4	4	4
ZrSiO ₄	6	6	6	6	6	6	6
Fe ₂ O ₃	4	4	4	4	4	4	4
Cashew tozu	5	5	5	5	5	5	5
BaSO ₄	15	15	15	15	15	15	15
CaCO ₃	7	7	7	7	7	7	7
Wollastonite	8	8	8	8	8	8	8
Toplam	100	100	100	100	100	100	100

Şekil 3.1’de yapısal malzemeler için seçilen noktaların Simplex-Lattice Design Metoduna göre üçgen model üzerindeki yerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yapısal malzeme oranlarının küçültülmüş modeli ve üçgen modeldeki yerleri.

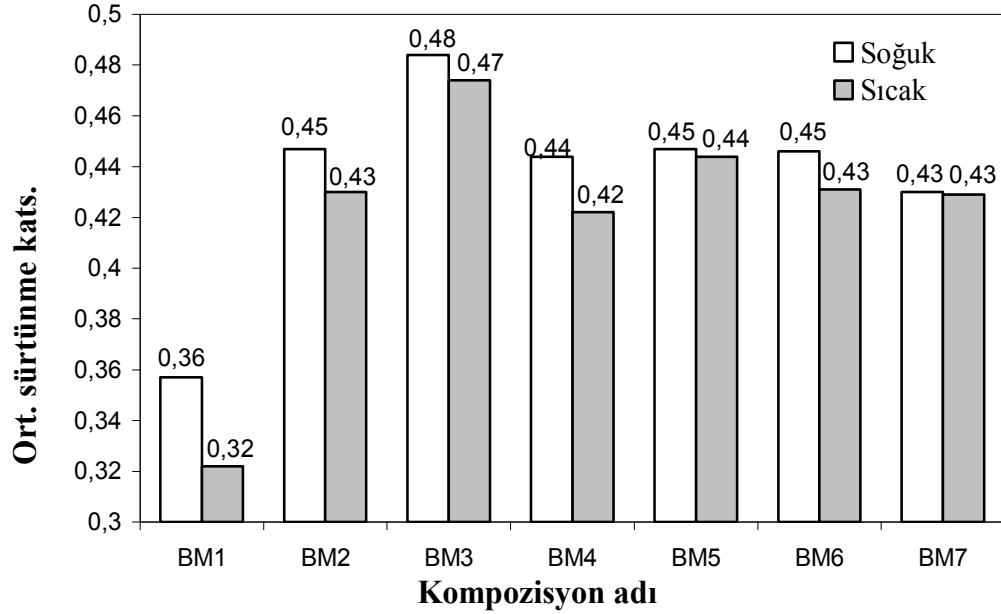
Bu malzemelerin yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Yoğunluk genel olarak bakır oranıyla artış gösterirken (BM1, BM4 ve BM7), aramid lif oranıyla azalmıştır (BM3, BM5 ve BM7). Yüzey pürüzlülüğü ise balata içerisindeki lifli malzeme oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. Kaya yünü ve aramid liflerin artışıyla yüzey pürüzlülüğünde artış gözlenmiştir (BM2, BM3, BM5 ve BM6).

Çizelge 3.3. Balata kompozisyonlarının fiziksel özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
BM1	1,99	8,8
BM2	1,93	11,6
BM3	1,60	12,3
BM4	2,02	10,2
BM5	1,80	11,7
BM6	1,74	14,2
BM7	1,96	9,8

Çizelge 3.1. deki üretim parametrelerine göre üretilen balataların sürtünme-aşınma test sonuçlarına göre soğuk ve sıcak olmak üzere iki farklı sürtünme katsayısı elde edilmiştir. 205°C’nin altında ölçülen sürtünme katsayıları soğuk, üzerindeki ise sıcak olarak isimlendirilmektedir. Şekil 3.2’de soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının balata kompozisyonu türüne bağlı değişimi gösterilmiştir. Soğuk sürtünme katsayısı sıcak sürtünme katsayısına göre her zaman daha yüksek değerlere sahiptir. Çünkü 205°C’nin altında balata-disk ara yüzeyindeki aşınma oranı yüzeyde sürtünme filmi oluşturamayacak kadar azdır (veya çok ince bir film meydana getirebilir) ve sürtünme filmi ara yüzeydeki temasın kesilmesinde ve sürtünme katsayısının düşmesinde büyük rol oynar. Bu yüzden yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısının düşmesinin başta gelen sebebi, sürtünme filmidir. En yüksek ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayıları BM3 balatasında elde edilmiştir. Buna karşın en düşük ortalama sürtünme katsayısı BM1 balatasında görülmektedir. Ayrıca bu balatanın ortalama sıcak sürtünme katsayısı 0,32 gibi düşük bir değerdir. Soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı arasındaki fark ne kadar fazla ise balatanın sürtünme kararlılığı okadar düşüktür.

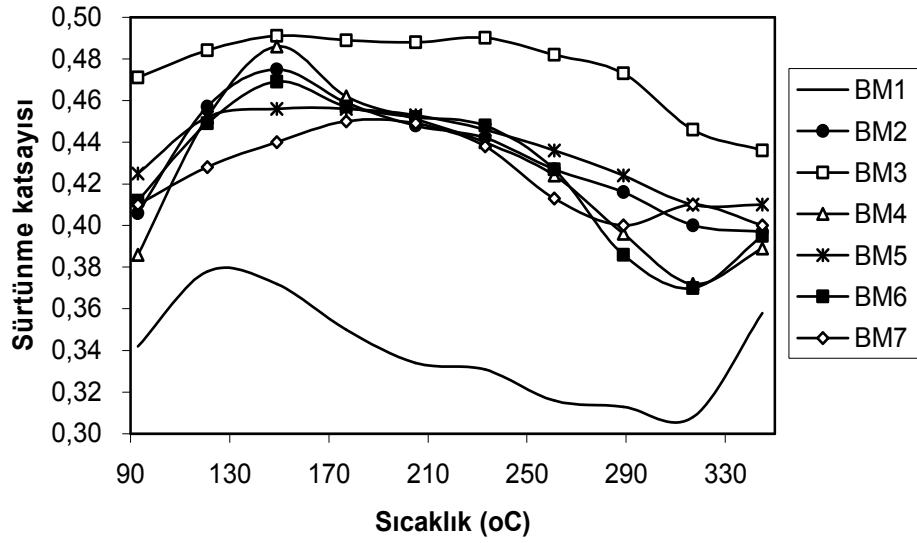
Güvenli bir sürüş için sürtünme katsayısının yüksek olmasının yanı sıra bu katsayının sürekli (kararlı) olması istenir. Yapılan testlerden 0,01'lik bir farkla en yüksek kararlılığa sahip balata malzemesinin BM7 olduğu görülür. Ancak bu balatanın ortalama sürtünme katsayısı değeri BM2, BM3, BM5 ve BM6'ya göre daha düşüktür.



Şekil 3.2. Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının balata kompozisyonuna göre değişimi.

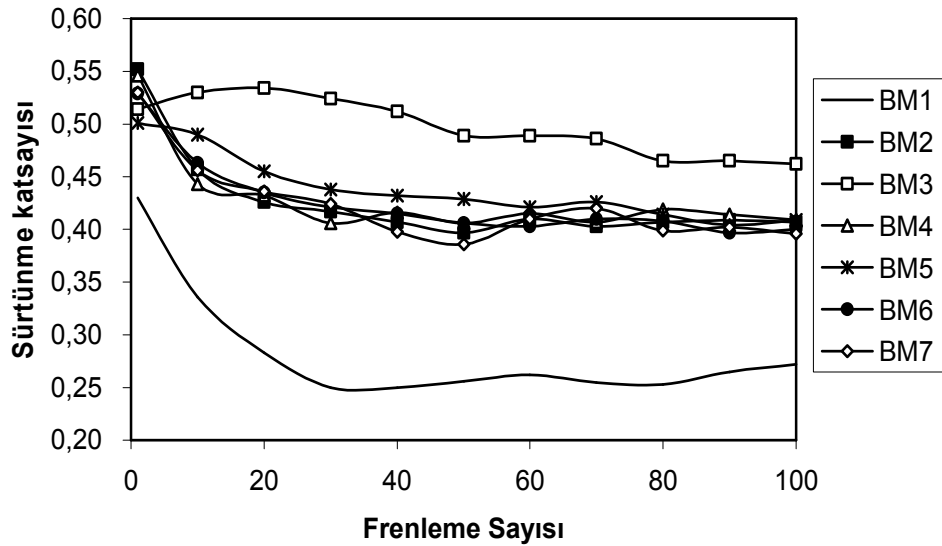
Çizelge 3.2 ile karşılaştırıldığında, BM3 balatasında aramid lif oranı en yüksek değerinde iken BM1'de bakır tozu en yüksek, BM2'de ise kaya yünü en yüksek değerini alır. Dolayısıyla aramid lif oranının artmasıyla ortalama sürtünme katsayısı artmıştır, bakır tozu oranının artmasıyla ise azalmıştır genellemesi yapılabilir. Bakır oranının artmasıyla birlikte yüksek sıcaklıkta disk-balata ara yüzeyinde oluşan bakır oksit miktarı artmıştır. Bu sebeple sürtünme katsayısı düşmüştür (Jang ve ark. 2003).

Sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 3.3'de verilmiştir. Sürtünme katsayısındaki en kararsız değişimi BM1, BM2, BM4 ve BM6 sergilemiştir, en kararlı değişim ise BM5 ve BM7'de görülmüştür.



Şekil 3.3. Yapısallar için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi Şekil 3.4’de verilmiştir. En yüksek performansı BM3 balatası göstermiştir. BM1 en kötü performansa sahip olmuştur. Geri kalan diğer balataların performansları genel olarak aynı olduğu görülmüştür.

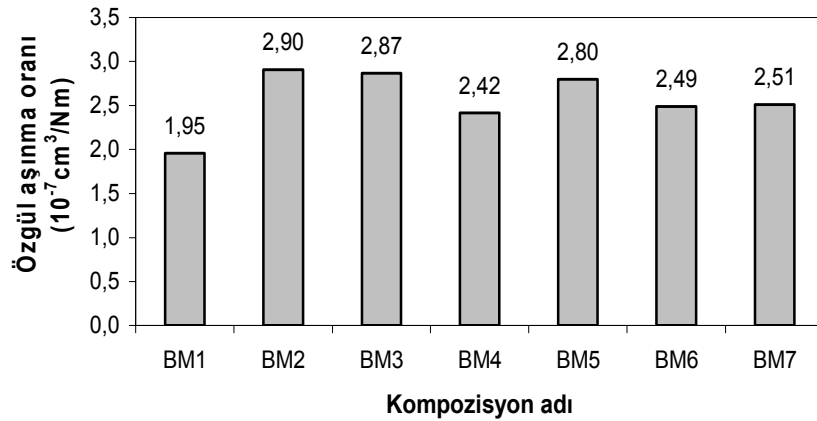


Şekil 3.4. Yapısallar için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Bir frenleme sisteminde yer alan balata malzemesinin sergilediği sürtünme katsayısı değişimi, o balatayı tanımlamak için yeterli değildir. Sürtünme katsayısı çok yüksek olsa bile ömrü az olan bir balatanın, maliyeti ve değiştirme süreleri önemli bir dezavantaj oluşturur. Bu bakımdan balata ömrünü belirleyen aşınma oranı da en az

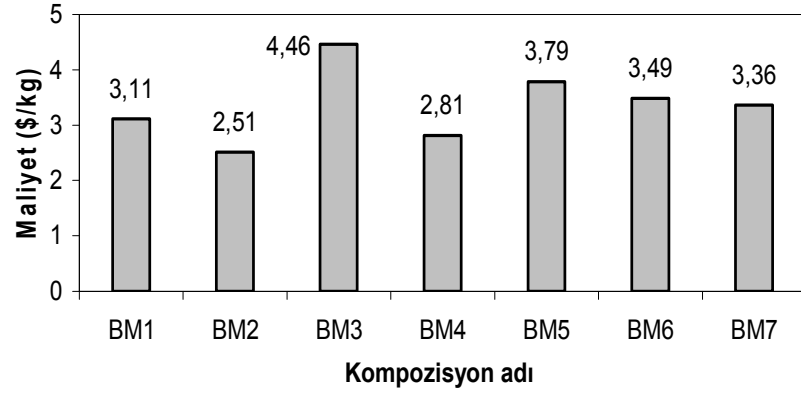
sürtünme katsayısı kadar önemli ve gereklidir. Her iki özellik birlikte değerlendirilip optimum performansı sağlayan balata malzemelerinin seçimine gidilmelidir.

Şekil 3.5’de test edilen balataların özgül aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranı en yüksek olan balata malzemesi, sürtünme katsayı değişimleri en yüksek ve kararlı olan BM3’tür. Buna karşın, en düşük aşınma oranı BM1’de görülmüştür. Bunun sebebi daha önce de açıklandığı gibi, bakır oranının artmasıyla birlikte yüksek sıcaklıkta disk-balata ara yüzeyinde oluşan bakır oksit miktarının artması ve disk-balata temasının engellenmesi olduğu düşünülmektedir. Kaya yünü oranının maksimum olduğu BM2 ise BM1 ve BM3’ün arasında, genelde yüksek bir aşınma oranına sahip olmuştur. BM6 ise BM4, BM5 ve BM7’ye göre çok fazla olmasa da düşük bir aşınma oranı sergilemiştir. Bu malzemede, bakır tozu en düşük oranda yer alırken kaya yünü ve aramid lifleri ortalama bir değerde kullanılmıştır.



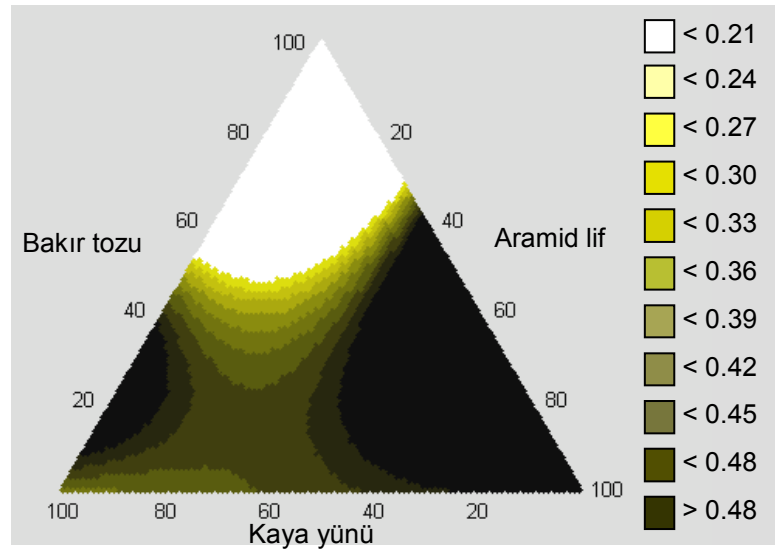
Şekil 3.5. Yapısallar için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.

Balataların maliyeti de en az tribolojik performansı kadar önemlidir. Balatanın gösterdiği performans ne kadar yüksek olursa olsun karışımında kullanılan malzemelerin maliyetleri yüksek ise bu balatanın tercih edilme oranı oldukça düşük olur. Bu bakımdan tribolojik performansın yanı sıra ekonomik açıdan da balata malzemesinin değerlendirilmesi optimum tasarım için kaçınılmazdır. Buna göre çalışmada oluşturulan her bir kompozisyonun maliyet değişimi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Yapısallar için kompozisyon türüne bağlı maliyet değişimi.

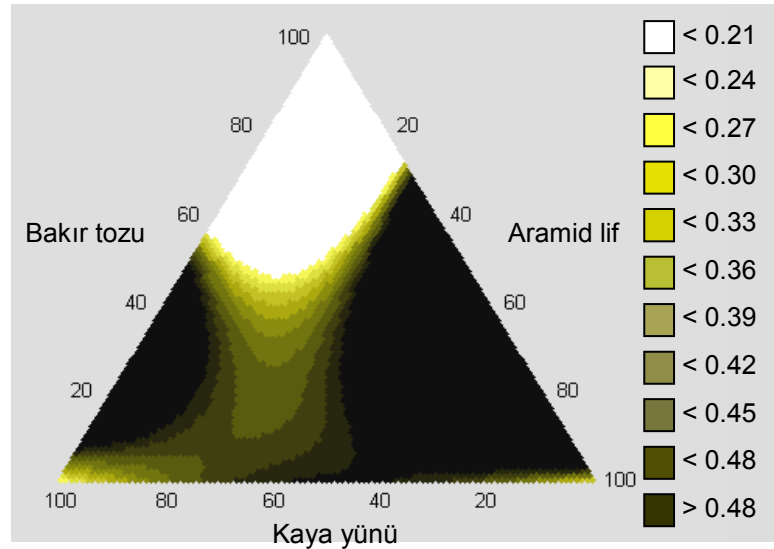
Maliyetleri karşılaştırıldığında, incelenen kompozisyonlar arasında en pahalı olanın BM3 olduğu görülür. Sürtünme özellikleri çok iyi olan bu malzemenin, aşınma oranı ve maliyeti çok yüksek çıkmıştır. En düşük maliyet ise 2,51 \$/kg ile BM2’de olduğu görülür. Ancak bu malzemenin hem aşınma oranı çok yüksek, hem de sürtünme özellikleri düşük değerlerde elde edilmiştir. Sürtünme, aşınma ve maliyet üçü birlikte değerlendirilip optimum malzeme oranları seçilmelidir. Bunun için bu çalışmada gerek deney sayısını en azadüşürmek gerekse optimum sonuçları elde etmek amacıyla Simplex-Lattice Design yöntemi kullanılmıştır. Yapısalların sıcak sürtünme katsayısı, soğuk sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve maliyet optimizasyonu için Matlab’da hazırlanan program kullanılarak Şekil 3.7’deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Yapısalların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen ortalama sıcak sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.

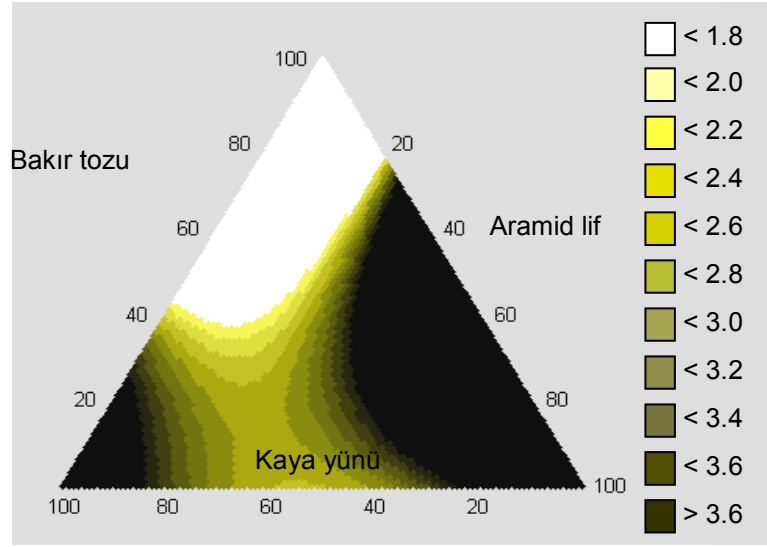
Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere kaya yünü ve bakır tozu oranı azaltılıp, aramid lif oranı arttırıldıkça sıcak sürtünme katsayısı yükselmiştir. Bunun tam tersi durumunda ise sıcak sürtünme katsayısı düşmüştür. Bunun yanında, aramid lif ve kaya yünü oranı arttırılıp, bakır tozu oranı düşürüldükçe sıcak sürtünme katsayısında yine bir yükselme meydana gelmiştir.

Soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi Şekil 3.8'de verilmiştir. Sıcak sürtünme katsayısındaki değişim, soğuk sürtünme katsayısı değişiminde de görülmüştür. Aramid lif oranının arttırılıp, kaya yünü ve bakır tozu oranının azaltılmasıyla veya kaya yünü oranının arttırılıp, aramid lif ve bakır tozu oranının azaltılmasıyla soğuk sürtünme katsayısının arttığı gözlenmiştir. En düşük sürtünme katsayısına sahip olan bölgede aramid lif ve kaya yünü oranının minimum, bakır tozunun maksimum olduğu teorik olarak şekil üzerinde çıkan sonuçlardan görülmektedir.



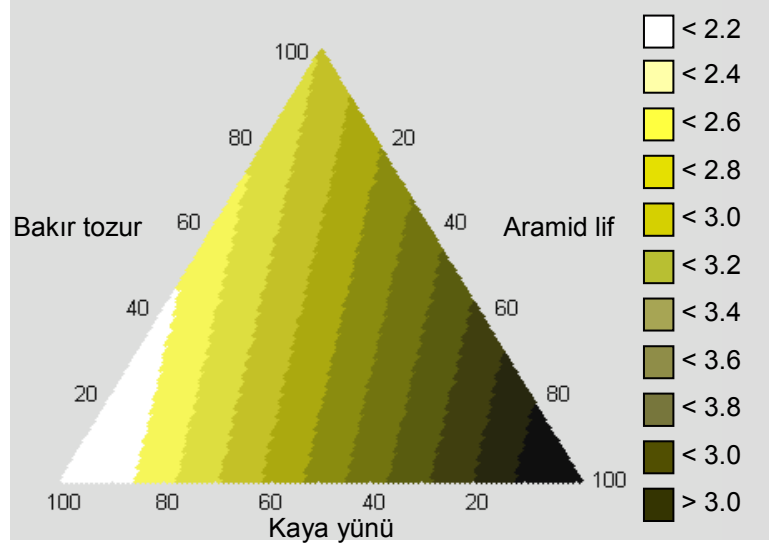
Şekil 3.8. Yapısalların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen ortalama soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.

Aşınma oranının malzeme oranlarına göre değişimi Şekil 3.9'da verilmiştir. En düşük aşınma oranı aramid liflerin %20'den az ve bakır tozlarının %50'den fazla olduğu bölgede görülmüştür. Ancak bu bölgede ortalama sürtünme katsayısı çok düşük değerlerde hesaplanmıştır (Şekil 3.7-4.8). Aşınma oranının yine oldukça düşük olduğu kaya yününün %40-70, aramid liflerin %60-100 ve bakır tozunun %40-0 ile sınırlanan bölgede ise sürtünme katsayısı uygun değerlerde elde edilmiştir.



Şekil 3.9. Yapısalların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen özgül aşınma oranının ($10^{-7} \text{cm}^3/\text{Nm}$) malzeme oranlarına göre değişimi.

Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'dan da görüldüğü gibi sürtünme katsayıları yüksek olan bölgelerin aşınma oranı değerleri genelde yüksek çıkmıştır. Bu karışımların tribolojik özelliklerinin yanı sıra maliyet açısından da incelenmesi gerekir (Şekil 3.10).

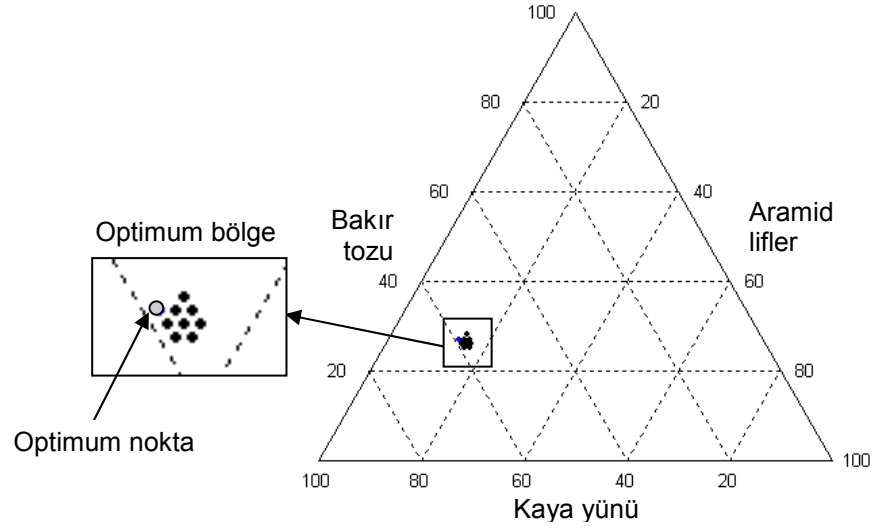


Şekil 3.10. Yapısalların optimizasyonunda malzeme oranlarına göre \$/kg cinsinden balata malzemesinin maliyet değişimi.

Şekil 3.10'dan da görüldüğü gibi, aramid lif oranı artışıyla balata maliyeti oldukça yüksek değerler almaktadır. Bu bakımdan aramid lif oranının gerek yüksek aşınma oranı gerekse de yüksek maliyeti sebebiyle belirli sınırlar içerisinde tutmak gerekir. Kaya yünü oranı yüksek olan malzemelerin maliyeti düşük olmasına rağmen, tribolojik

özellikler sadece belirli bölgelerde uygun değerlere sahip olabilmektedir. Bakır tozunun ise maliyeti ortalama bir değere sahip olmakla birlikte balatanın sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürür. Ancak düşük aşınma oranı sebebiyle belirli oranlarda balata malzemesi içerisinde kullanılması avantaj sağlar.

Şekil 3.7-3.10 arasında elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre bakır tozu, kaya yünü, aramid liften oluşan bir yapısal grubu için optimum oranlar Şekil 3.11’de verilen bölge ile gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Yapısal optimizasyonda elde edilen optimum bölge ve optimum nokta.

Yapısal için optimum bölge olarak tanımlanan ve Şekil 3.11’de gösterilen bölge için sınır şartları ve optimum noktanın hesaplanan özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Yapısal optimizasyonda sınır şartları.

Özellikler	Ortalama sıcak sürt. kats.	Ortalama soğuk sürt. kats.	Aşınma oranı ($10^{-7} \text{cm}^3/\text{Nm}$)	Maliyet (\$/kg)	Sıcak ve soğuk sürt. kats. arasındaki fark
Sınır şartları	>0,430	>0,430	<2,45	< 2,80	<0,05
Optimum nokta	0,431	0,440	2,43	2,49	0,009

Teorik olarak optimum bölge kabul edilen sınırlar içerisinde bakır tozu, kaya yünü ve aramid lif oranları;

$$\%6,25 < \text{Bakır tozu} < \%7; \quad \%14,25 < \text{Kaya yünü} < \%14,75; \quad \%3,50 < \text{Aramid lif} < \%4,75$$

sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu sınırlar içerisinde yer alan en iyi özelliklere sahip ve maliyeti en düşük balatanın kompozisyonu Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Bu balatanın kompozisyon oranları (100 gr’lık bir balata karışımı için) ve üretim sonrasında ölçülen mekanik özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Yapısal optimizasyonunda hesaplanan optimum oranlar ve bu kompozisyon oranlarında üretilen balatanın mekanik özellikleri.

Yapısal türü	Karışım içindeki oranları (% ağırlıkça)	Balatanın yoğunluğu (g/cm ³)	Balatanın yüzey pürüzlülüğü (Ra)
Bakır tozu	6,75	2,02	10,3
Kaya yünü	14,75		
Aramid lif	3,5		

Çizelge 3.6’da bu balatanın ortalama sıcak sürtünme katsayısı, soğuk sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gibi tribolojik özellikleri ve maliyeti verilmiştir. Deneysel sonuçlar deneysel tasarım yöntemiyle hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılıp hata payı yüzdesi bulunmuştur. Optimum olarak kabul edilen kompozisyondan üç adet numune test edilip ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere teorik ve deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın değerlere sahiptir. Ortalama sıcak sürtünme katsayısında %2,6, ortalama soğuk sürtünme katsayısında %1,8 ve aşınma oranında sadece %0,41’lik bir hata payı ile sonuçlar gerçek sonuçlara oldukça yakın değerlerde hesaplanmıştır.

Çizelge 3.6. Yapısal optimizasyonu gerçekleştirilen balatanın tribolojik özellikleri.

Malzeme	Ort. sıcak sürt. kats.	Ort. soğuk sürt. kats.	Aşınma Oranı (10 ⁻⁷ cm ³ /Nm)	Balata Maliyeti (\$/kg)
Deneysel sonuçlar	0,422	0,440	2,41	2,49
	0,419	0,432	2,45	
	0,426	0,438	2,42	
Deneysel ort.	0,420	0,436	2,42	
Teorik	0,431	0,440	2,43	
% Hata payı	%2,6	%1,8	%0,41	

3.1.2. Yağlayıcı malzemelerin optimizasyonu

Yağlayıcı malzemelerin optimizasyonunda karışım, Simplex - Lattice Design metoduna göre belirlenen oranlarda (Çizelge 3.7) oluşturulmuştur. Bu aşamada

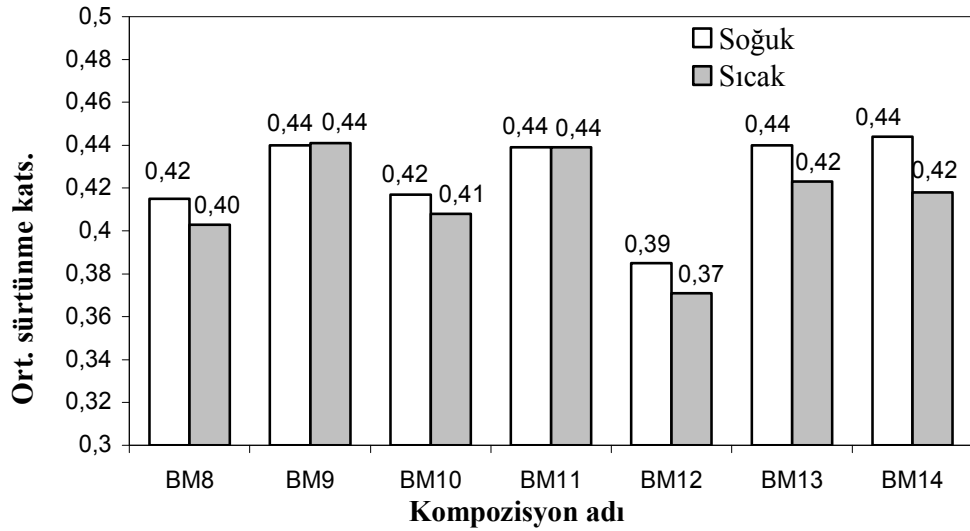
oranından bağımsız olarak artmıştır (BM11, BM13 ve BM14). Yüzey pürüzlülüğünün de en fazla ZnS'den etkilendiği ve ZnS oranının artışıyla arttığı gözlenmiştir (BM10, BM12, BM13 ve BM14).

Çizelge 3.8. Balata kompozisyonlarının fiziksel özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
BM8	1,99	9,6
BM9	1,99	9,2
BM10	1,93	11
BM11	1,98	9,8
BM12	1,92	10,2
BM13	2,06	11,8
BM14	2,09	10,6

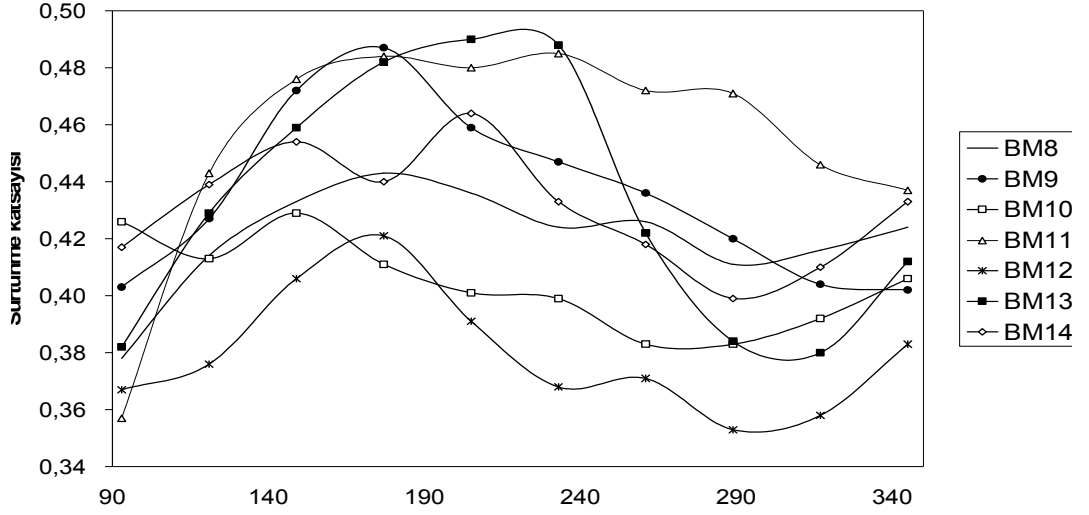
Şekil 3.13'de sürtünme testi sonucunda elde edilen soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının balata kompozisyonu türüne bağlı değişimi gösterilmiştir. Sonuçlara göre, kullanılan yağlayıcıların soğuk sürtünme katsayısı üzerinde çok fazla etkiye sahip olmadıkları görülmüştür. Ancak yüksek sıcaklıklarda malzemelerin özelliklerinin ve etkilerinin değişmesi sebebiyle sıcak sürtünme katsayısı 0,44 ile 0,37 arasında değişmiştir. BM9 ve BM11 balatalarında ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayıları en yüksek değerlerde ve eşit olarak elde edilmiştir. Ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının birbirine eşit olması bu balataların kararlılığını gösterir ve sürtünme katsayıları açısından diğerleri ile karşılaştırıldığında en iyi performans bu balatalarda görülmüştür. BM9'da coke tozu karışıma maksimum oranda, grafit ve ZnS tozu ise minimum oranda katılmıştır. BM11'de coke ve grafit tozu karışıma ortalama bir oranda, ZnS yine minimum oranda katılmıştır. Dolayısıyla ZnS tozunun sürtünme katsayısını düşürdüğü, grafit tozunun belirli bir orana kadar sürtünme katsayısını arttırdığı ve coke tozunun yüksek ve kararlı sürtünme katsayısı üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu görülmüştür. Ancak BM12'de coke ve ZnS tozlarının ortalama oranlarda karıştırılması ile oldukça düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Buradan da coke ve ZnS tozlarının yüksek oranlarda kullanılması durumunda sürtünme katsayısı üzerinde olumsuz etkiye sahip oldukları görülmüştür. BM13'de ise grafit ve ZnS tozları karışıma ortalama oranlarda karıştırılıp, coke minimum oranda katılmıştır ve elde edilen ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri yüksek ancak kararsızdır. Benzer sonuçlar BM14 balatasında da görülmektedir. Bu balata malzemesinde üç yağlayıcı malzeme

karışıma izafi olarak eşit oranlarda katılmıştır. BM8’de maksimum oranda grafit tozu ve BM10’da maksimum oranda ZnS kullanılmıştır ve genel olarak sürtünme performanslarının benzer olduğu görülmüştür. Ancak BM10 balatasının yüksek sıcaklıklarda BM8’e göre biraz daha kararlı sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür.



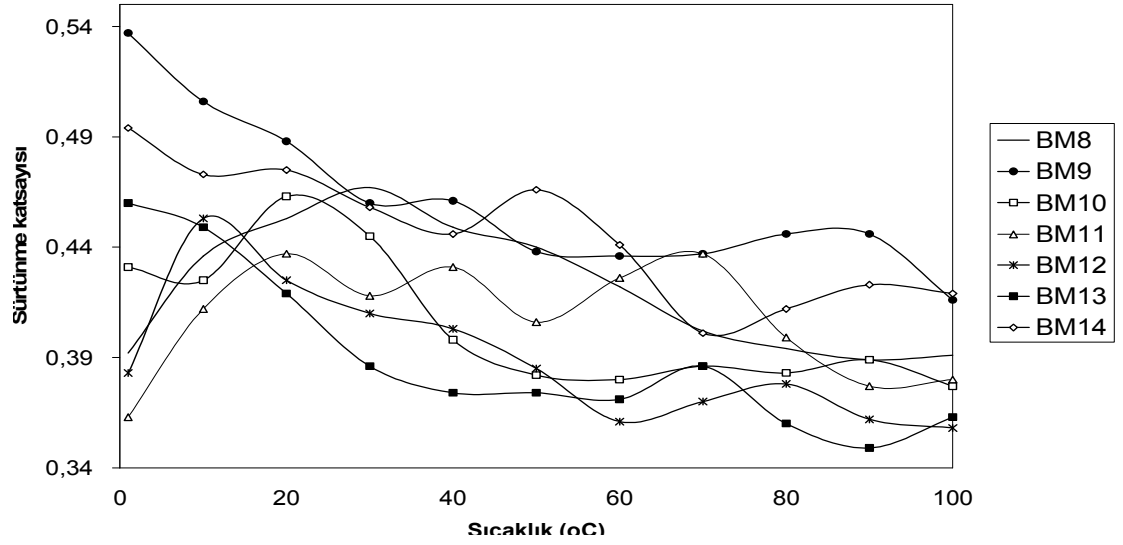
Şekil 3.13. Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının balata kompozisyonuna göre değişimi.

Sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 3.14’de verilmiştir. Sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.14’den de görüldüğü gibi sıcaklığa bağlı en büyük değişim BM12, BM13 ve BM14’de görülmüştür. Bu balata malzemelerinin ortak özelliği ağırlıkça %4,33 ve %5,5 oranlarında ZnS içermeleridir. Maksimum ZnS içeren BM10 balatasının genel olarak daha kararsız bir değişim sergilediği gözlenmiştir. Buradan da, belirli ZnS oranlarında balatanın sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısındaki kararlılığının oldukça düşük olduğu sonucuna varılır.



Şekil 3.14. Yağlayıcılar için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

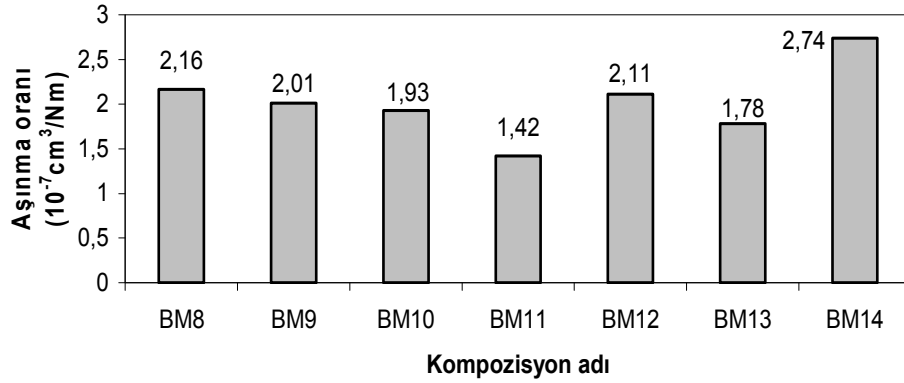
Frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi Şekil 3.15'de verilmiştir. En kararlı değişim BM8 ve BM9 balatasında görülmüştür. Bu balata malzemelerinin her ikisinde de minimum oranda (ağırlıkça %2) ZnS bulunmaktadır.



Şekil 3.15. Yağlayıcılar için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

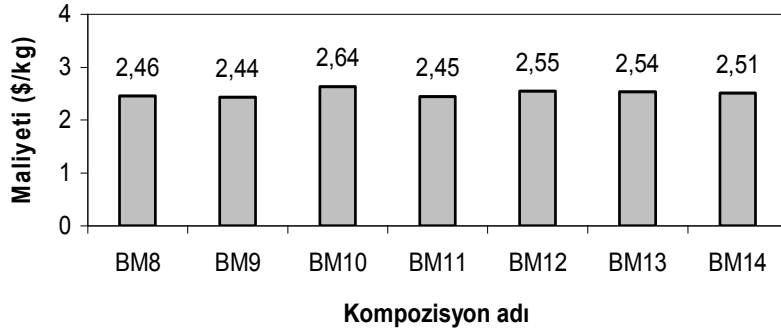
Şekil 3.16'da test edilen balataların aşınma oranları sonuçları verilmiştir. Aşınma oranı en yüksek olan balata malzemesi, üç yağlayıcı malzemenin karışımında izafi olarak eşit oranlarda yer aldığı BM14 balatasıdır. BM11 yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısına sahip olmasının yanı sıra en düşük aşınma oranına sahip olmuştur. BM9 balata malzemesi BM11 ile benzer sürtünme katsayısı değişimine sahip olmasına karşın aşınma oranı 2,01 gibi oldukça yüksek çıkmıştır. BM11'de BM9'a göre grafit tozu oranı

daha yüksek ve coke oranı daha düşüktür. BM8’de de grafit tozu oranı çok yüksek olmasına karşın coke oranı çok düşük olduğu için aşınma oranı çok yüksek değerlerde elde edilmiştir. Dolayısıyla ZnS oranının minimum olduğu ve grafit ve coke tozunun belirli oranlarda kullanılması durumunda aşınma oranının en düşük seviyelerde olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.16. Yağlayıcılar için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.

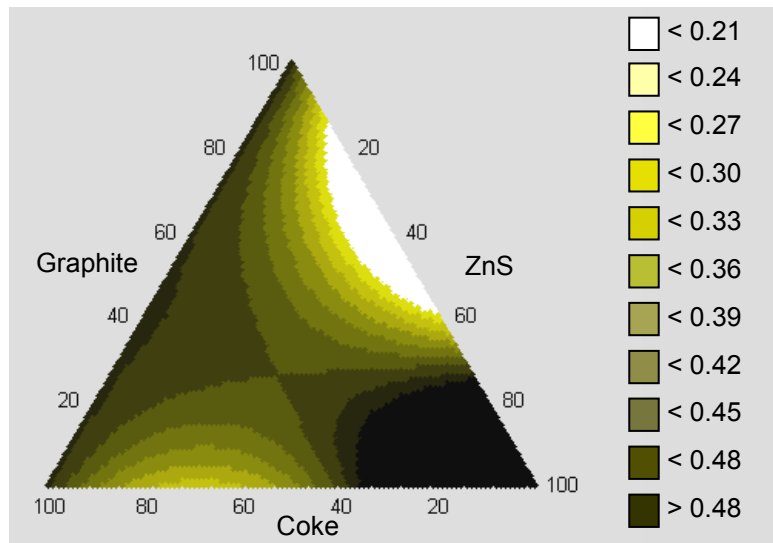
Tribolojik performansın yanı sıra ekonomik açıdan da balata malzemesinin değerlendirilmesi optimum tasarım için kaçınılmazdır. Buna göre çalışmada oluşturulan her bir kompozisyonun maliyet değişimi Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Yağlayıcılar için kompozisyon türüne bağlı balata maliyeti değişimi.

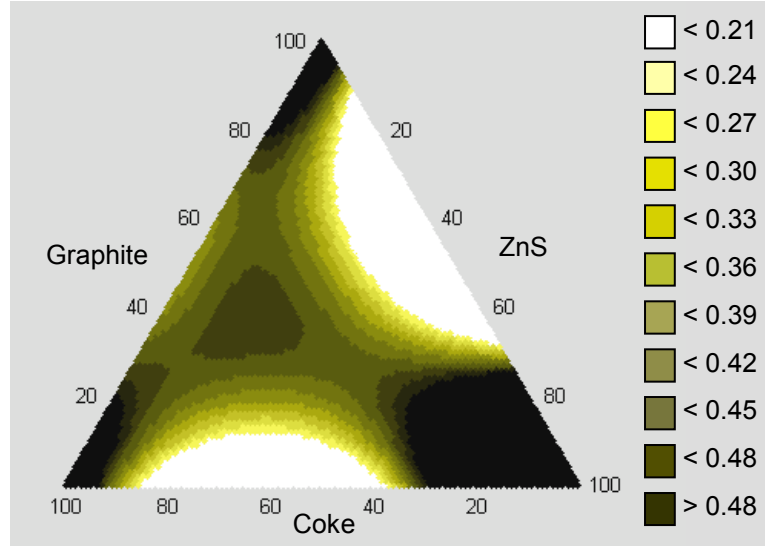
Maliyetleri karşılaştırıldığında, incelenen kompozisyonlar arasında en pahalı olanın BM10 olduğu görülür. Sürtünme özellikleri çok iyi olan ve maliyetide en düşük olan BM9’un ise aşınma oranı çok yüksek çıkmıştır. BM11 balatası ise iyi sürtünme ve aşınma özelliklerine sahip olması ile birlikte maliyeti 2,45 \$/kg gibi diğerlerine göre daha uygun değerdedir. Sürtünme, aşınma ve maliyet üçü birlikte değerlendirilip optimum malzeme oranları seçilmelidir. Yağlayıcıların sıcak sürtünme katsayısı, soğuk

sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve maliyet optimizasyonu için Matlab’da hazırlanan program kullanılarak Şekil 3.18’deki sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere yağlayıcı grubu içerisinde coke tozunun azalması (özellikle %10’dan daha düşük oranlarda), grafit tozunun %40’dan daha fazla ve ZnS’nin %10 ile %60 oranında kullanılması durumunda oluşan bölgede sıcak sürtünme katsayısı en düşük seviyelerde elde edilmiştir. %60’dan daha fazla ZnS kullanılması durumunda grafit tozu ve coke tozu oranından bağımsız olarak genelde yüksek sıcak sürtünme katsayıları gözlenmektedir. Coke ve grafit tozu oranının azaltılıp ZnS oranının artırılmasıyla en yüksek sıcak sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

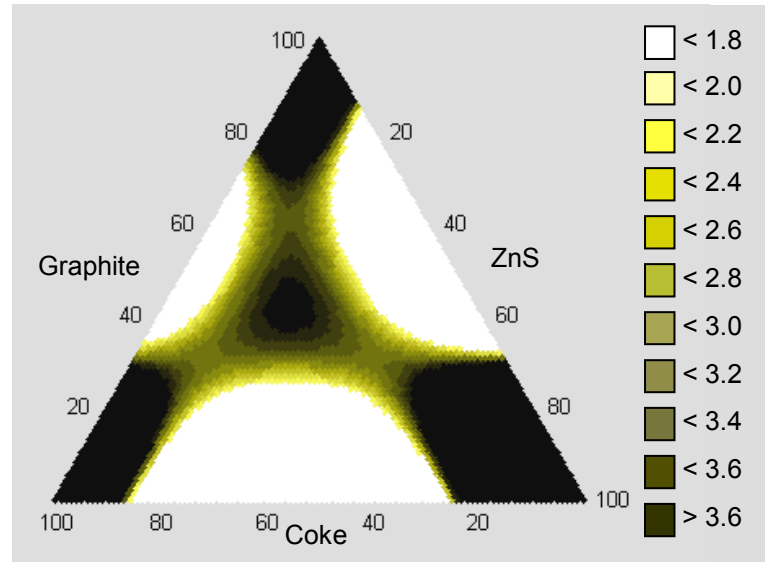


Şekil 3.18. Yağlayıcıların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen sıcak sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.

Soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi Şekil 3.19’da verilmiştir. Sıcak sürtünme katsayısındaki değişim, soğuk sürtünme katsayısı değişiminde de genelle olarak benzer görülmüştür. Ancak burada sınırlar daha belirgin olarak görülmektedir. Coke ve grafit tozu oranının azaltılıp ZnS oranının artırılmasıyla en yüksek soğuk sürtünme katsayıları elde edilmiştir.



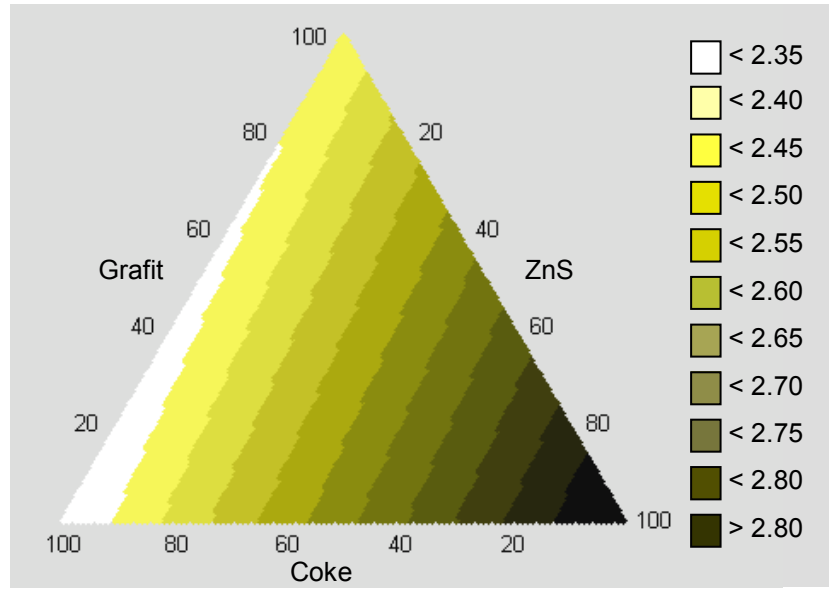
Şekil 3.19. Yağlayıcıların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.



Şekil 3.20. Yağlayıcıların optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen özgül aşınma oranının ($10^{-7} \text{cm}^3/\text{Nm}$) malzeme oranlarına göre değişimi.

Aşınma oranının malzeme oranlarına göre değişimi Şekil 3.20'de verilmiştir. ZnS'nin %10-70, grafit tozunun %40-80, coke'un %30-90 olduğu bölgede çok düşük aşınma oranları görülmüştür. Grafit tozunun maksimum, ZnS'nin ve coke'un minimum veya coke'un maksimum grafit tozu ve ZnS'nin minimum veya ZnS'nin maksimum grafit tozu ve coke'un minimum olduğu bölgelerde çok yüksek aşınma oranları elde edilmiştir.

Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’den de görüldüğü gibi sürtünme katsayıları ZnS’nin %60’dan fazla, grafit tozunun %30’dan az, coke’un %40’dan az olduğu bölgede çok yüksek elde edilmiştir, buna karşın bu bölgede oldukça yüksek aşınma oranı görülmüştür. Tribolojik performans açısından bu grafiklerin analizinden optimum bölge ZnS’nin %20’den düşük, grafit tozunun %40-80 ve coke tozunun %40-80 civarında olduğu bölge tercih edilmelidir. Bu karışımların tribolojik özelliklerinin yanı sıra maliyet açısından da incelenmesi gerekir (Şekil 3.21).

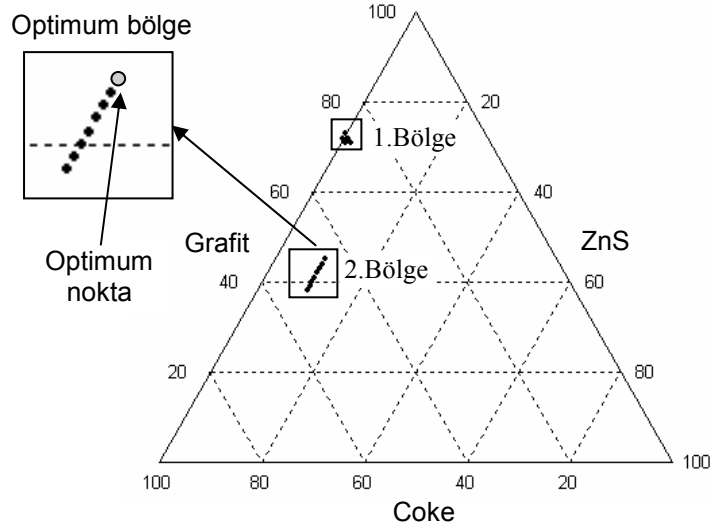


Şekil 3.21. Yağlayıcıların optimizasyonunda malzeme oranlarına göre \$/kg cinsinden maliyet değişimi.

Şekil 3.21’den de görüldüğü gibi, ZnS tozu oranı artışıyla balata maliyeti oldukça yüksek değerler almaktadır. Buna karşın grafit ve coke tozu oranı arttıkça balata maliyeti düşmüştür. Bu bakımdan ZnS tozunun minimum ve tribolojik performansın en iyi düzeyde olduğu bölge optimum yağlayıcı bölgesi olarak seçilebilir. Buna göre Şekil 3.18-3.21 arasında elde edilen optimizasyon sonuçlarından grafit tozu, coke tozu ve ZnS’den oluşan bir yağlayıcı grubu için en uygun oranlar Şekil 3.22’de verilen taralı bölgeler ile gösterilmiştir.

Optimizasyon sonucunda Şekil 3.22’de elde edilen grafikten de görüldüğü gibi belirlenen sınır şartlarını sağlayan 2 farklı kompozisyon bölgesi elde edilmiştir. Bölgeler birbirleriyle karşılaştırıldığında maliyeti en uygun bölge 1. bölge iken bu bölgenin aşınma oranı yüksek elde edilmiştir. Optimum sonuçları sağlayan bölge

2.bölgedir ve bu bölge içinde en düşük aşınma oranı sergileyen kompozisyon grafik üzerinde gri nokta ile gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Yağlayıcıların optimizasyonunda elde edilen optimum bölge ve optimum nokta.

Yağlayıcılar için optimum bölge olarak tanımlanan ve Şekil 3.22’de gösterilen bölge için sınır şartları ve optimum noktanın hesaplanan özellikleri Çizelge 3.9’de verilmiştir.

Çizelge 3.9. Yağlayıcıların optimizasyonunda sınır şartları ve optimum nokta değerleri.

Özellikler	Ortalama sıcak sürt. kats.	Ortalama soğuk sürt. kats.	Aşınma oranı ($10^{-7} \text{cm}^3/\text{Nm}$)	Maliyet (\$/kg)	Sıcak ve soğuk sürt. kats. arasındaki fark
Sınır şartları	>0,440	>0,430	<1,70	<2,50	<0,05
Optimum nokta	0,443	0,440	1,69	2,44	0,003

Teorik olarak optimum bölge kabul edilen sınırlar içerisinde grafit, coke ve ZnS tozu oranları;

- 1.Bölge: %14,6 < Grafit < %14,2; %5,6 < Coke < %5,4; %0,2 < ZnS < %0
2.Bölge: %9 < Grafit < %7,6; %10,4 < Coke < %9; ZnS = %2

sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu sınırlar içerisinde yer alan en iyi özelliklere sahip ve maliyeti en düşük balatanın kompozisyonu 2.bölgede ve Şekil 3.22’de gösterilen noktada tespit edilmiştir. Bu balatanın kompozisyon oranları (100 gr’lık bir balata karışımı için) ve üretim sonrasında ölçülen mekanik özellikleri Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Yağlayıcıların optimizasyonunda hesaplanan optimum oranlar ve bu kompozisyon oranlarında üretilen balatanın mekanik özellikleri.

Yağlayıcı türü	Karışım içindeki oranları (% ağırlıkça)	Balatanın yoğunluğu (g/cm ³)	Balatanın yüzey pürüzlülüğü (Ra)
Grafit	9	2,05	9,4
Coke	9		
ZnS	2		

Çizelge 3.11’de bu balatanın ortalama sıcak sürtünme katsayısı, soğuk sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gibi tribolojik özellikleri ve maliyeti verilmiştir. Deneysel sonuçlar deneysel tasarım yöntemiyle hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılıp hata payı yüzdesi bulunmuştur. Optimum olarak kabul edilen kompozisyondan üç adet numune test edilip ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere teorik ve deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın değerlere sahiptir. Ortalama sıcak sürtünme katsayısında %0,22, ortalama soğuk sürtünme katsayısında %0,68 ve aşınma oranında sadece %3,97’lik bir hata payı ile sonuçlar gerçek sonuçlara oldukça yakın değerlerde hesaplanmıştır.

Çizelge 3.11. Yağlayıcı optimizasyonu gerçekleştirilen balatanın tribolojik özellikleri.

Malzeme	Ort. sıcak sürt. kats.	Ort. soğuk sürt. kats.	Aşınma oranı (10 ⁻⁷ cm ³ /Nm)	Balata Maliyeti (\$/kg)
Deneysel sonuçlar	0,441	0,435	1,71	2,44
	0,445	0,436	1,76	
	0,442	0,441	1,83	
Deneysel ort.	0,442	0,437	1,76	
Teorik	0,443	0,440	1,69	
% Hata payı	%0,22	%0,68	%3,97	

Yapıların optimizasyonunda optimum özelliklerde elde edilen balata malzemesi yağlayıcıların optimizasyonunda elde edilen optimum balata malzemesi ile Çizelge 3.12’de karşılaştırılmıştır. Yağlayıcı optimizasyonu sonucunda balatadaki iyileştirme yüzdesi hesaplanmıştır. Buna göre yağlayıcı optimizasyonu sonucunda balata malzemesinin ortalama sıcak sürtünme katsayısında, ortalama soğuk sürtünme

katsayısında, maliyetinde ve özellikle aşınma oranında önemli oranda iyileştirme sağlanmıştır.

Çizelge 3.12. Yapısal ve yağlayıcıların optimizasyonunda balata özelliklerindeki iyileştirme yüzdeleri.

Malzeme	Ort. sıcak sürt. kats.	Ort. soğuk sürt. kats.	Aşınma oranı ($10^{-7} \text{cm}^3/\text{Nm}$)	Balata Maliyeti (\$/kg)
Yapısal-opt.	0,420	0,436	2,42	2,49
Yağlayıcı-opt	0,442	0,437	1,76	2,44
% İyileştirme	+ % 5,2	+ % 0,22	+ % 27	+ % 2,4

3.1.3. Abrasive malzemelerin optimizasyonu

Abrasive malzemelerin optimizasyonunda oranlar Simplex-Lattice Design metoduna göre Çizelge 3.13'deki gibi belirlenmiştir. Yapısal, bağlayıcı, yağlayıcı ve dolgu malzemelerinin oranları sabit tutulmuştur.

Çizelge 3.13. Balata malzemesinin kompozisyonu (% ağırlıkça oranları).

Malzemeler	BM15	BM16	BM17	BM18	BM19	BM20	BM21
Bakır tozu	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75
Kaya yünü	14,75	14,75	14,75	14,75	14,75	14,75	14,75
Aramid lifleri	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Fenolik reçine	8	8	8	8	8	8	8
Lastik tozu	2	2	2	2	2	2	2
Grafit tozu	9	9	9	9	9	9	9
Coke	9	9	9	9	9	9	9
ZnS	2	2	2	2	2	2	2
ZrSiO₄	10	3	3	6,5	6,5	3	6
Fe₂O₃	2	9	2	5,5	2	5,5	4
Cashew tozu	3	3	10	3	6,5	6,5	5
BaSO ₄	15	15	15	15	15	15	15
CaCO ₃	7	7	7	7	7	7	7
Wollastonite	8	8	8	8	8	8	8
Toplam	100	100	100	100	100	100	100

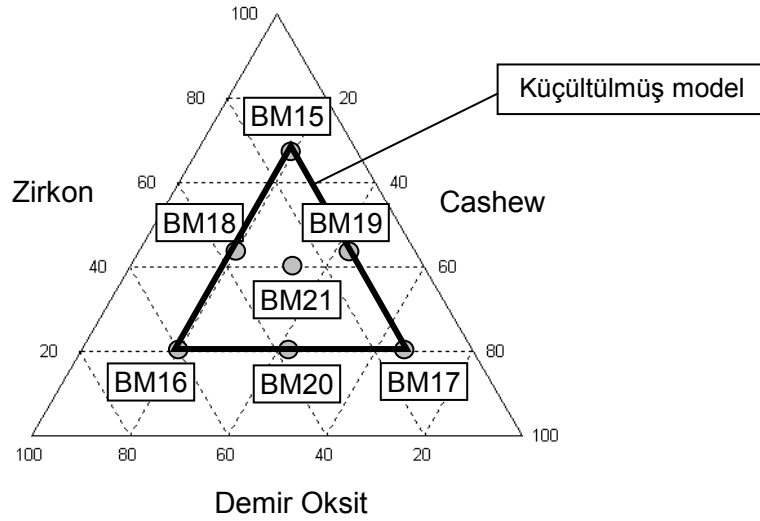
Bu malzemelerin yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi fiziksel özellikleri Çizelge 3.14'de verilmiştir. Yoğunluk değerlerine bakıldığında genel olarak bu değerlerin ZrSiO₄ oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. ZrSiO₄ oranı arttıkça yoğunluğun da arttığı (BM15, BM18, BM19 ve BM21), ancak karışıma cashew tozu ilavesiyle yoğunluğun azaldığı görülmüştür (BM17, BM19 ve BM20). Yüzey pürüzlülüğünün ise

ZrSiO₄ ve cashew tozu oranının artışıyla arttığı, Fe₂O₃'ten çok fazla etkilenmediği görülmüştür.

Çizelge 3.14. Balata kompozisyonlarının fiziksel özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
BM15	2,13	11,2
BM16	2,11	7,0
BM17	1,80	14,3
BM18	2,03	12,0
BM19	2,01	13,4
BM20	1,95	11,6
BM21	2,05	9,8

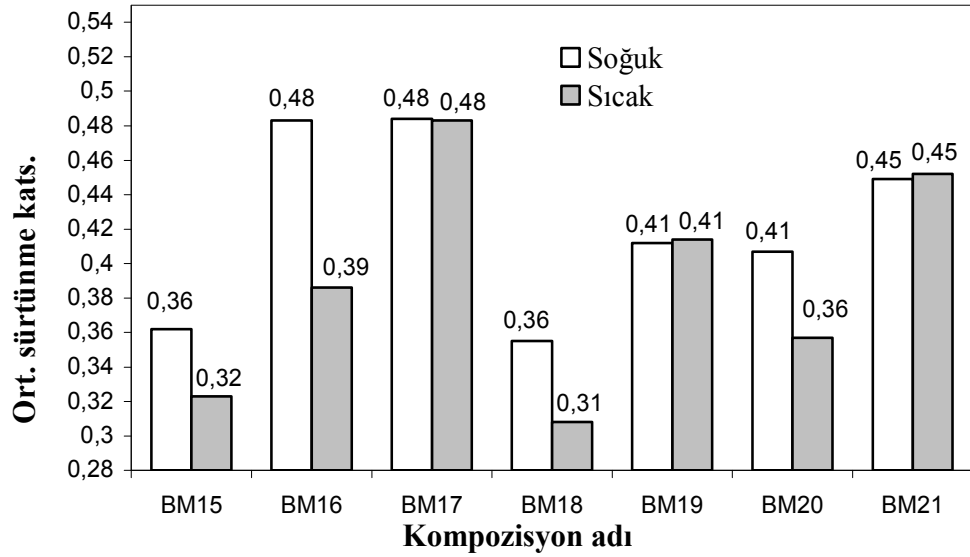
Şekil 3.23'de abrasive malzemeler için seçilen noktaların Simplex-Lattice Design Metoduna göre üçgen model üzerindeki yerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Seçilen abrasive malzeme oranlarının üçgen modeldeki yerleri.

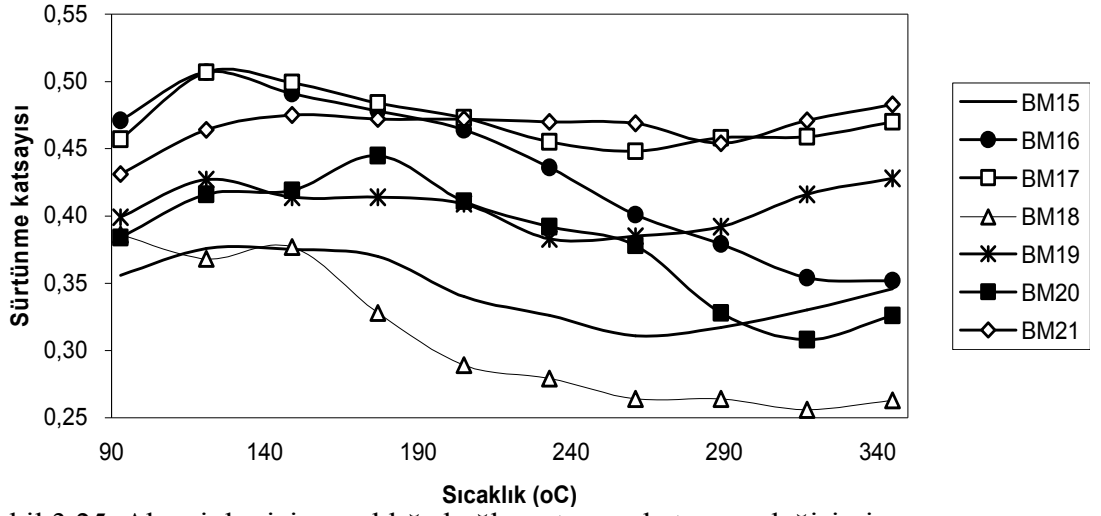
Şekil 3.24'de soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının balata kompozisyonu türüne bağlı değişimi gösterilmiştir. Abrasivlerin tek başına sürtünme performansına etkisine bakıldığında maksimum oranda ZrSiO₄ içeren BM15 balatasında ortalama sürtünme katsayıları oldukça düşük düzeylerde elde edilmiştir. Maksimum oranda Fe₂O₃ içeren BM16 balatasında ortalama sürtünme katsayısı yüksek ancak soğuk ve sıcak sürtünme katsayıları arasındaki farkın da yüksek olduğu görülmüştür. En iyi (hem ortalama değeri yüksek hem de kararlı) sürtünme katsayıları maksimum oranda Cashew tozu içeren

BM17 balatasında elde edilmiştir. Abrasivlerin sinerjik etkisini gösteren BM18, BM19, BM20 ve BM21 balatalarına bakıldığında en düşük ortalama sürtünme katsayısı ortalama oranda ZrSiO₄ ve Fe₂O₃ ve minimum oranda Cashew tozu içeren BM18 balatasında görülmüştür. En kararsız sürtünme katsayısı değişimi ise minimum oranda ZrSiO₄ ve ortalama oranda Cashew tozu ve Fe₂O₃ içeren BM20 balatasında görülmüştür. BM19’da kararlı bir sürtünme katsayısı değişimi görülmesine karşın, ortalama sürtünme katsayısı düşük seviyelerde elde edilmiştir. Üç abrasive malzemeden ortalama oranlarda karıştırılan BM21 balatasında yeterli seviyede yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı değişimi gözlenmiştir.

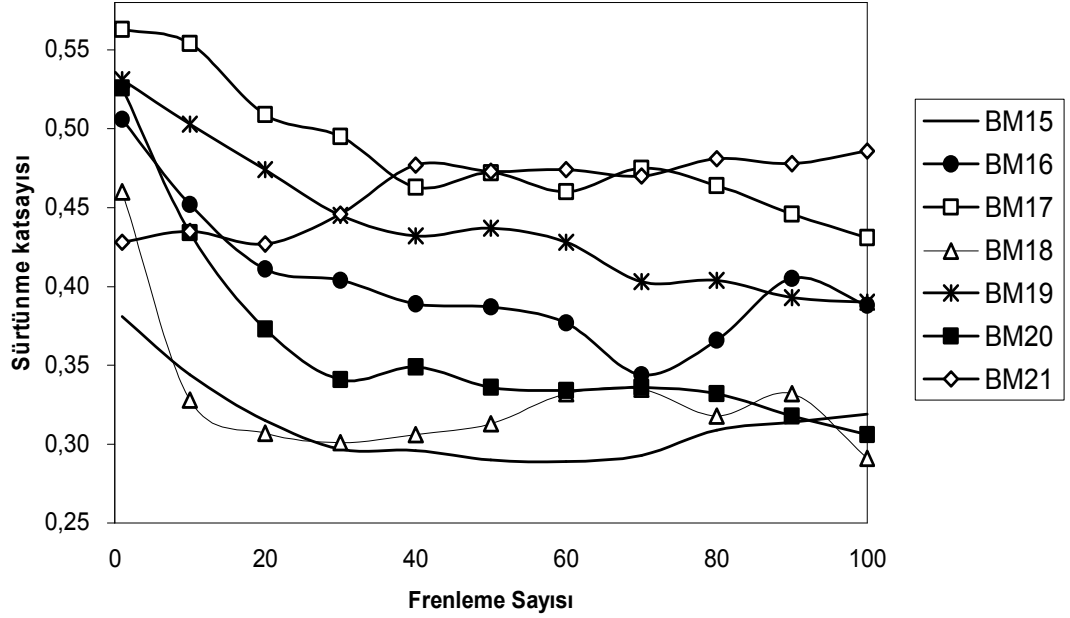


Şekil 3.24. Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının balata kompozisyonuna göre değişimi.

Sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.25’den de görüldüğü gibi sıcaklığa bağlı en kararsız değişim BM16, BM18 ve BM20’de görülmüştür. Aynı zamanda bu balata malzemelerinin sıcaklık artışına karşın sürtünme katsayılarında büyük düşüşler gözlenmiştir (özellikle BM18’de). Bu balata malzemelerinin ortak özelliği ağırlıkça yüksek oranda Fe₂O₃ içermeleridir. Sıcaklığa bağlı en kararlı sürtünme katsayısı değişimleri ise yüksek oranda Cashew tozu içeren BM17, BM19 ve BM21 balatalarında görülmüştür.



Şekil 3.25. Abrasivler için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

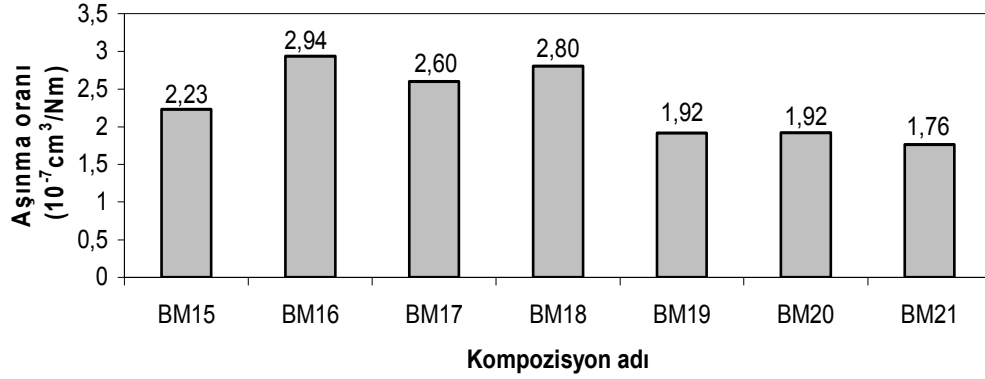


Şekil 3.26. Abrasivler için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi Şekil 3.26'da verilmiştir. En kararsız değişim yine BM16, BM18 ve BM20 balatalarında görülmüştür. Frenleme sayısına bağlı en yüksek ve kararlı sürtünme katsayısı değişimi BM21 balatasında elde edilmiştir.

Şekil 3.27'de test edilen balataların aşınma oranları sonuçları verilmiştir. Aşınma oranı en yüksek olan balata malzemesi, Fe₂O₃'in en yüksek oranda bulunduğu BM16 balatasıdır. BM19, BM20 ve BM21 balatalarının aşınma oranları en düşük değerdedir.

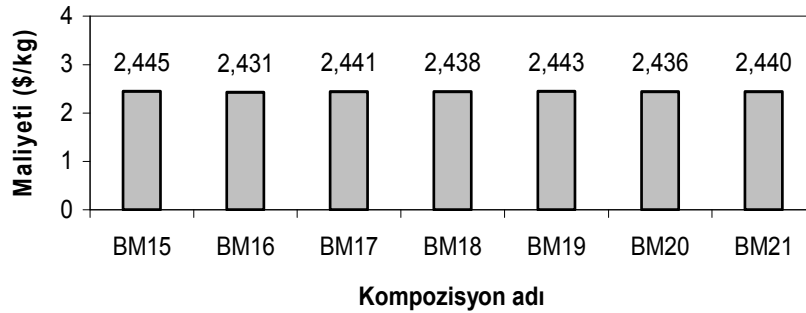
olmalarına karşın, sürtünme performansı açısından en iyi özellik sergileyen BM21 balatasıdır.



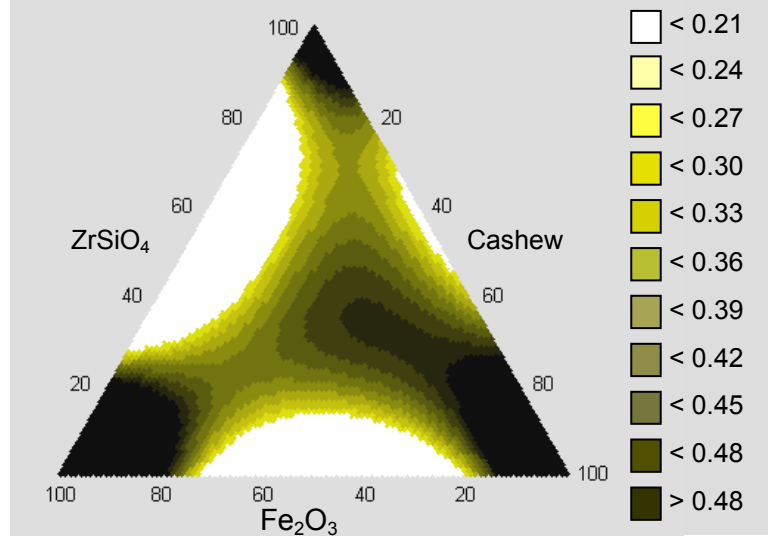
Şekil 3.27. Abrasivler için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.

Dolayısıyla elde edilen sonuçlardan balata malzemelerinde abrasive olarak kullanılan ZrSiO_4 'un aşınma oranını düşük seviyede tutma, Cashew tozunun sürtünme katsayısını yüksek sıcaklıklarda kararlı tutma gibi olumlu yönlerine karşın, Fe_2O_3 'ün aşınma oranını arttırdığı ve sürtünme katsayısında kararsızlıklara yol açtığı görülmüştür.

Abrasivlerin optimizasyonunda oluşturulan her bir kompozisyonun maliyet değişimi Şekil 3.28'de verilmiştir. Maliyetleri karşılaştırıldığında, incelenen kompozisyonların hepsinin birbirine yakın maliyete sahip olduğu görülmüştür. Abrasivlerin sıcak sürtünme katsayısı optimizasyonu için Matlab'da hazırlanan program kullanılarak Şekil 3.29'daki sonuçlar elde edilmiştir.

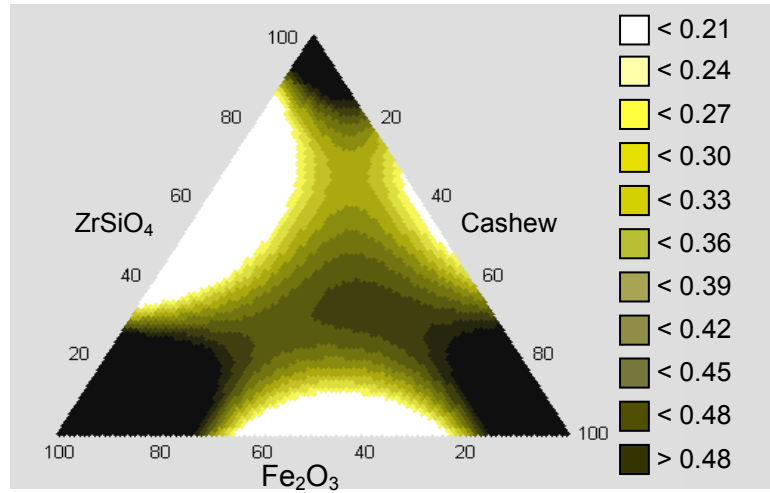


Şekil 3.28. Abrasivler için kompozisyon türüne bağlı balata maliyeti değişimi.



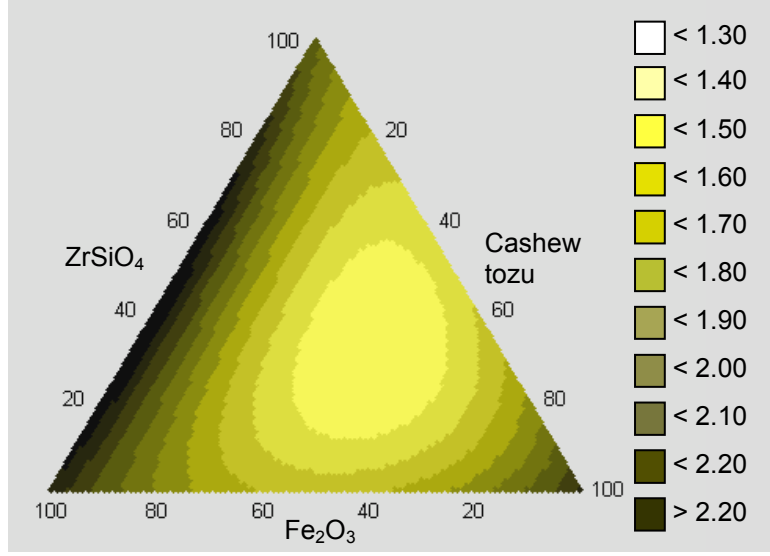
Şekil 3.29. Abrasivlerin optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen sıcak sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.

Şekil 3.29'dan de görüldüğü üzere karışım içerisinde cashew tozunun artması veya Fe₂O₃ tozunun tek başına artması durumunda oluşan bölgede sıcak sürtünme katsayısı en yüksek seviyelerde elde edilmiştir. %60'dan daha fazla cashew kullanılması durumunda ZrSiO₄ ve Fe₂O₃ oranından bağımsız olarak genelde yüksek sıcak sürtünme katsayıları gözlenmektedir. Benzer şekilde %80'den daha fazla Fe₂O₃ kullanılması durumunda ZrSiO₄ ve cashew oranından bağımsız olarak genelde yüksek sıcak sürtünme katsayıları gözlenmektedir. Soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi Şekil 3.30'da verilmiştir. Maksimum sürtünme katsayıları abrasivlerin bir tanesinin oranının artırılıp, diğerlerinin azaltıldığı karışımlarda elde edilmiştir.



Şekil 3.30. Abrasivlerin optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen soğuk sürtünme katsayısının malzeme oranlarına göre değişimi.

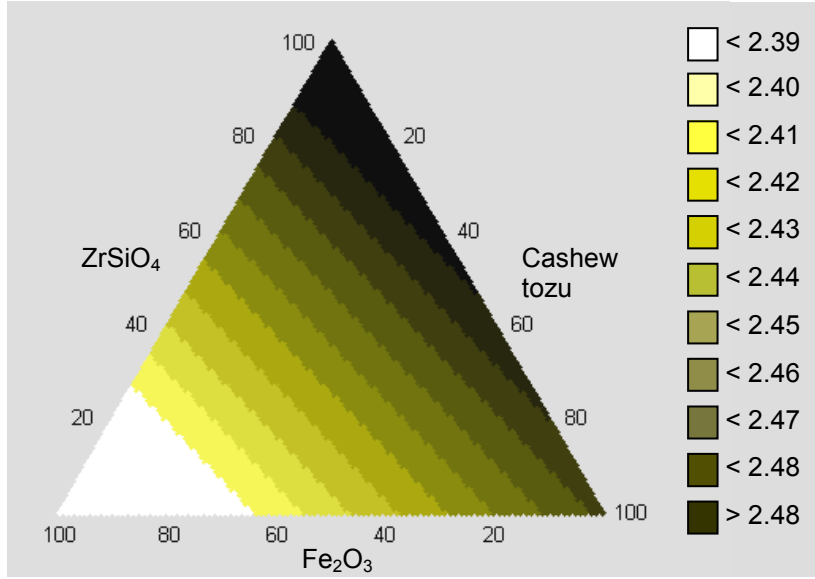
Aşınma oranının malzeme oranlarına göre değişimi Şekil 3.31’de verilmiştir. En düşük aşınma oranı $ZrSiO_4$ ’un %20 – 60, Fe_2O_3 ’ün %10 – 40 ve cashew tozunun %35-60 civarındaki alan içerisinde yer almaktadır. Bunun yanında karışım içerisindeki $ZrSiO_4$ ’un oranından bağımsız cashew tozunun azaltılıp Fe_2O_3 ’in artırılmasıyla aşınma oranı en yüksek değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 3.31. Abrasivlerin optimizasyonunda deneysel tasarım yöntemine göre elde edilen aşınma oranının malzeme oranlarına göre değişimi.

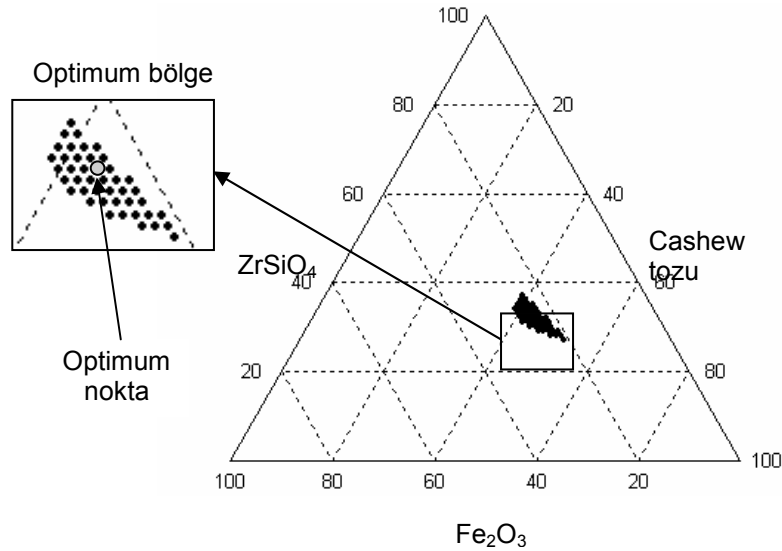
Şekil 3.29, Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’den de görüldüğü gibi sürtünme katsayıları ve aşınma oranı açısından $ZrSiO_4$ ’un ve cashew tozunun ortalama oranda ve Fe_2O_3 ’ün minimum oranda karıştırılması durumunda optimum sonuçlar elde edilmektedir. Bu karışımların tribolojik özelliklerinin yanı sıra maliyet açısından da incelenmesi gerekir (Şekil 3.32).

Şekil 3.32’den de görüldüğü gibi, balata maliyeti daha çok $ZrSiO_4$ ve Fe_2O_3 ’ten etkilenir. Bu bakımdan $ZrSiO_4$ ve Fe_2O_3 tozunun minimum ve tribolojik performansın en iyi düzeyde olduğu bölge optimum abrasive bölgesi olarak seçilebilir. Buna göre Şekil 3.29-3.32 arasında elde edilen optimizasyon sonuçlarından en uygun oranlar Şekil 3.33’de verilen taralı bölge ile gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Abrasivlerin optimizasyonunda malzeme oranlarına göre \$/kg cinsinden maliyet değişimi.

Optimizasyon sonucunda Şekil 3.33’de elde edilen grafikten de görüldüğü gibi belirlenen sınır şartlarını sağlayan optimum bir bölge elde edilmiştir. Optimum sonuçları sağlayan en düşük maliyete sahip kompozisyon grafik üzerinde gri nokta ile gösterilmiştir. Abrasivler için optimum bölge olarak tanımlanan ve Şekil 3.33’de gösterilen bölge için sınır şartları ve optimum noktanın hesaplanan özellikleri Çizelge 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.33. Abrasivlerin optimizasyonunda elde edilen optimum bölge ve optimum nokta.

Çizelge 3.15. Abrasivlerin optimizasyonunda sınır şartları ve optimum nokta değerleri.

Özellikler	Ortalama sıcak sürt. kats.	Ortalama soğuk sürt. kats.	Aşınma oranı ($10^{-7} \text{cm}^3/\text{Nm}$)	Maliyet (\$/kg)	Sıcak ve soğuk sürt. kats. arasındaki fark
Sınır şartları	>0,450	>0,440	<1,50	<2,44	<0,05
Optimum nokta	0,453	0,450	1,40	2,43	0,008

Teorik olarak optimum bölge kabul edilen sınırlar içerisinde ZrSiO_4 , Fe_2O_3 ve Cashew tozu oranları;

$$\%5,25 < \text{ZrSiO}_4 < \%4,2; \quad \%3,9 < \text{Fe}_2\text{O}_3 < \%3,3; \quad \%7,35 < \text{Cashew tozu} < \%6,15$$

sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu sınırlar içerisinde yer alan en iyi özelliklere sahip ve maliyeti en düşük balatanın kompozisyonu Şekil 3.22’de gösterilen noktada tespit edilmiştir. Bu balatanın kompozisyon oranları (100 gr’lık bir balata karışımı için) ve üretim sonrasında ölçülen mekanik özellikleri Çizelge 3.16’da verilmiştir.

Çizelge 3.16. Abrasivlerin optimizasyonunda hesaplanan optimum oranlar ve bu kompozisyon oranlarında üretilen balatanın mekanik özellikleri.

Abrasive türü	Karışım içindeki oranları (% ağırlıkça)	Balatanın yoğunluğu (g/cm^3)	Balatanın yüzey pürüzlülüğü (Ra)
ZrSiO_4	5,10	2,17	11,2
Fe_2O_3	3,45		
Cashew tozu	6,45		

Çizelge 3.17’de bu balatanın ortalama sıcak sürtünme katsayısı, soğuk sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gibi tribolojik özellikleri ve maliyeti verilmiştir. Deneysel sonuçlar deneysel tasarım yöntemiyle hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılıp hata payı yüzdesi bulunmuştur. Optimum olarak kabul edilen kompozisyondan üç adet numune test edilip ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere teorik ve deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın değerlere sahiptir. Ortalama sıcak sürtünme katsayısında %0,6, ortalama soğuk sürtünme katsayısında deneysel sonuç tam değerinde hesaplanmıştır ve aşınma oranında sadece %1,4’lük bir hata payı ile sonuçlar gerçek sonuçlara oldukça yakın değerlerde hesaplanmıştır.

Çizelge 3.17. Abrasive optimizasyonu gerçekleştirilen balatanın tribolojik özellikleri.

Malzeme	Ort. sıcak sürt. kats.	Ort. soğuk sürt. kats.	Aşınma Oranı ($10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	Balata Maliyeti (\$/kg)
Deneysel sonuçlar	0,463	0,446	1,35	2,43
	0,456	0,448	1,40	
	0,465	0,455	1,39	
Deneysel ort.	0,460	0,450	1,38	
Teorik	0,453	0,450	1,40	
% Hata payı	%0,6	%0	%1,4	

Yağlayıcıların optimizasyonunda optimum özelliklerde elde edilen balata malzemesi abrasivlerin optimizasyonunda elde edilen optimum balata malzemesi ile Çizelge 3.18'de karşılaştırılmıştır. Abrasive optimizasyonu sonucunda balatadaki iyileştirme yüzdesi hesaplanmıştır. Buna göre abrasive optimizasyonu sonucunda balata malzemesinin ortalama sıcak sürtünme katsayısında, ortalama soğuk sürtünme katsayısında, aşınma oranında ve maliyetinde önemli oranda iyileştirme sağlanmıştır.

Çizelge 3.18. Yağlayıcıların ve abrasivlerin optimizasyonunda balata özelliklerindeki iyileştirme yüzdeleri.

Malzeme	Ort. sıcak sürt. kats.	Ort. soğuk sürt. kats.	Aşınma Oranı ($10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	Balata Maliyeti (\$/kg)
Yağlayıcı-opt	0,442	0,437	1,76	2,44
Abrasive-opt	0,460	0,450	1,38	2,43
% İyileştirme	+ % 4,1	+ % 3	+ % 22	+ % 0,4

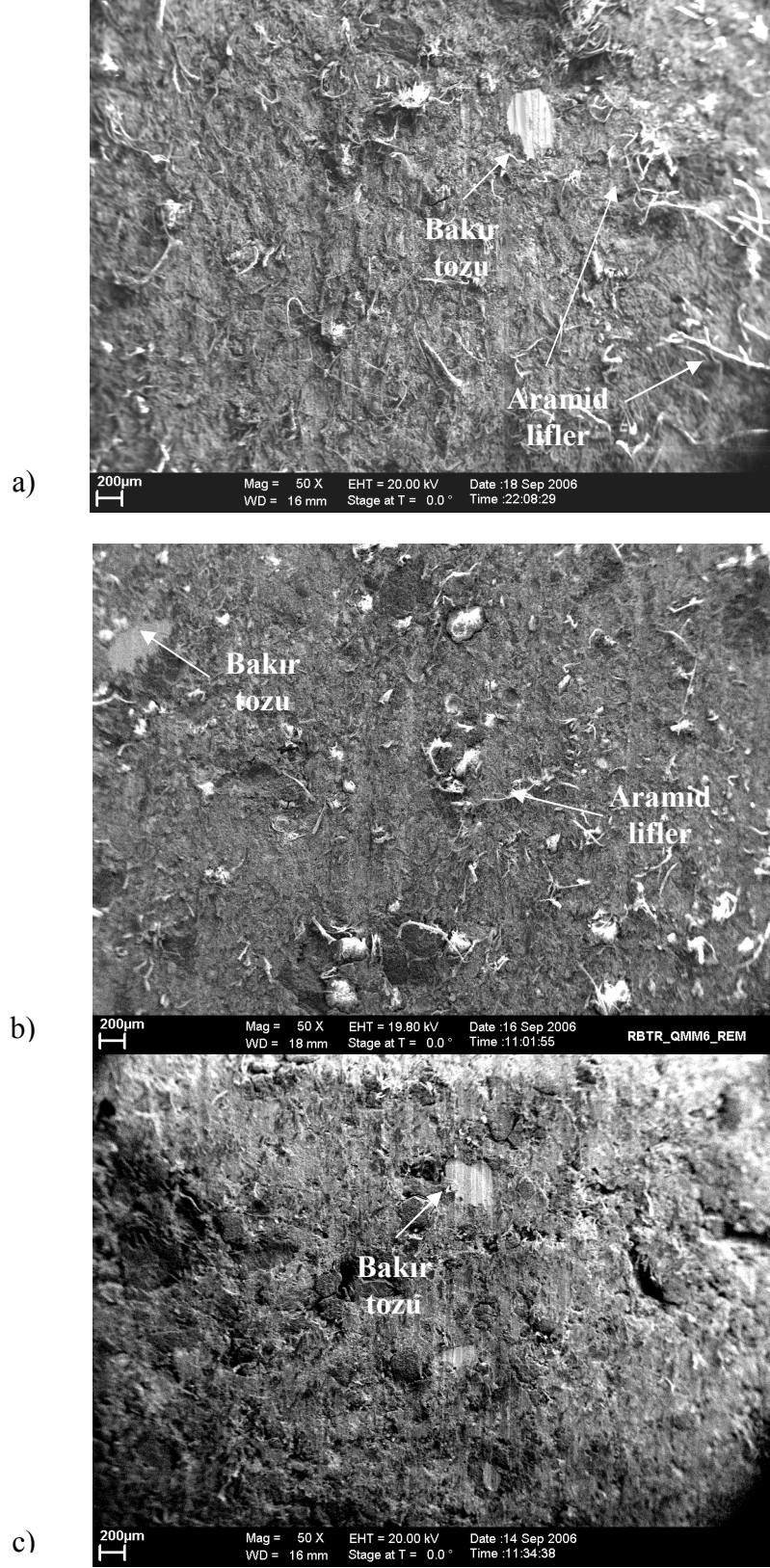
3.1.4. Optimizasyonu gerçekleştirilen numunelerin mikrokarakterizasyonu

Bu çalışmada sırasıyla balata malzemesini oluşturan malzemelerin görev bakımından gruplandırıldığı yapısal grubu, yağlayıcı grubu ve abrasive grubu optimize edilmiştir. Çizelge 3.19'da her bir grubun optimizasyonu sonucunda elde edilen optimum % ağırlıkça oranlar (kalın yazı tipinde gösterilmiştir) verilmiştir.

Çizelge 3.19. Optimizasyonu gerçekleştirilen malzeme gruplarının optimum % ağırlıkça oranları ve tribolojik özellikleri.

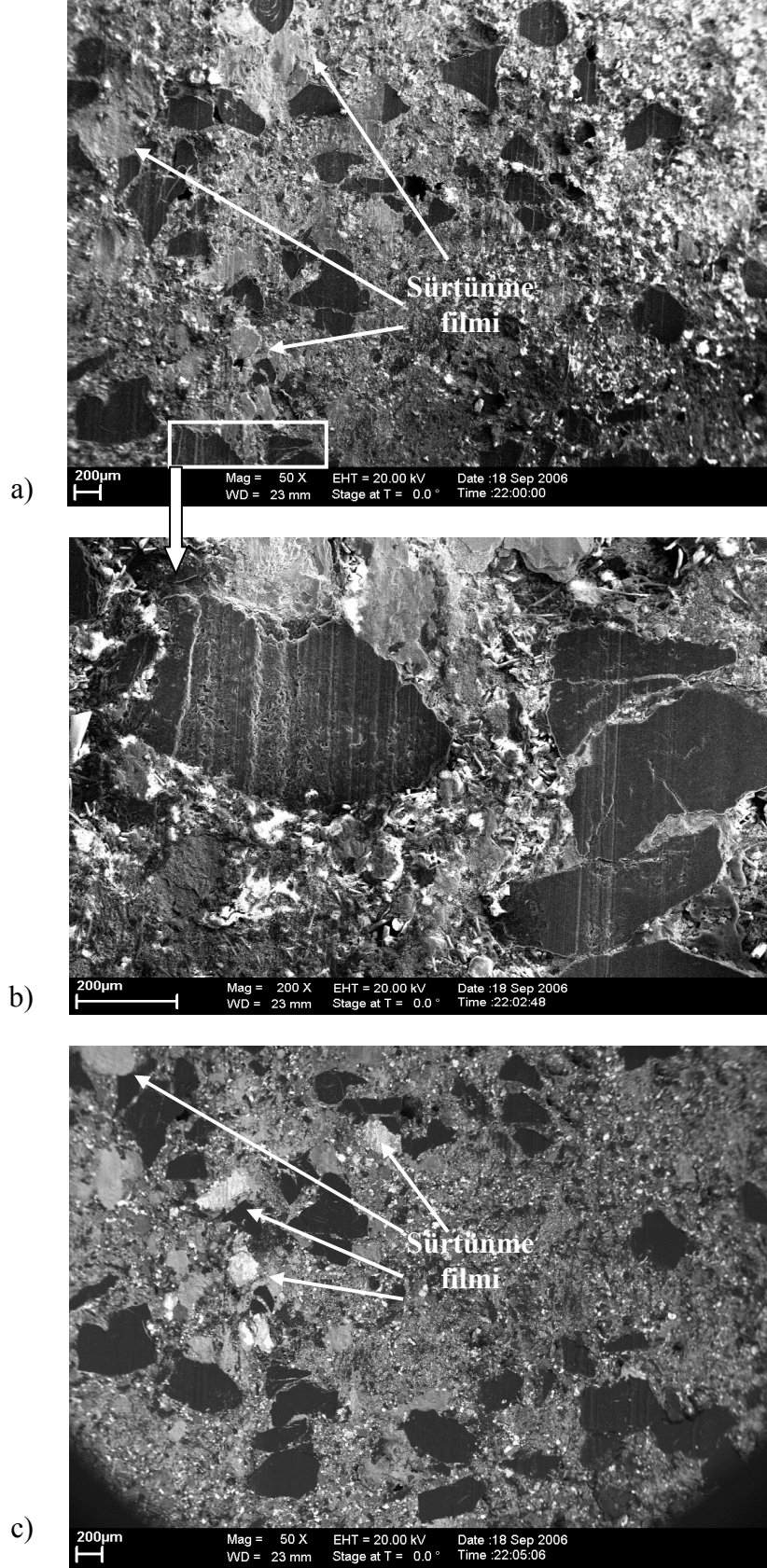
Gruplar	Malzemeler	Opt. yapısal	Opt. yağlayıcı	Opt. abrasive
Yapısallar	Bakır tozu	6,75	6,75	6,75
	Kaya yünü	14,75	14,75	14,75
	Aramid lifleri	3,5	3,5	3,5
Yağlayıcılar	Grafit tozu	9	9	9
	Coke	7	9	9
	ZnS	4	2	2
Abrasive'ler	ZrSiO ₄	6	6	5,10
	Fe ₂ O ₃	4	4	3,45
	Cashew tozu	5	5	6,45
Sıcak sürt. kats.		0,420	0,436	2,42
Soğuk sürt. kats		0,442	0,437	1,76
Aşınma oranı		0,460	0,450	1,38

Elde edilen bu üç numunenin yüzeyi sürtünme testinden önce ve sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenip karşılaştırılmıştır. Şekil 3.34'de aşınmamış yüzey görüntüleri verilmiştir. Genellikle yüzeyler aşınma öncesinde liflerle (aramid veya kaya yünü) kaplıdır. Kalıplamadan sonra uygulanan taşlama işlemleri ile bu yüzeyler temizlense de liflerin büyük çoğunluğu yüzeyde kalır ve uygulanan taşlama işlemi süresine bağlı olarak da lif oranı artar veya azalır. Örneğin Şekil 3.34(a)'da taşlama işlemi daha kısa, (b)'de biraz daha uzun ve (c)'de en uzun olarak uygulanmıştır. Sürtünme performansı açısından taşlama işleminin bir etkisi yoktur. Sadece balata boyutlarını istenen tolerans değerlerine getirmek için uygulanır. Bakır partikülleri de diğer tozlara göre daha büyük oldukları için aşınma öncesinde belirgin olarak görülmektedir. Balatayı oluşturan diğer malzemeler lifler nedeniyle görülememektedir. Ancak Şekil 3.35'e bakıldığında aşınma sonrasında liflerin yüzeyden kalkmasıyla diğer komponentler açık olarak görülmektedir.



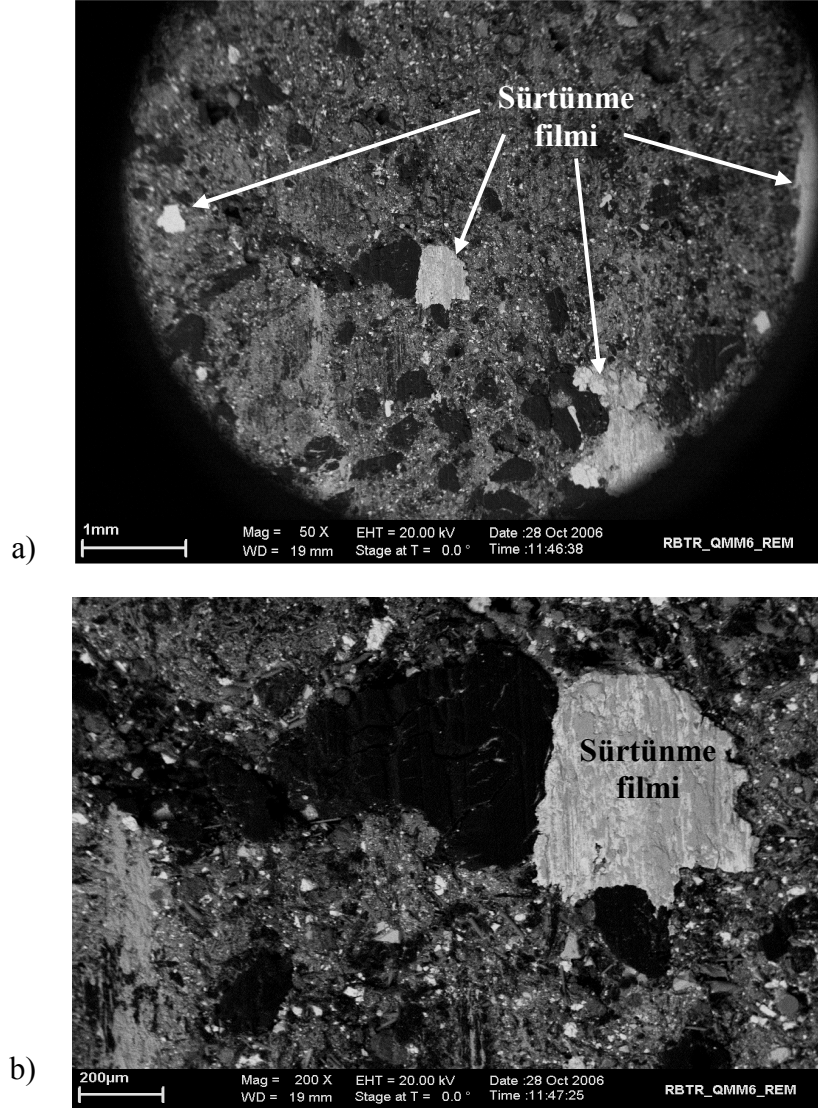
Şekil 3.34. SEM ile çekilmiş aşınmamış yüzey görüntüleri (a) optimum yapısal, (b) optimum yağlayıcı ve (c) optimum abrasive.

Şekil 3.35'de yapısal grubu optimize edilen numunenin sürtünme testi sonucunda SEM ile çekilmiş aşınmış yüzey görüntüleri görülmektedir. Şekil 3.35 (a)'da elektron mikroskopunun SE modunda x50 büyütme ile çekilmiş yüzey görüntüsünün x200 büyütme ile çekilmiş bölgesi Şekil 3.35 (b)'de verilmiştir. Bu fotoğraflarda gri renkte görülen bölgeler sürtünme ara yüzeyinde oluşan sürtünme filmidir. Taramalı elektron mikroskopunun SE modunda çekilen bu görüntülerde sürtünme filminin şeklini, dağılımını ve yoğunluğunu ayırt etmek oldukça güçtür. Bu yüzden Şekil 3.35 (c)'de görüldüğü gibi mikroskopun QBSD modunda aynı yüzeyden görüntü alınmıştır. Sürtünme filmi bu görüntülerde net olarak (beyaz veya çok açık gri renkte) görülebilmektedir. Optimum yapısal numunelerinden çekilen bu mikroyapı fotoğraflarından da görüldüğü gibi sürtünme filmi daha çok sert partiküllerin etrafında yoğunluk kazanmıştır. Sert partiküllerin çoğunlukla abrasive malzemelerden Zirkon, Cashew tozu ve Demir oksit tozlarından oluştuğu düşünülmektedir. Bu sert partiküller izafi olarak diske karşı yüksek bir aşınma direncine sahiptir ve sürtünme esnasında kısa bir alışma devresini takiben diğer aşınma dirençli bileşenlere göre balata yüzeyinde biraz daha yüksekte kalırlar ve aşınma partiküllerinin ara yüzeyde birikmesiyle sürtünme filmi meydana gelir.



Şekil 3.35. SEM ile çekilmiş optimum yapısal balatının aşınmış yüzey görüntüleri (a) SE modunda 50x, (b) SE modunda 200x, (c) QBSD modunda 50x.

Balatanın yağlayıcı grubunun optimizasyonu sonucunda elde edilen kompozisyonun yüzey görüntüsü Şekil 3.36 (a)'da elektron mikroskobunun QBSD modunda x50 büyütme ile çekilmiş ve x200 büyütme ile çekilmiş bölgesi Şekil 3.36 (b)'de verilmiştir. Şekil 3.36'da verilen optimum yağlayıcı numunesinin Şekil 3.35'deki optimum yapısal numunesinden sadece yağlayıcı malzeme grubunun oranları bakımından farklıdır.

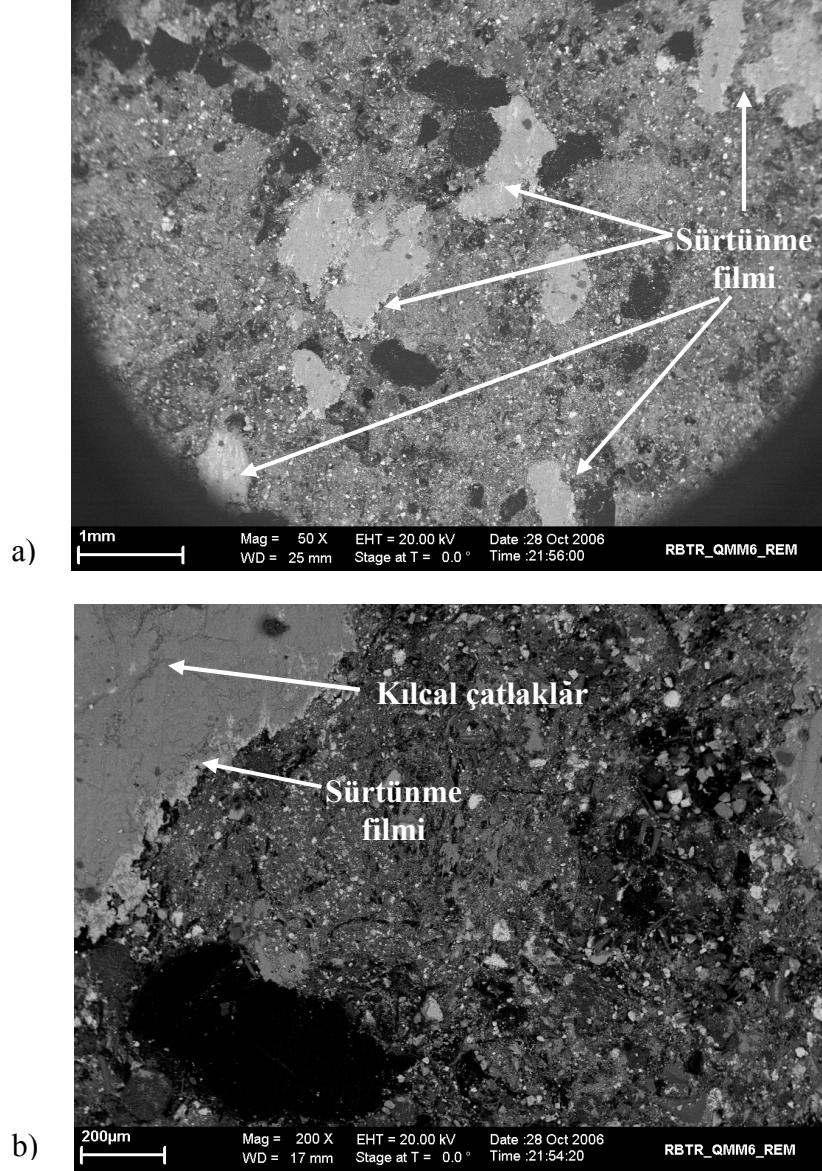


Şekil 3.36. SEM ile çekilmiş optimum yağlayıcı balatanın aşınmış yüzey görüntüleri (a) QBSD modunda 50x, (b) QBSD modunda 200x.

Optimum yağlayıcı numunesi optimum yapısal numunesinden daha fazla coke ve daha az ZnS içermektedir. Şekil 3.35'de verilen optimum yapısal yüzeyi ile karşılaştırıldığında sürtünme filminin optimum yağlayıcıda bölge sayısının daha az ancak daha geniş alanlarda dağılım sergilediği görülmektedir. Bu sonuçlardan coke

tozunun yüzeyde oluşan sürtünme filmini bölgesel olarak daha geniş alan kaplamasına sebebiyet verdiği görülmüştür. Tablo 3.19’da optimum yapısal ve yağlayıcı için verilen sürtünme katsayısı ve aşınma değerleri karşılaştırıldığında optimum yağlayıcının sıcak sürtünme katsayısının daha yüksek ve aşınma oranının da oldukça düşük olduğu görülür. İki balata arasındaki bu farkın sebebi ara yüzeyde oluşan sürtünme filminin aşınmayı önlemesi ve yüksek sıcaklıklarda kararlı (yüksek) sürtünme katsayısının elde edilmesi olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla disk ile balata ara yüzeyinde oluşan sürtünme filminin balatanın sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde pozitif etkisi olduğu sonucuna varılır.

Şekil 3.37 (a)’da abrasive grubunun optimizasyonu sonucunda elde edilen optimum oranlara sahip balatanın aşınma sonrası yüzey görüntüsü elektron mikroskobunun QBSD modunda x50 büyütme ile çekilmiş ve x200 büyütme ile çekilmiş bölgesi Şekil 3.37 (b)’de verilmiştir. Şekil 3.36’daki optimum yağlayıcı numunesinden sadece abrasive malzeme grubunun oranları bakımından farklıdır (Tablo 3.19). Optimum abrasive numunesi optimum yağlayıcı numunesinden daha az Zirkon ve Fe_2O_3 , daha fazla Cashew içermektedir. Yüzeyde siyah renkte görülen parçacıkların (Fe_2O_3) optimum yapısal ve optimum yağlayıcı yüzeyinden elde edilen görüntülere oranla daha az sayıda olduğu açıkça görülmektedir. Ancak sürtünme filmi bölgelerinin sayısı ve kapladığı alan açısından karşılaştırıldığında optimum abrasive numunesinde daha yoğun bir dağılım sergilemektedir. Bu sebeple sürtünme filminin koruyucu tabaka etkisi altında bu numunenin diğer numunelere kıyasla aşınma oranı daha düşük, sürtünme katsayısı daha kararlı ve sıcak sürtünme katsayısı oldukça yüksek değerlerde (0,46 gibi) elde edilmiştir. Ancak oluşan sürtünme filminin de belirli bir ömrü vardır. Kayma esnasında artan sıcaklık, değişken yüklemeler (tekrarlı frenleme), disk yüzeyindeki pislikler veya balatanın aşınması ile oluşan sert aşınma partikülleri sebebiyle sürtünme filminde çatlaklar, yarıklar ve zamanla pullar halinde kopmalar meydana gelebilir. Şekil 3.37 (b)’de sürtünme filmi yüzeyinde oluşmuş kılcal bir çatlak görülmektedir. Sürtünme testine devam edilmiş olsaydı sürtünme filminde oluşan kılcal çatlaklar yarıklara dönüşüp, pullar halinde malzeme kopmaları meydana gelebilirdi veya sürtünme filmine sert bir aşınma partikülü çarparak çatlak oluşmadan bir anda yüzeyden kopartılabilirdi.



Şekil 3.37. SEM ile çekilmiş optimum abrasive balatanın aşınmış yüzey görüntüleri (a) QBSD modunda 50x, (b) QBSD modunda 200x.

3.2. Yeni Üretim Parametrelerinin Geliştirilmesi

Fren balata malzemeleri karıştırma, sıcak kalıplama ve sinterleme işlemlerini takiben üretilmektedir. Malzemenin kompozisyonu kadar bu üretim parametrelerinin de frenleme performansı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Tasarlanan bir balata malzemesinin kompozisyonu ve oranları ne kadar doğru seçilmiş olursa olsun, üretimi uygun olarak yapılmadığı sürece balata istenen performansı sağlayamaz. Bu bakımdan bu çalışmada birinci aşamada optimize edilen balata kompozisyonuna ikinci aşamada en uygun üretim parametreleri araştırılmıştır. Optimize edilen üretim parametreleri

kalıplama süresi, basıncı, sıcaklığı ile sinterleme süresi ve sıcaklığıdır. Bu parametrelerden bir tanesi değiştirilip, diğerlerini sabit tutmak koşuluyla en iyi sürtünme – aşınma özelliklerini ve en uygun maliyeti sağlayan değerler tespit edilmiştir.

3.2.1. Kalıplama parametrelerinin optimizasyonu

Fren balata malzemelerinde kalıplama işlemi, istenen şekle sahip kalıp içerisine doldurulan toz malzemenin belirli sıcaklıkta belirli süre ile belirli basınç uygulanmasını içermektedir. Kalıplama parametrelerinin optimizasyonunda aynı kompozisyona sahip balatalar farklı kombinasyonlarda kalıplama süresi, basıncı ve sıcaklıklarda kalıplanarak, sinterleme fırınında sabit koşullar altında üretilmiştir.

3.2.1.1. Kalıplama süresinin optimizasyonu

Çizelge 3.20’de kalıplama parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin kalıplama süreleri verilmiştir.

Çizelge 3.20. Kalıplama sürelerinin optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin kalıplama ve sinterleme parametreleri.

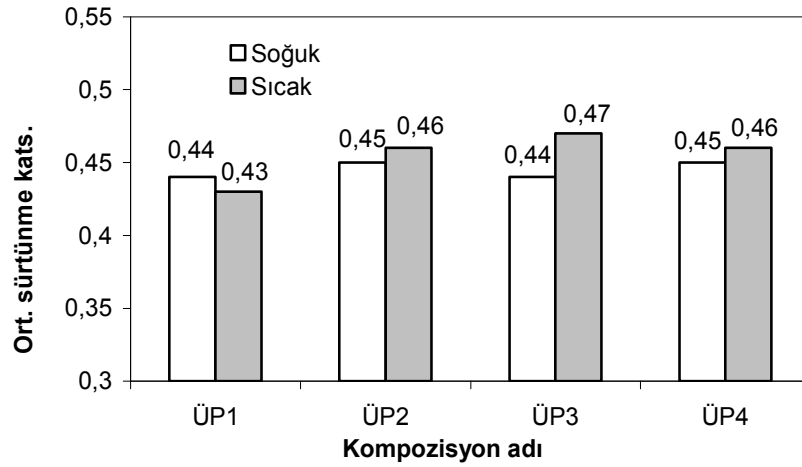
Balata adı	Kalıplama Süresi (dak)	Kalıplama Sıcaklığı (°C)	Kalıplama Basıncı (MPa)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
ÜP1	3	150	7,5	12	165
ÜP2	5	150	7,5	12	165
ÜP3	7	150	7,5	12	165
ÜP4	9	150	7,5	12	165

Bu malzemelerin yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi fiziksel özellikleri Çizelge 3.21’de verilmiştir. Kalıplama süresi artışına bağlı olarak sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir farklılık tespit edilmemiştir. Dolayısıyla kalıplama süresinin balatanın fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 3.21. Balata kompozisyonlarının mekanik özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
ÜP1	2,16	11
ÜP2	2,17	11,2
ÜP3	2,17	11,1
ÜP4	2,17	11,3

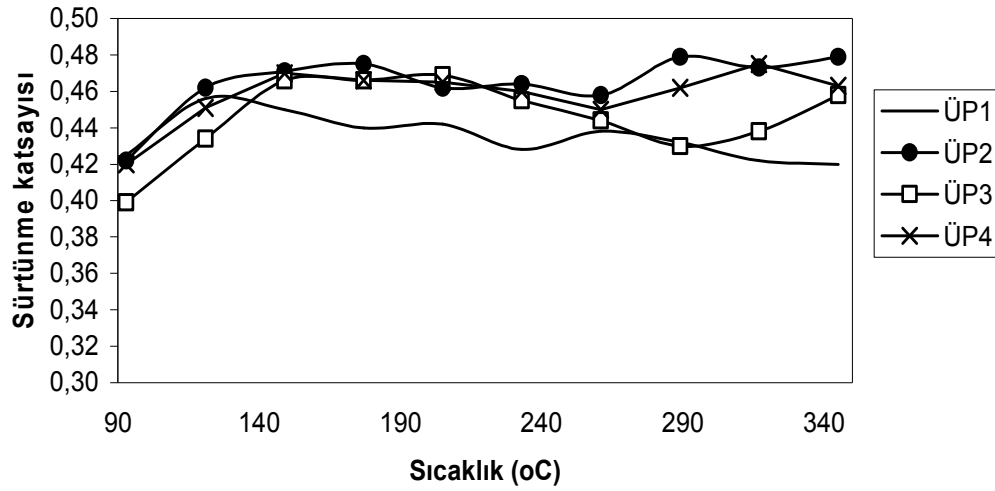
Çizelge 3.20'de verilen üretim parametrelerine göre üretilen aynı kompozisyondaki balata malzemelerinin ortalama sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.38. Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının kalıplama süresine göre değişimi.

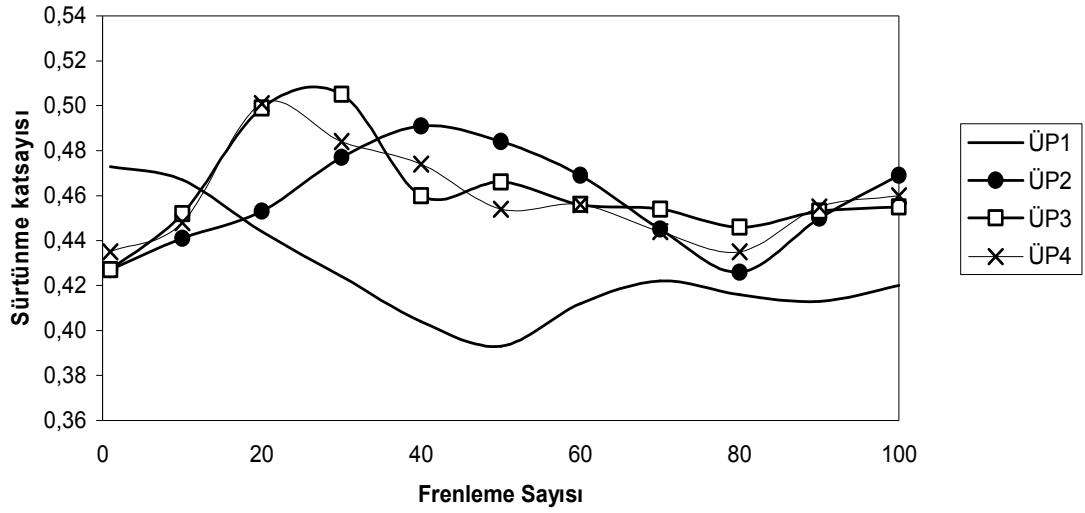
Şekil 3.38'de görüldüğü gibi 3 dak.'lık (ÜP1) kalıplama süresinde ortalama sürtünme katsayısı 5, 7 ve 9 dak.'ya göre daha düşük değerler sergilemiştir. Kalıplama süresinin azalması ile toz halindeki karışımın birbiri ile tam olarak bağlanmasına fırsat verilmediği ve muhtemelen gözenekli bir yapı meydana geldiğinden sürtünme katsayısı düşük elde edilmiştir. Ayrıca düşük kalıplama sürelerinde karışımı oluşturan bileşenler arasında güçlü bir bağ meydana gelmez (polimerizasyon işlemi tam olarak gerçekleşemez) ve buna bağlı olarak balata numunesinin kalıptan çıkartılıp taşınması esnasında parçalanma (dağılma) meydana gelmiştir. Buna karşın kalıplama süresinin 5 dak.'dan daha fazla artmasıyla birlikte sürtünme katsayısında önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. Sürenin daha fazla artması sadece zaman ve enerji kaybına sebep olacağından sürtünme performansı açısından 5 dak. optimum kalıplama süresi olarak kabul edilebilir.

Kalıplama süresinin balatanın çalışma sıcaklığına bağlı olarak sürtünme performansına etkisi Şekil 3.39'da gösterilmiştir. ÜP1 dışındaki ÜP2, ÜP3 ve ÜP4 kalıplama parametrelerinde genel olarak benzer bir değişim sergilerken, ÜP1 yüksek sıcaklıklarda düşen bir sürtünme katsayısı değişimi sergilemiştir. Kalıplama süresi kısa olduğu için toz halindeki karışımın birbiri ile tam olarak bağlanmasına fırsat verilmediği ve zayıf bir yapının oluştuğu düşünülmektedir. Bu yüzden yüksek çalışma sıcaklıklarında bu yapı diğer malzemelere göre daha kötü performans sergilemiştir.



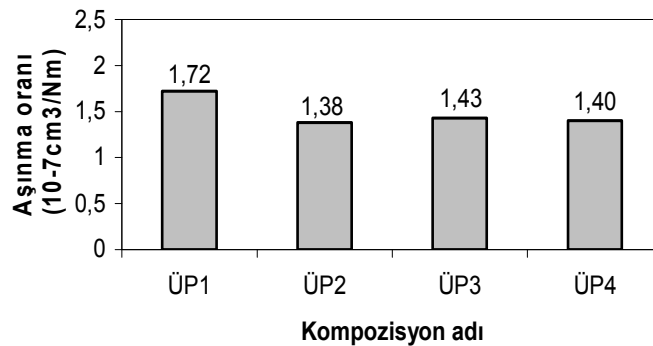
Şekil 3.39. Farklı kalıplama süreleri için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Kalıplama süresinin frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme performansına etkisi incelendiğinde (Şekil 3.40), ÜP1'in ÜP2, ÜP3 ve ÜP4'den tamamen farklı bir dağılım sergilediği ve genel olarak frenleme sayısına bağlı olarak düşen bir sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. ÜP2, ÜP3 ve ÜP4'de ise daha yüksek bir sürtünme katsayısı değişimi gözlenmiştir. Ancak her bir balata için sürtünme katsayılarının alt ve üst sınırlarına bakıldığında en kararlı değişim ÜP2'de görülmüştür. Bu test sonuçlarından da balata malzemesinin gerek çalışma sıcaklığına gerekse frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme performansının 5 dak.'dan daha yüksek kalıplama sürelerinde çok fazla değişmediği, sadece zaman ve enerji kaybına sebep olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.40. Farklı kalıplama süreleri için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Farklı kalıplama sürelerinde üretilen balata malzemelerinin aşınma oranı değişimleri Şekil 3.41’de verilmiştir. En yüksek aşınma oranı ÜP1’de görülmesine karşın, en düşük aşınma oranı ÜP2’de ölçülmüştür. Bunun sebebi ÜP1’de kalıplama süresinin kısa olması (3 dak.) sebebiyle toz tanelerinin birbiri ile temas eden yüzeylerinin bağlanması için gerekli basınç ve sıcaklığın yetersiz kalmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden kalıplama işleminden sonraki taşınma esnasında bile kolaylıkla dağılabileme özelliği sergilemiştir. ÜP2’de en düşük ve ÜP3 ve ÜP4’de benzer aşınma oranı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.41. Farklı kalıplama süreleri için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.

Reçine polimerizasyonunun büyük bir kısmı kalıplama işlemi esnasında tamamlanmaktadır. Bu bakımdan kalıplama süresinin kısa tutulması daha az miktarda

reçinenin polimerizasyon olmasına neden olur ki, bu da balata performansı açısından çok önemli değildir. Çünkü sinterleme işleminde polimerizasyon için gerekli sıcaklık değerlerine ulaşılmakta ve polimerizasyon işlemi sinterleme esnasında tamamlanmaktadır. Yapılan testlerden de bu sebepten dolayı, kalıplama süresinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, ancak belirli bir değerden sonra optimum özellik sergilediği tespit edilmiştir. Balataların sıcaklığa ve frenleme sayılarına bağlı sürtünme katsayıları ve aşınma oranları birlikte değerlendirildiğinde tribolojik performans ve maliyet açısından bu kompozisyona sahip balata malzemesi için optimum kalıplama süresinin 5 dak. olduğu saptanmıştır.

3.2.1.2. Kalıplama sıcaklığının optimizasyonu

Çizelge 3.22’de kalıplama parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin kalıplama sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 3.22. Kalıplama sıcaklıklarının optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin kalıplama ve sinterleme parametreleri.

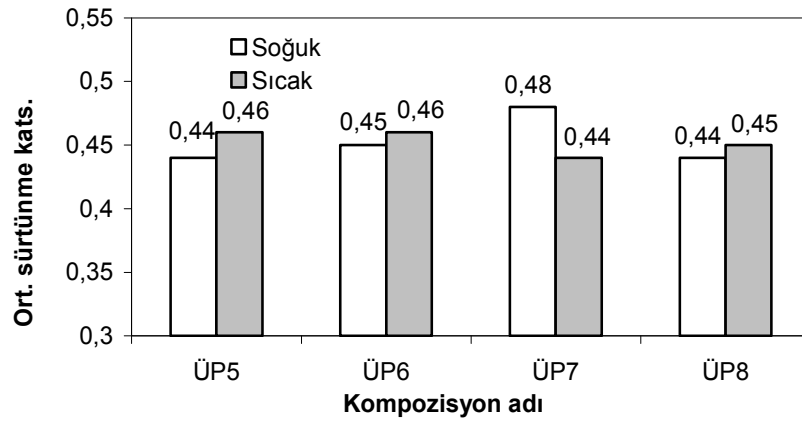
Balata adı	Kalıplama Süresi (dak)	Kalıplama Sıcaklığı (°C)	Kalıplama Basıncı (MPa)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
ÜP5	5	125	7,5	12	165
ÜP6	5	150	7,5	12	165
ÜP7	5	175	7,5	12	165
ÜP8	5	200	7,5	12	165

Bu malzemelerin sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik özellikleri Çizelge 3.23’de verilmiştir. Kalıplama sıcaklığına bağlı olarak sertlik ve yoğunluğun arttığı, yüzey pürüzlülüğünün ise azaldığı tespit edilmiştir. Yoğunluğun artması muhtemelen karışımı oluşturan malzemelerden düşük ergime sıcaklığına sahip olanların sıcaklık artışıyla beraber ergimesi ve gözenekleri doldurması olabilir. Benzer şekilde yüzeyde ergiyen (veya buharlaşan) malzemelerin oluşturduğu boşluklar sebebiyle de yüzey pürüzlülüğü yüksek çıkmıştır.

Çizelge 3.23. Balata kompozisyonlarının mekanik özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
ÜP5	2,17	12
ÜP6	2,17	11,2
ÜP7	2,17	12,3
ÜP8	2,18	12,9

Çizelge 3.23’de verilen üretim parametrelerine göre üretilen aynı kompozisyondaki balata malzemelerinin ortalama sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 3.40’da verilmiştir.

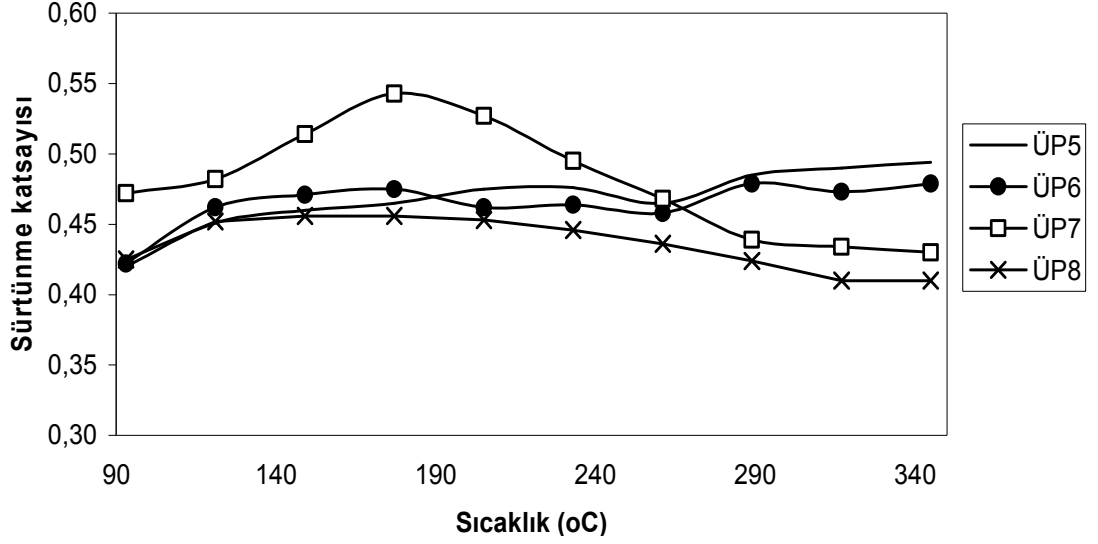


Şekil 3.42. Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının kalıplama sıcaklığına göre değişimi.

Şekil 3.42’de görüldüğü gibi kalıplama sıcaklığı artışına bağlı olarak ortalama sıcak ve soğuk sürtünme katsayılarında önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. Kalıplama sıcaklığının 125°C olması durumunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kalıplama sıcaklığının 150, 175 ve 200°C olması durumundaki sonuçlardan çok farklı değildir. Ancak 125°C sıcaklıkta tüketilen enerji miktarı daha düşük olduğu için, maliyet açısından daha avantajlı.

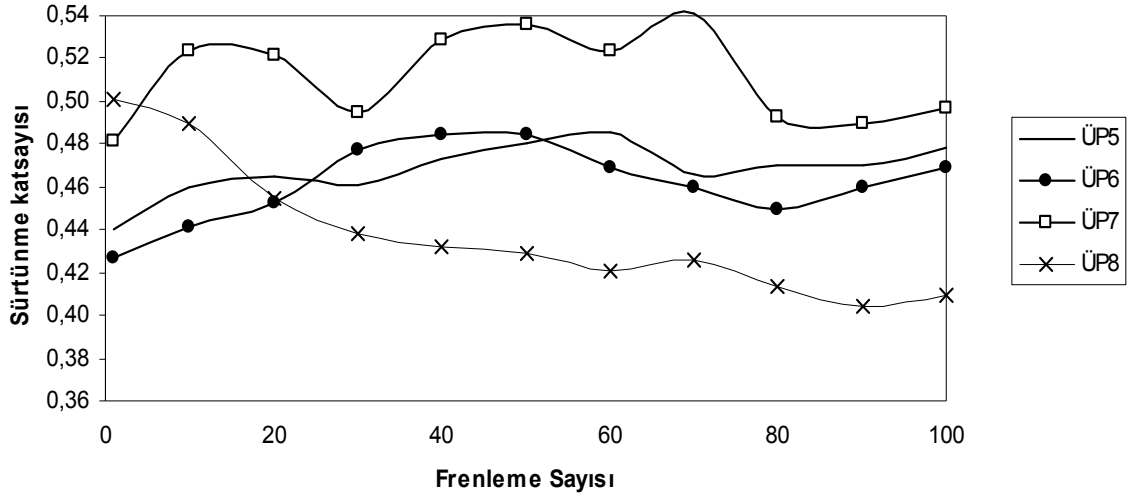
Kalıplama sıcaklığının balatanın çalışma sıcaklığına bağlı sürtünme performansına etkisi Şekil 3.43’de gösterilmiştir. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak en kararlı sürtünme katsayısı değişimi ÜP5 ve ÜP6’da görülmüştür. ÜP7 oldukça kararsız ve ani azalan bir değişim gösterirken, ÜP8 kararlı ve azalan yönde bir sürtünme katsayısı değişimi sergilemiştir. Bunun sebebi ÜP7’de olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda karışımı oluşturan tanelerin yapısının değişmesi (veya bozunması) ve sürtünme katsayısında dalgalı bir değişim meydana gelmesi ve sıcaklığın daha da artmasıyla ÜP8’de olduğu gibi termal

ayırışma meydana gelmesi olabilir. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak en iyi sürtünme performansını sergileyen balata malzemeleri 125 ve 150°C’de basılan ÜP5 ve ÜP6’dır. Ancak 125°C sıcaklıkta tüketilen enerji miktarı daha düşük olduğu için, maliyet açısından daha avantajlı.



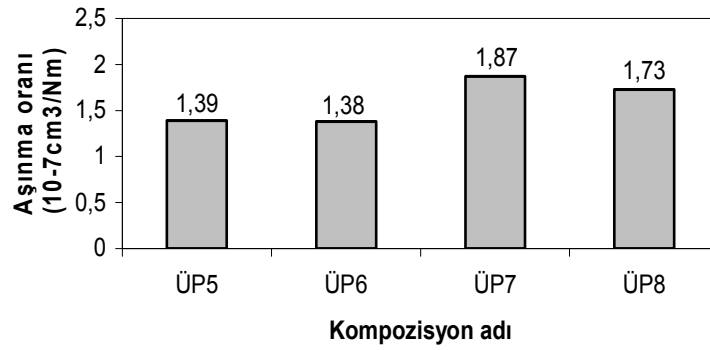
Şekil 3.43. Farklı kalıplama süreleri için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Farklı kalıplama sıcaklıkları için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi Şekil 3.44’de verilmiştir. En kararsız sürtünme katsayısı değişimi ÜP7’de görülürken, en kararlı değişim ÜP8’de görülmüştür. Ancak ÜP8’de kararlı olmasına rağmen yüksek frenleme sayılarında düşen yönde bir sürtünme katsayısı değişimi elde edilmiştir. Bunun sebebi 200°C’de kalıplanan balata malzemelerinde reçine yapısının bozunmuş olması olabilir. ÜP5 ve ÜP6’da ise genel olarak çok kararlı bir değişim gözlenmese de, yüksek frenleme sayılarına karşı daha dayanıklı bir değişim söz konusudur.



Şekil 3.44. Farklı kalıplama sıcaklıkları için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Farklı kalıplama sıcaklıklarında üretilen balata malzemelerinin aşınma oranı değişimleri Şekil 3.45’de verilmiştir. ÜP5 ve ÜP6 balataları düşük bir aşınma oranına sahip iken ÜP7 ve ÜP8 balataları oldukça yüksek aşınma oranları sergilemişlerdir. Yüksek aşınma oranının sebebi yüksek sıcaklıklarda karışımı oluşturan malzemelerin yapısının bozulması olduğu düşünülmektedir. ÜP6’da en iyi sonuç elde edilmesine rağmen ÜP5 ile karşılaştırıldığında aşınma oranları arasında çok fark olmadığı ve enerji tüketimi açısından ÜP6’nın dezavantajlı olduğu görülür. Bu bakımdan talep edilen özellikleri en iyi sağlayabilecek balata malzemesi seçilerek kullanılabilir. Bu çalışmada balata malzemesinin en iyi tribolojik performansının yanısıra üretim maliyeti açısından da en uygun değerleri sergilemesi amaçlandığından en uygun kalıplama sıcaklığının 125°C olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 3.45. Farklı kalıplama sıcaklıkları için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.

3.2.1.3. Kalıplama Basıncının Optimizasyonu

Çizelge 3.24'de kalıplama parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin kalıplama basıncı verilmiştir.

Çizelge 3.24. Kalıplama basıncının optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin kalıplama ve sinterleme parametreleri.

Balata adı	Kalıplama Süresi (dak)	Kalıplama Sıcaklığı (°C)	Kalıplama Basıncı (MPa)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
ÜP9	5	125	5	12	165
ÜP10	5	125	7,5	12	165
ÜP11	5	125	10	12	165
ÜP12	5	125	12,5	12	165

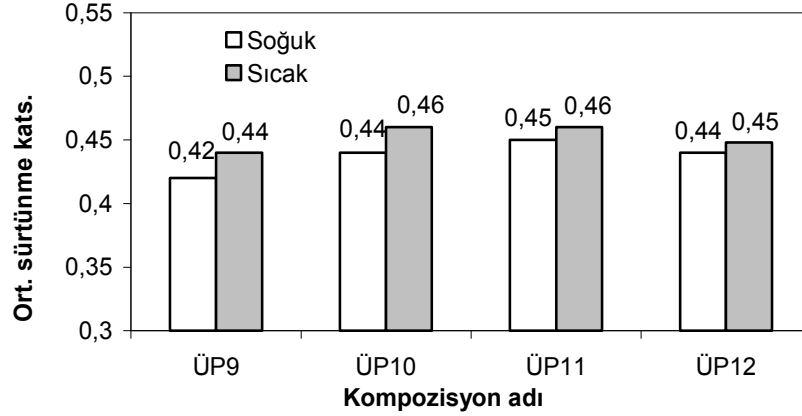
Bu malzemelerin sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik özellikleri Çizelge 3.25'de verilmiştir. Artan basınç ile birlikte balata malzemesini oluşturan toz halindeki malzemelerin birbirine temas eden yüzey alanlarının daha da artması sebebiyle gözenek oranı azalıp yoğunluk artmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün de artan kalıplama basıncı ile birlikte arttığı gözlenmiştir.

Çizelge 3.25. Balata kompozisyonlarının mekanik özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
ÜP9	2,17	11,7
ÜP10	2,17	12
ÜP11	2,23	11,5
ÜP12	2,30	12,2

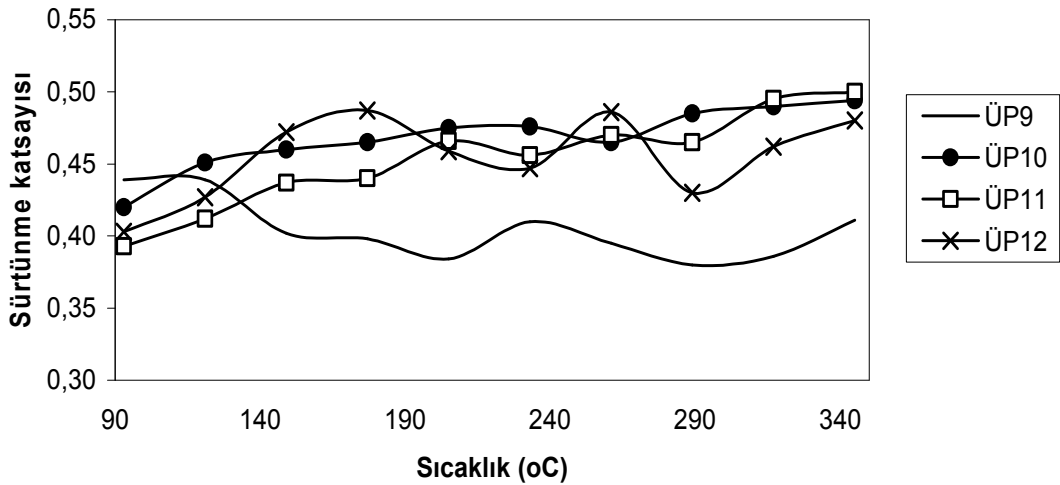
Çizelge 3.24'de verilen üretim parametrelerine göre üretilen aynı kompozisyondaki balata malzemelerinin ortalama sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 3.46'da verilmiştir. Kalıplama basıncına bağlı olarak ortalama sıcak ve soğuk sürtünme katsayılarındaki değişim Şekil 3.46'dan da görüldüğü gibi önemli bir etkiye sahip olmamıştır. Özellikle 7,5 MPa (ÜP10) kalıplama basıncından sonra sürtünme katsayısında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Ancak 7,5 MPa kalıplama basıncında tüketilen enerji miktarı daha düşük olduğu için, maliyet açısından daha avantajlı. Düşük basınçlarda (ÜP9) ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayıları düşük elde edilmiştir. Bunun sebebi, basıncın azalmasıyla birlikte gözenek miktarının artması ve sürtünme esnasında disk ile

eş çalışan balatanın gözenekli yapısından dolayı birbirine temas eden yüzey alanlarının azalmasından olduğu düşünülmektedir.



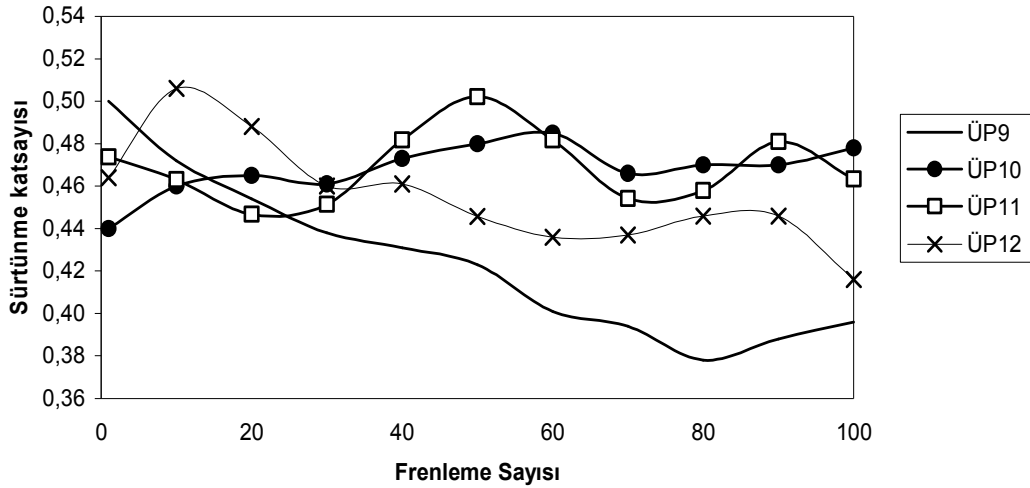
Şekil 3.46. Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının kalıplama basıncına göre değişimi.

Kalıplama basıncının balatanın çalışma sıcaklığı esnasındaki sürtünme performansına etkisi Şekil 3.47’de gösterilmiştir. 7,5 MPa kalıplama basıncından sonraki basınç değerlerinde elde edilen sürtünme katsayısı değişimi genel olarak birbirine benzer olup daha düşük basınçlarda (5 MPa gibi) kararlı ancak düşen doğrultuda bir sürtünme değişimi söz konusudur. ÜP12’deki gibi çok yüksek basınçlarda ise yüksek sıcaklıklara karşı dayanım iyi olmasına rağmen kararsız bir sürtünme performansı elde edilmiştir. Bu bakımdan en iyi sonuçlar ÜP10 ve ÜP11’de görülmektedir. Ancak 7,5 MPa kalıplama basıncında tüketilen enerji miktarı daha düşük olduğu için, maliyet açısından daha avantajlı.



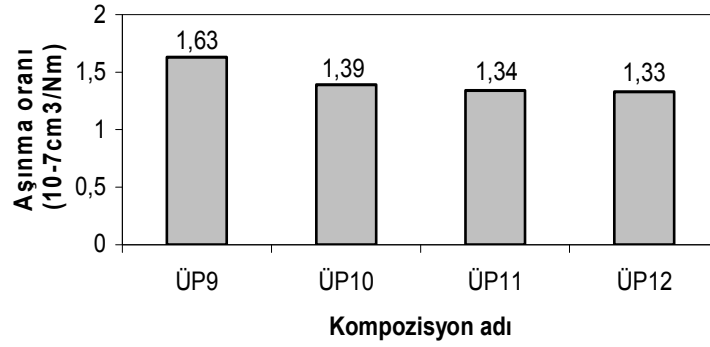
Şekil 3.47. Farklı kalıplama basınçları için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Frenleme sayısına bakıldığında (Şekil 3.48) gerek sürtünme kararlılığı gerekse yüksek sıcaklıklara karşı dayanım açısından en iyi performans 7,5 MPa kalıplama basıncı ile üretilen ÜP10'da görülmüştür. ÜP11 çalışma sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısı değişiminde ÜP10 ile benzer performans sergilemesine karşın frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişiminde kararsız değişim sergilemiştir.



Şekil 3.48. Farklı kalıplama basınçları için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Farklı kalıplama basınçlarında üretilen balata malzemelerinin aşınma oranı değişimleri Şekil 3.49'da verilmiştir. ÜP9 dışında genel olarak balata malzemelerinin aşınma oranları benzer elde edilmiştir. ÜP9'da kalıplama basıncı düşük olduğu için gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve taneler arası temas yüzeylerinin daha az ve zayıf olduğu ve bu yüzden aşınma oranının yüksek olduğu düşünülmektedir. Aşınmaya karşı en dirençli balata malzemesi 12MPa kalıplama basıncı ile üretilen ÜP12'dir. Ancak bu numunenin sıcaklığa ve frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi ÜP10 ve ÜP11'e göre daha kötüdür. Ayrıca tükettiği enerji miktarı da diğerlerine göre daha fazla olduğu için üretim maliyeti açısından avantajlı değildir. Üretim maliyeti kalıplama basıncı ile birlikte artış göstermektedir. ÜP10 ve ÜP11 numunelerinin ise sıcaklığa ve frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimleri benzer ve uygun olmasına rağmen ÜP11'in aşınmaya karşı direnci daha yüksek olduğu için bu kompozisyondaki balata malzemesi için en uygun kalıplama basıncı 10 MPa'dır.



Şekil 3.49. Farklı kalıplama basınçları için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.

3.2.2. Sinterleme parametrelerinin optimizasyonu

Fren balata malzemelerinde sinterleme işlemi, sıcak kalıplama işlemi ile ön şekillendirmesi yapılmış balatanın yapısal kararlılığının arttırmak ve uygulanan yüklere karşı mukavemetine arttırmak amacıyla belirlenen süre ve sıcaklıkta özel fırınlarda ısıtılmasıdır. Sinterleme parametrelerinin optimizasyonunda aynı kompozisyona ve kalıplama parametrelerine sahip balatalar farklı kombinasyonlarda sinterleme süresi ve sıcaklıklarda üretilmiştir.

3.2.2.1. Sinterleme süresinin optimizasyonu

Çizelge 3.26'da sinterleme parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin sinterleme süreleri verilmiştir.

Çizelge 3.26. Sinterleme süresinin optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin kalıplama ve sinterleme parametreleri.

Balata adı	Kalıplama Süresi (dak)	Kalıplama Sıcaklığı (°C)	Kalıplama Basıncı (MPa)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
ÜP13	5	125	10	10	165
ÜP14	5	125	10	12	165
ÜP15	5	125	10	14	165
ÜP16	5	125	10	16	165

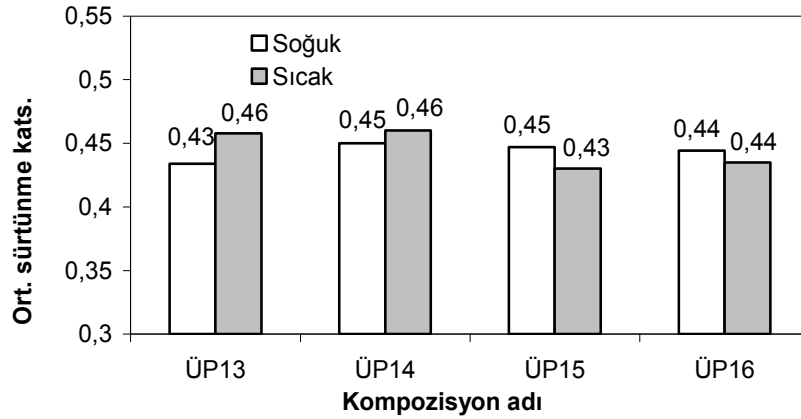
Bu malzemelerin sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik özellikleri Çizelge 3.27'de verilmiştir. Sinterleme süresine bağlı olarak yoğunluğun çok fazla değişmemekle beraber çok düşük bir azalma gözlenmiştir. Azalmanın sebebi yüksek

sıcaklıklara karşı dayanıksız malzemelerin ergimesi ve buharlaşması olabilir. Yüzey pürüzlülüğünün de genel olarak sinterleme süresinden etkilenmediği tespit edilmiştir.

Çizelge 3.27. Balata kompozisyonlarının mekanik özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
ÜP13	2,20	12,1
ÜP14	2,20	12
ÜP15	2,19	11,9
ÜP16	2,19	12,2

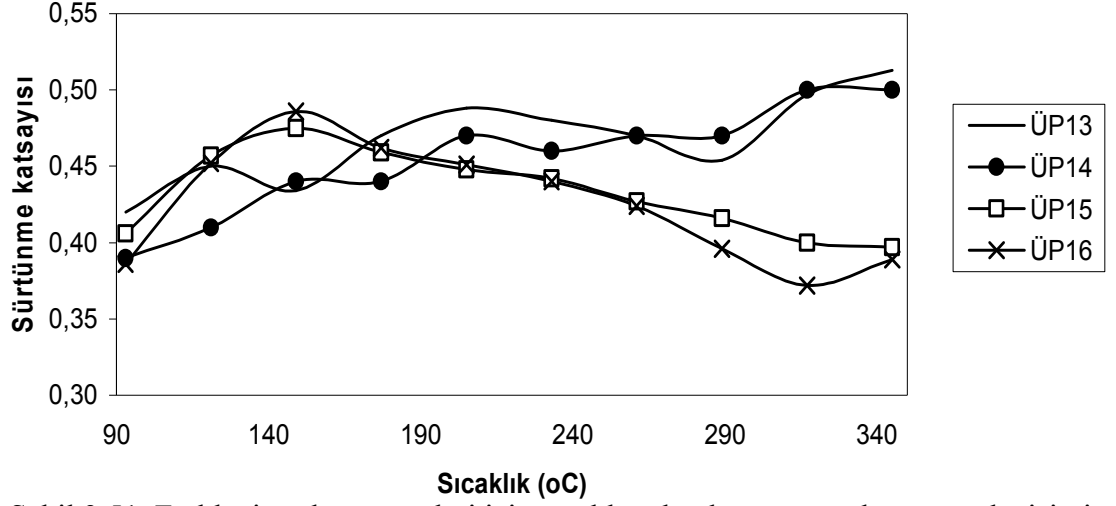
Çizelge 3.28’de verilen üretim parametrelerine göre üretilen aynı kompozisyondaki balata malzemelerinin ortalama sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 3.50’de verilmiştir. Sinterleme süresine bağlı olarak ortalama sıcak ve soğuk sürtünme katsayılarındaki değişim önemli bir etkiye sahip olmamıştır. Özellikle 10 saat (ÜP13) ve 12 saat (ÜP14) sinterleme süreleri arasında sürtünme katsayısında önemli bir farklılık gözlenmemiştir. Ancak sinterleme süresi arttıkça (ÜP15 ve ÜP16) ortalama sürtünme katsayılarının kararsızlığı artmıştır. Bunun sebebi, sinterleme süresinin artmasıyla birlikte yapı içerisindeki bileşenlerin sıcaklıktan daha fazla etkilenmesi ve özelliklerinin değişmesi olabilir.



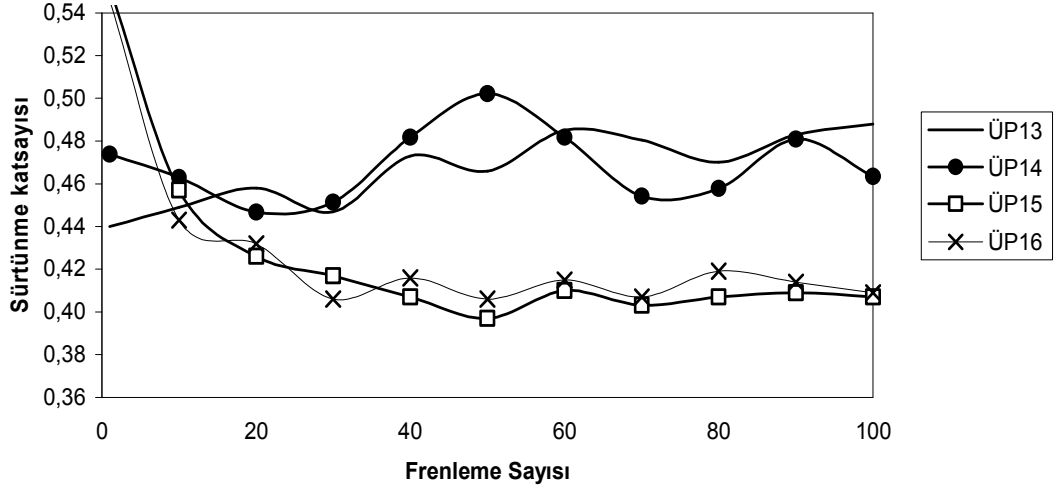
Şekil 3.50. Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının sinterleme süresine göre değişimi.

Sinterleme süresinin balatanın çalışma sıcaklığına bağlı olarak sürtünme performansına etkisi Şekil 3.51’de gösterilmiştir. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak en kararlı ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı sürtünme katsayısı değişimi ÜP13 ve ÜP14’de görülmüştür. ÜP13, ÜP14’e göre daha kararsız bir değişim sergilemesine rağmen 10 saatte tüketilen enerji miktarı daha düşük olduğu için, maliyet ve üretim

zamani açısından ÜP13 daha avantajlı. ÜP15 ve ÜP16 ani azalan bir değişim göstermiştir. Bunun sebebi yüksek sıcaklıklarda karışımı oluşturan tanelerin yapısının değişmesi (veya bozunması) ve termal ayrışma meydana gelmesi olabilir.



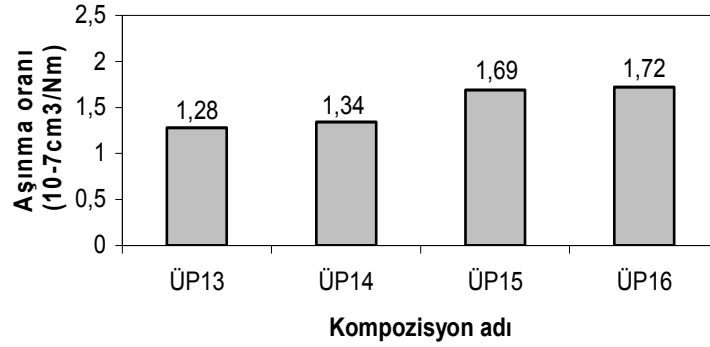
Şekil 3.51. Farklı sinterleme süreleri için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.



Şekil 3.52. Farklı sinterleme süreleri için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Frenleme sayısına bakıldığında, en yüksek performans ÜP13 ve ÜP14'de ve en düşük performans ÜP15 ve ÜP16'da görülmüştür (Şekil 3.52). ÜP15 ve ÜP16'da sürtünme katsayısında yüksek frenleme sayılarına karşı daha hızlı bir düşüş meydana gelirken, ÜP13 ve ÜP14'de değişim yükselen yönde meydana gelmiştir. Ancak ÜP13 daha kararlı bir değişim sergilemiştir.

Farklı sinterleme sürelerinde üretilen balata malzemelerinin aşınma oranı değişimleri Şekil 3.53'de verilmiştir. Sürtünme performansları kötü olan ÜP15 ve ÜP16 balatalarının aşınma dirençleri de düşük elde edilmiştir. Dolayısıyla gerektiğinden daha uzun süre sinterleme hem tribolojik performans hem de maliyet açısından dezavantajlıdır. Daha düşük sürelerde sinterlenen ÜP13 ve ÜP14 balatalarında aşınma oranları oldukça düşük elde edilmiştir. Özellikle ÜP13 balatasının sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi ÜP14'e göre daha kararsız olmasına karşın aşınma direncinin daha yüksek elde edilmesi ve sinterleme süresinin 10 saat gibi diğerlerine göre daha düşük olması bu balata malzemesinin tercih edilmesine sebep olmuştur.



Şekil 3.53. Farklı sinterleme süreleri için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.

Balata malzemelerinin kompozisyonları aynı olmasına rağmen sinterleme sürelerinin farklı olması sebebiyle tükettikleri enerji miktarı ve dolayısıyla üretim maliyeti de farklılık kazanmaktadır. Üretim maliyeti sinterleme süresi ile birlikte artış göstermektedir. Bu bakımdan yapılan sürtünme-aşınma testleri ve üretim maliyeti de göz önüne alınarak optimum sinterleme süresinin 10 saat olduğu tespit edilmiştir.

3.2.2.2. Sinterleme sıcaklığının optimizasyonu

Çizelge 3.28'de sinterleme parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin sinterleme sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 3.28. Sinterleme sıcaklığının optimizasyonu gerçekleştirilen balata malzemelerinin kalıplama ve sinterleme parametreleri.

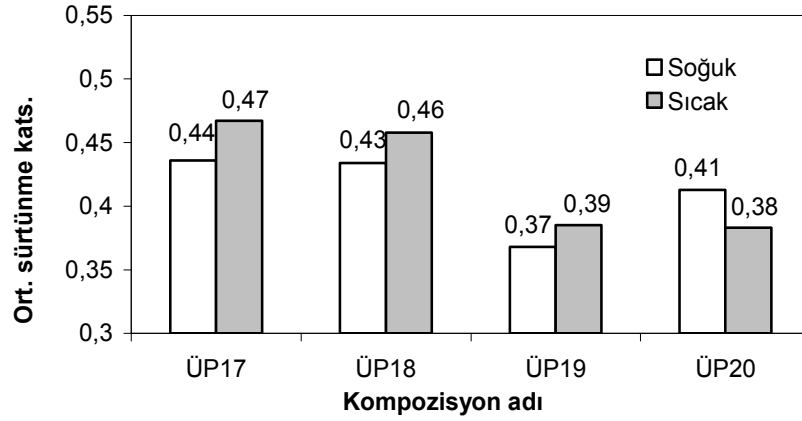
Balata adı	Kalıplama Süresi (dak)	Kalıplama Sıcaklığı (°C)	Kalıplama Basıncı (MPa)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
ÜP17	5	125	10	10	150
ÜP18	5	125	10	10	165
ÜP19	5	125	10	10	180
ÜP20	5	125	10	10	195

Bu malzemelerin sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik özellikleri Çizelge 3.29’da verilmiştir. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak yoğunluk karışımı oluşturan malzemelerin ergimesiyle ve gözenekleri doldurması ile önce artmış, daha sonra da yüksek sıcaklıkta yanması ve buharlaşması sebebiyle düşmüştür. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü de buna ters orantılı olarak önce azalmış, daha sonra da artmıştır.

Çizelge 3.29. Balata kompozisyonlarının mekanik özellikleri.

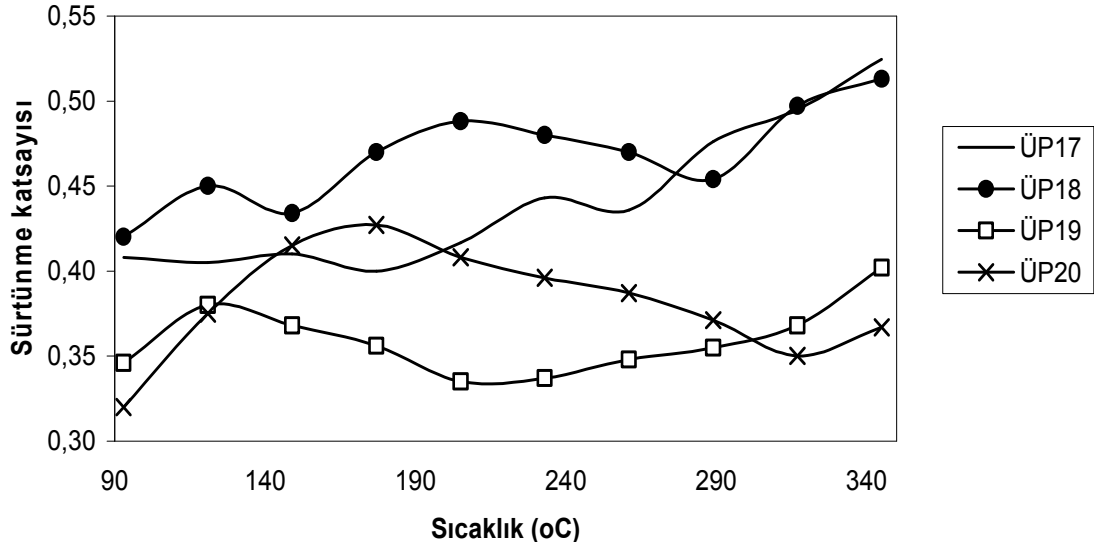
Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
ÜP17	2,20	11,8
ÜP18	2,20	12,1
ÜP19	2,22	12,2
ÜP20	2,16	12,7

Çizelge 3.28’de verilen üretim parametrelerine göre üretilen aynı kompozisyondaki balata malzemelerinin ortalama sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 3.52’de verilmiştir. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak ortalama sıcak ve soğuk sürtünme katsayılarındaki değişim Şekil 3.54’den de görüldüğü gibi büyük farklılıklara neden olmuştur. Özellikle 180°C’den (ÜP19) sonraki sinterleme sıcaklıklarında sürtünme katsayısında ani bir düşüş ve kararsızlık gözlenmiştir. Bunun sebebi, sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte yapı içerisindeki bileşenlerin sıcaklıktan daha fazla etkilenmesi ve özelliklerinin değişmesi olabilir. Ancak sinterleme sıcaklığı düşükçe (ÜP17 ve ÜP18) tam tersi durum gözlenmiştir. ÜP18’de maksimum ortalama sürtünme katsayısı elde edilmiştir.



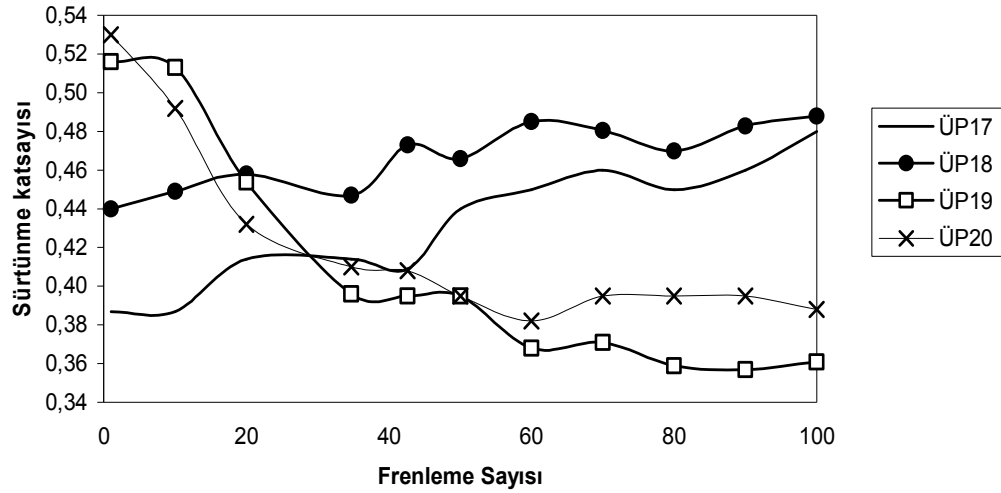
Şekil 3.54. Sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının sinterleme sıcaklığına göre değişimi.

Sinterleme sıcaklığının balatanın çalışma sıcaklığına bağlı olarak sürtünme performansına etkisi Şekil 3.55’de gösterilmiştir. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak en kararlı ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı sürtünme katsayısı değişimi ÜP17 ve ÜP18’de görülmüştür. ÜP17, ÜP18’e göre hem daha kararlı bir değişim sergilemiş hem de tüketilen enerji miktarı daha düşük olduğu için, maliyet açısından ÜP17 daha avantajlı. ÜP19 ve ÜP20 oldukça kararsız ve yüksek sıcaklıklarda düşen bir değişim göstermiştir. Bunun sebebi yüksek sıcaklıklarda karışımı oluşturan tanelerin yapısının değişmesi (veya bozunması) ve termal ayrışma meydana gelmesi olabilir.



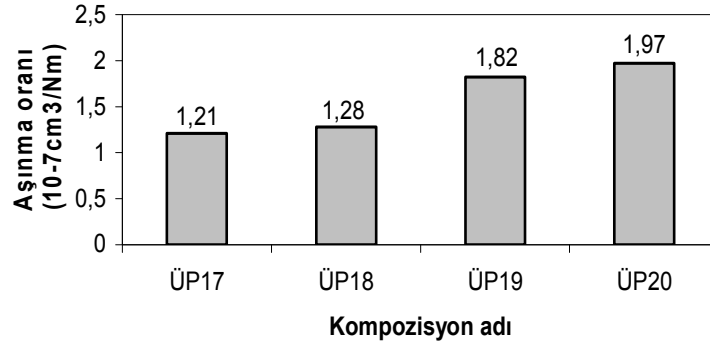
Şekil 3.55. Farklı sinterleme sıcaklıkları için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Frenleme sayısına bakıldığında, en yüksek performans ÜP17 ve ÜP18’de ve en düşük performans ÜP19 ve ÜP20’de görülmüştür (Şekil 3.56). ÜP19 ve ÜP20’de sürtünme katsayısında yüksek frenleme sayılarına karşı daha hızlı bir düşüş meydana gelirken, ÜP17 ve ÜP18’de değişim yükselen yönde meydana gelmiştir. ÜP18 daha yüksek bir sürtünme katsayısı değişimi sergilerken, ÜP17 düşük ancak daha kararlı bir değişim sergilemiştir.



Şekil 3.56. Farklı sinterleme sıcaklıkları için frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen balata malzemelerinin aşınma oranı değişimleri Şekil 3.57’de verilmiştir. 180oC’den itibaren aşınma oranında ani bir artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi yüksek sıcaklıklarda karışımı oluşturan tanelerin yapısının değişmesi (veya bozunması) ve termal ayrışma meydana gelmesi olabilir. Özellikle reçine ve lastik tozu gibi malzemeler yüksek sıcaklıklarda yanarak bağlayıcı özelliğini yitirirler. Kullanılan reçinenin ergime noktasının 110oC olduğu göz önünde bulundurulursa 180oC’den sonra büyük bir kısmı yanarak buharlaşır. Bu bakımdan kullanılan reçine için en uygun sinterleme sıcaklığı 150oC’dir. Daha yüksek sıcaklıklarda reçine yandığı için aşınma oranı da dolayısıyla yüksek elde edilir.



Şekil 3.57. Farklı sinterleme sıcaklıkları için kompozisyon türüne bağlı aşınma oranı değişimi.

Yapılan sürtünme-aşınma testleri ve üretim maliyeti de göz önüne alınarak bu balata malzemesi için optimum sinterleme sıcaklığının 150oC olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Sonuçların Kullanımdaki Bir Balata ile Karşılaştırılması

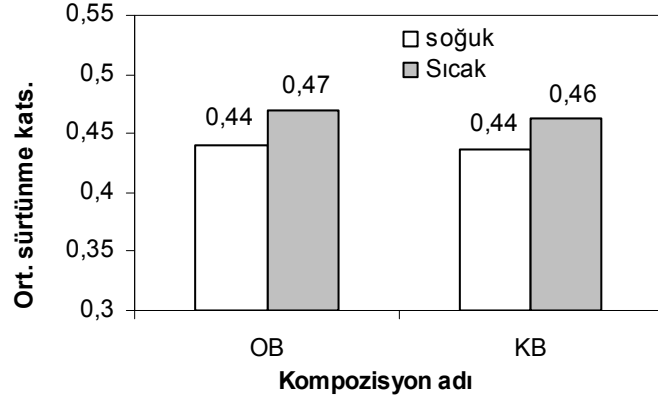
Bu çalışmada kompozisyonu ve üretim parametreleri optimize edilen balata malzemesinin kullarımdaki diğer balata malzemelerinden farkını, üstün ve eksik yönlerini karşılaştırmak amacıyla kullarımdaki bir balatanın test sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. Seçilen balatanın yeni ve orijinal olmasına ve çeşitli kalite belgeleri ile ispatlanmış üstün özelliklere sahip olmasına ve araç üreticilerinin en çok tercih ettiği marka olmasına dikkat edilmiştir. Kullarımdaki balata arka sac kısmı ile beraber temin edilmiştir ve Chase testi için bu sac kısmı kesilip gerekli numune boyutlarına getirilmiştir.

Optimum ve kullarımdaki balata malzemenin sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik özellikleri Çizelge 3.30'da verilmiştir. Bu çalışmada optimum kompozisyona sahip ve optimum üretim parametreleri ile üretilen OB balatasının yoğunluğu kullarımdaki bir balatadan (KB) daha düşük olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü de tam tersine OB balatasında daha yüksek elde edilmiştir.

Çizelge 3.30. Optimum ve kullarımdaki balata malzemelerinin mekanik özellikleri.

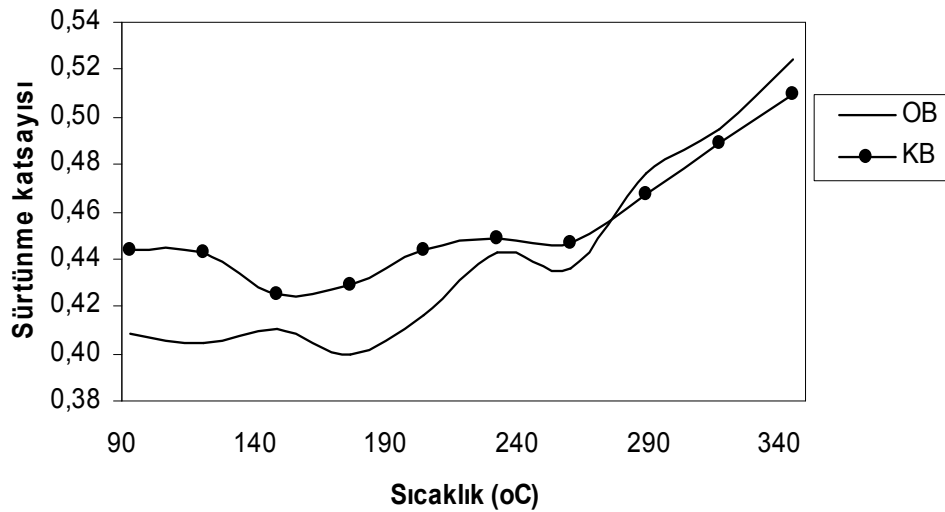
Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
Optimum balata (OB)	2,20	11,8
Kullarımdaki bir balata (KB)	2,27	8,9

Şekil 3.58’de OB ve KB balatasının ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayıları görülmektedir. Soğuk sürtünme katsayısı değerleri aynı olmakla beraber sıcak sürtünme katsayısı OB’de biraz daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bu durum yüksek sıcaklıklarda balatanın frenleme kuvvetine karşı dayanıklı olduğunu gösterir. Ancak bu değerler balatanın sıcaklığa bağlı olarak performans değişimini açıklamak için yeterli değildir.

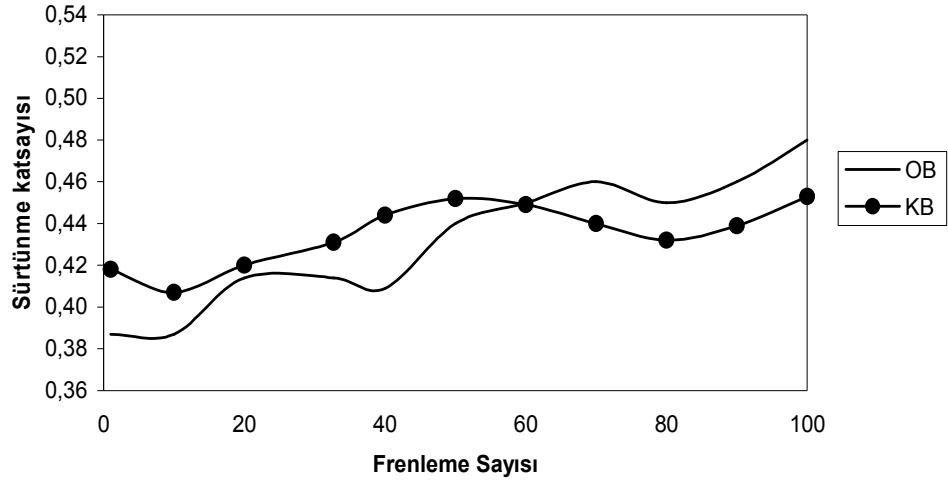


Şekil 3.58. Optimum ve kullanımdaki bir balatanın sıcak ve soğuk ortalama sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.

Çalışma sıcaklığına bağlı sürtünme katsayısı değişimi Şekil 3.59’da verilmiştir. Her iki balatanın kararlılığı yaklaşık benzer elde edilmiştir. Optimum balatanın yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı olduğu gözlenmiştir. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişiminde de durum aynıdır (Şekil 3.60).

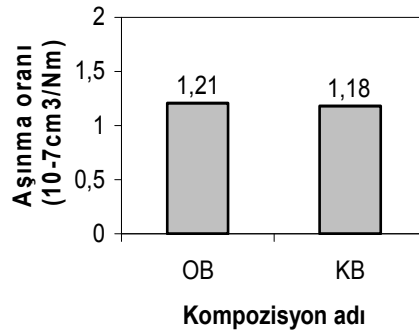


Şekil 3.59. Optimum ve kullanımdaki bir balatanın çalışma sıcaklığına bağlı sürtünme katsayıları değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 3.60. Optimum ve kullanımdaki bir balatanın frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayıları değişimlerinin karşılaştırılması.

Şekil 3.61’de verilen aşınma oranı değişiminden de görüldüğü gibi, kullanımdaki balata optimum balatadan çok az farkla daha iyi performans sergilemiştir. Ancak yukarıda karşılaştırılan sürtünme performansları ve maliyet de göz önüne alındığında optimum balatanın daha avantajlı olduğu görülür.



Şekil 3.61. Optimum ve kullanımdaki bir balatanın aşınma oranlarının karşılaştırılması.

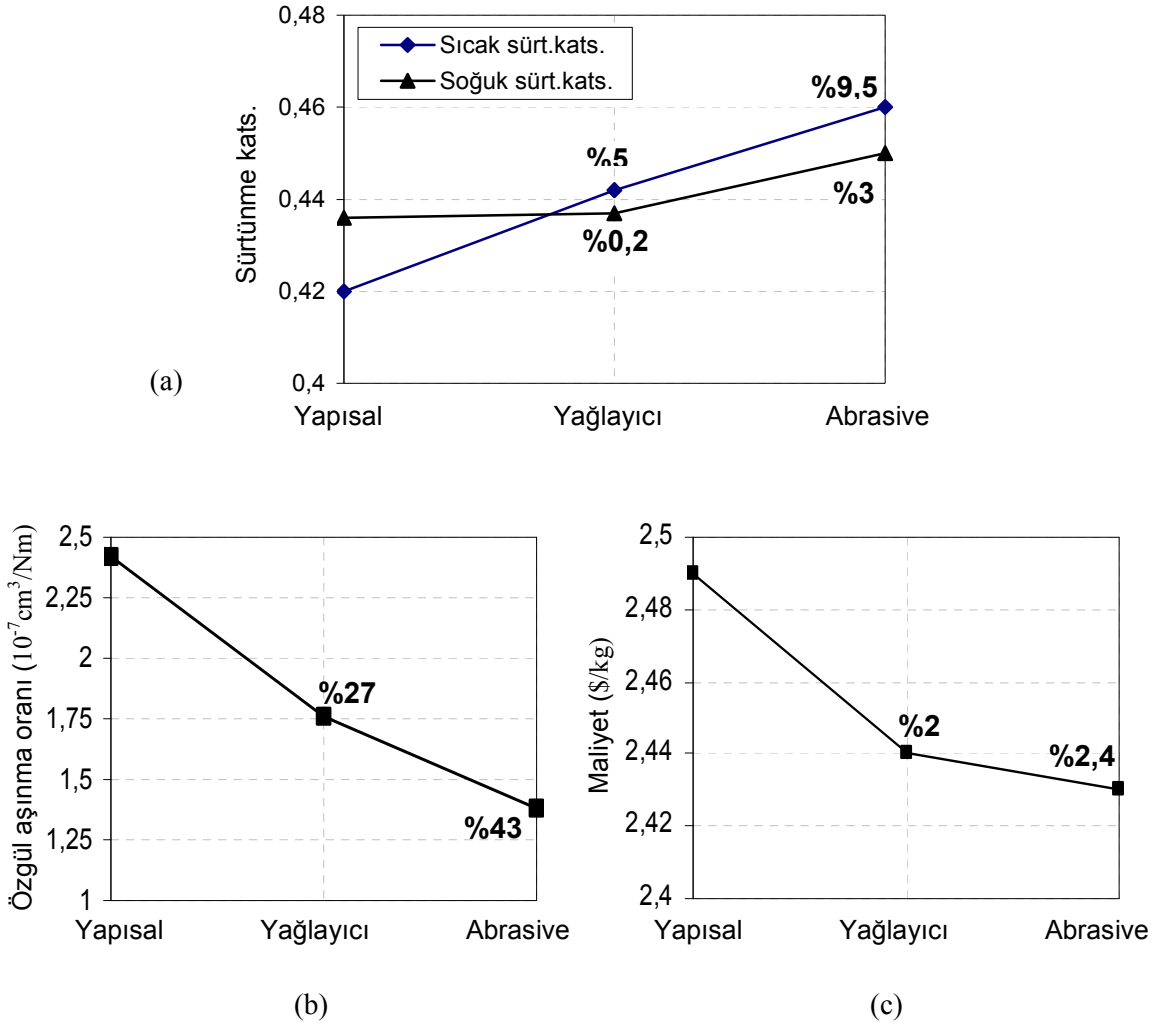
5. SONUÇLAR

Bu çalışmada binek taşıtlarda kullanılan ve gri dökme demir ile eş çalışabilecek bir balata malzemesinin kompozisyonu matematiksel ve deneysel, üretim parametreleri ise deneysel olarak optimize edilmiştir. Yapılan testler ve analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Balata malzemesi içerisinde aramid lif oranının izafi olarak artmasıyla yoğunlukta düşüş, yüzey pürüzlülüğünde artış, ortalama sıcak ve soğuk sürtünme katsayısında artış, aşınma oranında ve maliyette artış gözlenmiştir. Bakır oranının artmasıyla yoğunlukta artış, yüzey pürüzlülüğünde düşüş, ortalama sıcak ve soğuk sürtünme katsayısında düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebi de yüksek sıcaklıkta disk-balata ara yüzeyinde oluşan bakır oksit miktarının artması ve temasın engellenmesidir. Böylece ortalama sürtünme katsayısının yanında aşınma oranında da düşüş gözlenmiştir. Bakır tozunun maliyeti ortalama bir değere sahip olmakla birlikte (aramid lif ve kaya yünü ile karşılaştırıldığında) düşük aşınma oranı sebebiyle belirli oranlarda balata malzemesi içerisinde kullanılması avantaj sağlamıştır. Kaya yünü'nün yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olmamasına karşın, kaya yünü oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünde artış, ortalama sıcak ve soğuk sürtünme katsayısında artış, aşınma oranında bakır tozu kadar önemli bir düşüş sağlamamasına rağmen maliyette önemli bir düşüş sağladığı için belirli oranlarda kullanımı tercih edilmiştir.
2. Balata malzemesi içerisinde grafit tozu oranının izafi olarak artmasıyla yoğunlukta ve yüzey pürüzlülüğünde önemli bir fark gözlenmemiştir. Karışım içerisinde coke tozu oranı ile birlikte grafit tozu oranı arttırıldığında yüksek tribolojik özellikler düşük maliyette elde edilmiştir. Ancak coke tozu oranı daha fazla arttırılırsa sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı oldukça kararsız bir değişim sergilemiştir ve aşınma oranı artmıştır. Balatanın gerek tribolojik performansı açısından gerekse maliyeti açısından yağlayıcılar arasında en büyük etkiyi ZnS tozu yaratmıştır. ZnS oranı arttıkça yoğunluk azalmıştır, yüzey pürüzlülüğünün de en fazla ZnS'den etkilendiği ve ZnS

oranının artışıyla arttığı gözlenmiştir. Sıcaklığa ve frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı ZnS oranı artışıyla genel olarak kararsız bir değişim sergilemiştir. Ortalama sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı ZnS oranı artışıyla düşmüştür. Aşınma oranı da nispeten yüksek elde edilmiştir. ZnS'nin yüksek oranda kullanılmasıyla elde edilen bu kötü performansın yanı sıra maliyetinin de yüksek olması balata malzemesi karışımında düşük oranlarda veya hiç kullanılmaması daha avantajlı olur.

3. Abrasive malzeme grubunun optimizasyonunda balata yoğunluğu genel olarak $ZrSiO_4$ oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. $ZrSiO_4$ oranı arttıkça yoğunluğun da arttığı, ancak karışıma cashew tozu ilavesiyle yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün ise $ZrSiO_4$ ve cashew tozu oranının artışıyla arttığı, Fe_2O_3 'ten çok fazla etkilenmediği görülmüştür. Maksimum oranda $ZrSiO_4$ içeren balatada ortalama sürtünme katsayıları oldukça düşük düzeylerde elde edilmiştir. Maksimum oranda Fe_2O_3 içeren balatada ortalama sürtünme katsayısı yüksek ancak soğuk ve sıcak sürtünme katsayıları arasındaki farkın da yüksek olduğu görülmüştür. En iyi (hem ortalama değeri yüksek hem de kararlı) sürtünme katsayıları maksimum oranda Cashew tozu içeren balatada elde edilmiştir. Sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi en kararlı olan malzeme cashew tozu, en kararsız da Fe_2O_3 olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple en yüksek aşınma oranı Fe_2O_3 içeriği en yüksek olan balata malzemesinde elde edilmiştir. Maliyetleri karşılaştırıldığında kompozisyonlar arasında önemli bir fark olmadığı için optimum balata seçiminde tribolojik performansı öncelikli olarak değerlendirilmesi gerekir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlardan balata malzemelerinde abrasive olarak kullanılan $ZrSiO_4$ 'un aşınma oranını düşük seviyede tutma, Cashew tozunun sürtünme katsayısını yüksek sıcaklıklarda kararlı tutma gibi olumlu yönlerine karşın, Fe_2O_3 'ün aşınma oranını arttırdığı ve sürtünme katsayısında kararsızlıklara yol açtığı görülmüştür. Şekil 4.1.'de yapılan optimizasyon işlemleri sonucunda balata malzemesinin tribolojik özelliklerinde ve maliyetinde yapılan her aşamada toplam iyileştirme oranları gösterilmiştir.

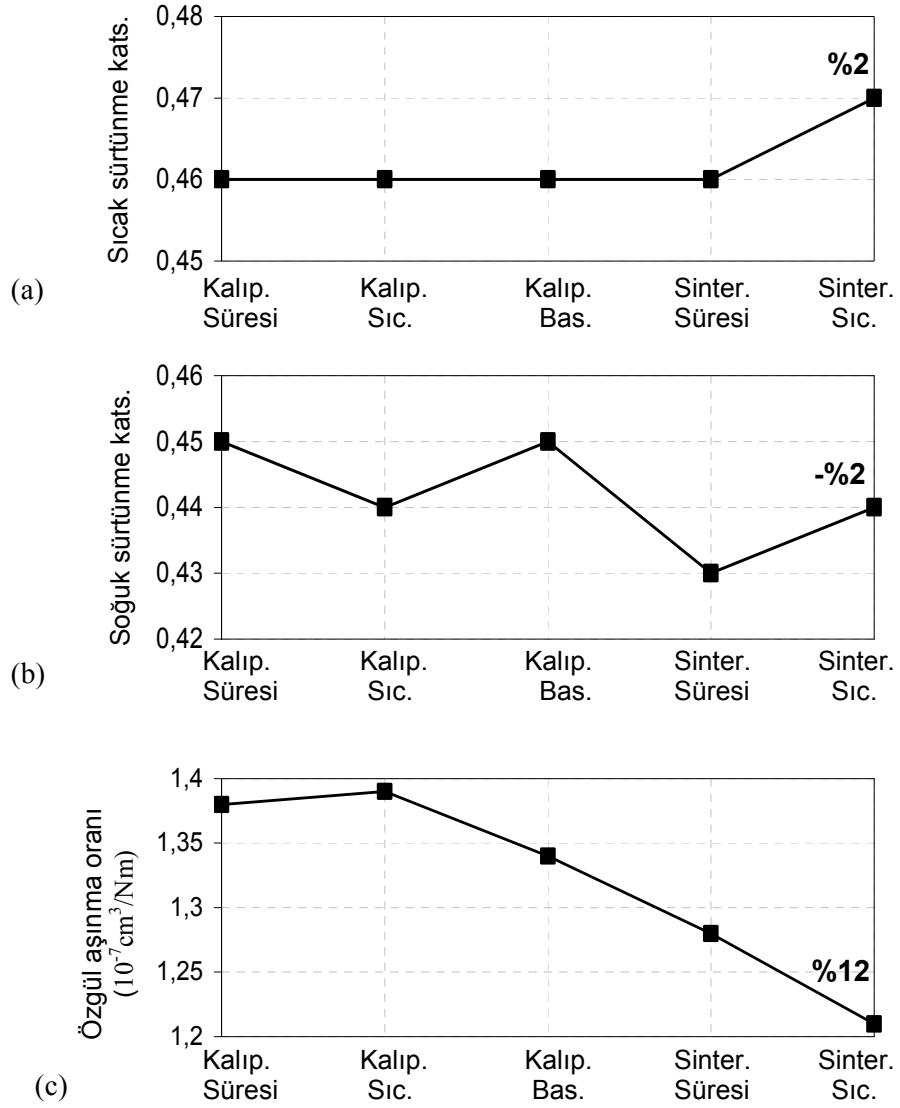


Şekil 4.1. Optimizasyon işlemleri sonucunda balata malzemesinin (a) Sıcak-soğuk ortalama sürtünme katsayısında, (b) özgül aşınma oranında ve (d) maliyetinde her aşamada yapılan toplam iyileştirme oranları.

4. Balata numunelerinin aşınmış (sürtünme testi gerçekleştirilmiş) numunelerinden çekilen mikroyapı fotograflarından sürtünme filminin çoğunlukla sert partiküllerin etrafında yoğunluk kazandığı görülmüştür. Coke tozunun yüzeyde oluşan sürtünme filmini bölgesel olarak daha geniş alan kaplamasına sebebiyet verdiği görülmüştür. Artan sürtünme filmi alanıyla birlikte sürtünme katsayısı kararlılığı artmıştır, aşınma oranı da bu sebeple düşük değerlerde kalmıştır. Çünkü ara yüzeyde oluşan sürtünme filmi yüzeyde koruyucu tabaka etkisi görür, böylece aşınma önlenir ve yüksek sıcaklıklarda kararlı (yüksek) sürtünme katsayısının elde edilir. Balata malzemesinde cashew tozu oranı artırıldığında sürtünme filmi bölgelerinin sayısı ve kapladığı alan

da artmaktadır. Bu sebeple sürtünme filminin koruyucu tabaka etkisi altında bu numunenin diğer numunelere kıyasla aşınma oranı daha düşük, sürtünme katsayısı daha kararlı ve sıcak sürtünme katsayısı oldukça yüksek değerlerde (0,46 gibi) elde edilmiştir.

5. Kalıplama parametrelerinin balatanın tribolojik performansı üzerindeki etkisinin incelemek amacıyla yapılan testlerde kalıplama süresinin azalması ile toz halindeki karışımın birbiri ile tam olarak bağlanmasına fırsat verilmediği ve muhtemelen gözenekli bir yapı meydana geldiğinden sürtünme katsayısı düşük ve aşınma oranı yüksek elde edilmiştir. Ayrıca düşük kalıplama sürelerinde karışımı oluşturan bileşenler arasında güçlü bir bağ meydana gelmez (polimerizasyon işlemi tam olarak gerçekleşemez) ve buna bağlı olarak balata numunesinin kalıptan çıkartılıp taşınması esnasında parçalanma (dağılma) meydana gelmiştir. Buna karşın kalıplama süresinin 5 dak.'dan daha fazla artmasıyla birlikte sürtünme katsayısında önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. Sürenin daha fazla artması sadece zaman ve enerji kaybına sebep olacağından sürtünme performansı açısından 5 dak. optimum kalıplama süresi olarak kabul edilebilir. Balata malzemesinin en iyi tribolojik performansının yanısıra üretim maliyeti açısından da en uygun değerleri sergilemesi amaçlandığından en uygun kalıplama sıcaklığının 125°C olduğuna karar verilmiştir ve en uygun kalıplama basıncı 10 MPa'dır. Optimum sinterleme süresinin 10 saat olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan reçine için en uygun sinterleme sıcaklığı 150°C'dir. Daha yüksek sıcaklıklarda reçine yandığı için aşınma oranı da dolayısıyla yüksek elde edilir. Şekil 4.2.'de üretim parametrelerinin optimizasyonu sonucunda balata malzemesinin ortalama sıcak sürtünme katsayısında, ortalama soğuk sürtünme katsayısında ve özgül aşınma oranında yapılan toplam iyileştirme oranları.



Şekil 4.2. Üretim parametrelerinin optimizasyonu sonucunda balata malzemesinin (a) ortalama sıcak sürtünme katsayısında, (b) ortalama soğuk sürtünme katsayısında ve (c) özgül aşınma oranında yapılan toplam iyileştirme oranları.

Üretim parametrelerinin optimizasyonu sonucunda;

Toplam üretim süresinde azaltma oranı (Kalıplama + Sinterleme) = %20

Toplam üretim sıcaklığında azaltma oranı (Kalıplama + Sinterleme) = %14,5

6. Bu çalışmada kompozisyonu ve üretim parametreleri optimize edilen balata malzemesinin kullarımdaki diğer balata malzemelerinden farkını, üstün ve eksik yönlerini karşılaştırmak amacıyla kullarımdaki bir balatanın test sonuçları ile

karşılaştırma yapılmıştır. Sürtünme performansları ve maliyet açısından bu tez çalışması içerisinde optimum kompozisyonda ve bu kompozisyona en uygun üretim parametreleri ile üretilen balata malzemesinin kullanımdaki bir balata malzemesinden daha avantajlı olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

ABBASI,F.,A.SHOJAEL,A.A.KATBAB. 2000. Thermal Interaction between polymer-based composite friction materials and counterfaces. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.81, p. 364-369.

APAS,A.T., H.HU, J.ZHANG. 1993. *Wear* 162–164, p.88–195.

AMONTONS,M. 1699. De la resistance causee dansles machines. *Memoires de l'Academic Royale*.Paris.p. 275-282.

ANDERSON,A.E. 1992. Friction and wear of automotive brakes. *Materials Park, OH: ASM Handbook*, vol. 18.

ANDERSON,A.E. 1987. Brake system performance-effect of fiber types and concentrations, In: *Proceedings of fibers in linings symposium*. Montreal, Quebec: The Asbestos Institute, p. 2-57.

AZHARİ,C.H., R.J.TALİB. 1998. *J.Phys.Sci.* 9. p. 51–78.

BARBER,J.R. 1969. *Proc. Roy. Soc. A* 312 . p.381-394.

BARK,L.S. 1977. *Wear* 41. p. 309.

BARTENEV,G.M., V.V. LAVRENTEV. 1972.*Polimer Friction and Wear*. Chemistry Publisher. Leningrad.

BERGMANN,F., M.ERİKSSON, S.JACOBSON. 1999. A software based measurement system for test and analysis of automotive brake squeal, *TriboTest Journal*;5(3): p. 265–275.

BETTGE,D., J.STARCEVIĆ. 2003. Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes, *Wear* 254. p. 195–202.

BHUSHAN,B., B.K.GUPTA. 1991. *Handbook of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments*, McGraw-Hill, New York.

BLAU,P.J., H.M.MEYER III. 2003. Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials, *Wear* 255. p. 1261–1269.

BLAU,P.J. 2001. *Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives*. Metals and Ceramics Division. p.1-38.

BOWDEN,F.P., D.TABOR. 1959.*Reibung und Schmiening Fester Körper*.Berlin.

BOWDEN,F.P., D.TABOR. 1971. The Friction and Lubrication of Solids, Part 1, Oxford, at the Clarendon Press.

BOZ, M., 2003. Seramik takviyeli bronz esaslı toz metal fren balata üretimi ve sürtünme-aşınma özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniv., Ankara, s.3-60.

CARLEY,L.,M. MAVRIGIAN. 1998. Brake Systems, OEM & Racing Brake Technology. Berkeley Publishing Groups, ISBN: 1-55788-281-9, p. 50-55.

CHAPMAN,T.R., D.E.NIESZ, R.T.FOX, T.FAWCETT. 1999. Wear-resistant aluminium-boron-carbide cermets for automotive brake applications, Wear 236. p.81-87.

CHO,M.H. , S.J.KIM, R.H.BASCH, J.W.FASH, H.JANG. 2003. Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure, Tribology International 36. p. 537–545.

CORNELL, J.A. 2002. Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data, 3rd Edition. Wiley Series in Probability and Statistics. University of Florida. 538 p.

COULOMB,C.A.1785. Theorie des machines simples. Memoires de Mathematiques et de Physque de l'Academie des Sciences.Paris.p.161-342.

CZİCHOS, VE HABİG

DAY,A.J.2000.Friction, Friction Materials, and Brake Operational Characterstics.Short Course on the Braking of Road Vehicles,University of Bradford,4-8 September 2000.p.13.

DEMİRCİ,A.H. 1982. Ötektoidaltı alaşımsız çeliklerin yeni imal edilen bir sürtünme aşınma deney standında ısıl işlemlere bağlı olarak aşınma davranışlarının incelenmesi ve optimizasyonu, Ege Üniversitesi Mak. Fak. Doçentlik Tezi, Haziran-1982.

DEMİRCİ, A.H.1989.Teknik kuru sürtünmeli ötektoidaltı çelik/çelik sisteminde aşınma dayanımı, yüzey bölgesi sertliği ve %C ilişkisi. Uludağ Üniversitesi,Müh. Fak. Dergisi 3(1), s. 11-19.

DEMİRCİ, A.H.1984. Perlitaltı alaşımsız çeliklerde ısıl işlemler ile aşınma mukavemeti değişiminin incelenmesi. II.Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi. 19-21 Eylül. ODTÜ, Ankara, s. 11-17.

DEMİRCİ, A.H.1988. Tribolojide model sistemleri ve deney sonuçlarının gerçek sisteme taşınabilirliği. Ülkemiz Kalkınmasında Mühendisliğin Rolü Sempozyumu, Yıldız Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 20-24 Haziran, İstanbul, s. 11-17.

DEMİRCİ, A.H.1988. Poliester-Grafit kompozit malzemelerinin bir kaymalı teknik kuru sürtünme sisteminde grafit oranına bağlı olarak aşınma davranışının değişimi.

II.Ulusal Üniversite Sanayi İşbirliği Sempozyumu, 23-25 Haziran. Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

DIN 50281. 1967. Reibung von Lagerungen; Begriff, Arten, Zustände, Physikalische Grössen Pachnormenausschuss Materialprüfung im Deutschen Normenausschuss (DNA), Jüli-1967.

DOİ,K., T.MİBE, H.MATSUI, T.TAMASHO, H.NAKANİSHİ. 2000. Brake judder reduction technology-brake design technique including friction material formulation, JSAE Review 21. p. 497-502.

EKŞİ, A., 1996, Metal tozu üretim teknikleri, Endüstriyel teknoloji, Gazi Üniv. Teknik Eğitim Fak., Ankara.

ERİKSSON,M., J.LORD, S.JACOBSON. 2001. Wear and contact conditions of brake pads dinamical in-situ studies of pad on glass. Wear 249. p.272-278.

ERİKSSON,M., S.JACOBSON. 2000. Tribological surfaces of organic brake pads, Tribology International 33. p.817-827.

ERİKSSON,M., F.BERGMAN, S.JACOBSON. 2002. On the nature of tribological contact in automotive brakes, Wear 252. p. 26-36.

ERİKSSON,M., F.BERGMAN, S.JACOBSON. 1999. Surface characterisation of brake pads after runing under silent and squeeling conditions, Wear 232. p. 163-167.

ERİKSSON,M., A.LUNDQVİST, S.JACOBSON. 2000. A study of the influence of humidity on the friction and squeal generation of automotive brake pads, Journal of Automobile Engineering.

ERSÜMER, A., 1970. Toz metalurjisi sert metal sinterleme, İstanbul Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul, s. 35-50.

FİLİP,P., Z.WEİSS, D.RAFAJA. 2002. On friction layer formation in polimer matrix composite materials for brake applications, Wear 252. p. 189-198.

FLEİSCHER,G., H.WAMSER.1972. Reibung und Verschleiss, Schmierungetechnik 3.

GILLES,T. 2005. Automotive Chassis; Brakes, Steering & Suspension. Thomson Delmar Learning, USA, ISBN: 1-4018-5630-6, p. 164-170.

GOMES,J.R., O.M.SİLVA, C.M.SİLVA, L.C.PARDİNİ, R.F.SİLVA. 2001. The effect of sliding speed and temperature on the tribological behavior of carbon-carbon composites, Wear 249. p. 240-245.

GÖKTAN,A.,A.GÜNEY ve M.EREKE.1995. Taşıt Frenleri. İTÜ Makine Fakültesi, Alliedsignal Automotive, ISBN 975-95017-0-8, Türkiye.109 s.

GÖTTNER,G.H. 1970. Tribologie-Begrift, Wesen und Bedeutung, Schmiertechnik-Tribologie Bd 17. s.285-289.

HALBERSTADT, M. L., MANSFIELD, J. A., RHEE,S.K. 1977. Effects of potassium titanate fiber on the wear of automotive brake linings, International Conference on the Wear of Materials, St. Louis, Mo., U.S.A., April 26–28.

HERRING,J.M. 1967. Mechanism of brake fade in organic brake pad linings, Society of Automotive Engineers Transaction, Paper 670146.

HO,T.L. 1977. International Conference on Wear of Materials 1977, St. Louis, MO, p. 70–76.

IBRAHIM,R.A., S.MADHAVAN, S.L.QIAO, W.K.CHANG. 2000. Experimental investigation of friction induced noise in brake systems. International Journal of Vehicle Design, Vol.23, Nos. ¾.

IBRAHIM,R.A. 1994a. Friction-induced vibration, chatter, squeal and chaos. Part I: Mechanics of Contact and Friction. ASME Applied Mechanics Reviews Vol 47(7), p. 209-226.

IBRAHIM,R.A. 1994b. Friction-induced vibration, chatter, squeal and chaos. Part II: Dynamics and Modeling. ASME Applied Mechanics Reviews Vol 47(7), p. 227-253.

ISO 4545 Parts 1, 2, 3, and 4 : 2005, Metallic materials - Knoop hardness test.

JACKO,M.G. 1977. International Conference on Wear of Materials 1977, St. Louis, MO. p. 541–546.

JACKO,M.G. 1978. Physical and chemical changes of organic disc pads in service, Wear 46. p. 163-175.

JACKO,M.G., P.H.S.TSANG, S.K.RHEE. 1984. Automotive linings evolution during the past decade, Wear 100. p. 503-15.

JACKO,M.G., P.H.S.TSANG, S.K.RHEE. 1989. Wear debris compaction and friction film formation of polymer composites. In: Proceedings of the International Conference on Wear of Materials. p. 469–480.

JACKO,M.G., P.H.S.TSANG, S.K.RHEE. 1989. Wear 133. p. 23.

JACKO,M.G. 1978. Wear 46. p.163.

JAHANMİR,S. 1986. On mechanics and mechanism of laminar wear particle, In:R.M. Latanision, T.E. Fischer (Eds.), Advances in the Mechanics and Physics of Surfaces, vol. 3, Hardwood Academic Publishers, Switzerland. p. 261–332.

JANG,H., K.KO, S.J.KİM, R.H.BASCH, J.W.FASH. 2003. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials, *Wear* (article in press).

JANG,H., S.J.KİM.2000. The effects of antimony trisulfide Sb_2S_3 and zirconium silicate $ZrSiO_4$ in the automotive brake friction material on friction characteristics. *Wear* 239, p.229–236.

JANG,H., J.S.LEE, J.W.FASH. 2001. Compositional effects of the brake friction material on creep groan phenomena, *Wear* 251. p. 1477-1483.

KATO, Y., H. SOUTOME. 2001. Friction material design for brake pads using database, *Tribology Transactions*, Jan, 2001, 44,1; ProQuest Science Journals. pg.137.

KIM,S.J., K.S.KİM, H.JANG. 2003. Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology* 136, p. 202-208.

KİM,S.J., M.H.CHO, D.-S. LİM, H.JANG.2001. Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material, *Wear* 251,p.1484-1491.

KIM,S.J.,H.JANG.2000. Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp. *Tribology International* 33, p. 477-84.

KRAGELSKIİ,I.W. 1971. *Reibung und Verschleiss*, Carl Hanser Verlag, München.

KRAGELSKIİ,I.W. 1970. Zur Berechnung der Reibungskräfte und des Verschleisses beim Gleiten. *Schmierungstechnik* 1. s.33-39.

KRAUSE,H., A.H.DEMİRCİ. 1972. Factor influencing the real trend of the coefficient of friction of two elastic bodies rolling over each other in the presence of dry friction. In: *The mechanics of the Contact Between Deformable Bodies. Proceedings of the Symposium of the International Union of the Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM)*. Enschede, Netherlands. s. 342-358.

KUBOTA,M., T.HAMADE, Y.NAKAZONO, M.FUKUDA, K.DOİ.2000. Development of a lightweight brake disc rotor: a design approach for achieving an optimum thermal, vibration and weight balance. *JSAE Review* 21. p. 349-355.

KURT, A., 1992. Toz metal bronz yatak malzemelerinin özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, s. 20-55.

KURT, A., M.BOZ. 2004. Wear behaviour of organic asbestos based and bronze based powder metal brake linings. *Materials and Design*. Article in pres.

KUHN, H.A., LAWLEY, A. 1978. *Powder Metallurgy Processing – New Techniques and Analyses*, Academic Press, New York, San Francisco.

LİBSCH,T.A., S.K.RHEE. 1977. International Conference on Wear of Materials 1977, St. Louis, MO. p. 555–549.

LU,Y., C.F.TANG, M.A.WRİGHT. 2002. Optimization of a commercial brake pad formulation. Journal of Applied Polymer Science, Vol.84, p.2498-2504.

MATYSIAK,S.J., A.A.YEVTUSHENKO, E.G.IVANYK. 2002. Contact temperature and wear of composite friction elements during braking. Intern. Journal of Heat and Mass Transfer 45. p. 193-199.

NEWMAN,L.B. 1978. Friction Materials-Recent Advances, Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ.

‘NEWS-NOTES’, U.S. Environmental Protection Agency, Brake Manufacturers Look at Pollution from Copper Brake Pads, Issue Number: 53, Chapter Name: Notes on the National Scene,09.1998.

NİCHOLSON,G. 1995. Facts About Friction, P&W Price Enterprises,Inc.,Croydon, PA.

NORTH, M.R. 1976. Disc Brake Squeal. Proc. Conference on Brake of Road Vehicles. Institution of Mechanical Engineers C38/76, p. 169-176.

OEHL,K.H. and H.G.PAUL.1990.Brake Linings for Road Vehicles.Verlag Moderne Industrie AG&Co,D-8910,Box 1751,Germany.p. 4-44.

ÖİK III, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III, Ankara 2001.

OSTERMEYER,G.P. 2003. On the dynamics of the friction coefficient, Wear 254. p. 852-858.

ÖSTERLE,W., M.GRIEPENTROG, T.H.GROSS, I.URBAN. 2001. Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes, Wear 251. p. 1469–1476.

ÖSTERLE,W., I.URBAN. 2004. Friction layers and friction films on PMC brake pads, Wear (article in press)

ÖVEÇOĞLU, M. L., 1997. Toz metalurjisi tarihsel gelişimi, üretim aşamaları ve yeni eğilimler, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, Türkiye, s. 449-475.

PRANDIL,L.1928.Angew. Math. Mech. 8.p. 85.

PRASAD,S.V., J.S.ZABİNSKİ.1997. Tribological behaviour of nanocrystalline zinc oxide films, Wear 203-204. p. 245-256.

RHCE,S.K.1974.Wear Mechanism of Asbestos Reinforced Automotive Friction

Materials. Wear 29. Amsterdam.p. 391-393.

RHEE,S.K.1974. Wear 29, p. 371–393.

RHEE,S.K.,H.S.TSANG,Y.S.WANG.1989.Friction-induced noise and vibration of disc brakes. Wear 133, p. 169-176.

RHEE,S.K., M.G.JACKO, P.H.S.TSANG. 1991. Wear 146. p. 89–97.

SALLIT,I., C.RICHARD, R.ADAM, F.ROBBE-VALLOIRE. 1998. Characterization methodology of a tribological couple: metal matrix composite/brake pads, Material Characterization 40. p. 169-188.

SCIESZKA,S.F. 1980. Wear 64. p. 367–378.

SCHNEIDER,L. 1988. Schmierungstechnik (Berlin) 19. p. 205.

SHOROWORDI,K.M., A.S.M.A.HASEEB, J.P.CELIS. 2003. Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminium MMC sliding against phenolic brake pad, Wear (article in press).

SIEBEL, KEHL 1936.

SIWEI,Z. 1991. Studies in non-asbestos friction materials: a brief review mechanical properties materials design, in: B. Wu (Ed.), Mechanical Properties Materials Design, vol. 5, Elsevier, Amsterdam. p. 403–411.

SO,H.1996. Tribol. Int. 29 (5). p. 415–423.

SPURR,R.T.1961. A theory of brake squeal. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers (Automotive Division) Vol. 1, p. 33-40.

SPURR,R.T. 1972. Fillers in Friction Materials, Wear, 22, pp. 367-409.

SUH,N.P. 1973. Wear 25. p.111–124.

TALIB,R.J., A.MUCHTAR, C.AZHARI. 2001. Scientific Conference Electron Microscopy Conference, Malaysia, Kuala Lumpur. p. 181–184.

TALIB,R.J., C.H.AZHARI. 2000. Second International Conference on Advances in Strategic Technologies, Putra Jaya. p. 859–868.

TALIB,R.J., A.MUCTHAR, C.H.AZHARI. 2002. J. Asean Microsc. Soc. Thailand 18 (1). p. 64–65.

TANG ,C.-F., LU, Y. 2004. Combinatorial Screening of Ingredients for Steel Wool Based Semimetallic and Aramid Pulp Based Nonasbestos Organic Brake Materials, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 23, No. 1/2004. p. 51-63.

THURESSON,D.2004. Influence of material properties on sliding contact braking applications. *Wear* (article in press).

Tribologie, Tribotechnik, Schmierungstechnik Begriffsbestimmungen, Arbeitsblatt Nr.1, 1970 Deutsche Gesellschaft für Tribologie, Homberg/Ndrh-Batı Almanya.

UEXKÜLL, O., SKERFVİNG, S., DOYLE, R. AND BRAUNGART, M. (2005) Antimony in brake pads-a carcinogenic component? *Journal of Cleaner Production* 13, 19–31.

URBAN,I., I.DÖRFEL, W.ÖSTERLE, W.GESATZKE, P.SCHUBERT-BİSCHOFF, S.TREPTE. 2000. Proceedings of the 12th European Congress on Electron Microscopy, Vol. II, Czechoslovak, Society for Electron Microscopy, Brno, Czech Republic. p. 603.

UYGUR, M. E., 1986. Toz metalurjisi seminer notları, SEGEM, İstanbul, 3-9.

WALSH,P. and R.T.SPURR. 1979. Journal in Mech E (Railway Div), C 161, p. 137.

WAHL,H. 1948.Verschleissstechnik, Die Technik Bd.3, Nr.5 s. 193-204.

WAHL,W. 1975. Abrasive Verschleisschäden und ihre Verminderung, VDI-Bricht Nr.243. s.171-187.

WINKELMANN,U. 1978. Anwendung von Verschleiss-Unntersuchungsmethoden zur Bestimmung der Lebensdauer von Gelenklagern, Schmierungstechnik 9. s.103-106.

WIRTH,A.,K.STONE, R.WHITAKER.1992. SAE Tech. Paper 922541 (1992). p. 1-8.

WU,J.B.C., J.E.REDMAN. 1994. Hardfacing with cobalt and nickel alloys, *Welding J.* 73. p. 63-68.

WYCLİFFE,P.1993. Friction and wear of Duralcan reinforced aluminium composites in automotive braking systems, SAE Technical Papers,930187.

YAVUZ,N.2002.Toz Metalurjisi Ders Notları. Uludağ Üniversitesi Müh-Mim. Fak. Makine Müh.Böl. Bursa.

ZHİGAO,X., L.XİAOFEİ. 1991. A research for the friction and wear properties of a metal-fiber-reinforced composite material. in: B. Wu (Ed.), *Mechanical Properties Materials Design*, vol. 5, Elsevier, Amsterdam, p. 611–615.

www.frictioncentre.com

www.rockwool-marine.com/sw37847.asp

EKLER:**Ek-1:** Farklı araştırmacıların geliştirdiği balata kompozisyonları.

Ham madde		Kim ve ark. 2001	Kato ve Soutome 2001	Lu ve ark. 2001	Jang ve Kim 2000	Bettge ve ark. 2003	Österle 2004	Bergmann ve ark. 1999
Disk Malzemesi		gri d.d.	gri d.d.	gri d.d.	gri d.d.	St 52	gri d.d.	gri d.d.
Metal lifler	Cu lifler		19,92		3			30
	Çelik lifler			29,9			48	
Organik ve seramik lifler	Aramid lifler	22,5	3		6	6,4		8
	Alümina						2	
	Cam lifler		14,94		3			
	Seramik lifler							
Taş lifler								
Bağla- yırcı	Fenolik Reçine	20	24,94	18	20	19,2	6	11
	Lastik tozu			11	3	7,5	12	
Yağlayıcı	Grafit		7,27	29,1	5			15
	MoS ₂	5			3		10	
	coke			2,7				
	Sb ₂ S ₃				2...6	4,6		
Sürtünme Katkıları	ZrSiO ₄				2...6			5
	Kum						3	
	Karbon							
	Quartz							
	Cashew tozu		19,94		10			
	Organik tozu							
	Potasyum titanat	7,5			5,1	9...17		
	Demir tozları							7
Pirinç							8	
Bronz							8	
Metal sülfidler						0,3		
Dolgu Malzemeleri	BaSO ₄	45	0,02	1,6	20	14		8
	Ca(OH) ₂				3			
	CaCO ₃					48		
	Vermiculite				3		19	
	Slikon oksit							
	Demir oksit							
	MgO			2,6				

Ek-3: Chase Sürtünme cihazında yapılan bir balata testi örneği (I).

DATE	2005-01-10
------	------------

Friction Coefficient Test Rig

PYRAMID PRECISION ENGINEERING J661 Test Report - Log Sheet

Test ID	Date	Operator	Material	Lot	Ref	Job	Schedule
91_b	8.11.04	srh	sw-b	2\4	swastic		C:\fctr2004\sched_J661.txt

Initial Mass gms	Final Mass gms	Loss gms	Loss %	Initial Thick inches	Final Thick inches	Loss mm	Loss %
0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.21	0.01	6.10

BASELINE-I

No	Force lbs	Friction μ
1	72.8	0.483
5	76.3	0.514
10	74.4	0.509
15	74.1	0.508
20	76.1	0.510

WEAR

No	Force lbs	Friction μ
1	74.6	0.502
10	73.3	0.496
20	72.4	0.489
30	71.9	0.483
40	70.0	0.480
50	71.3	0.489
60	70.2	0.475
70	70.2	0.470
80	69.5	0.468
90	69.3	0.465
100	68.2	0.464

FADE-II

Temp F	Force lbs	Friction μ
199	57.6	0.388
250	62.3	0.424
300	65.3	0.435
401	69.1	0.460
451	69.1	0.467
502	66.4	0.459
552	60.1	0.403
603	53.9	0.367
653	38.3	0.262

FADE-I

Temp F	Force lbs	Friction μ
199	74.1	0.503
250	76.6	0.520
300	77.9	0.530
351	78.8	0.528
401	76.1	0.521
451	77.4	0.526
502	74.6	0.502
552	64.7	0.438

Normal List μ	Hot List μ
0.460	0.262
0.435	0.327
0.424	0.344
0.388	0.345
	0.367
	0.403
	0.426
	0.459
	0.467
	0.509

RECOVERY-II

Temp F	Force lbs	Friction μ
600	42.0	0.284
500	50.4	0.344
400	50.8	0.345
300	47.7	0.327
200	45.3	0.304

RECOVERY-I

Temp F	Force lbs	Friction μ
500	79.2	0.532
400	75.7	0.509
300	62.3	0.426
200	56.8	0.385

Normal μ	Hot μ
0.427	0.391

BASELINE-II

No	Force lbs	Friction μ
1	47.3	0.315
5	53.0	0.358
10	55.2	0.372
15	56.8	0.386
20	57.9	0.397

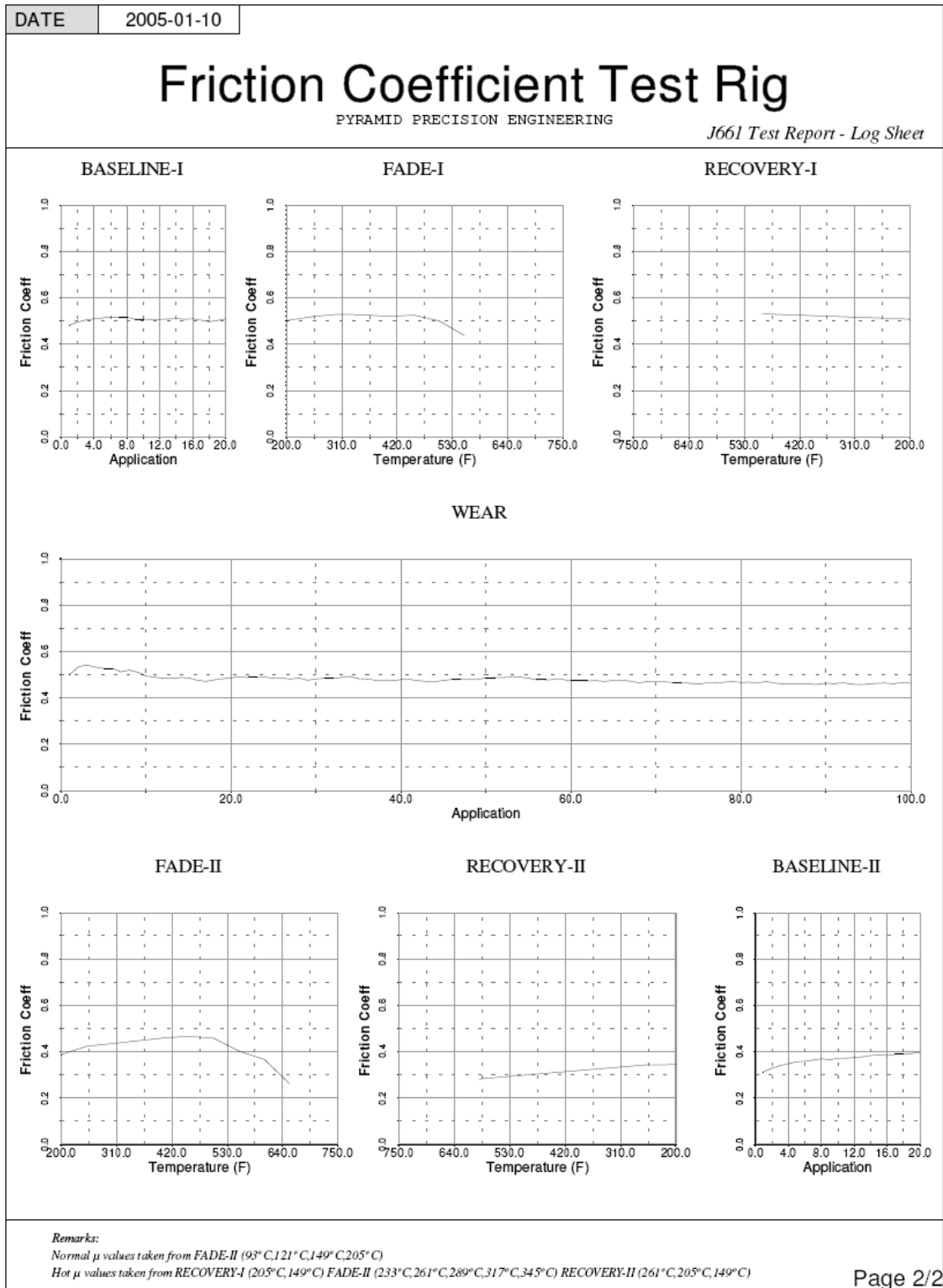
RATING

F	F
---	---

Remarks:
 Normal μ values taken from FADE-II (93°C,121°C,149°C,205°C)
 Hot μ values taken from RECOVERY-I (205°C,149°C) FADE-II (233°C,261°C,289°C,317°C,345°C) RECOVERY-II (261°C,205°C,149°C)

Page 1/2

Chase Sürtünme cihazında yapılan bir balata testi örneği (II).



TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sũresince değerli bilgi ve tavsiyeleri ile bana yol gũsteren değerli hocam Prof.Dr. Nurettin YAVUZ'a, malzeme temininde, ũretiminde ve testinde gerekli olan her desteği sağlayan FRENTEK A.Ő.'ye ve mikroskopik analizlerin yapılmasında destek veren BOSCH A.Ő.'ye teőekkũrũ bir borç bilirim. Ayrıca, çalıőmalarımnda karőılaőtıęım problemlerde beni hiç yanıtız bıraktımayan ve değerli bilgilerini esirgemeyen Mak.Mũh. Hasan KũũKYILMAZ'a ve çalıőmam boyunca hep yanımda olan, bũyũk sabır ve destek gũsteren değerli eőtım Taner ERTAN'a gũnũlden teőekkũr ederim.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Bulgaristan'ın Kırcaali şehrinde doğdu. İlkokul öğrenimini Bulgaristan'da, orta ve lise öğrenimini Bursa Kız Lisesinde tamamladı. 1996 yılında üniversite sınavında kazandığı Uludağ Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümünden 2000 yılında mezun oldu ve aynı yıl Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans programını 2002 yılında tamamladı. 2002 yılında doktora öğrenimine başlayan Araş. Gör. Rukiye Ertan çalışmalarını sürdürmekte olup, Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.