



**BRONZ ESASLI SERAMİK TAKVİYELİ FREN BALATALARININ
PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ**

Hüsamettin KUŞ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2014

Hüsamettin KUŞ tarafından hazırlanan “BRONZ ESASLI SERAMİK TAKVİYELİ FREN BALATALARININ PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

Otomotiv Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Kimya Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Atilla KOCA

Otomotiv Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Mustafa BOZ

İmalat Mühendisliği, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Bülent BOSTAN

Metalürji Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 28/05/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hüsamettin KUŞ

28/05/2014

BRONZ ESASLI SERAMİK TAKVİYELİ FREN BALATALARININ PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Hüsamettin KUŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2014

ÖZET

Balata, fren sistemindeki önemli parçalardan biridir. Fren balata kalitesinin en önemli göstergelerinden birisi, sürtünme katsayısının sıcaklık artışından etkilenmemesidir. Bununla birlikte; aşınma değerlerinin de uygun seviyelerde olması beklenir. Bu deneysel çalışmada, çeşitli katkı maddeleri içeren yirmi dört farklı bronz esaslı fren balata malzemeleri üretilmiştir. T/M (Toz Metalurjisi) yöntemi ile üretilen fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma özellikleriyle bazı fiziksel özellikleri (yoğunluk ve sertlik gibi) incelenmiştir. Mikroyapı ve aşınmış yüzey incelemeleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) kullanılmıştır. Sürtünme aşınma testleri chase tipi sürtünme test cihazı kullanılarak SAE J661 test standartlarına göre yapılmıştır. Ana veya temel malzeme olarak kütlece % 86 bronz tozu, % 11 demir tozu ve % 3 grafit tozu kullanılmıştır. Bu ana malzemeye ilave edilen her bir katkı maddesinin ana malzeme içerisindeki optimum miktarları belirlenmeye çalışılmıştır. İlk aşamada; kütlece farklı oranlarda uçucu kül ve cam tozu katkı malzemesi kullanarak fren balata malzemeleri üretilmiş ve bunlar test edilmiştir. Deney sonuçları, uçucu külün cam tozuna göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Diğer aşamalarda; ana malzeme+% 6 uçucu kül içeren fren balata malzemesine kütlece farklı oranlarda kolemanit ve spinel oksit ilave edilerek bunların ayrı ayrı etkileri ve optimum oranları belirlenmiştir. Ayrıca; ana malzeme+%12 uçucu kül ve % 1 kolemanit içeren fren balata malzemesi içerisine çeşitli oranlarda katılan spinel oksit katkı malzemesinin de etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler ve analiz sonucunda; üretilen yeni balata malzemelerin sürtünme kararlılığı bakımından optimum performans seviyeleri ve ilgili katkı maddesi oranları ortaya konulmuştur. Üretilen fren balata numunelerinin aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri SAE J661 standart aralığında bulunmuştur. Sıcaklığa bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,444) ana malzeme+% 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 1 spinel oksit içeren fren balata numunesinin ve en düşük kütle kaybını (% 1,75) ana malzeme+% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit içeren fren balata numunesinin gösterdiği belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.026
Anahtar Kelimeler : Fren balata malzemesi, uçucu kül, cam tozu,
kolemanit, spinel oksit, toz metalurjisi, aşınma
Sayfa Adedi : 162
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

IMPROVEMENT OF THE PERFORMANCE OF THE CERAMIC-REINFORCED BRONZE BASED BRAKE LININGS

(Ph. D. Thesis)

Hüsamettin KUŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2014

ABSTRACT

Brake lining is one of the important components of the brake system. One of the most important indicators of the quality of brake linings is that they should not significantly be influenced by the increased temperature. They should also have acceptable wear ratios. In this experimental study; twenty four different bronze-based brake-lining materials containing different additives were produced. Friction and wear properties of each of the specimens produced by powder-metallurgy were examined in addition to their some physical properties (eg. density and hardness). Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) were used to investigate the microstructures of the linings and the surfaces of the specimens after the wear test. Frictional-wear tests were conducted by using chase-type frictional test device according to SAE J661 test standarts. As a matrix-material, a powder mixture consisting of 86 % bronze, 11% iron and 3% graphite in mass was used. The optimum amount of each additives in the base material was determined. For the first stage, different frictional materials with the additives of fly ash or glass powder were produced and tested. The test results of frictional-wear showed that fly ash is more effective than the glass-powder. At the following stages, different rates of colemanite and spinel oxide in mass were added into the matrix material+6 % fly ash in mass. Then each of those materials with the additives of colemanite and spinel oxide were tested and their optimum rates and effects were determined. Besides; the effects of the spinel oxide added in different proportions into the material of matrix-material+12 % fly ash and 1 % colemanite in mass were examined. As a result of the tests and the analyses; the optimum performance levels in respect to the friction stability of the produced new brake-lining materials and the ratios of the related additives were demonstrated. The values of the wear and friction ratios of the produced brake-lining samples were found within the SAE J661 standard levels. It was also determined that the brake-lining sample containing matrix material+12 % fly ash+1 % colemanite+1 % spinel oxide exhibited the maximum average friction ratio of 0,444 dependent on temperature and the brake-lining sample containing matrix material+6 % fly ash+1 % colemanite+4 % spinel oxide displayed the minimum mass-loss of 1,75 %.

Science Code : 708.3.026
Key Words : Brake lining materials, fly ash, glass powder,
colemanite, spinel oxide, powder metalurgy, wear
Page Number : 162
Supervisor : Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince engin bilgi birikimi ve değerli katkıları ile beni yönlendiren saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK'a en içten saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitesi toplantılarındaki değerli katkı ve değerlendirmelerinden dolayı tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Metin GÜRÜ ve sayın Prof. Dr. Atilla KOCA'ya teşekkür ederim. Ayrıca çalışmaya maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Deney numunelerinin üretilmesinde fabrika imkânlarının kullanılmasını sağlayan SONMAK firması ve çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca eşim ve oğluma tez çalışmam süresince gösterdikleri özveri ve desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
3. TOZ METALÜRJİSİ	21
3.1. Giriş.....	21
3.2. Toz Metalurji Yöntemi ile Parça Üretim Adımları.....	21
3.2.1. Toz üretim metotları.....	22
3.2.2. Toz karıştırma	25
3.2.3. Presleme	25
3.2.4. Sinterleme.....	27
3.3. Toz Metalürjisi'nin Avantaj ve Dezavantajları.....	29
3.4. Toz Metalürjisinin Uygulama Alanları.....	30
4. FREN SİSTEMİ VE FREN SÜRTÜNME MALZEMELERİ.....	31
4.1. Diskli Frenler	32
4.2. Kampanalı Frenler	32
4.3. Disk Frenlerle Kampanalı Frenlerin Karşılaştırılması.....	33

	Sayfa
4.4. Fren Etkinlik Kaybı.....	34
4.4.1. Mekanik yorulmanın neden olduğu fren etkinlik kaybı	34
4.4.2. Balata yorulmasının neden olduğu fren etkinlik kaybı	35
4.4.3. Fren diski ve balatası arasında oluşan gaz tabakasının neden olduğu fren etkinlik kaybı	36
4.4.4. Suların sebep olduğu fren etkinlik kaybı.....	37
4.5. Fren Balataları.....	37
4.5.1. Organik fren balataları	38
4.5.2. Karbon-Karbon fren balataları	39
4.5.3. Metalik fren balataları	40
4.6. Sinter Metalik Fren Balatalarının Üretimi	43
4.7. Disk ve Kampana Malzemesi	44
4.8. Fren Sisteminde Sürtünme ve Aşınma.....	45
4.8.1. Sürtünme.....	45
4.8.2. Sürtünmenin temel mekanizmaları	46
4.8.3. Aşınma.....	48
4.8.4. Frenlerde sürtünme mekanizması	54
5. MATERYAL VE METOT	57
5.1. Fren Balata Malzemelerinin Hazırlanması	58
5.1.1. Kullanılan hammaddeler	58
5.1.2. Tozların karıştırılması	66
5.1.3. Tozların sıcak preslenmesi	66
5.1.4. Sıcak presleme ve sinterleme işlemi	67
5.2. Deney Ekipmanı ve Test Şartları	68

	Sayfa
5.2.1. Bilgisayar programı.....	71
5.3. Yoğunluk Ölçümü.....	72
5.4. Sertlik Ölçümü.....	72
5.5. Toz Boyut Analizi.....	72
5.6. Metalografik Çalışmalar.....	72
5.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları.....	73
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	75
6.1. Uçucu Külün Etkisi.....	75
6.1.1. Yoğunluk değişimi.....	75
6.1.2. Sertlik değişimi.....	76
6.1.3. Aşınma deney sonuçları.....	77
6.1.4. Aşınma yüzey analizi.....	83
6.1.5. Mikroyapı incelemesi.....	89
6.2. Cam Tozunun Etkisi.....	98
6.2.1. Yoğunluk değişimi.....	98
6.2.2. Sertlik değişimi.....	99
6.2.3. Aşınma deney sonuçları.....	100
6.2.4. Aşınma yüzey analizi.....	104
6.2.5. Mikroyapı incelemesi.....	108
6.3. Kolemanitin Etkisi.....	111
6.3.1. Yoğunluk değişimi.....	111
6.3.2. Sertlik değişimi.....	112
6.3.3. Aşınma deney sonuçları.....	113
6.3.4. Aşınma yüzey analizi.....	117

	Sayfa
6.3.5. Mikroyapı incelemesi	122
6.4. Spinel Oksitin Etkisi	124
6.4.1. Yoğunluk değişimi	124
6.4.2. Sertlik değişimi	126
6.4.3. Aşınma deney sonuçları	127
6.4.4. Aşınma yüzey analizi	134
6.4.5. Mikroyapı incelemesi	140
6.5. Değerlendirme	145
6.5.1. Performans değerlendirmesi	145
6.5.2. Maliyet değerlendirmesi	146
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	149
7.1. Sonuçlar	149
7.2. Öneriler	152
KAYNAKLAR	153
ÖZGEÇMİŞ	162

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Uçucu külün kimyasal bileşemi	14
Çizelge 3.1. T/M'nin otomotiv sektöründe uygulama alanları.....	30
Çizelge 4.1. Bakır ve demir esaslı balata malzemelerinin kimsayal bileşimi.....	41
Çizelge 4.2. Bronz esaslı sinter balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri.....	41
Çizelge 4.3. Kuru sürtünme için demir esaslı malzemeler	42
Çizelge 4.4. Demir esaslı sinter balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri.....	42
Çizelge 5.1. Bronz esaslı fren balata malzemesini oluşturan bileşenlerin kütlece yüzde dağılımı	58
Çizelge 5.2. Bronz tozuna ait fiziksel özellikler.....	58
Çizelge 5.3. Bronz tozunun boyut analizi	58
Çizelge 5.4. NC 100.24 demir tozunun fiziksel özellikleri	59
Çizelge 5.5. Demir tozunun boyut analizi	59
Çizelge 5.6. NC 100.24 demir tozunun kimyasal özellikleri	59
Çizelge 5.7. Grafit tozunun kimyasal analizi	60
Çizelge 5.8. Grafit tozunun boyut analizi.....	60
Çizelge 5.9. Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal bileşimi	62
Çizelge 5.10. Uçucu kül tozunun boyut analizi.....	62
Çizelge 5.11. Çalışmada kullanılan kolemanitin kimyasal bileşemi.....	63
Çizelge 5.12. Kolemanit tozunun boyut analizi	63
Çizelge 5.13. Çalışmada kullanılan spinel oksitin kimyasal bileşimi	64
Çizelge 5.14. Spinel oksit tozunun boyut analizi	64
Çizelge 5.15. Çalışmada kullanılan cam tozunun kimyasal bileşimi	65

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.16. Cam tozunun boyut analizi.....	65
Çizelge 5.17. SAE J661 test standardı.....	70
Çizelge 6.1. SAE-J661 test standardına göre balata malzemelerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ve bronz matrisli balata malzemesine göre maliyetteki % değişim oranı.....	146
Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan tozların birim fiyatları (kg/TL).....	147

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Toz metalürjisinin genel adımları	22
Şekil 3.2. Metal tozu üretimi yapılan muhtelif atomizasyon uygulamaları	23
Şekil 3.3. Demir penta-karbonilin ayrıştırılması ile üretilen demir tozları	24
Şekil 3.4. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları	25
Şekil 3.5. Presleme adımları.....	26
Şekil 3.6. Mikroskopik ölçekte sinterleme işlemi	28
Şekil 4.1. Otomobil fren sistemi.....	31
Şekil 4.2. Diskli fren sistemi	32
Şekil 4.3. Kampanalı fren sistemi	33
Şekil 4.4. Mekanik yorulma	35
Şekil 4.5. Balata yorulması	36
Şekil 4.6. Fren diski ve fren balatası arasında meydana gelen gaz tabakası.....	37
Şekil 4.7. Demir esaslı bir balata malzemesinin sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	42
Şekil 4.8. İdeal bir yüzeye göre yüzey sapmalarının seçilmiş tipleri.....	46
Şekil 4.9. Pürüzler arasındaki temas gerilimi.....	47
Şekil 4.10. Mikroskobik seviyede sürtünme oluşum mekanizmaları.....	48
Şekil 4.11. Bir tribolojik sistem ile ilgili parametreler ve temel özellikleri	49
Şekil 4.12. Dört temsili aşınma modunun şematik gösterimi	50
Şekil 4.13. Abrasiv aşınmanın beş süreci.....	51
Şekil 4.14. Taramalı elektron mikroskopu kullanılarak elde edilen abrasiv aşınmanın üç aşaması.....	52
Şekil 4.15. İki ve üç gövdeli abrasiv aşınma tipleri	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. Temas yamaları, temas yamaları içerisindeki gerçek temas alanları ve fren balatasının genel görüntüsü	55
Şekil 4.17. Fren diski ve fren balatası arasındaki temas durumunun şematik gösterimi	56
Şekil 5.1. Presleme sıcaklığı ve basıncının zamana bağlı değişimi	68
Şekil 5.2. Chase tipi sürtünme-aşınma test cihazının şematik resmi	69
Şekil 5.3. Chase tipi sürtünme test cihazı kontrol paneli	71
Şekil 6.1. Uçucu kül miktarının yoğunluk değişimi üzerine etkisi (A; $P_{Presleme}=70$ MPa; $T_{Sinterleme}=650$ °C; $t_{süre}=4$ dakika).....	76
Şekil 6.2. Uçucu kül miktarının sertlik değişimi üzerine etkisi (A; $P_{Presleme}=70$ MPa; $T_{Sinterleme}=650$ °C; $t_{süre}=4$ dakika)	77
Şekil 6.3. Arayüzey sıcaklığının ve uçucu kül yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A; $P_{Presleme}=70$ MPa; $T_{Sinterleme}=650$ °C; $t_{süre}=4$ dakika).....	78
Şekil 6.4. Uçucu kül miktarının soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A; $P_{Presleme}=70$ MPa; $T_{Sinterleme}=650$ °C; $t_{süre}=4$ dakika).....	80
Şekil 6.5. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine uçucu kül miktarının etkisi (A; $P_{Presleme}=70$ MPa; $T_{Sinterleme}=650$ °C; $t_{süre}=4$ dakika).....	81
Şekil 6.6. Uçucu kül miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (A; $P_{Presleme}=70$ MPa; $T_{Sinterleme}=650$ °C; $t_{süre}=4$ dakika)	82
Şekil 6.7. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi üzerinden alınan a) 1 numaralı noktanın, b) 2 numaralı noktanın EDS analizi.....	87
Şekil 6.8. Resim 6.12'deki 1 noktasının EDS analizi	95
Şekil 6.9. % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin a) 1, b) 2, c) 3, d) 4 noktasının EDS analizi	96
Şekil 6.10. Cam tozu miktarının yoğunluk değişimi üzerine etkisi (A; $P_{Presleme}=70$ MPa; $T_{Sinterleme}=650$ °C; $t_{süre}=4$ dakika)	99
Şekil 6.11. Cam tozu miktarının sertlik değişimi üzerine etkisi (A; $P_{Presleme}=70$ MPa; $T_{Sinterleme}=650$ °C; $t_{süre}=4$ dakika)	100

Şekil	Sayfa
Şekil 6.12. Arayüzey sıcaklığının ve cam tozu yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	100
Şekil 6.13. Cam tozu miktarının soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine miktarının etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	102
Şekil 6.14. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine cam tozu miktarının etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	103
Şekil 6.15. Cam tozu miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)	104
Şekil 6.16. % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinde a) 1 numaralı noktanın b) 2 numaralı noktanın EDS analizi.....	107
Şekil 6.17. Kolemanit miktarının yoğunluk değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	112
Şekil 6.18. Kolemanit miktarının sertlik değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	113
Şekil 6.19. Arayüzey sıcaklığının ve kolemanit yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	113
Şekil 6.20. Kolemanit miktarının soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	115
Şekil 6.21. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine kolemanit miktarının etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	116
Şekil 6.22. Kolemanit miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	117
Şekil 6.23. % 4 kolemanit katkılı fren balata numunesinin aşınma yüzeyi üzerinden alınan a) 1 numaralı noktanın b) 2 numaralı noktanın EDS analizi.....	121
Şekil 6.24. Spinel oksit miktarının yoğunluk değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	125

Şekil	Sayfa
Şekil 6.25. Spinel oksit miktarının sertlik değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	126
Şekil 6.26. Arayüzey sıcaklığının ve spinel oksit miktarının sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	127
Şekil 6.27. Arayüzey sıcaklığı ve spinel oksit yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	128
Şekil 6.28. Spinel oksit miktarının soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	129
Şekil 6.29. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine spinel oksit miktarının etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	131
Şekil 6.30. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine spinel oksit miktarının etkisi (A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	132
Şekil 6.31. Spinel oksit miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (A+% 6 U.K.+ % 1 Kolemanit; A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika).....	133
Şekil 6.32. Resim 6.24'de 1 ile gösterilen noktanın EDS analiz sonucu	136
Şekil 6.33. Resim 6.25'deki fren balata numunesinde a) 1 numaralı noktanın, b) 2 numaralı noktanın EDS analizi.....	139
Şekil 6.34. Resim 6.28'deki fren balata numunesinde a) 1 numaralı noktanın, b) 2 numaralı noktanın EDS analizi	143
Şekil 6.35. SAE-J661 test standardına göre sürtünme katsayılarına karşılık gelen harf değerleri	145

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Bronz tozunun SEM görüntüsü	59
Resim 5.2. Demir tozunun farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a) X 250 b) X 2500	60
Resim 5.3. Çalışmada kullanılan uçucu külün farklı büyütmelelerde SEM görüntüleri a) X 2500 b) X 5000	61
Resim 5.4. Çalışmada kullanılan kolemanitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a) X1000 b) X2500	63
Resim 5.5. Çalışmada kullanılan spinel oksitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri	64
Resim 5.6 Cam tozunun farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a) X 5000 b) X 7500	65
Resim 5.7. Turbola toz karıştırıcı	66
Resim 5.8. Endüstriyel tip sıcak presleme cihazı	67
Resim 5.9. Toz presleme kalıbı	67
Resim 5.10. Chase tipi sürtünme aşınma test cihazı.....	69
Resim 5.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	73
Resim 6.1. Bronz esaslı fren balata malzemesinin aşınma sonrası SEM resimleri a) X240 b) X500	83
Resim 6.2. % 2 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma sonrası yüzeylerin SEM resimleri a) X240 b) X3000	84
Resim 6.3. % 4 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma sonrası yüzeylerinin SEM resimleri a) X240 b) X500	85
Resim 6.4. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma sonrası yüzeylerinin SEM resimleri a) X240 b) X500	86
Resim 6.5. % 8 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM resmi.....	88

Resim	Sayfa
Resim 6.6. a) % 10 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma sonrası SEM resmi b) % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma sonrası SEM resmi	89
Resim 6.7. Bronz matrisli fren balata malzemesinin SEM görüntüsü.....	90
Resim 6.8. Bronz matrisli fren balata malzemesinde oluşan gözenek yapısı	90
Resim 6.9. Bronz matrisli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası	91
Resim 6.10. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü.....	92
Resim 6.11. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası.....	93
Resim 6.12. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesindeki uçucu kül ile matris arayüzeyi	94
Resim 6.13. % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü.....	95
Resim 6.14. % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinde gözenek oluşumu	98
Resim 6.15. Artan cam tozu miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri a) % 2 b) % 4 c) % 6 d) % 8 cam tozu	105
Resim 6.16 % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü.....	109
Resim 6.17. % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası	109
Resim 6.18. a) % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinde gruplaşmış cam partiküllerinin SEM görüntüsü b) Cam tozu ile matris ara yüzeyi.....	111
Resim 6.19. Artan kolemanit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 kolemanit	118
Resim 6.20. % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	120

Resim	Sayfa
Resim 6.21. % 6 uçucu kül+ % 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü.....	122
Resim 6.22. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası.....	123
Resim 6.23. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde artan spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 spinel oksit.....	134
Resim 6.24. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi	136
Resim 6.25. % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde artan spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 spinel oksit.....	137
Resim 6.26. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü.....	140
Resim 6.27. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası	141
Resim 6.28. a) % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin SEM görüntüsü b) Spinel oksit ile matris arayüzeyi	143
Resim 6.29. % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 1 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü.....	144

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

μ	Sürtünme Katsayısı
μm	Mikron
F	Kuvvet (N)
<i>f</i>	Sürtünme Kuvveti
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar

Açıklama

BSD	Brinell sertlik değeri
BSE	Geri yansıyan elektron görüntüsü
EDS	Enerji dağılım spektrometresi
KLM	Kolemanit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
T/M	Toz metalürjisi
U.K.	Uçucu kül

1. GİRİŞ

Frenler otomobillerdeki en önemli güvenlik ve performans elemanlarından biridir (Mohanty ve Chugh, 2007). Hareket enerjisini sürtünme yoluyla ısıya dönüştürerek hareketin durdurulması ya da kontrol altına alınmasını sağlayan sisteme fren sistemi denir. Fren sisteminden, aracı değişik şartlar altında emniyetli bir şekilde durdurması istenir (Sugözü, 2009).

Fren sisteminin frenleme performansına etki eden önemli parçasından birisi fren balatasıdır (Mutlu, 2002). İdeal bir fren balata malzemesinden kuru veya ıslak ortamlarda değişken yük, sıcaklık, hız gibi farklı çalışma koşullarında sabit bir sürtünme katsayısı göstermesi, ayrıca ısıya, suya ve yağa karşı direnç, düşük aşınma oranı, yüksek termal kararlılık, frenleme esnasında düşük ses ve fren diskine zarar vermemesi beklenir (Jaafar, Selamat ve Kasiran 2012; Abadi, Khavandi ve Kharazi 2010). Fren balatasının sahip olduğu bu özellikler doğrudan taşıtın frenleme ve güvenlik performansını etkiler (Han, Tian ve Yin, 2008).

Son zamanlara kadar asbest düşük fiyatı, iyi mekanik özellikleri ve matris ile uyumu gibi avantajlarından dolayı fren balata malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktaydı (Han ve diğerleri 2008). Ancak akciğerlere giren 0,1-1 μm çapında, 5 μm uzunluğundaki asbest liflerinin fiziksel etki ile temas yerinde yaralama ve parçalama gibi etkiler yaptığı, bunun sonucunda ise solunum yollarındaki bronşlarda kasılmaların meydana geldiği, ayrıca akciğer zarında kireçlenmeler ile sertleşmelere neden olduğu ve akciğer kanserine yol açtığı görülmüştür (Gemalmayan, 1984). Asbestin neden olduğu bu sağlık problemlerinden dolayı fren balata üreticileri asbestin yerini alabilecek alternatif malzeme arayışı içine girmişlerdir (Chan ve Stachowiak, 2004).

Fren balata malzemeleri metalik, karbon-karbon kompozitler ve organik polimer olmak üzere üç ana sınıfta ayrılabilir (Anderson, 1992: 569). Sinter metalik fren balataları bakır ya da demir esaslı olabilir. Bu tip fren balataları katı hal sinterleme yöntemi ile üretilmekte ve performansını geliştirmek için inorganik katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu fren balataları çok yüksek güç giriş yoğunlukları için geliştirilmiştir. Karbon esaslı balatalar ise askeri ve ticari uçakların disk frenlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Bu balatalar

ağırlığın kiritik olduğu ve fiyatın ikinci planda olduğu performansın daha önemli olduğu uçak frenlerinde ve yarış otomobillerinde kullanılmaktadır. Otomobil frenlerinde kullanılan en yaygın fren balata malzemesi organik polimer malzemedir. Bu balata malzemeleri genellikle % 30–40 organik reçine içermektedir ve formülleri genellikle patentlidir (Bijwe, 1997). Organik polimer balata malzemeleri genellikle 10-20 arasında değişen farklı malzemelerden oluşan kompozit bir malzemedir. Bu malzemeler bağlayıcı, yapısal malzeme, dolgu malzemesi ve sürtünme düzenleyici olarak dört sınıfa ayrılabilir. Yapısal malzemeler mekanik dayanım sağlar ve genellikle metal, karbon, cam, kevlar ve nadir olarak da farklı mineraller ve seramik fiberler kullanılır. Bağlayıcı balata malzemesini oluşturan tüm bileşenleri bir arada tutar ve termal olarak kararlı bir yapı oluşturur. Fren balata formüllerinde günümüzde bağlayıcı olarak fenolik reçine, kauçuk ya da kaju fıstık kabuğu sıvısı modifiyeli fenolik reçineler kullanılmaktadır. Dolgu malzemesi ise temel olarak maliyeti azaltmanın yanı sıra üretilebilirliği geliştirmek için kullanılır. Mika ve vermikülit gibi farklı mineraller sık sık kullanılır. Barit minerali ($BaSO_4$) ve kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) ve alçı ($CaSO_4$) diğer yaygın kullanılan dolgu malzemeleridir. Sürtünme düzenleyici kararlı bir sürtünme özelliği ve hem fren balatası hem de fren diskindeki aşınmayı kontrol etmek için ilave edilir. Grafit, kok, molibden disülfür (MoS_2) ve antimon (Sb_2S_3) gibi yağlayıcılar artan sıcaklıkta sürtünme katsayısını stabilize etmek için kullanılır. Alüminyum oksit (Al_2O_3), zirkonyum oksit (ZrO_2), silisyum karbür (SiC), zirkonyum silikat ($ZrSiO_4$) gibi abrasivler sürtünme katsayısını ve disk aşınmasını artırır. Abrasivlerin diğer bir amacı disk yüzeyinden istenmeyen yüzey filmlerini ve demir oksitleri temizleyerek daha iyi bir sürtünme yüzeyi oluşturmaktır (Eriksson ve Jacobson, 2000; Ma, Martynkova, Marta, Matejka ve Lu, 2008; Yavuz ve Ertan, 2005).

Yolcu otomobillerinde disk ile balata arasındaki çalışma sıcaklığı şiddetli ve tekrarlı frenleme durumuna göre 370 °C'ye kadar çıkabilir. Fren balatası ile disk arasındaki bu yüksek sıcaklık balata malzemesinin kayma dayanımının azalmasına dolayısıyla fren etkinlik kaybına yol açan sürtünme kuvvetinin azalmasına neden olur. Yüksek sıcaklıklarda (300-400 °C) sürtünme katsayısındaki düşüşe bağlı olarak fren performansındaki düşüş fren etkinlik kaybı olarak ifade edilmektedir (Jang, Ko, Kim ve Basch, 2004; Bijwe, Majundar ve Satapathy, 2005; Eriksson, Bergman ve Jacobson, 2002). Organik polimer esaslı fren balatalarında fren etkilik kaybı bağlayıcı olarak kullanılan fenolik reçinenin yüksek sıcaklıklarda (300-400 °C) termal ayrışmaya maruz kalması ile açıklanabilir. Bu nedenle organik temelli fren balata malzemeleri düşük enerji tüketiminin

olduğu hafif binek türü araçların frenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kim ve Lee, 2011).

Ancak gelişen teknoloji ile birlikte taşıtların hızı, büyüklüğü artış gösterirken bu taşıtlarda kullanılan fren sistemleri tam tersine küçülmüştür. Dolayısıyla birim alana düşen enerji miktarı artmıştır ve çalışma sıcaklıkları kullanılan balata malzemesindeki bileşenlerin sınırlarını aşmıştır ve oluşan ısının transferi için gerekli yüzey alanı küçülmüştür (Yavuz ve Ertan, 2005). Bundan dolayı farklı çevresel koşullarda, hızlarda ve yüksek sıcaklıklarda kararlı sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranına sahip yeni balataların geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur (Han, Huang, Zhang ve Lu, 2006).

Metal seramik fren balataları metalik olmayan katkı maddeleri içeren metal matrisli malzemelerdir. Metal matris olarak bakır alaşımları, demir ve demir alaşımları metalik olmayan katkı maddeleri olarak da tercihen (Al_2O_3 , SiO_2 veya mullit) ve silikatlar kullanılır. İlave katkı olarak düşük sıcaklıkta eriyen metaller, sülfür veya sülfat, karbür, grafit ve sinter metalik tozlar kullanılabilir. Metalik olmayan miktar hacim olarak % 50 veya daha fazla olabilir (Topbaş, 1993: 261). Metal seramik veya sermet balata olarak adlandırılan bu malzemeler yüksek enerji absorbe edebilme kapasitelerinden dolayı genellikle yüksek hızlı trenlerde, uçaklarda, yarış motosikletlerinde kullanılmaktadır (Kim ve Lee, 2011).

Günümüzde metal-seramik balata malzemelerinin üretiminde presleme ve sinterlenme adımlarını içeren klasik toz metalürjisi yöntemi kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem ile üretilen balata malzemeleri düşük yoğunluk değerleri, yüksek poroziteden (gözenekten) dolayı kötü termal iletkenlik ve kötü dayanım gibi dezavantajlara sahiptir. Bunun yanı sıra bu yöntem ile üretimde ağır makinalara ihtiyaç duyulması bu yöntemin küçük çaplı üretimler için pahalı olmasına neden olmaktadır. Bu yöntemde birim ürün başına maliyetin yüksek olmasından dolayı ancak büyük çaplı üretimler için ekonomik olmaktadır (Ghazi, Chandra ve Misra, 2011). Tüm bunların aksine sıcak presleme işlemi, ısı ve basıncın bir araya gelerek neredeyse tamamen iç gözeneklilikten arınmış bir ürün elde etme işlemidir. Geleneksel soğuk pres-sinterleme işlemleriyle karşılaştırıldığında sıcak presleme tekniği daha az güç, daha kısa süre, (genellikle 2–3 dakika) ve daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyar. Ayrıca bu teknikte soğuk presleme-sinterleme işlemine göre daha yüksek yoğunluklara ulaşılır (Çelik, 2009).

Bu çalışmada sıcak presleme yöntemi ile asbest içermeyen metal-seramik (sermet) fren balatalarının üretilmesi ve performans özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla, termik santrallerde endüstriyel bir atık olarak oluşan uçucu kül, cam işleme ünitelerinde ortaya çıkan ve atık camdan elde edilen cam tozu, ülkemizde bol miktarda bulunan ve bor minerali olan kolemanit ve $MgAl_2O_4$ spinelin fren balata malzemesinde kullanılabilirliği ve performans özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Jang, Ko, Kim ve Basch, (2004) yaptıkları çalışmada değişik fren sürtünme çiftlerinin, aşınma ve sürtünme performansları üzerine farklı metalik fiberlerin etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla bakır, çelik, alüminyum gibi farklı metalik fiber içeren fren balata malzemeleri üretmişler ve üretilen numuneleri küçük çaplı sürtünme test cihazı kullanılarak sürtünme aşınma testine tabi tutmuşlardır. Sürtünme testlerinde gri dökme demir ve Al-MMC (Alüminyum Metal Matrisli Kompozit) olmak üzere iki farklı karşı disk kullanmışlardır. Çevre sıcaklığında yapılan testlerde elde edilen sonuçlarda bakır fiber içeren balata malzemelerin düşük hızlarda gri dökme demire karşı çalıştırıldıklarında olumsuz μ -v (sürtünme katsayısı-kayma hızı) ilişkisi gösterdiğini belirlemişlerdir. Karşı yüzey olarak Al-MMC malzeme seçildiğinde ise negatif μ -v ilişkisi görüldüğünü saptamışlardır. Diğer taraftan yüksek sıcaklıklarda yapılan testlerde bakır fiber içeren balata malzemesinin diğerlerinden daha iyi fren etkinliği gösterdiğini vurgulamışlardır. Yapılan çalışma neticesinde çelik fiber içeren fren balata malzemesinin yüksek sıcaklıklarda kayma esnasında düzensiz sürtünme davranışı ve şiddetli malzeme transferi göstermesi nedeniyle Al-MMC diskler için uygun olmadığı sonucuna varmışlardır (Jang ve diğerleri, 2004).

Mutlu, Eldoğan ve Fındık, (2006) yaptıkları çalışmada farklı kompozisyon bileşeni içeren 20 farklı fren balata numunesi üretmişler ve numunelerin sürtünme ve aşınma performanslarını gri dökme demirden yapılan diske karşı çalıştırarak incelemişlerdir. Üretilen fren balata numuneleri üzerine sıcaklığın (50-400 °C) etkisini araştırmışlardır. Numunelerin mikro yapısal karakteristiklerini belirlemek için SEM kullanmışlardır. Son olarak fren balataları üzerine çevrenin etkisini belirlemek amacıyla su, tuzlu su, yağ ve frenleme sıvısı gibi ortamlarda üretilen fren balataları korozyon testine tabi tutmuşlardır (Mutlu ve diğerleri, 2006).

Ma ve diğerleri (2008) yaptıkları çalışmada metalik bileşen içermeyen fren balata malzemesinde abrasiv olarak kullanılan zirkonyum silikatın ($ZrSiO_4$) sürtünme performansı ve fren balata-disk arasında oluşan sürtünme tabakası üzerine etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlarda $ZrSiO_4$ sürtünme katsayısını geliştirdiği fakat aşınma oranını olumsuz yönde etkilediğini belirlemişlerdir (Ma ve diğerleri, 2008).

Öztürk ve Öztürk (2011) yaptıkları çalışmada fren balata malzemelerinin sürtünme karakteristikleri ve mekanik özellikleri üzerine reçine tipi ve elyaf uzunluğunun etkisini araştırmışlardır. Üretilen tüm kompozitlerin tribolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Sürtünme deneylerinde chase tipi sürtünme test cihazı kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlarda reçine türü ve fiber uzunluğunun balata malzemelerinin tribolojik ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir (Öztürk ve Öztürk, 2011).

Kurt ve Boz (2005) yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile bronz esaslı fren balata malzemesi üretmişlerdir. Üretilen bu balatanın aşınma davranışını asbest içeren başka bir balata ile karşılaştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda bronz esaslı fren balata malzemesinde sıcaklık artışının asbest içeren fren balata malzemesinden daha düşük olduğunu belirlemişler ancak bronz esaslı balata malzemesinde daha yüksek aşınma oranı tespit etmişlerdir. Ayrıca düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik nedeniyle bronz esaslı fren balata malzemesinin termal iletkenliğinin azaldığını belirlemişlerdir (Kurt ve Boz, 2005).

Cho ve diğerleri (2008) yaptıkları çalışmada fren balata malzemelerinin sürtünme karakteristiği üzerine zirkonyum parçacık büyüklüğünün etkisini araştırmışlardır. Dört farklı büyüklükteki (1 μm , 6 μm , 75 μm ve 150 μm) zirkonyum partikülü ile güçlendirilmiş metal içermeyen farklı fren balataları üretmişlerdir. Üretilen fren balata malzemelerini pad on disk tipi sürtünme test cihazında gri dökme demire karşı çalıştırarak zirkonyum parçacık büyüklüğünün sürtünme katsayısı, aşınma direnci ve sürtünme kuvveti değişimi üzerine etkisini belirlemişlerdir. Sonuç olarak zirkonyum parçacık büyüklüğü, sürtünme performansı ile yakından ilişkili olan sürtünme filminin oluşumunda önemli bir rol oynadığını belirlemişlerdir. Kaba zirkonyum partikülleri içeren fren balata malzemelerinin aşınma yüzeyinde daha az balata aşınması, mükemmel sürtünme kararlılığı sağlayan sabit bir sürtünme filmi oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ancak ince zirkonyum içeren fren balata malzemelerinin aşınma yüzeyinde ise olumsuz sürtünme kararlılığı ve aşırı balatası aşınmasına neden olan geçici bir sürtünme filmi oluştuğunu belirlemişlerdir. Ayrıca kaba zirkonyum partikülleri içeren fren balataların aşırı disk aşınmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir (Cho ve diğerleri, 2008).

Boz ve Kurt (2007) yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile bronz esaslı fren balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda % 0,5; % 1; % 2 ve % 4 Al_2O_3 takviye ederek yeni balata malzemeleri üretmişlerdir. Üretilen bu seramik takviyeli balata malzemelerinin sürtünme aşınma davranışlarını belirleyerek seramik ilavesiz bronz esaslı balata malzemesi ile mukayeselerini yapmışlardır. Bu amaçla fren balata malzemelerinin yoğunluk, sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarlarını belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda, bu çalışmada kullanılan metal tozundan üretilen fren balata malzemelerinin optimum sürtünme-aşınma davranışlarını 350 MPa presleme basıncında ve 820 °C sinterleme sıcaklığında gösterdiğini belirlemişlerdir. Sürtünme yüzeyindeki sıcaklığın artması ile sürtünme katsayısında bir azalma gözlemlenmiştir. Artan sıcaklık ile sürtünme katsayısında en düşük azalma % 2 ve % 4 Al_2O_3 ile güçlendirilmiş balata malzemelerinde belirlemişlerdir. Alümina miktarının artması ile birlikte balata malzemelerinin kütle kayıplarında bir azalma belirlemişlerdir. % 2 ve % 4 alümina ile güçlendirilmiş malzemelerin en iyi sonuçları gösterdikleri sonucuna varmışlardır (Boz ve Kurt, 2007).

Sampath (2006) yaptığı çalışmada farklı oranlarda cam ve kevlar elyafı ile güçlendirilmiş fenolik reçine matrisli fren balata malzemesi üretmiştir. Üretilen bu kompozit malzemelerin hafif binek tipi araçlar için uygunluğunu belirlemek amacıyla kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik, sürtünme ve aşınma özelliklerini belirlemiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarda kompozitlerin aşınma oranlarının sıcaklıktaki artış ile arttığını fakat kevlar ile güçlendirilmiş kompozitlerin cam elyafı ile güçlendirilmiş kompozitlerin aksine tüm sıcaklıklarda nispeten daha az aşınma oranı gösterdiğini belirlemiştir. Sürtünme uygulamaları için kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemelerin cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerinden daha uygun olduğu sonucuna varmıştır (Sampath, 2006).

Kumar ve Bijwe (2010) yaptıkları çalışmada ağırlıkça % 90 aynı bileşene sahip fakat ağırlıkça % 10 bronz, bakır ve demir gibi farklı metalik dolgu malzemeleri içeren üç farklı kompozit malzeme üretmişlerdir. Üretilen bu malzemelerin fiziksel, termo-fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini karakterize etmişlerdir. Kompozit malzemelerin farklı tribolojik özelliklerini belirlemek için aşınma ve sürtünme deneylerini fren atalet test dinamometresinde gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda metalik bileşen kullanılmasının performans özelliklerinin birçoğunu olumlu yönde etkilediğini belirlemişlerdir. Bakır içeren numunelerin en iyi tribolojik davranışı gösterdiğini bu

malzemeyi bronz içeren malzemenin ve sonrada demir içeren malzemenin takip ettiğini belirlemişlerdir (Kumar ve Bijwe, 2010).

Yi ve Yan (2006) yaptıkları çalışmada fenolik reçine matrisli balata malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek için sürtünme düzenleyicisi olarak hegzagonal bor nitrür ve petrol koku içeren numuneler üretmişlerdir. Üretilen bu numunelerin eğme dayanımları ile sertliklerini belirlemişlerdir. Üretilen sürtünme malzemelerinin aşınma ve sürtünme davranışlarını pim on disk test cihazında, farklı sıcaklıklarda dökme demirden üretilen diske karşı çalıştırarak belirlemişlerdir. Aşınma testi sonunda numunelerin aşınma yüzeylerini SEM kullanılarak analiz etmişlerdir. İki farklı sürtünme düzenleyicinin, aşınma oranını azaltmada ve değişik sıcaklıklarda sürtünme katsayısını stabilize etmede önemli derecede etkisinin olduğunu belirlemişlerdir. İki sürtünme düzenleyici arasındaki optimum oranın 1:1 olması gerektiğini ifade etmişlerdir (Yi ve Yan, 2006).

Abadi, Khavandi ve Kharazi (2010) yaptıkları çalışmada güçlendirme elyafı olarak farklı oranlarda karbon ve çelik elyaf karışımı içeren dört farklı balata malzemesi üretmişlerdir. Bu malzemelerin sürtünme, aşınma ve sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda karbon elyafının artması ile sürtünme katsayısının arttığı aşınma direncinin ise azaldığını tespit etmişlerdir (Abadi ve diğerleri, 2010).

Boz ve Kurt (2006) yaptıkları çalışma toz metalürjisi yöntemi ile bronz esaslı fren balataları üretmişlerdir. Üretilen bu balataların sürtünme-aşınma performanslarını chase tipi sürtünme test cihazı kullanarak belirlemişlerdir. İkinci aşamada bronz esaslı balata malzemesine farklı oranlarda (% 0,5; 1; 2 ve 4) Zn tozu ilave edilerek, yeni balata numuneleri üretmişlerdir. Üretilen Zn ilaveli balata numunelerinin sürtünme aşınma davranışlarını belirleyerek bronz esaslı balata numuneleri ile mukayesesini yapmışlardır. Deneyler sonucunda, bu çalışmada kullanılan bronz esaslı fren balata numunelerinin optimum sürtünme-aşınma davranışlarını 350 MPa presleme basıncında ve 820 °C sinterleme sıcaklığında gösterdiklerini belirlemişlerdir. Bütün balata numunelerinin aşınma direnci ve sürtünme katsayısı değerleri SAE-J661 standart aralığında çıktığını ifade etmişlerdir. Aşınma direnci açısından en iyi sonucu % 0,5 Zn ilaveli balata malzemesinin sürtünme katsayısı açısından en iyi sonucu ise % 2 Zn ilaveli balata malzemesinin gösterdiğini belirlemişlerdir (Boz ve Kurt, 2006).

Ertan ve Yavuz (2010) yaptıkları çalışmada binek taşıtların fren sistemlerinde kullanılan balata malzemelerinin yapısal bileşenlerinin deneysel analizini yapmışlardır. Kullanılan yapısal malzemelerin (bakır tozu, kaya yünü ve aramid elyaf) balatanın tribolojik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Toz halindeki karışıma farklı oranlarda yapısal malzemeler ilave edilerek sabit üretim koşullarında üretilen numunelerin tribolojik özelliklerini chase tipi sürtünme cihazında incelemişlerdir. Bu testler sonucunda numunelerin sıcaklığa, frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimlerini ve aşınma oranlarını belirlemişlerdir. Ayrıca farklı oranda yapısal malzeme içeren numunelerin tribolojik ve fiziksel özelliklerini birbiri ile karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlardan yapısal malzemelerin balatanın frenleme performansı açısından önemli etkilere sahip olduğunu, uygun oranlarda kullanılması durumunda balatanın ömrünü arttırdığını ve daha kontrollü ve güvenli frenleme sağladığını belirtmişlerdir (Ertan ve Yavuz, 2010).

Sugözü (2009) yaptığı çalışmada asbest ve elyaf katkı malzemesi bulunmayan disk fren balatası üretiminde bor mineralleri, bor türevleri (borik asit, boraks, üleksit, kolemanit) ve sedir çam kozalak tozu kullanımını araştırmıştır. Balata performansının etkisini belirlemek için farklı üretim parametreleri uygulamıştır. Böylece balata performansı üzerinde etkili olan parametreleri araştırmıştır. Bor minerallerinin komponent içerisindeki optimum oranını belirlemek için farklı balata kompozisyonları oluşturmuştur. Üretilen balataların sürtünme katsayısı-zaman-sürtünme yüzey sıcaklığı değişimlerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapmış ve elde edilen değerlerle grafikler oluşturmuştur. Numunelerin aşınma, sertlik, yoğunluk değerleri ve farklı sıvılara dayanımı ölçmüş ve SEM resimlerini çekmiştir. Elde edilen bilimsel veri ve bulguların, fren balatasından istenen fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri karşılayan sürtünme malzemeleri için yeni bir yaklaşım getirdiğini ifade etmiştir (Sugözü, 2009).

Albayrak (2009) yaptığı çalışmada toz metalurjisi (T/M) yöntemi ile farklı oranlarda grafit ilave edilmiş bronz esaslı balata malzemeleri üretmiştir. Farklı kompozisyonlarda hazırlanan balata numunelerini 500 MPa basınç altında şekillendirmiştir. Sinterleme aşamasını argon ortamında 530 °C’de 15 dakikada ön-sinterleme ve 800 °C’de 60 dakikada sinterleme şeklinde gerçekleştirmiştir. Performans testlerini laboratuvar şartlarında tasarlanmış ve imal edilmiş aşınma test cihazı kullanarak yapmıştır. Bronz balataların sürtünme katsayılarını ve aşınma oranlarını, 157, 236, 314 N yük altında, 0,1 m/s kayma hızında tespit etmiştir. Bronz esaslı ve grafit ilaveli balata malzemelerin sürtünme

katsayıları ve aşınma oranlarını incelediğinde, grafit ilavesi ile oluşan gözeneklerin ve katı yağlayıcının belirli bir düzeye kadar sürtünme katsayısı üzerinde olumlu etki gösterdiğini fakat belirli bir düzeyden sonra ise olumsuz yönde etki gösterdiğini belirtmiştir. Mikro yapı analizinde optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), aşınma yüzeylerinin analizinde ise SEM kullanmıştır. Aşınma yüzeylerinde artan grafit oranları ile aşınma mekanizmasının değiştiğini gözlemlemiştir (Albayrak, 2009).

Berek (2010) yaptığı çalışmada toz metalurjisi (T/M) yöntemi ile farklı oranlarda kuvars ve diatomit tozları ile güçlendirilmiş bronz esaslı balata malzemesi üretmiştir. Farklı kompozisyonlarda hazırlanan balata numunelerini 500 MPa basınç altında şekillendirmiştir. Numuneleri argon ortamında 530 °C'de 15 dakika ön sinterleme ve 800 °C'de 60 dakika sinterleme işlemine tabi tutmuştur. Aşınma testlerini özel olarak tasarlanmış aşınma cihazı kullanılarak 314 N sabit yük ve farklı hızlar (7, 8, 11 m/s) ile gerçekleştirmiştir. Mikro yapı çalışmalarını, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapmıştır. Belirli bir orana kadar grafit, kuvars ve diatomitin fren balata malzemelerinin sürtünme katsayılarını yükselttiğini belirlemiştir. Ayrıca üretilen balata malzemelerinin sürtünme katsayılarının 0,12-0,29 aralığında olduğunu ifade etmiştir (Berek, 2010).

Arjmand ve Shojaei (2011) yaptıkları çalışmada farklı oranlarda aramid pulp ve çelik yünü içeren kauçuk temelli fren balata malzemelerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini fiber içermeyen kauçuk temelli fren balata malzemesi ile karşılaştırarak karakterize etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre çelik yün içeren kompozitlerin kauçuk temelli sürtünme kompozitlerine göre daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma direnci gösterdiğini belirlemişlerdir. Aramid pulp ilavesinin yüksek kayma hızlarında fren balata malzemesinin sürtünme katsayısını artırdığını ve fren etkinlik kaybına karşı direnç geliştirdiğini belirlemişlerdir (Arjmand ve Shojaei, 2011).

Kim, Cho, Kim ve Jang (2007) yaptıkları çalışmada ticari fren balatalarında kullanılmakta olan fenolik reçine, potasyum titanat ve cashew nut shell liquid (kaju fıstık kabuğu sıvısı) gibi üç farklı bileşenin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Bu bileşenlerin sürtünme özelliklerini asbestsiz fren balata formülasyonu kullanılarak değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda fenolik reçinenin kayma esnasında yüksek gürültü eğilimi açığa çıkardığını sürtünme katsayısını artırdığını belirlemişlerdir. Balata malzemesi içerisinde

CNSL bileşeninin artması ile gürültü eğiliminin azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca ilave fenolik reçinenin sürtünme malzemesinin aşınma direncini artırdığını, potasyum titanat ve CNSL bileşenlerinin aşınma direncini kötüleştirdiğini belirtmişlerdir. Gürültü eğilimini azaltmak için yüksek sıkıştırılabilirlik, yüksek gözeneklilik ve düşük sertliğe sahip fren balataları önermişlerdir (Kim ve diğerleri, 2007).

Gültekin (2007) yaptığı çalışmada otomotiv sanayinde kullanılan geleneksel fren disk ve balata malzemelerine alternatif balata ve disk malzemesi üretmiştir. Üretilen MMK (Metal Matrisli Kompozit) fren diski ve balata malzemesinin yüksek termal iletkenlik, düşük termal genişleme, yüksek aşınma direnci ve standartlara uygun kararlı bir sürtünme katsayısı değerine sahip olduğunu belirlemiştir. Deneyler sonucunda üretilen balata malzemelerinin asbestli geleneksel organik balata malzemelerine alternatif olarak kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır (Gültekin, 2007).

Öztürk, Arslan ve Öztürk (2007) yaptıkları çalışmada seramik ve bazalt elyafı kullanarak hibrid sürtünme malzemesi üretmişlerdir. Seramik elyaf miktarını hacimce % 10 olarak sabit tutarken bazalt elyaf miktarını hacimce % 0-40 arasında değiştirmişlerdir. Sürtünme malzemelerinin sürtünme, aşınma ve mekanik özelliklerini; 312,5-625 N uygulama yükünde, 100-350 °C disk sıcaklığında ve 3,2-12,8 m/s kayma hızında pin on disk test cihazında gri dökme demir diske karşı çalıştırarak belirlemişlerdir. Numunelerin aşınmış yüzeylerini SEM mikroskobu kullanarak analiz etmişlerdir. Deneyler sonucunda elyaf miktarının kompozit malzemenin tribolojik ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Hibrid sürtünme malzemesinin sürtünme katsayısının bazalt elyaf miktarı arttıkça arttığını belirtmişlerdir. Fakat kompozitlerin özgül aşınma oranlarının hacimce % 30 elyaf oranına kadar azaldığını ancak bu değer üzerinde aşınma oranının tekrar arttığını tespit etmişlerdir. Aşınma testlerinde sürtünme katsayısının artan yük ve hız ile azaldığını fakat disk sıcaklığının 300 °C üzerine artması ile arttığını gözlemlemişlerdir. Aşınma oranını etkileyen en önemli faktörün disk sıcaklığı olduğu sonucuna varmışlardır (Öztürk ve diğerleri, 2007).

Jang ve Kim (2000) yaptığı çalışmada farklı miktarda antimon trisülfid (Sb_2S_3) ve zirkonyum silikat ($ZrSiO_4$) içeren dokuz farklı otomotiv fren balata malzemesinin sürtünme karakteristiklerini fren test dinamometresi kullanarak araştırmışlardır. Sürtünme kuvvetindeki salınım ve sürtünme katsayısındaki değişimi belirlemek için iki farklı fren

uygulama modu seçmişlerdir. Deneysel sonuçlarda sürtünme karakteristiğini belirlemede Sb_2S_3 ve $ZrSiO_4$ 'ün bağıl miktarının önemli bir rol oynadığını göstermişlerdir. Sürtünme malzemesindeki Sb_2S_3 'ün sürtünme kararlılığını arttırdığını ve $ZrSiO_4$ 'ün fren uygulamalarındaki tork salınımını kötüleştirdiğini ifade etmişlerdir (Jang ve Kim, 2000).

Ferrer, Pascual, Busquets ve Rayon, (2010) yaptıkları çalışmada trenlerde fren pabucu olarak kullanılan gri dökme demir fren pabucu ile bu pabucun yerine geliştirilen sinterlenmiş kompozit sürtünme malzemelerinin (Fe, Cu, Cr, Sn, Grafit) tribolojik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Her iki malzemenin sürtünme katsayısını karşılaştırmalı analiz etmek için pin on disk test cihazı kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda yüksek frenleme hızlarında gri dökme demir frenlerin sürtünme katsayılarında bir miktar düşüş görülürken sinterlenmiş kompozit fren malzemelerinin sürtünme katsayısında bir miktar artış görüldüğünü belirlemişlerdir. Sinterlenmiş fren pabuçlarının aşınma miktarı gri dökme demir fren pabuçlarından daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Tekerlek sırt yüzeyinde sinterlenmiş fren pabucu tarafından üretilen pürüzlülük değerinin gri dökme demir tarafından üretilenden 10 kat daha az olduğunu tespit etmişlerdir (Ferrer ve diğerleri, 2010).

Kumar ve Bijwe, (2011) yaptıkları çalışmada fren balata malzemesi üretiminde kullanılan bakırın (toz ve fiber olarak) rolünü araştırmışlardır. Laboratuvar koşullarında değişen miktarlarda (ağırlıkça % 0, % 10 ve % 20) bakır tozu ve fiberi içeren asbestsiz balata malzemeleri geliştirmişlerdir. Üretilen bu malzemelerin fiziksel, kimyasal, termo-fiziksel ve mekanik özelliklerini karakterize etmişlerdir. Tribolojik değerlendirmeler için en gerçekçi sonuçları yansıması için fren atalet test dinamometresi kullanmışlardır. Deneyler sonucunda genel olarak bakır eklenmesinin tüm önemli performans özellikleri geliştirdiği sonucuna varmışlardır. Şekil açısından genel olarak bakır tozunun bakır fiberden daha iyi bir seçim olduğunu görmüşlerdir. Miktar açısından bakıldığında ise ağırlıkça % 10'un en iyi miktar olduğunu kanıtlamışlardır (Kumar ve Bijwe, 2011).

Cho, Kim, Basch, Fash ve Jang, (2003) yaptıkları çalışmada gri dökme demir disk ve otomotiv fren balataları kullanarak sürtünme karakteristiklerinin deneysel çalışmalarını yürütmüşlerdir. Eriyiklerin soğutma hızı ve karbon değerini değiştirerek farklı mikro yapılaraya sahip gri dökme demir numuneler üretmişler ve bu disklere karşı çalıştırmak için karşı malzeme olarak ticari olmayan iki farklı tip fren balatası (çelik içermeyen ve çelik

içeren) kullanmışlardır. Sürtünme testlerini, pad on disk tipi sürtünme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısının seviyesi ve fren etkinlik kaybı üzerine gri dökme demir diskteki ferrit ve grafitin etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucuna göre; gri dökme demirdeki grafit parçacıklarının artan miktarıyla sürtünme katsayısı ve etkisinin, demir içerikli balata kullanımında olduğu gibi daha belirgin olduğu kanısına varmışlardır. Disk yüzeyindeki ferrit fazı miktarının, sürtünme katsayısında az etki gösterdiğini belirtmişlerdir (Cho ve diğerleri, 2003).

Stadler, Krnel ve Kosmac, (2007) sinterlenmiş metalik fren balatalarının sürtünme ve aşınma özelliklerini C/C-SiC kompozit fren diskinde karşı çalıştırarak belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada, C/C-SiC fren diski ile iyi uyum sağlamış gibi görünen sinterlenmiş metalik fren balatalarının aşınma ve sürtünme özelliklerini belirlemişlerdir. Fren kaliperleri ve disk ölçüleri farklı olan iki farklı ticari motosikletin fren sistemindeki dinamometreleri ile sürtünme karakteristiklerini incelemişlerdir. Sürtünme tabakasının oluşumunda metalik matris içindeki abrasiv ve grafit gibi bileşenlerin etkisini EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) analizi donanımlı SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) kullanarak araştırmışlardır. Sürtünme tabakasının, diskin kayma yüzeyi üzerinde daha çok demir ve bakır oksitlerden oluşan oksidasyon aşınması olduğunu doğrulamışlardır. Sinterlenmiş metalik disklerin sürtünme özelliklerini incelemişler ve fren balatalarının yapısı ve kompozisyonuyla bağlantılı olduğunu gözlemlemişlerdir (Stadler ve diğerleri, 2007).

Her yıl tüm dünyadaki kömür santrallerinden çok büyük miktarda uçucu kül elde edilmektedir. Yalnız Amerika Birleşik Devletlerinde yılda 70 milyon ton uçucu kül üretilmektedir. Amerika'da üretilen uçucu küllerin yalnızca % 40'ı faydalı uygulamalarda kullanılır ve arta kalanı yok edilmek zorundadır. Bu işlem ise uçucu kül üreten kuruluş için ek maliyete neden olmaktadır. Uçucu kül parçacıkları sürtünme malzemelerinde dolgu malzemesi olarak kullanılmak için uygun bazı özelliklere sahiptir (Mohanty ve Chugh, 2007).

Hong ve diğerleri, (2008) yaptıkları çalışmada düz fenolik reçine, silikonlu fenolik reçine veya boron fosforlu (B-P) fenolik reçineli fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Fren balata numuneleri üretmek için basit bir formülasyon kullanmışlar ve aşınma testlerini Krauss tipi sürtünme test cihazında yapmışlardır. Üç

sürtünme malzemesindeki sürtünme stabilitesini ve aşınma oranını, 400 °C'nin üstündeki sıcaklık fonksiyonları olarak karşılaştırmışlar ve mekanizmaları farklı sıcaklık değerlerinde aşınma yöntemleri ile birleştirilerek analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, reçinedeki termal ayrışma sonucu oluşan ayrılmış alt yüzeyler ile yükseltilmiş sıcaklıklardaki aşınma oranını tespit etmişler, en iyi çalışma direncini ve sürtünme stabilitesini, B-P uygulanmış reçine içeren balata malzemesinin verdiği belirlemişlerdir (Hong ve diğerleri, 2008).

Çizelge 2.1. Uçucu külün kimyasal bileşemi (Mohanty ve Chugh, 2007)

SiO ₂	31.3
Al ₂ O ₃	10.6
Fe ₂ O ₃	8.3
SO ₃	12.8
CaO	20.9
MgO	0.4
Yanmamış Karbon	12.55
Nem	0.11
Hidrasyon suyu	0.71
Na ₂ O	0.4
K ₂ O	1.1
Diğerleri(TiO ₂ +P ₂ O ₃ +SrO+BaO)	0.83

Mohanty ve Chugh, (2007) yaptıkları çalışmada ağırlıkça % 50'den daha fazla uçucu kül içeren fren balata malzemesi geliştirmeye çalışmışlardır. Fren balatası geliştirme evresinde fenolik reçine, aramid pulp, cam elyaf, potasyum titanat, grafit, alüminyum fiber, bakır tozu ve Çizelge 2.1'de kimyasal bileşemi verilen uçucu kül kullanmışlardır. Deneyler sonucunda geliştirilen fren balata malzemesinin 0,35-0,4 aralığında kararlı bir sürtünme katsayısı ve ağırlıkça % 12'den daha az aşınma oranı gösterdiklerini belirlemişlerdir (Mohanty ve Chugh, 2007).

Artan sıcaklık ile fren balata malzemesinin sürtünme katsayısının düşmesi fren etkinlik kaybı ve sıcaklığın düşmesi ile fren etkinliğinin yeniden canlanması toparlanma olarak tanımlanır. Bu karakteristiklerin fren balata malzemesinin performansını değerlendirmede belirleyici önem taşıdığı vurgulanmıştır (Satapathy ve Bijwe, 2004).

Satapathy ve Bijwe, (2004) yaptıkları çalışmada fren balata malzemelerinin toparlanma ve fren etkinlik kaybı özellikleri üzerine farklı elyaf türlerinin (Aramid, PAN, Karbon ve Selülozik) etkisini araştırmışlardır. Fiber türünün toparlanma ve fren etkinlik kaybı

özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda karbon elyaf temelli fren balata malzemesinin fren etkinlik kaybına karşı en yüksek direnci, selülozik elyaf temelli fren balata malzemesinin ise fren etkinlik kaybına karşı en düşük direnci gösterdiklerini belirlemişlerdir. Tüm fren balata malzemelerinde % 100'den daha fazla toparlanma davranışı belirlemişlerdir. En yüksek aşınma direncini sırasıyla aramid elyaf içeren balata malzemesinin ve en düşük aşınma direncini ise selülozik elyaf içeren balata malzemesinin gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca aşınmış yüzey SEM analizlerinin fren balata malzemelerinin aşınma mekanizmalarının anlaşılmasına katkı sağlayacağını ifade etmişlerdir (Satapathy ve Bijwe, 2004).

Tomasek, Kratosova, Yun, Fan ve Lu, (2009) yaptıkları çalışmada metalik bileşen içermeyen fren balata malzemesinin sürtünme performansı ve sürtünme tabakası üzerine bir abrasiv olarak alüminanın (Al_2O_3) etkisini incelemişlerdir. Çalışmada hacimce % 0; % 3,4; %5,6; % 9,0 ve % 14,6 alümina içeren beş farklı fren balata malzemesi üretmişler ve üretilen balata malzemelerini Çin Ulusal Standartlarına (GB5763-1998) göre JF 151 tipi sürtünme test cihazı kullanarak test etmişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda alüminanın sürtünme katsayısını artırdığını ve aşınma performansını geliştirdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca sürtünme tabakasının oluşumu ve gelişimini karakterize etmek için X-ışını floresans spektrometresi ve enerji dağılımlı X-ışını analizörlü taramalı elektron mikroskobu kullanmışlardır. Alümina içeren fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde demir içeren filmler tespit edildiğini alümina içermeyen fren balata malzemesinde ise tespit edilemediğini belirtmişlerdir (Tomasek ve diğerleri, 2009).

Malhotra, Valimbe ve Wright, (2002) yaptıkları çalışmada uçucu kül, taban külü ve baca gazı kükürt giderme (FGD) yıkayıcı çamuru içeren katma değeri yüksek ürünler geliştirmeye odaklanmışlardır. Bu amaçla otomotiv sürtünme kompozitleri için katkı maddeleri ve sürtünme düzenleyici olarak uçucu kül, taban külü ve sülfatça zengin temizleyici çamurun potansiyel kullanımını araştırmışlardır. Uçucu kül, taban külü ve temizleyici çamurdan üretilen sürtünme kompozitlerin yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile karakterize etmişlerdir. Kompozitlerin sürtünme davranışını sürtünme tanımlama ve tarama testi (FAST) yardımı ile araştırmışlardır. Deneyler sonucunda sürtünme malzemelerine uçucu kül ve taban külü ilave edilmesi ile bu yeni malzemelerin sürtünme katsayısının arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca sürtünme

malzemesine ilave edilen kül partiküllerinin davranışlarının Al_2O_3 , Cr_2O_3 , SiC gibi abrasivlerle benzer olduğu sonucuna varmışlardır (Malhotra ve diğerleri, 2002).

Hee ve Filip, (2005) yaptıkları çalışmada fenolik matris içerisine karıştırılmış birçok seramik malzeme içeren ve yeni geliştirilen fren balata formüllerinin aşınma ve sürtünme davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla iki kompozit sürtünme malzemesi hazırlamışlardır. İlk hazırlanan malzeme ağırlıkça % 25 uçucu kül ve 14 ilave bileşen içermektedir. İkinci kompozit malzemeye potasyum titanat ilave edilerek yeniden formüle etmişlerdir. Test malzemelerinin sürtünme ve aşınma performanslarını orijinal ticari fren balatası ile karşılaştırmışlardır. Tüm numunelerin aşınma ve sürtünme karakteristiklerini sürtünme tanımlama ve tarama testi (FAST) ve fren atalet test dinamometresi kullanarak belirlemişlerdir. İki sürtünme malzemesinin performanslarını yorumlamak için sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve sürtünme yüzeylerini incelemişlerdir. Numunelerin sürtünme yüzeylerini ışık mikroskobu, tarama ve transmisyon elektron mikroskobu, X-ray ve X-ray difraksiyon analizleri kullanarak incelemişlerdir. Düşük fiyatlı uçucu kül bileşene eklenerek üretim fiyatlarını düşürmüşlerdir. Ayrıca potasyum-titanat içeren fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı kararlılığının, aşınma ve fren etkinlik kaybı direncinin önemli ölçüde geliştiğini tespit etmişlerdir (Hee ve Filip, 2005).

Junior, Arrieche ve Schaeffer, (2008) yaptıkları çalışmada küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde bakım masrafını azaltmak amacıyla rüzgar türbinlerinin fren sisteminde kullanılan farklı tip fren balata malzemelerinin aşınma davranışlarını analiz etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla piyasada yaygın olarak kullanılan fenolik reçine temelli fren balatası ile toz metalürjisi yöntemi ile kendi ürettikleri sinter metalik fren balatasının sürtünme aşınma performanslarını karşılaştırmışlardır. Her iki balata malzemesinin farklı bileşimine rağmen çok benzer aşınma davranışı gösterdikleri belirlemişlerdir. Ayrıca sinter metalik balata malzemesinin daha yüksek sürtünme katsayısı gösterdiğini ifade etmişlerdir (Junior ve diğerleri, 2008).

Xiang, Hong-hong ve Ping-ping, (2007) yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile bakır esaslı uçak fren balata malzemeleri hazırlamışlar ve hazırlanan balata malzemelerinin mikro yapı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine sinterleme sıcaklığı ve presleme basıncının etkisini araştırmışlardır. Sabit sinterleme sıcaklığında presleme basıncının 1,5 MPa kadar artması ile balata malzemelerinin porozite, sürtünme katsayısı ve ağırlık

kayıplarının belirgin derecede azaldığını belirlemişlerdir. Sinterleme basıncının 1,5 MPa'dan 2,5 MPa artması ile porozitede küçük miktarda azalma olduğu ve aşınma davranışının hafif miktarda geliştiğini tespit etmişlerdir. Ancak presleme basıncının 2,5 MPa'dan daha fazla artırılmasının mikroyapı ve tribolojik karakteristikler üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Sabit sinterleme basıncında sinterleme sıcaklığının 900 °C'den 930 °C'ye yükselmesinin sinterlemiş malzeme yoğunluğunu ve aşınma davranışını belirgin derece geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Sinterleme sıcaklığının 1000 °C'ye çıkmasının yoğunluk artışını devam ettirdiğini fakat aşınma davranışı üzerinde çok az etki gösterdiğini belirlemişlerdir (Xiang ve diğerleri, 2007).

Kim, Cho, Lim ve Jan, (2001) yaptıkları çalışmada fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma performansı üzerine aramid pulp ve potasyum titanat whiskerslerinin sinerjik etkilerini pad on disk tipi sürtünme test cihazı kullanarak araştırmışlardır. Fren balata malzemelerinin üretiminde beş farklı bileşen (aramid pulp, potasyum titanat, fenolik reçine, molibden sülfür ve barit) kullanmışlardır. Aşınma oranı, kayma yüzeyinin morfolojisi ve sürtünme kararlılığı üzerine iki bileşenin (potasyum titanat ve aramid pulp) etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar neticesinde aramid pulp ve potasyum titanat whiskerslerin sürtünme yüzeyi üzerinde dayanıklı bir sürtünme filmi oluşturmada önemli bir rol oynadıkları sonucuna varmışlardır. Oluşan sürtünme filminin sürtünme kararlılığı ve aşınma direncinin gelişmesine önemli ölçüde katkı sağladığını belirlemişlerdir (Kim ve diğerleri, 2001).

Kim, Cho, Cho ve Jang, (2007) yaptıkları çalışmada farklı oranlarda grafit ve antimon trisülfür (Sb_2S_3) içeren asbestsiz fren balata malzemelerinin tribolojik davranışlarını araştırmışlardır. Farklı oranlarda iki katı yağlayıcı içeren fren balata malzemelerinin sürtünme katsayılarının değişimi üzerine sıcaklığın, kayma hızının ve uygulama basıncının etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar iki katı yağlayıcı içeren fren balata malzemelerinin tek bir katı yağlayıcı içeren fren balata malzemelerine göre daha iyi sürtünme kararlılığı, daha düşük hız hassasiyeti gösterdiklerini belirlemişlerdir. Özellikle daha yüksek grafit içeren balata malzemelerinin diğer balata malzemelerine göre yüksek sıcaklıklarda fren etkinlik kaybına karşı daha iyi bir direnç gösterdiklerini belirlemişlerdir (Kim ve diğerleri, 2007).

Ertan ve Yavuz, (2010) yaptıkları çalışmada sürtünme malzemelerinin tribolojik özellikleri üzerine üretim parametrelerin etkisini ve sürtünme malzemelerin tribolojik özelliklerini geliştirmek için optimum üretim parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu doğrultuda üretim parametreleri ile sürtünme özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemeyi amaçlamışlardır. Balata malzemelerinin sürtünme deneyleri için chase tipi sürtünme test cihazı kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda üretim parametrelerinin sürtünme malzemesinin tribolojik özelliklerini geliştirebileceğini belirlemişlerdir (Ertan ve Yavuz, 2010).

Hwang, Jung, Cho, Kim ve Jang, (2010) yaptıkları çalışmada çok duvarlı karbon nano tüpün sürtünme etkinliği, aşınma oranı, fren etkinlik kaybı ve sönümlenme kapasitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Fren balata malzemelerini geleneksel kuru karıştırma metodu kullanarak üretmişlerdir. Karbon nano tüp içeren balata malzemelerinin fren performansını değerlendirmek için 1/5 ölçekli fren test dinamometresi, tribolojik özelliklerini değerlendirmek için de Krauss tipi test cihazı kullanmışlardır. Fiziksel ve tribolojik özelliklerin balata malzemesindeki karbon nano tüp içeriğine önemli derecede bağlı olduğunu görmüşlerdir. Özellikle karbon nano tüp ilaveli balata malzemelerinin gelişmiş sürtünme kararlılığı ve fren etkinlik kaybı direnci gösterdiklerini belirlemişlerdir. Ayrıca karbon nano tüp içeren balata malzemelerinin sönümlenme kapasitelerinin arttığını belirlemişlerdir. Karbon nano tüpün güçlendirici etkisi nedeniyle balata malzemelerinin aşınma direncini geliştirdiğini ifade etmişlerdir (Hwang ve diğerleri, 2010).

Kim ve Jang, (2000) yaptıkları çalışmada iki farklı fenolik reçine (düz novalak reçine ve modifiyeli novalak reçine) içeren otomotiv fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma karakteristiklerini pad on disk tipi sürtünme test cihazında belirlemişlerdir. Farklı miktarlarda fenolik reçine ve aramid pulp içeren altı farklı balata malzemesi üretmişler ve sürtünme-aşınma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Sürtünme karakteristiğini araştırmak için iki farklı test modu kullanmışlardır. Üretilen balata malzemelerinin sürtünme karakteristiklerinin (sürtünme kararlılığı, aşınma direnci) aramid pulp miktarına, reçine türü ve miktarına önemli derecede bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Modifiyeli fenolik reçine esaslı balata malzemelerinin düz fenolik reçine esaslı balata malzemelerinden daha iyi sürtünme kararlılığı gösterdiğini belirlemişlerdir. Özellikle hacimce % 10 aramid pulp ile güçlendirilmiş balata malzemelerinin reçine türüne bakılmaksızın sürtünme kararlılığında önemli bir gelişme görüldüğü belirtmişlerdir. Ancak modifiyeli reçine içeren balata

malzemelerinin aşınma direncinde önemli bir azalmanın görüldüğünü tespit etmişlerdir (Kim ve Jang, 2000).

Rhee (1971) yaptığı çalışmada demir tozu ve grafit dolgulu fenolik reçinenin sürtünme özelliklerinin yük, hız ve sıcaklığa bağımlılığını araştırmıştır. Fren zayıflamasında yük zayıflaması, hız zayıflaması ve sıcaklık zayıflaması olarak üç mekanizmanın etkili olduğunu görmüştür. Sabit kayma hızında balata basıncını artırmakla sürtünme kuvvetinin doğrusal olarak artmadığını, sabit basınçta kayma hızını artırmakla sürtünme kuvvetinin azaldığını tespit etmiştir. Bu nedenle sürtünme katsayısının sabit değil normal kuvvet, kayma hızı ve arayüzey sıcaklığına bağlı olabileceği sonucuna varılmıştır. Sürtünme katsayısının sabit olmadığını, sabit sıcaklık ve sabit kayma hızında artan basınçla azaldığı, sabit basınçta ise artan hızla azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı olduğu sonucuna varmıştır (Rhee, 1971).

Maleque ve Atigah yaptıkları çalışmada insan sağlığına zararlı asbest elyafı yerine doğal hindistan cevizi elyafı içeren fren balata malzemeleri geliştirmişlerdir. Toz metalürjisi yöntemi kullanarak katı yağlayıcı, abrasiv malzeme, sürtünme düzenleyici, bağlayıcı ve hacimce farklı oranlarda (% 0, 5, 10, 15 ve 20) hindistan cevizi elyafı içeren fren balata formülleri hazırlamışlardır. Numunelerin sertlik, gözenek, mikroyapısal değişimlerini ve sürtünme aşınma özelliklerini belirlemişlerdir. Sürtünme aşınma özelliklerini chase tipi sürtünme-aşınma test cihazı kullanarak belirlemişlerdir. Deneysel çalışma neticesinde en yüksek yoğunluk, en düşük kütle kaybı, en iyi sürtünme özelliklerini hacimce % 5 hindistan cevizi elyafı içeren balata malzemesinde belirlemişlerdir. Sonuç olarak insan sağlığına zararlı asbest yerine insan sağlığına hiçbir zararı olmayan hindistan cevizi elyafının rahatlıkla fren balata malzemelerinde dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir (Maleque ve Atigah, 2013).

Gopal, Dharani ve Blum (1996) öğütülmüş E-camı veya çelik elyaf içeren hibrid (Kevlar pulp içeren) fenolik kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını farklı hız ve sıcaklıklarda chase tipi sürtünme test cihazı kullanarak incelemişlerdir. Genellikle Kevlar pulp ilavesinin her iki hibrid kompozit malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde geliştirdiği ve sürtünme katsayılarını da azalttığını belirlemişlerdir. Kevlar pulp ilavesinin aynı zamanda çelik fiber içeren kompozit malzemelere yüksek hızlarda mükemmel sürtünme kararlılığı kazandırdığı ayrıca hem çelik fiber hem de cam elyaf içeren

kompozitlerin yüksek hızlarda gürültü oluşturma eğilimini önemli ölçüde azalttığını belirlemişlerdir. Çelik fiber içeren kompozit malzemeye kevlar pulp ilavesinin bu malzemenin genel performansını önemli ölçüde geliştirdiğini tespit etmişlerdir (Gopal ve diğerleri, 1996).

Talip, Munchtar ve Azhari (2003) yaptıkları çalışmada yarı metalik fren balata malzemesini dökme demir fren diskine karşı çalıştırarak fren balata malzemesinin sürtünme aşınma testini gerçekleştirmişlerdir. Sürtünme testinden sonra aşınma mekanizmalarını SEM mikroskobu kullanarak belirlemişlerdir. Sürtünme malzemelerinin aşınmasında abrasiv, adhesiv, yorulma, delaminasyon ve ısıl aşınma mekanizmalarının etkin olduğunu belirtmişlerdir (Talip ve diğerleri, 2003).

3. TOZ METALURJİSİ

3.1. Giriş

Toz metalürjisi (T/M) metal tozları üretimi ve bu tozlardan yarı bitmiş ya da bitmiş nesnelere yapma bilimi ve sanatı olarak tanımlanır. Toz metal parçalarının üretimi elementel ya da alaşım tozlarının karıştırılması, karıştırılan tozların uygun kalıplarda sıkıştırılması ve toz partikülleri arasında metalürjik bir bağ oluşturulması amacıyla atmosfer kontrollü fırınlarda sinterlenmesi aşamalarını içermektedir. Elde edilen nihai ürün çeşitli alanlarda kullanılmak için yeterli yoğunluğa ve dayanıma sahip bir malzemedir (Angelo ve Subramanian, 2008: 1).

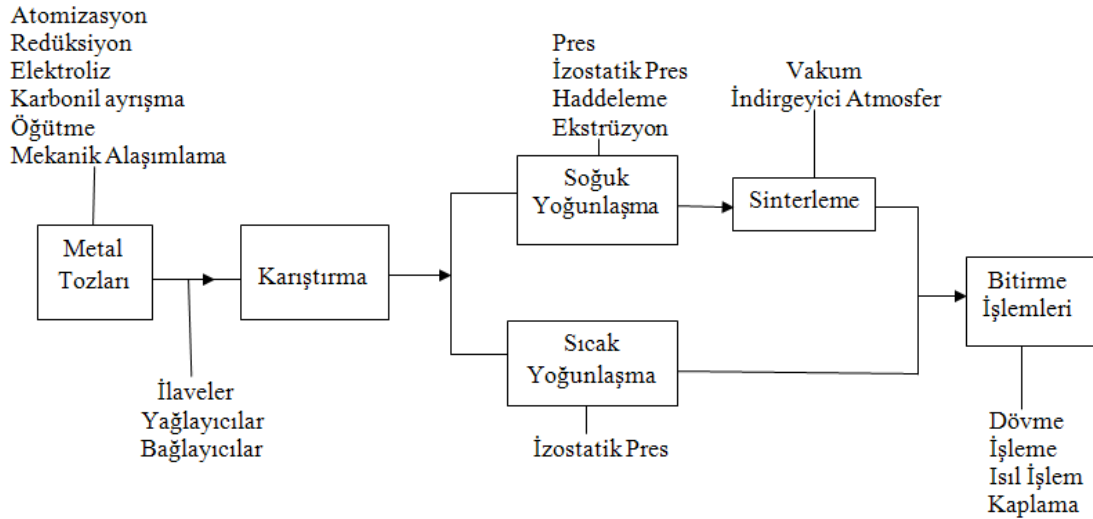
Günümüzde ise T/M, yüksek gözenekli metal filitrelerden, kendinden yağlamalı yataklara, kontrollü gözeneklilik ile sinterlenmiş parçalara ve son olarak tam yoğunluktaki mamürlere kadar geniş ürün yelpazesini içermektedir (Boz, 2003). T/M yöntemi ile üretilen ürünlerinin % 70'i otomotiv endüstrisinde, % 12'si iş makinalarında, % 5'i tarım aletlerinde ve % 15'lik oranı da güncel aletlerde kullanılmaktadır (Çiğdem, 2006: 329).

3.2. Toz Metalürji Yöntemi ile Parça Üretim Adımları

Toz metalürjisi ile parça üretimi dört aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar;

1. Toz Üretimi
2. Karıştırma veya harmanlama
3. Presleme
4. Sinterleme

Yukarıda belirtilen dört adımı takiben parçalara bazı özel karakteristikler kazandırmak ve yüksek boyut hassasiyetine ulaşmak için seçenekli ikinci prosesler uygulanabilir (Çiğdem, 2006: 330). Şekil 3.1'de toz metalürjisi proseslerinin basit bir akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.1. Toz metalürjisinin genel adımları (Karagöz ve Yamanoglu, 2008)

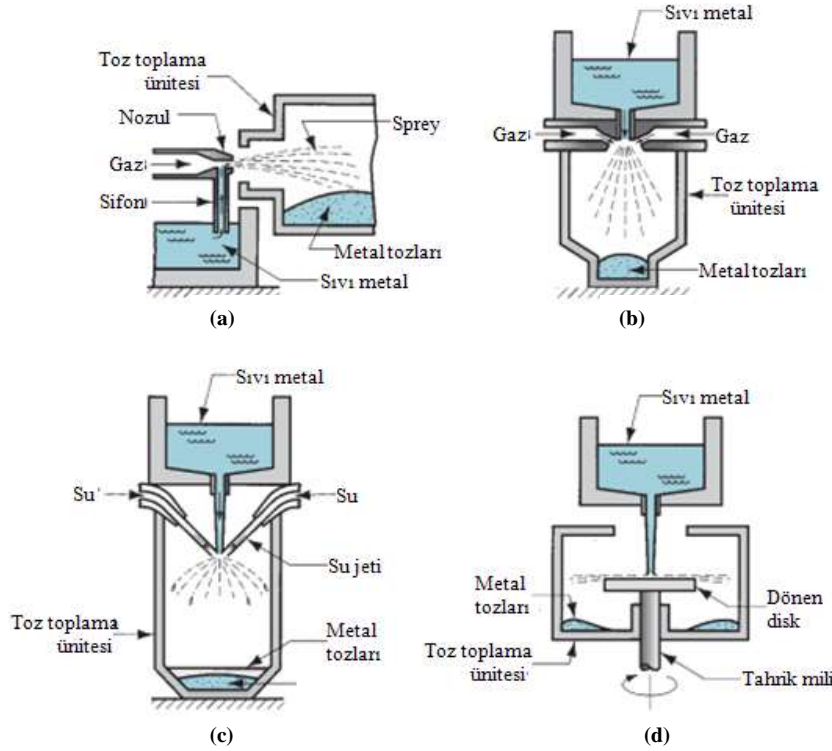
3.2.1. Toz üretim metotları

Hemen her malzeme toz haline getirilebilir, fakat belirli malzemeyi toz haline getirmek için seçilen yöntem maliyet, tepkimeler ve istenilen özellikler gibi faktörlerin karışımına bağlıdır (German, 2007: 61). Metal tozlarının ticari olarak üretildiği üç temel yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin hepsinde, yüzey alanını artırmak için metale enerji verilir. Bu yöntemler: atomizasyon, kimyasal toz üretimi ve elektrolitik toz üretimidir (Groover, 2009: 350).

Atomizasyon

Atomizasyon metal ve alaşım tozu üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir (Angelo ve Subramanian, 2008: 216). Bu yöntemde sıvı metal, damlalardan oluşan bir sprey haline dönüştürülür ve toz halinde katılaştırılır. Bu yöntem, günümüzde en esnek ve popüler toz üretim tekniği olup saf metaller ve alaşımlar dahil neredeyse tüm metallere uygulanabilir. Sıvı metal spreyi oluşturmanın muhtelif yolları vardır. Bunlardan bazıları Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Şekilde gösterilen metotların ikisi gaz atomizasyonu uygulamalarıdır. Bu yöntemlerde yüksek hızda bir gaz jeti (hava veya inert gaz) sıvı metali pülverize etmek (atomize etmek) için kullanılır. Bu yöntemlerin ilkinde, Şekil 3.2.a'da gösterildiği gibi, gaz dar bir aralıktan (nozuldan) üflenerek sıvı metali alttaki banyodan yukarı emerek (sifon etkisi) bir odaya sprey halinde püskürtür. Sıvı damlaları bu odada toz halinde katılaştır. Bu yöntemle çok benzer olan ve Şekil 3.2.b'de gösterilen yöntemde ise,

sıvı metal yer çekimi etkisi ile bir aralıktan aşağı akar akmaz bir hava jeti ile atomize edilir. Elde edilen küresel şekilli tozlar alttaki odada toplanır. Şekil 3.2.c'de gösterilen metot, hava yerine yüksek hızda su jeti kullanımı hariç Şekil 3.2.b'deki yöntemle benzer. Bu yöntem, su atomizasyonu olarak bilinir ve atomizasyon yöntemleri arasında en yaygın olanıdır. Ayrıca yöntem, özellikle 1600 °C (1873 K)'nin altında ergiyen metaller için oldukça uygundur. Soğuma daha hızlı olup, elde edilen tozlar küreselden ziyade düzensiz şekillidir. Ancak, su kullanımının dezavantajı partikül yüzeylerinde oksidasyon olmasıdır. Bu yöntemde son yıllarda yapılan bir yenilik, oksidasyonu azaltmak için su yerine sentetik yağ kullanımıdır. Hava ve su atomizasyon yöntemlerinin her ikisinde de, partikül tane boyutu yüksek oranda sıvı akış hızı ile kontrol edilir ve tane boyutu hız ile ters orantılıdır (Groover, 2009: 350, 351).



Şekil 3.2. Metal tozu üretimi yapılan muhtelif atomizasyon uygulamaları (Groover, 2009: 351)

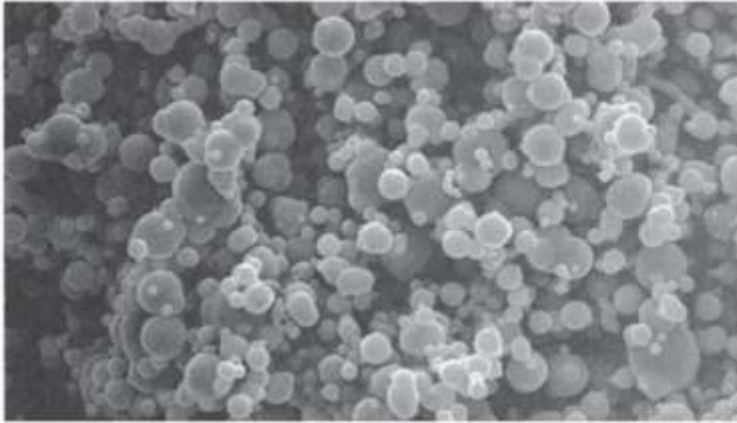
- a) ve b) İki gaz atomizasyonu yöntemi
- c) Su atomizasyonu
- d) Dönen disk yöntemi ile santrifüj atomizasyonu

Santrifüj atomizasyon yöntemi çok yüksek saflıkta tozlar üretmek için geliştirilmiştir. Bu uygulamalardan biri olan dönen disk yöntemi Şekil 3.2.d'de gösterilmektedir. Bu yöntemde, sıvı metal yaklaşık 35,000 1/min gibi çok yüksek hızla dönen bir soğuk metal

disk üzerine dökülüp etrafa saçılır ve bu sayede toz haline getirilir (Angelo ve Subramanian, 2008: 230).

Diğer toz üretim yöntemleri

Diğer toz üretim metotları değişik kimyasal redükleme (indirgeme) işlemleri, çökeltme metotları ve elektrolizdir. Kimyasal redükleme metal bileşiklerinin değişik kimyasal reaksiyonlar sonucu saf metal tozuna indirgenmesi işlemidir. Yaygın bir redükleme işlemi, metal oksitleri hidrojen veya karbon monoksit gibi redükleyici gazlarla tepkimeye sokarak metal elementlerini açığa çıkarmaktır. Bu işlemde, indirgeyici gazlar metal oksitteki oksijen ile bileşik yaparken metal serbest kalmaktadır. Bu yaklaşım, demir, tungsten ve bakır tozları üretmek için kullanılmaktadır. Demir tozu üretmek için kullanılan diğer bir kimyasal yöntem karbonil yöntemidir. Bu yöntemde, demir penta-karbonil ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) ayrıştırılarak yüksek saflıkta küresel demir tozları elde edilir. Bu yöntemle üretilmiş tozlar Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Bir diğer kimyasal toz üretme tekniği, metal elementlerinin tuzlu eriyiklerinden çökeltme ile ayrıştırılmasıdır. Bakır, nikel ve kobalt tozları bu şekilde üretilmektedir (Groover, 2009: 351, 352).

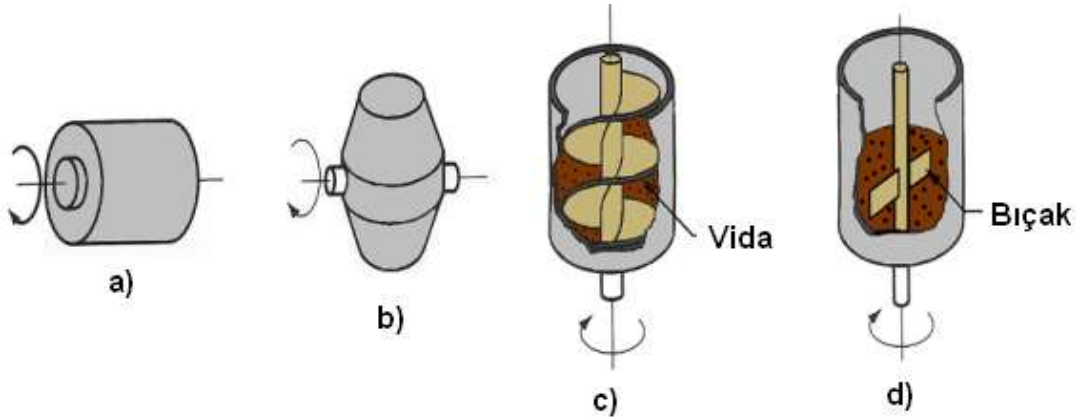


Şekil 3.3. Demir penta-karbonilin ayrıştırılması ile üretilen demir tozları (Groover, 2009: 352)

Yüksek saflığa sahip metal tozları üretmenin bir başka yöntemi de elektrolizdir. Bu yöntemde elektroliz hücresinin katot çubuğunda metal tozları çöktürülür ve daha sonra katot üzerinde çöktürülen birikinti sıyrılır, yıkanır, kurutulur ve öğütülerek toz haline getirilir. Bu yöntem, temel olarak bakır ve demir tozu üretiminde kullanılır (German, 2007: 66; Angelo ve Subramanian, 2008: 34).

3.2.2. Toz karıştırma

Tozların karıştırılması yağlayıcı ve katkı maddeleri gibi farklı bileşenlerin toz içerisinde homojen dağılmasını sağlar ve ayrıca sıkıştırma ve sinterlemeyi de kolaylaştırır. Toz metalürjisi yöntemi ile parça üretiminde üretilecek parça birçok farklı toz bileşenden oluşuyorsa üretimin bu aşaması zorunludur. Karıştırma işlemi kuru ve yaş koşullarda yapılabilir. Yaş karıştırma toz parçacıklardan yüksek oranda düzgün ve homojen bir karışım elde etmek için uygulanır. Yaş karıştırmada sıvı olarak alkol, aseton, benzen ya da damıtılmış su kullanılır. Karıştırma işleminde çeşitli tiplerde değirmen ve karıştırıcılar kullanılır. Bilyeli değirmen ya da çubuklu değirmen yoğunlukla karbürler gibi sert metalleri karıştırmak için kullanılır. Genel olarak çift konili mikser yada Y-konili mikser karıştırma işlemi için en çok kullanılan araçlardır. Ön alaşımli tozlar yerine toz karışımlarının kullanımı hem ekonomik hem de teknik faktörlere bağlanmaktadır. Toz karışımları çoğunlukla daha az pahalı ve daha iyi sıkıştırma özelliklerine sahiptir. Yumuşak ve sünek malzemeler için muhtemel iş sertleşmesinden dolayı değirmen tipi karıştırıcılar kullanmak uygun değildir (Angelo ve Subramanian, 2008: 43,44).



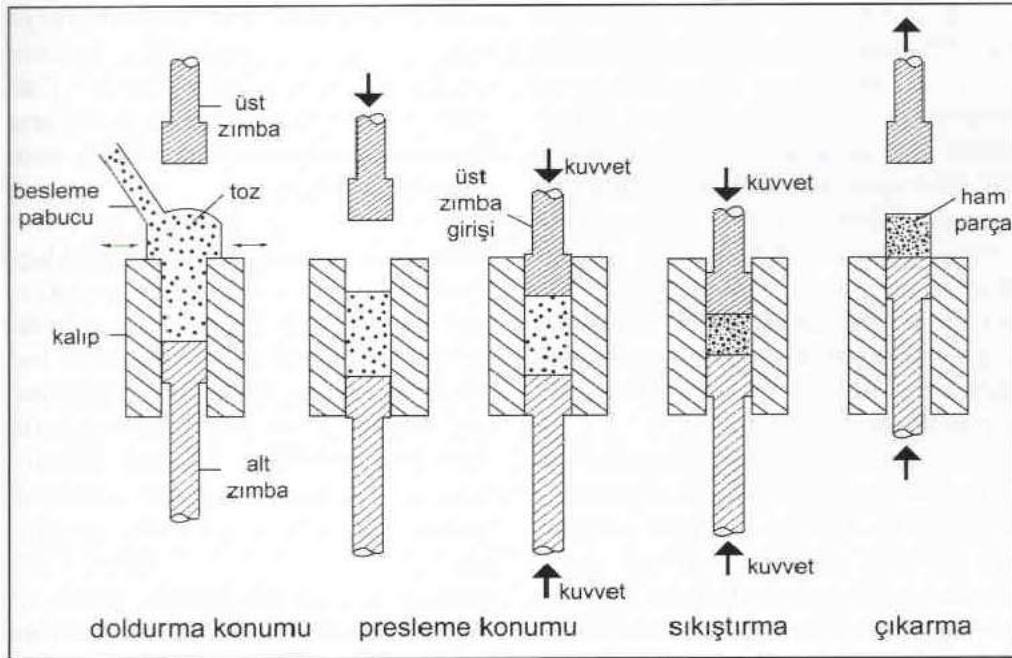
Şekil 3.4. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları (Groover, 2009: 353)

- a) Dönen tambur
- b) Dönen çift koni
- c) Vidalı mikser
- d) Bıçaklı mikser

3.2.3. Presleme

Toz metalürjisindeki en önemli adım preslemedir. Şekil 3.5’de presleme adımları görülmektedir. Presleme işleminde metal tozları, özel olarak hazırlanmış çelik kalıp içerisinde basınç etkisi ile kompakt bir hale getirilir. Bu işlem için genellikle hidrolik,

mekanik ve pnömatik presler kullanılmaktadır (Çiğdem, 2006: 338). Değişik sıkıştırma teknikleri olmakla beraber en yaygın kullanılanı tek eksenli bir kalıp ile sıkıştırma işlemidir. Tek eksenli kalıp ile sıkıştırma tekniği kesintisiz üretim, otomasyon sistemleri, yüksek miktarlarda metal ve seramik parçalar ile ilaç ve patlayıcı endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu nedenlerden dolayı endüstriyel uygulamalardaki çoğu T/M parçalar bu teknik kullanılarak üretilirler. T/M üretim yöntemi ile elde edilen malzemenin dayanımı presleme ve sinterleme sonrası yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir. Sinterlemede esas olan istenilen yoğunluğun (çoğu zaman tam yoğunluk) ve dolayısıyla fiziksel dayanımın elde edilmesidir. İdeal yoğunluk %100 teorik yoğunluğa erişmektir (Kurt, 2004).



Şekil 3.5. Presleme adımları (German, 2007: 197)

Tek yönlü sıkıştırma işleminde, pres sıkıştırılacak tozlar üzerine tek yönlü kuvvet uygulanır. Üst zımba kalıp boşluğuna girerek sıkıştırılacak tozu sabit olan alt zımbaya kalıp boşluğuna sıkıştırır. Tek yönlü sıkıştırmada tozlar arası ve tozlarla kalıp yüzeyi arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına neden olur. Uygulanan sıkıştırma kuvveti kalıp boyunca düzenli uygulanmadığında sıkıştırılan parçadaki yoğunluk homojen bir dağılım gösterememektedir. Yoğunluk hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha yoğun sabit zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Çift yönlü sıkıştırmada ise toz üst ve alt zımba tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Alt ve üst zımba tarafından eşit veya farklı basınç

uygulanabilir. Çift yönlü sıkıştırma işleminde üst zımbanın toza uyguladığı basınç sonucu kalıp yüzeyleri ile toz arasındaki sürtünme kuvveti kalıbı destekleyen (yay v.b.) kuvvetleri geçtiğinde kalıp aşağı hareket ederek sanki alt zımba yukarı hareket ediyormuş görünümü verir. Gerekli basınç uygulanıp sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra iş parçası alt zımbanın yukarı hareketi ile kalıptan çıkartılır. Çift yönlü sıkıştırmada sıkıştırılan parçaların yoğunluk dağılımı, tek yönlü sıkıştırma yöntemi ile elde edilen parçaların yoğunluk dağılımından daha homojendir (Kurt, 1992).

Diğer bir presleme yöntemi olan soğuk izostatik presleme, kademeli ve karmaşık şekilli parçalar veya boy-çap oranının büyük olduğu parçalar için tercih edilir. Soğuk izostatik presleme işleminde toz esnek bir kalıp içerisinde sızdırmaz hale getirilir. Bu toz-kalıp birleşimi yağ veya su gibi bir sıvının olduğu kabın içinde sıkıştırılır. Genellikle yağlayıcılar kullanılmaz. Bununla beraber sert metallerin ham yoğunluğunu artırmak için bazı parafinler ilave edilir. Sıkıştırma basıncı bir gaz veya sıvı yardımıyla parçaya her yönden ve eşit olarak uygulanır ve uygulanan basınç bütün yönlerde aynı değerde etki yapar. Bundan dolayı sıkıştırılan parçanın yoğunluğu her noktada aynı değerde olur. İzostatik preslenmiş parçalarda yoğunluk gradyanları daha küçük olduğu için büyük sinterleme daralmaları sırasında çarpılma olmaz. Bundan dolayı; sert metaller kalıp çelikleri, paslanmaz çelikler ve birçok seramikler büyük parçaların şekillendirilmesinde kullanılır (German, 2007: 224, 225).

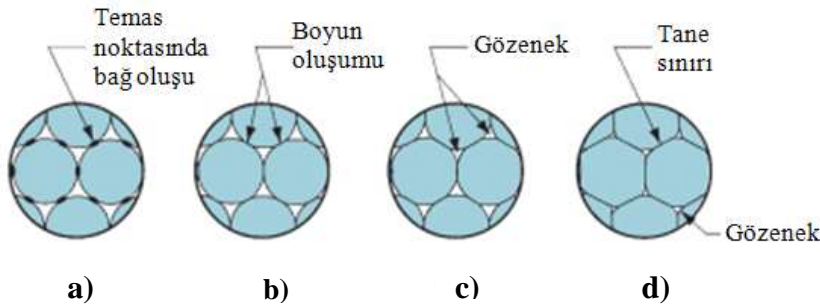
Sinterlemesi zor olan tozlar için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri de sıcak presleme yöntemidir (Angelo ve Subramanian, 2008: 119). Bu yöntem de ısı ve basıncın bir araya gelerek neredeyse tamamen iç gözeneklilikten arınmış bir ürün elde etme işlemidir. Geleneksel soğuk pres-sinterleme işlemleriyle karşılaştırıldığında sıcak presleme tekniği daha az güç, daha kısa süre (genellikle 2–3 dakika) ve daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyar. Ayrıca bu teknikte soğuk presleme-sinterleme işlemine göre, daha yüksek yoğunluklara ulaşılır (Çelik, Çelik ve Güven, 2010).

3.2.4. Sinterleme

Sinterleme işlemi preslenmiş parçaların kontrollü bir atmosferde ve yüksek sıcaklıkta istenilen nihai özelliklerin eldesi amacıyla ısıtılmasına tabi tutulmasıdır. Metallerin çoğu ergime sıcaklıklarının % 70'i ile % 80'i arasında bir sıcaklıkta sinterlenirken, bazı refrakter

malzemelerde sinterleme sıcaklığı ergime sıcaklıklarının % 90'nına ulaşabilir. Karışım birden fazla malzeme içerdiği zaman işlem sıcaklığı bazı bileşenlerin ergime sıcaklıklarının üzerinde olabilir. Bu gibi hallerde düşük ergime noktalı malzemeler ergiyerek yüksek ergime noktalı tozlar arasındaki boşlukları doldururlar (Çiğdem, 2006: 343, 344).

Sinterleme işleminde en önemli itici gücün yüzey enerjisini azaltma olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Preslenmiş yaş ürün aralarında bağ olmayan ve kendi yüzeyi olan birçok serbest partikülden oluşur. Dolayısıyla, yaş üründeki toplam yüzey alanı çok yüksektir. Isı etkisi altında, partiküller arası bağ oluşumu ve artması ile yüzey alanı, dolayısıyla yüzey enerjisi, azaltılır. Başlangıçtaki tozların tane boyutu küçüldükçe toplam yüzey enerjisi yükselir ve işlemin ardındaki itici güç artar. Şekil 3.6'da verilen bir dizi şematik çizim metal tozların sinterlenmesi esnasında vuku bulan mikroskobik ölçekteki değişimleri göstermektedir. Sinterleme işleminde, kütle transferi (difüzyonu) ile temas noktalarında boyun oluşumu ve oluşan boyun bölgelerinin de daha sonra tane sınırına dönüşmesi gerçekleşir. Bu olayın gerçekleşmesindeki temel mekanizma difüzyondur. Diğer muhtemel mekanizmalardan biri de plastik akıştır. Sinterleme esnasında, gözenek boyutu küçüldüğünden büzülme oluşur. Bu büzülme miktarı büyük oranda, sıkıştırma işleminde uygulanan basınca ve dolayısıyla yaş ürünün yoğunluğuna bağlıdır. Büzülme miktarı genellikle, işlem şartları sıkı kontrol edildiği takdirde, tahmin edilebilir (Groover, 2009: 356).



Şekil 3.6. Mikroskobik ölçekte sinterleme işlemi (Groover, 2009: 356)

- a) Partiküller arası bağ oluşumunun temas noktalarında başlaması
- b) Temas noktalarında 'boyun' oluşumu
- c) Partiküller arasındaki gözenek boyutunun küçülmesi
- d) Partiküller arasında boyun bölgelerinde tane sınırlarının gelişimi

Sinterleme sonrası işlemler

Sinterlenmiş toz metal parçalara boyutsal hassasiyet, korozyon direnci yâda mukavemet artışı gibi bazı özellikler kazandırmak için ilave işlemlere ihtiyaç duyulur. Toz metal parçalara sinterlemeden sonra ısıtıl işlem, infiltrasyon, yüzey kaplama işlemleri, buhar işlemi gibi birçok farklı ikincil işlemler uygulanır. İnfiltrasyon işleminde toz metal parçaların gözenekleri yağ, plastik, sıvı metal ya da alaşım ile doldurulur. Gözeneklere düşük ergime noktalı bir metal veya alaşım emdirilerek yoğunluk, mukavemet, sertlik, süneklik ve darbe mukavemetinde artış sağlanabilir. Toz metal parçalara bakır, nikel, kadmiyum, çinko, krom kaplama yapılabilir. Kaplama işlemi yapılmadan önce yüzeydeki gözenekler reçine veya deformasyonla kapatılmalıdır. Buhar işlemi ile demir asıllı parçaların yüzeyleri manyetik demir oksit tabakası ile kaplanarak sertlik, basma dayanımı, aşınma ve korozyon dirençleri artırılır. Buhar işlemi 500-550 °C civarında bir sıcaklıkta yüksek basınçlı buharın toz metal parçalara uygulanması ile gerçekleştirilmektedir (Angelo ve Subramanian, 2008:175,177, 180).

3.3. Toz Metalürjisinin Avantaj ve Dezavantajları

Diğer imal usullerinde olduğu gibi toz metalürjisinin de belirli avantaj ve dezavantajları vardır. Toz yönteminin ekonomik bir şekilde ve başarıyla uygulanabilmesi için avantaj ve dezavantajlarının başlangıçta değerlendirilmesi gerekir. Önemli avantajları aşağıda özetlenmiştir.

1. Talaşlı işlem gereksiniminin azaltılması veya tamamen eliminasyonu
2. Yüksek üretim hızları
3. Karmaşık şekillerin üretimi
4. Çok geniş bir kompozisyon aralığı
5. Özelliklerin geniş bir aralıkta değişimi
6. Hurda miktarının azaltılması veya eliminasyonu (Çiğdem, 2006: 354, 355, 356).

Toz metalürjisinin dezavantajları ise şunlardır;

1. Düşük mekanik özellikler
2. Nispeten yüksek kalıp maliyeti

3. Yüksek malzeme fiyatı
4. Dizayn sınırlamaları
5. Parça kesiti boyunca özelliklerin değişim göstermesi (Çiğdem, 2006: 356, 357).

3.4. Toz Metalürjisinin Uygulama Alanları

Günümüzde T/M, pek çok uygulamada diğer üretim yöntemleri ile başa baş yarışmaktadır. T/M ile üretilen parçaların kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır (Serfiçeli, 2000: 231). Küresel bazda, T/M ürünlerinin satışı yılda 75 milyar dolarlık bir büyüklüğe ulaşmaktadır. Bu değer ana kalemleri elektronik seramikler, sert metal kesici takımlar, elektro-manyetik parçalar ile sıhhi tesisatlar, tabaklar ve tuğlalar gibi yaygın seramik ürünler oluşturmaktadır (German, 2007: 482). Genel olarak T/M talaşlı üretim gerektirmeyen makine parçaları, takım çelikleri, sert metaller, sermetler, kaymalı yataklar, gözenekli metaller ve filtreler, sürtünme elemanları, elektrik ve manyetik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Serfiçeli, 2000: 231). TM'nin otomotiv sektöründe önemli uygulamaları Çizelge 3.1'de görülmektedir.

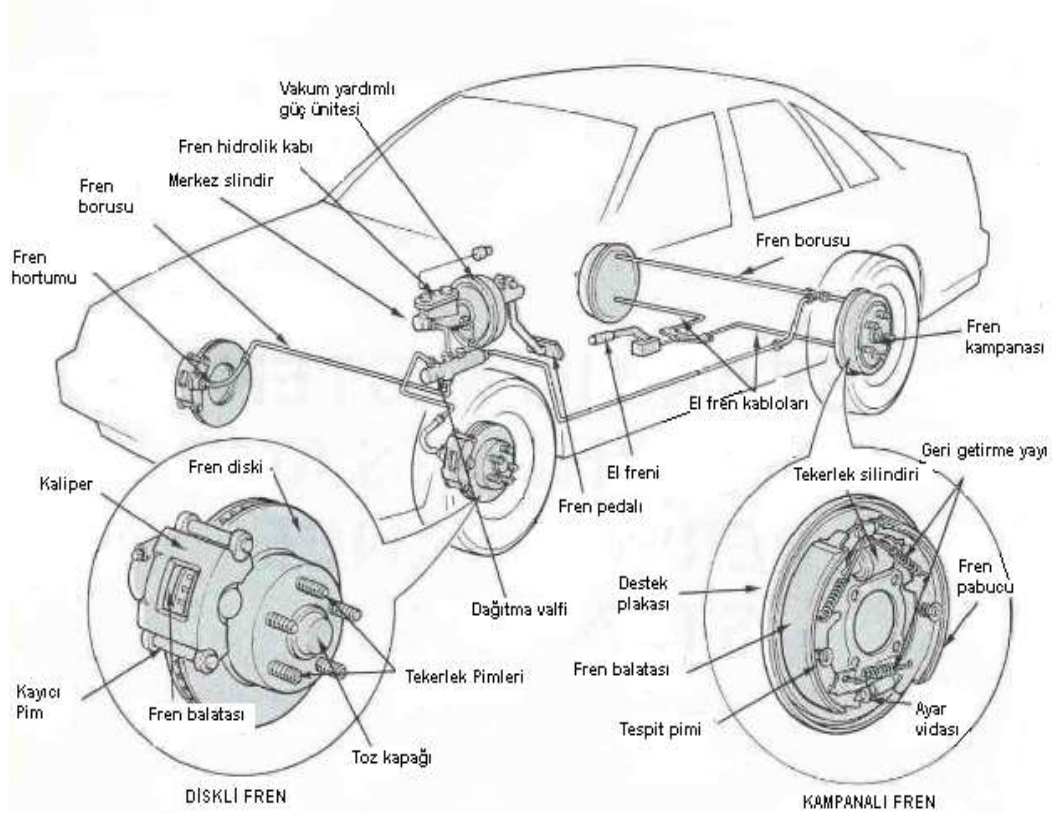
Çizelge 3.1. T/M'nin otomotiv sektöründe uygulama alanları (Öveçoğlu, 1997)

Dinamo regülatörü kontaklar	Pt alaşımları, Fe
Yataklar	Cu, Pb, Sn, Fe, Al, grafit, tunç
Fren balataları	Fe, grafit, Cu, Zn, Sn
ABS fren sistemi sensör halkaları	Fe, P
Debriyaj ve fren balataları	Fe, grafit, Cu, Zn, Sn, Pb
Elektrik kontakları	W, Cu, Ag
Amartisör	Fe, Cu, takım çeliği
Buji	Fe, Zn, seramik esaslı tozlar
Vites kutusu parçaları	Fe, Cu, çelik

4. FREN SİSTEMİ VE FREN SÜRTÜNME MALZEMELERİ

Frenler bir taşıtı yavaşlatmak, durdurmak ya da durur halde tutmak için kullanılan emniyet sistemidir. Bu amaçla fren sistemi taşıtın sahip olduğu kinetik enerjiyi fren diski ve balatası arasında ısı enerjisine dönüştürerek taşıtı durdurur. Motorlu taşıtlarda kullanılan fren sistemi şu görevleri yerine getirir.

1. Taşıtın durdurulmasının zorunlu olduğu durumlarda taşıtın hızını azaltmak.
2. Yokuş aşağı inen bir taşıtın aşırı hız kazanmasını önlemek.
3. Durur haldeki bir taşıtın bu durumunu sürdürmek (Breuer ve Bill, 2007: 11).

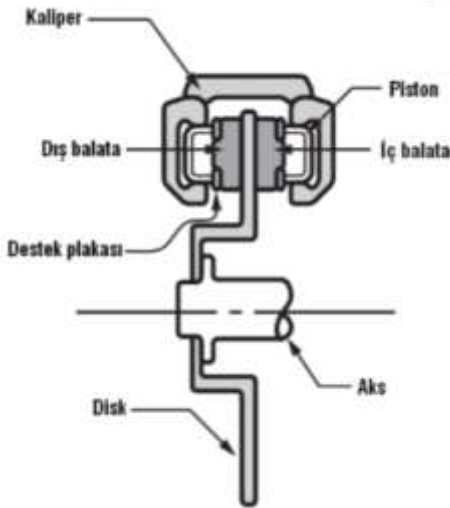


Şekil 4.1. Otomobil fren sistemi (Halderman, 2004: 42)

Taşıt sürücüsü ve yolcuların yaşamları ve güvenliği fren sisteminin düzgün çalışmasına bağlıdır. Bundan dolayı frenler taşıt üzerindeki en önemli parçalardan biridir. Ortalama bir taşıtta frenlerin yılda 50,000 kez kullanıldığı tahmin edilmektedir (Halderman, 2004: 41). Motorlu taşıtlarda kullanılan sürtünmeli frenler; Şekil 4.1'de görüldüğü gibi diskli ve kampanalı olmak üzere ikiye ayrılır.

4.1. Diskli Frenler

Diskli fren kavramı 20. yüzyılın başından beri bilinmektedir ancak kullanımı 1960'lı yıllarda yaygınlaşmıştır. Günümüzde ön akslarda disk frenler standart olup, daha üst modellerde de arkadaki kampanalı frenlerin yerini almıştır. Disk frenler daha dayanıklı ve güçlü olmalarının yanı sıra, frenleme kuvvetini hassas olarak ayarlayabilmekte ve kendisini temizleyebilmektedir. Ayrıca bakımı daha kolaydır. Diskli fren sistemi fren diski, sabit bir kaliper ile bu kaliper üzerine yerleştirilen fren balata ve pabuçları ile fren hidrolik silindiri ve pistonlarından oluşmaktadır (Yüce, 2006: 213). Diskli frenlerde disk ya da rotor taşıt tekerleğine bağlanmıştır ve tekerlekle beraber dönmektedir. Fren balataları sabit bir otomotiv parçası olan U şeklindeki kaliper aracılığı ile diskin her iki tarafına konumlandırılmıştır. Fren pedalına basıldığında fren pedal kuvveti hidrolik akışkan aracılığı ile kaliperlere aktarılır. Kaliper içindeki artan hidrolik basınç fren balatalarını dönen fren diskine doğru bastırmaktadır. Fren disk-balatası arasında oluşan sürtünme fren diskini yavaşlatır ve durdurur. Fren diski civata yardımı ile taşıt tekerleğine bağlı olması nedeniyle taşıt yavaşlar ve durur (Crouse ve Anglin, 1989: 27, 44).

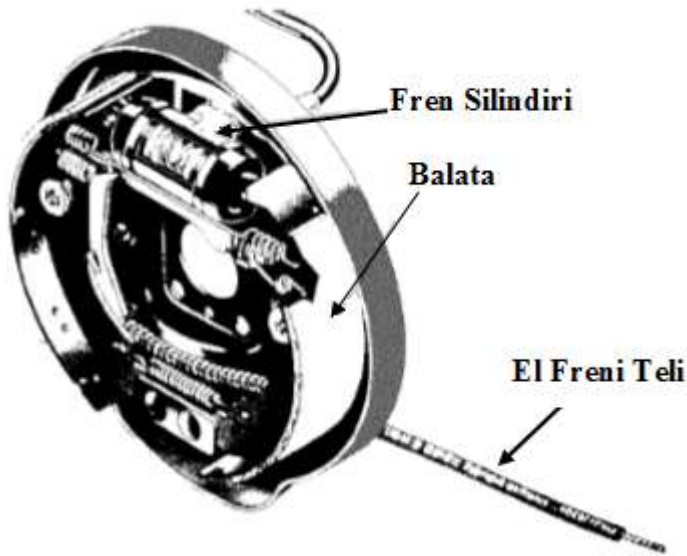


Şekil 4.2. Diskli fren sistemi (Demir, 2009)

4.2. Kampanalı Frenler

Kampanalı frenlerde frenlenen yüzey silindriktir ve karayolu taşıtlarında içten pabuçlu olan kampanalı frenler kullanılmaktadır (Şekil 4.3). Kampanalı freni işletme şartlarının gerektirdiği mukavemete sahip ve ısı özellikleri sağlayan bir kampana, pabuçlar ve baskı

düzeni ve taşıma düzeni elemanlarından oluşur (Avunç, 2007). 50'li yılların ortalarına kadar, otomobil teknolojisinde standart olarak kabul edilen kampanalı frenler giderek yerini çok daha üstün olan disk fren sistemine bırakmıştır. Günümüzde hafif ve düşük performanslı araçların arka akslarında kullanılan kampanalı frenlerde, balata fren kampanasının iç yüzeyine sürtünerek frenleme gücü üretir. Disk frenlerde aksel yönde olan sıkıştırma kuvvetlerinin, kampanalı frenlerde dönme eksenine dik yönde olması, çalışma sırasında biçimsel değişime uğraması basıncın balataların tüm sürtünme yüzeyine düzgün ve dengeli olarak dağıtamaması, başlıca dezavantajlarıdır. Bu nedenle, bu tür frenler günümüz yolcu arabaların arka akslarında kullanılmaktadır. Bazı durumlarda kampanalı frenler, el freni görevini de üstlenmektedir (Yüce, 2006: 214, 215).



Şekil 4.3. Kampanalı fren sistemi (Göktan, Güney ve Ereke, 1995: 36)

4.3. Disk Frenlerle Kampanalı Frenlerin Karşılaştırılması

Günümüzde disk frenler özellikle otomobillerin ön akslarında ve bazı modellerin arka akslarında da kullanılmaktadır. Ayrıca ağırlığı 7,5 tonun altında olan ticari taşıtların ön akslarında da disk fren kullanımı gitgide artmaktadır. Buna karşılık otomobillerin büyük bir kısmının arka aksları ve ticari taşıtların çoğunun ve özellikle ağır ticari taşıtların tümünün ön ve arka akslarında kampanalı frenler bulunmaktadır. Her iki tip frenin de kullanılıyor olması birbirlerine göre avantajlı ve sakıncalı yanlarının bulunduğunu göstermektedir (Göktan ve diğerleri, 1995: 47).

Diskli frenler oldukça verimlidir ve aşırı ısınmadan doğan balata ile disk arasındaki sürtünme kayıplarına (fren etkinlik kayıplarına) karşı dayanıklıdır. Aşırı ısınmalar, hem balatanın hem de kampananın sürtünme yüzeylerinde zamanla cam gibi bir parlaklık oluşturur ve frenleme etkisinde zayıflama meydana gelir. Diskli frenler havaya açıktır ve daha küçük sürtünme yüzeylerine sahiptir. Diskli frenlerin nem ve dış kirliliklere açık oluşu şikâyet konusu olmakla birlikte diskli frenlerin kuru ve ıslak havada rahatlıkla çalıştıkları belirlenmiştir. Diskli frenlerde sürtünme yüzeyi çok dar olduğundan daha büyük frenleme kuvvetlerine ve basınçlarına ihtiyaç duyabilir. Diskli frenlerde servo enerji olmaması, frenlemenin daha kararlı olarak çalışmasını sağlar. Ayrıca yüksek hızlardaki durmalarda tutukluk veya fren kapması meydana gelmez (Mutlu, 2002).

4.4. Fren Etkinlik Kaybı

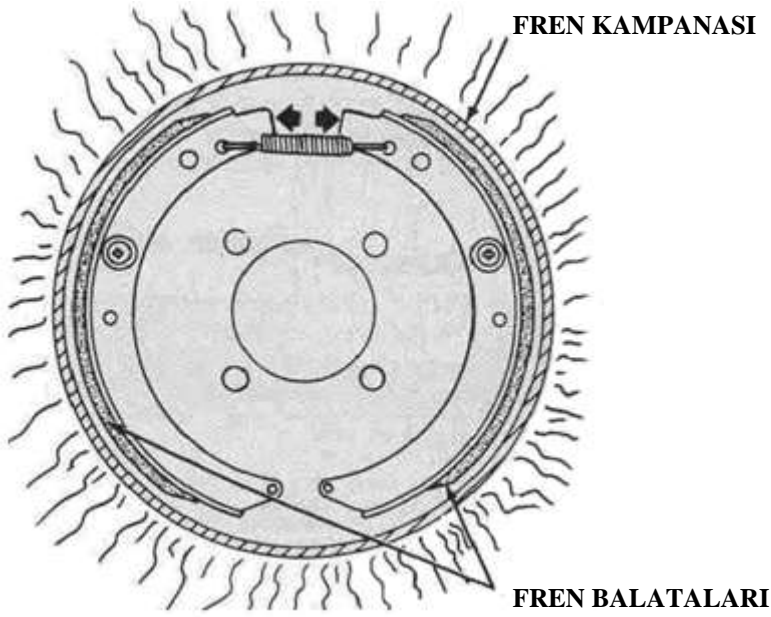
Fren kampanası ya da diskinin sıcaklığı ani ve etkili frenlemelerde saniyeler içerisinde 55 °C daha yüksek sıcaklıklara çıkabilir. Fakat fren diskinin sıcaklığının frenlemeden önceki sıcaklığa soğuması 30 saniye veya daha fazla sürebilir. Ani ve etkili frenlemeler çok sık tekrarlanırsa fren parçaları aşırı ısınır ve etkinliğini kaybeder ya da tamamen iş göremez hale gelebilir. Frenleme gücünün kaybı, fren etkinlik kaybı olarak tanımlanır. Frenlerin aşırı ısınması ve fren etkinlik kaybı; fren tasarımı, frenlerin soğuma yeteneği, kullanılan sürtünme malzemesinin tipi gibi faktörlerden etkilenmektedir. Fren sisteminde meydana gelen dört tip fren etkinlik kaybı vardır (Halderman, 2004: 58, 59).

1. Mekanik yorulmanın neden olduğu fren etkinlik kaybı
2. Balata yorulmasının neden olduğu fren etkinlik kaybı
3. Fren balata-disk veya balata-kampana arasında oluşan gazın neden olduğu fren etkinlik kaybı
4. Suların sebep olduğu fren etkinlik kaybı

4.4.1. Mekanik yorulmanın neden olduğu fren etkinlik kaybı

Mekanik yorulma fren kampanasının aşırı ısıya maruz kaldığı zaman dışa doğru genişlemesi ile oluşur (Şekil 4.4). Böylece frenleme gücünü sürdürebilmek için fren pedalını gereğinden daha fazla hareket ettirmek zorunda kalırız. Fren kampanaları fren pedalına sonuna kadar basılmasına rağmen fren balata ile fren kampanası arasındaki

temasın sağlanamayacağı noktaya kadar genişlediğinde fren etkinlik kaybı oluşur. Kampana tipi frenlerde mekanik yorulmanın neden olduğu fren etkinlik kaybı daha çok ısıyı absorbe edebilen ağır ya da daha geniş fren kampanası kullanılarak azaltılabilir. Mekanik yorulmanın neden olduğu fren etkinlik kaybı disk frenlerinde fren diskinin ısınması sonucu fren balatasına doğru genişlemesinden dolayı bir problem değildir (Halderman, 2004: 58).

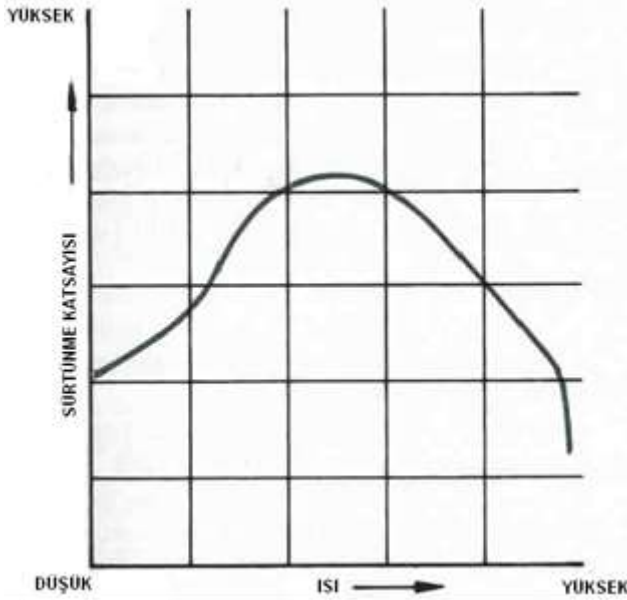


Şekil 4.4. Mekanik yorulma (Halderman, 2004: 58)

4.4.2. Balata yorulmasının neden olduğu fren etkinlik kaybı

Balata yorulmasının neden olduğu fren etkinlik kaybı hem disk hem de kampanalı tip frenleri etkiler. Balata yorulmasının neden olduğu fren etkinlik kaybı, frenleme sırasında fren balatalarının aşırı ısıya maruz kalması sonucunda sürtünme katsayılarının hızla düşmesi şeklinde meydana gelir (Şekil 4.5). Kampanalı frenlerde balata yorulmasının oluşturduğu fren etkinlik kaybı bazen fren pedalına uygulanan basınç miktarı artırılarak kısmi olarak azaltılabilir. Ancak ekstra basınç balata yorulmasını ve ısı miktarını arttırdığından bu durum fren etkinlik kaybının daha da artmasına neden olabilir. Diskli tip frenlerin oluşan ısıyı daha iyi yayma özelliğine sahip olması ve disk yüzeylerinin hava ile temas halinde bulunması nedeniyle balata yorulmasının neden olduğu fren etkinlik kaybı bu tip frenlerde daha az probleme neden olmaktadır. Ayrıca birçok fren diski soğumaya

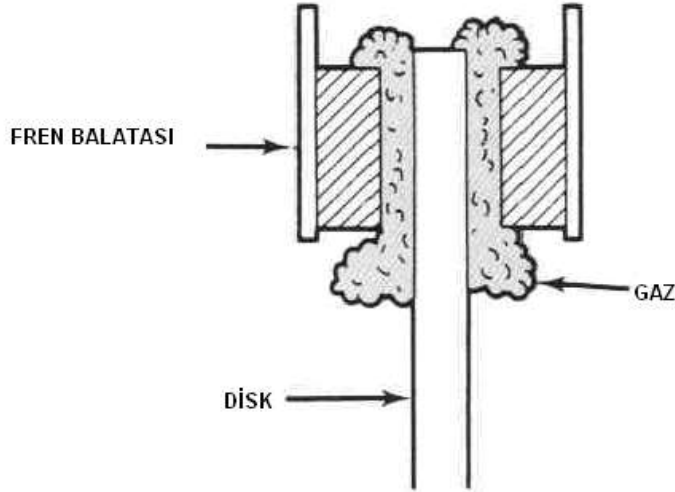
yardımcı olması amacıyla içten havalandırılmalı olarak yapılmaktadır (Halderman, 2004: 58, 59).



Şekil 4.5. Balata yorulması (Halderman, 2004: 59)

4.4.3. Fren diski ve balatası arasında oluşan gaz tabakasının neden olduğu fren etkinlik kaybı

Çok sert frenlemelerde fren kampanası ve fren balatası arasında ya da fren diski ve fren balatası arasında toz parçacıkları ve ince bir sıcak gaz tabakası oluştuğunda oluşan genellikle nadir görülen bir fren etkinlik kaybıdır. Gaz tabakası bir yağlayıcı gibi davranarak sürtünmeyi azaltır (Şekil 4.6). Balata yorulmasının neden olduğu fren etkinlik kaybında olduğu gibi durma gücünün aynı kalabilmesi için fren pedalına daha yüksek bir kuvvet uygulamak gerekir. Birçok durumda fren etkinlik kaybı geçici bir durumdur. Fren balataları ve diskler soğuduğunda frenler normal durumuna döneceklerdir. Ancak ısının çok fazla arttığı durumlarda oluşan yüksek ısı sürtünme malzemelerine zarar verir ya da hidrolik sistem içerisindeki lastik contayı eritir (Halderman, 2004: 59).



Şekil 4.6. Fren diski ve fren balatası arasında meydana gelen gaz tabakası (Halderman, 2004: 59)

4.4.4. Suların sebep olduğu fren etkinlik kaybı

Taşıt yağmurlu havada ya da su dolu çukurlardan geçtiğinde su fren kampanası ile fren balatası arasında kalabilir. Bu durum olduğunda su fren kampanası ile balata arasından çıkıncaya kadar frenleme kuvveti sağlanamaz. Suların neden olduğu fren etkinlik kaybı çoğunlukla kampana tip frenlerde oluşurken disk tipi frenlerde de oluşabilir. Taşıt su dolu bir çukurdan geçtikten sonra usta şoför fren sisteminin çalıştığını kontrol etmek ve fren balatası-kampana veya fren balatası-fren diski arasındaki suyun çıkmasına yardımcı olmak için fren pedalına hafifçe basabilir (Halderman, 2004: 59).

4.5. Fren Balataları

Fren balataları fren sistemi içerisinde oldukça zor koşullar altında çalışan ve büyük miktarda aşınmaya maruz kalan parçalardır. Fren balataları basit bir parça olarak görülmesine rağmen yıllar süren bir mühendislik çalışmasının ürünüdür. Üretilen fren balataları farklı bileşenler içerdiğinden benzer sürtünme özellikleri göstermezler. Bir fren balatası tasarlanırken, mühendisler fren balatasını oluşturan sürtünme elamanlarının performanslarını test ederek en uygun sürtünme bileşenlerini belirleyip uygun kompozisyonu oluşturmaktadırlar (Halderman, 2004: 68). Balata malzemeleri genellikle üreticilerin geçmiş tecrübeleri eşliğinde deneme yanılma yöntemi ile geliştirilmektedir (Yun, Filip ve Lu, 2010; Hee ve Filip, 2005). Fren balataları birçok farklı bileşenin

karışımından oluşmaktadır. Fren balataları metalik, karbon ve organik olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir (Anderson, 1992: 569).

4.5.1. Organik fren balataları

Günümüzde fren balataları içerisinde kullanılan en yaygın grup asbest içermeyen organik malzeme olarak adlandırılır. Bu balatalar temel olarak 20–30 arasında değişen farklı bileşenlerden oluşmaktadır (Ostermeyer ve Muller, 2008). Ayrıca ağırlıkça %30-40 oranında organik reçine içermektedir (Bijwe, 1997). Ancak bu bileşenlerin karışım oranı balata üreticileri tarafından sır olarak saklanmaktadır (Ostermeyer ve Muller, 2008). Organik balata malzemelerini oluşturan bileşenler en az dört farklı sınıfa ayrılabilir. En uygun bileşeni oluşturmak için bu dört sınıftaki malzemelerin tespiti fren balata üreticileri için zor bir görevdir. Bu sınıflar bağlayıcı, dolgu malzemeleri, sürtünme düzenleyici ve takviye malzemelerinden oluşmaktadır (Bijwe, 1997).

Bağlayıcılar

Bağlayıcılar, tüm bileşenleri bir arada tutmak ve kararlı bir matris oluşturmak için kullanılır. Yaygın olarak termoset tipi fenolik reçine kullanılır. Ayrıca sönümlenme özelliğini geliştirmek için fenolik reçine içerisine lastik tozu ilave edilir (Eriksson ve Jacobson, 2000).

Yapısal malzeme

Yapısal malzemeler mekanik dayanım sağlamak için kullanılır. Asbest yasaklanmadan önce fren balata malzemelerinde yapısal malzeme olarak yaygın şekilde asbest kullanılmaktaydı. Günümüzde yapısal malzeme olarak genellikle metal, karbon, cam elyaf, kevlar, ayrıca nadiren de olsa farklı mineral ve seramik elyaflar veya bunların kombinasyonları kullanılmaktadır (Kesavan ve Shao, 2007).

Dolgu malzemesi

Dolgu malzemeleri temelde balata maliyetini azaltmak ve üretilebilirliği iyileştirmek için kullanılır. Bu amaçla mika ve vermikülit gibi farklı mineraller çok sık kullanılmaktadır.

Baryum sülfat da diğer yaygın kullanılan bir dolgu malzemesidir (Eriksson ve Jacobson, 2000).

Sürtünme düzenleyici

Sürtünme düzenleyiciler kararlı sürtünme özellikleri sağlamak ve hem disk hem de fren balatasındaki aşınma oranını kontrol etmek için ilave edilirler. Grafit ve metal sülfid gibi katı yağlayıcılar öncelikle artan sıcaklıklarda sürtünme katsayısını dengelemek için kullanılırlar (Erikson ve Jacobson, 2000). Ticari fren balataları tipik olarak hacimce % 1-8 arasında değişen oranlarda abrasiv partiküller içerir. Zirkon, alümina, kuvars, magnezya gibi silikatlar ve oksitlerin farklı formları istenilen sürtünme seviyesini elde etmek için fren balatalarında kullanılır. Abrasivlerin etkinliği büyük ölçüde sertliğine ve morfolojik yapısına bağlıdır. Ticari fren balatalarında kullanılan abrasiv partiküllerin boyutu birkaç mikrondan yüzlerce mikron arasında değişebilir. Partikül boyutunun secimi üretici firmalarının önceki tecrübelerine dayanmaktadır (Cho ve diğerleri, 2008). Pirinç, bakır gibi metalik parçacıklar ya da tozlar ısı dağıtımını geliştirmek için ilave edilir. Ayrıca metalik tozların fren etkinliğini artırıcı yönde faydasının olduğu bildirilmektedir (Bijwe, 1997).

4.5.2. Karbon-Karbon fren balataları

Karbon esaslı balatalar askeri ve ticari uçakların disk frenlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Dünyada üretilen karbon-karbon kompozitlerinin yaklaşık % 63'ü uçak fren sistemlerinde kullanılır (Bijwe, 1997). Ayrıca bu balatalar ağırlığın kritik olduğu ve fiyatın ikinci planda olduğu performansın daha önemli olduğu yarış otomobillerinde de kullanılmaktadır. Karbon-karbon sürtünme malzemeleri karbon fiberlerden yapılmaktadır. Karbon fiberler amorf karbon ile bağlanan grafit fiber olarak da adlandırılmaktadır. Amorf karbon bağlayıcı oluşturmak için organik reçineler ya yüksek sıcaklıkta fırınlanır ya da kimyasal buhar çökertme işlemi uygulanmaktadır. Daha sonraki işlemler sonunda üretilen sürtünme malzemesi aslında çok düşük gözenekli saf karbondan oluşmaktadır (Anderson, 1992: 570; Bijwe, 1997). Karbon-karbon malzemeler 2000 °C çalışma sıcaklığı ve yüksek özgül ısı özelliği sebebiyle fren uygulamalarında dökme demir yerine kullanıldığında yaklaşık % 85 oranında ağırlık kazancı sağlamasına imkân verir (Anderson, 1992: 570). Bu malzemelerin hafif, termal olarak kararlı yapısı, oldukça yüksek özgül ısıya sahip olması

bir fren malzemesi olarak mükemmel bir performans göstermelerini sağlamaktadır. Malzemenin bu sınıfının avantajları şunlardır (Bijwe, 1997).

- Yüksek sıcaklıklarda çeliğin iki katı dayanım gösterir.
- % 40 daha hafiftir.
- Servis ömrü yaklaşık iki kattır.
- Ağır çevre koşullarından etkilenmez.

Ancak fiyat ve oksidasyon hassasiyeti gibi dezavantajları vardır (Bijwe, 1997).

4.5.3. Metalik fren balataları

Bu fren balataları bakır ya da demir esaslı olabilir. Bu tip fren balatalarının çoğu katı hal sinterleme yöntemi ile üretilmektedir ve performansı geliştirmek için inorganik katkı maddeleri ilave edilir. Bu fren balataları çok yüksek güç giriş yoğunlukları için geliştirilmiştir. Örneğin katı hal sinterlenmiş bronz ve mullit balatalar yüksek hızlı demiryolu balatalarında ve yarış arabalarında kullanılmaktadır. Grafit ile sinterlenmiş demir balatalar ağır hizmet tipi araçlarının hem kampanalı hem de disk tipi frenlerinde kullanılmaktadır. Diğer metalik sürtünme malzemesi de dökme demirdir. Bu malzeme bazı eski demiryolu frenlerinde kullanılmasına rağmen otomobillerde dökme demirin fren balatası olarak kullanıldığı bilinmemektedir. Ancak dökme demir otomobillerde disk ve kampanalı tip frenlerde çoğunlukla karşı yüzey olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle otomobillerde her ne kadar fren balatası olarak kullanılmasa da fren diski ve kampanası olarak fren sisteminde kullanımı devam etmektedir (Anderson, 1992: 570).

Bakır esaslı balata malzemeleri

Islak sürtünme uygulamalarında sinter malzemenin matrisi bakırdır. Fakat kuru sürtünme uygulamalarda bileşendeki bakır oranı azaltılır demir oranı arttırılır. Çizelge 4.1’de bakır ve demir esaslı balata malzemelerine ait kimyasal bileşimler görülmektedir. Bileşenlerin oranının değişmesi malzemenin fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca bileşenlerin oranlarını değiştirerek farklı sürtünme katsayılarına sahip balata malzemeleri elde edilebilir. Balata malzemesini oluşturan bileşenlerin karıştırma işlemi genellikle koni tip karıştırıcılar kullanılarak gerçekleştirilir. Karıştırma işlemi sırasında bileşenlerin

segregasyonunu önlemek amacıyla sinterleme esnasında yapıdan kolaylıkla uçabilen yağlar kullanılır (Özsever, 1984:701).

Çizelge 4.1. Bakır ve demir esaslı balata malzemelerinin kimsayal bileşimi (Özsever, 1984: 702)

Bakır	Demir	Kurşun	Kalay	Çinko	SiO ₂	Grafit
65-75	----	2-5	2-5	5-8	2-5	10-20
10-15	50-60	2-4	2-4	---	8-10	10-15

Çizelge 4.2. Bronz esaslı sinter balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri (Topbaş, 1993: 259)

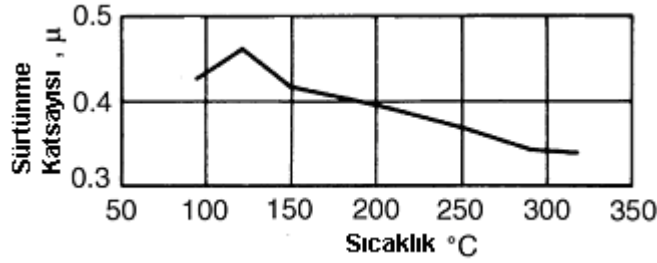
Kullanım Şartları	Baskı basıncı $p \leq 5$ MPa Kayma Hızı $v \leq 40$ m/s $p.v \leq 1,5$ kW/cm ²
Sürtünme Katsayısı (μ)	0,15.....0,50
Aşınma	$p.v=0,8....1,0$ kW/cm ² olan orta yüklerde, 0,5 cm ³ /kWh
Sıcaklığa Dayanım	Sürekli çalışmalarda max. 450 °C Kısa süreli çalışmalarda max. 650 °C
Özgül ağırlık	5.....7 g/cm ³
Isı İletim Katsayısı	6.....35 W/mK
Sertlik	10.....50 BSD

Demir esaslı balata malzemeleri

Demir esaslı balata malzemeleri, yüksek zorlamalar için uygundur ve özellikle kuru çalışan kavramalarda tercih edilirler. Bronz esaslı malzemelere nazaran daha ucuzdurlar ve daha yüksek sıcaklıklarda da daha iyi aşınma direnci gösterirler. Belirli kullanım alanları için Çizelge 4.3’de gösterildiği gibi değişik bileşenlerde üretilebilirler (Topbaş, 1993: 260). Ayrıca sinter demir balataların ısıyı iyi iletme özelliklerinden dolayı yüksek sürtünme sıcaklıklarının meydana geldiği yerlerde kullanılmaktadır. Sinter demir balataların bu ısıyı iletme özelliği balatanın soğuk kalmasını temin etmekte ve bu durum balataların ömrünü artırmaktadır (Boz, 2003).

Şekil 4.7’de kuru sürtünme malzemesinin sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi görülmektedir. 95 °C ve 315 °C arasında dinamik sürtünme katsayısındaki düşüş oldukça dikkate değerdir. Belli bir noktadan sonra azalma oranı yavaşlar ve sonunda kararlı bir duruma erişir. Bazı malzemelerin sürtünme katsayıları, sürtünme katsayısı kararlı bir duruma ulaştıktan sonra sıcaklığın artması ile hafif bir artış gösterdikleri rapor edilmiştir.

Bu durum temel olarak sürtünme malzemesinde kullanılan grafitin yüksek sıcaklık etkisi ve yüzey morfolojisindeki değişimden kaynaklanmaktadır (Özsever, 1984: 703).



Şekil 4.7. Demir esaslı bir malzemenin sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi (Özsever, 1984: 703).

Demir esaslı balataların kullanım yerleri inşaat makineleri, vinç, ağır presler, takım tezgâhları, haddeler, gemi ve tekstil makinelerinde tahrik sistemleri, kâğıt ve paketleme makineleri ve halat tamburu gibi güçlü konstrüksiyonlarda, kavrama ve frenlerdir. Çizelge 4.4'de demir esaslı balata malzemesinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri görülmektedir (Topbaş, 1993: 261).

Çizelge 4.3. Kuru sürtünme için demir esaslı malzemeler (Topbaş, 1993: 256)

Ülke	Fe	Cu	Sn	Grafıt	Pb	SiO ₂	MoS ₂	Diğer
A.B.D.	60 67,5 60-77 80	- - - -	5 - - -	15 - 20-30 4	- - - -	- - - -	- - - 2	% 3 Bi, % 14 Mullit % 5 Si, % 7,5 Bi, % 20 Mullit % 3-10 Bi % 3 Al ₂ O ₃
Almanya	70-90	16	-	15-20	<5	-	-	Max. % 0,8 P
B.D.T.	60-72	<15	-	9	<13	3	-	BaSO ₄ , % 3 Asbest
İtalya	62	16	-	13,4	8	0,6	-	-

Çizelge 4.4. Demir esaslı sinter balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri (Topbaş, 1993: 261)

Kullanım Şartları	Baskı basıncı $p \leq 6$ MPa Kayma Hızı $v \leq 60$ m/s $p.v \leq 3$ kW/cm ²
Sürtünme Katsayısı (μ)	0,25.....0,65
Aşınma	$p.v=1,5 \dots 2,0$ kW/cm ² olan orta yüklerde, 0,5 cm ³ /kWh
Sıcaklığa Dayanım	Sürekli çalışmalarda max. 660 °C Kısa süreli çalışmalarda max. 880 °C
Özgül ağırlık	5.....7 g/cm ³
Isı İletim Katsayısı	1,2.....35 W/mK
Sertlik	15.....40 BSD

Seramik katkılı sinter balata malzemeleri

Daha yüksek güçler için, metalik olmayan katkı içeren metalik bağlantılı balata malzemeleri kullanılır. Metalik bileşenleri bakır alaşımları, demir ve demir alaşımları, metalik olmayanları ise tercihen oksitler (SiO_2 , Al_2O_3 veya mullit) ve silikatlardır. İlave katkı olarak düşük sıcaklıkta eriyen metaller, sülfür ve sülfat, karbür, grafit ve intermetalik fazlar kullanılabilir. Metalik olmayan miktar, hacim olarak % 50 veya daha fazla olabilir. Metal-seramik balata malzemelerinin sürtünme katsayısı 0,3-0,7 arasındadır. Bunlar, 1000 °C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Yüksek miktarda metalik olmayan komponent içermelerinden dolayı kırılırlar ve çok az dayanıma sahiptirler. Bu nedenle, düz bir metal üzerine pres edilirler ve balata taşıyıcıya perçinle bağlanırlar. Metal-seramik balata malzemeleri, çok fazla yüklenen kavrama ve frenlerde, özellikle hacim ve ağırlık problemi olan yerlerde kullanılır. Örnek olarak, uçakların yer frenleri, ağır taşıtlar, inşaat makineleri ve paletli taşıtlar için kavramalar söylenebilir (Topbaş, 1993: 261, 262).

4.6. Sinter Metalik Fren Balatalarının Üretimi

Sinter balata malzemelerinin üretimindeki farklı adımlar aşağıda sırasıyla açıklanmıştır (Angelo ve Subramanian, 2008: 215).

(i) Bileşenlerin Karıştırılması: Balata malzemesini oluşturan farklı bileşenlerden homojen bir karışım elde etmek için bileşenler çift konili karıştırıcılar içerisinde karıştırılır (Angelo ve Subramanian, 2008: 215).

(ii) Presleme: Tozların sıkıştırılma işlemi hidrolik presler kullanılarak yapılır. Sıkıştırma basıncı kullanılan tozların türü ve istenilen sıkıştırma sonu yoğunluğuna göre 165-276 MPa arasında değişir (Özsever, 1984: 701).

(iii) Sinterleme: Preslenmiş balatalar tutkal yardımı ile balata destek plakası ile birleştirirler. Fren balataları daha sonra boyanır ya da korozyonu önlemek için toz ile kaplanır. Kaplanmış balatalar daha sonra fırın içersinde dikey olarak dizilir ve koruyucu bir atmosfer altında yaklaşık 4-6 saat arasında sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Sinterleme sıcaklığı bakır matrisli malzemeler için 800 °C ve demir matrisli malzemeler için 1000 °C olarak seçilir. Parçalar fırından çıkarılmaya başlamadan önce yavaşça soğutulur (Angelo ve Subramanian, 2008: 215).

(iv) **İşleme:** Bu işlem paralel yüzeyler ve istenilen tolerans değerleri elde etmek için yapılır. Bunun yanı sıra delme ya da frezeleme işlemleri de yapılır. Son olarak parçaların yüzeyleri taşlanır (Angelo ve Subramanian, 2008: 215).

4.7. Disk ve Kampana Malzemesi

Disk ve kampana malzemesinin mekanik ve ısıl zorlamalara karşı dayanıklı olması istenir. Fren sistemlerinde, sürtünmeden dolayı kısa zamanda meydana gelen sıcaklık artışının en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılabilmesi için karşı malzemenin yüksek ısı iletim katsayısı ile özgül ısıya sahip olması gerekir (Gemelmayan, 1984). Bugünün fren diskleri çoğunlukla perlitik gri dökme demirden üretilir. Malzemenin ısıl çatlama davranışını geliştirmek ve abrazyon direncini artırmak için dökme demir içerisine az miktarda krom ve molibden ilave edilir. Malzeme içerisindeki yüksek karbon içeriği absorbe edilen ısı miktarını artırarak hızı geliştirir.

Yüksek performanslı taşıtların fren diskinden beklediği talepleri karşılamak için bu taşıtlarda kullanılacak yeni malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemeler SiC içeren bir matris ile karbon fiberin birleşmesinden oluşan C-SiC fren diskleridir. C-SiC fren disklerinin gri dökme demir disklerle karşılaştırıldığında gelişmiş abrazyon direnci (300.000 km üzeri servis ömrü), yaysız ağırlıkta azalma, yüksek sıcaklık rezilyansı ve krozyon direnci gibi avantajları bulunmaktadır. Ancak C-SiC disklerin üretiminin karmaşıklığından kaynaklanan yüksek fiyatları bu disklerin otomotiv piyasasında geniş kullanımını engellemektedir.

Fren kampana malzemesi olarak ise üretimi pahalı olmayan, bundan dolayı yaygın olarak kullanılmakta olan gri dökme demir kullanılır. Ağırlığın önemli olduğu durumlarda özel çözümler kullanılabilir. Örnek olarak;

➤ İki parçalı kompozit dökümler. Dış parça alüminyum alaşımından yapılır ve gri dökme demir halka sürtünme çiftine daha iyi uyumundan dolayı alüminyum dış parçanın içine monte edilir.

➤ Seramik ya da alüminyum oksit ile güçlendirilmiş alüminyum kampanalar.

Alüminyum fren kampana üretimi yapılmakta ancak alüminyum fren kampanalarının düşük sıcaklık rezilyansı bu kampanaların performanslarını ve uygulama genişliği yönünden sınırlamaktadır. Alüminyum fren kampanaları bundan dolayı ancak hafif taşıtların arka frenlerinde kullanılmak için uygundur (Breuer ve Bill, 2007: 99, 100).

4.8. Fren Sisteminde Sürtünme ve Aşınma

4.8.1. Sürtünme

Genel anlamda sürtünme, temasta olan ve izafi hareket yapan iki cismin yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı göstermiş oldukları dirençtir (Akkurt, 1990: 263). Katı cisimlerin sürtünmesini belirleyen temel deneysel yasalar bir hayli basittir. 1875 yılında Kolomb tarafından (çalışmalarının çoğu, Leonardo da Vinci ve Amontons tarafından daha önce yapılanları temel almaktadır) formüle edildiği için genellikle, Kolomb yasası olarak adlandırılmaktadır. Bu yasalar, çok genel terimlerle aşağıda gösterildiği biçimde açıklanabilir;

- 1- Statik sürtünme, kinetik (ya da dinamik) sürtünmeden daha büyük olabilir,
- 2- Sürtünme, kayma hızından bağımsızdır,
- 3- Sürtünme kuvveti, uygulanan yük ile doğru orantılıdır,
- 4- Sürtünme kuvveti, temas alanından bağımsızdır,

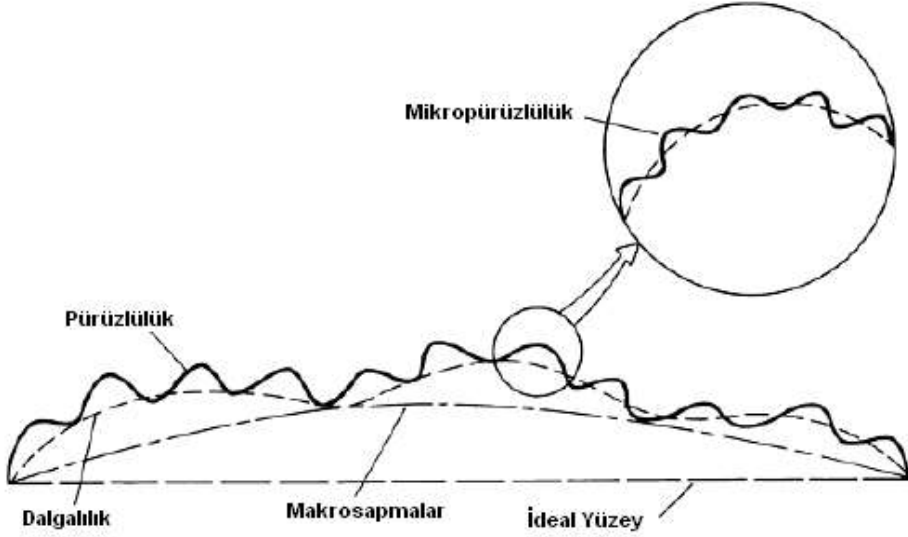
“Yasaların” çok genel bir yapıya sahip oldukları ve bundan ötürü de, pek çok durumda uygulanabilir olmalarına karşın, bazı durumlarda da geçerli olmadıkları dikkate alınmalıdır. Sürtünme yaygın olarak sürtünme katsayısı ile ifade edilir. Sürtünme katsayısı tanımlamak için genellikle μ , f sembolleri kullanılır. Sürtünme katsayısı Eş. 4.1’de ifade edildiği gibi yük (N) ile sürtünme kuvveti (f) arasındaki orandır;

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (4.1)$$

denklemleri ile ifade edilir (Larsen-Basse, 1992: 25).

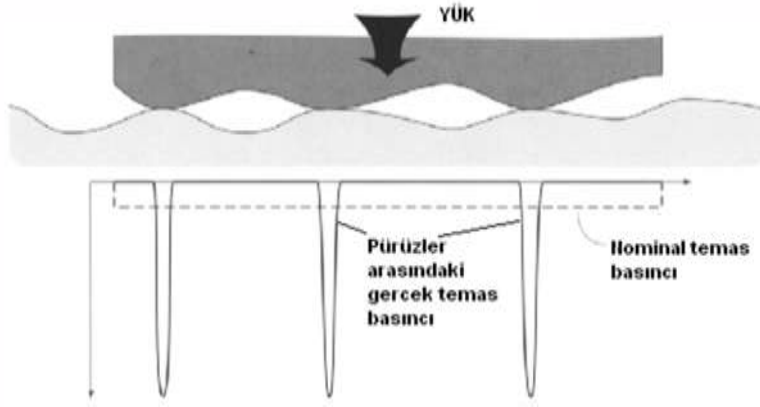
4.8.2. Sürtünmenin temel mekanizmaları

Malzeme yüzeyleri mikroskobik düzeyde tamamen düz değildir. Yüksek büyütmelerde en iyi parlatılmış yüzeylerde bile girinti, çıkıntı, dalgalanmalar, çukurlar ve pürüzler görülmektedir (Şekil 4.8).



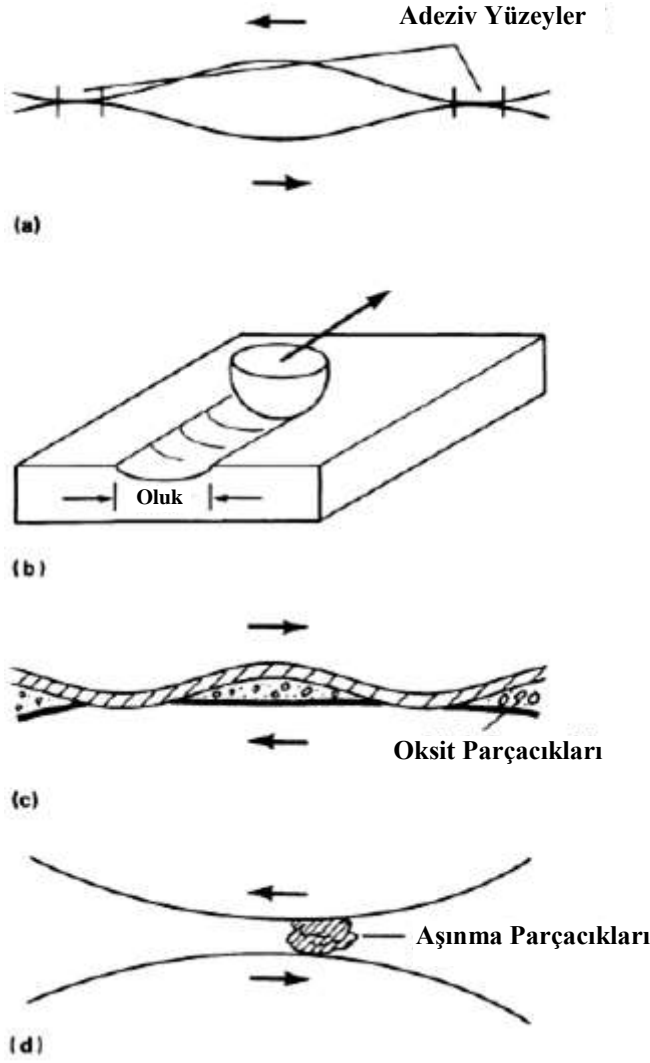
Şekil 4.8. İdeal bir yüzeye göre yüzey sapmalarının seçilmiş tipleri (Larsen-Basse, 1992: 28).

İki yüzey bir araya getirildiğinde, yüzeyler yalnızca bir miktar pürüzün uç kısımlarında birbirleriyle yakından temas etmektedir. Böylece temas alanı esasen çok küçük temas alanlarından meydana gelmektedir (Şekil 4.9). Bu küçük temas alanlarının toplamı (A_r) gerçek temas alanını oluşturmaktadır. Bu alan geometrik yüzey alanından (A) çok daha küçüktür (Akkurt, 1990: 265). Bu noktalardaki temas basıncı daha yumuşak malzemenin sertliğine yakın olabilir; ayrıca bu noktalarda birçok sayıda bölgesel çapta plastik deformasyon olabilir ve iki malzeme arasında oldukça güçlü soğuk kaynak bağı oluşur. Hareket başladığında bu bağlar sürtünme kuvveti tarafından kırılır ve bu durum sürtünmenin adhesiv bileşenini meydana getirmektedir (Larsen-Basse, 1992: 31).



Şekil 4.9. Pürüzler arasındaki temas gerilimi (Stachowiak, ve Batchelor, 2005: 476)

Bazı pürüzler diğer malzemenin yüzeyi boyunca dalıp eş malzemenin yüzeyinde kanallar açabilir ve bunun sonucunda ortaya çıkan plastik deformasyon ya da elastik histeriz de sürtünme kuvvetinin oluşmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca aşınma sonucunda oluşan ve kayma yüzeyi arasına sıkışıp kalan aşınma parçacıklarının yol açtığı aşınmadan dolayı bu durum sürtünme kuvveti için ek katkılar sağlayabilir. Sonuç olarak sürtünme bir sistem özelliği olarak düşünülür. Sürtünme temas halindeki iki yüzeyin doğasına, malzemelere, çevreye, uygulama koşullarına ve titreşim, gibi özelliklere bağlıdır. Sürtünmenin meydana gelmesinde, değişen derecelerde işe karışan mikroskobik mekanizmalar şöyle sıralanabilir; (1) adezyon, (2) yüzey pürüzlerinin mekanik etkileşimleri, (3) bir yüzeyin diğer yüzeyin pürüzleri tarafından kazınması, (4) oksit gibi yüzey katmanlarının kırılması ve/veya deformasyonu, ve (5) özellikle aşınmanın meydana getirdiği parçacıkların topaklanmasından oluşan, hareket eden yüzeyler arasında sıkışıp kalan üçüncü cisimlerin yüzey katmanları üzerinde yarattığı bölgesel plastik deformasyon ve/veya kırıklar (Şekil. 4.10) (Larsen-Basse, 1992: 30).



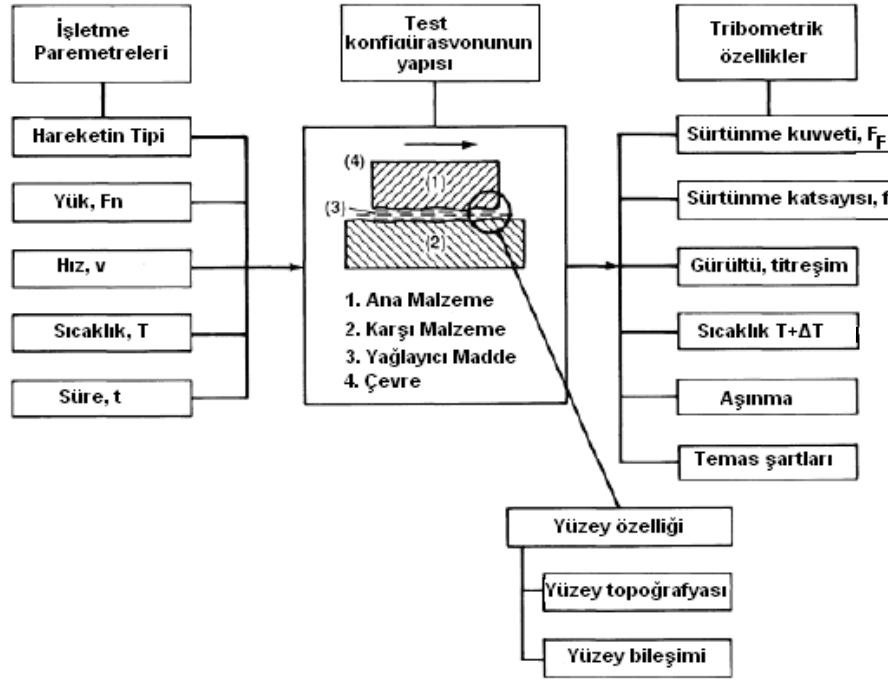
Şekil 4.10. Mikroskobik seviyede sürtünme oluşum mekanizmaları (Larsen-Basse, 1992: 30).

- a) Adezyon
- b) Kazıma
- c) Oksitlerin kırılması ve parçalanması
- d) Sıkışmış aşınma partikülü

4.8.3. Aşınma

Aşınma birbirlerine göre bağıl hareket yapan yüzeylerde malzemenin istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır. Bu şekilde, yüzeyler ilk şekillerini kaybederler; parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyonu normal şekilde yerine getiremezler. Bunun sonucunda makinenin hassasiyeti azalır, dinamik kuvvetler büyür gürültü ve titreşim meydana gelir, verim azalır (Akkurt, 1990: 276). Hemen hemen tüm makineler aşınma sebebiyle dayanıklılığını ve güvenilirliklerini kaybederler ve kullanım ömürleri azalır. Bu

nedenle aşınma kontrolü önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Aşınma bir sistem fonksiyonudur. Aşınma sıcaklık, yağlama, çalışma şartları, çevre, yüzey pürüzlülüğü, malzeme çifti v.b. unsurları içeren bir sisteme bağlıdır. Henüz aşınma önemli bir parametre olduğundan aşınma prosesini tanımlamak için yoğun çalışmalar devam etmektedir (Kato ve Adachi, 2000: 273).



Şekil 4.11. Bir tribolojik sistem ile ilgili parametreler ve temel özellikleri (Czichos, 1992: 481)

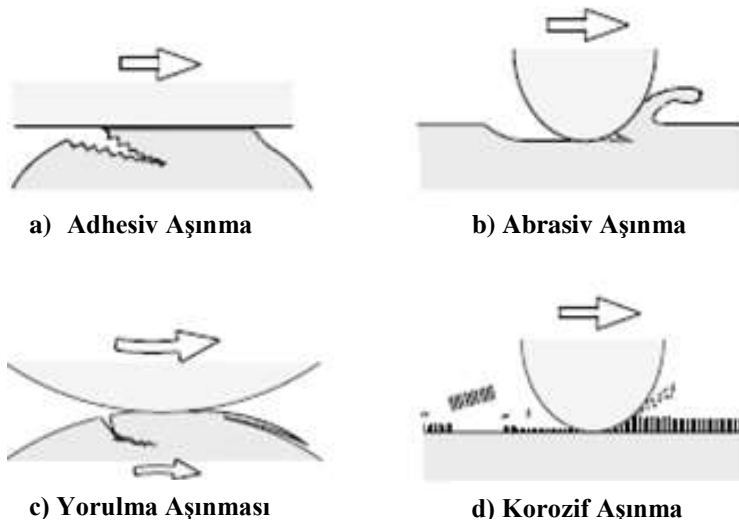
Aşınma türleri

Aşınma mekanizmaları genel olarak dört ana başlıkta incelenmektedir (Kato ve Adachi, 2000: 277).

1. Adhesiv Aşınma
2. Abrasiv Aşınma
3. Yorulma Aşınması
4. Koroziv Aşınma

Adhesiv ve abrasiv aşınma plastik temas altında oluşan aşınma modlarıdır. Benzer metaller arasında plastik temas durumunda, temas arayüzeyi adhesiv bağlanma gücüne sahiptir.

Malzemenin temas arayüzeyinde meydana gelecek hasar eğer ki güçlü adhezyon sonucu oluşuyorsa bu tür aşınma mekanizmasına adhesiv aşınma adı verilir. Sert ve keskin malzeme ile ona göre daha yumuşak sayılabilecek bir malzeme arasında meydana gelen plastik temas durumunda, sert olan malzeme daha yumuşak olan malzemeye batacağıdır. Malzemede oluşan çatlak pürüzlü malzeme tarafından mikro-kesme şeklinde oluştuğunda oluşan bu aşınma türü abrasiv aşınma olarak adlandırılır. Yorulma çatlakları oluşumu tekrarlı sürtünme çevriminde meydana gelmektedir. Aşınma yüzey hasarının yorulma mekanizması ile meydana geldiği bu aşınma türüne ise yorulma aşınması denmektedir. Korozif ortamdaki temas durumu, temas arayüzeyindeki tribokimyasal reaksiyonları hızlandırır. Korozif bir ortamda tribokimyasal reaksiyonların meydana getirdiği malzeme kaybı korozif aşınma olarak tanımlanmaktadır. Havada en baskın korozif madde oksijendir ve havada metallerin tribokimyasal aşınması oksidatif aşınma olarak adlandırılır. Bazı durumlarda termal gerilmenin neden olduğu yüzey çatlakları ya da sürtünme ısısının neden olduğu yüzey erimesi malzeme kaybına neden olur. Bu tür aşınma termal aşınma olarak adlandırılır. Geleneksel olarak kabul edilen temsili dört aşınma modu Şekil 4.12’de görülmektedir. Bu aşınma modları detaylı olarak aşağıda açıklanmaktadır (Kato ve Adachi, 2000: 277, 278).



Şekil 4.12. Dört temsili aşınma modunun şematik gösterimi (Kato ve Adachi, 2000: 278)

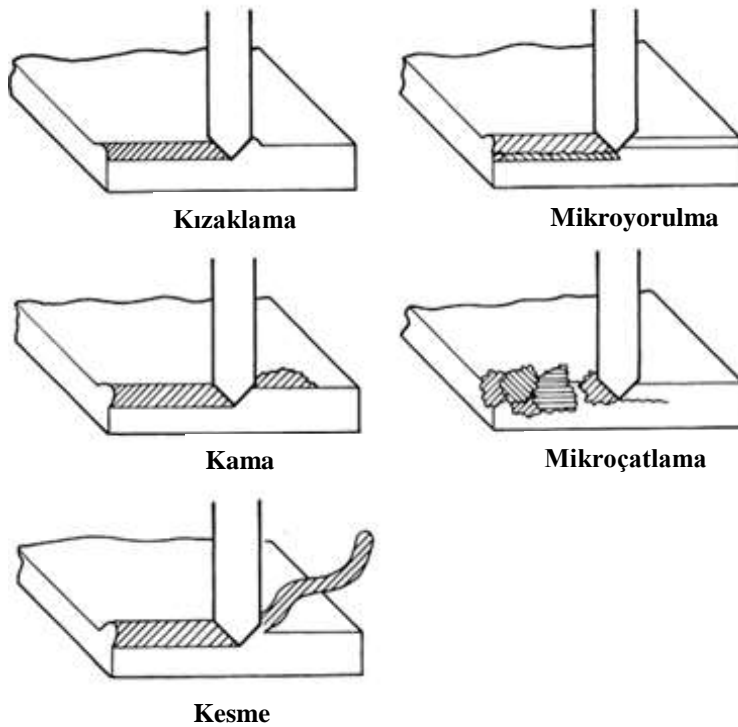
Adhesiv aşınma

Plastik temas altındaki iki yüzey arasındaki temas arayüzeyi bağıl hıza direnecek kadar güçlü adhesiv bağa sahipse, dislikasyonların neden olduğu büyük plastik deformasyon kayma ve basma altındaki temas bölgesinde ortaya çıkar. Temas bölgesinde böyle büyük

bir deformasyonun sonucunda, bir çatlak başlar ve birleşik kayma ve çekme modu oluşan çatlağın yayılmasını sağlar. Çatlak temas ara yüzeyine ulaştığında bir aşınma partikülü oluşur ve adhesiv transfer tamamlanır. Temas arayüzeyinde yeterince güçlü adhesiv bağ olduğunda oluşan aşınmanın bu tipi adhesiv aşınma olarak adlandırılır (Kato ve Adachi, 2000: 278, 279).

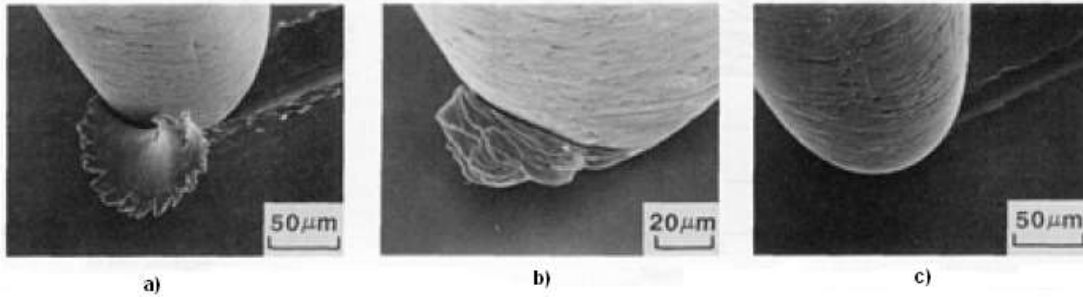
Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma katı bir cisim eşit ya da daha büyük sertliğe sahip bir malzeme partikülüne karşı yüklendiği zaman meydana gelir. Bu problemin yaygın bir örneği hafriyat makinelerinin üzerindeki keççelerin aşınmasıdır (Stachowiak, ve Batchelor, 2005: 501). Abrasiv aşınma esnasında bir yüzeyden malzemenin nasıl kaldırıldığını açıklamak için çeşitli mekanizmalar öne sürülmüştür. Bu mekanizmalar kırılma, yorulma ve erimeyi içermektedir. Abrasyon aşınmasının karmaşıklığı nedeniyle, hiçbir mekanizma tek başına tüm kayıptan sorumlu değildir. Şekil 4.13’de tek aşındırıcı bir ucun bir yüzeyi kat ettiği zaman olabilecek proseslerin bazıları görülmektedir. Bu prosesler kızaklama, kama oluşumu (wedge formation), kesme, mikroyorulma ve mikro çatlamaı içermektedir (Tylczak ve Oregon, 1992: 184).



Şekil 4.13. Abrasiv aşınmanın beş süreci (Tylczak ve Oregon, 1992: 185)

Kızaklama bir yivden kenarlarına malzeme çıkarma sürecidir. Bu olay hafif yükler altında oluşur ve herhangi bir gerçek malzeme kaybı ile sonuçlanmaz. Soğuk çalışma aracılığı ile dislokasyon birikmesi şeklinde yüzeye yakın yerlerde hasar oluşur. Bu soğuk çalışan yüzey üzerinde daha sonra çizikler meydana gelirse, bu ilave iş mikro yorulma boyunca kayıpla sonuçlanabilir. Temas ara yüzeyinin kesme dayanım oranı ana gövdenin kesme dayanımına göre yeterince yüksek bir seviyeye ulaştığında (0,5'den-1,0) kama abrasiv bir ucun önünde gelişmektedir. Pulluklanma aşındırıcı bir ucun önünde gelişebilir. Bu durumda, yivden çıkarılan toplam malzeme miktarı kenarlara çıkarılandan daha büyüktür. Bu pulluklanma oluşumu hala abrasiv aşınmanın hafif bir şeklidir. Sünek bir malzeme için aşınmanın en ağır şekli kesmedir. Kesme işlemi sırasında aşındırıcı uç takım makinelerinin yaptığı gibi bir talaş çıkartır. Bu olay malzeme çıkarılması ile sonuçlanır fakat yivin boyutuna göre çıkan malzeme çok az olmaktadır. Keskin bir aşındırıcı parçacık için kesmenin kızaklamaya dönüştüğü kritik bir açı vardır ve bu açı aşınmış olan malzemeye bağlıdır. Kritik açıya örnek olarak alüminyum için 85 ° bakır için de 45 ° arasında değişir. Sünek malzemeler için Şekil 4.14'de kızaklama, kesme ve pulluklanma mekanizmaları görülmektedir. Penetrasyon derecesi kızaklamadan pulluklaşma ve kesme ye geçişte kritik öneme sahiptir (Tylczak ve Oregon, 1992: 185).



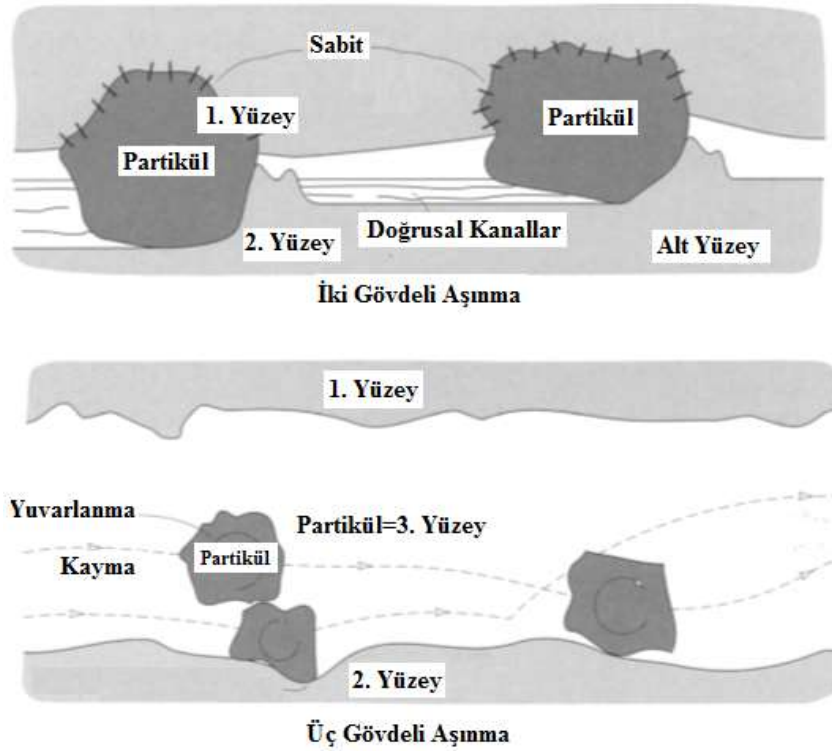
Şekil 4.14. Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak elde edilen abrasiv aşınmanın üç aşaması (Tylczak ve Oregon, 1992: 185)

- a) Kesme
- b) Pulluklanma oluşumu
- c) Kızaklama

Aşınmış yüzey üzerinden geçen partikülün yolu abrasiv aşınmasının doğasını belirler. Literatürde abrasiv aşınma;

- İki gövdeli;
- Üç gövdeli olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır (Stachowiak, ve Batchelor, 2005: 504).

İki gövdeli aşınmaya zımpara kâğıdının yüzey üzerindeki hareketi örnek olarak gösterilebilir. İki gövdeli aşınmada yüzey üzerindeki sert pürüzler yada yüzeye gömülmüş sabit partiküller kesici bir alet gibi yüzey üzerinde hareket ederler. Üç gövdeli abrasiv aşınmada ise aşınma partikülleri sabit olmadıklarından yüzey üzerinde serbest olarak hem kayarak hem de yuvarlanarak hareket ederler. Şekil 4.15’de iki ve üç gövdeli abrasiv aşınma şematik olarak gösterilmektedir (Stachowiak, ve Batchelor, 2005: 505).



Şekil 4.15. İki ve üç gövdeli abrasiv aşınma tipleri (Stachowiak, ve Batchelor, 2005: 505)

Yorulma aşınması

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Olay özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makine elamanlarında, yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması sonucudur. Bu elamanlarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde hertz yüzey basınçları meydana gelir. Bu çeşit basınçların hemen altında kayma gerilmeleri oluşur. Değişken zorlama nedeniyle malzemenin yüzeyinde bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislikasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde

küçük çukurcuklar meydana getirmektedir. Piting aşınmasının diğer bir açıklama tarzında ise, çukurcukların plastik deformasyon nedeniyle doğrudan doğruya temas yüzeyinde meydana geldiği ve buradan malzemenin iç kısımlarına da yayıldığı ileri sürülmektedir (Akkurt, 1990: 280, 281).

Korozif aşınma

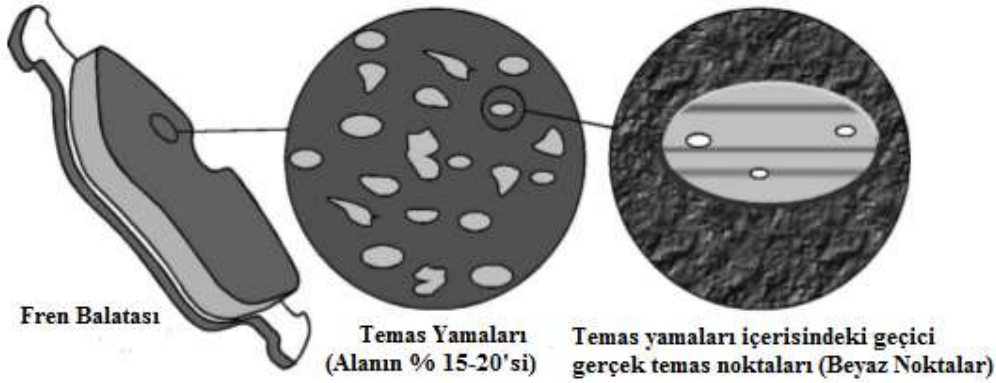
Korozif aşınma hem korozyon hem de aşınma mekanizmalarını içeren malzeme bozulması olarak tanımlanır. Aşınma ve korozyonun birlikte oluşturduğu etki her bir sürecin tek başına oluşturduğu toplam malzeme kaybından çok daha fazla malzeme kaybına neden olabilir. Bu durum iki süreç arasındaki sinerji göstermektedir. Adhesiv aşınmayı önlemede faydalı olan yüzey kimyasal reaksiyonları kontrolsüz olması durumunda ciddi miktarda taban malzeme kaybına neden olacaktır. Bir malzeme (metal) yüzeyi üzerinde bir film oluşturmak için korozyona uğrarsa ve aynı zamanda da kaymalı temas maruz kalırsa aşağıdaki dört süreçten birisi oluşabilir (Stachowiak ve Batchelor, 2005: 573).

- Korozyon ve aşınmanın oluşmasını engelleyecek güçlü bir yağlayıcı film oluşabilir.
- Kaymalı temas altında kısa bir ömre sahip zayıf bir film üretilebilir ve filmin düzenli olarak oluşumu ve bozulması nedeniyle yüksek oranda bir aşınma oluşabilir. Bu durumda sürtünme katsayısı düşük olabilir ya da olmayabilir.
- Koruyucu yüzey filmleri aşınabilir (örneğin piting tarafından) ve kalan filmler arasında galvanik bağlantı yapabilir ve taban zemin yüzey üzerindeki aşınmış alanın hızla korozyonuna neden olabilir.
- Koroziv ve aşınma süreci basit olarak bu iki prosesin toplamı olan malzeme kaybına neden olmak için bağımsız olarak hareket edebilirler (Stachowiak ve Batchelor, 2005: 573).

4.8.4. Frenlerde sürtünme mekanizması

Otomotiv fren sisteminin sürtünme davranışı balata ve disk sürtünme yüzeylerinin özellikleri tarafından belirlenir. Balata ve disk arasında meydana gelen sürtünme mekanizması çok karmaşık ve değişkendir. Bu neden ile sürtünme mekanizması hâlâ tam olarak anlaşılamamıştır (Eriksson ve Jacobson, 2000). Frenleme esnasında sürtünmedeki etkin mekanizma yerel sürtünme yüzey sıcaklığı, yerel sürtünme şiddeti, ısıl temas dirence

bağlı ısı ile meydana gelen deformasyon ve sürtünme esnasında kopan partiküllerdir (Boz, 2003). Sürtünme esnasında kopan partiküller ısı ve basıncın etkisi ile balata yüzeyinde belirli noktalarda birikerek yama adı verilen alanları oluşturur (Eriksson ve diğerleri, 2002).

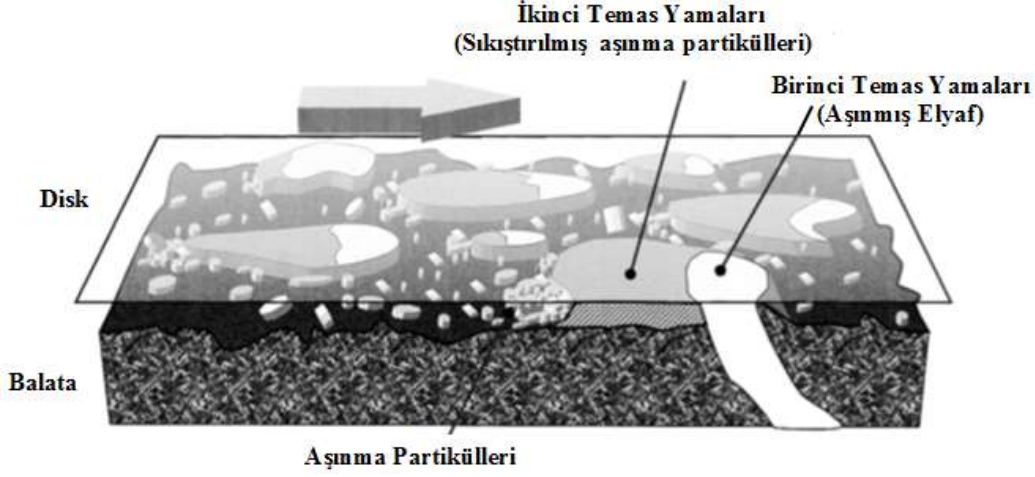


Şekil 4.16. Temas yamaları, temas yamaları içerisindeki gerçek temas alanları ve fren balatasının genel görüntüsü (Eriksson ve Jacobson, 2000)

Geleneksel balata malzemeleri göreceli olarak yumuşaktır. Buna rağmen balata yüzeyinin sınırlı bir kısmı disk ile temas halindedir. Temas halindeki bu gerçek temas alanları Şekil 4.16'da görüldüğü gibi balata yüzeyi üzerinde dağılmış olan temas yamaları içerisinde bulunurlar. Gerçek temas alanlarının büyüklükleri temas yamaları ile karşılaştırıldığında küçüktür ancak sürtünme yüzeyleri arasında oluşan sürtünme kuvveti gerçek temas alanları aracılığı ile iletilmektedir (Eriksson ve diğerleri, 2002).

Balata yüzeyinde oluşan temas yamaları birinci ve ikinci temas yaması olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Fren sürtünme elemanları (balata-disk veya balata-kampana) arasında sürtünme başladığında fren balatasının aşınmaya karşı dirençli ve mekanik olarak kararlı bileşenlerinin düşük aşınma oranları göstermesi nedeniyle ilk olarak birinci temas yamaları oluşur. İlk olarak oluşan bu temas yamaları ikinci temas yamaların büyüyebilmesi için çekirdeklenme noktaları oluşturur. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi aşınma esnasında oluşan aşınma partikülleri birinci temas yamalarına karşı birikir. Sürtünme arayüzeyinde oluşan normal basınç, kayma kuvveti ve sürtünme ısısı birinci temas yamalarının karşısında biriken aşınma partiküllerinin sıkıştırılması ve sinterlenmesine neden olur. Böylece birinci temas yamalarının karşısında ince ikinci temas yamaları oluşur (Eriksson ve Jacobson, 2000; Ostermeyer, 2001). Yapılan ölçümler oluşan ikinci temas yamalarının

ortalama sertlik değerinin balatanın sertlik değerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermiştir (Eriksson ve diğerleri, 2002).



Şekil 4.17. Fren diski ve fren balatası arasındaki temas durumunun şematik gösterimi (Eriksson ve Jacobson, 2000)

Oluşan ikinci temas yamaları oldukça uzun ömürlü olabilir. Ancak ikinci temas yamasının önünde biriktiği birinci temas yaması aşınır veya yok olursa ikinci temas yaması yok olur (Eriksson ve diğerleri, 2002). Ayrıca disk yüzeyinin pürüzlü yapısı da yamaların bozulmasını sağlayabilir. Bozulan yamalar ya diğer aşınma partikülleri ile birlikte temas bölgesine doğru akarak diğer yamalara dahil olurlar yada başka bir noktada yamaların oluşabilmesi için çekirdeklenme noktaları oluştururlar (Ostermeyer, 2001).

5. MATERYAL VE METOT

Bronz esaslı balata malzemesinin mekanik ve sürtünme-aşınma özellikleri üzerine uçucu kül, kolemanit, spinel oksit ve cam tozu gibi farklı bileşenlerin etkilerini ve bu bileşenlerin fren balata malzemeleri içerisindeki optimum miktarlarını belirlemek amacıyla Çizelge 5.1'de kütlece yüzde dağılımı verilen bronz esaslı balata malzemesi üretilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde üretilen bronz esaslı ana malzeme kısaltma amacıyla A harfi ile kodlanmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında, uçucu kül ve cam tozunun ayrı ayrı etkisini belirlemek için bronz esaslı ana malzeme içeresine kütlece % 2, % 4, % 6 ve % 8 oranlarında cam tozu ve kütlece % 2, % 4, % 6, % 8, % 10, % 12 oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Üretilen balata malzemeleri sürtünme-aşınma deneylerine tabi tutularak optimum uçucu kül ve cam tozu miktarları belirlenmiştir. Sürtünme-aşınma deneyleri sonucunda uçucu külün cam tozuna göre sürtünme-aşınma performansı açısından daha etkili ve ayrıca uçucu külün daha ucuz olduğu dikkate alınarak çalışmanın ilerleyen aşamalarında uçucu kül tercih edilmiştir. İkinci aşamada, en iyi sonucu veren miktarda uçucu kül takviyeli balata malzemesinin sürtünme-aşınma özellikleri üzerine kolemanit miktarının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla bir önceki aşamada optimum belirlenen oranda uçucu kül ile güçlendirilmiş bronz esaslı balata malzemesine kütlece farklı oranlarda kolemanit takviye edilmiştir. Üretilen bu yeni malzemelerin sürtünme-aşınma deneyleri yapılarak optimum oranda uçucu kül takviyeli balata malzemesi içeresine ilave edilebilecek optimum kolemanit miktarı belirlenmiştir. Üçüncü aşamada, birinci ve ikinci aşamada optimum belirlenen oranlarda uçucu kül ve kolemanit katkısı içeren bronz esaslı balata malzemesinin sürtünme-aşınma özellikleri üzerine spinel oksit miktarının etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla uçucu kül ve kolemanit miktarı sabit tutularak farklı oranlarda spinel oksit katkısı içeren balata malzemeleri üretilmiştir. Farklı oranlarda spinel oksit katkılı balata malzemelerinin sürtünme-aşınma deneyleri yapılarak optimum oranlarda uçucu kül ve kolemanit takviyesi içeren balata malzemesine ilave edilecek en uygun spinel oksit miktarları belirlenmiştir.

Tüm testler sonucunda Çizelge 5.1'de verilen kimyasal bileşime sahip bronz esaslı balata malzemesi içeresine ilave edilecek optimum miktardaki cam tozu, uçucu kül, kolemanit ve spinel oksit miktarları belirlenmiştir.

5.1. Fren Balata Malzemelerin Hazırlanması

Bronz esaslı balata malzemesinin üretimi için 80-10-10 (Cu-Sn-Pb) bronz tozu, demir tozu ve grafit tozu kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak uçucu kül, cam tozu, kolemanit ve spinel oksit tozu kullanılmıştır. Kullanılan hammaddelerin kimyasal, fiziksel özellikleri ve toz boyut analizleri Çizelge 5.2-5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.1. Bronz esaslı balata malzemesini oluşturan bileşenlerin kütlece yüzde dağılımı

Bronz (80-10-10) (%)	Demir (%)	Grafit (%)
86	11	3

5.1.1. Kullanılan hammaddeler

Bronz tozu

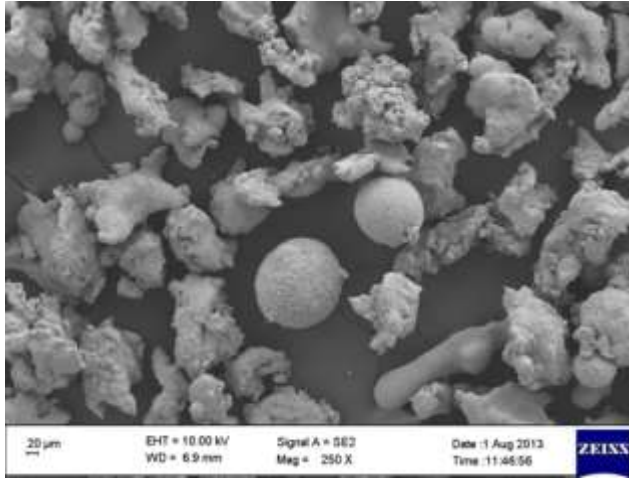
Çalışmada Gürel Makine'den temin edilen ve su atomizasyon yöntemi ile üretilmiş ön alaşımlı 91,87 µm ortalama toz boyutuna sahip 80-10-10 (Cu-Pb-Sn) bronz tozu kullanılmıştır. Bronz tozuna ait fiziksel özellikler Çizelge 5.2'de ve boyut analiz sonuçları Çizelge 5.3'de verilmiştir. Ayrıca bronz tozunun SEM görüntüsü Resim 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.2. Bronz tozuna ait fiziksel özellikler

Fiziksel Özellikleri	Test Sonuçları
Akıcılık	20 s/50 g
Görünür yoğunluk	4,3 g/cm ³
Hacim (Yığın) yoğunluğu	3 g/cm ³

Çizelge 5.3. Bronz tozunun boyut analizi

$d_{(0,1)}$	$d_{(0,5)}$	$d_{(0,9)}$
35,17 µm	91,87 µm	190,83 µm



Resim 5.1. Bronz tozunun SEM görüntüsü (X 250)

Demir Tozu

Çalışmada Höganäs firmasından temin edilen ve 94,08 µm ortalama toz boyutuna sahip NC 100.24 ticari isimli sünger demir tozu kullanılmıştır. Demir tozunun fiziksel özellikleri, toz boyut analizi ve kimyasal özellikleri Çizelge 5.4, 5.5 ve 5.6'da verilmiştir. Kullanılan demir tozunun farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri Resim 5.2'de gözenek yapısı da Resim 5.2.b'de görülmektedir.

Çizelge 5.4. NC 100.24 demir tozunun fiziksel özellikleri

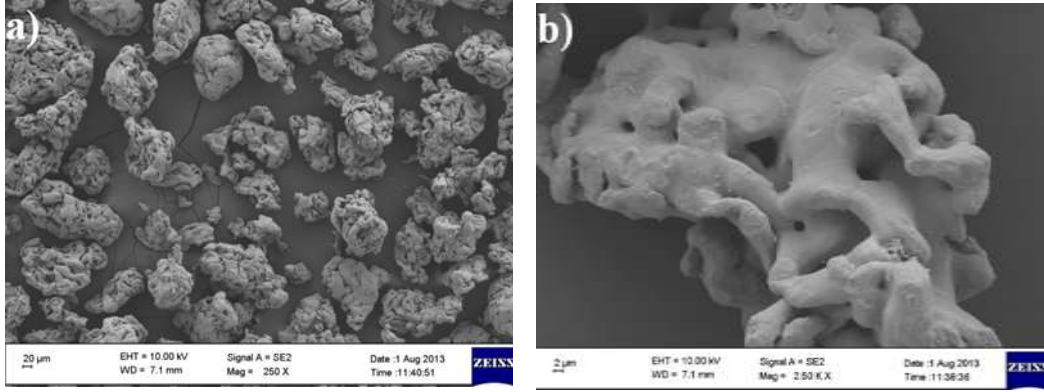
Fiziksel Özellikleri	Test Sonuçları
Görünür Yoğunluk	2,43 g/cm ³
Akıcılık	32 s /50 g

Çizelge 5.5. Demir tozunun boyut analizi

$d_{(0,1)}$	$d_{(0,5)}$	$d_{(0,9)}$
36,16 µm	94,08 µm	168,37 µm

Çizelge 5.6. NC 100.24 demir tozuna ait kimyasal özellikler

Kimyasal Analiz	Test Sonuçları
H ₂ Kaybı	% 0,15
C	Max % 0,02
Fe	Kalanı



Resim 5.2. Demir tozunun farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri
a) X 250 b) X 2500

Grafit tozu

Çalışmada Gürel Makine'den temin edilen ve 88,69 μm ortalama toz boyutuna sahip grafit tozu kullanılmıştır. Grafit tozunun kimyasal ve toz boyut analiz sonuçları Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Grafit tozunun kimyasal analizi

Kimyasal Analiz	Test Sonuçları
Karbon	>93 %
Ash	< 7 %
Nem	< 1 %

Çizelge 5.8. Grafit tozunun boyut analizi

$d_{(0,1)}$	$d_{(0,5)}$	$d_{(0,9)}$
16,23 μm	88,69 μm	206,53 μm

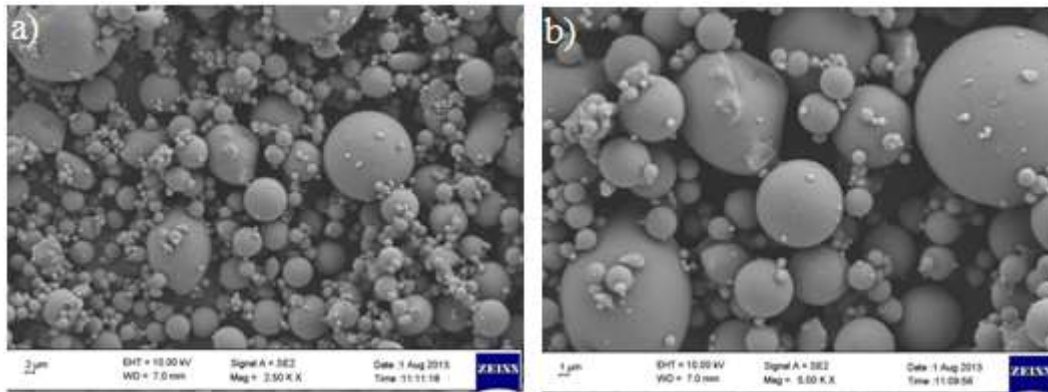
Uçucu kül

Uçucu kül termik santrallerde kömürün yakılması sonucunda ortaya çıkan atık bir üründür. Bu atık üründen tane boyutu küçük olan partiküller baca çekişi sayesinde taşınarak hava ile temas eder ve uçucu kül oluşur. Uçucu küller elektro filtreler yardımı ile ince taneli kalıntı olarak atmosfere atılmadan önce yanma gazlarından elde edilirler. Uçucu küllerin tane boyutu 1 ile 200 μm arasında değişir. Ancak; filtre arkasından alınan uçucu küllerin tane boyutları 1- 10 μm arasında değişir ve filtreden geçtikleri için tane boyutları birbirine çok

yakındır (Yakınlar, 2011; Aruntaş, 2006). Termik santralin 1 kWh'lik enerji üretiminde yaklaşık 110 g kül, atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden yılda yaklaşık 650,000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dolayısıyla bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda mali ve teknik sorunlar yaratabilmektedir (Görhan, Kahraman, Başpınar ve Demir, 2009). Türkiye'de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve ortalama 15 milyon uçucu kül üretilmektedir. Bu ise önemli derecede ekonomik ve çevresel problemler meydana getirmektedir. Uçucu küller endüstriyel atık olarak geri kazanılmaya elverişli bir malzeme olup değişik sektörlerde değerlendirme olanakları vardır (Mordoğan, İpekoğlu, Güler ve Güler, ve 2005).

ASTM C 618 standartına göre uçucu küller, F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70'den fazla olan ve CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılan küllerdir. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 50'den fazladır. CaO > %10 olduğu için de yüksek kireçli uçucu kül olarak adlandırılırlar (Görhan, Kahraman, Başpınar ve Demir, 2008).

Çalışmada İskenderun Sugözü Termik santralinden temin edilen ve 19,60 μm ortalama toz boyutuna sahip F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küllere ait farklı büyütmelelerde SEM görüntüleri Resim 5.3 görülmektedir.



Resim 5.3. Çalışmada kullanılan uçucu külün farklı büyütmelelerde SEM görüntüleri
a) X 2500 b) X 5000

SEM görüntülerinde uçucu külün tane boyutlarının birbirinden farklı ve tane yapısının küresel olduğu görülmektedir. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve toz boyut analiz sonuçları Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10'de verilmiştir.

Çizelge 5.9. Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal bileşimi

Bileşik	Kütlece (%)
SiO ₂	62,3
Al ₂ O ₃	20,1
Fe ₂ O ₃	7,93
MgO	1,33
TiO ₂	1,15
Na ₂ O	1,09
K ₂ O	2,03
CaO	2,42

Çizelge 5.10. Uçucu kül tozunun boyut analizi

d _(0,1)	d _(0,5)	d _(0,9)
3,63 µm	19,60 µm	76,25 µm

Kolemanit

Dünya rezervinin yaklaşık % 60'ına sahip olan Türkiye'nin en önemli yeraltı zenginliklerinden biri bor'dur (Gencel, Brostow, Özel ve Filiz, 2010). Kimyasal bileşimi Ca₂B₆O₁₁.5H₂O olan kolemanit bir kalsiyum bor mineralidir. Sertliği 4-4,5 özgül ağırlığı 2,42'dir (Sugözü, 2009). Boratlar çoğunlukla camlarda ve cam elyaf sektöründe kullanılmaktadır. Bor silikatlı cam üretiminde bor ilavesi mekanik dayanım ve termal şoklara direnci artırmaktadır (Mutlu, Sugözü ve Öner, 2009).

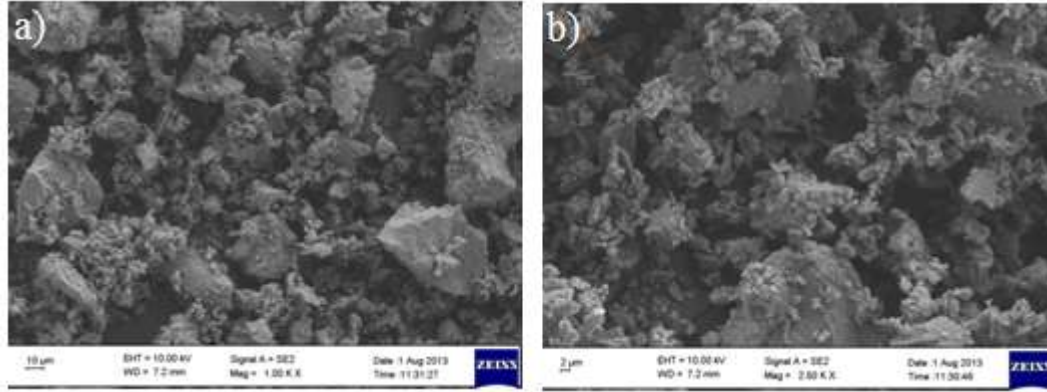
Bu çalışmada kullanılan ve 32,19 µm ortalama toz boyutuna sahip kolemanit Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Öğütülmüş kolemanitin kimyasal bileşimi ve toz boyut analizi Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12'de verilmiştir. Kolemanitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri Resim 6.4'de görülmektedir.

Çizelge 5.11. Çalışmada kullanılan kolemanitin kimyasal bileşimi

Bileşik	Değer (%)
B ₂ O ₃	40.00±0.5
CaO	27.00±1.00
SiO ₂	4.00-6.50
SO ₄	0,60 Max.
Fe ₂ O ₃	0.08 Max.
Al ₂ O ₃	0.40 Max.
MgO	3.00 Max.
SrO	1.50 Max.
Na ₂ O	0.35 Max.
Kızdırma Kaybı	24.60 Max.
Nem	1 Max.

Çizelge 5.12. Kolemanit tozunun boyut analizi

d _(0,1)	d _(0,5)	d _(0,9)
3,82 µm	32,19 µm	95,92 µm

Resim 5.4. Çalışmada kullanılan kolemanitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri
a) X 1000 b) X 2500

Spinel oksit

Spinel oksitler birbirine çok benzeyen yapılara sahip oksitler gurubudur. Tipik rengi kırmızı olmakla birlikte pembe ve yakut rengine de sahip olan bu taşların rapor edilen 100'e yakın çeşidi vardır. Fakat yalnızca bunların birkaç tanesi sıklıkla kullanılmaktadır. Ticari adı Spinel oksit olan malzeme, genel yapısı (RO.M₂O₃) olarak belirtilen spinellerden magnezyum alümina spinelidir. Kimyasal formülü MgAl₂O₄ olan bu spinel yüksek ergime noktası, düşük yoğunluğa sahiptir ve fiyatı oldukça ucuzdur (Korçak, 2005).

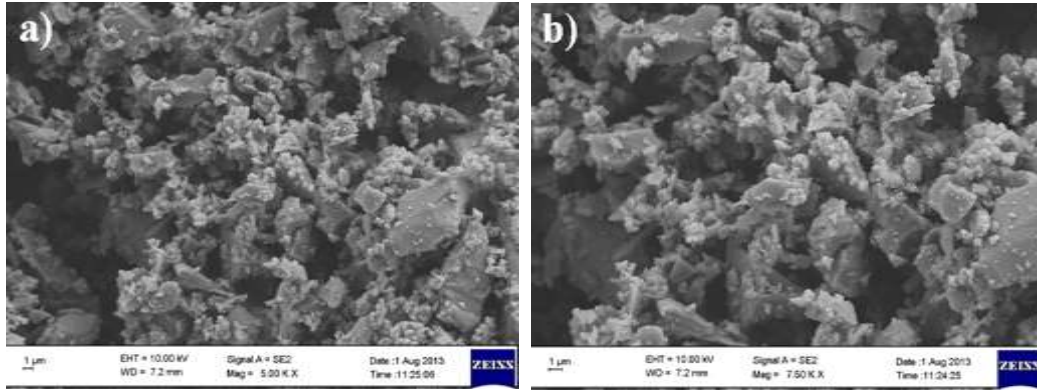
Çalışmada kullanılan 12,85 µm ortalama toz boyutuna sahip magnezyum alümina spinel oksit tozu Kütahya’da bulunan KÜMAŞ işletmelerinden temin edilmiştir. Magnezyum alümina spinelinin kimyasal bileşimi ve toz boyut analiz sonuçları Çizelge 5.13 ve Çizelge 5.14’de verilmiştir. Spinel oksitin SEM görüntüleri Resim 5.5’de görülmektedir.

Çizelge 5.13. Çalışmada kullanılan spinel oksitin kimyasal bileşimi (%)

Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	LOI
67,44	31,55	0,32	0,28	0,41	0.05

Çizelge 5.14. Spinel oksit tozunun boyut analizi

d _(0,1)	d _(0,5)	d _(0,9)
2,43 µm	12,85 µm	66,01 µm



Resim 5.5. Çalışmada kullanılan spinel oksit tozunun farklı büyütme seviyelerindeki SEM görüntüleri
a) X 5000 b) X 7500

Cam tozu

Cam, sert, katı, ergime noktası olmayan ve kristalizasyona engel olacak kadar yüksek viskoziteye sahip aşırı soğumuş sıvı olarak tanımlanabilir (Yalçın ve Gürü, 2002: 418).

Cam malzemeler, iyi kimyasal dayanımları, yüksek sertlikleri ve saydam olmalarından dolayı endüstrinin birçok alanında üstün bir malzeme olarak kullanılırlar. Camlar yüksek sıcaklıklarda da (teknik cam en az 400 °C, kuvars camı 1050 °C ye kadar) form dayanımı gösterir. Bundan dolayı, cam ürünleri özellikle kimya endüstrisinde, eczacılıkta, gıda

maddeleri endüstrisinde çokça kullanılır (Yalçın ve Gürü, 2002: 418). Doğal kaynakların tükendiği ve çevre kirliliğinin önemli boyutlara ulaştığı günümüzde, tüm atıkların geri kazanımında olduğu gibi cam geri kazanımı da önemli olmaktadır (Yahlizade, 2007).

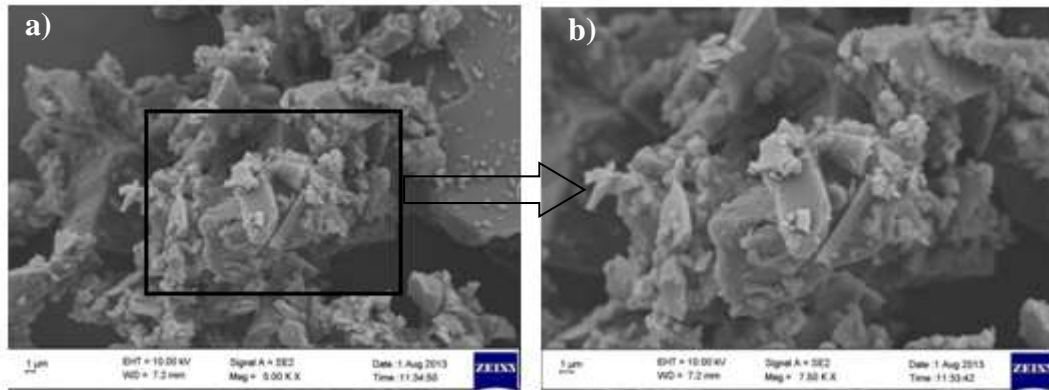
Bu çalışmada kullanılan ve 28,13 μm ortalama toz boyutuna sahip cam tozu, dış cephe cam kaplaması yapan bir firma olan KARSAN cam mozaik firmasından temin edilmiştir. Cam tozunun kimyasal bileşimi ve toz boyut analiz sonuçları Çizelge 5.15 ve Çizelge 5.16'da verilmiştir. Cam tozuna ait farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri ise Resim 5.6'da görülmektedir.

Çizelge 5.15. Çalışmada kullanılan cam tozunun kimyasal bileşimi

Bileşik	Ağırlık (%)
SiO ₂	73,8
CaO	12,5
Al ₂ O ₃	0,834
Fe ₂ O ₃	0,314
Na ₂ O	9,58
MgO	2,35

Çizelge 5.16. Cam tozunun boyut analizi

d _(0,1)	d _(0,5)	d _(0,9)
4,75 μm	28,13 μm	102,77 μm



Resim 5.6. Cam tozunun farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri
a) X5000 b) X7500

5.1.2. Tozların karıştırılması

Numunelerin hazırlanmasında ilk aşama matris ve takviye fazlarını oluşturan tozların ağırlık oranlarına göre tartılması ve ardından tartılan bu tozların karıştırılması işlemidir. Tozların tartı işlemleri belirlenen karışım oranlarına göre Sartorius marka 0,001 mg hassasiyetteki terazide yapılmıştır. Karıştırma işlemi Resim 5.7’de görülen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan ve üç boyutlu hareket edebilen Turbula-Model T2F marka karıştırıcı cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Homojen bir karışım elde edebilmek amacıyla tozlar Turbula’da, 60 1/min dönme hızında 90 dakika süre boyunca karıştırılmıştır.



Resim 5.7. Turbula toz karıştırıcı

5.1.3. Tozların sıcak preslenmesi

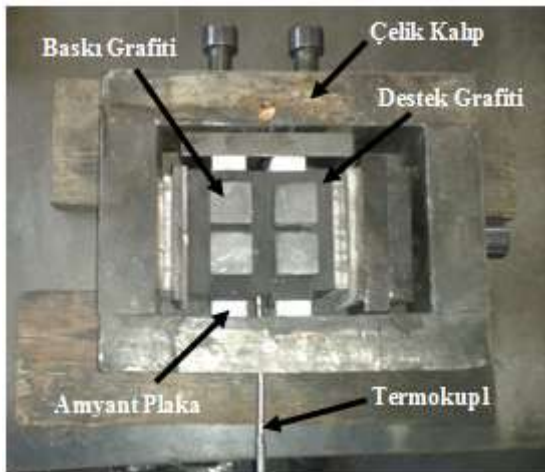
Sıcak presleme makinesi

Fren balata malzemelerinin üretiminde Resim 5.8’de görülen endüstriyel tip sıcak pres makinesi kullanılmıştır. Bu makinede basınç hidrolik bir ünite vasıtasıyla sağlanmaktadır.



Resim 5.8. Endüstriyel tip sıcak presleme cihazı

Uygun bileşenlerde hazırlanan karışım tozları Resim 5.9’da görülen grafit kalıplarda ısı ve basınç altında preslenmiştir. Presleme kalıbı; baskı, destek grafitleri, çelik kalıp, amyant plaka ve termokupl’dan oluşmaktadır.

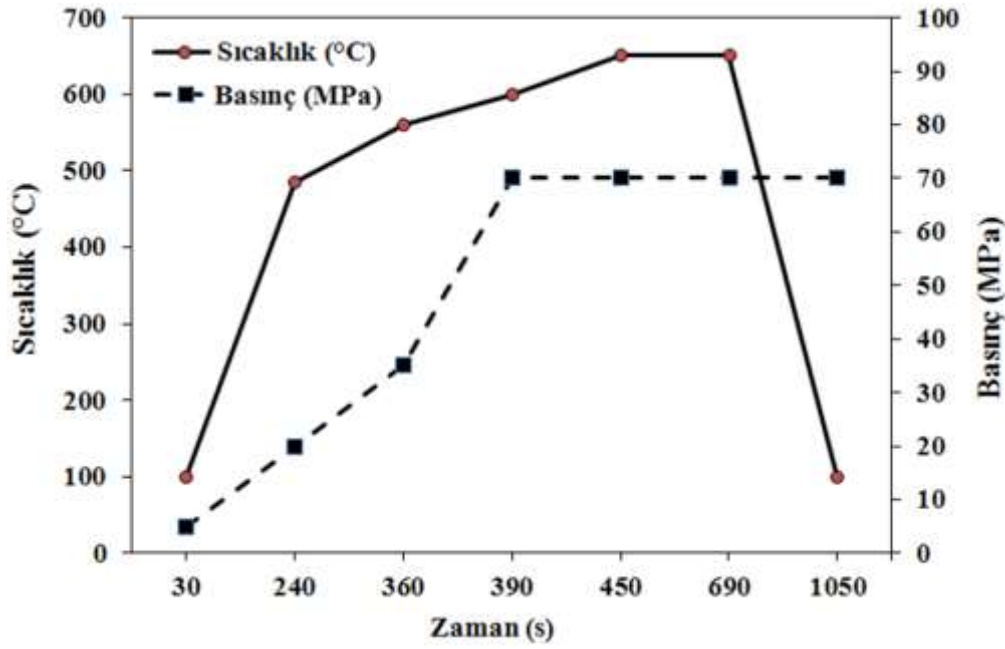


Resim 5.9. Toz presleme kalıbı

5.1.4. Sıcak presleme ve sinterleme işlemi

Fren balata malzeleri Resim 5.8’de görülen endüstriyel tip sıcak presleme cihazında ve Şekil 5.1’de verilen üretim parametrelerine göre üretilmiştir. Uygun oranlarda karıştırılan tozlar % 100 teorik yoğunluğa karşılık gelen ağırlıklarda tartıldı. Uygun ağırlıklarda

tartılan her bir toz karışımı Resim 5.9’da görülen toz presleme kalıbının her bir odacığına döküldü. Her bir odacık üst baskı grafitiyle kapatıldı. Hazırlanan grafit kalıp çelik bir çekirdek etrafındaki baskı vidaları ile sıkıştırıldı. Çelik çekirdek ile grafit kalıp arasına amyant plaka konularak kalıbın yalıtılması sağlandı. Sıcaklığın doğru olarak görülmesi için kalıp merkezindeki grafit parçaya 3,5 mm çapında delikten termokuplun ucu tam merkeze yerleştirildi. Bütün bu işlemlerden sonra sinterlenmeye hazır hale getirilen toz karışımı yüklenmiş grafit kalıp bloğu sıcak presleme ünitesine yerleştirildi. Toz karışımının birim alanı üzerine yaklaşık 5 MPa basınçtan başlayıp sıcaklık 650 °C ye ulaştığında basınç 70 MPa olacak şekilde baskı yapılarak sabit sıcaklık ve basınçta dört dakika bekletildi. Daha sonra ısıtma ünitesi devreden çıkarılarak numunelerin kalıp içerisinde 70 MPa basınçta oda sıcaklığına soğuyana kadar beklendi. Kalıp soğuduktan sonra çözülerek içindeki sinterlenmiş numuneler çıkartıldı.



Şekil 5.1. Presleme sıcaklığı ve basıncının zamana bağlı değişimi

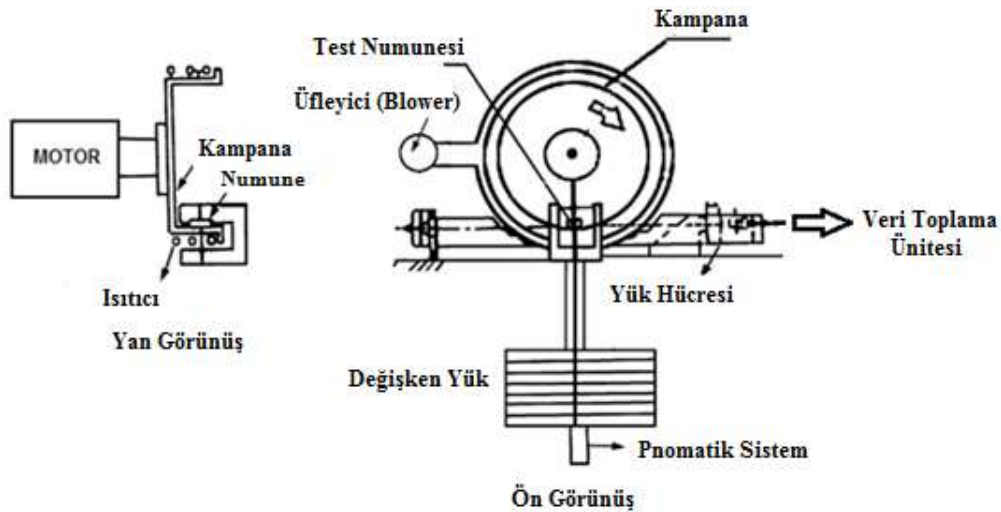
5.2. Deney Ekipmanı ve Test Şartları

Üretilen fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma deneyleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji Malzeme Mühendisliğinde bulunan Chase tipi sürtünme-aşınma test cihazında yapılmıştır. Chase tipi sürtünme-aşınma test cihazı SAE J661 test standartına göre otomotiv fren sisteminde kullanılan balataların, kavrama balatalarının ve endüstriyel sürtünme malzemelerinin sürtünme karakteristiklerini belirlemek için

tasarlanmıştır (Resim 5.10). Ayrıca chase tipi sürtünme-aşınma test cihazı kalite kontrol, araştırma, geliştirme ve sertifikasyon tipi uygulamalar için de kullanılabilir. Sürtünme test cihazı numune tutucusu, 250 Hv sertlikte ve 280 mm çapında gri dökme demirden üretilmiş kampana ve kontrol ünitesi olmak üzere üç ana kısımdan oluşur. Test cihazında 25x25x7 mm boyutlarında test numunesi kullanılmaktadır. Numuneye uygulanan yük pömatik bir sistem tarafından sağlanmaktadır. Test boyunca kampana sıcaklığı, kampananın dış çevresine yerleştirilmiş rezistanslar ve hava soğutma sistemi tarafından otomatik olarak kontrol edilmektedir (Şekil 5.2).



Resim 5.10. Chase tipi sürtünme aşınma test cihazı



Şekil 5.2. Chase tipi sürtünme-aşınma test cihazının şematik resmi

Sürtünme-aşınma testi Çizelge 5.17’de verilen ve SAE J661 test standardında belirtildiği gibi parlatma, düzenleme, I. ve II. alıştırma, I. ve II. yorma, I. ve II. toparlanma ve aşınma süreçlerinden oluşmaktadır.

Çizelge 5.17. SAE J661 test standardı

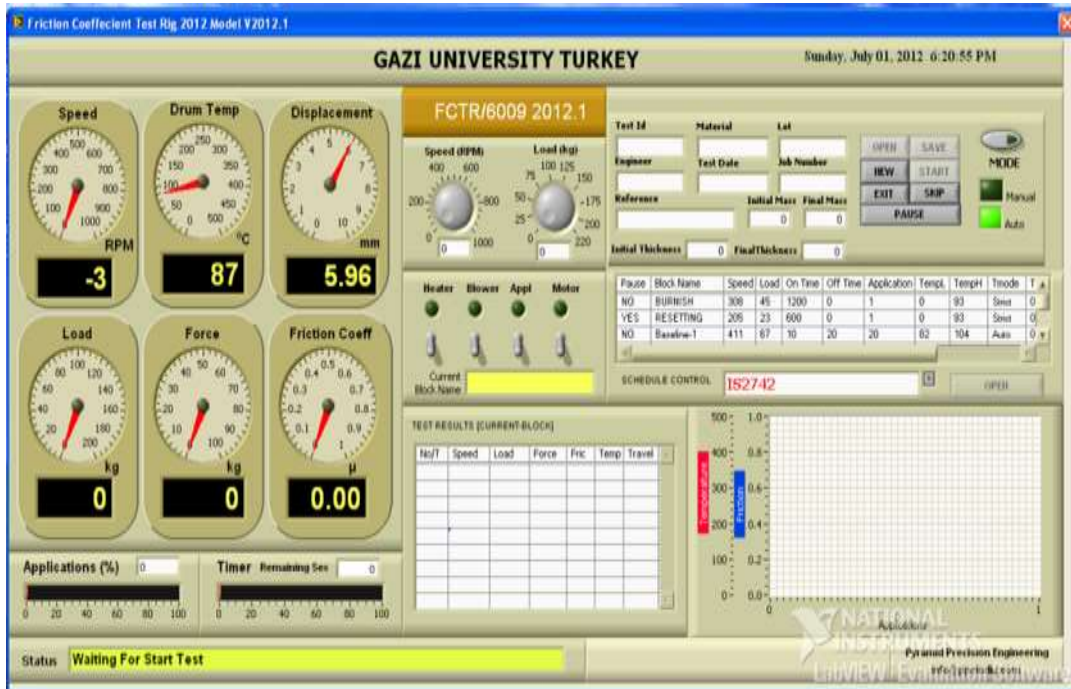
İşlem Basamakları	Hız (1/min)	Yük (N)	Sürtünme (s)	Bekleme (s)	Uygulama Sayısı	Sıcaklık (°C)		
						Min	Max	Artış
Parlatma	308	450	1200	0	1	-	93	0
Düzenleme	205	230	300	0	1	-	93	0
I. Alıştırma	411	670	10	20	20	82	104	0
I. Yorma	411	670	600	0	1	93	289	28
I.Toparlanma	411	670	10	0	4	261	93	56
Aşınma	411	670	20	10	100	193	205	0
II. Yorma	411	670	600	0	1	93	345	28
II.Toparlanma	411	670	10	0	5	317	93	56
II.Alıştırma	411	670	10	20	20	82	104	0

Parlatma aşamasında fren balata malzemesi yüzeyinin yüzde 95’i kampana yüzeyine temas edinceye kadar 308 1/min kampana hızı ve 450 N yük altında 20 dakika, düzenleme aşamasında ise 205 1/min kampana hızı ve 82-93 °C kampana sıcaklığında 230 N yük altında 5 dakika boyunca kampanaya karşı çalıştırıldı. Testin I ve II. alıştırma aşamasında fren balata malzemeleri 670 N yük altında, 411 1/min kampana hızı ve 82-104 °C kampana sıcaklığında 10 saniye boyunca kampanaya karşı çalıştırılmakta ve ardından yük kaldırılarak 20 saniye boyunca balata-kampana teması kesilmektedir. Bu işlemin 20 defa tekrar edilmesi ile testin bu aşaması tamamlandı. Birinci yorma aşamasında 411 1/min kampana hızı, 670 N yük altında 93-289 °C kampana sıcaklığında ikinci yorma aşamasında ise 93-345 °C kampana sıcaklığında fren balata malzemesi kampanaya karşı çalıştırılarak sürtünme arayüzey sıcaklığının sürtünme katsayısı üzerine etkisi belirlendi. Testin birinci toparlanma aşamasında fren kampana sıcaklığı sırası ile 261, 205, 149 ve 93 °C’ye ikinci toparlanma aşamasında ise 317, 261, 205, 149 ve 93 °C sıcaklığa soğutulmakta ve her bir sıcaklık değerinde fren balata malzemesi 411 1/min kampana hızı ve 670 N yük altında 10 saniye boyunca kampana’ya karşı çalıştırılmakta ve bu sıcaklık değerlerindeki sürtünme katsayısı değerleri tespit edilmektedir. Testin aşınma aşamasında ise fren balata malzemeleri 670 N yük altında ve 411 1/min kampana hızı ve 193-204 °C kampana sıcaklığında, 20 saniye boyunca kampanaya karşı çalıştırıldı ve ardından yükünün kaldırılması ile 10 saniye boyunca balata-kampana teması kesildi. Bu işlemin 100 defa

tekrar edilmesi ile testin bu aşaması tamamlandı. Ağırlık kaybı ise parlatma aşamasından ve II. alıştırma aşamasından sonra kütle farkının ölçülmesi ile hesaplandı.

5.2.1. Bilgisayar programı

Chase tipi sürtünme-aşınma test cihazının kontrol panelinde bulunan test adı ve test standartı seçilerek başlat düğmesine basıldıktan sonra test cihazı Çizelge 5.17'de görülen basamaklara göre otomatik olarak teste başlamaktadır. Her bir deney aşamasını tamamladıktan sonra test cihazı diğer adıma otomatik olarak geçmektedir. Chase tipi sürtünme-aşınma test cihazının Şekil 5.3'de görülen kontrol paneli üzerinde kampana hızı, kampana sıcaklığı, normal yük, sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti ve test boyunca numune boyutundaki değişimler anlık olarak görülebilmektedir. Deney esnasında bilgisayara aktarılan anlık veriler grafiklere dönüştürülmektedir. Otomatik olarak çizilen grafikler test tamamlandıktan sonra masaüstünde bulunan rapor simgesi tıklanarak pdf dosyası olarak alınmaktadır.



Şekil 5.3. Chase tipi sürtünme-aşınma test cihazı kontrol paneli

5.3. Yoğunluk Ölçümü

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen malzemelerin yoğunlukları ölçülmüştür. Malzemelerin yoğunluk ölçümleri Sartorius marka 0,0001 g hassasiyette ölçüm yapabilen dijital terazide Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk değerleri Eş. 6.1 'de verilen formül kullanılarak belirlenmiştir.

$$\rho = \frac{W_{hava}}{W_{su}} \quad (6.1)$$

W_{hava} : Numunenin havadaki ağırlığı

W_{su} : Numunenin su içindeki ağırlığı

ρ : Yoğunluk (g/cm^3)

5.4. Sertlik Ölçümü

Numunelerin sertlik ölçümleri Instron Wolpert marka GmbH Diastestor 7551 tipi sertlik ölçme cihazında Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Brinell sertlik ölçme yöntemi 2,5 mm bilya çapı ve 31,25 kg kuvvet kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yük numelere 30 s boyunca uygulanmıştır. Her bir numuneden en az beş ölçüm değeri alınmış ve alınan bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır.

5.5. Toz Boyut Analizi

Balata malzemelerinin üretiminde kullanılan tozların parçacık boyut analizi Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Toz Metalürji Laboratuvarı'nda bulunan Master Sizer X Ver.1.2b kodlu Laser parçacık boyut analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır.

5.6. Metalografik Çalışmalar

Üretilen kompozit malzemeler metalografik numune hazırlama teknikleri ile sırasıyla 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh'lik su zımparası kullanılarak kaba ve ince olarak zımparalanmıştır. Daha sonra yine sırasıyla 6 μm ve 1 μm 'luk keçe ve elmas

solüsyon yardımıyla kaba ve ince olarak parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Metalografik olarak hazırlanan yüzeyler daha sonra etanol ile temizlenmiş ve yüzeydeki kirlilikler giderildikten sonra SEM ile farklı büyütme oranlarında mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

5.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları

Numunelerin mikro yapılarını incelemek ve aşınma testi sonrası aşınma yüzeyinde meydana gelen değişimleri belirlemek için taramalı elektron mikroskopunda (SEM) fotoğraflar çekilmiş ve EDS analizleri yapılmıştır. Bu incelemeler Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezinde yer alan Zeiss/Supra marka Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) cihazında gerçekleştirilmiştir (Resim 5.11). Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron (backscattered electron) ve X ışınları (EDX-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü bulunmaktadır. Cihaz görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri ile kalitatif ve kantitatif analizler yapabilmektedir.



Resim 5.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

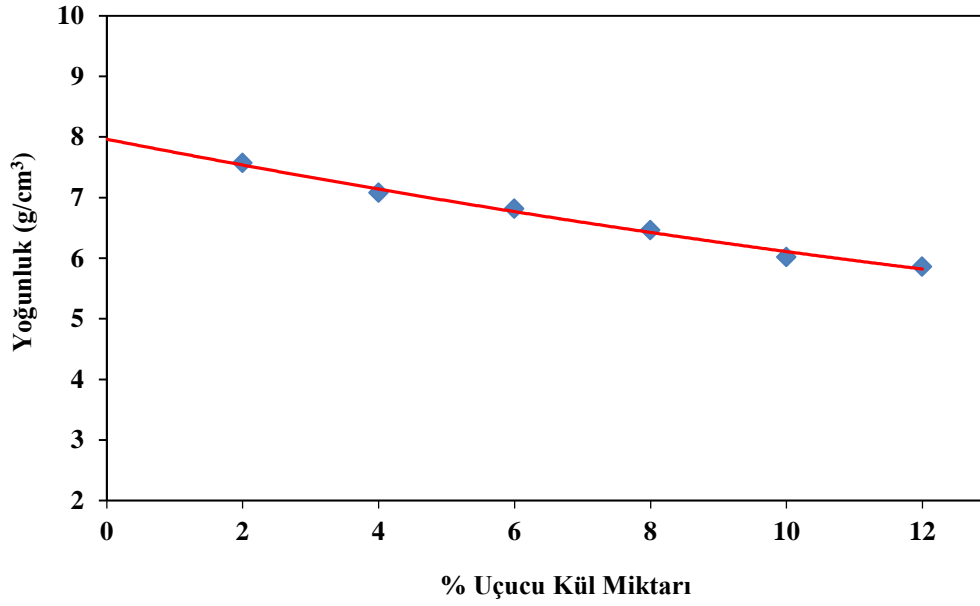
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Uçucu Külün Etkisi

Uçucu kül günümüzdeki ticari fren balatalarının birçoğunda kullanılmakta olan SiO_2 , Al_2O_3 , CaSO_4 ve yanmamış karbon içeren bir karışım olup, düzgün fiziksel ve mühendislik özelliklere sahip ince büyüklükte partiküllerden oluşmaktadır. Ayrıca uçucu kül günümüzdeki fren balatalarında kullanılan malzemelerle karşılaştırıldığında % 2-3 oranında daha düşük özgül ağırlığa sahiptir. Uçucu kül partikülleri genellikle $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşmakta ve bundan dolayı fren balata malzemelerinden istenilen bir özellik de olan artan sıcaklıklarda kararlı yapı sağlamaktadır (Mohanty ve Chugh, 2007; Dadkar, Tomar ve Satapathy, 2009). Literatürde ifade edilen özellikleri nedeniyle uçucu külün fren balata uygulamalarında kullanılması durumunda balata malzemelerinin fren performans özelliklerini olumlu yönde geliştireceği düşünülmüştür. Bu nedenle bronz esaslı fren balata malzemesinin frenleme performansı üzerine uçucu külün etkisini belirlemek amacıyla ilk aşamada sıcak presleme yöntemi ile Çizelge 5.1.'de kimyasal bileşimi verilen bronz esaslı fren balata malzemesi üretilmiştir. İkinci aşamada ise bronz esaslı ana malzeme içerisine farklı oranlarda (% 2, % 4, % 6, % 8, % 10, % 12) uçucu kül partikülü ilave edilerek yeni fren balata malzemeleri üretilmiştir. Üretilen bronz esaslı ve uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin yoğunluk, sertlik, sürtünme-aşınma performansı ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca performans deneyleri sonucunda bronz esaslı balata malzemesi ile uçucu kül takviyeli balata malzemeleri içerisinde en iyi sonuçları gösteren malzemelerin mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. Yoğunluk değişimi

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda uçucu kül ilavesi ile hazırlanan balata numunelerinin sinterleme sonrası yoğunluk değerleri Şekil 6.1'de görülmektedir.

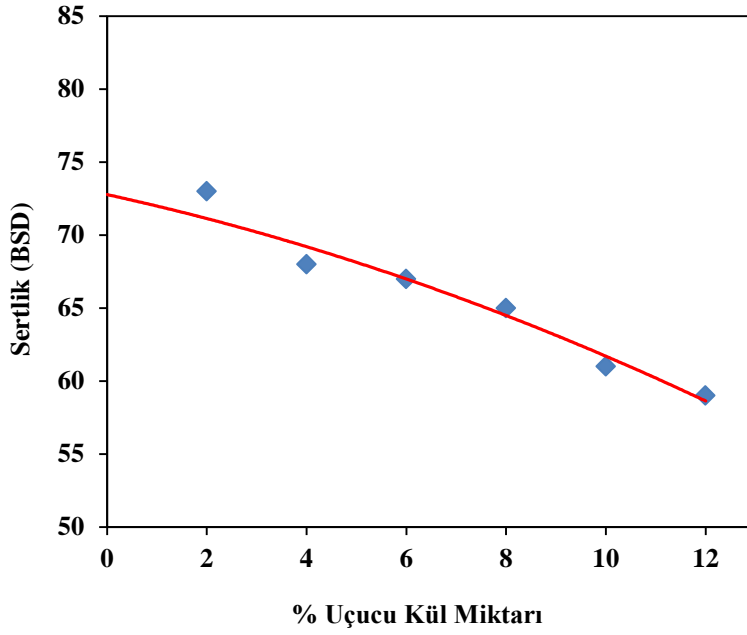


Şekil 6.1. Uçucu kül miktarının yoğunluk değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.1’de uçucu kül miktarının artması ile balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi uçucu kül takviyesiz bronz esaslı balata malzemesinin yoğunluğu $7,95 \text{ g/cm}^3$ iken, bu balata malzemesine % 12 uçucu kül ilave edildiğinde yoğunluk değerinin yaklaşık % 27 düştüğü belirlenmiştir. Artan uçucu kül miktarı ile yoğunluğun azalmasının nedenlerinden biri olarak artan uçucu kül miktarı ile matris/takviye ara yüzey alanının artması ve bunun da gözenekliliği artırması gösterilebilir. Ayrıca yoğunluk değerinin azalmasının diğer başka bir nedeni de; SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi bileşenlerden oluşan uçucu kül parçacıkların sertliğinden dolayı karışım tozunun sıkıştırmaya daha dirençli hale gelmesi ile sıkıştırılabilirliğin kötüleşmesi ve buna bağlı olarak da gözenek boyutunun artması gösterilebilir (Resim 6.14). Elde edilen sonuçların literatürde yapılan çalışma sonuçları ile uyum gösterdiği belirlenmiştir (Günay, 2009; Sai, Komaraiah ve Raju, 2008).

6.1.2. Sertlik değişimi

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda uçucu kül ilavesi ile hazırlanan numunelerin sertlik değerleri Şekil 6.2’de görülmektedir.

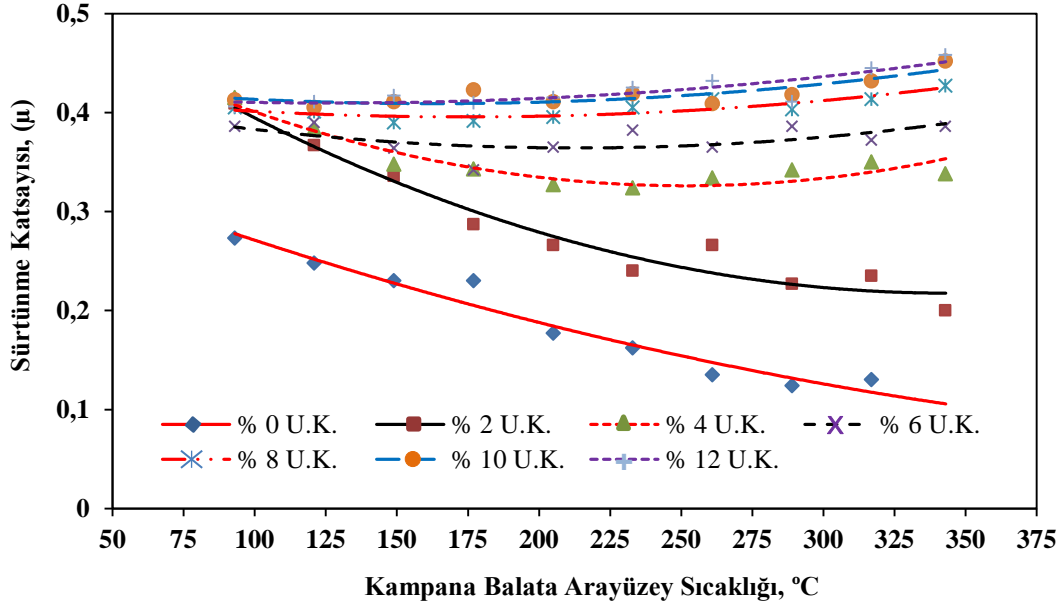


Şekil 6.2. Uçucu kül miktarının sertlik değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.2’de görüldüğü gibi artan uçucu kül miktarı ile balata malzemelerinin sertlik değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Uçucu kül takviyeli balata malzemeleri arasında en yüksek sertlik değeri 73 BSD ile % 2 uçucu kül takviyeli balata malzemesinde belirlenirken, en düşük sertlik değeri ise 59 BSD ile % 12 uçucu kül takviyeli balata malzemesinde belirlenmiştir. Artan uçucu kül miktarı ile sertlik değerindeki bu düşüşün nedeni artan uçucu kül miktarı ile gözenekliliğin artmasına atfedilmiştir (Resim 6.14). Araştırmacılar yaptıkları çalışmada Al-% 6 Mg alaşımli bir malzeme içerisinde artan uçucu kül miktarı ile sertlik değerinin azaldığını ve bu durumun da yoğunluktaki değişimden kaynaklandığı ifade etmişlerdir (Zahi ve Daub, 2010). Elde edilen bulguların Zahi ve Daub, (2010) tarafından elde edilen sonuçlar ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

6.1.3. Aşınma deney sonuçları

Aşınma genel olarak; sıcaklık, hız, çevre, uygulama yükü ve temas halindeki sürtünme yüzeyleri arasındaki etkileşimin doğasına bağlıdır (Öztürk ve Öztürk, 2011). Sürekli kayma koşullarında (Hız 411 1/min, yük 670 N) bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda uçucu kül ilavesi ile hazırlanan numunelerin sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 6.3’de görülmektedir.



Şekil 6.3. Arayüzey sıcaklığının ve uçucu kül yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Taşıtın durdurulması esnasında üretilen sürtünme ısı, sürtünme çiftinin arayüzey sıcaklığında önemli bir artışa neden olur. Sıcaklıktaki bu artış frenleme etkinliğinin kaybolmasına neden olan sürtünme katsayısında bir düşüşe neden olur. Artan sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısının düşmemesi balata malzemelerinin en önemli özelliklerinden birisi olarak değerlendirilir (Saffar, Shojaei ve Arjmand, 2010). Ayrıca balata malzemelerinden frenleme esnasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan arayüzey sıcaklığındaki artışa bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimin minimum seviyede olması istenir (Boz ve Kurt, 2006).

Şekil 6.3'de görüldüğü gibi artan kampana-balata arayüzey sıcaklığına bağlı olarak bronz matrisli ve % 2 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin sürtünme katsayılarının artan sıcaklığa bağlı olarak azaldığı, artan uçucu kül miktarı ile fren balata malzemelerinin sürtünme katsayılarının daha kararlı hale geldiği belirlenmiştir. Ayrıca kampana-balata arayüzey sıcaklığına bağlı en düşük ortalama sürtünme katsayısı değeri (0,190) uçucu kül takviyesiz bronz matrisli balata malzemesinde, en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri (0,423) ise % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinde belirlenmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi artan uçucu kül miktarı ile arayüzey sıcaklığına bağlı ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumun, sürtünme-aşınma esnasında kopan aşınma parçacıklarının sürtünme ısı ve temas basıncının etkisi ile sürtünme arayüzeyinde sert uçucu kül partiküllerinin etrafında yama oluşturmasından

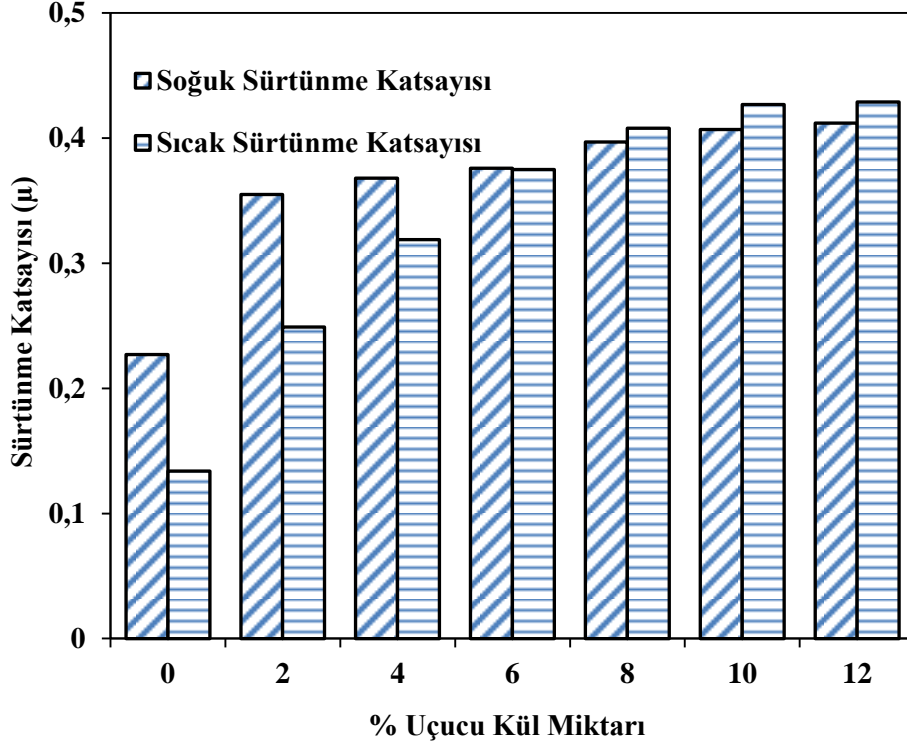
kaynaklandığı düşünülmektedir (Resim 6.4-6.6). Oluşan bu yamaların literatürde yüksek sertlik değerine sahip oldukları rapor edilmiştir (Ostermeyer, 2003). Uçucu kül partiküllerinin etrafında oluşan yamaların literatürde rapor edilen yüksek sertlikleri nedeniyle fren kampanasını aşındırdığı ve bu durumun da fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde, Cho, Kim, Kim ve Jang, (2005) kompozit malzemenin sürtünme katsayısının malzemeyi oluşturan bileşenlerin morfolojik ve sertlik özellikleri ile yakından ilişkili olduğunu yüksek sertliğe sahip içeriklerin karşı diske karşı aşındırıcı etkisinden dolayı sürtünme katsayısının artmasını sağladıklarını ifade etmişlerdir (Cho ve diğerleri, 2005).

Literatürde genellikle ticari fren balatalarının 0,3-0,6 aralığında bir sürtünme katsayısına sahip oldukları ve 0,3'ün altında sürtünme katsayısı sergileyen malzemelerin ticari fren balataları için kabul edilemez oldukları belirtilmektedir (Blau, 2001; Zhang ve Wang., 2007). Bu bilgiler ışığında % 4, % 6, % 8, % 10 ve % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin sırası ile 0,35; 0,37; 0,40; 0,419; 0,423 gibi 0,3'den daha yüksek sıcaklığa bağlı ortalama sürtünme katsayıları göstermeleri nedeni ile bu malzemelerin rahatlıkla fren balata malzemesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir.

Balata malzemesinin fren diski ile beraber çalışması esnasında sürtünme etkisi ile arayüzey sıcaklığı sürekli artış gösterir. Bu sıcaklığın etkisiyle balata malzemesinin yapısı ve sergilediği tribolojik özellikler de değişmektedir (Ertan ve Yavuz, 2010). Bu çalışmada, balataların sürtünme-aşınma test sonuçlarına göre belirli bir sıcaklığın üzerinde ölçülen sürtünme katsayıları sıcak, altındakiler de soğuk olarak isimlendirilmiştir. Buna göre II. yorma testi esnasında 93°C, 121°C, 149 °C, 205 °C sıcaklıklarda elde edilen sürtünme katsayılarının ortalamasına soğuk sürtünme katsayısı, I. toparlanma (149, 205 °C), II. yorma (345, 317, 289, 261, 233 °C) ve II. toparlanma (261, 205, 149 °C) testleri esnasında belirtilen sıcaklıklarda elde edilen sürtünme katsayılarının ortalaması da sıcak sürtünme katsayısı olarak isimlendirilmiştir. Şekil 6.4'de balata malzemelerinin soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının değişimi üzerine uçucu kül miktarının etkisi görülmektedir.

Şekil 6.4'de görüldüğü gibi en yüksek soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri (0,412-0,429) % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinde, buna karşın en düşük soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri (0,232-0,136) uçucu kül takviyesiz bronz esaslı balata malzemesinde belirlenmiştir. Artan uçucu kül miktarı ile fren balata malzemelerinin soğuk

ve sıcak sürtünme katsayılarının arttığı belirlenmiştir. Ancak % 10 ve % 12 uçucu kül takviyeli balata malzemelerin sıcak ve soğuk sürtünme katsayıları arasında belirgin bir fark görülmediğinden dolayı uçucu kül miktarı daha fazla arttırılmamıştır.

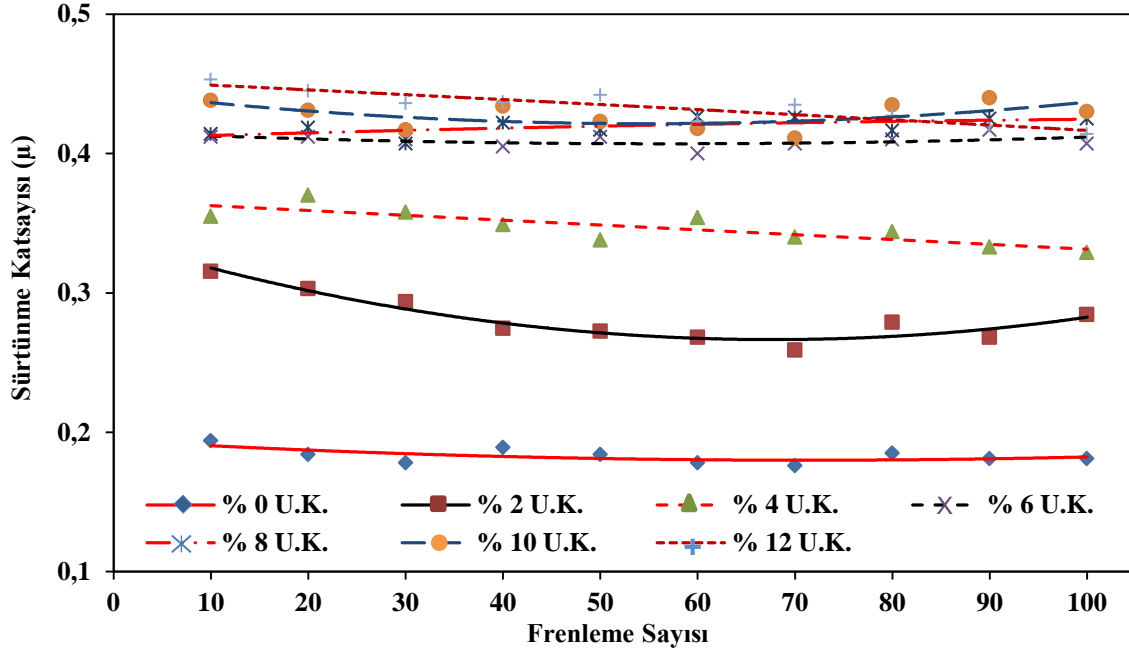


Şekil 6.4. Uçucu kül miktarının soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Ayrıca % 8, % 10 ve % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin sıcak sürtünme katsayılarının soğuk sürtünme katsayılarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum artan uçucu kül miktarı ile sürtünme arayüzeyinde büyüyen temas yamalarının varlığı ile açıklanabilir (Resim 6.5 ve 6.6). Artan uçucu kül miktarı ile ikinci temas yamalarının oluşması için daha fazla çekirdeklenme noktaları oluşmakta ve bu çekirdeklenme noktalarının etrafında artan sıcaklıkla beraber daha fazla sayıda ikinci temas yamaları oluşmakta ve büyümektedir. Aşınma yüzeyinde oluşan ve büyüyen bu temas yamaları artan sıcaklıkla fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin düşmesini engellediği düşünülmektedir.

Şekil 6.5’de bronz esaslı ve farklı oranlarda uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi frenleme sayısına bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,433) % 12

uçucu kül takviyeli fren balata malzemesi gösterirken en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,183) ise uçucu kül takviyesiz bronz esaslı balata malzemesi göstermiştir. Uçucu kül miktarının artması ile ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin düzgün bir şekilde arttığı görülmüştür.



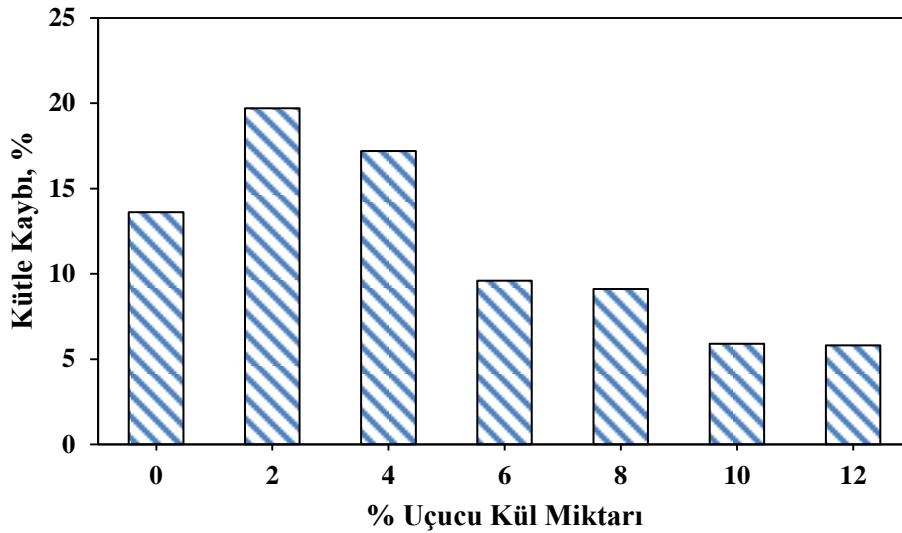
Şekil 6.5. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine uçucu kül miktarının etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.5’de fren balata malzemelerinin frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayılarında artma ve azalma şeklinde sürekli bir değişim görülmektedir. Eriksson ve diğerleri (2002) yaptıkları çalışmada temas yamaları içerisinde yoğunlaşmış olan gerçek temas alanlarının aşınma, deformasyon ve disk yüzey pürüzlülüğü nedeniyle sürekli olarak değiştiğini ve değişen bu yüzey özelliklerinin de sürtünme katsayısının sürekli olarak değişmesine neden olduğunu ifade etmişlerdir (Eriksson ve diğerleri, 2002). Elde edilen sonuçlarda frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayı değerlerindeki değişimin literatürle benzerlik gösterdiği Şekil 6.5’den tespit edilmiştir.

Bir fren sisteminde yer alan balata malzemesinin sergilediği sürtünme katsayısı değişimi, frenleme performansını değerlendirmek 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 (Ertan ve Yavuz, 2010).

Şekil 6.6'da bronz esaslı ve farklı oranlarda uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma sonrası kütle kaybı oranları görülmektedir. Aşınma sonrası en yüksek kütle kaybını kütlece % 19,7 ile % 2 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesi gösterirken en düşük kütle kaybını % 5,8 ile % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesi göstermiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan uçucu kül miktarı ile uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin kütle kayıplarının azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma direnci yönünden olumlu olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6.6. Uçucu kül miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

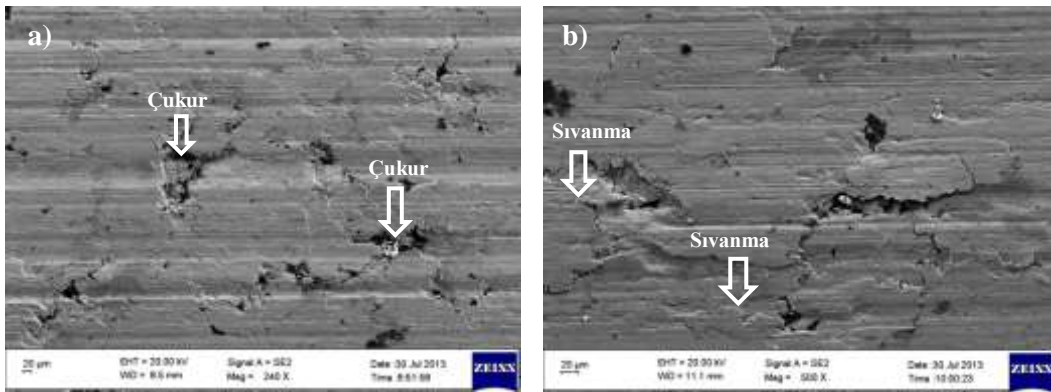
Ancak % 2 ve % 4 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin kütle kayıpları takviyesiz malzemeye göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum yetersiz takviye elemanına sahip fren balata malzemelerinin düşük yük taşıma yetenekleri nedeniyle takviye elemanlarının sürtünme-aşınma esnasında meydana gelen temas yüklerini taşıyamayarak kırılması veya matristen ayrılması sonucu üçüncü yüzey aşınması meydana getirerek kütle kaybının artmasına neden olması şeklinde açıklanabilir. Rohatgi, Guo, Huang ve Ray, (1997) yaptıkları çalışmada kütlece % 5 uçucu kül takviyeli malzemenin 8 N'dan daha büyük yüklerde uçucu kül partiküllerinin kırılması ve ana matristen ayrılması ile aşınma direncinin azaldığını ve ayrıca takviyesiz malzemeye göre daha yüksek kütle kaybı gösterebileceğini rapor etmişlerdir (Rohatgi ve diğerleri, 1997). Elde edilen sonuçlar

Rohatgi ve diğerkleri, (1997) tarafından yapılan çalışma sonuçları ile büyük bir uyum göstermiştir. % 2 uçucu külden sonra artan uçucu kül miktarı ile fren balata malzemelerinin yük taşıma kapasitelerinin artması ve aşınma yüzeylerinde yamaların (yüzey filmlerinin) oluşması ve büyümesi ile kütle kayıplarının azaldığı belirlenmiştir.

6.1.4. Aşınma yüzey analizi

Bronz esaslı ve farklı oranlarda uçucu kül takviyeli balata malzemelerinin SAE J661 test standardına göre yapılan sürtünme-aşınma deneyleri sonrası balata malzemelerinin aşınma yüzeyinde meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları Resim 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 ve 6.6'da görülmektedir.

Resim 6.1.a ve b'de bronz esaslı fren balata malzemesinin aşınma sonrası yüzeyinde meydana gelen değişimlerin SEM resimleri görülmektedir. Resim 6.1'deki bronz matrisli ana malzemenin aşınma yüzey resimleri incelendiğinde aşınma yüzeylerinde plastik deformasyon sonucu yüzeyden ince plakalar halinde malzemelerin kalktığı ve bunun sonucunda aşınma yüzeyi üzerinde çukurların oluştuğu görülmektedir (Resim 6.1.a). Aşınma sonrası yüzeyden plaka halinde kopan aşınma partiküllerinin ısı ve basınç etkisi ile tekrar aşınma yüzeyine sünek sıvanma şeklinde yapıştığı belirlenmiştir (Resim 6.1.b).

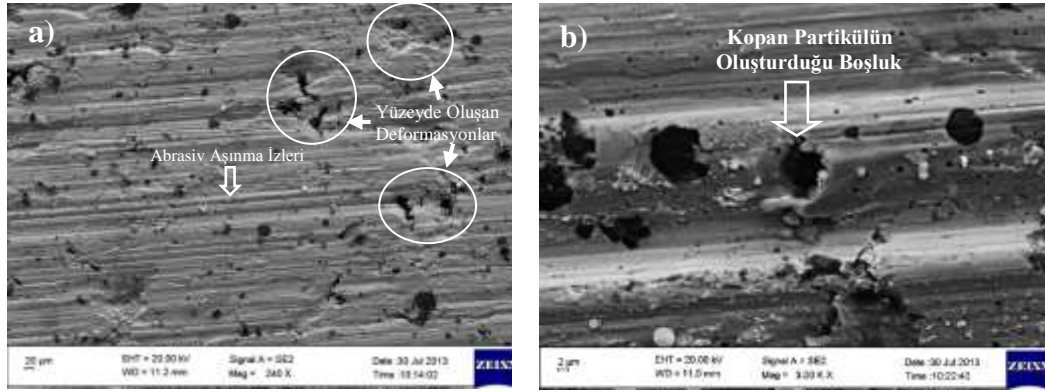


Resim 6.1. Bronz matrisli fren balata malzemesinin aşınma sonrası SEM resimleri
a) X240 b) X500

Bu sıvanma etkisinden dolayı fren balata malzemesinde düşük kütle kaybı meydana geldiği belirlenmiştir. Ping-ping, Hong-chao, Xiang ve Bai-yun (2007) yaptıkları çalışmada sert bir yüzeyin (kampana malzemesi) yumuşak bir yüzey üzerinde (bakır esaslı balata) kaydığında yumuşak yüzeyin belirli bir mesafe altında kayma yönüne paralel uzayan mikro

çatlakların oluştuğunu oluşan bu çatlakların belirli kritik bir büyüklüğe eriştiğinde yüzey ve çatlaklar arasında ince levhalar halinde malzeme kopmasının görüldüğünü ve buna bağlı olarak aşınma yüzeylerinde çukurların oluştuğunu rapor etmişlerdir (Ping-ping ve diğerleri, 2007). Bronz matrisli balata malzemesinin yüzeyinde meydana gelen aşınma mekanizmasının Ping-ping ve diğerleri, (2007) tarafından ifade edilen aşınma mekanizmasına benzer davranış gösterdiği belirlenmiştir.

Resim 6.2’de % 2 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma testi sonrası aşınma yüzeyinde meydana gelen değişimlerin SEM resimleri görülmektedir. SEM resimlerinde fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde çukurlar ve abrasiv aşınma çizgilerinin oluştuğu görülmektedir (Resim 6.2.a).

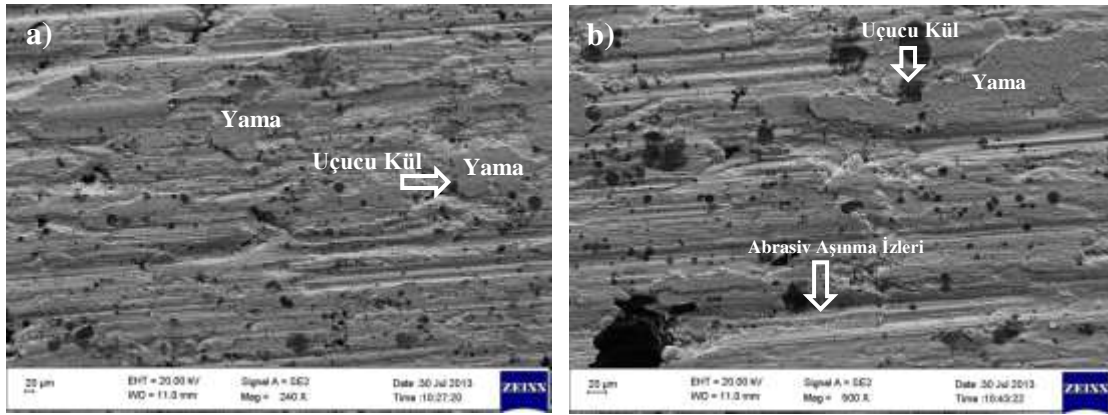


Resim 6.2. % 2 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma sonrası yüzeylerinin SEM resimleri a) X240 b) X3000

Fren balata malzemesi uçucu kül, bakır, kalay, kurşun, demir, grafit gibi birçok farklı bileşenden meydana gelmektedir. Uçucu külün aşınma direnci bileşiminde yüksek oranda SiO_2 , Al_2O_3 gibi seramik parçacıklar bulunması nedeni ile doğal olarak bakır, kalay, kurşun ve grafit gibi yumuşak bileşenlerden daha iyidir. Sürtünme esnasında balata malzemesinin yumuşak bileşenleri aşındıktan sonra yüzeye çıkan uçucu kül partiküllerinin fren balata malzemesi ile kampana arasındaki bağıl hareketi engelleyerek sürtünme katsayısının bronz matrisli ana malzemeye göre artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ancak balata içerisindeki uçucu kül partiküllerinin sürtünme esnasında arayüzeyde oluşan temas basıncını taşıyamayarak ana matristen ayrıldığı görülmektedir (Resim 6.2.b). Ana matristen kopan bu uçucu kül partiküllerinin aşınma yüzeyine paralel uzanan aşınma izleri oluşturduğu tespit edilmiştir (Resim 6.2.a). Oluşan bu aşınma izlerinin muhtemelen kopan uçucu kül partiküllerinin aşınma yüzeyinde kesme türü bir aşınma mekanizması

oluşturarak % 2 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin kütle kaybının bronz matrisli balata malzemesine göre daha yüksek olmasına neden olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında % 2 uçucu kül miktarının bronz matrisli balata malzemesi için yeterli takviye elamanı miktarı olmadığı sonucuna varılmıştır.

Resim 6.3.a ve b'de % 4 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma testi sonrası aşınma yüzeyinin SEM resimleri görülmektedir. Resim 6.3.a ve b'deki aşınma yüzeyleri incelendiğinde yüzey üzerinde abrasiv aşınma izlerinin yanı sıra uçucu kül partiküllerinin bir ucunda ince temas yamalarının olduğu görülmektedir. Fren balatası ile kampanası arasında sürtünme başladığında yumuşak fren balata malzemesi ile kampana arasında aşınma partikülleri oluşmaya başlar. Oluşan bu aşınma partikülleri aşınmaya karşı daha dirençli bileşen (uçucu kül) etrafında temas basıncı ve sürtünme yüzeyinde artan ısı etkisiyle mekanik alaşımlama işlemine maruz kalması sonucu temas yamalarına dönüşmektedir. Literatürde temas yamalarının oluşumu ile ilgili yapılan çalışmalarda benzer bulgulara ulaşılmıştır (Ostermeyer, 2003; Eriksson ve Jacobson, 2000).

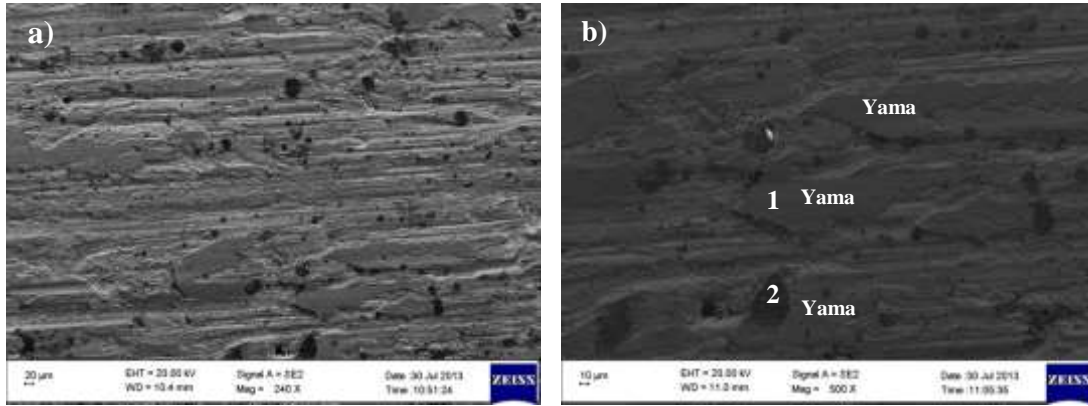


Resim 6.3. % 4 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma sonrası yüzeylerinin SEM resimleri
a) X240 b) X500

Literatürde oluşan bu yamaların oldukça sert olduğu ifade edilmektedir (Ostermeyer, 2003; Österle ve Urban, 2004; Eriksson ve diğerleri, 2002). Literatürde ifade edildiği gibi bu yamaların yüksek sertliğinden dolayı daha çok karşı malzemeyi aşındırması nedeniyle fren balata malzemesinin kütle kaybının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 6.6). Ancak % 4 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde oluşan abrasiv aşınma izleri ve bronz matrisli fren balata malzemesine göre daha fazla kütle kaybı göstermesi % 4 uçucu

külün, fren balata malzemesi için yeterli takviye elamanı miktarı olmadığı sonucuna varılmıştır.

Resim 6.4'de % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma testi sonrası aşınma yüzeyinin farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri görülmektedir. Resimlerde görüldüğü gibi artan uçucu kül miktarı ile aşınma yüzeyinde daha fazla sayıda yamanın oluştuğu görülmektedir. Resim 6.4.b'de % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyindeki yama üzerinden alınan ve 1 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analiz sonuçlarına göre bu noktanın ağırlıkça % 52,95 demir, % 26,78 bakır, % 2,61 kalay, % 1,48 kurşun, % 5,16 karbon, % 9,09 oksijen % 0,20 alüminyum ve % 1,69 silisyumdan oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.7.a).

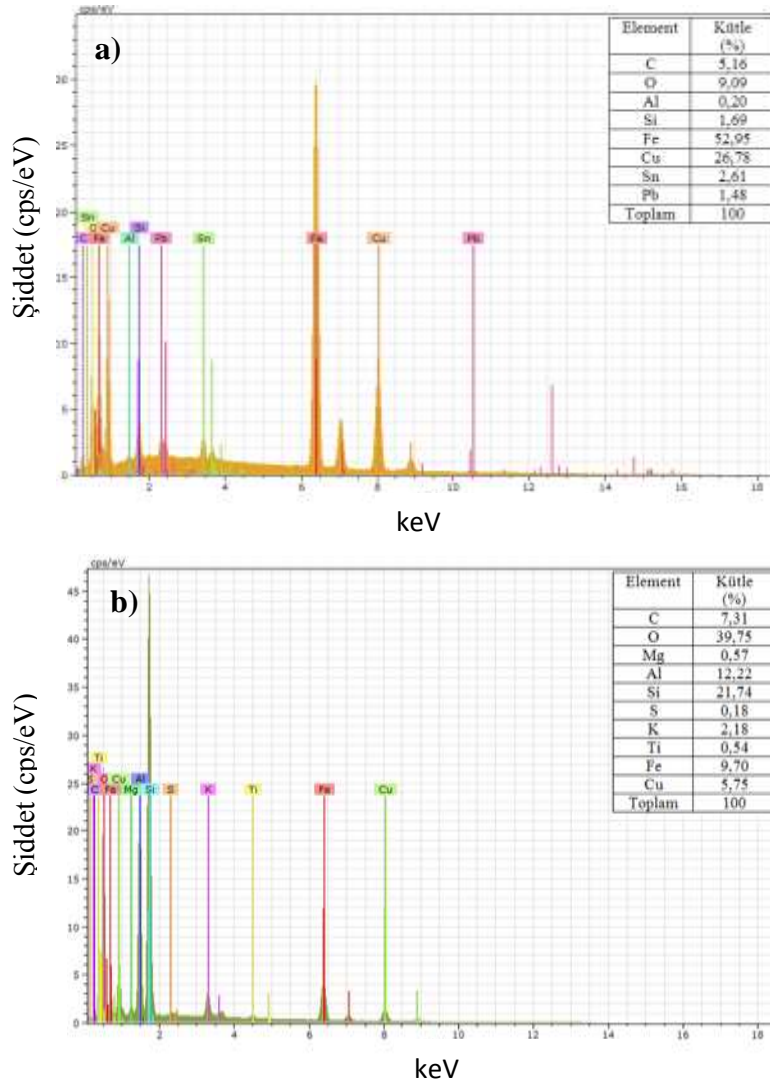


Resim 6.4. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma sonrası yüzeylerinin SEM resimleri
a) X240 b) X500

Şekil 6.7.a'daki EDS analiz sonucunda görüldüğü gibi yama üzerinde demir oranı normalden fazla tespit edilmiştir. Bu sonuç, yamaların sahip oldukları yüksek sertlik değerleri nedeniyle fren kampanasını aşındırması ve sürtünme arayüzeyine partikül geçişine neden olması ile oluşur. Literatürde dökme demire göre daha yüksek sertliğe sahip Al_2O_3 bileşeni içeren balata malzemesinin, sürtünme esnasında bu sert bileşenin dökme demir malzemeyi aşındırması ile dökme demirden balata yüzeyine doğru demir partikül geçişinin olduğu rapor edilmiştir (Tomasek, Kratosova, Yun, Fan ve Lu, 2009). Literatürdeki sonuçlarda çalışmada elde edilen benzer bulguyu ortaya koymuştur.

Resim 6.4.b'de 2 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analizinde ise bu noktanın ağırlıkça % 39,75 oksijen, % 12,22 alüminyum, % 21,74 silisyum, % 9,70 demir, % 5,75 bakır, %

7,31 karbon, % 2,18 potasyum ve düşük miktarlarda magnezyum, titanyum ve kükürten oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.7.b). Bu sonuçlar bu noktanın ağırlıkça % 62,3 SiO₂, 20,1 Al₂O₃ ve 7,93 Fe₂O₃ ve düşük miktarlarda MgO, TiO₂, K₂O içeren uçucu kül olduğunu kanıtlamaktadır. Resim 6.4.b’de sert uçucu kül partikülünün arkasında aşınma partiküllerinin (bakır, kalay, kurşun, demir ve grafit) birikmesi ve ısı ve basınç altında bu aşınma partiküllerinin mekanik alaşımlama işlemine maruz kalması sonucu uçucu kül partiküllerinin arkasında yamaların (sürtünme filmlerinin) oluştuğu tespit edilmiştir. Oluşan bu yamaların fren balata malzemesinin kütle kaybını azalttığı, sürtünme katsayısını da arttırdığı düşünülmektedir.

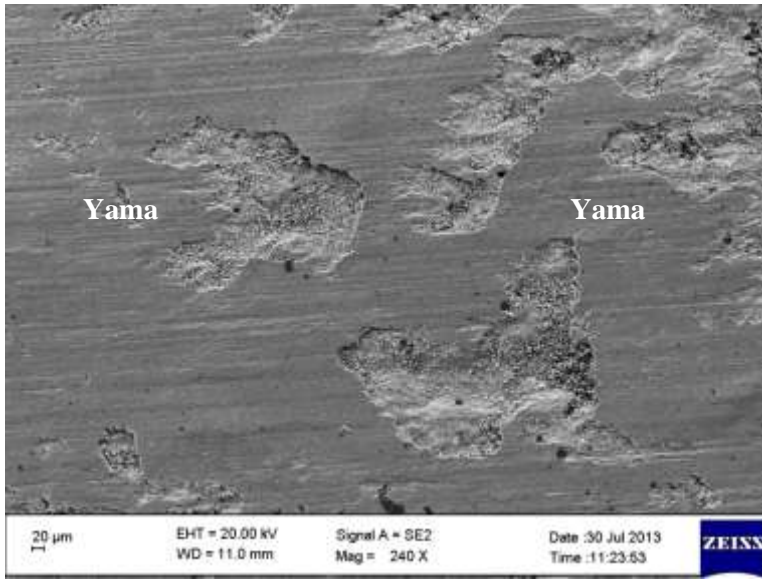


Şekil 6.7. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerin aşınma yüzeyleri üzerinden alınan 1 ve 2 numaralı noktaların EDS analizi

a) 1 numaralı noktanın

b) 2 numaralı noktanın EDS analizi

Resim 6.5'de % 8 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma deneyi sonrası aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir. Artan uçucu kül miktarı ile ikinci temas yamalarının oluşması için gerekli olan birinci temas yama (uçucu kül) sayısı artırmakta ve bu birinci temas yamalarının etrafında artan sıcaklıkla beraber daha fazla sayıda ikinci temas yamaları oluşmakta ve büyümektedir. Oluşan bu temas yamaları kendi aralarında birleşerek daha büyük bir yama haline dönüştüğü ve aşınma yüzeyini kaplandığı Resim 6.5'de görülmektedir.



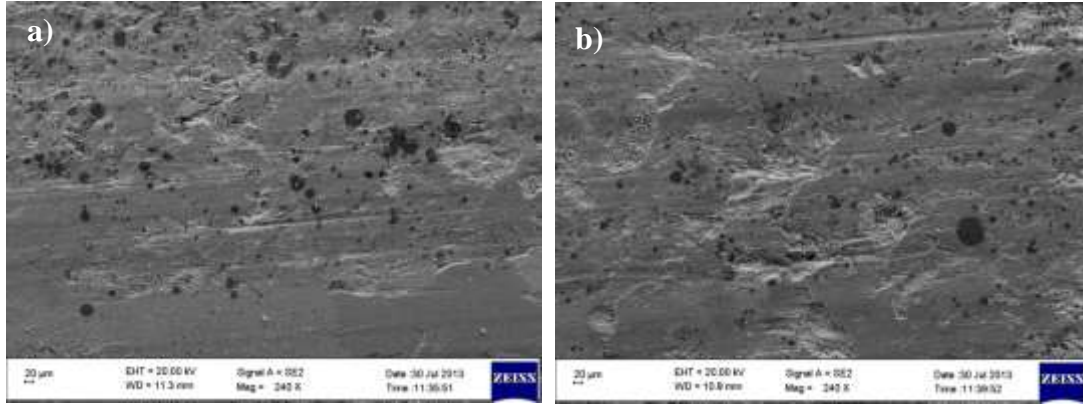
Resim 6.5. % 8 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM resmi (X240)

Eriksson ve Jacobson, (2000) tarafından yapılan çalışmada artan sıcaklık ve basınçla balata yüzeyinde oluşan temas yamalarının milimetre boyutlarına ulaşabileceği hatta balata yüzeyinin büyük kısmını kaplayabileceği ifade edilmektedir (Eriksson ve Jacobson, 2000). Elde edilen sonuçların Erikson ve Jacobson, (2000) tarafından yapılan çalışma sonuçları ile büyük bir paralellik gösterdiği belirlenmiştir.

Ayrıca literatürde yüzeyi kaplayan bu yamaların yüksek sertliklerinden dolayı karşı diski aşındırdığı rapor edilmiştir (Ostermeyer, 2003). Dolayısı ile balata yüzeyini kaplayan bu yamaların yüksek sertliklerinden dolayı karşı malzemeyi aşındırması ile balata malzemesinin kütle kaybının azaldığı tespit edilmiştir.

Resim 6.6.a'da % 10 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin, Resim 6.6.b'de ise % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

görülmektedir. SEM resimlerinde % 10 ve % 12 uçucu kül takviyeli balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinin oldukça pürüzsüz olduğu görülmektedir. Ayrıca % 10 ve % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin diğer tüm numuneler arasında en az kütle kaybı ve en yüksek sürtünme katsayısı gösterdikleri belirlenmiştir (Şekil 6.3 ve Şekil 6.6).



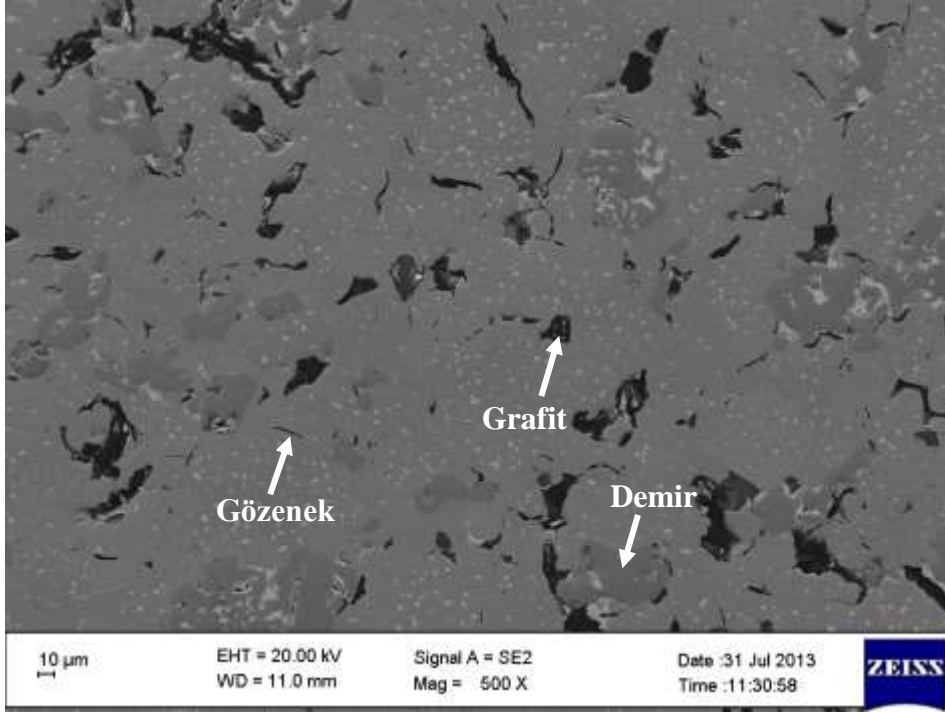
Resim 6.6. a) % 10 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma sonrası SEM resmi (X240) b) % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin aşınma sonrası SEM resmi (X240)

Artan uçucu kül miktarı ile uçucu kül partiküllerinin yük taşıma kapasiteleri artmakta ve yerinden kopma olasılıkları da azalmaktadır. Sonuç olarak uçucu kül partiküllerinin yük taşıma kapasitelerinin artması ve buna bağlı olarak da partiküllerin yerinden kopma olasılıklarının azalması fren balata malzemeleri ile fren kampanası arasındaki sürtünme katsayısının artmasına ve balata malzemelerinin kütle kayıplarının da azalmasına neden olduğu düşünülmektedir.

6.1.5. Mikroyapı incelemesi

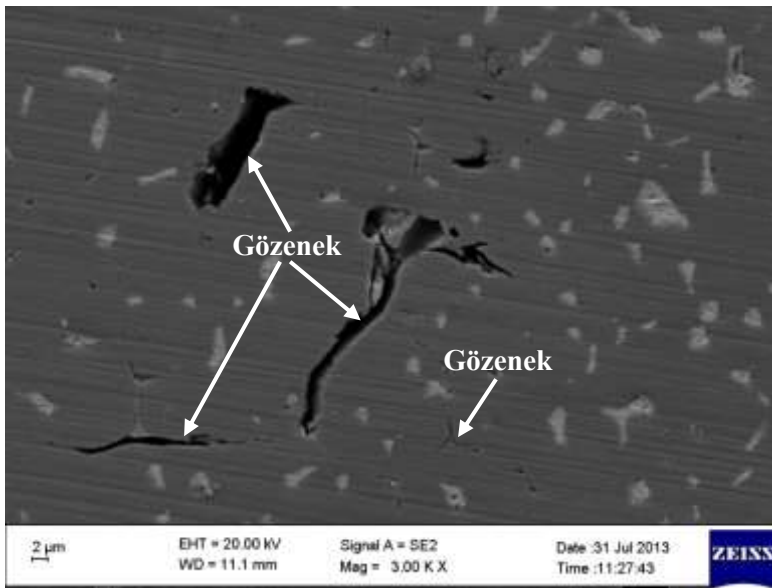
Uçucu kül takviyesiz bronz matrisli balata malzemesi ile yoğunluk, sertlik ve sürtünme-aşınma deney sonuçları açısından en iyi değerleri gösterdiği düşünülen % 6 ve % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin mikroyapıları incelenmiştir.

Resim 6.7’de sıcak presleme yöntemi ile üretilen uçucu kül takviyesiz bronz matrisli balata malzemesinin SEM resmi görülmektedir. SEM resminde mikro yapının üniform olduğu ayrıca demir tozlarının birbirleriyle birleşerek daha büyük taneler oluşturdukları görülmektedir. Yapı içerisine dağılmış grafit partikülleri de görülmektedir. Yapı içerisinde az miktarda da olsa gözenek oluştuğu belirlenmiştir.



Resim 6.7. Bronz matrisli fren balata malzemesinin SEM görüntüsü (X500)

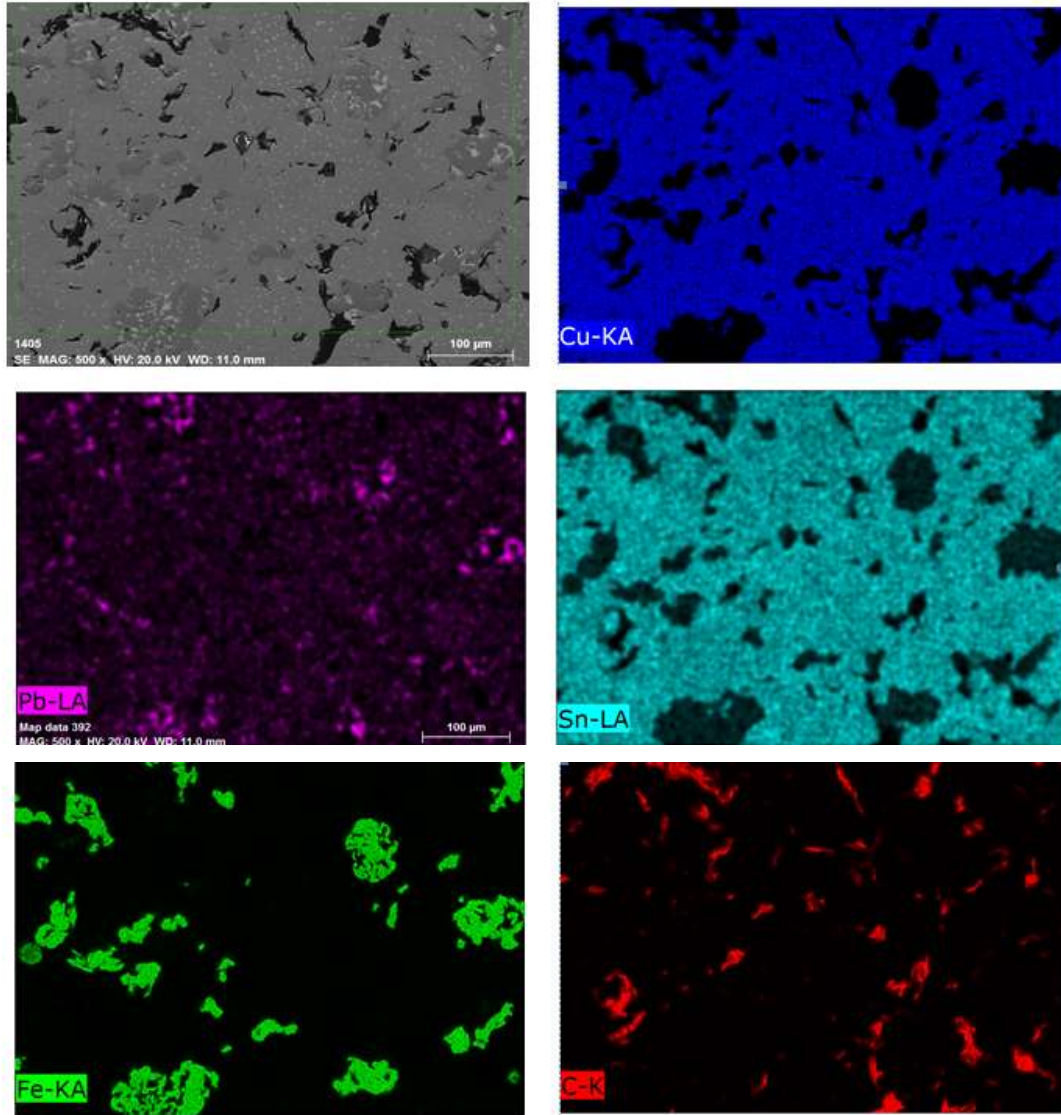
Bronz matrisli fren balata malzemesi içerisinde oluşan gözeneklerin varlığı daha net olarak Resim 6.8’de görülmektedir. Mikro yapılar da gözenek miktarının azlığı malzeme üretimi olarak seçilen 70 MPa presleme basıncı 650 °C presleme sıcaklığı ve 4 dakika presleme süresi gibi üretim parametrelerinin bu malzemenin üretimi için uygun parametreler olduğunu göstermektedir.



Resim 6.8. Bronz matrisli fren balata malzemesinde oluşan gözenek yapısı (X3000)

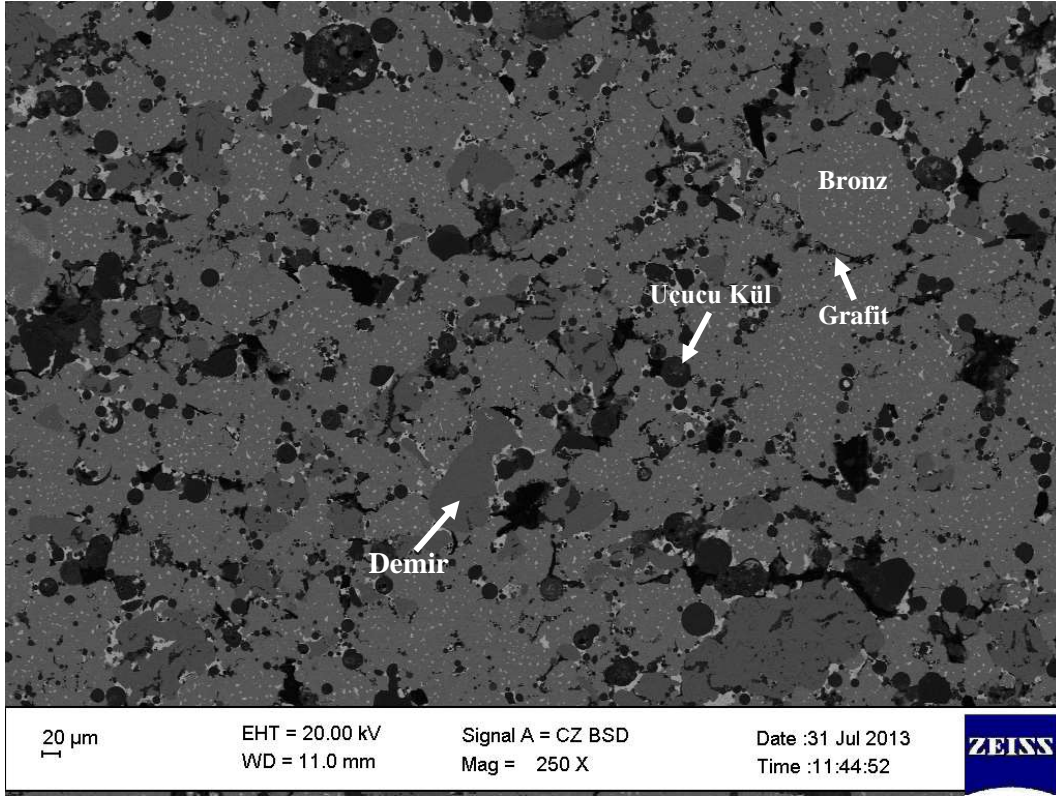
Resim 6.9'da bronz esaslı balata malzemesinin elementel dağılım haritası görülmektedir. Resimlerde bronz malzemeyi oluşturan bileşenlerin mikro yapı içerisinde dağılımı görülmektedir. Resimlerde görüldüğü gibi bronz malzemeyi oluşturan bileşenlerin (bakır, kalay, kuşun, demir ve grafit) yapı içerisinde buldukları ve yapı içerisinde üniform olarak dağıldıkları görülmektedir. Ayrıca matris içerisine ilave edilen demir tozlarının yapı içerisinde birleşerek iri taneler meydana getirdikleri görülmektedir.

Xiang ve diğerleri, (2007) yaptıkları çalışmadaki bakır matrisli fren balata malzemesinin mikro yapısı incelendiğinde matris içerisine ilave edilen $\leq 74 \mu\text{m}$ altı demir tozlarının bir araya gelerek daha büyük taneli demir partikülleri meydana getirdiği görülmüştür (Xiang ve diğerleri, 2007). Bu durum yapılan çalışma ile büyük bir uyum göstermektedir.



Resim 6.9. Bronz matrisli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası

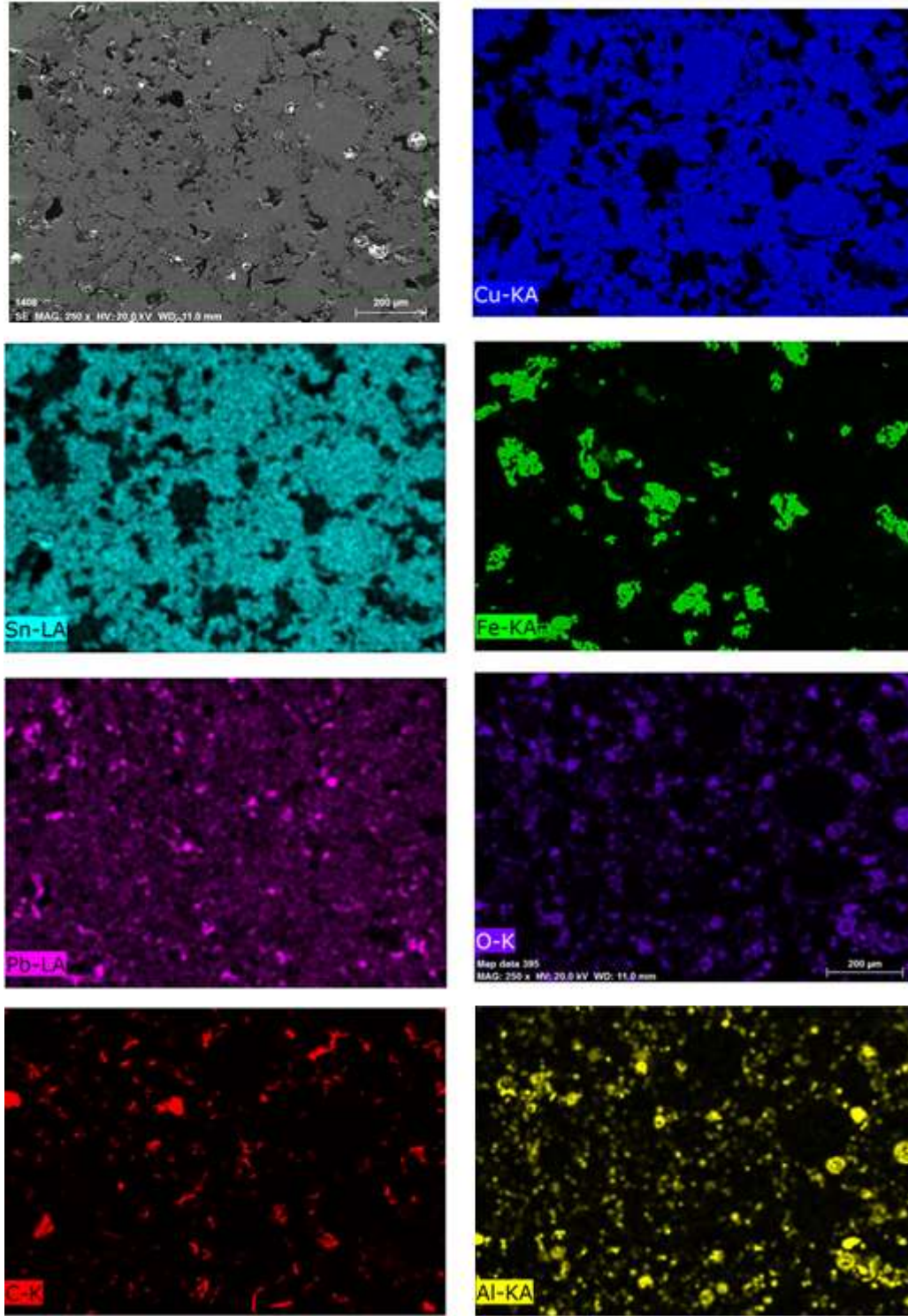
Resim 6.10'de % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü ve Resim 6.11'de elementel dağılım haritası görülmektedir. Resim 6.10'daki BSE görüntüsünde grafit partiküllerinin bronzun tane sınırlarında yer aldığı ve tane sınırlarında yer alan grafitin bariyer görevi görerek bu noktalarda tanelerin birleşmesini engellediği belirlenmiştir.



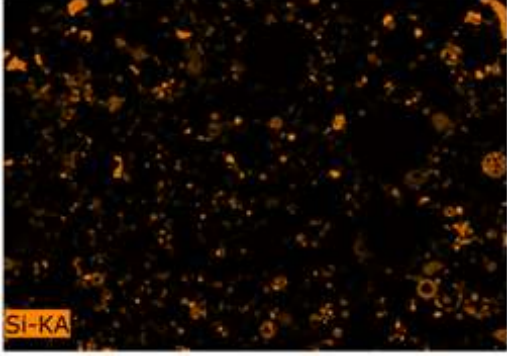
Resim 6.10. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü (X250)

Fren balata malzemelerinde grafit ucuz ve etkili olduğundan dolayı en yaygın kullanılan katı yağlayıcıdır (Öztürk, Öztürk ve Adıgüzel, 2013). Ancak tane sınırlarında biriken grafit partiküllerinin gözeleliliği arttırdığı ve bu durumunda sinterleşmeyi azaltarak taneler arasında zayıf bağların oluşmasına neden olacağı ifade edilmektedir (Albayrak, 2009). Çalışmadan elde edilen sonuçlar Albayrak (2009) tarafından yapılan çalışma sonuçları ile örtüşmektedir.

Resim 6.11'de % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası görülmektedir. Resim 6.11'deki elementel dağılım haritasında matrisi oluşturan bileşenlerin (bakır, kalay, kurşun, uçucu kül, demir ve grafit) matris içerisinde üniform olarak dağıldıkları görülmektedir.

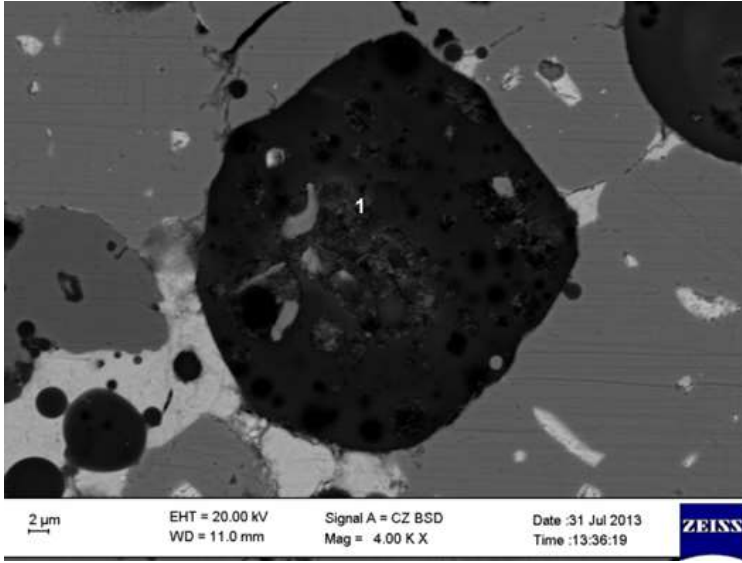


Resim 6.11. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası



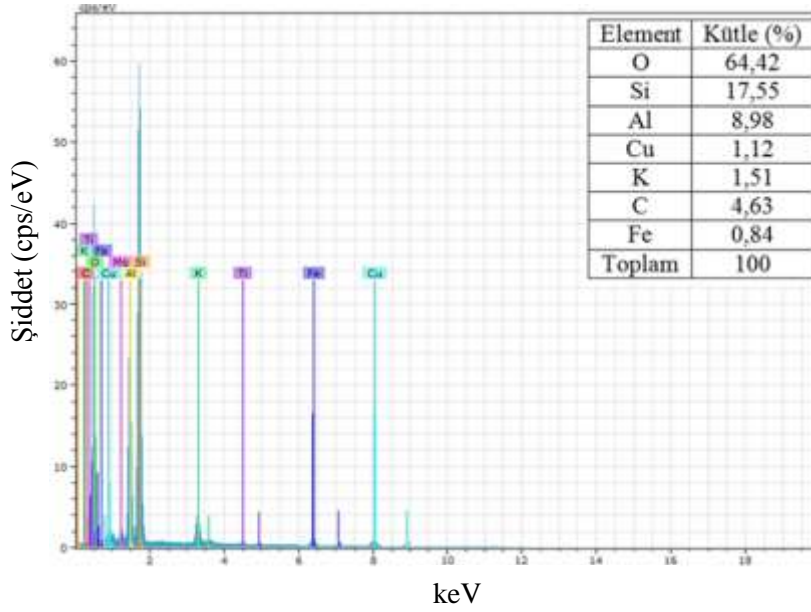
Resim 6.11. (Devam) % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası

Resim 6.12’de % 6 uçucu kül takviyeli balata malzemesinde uçucu kül partikülü ile matris arayüzey uyumu görülmektedir. Resim incelendiğinde uçucu kül ile matris arasında boşluk olmadığı ve gayet iyi bir arayüzey bağının olduğu söylenebilir.



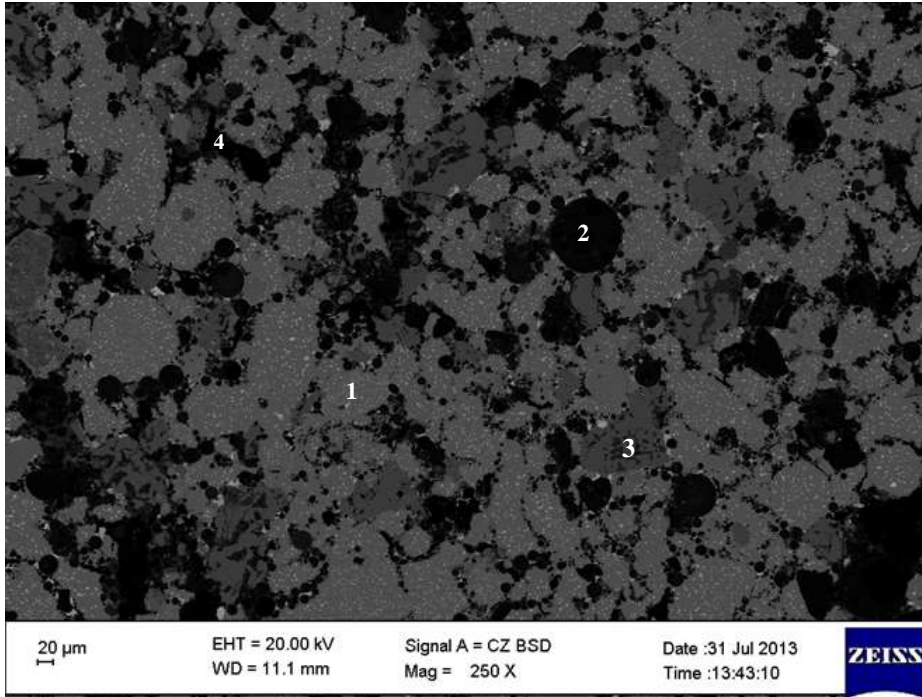
Resim 6.12. % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesindeki uçucu kül ile matris arayüzeyi (X4000)

Şekil 6.8’de Resim 6.12’deki 1 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 6.8’deki EDS analiz sonuçlarına göre Resim 6.12’de 1 rakamı ile gösterilen noktanın yüksek miktarda oksijen (O), silisyum (Si) ve alüminyum (Al) elementleri içerdiği belirlenmiştir. Bu noktada yüksek oranda O, Si ve Al elementlerinin bulunması bu noktaki fazın yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 bileşiklerini içeren uçucu kül partikülü olduğunu kanıtlamaktadır.

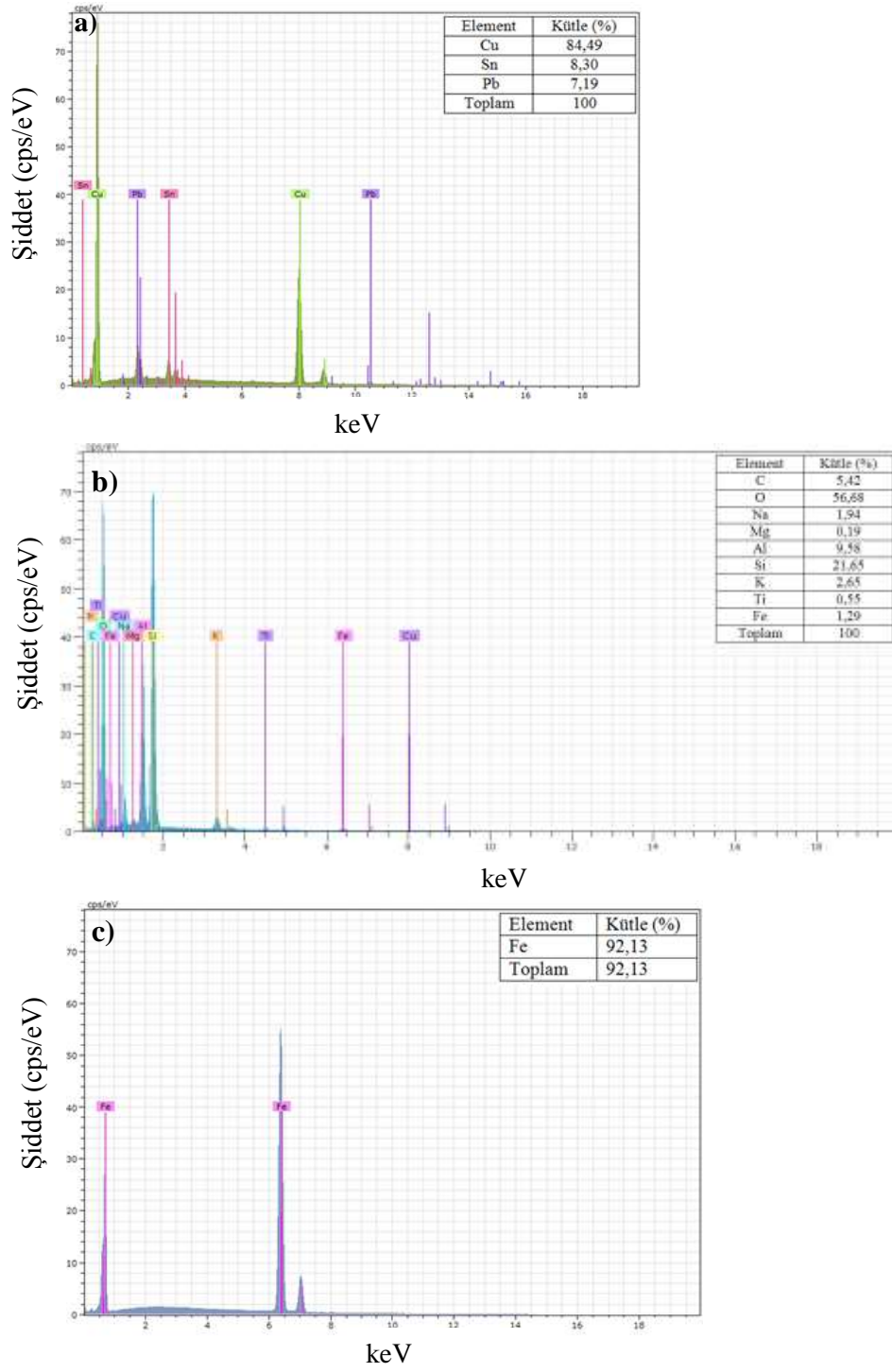


Şekil 6.8. Resim 6.12'deki 1 noktasının EDS analizi

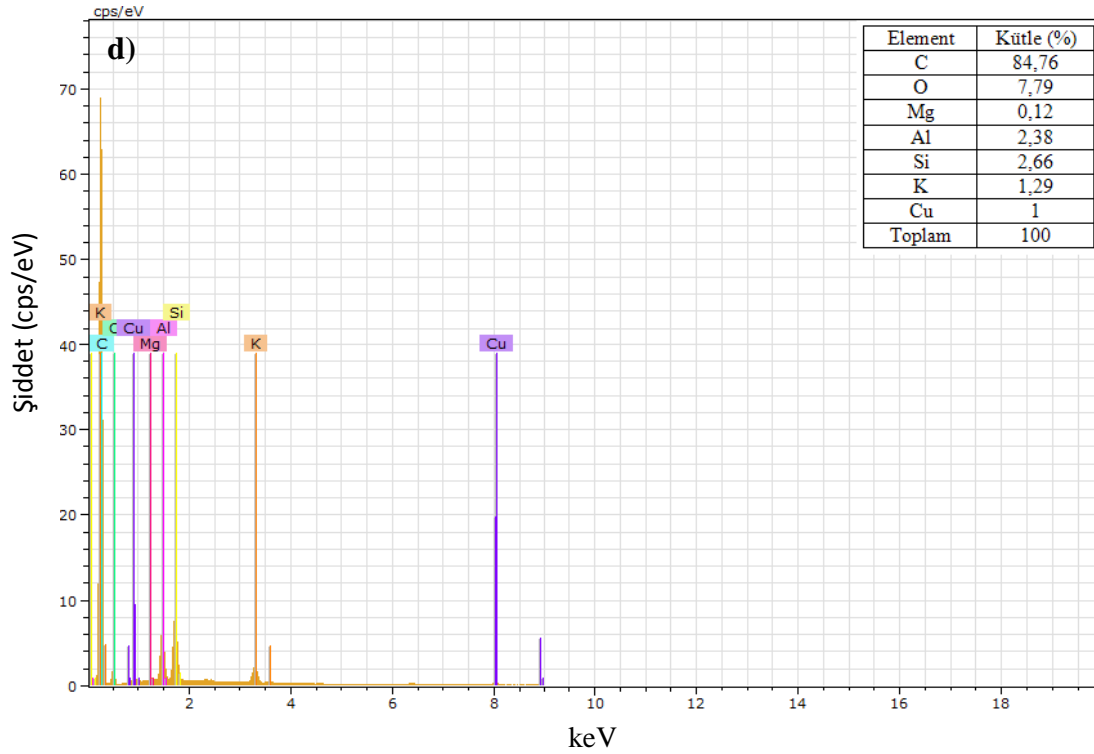
Resim 6.13'de % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü görülmektedir. Şekil 6.9'da Resim 6.13'de 1, 2, 3 ve 4 rakamı ile gösterilen noktalardaki fazların EDS analiz sonuçları görülmektedir. EDS analiz sonuçlarına göre 1 noktasındaki fazın ana matrisi oluşturan bronz, 2 noktasındaki fazın uçucu kül, 3 noktasındaki fazın demir ve 4 noktasındaki fazın grafit olduğu belirlenmiştir.



Resim 6.13. % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü (X250)



Şekil 6.9. % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin
a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 noktasının EDS analizi

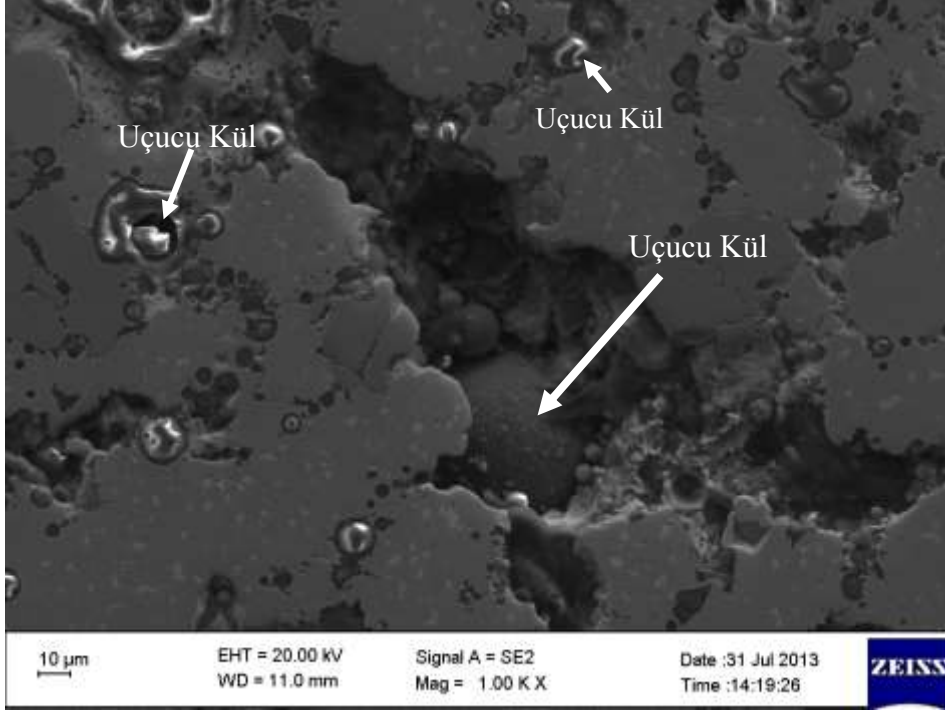


Şekil 6.9. (Devam) Şekil 6.9. % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 noktasının EDS analizi

Resim 6.14'de % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin SEM resmi görülmektedir. Resimde yapı içerisinde oluşan gözenek ve bu gözenek içerisinde hapsolmuş uçucu kül partikülleri görülmektedir.

Malzeme içerisinde oluşan gözenek yapısının malzemenin mukavemeti açısından olumsuz bir durum oluşturduğu düşünülebilir. Ancak literatürde gözenek artışının balata malzemesine uygulamada bazı faydalar sunduğu bildirilmektedir. Bunlardan birincisi oluşan gözeneklerin balata malzemesinin sürtünme katsayısının artışı teşvik eden yüzey pürüzlülüğünü arttırması ikincisi, oluşan gözeneklerin balata malzemesindeki abrasiv partikülleri tutarak frenleme esnasında abrasiv partikül kaybını engellediği şeklinde ifade edilmektedir (Junior ve diğerleri, 2008).

Resim 6.14'de görüldüğü gibi yapı içerisinde oluşan gözeneklerin uçucu kül partiküllerini tutarak uçucu kül partiküllerinin sürtünme esnasında yerlerinden koparak çıkmasını engellediği ve sürtünme katsayısı artışı teşvik eden yönde etki gösterdiği düşünülmektedir. Dolayısı ile çalışmadan elde edilen sonuçlar literatür ile uyum içindedir.



Resim 6.14. % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinde gözenek oluşumu (X1000)

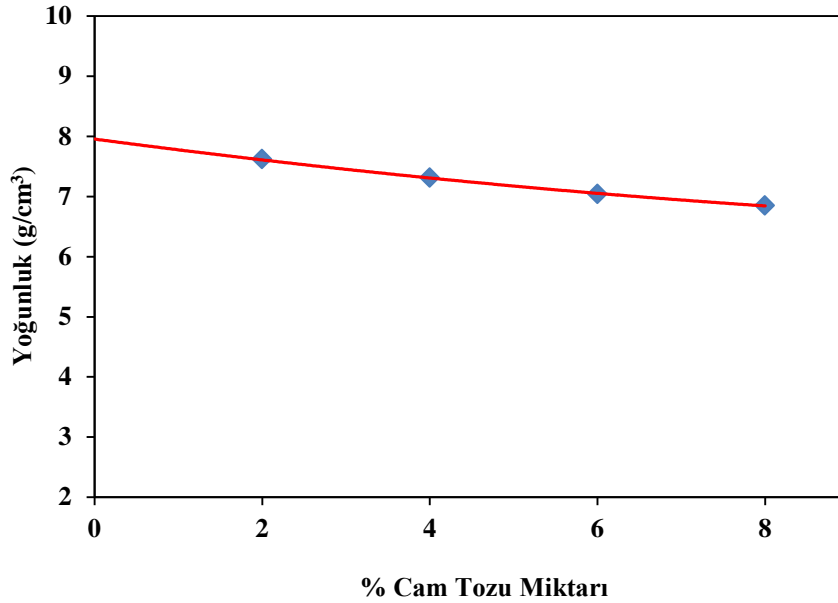
6.2. Cam Tozunun Etkisi

Bronz esaslı fren balata malzemesinin sürtünme-aşınma performansı üzerine cam tozu miktarının etkisini belirlemek amacıyla ilk aşamada sıcak presleme yöntemi ile Çizelge 5.1.'de kimyasal bileşimi verilen bronz esaslı fren balata malzemesi üretilmiştir. İkinci aşamada ise bronz esaslı ana malzeme içerisine farklı oranlarda (% 2, % 4, % 6, % 8) cam tozu partikülü ilave edilerek yeni fren balata malzemeleri üretilmiştir. Üretilen bronz esaslı ve cam tozu takviyeli balata malzemelerinin yoğunluk, sertlik, sürtünme-aşınma performansı ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca performans deneyleri sonucunda cam tozu takviyeli malzemeler içerisinde en iyi sonucu gösteren malzemenin mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.2.1. Yoğunluk değişimi

Şekil 6.10'da bronz esaslı fren balata malzemesine ilave edilen cam tozu miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri görülmektedir. Şekilde artan cam tozu miktarı ile yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmektedir. Cam tozu içermeyen bronz esaslı balata

malzemesinin yoğunluğu $7,95 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. Bu malzemeye % 2 cam tozu ilave edildiğinde yoğunluğun $7,62 \text{ g/cm}^3$ 'e % 4, % 6 ve % 8 cam tozu ilave edildiğinde ise yoğunluk değerlerinin sırası ile 7,31; 7,04 ve $6,85 \text{ g/cm}^3$ 'e düştüğü belirlenmiştir.

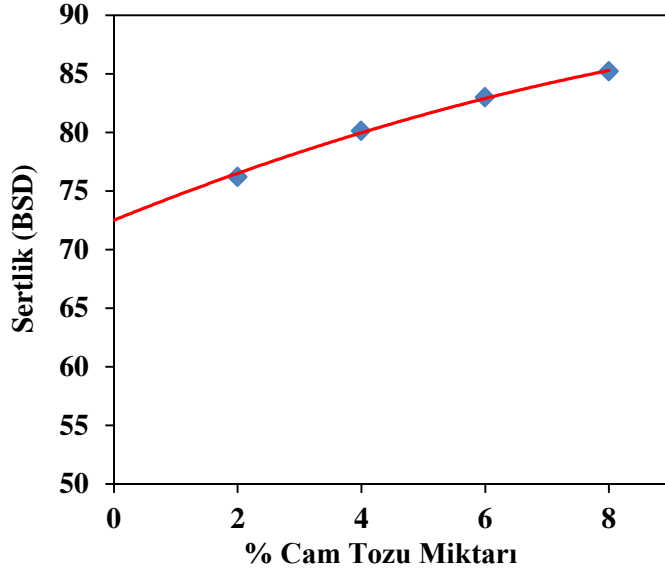


Şekil 6.10. Cam tozu miktarının yoğunluk değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70 \text{ MPa}$; $T_{\text{Sinterleme}}=650 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{süre}}=4 \text{ dakika}$)

Artan cam tozu miktarı ile fren balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinin azalmasının nedeni olarak metal tozlarının sıkıştırılabilirlik özelliğinin kötüleşmesi ve buna bağlı olarak da gözenek miktarının artması gösterilebilir (Resim 6.18.b).

6.2.2. Sertlik değişimi

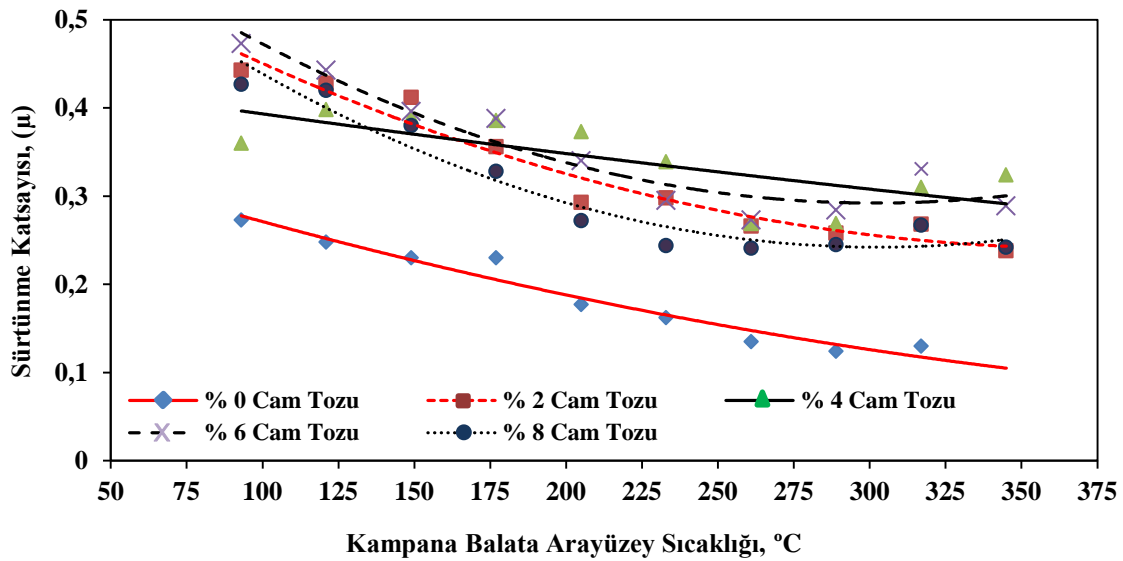
Şekil 6.11'de bronz esaslı fren balata malzemesine ilave edilen cam tozu miktarına bağlı olarak değişen sertlik değerleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi cam tozu miktarının artması ile sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Cam tozları yaklaşık % 74 oranında SiO_2 gibi sert bir bileşikten oluşmaktadır (Bkz. Çizelge 5.15). Sertlik ölçümlerinin Resim 6.16'da görüldüğü gibi yapı içerisinde homojen dağılan sert cam tozları üzerinden alındığı düşünülmektedir. Dolayısı ile artan cam tozu miktarı ile sertlik değerinin artması beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6.11. Cam tozu miktarının sertlik değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

6.2.3. Aşınma deney sonuçları

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda (% 2, % 4, % 6 ve % 8) cam tozu ilavesi ile hazırlanan numunelerin sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 6.12’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi bronz esaslı ve cam tozu takviyeli balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinde artan sürtünme arayüzey sıcaklığı ile düşme eğilimi belirlenmiştir.



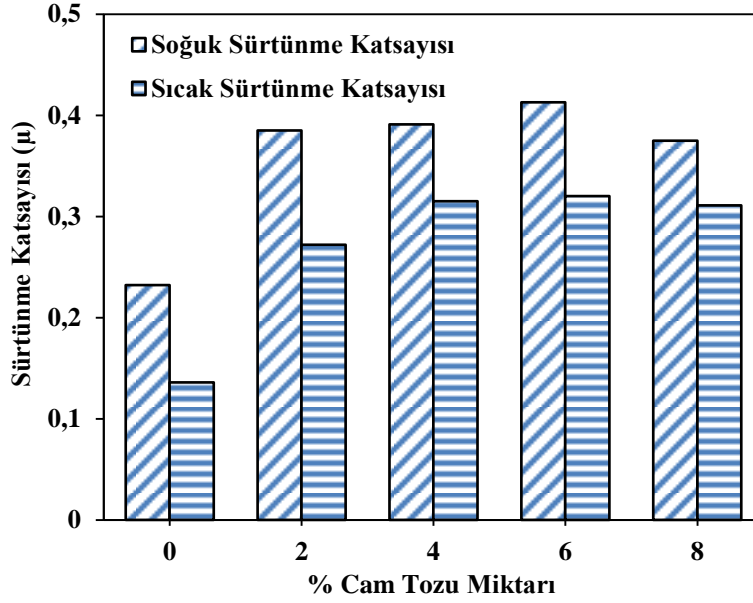
Şekil 6.12. Arayüzey sıcaklığının ve cam tozu yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Bu durum artan sıcaklığa bağlı olarak malzemelerin Young (Elastikiyet) katsayılarının azalması ile açıklanabilir. Cam tozu takviyeli balata malzemelerinde artan arayüzey sıcaklığına bağlı olarak azalan elastikiyet katsayıları bu malzemelerde yük altında daha fazla elastik deformasyonun oluşmasına neden olur. Oluşan bu elastik deformasyon zaten zayıf olan cam tozu matris arayüzey bağının (Resim 6.18.b) daha da zayıflamasına ve cam partiküllerinin matris içinden daha az kuvvetle kopmasına yol açar. Bu durum ise cam tozu takviyeli balata malzemelerinin sürtünme esnasında karşı yüzeye yeterli tutunma kuvveti gösterememesine neden olmakta ve bundan dolayı da sürtünme katsayısı değerlerinin artan arayüzey sıcaklığı ile azaldığı düşünülmektedir. Bu sonucu % 6 cam tozu takviyeli balata malzemesinin aşınma yüzeyinde oluşan temas yamasında belirlenen % 22 demir oranı desteklemektedir (Şekil 6.16.a). Temas yamasında belirlenen düşük demir oranı % 6 cam tozu takviyeli balata malzemesinin karşı yüzeye yeterli tutunma sağlayamadığını göstermektedir. Çünkü yetersiz tutunma kuvveti karşı yüzeyi daha az oranda aşındıracak ve böylece düşük miktarda demir partikülü geçişine neden olacaktır. Ayrıca daha önceki bölümde % 6 cam tozuna göre daha kararlı sürtünme davranışı sergileyen % 6 uçucu kül takviyeli balata malzemesinin aşınma yüzeyinde oluşan yamada % 52,95 demir oranı tespit edilmesi (Bkz. Şekil 6.7.a) % 6 cam tozu takviyeli balata malzemesinin karşı yüzeye yeterli tutunma sağlayamadığını daha açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Yüksek arayüzey sıcaklığında temas noktalarında yağlayıcı etki gösteren bazı oksitlerin oluşması (Ping-ping ve diğerleri, 2007) balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin azalmasının başka bir nedeni olarak gösterilebilir. Çünkü artan arayüzey sıcaklığı ile sürtünme arayüzeyinde oluşan bu oksitler sürtünme çifti arasında bir yağlayıcı gibi davranarak bronz matrisli ve cam tozu takviyeli balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin azalmasına neden olur.

Artan kampana-balata arayüzey sıcaklığına bağlı en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,190) cam tozu takviyesiz bronz esaslı fren balata malzemesi verirken, en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,351) ise % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin verdiği belirlenmiştir. Ayrıca % 4 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin bronz matrisli, % 2, % 6 ve % 8 cam tozu takviyeli balata malzemelerine göre artan sürtünme arayüzey sıcaklığı karşısında daha iyi sürtünme katsayısı kararlılığı gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 6.12).

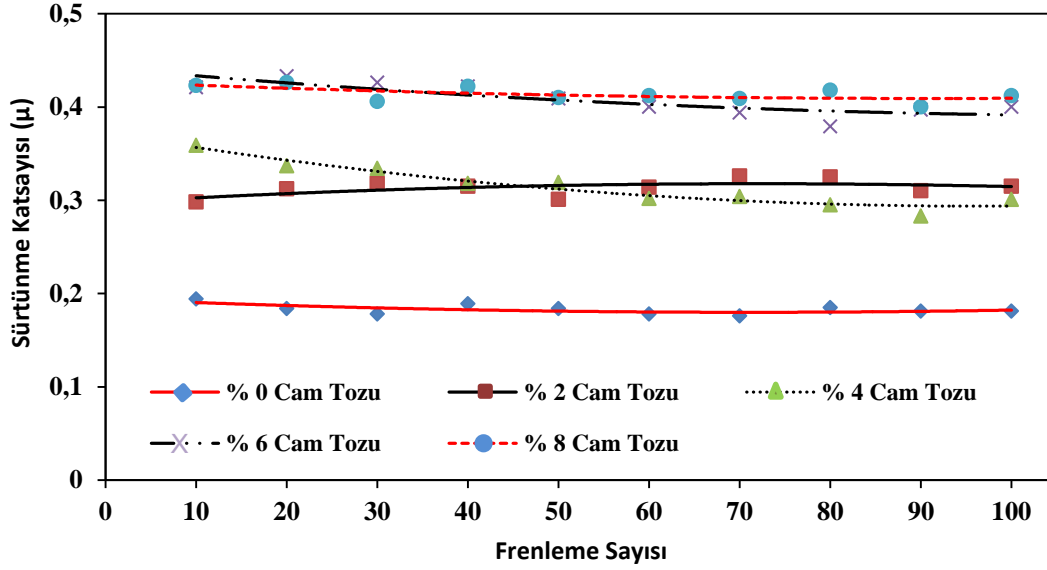
Şekil 6.13’de bronz esaslı fren balata malzemesine ilave edilen cam tozu miktarına bağlı olarak değişen sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir.



Şekil 6.13. Cam tozu miktarının soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekilde görüldüğü gibi en düşük soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerlerini (0,232-0,136) cam tozu takviyesiz bronz esaslı fren balata malzemesi gösterirken en yüksek soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerlerini (0,413-0,320) % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir. Bronz esaslı balata malzemesine ilave edilen cam tozu miktarının % 6’ya kadar artması ile sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı değerlerinin yükseldiği, ancak cam tozu miktarının % 8’e çıkması ile sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı değerlerinde bir miktar düşme meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca balata malzemelerinin soğuk sürtünme katsayısı değerlerinin sıcak sürtünme katsayısı değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Bronz esaslı fren balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda cam tozu ilavesi ile hazırlanan balata numunelerinin frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayı değişimleri Şekil 6.14’de görülmektedir. Frenleme sayısına bağlı en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,183) cam tozu takviyesiz bronz esaslı fren balata malzemesi gösterirken en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,413) % 8 cam tozu takviyeli balata malzemesi göstermiştir. Artan cam tozu miktarı ile balata malzemelerinin frenleme sayısına bağlı ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

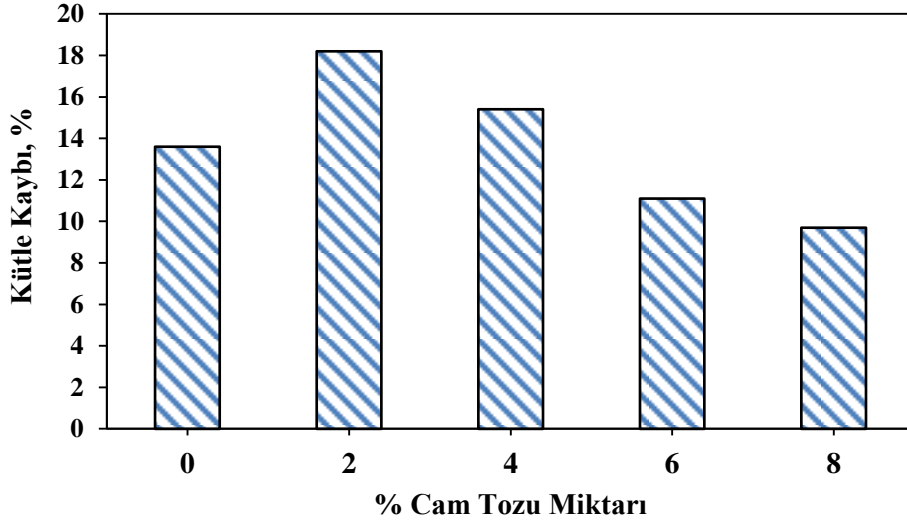


Şekil 6.14. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine cam tozu miktarının etkisi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekilde görüldüğü gibi % 2 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısının yaklaşık 45. frenlemeden sonra arttığı belirlenmiştir. Bu durum yetersiz takviye elamanına sahip fren balata malzemesinin takviye elemanlarının sürtünme arayüzeyinde oluşan temas basıncını taşıyamayarak daha küçük parçalara ayrılması ve bu küçük parçaların da sürtünme arayüzeyinde temas alanını artırarak sürtünme katsayısının artmasına neden olması şeklinde açıklanabilir.

Şekil 6.15'de bronz esaslı fren balata malzemesine ilave edilen cam tozu miktarına bağlı olarak değişen kütle kaybı oranları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek kütle kaybı % 18,2 ile % 2 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinde belirlenirken en düşük kütle kaybı ise % 9,7 ile % 8 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinde belirlenmiştir. Ayrıca % 2 ve % 4 cam tozu takviyeli fren balata malzemelerinin kütle kayıplarının bronz matrisli balata malzemesine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Cam tozu miktarının artması ile cam tozu ile güçlendirilmiş fren balata malzemelerinin kütle kayıplarının azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun artan cam tozu miktarı ile fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde oluşan temas yamalarının varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir (Resim 6.15.b-c-d). Çünkü oluşan bu temas yamaları balata ve kampana arasında kararlı bir sürtünme filmi oluşturarak kütle kayıplarının azalmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde araştırmacılar yaptıkları çalışmada, düşük aşınma miktarı gösteren fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde kararlı bir sürtünme filminin

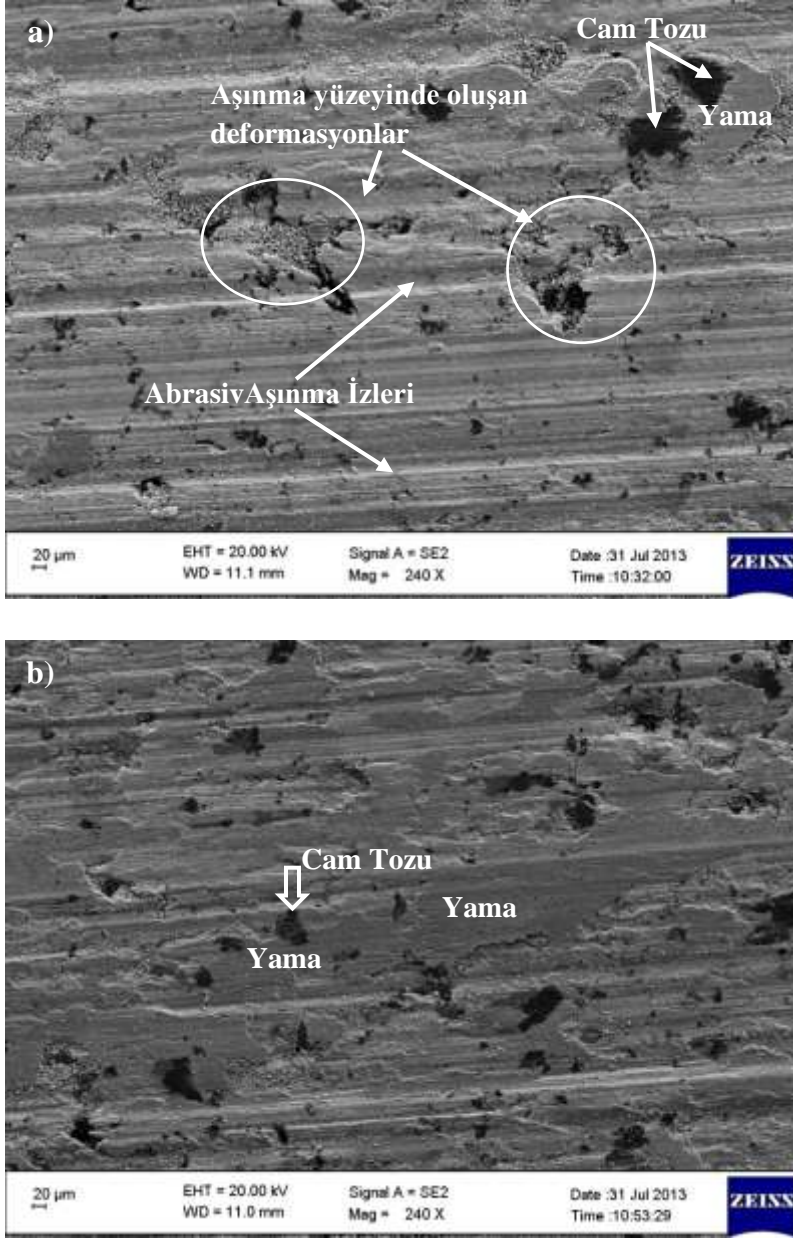
oluşturduğunu ifade etmişlerdir (Kchaou, Sellami, Elleuch ve Singh, 2013; Abadi ve diğerleri, 2010). Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, sonuçların literatür ile tam bir paralellik gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 6.15. Cam tozu miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (A; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

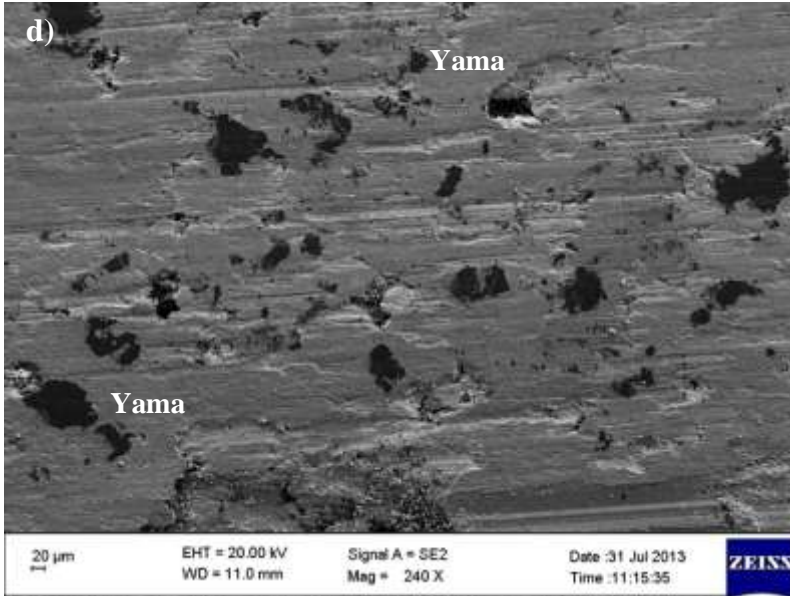
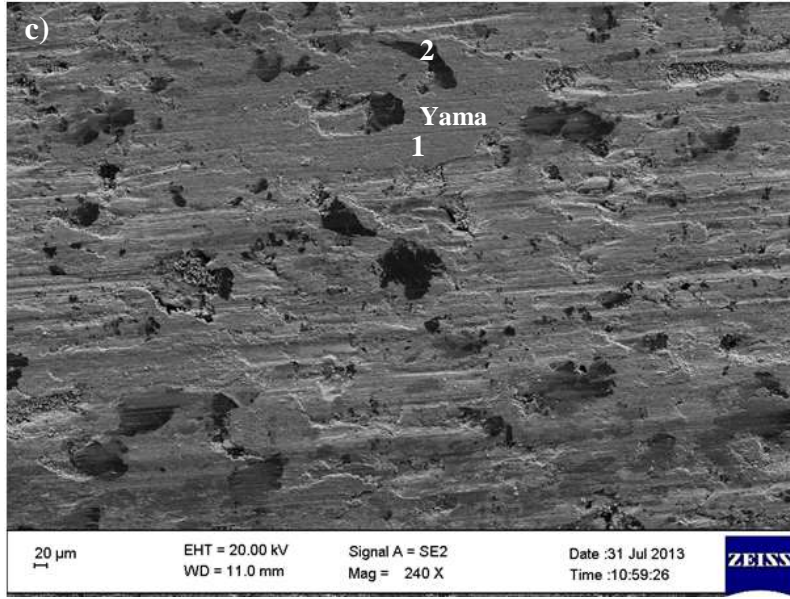
6.2.4. Aşınma yüzey analizi

Farklı oranlarda cam tozu takviyeli bronz esaslı balata malzemelerinin SAE J661 test standardına göre yapılan sürtünme-aşınma deneyleri sonrası aşınma yüzeylerinde meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları Resim 6.15’de görülmektedir.



Resim 6.15. Artan cam tozu miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri (X240)

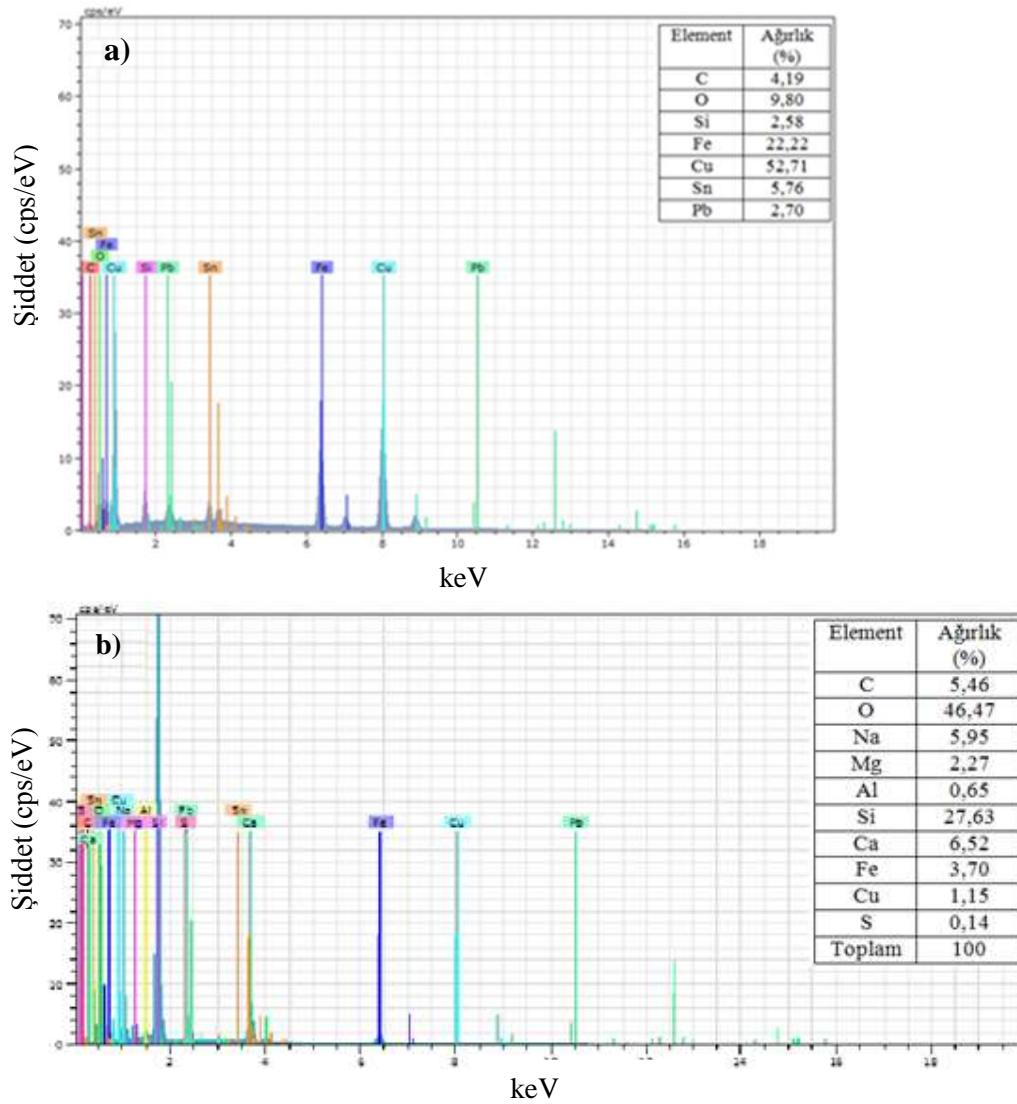
a) % 2 b) % 4 c) % 6 d) % 8 cam tozu



Resim 6.15. (Devam) Artan cam tozu miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri (X240)
a) % 2 b) % 4 c) % 6 d) % 8 cam tozu

Resim 6.15.a'da % 2 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi görülmektedir. Resimde malzeme yüzeyinde abrasiv aşınma izlerinin olduğu tespit edilmiştir. Oluşan bu abrasiv aşınma izlerinin balatayı oluşturan yumuşak bileşenler (bakır, kalay, kurşun, grafit) aşındıktan sonra yüzeye çıkan cam tozu partiküllerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü balata malzemesindeki yetersiz cam tozu partikülleri arayüzeyde oluşan temas basıncını taşıyamadıklarından dolayı matristen koparak aşınma yüzeyinde deformasyon ve abrasiv aşınma izleri oluşturmuştur. Bu durum % 2 cam tozu takviyeli balata malzemesinde kütle kaybını arttırmıştır. Artan cam tozu

miktarı ile aşınma yüzeylerinde abrasiv aşınma izlerinin azaldığı ve yüzeyde yamaların (yüzey filmlerinin) oluştuğu görülmektedir (Resim 6.15.b-c-d). % 4, % 6 ve % 8 cam tozu takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde birinci temas yamalarının (cam tozu) arkasında biriken aşınma partiküllerinin ısı ve basınç etkisiyle mekanik alaşımlama işlemine maruz kalması ile cam tozu partiküllerinin etrafında yeni temas yüzeylerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Oluşan bu yeni yüzey yamalarının da balata malzemesinin aşınma direncini geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Boz ve Kurt, (2007) yaptıkları çalışmada sürtünme arayüzeyinde oluşan temas yamalarının disk-balata arasındaki temas yüzeyini arttıracaklarını ve artan bu temas yüzeyinin de sürtünme katsayısının artmasına, aşınma oranının azalmasına neden olacağını rapor etmişlerdir (Boz ve Kurt, 2007). Elde edilen bulgular Boz ve Kurt (2007) tarafından yapılan çalışma sonuçları ile örtüşmektedir.

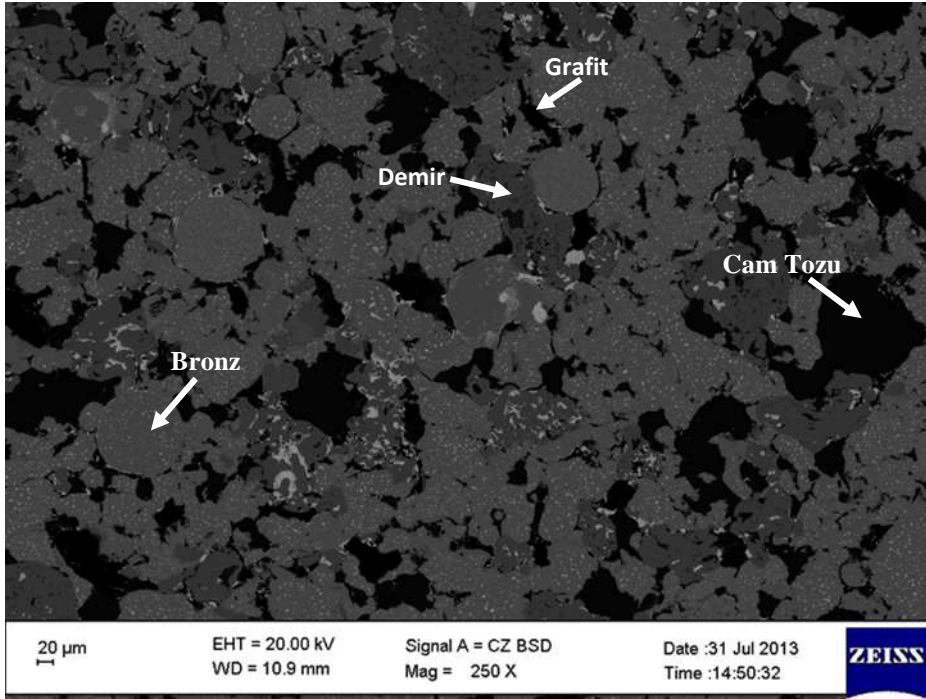


Şekil 6.16. % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinde
a) 1 numaralı noktanın b) 2 numaralı noktanın EDS analizi

Şekil 6.16.a ve b'de % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi üzerinde 1 ve 2 rakamı ile gösterilen noktaların EDS analiz sonuçları görülmektedir. EDS analiz sonuçlarına göre 2 rakamı ile gösterilen noktanın ağırlıkça % 46,47 O, % 27,63 Si % 5,95 Na, % 6,52 Ca, % 5,46 C, % 2,27 Mg ve az miktarlarda Al, Fe, Cu ve S'den oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.16.b). Bu noktada yüksek oranda O, Si elementlerinin bulunması bu noktadaki fazın yüksek oranda SiO₂ bileşiği içeren cam tozu olduğunu kanıtlamaktadır. % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde oluşan ve 1 rakamı ile gösterilen temas yamasının ağırlıkça % 52,71 Cu, % 22,22 Fe, % 9,8 O, % 5,76 Sn, % 4,19 C, % 2,70 Pb'dan oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 6.16.a). 1 ve 2 rakamı ile gösterilen noktaların EDS analiz sonuçları aşınma esnasında birinci temas yamalarının (cam toz partikülleri) arkasında biriken yumuşak aşınma partiküllerinin (Cu, Sn, Pb) sürtünme ısısı ve temas basıncı etkisi ile mekanik alaşımlama işlemine maruz kalarak ikinci temas yamalarına dönüştüğünü net bir şekilde ortaya koymaktadır. İkinci temas yamasında belirlenen ağırlıkça % 22,22 demir oranı fren balata malzemesinin, fren kampanasını düşük yoğunluklu abrasiv aşınmaya uğrattığını ve bu abrasiv aşınma esnasında karşı yüzeyden (fren kampanasından) kopan demir partiküllerinin sürtünme arayüzeyine dahil olduğunu göstermektedir.

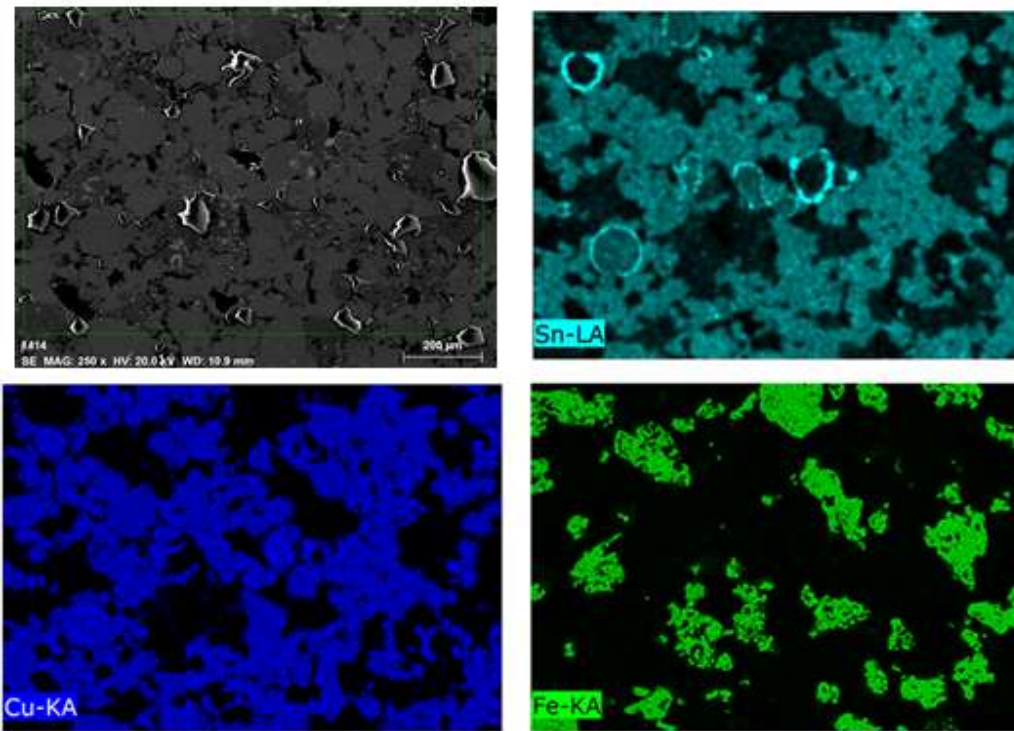
6.2.5. Mikroyapı incelemesi

Yoğunluk, sertlik ve sürtünme-aşınma sonuçları açısından en iyi değerleri gösterdiği düşünülen % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin mikroyapısı incelenmiştir. Resim 6.16'da % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemenin BSE görüntüsü ve Resim 6.17'de elementel dağılım haritası görülmektedir.

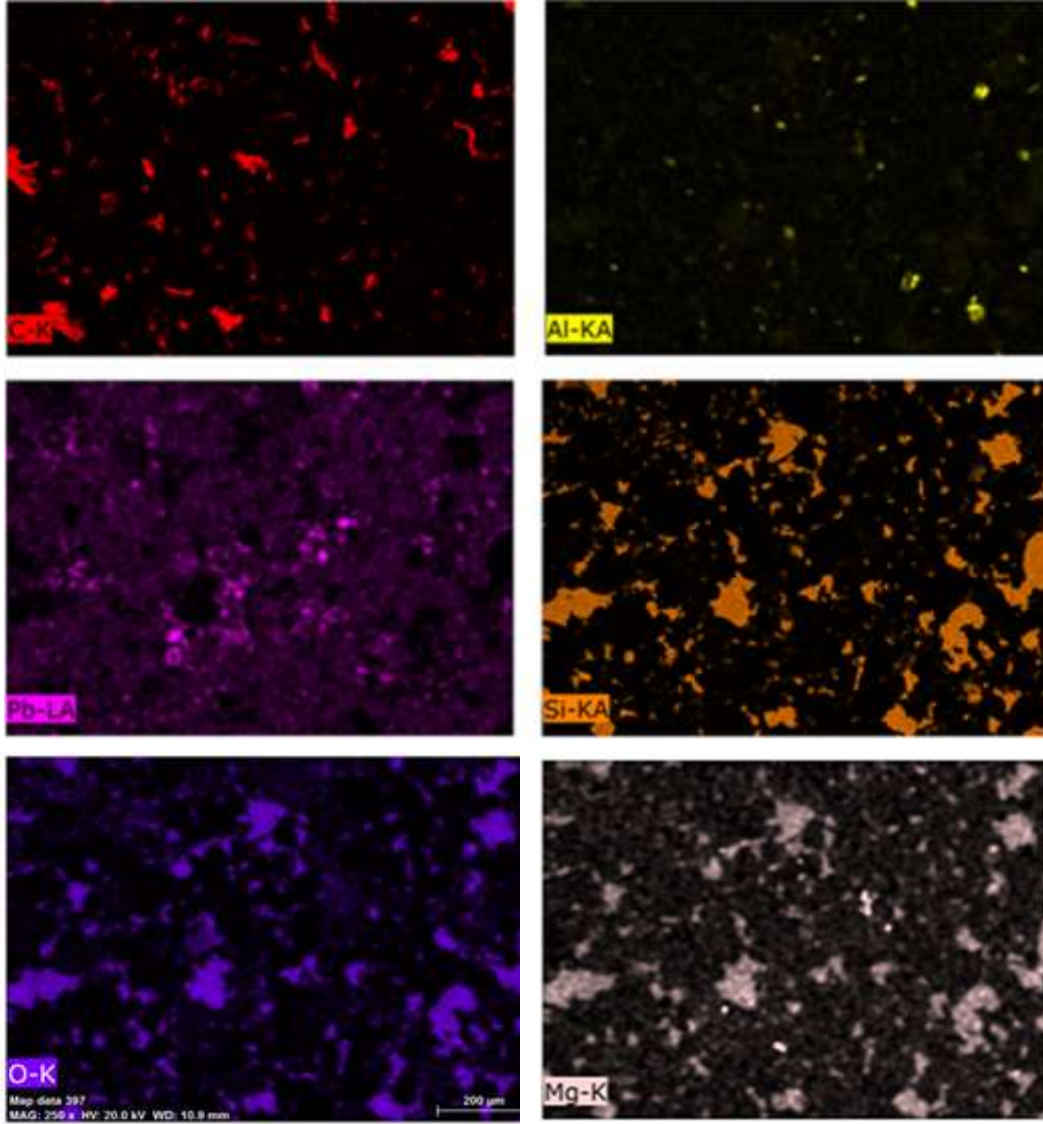


Resim 6.16. % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü

Resim 6.16'daki BSE görüntüsü ve Resim 6.17'deki elementel dağılım haritası incelendiğinde malzemeyi meydana getiren bileşenlerin (bronz, demir, grafit, cam tozu) yapı içerisinde üniform olarak dağıldığı görülmektedir.

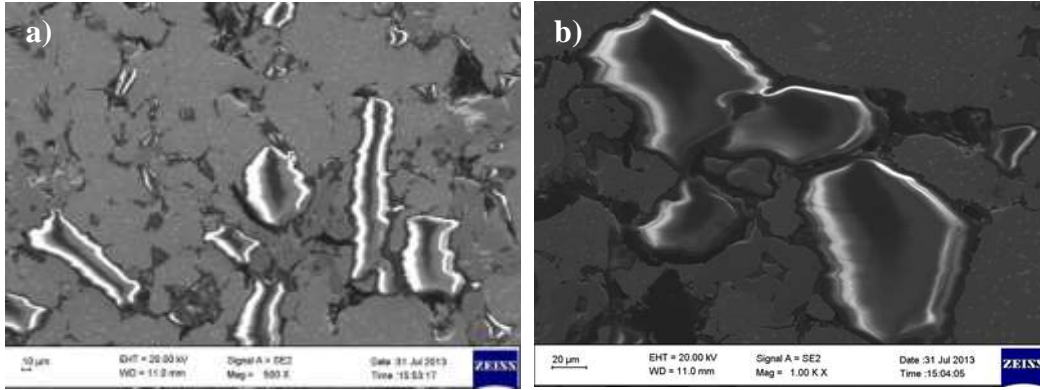


Resim 6.17. % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası



Resim 6.17. (Devam) % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemenin elementel dağılım haritası

Resim 6.18'de % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri görülmektedir. Resim incelendiğinde kümelenmiş cam tozu partikülleri görülür (Resim 6.18.a). Ayrıca bir araya gelen cam tozlarının farklı şekillere ve keskin köşelere sahip oldukları da görülmektedir. Cam tozu partiküllerinin keskin köşelere sahip olması, matris ile cam tozu arayüzey birleşmesinde yapıyı olumsuz etkileyerek cam tozu ile matris arasında boşluk oluşmasına neden olduğu belirlenmiştir (Resim 6.18.b). Cam tozu ile matris arasındaki boşluk, cam tozu ile matris arasında çok iyi bir arayüzey bağının oluşmadığını göstermiştir.



Resim 6.18. a) % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinde gruplaşmış cam partiküllerinin SEM görüntüsü (X500) b) Cam tozu ile matris arayüzeyi (X1000)

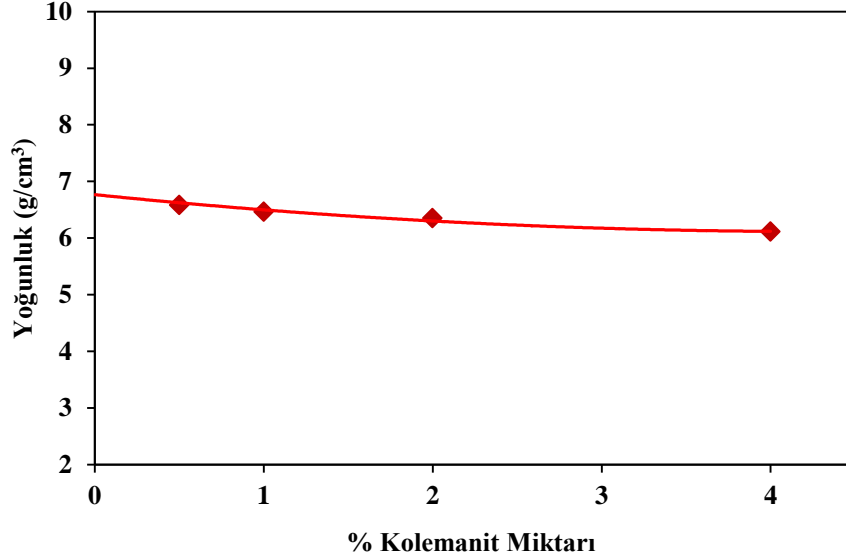
6.3. Kolemanitin Etkisi

A+% 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin sürtünme ve aşınma performansı üzerine kolemanitin etkisini belirlemek amacıyla A+% 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine kütlece farklı oranlarda (% 0,5; % 1; % 2 ve % 4) kolemanit ilave edilerek yeni fren balata malzemeleri üretilmiştir. Farklı oranlarda kolemanit katkılı fren balata malzemelerinin sertlik, yoğunluk, sürtünme-aşınma performansı ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca performans deneyleri sonucunda kolemanit katkılı malzemeler içerisinde en iyi sonucu gösteren malzemenin mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.3.1. Yoğunluk değişimi

% 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri Şekil 6.17'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kolemanit miktarının artması ile fren balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Kolemanit katkısız % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesinin yoğunluğu $6,81 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. Bu malzemeye % 4 kolemanit ilave edildiğinde yoğunluğun yaklaşık % 10 düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun $650 \text{ }^\circ\text{C}$ sinterleme sıcaklığında, kolemanitin sahip olduğu kristal suyu kaybederek gözenekli bir yapıya dönüşmesinden ileri geldiği düşünülmektedir. Kolemanit mineralinin kimyasal formülü $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ olup, bu formüle göre 1 g B_2O_3 0,431 g kristal suyu içerdiği rapor edilmiştir (Kayandan, Pehlevan, Çağlayan ve Türedi, 2004). Ayrıca kolemanit gibi kristal suyu bulduran cevherler ısıtıldıkları zaman, sıcaklık ve zamana bağlı olarak bu suyun bir

kısmını veya tamamını verdikleri ve bu işleminde dehidratasyon veya kalsinasyon olarak adlandırıldığı ifade edilmiştir (Demirkıran ve Künkül, 2011).

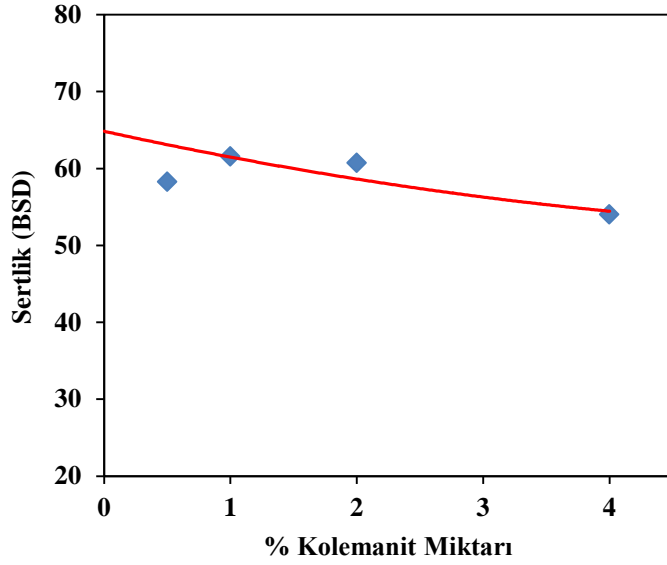


Şekil 6.17. Kolemanit miktarının yoğunluk değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmada kolemanitin optimum kalsinasyon sıcaklığının 600 °C olduğu ve bu sıcaklıkta yapılan kalsinasyon’da gözenekli bir yapının oluştuğu ifade edilmiştir (Davies, Çolak ve Hooper, 1991). Dolayısı ile literatürde ifade edilen tüm bu bulgular mevcut çalışmada elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.

6.3.2. Sertlik değişimi

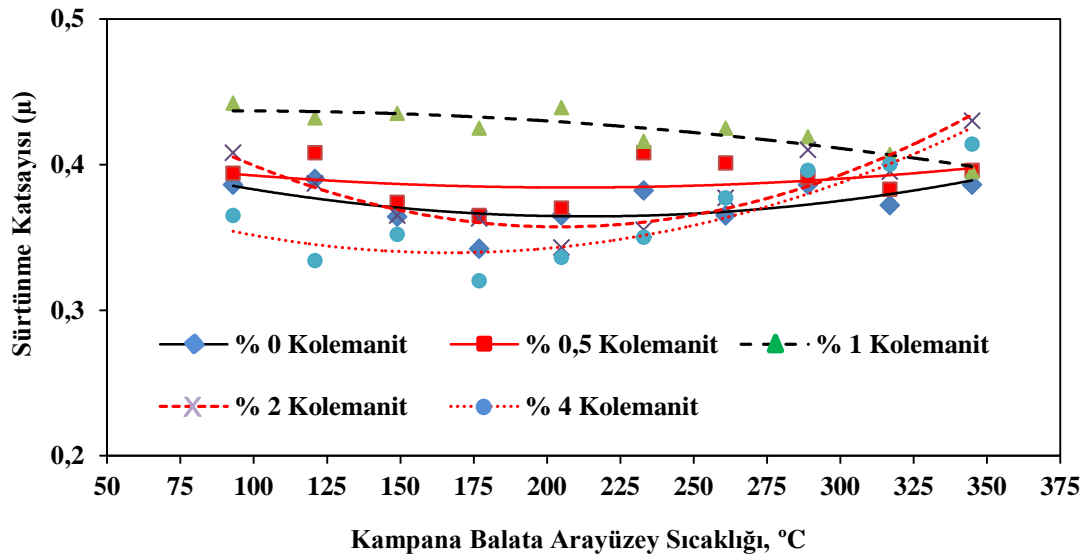
% 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarına bağlı olarak değişen sertlik değerleri Şekil 6.18’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi % 6 uçucu kül takviyeli balata malzemesine % 0,5 kolemanit ilave edildiğinde sertlik değerinin 67 BSD’den 58 BSD’ye düştüğü belirlenmiştir. Kolemanit miktarının % 1 olması ile sertlik değerinin hafif bir artış ile 61,56 BSD’ye çıktığı belirlenmiştir. Bu noktadan sonra artan kolemanit miktarı ile sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Sertlikteki bu azalmanın nedeni olarak Şekil 6.17’deki yoğunluk düşüşü gösterilebilir.



Şekil 6.18. Kolemanit miktarının sertlik değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

6.3.3. Aşınma deney sonuçları

Sürekli kayma koşullarında (Hız 411 1/min, yük 670 N) % 6 uçucu kül takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda (% 0,5; % 1; % 2 ve % 4) kolemanit ilavesi ile hazırlanan fren balata numunelerinin sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 6.19’da görülmektedir.

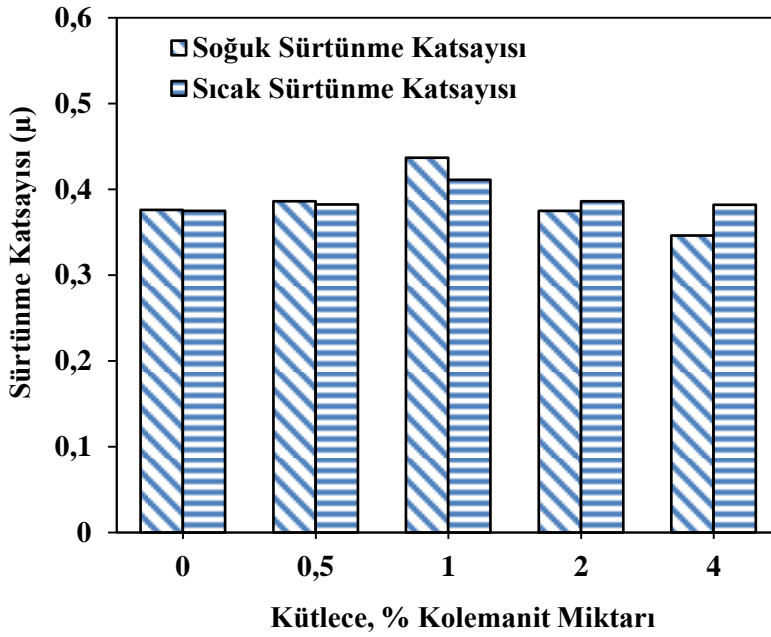


Şekil 6.19. Arayüzey sıcaklığı ve kolemanit yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.19’da görüldüğü gibi kampana-balata arayüzey sıcaklığına bağlı en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,364) % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemesi verirken, en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,423) ise % 1 kolemanit katkılı fren balata malzemesi vermiştir. Şekil incelendiğinde % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine % 0,5 ve % 1 kolemanit ilave edilmesi ile fren balata malzemelerinin sıcaklığa bağlı ortalama sürtünme katsayılarının yükseldiği bu orandan sonra kolemanit miktarındaki artışa bağlı olarak ortalama sürtünme katsayılarının düştüğü belirlenmiştir. Bu durum, fren balata malzemelerinin aşınma yüzeyinde oluşan temas yamalarının varlığı ile açıklanabilir. Kolemanit miktarının % 1’e kadar artması ile fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde yeterli temas yamalarının oluştuğu bu orandan sonra artan kolemanit miktarına bağlı olarak yeterli temas yamalarının oluşmadığı belirlenmiştir (Resim 6.19). Balata malzemelerinin aşınma yüzeyinde oluşan bu temas yamalarının, sürtünme katsayılarının artışını sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca % 0,5 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin % 1; % 2 ve % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemelerine göre artan sürtünme arayüzey sıcaklığı karşısında daha iyi sürtünme katsayısı kararlılığı gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun, % 0,5 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde kararlı temas yamalarının oluşmasından ileri geldiği düşünülmektedir (Resim 6.19.a). Daha önce yapılan birçok çalışmada bu konuda benzer bulgulara ulaşılmıştır (Abadi ve diğerleri, 2010; Kchaou ve diğerleri, 2013; Kim ve diğerleri, 2007).

% 2 ve % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemelerinin sürtünme katsayılarında arayüzey sıcaklığı 233 °C’yi geçtikten sonra artış yönünde bir eğilim olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.19). Bu durumun karşı malzeme olarak kullanılan gri dökme demir kampana malzemesinin ve fren balata malzemelerinin artan arayüzey sıcaklığı ile özelliklerinin değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira sürtünme çiftinin değişen özellikleri sürtünme katsayılarının değişmesine neden olur. Kim ve diğerleri (2007) tarafından yapılan çalışmada bu konuda benzer bulgulara ulaşılmıştır (Kim ve diğerleri, 2007).

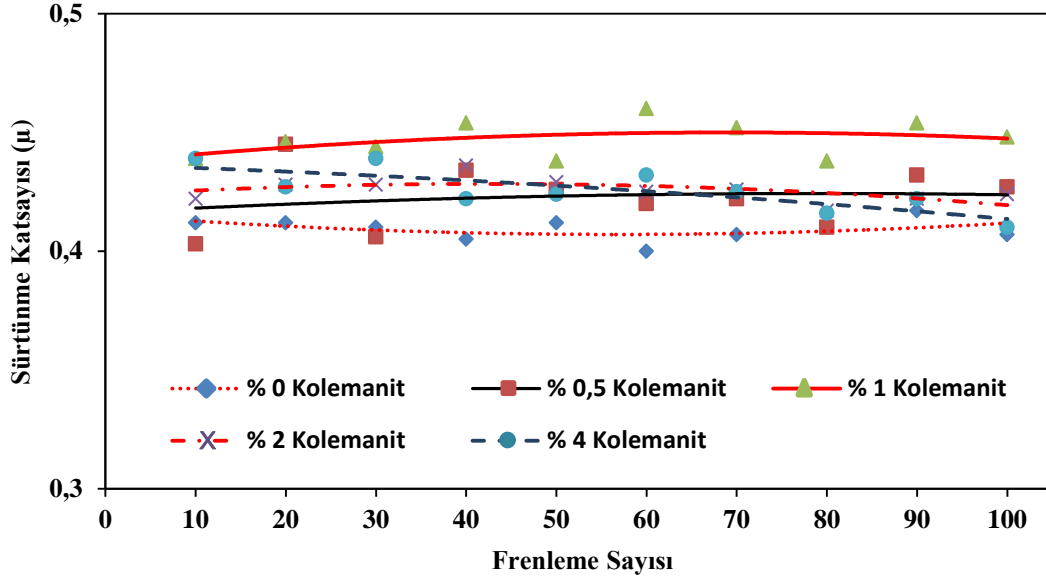
Şekil 6.20’de % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarına bağlı olarak değişen sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kolemanit miktarının % 0,5’den % 1’e artması ile soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının arttığı ancak bu orandan sonra artan kolemanit miktarı ile soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.20. Kolemanit miktarının soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

En düşük soğuk sürtünme katsayısı değeri (0,346) % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemesinde belirlenirken en yüksek soğuk sürtünme katsayısı değeri (0,437) % 1 kolemanit katkılı fren balata malzemesinde belirlenmiştir. En düşük sıcak sürtünme katsayısı değeri (0,375) kolemanit katkısız fren balata malzemesinde belirlenirken en yüksek sıcak sürtünme katsayısı değeri (0,411) % 1 kolemanit katkılı fren balata malzemesinde belirlenmiştir. Ayrıca % 2 ve % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemelerinin sıcak sürtünme katsayılarının soğuk sürtünme katsayılarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

% 6 uçucu kül takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda kolemanit ilavesi ile hazırlanan numunelerin frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 6.21’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi frenleme sayısına bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,447) % 1 kolemanit katkılı fren balata malzemesi gösterirken, en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,409) kolemanit içermeyen balata malzemesi göstermiştir.

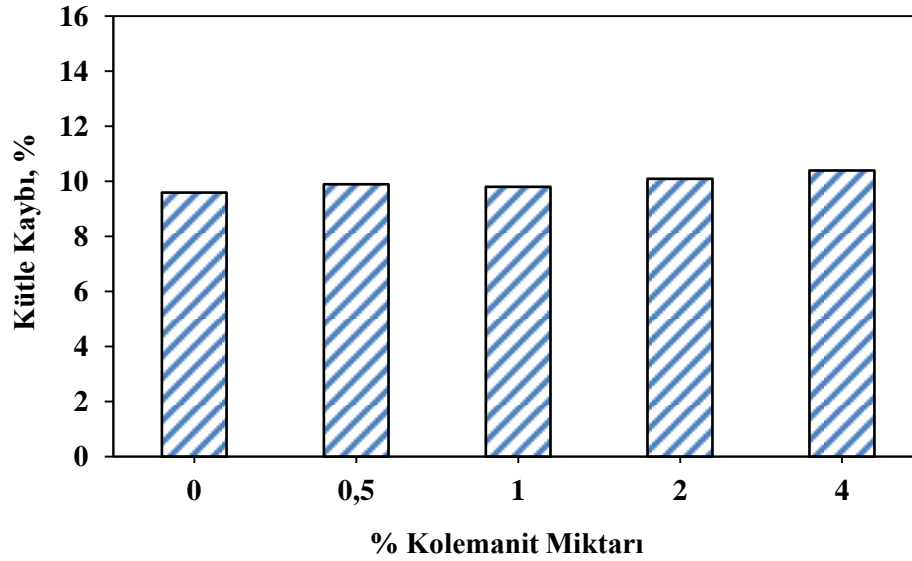


Şekil 6.21. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine kolemanit miktarının etkisi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekilde görüldüğü gibi fren balata malzemelerinin frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değerlerinde inişli çıkışlı sürekli bir değişim görülmektedir. Bu durumun sebebi, Anderson tarafından balata temas yüzeyinde ısıl yükün homojensizliğinden olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Burada deney süresince disk yüzeyindeki temas bölgelerinin içine doğru ısıdaki değişim periyodik olarak değişir. Bu etkiden dolayı sürtünme katsayısında sürekli bir değişim meydana gelir (Anderson, 1992). Ayrıca bu durumun başka bir nedeni olarak Stackhowiak ve Batchelor, (2001) sürtünme çiftlerinin yüzeyindeki pürüzlerde birleşme olması ve büyümesi ile açıklar. Bu durumda bir yapışma ve bir bırakma hali sürekli tekrarlanır, bu da sürtünme katsayısında sürekli artma ve azalma olmasına sebep olur (Stachowiak ve Batchelor., 2001). Artan frenleme sayısı ile fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değişimlerinin literatürle benzerlik gösterdiği Şekil 6.21'den tespit edilmiştir.

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda kolemanit ilavesi ile hazırlanan balata numunelerinin aşınma sonrası kütle kayıp oranları Şekil 6.22'de görülmektedir. Şekilde kolemanit içermeyen fren balata malzemesinde % 9,6 kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. Bu balata malzemesine % 0,5 kolemanit ilave edildiğinde kütle kaybının hafif bir artış ile % 9,9'a yükseldiği belirlenmiştir. Kolemanit miktarının % 1 olması ile kütle kaybının % 9,8'e

düştüğü görülmüştür. Bu noktadan sonra kolemanit miktarının % 2 ve % 4'e artması ile kütle kayıplarının sırası ile % 10,1 ve 10,4'e yükseldiği belirlenmiştir.

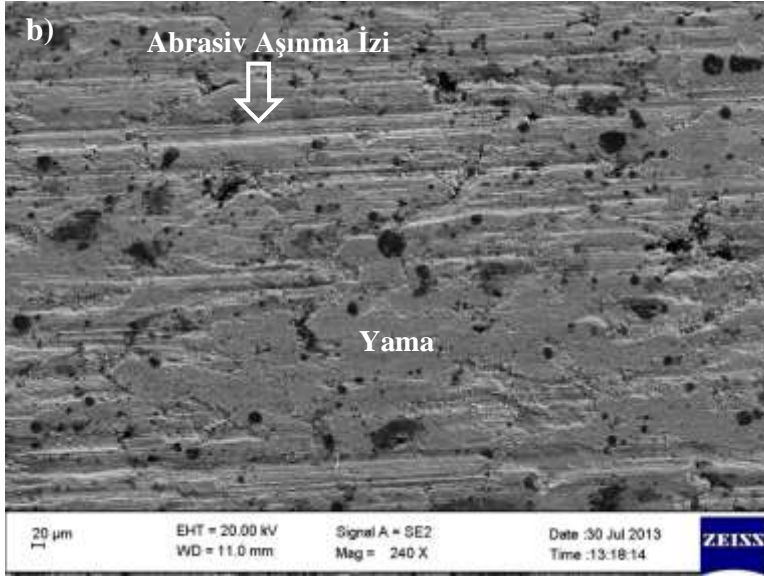
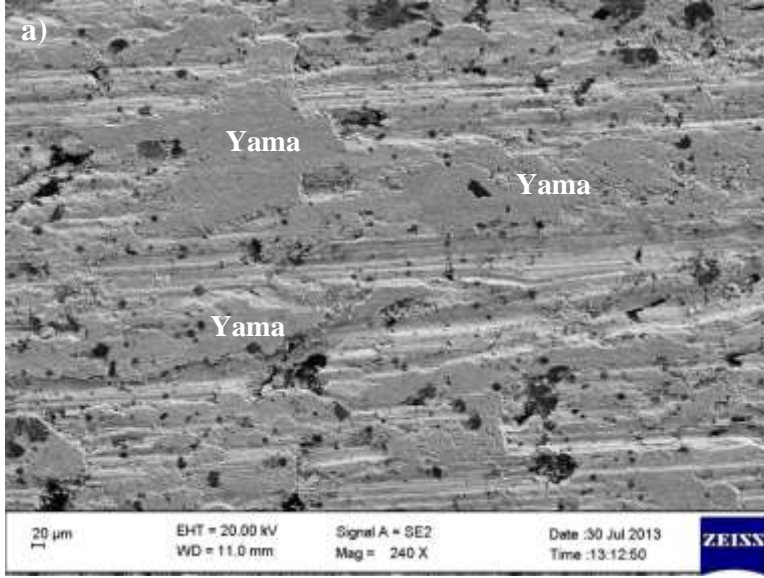


Şekil 6.22. Kolemanit miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (A+% 6 U.K.; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Özellikle % 1 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin % 9,8 kütle kaybı ile kolemanit katkılı fren balata malzemeleri içerisinde en düşük kütle kaybını gösterdiği belirlenmiştir

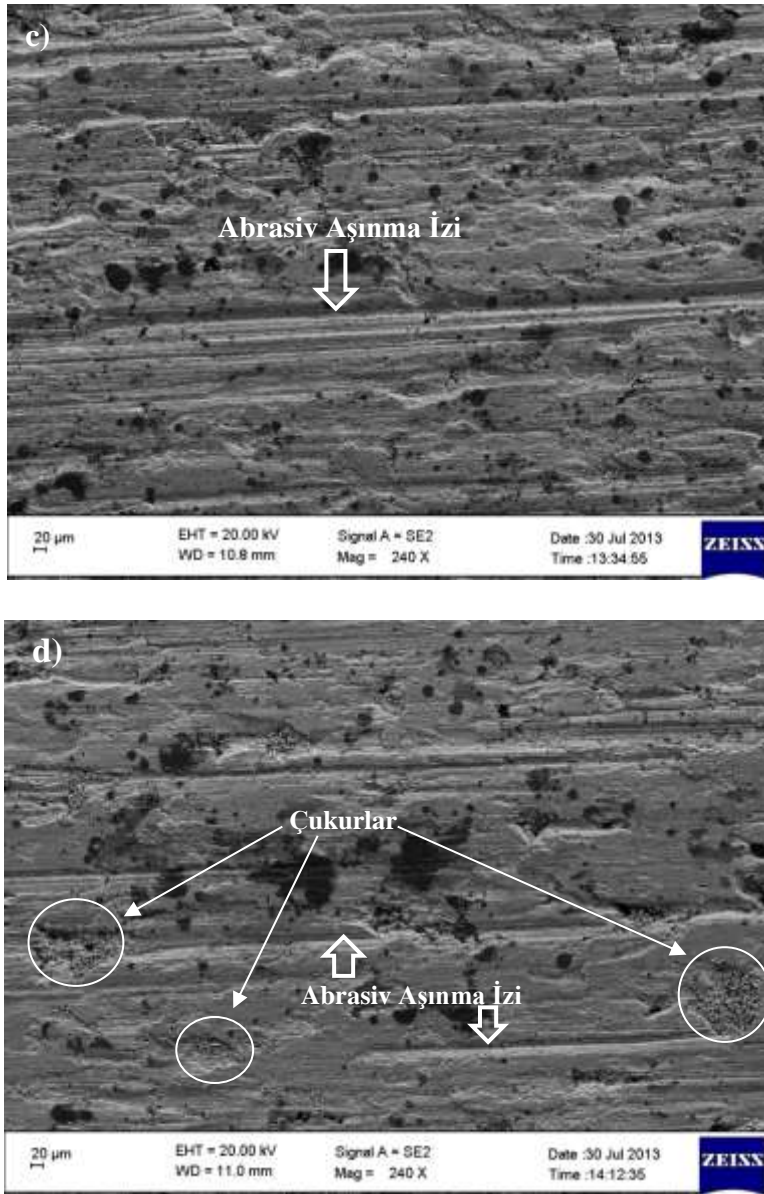
6.3.4. Aşınma yüzey analizi

Farklı oranlarda kolemanit katkılı balata malzemelerinin SAE J661 test standardına göre yapılan sürtünme-aşınma deneyleri sonrası aşınma yüzeylerinde meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları Resim 6.19'da görülmektedir.



Resim 6.19. Artan kolemanit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri (X240)

a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 kolemanit



Resim 6.19. (Devam) Artan kolemanit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri (X240)

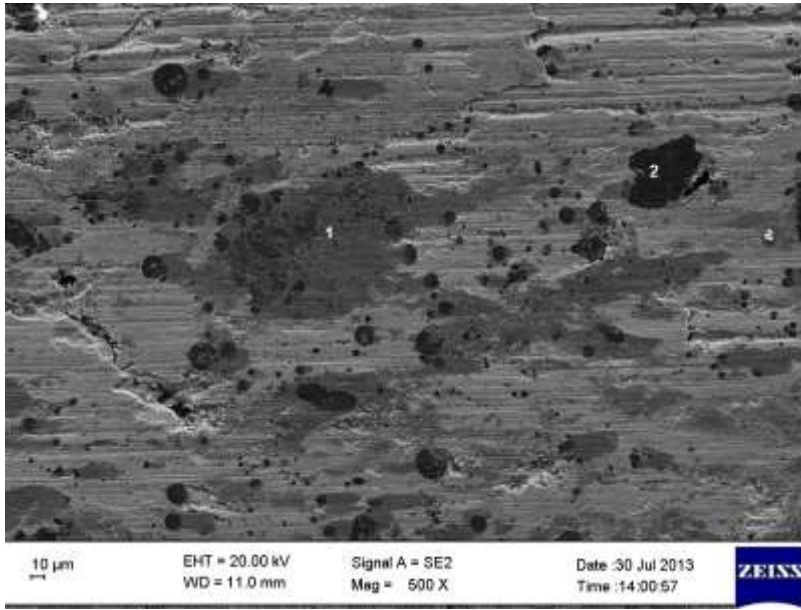
a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 kolemanit

Resim 6.19 incelendiğinde % 0,5 kolemanit katkıli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde temas yamalarının (yüzey filmlerinin) oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.19.a). Benzer şekilde % 1 kolemanit katkıli fren balata malzemesinin de aşınma yüzeyinde temas yamalarının oluştuğu görülmüştür. Ayrıca oluşan bu yamaların yanında abrasiv aşınma izlerinin de oluştuğu tespit edilmiştir (Resim 6.19.b). % 0,5 ve % 1 kolemanit katkıli fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde oluşan temas yamalarının balata malzemelerini aşınmaya karşı koruduğu ve ayrıca sürtünme katsayısı kararlılığına da katkı sağladığı

düşünülmektedir. Österle ve Urban (2005) yaptıkları çalışmada sürtünme katsayısının kararlılığı üzerine aynı tespitte bulunmuşlardır (Österle ve Urban, 2005).

% 2 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi incelendiğinde yüzeyde fren balata malzemesini aşınmaya karşı koruyacak yeterli temas yamalarının oluşmadığı ve abrasiv aşınma izlerinin daha da derinleştiği görülmektedir (Resim 6.19.c). Dolayısı ile yetersiz yüzey yamaları ve derinleşen abrasiv aşınma izleri fren balata malzemesinin kütle kaybının artmasına neden olmuştur. % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi incelendiğinde yüzeyde abrasiv aşınma izlerinin yanı sıra kütle kaybının daha da artmasına neden olacak çukurların oluştuğu görülmektedir (Resim 6.19.d).

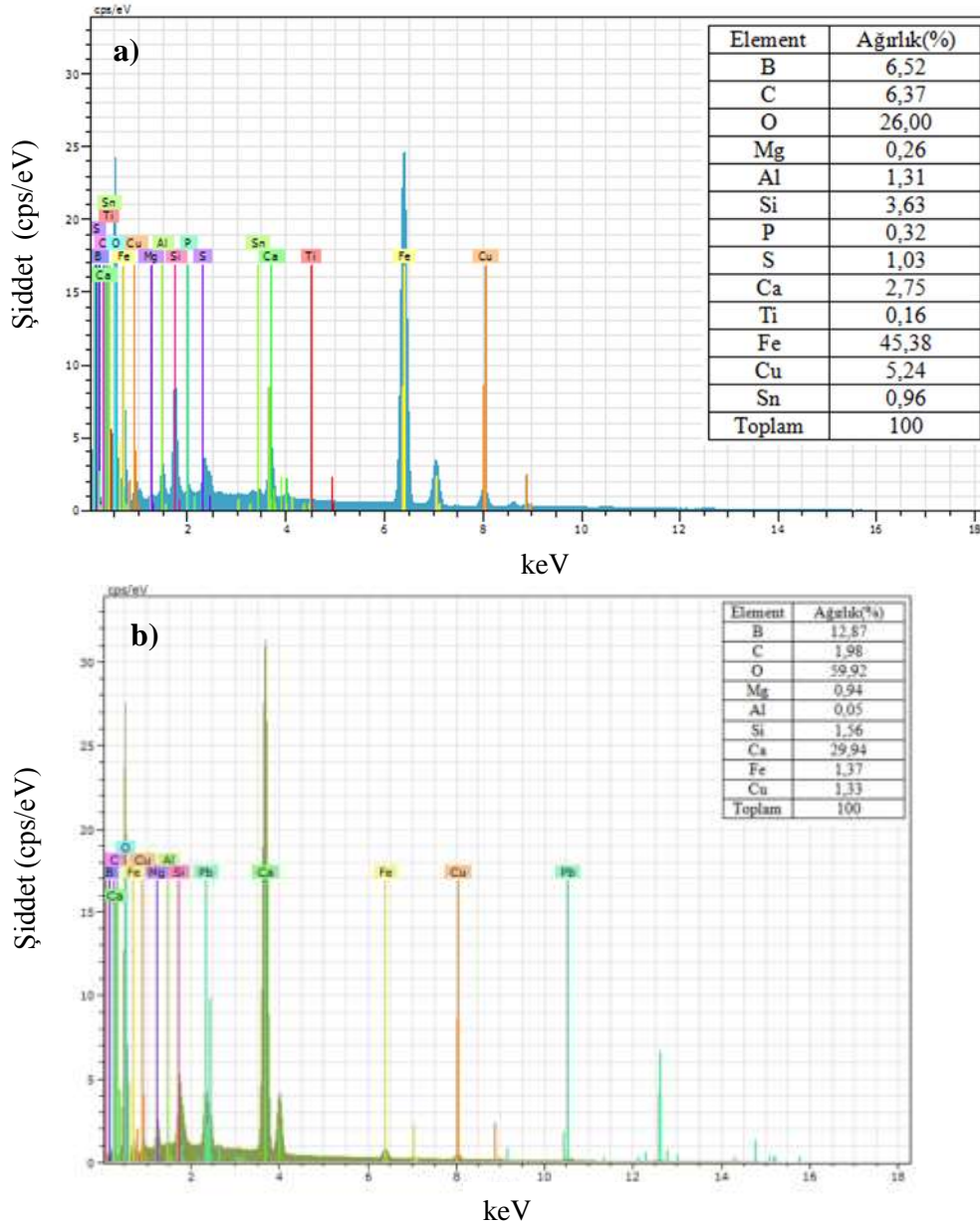
Resim 6.20’de % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin aşınma yüzey resmi görülmektedir. Resim 6.20’de 1 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analizinde bu noktanın demir, oksijen ve bir miktar bor ve kalsiyum elementlerinden oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.23.a).



Resim 6.20. % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500)

Resim 6.20’de 2 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analizinde bu noktanın % 59,92 oksijen, 29,94 kalsiyum, % 12,87 bor ve düşük miktarda karbon, magnezyum, alüminyum, silisyum, demir ve bakır elementlerinden oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.23.b). Elde edilen bu sonuçlar bu noktadaki fazın kolemanit partikülü olduğunu göstermektedir. Bu durum

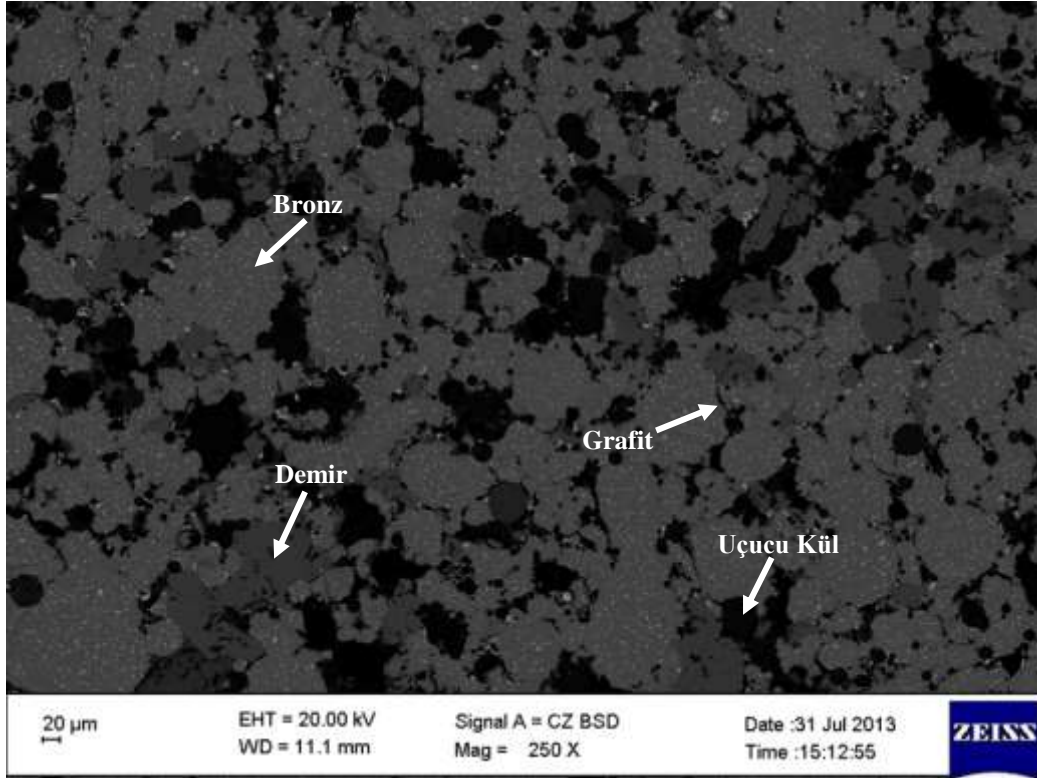
kolemanitin matris içerisinde tamamen çözünmeyip aşınma işlemine partikül halinde de dahil olduğunu göstermektedir. Ancak bor elementinin atom çapı küçük olduğundan EDS analizi sonucunda tespit edilen bor yüzdesi tam olarak doğru değildir. Bundan dolayı EDS analiz sonuçları balata malzemeleri içerisindeki net bor miktarının belirlenmesinden ziyade bor elementi içeren kolemanit partiküllerin yapı içerisindeki dağılımının ve partikül türünün belirlenmesi açısından önemlidir.



Şekil 6.23. % 4 kolemanit katkılı fren balata numunesinin aşınma yüzeyi üzerinden alınan a) 1 numaralı noktanın b) 2 numaralı noktanın EDS analizi

6.3.5. Mikro yapı incelemesi

Yoğunluk, sertlik ve sürtünme-aşınma sonuçları açısından en iyi değerleri gösterdiği düşünülen A+% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesinin mikroyapısı incelenmiştir. Resim 6.21'de A+% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesinin BSE görüntüsü Resim 6.22'de ise elementel dağılım haritası görülmektedir.

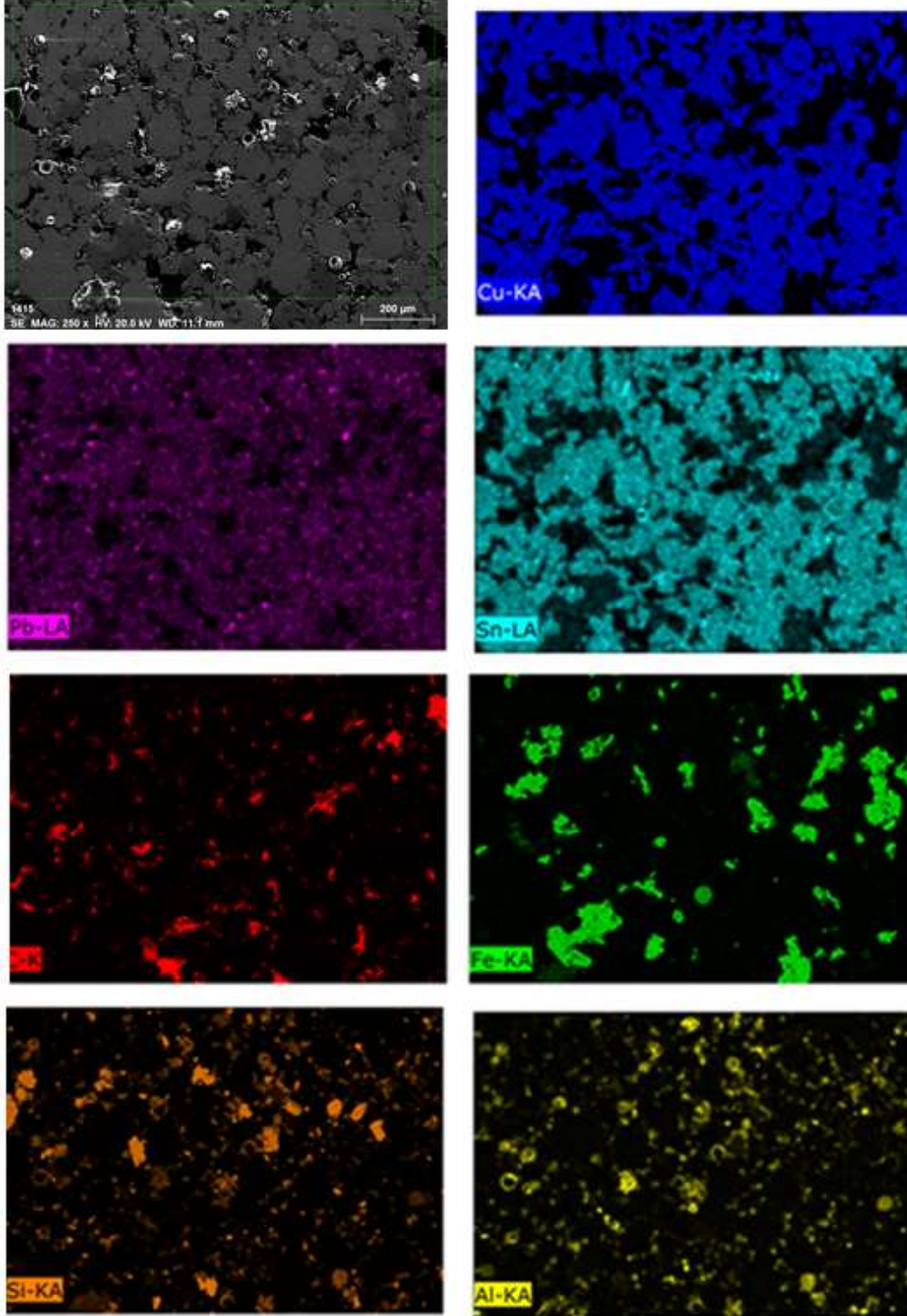


Resim 6.21. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü

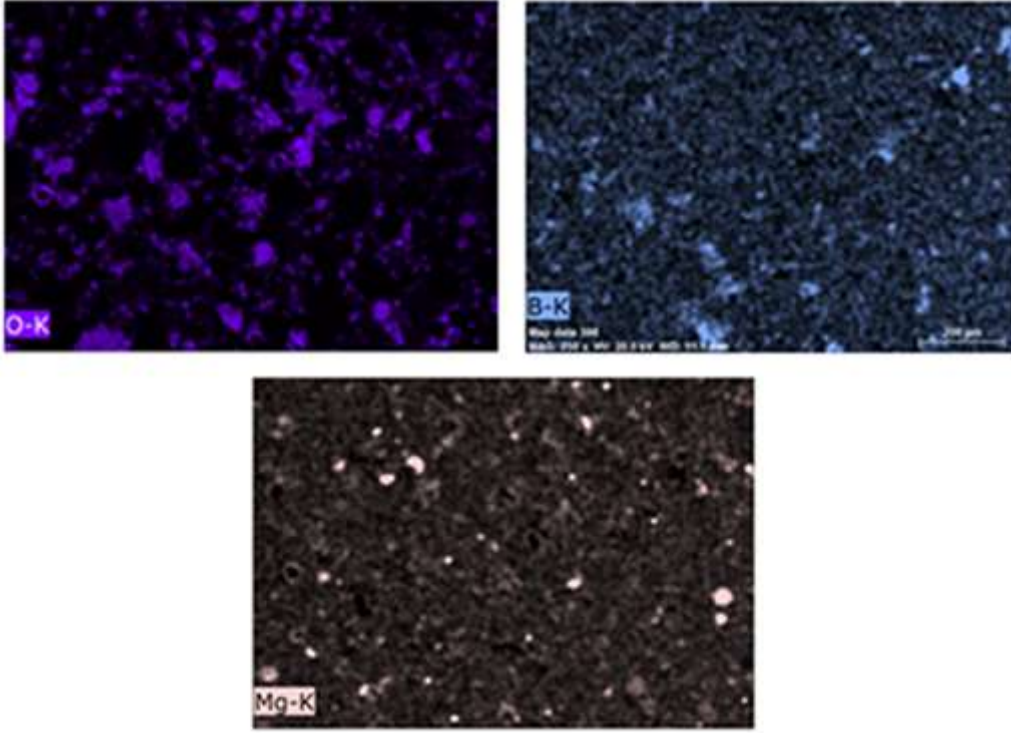
Resim 6.21'deki BSE görüntüsü ve 6.22'deki elementel dağılım haritası incelendiğinde matrisi oluşturan bileşenlerin (bakır, kalay, kurşun, demir, grafit, uçucu kül) yapı içinde üniform olarak dağıldığı görülmektedir. Ayrıca matris içinde bulunan demir partiküllerinin matrise difüze olmayıp partikül halinde bulunduğu tespit edilmiştir (Resim 6.22). Grafitin ise ağırlıklı olarak bronz tanelerinin sınırlarında toplandığı görülmüştür.

Resim 6.22'de kolemaniti oluşturan bir bileşen olan bor elementinin yapı içerisine tamamen difüze olmayıp grafit partiküllerinin bulunduğu noktalarda toplandığı görülmektedir. Bu sonuç kolemanitin de bu noktalarda bulunduğu şeklinde

yorumlanmıştır. Dolayısı ile kolemanit ve grafit partiküllerinin tane sınırlarında toplandığı söylenebilir.



Resim 6.22. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası



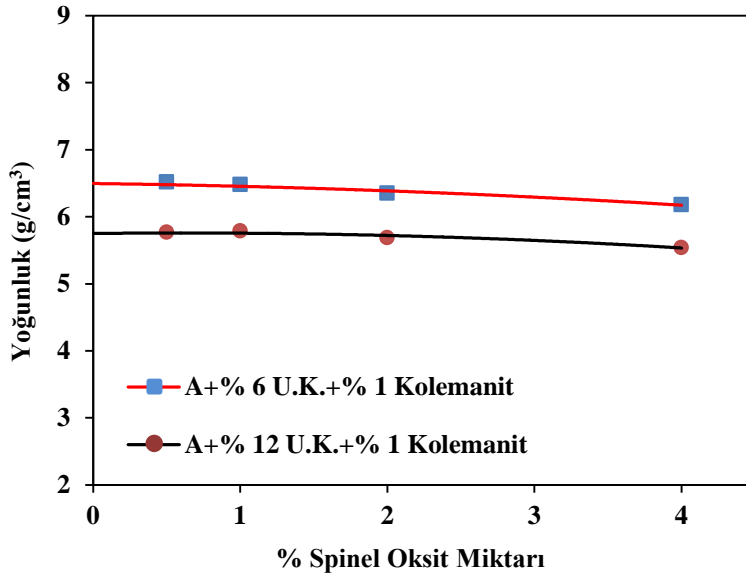
Resim 6.22. (Devam) % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası

6.4. Spinel Oksitin Etkisi

A+% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi ile A+% 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine farklı oranlarda (% 0,5; % 1; % 2 ve % 4) spinel oksit ilave edilerek yeni fren balata malzemeleri üretilmiştir. Üretilen bu yeni fren balata malzemelerinin yoğunluk, sertlik, sürtünme-aşınma performansı ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca performans deneyleri sonucunda spinel oksit katkılı balata malzemeleri içerisinde en iyi sonucu gösteren fren balata malzemelerinin mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.4.1. Yoğunluk değişimi

% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi ile % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri Şekil 6.24'de görülmektedir.

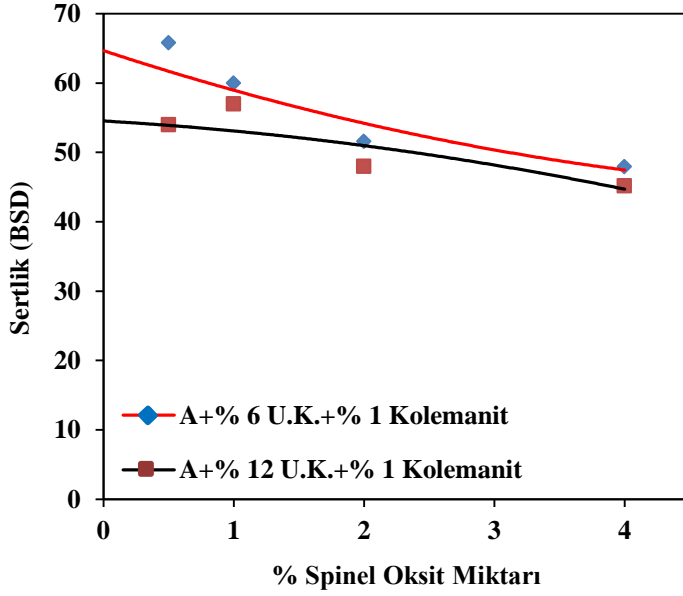


Şekil 6.24. Spinel oksit miktarının yoğunluk değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekilde görüldüğü gibi % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinin tüm spinel oksit miktarlarında % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Aynı oranda spinel oksit içeren balata malzemelerinde artan uçucu kül miktarı ile yoğunlukların düşmesinin sebebi uçucu kül tozunun metal tozların sıkıştırılabilirlik özelliğini azaltmasına bağlı olarak gözenek miktarı ve boyutunun artmış olmasındandır. Şekilde görüldüğü gibi % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin yoğunluk değeri $6,46 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Bu balata malzemesine % 0,5 spinel oksit ilave edildiğinde yoğunluk değerinin hafif bir artış ile $6,52 \text{ g/cm}^3$ 'e yükseldiği, % 1, % 2 ve % 4 spinel oksit ilave edildiğinde ise yoğunluk değerlerinin sırası ile 6,48; 6,35 ve $6,18 \text{ g/cm}^3$ 'e düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin yoğunluğu $5,73 \text{ g/cm}^3$ iken bu malzemeye % 4 spinel oksit ilave edildiğinde yoğunluk değerinin yaklaşık % 3,31 düştüğü belirlenmiştir. Artan spinel oksit miktarı ile yoğunluk değerlerindeki bu düşüşün nedeni olarak artan spinel oksit miktarı ile birlikte matris/takviye arayüzey alanının artması ve bunun da gözenekliliği artırması gösterilebilir (Resim 6.28.b).

6.4.2. Sertlik değişimi

% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi ile % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen sertlik değerleri Şekil 6.25’de görölmektedir.

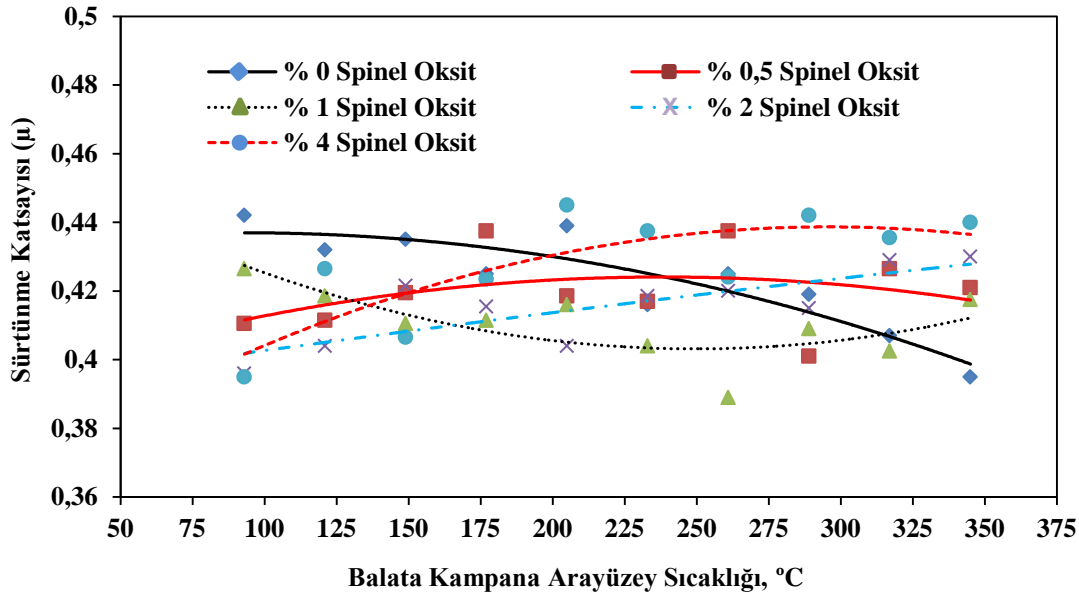


Şekil 6.25. Spinel oksit miktarının sertlik değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.25’de göröldüğü gibi % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesinin sertlik değeri 61 BSD olarak bulunmuştur. Bu balata malzemesine % 0,5 spinel oksit ilave edildiğinde sertlik değerinin bir miktar artış ile 65 BSD’ye yükseldiği belirlenmiştir. Bu noktadan sonra % 1, % 2 ve % 4 spinel oksit ilave edildiğinde sertlik değerlerinin sırası ile 60, 51 ve 48 BSD’ye düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde en yüksek sertlik değeri 57 BSD ile % 1 spinel oksit katkılı fren balata malzemesinde, en düşük sertlik değeri ise 45 BSD ile % 4 spinel oksit katkılı fren balata malzemesinde belirlenmiştir. Şekilde göröldüğü gibi % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde en yüksek sertlik değeri % 0,5 spinel oksit katkılı numunede, % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde ise % 1 spinel oksit katkılı numunede belirlenmiştir. Bu durumun nedeni olarak bu balata malzemelerinin kendi grupları içerisinde en yüksek yoğunluk değerine sahip olması gösterilebilir. Genel olarak yoğunluk değerlerinin azalması ile fren balata malzemelerinin sertlik değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

6.4.3. Aşınma deney sonuçları

% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda spinel oksit ilavesi ile hazırlanan numunelerin sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı sürtünme katsayı değişimleri Şekil 6.26'da görülmektedir.



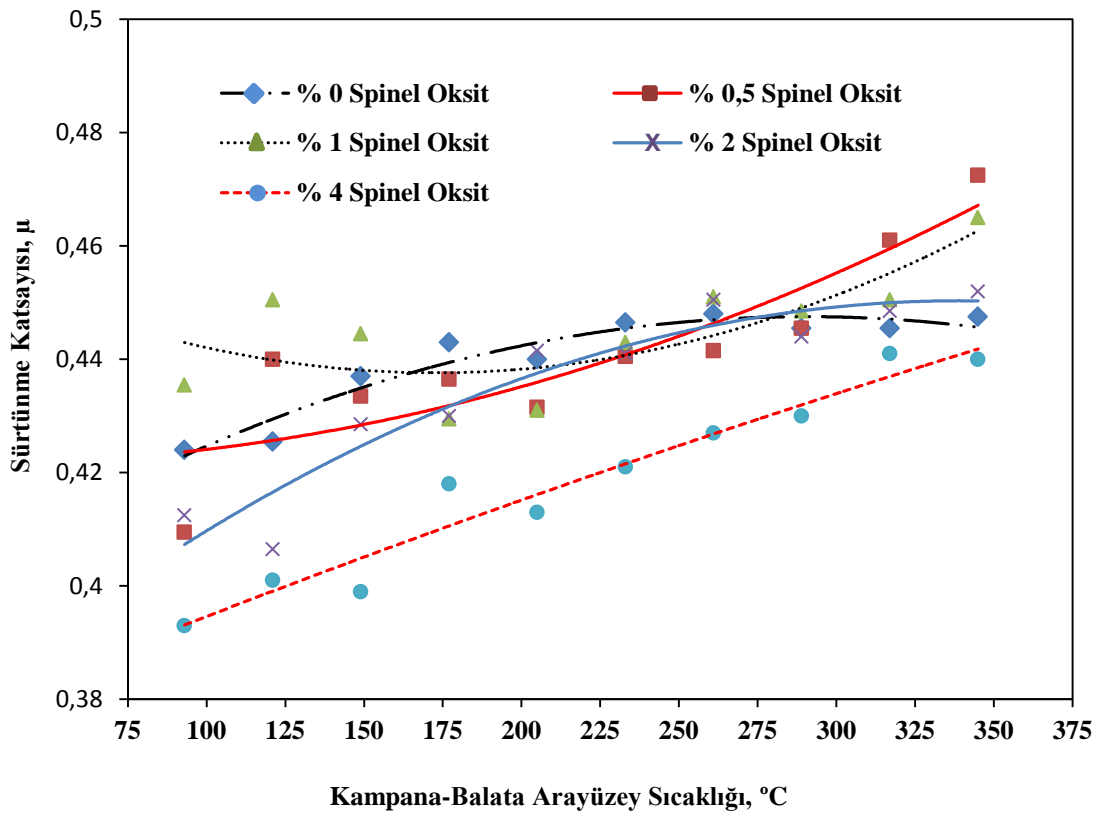
Şekil 6.26. Arayüzey sıcaklığının ve spinel oksit yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.26'da görüldüğü gibi kampana-balata arayüzey sıcaklığına bağlı en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,410) % 1 spinel oksit katkıli fren balata malzemesi verirken en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri (0,427) ise % 4 spinel oksit katkıli fren balata malzemesi vermiştir. Şekilde görüldüğü gibi spinel oksit içermeyen % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin sürtünme katsayı değerinin 150 °C'den sonra lineer olarak azaldığı, % 0,5 spinel oksit katkıli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin ise yaklaşık 240 °C'ye kadar arttığı bu noktadan sonra artan arayüzey sıcaklığı ile azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca % 1 spinel oksit katkıli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin 225 °C'ye kadar azaldığı bu noktadan sonra artan arayüzey sıcaklığı ile artış yönünde bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. % 2 spinel oksit katkıli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin artan arayüzey sıcaklığı ile düşmediği tam tersine yükseldiği belirlenmiştir. % 4 spinel oksit katkıli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin de 250 °C'ye kadar arttığı, bu noktadan sonra artan arayüzey sıcaklığı ile kararlı bir sürtünme katsayısı

davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Şekilden de görülebildiği gibi balata malzemesine ilave edilen spinel oksit artan sürtünme arayüzey sıcaklıklarında sürtünme katsayısı kararlılığını geliştirdiği söylenebilir.

% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda spinel oksit ilavesi ile hazırlanan numunelerin artan sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı sürtünme katsayısı değişimleri değerlendirildiğinde en kararlı sürtünme katsayısı değişimini % 2 spinel oksit katkılı balata malzemesinin en kararsız sürtünme katsayısı değişimini ise spinel oksit katkısız % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 6.26).

% 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda (% 0,5; % 1; % 2 ve % 4) spinel oksit ilavesi ile hazırlanan numunelerin sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 6.27'de görülmektedir.

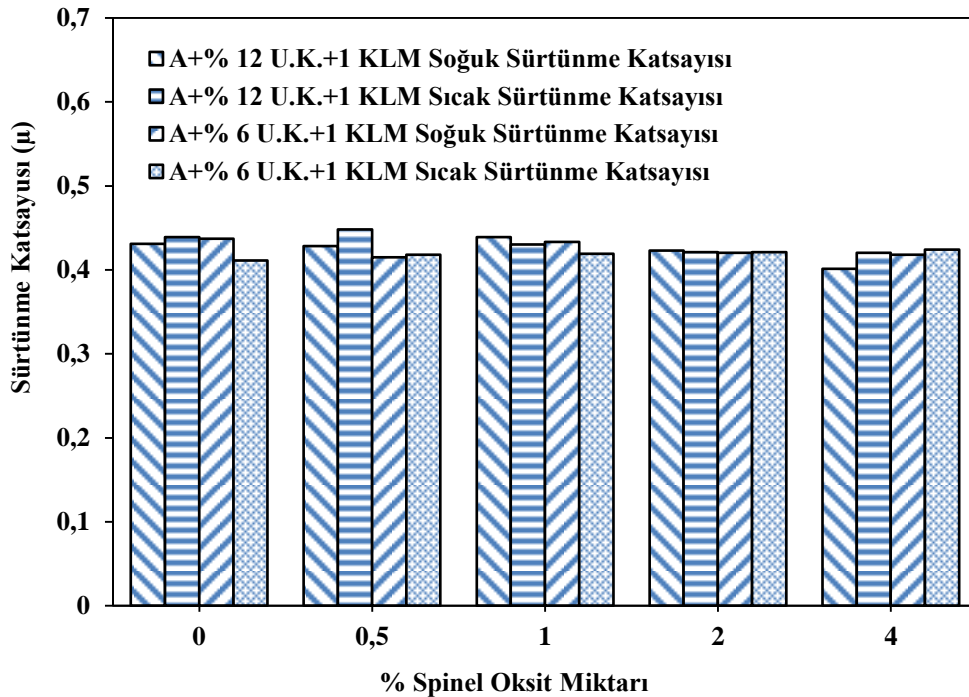


Şekil 6.27. Arayüzey sıcaklığının ve spinel oksit yüzdesinin sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.27’de görüldüğü gibi kampana-balata arayüzey sıcaklığına bağlı en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,418) % 4 spinel oksit katkıli fren balata malzemesi verirken en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,444) ise % 1 spinel oksit katkıli fren balata malzemesi vermiştir. Şekilde görüldüğü gibi spinel oksit katkıli fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin artan sürtünme arayüzey sıcaklığı ile düşmediği belirlenmiştir. Bu durum spinel oksit katkıli fren balata malzemelerin karşı yüzeye yeterli tutunma kuvveti uygulayarak artan sıcaklıkla sürtünme katsayılarının düşmesini engellediği şeklinde yorumlanmıştır.

% 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda spinel oksit ilavesi ile hazırlanan numunelerin sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimleri değerlendirildiğinde en kararlı sürtünme katsayısı değişimini spinel oksit içermeyen balata malzemesinin en kararsız sürtünme katsayısı değişimini ise % 0,5 spinel oksit katkıli fren balata numunesinin gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 6.27).

Şekil 6.28’de % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi ile % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen soğuk ve sıcak sürtünme katsayıları görülmektedir.

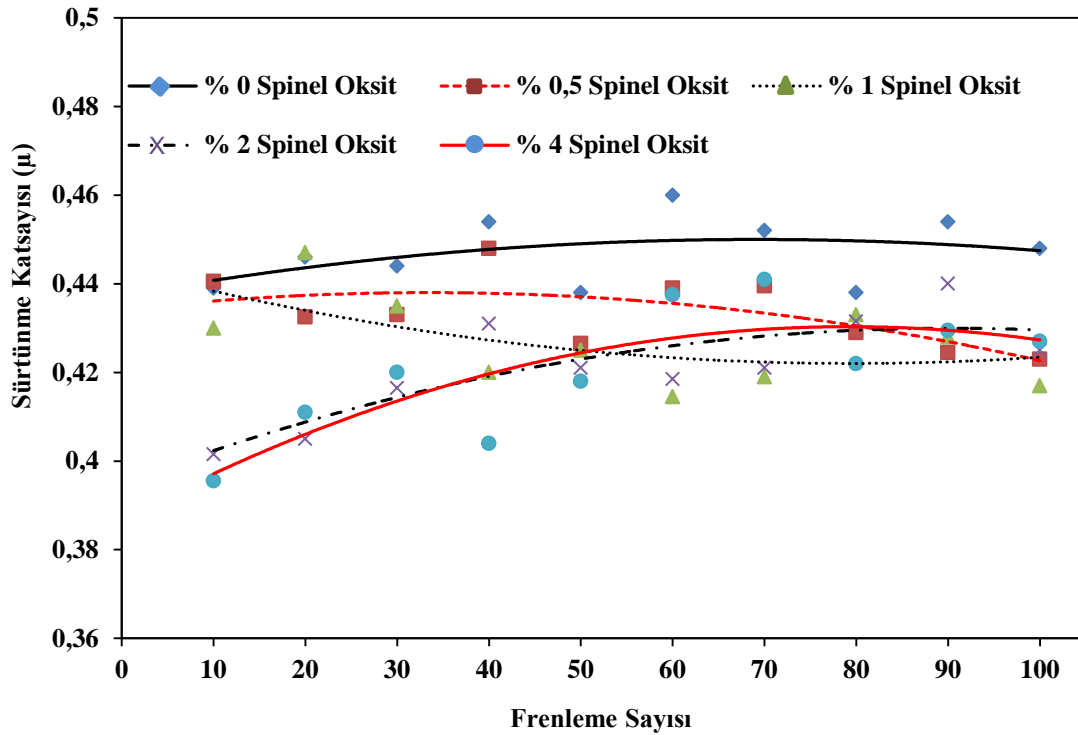


Şekil 6.28. Spinel oksit miktarının soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; A+%12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.28'de görüldüğü gibi % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine % 0,5 spinel oksit ilave edilmesi ile fren balata malzemesinin soğuk sürtünme katsayısının 0,437'den 0,415'e düştüğü sıcak sürtünme katsayısının ise bir miktar artış ile 0,411'den 0,418'e yükseldiği belirlenmiştir. Spinel oksit miktarının % 0,5'den % 1'e yükselmesi ile soğuk sürtünme katsayısının bir miktar artış ile 0,433'e sıcak sürtünme katsayısının ise çok az bir artış ile 0,419'a yükseldiği belirlenmiştir. Bu noktadan sonra spinel oksit miktarının % 2'den % 4'e artması ile soğuk sürtünme katsayısının bir miktar düşüş ile 0,420'den 0,418'e düştüğü sıcak sürtünme katsayısının ise hafif bir artış ile 0,421'den 0,424'e yükseldiği belirlenmiştir.

% 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine % 0,5 spinel oksit ilave edilmesi ile soğuk sürtünme katsayısının 0,431'den 0,428'e düştüğü sıcak sürtünme katsayısının ise bir miktar artış ile 0,439'dan 0,448'e yükseldiği belirlenmiştir. Spinel oksit miktarının % 0,5'den % 1'e yükselmesi ile soğuk sürtünme katsayısının bir miktar artış ile 0,439'a yükseldiği ancak sıcak sürtünme katsayısının bir miktar düşüş ile 0,430'a düştüğü belirlenmiştir. Bu noktadan sonra spinel oksit miktarının % 2'den % 4'e artması ile soğuk sürtünme katsayısının 0,423'den 0,401'e ve sıcak sürtünme katsayısının da 0,421'den 0,400'e düştüğü belirlenmiştir. Spinel oksit katkılı tüm numuneler içerisinde en yüksek soğuk sürtünme katsayısı değerini (0,439) % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 1 spinel oksit takviyeli balata malzemesinin en yüksek sıcak sürtünme katsayısı değerini (0,448) ise % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 0,5 spinel oksit takviyeli balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca % 2 spinel oksit katkılı fren balata malzemelerinin sıcak ve soğuk sürtünme katsayılarının birbirine oldukça yakın değerler gösterdiği belirlenmiştir.

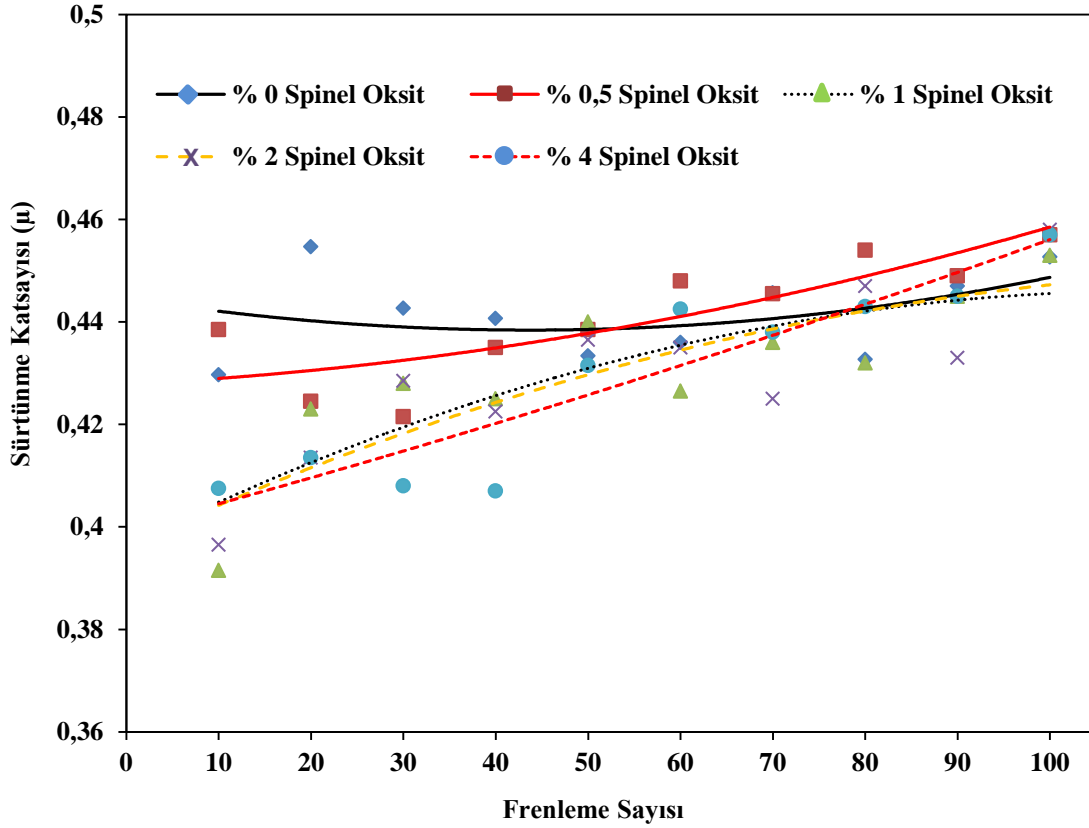
% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda spinel oksit ilavesi ile hazırlanan numunelerin frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayı değişimleri Şekil 6.29'da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi frenleme sayısına bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,447) spinel oksit katkısız % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi gösterirken en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,420) ise % 4 spinel oksit katkılı balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 6.29. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine spinel oksit miktarının etkisi (A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.29’da % 0,5 spinel oksit katkıli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinde 50. frenlemeye kadar kararlı bir değişim görülürken bu noktadan sonra artan frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerinde azalma eğilimi görülmüştür. % 1 spinel oksit katkıli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin yaklaşık 70. frenlemeye kadar azaldığı bu noktadan sonra ise artan frenleme sayısına bağlı olarak kararlı bir sürtünme katsayısı davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca % 2 ve % 4 spinel oksit katkıli fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin yaklaşık 65. frenlemeye kadar arttığı bu noktadan sonra artan frenleme sayısına bağlı olarak kararlı bir sürtünme katsayısı davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

% 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda spinel oksit ilavesi ile hazırlanan numunelerin frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayı değişimleri Şekil 6.30’da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi frenleme sayısına bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri (0,441) spinel oksit katkısız % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinde, en düşük ortalama sürtünme katsayısı değeri (0,429) ise % 4 spinel oksit katkıli fren balata malzemesinde belirlenmiştir.

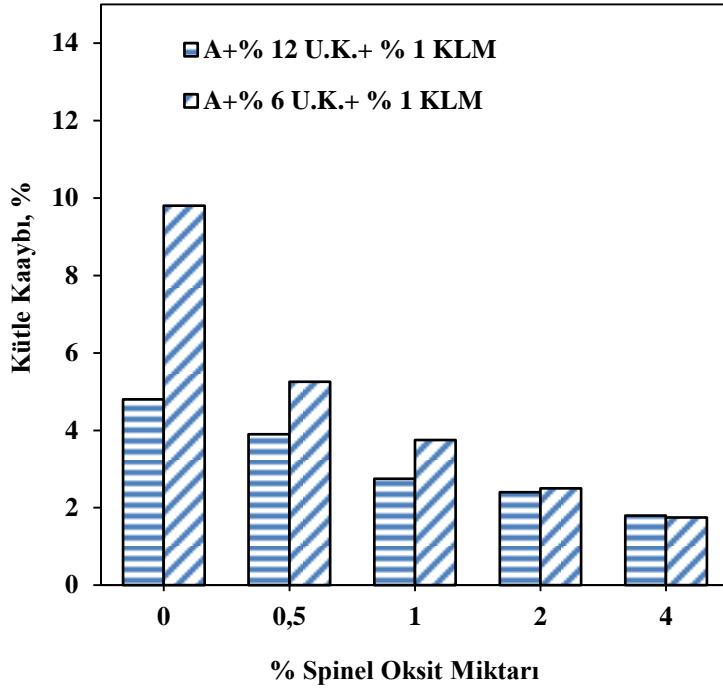


Şekil 6.30. Frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine spinel oksit miktarının etkisi (A+% 12 U.K.+% 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekil 6.30'da görüldüğü gibi % 0,5; % 1; % 2 ve % 4 spinel oksit katkıli fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinde artan frenleme sayısı ile artma eğilimi tespit edilmiştir.

Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da görüldüğü gibi fren balata malzemelerinin frenleme sayısına bağlı sürtünme katsayılarında sürekli bir değişim meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durumun her frenleme esnasında sürtünme arayüzeyinde oluşan ve bozulan ikinci temas yamalarının balata-kampana temas alanını sürekli değiştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, sürtünme çifti arasında sürekli değişen temas alanı sürtünme katsayısında artma ve azalma şeklinde bir değişime neden olacaktır.

% 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesi ile % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen kütle kaybı oranları Şekil 6.31'de görülmektedir.

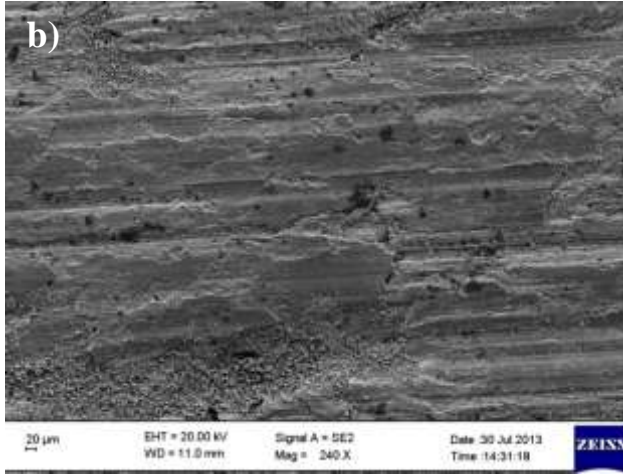
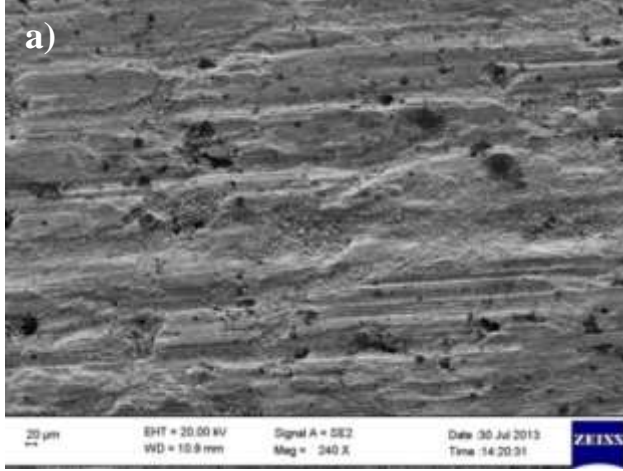


Şekil 6.31. Spinel oksit miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (A+% 6 U.K.+ % 1 Kolemanit; A+% 12 U.K.+ % 1 Kolemanit; $P_{\text{Presleme}}=70$ MPa; $T_{\text{Sinterleme}}=650$ °C; $t_{\text{süre}}=4$ dakika)

Şekilde görüldüğü gibi % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde en yüksek kütle kaybı % 9,8 ile spinel oksit içermeyen fren balata malzemesinde meydana gelirken, % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde de benzer bir sonuç ile en yüksek kütle kaybı % 4,8 ile spinel oksit içermeyen fren balata malzemesinde tespit edilmiştir. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit ve % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde sırası ile en az kütle kaybı % 1,75 ve % 1,8 ile % 4 spinel oksit katkıli fren balata malzemelerinde belirlenmiştir. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit ve % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde artan spinel oksit miktarına bağlı olarak fren balata malzemelerinin aşınma miktarlarında sürekli azalan bir eğilim belirlenmiştir. Ayrıca % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli numunelerin % 4 spinel oksit katkısı dışındaki tüm spinel oksit miktarlarında % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli numunelerden daha düşük kütle kaybı gösterdiği belirlenmiştir. Artan spinel oksit miktarı ile fren balata malzemelerinin aşınma dirençlerinin gelişmesinin nedeni matris içerisinde artan spinel oksit partikülünün aşınma yüküne dayanmak için yumuşak matris malzemenin yerini alması ile balata malzemelerinin daha iyi aşınma dayanımı ve daha yüksek abrasiv direnç dayanımı göstermesine atfedilmektedir. Zhou ve diğerleri (2012) tarafından yapılan çalışmada bu konuda benzer bulgulara ulaşılmıştır.

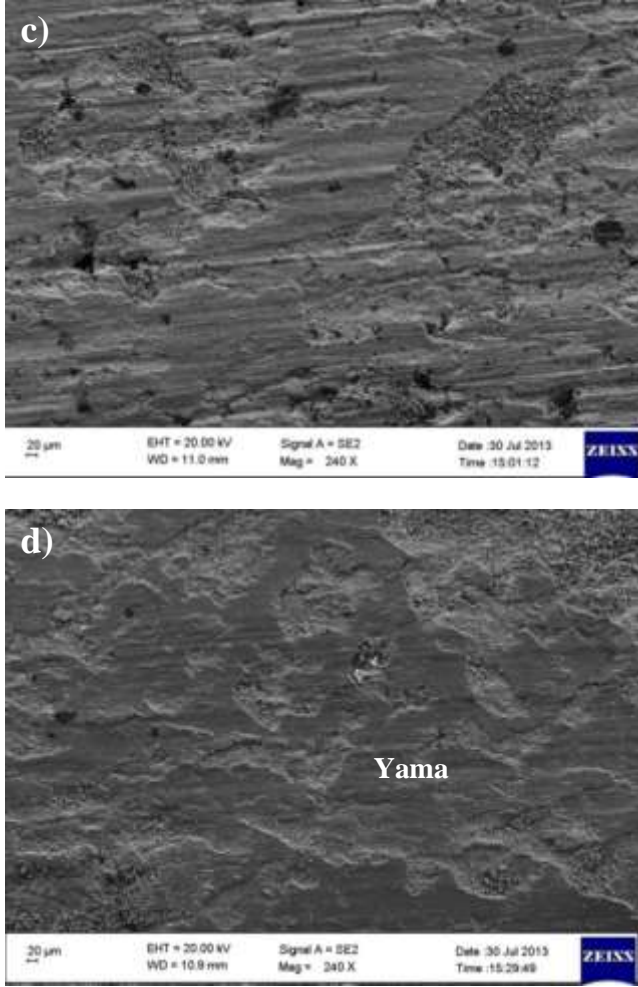
6.4.4. Aşınma yüzey analizi

Farklı oranlarda spinel oksit katkısı içeren % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma deneyleri sonrası aşınma yüzeylerinde meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları Resim 6.23’de görülmektedir.



Resim 6.23. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde artan spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri (X240)

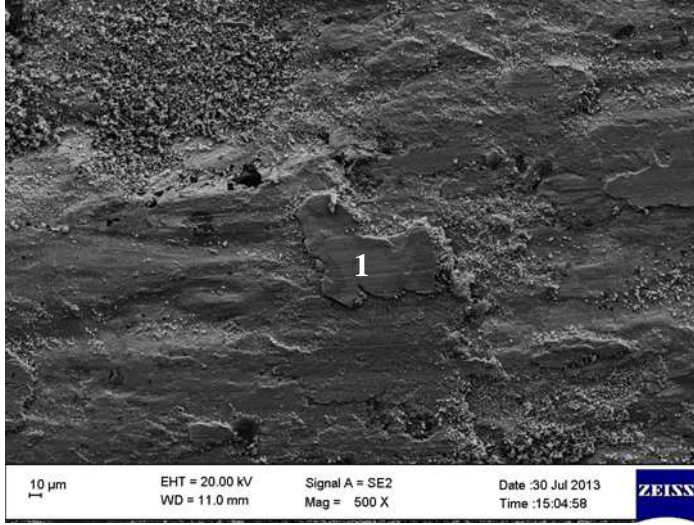
a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 spinel oksit



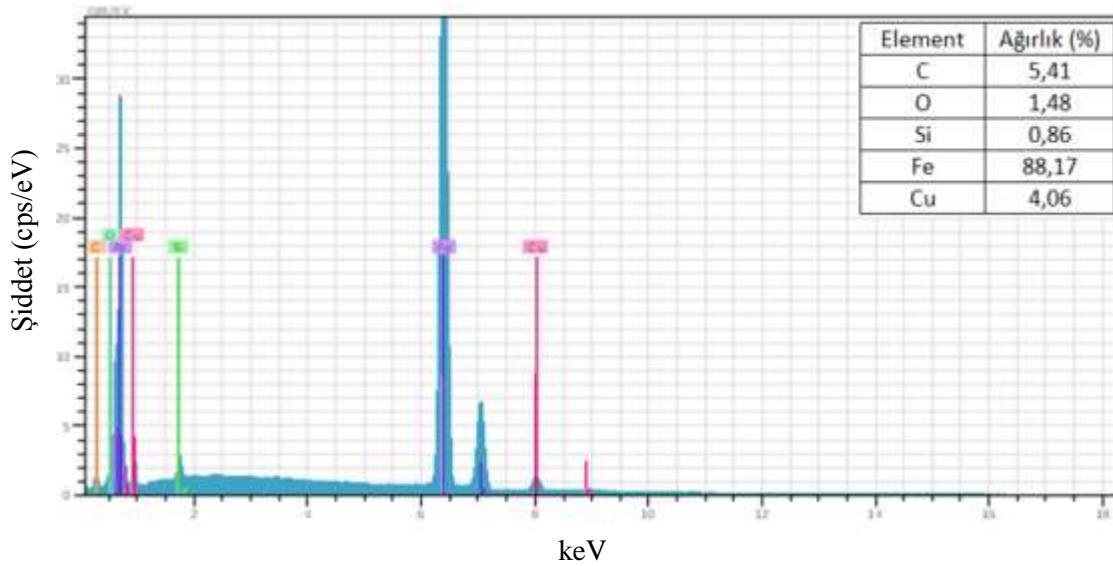
Resim 6.23. (Devam) % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde artan spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri (X240)
a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 spinel oksit

Resim 6.23 incelendiğinde % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarı arttıkça aşınma yüzeylerinde oluşan temas yamalarının büyüdüğü görülmektedir. Özellikle % 4 spinel oksit katkılı fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinin temas yamaları ile kaplandığı belirlenmiştir. Ayrıca temas yamalarının arasında aşınma kraterlerinin oluştuğu ve sürtünme arayüzeyinde oluşan aşınma partiküllerinin bir kısmının buralarda biriktiği görülmektedir (Resim 6.23.d). Artan spinel oksit miktarı ile aşınma yüzeyinde oluşan ve büyüyen temas yamalarının fren balata malzemelerinin aşınma dirençlerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır (Şekil 6.31).

Resim 6.24'de % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin aşınma sonrası SEM görüntüsü ve Şekil 6.32'de Resim 6.24'de 1 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analiz sonucu görülmektedir.



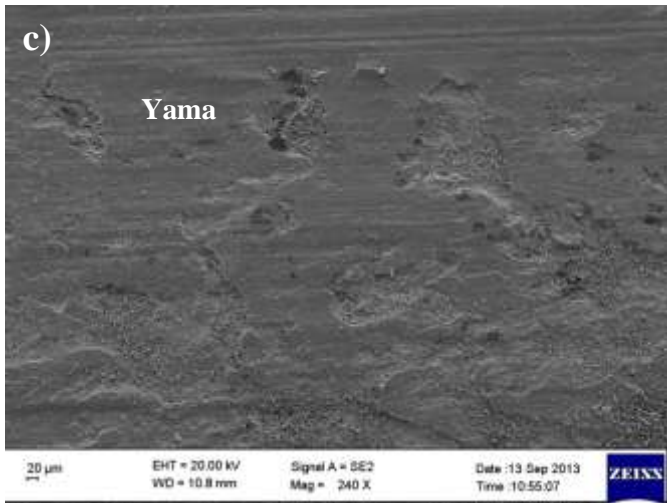
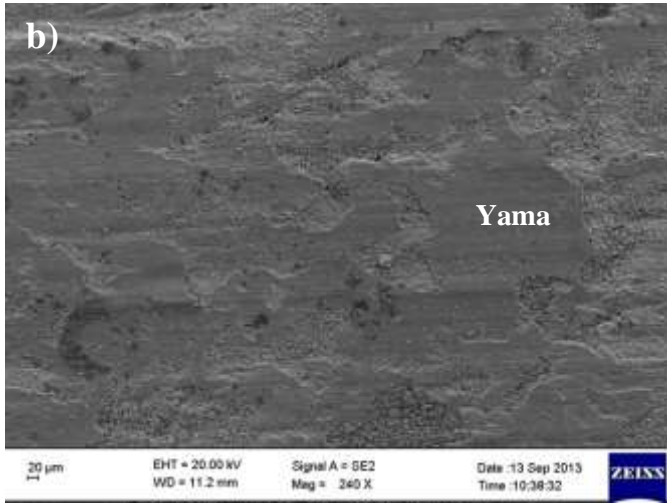
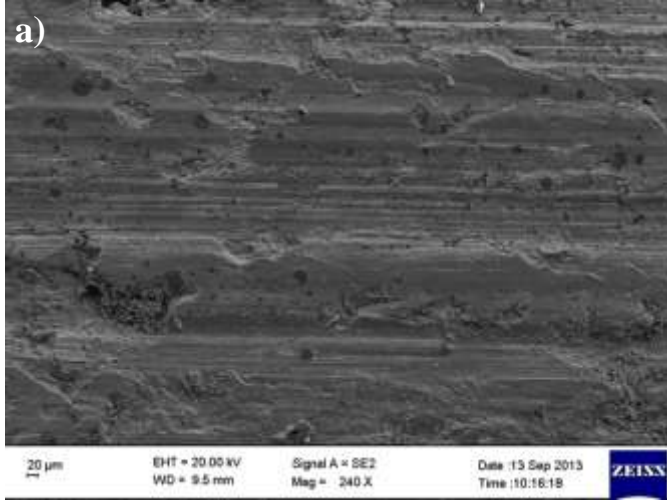
Resim 6.24. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500)



Şekil 6.32. Resim 6.24'da 1 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analiz sonucu

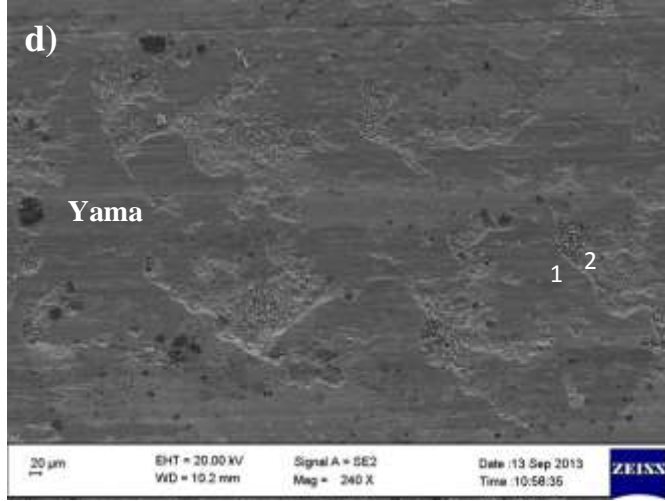
Aşınma yüzeyi üzerinde 1 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analiz sonucunda bu noktanın % 88,17 demir, % 5,41 karbon, % 4,06 bakır, % 1,48 oksijen ve % 0,86 silisyum'dan oluştuğu anlaşılmaktadır. Dolayısı ile bu parçanın aşınma esnasında kampana malzemesinden kopan ve balata malzemesi yüzeyine yapışan demir partikülü olduğu düşünülmektedir.

Farklı oranlarda spinel oksit katkısı içeren % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma deneyleri sonrası aşınma yüzeylerinde meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları Resim 6.25'de görülmektedir.



Resim 6.25. % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde artan spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri (X240)

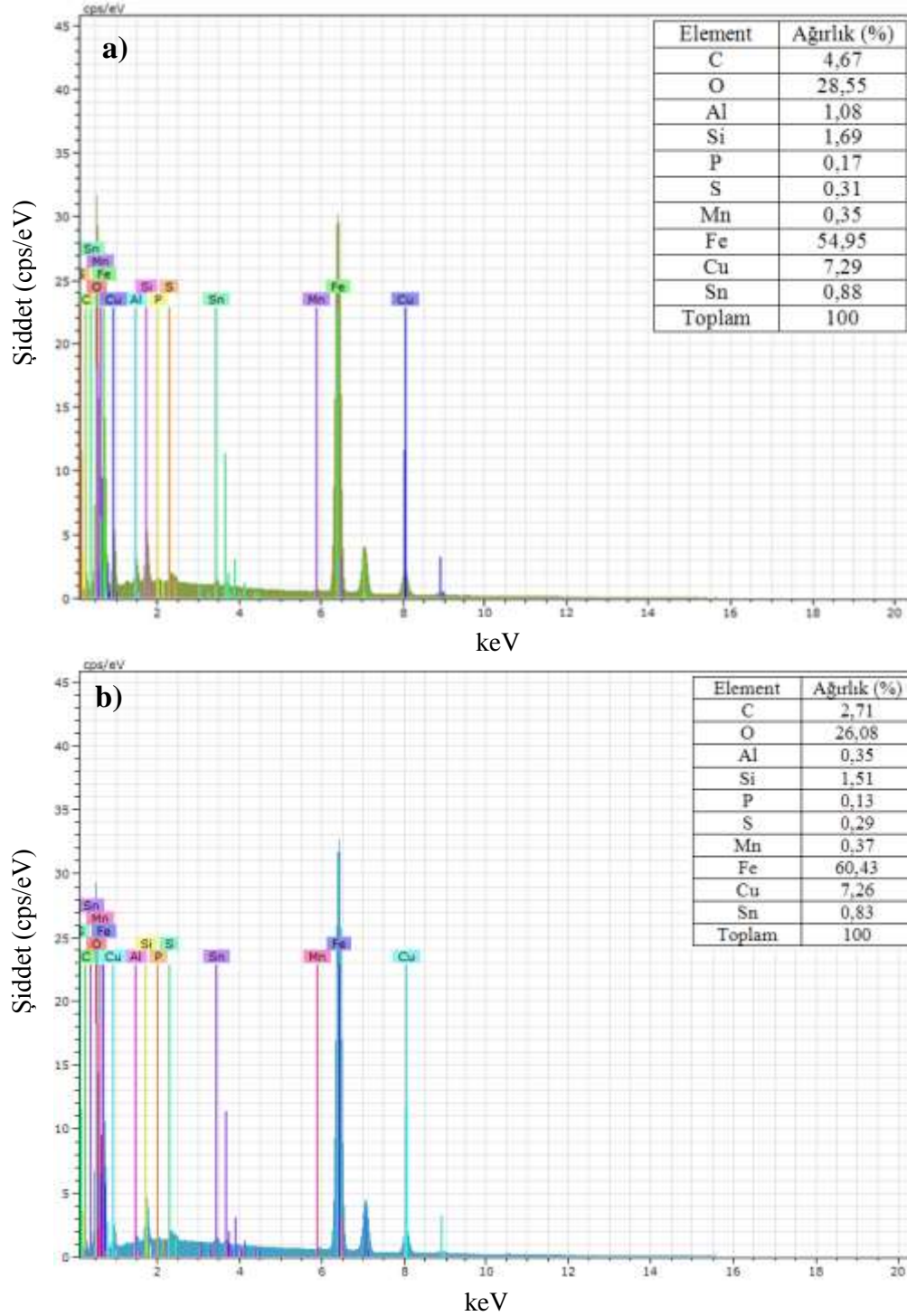
a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 spinel oksit



Resim 6.25. (Devam) % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinde artan spinel oksit miktarına bağlı olarak değişen aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri (X240)
a) % 0,5 b) % 1 c) % 2 d) % 4 spinel oksit

Resim 6.25 incelendiğinde % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarı arttıkça aşınma yüzeylerinin yamalar ile kaplandığı görülmektedir. Ayrıca aşınma yamalarının arasında oluşan kraterlerde aşınma partiküllerinin toplandığı görülmektedir. Özellikle % 1, % 2 ve % 4 spinel oksit katkılı fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinin oldukça pürüzsüz olduğu görülmektedir. (Resim 6.25 b-c-d) Bu durum sürtünme esnasında fren balata malzemesinden daha çok karşı malzemenin aşındığı şeklinde yorumlanmıştır.

Şekil 6.33'de Resim 6.25'deki % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi üzerinde 1 ve 2 rakamı ile gösterilen noktalarının EDS analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.33. Resim 6.25'deki fren balata numunesinde
a) 1 numaralı noktanın b) 2 numaralı noktanın EDS analizi

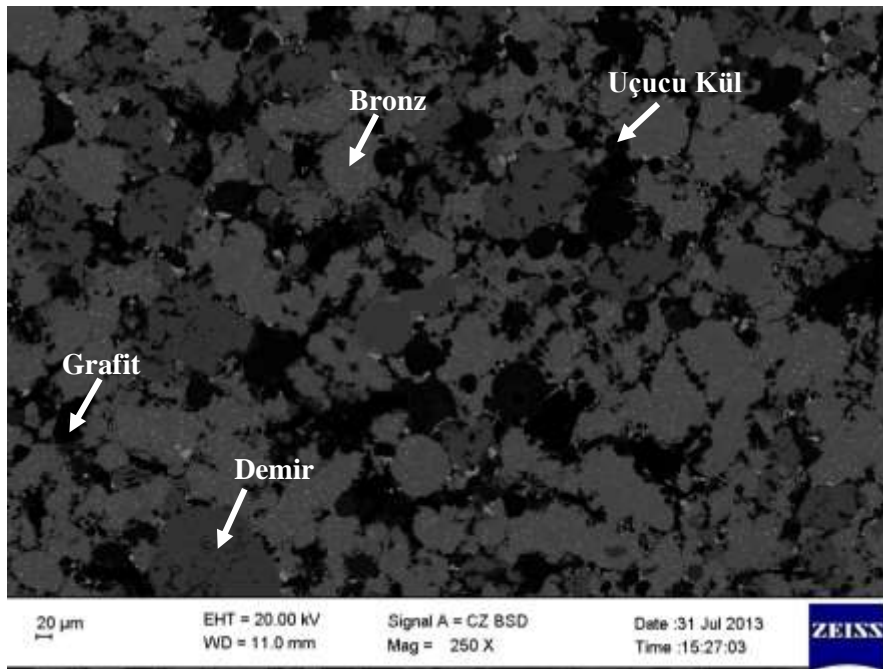
Şekil 6.33'deki EDS analiz sonuçlarına göre 1 rakamı ile gösterilen noktanın ağırlıkça % 54,95 demir % 28,55 oksijen % 9,29 bakır, % 4,67 karbon ve düşük miktarlarda Al, Si, P, Mn, Sn, S gibi elementlerden 2 rakamı ile gösterilen noktanın da ağırlıkça % 60,43 demir, % 26,08 oksijen, % 7,26 bakır, % 2,71 karbon ve düşük miktarlarda Al, Si, P, S ve Mn gibi elementlerden oluştuğu tespit edilmiştir. EDS analiz sonuçlarına göre 2 rakamı ile

gösterilen aşınma partiküllerinin ve 1 rakamı ile gösterilen temas yamasının benzer kimyasal bileşime sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum sürtünme esnasında fren balata malzemesinin karşı malzemedan aşınma partikülleri halinde parçacıklar koparması ve kopan partiküllerin de ısı ve basınç etkisi ile fren balata malzemesinin yüzeyinde oluşan yamalara dahil olarak bu yamaların büyümesine katkı sağlaması ile açıklanabilir. Oluşan bu yamaların balata malzemesini aşınmaya karşı koruduğu ve böylece kütle kayıplarının azalmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca EDS analiz sonuçlarında belirlenen nispeten yüksek oksijen miktarı yamalarda ve aşınma partiküllerinde FeO yada Fe₃O₄ gibi bileşiklerinin oluştuğu şeklinde yorumlanmıştır.

6.4.5. Mikroyapı incelemesi

Yoğunluk, sertlik ve sürtünme-aşınma sonuçları açısından en iyi değerleri gösterdiği düşünülen % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit ve % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 1 spinel oksit takviyeli balata malzemelerin mikroyapıları incelenmiştir.

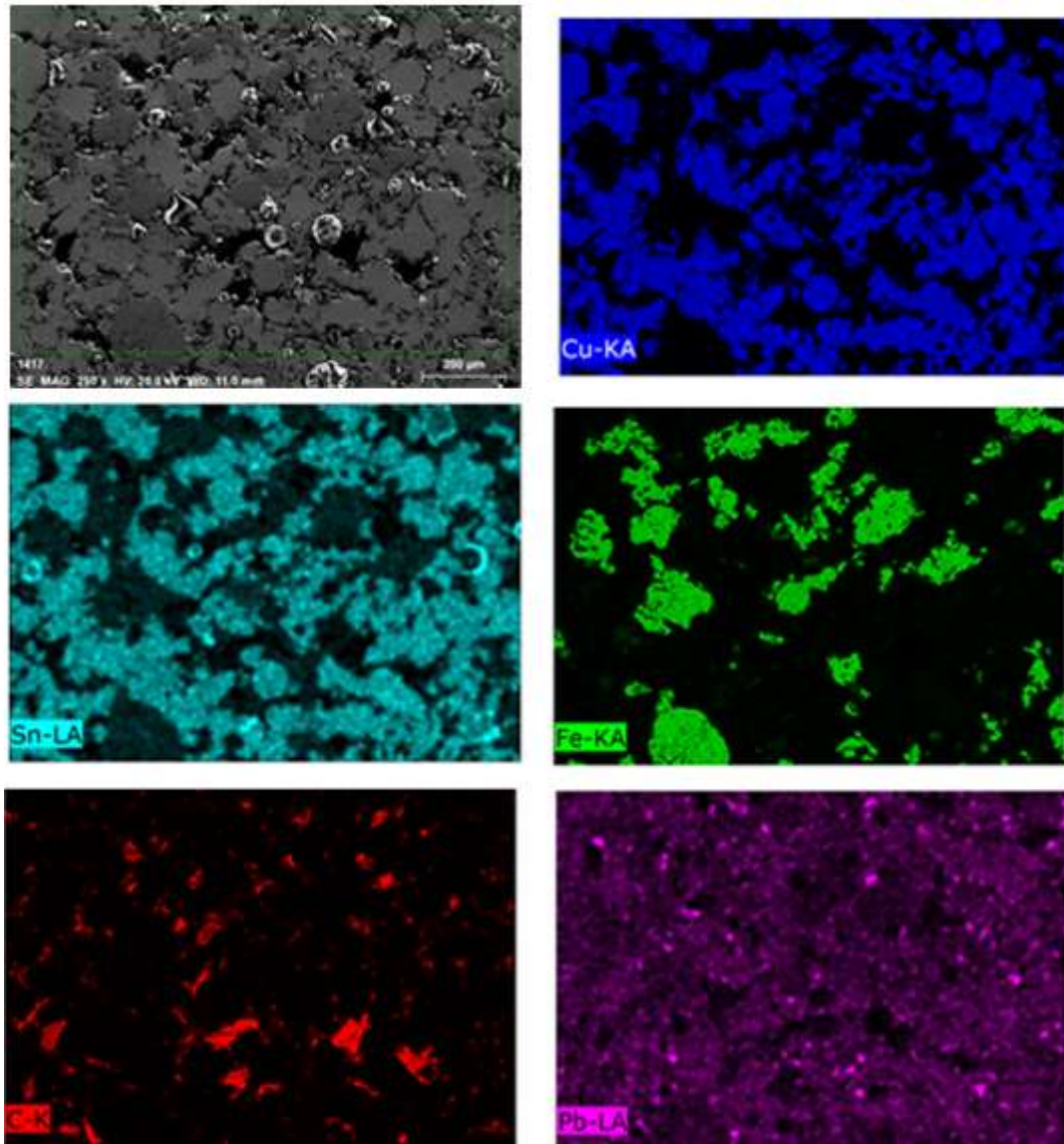
Resim 6.26'da % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü ve Resim 6.27'de ise elementel dağılım haritası görülmektedir.



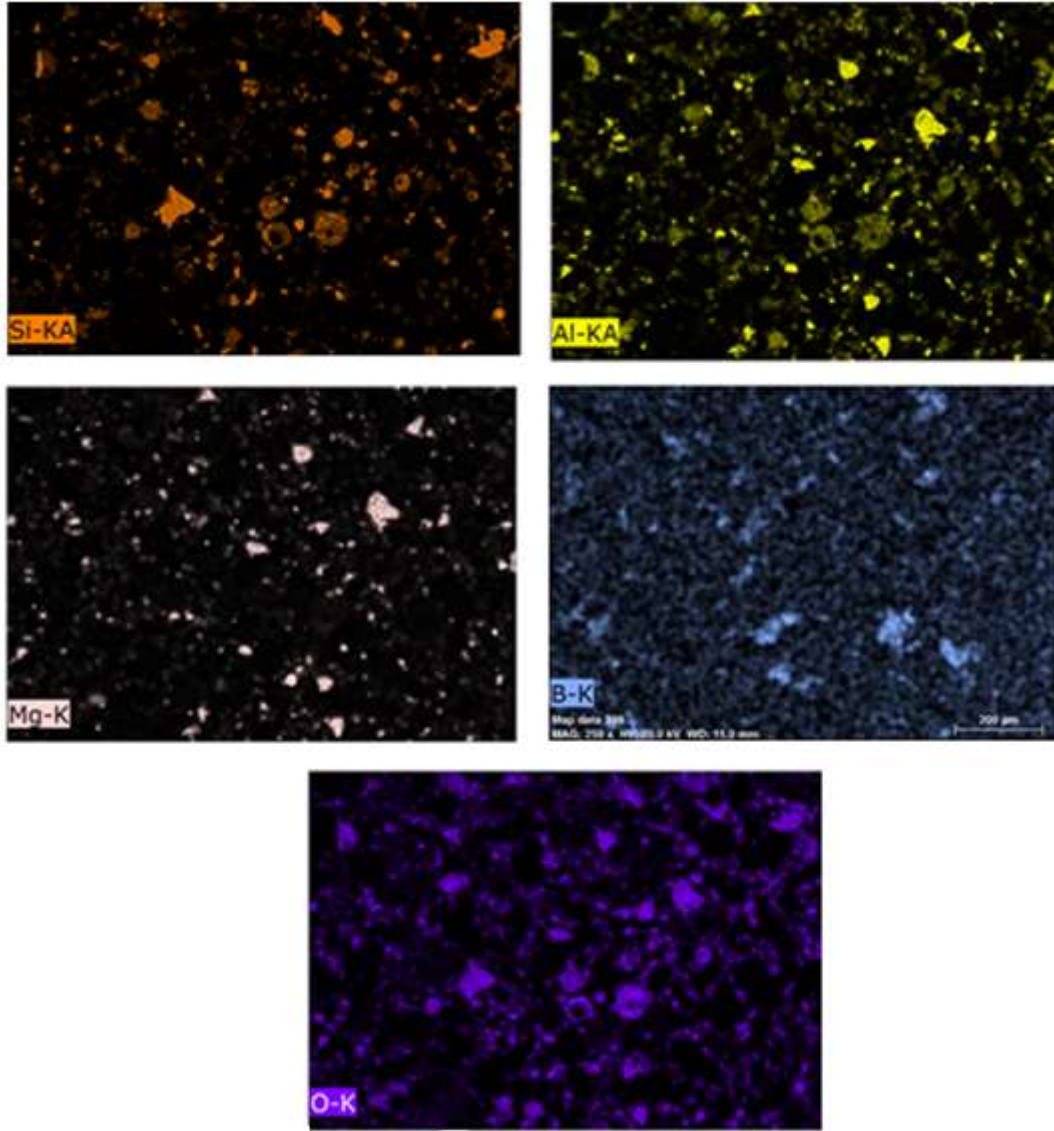
Resim 6.26. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü

Resim 6.26'daki BSE ve Resim 6.27'deki elementel dağılım haritasında görüldüğü gibi matrisi oluşturan bileşenlerin (bronz, uçucu kül, demir ve grafit tozu) yapı içerisinde uniform olarak dağıldıkları belirlenmiştir. Matris içerisindeki demir bileşenin yapı içerisinde daha büyük taneler meydana getirdiği görülmektedir.

Resim 6.27'deki elementel dağılım haritasında görüldüğü gibi kolemanitin ağırlıklı olarak grafit partiküllerinin bulunduğu noktalarda toplandığı görülmektedir. Dolayısı ile kolemanit ile grafit partiküllerinin benzer noktalarda toplandığı söylenebilir.



Resim 6.27. % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası

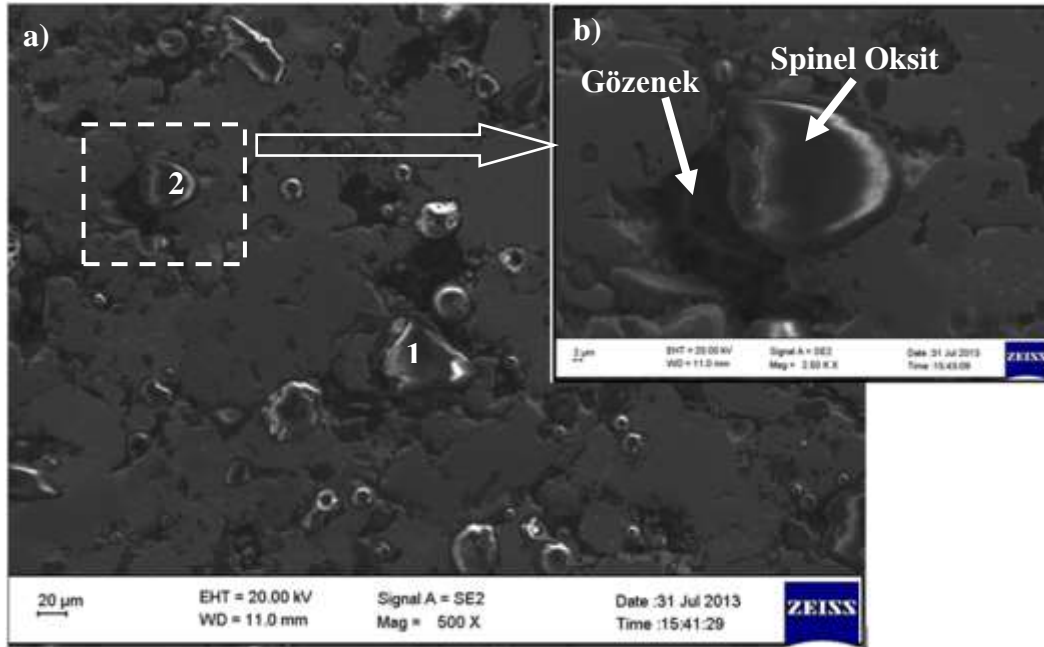


Resim 6.27. (Devam) % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin elementel dağılım haritası

Resim 6.28.a'da % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin SEM resmi ve Resim 6.28.b'de spinel oksit partikülü ile matris arayüzey uyumu görülmektedir.

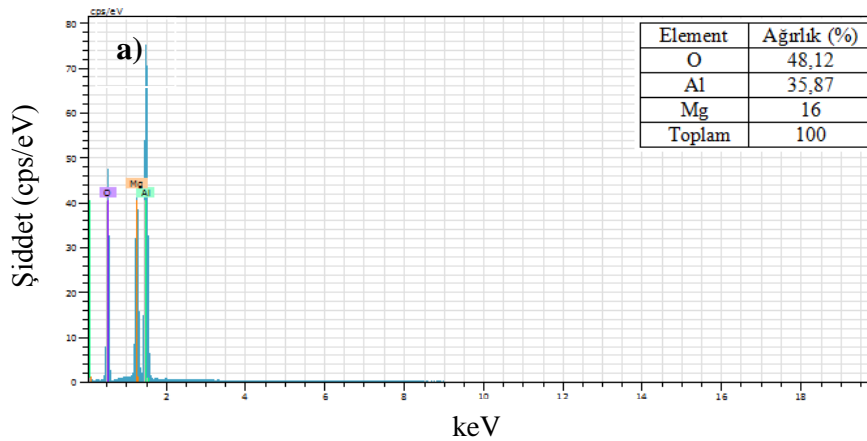
Resim 6.28.a'daki SEM resminde 1 rakamı ile gösterilen noktanın ağırlıkça % 48,12 O, % 35,87 Al ve % 16 Mg'dan ve 2 rakamı ile gösterilen noktanın da % 46,99 O, % 36,54 Al ve % 16,46 Mg'dan oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.34.a-b). EDS analiz sonuçlarına göre 1 ve 2 rakamı ile gösterilen noktaların birbirine benzer kimyasal bileşim gösterdiği ve bu noktaların O, Al ve Mg elementlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Dolayısı ile bu noktaların

MgAl₂O₄ bileşiği olan spinel oksit partikülü olduğu sonucuna varılmıştır. Resim 6.28.b incelendiğinde spinel oksit partikülü ile matris arasında iyi bir arayüzey bağını meydana geldiği ve ayrıca numune yüzeyinde gözeneklerin oluştuğu görülmektedir.

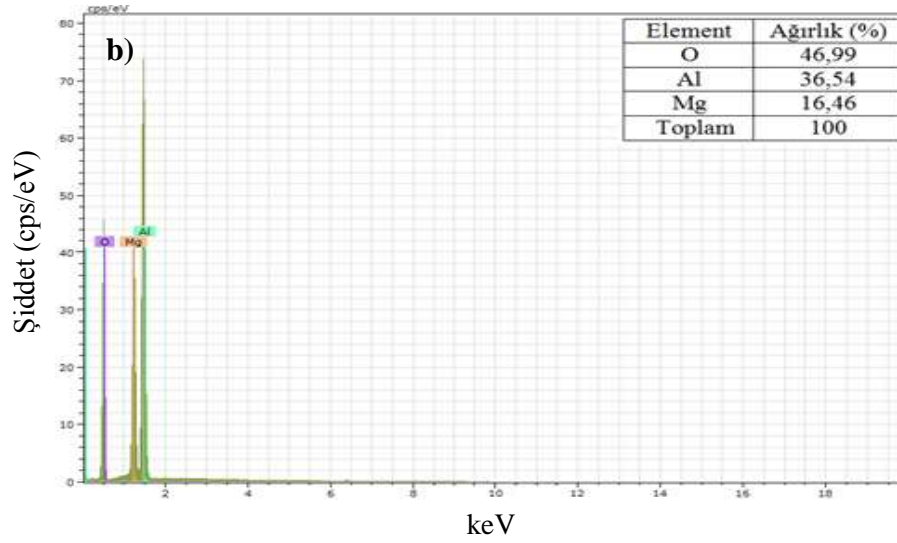


Resim 6.28. a) % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit içeren fren balata malzemesinin SEM görüntüsü b) Spinel oksit ile matris arayüzeyi

Fren balata malzemelerinden yüzey pürüzlülüğünü koruyabilmesi için hem gözenek bulunması hem de farklı sürtünme davranışları sergileyen partiküllerin bir arada bulunması istenir (Albayrak, 2009). Resim 6.28’de görüldüğü gibi fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit partikülü gözenekliliği artırırken sürtünme sırasında sürtünme özelliklerini dengeleyici yönde de katkı sağladığı düşünülmektedir.

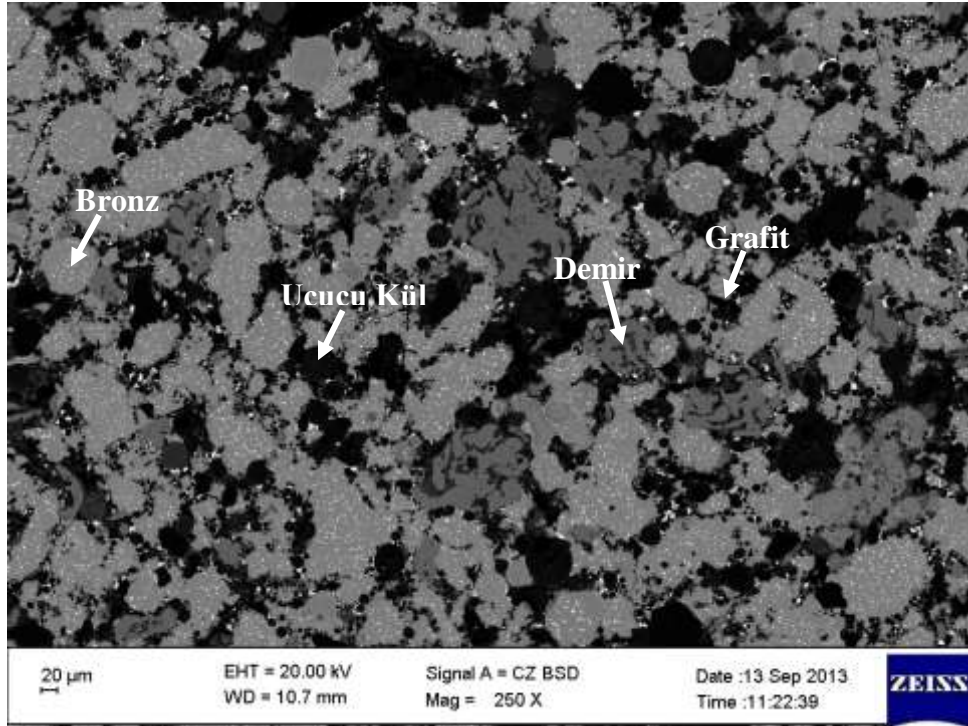


Şekil 6.34. Resim 6.28.’deki fren balata numunesinde a) 1 numaralı noktanın, b) 2 numaralı noktanın EDS analizi



Şekil 6.34. (Devam) Resim 6.28'deki fren balata numunesinde
a) 1 numaralı noktanın, b) 2 numaralı noktanın EDS analizi

Resim 6.29'da % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 1 spinel oksit takviyeli balata malzemesinin BSE görüntüsü görülmektedir.



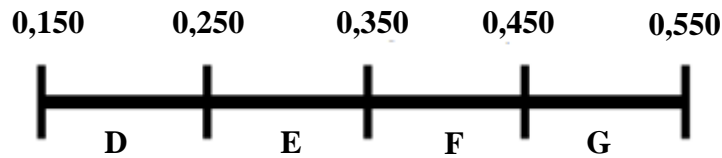
Resim 6.29. % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 1 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinin BSE görüntüsü

Resim 6.29 incelendiğinde matrisi oluşturan partiküllerin yapı içerisinde üniform olarak dağıldığı ve ayrıca grafit partiküllerinin de bronzun tane sınırlarında toplandığı görülmektedir.

6.5. Değerlendirme

6.5.1. Performans değerlendirmesi

Bu çalışmada; SAE-J661 test standardına göre elde edilen sonuçlar Şekil 6.35’de görülmekte olan skala üzerinde gösterilmiştir. Bu skalada fren ve debriyaj balataları için sürtünme katsayısı değerleri 0,150-0,550 arasında değerler kabul edilmiş ve her bir balata malzemesinin soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri aşağıdaki skalada belirtilen sürtünme katsayısı aralığına karşılık gelen harf değeri ile kodlanmıştır. Deneyler sonucunda her bir numune için elde edilen soğuk ve sıcak sürtünme katsayısına karşılık gelen harf değerleri Çizelge 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.35. SAE-J661 test standardına göre sürtünme katsayılarına karşılık gelen harf değerleri

Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi bütün numunelerin sürtünme aşınma davranışları SAE-J661 test standardına uygun sonuçlar göstermiştir. Ancak skalada DD ile kodlanan ve 0,150-0,250 aralığındaki sürtünme katsayısı değerlerinin debriyaj balataları ve ağır iş makinalarının fren balataları için iyi bir sonuç olmasına rağmen, balata üreticileri binek türü araçların fren balatalarından beklenen performans açısından bu değerlerin uygun olmadığını belirtmektedirler.

0,25-0,55 aralığındaki sürtünme katsayısına sahip numunelerin, yol taşıtlarının fren balatalarında SAE-J661 standardına göre uygun olduğu Çizelge 6.1’de görülmektedir.

Çizelge 6.1. SAE-J661 test standardına göre balata malzemelerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ve bronz matrisli balata malzemesine göre maliyetteki % değişim oranı

Numune kodu	Skalada okunan değer	Ana malzemeye göre maliyetteki % değişim oranı
A	DD	
A+% 2 U.K.	FD	- 1,96
A+% 4 U.K.	FE	-3,84
A+% 6 U.K.	FF	-5,65
A+% 8 U.K.	FF	-7,40
A+% 10 U.K.	FF	-9,08
A+% 12 U.K.	FF	-10,71
A+% 2 CAM TOZU	FE	-1,93
A+% 4 CAM TOZU	FE	-3,78
A+% 6 CAM TOZU	FE	-5,57
A+% 8 CAM TOZU	FE	-7,29
A+% 6 U.K.+% 0,5 KOLEMANİT	FF	-6,12
A+% 6 U.K.+% 1 KOLEMANİT	FF	-6,58
A+% 6 U.K.+% 2 KOLEMANİT	FF	-7,50
A+% 6 U.K.+% 4 KOLEMANİT	EF	-9,27
A+% 6 U.K.+% 1 KOLEMANİT+% 0,5 SPİNEL OKSİT	FF	-7,04
A+% 6 U.K.+% 1 KOLEMANİT+% 1 SPİNEL OKSİT	FF	-7,49
A+% 6 U.K.+% 1 KOLEMANİT+% 2 SPİNEL OKSİT	FF	-8,37
A+% 6 U.K.+% 1 KOLEMANİT+% 4 SPİNEL OKSİT	FF	-10,08
A+% 12 U.K.+% 1 KOLEMANİT	FF	-11,59
A+% 12 U.K.+% 1 KOLEMANİT+% 0,5 SPİNEL OKSİT	FF	-12,02
A+% 12 U.K.+% 1 KOLEMANİT+% 1 SPİNEL OKSİT	FF	-12,44
A+% 12 U.K.+% 1 KOLEMANİT+% 2 SPİNEL OKSİT	FF	-13,27
A+% 12 U.K.+% 1 KOLEMANİT+% 4 SPİNEL OKSİT	FF	-14,90

6.5.2. Maliyet değerlendirmesi

Fren balata malzemelerinin maliyet değerlendirmesi balata üretiminde kullanılan her bir bileşenin birim fiyatları değerlendirilerek yapılmıştır (Çizelge 6.2). Üretim maliyetleri dikkate alınmamıştır. Bronz matrisli balata malzemesinin üretiminde kullanılan tozların birim fiyatları dikkate alınarak ana malzemenin maliyeti belirlenmiştir. Ana malzeme içerisine ilave edilen her bir katkı malzemesinin ana malzemenin maliyeti üzerine etkisi ayrı ayrı hesaplanmış ve ana malzemeye göre maliyetteki yüzde değişim oranı belirlenmiştir. Kullanılan malzemelerin birim fiyatı açısından değerlendirildiğinde ana malzemeye göre fiyatlarda minimum % 1,96 ile % 14,90 arasında bir düşme meydana geldiği belirlenmiştir (Çizelge 6.1).

Fren balata malzemelerinin maliyetleri ile frenleme performansları birlikte değerlendirildiğinde sıcaklığa bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri gösteren A+%12 U.K.+% 1 Kolemanit+% 1 Spinel Oksit takviyeli balata malzemesi maliyetinin bronz matrisli ana malzemeye göre % 12,44 düştüğü, kütle kaybı açısından en iyi sonucu gösteren A+% 6 U.K.+% 1 Kolemanit+% 4 Spinel Oksit takviyeli balata malzemesi maliyetinin de ana malzemeye göre % 10,08 azaldığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak bronz matrisli ana malzemeye ilave edilen katkı elemanları ile balata malzemelerinin frenleme performansları geliştirilirken maliyetleri de düşürülmüştür.

Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan tozların birim fiyatları (kg/TL)

	Uçucu Kül	Kolemanit	Spinel Oksit	Cam Tozu	Grafit	Bronz Tozu	Demir Tozu
kg/TL	0,015	0,32	1,85	1,20	6	85	35

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada değişik tür ve oranlarda takviye elemanları ilave edilerek sıcak presleme yöntemi ile bronz esaslı balata malzemeleri üretilmiş ve üretilen bu balataların sertlik, yoğunluk gibi mekanik özellikleri ile sürtünme-aşınma özellikleri incelenerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Fren balata malzemelerinin üretimi için seçilen 650 °C presleme sıcaklığı ve 70 MPa presleme basıncının balata malzemelerinin üretimi için uygun olduğu belirlenmiştir.
- 2) Bronz esaslı fren balata malzemesine ilave edilen uçucu kül miktarı arttıkça fren balata malzemelerinin yoğunluk ve sertlik değerlerinin azaldığı buna karşın, sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir.
- 3) Bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda uçucu kül ilavesi ile hazırlanan numuneler arasında sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı en düşük ortalama sürtünme katsayısını (0,190) bronz esaslı fren balata malzemesinin en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,423) ise % 12 uçucu kül takviyeli balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir.
- 4) % 2 ve % 4 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin bronz matrisli balata malzemesine göre sırası ile % 44, % 26 daha fazla kütle kaybı, % 6, % 8, % 10 ve % 12 uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin ise sırası ile % 30, % 33, % 43, % 56, % 57 daha düşük kütle kaybı gösterdiği belirlenmiştir.
- 5) Bronz matrisli fren balata malzemesine ilave edilen cam tozu miktarı arttıkça fren balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinin azaldığı, sertlik değerlerinin ise arttığı belirlenmiştir.
- 6) Bronz matrisli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda cam tozu ilavesi ile hazırlanan numuneler arasında sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı en yüksek

ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,351) % 6 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin, en kararlı sürtünme davranışını ise % 4 cam tozu takviyeli fren balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir.

- 7) % 2 ve % 4 cam tozu takviyeli fren balata malzemelerinin bronz matrisli balata malzemesine göre sırası ile % 33, % 13 daha yüksek kütle kaybı, % 6 ve % 8 cam tozu takviyeli fren balata malzemelerinin ise sırası ile % 18, % 28 daha düşük kütle kaybı gösterdiği belirlenmiştir.
- 8) Sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı sürtünme katsayısı kararlılığı yönünden uçucu kül takviyeli fren balata malzemelerinin cam tozu takviyeli balata malzemelerine göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.
- 9) % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarı arttıkça, balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinin azaldığı ve buna bağlı olarak da sertlik değerlerinin düştüğü belirlenmiştir.
- 10) % 6 uçucu kül takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda kolemanit ilavesi ile hazırlanan numuneler arasında sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,423) % 1 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin, en kararlı sürtünme davranışını ise % 0,5 kolemanit katkılı fren balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir.
- 11) % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit partikülünün fren balata malzemelerinin kütle kaybına olumlu yönde bir katkısının olmadığı belirlenmiştir.
- 12) % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarı arttıkça balata malzemelerinin yoğunluk ve sertlik değerlerinin % 0,5 spinel oksit'e kadar arttığı bu noktadan sonra ise azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.
- 13) % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda spinel oksit ilavesi ile hazırlanan numuneler arasında sürtünme arayüzey

sıcaklığına bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,427) % 4 spinel oksit katkılı fren balata malzemesinin, en kararlı sürtünme davranışını ise % 2 spinel oksit katkılı fren balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir.

- 14) % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarı arttıkça fren balata malzemelerinin sertlik ve yoğunluk değerlerinin % 1 spinel oksit'e kadar arttığı bu noktadan sonra ise azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.
- 15) % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi ve bu malzemeye farklı oranlarda spinel oksit ilavesi ile hazırlanan numuneler arasında sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini (0,444) % 1 spinel oksit katkılı fren balata malzemesinin, en kararlı sürtünme davranışını ise spinel oksit katkısız balata malzemesinin gösterdiği belirlenmiştir.
- 16) % 6 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi ile % 12 uçucu kül+% 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen spinel oksit miktarı arttıkça balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde oluşan temas yamalarının büyüdüğü ve buna bağlı olarak kütle kayıplarının azaldığı belirlenmiştir.
- 17) Kolaylıkla temin edilebilen ve oldukça ucuz olan uçucu kül, kolemanit, cam tozu ve spinel oksit partiküllerinin fren balata malzemesi üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir.
- 18) Bronz matrisli balata malzemesine ilave edilen partikül miktarının artması ile balata malzemelerinin maliyetlerinin bronz matrisli balata malzemesine göre düştüğü ve en yüksek maliyet düşüşünün minimum % 14,94 ile A+% 12 uçucu kül+% 1 kolemanit+% 4 spinel oksit takviyeli fren balata malzemesinde gerçekleştiği belirlenmiştir.
- 19) SAE-J661 test standardına göre bronz matrisli ve % 2 uçucu kül takviyeli numunelerin debriyaj balatası olarak diğer numunelerin ise fren balatası olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

7.2. Öneriler

- 1) Uçucu kül ilavesi ile fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özelliklerinin olumlu yönde geliştiği belirlenmiştir. Ancak uçucu kül partikül boyutunun fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özellikleri üzerine etkisi belirlenmemiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda uçucu kül partikül boyutunun fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özellikleri üzerine etkisi araştırılabilir.
- 2) Piyasadan kolaylıkla temin edilebilen çeşitli partikül (örneğin feldspat, B_2O_3) takviyeli bronz matrisli fren balatası üretilerek sürtünme aşınma özellikleri incelenebilir ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abadi, K. B. S., Khavandi, A., and Kharazi, Y. (2010). Effects of Mixing the Steel and Carbon Fibers on the Friction and Wear Properties of a PMC Friction Material. *Appl., Compos., Mater.*, 17(2), 151–158.
- Akkurt, M. (1990). *Makine Elemanları Cilt: I*. İstanbul/Türkiye: Birsen Yayınevi, 263, 265, 276, 280, 281.
- Albayrak, B. (2009). *Bronz Balataların Üretimi ve Performans Testleri*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 65-88.
- Anderson, E. A. (1992). Friction and Wear of Automotive Brakes. In P. J. Blau (Eds.), *Friction Lubrication and Wear Technology*. ASM Handbook. Vol. 18, pp. 569-577.
- Angelo, C. P. and Subramanian, R. (2008). *Powder Metallurgy Science, Technology and Applications*. New Delhi: Prentice Hall of India, 1-230.
- Arjmand, M., and Shojaei, A. (2011). Tribological Characteristics of Rubber-Based Friction Materials. *Tribol Lett.*, 41(2), 325–336.
- Aruntaş, Y. H. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 21(1):193-203.
- Avunç, T. (2007). *Ağır Ticari Taşıtların Fren Sistemleri Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 37-55.
- Berek, S. (2010). *Kuvars ve Diatomit Katkılarının Bronz Esaslı Balataların Aşınma Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 71-136.
- Bijwe, J. (1997). Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials-A Review. *Polymer Composites*, 18(3), 378-396.
- Bijwe, J., Majumdar, N. N., and Satapathy, K. B. (2005). Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials. *Wear*, 259(7-12), 1068-1078.
- Blau, J. P. (2001). Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives. *Oak Ridge National Laboratory Technical Report*, Oak Ridge, 1-23.
- Boz M. (2003). *Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi ve Sürtünme Aşınma Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30-122.
- Boz, M., and Kurt, A. (2007). The effect of Al₂O₃ on the friction performance of automotive brake friction materials. *Tribology International*, 40(7), 1161–1169.

- Boz, M., ve Kurt, A. (2006). Toz Metal Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Performansı Üzerine Çinkonun Etkisi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 21(1), 115-121.
- Breuer, B. and Bill, H. K. (2007). *Brake Technology Handbook*, Warrendale-Pennsylvania: SAE International, 99,100.
- Chan, D. and Stachowiak, W. G. (2004). Review of automotive brake friction materials. *Journal of Automobile Engineering*, 218(9), 953-966.
- Cho, H. M., Kim, J. S., Kim, D., and Jang, H. (2005). Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study. *Wear*, 258(11-12), 1682-1687.
- Cho, K. H., Jang, H., Hong, S. Y., Kim, J. S., Basch, H. R., and Fash, W. J. (2008). The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials. *Wear*, 264(3-4), 291-297.
- Cho, M. H., Kim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W., and Jang, H. (2003). Tribological Study of Gray Cast Iron with Automotive Brake Linings: The Effect of Rotor Microstructure. *Tribology International*, 36(7), 537-545.
- Crouse, H. W. Anglin, L. D. (1989). *Automotive Brakes Suspension and Steering*. New York: McGraw-Hill, 27,44.
- Czichos, H. (1992). Desing of Friction and Wear Experiments. In P. J. Blau (Eds.), *Friction Lubrication and Wear Technology*. ASM Handbook. Vol. 18, pp. 481
- Çelik, E. (2009). *Elmaslı Kesici Takımlarda Alternatif Bağlayıcılar*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 15-16.
- Çelik, E., Çelik, Ö., ve Güven, Y. Ş. (2010). *Sıcak Pres Tasarımı ve Elmaslı Kesici Takım Üretimi*, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 281-289.
- Çiğdem, M. (2006). *İmal Usulleri* (2. Baskı). İstanbul: Çağlayan Kitabevi, 330, 338, 343-344, 354-357.
- Dadkar, N., Tomar, S. B., and Satapathy, K. B. (2009). Evaluation of flyash-filled and aramid fibre reinforced hybrid polymer matrix composites (PMC) for friction braking applications. *Materials and Desing*, 30(10), 4369-4376.
- Davies, W. T., Çolak, S., and Hooper, M. R. (1991). Boric acid production by the calcination and leaching of powdered colemanite. *Powder Techonology*, 65(1-3), 433-440.
- Demir, A. (2009). *Fren Disklerine Uygulanan Kaplamaların Frenleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 1-5.

- Demirkıran, N., ve Künkül, A. (2011). Liç Prosesinde Kullanım Amaçıyla Kalsine Üleksit Hazırlanması. *Madencilik*, 50:43-53.
- Eriksson, M., Bergman, F., and Jacobson, S. (2002). On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Wear*, 252(1-2), 26-36.
- Eriksson, M., Jacobson, S. (2000). Tribological surface of organic brake pads. *Tribology International*, 33(12), 817-827.
- Ertan, R., and Yavuz, N. (2010). An experimental study on the effects of manufacturing parameters on the tribological properties of brake lining materials. *Wear*, 268(11-12), 1524-1532.
- Ertan, R., ve Yavuz, N. (2010). Balata Malzemelerinde Kullanılan Yapısalarda Balatanın Tribolojik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1), 169-177.
- Ferrer, C., Pascual, M., Busquets, D., and Rayon, E. (2010). Tribological study of Fe-Cu-Cr-graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique. *Wear*, 268(5-6), 784-789.
- Gemalmayan, N. (1984). *Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-3.
- Gencel, O., Brostow, W., Özel, C., and Filiz, M. (2010). An investigation on the concrete properties containing colemanite. *International Journal of Physical Sciences*, 5(3), 216-225.
- German, R. M. (2007). *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*. (Çeviri Editörleri: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N.). New Jersey: MPIF. (Eserin orijinali 1984'de yayımlandı), 61-482.
- Ghazi, S. A. A., Chandra, K., and Misra, S. P. (2011). Development and Characterization of Fe-Based Friction Material Made by Hot Powder Preform Forging for Low Duty Applications. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10(13), 1205-1212.
- Gopal, P., Dharani, R. L., and Blum, D. F. (1996). Hybrid phenolic friction composites containing Kevlar pulp Part 1. Enhancement of friction and wear performance. *Wear*, 193(2), 199-206.
- Göktan, G. A., Güney, A., Ereke, M. (1995). *Taşıt Frenleri*. İstanbul: İTÜ Makina Fakültesi, 36,47
- Görhan, G., Kahraman E., Başpınar, M.S., ve Demir, İ. (2008). Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*. 4(2), 85-94.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S., ve Demir, İ. (2009). Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik Özellikler. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 33-42.

- Groover, M. P. (2009). *Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes and Systems* (4th Edition). New Jersey: Prentice-Hall Inc., 350-356.
- Gültekin, D. (2007). *Metal Matrisli Kompozit Fren Diski, Balatası Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 10-12.
- Günay, M. (2009). *Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 78-79.
- Halderman, J. D. (2004). *Automotive Brake Systems* (3th Edition). Ohio: Pearson Prentice Hall, 41-70.
- Han, L., Huang, L., Zhang, J., and Lu, Y. (2006). Optimization of ceramic friction materials. *Composites Science and Technology*, 66(15), 2895-2906.
- Han, Y., Tian, X., and Yin, Y. (2008). Effects of Ceramic Fiber on the Friction Performance of Automotive Brake Lining Materials. *Tribology Transactions*, 51(6), 779-783.
- Hee, W., K., and Filip, P. (2005). Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings. *Wear*, 259(7-12), 1088-1096.
- Hong, U. S., Jung, S. L., Cho, K. H., Cho, M. H., Kim, S. J., and Jang, H. (2008). Mechanism of Multiphase Friction Materials with Different Phenolic Resin Matrices. *Wear*, 266(7-8), 739-744.
- Hwang, H. J., Jung, S. L., Cho, K. H., Kim, Y. J., and Jang, H. (2010). Tribological performance of brake friction materials containing carbon nanotubes. *Wear*, 268(3-4), 519-525.
- Jaafar, R., T., Selamat, S., M., and Kasiran, R. (2012). Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development, In K. Kondoh (Eds.), *Powder Metallurgy*, pp. 1-31
- Jang, H., and Kim, S. J. (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(2), 229-236.
- Jang, H., Ko, K., Kim, J. S., and Basch, H. R. (2004). The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*, 256(3-4), 406-414.
- Junior, E. L. A. J., Arrieche, E. F., and Schaeffer, L. (2008). Analysis of Wear in Organic and Sintered Friction Materials Used in Small Wind Energy Converters. *Materials Research*, 11(3), 269-273.

- Karagöz, Ş., ve Ymanoğlu, R. (2008). *PREP Atomizasyonu ile Üretilen Tozların Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı*, 4. Otomotiv Kongresi Bildiriler Kitabı, Bursa, 587-592.
- Kato, K. and Adachi, K. (2000). Wear Mechanisms. In B. Bhushan (Eds.), *Modern Tribology Handbook Volume One*. CRC Press, pp. 273-279.
- Kayandan, İ., Pehlevan, V., Çağlayan, B., ve Türedi, S. (2004). *Düşük Tenörlü Kolemanit Cevherinin Kalsinasyon Yöntemi ile Zenginleştirilmesi*, Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye.
- Kchaou, M., Sellami, A., Elleuch, R., and Singh, H. (2013). Friction characteristics of a brake friction material under different braking conditions. *Materials and Design*, 52:533-540.
- Kesavan, K. S., and Shao, X., (2007). Friction Materials, In S. Lee. (Eds.), *Encyclopedia of Chemical Processing*, Taylor & Francis, pp. 1071-1083.
- Kim, C. Y., Cho, H. M., Kim, J. S., and Jang, H. (2007). The effect of phenolic resin, potassium titanate, and CNSL on the tribological properties of brake friction materials. *Wear*, 264(3-4), 204-210.
- Kim, H. S., and Lee, S. H. (2011). Effect of Pressure on Tribological Characteristics between Sintered Friction Materials and Steel Disk. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(4), 643-650.
- Kim, J. S., Cho, H. M., Cho, H. K., and Jang, H. (2007). Complementary effects of solid lubricants in the automotive brake lining. *Tribology International*, 40(1), 15-20.
- Kim, J. S., Cho, H. M., Lim, S., and Jan, H. (2001). Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material. *Wear*, 251(1-12), 1484-1491.
- Kim, S. J., and Jang, H. (2000). Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp. *Tribology International*, 33(7), 477-484.
- Korçak, M. (2005). *Seramik Takviyeli Çinko Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 41-42.
- Kumar, M., and Bijwe, J. (2010). NAO friction materials with various metal powders: Tribological evaluation on full-scale inertia dynamometer. *Wear*, 269(11-12), 826-837.
- Kumar, M., and Bijwe, J. (2011). Non-asbestos organic (NAO) friction composites: Role of copper; its shape and amount. *Wear*, 270(3-4), 269-280.
- Kurt, A. (1992). *Toz metal bronz yatak malzemelerinin özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-59.

- Kurt, A., and Boz, M. (2005). Wear behaviour of organic asbestos based and bronze based powder metal brake linings. *Materials and Design*, 26(8), 717-721.
- Kurt, O. A. (2004). *Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme Ders Notları*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 1-32
- Larsen-Basse, J. (1992). Basic Theory of Solid Friction. In P. J. Blau (Eds.), *Friction Lubrication and Wear Technology*. ASM Handbook. Vol. 18, pp. 28, 30, 31
- Larsen-Basse, J. (1992). Introduction to Friction. In P. J. Blau (Eds.), *Friction Lubrication and Wear Technology*. ASM Handbook. Vol. 18, pp. 25
- Ma, Y., Martynkova, S. G., Valaskova, M., Matejka, V., and Lu, Y. (2008). Effects of ZrSiO₄ in non-metallic brake friction materials on friction performance. *Tribology International*, 41(3), 166-174.
- Maleque, M. A. Atiqah, A. (2013). Development and Characterization of Coir Fibre Reinforced Composite Brake Friction Materials. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(11), 3191-3199
- Malhotra, M. V., Valimbe, S. P., Wright, A. M. (2002). Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites. *Fuel*, 81(2), 235-244.
- Mohanty, S., and Chugh, P. Y. (2007). Development of fly ash-based automotive brake lining. *Tribology International*, 40(7), 1217-1224.
- Mordoğan, H., İpekoğlu, Ü., Güler, E., ve Güler, G. (2005). *Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları*, 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı IMCET, İzmir, Türkiye.
- Mutlu, İ. (2002). *Seramik katkılı asbestsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel incelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2, 23-24.
- Mutlu, İ., Eldoğan, O., and Fındık, F. (2006). Tribological properties of some phenolic composites suggested for automotive brakes. *Tribology International*, 39(4), 317-325.
- Mutlu, İ., Sugözü, İ., and Öner, C. (2009). *Investigation of friction behavior of boric acid and black pine cone dust added brake pads*, 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), Karabük, Turkey.
- Ostermeyer, G. P., and Muller, M. (2008). New insights into the tribology of brake systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, 222(7), 1167-1200.
- Ostermeyer, P. G. (2003). On the dynamics of the friction coefficient. *Wear*, 254(9), 852-858.

- Ostermeyer, P., G. (2001). Friction and wear of brake systems. *Forschung im Ingenieurwesen*, 66(6), 267-272.
- Österle, W., and Urban, I. (2004). Friction layers and friction films on PMC brake pads. *Wear*, 257(1-2), 215-226.
- Öveçoğlu, M. L. (1997). *Toz metalürjisi tarihsel gelişim, üretim aşamaları ve yeni eğilimler*, 9. Uluslararası metalürji ve malzeme kongresi, İstanbul, Türkiye, 449-475
- Özsever, S. (1984). P/M Friction Materials, In E. Klar (Eds.), *Powder Metallurgy 9 th. Edition*. Ohio. ASM Handbook. Vol. 7, pp. 701-703.
- Öztürk, B., Arslan, F., and Öztürk, S. (2007). Hot wear properties of ceramic and basalt fiber reinforced hybrid friction materials. *Tribology International*, 40(1), 37-48.
- Öztürk, B., and Öztürk, S. (2011). Effects of Resin Type and Fiber Length on the Mechanical and Tribological Properties of Brake friction Materials. *Tribology Letters*, 42(3), 339-350.
- Öztürk, B., Öztürk, S., and Adıgüzel A. A. (2013). Effect of Type and Relative Amount of Solid Lubricants and Abrasives on the Tribological Properties of Brake Friction Materials. *Tribology Transactions*, 56, 428-441.
- Ping-ping, Y., Sheng Hong-chao, S., Xiang, X., Bai-yun, H. (2007). Worn surface characteristics of Cu-based powder metallurgy brake materials for aircraft, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(1), 99-103.
- Rhee, S. K. (1971). Wear of Metal Reinforced Phenolic Resin, *Wear*, 18(6), 471-477.
- Rohatgi, K. P., Guo, Q. R., Huang, P., and Ray, S. (1997). Friction and Abrasion Resistance of Cast Aluminum Alloy-Fly Ash Composite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28(1), 245-250.
- Saffar, A., Shojaei, A., and Arjmand, M. (2010). Theoretical and experimental analysis of the thermal, fade and wear characteristics of rubber-based composite friction materials. *Wear*, 269(1-2), 145-151.
- Sai, V. N., Komaraiah, M. and Raju, R. S. T. V. (2008). Preparation and Properties of Sintered Copper-Tin Composites Containing Copper Coated or Uncoated Fly Ash. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(7), 651-657.
- Sampath, V. (2006). Studies on Mechanical, Friction, and Wear Characteristics of Kevlar and Glass Fiber-Reinforced Friction Materials. *Materials and Manufacturing Processes*, 21(1), 47-57.
- Satapathy, K. B., and Bijwe, J. (2004). Performance of friction materials based on variation in nature of organic fibres Part I. Fade and recovery behaviour. *Wear*, 257(5-6), 573-584.

- Serfiçeli, Y. S. (2000). *Malzeme Bilgisi Temel Ders Kitabı*, İstanbul/Türkiye: Milli Eğitim Basımevi, 231.
- Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W. (2005). *Engineering Tribology* (2nd. Edition). Elsevier, Butterworth-Heinemann, 476-573.
- Stadler, Z., Krnel, K., and Kosmac, T. (2007). Friction behavior of sintered metallic brake pads on a C/C–SiC composite brake disc. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3), 1411–1417.
- Sugözü, İ. (2009). *Bor Katkılı Asbetsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1-3.
- Talip, R. J., Muchtar, A. and Azhari, C. H. (2003). Microstructural characteristics on the surface and subsurface of semimetallic automotive friction materials during braking process. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 694-699.
- Tomasek, V., Kratosova, G., Yun, R., Fan, Y., and Lu, Y. (2009). Effects of alumina in nonmetallic brake friction materials on friction performance. *Journal of Material Sci.*, 44(1), 266–273 (2009).
- Topbaş, M. A. (1993). *Endüstri Malzemeleri. 2. Cilt*. İstanbul/Türkiye: Prestij Basın Yayın ve Hizmetleri, 251-264.
- Tylczak, H. J. and Oregon, A. (1992). Abrasive Wear. In P. J. Blau (Eds.), *Friction Lubrication and Wear Technology*. ASM Handbook. Vol. 18, pp. 184-185.
- Xiang, X., Hong-chao, S., Jie, C., Ping-ping, Y. (2007). Effects of sintering pressure and temperature on microstructure and tribological characteristic of Cu-based aircraft brake material. *Trans., Nonferrous Met. Soc.*, 17(4), 669-675.
- Yahlizade, S. E. (2007). *Atık Cam İçeren Parke Taşlarının Yangın, Donma-Çözülme ve Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlı Urfa, 1-2.
- Yakınlar, O. (2011). *Uçucu Kül Dolgulu Alimünyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Otomotiv Sektöründe Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 16.
- Yalçın, H. ve Gürü, M. (2002). *Malzeme Bilgisi*. Ankara/Türkiye: Palme Yayıncılık, 418.
- Yavuz, N., ve Ertan, R. (2005). Polimer Matrisli Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyon ve Üretim Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makine*, 47(553), 24-30.
- Yi, G., and Yan, F. (2006). Effect of hexagonal boron nitride and calcined petroleum coke on friction and wear behavior of phenolic resin-based friction composites. *Materials Science and Engineering A*, 425(1-2), 330–338.

- Yun, R., Filip, P., and Lu, V. (2010). Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials. *Tribology International*, 43(11), 2010-2019.
- Yüce, N. A. (2006). *Modern Otomobil Teknolojisi*. İstanbul/Türkiye: Shell Yayınları, 213-215.
- Zahi, S., Daub, R., A. (2011). Fly ash characterization and application in Al-based Mg alloys. *Materials and Design*, 32(3), 1337-1346.
- Zhang, S., and Wang, F. (2007). Comparison of friction and wear performances of brake material dry sliding against two aluminum matrix composites reinforced with different SiC particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1-2), 122:127
- Zhou, Y., Yu, Z., Zhou, N., Shi, C., Liu, E., Du, X., and He, C. (2013). Microstructure and properties of in situ generated MgAl₂O₄ spinel whisker reinforced aluminum matrix composites. *Materials & Design*, 46, 724-730.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KUŞ, Hüsamettin
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1983, Tarsus
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0326 618 2931
 Faks : 0326 618 2930
 e-mail : husamettin.kus@hotmail.com



Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet yılı
Yüksek lisans	Selçuk Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü	2008
Lisans	Selçuk Üniversitesi/Makina Eğitimi	2005
Lise	Tarsus Endüstri Meslek Lisesi	2001

İş Deneyimi, Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2010-	Mustafa Kemal Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2008-2010	Erzincan Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce (ÜDS:68,750)

Yayınlar

1. Çetin, M., Yüksel, F., Kuş, H. (2009). Emission characteristics of a converted diesel engine using ethanol as fuel. *Energy for Sustainable Development*.13(4), 250-254.
2. ÇETİN, M. ve KUŞ, H. (2010). Biyoetanol Yakıtların Emisyon Karakteristikleri ve Erzincan'ın Biyoetanol Üretim Potansiyeli, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 3(1),19-35.
3. ÇETİN, M. ve KUŞ, H. (2009). Konutlarda Soba Zehirlenmeleri, Yanma Havası Temini ve Çözüm Önerileri. *Standard (TSE ekonomik ve teknik dergi)* 571, 109-112
4. ÇETİN, M. ve KUŞ, H. (2009, 16-17 Ekim). *Temiz ve Sürdürülebilir Alternatif Enerji Biyodizel ve Türkiye'nin Biyodizel Potansiyeli*. V.Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu. Kayseri.

Hobiler

Futbol, Bilgisayar Teknolojileri, Sinema



GAZİ GELECEKTİR..