

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAL MATRİKSLİ KOMPOZİT FREN DİSKİ,
BALATASI ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Deniz GÜLTEKİN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hatem AKBULUT

Haziran 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAL MATRİKSLİ KOMPOZİT FREN DİSKİ,
BALATASI ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Deniz GÜLTEKİN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 22 / 06 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr. Hatem AKBULUT
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr. Cuma BİNDAL
Üye**

**Doç. Dr. Kenan GENEL
Üye**

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamda, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hatem AKBULUT'a, her konuda bana destek olduğu, yol gösterdiği ve en önemlisi güvendiği için sonsuz teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Serdar ASLAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarında beni daima destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli dostlarım ve çalışma arkadaşlarım, Sayın Metalurji ve Malzeme Mühendisi Miraç KUMAŞ ALAF'a, Sayın Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Arş. Gör. Mehmet Oğuz GÜLER'e, Sayın Fizik Bilim Uzmanı Fuat KAYIŞ'a, Sayın Metalurji ve Malzeme Mühendisi Mehmet UYSAL'a, Sayın Metalurji ve Malzeme Mühendisi Arş. Gör. Ramazan KARSLIOĞLU'a teşekkürü bir borç bilirim.

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü teknikeri Ersan DEMİR'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Arş. Gör. Fatih ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

Aile olmanın önemini ve güzelliğini, bana her zaman sevgi, saygı ve güven duyarak, her konuda destekleyerek gösteren, başta sevgili Annem Gönül KURT, Babam Enver KURT ve Sevgili Eşim Emrah GÜLTEKİN olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xxii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY.....	xxiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	5
2.1.1. Polimer matriksli kompozitler.....	9
2.1.2. Seramik matriksli kompozitler.....	10
2.1.3. Cam matriksli kompozitler.....	10
2.1.4. Karbon-karbon kompozitleri.....	10
2.1.5. Metal matriksli kompozitler (MMK).....	11
BÖLÜM 3.	
METAL MATRİKS KOMPOZİTLER	12
3.1. MMK'lerin Kullanım Alanları ve Teknolojik Önemleri.....	13
3.2. MMK Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	16
3.2.1. Sıvı faz üretim yöntemleri.....	17
3.2.1.1. Atomizasyon ve gaz enjeksiyonu.....	17

3.2.1.2. Vorteks metodu.....	17
3.2.1.3. Pelet metodu.....	17
3.2.1.4. Santrifüj yöntemi.....	18
3.2.1.5. Sıkıştırma döküm.....	18
3.2.1.6. İnfiltrasyon yöntemi.....	19
3.2.2. Katı hal üretim yöntemleri.....	20
3.2.3. Reaksiyonla kompozit üretim teknikleri.....	21
3.3. Takviye Malzemeleri.....	21
3.3.1. SiC takviye malzemesi.....	22
3.3.2. Grafit.....	22
3.4. Metal Matriksli Kompozit Malzemelerin Tribolojik Davranışları.....	23

BÖLÜM 4.

SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	24
4.1. Giriş.....	24
4.2. Sürtünme Kanunları	25
4.3. Sürtünme	26
4.3.1. Yağlama	30
4.3.1.1. Katı yağlayıcılar.....	32
4.4. Aşınma	34
4.4.1. Aşınma türleri	35
4.4.1.1. Adhesiv aşınma	39
4.4.1.2. Abrazif aşınma	39
4.4.1.3. Yorulma aşınması	42
4.4.1.4. Korozif aşınması	43

BÖLÜM 5.

OTOMOTİV FREN SİSTEMİ	44
5.1. Giriş.....	44
5.2. Taşıt Frenleri	45
5.2.1. Disk frenler.....	47
5.2.1. Kampanalı frenler.....	48
5.3. Balatalar	51

5.3.1. Organik balatalar	52
5.3.2. Metalik balatalar	54
5.3.3. Karbon esaslı balatalar	54
5.4. Balatalardan istenilen özellikler	55

BÖLÜM 6.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	57
6.1. Çalışma Programı.....	57
6.1. Deney Malzemeleri.....	58
6.2.1 Matriks malzemeleri.....	58
6.2.2. Kullanılan takviye malzemeleri.....	58
6.3. MMK Malzemelerin Üretimi.....	59
6.3.1 Fren diskinin üretimi.....	59
6.3.2. Fren balatası üretimi.....	61
6.4. Metalografik ve Optik Mikroskop Çalışmaları.....	63
6.5. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	64
6.6. Termal Genleşme Çalışmaları.....	64
6.7. Termal İletkenlik Çalışmaları.....	65
6.8. Aşınma Deney Çalışmaları.....	65

BÖLÜM 7.

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	69
7.1. Partikül Takviyeli MMK Malzemelerin Mikroyapıları.....	69
7.2. Termal Genleşme Deney Sonuçları.....	72
7.3. Termal İletkenlik Deney Sonuçları.....	75
7.4. Aşınma Deney Sonuçları.....	77
7.4.1 Cu-%1 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları.....	77
7.4.2 Cu-%2 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları.....	108
7.4.3 Cu-%3 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları.....	135
7.4.4 Cu-%4 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları.....	157
7.4.5 Cu-%5 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları.....	177

BÖLÜM 8.

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	199
8.1 Sürtünme Katsayısı-Grafit Oranı-Yük Sonuçları	199
8.2 Genel Sonuçlar ve Öneriler.....	202
KAYNAKLAR.....	204
ÖZGEÇMİŞ	208

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

μ	: Sürtünme katsayısı
MMK	: Metal matrisli kompozit
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
CTE	: Termal genişleme katsayısı
N	: Newton
F	: Kuvvet
P	: Yük
Q	: Aşınma oranı
W	: Uygulanan yük
B	: Malzeme sabiti
H	: Malzeme sertliği

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 7.1.	a) %1 b) %2 c) %3 d) %4 e) %5 Grafit takviyeli Cu kompozit balataların grafit dağılımını gösteren mikroyapıları.....	69
Şekil 7.2.	a) %1 b) %2 c) %3 d) %4 e) %5 Grafit takviyeli Cu kompozit balataların, yüksek büyütmedeki mikroyapıları.....	70
Şekil 7.3.	Al-%20 SiC partikül takviyeli MMK fren disk malzemesinin farklı büyütme mikroyapıları.....	72
Şekil 7.4.	Cu-MMK balata malzemelerinin sıcaklık-%genleşme grafikleri.....	73
Şekil 7.5.	Cu-MMK balata malzemelerinin sıcaklık-termal genleşme katsayısı grafikleri.....	74
Şekil 7.6.	Al-MMK fren disk malzemesinin sıcaklık-%genleşme katsayısı grafiği.....	74
Şekil 7.7.	Al-MMK fren disk malzemesinin sıcaklık-termal genleşme katsayısı grafiği.....	75
Şekil 7.8.	Cu-MMK Balata malzemelerinin sıcaklık-termal iletkenlik grafiği.....	76
Şekil 7.9.	Al-MMK fren disk malzemesinin sıcaklık-termal iletkenlik grafiği.....	76
Şekil 7.10.	Cu-%1 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	78
Şekil 7.11.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları.	80

Şekil 7.12.	Cu-%1 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri	82
Şekil 7.13.	Cu-%1 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri	82
Şekil 7.14.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüsü..	84
Şekil 7.15	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) Yüzeyin SEM görüntüsü b) Abrazif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi	85
Şekil 7.16.	Cu-%1 Gr balata malzemesi ile 20N yük 0,5 m/sn hız parametrelerinde yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin a), b), c) SEM görüntüsü d) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi e) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	86
Şekil 7.17.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi.....	88
Şekil 7.18.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	89
Şekil 7.19	. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	90
Şekil 7.20.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	91
Şekil 7.21.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c)10N d) 20N yük, 0,5 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri	92

Şekil 7.22.	Cu-%1 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	94
Şekil 7.23.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları	94
Şekil 7.24.	Cu-%1 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri	95
Şekil 7.25.	Cu-%1 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri	96
Şekil 7.26.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında 20N yük ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri	98
Şekil 7.27.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında 20N yük ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin daha yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri.....	98
Şekil 7.28.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin a), b) SEM görüntüsü c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	99
Şekil 7.29.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,8 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	101
Şekil 7.30.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	102

Şekil 7.31.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	103
Şekil 7.32.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	104
Şekil 7.33.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c)10N d) 20N yük, 0,8 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri	105
Şekil 7.34.	Cu-%1 Gr balata malzemesinin 2N, 5N ve 10N yük ile yapılan tüm deneylerinin bitmesinden sonra incelenen disk yüzeyinin a), b) SEM görüntüleri c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi, d) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	106
Şekil 7.35.	Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	107
Şekil 7.36.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında, aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları	110
Şekil 7.37	Cu-%2 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri	111
Şekil 7.38.	Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri.....	111
Şekil 7.39.	Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 10 yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası aşınma yüzeyinde görülen pulluklama aşınma mekanizmasının görünümü b) Pulluklama (Wedge formation) aşınmasının şematik görünümü	112

Şekil 7.40.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüsü.....	113
Şekil 7.41.	Cu-%2 Gr balata malzemesi ile 20N yük ve 0,5 m/sn hız değerlerinde yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri	113
Şekil 7.42	Cu-%2 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinden alınan ve Şekil 7.41’de görülen SEM görüntülerinde a) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	114
Şekil 7.43.	Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	115
Şekil 7.44.	Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	116
Şekil 7.45.	Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) Siyah Kesik çizgi ile gösterilen noktanın EDS analizi	117
Şekil 7.46.	Cu-%2Gr takviyeli balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	119
Şekil 7.47.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c)10N d) 20 N yük, 0,5 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edile sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri	120

Şekil 7.48.	Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	122
Şekil 7.49.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları.....	123
Şekil 7.50.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	124
Şekil 7.51.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin daha yüksek büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.....	124
Şekil 7.52.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyi sonrasında çıkan aşınma partiküllerinin SEM görüntüsü.....	125
Şekil 7.53.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn hız ve 20N yük ile yapılan deney sonrasında alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	126
Şekil 7.54.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası EDS yapılan yüzeyin a) SEM görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	127
Şekil 7.55.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	128
Şekil 7.56.	Cu-%2 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	130

Şekil 7.57. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	131
Şekil 7.58. Cu-%2 Gr balata malzemesi a) 2N b) 5N c) 10N d) 20 N yük, 0,8 m/sn kayma hızı ve 1000m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri	132
Şekil 7.59. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinden sonra alınan a), b) Disk yüzeyi SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	133
Şekil 7.60. Cu-%3 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	135
Şekil 7.61. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları	136
Şekil 7.62. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aynı büyütmede çekilen SEM görüntüleri.....	136
Şekil 7.63. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında farklı büyütmelerde çekilen SEM görüntüleri.....	138
Şekil 7.64. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyi sonrasında çıkan aşınma partiküllerinin SEM görüntüsü.....	138
Şekil 7.65. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	139

Şekil 7.66.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	140
Şekil 7.67.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	141
Şekil 7.68.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	142
Şekil 7.69.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	143
Şekil 7.70.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c)10N d) 20 N yük, 0,5 m/sn kayma hızı ve 1000m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri	144
Şekil 7.71.	Cu-%3 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklere göre sürtünme katsayı değerleri.....	146
Şekil 7.72.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları.....	146
Şekil 7.73.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aynı büyütmede çekilen SEM görüntüleri.....	147
Şekil 7.74.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında farklı büyütmelerde çekilen SEM görüntüleri.....	148

Şekil 7.75.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyi sonrasında çıkan aşınma partiküllerinin SEM görüntüsü.....	149
Şekil 7.76.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	149
Şekil 7.77.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	151
Şekil 7.78.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	152
Şekil 7.79.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	153
Şekil 7.80.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	153
Şekil 7.81.	Cu-%3 Gr balata malzemesi a) 2N b) 5N c) 10N d) 20 N yük, 0,8 m/sn kayma hızı ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri	154
Şekil 7.82.	Cu-%3 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinden sonra alınan a), b) Disk yüzeyi SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	156

Şekil 7.83.	Cu-%4 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	156
Şekil 7.84.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları	157
Şekil 7.85.	Cu-%4 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri.....	158
Şekil 7.86.	Cu-%4 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri.....	159
Şekil 7.87.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	160
Şekil 7.88.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	161
Şekil 7.89.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	162
Şekil 7.90.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	162
Şekil 7.91.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	163
Şekil 7.92.	Cu-%4 Gr balata malzemesi a) 2N b) 5N c)10N d) 20 N yük, 0,5 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri.....	164

Şekil 7.93.	Cu-%4 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	166
Şekil 7.94.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları.....	167
Şekil 7.95.	Cu-%4 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri.....	168
Şekil 7.96.	Cu-%4 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri.....	168
Şekil 7.97.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	169
Şekil 7.98.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	171
Şekil 7.99.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	171
Şekil 7.100.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	172
Şekil 7.101.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	173
Şekil 7.102.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn kayma hızı ve 1000m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri.....	174

Şekil 7.103.	Cu-%4 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinden sonra alınan a), b) Disk yüzeyi SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	175
Şekil 7.104.	Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	177
Şekil 7.105.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında, aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları	177
Şekil 7.106.	Cu-%5 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri.....	179
Şekil 7.107.	Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri	180
Şekil 7.108.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüsü..	180
Şekil 7.109.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin a) ve b) SEM görüntüleri c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	181
Şekil 7.110.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Yüzey SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi.....	182
Şekil 7.111.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Yüzey SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi.....	183
Şekil 7.112.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Yüzey SEM görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi.....	184

Şekil 7.113.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Yüzey SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi.....	185
Şekil 7.114.	Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	186
Şekil 7.115.	Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri.....	187
Şekil 7.116.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c)10 N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları.....	188
Şekil 7.117.	Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri.....	189
Şekil 7.118.	Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri.....	189
Şekil 7.119.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında ve 20N yük ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri.....	190
Şekil 7.120.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn hız ve 20N yük ile yapılan deneyler sonrasında alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	191
Şekil 7.121.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi	192
Şekil 7.122.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	193

Şekil 7.123.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	194
Şekil 7.124.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	194
Şekil 7.125.	Cu-%5 Gr balata malzemesi a) 2N b) 5N c)10N d) 20 N yük, 0,8 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri	196
Şekil 7.126.	Cu-%5 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinden sonra alınan a), b) Disk yüzeyi SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi.....	193
Şekil 8.1.	0,5 m/sn hız ve 3000 m mesafe parametrelerinde sürtünme katsayısı-grafit oranı-yük sonuçları	199
Şekil 8.2.	0,8 m/sn hız ve 3000 m mesafe parametrelerinde sürtünme katsayısı-grafit oranı-yük sonuçları	200

TABLolar LİSTESİ

Tablo 6.1. Al-Si alaşımının kimyasal bileşimi.....	58
--	----

ÖZET

Anahtar kelimeler: Metal Matriksli Kompozit, Otomotiv Fren Sistemi, Fren Diski, Fren Balatası, Aşınma, Sürtünme, Termal iletkenlik, Termal genleşme

Teknolojik uygulamalardaki çalışma ve yakıt masraflarını düşürmek için otomotiv uygulamalarında malzeme ağırlığının düşürülmesi ve bu yolla mukavemet/yoğunluk (spesifik mukavemet) oranlarının artırılması önemlidir. Bu oran, mühendislik malzemelerinin elastik modül, mukavemet, korozyon, oksidasyon, termal kararlılık, sürünme, aşınma ve yorulma uygulamalarında en önemli parametrelerden biridir.

MMK üretiminin ana amacı matriks alaşımının mukavemet ve elastik modülünü arttırmaktır. Bununla beraber matriks alaşımları farklılığından dolayı değişik elastik modül, mukavemet ve termal genleşme katsayılı malzemeler üretilebilmektedir. En önemli özelliklerinden biri ise aşınma dirençlerinin çok iyi olmasından dolayı aşınma uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilirlerdir.

Bu çalışmanın amacı, otomotiv sanayinde kullanılan geleneksel fren disk ve balata malzemelerine alternatif olabilecek özelliklere sahip yüksek termal iletkenlik, düşük termal genleşme, yüksek aşınma direnci ve standartlara uygun kararlı bir sürtünme katsayısı değerine sahip MMK fren disk ve balata malzemesi üretmek ve özelliklerini belirlemektir.

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF METAL MATRIX COMPOSITE BRAKE DISC, BRAKE PAD

SUMMARY

Keywords: Metal Matrix Composites, Automobile Brake System, Brake Pad, Wear, Friction, Thermal Conductivity, Thermal Expansion

It is an important task to reduce to weight and increase the strength/density (specific strength) in order to reduce the costs of technological applications and fuel. This ratio is also one of the most important parameter in elastic modulus, corrosion, oxidation, thermal stability, creep and fatigue of engineering materials.

The main purpose of the MMC production is to increase the strength and elastic modulus of the matrix alloy. However, it is also possible to produce materials having different elastic modulus, strength and thermal expansion coefficient values. One of the most important parameter is used in the wear applications because of their high wearing resistance.

The aim of this study is to produce MMC brake discs and pads having high thermal conductivity, low thermal expansion, high wear resistance and friction coefficients, which are suitable with the standards as alternative materials for the traditional brake discs and pads.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Farklı uygulamalar için kullanılmak üzere dizaynı ve üretimi yapılabilen malzemeler, yüzyıllardır kullanılan sıradan ve geleneksel malzemelerden (bakır, dökme demir, bronz v.s), yeni geliştirilmiş ileri teknoloji ürünü malzemelere (kompozitler, teknolojik seramikler, yüksek performanslı çelikler, v.s) kadar değişmektedir. Malzeme çeşidinin çokluğundan dolayı, en doğru üretim yöntemi ile üretilecek ve doğru uygulama sahasında kullanılacak olan doğru malzemenin seçimi oldukça zorlayıcı olmaktadır. Bütün bu malzemelerin teker teker incelenmesi ve karakterize edilmesinde çıkabilecek zorluklara ve karışıklılara karşın, malzemelerin geniş bir sınıflandırmaya tabi tutulması gereği doğmuştur [1].

Bu malzemeler esas karakteristik özelliklerine bağlı olarak (sertlik, mukavemet, yoğunluk ve ergime sıcaklıkları) dört ana kategoriye ayrılmıştır. Metaller, plastikler, seramikler ve kompozitler [1, 8]. Her sınıf, farklı ve belki de bir diğer sınıfın özellikleriyle örtüşen özelliklere sahip çok sayıda malzemeyi içermektedir [1].

Metaller; mühendislik çalışmalarında geniş dizayn imkanı ve üretim geçmişi sağlayan, birçok uygulama alanında baskın olarak kullanılan malzemelerdir. Sık kullanılan metaller demir, alüminyum, bakır, magnezyum, çinko, kurşun, nikel ve titanyumdur. Yapısal uygulamalarda alaşımlar saf metallere göre daha sık kullanılır olmuştur. Alaşımlar metalik olmayan elementleri de içerebilen, farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Örneğin dökme demir kırılgan ve korozyon dayanımı düşük bir malzeme olmakla beraber içerisine ilave edilen %1'den daha az miktardaki C yapıyı daha tok bir hale getirirken, bir miktar krom ilavesi korozyon dayanımını arttırmaktadır. Alaşımlandırma ile binlerce yeni metal oluşturulmaktadır. Metaller Alüminyum, Magnezyum ve Berilyum haricinde, plastiklere ve kompozitlere kıyasla daha ağırdır. Metaller yüksek mukavemet, termal kararlılık ve termal-elektriksel iletkenlik özelliklerine sahiptir. Plastiklerden oldukça

çok olan yüksek sıcaklık dayanımları sebebiyle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır [1].

Plastikler; son yıllarda oldukça yaygın kullanım alanı bulan mühendislik malzemelerindendir. Yüksek korozyon dayanımına sahip, hafif ve kolay şekillendirilebilir olan plastikler otomotiv, uzay-uçak endüstrisinde ve büyük-küçük birçok cihazda yaygın olarak kullanılmaktadır. Plastikler levha, çubuk, toz, pelet ve granül şeklinde olabilir. Üretim prosesine bağlı olarak ürünler ya son haline yakın ya da tamamen kullanıma hazır olarak çıkarlar. Yüzey kaliteleri yine üretim prosesine bağlı olarak oldukça iyi olup herhangi bir yüzey işlemi gerektirmediklerinden ürün maliyetleri oldukça düşer. Plastikler düşük termal kararlılıkları sebebiyle yüksek sıcaklıklarda kullanılamazlar. Genel olarak kullanım sıcaklıkları 100°C ve altındadır. Bazı plastik malzemeler ise yaklaşık 200°C'ye kadar performanslarında önemli bir düşüş olmadan çalışabilirler. Metallerden çok daha düşük ergime sıcaklıklarına sahip olduklarından kolayca üretilirler [1].

Seramikler; güçlü kovalent bağlara sahip olmaları sebebiyle üstün termal kararlılık ve yüksek sertlik gösterirler. Tüm malzemeler arasında en sert ve katı malzemelerdir. Seramikleri metallerden ayıran esas karakteristik özellik, seramiklerin neredeyse hiç sünek davranış göstermemeleridir. Mühendislik malzemeleri içinde en yüksek ergime noktasına sahip malzemelerdir. Genellikle yüksek sıcaklık ve yüksek aşınma dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Korozyona karşı dayanıklıdırlar. Seramiklerin üretimi için yüksek sıcaklık ekipmanları gerekmektedir. Yüksek sertliklerinden ve gevrekliklerinden dolayı üretim sonrası işlenmeleri oldukça zordur. Bu sebeple nihai ürün olarak üretilirler [1].

Kompozitler; genellikle şekil ve kimyasal bileşimleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla sayıda makro bileşenin kombinasyonundan oluşan malzeme sistemi şeklinde tanımlanabilir [1, 3, 5]. Doğada bulunan kemik, ağaç v.b. gibi malzemeler kompozit malzeme olarak sayılabilir. İnsan yapımı kompozitlerin binlerce yıldır kullanılmakta olduğu bilinmektedir (saman v.b gibi malzemelerin doğal fiber olarak kerpiç tuğla olarak kullanılması gibi) [7].

Kompozit malzemeler uzun zamandır teknolojik problemleri çözmek amacıyla kullanılmaktadır. 1960'larda polimer esaslı kompozitlerin üretilmesi ile birlikte kompozit malzemeler yaygın kullanılan mühendislik malzemeleri arasında yer almıştır. Kompozitlerin otomotiv parçaları, spor malzemeleri, uzay ve uçak bileşenleri, denizcilik malzemeleri, çeşitli cihazlar ve yağ endüstrileri gibi alanlarda oldukça yaygın kullanım alanı bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımındaki artış, ürün performansının farkına varılması ve dünya piyasalarında hafif malzemelerin artan yarışı ile ortaya çıkmıştır [1].

Tüm malzemeler içerisinde kompozit malzemeler, oldukça yaygın olarak kullanılan çelik ve alüminyum gibi malzemelerin yerine çok daha iyi performansla kullanılma potansiyeline sahiptir. Örneğin kompozit malzemenin çelik bileşenler yerine kullanılmasıyla bileşen ağırlığından %60–80, alüminyum yerine kullanılmasıyla da yine parça ağırlıklarından %20–50 kazanç sağlanabilmektedir. Dolayısıyla bugünkü ve gelecekteki birçok uygulama alanında kompozit malzemelerin kullanımının katlanarak artacağı görülmektedir [1].

BÖLÜM 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler genellikle, sürekli bir ana faz malzemenin içerisinde bir ya da daha fazla süreksiz fazın ilave edilmesi ile oluşturulur. Bu süreksiz kısım takviye fazı, sürekli olan ana faz ise matriks olarak adlandırılır. Genelde takviye malzemeleri matriks malzemesinden daha mukavemetli olmaktadır. Kompozitin tasarlanan performansı göstermesi için her iki bileşene de ihtiyacı vardır [8].

Kompozit terimi geniş manada ele alındığında; çok kristalli birçok metal ve metal olmayan parçaların bir arada toplanması olarak ifade edilebilir. Bu sebepten dolayı kompozit malzeme terimini daha dar ve anlaşılır kalıplar içinde ele almak lazımdır [3]. Kompozit malzeme iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelerek kendi özelliklerinden çok daha üstün özelliklere sahip yeni bir malzeme meydana getirmesi ile meydana gelmektedir [1].

Kompoziti oluşturan bileşenlerin zayıf olan özellikleri diğer bileşenin daha üstün bir özelliği ile takviye edilerek, bileşenlerin üstün özelliklerini taşıyan yeni fonksiyonel malzemeler meydana getirilir. Dolayısıyla kompozit malzemenin özellikleri kendisini oluşturan bileşenlerin özelliklerinden daha iyidir [1].

İçyapıları çıplak gözle incelendiğinde yapıyı oluşturan bileşenler kolayca seçilip ayırt edilebilir. Sözlük anlamında kullanılan kompozit terimi çeşitli parçalardan veya elementlerden oluşan malzemeleri tanımlamaktadır. Bu tanıma göre de pek çok malzemenin kompozit grubu içerisinde girmesi gerekmektedir. Başta alaşımlar olmak üzere konvansiyonel mühendislik malzemeleri ile gerçek anlamda kompozit malzemelerin birbirlerinden ayırt edilmesi güçleşecektir [5].

Tanımlamadaki bu farklılıklar, kompozit malzemeyi oluşturan yapı bileşenlerinin farklı boyutlarda tanımlanmasından kaynaklanmaktadır. Yapı bileşenleri element

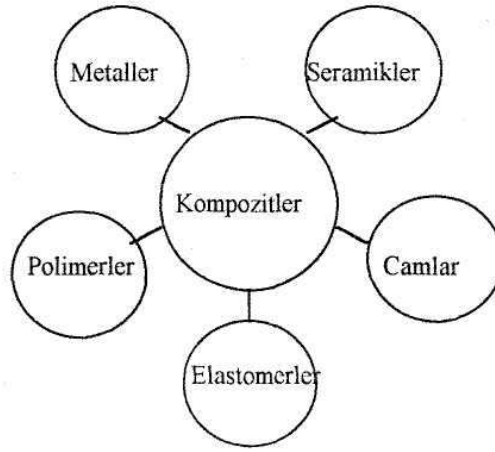
düzeyinde düşünülürse arı haldeki metaller dışında kalan alaşımlar ve bileşikler kompozittir. Diğer taraftan, bileşenler mikroyapısal boyutta düşünüldüğünde ise iki veya daha fazla sayıda farklı kristal, molekül veya fazdan oluşan tüm malzemeler de kompozit tanımı içerisine girecektir. Kompozit malzemelerin yapı bileşenlerinin makro boyutta olduğu kabul edilirse partikül karakterli kompozitlerden olan dispersiyonla sertleştirilmiş alaşımlar ve sermetler de tanımın dışına çıkar. Bütün bu durumların göz önünde bulundurulması şartıyla kompozit malzeme; temel olarak birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla makro bileşenin karışımından veya birleşmesinden meydana gelen malzeme sistemidir diye tanımlanabilir [5].

Bir malzemenin kompozit sayılabilmesi için kabaca aşağıdaki özellikleri taşıması gerekmektedir [3]:

- a) İnsan tarafından üretilmelidir,
- b) Farklı bileşenlerle beraber kimyasal olarak birbirinden farklı en azından iki malzemenin kombinasyonundan oluşmalıdır,
- c) Kompozit malzemeyi oluşturan ayrı malzemeler üç boyutlu olarak birleşmelidirler,
- d) Kompozit, kendisini meydana getiren bileşenlerin tek başlarına sahip olamayacakları özellikler göstermelidir.

2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler içerisine ilave edilen takviye malzemenin morfolojisine ya da matriks malzemesine göre sınıflandırılmaktadır [1, 7, 8, 11, 12]. Kompozitleri meydana getiren bileşen sınıfları çok değişik malzemelerden olabilmektedir. Şekil 2.1. kompozitlerin üretildiği malzeme sınıflarını göstermektedir. Kompozit sistemlerine bağlı olarak değişik sınıftaki malzemelerden en az iki grup bir araya getirilerek üstün özelliklere sahip malzemeler elde edilmektedir [2].

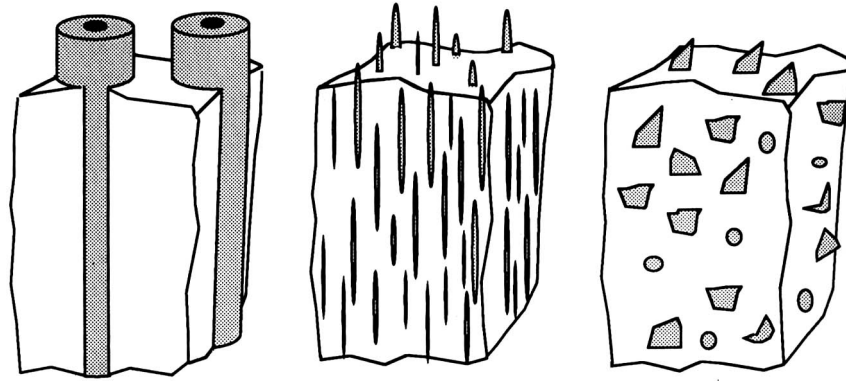


Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin üretildikleri malzeme sınıfları [3, 7]

Kompozit malzemeler, yapısal bileşenlerin şekline göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır [3]:

- Fiberli kompozitler
- Levhasal kompozitler
- Partikül kompozitler
- Doldurulmuş kompozitler
- Tabakalı kompozitler

Elastik modülünün ve çoğunlukla da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bir bağlayıcı, matriks içine tane şeklindeki katkı maddelerinin ilavesi ile oluşturulan partikül esaslı kompozitler, büyük uzunluk/çap (L/D) oranı nedeni ile daha fazla yük iletimi yeteneğine sahip dolayısıyla yüksek dayanımlı whisker, kısa fiber veya lamel esaslı kompozitler ve fiberin yüksek yeterlikli tüm özelliklerini taşıyan sürekli fiber esaslı kompozitler [6] kullanımı en yaygın olan kompozit malzemelerdir (Şekil 2.2.). Her sınıf eşsiz özelliklere ve geniş uygulama alanlarına sahip olmakla birlikte kendi aralarında da özel kategorilere ayrılmaktadır [8].



Şekil 2.2. Metal matriksli kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan takviye tiplerinin şematik görünümü [13]

Sürekli fiberler, geometrik olarak karakterize edilecek olursa, boyları çaplarına oranla oldukça büyük olan takviye malzemeleridir. Matriks malzemesinden daha mukavemetlidir. Fiber çapları genellikle 3–200 µm arasındadır. Whiskerler ise genellikle daha kısa ve kalın fiberlerdir. Süreksiz fiberler olarak da adlandırılır. Boy-çap oranları $5 < l/d < 1000$ şeklindedir. Whiskerlerin çapları da 0.02–100 µm arasında değişmektedir. Fiberler takviye malzemelerinin özel şekillilerindedir [8]. Sürekli fiberlerle takviye edilmiş MMK'lerde takviye malzemesinin hacim oranı % 70'lere kadar arttırılabilmektedir [3]. Takviye hacminin arttırılması ile mukavemet değerleri de arttırılabilmektedir. Eğer takviye malzemesi çok miktarda ilave edilirse, matriks malzemesinin bu takviye faz bileşenlerini birbirinden ayırması zorlaşır ve bu durumda takviye malzemesi üst üste binebilir, birbirine karışır ya da düğümlenir [8]. MMK'lar üzerindeki ilk çalışmalar sürekli fiberlerle takviye edilen malzemeler üzerine olmuştur ve bu malzemelerin uygulamaları havacılık alanında kendini göstermiştir. Bu malzemelerin kullanım alanları daha ucuz ve kolay fiber üretim teknolojisinin gerektiği şekilde gelişmemesinden dolayı sınırlı kalmıştır [3].

Partikül takviyeli kompozitler, matriks malzemesinin içerisine takviye malzemesi olarak partiküllerin ilave edilmesi ile oluşur. Partiküllerde fiberler gibi farklı boyutlarda olabilmektedirler [8]. Partiküller tahmin edilebilir izotropik özellikler sağlayan malzemelerdir [10, 12]. Ayrıca birçok partikül takviyeli kompozit malzeme iyi mekanik, termal ve tribolojik özellikleri sebebiyle ilgi çekmekte [10], çok çeşitli endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır [11]. Yüksek mukavemet, sertlik ve termal iletkenlik özelliklerinin yanı sıra partikül takviyeli kompozitlerin aşınma dayanımı,

takviyesiz matriks metaline göre çok daha iyidir. Al alaşımları üzerine çok sayıda çalışma yapılmakta Ti, Fe ve Mg alaşımları da ilgi uyandırmaktadır. Yaygın olarak kullanılan partiküller SiC ve Al₂O₃ [10, 11] olmakla birlikte, TiB₂, B₄C, SiO₂, TiC, WC, BN, ZrO₂, W gibi partikül takviyeler üzerine çalışmalar yapılmaktadır [11]. Bu tür malzemeler, matriks metalinin takviyesiz halde sahip olduğu abrasif ve kaymalı aşınma değerlerinin çok daha altında özellikler sergilemekte ve tribolojik dayanımın takviye malzemeleri ile arttığını göstermektedirler [10].

Takviye malzemeleri kompozit yapısını ya da ilave edildikleri malzemenin yapısını güçlendirmek amacıyla kullanılmaktadır [8]. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde uygulanan yük direkt olarak hem matriks hem de takviye yani fiber tarafından taşınır. Süreksiz fiber takviyeli ya da partikül takviyeli kompozitlerde ise yük matriks tarafından takviyeye taşınır ve takviye malzeme yükü taşır [12].

En yaygın kullanılan takviye malzemeleri boron, cam, grafit (veya karbon) ve kevlar fiberler, alümina, alüminyum, silisyum karbür, silisyum nitrat ve titanyumdur [8].

Matriks malzemesi takviye malzemesini destekleyen, takviyeleri birbirinden ayıran ve koruyan bağlayıcı bir malzeme gibi davranmaktadır. Malzemeye gelen yük matriks tarafından takviye malzemeye iletilir. Matriks tipik olarak daha düşük yoğunluğa, dayanıma yani takviye malzemesinden daha düşük mukavemete sahip olmaktadır [1, 8]. Gevrek, sünek, elastik ya da plastik olabilir. Lineer ya da lineer olmayan gerilme-genleme davranışı gösterebilir. En yaygın kullanılan matriks malzemeleri karbon, seramik, cam, metal ve polimerik matrikslerdir [8].

Kompozit malzemeler, kullanılan matriks malzemesine göre şu şekilde sınıflandırılabilir[3, 5]:

1. Polimer matriksli kompozitler
2. Seramik matriksli kompozitler
3. Cam matriksli kompozitler
4. Karbon-karbon kompozitler
5. Metal matriksli kompozitler (MMK)

2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimerik matrisler en düşük maliyetli ve en yaygın kullanılan matris malzemeleridir. Polimerler, metal ve seramiklere göre çok daha fazla komplekstirler. Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla çalışılabilir malzemelerdir [3]. Üretimi oldukça kolaydır. Mekanik özellikleri iyi olmakta beraber genellikle takviye malzemesini ıslatma özellikleri de iyidir. Düşük yoğunluğa sahiptir. Üretimleri düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiği için birçok organik takviye malzemesinin kullanılabilmesi avantajları arasında sayılırken [8] diğer taraftan düşük modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılan polimer matrisler genelde sürekli fiber takviyeli olarak kullanılırlar. Bunlardan en önemli olanları sürekli fiberlerle takviye edilen polyster ve epoksi reçine matrisleridir. Epoksi reçine matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarından biri havacılık uygulamalarıdır [3].

Polimer matrisli kompozitlerle çalışırken göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden biri sıcaklık, diğeri nemdir. Özellikle bu iki faktörün beraber etkin olduğu şartlarda polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinde hidrotermal etkilerden dolayı düşüşler meydana geldiği belirtilmektedir [3].

Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok bilinen ve en fazla kullanılan metotlardan bazıları; elle sıvama, tel sarma, kese kalıplama işlemi, pültrüzyon metodu, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termo oluşum metotlarıdır. Polimerlerde kullanılan takviye malzemelerinden en önemli olanlarının; cam fiber, kevlar fiber, boron fiber ve karbon fiberler olduğu rapor edilmektedir [3].

2.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik malzemeler çok sert ve kırılındırlar. Bunun yanında yüksek sıcaklıklarda bile yüksek elastik özellikler gösterirlerken kimyasal olarak serttirler ve ayrıca düşük yoğunluk gibi özellikler sergilemektedirler. Seramik malzemeler termal şok direncinin ve tokluğun düşük olduğu malzemelerdir [3]. Seramik matrisle ilave edilen karbon, seramik, metal ve cam fiberler özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları gibi özel

şartlar için geliştirilmektedir [8]. Seramik malzemelerin seramik fiberler ile takviye edilmesi durumunda, mukavemet yükselmekte ve tokluklar da artmaktadır. Alümina ve zirkonya esaslı seramik kompozitler üzerindeki son yıllardaki çalışmalar, bu malzemelerin sadece roket başlığı, uzay araçları gibi uygulamalarda değil aynı zamanda insan vücudunda da kullanılmaya başlanmasına sebebiyet vermiştir. Seramik matriksli kompozitlerde proses parametreleri ile oynayarak mikro çatlaklar oluşturulmaktadır. Bu çatlaklar gerilme konsantrasyonlarının yoğunlaşmasını engelleyerek gerilmeleri absorbe etmektedirler [3].

Seramik matriksli kompozitlerin üretimleri iki aşamalı bir prosestir. Birincisi takviye malzemelerinin matriks içine verilmesi ve ikincisi ise matriksin yoğunlaştırılmasıdır. Üretim metotlarının bazıları; viskoz infiltrasyon, sıcak izostatik presleme, infiltrasyon, toz metalürjisi içerisinde sayılabilen tüm metodlar, kimyasal reaksiyon, sol-jel ve polimer piroliz metotlarıdır [3].

2.1.3. Cam matriksli kompozitler

Cam ve cam-seramik kompozitler genellikle takviye malzemesi olarak kullanılan cam-seramiklerden daha düşük elastik modüle sahiptirler. Cam ya da seramik matriksli kompozitlerin en karakteristik özelliği yüksek sıcaklıklardaki mukavemetleridir. Cam matriksli kompozitlerin başlıca kullanıldıkları yerler, motorlarda ısı-rezistans parçaları, egzoz sistemleri ve elektrikle ilgili parçalardır[8].

2.1.4. Karbon-karbon kompozitleri

Matriks malzemesi olarak kullanılan karbonun birim ağırlıktaki ısı kapasitesi oldukça yüksektir. Roket ağızlarında, uzay araçlarında bulunan koruyucu kalkanlarda, debriyaj ve fren balata-disk sistemlerinde kullanılmaktadır [8]. Bu malzemeler yüksek teknoloji gerektiren askeri ve uzay alanlarındaki uygulamalarına nispeten düşük hacim sağlamasına karşın, katma değeri yüksek ve oldukça pahalı malzemelerdir [6].

2.1.5. Metal matriksli kompozitler (MMK)

Metal matriks, özellikle oksitli ortamlarda ve yüksek sıcaklık uygulamalarında iyidir. Matriks malzemesi olarak kullanılan en yaygın metaller alüminyum, magnezyum, titanyum [6], demir, nikel, tungsten [8] ve bunların alaşımları ile bazı süper alaşımlar, takviye olarak kullanılan malzemeler ise sürekli fiber, kısa fiber, whisker veya partikül şeklinde üretilen, örneğin; bor, karbon, silisyum karbür ve alümina gibi seramikler veya çelik, tungsten gibi bazı tellerdir. MMK'larda tüm kompozit özellikleri, katkı ve matriks alaşımlarının özelliklerine, üretim süreçlerine, katkı/matriks ara yüzeyi ve mikro yapı özellikleri gibi çeşitli etkenlere bağlıdır [6].

Toz metalurjisine alternatif olarak geliştirilen döküm ve reaksiyonla MMK üretim tekniklerinin ucuz ve pratik olmalarından dolayı bu malzemeler üzerindeki ilgi son 30 yılda doruk noktasına ulaşmıştır. Seramiklerin yüksek elastik modül ve metallerin yüksek süneklik özelliklerini birleştiren bu malzemeler, havacılık ve savunma sanayinin yanında otomotiv endüstrisinde de kullanılmaya başlanmışlardır. MMK malzemelerin yüksek aşınma direnci de göz önüne alındığında bu malzemelerin modern teknolojide kullanılmaya aktarılmasının önemi açıkça ortaya çıkmaktadır [3].

BÖLÜM 3. METAL MATRİKS KOMPOZİTLER

Metal matriksli kompozit malzemeler, üç-boyutlu takviye (genellikle oksit, karbür ya da nitrür) içeren metalik matriks (genellikle Al, Cu, Fe, Mg, Ti ya da Pb) olarak tanımlanabilir. Bu takviye malzemeleri sürekli-süreksiz fiberler, partiküller ya da whiskerler olarak sınıflandırılırlar [10]. MMK malzemeler hakkındaki bilgiler daha eski yıllara dayanmasına rağmen, bu malzemelerin kullanımları son yıllarda, özellikle son 30 yılda oldukça yaygınlaşmıştır. MMK malzemelerin yerlerine kullanıldıkları metal ve diğer bazı malzemelere göre avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [1, 3]. Buna göre MMK malzemeler;

- a) Yüksek elastik modüle sahiptirler,
- b) Yüksek mukavemet (çekme, basma, aşınma, sürünme ve kayma) gösterirler.
- c) Yüksek sıcaklıklarda çalışırlar,
- d) Metallerin süneklik ve tokluk, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek modül özelliklerini birleştirirler,
- e) Tekrar üretilebilir mikroyapı ve özelliklere sahiptirler,
- f) Düşük yoğunluk değerleri verirler,
- g) Sıcaklık değişikliklerine veya termal şoka karşı düşük hassasiyet gösterirler,
- h) Yüksek yüzey dayanıklılığı ve yüzey akışlarına karşı düşük hassasiyete sahiptirler,
- i) Yüksek elektrik ve termal iletkenlik özellikleri mevcuttur.

MMK'lerin yüksek toklukları, yüksek sıcaklıklarda bile mukavemetlerini muhafaza edebilmeleri en açık ve en önemli avantajlarıdır. Gereken yüksek mekanik direnç, takviye malzemesinden sağlandığından dolayı, bir kompozit malzeme için matriksin yüksek sıcaklıklarda bile kararlı kalabilmesi mümkündür [3].

Üretilecek olan Al matriks kompozitler aşınma direnci yüksek çalışma şartlarında statik ve dinamik yüklere karşı Al alaşımlarına göre çok daha dayanıklı

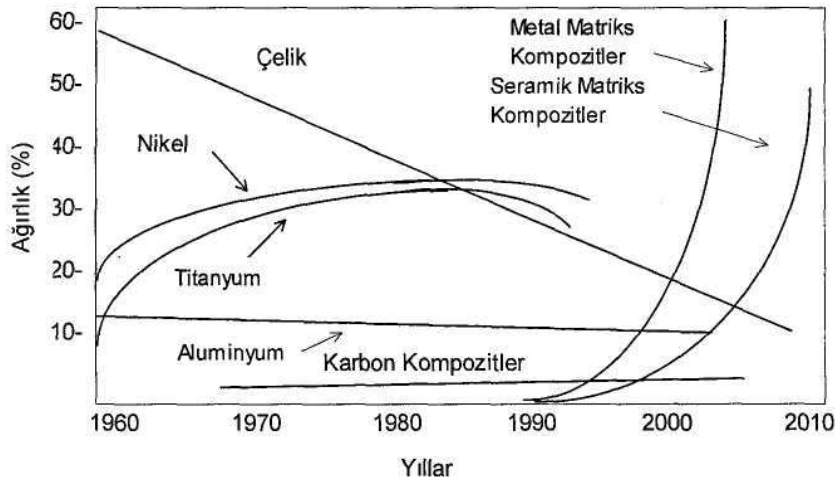
malzemelerdir. Bunun yanında Ti matrisli kompozitlerde de kullanılmaktadır. Aşınma direnci ve diğer mekanik özelliklerin yüksek olması istendiği uygulama alanlarında kullanılabilir. Örneğin: Motor pistonları, fren ve debriyaj balataları bu malzemelerin kullanılabilabileceği en uygun yerlerdir. Dünya piyasalarında SiC partikül destekli pistonlar ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Ülkemizde ise henüz pistonlar Al alaşımlarından veya dökme demirden yapılmaktadır. Ülkemizde balata üretiminde de toksik etkili asbest kullanılmaktadır. Asbest ucuz olmakla birlikte solunum yoluyla akciğer kanseri veya astım gibi hastalıklara sebep olmaktadır. Balataların MMK olarak üretilmesi ile insan sağlığını tehdit eden bu unsurlar ortadan kalkacaktır [6].

Sürekli fiberlerle takviye edilen MMK malzemeler aslında kompozit malzemelerin spesifik olarak belli bir sınıfını teşkil etmektedirler. Metallerin çoğunun aksine fiber takviyeli kompozit malzemeler anizotropiktir. Anizotropikliğin derecesi fiber oryantasyonuna bağlıdır. Metal matrisli yükü transfer ederken ve aynı zamanda yükü fiberlere iletirken, fiberlerin ana rolü ise yükü taşımaktır. Matrisin yükü transfer edebilmesi ve fiberlerin yükü taşımadaki başarısı fiber/matris arayüzündeki ıslanmanın başarısına bağlıdır. Ticari uygulamalarda dispersiyonla sertleştirilmiş ve partikül takviyeli MMK malzemeler kullanılırken, sürekli fiberlerle takviye edilmiş MMK'lerin uygulaması, havacılıktaki, bazı uygulamalarla ve askeri uçakların bazı parçaları ile sınırlandırılmıştır. Bunların dışında istisna olarak sürekli paslanmaz çelik fiberlerle takviye edilen MMK malzemeler otomobil biyel kollarında da kullanılmaktadırlar [3].

3.1. MMK'lerin Kullanım Alanları ve Teknolojik Önemleri

Metal matrisli kompozit malzemeler, geleneksel alaşımlar ve malzemelerle kıyaslandığında geliştirilmiş mekanik özelliklerinden dolayı birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [6, 15, 17]. Geçtiğimiz yüzyılda kompozit malzemelerin kullanımı, araçlar için havalı lastik ve takviyeli beton malzemelerin ortaya çıkmasıyla yayılmıştır. Diğer adım ise İkinci Dünya Savaşı sırasında, cam fiber takviyeli plastik malzemelerin geliştirilmesi olmuştur. 1970 ve 80'lerde uzay ve uçak endüstrisi gibi ağırlık ve hacmin çok daha önemli olduğu

uygulama alanlarının [6, 7] ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla çok çeşitli kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Geliştirilen ve geliştirilmekte olan bu malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır[7]. Şekil 3.1.'de jet motorlarında ve otomobillerde kullanılan ve ileri ki yıllarda kullanılması düşünülen malzemeleri göstermektedir [3]. Bunlar arasında SiC ve Al₂O₃ partikül destekli alüminyum esaslı döküm kompozitler, diğer kompozitlere kıyasla daha düşük üretim maliyetine sahip olmaları nedeniyle değişik mühendislik uygulamaları için potansiyel malzemelerdir. Bu kompozitler takviyesiz malzemelerle kıyaslandığında elastiklik modülü, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanma gibi mekanik özelliklerde önemli ölçüde üstünlüğe sahiptir. Daha da önemlisi, partikül takviyeli Al kompozitler partikül hacim oranı ve dağılımına göre değişen düşük termal genleşme özelliğine sahiptir. Bu son özellik yüksek ısı iletkenlik ve düşük yoğunlukla birleşince alüminyum matris kompozit malzemelerini elektronik soğutucu, uzay ve havacılık alanında ilgi çekici kılmıştır [6].

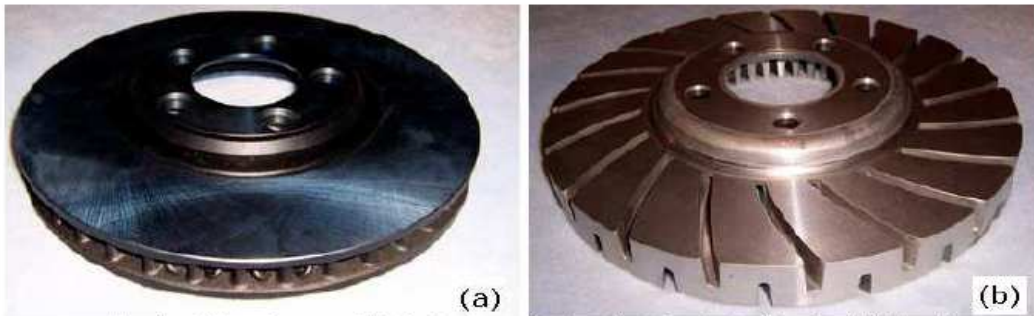


Şekil 3.1. Jet Motorlarında ve otomobillerde kullanılan ve ileri ki yıllarda kullanılması düşünülen malzeme tahmini [3].

Ağırlığın azaltılması, mekanik özelliklerin ve özellikle aşınma davranışındaki ilerleme ve kolay üretim kompozit malzemeleri cazip hale getirmektedir. Al esaslı MMK malzemeler, yüksek spesifik mukavemet, sertlik ve aşınma dayanımı da göstermektedir. Dünyanın farklı bölgelerinde, farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda [5, 14, 15], fren sistemlerinde dökme demir yerine Al-MMK malzemelerin kullanılabilirliği araştırılmış, alüminyum fren bileşenlerinin

geliştirilmesi, karakterizasyonu, fren sisteminin matematiksel analizleri ve dökme demir ile karşılaştırmalı incelemeleri üzerine çalışılmıştır [15].

Buna rağmen bu konu üzerine yapılan literatür çalışmaları halen yetersiz kalmaktadır. Yapılan tüm çalışmalarda birinci amaç Al-MMK malzemelerin dökme demir malzemelere kıyasla yüksek termal iletkenlik, düşük termal genleşme, düşük yoğunluk özelliklerinden yararlanmaktır (Şekil 3.2.). Bu çalışmalarda, dökme demir yerine Al-MMK malzemelerin kullanılması ile fren sistemlerinde etkin bir ağırlık kaybının olacağı ve bunun büyük avantajlar sağlayacağı belirtilmektedir [15].



Şekil 3.2. a) 4 kapılı bir sedan otomobil için gri dökme demirden üretilen fren diski (ağırlık:8,44kg) b) Aynı araç için Al-MMK malzemedan üretilen fren disk prototipi (ağırlık: 3,32kg) [35]

Yeni fren balata malzemelerinin geliştirilmesi, bu malzemelerin frenleme şartlarına karşı dayanımları da çok önemlidir. %20-%30 SiC takviyesi ile üretilen fren disk malzemeleri, yarış uygulamalarında ve araç testlerinde oldukça başarılı olmuştur [2]. MMK malzemeler basınç kazanları (Al-karbon fiberler) yatak malzemeleri ve ses izolatörleri (Pb-cam fiberleri, Cu-Pb-Sn grafit, Al-grafit), aşınmaya dayanıklı elemanlar (Al-Cu-SiC, Al-Al₂O₃, Al-grafit), pil plakaları (Pb-grafit fiberleri) ve aşındırıcılar (Al/SiC whisker) gibi yapısal uygulamalarda da metal ve alaşımlarının yerini almaya aday görünmektedirler. Elektrik-Elektronik sanayinde mikrodalga devre üniteleri (Al-SiC), elektrik fırçaları (Al-karbon fiberleri) MMK malzemelerden elde edilmektedir. MMK malzemelerin elektronik cihazların paketlenmesinde kullanılması ile ağırlık 3 kat civarında azalmakta ve bunun yanında termal iletim katsayısı da önemli derecede artmaktadır. Böylece yüksek sıcaklıktan çabuk etkilenen elektronik cihazlar emniyet altına alınmaktadır. Süper iletken malzemelerde

metallere (Ni,Cu, Ag) Nb fiberler ilavesi ile üretilip kullanılmaktadır. Raketler (Al SiC partikül), bisiklet iskeletleri (Al-Al₂O₃) gibi spor eşyaları da metal bazlı kompozitlerden dizayn edilmektedir [5].

3.2. MMK Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Takviye malzemelerinin ve kompozitlerin üretimindeki gelişmeler kompozit malzemelerin ticari kullanılabilirliklerini arttırmaktadır. Metal matriksli kompozitlerin üretilmesinde çok sayıda üretim yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler temelde üç gruba ayrılmaktadır [2, 3, 5]:

- (1) Sıvı faz üretim yöntemleri,
- (2) Katı faz üretim yöntemleri,
- (3) Reaksiyon (in situ) üretim yöntemi

Sıvı faz ve katı faz üretim yöntemleri konusunda bugüne değin sayısız üretim tekniği geliştirilmiştir. Geleneksel üretim yöntemlerinin modifikasyonu ile MMK malzemeler üretmeyi amaçlayan firmalar ve araştırmacılar çok sayıda yeni yöntemler geliştirmiş olduğundan dolayı araştırmacılar tarafından standart üretim yöntemlerinin sınıflandırılması mümkün olamamıştır. Reaksiyonla MMK üretim tekniği aslında sıvı ve katı faz üretim yöntemlerinin bir kombinasyonudur. Esasen, üretim yöntemleri, kompozitlerin uygulamaya aktarıldığı ilk yıllarda sıvı ve katı faz teknikleri olarak belirlenmiş, daha sonra geliştirilen reaksiyonla MMK malzeme üretim tekniğinin bu iki sınıf içinde hangisine dahil edileceği konusundaki tereddütler sonucunda birçok araştırmacı tarafından yeni bir kompozit üretim sınıfı olarak tanımlanmıştır [3]. Ticari olarak kullanılan birçok kompozit malzeme; düşük maliyetler, toz haldekinde daha iyi taşınabilirlik ve çok farklı şekil-boyutlarda üretim gibi proses avantajlarından dolayı [2, 16] sıvı hal üretim yöntemleri ilgi çekmekle birlikte bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir: (i) Partikül ya da fiberlerin aglomerasyon ve dentritik segregasyondan dolayı matriks içerisinde homojen dağılmaması, ve (ii) yüksek ergime sıcaklığından dolayı (matriks-takviye) arayüzeylerde kimyasal reaksiyonların meydana gelmesi gibi [16].

3.2.1. Sıvı faz üretim yöntemleri

3.2.1.1. Atomizasyon ve gaz enjeksiyonu

Bir enjeksiyon tabancası kullanılarak inert bir taşıyıcı gaz yardımıyla seramik tozları sıvıya ilavesi: Genel olarak atomizasyon ve gaz enjeksiyonu olarak bilinir. Takviye malzemelerinin, özellikle partiküllerin sıvı matriks içersine N₂ gazı yardımıyla disperse edilmesi prensibine dayanmaktadır [3].

3.2.1.2. Vorteks metodu

Bu yöntemde, ergitilen matriks metalinin içine daldırılan bir karıştırıcı yardımıyla oluşturulan vorteks içine seramik takviye malzemeleri kontrollü olarak verilerek MMK malzemeler elde edilir. Genelde partikül takviyeli MMK malzemelerin üretimi için daha uygun olmasına rağmen kısa fiber veya whisker takviyeli kompozitlerin üretilmesi de mümkündür [5].

Kompozit dökümden tek farkı ilavelerin daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesidir. MMK üretim yöntemlerinin içinde en ucuz ve en kolay olduğu kabul edilmesine rağmen dezavantajları da mevcuttur. Her şeyden önce karıştırma ve ilavelerin kontrollü atmosferde yapılması gerekmektedir. Proses değişkenlerinin iyi kontrol edilmediği durumlarda porozite oranları artmaktadır [5].

3.2.1.3. Pelet metodu

Bu yöntemde önceden sıkıştırma döküm gibi herhangi bir yöntemle hazırlanan peletler sıvı metale ilave edilir. Hazırlanan peletler matriks metali ile aynı bileşime sahip olan metal ile yüksek orandaki (% 50-60) takviye malzemesinden meydana gelmektedir. Peletler hazırlanmadan önce takviye malzemeleri genelde Ni veya Cu gibi metallerle kaplanmaktadır. Bu yöntem ile kompozitler tekrar tekrar ergitilip dökülebilmektedir. Yöntem, oldukça ucuz ve pratik bir yöntemdir. Tek dezavantajı hazırlanan peletlerin tabakalar halinde oksit içerebilmesidir [3].

3.2.1.4. Santrifüj yöntemi

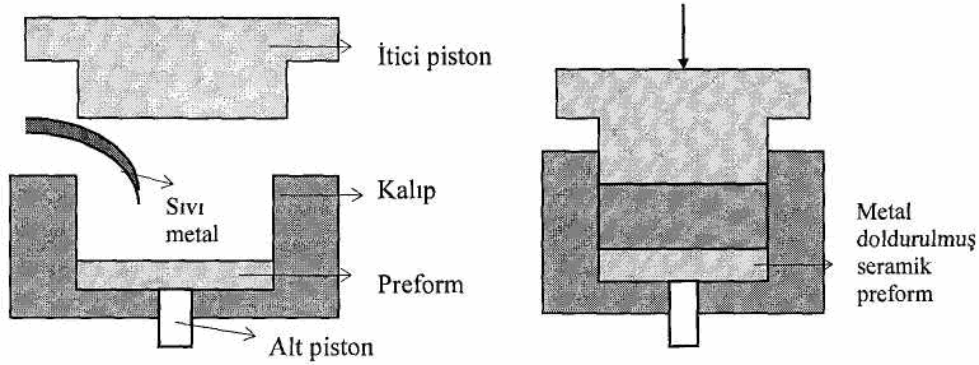
Herhangi simetrik bir parçanın üretilmesi durumunda santrifüj döküm olumlu sonuçlar verebilmektedir. Parçanın dış yüzeyinde mukavemet ve sertliğin artırılması isteniyorsa yoğunluğu matriks metalin yoğunluğundan daha yüksek olan partiküller kullanılmaktadır (Al-Al₂O₃ sistemi). İç yüzeyde, özellikle aşınmaya dayanıklı bir tabaka arzu edildiğinde, matriksinkinden düşük yoğunluğa sahip takviye malzemeleri tercih edilmektedir (Al-Grafit). Partiküller sıvıya ya santrifüj öncesi herhangi bir yöntemle verilmekte veya metalin santrifüj kalıbına aktarılması esnasında metalle beraber kalıba kontrollü bir şekilde özellikle bir enjeksiyon tabancası ile püskürtülmektedir[5].

3.2.1.5. Sıkıştırma döküm

MMK malzemelerin üretilmesinde sıkıştırma döküm tekniğinin, en önemli en pratik ve en ümit verici yöntemlerden birisi olduğu belirtilmektedir. Sıkıştırma döküm yöntemi, herhangi bir metalin basınç altında katılaştırılmasına. Bu yöntemle hemen hemen her tipte takviye malzemesi kullanılarak MMK malzeme üretilmesinin mümkün olduğu ifade edilmektedir. Bu metodda takviye malzemesi Şekil 3.3.'de şematik olarak verilen bir kalıp içine yerleştirilmekte ve döküm sıcaklığına çıkarılmış sıvı metal belli bir sıcaklığa ısıtılan takviye malzemesi üzerine dökülmektedir. Takiben, katılma tamamlanıncaya kadar sıvı metal üzerine yüksek miktarlarda basınç uygulanmaktadır [3].

Yüksek boyutsal kararlılık ve yüzey düzgünlüğü, parçaların talaşlı işleme ihtiyacını en aza indirir. Diğer döküm yöntemlerine nazaran uygulanan yüksek basınçtan dolayı gözenek oranı azaltılmış ve küçük taneli mikroyapıya sahip parçalar üretilebilir. MMK malzemelerin üretilmesinde sıkıştırma döküm tekniğinin, en önemli en pratik ve en ümit verici yöntemlerden birisi olduğu belirtilmektedir. Bu yöntemle hemen hemen her tipte takviye malzemesi kullanılarak MMK malzeme üretilmesinin mümkün olduğu ifade edilmektedir [5]. Fren disklerinin kompleks şekillerinden dolayı döküm, ana üretim prosesidir. Bu tür uygulamalar için kullanılacak malzeme %15-%30 SiC takviyeli döküm Al

alaşimleri olabilmektedir [2]. Günümüzde pistonlar, jantlar, rulman parçaları, bilezikler, bağlantı milleri, varil başlıkları, fren diskleri, dökme demirden bomba kılıfları gibi parçalar bu teknikle üretilmektedir [5].

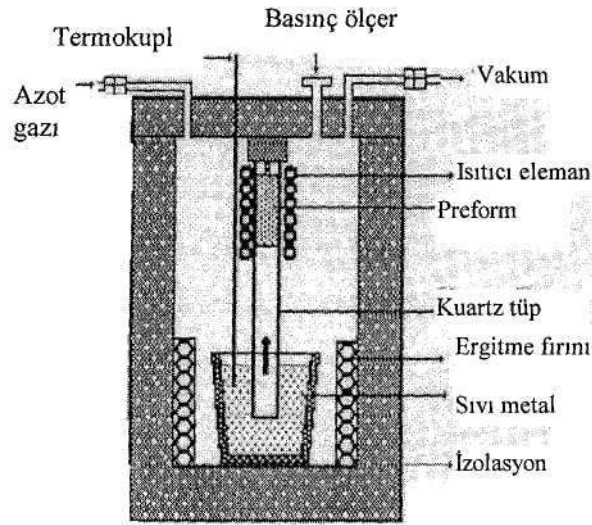


Şekil 3.3. Metal matrisli kompozitin sıkıştırma döküm yöntemi ile metal kalıp içerisindeki preforma döküm üretiminin şematik olarak gösterilişi [5]

3.2.1.6. İnfiltrasyon yöntemi

1) Basınçlı infiltrasyon yöntemi: Basınçlı infiltrasyon yöntemi ekonomik ve yöntem elastikiyeti nedeniyle dikkat çekicidir. İnfiltrasyon sırasında ergimiş metal, seramik malzemedeki gözenekleri kapiler kuvvetler etkisi ile doldurur. Sıvı faz sinterlenmesinden farklı olarak, infiltrasyonda sıvı haldeki metal ile gözenekli seramik malzemenin teması dış yüzeyden başlayarak gözenekli yapı içersine doğru yayılır. Bu yöntemle karmaşık şekilli veya büyük boyutlu ürünler istenen nihai şekle çok yakın olarak üretilebilir[6].

2) Vakum infiltrasyon yöntemi: MMK üretiminde; sıvı metal oksidasyonunu ve gaz boşluğu ihtimalini azaltmak için ilave olarak vakum kuvveti uygulanmaktadır. Preform kalıp boşluğuna yerleştirilir ve daha sonra kalıba sıvı matriks metali Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi, vakum ortamında infiltre edilir. Bununla birlikte, 0.1 MPa büyüklüğündeki zayıf vakum basıncı, son ürün MMK' lerde eksik şekillenme meydana getirir. Bu yöntem çok düşük infiltrasyon direnci olan MMK sistemler için direkt olarak veya hataları azaltmak amacıyla basınçlı gaz infiltrasyonu ile ya da sıkıştırma döküm ile kombine bir şekilde kullanılabilir [6].



Şekil 3.4. İnfiltrasyonla MMK malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan cihazın şematik olarak gösterilişi [5]

3.2.2. Katı hal üretim yöntemleri

Katı hal üretim tekniklerinden toz metalurjisi belki de en çok kullanılan yöntemdir. Bu teknik, süresiz fiber, partikül veya whiskerlerin matriks fazlarına ilavelerinde kullanılmaktadır. Matriks metal tozları ve fiberler beraber karıştırılarak değişik yöntemler ile yoğunlaştırılmakta ve teorik yoğunluğa ulaşmak için takiben sinterlenmektedirler [3]. Genellikle, takviye elemanı partikülleri olarak silisyum karbür, grafit, nikel, titanyum ve molibden, matriks malzemesi olarak da metalik bakır, nikel, alüminyum, kobalt ve titanyum esaslı alaşımlar ve çelikler kullanılmaktadır. Bu yöntemde, tozlar istenilen şekli oluşturmak için tasarlanan hacim oranlarında karıştırılıp kalıp içerisine konularak preslenir. Presleme işlemi soğuk ya da sıcak olarak yapılabilmektedir [6].

Ekstrüzyon veya çekme işlemi de sünek sürekli tel veya fiberlerin bir matrikste dağıtılması işleminde kullanılır. Bu metod genelde değişik fiberler içeren süperiletken kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır [3].

Plazma sprey, kimyasal veya fiziksel buhar depozisyonu (CVD, PVD), matriks metalinin fiberler üzerine depozisyonu ve takiben ara ürünün vakum sıcak presleme veya sıcak izostatik presleme ile yoğunlaştırılması prensibiyle MMK malzeme

hazırladığı diğer önemli yöntemlerdir. Plazma sprey birbirine benzemeyen iki malzemenin bir araya getirilmesini sağladığından dolayı oldukça faydalı bir yöntem olarak bilinmektedir [5].

3.2.3.Reaksiyonla kompozit üretim teknikleri

Bir ötektiğin yönlendirilmiş olarak katılaştırılması, iki fazlı bir mikroyapı ortaya çıkarmaktadır. Fazlardan birisi matriks, diğeri ise matriks içinde dağılmış lamel, plaka veya fiber şeklindeki fazdır. Yönlendirilmiş olarak katılaştırılan ötektik kompozitler üzerinde son derece yoğun ilgi mevcuttur. Bu metodla TaC whisker takviyeli NiTi süper alaşımı ile uçakların motor türbin kanatları üretilmektedir. TaC-Ni ötektik sisteminde düşük katılma hızlarında kare kesitli TaC fiberleri, yüksek katılma hızlarında ise küresele yakın kesitte ve daha yüksek sayıda TaC fiberleri elde edilmektedir [3].

MMK malzemelerin üretilmesinde kullanılan matriks metallerinin bir ayrımını yapmak mümkün gözükmemektedir. Geleneksel olarak kullanılan tüm metal ve alaşımlarının MMK malzeme üretmek amacıyla matriks metali olarak kullanılabilmesi mümkündür. Herhangi bir geleneksel alaşımı matriks metali olarak kullanmak için ilk şart uygun takviye malzemesinin seçimidir. Matriks ve takviye elemanı arasında kimyasal veya fiziksel uygunluk olduktan sonra kullanım yeri ve amacına bağlı olarak MMK malzemeler üretilmektedir. Genelde, matriks malzemesi olarak saf metaller kullanılmamakta, alaşımlar tercih edilmektedir. Alaşım genelde basit bir alaşım iken çok bileşenli bir alaşım da olabilmektedir. Çok değişik sayıda ve değişik özellikteki metaller matriks alaşımı olarak seçilebilmektedir (örneğin; Al, Cu, Fe, Mg, Ti ve Pb) [3].

3.3. Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri kimyasal yapılarına göre oksitler, karbürler, nitrürler ve diğer ilave malzemeleri olarak dört ana başlıkta incelenebilir. Bu malzemelerin seçiminde; kolay temin edilebilmeleri, fiyatı, matriks malzemesi ile uyumu ve katkıda bulunacağı özellikler göz önünde tutulmaktadır [5].

3.3.1. SiC takviye malzemesi

SiC erimiş metallerin içinde dahi mukavemet ve modül değerlerini kaybetmeksizin oksidasyon direnci yüksek olan bir malzemedir. Refrakter, aşındırıcı yada kimyasal alanda kullanılmak üzere partikül yada whisker yapısındaki SiC eldesi gayet kolay ve ucuzdur. Kum formundaki silika ve kok formundaki karbonun elektrikli bir fırında 2400 °C'deki reaksiyonu ile SiC elde edilir. Üretilen SiC büyük parçalardan oluştuğu için arzu edilen boyuta öğütülmelidir [5].

Kısaca özetlenecek olursa SiC'ün özellikleri [5] şunlardır:

1. Mükemmel sertlik ve aşınma direnci
2. Mükemmel korozyon direnci
3. Ani sıcaklık değişimlerine karşı direnç
4. Çeliğe göre daha yüksek ısı iletim
5. Çok düşük ısı genleşme

3.3.2. Grafit

Grafit ve karbon yapılarının esas kimyasal bileşeni olan elementel karbonun fiziksel yapısına göre değişim göstermektedir. Karbon, camı karbon halinde amorf yapılı, karbon siyahında turbostatik, kok kömürü ve kömürde kusurlu hegzagonal, grafit halinde mükemmel yakın hegzagonal kristal ya da elmasta mükemmel yakın tetragonal kristal şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Farklı kimyasal saflık derecelerinde olabilen karbon fiberler ise farklı kullanım alanlarında farklı seçenekler sunmaktadır [8].

Genellikle karbon olarak tanımlanan malzeme kusurlu-amorf kristal yapıda olup proses sıcaklığı 1100 °C (2010 °F) civarı olan, düşük iletkenliğe ve göreceli olarak sert yapıya sahip malzemedir. Grafit olarak tanımlanan malzeme ise daha kusursuz kristal yapıda olan, 3000 °C (5430 °F) işlem sıcaklığına, daha yüksek iletkenliğe sahip, yumuşak ve katı yağlayıcılık özelliğine sahip bir malzemedir. Grafitin bu özelliği Sürtünme ve Aşınma başlığı altında anlatılacaktır[8].

3.4. Metal Matriksli Kompozit Malzemelerin Tribolojik Davranışları

Metal matriksli kompozit malzemelerin geliştirilmesinde, onların yüksek tribolojik potansiyelleri önemli bir yer tutmaktadır. Yapılan tüm çalışmalara ve günümüze kadar olan gelişmelere rağmen yine de tribolojik karakteristikleri tam ve kesin olarak açıklanamamaktadır. Bu durum, sürtünme ve aşınma mekanizmalarındaki karmaşıklıklara ve MMK malzemenin mikro-makro yapısal değişenlerinin, malzemenin tribolojik özellikleri üzerinde nasıl bir rol oynadığına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Takviye içeriği, boyutu, yönlendi ve bağ mukavemeti kompozit malzemenin tribolojik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir [13]. Deneysel çalışmalara geçmeden önce sürtünme ve aşınma tanımları ve esasları hakkında bilgiler vermek uygun olacaktır.

BÖLÜM 4. SÜRTÜNME VE AŞINMA

4.1. Giriş

Sürtünme genel anlamda, temas halindeki ya da birbiri üzerinde hareket eden veya hareket ihtimali bulunan yüzeylerin hareketlerine karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır. Diğer adıyla triboloji cisimlerin bağıl hareketinde yüzeylerin etkileşimini inceleyen bilim dalıdır [4, 5, 13, 24, 27]. Triboloji kelimesi yunanca "tribos" kelimesinden çıkmıştır ve sürtünme manasındadır [4].

Sürtünmenin mühendislikle ilgili yönü oldukça eskidir. Sürtünmenin ilk pratik uygulamalarından olan ateş yakmak için sürtme ısısının kullanılışı tarih öncesi çağlara dayanır [4]. Binlerce yıl önce yaşamış insanın, günümüzün uzman tribolojistlerinde olduğu gibi sürtünme sorununa çözüm arayışları için, çalışan iki mekanik parça arasına saf su ilave etmesi parlak bir fikir olarak karşımıza çıkmaktadır [26]. Ağır yükleri taşımada, işi minimuma indirmek için kullanılan ve zaman zaman sıvı yağlarla yağlanan kızak, silindir ve tekerlek gibi uygulamaların tarihi 3000 yıldan eskidir. Bunlar sürtünme olayının ne denli erken değerlendirildiğini ve önemini göstermektedir [4]. Geçmişle günümüz arasındaki fark sadece bilgi birikimidir [26].

Sürtünmenin ve aşınmanın en iyi şekilde anlaşılması ile çok fazla miktarda enerji ve para israfının önüne geçilecektir ki bu durum ekonomik ve ekolojik açıdan oldukça önem teşkil eder [26].

Malzemenin, katı yüzeyden uzaklaşması için üç yol vardır: ergime ile, kimyasal çözünme ile ya da atomların yüzeyden fiziksel dağılımları ile. Prensip olarak tribo yüzey bir çeşit hasar göstermektedir fakat genellikle hasarın iki ya da daha fazla hasar tipinin birleşmesiyle oluştuğu gözlenmektedir [22, 28].

4.2. Sürtünme Kanunları

Sürtünme kanunlarının belirlenmesinde iki temel esas vardır. Bunlar büyük oranda uyumluluk gösterirler. Birinci kanun; temas eden yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvveti görünen temas alanından bağımsızdır. İkinci kanun; sürtünme kuvveti cisimler arasındaki normal yük ile doğru orantılıdır. Böylece bir cisim diğeri üzerinde kayarken, eğer normal yük iki katına çıkarılırsa sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Bu kural daha çok "Amonton" kuralı olarak bilinir ve ilk kez 1699 yılında Fransız bilim adamı Amonton tarafından çıkarılmıştır Üçüncü kural olarak da; kinetik sürtünmenin, kayma hızından bağımsız olduğu söylenebilir. Bu kuralın ilk ikisine göre uygulanabilirliği daha düşük değerdedir. Üçüncü kural Coulomb tarafından 1785 yılında açıklanmıştır [4].

Triboloji yaklaşımlarının ilki 15.yy başlarında Leonardo da Vinci tarafından yapılmıştır. Da Vinci, düzgün yüzeyler için sürtünmenin ağırlığın dörtte birinden sorumlu olduğunu diğeri bir deyişle sürtünme katsayısının 0.25 olduğunu kabul etmiştir [26]. Daha sonra Charles Augustin Coulomb (1736–1806), Leonhard Euler (1707–1783), John Theophilus Desagulier (1683–1744), Osborne Reynolds (1842–1919), Heinrich Rudolph Hertz (1857–1894), Richard Stribeck (1861–1950), Arnold Sommerfeld (1869–1951), Georg Vogelpohl (1900–1975), Frank Philip Bowden (1903–1968) ve diğeri birçok bilim insanı tarafından triboloji ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır [34].

Sürtünme kayan yüzeyler arasındaki enerji dağılımı ya da enerji harcanması (israfı) olarak nitelendirilir. Da Vinci ve Amonton'un sürtünme ile ilgili çalışmalarından çıkan dört esas deneysel (ampirik) yasa yüzyıllardır bilinmektedir. Bu yasalar aşağıdaki gibidir [24]:

- Statik nesne tanjantsal kuvveti arttırmaya meyilli olduğu zaman kaymadan önceki maksimum tanjant kuvveti ile normal kuvvet arasında bir orantı vardır.
- Kayma da tanjantsal sürtünme kuvveti, normal kuvvet ile orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti görünen temas alanından bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti kayma hızına bağlı değildir.

Yine Amonton'un kanunlarına göre; kuvvet gerçek temas alanı ile orantılı ise sürtünme kuvveti de uygulanan yük ile orantılıdır [24].

Sürtünme kuvveti ile ilgili Bowden ve Tabor (1964) tarafından yapılan çeşitli çalışmalarda ise gözlenen ve dikkate alınan genel kurallar aşağıdaki gibi özetlenmiştir [27];

1. Sürtünme katsayısı görünen temas alanına bağlı değildir,
2. Sürtünme katsayısı normal yük ile orantılıdır,
3. Kinetik sürtünme katsayısı hıza bağlı değildir,
4. Statik sürtünme katsayısından daha küçüktür.

4.3. Sürtünme

Triboloji, birbiriyle temas eden iki yüzey arasındaki etkileşimleri inceleyen, Fizik ve Kimya bilimlerinden, Mekanik ve Malzeme bilimine kadar birçok farklı alan tarafından incelenen ve çalışılan [27], ev aletlerinden uzay araçlarına kadar her alandaki teknik araç ve gerecin aşınması gibi ekonomik açıdan önem arz eden alanlarda büyük kayıplara neden olan problemleri tanımlayan ve işlevsel analizler uygulayan bir bilim alanıdır [24].

Birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı madde konulup konulmaması bakımından temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olarak üç halde de incelenebilir. Bir yüzey üzerinde bulunan bir cisim itilmeye karşı, karşı yönde bir direnç kuvveti oluşturur. Bu direnç kuvveti, tutmalı (statik) direnç kuvveti olarak isimlendirilir. Bir cisim hareket ettirebilmek için tutmalı sürtünme kuvvetinden daha büyük bir itme kuvvetine gereksinim vardır. Cisim hareket halinde ise tutmalı sürtünme kuvvetinden daha küçük boyutlardaki sürtünme kuvveti oluşur. Bu kuvvete kaymalı (dinamik) sürtünme kuvveti denir ve bu kuvvet itme kuvvetine karşı yöndedir [4].

Temasta bulunan iki malzemedeki biri diğerinin üzerinde kayarken diğer malzemenin karşı yüzeyin hareketine gösterdiği direnç *Sürtünme Kuvveti* olarak adlandırılır [8]. Sürtünme kuvveti ve normal yük arasındaki orantılılık, 'kinetik'

ve ‘statik’ sürtünme katsayıları ile tanımlanmaktadır [24]. Kuvvet (F_s), temas yüzeyinin normali (P ya da F_N) ile ilişkili olup,

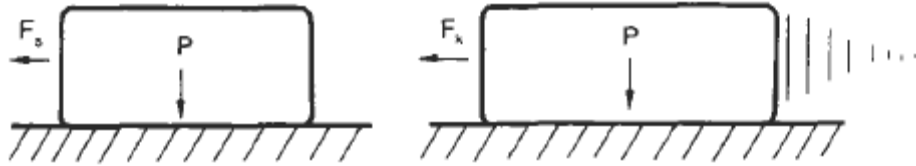
$$F_s = \mu_s \cdot P$$

olarak hesaplanır. μ_s statik sürtünme katsayısı olarak tanımlanır (Şekil 4.1.) [25, 29]. Kayma başladıktan sonra, kaymayı engelleyici kuvvet yavaşça azalır. Bu durumda denklem;

$$F_k = \mu_k \cdot P$$

olacaktır. μ_k kinetik sürtünme katsayısı olarak adlandırılır. Kinetik sürtünme, ısı olarak karşımıza çıkmaktadır [29, 31].

Birçok kitapta sürtünme katsayısından malzeme bileşiminin bir özelliği olarak bahsedilmektedir. Bu yaklaşım sıcaklık ve kayma hızı gibi parametrelere bağlı olan sürtünme katsayılarının tanımlanması için oldukça basit kalmaktadır [24]. Sürtünme ve aşınma, malzemelerin asıl özelliklerinden olmayıp tribosistemin özelliklerindedir [15, 34].



Şekil 4.1. Statik ve kinetik sürtünmenin şematik anlatımı [29]

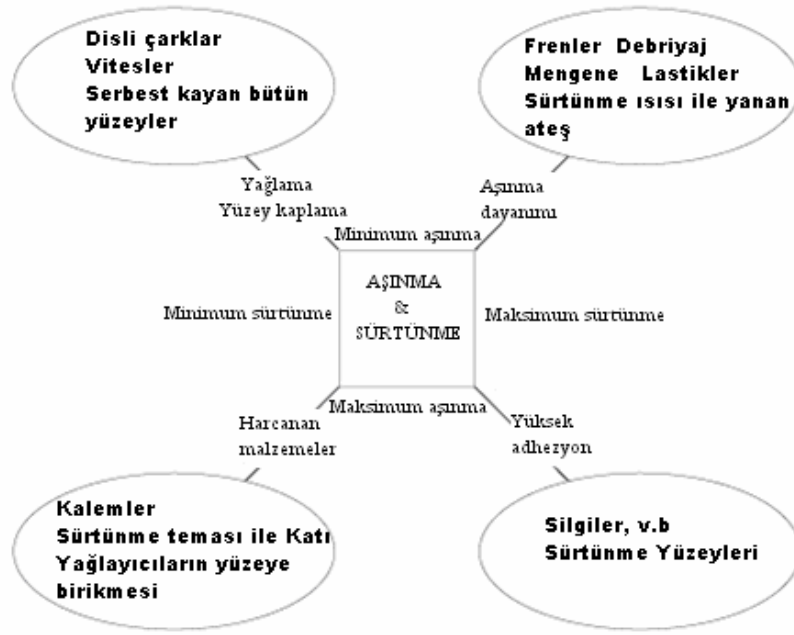
Sürtünme çalışmalarının tümünde ki esas problem, sürtünme katsayısını belirlemektir. Aşınmaya göre (aşınma için), aşınan malzemenin hacim oranı (V) ya da değerinin belirlenmesi ve aşınmadan dolayı ağır hasarın meydana geldiği şartların saptanması gerekmektedir [25].

Sürtünme ve aşınma üzerine yapılan çalışmalara ve binlerce yıldır bu olguların varlığının bilinmesine rağmen, başlangıçları, kökenleri ve davranışları hala tam olarak anlaşılamamıştır [25, 27].

Sürtünme daima enerji dağılımı ile ilgilidir ve enerji kaybının oluşum süreci birkaç aşama halinde tanımlanır.

1. Durum. Mekanik enerji temas bölgesinde ortaya çıkar ve gerçek temas alanının oluşumuna sebep olur.
2. Durum. Mekanik enerji elastik deformasyon, plastik deformasyon, kızaklama (ploughing) ve adhezyon şeklinde gerçek temas bölgesinin içerisine doğru ilerler.
3. Durum. Mekanik enerjinin; termal dağılım (ısı), hata, çatlak, enerji birikimi ve plastik olarak dönüşüm, akustik ve termal emilim gibi farklı şekillerde dağılımı [21].

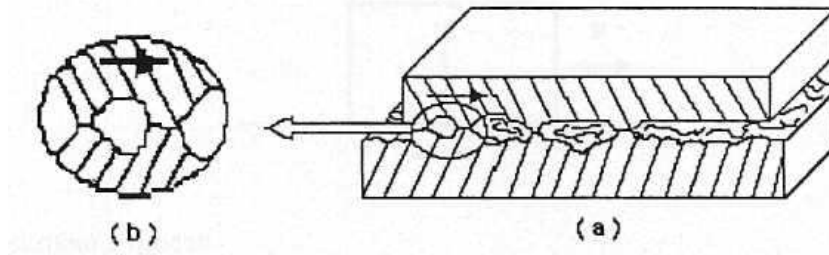
Sürtünmenin etkileri belirlendiğinden veya fonksiyonları kontrol edildiğinden beri tasarım ve üretim sürecinde, malzemenin sürtünme özellikleri dikkate alınarak, cihazın ömrü ve verimliliği belirlenmektedir. Tekniğin her sahasında malzemelerin sürtünme özelliklerinden ve sürtünme kuvvetinden faydalanılarak çeşitli konstrüksiyonlar gerçekleştirilmiştir [4]. Birbirine karşı çalışan iki katı yüzey arasındaki sürtünme ve aşınma günlük yaşantıda sürekli karşılaşılan bir durumdur [25] ve Şekil 4.2.'de gösterildiği üzere, bazı durumlarda en düşük sürtünme ve en yüksek aşınma değerleri ya da en az aşınma ile birlikte en yüksek sürtünme değerleri ya da her ikisinin de en yüksek değerlerinin istendiği çalışma alanları bulunmaktadır. Örneğin otomobillerde fren ile yavaşlama-durma esnasında aşınma oranının düşük, buna karşın sürtünme değerlerinin yüksek olması istenmektedir [24, 25, 26,], ya da ayakkabılarımızın tabanlarındaki sürtünmeden dolayı kaymanın engellenmesi yüksek sürtünmenin avantajlı olduğu durumlardır. Diğer yandan motor silindiri içinde piston hareketi esnasında düşük sürtünme ve aşınma beklenmektedir [25]. Kullandığımız kalemlerde sürtünmenin en az, aşınmanın ise yüksek değerlerde olması beklenir. Silgilerde ise hem sürtünme hem de aşınma yüksek olmalıdır (Şekil 4.2.) [24].



Şekli 4.2. Sürtünme ve aşınmanın istenen ya da istenmeyen özellikler olduğu ya da olmadığı bazı kullanım alanları [24]

Aşınma, malzeme sarfiyatının ve mekanik performansındaki düşüşün ana sebebi olmaktadır ve aşınmadaki herhangi bir düşüş önemli bir mali birikim sağlayacaktır. Sürtünme ise aşınmanın ve enerji dağılmasının baş nedenidir. Bununla birlikte iki yüzey arasında kayma sırasında enerji kaybı dışında sürtünme, ses oluşumuna da yol açmaktadır. Uygulamaların çoğunluğunda sürtünme dolayısıyla çıkan ses istenmemekte ve kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Ses emilimi ile bağlantılı olan ve yine sürtünme ile oluşan titreşim de zararlıdır. Ses oluşumu genellikle, düzgün ve sessiz bir kayma sağlamak amacıyla, aşınma ve sürtünmeyi kontrol etmekte olduğu gibi yağlama ilavesi ile kontrol altına alınabilmektedir [24].

Sürtünme, ilgili yüzeyler arasında belirli değerler içinde olmalıdır. Taşıt frenlerinde sürtünmenin azlığı nedeniyle taşıtın istenilen mesafe ve zamanda durmaması veya fazla sürtünme nedeniyle taşıtın frenlerinin bloke olması bu duruma tipik örnektir. Şekil 4.3.a'da üstteki cisim alttaki cisim üzerinde sağa doğru kaymaktadır, diyagram büyütülerek gösterilen Şekil 4.3.b'de ise yüzeysel yapışma noktaları görülmektedir. Hareketin devam etmesi için uygulanan kuvvet bu yapışma noktalarını bozacak kadar büyük olmalıdır [4].



Şekil 4.3. Sürtünmenin ayrıntıları; a) Üstteki cisim alttaki cisim üzerinde sağa doğru kaymaktadır, b) Yüzeysel yapışma noktaları büyütülerek gösterilmiştir [4]

Analiz ve görüntüleme teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde doğada bulunan hemen hemen tüm yüzeylerin mikroskobik seviyede pürüzlü olduğu anlaşılmıştır [24, 25]. Gerçek yüzeyler, atomlardan başlayarak gözle görülebilen oyuklar ve çıkıntılara kadar değişen boyutlardaki yüzeysel oluşumlara sahip olmaktadır [24,]. Pürüzlü iki yüzey arasındaki temas, farklı temas noktalarında meydana gelmektedir. Böyle iki yüzeyin kayması boyunca, bu temas noktalarında sürtünme ve aşınmaya sebep olan arayüzey gerilmeleri meydana gelir [24, 25]. Boyut ve temas noktalarının dağılımları belirlenebilirse daha kapsamlı sürtünme ve aşınma teorileri geliştirilebilir [25].

İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme, birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir. Her iki yüzey yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılmış olabilir ve esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur; bu hale sıvı sürtünmesi denir. İkinci durumda, yani yüzeyler tamamıyla ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır [5].

4.3.1. Yağlama

Gazların, sıvı ya da katıların düşük kayma mukavemetli ince tabakaları, karşılıklı çalışan yüzeylerin birbiri üzerindeki kayma hareketlerinin düzgünlüğünü

arttırmak ve oluşabilecek hasarı engellemek amacıyla iki yüzey arasına girmekte daha doğru bir ifadeyle ilave edilmektedir. Malzemelerin bu tabakaları katı yüzeyleri birbirinden ayırmakta ve genellikle oldukça ince olmaktadır. Genel olarak bu filmlerin kalınlıkları 1–100 [μm] arasında olmakla birlikte daha ince ve daha kalın yağlayıcı film tabakaları bulunabilir. Bu filmlerin katıların teması esnasında oluşabilecek hasarı önlemelerinde, etkinlikleri genellikle “yağlama” olarak adlandırılır. Yağlayıcı filme ihtiyaç duyan malzeme tipleri için herhangi bir kısıtlama olmamasına karşın, yağlayıcının uygulanacağı malzemenin türü bu yağlayıcının etkinlik ya da verimlilik limitlerini etkilemektedir. Örneğin gaz filmler düşük temas gerilimi için uygun iken katı yağlayıcı filmler genellikle düşük kayma hızlarındaki temaslarda kullanılmaktadır [24].

Gaz ya da sıvı yağlayıcılar kullanıldığında genellikle ‘hidrodinamik yağlama’, katı yağlayıcılar kullanıldığında ise sistem ‘katı yağlama’ olarak adlandırılmaktadır. Hidrodinamik yağlamanın özel bir çeşidi olan ve temas eden yüzeyler arasında fiziksel etkileşimin olduğu sıvı yağlayıcı sistem ‘elastohidrodinamik yağlama’ olarak adlandırılır. Yağlamanın bir diğer çeşidi olan ve birbiriyle temas eden yüzeylerde kimyasal etkileşimin bulunduğu sıvı yağlayıcı sisteme ise ‘sınır ve aşırı basınç yağlaması’ denmektedir. Tribosistemde herhangi bir film bulunması, karşılıklı hareket eden yüzeylerin az da olsa birbirinden ayrılması anlamına gelmektedir [24].

Birbiri üzerinde kayan malzemelerden biri sert, diğeri yumuşak (örneğin, kalay, kurşun, indiyum ve bunların alaşımları) olduğu takdirde, yumuşak malzeme diğeri malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile derhal kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış gibi olur. Yani yumuşak malzeme, bir yağlayıcı madde gibi rol oynar. Bunun sonucunda sürtünme katsayısı azalır ve bu yüzeyler arasında yenme olayı meydana gelmez. Pratikte kalay alaşımlarının çok iyi yatak malzemeleri olmalarının nedeni bu olaya bağlıdır [5].

4.3.1.1. Katı yağlayıcılar

Katı yağlayıcılar, sıvı yağlayıcılarla karşılaştırıldıklarında birçok ilgi çekici özelliğe sahiptir. Bunlardan biri yüksek temizlik özellikleridir. Katı yağlayıcılar çok yüksek sıcaklıklarda ya da vakum şartlarında hatta yüksek radyoaktivitenin bulunduğu ortamlarda bile yağlayıcılık sağlamaktadırlar. Yağlar genellikle bu şartlar altında kullanılamazlar. Katı yağlayıcı çalışmaları çok da yeni çalışmalar değildir. Örneğin grafitin yağlayıcı kullanımı geleneksel bir çalışma haline gelmiştir. Katı yağlayıcıların kullanım olanakları, yeni teknolojiler sayesinde aşınma yüzeyleri üzerine katı filmlerin biriktirilmesi ile yaygınlaşmaktadır [24].

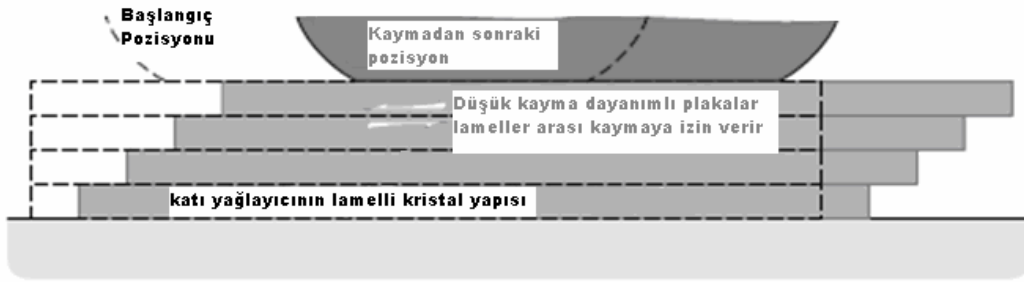
Herhangi bir yağlayıcının sistemde bulunmadığı durumlarda, birçok katı yüzeyde önemli bir seviyede adhezyon meydana gelir. Bu yüzeylerdeki yüksek adhezyon ya da yapışma kuvveti büyük çoğunlukla yüksek sürtünmelere yol açar [24].

Bazı malzemeler ise mekanik özelliklerinde anizotropik davranış gösterirler. Mekanik özelliklerin anizotropik olması lamelli katılar için karakteristik bir özelliktir. Eğer lamelli yapıdaki lameller düşük kayma gerilmelerinde birbiri üzerinde hareket ediyor yani kayıyor ise, bu yapı yağlayıcı özellik sağlar. Bahsedilen mekanizma Şekil 4.4.'te gösterilmektedir [24].

Lamelli katılar başlıca üç karakteristik özelliğe sahiptirler [24]

- Lamelli yapı çok düşük kayma gerilme seviyelerinde deforme olur,
- Lamelli katı aşınmış yüzeye kuvvetlice yapışır,
- Çalışma sıcaklığı ya da çalışma ortamında lamelli katıda herhangi bir ayrışma ya da kimyasal olarak bir diğer forma dönüşme görülmez.

Grafitin haricinde katı yağlayıcı olarak kullanılan diğer malzemeler ise Mo_2S , gümüş ve kurşun filmler, elmas benzeri kaplamalardır [36].

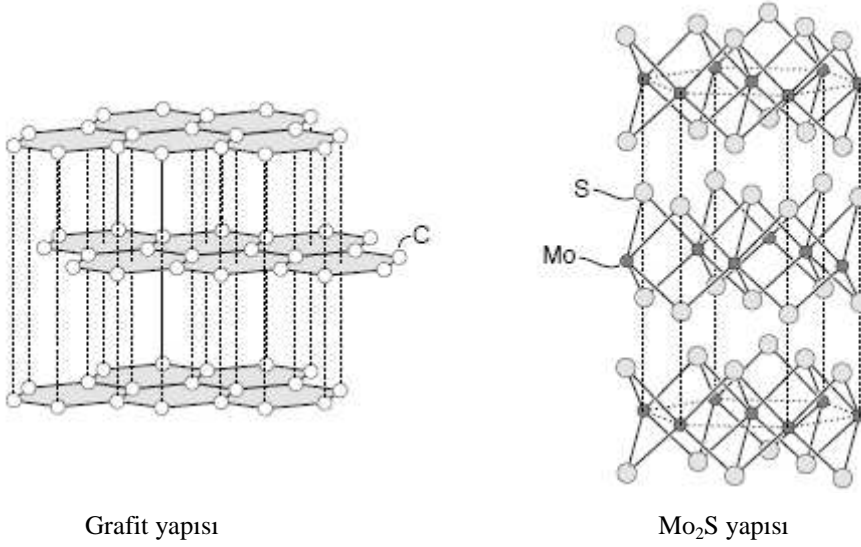


Şekil 4.4. Lameli katıların yağlayıcılık mekanizması [24]

Çeşitli çalışmalarda çok sayıda inorganik lamelli kristal yapının tribolojik özellikleri incelenmiş ve bu lamelli kristal yapılardan bazı metal dikhalkojenidlerin ve halidlere dahil birkaç malzemenin kaymada zayıf düzlemlere sahip olduğu bulunmuştur. Dikhalkojenidlerden kullanışlı tribolojik özelliklere sahip olan malzemeler molibden disülfat, tungsten disülfat ve molibden ditellürittir. Halid grubundan ise gerekli kristal yapıya sahip iki malzeme; kadmiyum iyodit ve nikel iyodittir [24].

Diğer yandan grafit, üstün ve eşsiz katı yağlayıcılık özelliklerine sahip bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Henüz tam anlaşılamayan sebeplerden ötürü birçok lamelli katı arasından sadece grafit ve molibden disülfat üstün yağlayıcılık performansı sunmaktadır [24].

Grafit ve molibden disülfatın yağlayıcı filmlerinin tribolojik karakteristikleri oldukça benzerdir. Bu durum kristal yapılarının kısmen benzemesiyle alakalıdır. Molibden disülfat ve grafitin kristal yapıları Şekil 4.5.'te verilmektedir [24].



Şekil 4.5. Grafit ve Mo₂S malzemelerinin kristal yapıları [24]

Şekilden de gösterildiği gibi her iki malzemede, yüksek mukavemetli lamel düzlemini oluşturan atomların arasında güçlü kimyasal bağlar görülmektedir. Bu güçlü kimyasal bağlarla birleşen atomların oluşturdukları düzlem ile bir alt düzlem arasındaki bağ yani lamellerarası bağ ise zayıftır. Bağ mukavemetindeki bu anizotropik davranış grafitte göre molibden disülfatta daha fazladır [24].

Grafitte birbirinden ayrı düzlemler boyunca yüzey enerjisi oldukça yüksektir ve bu düzlemler arasındaki kayma ortamda az miktarda su ya da oksijen bulunmasıyla kolaylaşmaktadır. Oksijenin ya da suyun grafit lamel yüzeyine absorbe olduğu ve lamellerarası bağlanmayı engellediği düşünülmektedir [24].

4.4. Aşınma

‘Karşılıklı yüzeylerin birbirleri ile etkileşimleri sonucu mekanik harekete bağlı olarak malzemede istenmeyen kopma’ şeklinde tanımlanan aşınma [4, 22], sürtünme etkisinin de kaçınılmaz bir sonucudur. Aşınma sonucu birbiriyle çalışan yüzeyler arasında meydana gelen boşluklar çalışma sırasında istenilmeyen durumlara yol açarak o oranda da istenilen fonksiyonların yerine getirilmesini zorlaştırır [4].

Genel olarak hemen hemen tüm makineler dayanımlarını ve güvenilirliklerini aşınma yüzünden kaybetmektedir. Bu sebeple aşınmanın kontrol altına alınması güvenilir bir teknoloji için büyük gereklilik arz etmektedir [22].

Aşınma mekanizması, sürtünme boyunca meydana gelen karmaşık değişimler olarak tanımlanabilir. Genel olarak aşınma tek bir mekanizma olarak karşımıza çıkmaz. Bu sebeple aşınmanın her durumundaki tüm mekanizmaların anlaşılması önem kazanmaktadır. Aşınma, mikroçatlaklar sebebiyle fiziksel dağılım ya da kimyasal çözünme veya temas arayüzeyinde ergimenin bir sonucu olarak ortaya çıkabilmektedir. Genel olarak aşınma, hacim kaybı miktarı ve aşınma yüzeyinin durumu ile değerlendirilir. Aşınma değeri, aşınma hızı, spesifik aşınma hızı ya da aşınma katsayısı olarak tanımlanır [22].

Aşınma, malzemenin özelliği değil, bir sistem cevabıdır. Aşınma tribosistemdeki dinamik parametreler, çevresel parametreler ve malzeme parametrelerindeki ufak bir değişim ile oldukça şiddetli değişebilir [22].

4.4.1. Aşınma türleri

Sürtünerek çalışan malzeme çifti arasındaki karşılıklı zorlama neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri vardır ve bundan dolayı farklı sınıflandırılmaları gerekmektedir [4].

En yaygın bilinen aşınma durumu 'kaymalı aşınma (sliding wear)' dır. Kaymalı aşınmada bir yüzey diğerinin üzerinde kayarken, tekrarlı kayma sonucu zaten malzeme yüzeyinin doğasından kaynaklanan pürüzlülükler dışında pürüzlü bir yüzey ya da malzeme yüzeyinde tepeler-çukurlar-yivler v.s gibi oluşumlar görülür. Bu pürüzlülükler kaymanın devamı halinde yerlerinden ayrılarak ya sistemden uzaklaşır ya da kayma arayüzeyine yerleşerek aşınma partikülleri olarak davranırlar [8].

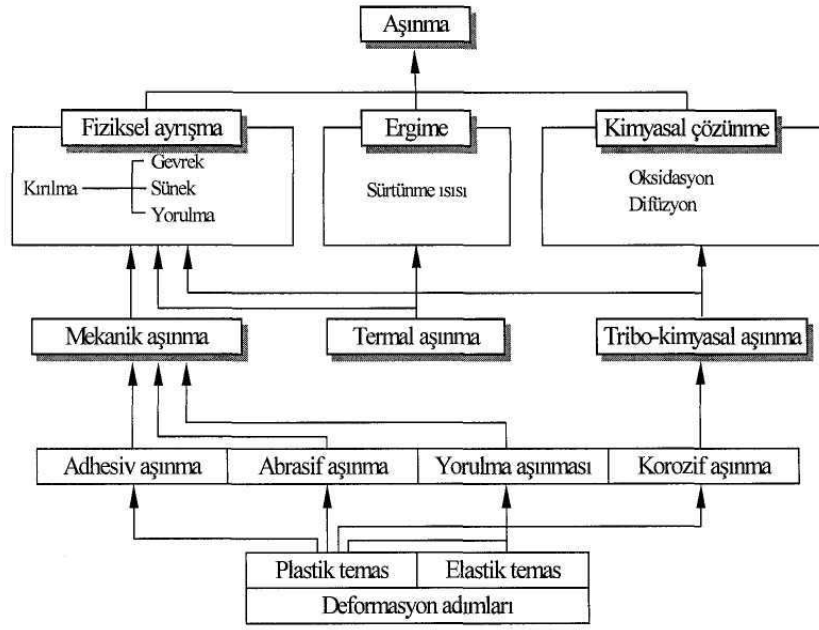
Archard'ın denklemine göre [8];

$$Q=B.W/H$$

Birim kayma mesafesindeki aşınma oranı (Q), uygulanan yük (W), malzeme sabiti (B) ile doğru, malzemenin sertliği (H) ile ters orantılı olmaktadır. Yani aşınma oranının, artan yük ile artmakta; artan sertlik ile azalması öngörülmektedir. Matriks malzemesinin sertliği, takviye edilmiş halinden daha düşük olabileceğinden; bu denklemden, sert takviye ilave edilmiş kompozit malzemelerin, artan sertliklerinden dolayı aşınma oranlarının azalacağı sonucu çıkarılabilmektedir [8].

Aşınmayı tanımlayıcı birçok terim vardır fakat bu terimler her zaman yeterince ayırt edilememektedir. Yine de bazen aşınma mekanizmalarının anlaşılması hakkındaki karışıklıkları ve zorlukları anlaşılır kılabilir [22]. Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerinin değiştirilmesinden etkilenmektedir [4].

Şekil 4.6.'da aşınmayı tanımlayıcı terimler ve birbirleri ile etkileşimleri özetlenmektedir. Şekilde aşınma, katı yüzeylerin temas tiplerini ve birbirleri ile etkileşimlerini sınıflandırmaktadır. Pratikte birçok farklı temas konfigürasyonu bulunmaktadır [22].



Şekil 4.6. Aşınmayı tanımlayıcı anahtar kelimeler ve birbirleri ile etkileşimleri [22]

Aşınma mekanizmaları genel olarak dört başlıkta incelenmektedir [5, 22].

1. Adhesiv aşınma
2. Abrasif aşınma
3. Yorulma aşınması
4. Korozyon aşınması

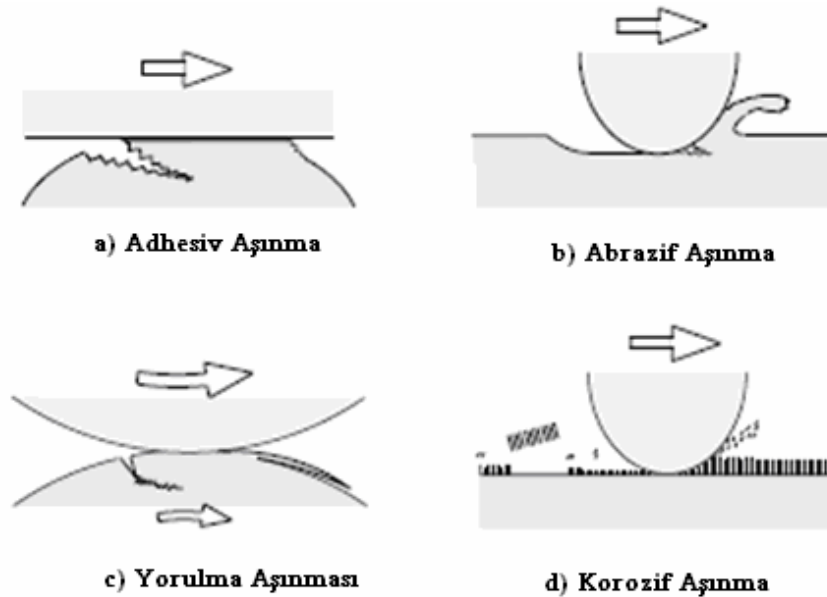
Adhesiv ve abrasif aşınma modları plastik temas altında oluşmaktadır. Benzer metaller arasında plastik temas durumunda, temas arayüzeyi adhesiv bağlanma kuvvetine sahip olacaktır. Malzemenin temas arayüzeyinde meydana gelecek hasar eğer ki güçlü adhezyon sonucu oluşuyorsa bu tür aşınma mekanizmasına adhesiv aşınma adı verilir [22].

Sert ve keskin malzeme ile ona göre daha yumuşak sayılabilecek bir malzeme arasında meydana gelen plastik temas durumunda, sert olan malzeme daha yumuşak olan malzemenin yüzeyine batacak ya da içine penetre olacaktır. Malzemede oluşacak çatlak ya da hasar işte bu sert faz partiküllerinin karşı malzeme yüzeyinde oluşturacakları mikro-yarıklar ya da mikro-çatlaklar sebebiyle oluşuyorsa bu tür aşınmaya abrasif aşınma denir [22, 37].

Yorulma çatlağı oluşumu tekrarlı sürtünme çevriminde meydana gelmektedir. Aşınma yüzey hasarının yorulma mekanizması ile meydana geldiği bu aşınma türüne ise yorulma aşınması denmektedir. Korozif ortamlarda, temas arayüzeyinde tribokimyasal reaksiyonlar hızlandırılır. Korozif bir ortamda tribokimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeyden malzeme kaybı korozif aşınma ile tanımlanmaktadır. Korozif aşınmada yüzeyden malzeme uzaklaşması, aşınma yüzeyinde kimyasal reaksiyon filminin oluşumu ile gerçekleşir ki bu filmin oluşumu, sürtünmesel deformasyon, sürtünme ısı ve oluşan mikroçatlaklar ile aktive edilip hızlandırılır [22].

Hava da baskın olan korozif madde oksijen ise böyle bir ortamda metallerde meydana gelen tribokimyasal aşınma da oksidatif aşınma olarak adlandırılır [22].

Yorulma aşınması ve korozif aşınma hem plastik hem de elastik temas şartlarında meydana gelmektedir. Şekil 4.7.'de gösterilen adhesiv, abrazif ya da yorulma aşınmalarındaki malzeme kaybı, temastaki deformasyon ve kırılma ile meydana gelmektedir. Bu kırılmalar mekanik olarak meydana gelen gerilmelerle üretilir ki bu tür aşınmalar genel olarak mekanik aşınma başlığı altında toplanır [22].



Şekil 4.7. Dört başlıkta incelenen aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi [22]

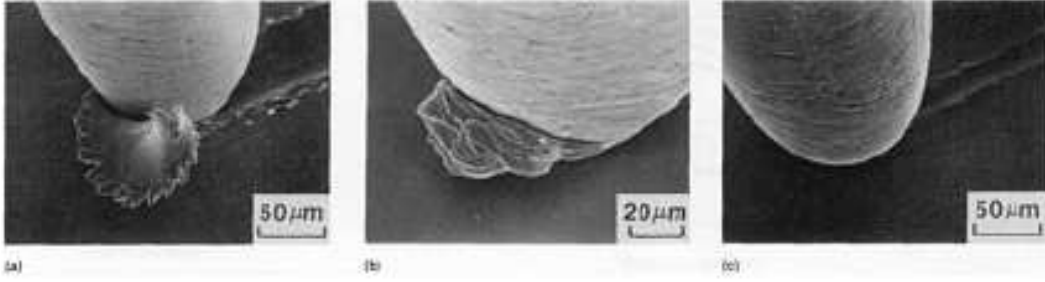
4.4.1.1. Adhesiv aşınma

Plastik temastaki iki yüzey arasındaki temas arayüzeyi relatif kaymaya direnç gösterecek kadar adhesiv bağ mukavemetine sahiptir. Dislokasyonlardan meydana gelen plastik deformasyon, basma ve kayma gerilmeleri altında temas bölgesinde çıkar. Temas alanındaki böyle deformasyonların sonucu olarak birleştirilmiş gerilme ve kayma hasar modlarında çatlak başlangıcı ve ilerlemesi teşvik edilir. Çatlak temas arayüzeyine ulaştığı zaman aşınma partikülleri meydana gelir ve adhesiv transfer tamamlanır. Temas arayüzeyindeki adhesiv bağlanmanın oluşturduğu bu tür aşınma, adhesiv aşınma olarak adlandırılır [22]. Bazı kaynaklarda adhezyonun aşınmaya sebep olmadığı, sadece temasın bir sonucu olduğu ve adhezyon sonucu yüzeyde hiç malzeme kaybının görülmediği durumların mevcut olduğu belirtilmektedir [30]. Adhezyon temastaki iki malzemenin sertliğinin artması ile düşmektedir [24].

4.4.1.2. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma ASTM'de de tanımlandığı üzere, katı yüzey boyunca, katı yüzeye karşı hareket eden sert partikül ya da sert yükseltelerin oluşturduğu aşınma türüdür. Aşınma genellikle temas eden yüzeyler arasındaki sert partiküllerin ya da diğerine göre sert yüzeylerin relatif hareketlerinden dolayı meydana gelen malzeme kaybını içeren katı yüzeyin hasarı olarak tanımlanır [28].

Abrazyon boyunca yüzeyden malzemenin nasıl uzaklaştığının açıklanması amacıyla birçok mekanizmanın olduğu ileri sürülmektedir. Bunlar genel olarak kırılma, yorulma ve ergimedir. Abrazif aşınmanın meydana gelmesindeki karışıklıktan dolayı sadece bir tane mekanizma tüm malzeme kaybindan sorumlu tutulamaz. Şekil 4.8.'de tek bir abrazif ucun malzeme yüzeyinden geçerken oluşturduğu bazı abrazif aşınma tipleri gösterilmektedir. Bu tipler Kızaklama (Ploughing), Pulluklama (Wedge), ve Kesme (Cutting) olarak adlandırılır [28].



Şekil 4.8. Abrazif aşınma mekanizmasının üç tipi olan a) Kesme, b) Pulluklama, c) Kızaklama aşınmalarının SEM görüntüleri [28]

Kızaklama (Ploughing) türü aşınma, temastaki iki yüzeyin sertliklerinin birbirinden farklı olduğu durumlarda meydana gelir. Diğerine göre daha sert olan malzeme yüzeyindeki tepcikler daha yumuşak olan yüzeyin içine girer ve eğer ki bir hareket söz konusu ise yüzeyde yiv oluşumuna sebep olurlar. Kızaklama oluşumunun iki ana sebebi kısaca yüzeylerdeki tepcikler ya da temas bölgesinde bulunan sert partiküllerdir [19, 22].

Kızaklama mekanizmasında malzeme, yüzeyde meydana gelen yivlerin kenarlarına toplanır. Bu düşük yüklerde meydana gelir ve herhangi bir malzeme kaybına yol açmaz. Hasar, malzemenin yüzeyinde soğuk deformasyon sebebiyle gelişen ve büyüyen dislokasyonlar sonucu meydana gelir. Eğer ki bu soğuk deformasyon bölgesinde yiv oluşumu devam ederse, yüzeydeki hasara ilave olarak mikroyorulma mekanizması sonucu da hasar oluşur [28].

Pulluklama (Wedge), abrazif ucun önünde meydana gelir. Pulluklama mekanizmasında, yiv önünde toplanan malzeme miktarı, kenarlara toplanan malzeme miktarından fazladır. Yine de pulluklama oluşumu abrazif aşınmanın hafif hasar bırakan mekanizmalarından sayılmaktadır [28].

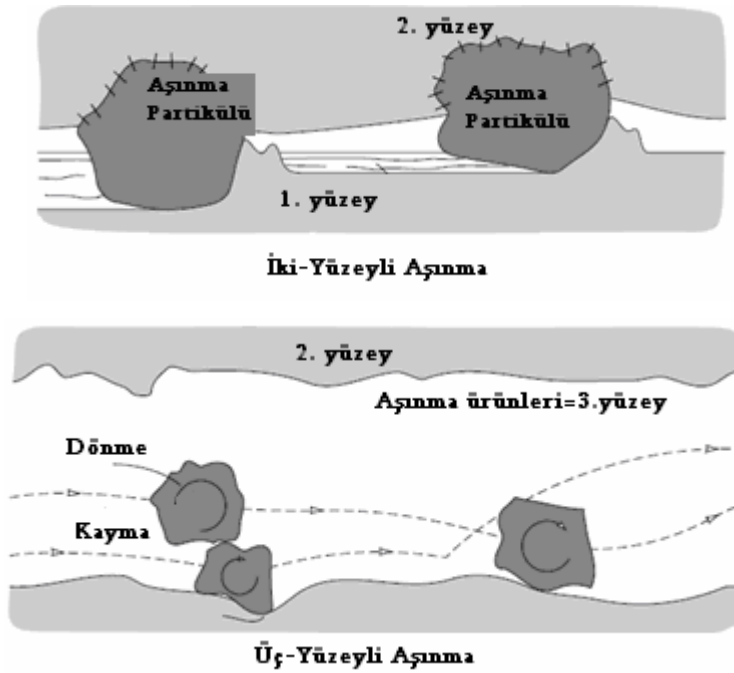
Yumuşak malzemeler için en ağır aşınma mekanizması Kesme (Cutting)'dir. Bu proses boyunca abrazif uç, malzemelerin işlenmesinde olduğu gibi yüzeyden malzemeyi plaka ya da talaş şeklinde kaldırır. Sert abrazif partiküller için mekanizmanın kızaklamadan kesmeye dönüşmesi için kritik bir açı (örn: bakır için 45° , alüminyum için 85°) ve penetrasyon derinliği mevcuttur [28].

Abrazyon aşınmasının maliyeti yüksek olup bir endüstri bölgesindeki toplam üretimin %1-4'ü arasında değişmektedir. Abrazyonun etkisi özellikle tarımın endüstriyel alanlarında ortaya çıkmaktadır. Madencilik v.b gibi [28].

İki yüzey birbiriyle temas ettiğinde, her iki yüzeyde de aşınma meydana gelir. Endüstriyel kuruluşlar, oluşan ekonomik kayıpları sebebiyle aşınan yüzeyin üzerine yoğunlaşarak ve diğer yüzeyin abrazif olduğunu düşünürler. Genel olarak her iki yüzey de abrazif aşınmaya meyillidir. [28]

Aşınan ya da aşındıran yüzeylerde aşınma hızı, malzemenin doğasına değil, her iki yüzey karakteristiğine, yüzeyler arasındaki abrazif mevcudiyetine, temas hızına ve diğer çevresel şartlara bağlıdır. [28]

Abrazyon tipik olarak temas ortamına göre olduğu gibi temas tipine göre de karakterize edilir. Temas tipleri iki-yüzey ve üç-yüzeyli aşınmayı kapsamaktadır. İki-yüzeyli temas, abrazif malzemenin tek yüzey üzerindeki hareketinde, üç-yüzeyli temas ise abrazifin iki yüzey arasındaki hareketinde meydana gelmektedir. Şekil 4.9.'da iki-yüzeyli ve üç-yüzeyli temas tipleri gösterilmektedir [8, 28].



Şekil 4.9. İki-yüzeyli ve üç-yüzeyli abrazif aşınma tipleri [24]

Erozyon aşınması ise, aşınma partiküllerinin ya da gaz, sıvı gibi akışkan bir ortamda bulunan aşındırıcı parçacıkların yüzeye serbestçe çarpması sonucu malzeme yüzeyinden parçaların kopmasıyla ortaya çıkmaktadır [5, 13]. Sıcaklık ve akış hızı arttıkça aşınma hızlanır [5]. Katı parçacıkların bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma abrasif erozyon olarak adlandırılır. Katı parçacıkların bağıl hareketi katı yüzeye dik olduğundan ise aşınma çarpma (impact) erozyonu olarak adlandırılır. Eroziyon aşınmaya örnek gaz türbinlerinin nozul ve kanatçıklarının yanma ürünleri içindeki katı parçacıklar tarafından aşındırılmasıdır. Sıvı erozyonu sıvı damlacıkları içeren sıvı ve gaz jetleri ile meydana gelen bir aşınmadır ve çarpma, karıncalanma oyulması (pitting) ve yenme yüzeyin kabalaşması şeklinde görülür [4].

4.4.1.3. Yorulma aşınması

Adhesiv ve abrazif aşınma mekanizmalarında aşınma partikülü oluşması için tekrarlı temasın olmasına gerek yoktur. Tekrarlı temasın olduğu yerlerde aşınma ürünlerinin oluşması için farklı bir aşınma mekanizması mevcuttur. Böyle tekrarlı temas halinde meydana gelen aşınma yorulma aşınması olarak adlandırılır [5, 22]. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu da yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur [5].

Yuvarlanma teması söz konusu olduğunda ise hasarda yorulma mekanizması daha fazla önem taşır. Bilyeli bir yatakta yorulma periyodu basitçe yatağın dönme sayısı ile ilgilidir. Bir küre veya silindire temas noktasındaki maksimum gerilme, yüzeyin biraz altında bir yerde meydana geldiğinden yorulma hasarı gerilmenin en yüksek olduğu yerde başlar. Yüzeyin altında yorulma çatlakları oluşur ve bunlar yuvarlanma temasıyla ilgili karakteristik karıncalanma (pitting) hasarı oluşturarak yüzeyden nispeten büyük metal parçacıkları ayrılmasına neden olur [4].

4.4.1.4. Korozif aşınma

Korozif aşınmada yüzeyden malzeme uzaklaşması, aşınma yüzeyinde kimyasal reaksiyon filminin oluşumu ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünlerinin yüzeye kuvvetli bir şekilde yapışması ve bulk malzeme gibi davranması durumunda, aşınma mekanizmasının da neredeyse bulk malzeme ile aynı olacağı öngörülmektedir. Yine de birçok durumda böyle reaksiyon ürünleri bulk malzemedan farklı davranmaktadır ki bu durumda katı yüzeyin korozif ortam ile etkileşimleri ile reaksiyon ürünlerinin oluşumu korozif aşınmayı meydana getirir [22].

Korozif aşınmada oluşan reaksiyon ürünleri sürtünme ile yüzeyden kalkar. Bu durumda reaksiyon tabakalarının aşınma hızı, yüzeyde oluşan ve yüzeyden kalkan reaksiyon ürünlerinin hızı ile alakalıdır [22].

BÖLÜM 5. OTOMOTİV FREN SİSTEMİ

5.1. Giriş

Fren sürtünme elemanları, hareket ile ortaya çıkan mekanik enerjiyi, balata tarafından absorbe edilen ısı enerjisine dönüştürmektedir. Fren bileşenlerinin başlıcaları dönen/hareketli parçalar tekerlek, aks, disk ya da kampana frenler gibi; sabit parçalar ise dönen parçalara baskı ya da yük uygulayarak, sürtünme kuvveti yoluyla yavaşlatma ve durdurma görevi üstlenen balatalardır [38].

Frenler temel olarak blok fren, kampana (band) fren, iç-papuç fren ve bu çalışmanın kapsamında incelenen disk frenler şeklinde sınıflandırılabilir. Fren sistemi için geliştirilen, sürtünme malzemeleri olan balatalar, geniş bir aralıkta olacak olan fren pedal basıncına, araç hızına, sıcaklık, nem ve diğer çevreel şartlara karşı sürtünme kuvvetini/katsayısını sabit ve güvenilir tutacak şekilde üretilmeli ve dizayn edilmelidir [38].

Farklı fren durumlarının performansı, esas olarak balata malzemesinin kompozisyon ve mikroyapısı tarafından kontrol edilmektedir. Sürtünme malzemesi olarak tek bir malzemenin kullanımının yetersiz olduğunun anlaşılması ile bu tür ve bundan başka çeşitli uygulamalar için de çok fazlı kompozit yapıdaki malzeme geliştirilmektedir. Bu çok fazlı sürtünme malzemesi içindeki her bir bileşenin rolü, yoğun olarak çalışılmakta ve daha iyi sürtünme performansı sağlamak amacıyla yeni katkı malzemeleri ilave edilmektedir [38].

Örneğin, kullanılan katkı malzemeleri arasında bağlayıcı olarak kullanılan reçine, malzemenin sürtünme özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Genellikle termoset fenolik reçine bağlayıcı ve fiber takviyesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca dolgu

malzemeleri ve metalik partiküller de daha iyi sürtünme özellikleri için malzemeye ilave edilmektedir [38].

5.2. Taşıt Frenleri

Fren, hareket halinde olan aracı en kısa mesafede veya en az zamanda yavaşlatma veya durdurma işlemidir. Frenleme kuvveti, hareket halinde bulunan bir aracın hızını kesip yavaşlatmak veya durdurmak için uygulanan kontrollü bir kuvvettir. Frenleme esnasında balata dönmekte olan kampana/disk'e basınç uygulayıp sürtünme meydana getirir. Araç sürtünme kuvvetinin yavaşlatma etkisi ile kontrollü olarak yavaşlar veya durur. Hareket halinde bulunan her cisim kinetik enerjiye sahiptir. Yani kinetik enerji hareket halindeki cismin hızının karesi ile kütesinin çarpımının yarısına eşittir [4].

Frenleme; kontrollü gücün, hızı azaltmak, durdurmak ya da aracı sabit tutmak amacıyla iki yüzeyin sürtünme oluşturacak şekilde birbirine sürtünmesi ile kullanılmasını kapsamaktadır. Sürtünme temastaki iki yüzey arasında birbirlerine göre hareketlerine gösterilen direnç olarak belirtilmektedir. Balatalar, kampana ya da disk frenlerle temas ederek aracın hareketini etkileyen ve harcanan sürtünme malzemeleridir [39].

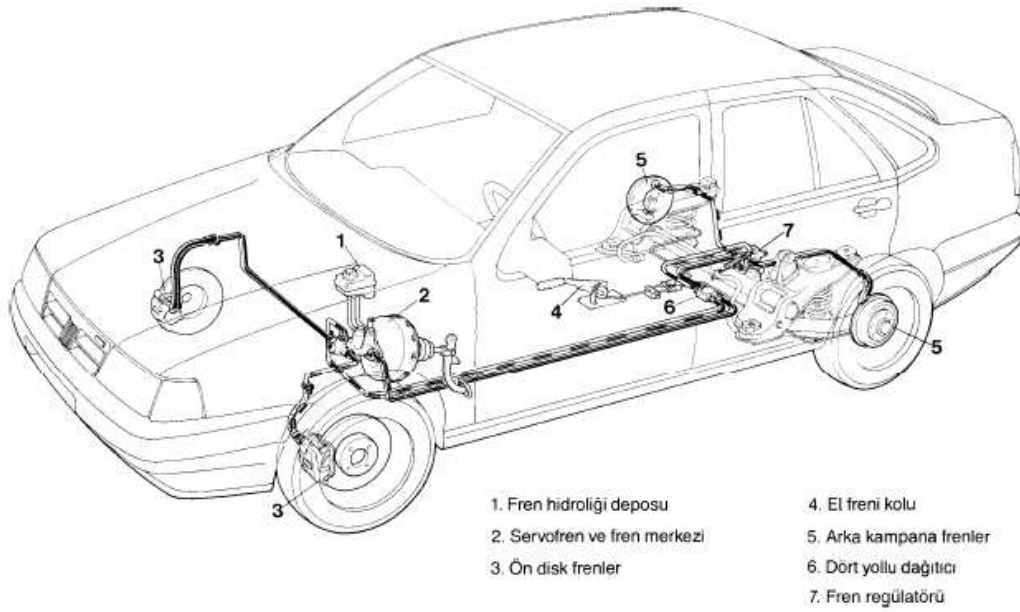
Fren performansındaki gelişmeler otomotiv endüstrisindeki gelişmelerin önemli bir kısmıdır. Yıllar boyu otomobillerin boyutlarındaki değişimler, araç ağırlığını etkilemiş, dolayısıyla yeni ve işlevsel frenlerin ve sürtünme malzemelerinin geliştirilmesi, otomobil taşımacılığı ve güvenlik açısından önemli ve çok çalışılır bir konu olmuştur [39].

Araçlardaki fren ekipmanlarının kararlı, tekrarlanabilir ve sıcak, soğuk, ıslak ve kuru ortamlar gibi farklı çevresel şartlarda etkin durdurma davranışına sahip olması gerekmektedir [40].

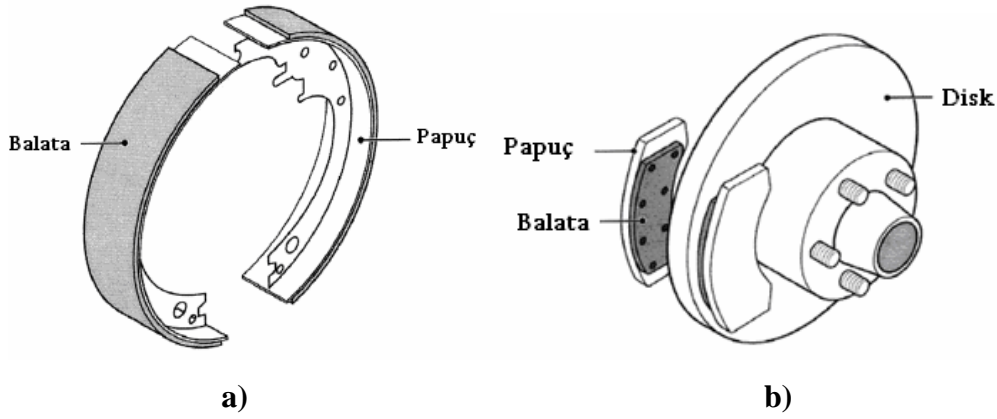
Otomotiv fren sistemi üç ana bölüme ayrılabilir [42]:

1. Rotor – tekerlek ile birlikte dönen kısımdır. Sürtünme çiftinin ilk parçasıdır. Çoğunlukla ve yaygın olarak kullanılan parçalar dökme demirden yapılırken, çeliğin ve son yıllarda metal matriksli kompozit malzemelerin de fren disk malzemesi olarak kullanımı mevcuttur.
2. Balata – sürtünme çiftinin ikinci parçasıdır. Hidrolik piston yardımıyla diski sıkıştırarak, sürtünme ile kinetik enerjiyi ısıya çevirir.
3. Hidrolik sistem – hidrolik presten gelen fren kuvvetini fren balatasına iletir.

Şekil 5.1.'de örnek bir otomobilin hidrolik fren sistemi, Şekil 5.2.'de ise kampana ve disk fren sistemleri görülmektedir.



Şekil 5.1. Bir otomobilin hidrolik fren sistemi [41]



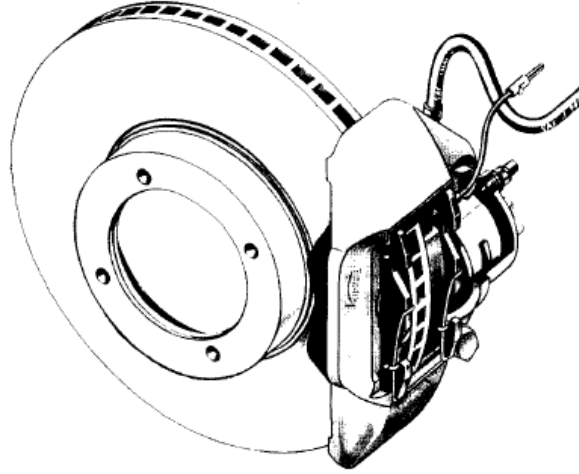
Şekil 5.2. a) Kampana tipi fren, b) Disk tipi fren [39]

Taşıtlarda tekerlek freni olarak sürtünmeli frenler kullanılmaktadır. Genel olarak doğrudan doğruya tekerleğe bağlı olan bu frenler iki ana fonksiyonu yerine getirirler.

1. Fren momentinin oluşturulması,
2. Enerji değişiminin gerçekleşmesi (kinetik veya potansiyel enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi ve bu ısının atılması) [41].

5.2.1. Disk frenler

Prensip olarak tekerlekle eş eksenli olarak monte edilmiş olan metal bir disk tekerlekle birlikte dönmektedir. Semer adı verilen ve tekerlek askı kollarına bağlı olan bir parça diski genel olarak bir köşesinden kavrar. Ender olarak diski çepeçevre kavrayan semerler de mevcuttur. Semerin iç kısımlarında diskin iki yüzeyine yaslanan balatalar frenleme sırasında hidrolik basınç ile diski her iki yönden eşit kuvvetle sıkıştırırlar. Diskin semer tarafından örtülü olmayan kısımları hava akımlarına açık bulunduğundan kolayca soğutulmaktadır. Çamur ve balata tozları merkezkaç kuvvetle ya da hava akımı ile temizlenirler. Fren cevap süresini uzatan nem oldukça hızlı buharlaştığından cevap çabuklaşır. Disk kaba kirlenmelere karşı bir çamurluk saçısı ile korunmaktadır. Şekil 5.3.'te bir disk fren görülmektedir [41].



Şekil 5.3. Bir disk fren ve elemanları [41]

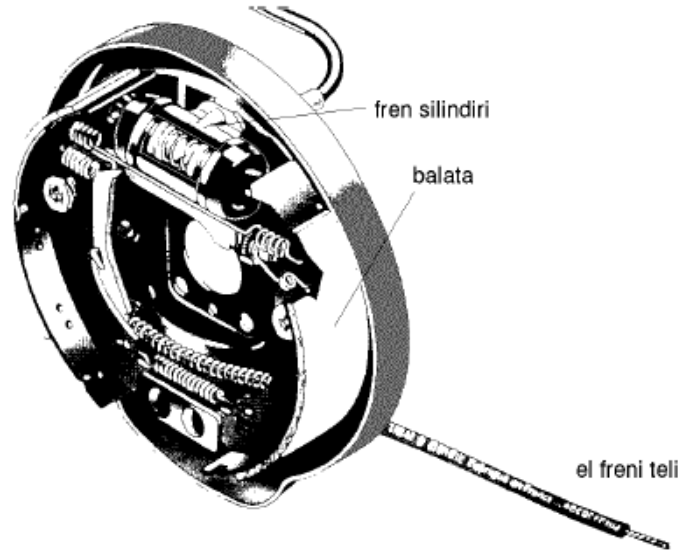
Diskli frenlerde ısının havaya iletilmesinin kolay olması ve her iki dönüş yönünde aynı frenlemeyi sağlamaları nedeniyle otomotiv alanında en çok kullanılan fren sistemidir [4].

Diskler yüzeydeki yabancı maddelerden kolay kurtulur. Diskli fren balatasının disk üzerindeki kuvvet dağılımı kampanalı fren tipine oranla daha kararlı ve daha homojendir. Yüksek hızlardaki frenlemede, ani kavrama eğilimi daha düşüktür. [4].

Günümüzde kullanılan frenlerde, fren sürtünme katsayısı genellikle $\mu = 0,3-0,4$ arasında değişmektedir. Balata yüzeyine gelen ortalama fren basınçları ise $P = 600-800 \text{ N/cm}^2$ arasındadır. Bu değer 1200 N/cm^2 ye kadar çıkabilir. [4, 41].

5.2.2. Kampanalı frenler

Kampanalı frenlerde fren yüzeyi silindirikdir. Çeşitli tipleri olmakla birlikte karayolu taşıtlarının tekerlek frenlerinde içten pabuçlu olanlar kullanılmaktadır (Şekil 5.4.).



Şekil 5.4. Kampanalı fren [41]

Sürtünme malzemelerinin karşı yüzeyle iyi bir alışma göstermesi, atmosfer şartlarında yapısını koruması, değişik basınçlara karşı mukavim olması gerekmektedir. Ayrıca dış zorlamalara karşı sürtünme katsayısı değerinin ve dağılımının büyük sapma göstermemesi ve sıcaklık karşısında yapısının bozulmaması istenir [4]. Soğuma, kirlilik ve diğer birçok faktör göz önüne alındığında genellikle araçların ön frenlerinde disk tipi, arka frenlerinde ise kampana tipi frenler kullanılmaktadır. Sürtünme malzemesi olarak nitelendirilen balatalar kampana ya da disk frenlerle birlikte kullanılmaktadır. Fren disklerinde kullanılan tipine 'pad', kampana tipi frenlerde kullanılan tipine ise 'segment ya da strip (kabuk)' denmektedir. Ağır ticari araçlarda kullanılan tip ise 'blok' olarak adlandırılır [43].

Disk frenlerde, balatalar diski karşılıklı olarak sıkıştırırlar. Balata-disk arasındaki sürtünme kuvveti balataların normal kuvvetine diktir ve etkilemez. Böylece frenleme kuvveti, iki parça arasındaki sürtünme katsayısı sabit olarak kabul edildiğinde, uygulanan yüke lineer olarak bağlı olacaktır. Bunu sonucu olarak ta kampana frenlere nazaran daha üstün fren pedal hissi olur [42].

Fren sürtünme ve aşınma özellikleri, sıcaklığa, sürtünme hızına ve basınca bağlı olduğu gibi fren dizaynına ve balata kompozisyonuna da bağlıdır. Fren balataları

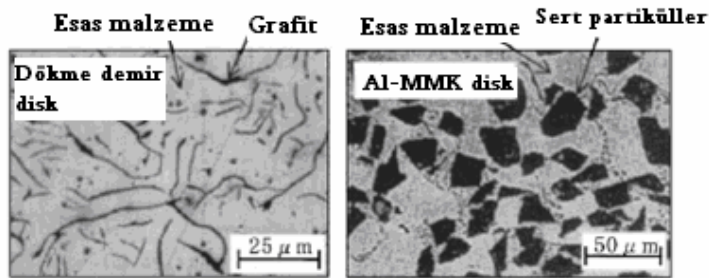
aşınan element olarak kullanılmakta ve dolayısıyla sürtünme davranışını başlıca belirleyen malzeme olmaktadır. Yine de sürtünme çiftinin diğeri olan kampana ya da disk malzemesi balata sürtünmesini ve aşınmasını etkilemektedir. [43].

Kampana frenlerde ağırlıklı kampana sürtünme yüzeyine yük (tipik olarak 50-70%) uygulayan fren balataları ile içten genişleyen papuç kullanılır. Birçok otomotiv disk frenlerinde ise disk yüzeyine uygulanan yük (7-25%) daha küçük bir orandır. Disk frenlerin açıkta olan yüzey alanları geniş ve daha iyi dizayn edilmiş olduğundan daha hızlı soğurlar fakat bu durumda da dışarıdan gelecek sıvılara ya da katı kirliliklere karşı korumasız kalırlar. [43]. Kampana frenler, çevresel etkilere (su, toz, kirlilik v.s. gibi) karşı daha dayanıklıdır [42].

Diskli frenler oldukça verimlidirler ve aşırı ısınmadan doğan balata ile disk arasındaki sürtünme kayıplarına (fade) karşı dayanıklıdır. Aşırı ısınmalar, hem balatanın hem de kampananın sürtünme yüzeylerinde zamanla cam gibi bir parlaklık oluşturur ve frenleme etkisinde zayıflama meydana gelir [4].

Diskli frenler açık havaya açıktır ve daha küçük sürtünme yüzeylerine sahiptir. Diskli frenlerin nem ve dış kirliliklere açık oluşu şikayet 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 duyulabilir [4].

Şekil 5.5.'te Nakanishi ve arkadaşlarının [14] Al-MMK fren diskleri ve geleneksel lamel grafitli dökme demir fren disklerinin optik yapıları gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Geleneksel dökme demir ve Al-MMK disk malzemelerinin mikroyapıları

Lamel dökme demir fren diski grafitin ferritik + perlitik veya perlitik ana yapı içinde dağılmış olan grafit yapısından meydana gelirken, Al-MMK fren diski SiC seramik parçalarının alüminyum alaşımında dağıldığı kompozit malzemedan oluşmuştur. Ancak yapılan testler % 30 SiC içeren Al-alaşımının fren balatalı kombinasyonda, disk aşınmasının genelde lamel grafitli dökme demirden daha az olmasına rağmen balata aşınmasının Al-MMK disk kullanıldığında dökme demir diske nazaran 2-2.5 kat daha yüksek olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle daha az balata aşınması için Al-% 30 SiC kompozitine % 2,5 kadar grafit ilavesi yapıp özellikler iyileştirilmiştir [14].

K. Laden ve arkadaşları [45] Al-% 18 Si ve Al-% 3 Mg matriks alaşımlarına ağırlıkça % 4-8 oranında 12 mm partikül çaplı SiC seramik takviye fazları ilave etmişlerdir. Bu arada SiC partiküllerinin morfolojisinin küresel ve keskin köşeli olması durumunu da ayrıca incelemişlerdir. Kompozit malzeme üretimlerini vorteks metodu ile gerçekleştirdikten sonra frenleme ve balata testleri gerçekleştirmişlerdir. Al-Mg alaşımlarında yetersiz aşınma dayanımı ve yüksek sürtünme katsayıları elde edilirken, Al-Si alaşımlarında çok az miktardaki SiC partikül ilavelerinde bile yeterli derecede aşınma dayanımı sağlanmıştır. Havada yapılan denemelerde 0.4 civarında bir sürtünme katsayısı elde edilirken argon gazı ortamında özellikle artan temas basıncı ile sürtünme katsayısının düştüğü ve 0.6 MPa lık temas basınçlarında sürtünme katsayısı 0.22 olarak tespit edilmiştir. Genelde MMK malzemelerin daha düşük temas sıcaklığı verdiği, çelik ve dökme demire göre daha ekonomik olduğu ifade edilmiştir.

5.3. Balatalar

Balatalar, TS 555'e göre sürtünmeli frenler için uygulanan fren kuvvetinin araçların tekerlekleri ile bağlantılı disk veya kampanalara sürtünme yolu ile aktarılmasını sağlayan elemanlar olarak tanımlanır. Balata, pabuç ile kampana/disk arasındaki sürtünme görevini üzerine alır. Balata, pabuca yapıştırma veya perçinleme usullerinden biriyle tutturularak, pabuca bağlı olarak çalışır [4].

Otomotiv sürtünme malzemeleri 90 yıldan bu yana belirlenmiş ve formülize edilmiştir. Sürtünme malzemeleri üç sınıfa ayrılmıştır: organik, metalik ve karbon [4, 43, 44].

5.3.1. Organik balatalar

Organik sürtünme malzemeleri, bir ya da birden fazla bağlayıcı reçine ve krisotil (chrysotile) asbest fiber ve sürtünmeyi modifiye etmek, aşınma özelliklerini iyileştirmek, maliyeti düşürmek, üretimi kolaylaştırmak, renkleri değiştirmek v.b. gibi birçok özelliği kontrol etmek amacıyla ilave edilen diğer takviye malzemelerinin karışımından oluşan bir kompozit malzemedir. Üç alt sınıfa ayrılmaktadır[43]:

- Asbestli (organik olarak ta adlandırılır) balatalar
- Asbest içermeyen organik (NAO) balatalar (eşitli fiberler kullanılmaktadır)
- Yarı-metalik ya da reçine ile bağlı metalik (semimet) balatalar.

Buğn kullanılan arabaların ağırlıklarının ve hızlarının arttırılması ile ölçüleri aynı kalmış olan frenlerden istenenler de epeyce artmıştır. Normal olarak 300-350 °C sıcaklığa tahammül eden organik balatalar bu ısıya çevrilen enerji miktarına dayanamayacak duruma getirilmişlerdir. Bu yüzden sıcaklığa ve yüksek zorlamalara tahammül edebilecek olan anorganik yani sintermetal ve seramik balataların geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır [4].

Yarı-metalik balatalar diğer asbest içermeyen (NAO) balatalardan ayrı değerlendirilmelidir çünkü yarı-metalik balatalar sınırlı bir kompozisyon aralığında eşsiz sürtünme ve aşınma özellikleri göstermektedir. Bu balatalar ağırlıkça %65 demir içeriğinden, %10-25 arası çelikten ve geri kalan kısmında da çoğunlukla poroz demir tozlarından oluşmaktadır. Grafit aę.%15, ısı-dayanımlı bağlayıcı fenolik reçine ise yaklaşık %10 civarında kullanılmaktadır[43].

NAO fren balatalarının formülasyonları hızlı bir gelişim ya da değişim göstermektedir. Genellikle bu formülasyonlar malzemenin neyi içermediğini göstermektedir; asbest içermeyen, metalik olmayan v.b. gibi. En yaygın kullanılan fiberler cam, metal, seramik, para-aramid (Kevlar©), selülozik ve diğer organik formlarıdır. Ayrıca wollastonit ve levhasal attapulgitete kullanılan takviye malzemelerindedir [43].

Organik sürtünme malzemelerinde kullanılan bağlayıcı reçine tipik olarak termoset polimerdir. Hem sıvı hem de toz hali kullanılmaktadır. İyi aşınma özellikleri sağlamak için balata reçineleri ya da bağlayıcıları tok olmalı, ısı dayanımı yüksek, termal olarak kararlı ve dolayısıyla termal bozunma davranışı tahmin edilebilir olmalıdır [43].

Sürtünme malzemesinin aşınma özellikleri uygun özellikteki inorganik takviyeler ile artırılabilir. Genellikle balata takviyeleri mukavemeti, termal genişleme özelliklerini, ısı absorpsiyonunu, sürtünme ve diğer birçok özelliği artırabilir [43].

Organik balata malzemeleri, genel olarak birçok farklı takviye malzemesi içermektedir. Bazı uygulamalarda 20-25 farklı bileşen olmaktadır [42]. Fren balatasında kullanılan malzemeleri sınıflandırırsak [4, 42, 43, 46];

- Bağlayıcı,
- Takviye element,
- Fiberler,
- Abrazif elementler (SiO_2 , Al_2O_3),
- Dolgu (katkı) maddeleri (BaSO_4 , CaCO_3 , Al_2O_3),
- Katı yağlayıcılar (MoS_3 , Sb_2S_3 , Grafit, vs.),
- Yanmaya karşı koruyucu malzemeler (Sb_2O_3 , alüminyum hidroksitler vs.)

Sürtünme malzemesinin sürtünen arayüzeyinde yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve dengesiz termal reaksiyonlar olduğu düşünülebilir. Balata malzemesine ilave edilen birçok sürtünme takviyelerinin balata performansına etkileri hakkında

yetersiz bilgilere sahip olduğundan, bu etkiler kesin olarak tahmin edilememektedir. Sonuç olarak birçok balata formülasyonu deneyimler ve çeşitli deneysel çalışmaların birleştirilmesi ile daha doğru bir deyimle açıklarsak deneme-yanılma yoluyla elde edilmiştir [43].

5.3.2. Metalik balatalar

Metalik fren balataları bakır yada demir esaslı olmaktadır. Bunlardan çoğu, performansın artırılması amacıyla ilave edilen inorganik takviyeler ihtiva ederek katı-hal sinterlenmesi ile üretilmektedir. Bu malzemeler yüksek güç girdi yoğunluğunun olduğu yerler için geliştirilmektedir. Sinterlenmiş, grafit içeren demir esaslı balatalar bazı yolcu araçlarının kampanalı fren kısımlarında olduğu gibi, ağır taşıtların hem disk hem kampana frenlerinde kullanılmaktadır[43].

Diğer sürtünme malzemesi ise dökme demirdir. Birçok demiryolu aracının fren sisteminde kullanılan iyi bir malzeme olmasına karşın yeni otomotiv uygulamalarında kullanılan dökme demir fren balatası bulunmamaktadır. Bu malzeme balata olarak değil daha çok kampana ve disklerde baskın karşı yüzey olarak kullanıldığından, balata olarak adlandırılmamakla birlikte sürtünme elemanı olarak nitelendirilir [43].

5.3.3. Karbon esaslı balatalar

Karbon-karbon gibi karbon esaslı balata balata malzemeleri askeri ve ticari uçakların fren diskleri ile kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir. Karbon esaslı balata malzemeleri, ağırlığın kritik, performansın istenen ve maliyetin ikincil önemli olduğu yarış araçları gibi bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Karbon-karbon sürtünme malzemeleri, amorf karbon bağlayıcı ile bağlanmış karbon fiberlerden (grafit fiberler) üretilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda fırınlanma ile ya da kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile üretilmiş organik reçineler, bu bağlayıcı amorf karbonu oluşturmak amacıyla yapıya ilave edilir[4, 43].

Araçlardaki fren balatalarının, yokuş aşağı inen ağır bir araçta yapılan güçlü ve sert bir fren, otoyolda bir aracın kullandığı minimal güçteki frene kadar değişen farklı koşullardaki frenlemeleri karşılamaları gerekmektedir. Araç frenleri yüksek güvenilirlikli, sıcaklığa, su ve diğer kirliliklere karşı ise minimum duyarlılıkta olmalıdır. Ayrıca balata sürtünme özelliği malzemenin ömrü boyunca istikrarlı olmalıdır [43].

5.4 Balatalardan istenilen özellikler

Balata malzemelerinde istenilen özellikleri belirtmek için çalışma şartlarının çok iyi bilinmesi gerekir. Özellikle balata yüzeyine etki eden basınç, aracın hızı ve sürtünmeden dolayı balata yüzeylerinde oluşan sıcaklık yükselmelerinin önemli olduğu görülür. Çalışma şartlarının hafif-orta-ağır olmasına göre balatadan istenen özellikler de değişmektedir. Balataların denenmesinde basınç-hız-sıcaklık değerlerinin birbiriyle olan kombinasyonları göz önüne alınır ve basınç-hız değerleri birbiri ile paralel olarak artırılır [4].

Literatürde balatalardan istenen özellikler aşağıdaki gibi özetlenmiştir [4].

1. Her çalışma şartlarında sabit sürtünme performansı,
2. Sürtünme katsayısının sıcaklık, fren basıncı ve hızdan bağımsız olması veya sürtünme davranışındaki değişimin az olması,
3. Yüksek sıcaklık direnci,
4. Yüksek ısı iletkenliği,
5. İyi korozyon direnci,
6. Yüksek mekanik mukavemet,
7. Düşük gürültü seviyesi,
8. Hava koşullarından etkilenmeme,
9. Balata malzemesinin sağlığa zararsız olması,
10. Yüksek aşınma mukavemeti ve karşı malzemede düşük aşınma istenmektedir

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Çalışma Programı

Süresiz takviyeli alüminyum matriksli kompozitler, düşük yoğunluk, yüksek spesifik dayanım (stiffness), yüksek spesifik mukavemet, kontrol edilebilir termal genleşme katsayısı, yükseltilmiş yorulma dayanımı ve yüksek sıcaklıklarda üstün boyutsal kararlılık gibi arzu edilen özelliklere sahip olabilen kompozit malzeme sınıfıdır. Bu malzemeler, çeşitli mühendislik uygulamalarına gereken özellikler doğrultusunda malzeme üretim seçeneği veren önemli bir sınıf olarak ortaya çıkmaktadır. Kompozitlerde, sürekli olan matriks fazının içerisinde bir ya da birden fazla takviye fazının kontrollü dağılımı mümkündür. Bu kompozit malzemelerin büyük çoğunluğu, yüksek mukavemetli, yüksek modüllü ve kırılğan seramik fazları ile takviye edilmiş metalik malzemelerdir [20]. Özellikle tribolojik uygulamalardaki yüksek temas yüklerinde düşük aşınmadan ağır ya da şiddetli aşınmaya geçişi geciktirmesi açısından sert partiküllerin bulunması önem arz etmektedir[10, 23].

Yakıt tüketimindeki artış araçların ağırlıklarının düşürülmesi yönündeki çalışmaları arttırmıştır. Geleneksel bir malzeme olan dökme demir yerine kullanılabilir alternatif bir malzeme olarak, dökme demire göre daha hafif bir metal olan alüminyum üzerine birçok çalışma [5, 14, 15, 18] yapılmıştır.

Özellikle sert partikül takviyeli Al-matriksli kompozit malzemeler, geliştirilmiş aşınma dayanımları ve mükemmel termal iletkenlikleri ile geleneksel dökme demir otomotiv fren disklerine alternatif olabilmektedir [10].

Literatür araştırması kısmında belirtildiği gibi fren diski olarak çelik, dökme demir ve son yıllarda seramikler de yüksek performanslı araçlarda yaygın olarak

kullanılmaya başlanmıştır. Çalışma performansı ele alındığında fren diski tek başına düşünülmemelidir. Araçta konforlu ve emniyetli bir seyahatin sağlanması için fren diski ve balatanın aşınma dayanımlarının yüksek olmasının yanında sürtünme katsayısının da belirli aralıklarda olması gerekmektedir. Disk ve balatanın ısınmaması, hafif, korozyona karşı dayanıklı olması da diğer dikkat edilmesi gereken ayrıntılardır.

Bu çalışmada, hafif, korozyona ve aşınmaya dayanıklı, sağlıklı fren diski-balata çiftlerinin üretilmesi ve performanslarının araştırılması amaçlanmaktadır. Disk olarak SiCp takviyeli Al-Si alaşımı, balata olarak da değişik oranlarda grafit takviyeli Cu seçilmiştir. Bu malzemeler ile yüksek ısı iletimine, düşük termal genleşme katsayısına ve yüksek aşınma dayanımına sahip kompozit malzeme çiftleri üretilmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapı, termal özellikler ve aşınma-sürtünme özellikleri araştırılmış, geleneksel dökme demir, çelik fren disklerine ve organik balata malzemelerine alternatif malzeme geliştirilmesi hedeflenmiştir.

6.2. Deneysel Malzemeleri

6.2.1. Matriks malzemeleri

MMK fren disk malzemesi üretiminde Tablo 6.1.'de verilen kimyasal bileşime sahip Al-Si alaşımı, fren balata malzemelerinin üretiminde ise 45–63 µm toz boyutuna sahip yüksek saflıkta Cu, matriks malzemesi olarak kullanılmıştır.

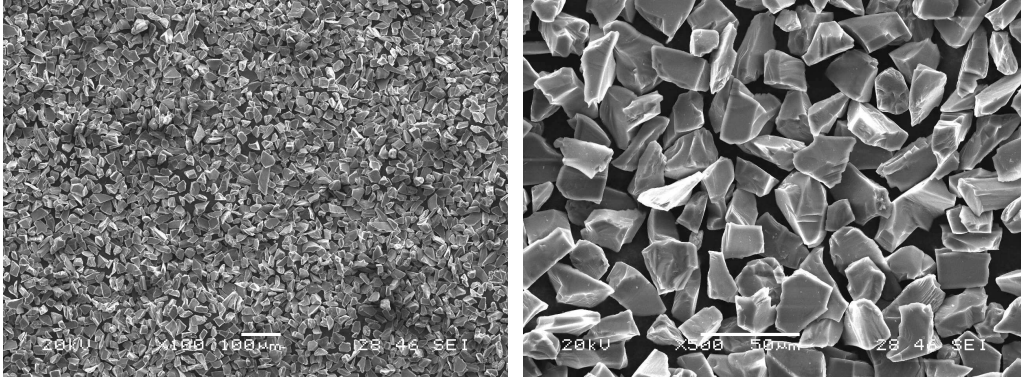
Tablo 6.1. Al-Si alaşımının kimyasal bileşimi

Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn
0,7	0,02	12	0,74	0,25	0,03	0,3

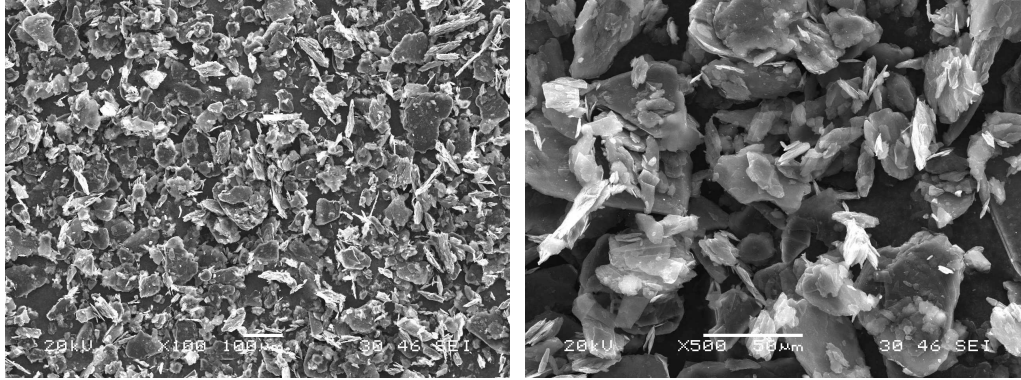
6.2.2. Kullanılan Takviye Malzemeleri

Al-MMK fren diskinde takviye malzemesi olarak kullanılan 400 mesh boyutundaki SiC partiküllerinin SEM görüntüleri Şekil 6.1.'de, Cu-MMK fren balatasına ilave edilen grafit partiküllerinin SEM görüntüleri ise Şekil 6.2.'de

verilmiştir.



Şekil 6.1. SiC partiküllerinin SEM görüntüleri



Şekil 6.2. Grafit partiküllerinin SEM görüntüleri

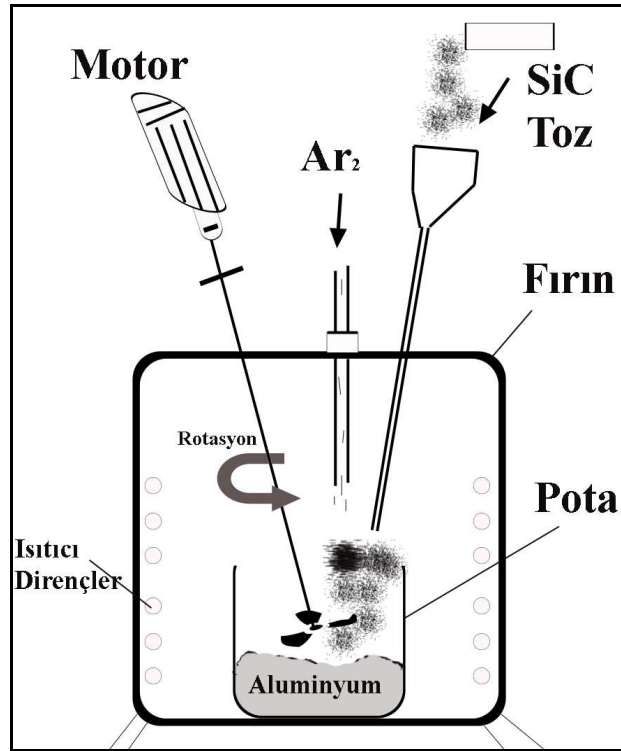
6.3. MMK Malzemelerin Üretimi

6.3.1. Fren diskinin üretimi

MMK fren diskinin üretimi esnasında vorteks metodu ve sıkıştırma döküm yöntemleri kullanılmıştır. Bu teknik ticari olarak da kullanılan genel bir tekniktir [47].

Bu çalışmada, basınçlı döküm alaşımı olan Al-Si esaslı alaşıma, 400 mesh boyutunda ve % 20 hacim oranında SiC partikül takviye edilerek fren disk numunesi üretilmiştir. SiC partikülleri Şekil 6.3.'te görüldüğü gibi, bir elektrik motoruna bağlanmış pervanenin, 700°C'lik fırında ergimiş sıvı metalde dönmesi

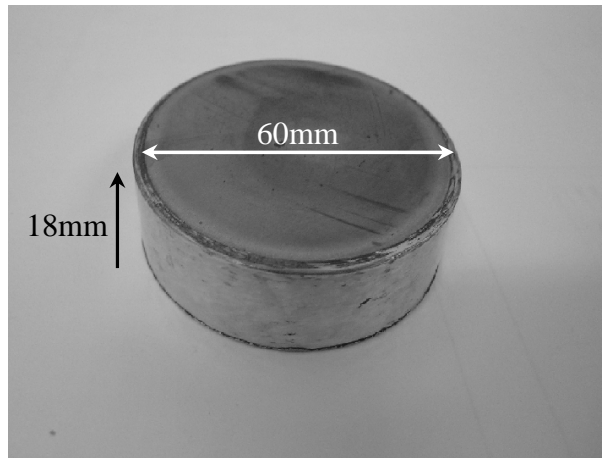
ile oluşan vorteks içine, % 20 hacim oranında, argon atmosferi altında ilave edilmiş ve karıştırmaya alıştırma sıcaklığı 570°C ' ye ulaşana dek devam edilmiştir. Takviye partiküllerinin homojen dağılımı sağlandıktan ve yaklaşık 750°C gereken döküm sıcaklığına çıkıldıktan sonra fırından alınan eriyik haldeki kompozit karışımı, Şekil 6.4.'te görülen basınçlı döküm ünitesindeki kalıbın içerisine boşaltılıp, 50 MPa basınç uygulanmıştır. Basınç altında katılan SiCp takviyeli Al esaslı kompozit malzeme döküm sonrası kalıptan Şekil 6.5.'da görüldüğü boyutlarda ve şekilde elde edilmiştir.



Şekil 6.3. Al-SiC fren diski üretmek için kullanılan fırının ve vorteks metodunun temsili görüntüsü [47]



Şekil 6.4. Basınçlı döküm ünitesi



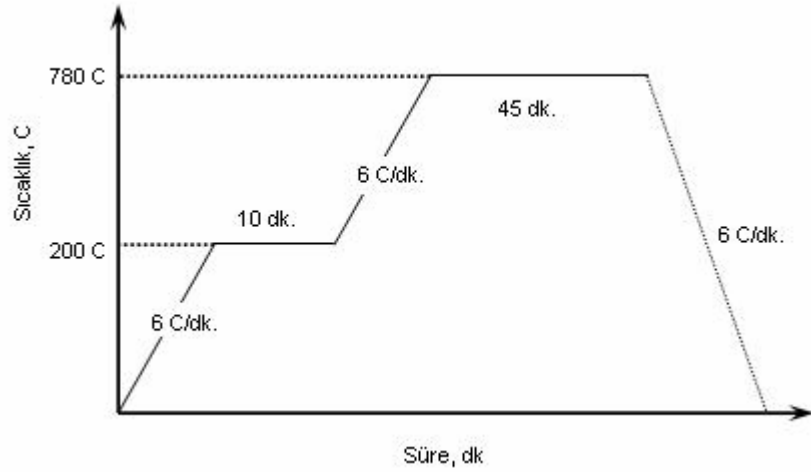
Şekil 6.5. Üretilen kompozit fren disk malzemesi

6.3.2. Fren balatası üretimi

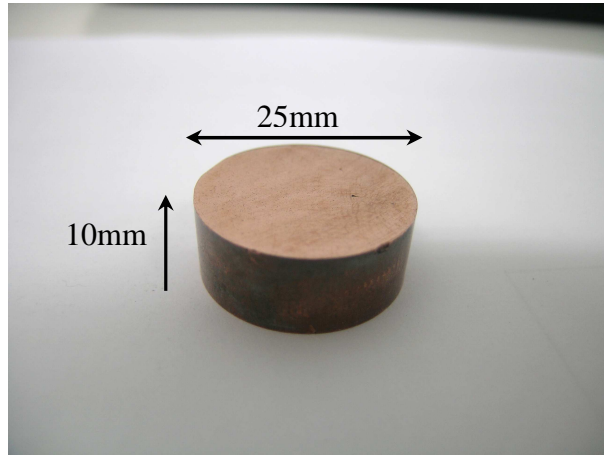
Balata numuneleri toz metalurjisi üretim tekniği kullanılarak üretilmiştir. Toz metalurjisi tekniği, metal matriksli kompozit malzeme üretiminde çok kullanılan yöntemlerden biridir. Ekonomiklik ve kolay olması gibi avantajlarının yanı sıra

zayıf fiziksel, mekaniksel özellik, porozite ve matris-takviye arayüzeylerinin iyi ıslatılmaması gibi dezavantajları da mevcuttur [47].

Balataların üretiminde, bakır tozları ve ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında tartılan grafit tozları, homojen bir takviye dağılımının sağlanması amacıyla bilyeli değirmende yaklaşık 3 saat karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında bir kalıp içerisine konulan tozlar, mekanik pres yardımıyla 40 Mpa basınç uygulanarak şekillendirilmiştir. Daha sonra kalıptan çıkarılan sıkıştırılmış ve şekillendirilmiş balata numuneleri, Protherm marka tüp fırında, %10 hidrojen-%90 argon atmosferinde, Şekil 6.6.'de görülen sinterleme adımları uygulanarak sinterlenmiş ve mukavemet kazandırılmıştır. 25 mm çap ve 10 mm yükseklikte üretilen balata malzemeleri Şekil 6.7.'de görülmektedir.



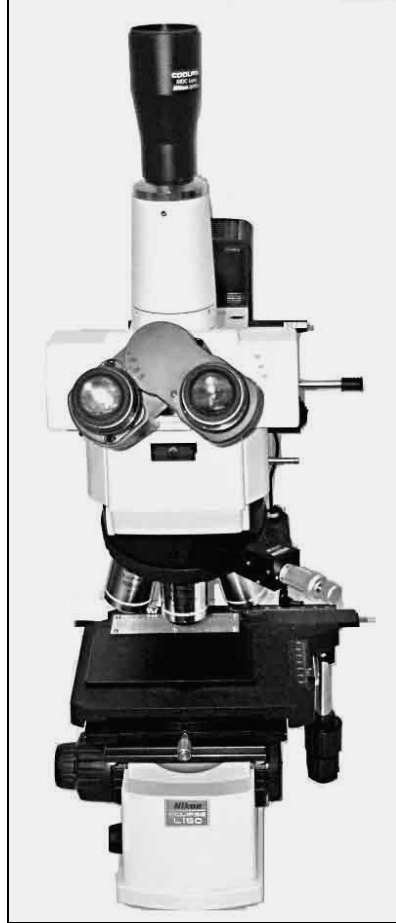
Şekil 6.6. Kompozit balataların sinterlenme proses adımları



Şekil 6.7. Üretilen kompozit balata malzemesi

6.4. Metalografik ve Optik Mikroskop Çalışmaları

Üretilen MMK fren diski ve balata malzemelerinin optik mikroskop incelemesi Şekil 6.8.'da gösterilen “Nikon Eclipse L 150” marka cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 6.8. Nikon Eclipse L 150 marka optik mikroskop cihazının fotoğrafı

Üretilen kompozit malzemeler metalografik numune hazırlama teknikleri ile sırasıyla 60, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımpara kağıtları kullanılarak kaba ve ince olarak zımparalanmıştır. Daha sonra yine sırasıyla 6 μ m, 1 μ m ve 0,25 μ m'lik elmas pastalar yardımıyla kaba ve ince parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Metalografik olarak hazırlanan yüzeyler daha sonra etanol ile temizlenmiş ve yüzeydeki kirlilikler giderildikten sonra optik mikroskop yardımıyla farklı büyütmelerde mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

6.5. Taramalı Elektron Mikroskobu Çalışmaları

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ve EDS analizleri “Jeol JSM 6060 LV” marka cihazla yapılmıştır (Şekil 6.9.).



Şekil 6.9. Jeol JSM 6060 LV marka SEM cihazının fotoğrafı

6.6. Termal Genleşme Çalışmaları

Al-Si-SiC fren diski ve Cu-Gr balata malzemelerinin termal genleşme çalışmaları Şekil 6.10.’de görülen “Anter Corporation Unitherm Model 1161 Dilatometer System” markalı dilatometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapılması için gerekli numune boyutları kesin değildir. Bu sebeple her numuneden malzemenin tamamını temsil edebilecek şekilde 10x10x20 mm boyutlarında termal genleşme numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 6.10. Anter Corporation Unitherm Model 1161 Dilatomter System” markalı dilatometre cihazı

6.7. Termal İletkenlik Çalışmaları

Üretilen fren disk ve balata numunelerinin termal iletkenlik ve termal yayınlabilirlik ölçümleri “NETZSCH LFA 447 MicroFlash” cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapılması için üretilen balata ve disk malzemeleri cihazın gerektirdiği numune boyutları olan 25 mm çap ve 2 mm yüksekliğe sahip olacak şekilde getirilmiştir.

6.8. Aşınma Deney Çalışmaları

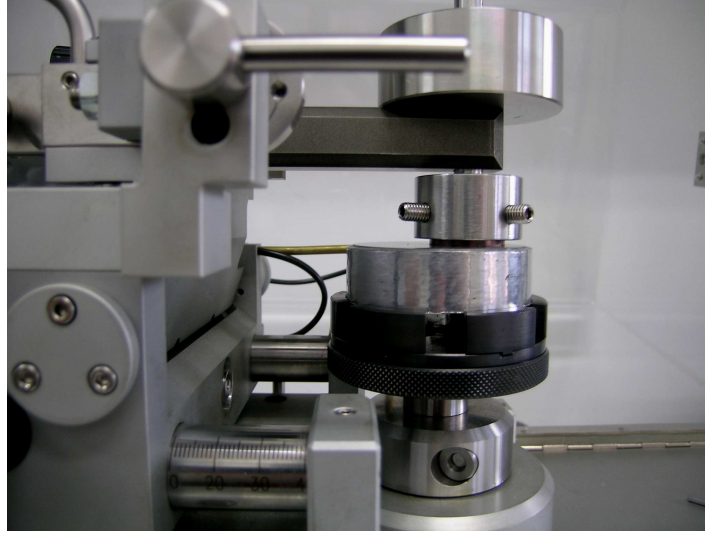
Üretilen Al-SiCp esaslı kompozit fren disk ve Cu-Grafit esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma deneyleri, DIN 50 324 ve ASTM G 99-95a standartlarına göre dizayn edilmiş, pin-on-disk (disk üstünde silindirik numune) prensibine göre çalışan “CSM Instruments Tribometer” markalı aşınma cihazında yapılmıştır (Şekil 6.11.).



Şekil 6.11. CSM Instruments Tribometer Aşınma Cihazı

Malzemelerin tribolojik davranışları, malzeme özelliklerinin kombinasyonu (kimyasal, fiziksel mekanik), deney şartları (yük, hız, çevresel özellikler) ve aşınma deney türü etkilemektedir [15]. Bu çalışmada, hacimce %20 SiCp takviye edilmiş Al matriksli kompozit disk üzerinde, ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 toz grafit takviye edilmiş Cu matriksli kompozit balata malzemesi karşılıklı olarak pin-on-disk deneyine tabi tutulmuştur. Al-MMK malzeme disk olarak ve Cu-MMK balata da pin olarak yerleştirilmiş, 1 adet disk malzemesi üzerinde sırasıyla %1'den %5' kadar grafit takviyesine sahip balata malzemeleri ile sırasıyla deney gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında 2N, 5N, 10N ve 20N'luk yükler kullanılmıştır. 0,5 m/sn ve 0,8 m/sn olmak üzere iki farklı hızda, her bir deney mesafesi 1000 m olmak üzere her parametre için farklı sayıda tekrarı yapılan deneyler ile disk ve balataların sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Deneyler yağlamasız ortamda, oda sıcaklığında ve yaklaşık %50–60 nispi nem koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Cu matriksli balata numunesi ve Al-MMK disk aşınma deney cihazına Şekil 6.12.'teki gibi yerleştirilmiştir. Disk, cihaz üzerine entegre olan altlık tutucuya ve balata da yine cihaz üzerinde entegre bir kol yardımıyla tam disk üzerine gelecek şekilde ve disk yüzeyi ile tam temas edecek biçimde, bir tutucu içerisine konulmuştur.



6.12. Fren disk-balata çiftinin aşınma deney cihazına yerleştirilmiş haldeki görüntüsü

Yapılan her deney öncesinde disk ve balata yüzeyleri öncelikli olarak, metalografik numune hazırlama teknikleri ile sırasıyla 60, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımpara kağıtları kullanılarak kaba ve ince zımparalama ve daha sonra yine sırasıyla $6\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ ve $0,25\mu\text{m}$ 'lik elmas pastalar yardımıyla kaba ve ince parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Metalografik olarak hazırlanan yüzeyler daha sonra etanol ile temizlenmiştir.

Disk ve balata malzemelerinin cihaz üzerine yerleştirilmesi ve sonrasında balata tutucu kol üzerine çalışılacak yükün uygulanması ile cihaz ve malzemeler deneye hazır duruma getirilmiştir. Daha sonra deney cihazının yazılım programına kayma mesafesi ve kayma hızı girilerek deney başlatılmıştır. Deneyin başlaması ile birlikte, cihaz üzerindeki hareket sensörleri tarafından algılanan sürtünme davranışı ya da malzemelerin kaymaya karşı gösterdikleri direnç eş zamanlı olarak sürtünme katsayısı şeklinde programa aktarılmıştır.

Aynı parametreler kullanılarak aynı deney farklı sayılarda tekrarlanmıştır. Fren diski-balata çiftinin gerçek çalışma şartlarına yaklaşmak için her 1000m tamamlandıktan sonra cihaz durdurulmuş, numunelerin yerleri değiştirilmeden ya da cihazdan çıkartılmadan tekrar 1000 m'lik kayma mesafesi ile deneye başlanmıştır. Farklı mesafelerde yapılan aşınma deneyleri sonucunda disk ve

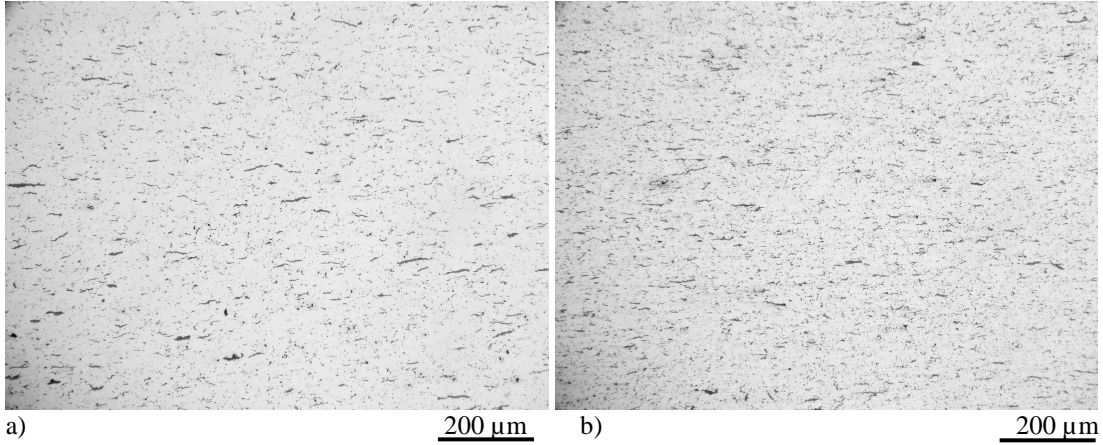
balata malzemelerinin farklı yük ve farklı hız değerlerinde sürtünme davranışları, sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği grafikleri şeklinde elde edilmiştir.

Her deney sonrası, deneye tabi tutulan balata malzemesinin aşınma yüzeyi Taramalı Elektron Mikroskopunda ve Optik Mikroskopta incelenmiştir. Diskin aşınma yüzeyi ise her balatanın tüm hızlardaki ve 2N, 5N ve 10 N'luk yüklerdeki deneylerinin tamamının bitmesinden sonra, 20N yük ile yapılan deneylerde ise her balata için 0,5 ve 0,8 m/sn hızlardaki deneylerden sonra incelenmiştir.

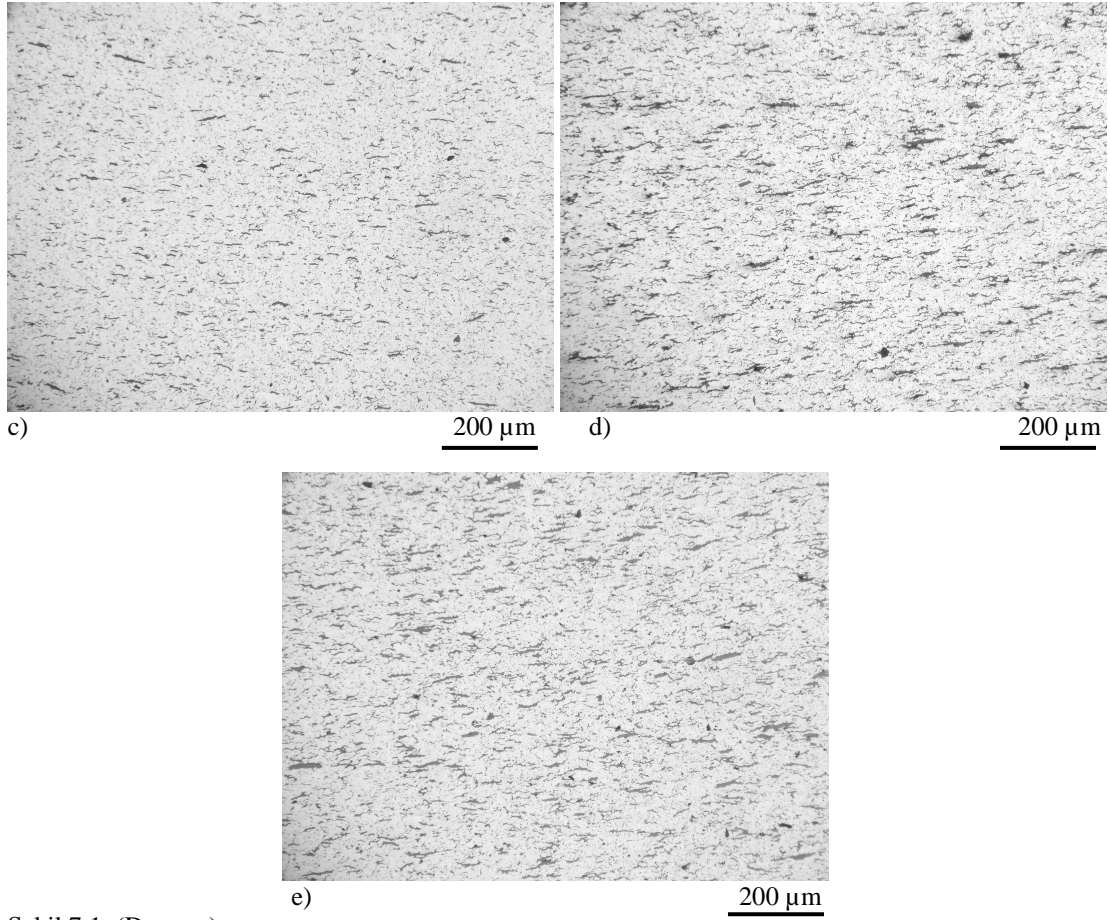
BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

7.1 Partikül Takviyeli MMK Malzemelerin Mikroyapıları

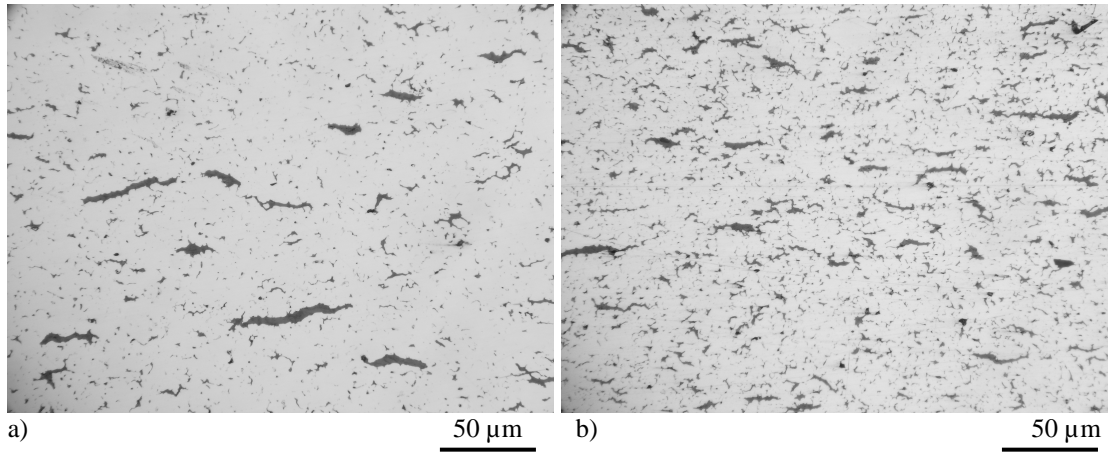
Takviye malzemelerinin konsantrasyonu, şekli, dağılımı ve boyutu, disk-balata çiftinin tribolojik ve termal özelliklerini önemli derecede etkilemektedir [13, 19]. Şekil 7.1. ve 7.2.'de toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Cu-Grafit esaslı kompozit balataların mikroyapıları verilmektedir. Ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 grafit ilave edilen Cu matrisli kompozit balataların mikroyapıları incelendiğinde, takviye edilen partiküllerin homojen bir dağılım gerçekleştirdiği ve görünür herhangi bir porozitenin bulunmadığı anlaşılmaktadır. Artan grafit miktarına paralel olarak takviyelerin mikroyapıdaki yoğunluğu görünür bir şekilde artmakta ve grafit partiküllerinin basma yönüne dik doğrultuda yönelme gösterdikleri görülmektedir.



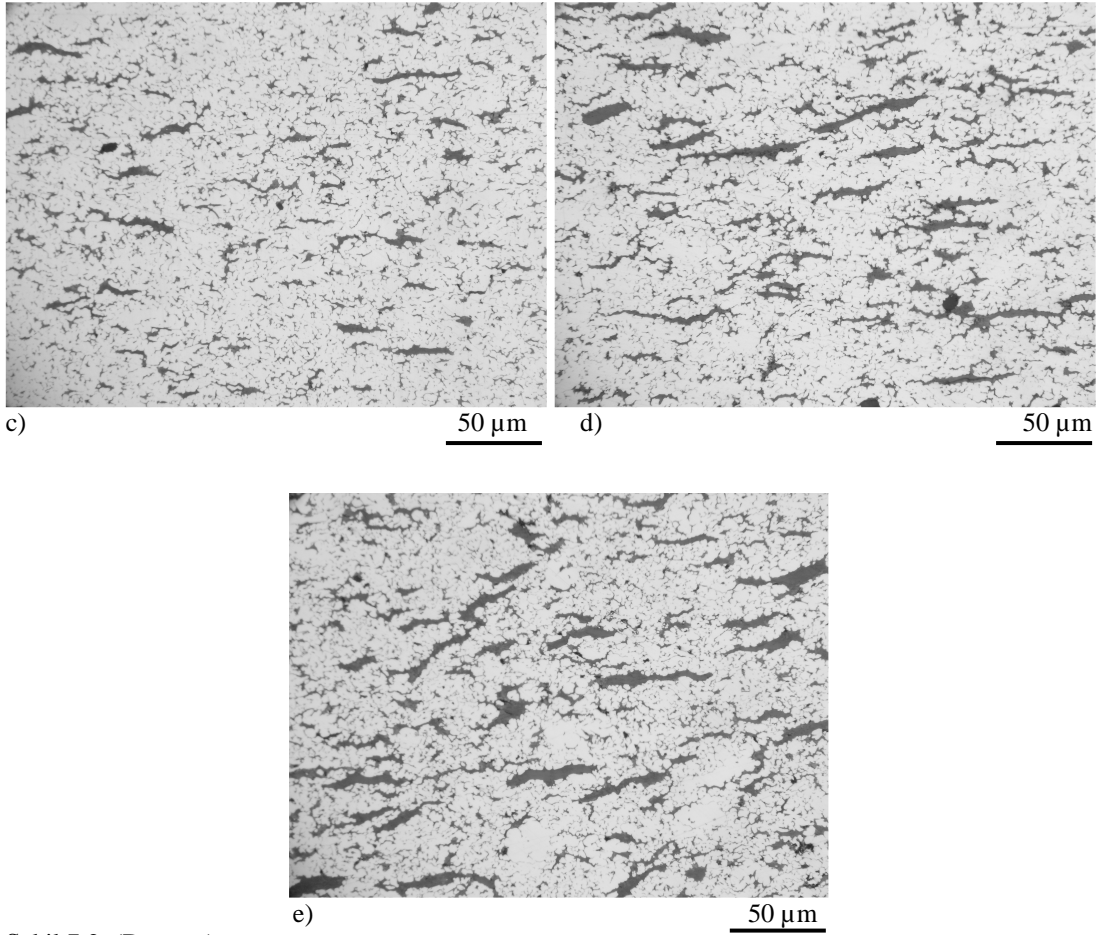
Şekil 7.1. a) %1 b) %2 c) %3 d) %4 e) %5 Grafit takviyeli Cu kompozit balataların grafit dağılımını gösteren mikroyapıları



Şekil 7.1. (Devamı)



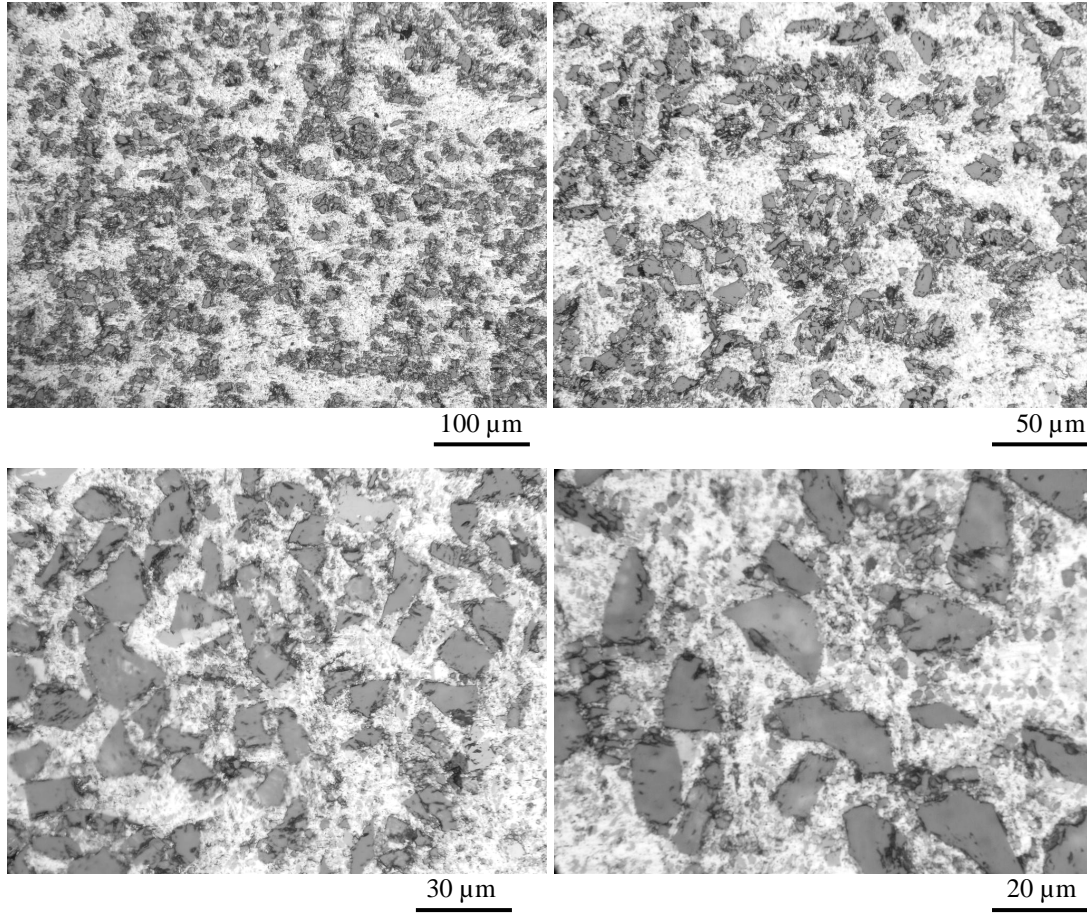
Şekil 7.2. a) %1 b) %2 c) %3 d) %4 e) %5 Grafit takiyeli Cu kompozit balataların, yüksek büyütmedeki mikroyapıları



Şekil 7.2. (Devamı)

Şekil 7.3.'de Vorteks metoduyla hacimce %20 SiC partikül takviye edilmiş ve sıkıştırma döküm tekniği ile üretilmiş Al matriksli kompozit fren diskinin farklı büyütmelerdeki mikroyapıları görülmektedir. Vorteks yöntemi ile yapılan karıştırma işleminin amacı, seramik partiküllerinin matriks metali içinde dispersiyonunu ve homojen dağılımlarını sağlamaktır. Disk mikroyapıları incelendiğinde SiC partiküllerinin matrikste homojen bir dağılım gösterdikleri, katılaşmanın basınç altında yapılmasından dolayı makro poroziteden serbest olduğu açıkça görülmektedir.

Optik mikroyapılar kompozit üretiminin başarı ile gerçekleştirildiğine işaret etmektedir.



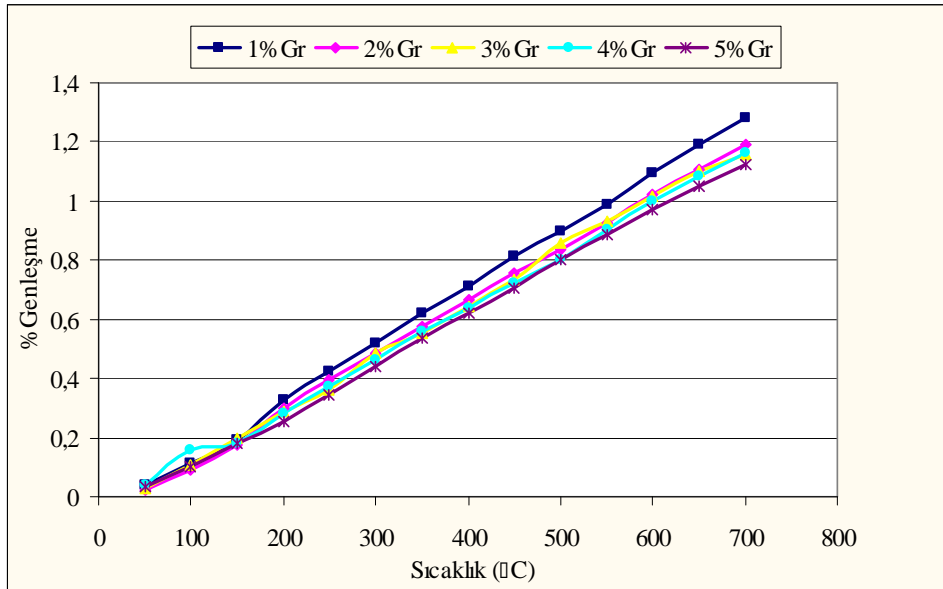
Şekil 7.3. Al-%20 SiC partikül takviyeli MMK fren disk malzemesinin farklı büyütme mikroyapıları

7.2. Termal Genleşme Deney Sonuçları

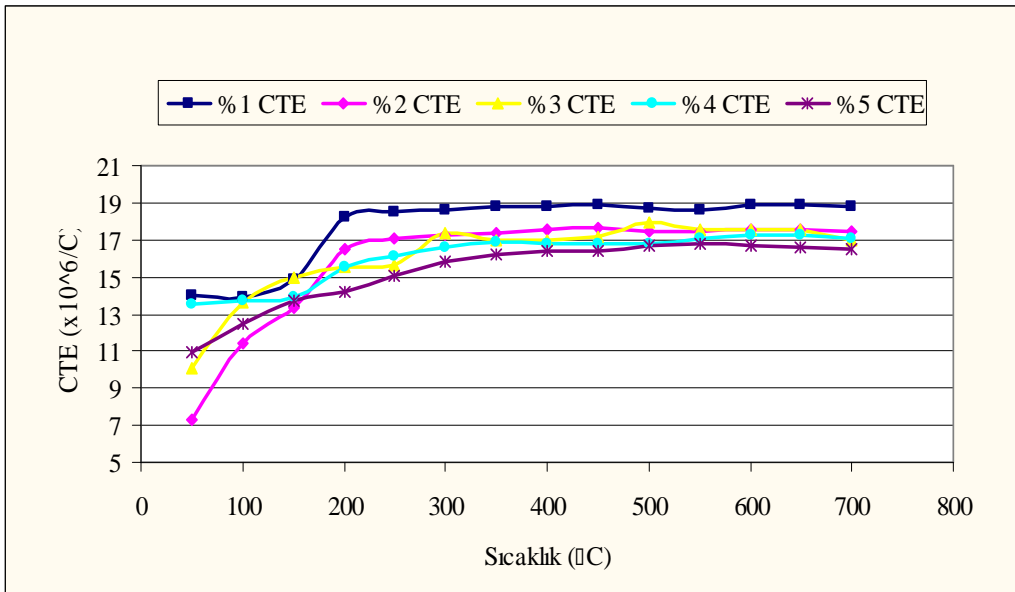
MMK fren disklerinin termal iletkenlik ve genleşme özelliklerinin takviye hacim oranı ve dağılımı ile değiştirilebildiği bilinmektedir [15]. Balata malzemelerinin oda sıcaklığından 700 °C'ye kadar 5 °C/dk hızla ve argon atmosferinde yapılan termal genleşme deneylerinden elde edilen % genleşme ve termal genleşme katsayı grafikleri Şekil 7.4. ve 7.5.'te verilmektedir. Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında, artan grafit oranı ile % genleşme değerlerinde düşük de olsa bir azalma gözlenmektedir. Örneğin %2 grafitli balatada 700 °C'de genleşme %1,189 iken, %5 grafitli balatada genleşme değeri %1,124 civarı bulunmuştur.

Cu matriksi içine ilave edilen %1-5 ağırlık oranlarındaki grafitin amacı, sürtünme katsayısını düzenlemek ve diski korumak için katı yağlayıcılık özelliğinin sağlanmasıdır. Bu nedenle %1-5 gibi düşük oranlarda kullanılan grafitin termal

genleşmeyi çok yüksek oranlarda etkilemesi beklenmemektedir. Buna rağmen Şekil 7.4. incelendiğinde, % genleşme ve CTE değerlerinin, artan grafit oranı ile düştüğü gözlenmektedir. Bu düşüşün çalışma performansı açısından avantaj doğuracağı kuşkusuzdur. Grafit miktarı – Sıcaklık – CTE değerleri ilişkisi Şekil 7.5.'e bakılarak incelendiğinde özellikle 200 °C'ye kadar artan sıcaklık ile tüm balatalarda CTE değerlerinin hızla arttığı, 200 °C'den sonra sıcaklıkla CTE artış hızında düşüşler meydana geldiği anlaşılmaktadır. Grafit partikülleri tabakalı yapılarından dolayı porozite gibi davranarak genleşmeyi azaltmaktadır. Mühendislik malzemelerinde porozitenin termal genleşmeyi düşürdüğü bilinmektedir.

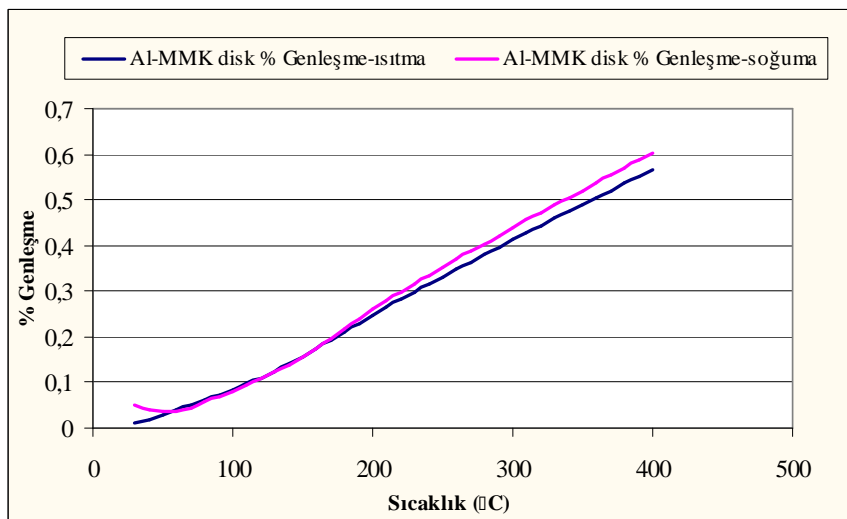


Şekil 7.4. Cu-MMK balata malzemelerinin sıcaklık-%genleşme grafikleri

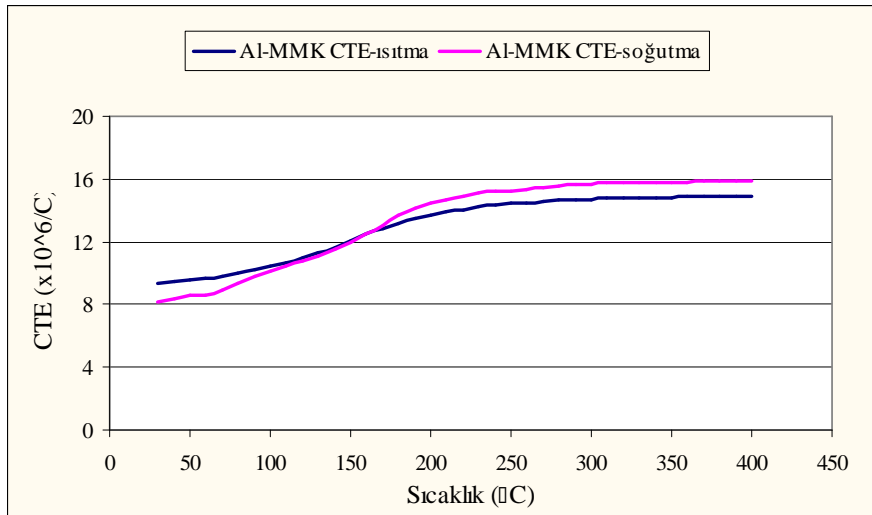


Şekil 7.5. Cu-MMK balata malzemelerinin sıcaklık-termal genişleme katsayısı grafikleri

Şekil 7.6.'da Al-Si-SiCp kompozitinin oda sıcaklığı–400 °C aralığında yapılan termal genişleme sonuçları sunulmaktadır. Şekil 7.7.'de ise ısıtma soğutma rejiminde Al-Si-SiCp kompozitinin CTE değişimi gösterilmektedir. Al-Si alaşımının CTE değeri $23,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ civarındadır. SiCp ise çok daha düşük (yaklaşık $4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) CTE değerine sahiptir. Al-Si alaşıma ilave edilen %20 SiC, kompozitin CTE değerini oda sıcaklığı için yaklaşık $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ değerine doğru değiştirmesi beklenmektedir. Yapılan ölçümlerde Al-Si alaşımının CTE değerinin beklendiği mertebede değişim göstermekte olduğu görülmektedir.



Şekil 7.6. Al-MMK fren disk malzemesinin sıcaklık-%genleşme katsayısı grafiği

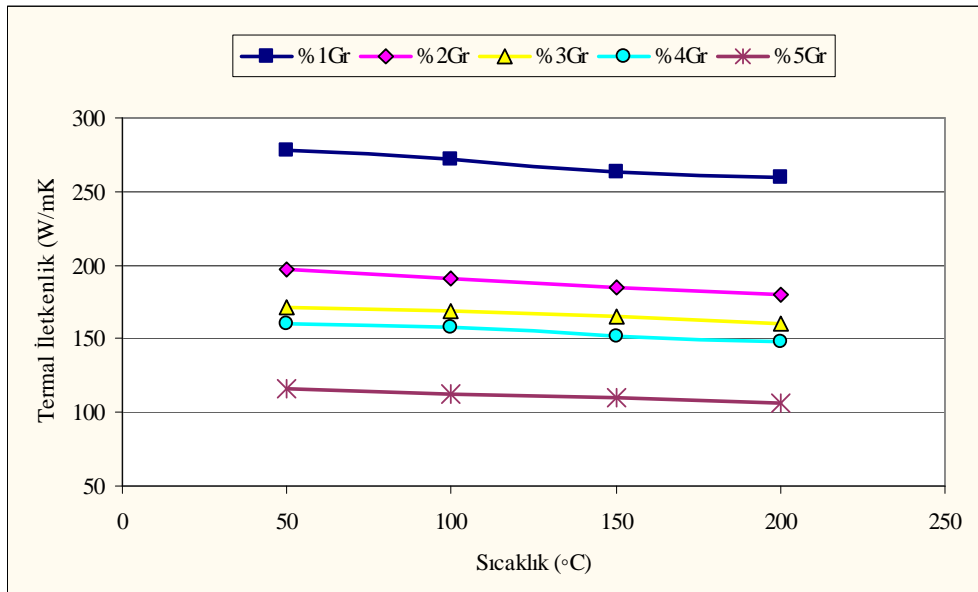


Şekil 7.7. Al-MMK fren disk malzemesinin sıcaklık-termal genişleme katsayısı grafiği

7.3. Termal İletkenlik Deney Sonuçları

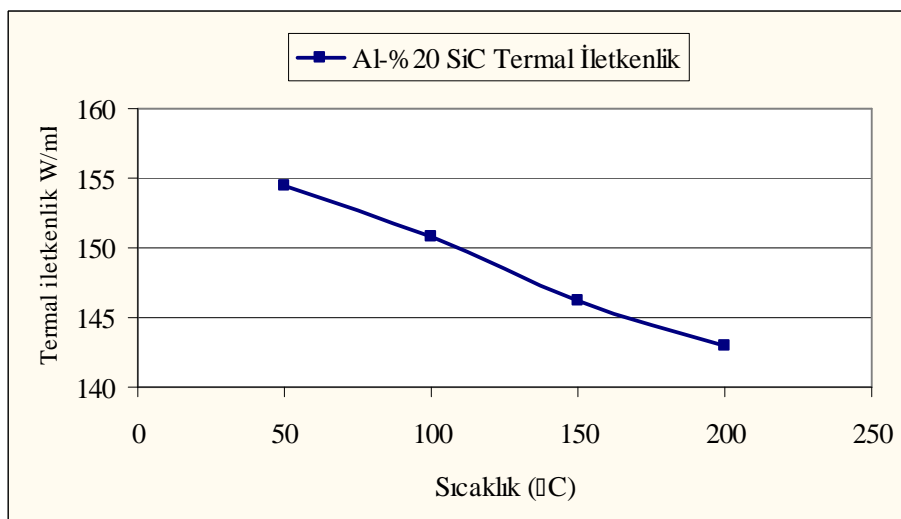
Şekil 7.8.'de verilen kompozit balataların termal iletkenlik değer grafikleri incelendiğinde, artan sıcaklığa göre ölçülen değerlerde çok düşük bir azalmanın gerçekleştiği buna karşın artan grafit takviye yüzdesi ile termal iletkenlik değerlerinde muazzam düşüşlerin olduğu görülmektedir. Örneğin %1 grafit takviyeli balatanın 100 °C'deki iletkenlik değeri 271,31 W/m.K iken %5 grafitli balatanın değeri 112,875 W/m.K değerine düşmüştür.

Frenleme sırasında sürtünme nedeniyle fren balataları aşırı ısınmaktadır. Aşırı sıcaklık nedeniyle balataların frenleme performansı değişebilmekte veya balatalar mekanik deformasyona uğramaktadır. Literatürde [4], ticari olarak kullanılan sinterlenmiş demir esaslı balata malzemelerinin termal iletkenlik değerlerinin yaklaşık olarak 1,2-35 W/m.K, sinterlenmiş bronz esaslı balataların ise 6-35 W/m.K civarında olduğu belirtilmektedir. Bu durumda değerler karşılaştırıldığında; ürettiğimiz balata malzemelerinin içinde en düşük termal iletkenlik değerine sahip olanının bile, ticari olarak kullanılan balata malzemesinin çok üstünde bir iletkenlik değerine sahip olduğu açıkça görülmektedir ki bu da sürtünme ile balata malzemelerinin aşırı ısınma ve performans kaybı problemlerine çözüm olabilecek, alternatif bir malzemenin olabilirliğini kanıtlamaktadır.



Şekil 7.8. Cu-MMK Balata malzemelerinin sıcaklık-termal iletkenlik grafiği

Al-Si-SiCp kompozit fren diskinin termal iletkenlik değerleri Şekil 7.9’da verilmektedir. Grafik incelendiğinde sıcaklığın artmasına bağlı olarak iletkenliğin azaldığı görülmektedir. Literatürde [43], geleneksel fren disk malzemesi olarak kullanılan dökme demirin termal iletkenlik değerinin 100 °C’de yaklaşık 46 W/m.K olduğu belirtilmektedir. Dökme demire alternatif malzeme olması amacıyla üretilen Al-Si-%20 SiCp kompozitinin 100 °C’deki termal iletkenlik değerinin 150,854 W/m.K olarak bulunması, geleneksel fren disk malzemesinden çok daha yüksek termal iletkenlik değerine ulaşıldığını açıkça göstermektedir.



Şekil 7.9. Al-MMK fren disk malzemesinin sıcaklık-termal iletkenlik grafiği

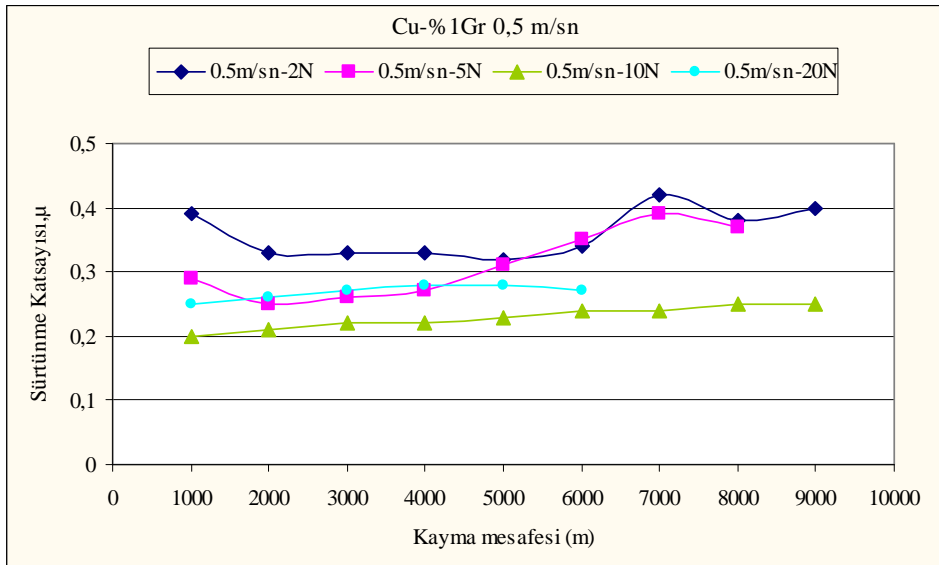
7.4. Aşınma Deney Sonuçları

Hacimce %20 SiC partikül takviyeli Al-Si matriksli kompozit malzeme ile ağırlıkça %1'den %5'e kadar grafit partikül takviyeli Cu matriksli kompozit malzemeler, disk-balata sürtünme çifti oluşturacak şekilde karşılıklı olarak, farklı yük, hız ve mesafe parametrelerinde aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Her bir balata malzemesi için sürtünme katsayısının kayma mesafesine, yüke ve hıza göre değişimi, deney sonrası aşınma yüzeylerinin optik mikroskop, SEM ve EDS incelemeleri ile sürtünme katsayısı grafikleri alt başlıklar şeklinde incelenmiş ve sonuçlar sunulmuştur.

%20 SiCp takviyeli Al-Si kompozit disk ve Cu-grafit kompozit balataların aşınma deneyleri sonrasında, değerlendirilebilir aşınma kayıpları kaydedilemediğinden bu çalışmada aşınma miktarı ile ilgili sonuçlar verilmemiştir. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma miktarı ağırlık kaybı cinsinden ölçülmüş, kimi malzemelerde herhangi bir aşınma kaybına rastlanmamış, kimisinde ise ölçülen değerler miligram mertebesine bile erişmemiştir. Disk ve balata arasında küçük miktarlarda da olsa malzeme transferi aşınmanın ölçülememesine yol açmıştır. Bu tür malzemelerde disk ve balata arasında transfer olan malzemenin aşınma miktarlarının ölçümünü engellediği birçok kaynakta da ifade edilmektedir [12].

7.4.1. Cu-%1 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları

Her bir balata malzemesi için farklı mesafelerde ve farklı yükler altında elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları, 0,5 m/sn ve 0,8 m/sn kayma hızlarına göre düzenlenmiştir. 0.5 m/sn kayma hızına göre sürtünme katsayısı sonuçları, Şekil 7.10.'da sunulmuştur.



Şekil 7.10. Cu-%1 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

Şekil 7.10.'da Cu-%1 Gr numunesinin 0,5 m/sn sabit hız değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kayma mesafesine göre verilmektedir. Grafik incelendiğinde, 2N yük ile yapılan deneylerde elde edilen katsayı değerlerinin, diğer yüklere nazaran daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte 5N ve 10N'luk yükler ile elde edilen grafiklerden, artan yük ile sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Uyyuru ve arkadaşlarının [15] yaptıkları çalışmada, normal yükün artmasıyla sürtünme katsayısında düşüş gözlemlediklerini, yükün artmasıyla kayma arayüzeyinde tribooksit tabaka oluşumunun desteklendiğini ve bu tabakanın yağlayıcı olarak davranarak, sürtünme katsayısı ile aşınma hızında düşüşe sebep olduğunu vurgulamışlardır.

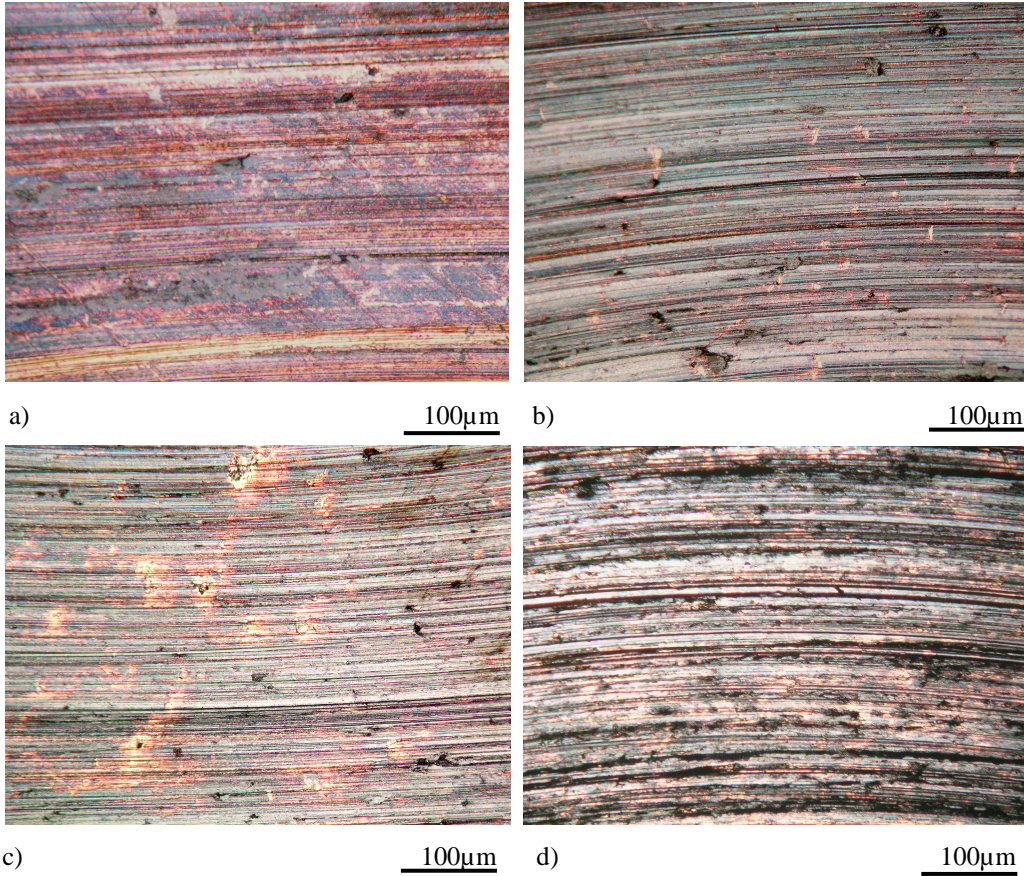
Benzer şekilde, 10N yükte elde edilen değerlerin, 2N ve 5N'da kaydedilenlerden daha düşük olması, yükün artmasıyla yüzeyde bir tribooksit filmi oluştuğu fikrini desteklemektedir.

Yine aynı çalışmada [15], bu tribooksit tabakasının, disk-balata-hava etkileşimleri ile ve sürtünme sonucu ortaya çıkan sıcaklığın aktivasyonu ile kayma yüzeyinde meydana gelmesinin desteklendiği belirtilmektedir. Oluşan bu oksit tabakasının, matriksten daha sert olduğu ve yüzeyler üzerinde koruyucu bir tabaka gibi

davranarak sürtünme katsayısı ve aşınma değerlerini düşürdüğü bildirilmektedir. Deneyde kullanılan yükün 5N'a artırılmasıyla grafikte görüldüğü gibi μ değerinde bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu da 2N'da muhtemelen etkin bir şekilde oluşamayan oksit tabakasının, 5N yük ile etkinliğinin artması sonucu sürtünme değerlerini düşürdüğü anlamına gelebilir.

Şekil 7.10. incelenmeye devam edilirse, artan yük ile μ değerlerindeki düşüşün 20N'luk yük uygulandığında tam tersi hareket ettiği görülecektir. Uyyuru [15], yaptığı çalışmada oluşan tribo tabakanın yağlayıcı gibi davranmasına karşılık kritik bir kalınlık ya da kritik bir yükten sonra sürtünme kuvvetleri ile kalkan bu tabakanın aşındırıcı partikül kaynağı gibi davranabileceğini belirtmiştir. Yapılan deneylerde, yükün 20N'a artırılması sonucu yüzeydeki tribooksit tabakasının muhtemelen bozulduğu düşünülmektedir. Artan yük ile karşı yüzeye daha fazla temas eden aşındırıcı partiküller sonucunda sürtünme katsayısı ve aşınma oranları artmaktadır. Literatürde [12], kompozit malzeme içerisindeki sert partiküllerin kayma boyunca, sert tepeciklerin birbiri ile etkileşiminden dolayı daha geniş plastik deformasyona ve takviye-matriks arasındaki adhezyonu azaltmalarına rağmen daha yüksek sürtünme katsayılarına sebep oldukları belirtilmektedir.

20N'a kadar, artan yük ile μ değerlerindeki düşüşün sebebinin tribooksit tabakası oluşumu olarak yorumlanmasına ilave olarak %1 grafit takviyeli malzemelerde, grafit miktarının yüzeyde tam anlamıyla koruyucu bir katı yağlayıcı tabakası oluşumu için yeterli olmamasına rağmen Şekil 7.11.'de gösterilen deney sonrası çekilmiş optik görüntülerde grafitin, balata yüzeyine sıvanmış olduğu görülmektedir. Şekil 7.11d.'ye bakıldığında yükün 20N'a çıkarılması ile yiv derinliklerinde ve genişliklerinde artış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7.11. Cu-%1 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları

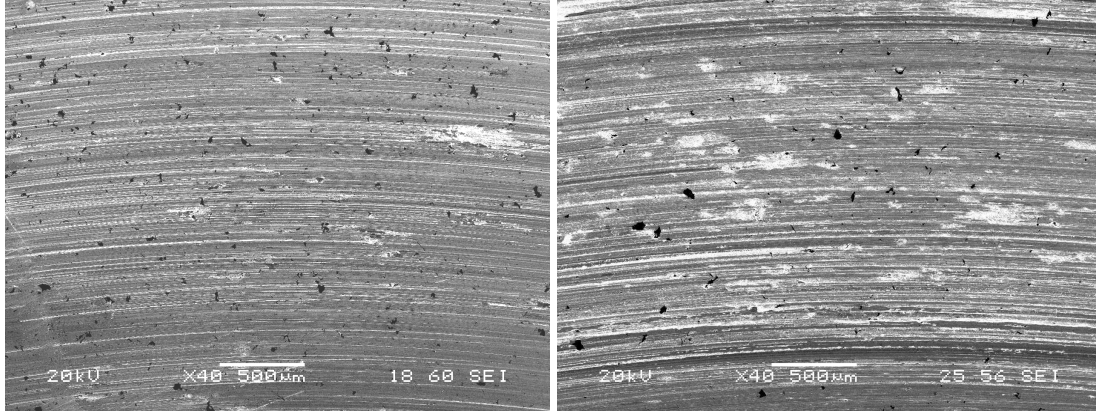
Şekil 7.10.'daki grafiklere tekrar bakılırsa, dikkat çeken bir diğer nokta ise 2N ve 5N ile yapılan deneylerde, 7000 m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı değerinin artışıdır. Kayma mesafesinin artması ile, malzemenin aşınmasının arttığı bilinmektedir [20]. Bu artışın sebebi, artan kayma mesafesi ile birlikte farklı aşınma mekanizmaları sonucu oluşan aşınma partiküllerinin, balata-disk arayüzeyinde sıkışıp deforme olmasından ileri gelmektedir. Ancak diğer yüklerde benzer artışın olmaması sonucu, ölçülen bu değer, ölçüm hatasından da kaynaklanabileceği ileri sürülebilir.

Şekil 7.12. ve 7.13.'de %1 Gr takviyeli balatanın 2N, 5N, 10N, 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntüler genel olarak incelendiğinde karşılıklı kayma sonucu balata yüzeyinde, karşı yüzeyde bulunan sert SiC partiküller tarafından oluşturulmuş aşınma çizgileri ya da yivleri görülmektedir. Basavarajappa'nın [20] yaptığı çalışmada, uygulanan yük artırılmasıyla, aşınma yüzeylerinin morfolojisinin ince çizgilerden belirgin yivlere

doğru değişmekte olduğu bildirilmektedir. Benzer şekilde, optik mikroskop görüntüleri artan yüke göre incelendiğinde, 2N’da aşınma yivleri belirgin olmamakla birlikte %1 oranında takviye edilmiş grafitin de homojen olarak yüzeye yayılmadığı görülmektedir. Yükün artmasıyla grafitin yüzeye yayılmasının artmasına karşın matriksin deformasyonu ve yivlerin genişliklerinde artış görülmektedir. Bu durum etkin bir yağlayıcılık sağlanması için grafit miktarının yeterli olmadığını göstermektedir.

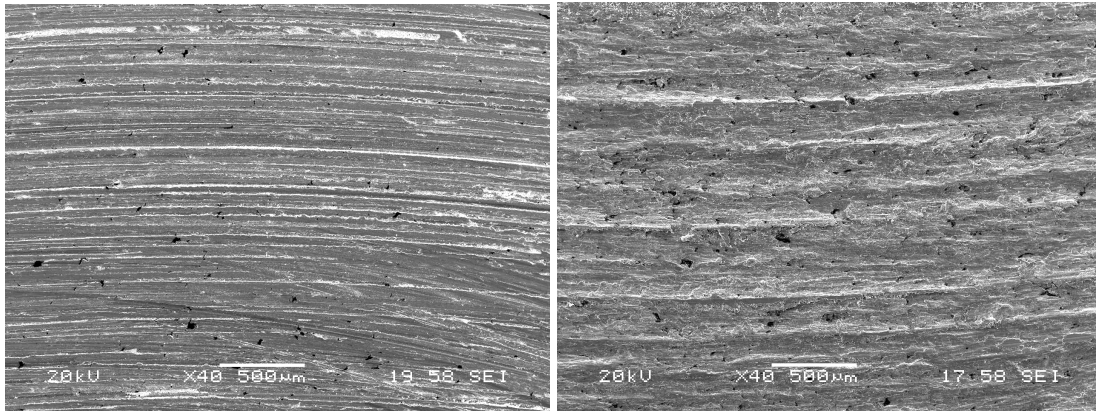
Literatür kısmında da bahsedildiği üzere plastik temastaki iki yüzey arasındaki temas arayüzeyi kaymaya direnç gösterecek kadar adhesiv bağ mukavemetine sahiptir. Temas alanlarında meydana gelen plastik deformasyon, basma ve kayma gerilmeleri ile deformasyon sertleşmesine yol açar. Temas alanındaki böyle deformasyonların sonucu olarak çatlak başlangıcı ve ilerlemesi teşvik edilir. Çatlak temas arayüzeyine ulaştığı zaman aşınma partikülleri meydana gelir ve adhesiv transfer tamamlanır [22].

7.12a. ve 7.13a. birlikte incelendiğinde, malzemenin tamamında olmamakla birlikte, yerel bazı alanlarda yüzey deformasyonu sonucu çatlak oluşumu görülmektedir. Aynı hızda ve 5N yük altında elde edilen görüntülere (şekil 7.12b. ve 7.13b.) bakılınca, deformasyon bölgelerinin kısmen arttığı ve yüzeyde, benzer şekilde yüzey deformasyonu sonucu hasar oranının arttığı gözlenmektedir. Mesafenin artması ile yüzeyde oluşan plastik deformasyon, deformasyon sertleşmesi sonucunda çatlak oluşumunu teşvik etmekte, bu çatlakların birbirleri ile bağlanmaları sonucunda yüzeyden malzeme kaybı gerçekleşmektedir. Çukur şeklinde görünen hasar bölgeleri, malzemenin yüzeyden ayrıldığı yerlerde gözlemlenmiştir.



a)

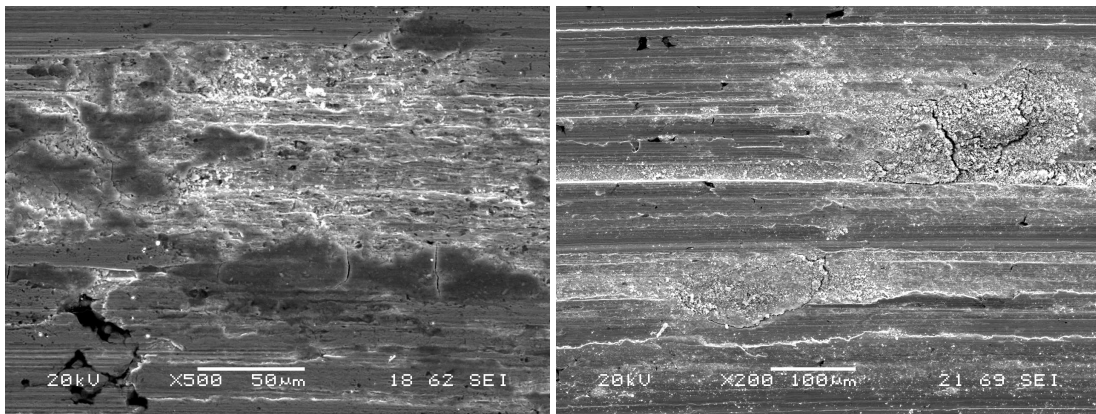
b)



c)

d)

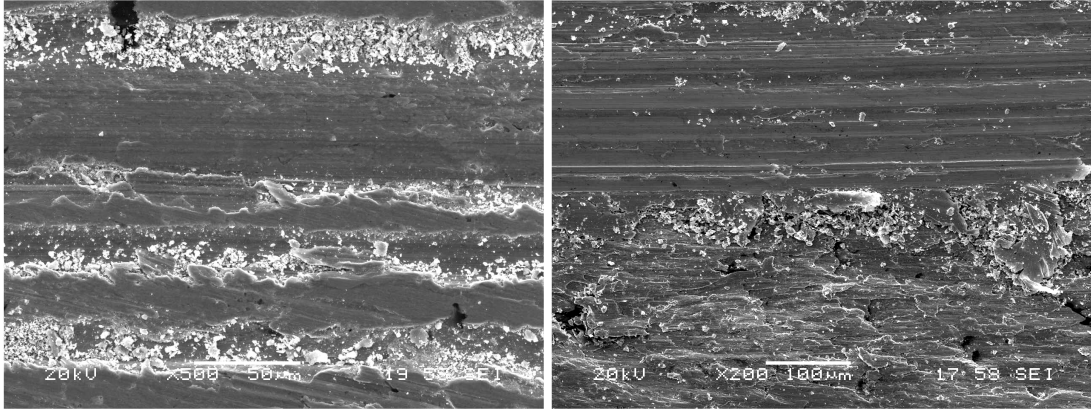
Şekil 7.12. Cu-%1 Gr takviyeli balatın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri



a)

b)

Şekil 7.13. Cu-%1 Gr takviyeli balatın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri



c)

d)

Şekil 7.13. (Devam)

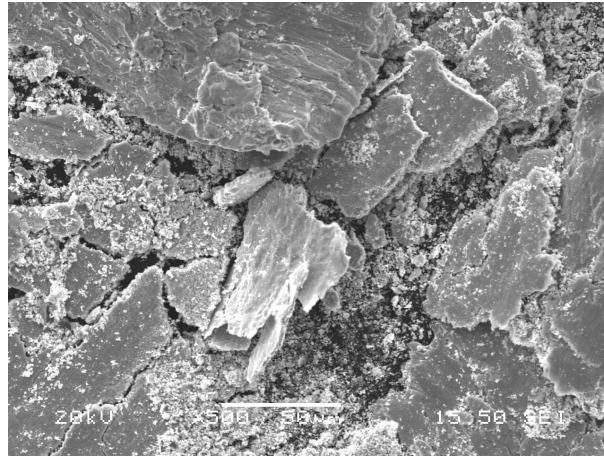
Şekil 7.12c.'ye bakıldığında ise 7.12a. ve 7.12b.'deki yerel deformasyon bölgelerinin yerine, yüzeyde düzgün dağılım gösteren aşınma izlerinin varlığı görülmektedir. Bunun sebebi Şekil 7.10.'daki sürtünme katsayısı grafiklerinin incelenmesinde 10N yükte sürtünme katsayısındaki düşüşünün sebebi olarak değinilen tribooksit tabakasının varlığı olabilir.

2, 5 ve 10N'luk deneylerden elde edilen ve Şekil 7.12a., 7.12b., 7.12c. ve 7.13a., 7.13b., 7.13c.'deki görüntülerde, baskın aşınma mekanizmasının karışık adhesiv ve abrazyon aşınma şeklinde olduğu görülmektedir. Adhezyon ile yüzeyden kopan aşınma ürünlerinin deforme olarak tekrar yüzeye yapışması sonucu adhesiv aşınma meydana gelmiştir. Bununla beraber karşı yüzeydeki aşındırıcı SiC partiküller, aşınma ürünleri ile birlikte balata yüzeyinde kızaklama (Ploughing) tipi abrazyona sebep olmuşlardır.

Zhang ve çalışma arkadaşlarının[10] kompozit malzemelerde yaptıkları aşınma çalışmasında karşı yüzeyin, SiC partiküllerinden daha yumuşak olması sebebiyle aşındırılan malzemenin SiC partikülleri arasına sıvandığı belirtilmektedir. Bu durumda aşınma, bakır matriksin karşı yüzeyle iki-yüzeyle aşınması ve bakır matriksli kompozit ile alüminyum matriksli kompozit yüzeylerinin arasına yerleşen aşınma ürünleri sebebiyle üç-yüzeyle aşınma mekanizmasının kombinasyonu şeklinde meydana gelir. Üç-yüzeyle aşınma, SiC partiküllerinin yerlerinden çıkarak kayma arayüzüne yerleşmeleri sonucu artar.

M. Mosleh ve P.Blau'nun [19] yapmış oldukları çalışmada da, sürtünmeye bağlı olarak aşınma partikülünün kayma arayüzüne sıkıştığı ve büyüyerek daha büyük partiküllere dönüştüğü belirtilmektedir. Bu daha büyük aglomere olmuş partiküllerin, üç-yüzeyle abrazyona, kızaklamaya ve sürtünme katsayısının artmasına sebep olduğunu vurgulamışlardır. Yine aynı çalışmada, daha çok metallerde görülen, sürtünme katsayısının başlangıçtaki düşük değerlerden daha yüksek değerlere artmasının sebebi olarak bu aşınma partiküllerinin sebep olduğu kızaklama etkisi gösterilmektedir.

Zhang ve çalışma arkadaşlarının [10] yaptığı aynı çalışmada, MMK malzemelerdeki baskın aşınma mekanizmasının metalik matriksin delaminasyonu olduğu belirtilmiştir. Çalışmaya göre yüzeyde oluşan plastik deformasyonlar çatlakların oluşumuna sebep olmakta, bu çatlakların büyümesi ve birbirleriyle bağlanmaları sonucunda malzeme ince plakalar ya da delaminasyon tabakaları halinde yüzeyden kalkmakta ve uzaklaşmaktadır.

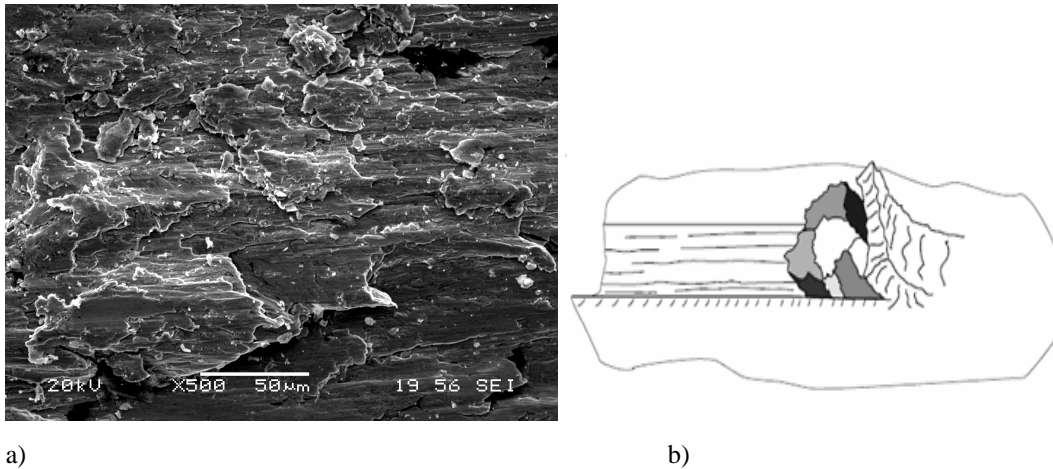


Şekil 7.14. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüsü

Cu-%1 grafitli balata malzemesinin 0,5 m/sn hızda ve 2N, 5N, 10N yükte yapılan deneylerinin SEM görüntülerine bakıldığında, delaminasyon veya herhangi bir mekanizma sonucu yüzeyden levhasal ya da farklı bir formda aşınma ürün çıkışı gözlenmemekle birlikte 20N'luk deneylerden elde edilen balata yüzeyinin (Şekil 7.12d. ve 7.13d.) ve aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri (Şekil 7.14.) bu yük ile yapılan deneylerde malzemenin ağır deformasyona uğradığını ve baskın aşınma

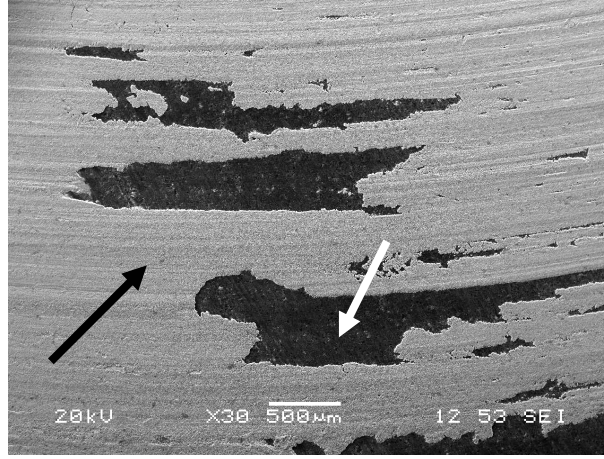
mekanizmasının kesme (cutting) abrazyon aşınması ile delaminasyon olduğunu göstermektedir. SEM görüntüsünde aşınma ürünleri, büyük levhasal form ile çok küçük partiküller şeklinde görülmektedir.

Şekil 7.12d. incelendiğinde, diğer yükler ile yapılan deneyler sonrası alınan görüntülerden farklı bir aşınma yüzey görüntüsü göze çarpmaktadır. Yükün 20N'a çıkarılmasıyla birlikte balatanın aşınması şiddetli bir şekilde değişmiştir. Şekil 7.15a.'da ağır deformasyona ve abrazyona uğrayan balata malzemesinin SEM görüntüsü verilmiştir. Karşı yüzeydeki SiC partiküller Şekil 7.15b.'de görülen aşınma modeline benzer bir şekilde balatanın hasara uğramasına sebep olmuştur. Deney sırasında aşınma partikül çıkışı gözlenmiş, bir kısım aşınma ürünü tribosistemin dışına atılırken, önemli kısmı kayma arayüzeyinde kalmıştır. Arayüzeyde kalan bu partiküller yükün de etkisiyle disk yüzeyine bir tabaka halinde sıvanmıştır. Şekil 7.16.'da 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyi görülmektedir.

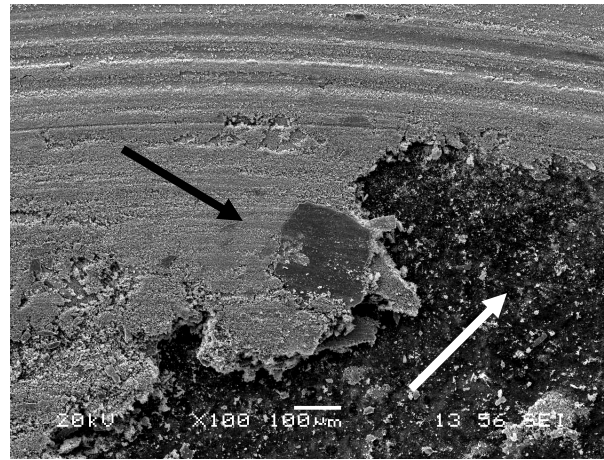


Şekil 7.15. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) Yüzeyin SEM görüntüsü b) Abrazyon aşınma mekanizmasının şematik gösterimi [24]

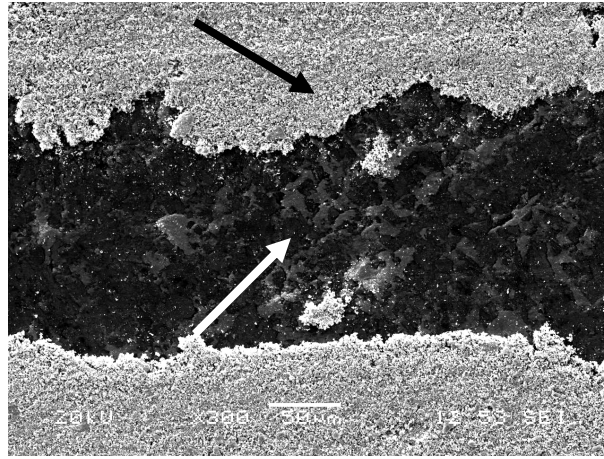
Şekil 7.16a. ve 7.16b.'de beyaz ok ile gösterilen koyu renkli kısımlar Al-MMK disk yüzeyi, siyah ok ile gösterilen kısımlar ise balata yüzeyinden kopup arayüzeyde sıkışan ve sonra disk yüzeyine sıvanan Cu-Gr kompozitinin aşınma ürünleridir.



a)

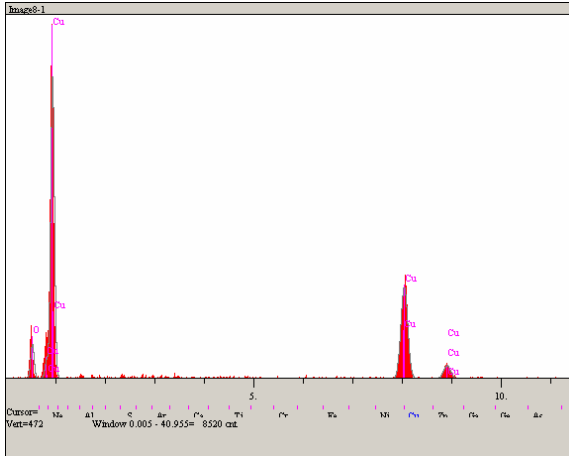


b)



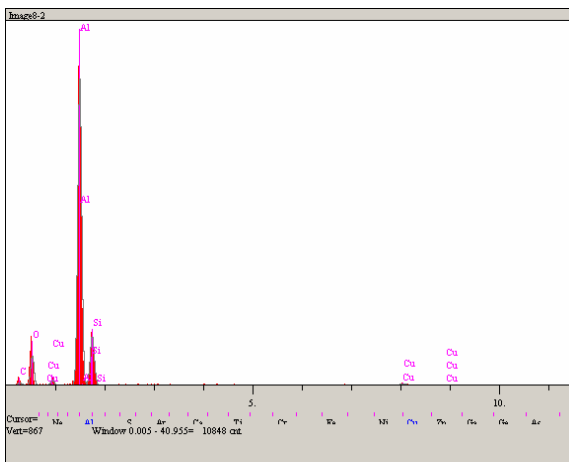
c)

Şekil 7.16. Cu-%1 Gr balata malzemesi ile 20N yük 0,5 m/sn hız parametrelerinde yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin a), b), c) SEM görüntüsü d) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi e) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	37.83	46.927	18.208	wt.%
Cu	204.94	53.073	81.792	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

d)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	6.27	31.281	19.960	wt.%
O	60.98	34.038	28.932	wt.%
Al	726.92	27.409	39.290	wt.%
Si	122.20	6.758	10.083	wt.%
Cu	6.84	0.514	1.735	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

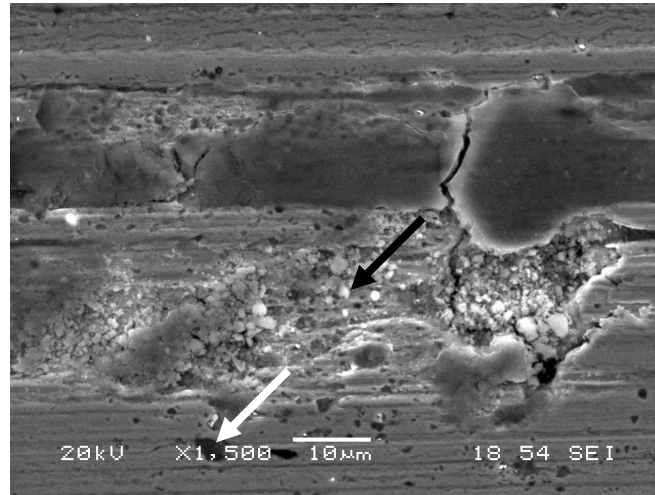
e)

Şekil 7.16. (Devamı)

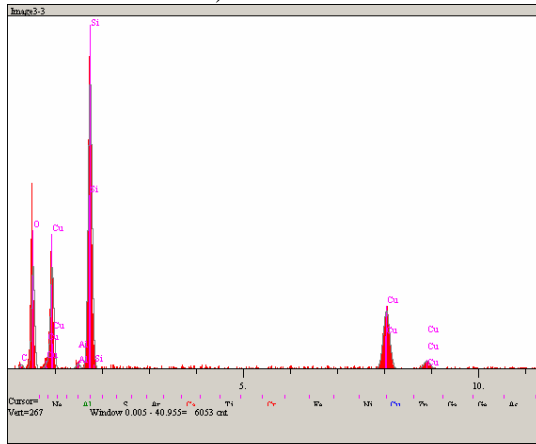
Şekil 7.10.'daki grafiklere tekrar bir göz atıldığında, 20N dışındaki grafiklerin her birinde kayma mesafesinin artmasıyla sürtünme katsayısında artış gözlenmektedir. Basavarajappa'nın [20] ve Nakanishi'nin [14] yaptıkları çalışmalarda belirtildiği gibi, matriksin aşınmasından dolayı SiCp dışarı itilir ve kırılarak karşı yüzeye gömülürler. Disk yüzeyinden kopan SiC partiküllerinin karşı yüzeye gömülmesi ya da arayüzeydeki diğer aşınma partikülleri ile birleşerek üçüncü bir yüzey olarak davranması sonucu sürtünme katsayısında artış görülmektedir. Şekil 7.17.'de yüksek büyütmelelerde çekilen görüntülerden alınan EDS sonuçlarında ok ile gösterilen noktalarda SiC partiküllerinin bulunduğu görülmektedir.

2N'luk deneyde elde edilen görüntü incelendiğinde yüzeyde, önceki paragraflarda anlatıldığı şekilde deformasyon sonucu bir mikroçatlak oluşumu gözlenmiştir. EDS

sonuçlarına bakıldığında ise beyaz ok ile gösterilen kısımda Si, C ve O piklerinin ve tabii ki Cu pikinin bulunduğu, siyah ok ile gösterilen kısımda ise Si, C, O ve Cu piklerinin yanı sıra Al pikinin de bulunduğu görülmektedir. Oksijenin varlığı hasar bölgesinde yüzey oksitlerinin bulunduğu işaretler. Al piki ise alüminyumun, fren disk malzemesinin yüzeyinden aşınma partikülü olarak kopup diğer aşınma ürünleri ile birlikte hasar yüzeyinde toplandığını göstermektedir.



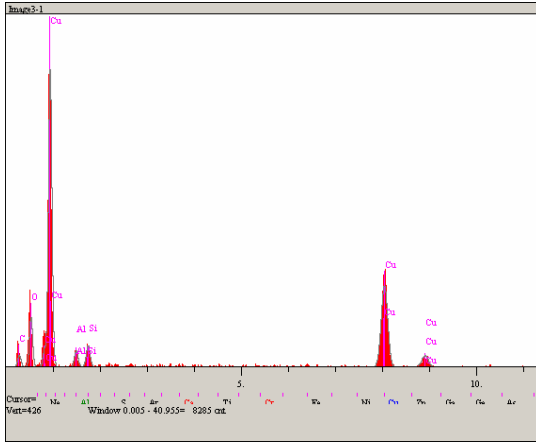
a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	3.18	21.535	11.754	wt.%
O	67.02	50.130	36.449	wt.%
Al	4.32	0.426	0.522	wt.%
Si	228.33	18.195	23.223	wt.%
Cu	75.96	9.714	28.051	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

Şekil 7.17. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi

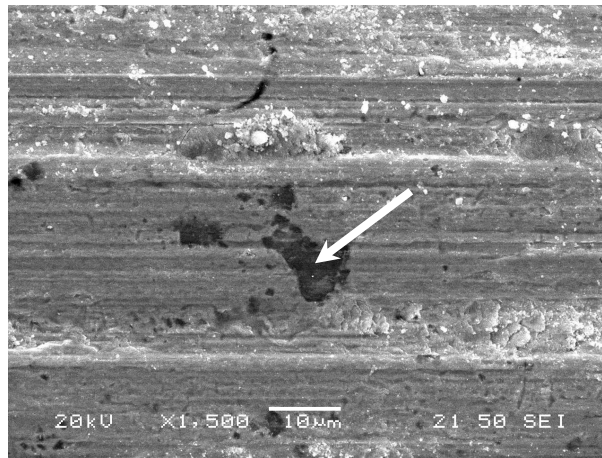


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	13.16	45.784	24.327	wt.%
O	51.61	33.570	23.760	wt.%
Al	19.83	1.854	2.213	wt.%
Si	26.97	1.994	2.478	wt.%
Cu	170.22	16.798	47.222	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)

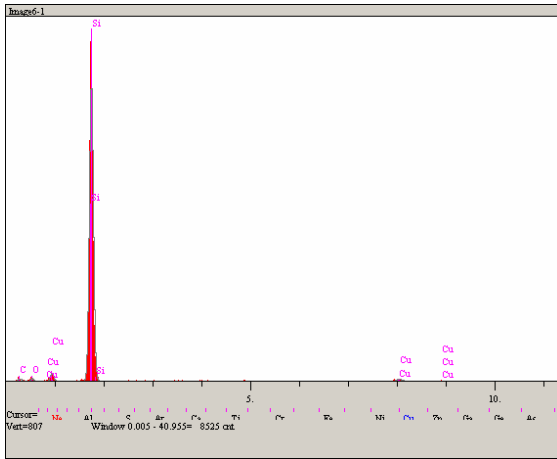
Şekil 7.17. (Devam)

5N ile yapılan deney sonrası incelenen balata yüzeyi Şekil 7.18a.'da ve görüntüde ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ile analizi Şekil 7.18b.'de verilmektedir. Görüntüde ok ile gösterilenin karşı yüzeyden koparak balata yüzeyine gömülmüş SiC partikülü olduğu açıktır.



a)

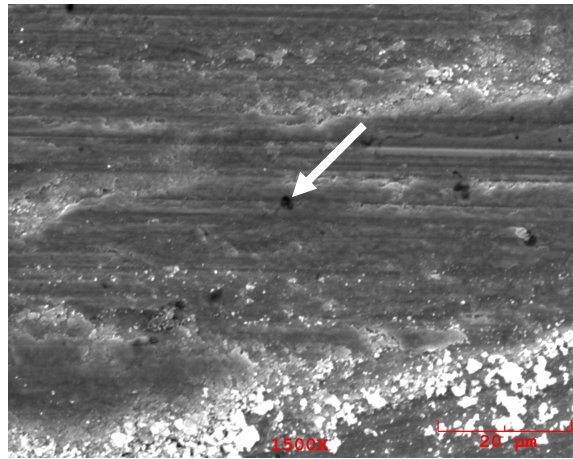
Şekil 7.18. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



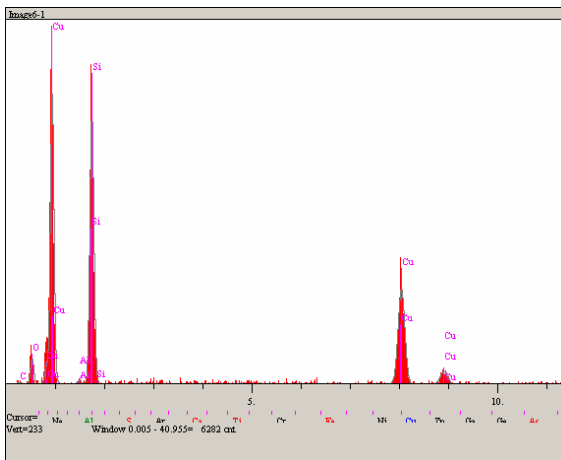
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	5.66	57.143	37.478	wt.%
O	5.76	7.886	6.890	wt.%
Si	686.96	33.938	52.049	wt.%
Cu	8.85	1.033	3.583	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

Şekil 7.18. (Devam)



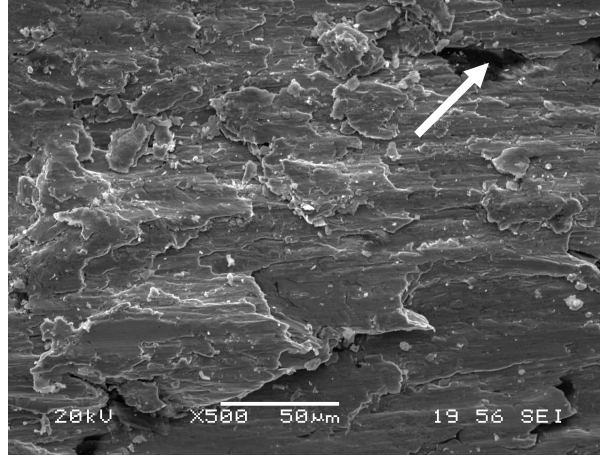
a)



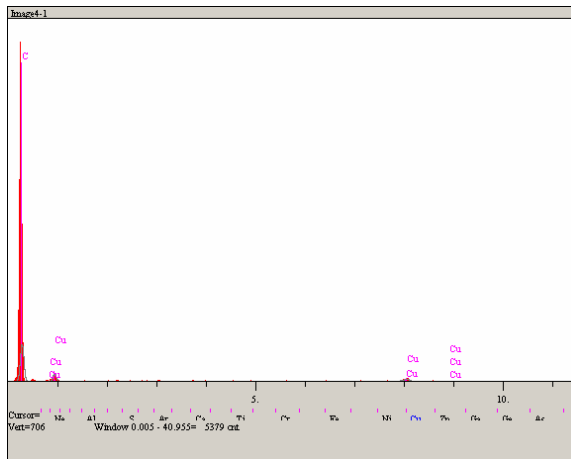
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	1.30	21.607	8.440	wt.%
O	13.83	21.931	11.411	wt.%
Al	2.28	0.499	0.438	wt.%
Si	177.98	31.169	28.470	wt.%
Cu	103.22	24.794	51.241	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

Şekil 7.19. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	66.75	98.673	93.357	wt.%
Cu	8.27	1.327	6.643	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

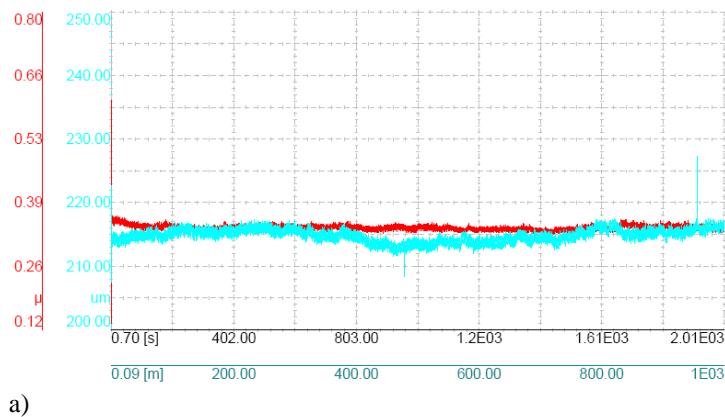
Şekil 7.20. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

10N yük ile yapılan deney sonrasında incelenen aşınma yüzeyi Şekil 7.19a'da, ve görüntüde ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ile analizi Şekil 7.19b'de verilmektedir. İncelenen görüntüden aşınma ile fren diski yüzeyinden kopan SiC partiküllerinin bu deneyde de balata yüzeyine gömüldüğü görülmektedir. 5N'daki görüntüye bakıldığında balata yüzeyine gömülen partikülün yaklaşık 10µm kadar olduğu buna karşılık 10N'daki görüntüde partikül boyutunun çok daha küçük olduğu görülmektedir. Bu da yükün artmasıyla karşı yüzeydeki takviye partiküllerinin deformasyona uğrayarak parçalandığını göstermektedir.

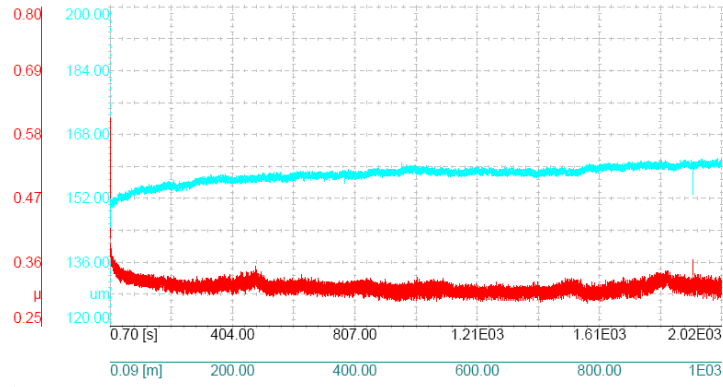
Şekil 7.20'de, daha önce de belirtildiği üzere, yükün 20N'a çıkarılması sonucu diğerlerine nazaran oldukça farklı bir aşınma yüzey görüntüsü elde edilmiştir.

2N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.21a.' da, 5N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.21b'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.21c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.21d.'de verilmektedir. Grafiklerde açıklanması gereken nokta, kırmızı ile gösterilen çizgilerin sürtünme katsayısını, açık mavi ile gösterilen çizgilerin ise aşınma derinliğini ya da yükseklik farkını temsil ettiğidir. Şekil 7.21a., b, c ve d incelenirse, 0,5m/sn hız ile 1000m boyunca tüm yüklerde kaydedilen sürtünme katsayısı değerlerinin kararlı olduğu, deney süresince aşırı bir artma ya da azalma göstermediği görülmektedir. Aşınma derinliği grafikleri ise 2N, 5N ve 10N yüklerde aynen sürtünme katsayısı değerleri gibi kararlı kalmıştır. 20N yükteki deneyde ise derinlik ya da yükseklik eğrisinde yaklaşık 20 μ m'lik bir değişim söz konusudur. Şekil 7.15. ve Şekil 7.17. incelenirken tartışıldığı üzere, 20N ile yapılan deneylerde aşınma mekanizmasının değiştiği, balata malzemesinin aşırı deformasyonu sonucu çıkan aşınma partiküllerinin disk yüzeyine sıvandığı belirtilmiştir. Bu disk yüzeyine sıvanan aşınma partiküllerinin disk kalınlığını arttıracığı malum olup, Şekil 7.21d.'deki yükseklik grafiği de bu durumu özetlemektedir.

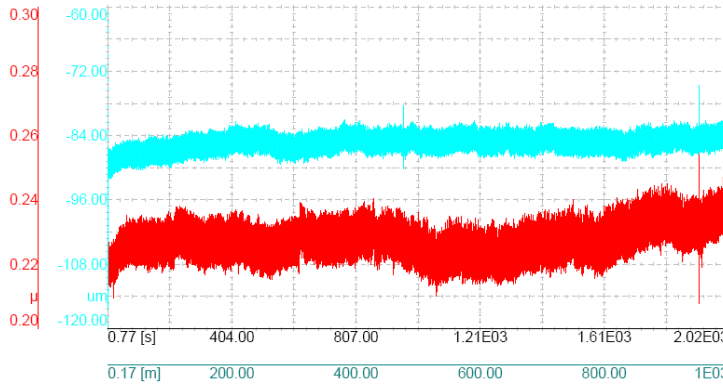
Nakanishi ve arkadaşlarının [14] yaptıkları çalışmada, tekrarlı frenlemelerin sürtünme katsayısının düşmesine ve fren balatasının aşınmasının artmasına sebep olduğunu, fren diskinin kalınlığının, balata yüzeyinden kopup disk yüzeyine sıvanan aşınma ürünleri sebebiyle arttığını belirtmişlerdir.



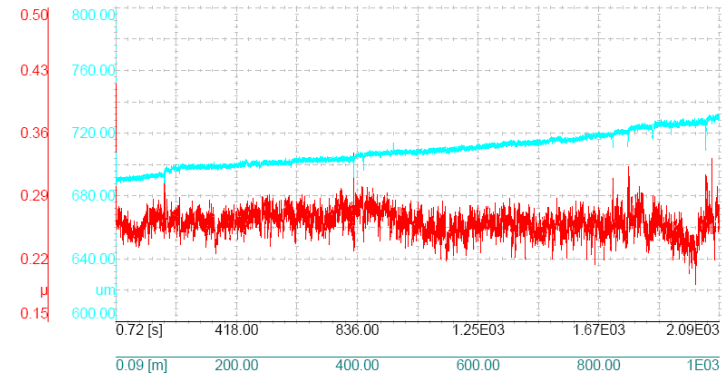
Şekil 7.21. Cu-%1 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c)10N d) 20N yük, 0,5 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri



b)



c)

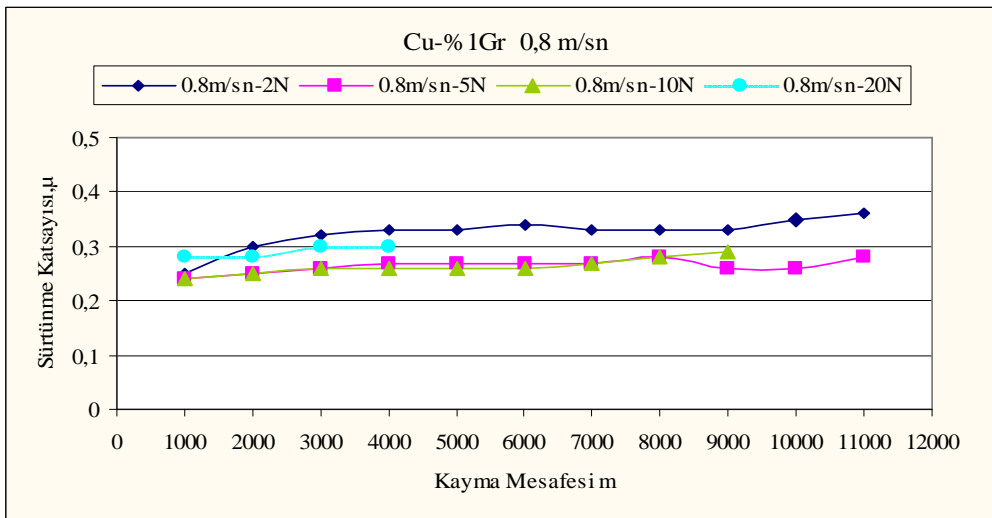


d)

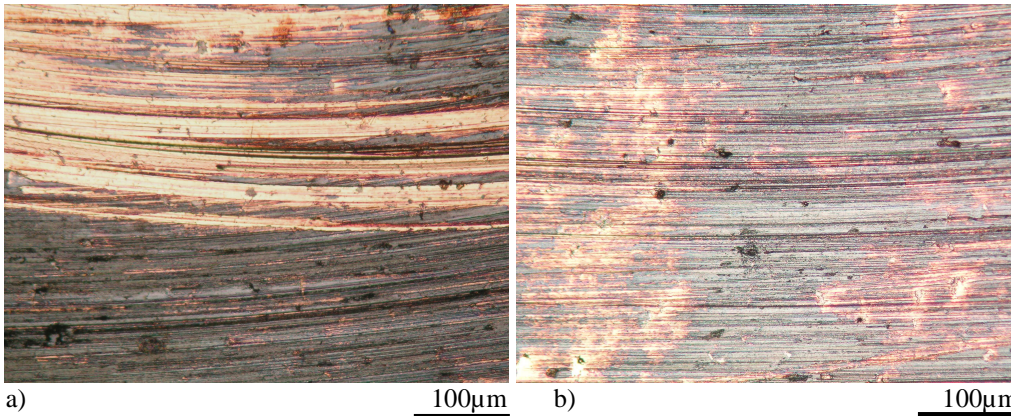
Şekil 7.21. (Devam)

Şekil 7.22.'de Cu-%1 grafitli balata malzemesinin 0,8 m/sn sabit hız değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, kayma mesafesine göre verilmektedir. Grafik incelendiğinde, 2N yük ile yapılan deneylerde elde edilen katsayı değerlerinin diğer yüklerle nazaran daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte 5N ve 10N'luk yükler ile elde edilen grafiklerin de yaklaşık aynı değerlerde oldukları görülmektedir. 2N, 5N ve 10N deneylerinin ilk deney sonuçları grafikten de görüleceği gibi aynı değerdedir.

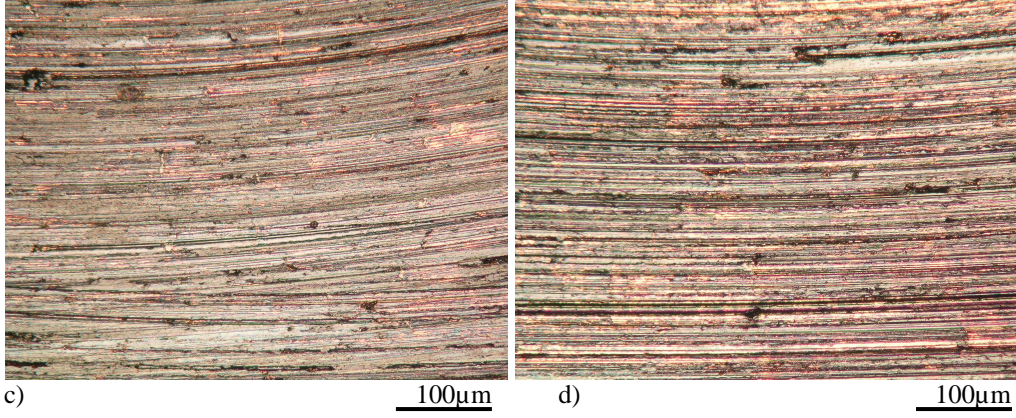
Kayma mesafesinin artmasıyla birlikte 2N ile yapılan deneylerin sürtünme katsayı değerlerinde artış gözlenmekle birlikte, 5N ve 10N deneylerinde önemli bir artma ya da azalma görülmemekte, dolayısıyla artan kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı değerleri kararlı bir davranış sergilemektedir. Yükün 20N'a arttırılmasıyla Şekil 7.10.'da da görülen eğilim bozulmamış, 20N yük ile yapılan deneylerde elde edilen μ değerleri 5 ve 10N'dakilerden yüksek çıkmıştır.



Şekil 7.22. Cu-%1 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

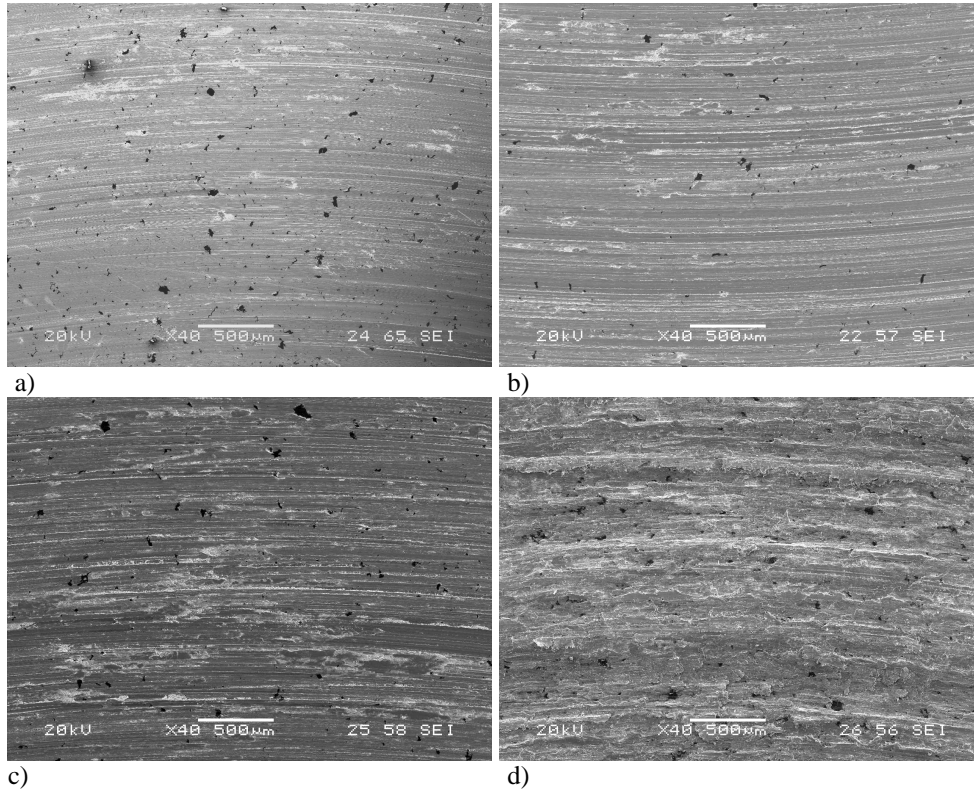


Şekil 7.23. Cu-%1 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları

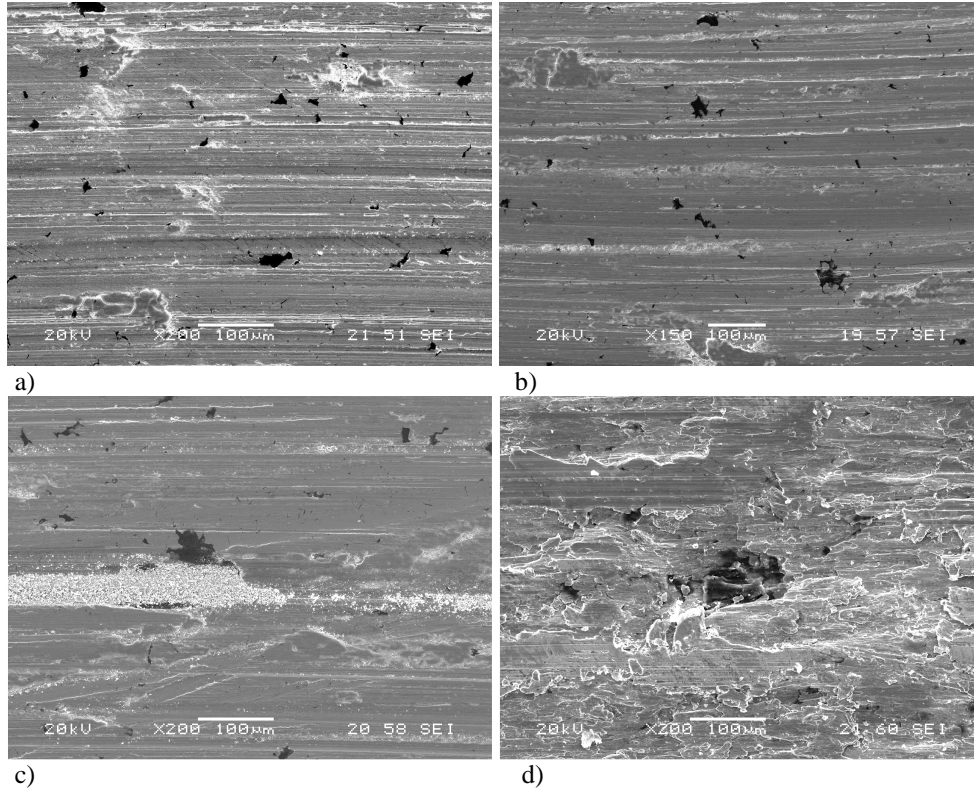


Şekil 7.23. (Devam)

Optik mikroskop fotoğrafları incelendiğinde artan yük ile aşınma yivleri daha belirgin hale gelmektedir. 2N ve 5N’da adhezyonun daha hakim olduğuna, artan yük ile yiv derinliklerinin artması, abrazyif aşınmanın da aktif olmaya başladığına işaretir.



Şekil 7.24. Cu-%1 Gr takviyeli balatının a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri



Şekil 7.25. Cu-%1 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri

Şekil 7.24.'e bakıldığı zaman, Şekil 7.23.'deki optik fotoğraflara benzer görüntülerin elde edildiği görülmektedir. SEM görüntülerinden, 2N'dan 10N'a doğru yükün artmasıyla aşınma izlerinin ve yerel deformasyonların arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 7.22.'ye bakıldığında 5N ve 10N yük ile yapılan deneyler sonucu elde edilen sürtünme katsayı değerlerinin neredeyse aynı olduğu söylenebilir. Ancak sürtünme katsayılarındaki benzer eğilim aşınma yüzeylerinde görülmemektedir. 10N yükte malzeme yüzeyi, 5N'dakine nazaran daha fazla deformasyona uğramış, dolayısı ile yüzeyde meydana gelen aşınma hasarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının azaldığı önceki bölümde belirtilmiştir. Literatürde [15], uygulanan yükün, sürtünme katsayısı üzerinde, aşınma oranına olduğundan daha az etkisinin bulunduğu belirtilmektedir.

Şekil 7.24d. incelendiğinde, Cu-%1 Gr balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında 20N yük ile yapılan deneyler sonrası elde edilen SEM görüntüsüne benzer olarak, 0,8 m/sn kayma hızında yapılan deney sonrasında da, balata yüzeyinin diğer

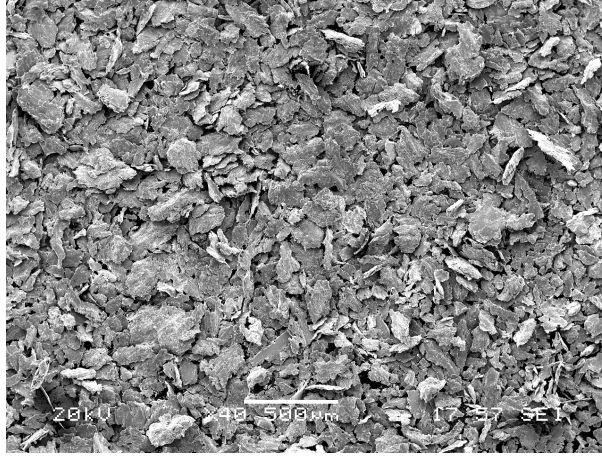
yüklerdekilere nazaran aşırı deformasyona ve abrazyona uğrayarak hasar gördüğü tespit edilmiştir.

Şekil 7.25.'te görülen daha yüksek büyütmelelerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde, 2N, 5N ve 10N yüklerde malzeme yüzeyinde artan yüke göre adhesiv aşınmadan abrazif aşınmaya geçildiği izlenimi edinilmektedir. Düşük yüklerde, yerel bazı adhesiv hasar bölgeleri ile kızaklama türü abrazif aşınmanın sebep olduğu aşınma çizgileri meydana gelmiştir. Yük arttıkça abrazif aşınma ile kayma yüzeylerinden kopan aşınma partiküllerinin balata yüzeyinde toplandığı görülmektedir (Şekil 7.25c.). Karşı yüzeydeki SiC partiküllerin yanı sıra, yüzeyde biriken aşınma ürünleri de üç-yüzeyli aşınmaya sebep olarak balata yüzeyinin hasara uğramasına sebep olmaktadır.

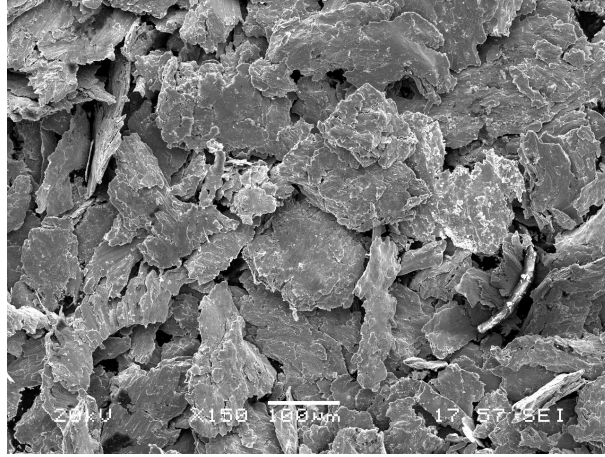
R.K. Uyyuru ve arkadaşlarının [15, 18] yaptıkları çalışmalarda, tribolojik yüzeyde bulunan çukurların, çatlaklar ya da delaminasyon ile kalkmış tabakaların kırılarak küçük parçalar halinde kayma arayüzeyinde yüksek oranda aşınma ürünü ya da üçüncü-yüzey aşındırıcıları olarak davranmaları sonucu meydana geldiği belirtilmektedir.

Şekil 7.25d. incelendiğinde balata yüzeyinin, karşı yüzeydeki sert SiC partiküller tarafından abrazif olarak aşındırıldığı görülmektedir. Yüzeyde bulunan çukurlar kızaklama ve kesme türü abrazif aşınma mekanizmalarının hakim olduğu bu malzemede, uygulanan 20N'luk yük ile yüzeyde geniş yivler ve çukurlar meydana gelmiştir.

Şekil 7.26. ve 7.27'de Cu-%1 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında 20N yük ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri verilmektedir. Tribolojik malzemenin aşınma partiküllerinin incelenmesi, aşınma mekanizması ve yüzeylerarası etkileşimin açıklanmasında önem taşımaktadır [19]. Görüntüler incelendiğinde, Al-Si esaslı kompozit disk yüzeyindeki sert SiC partiküller tarafından abrazif aşındırılan balata yüzeyinden 100µm'dan büyük levhasal formda partiküllerin koparıldığı görülmektedir.



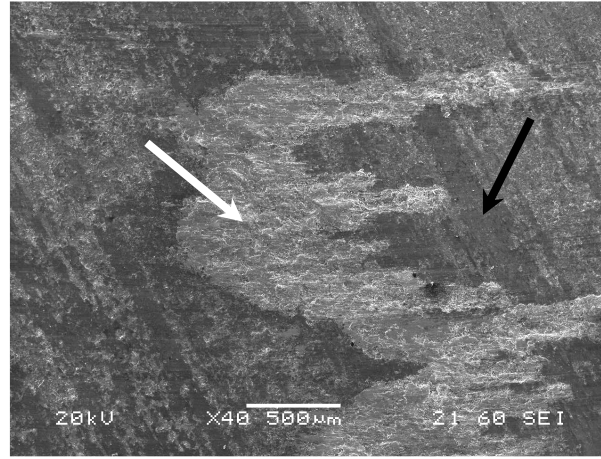
Şekil 7.26. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında 20N yük ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri



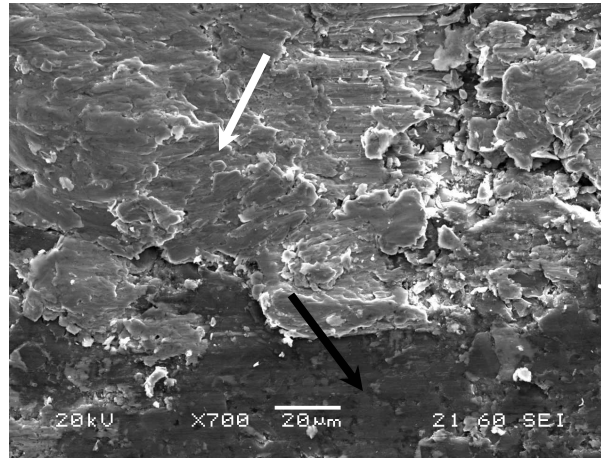
Şekil 7.27. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında 20N yük ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin daha yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri

Colaço ve arkadaşlarının [23] yaptıkları çalışmada, takviye partiküllerinin matriks malzemesinden daha gevrek olduğu ve abrazyon elemanının da takviyeden sert olduğu durumlarda, artan takviye hacim oranı ile malzemenin aşınma dayanımının azalarak, aşınma mekanizmasının mikrokızıklama (microploughing)'dan mikrokırılma ya da mikroçatlamaya döneceği belirtilmektedir. Takviye malzemesinin ve abrazyon malzemesinin sertlikleri arasındaki ilişkinin malzemenin aşınma davranışını belirlediği, abrazyonun sertliğinin takviye malzemesinin sertliğinden olması durumunda, matriks malzemesinin ihtiva ettiği takviyeye göre öncelikli aşınacağı vurgulanmaktadır. Eğer takviye partiküllerinin sertliği abrazyondan düşük ve çalışma şartları ağır ise bu durumda partiküllerin de kırılacağı bildirilmiştir.

Şekil 7.28.'de Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Cu-%1 Gr balatanın aynı yükte ve 0,5 m/sn kayma hızı ile yapılan deneyinde elde edilen görüntülere benzer disk yüzey görüntüleri görülmektedir. Karşılıklı kayma boyunca balata malzemesi karşı yüzeydeki sert SiC partiküller tarafından aşındırılmış ve çıkan aşınma ürünleri disk yüzeyine sıvanarak yeni bir kayma yüzeyi oluşturmuşlardır. EDS analizlerine bakıldığında balata aşınma ürünlerinin yanı sıra Al-Si/SiCp disk yüzeyinde oksit oluşumunun da varlığı görülmektedir.

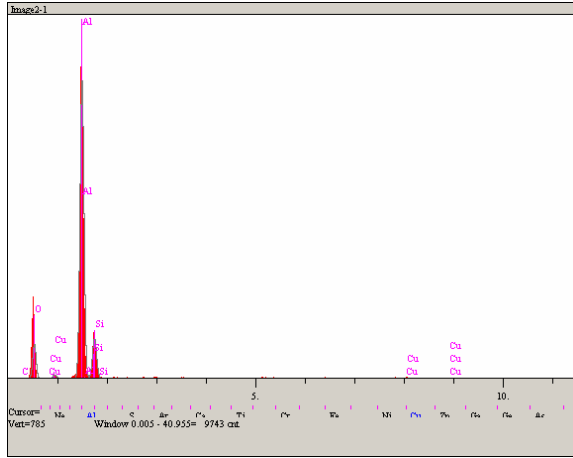


a)



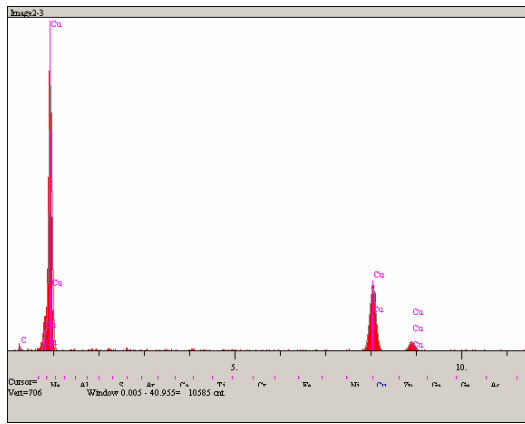
b)

Şekil 7.28. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin a), b) SEM görüntüsü c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	63.21	47.172	34.289	wt.%
Al	642.49	42.545	52.154	wt.%
Si	89.63	10.011	12.773	wt.%
Cu	2.01	0.272	0.784	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)



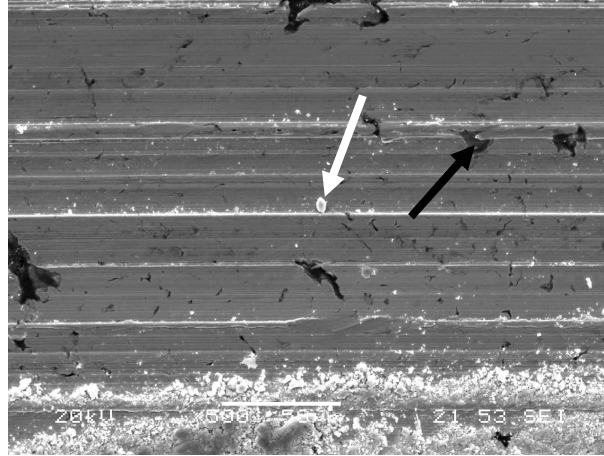
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	4.55	47.990	14.850	wt.%
Cu	229.75	52.010	85.150	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

d)

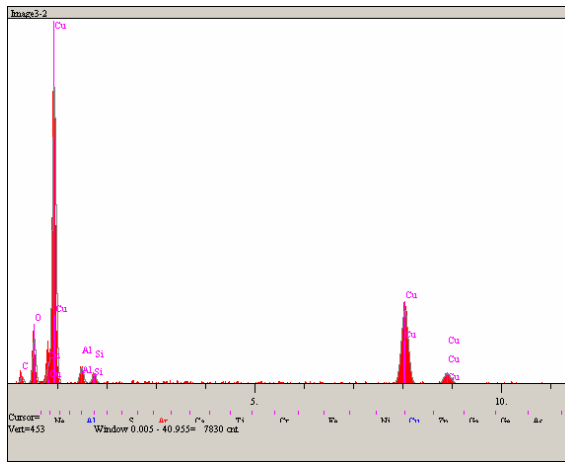
Şekil 7.28. (Devam)

Cu-%1 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında 2N yük ile yapılan deneyler sonrası alınan yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.29.'de, 5N yükteki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.30'da, 10N yük ile yapılan deney sonrasında elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.31.'de ve 20N'teki SEM ve EDS analizi de Şekil 7.32.'de verilmiştir.

Şekil 7.29. incelendiğinde, 2N yükte, balata yüzeyinde karşı yüzeydeki SiC partiküllerin oluşturduğu düzgün aşınma çizgileri görülmektedir. Kızaklama abrazyon aşınma mekanizması ile meydana gelen aşınma partiküllerinin yivlerin kenarlarında biriktiği, disk yüzeyinden gelen aşınma partiküllerinin de siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizine bakıldığında anlaşıldığı üzere balata yüzeyine gömüldüğü görülmektedir.

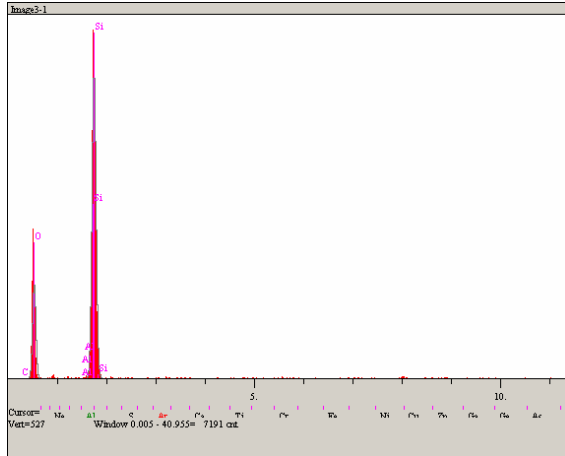


a)



b)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	7.39	37.186	17.912	wt.%
O	47.54	37.755	24.226	wt.%
Al	20.07	2.670	2.889	wt.%
Si	13.98	1.467	1.653	wt.%
Cu	157.83	20.922	53.321	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

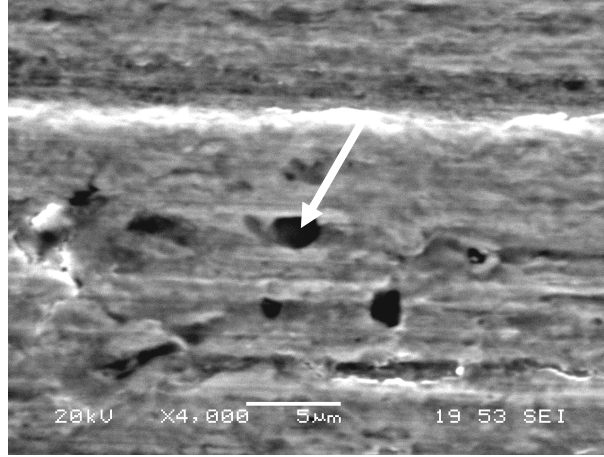


c)

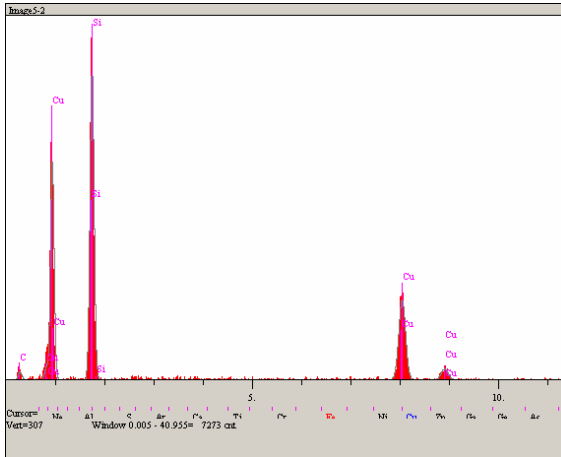
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	116.61	71.791	59.183	wt.%
Al	1.11	0.079	0.110	wt.%
Si	462.72	28.130	40.707	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.29. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,8 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.30.'da 5N yük ile yapılan deney sonrasında alınan SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Şekilde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizine bakıldığında, disk yüzeyinden aşınma ile kopan sert partiküllerin balata yüzeyine gömüldüğü anlaşılmaktadır.



a)

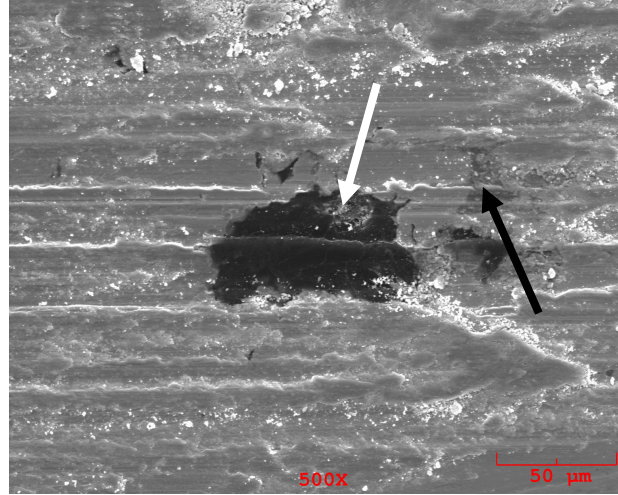


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	6.41	58.046	28.334	wt.%
Si	272.02	25.454	29.054	wt.%
Cu	116.48	16.500	42.612	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

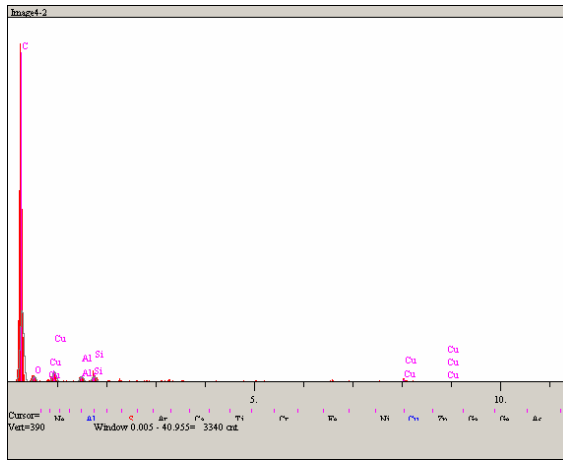
b)

Şekil 7.30. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.31.'de 10N yük ile yapılan deney sonrası elde edilen SEM görüntüsü ve oklarla gösterilen noktaların EDS analizleri görülmektedir. Sonuçlara göre disk yüzeyinden aşınma ile kopan ürünler balata yüzeyine gömülmüştür.

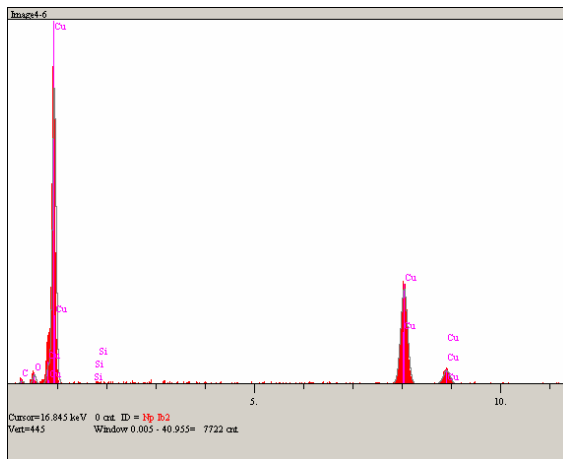


a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	71.71	87.251	82.270	wt.%
O	5.37	11.730	14.733	wt.%
Al	5.68	0.381	0.807	wt.%
Si	6.12	0.357	0.787	wt.%
Cu	2.19	0.281	1.403	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

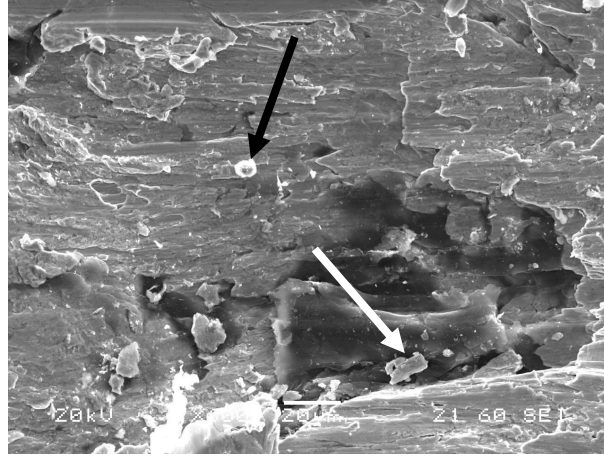


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	3.16	35.732	11.272	wt.%
O	9.98	14.718	6.185	wt.%
Si	0.72	0.165	0.122	wt.%
Cu	200.83	49.384	82.422	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

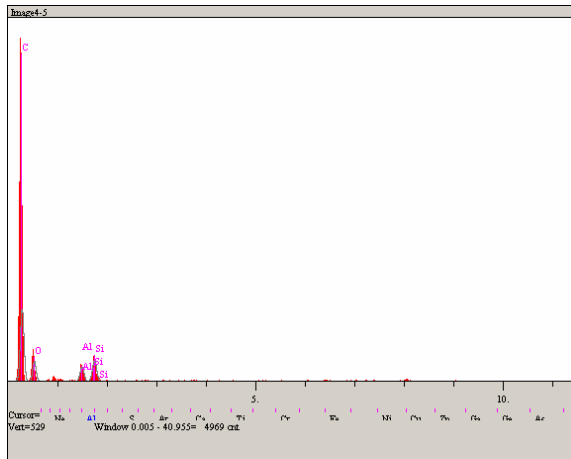
c)

Şekil 7.31. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

20N yük ve 0,8 m/sn kayma hızında Cu-%1 Gr balata yüzeyinin deney sonrası SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir.

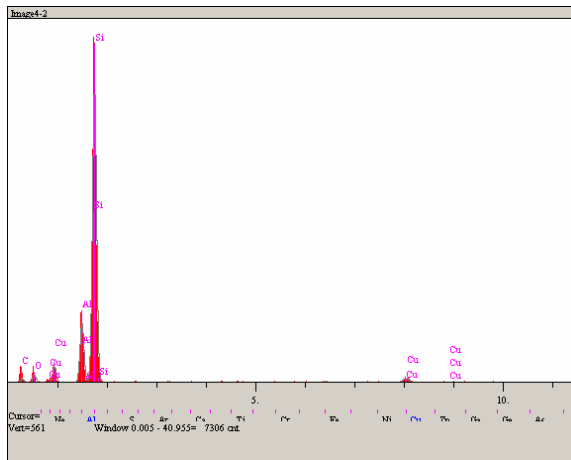


a)



b)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	97.00	75.698	68.967	wt.%
O	24.79	22.552	27.370	wt.%
Al	21.63	0.763	1.561	wt.%
Si	32.08	0.987	2.102	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

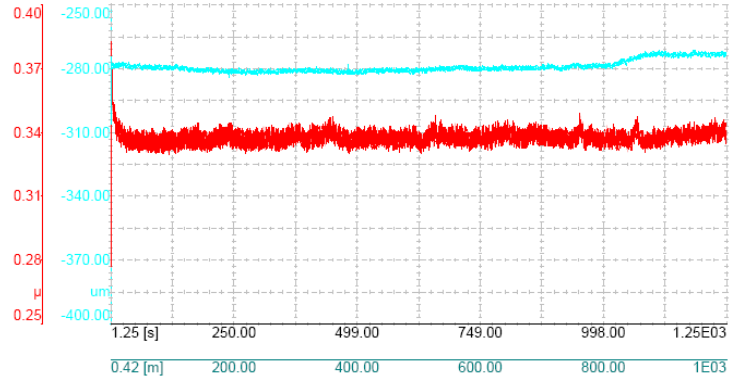


c)

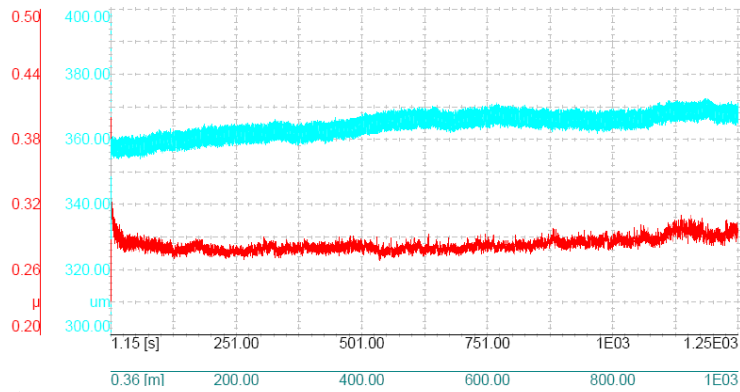
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	5.93	53.969	35.594	wt.%
O	10.19	12.961	11.387	wt.%
Al	90.29	5.094	7.547	wt.%
Si	471.49	26.781	41.301	wt.%
Cu	10.23	1.195	4.171	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.32. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Balata yüzeyinin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

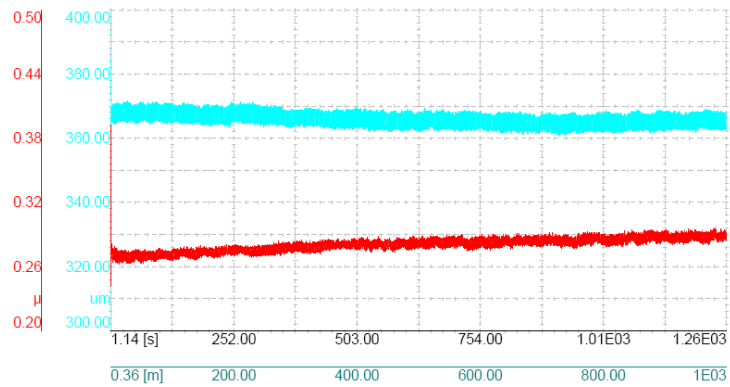
Cu-%1 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,8 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.33a.' da, 5N yük, 0,8 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.33b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.33c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.33d.'de verilmektedir.



a)

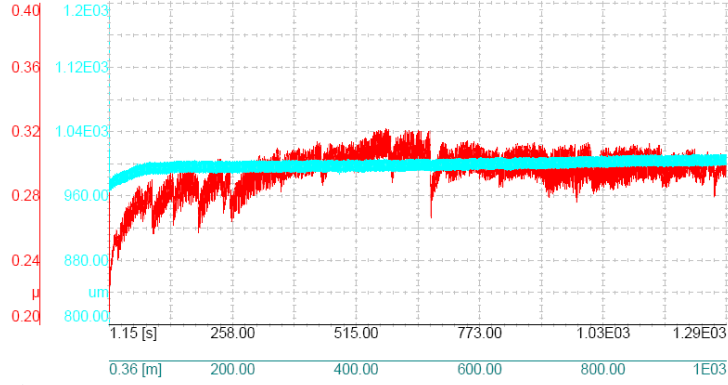


b)



c)

Şekil 7.33. Cu-%1 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c)10N d) 20N yük, 0,8 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri

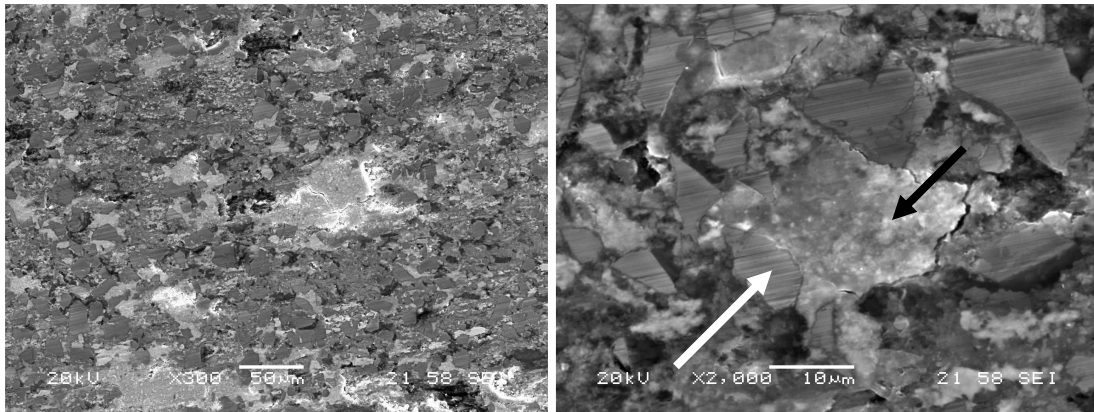


d)

Şekil 7.33. (Devam)

Şekil 7.33a., b, c ve d incelendiğinde, Şekil 7.21.'de verilen 0,5 m/sn kayma hızında elde edilen grafiklere benzer olarak 0,8 m/sn kayma hızında da sürtünme katsayısı değerlerinin deney süresince kararlı olduğu görülmektedir. Grafiklerde aşırı bir artış ya da azalma görülmemekle birlikte 20N yük ile yapılan deneyde sürtünme katsayı grafiğinde bazı düşüşler görülmektedir. Bu düşüşlerin sebebinin yükün 20N'a çıkarılmasıyla balata yüzeyinden disk yüzeyine transfer olan aşınma ürünlerinin etkisi olduğu düşünülmektedir.

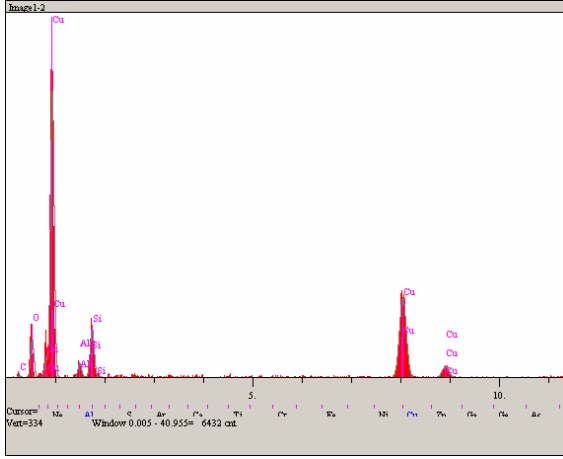
Cu-%1 Gr balata malzemesinin 2N, 5N ve 10N yük ile yapılan tüm deneylerinin bitmesinden sonra incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7.34a., b ve c'de verilmektedir.



a)

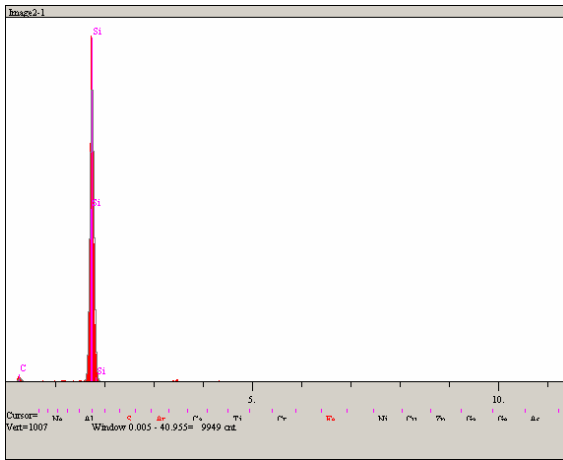
b)

Şekil 7.34. Cu-%1 Gr balata malzemesinin 2N, 5N ve 10N yük ile yapılan tüm deneylerinin bitmesinden sonra incelenen disk yüzeyinin a), b) SEM görüntüleri c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi, d) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	1.47	17.695	6.816	wt.%
O	30.00	39.515	20.275	wt.%
Al	12.72	3.236	2.800	wt.%
Si	46.13	9.231	8.314	wt.%
Cu	126.23	30.323	61.795	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	9.32	69.344	49.170	wt.%
Si	856.15	30.656	50.830	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

d)

Şekil 7.34. (Devam)

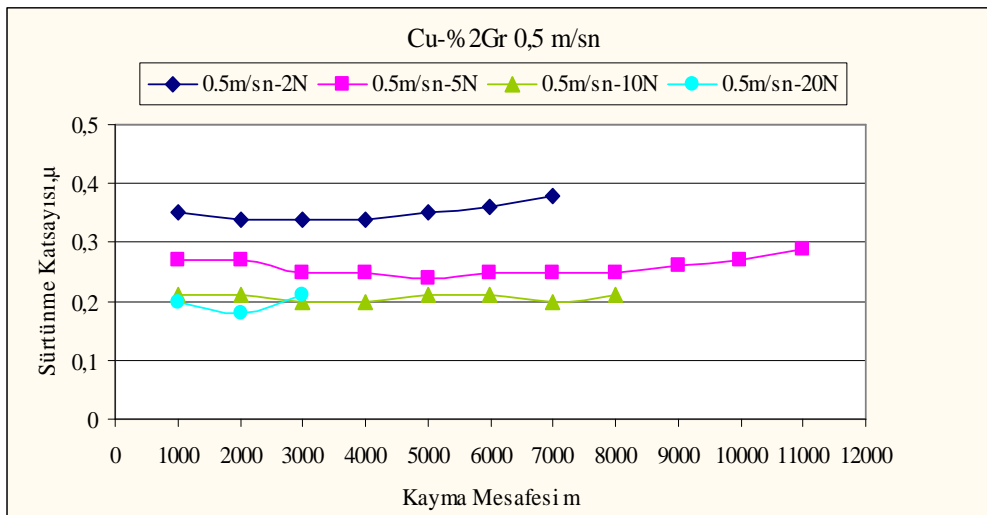
Disk yüzeyini inceleyecek olursak; aşınan balata malzemesinin disk yüzeyine sıvanması sebebiyle Al-Si/SiC diskin yüzeyi Cu-%1 grafit balata malzemesinin yüzeyine kıyasla oldukça düşük hasar görmüştür. Al disk yüzeyine sıvanan Cu ile karşı yüzeydeki Cu malzemeler birbirleri üzerlerinde kaymış ve disk yüzeyi balata yüzeyine göre daha iyi korunmuştur. Nakanishi [14] yaptığı çalışmada, aşınan balata malzemesinin Al-MMK disk yüzeyine ince bir film şeklinde toplandığını belirtmiştir. SiC partiküllerinin, Al-MMK yüzeyinde çıkıntı oluşturduğu ve balata yüzeyinden kopan aşınma partiküllerinin bu çıkıntıların arasına ya da içine doğru toplandıkları, SiC partiküllerinin kesici uç gibi davrandığı vurgulanmıştır.

Yine aynı çalışmada [14] , bir yanda geleneksel dökme demir fren diski ile sert partiküller içeren metalik matriksli balata malzemesi, diğer yanda ise Al-MMK fren diski ve yine sert partiküller içeren kompozit balata malzemesi karşılıklı aşınma

deneyine tabi tuttıklarını bildirilmiş, deneyler sonucunda dökme demir diskin Al-MMK diske oranla daha fazla aşındığı, buna karşılık dökme demirin karşı yüzeyinde kullanılan balata malzemesinin, Al-MMK diski karşısında kullanılan malzemeye göre daha az oranda aşındığını tespit ettiklerini belirtmişlerdir.

7.4.2 Cu-%2 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları

Cu-%2 Gr balata malzemesi için farklı mesafelerde ve farklı yükler altında elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları, 0,5 m/sn ve 0,8 m/sn hızlara göre grafik şeklinde verilmiştir. 0.5 m/sn kayma hızına göre sürtünme katsayısı sonuçları, Şekil 7.35.'de sunulmuştur.



Şekil 7.35. Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

Şekil 7.35.'te Cu-%2 Gr numunesinin 0,5 m/sn sabit kayma hızı değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kayma mesafesine göre verilmektedir. Grafik incelendiğinde, 2N yük ile yapılan deneylerde elde edilen katsayı değerlerinin diğer yüklerle yapılan deney sonuçları ile kıyaslandığında yüksek çıktığı görülmektedir. Artan kayma mesafesi ile μ değerlerinde az da olsa bir artış mevcuttur.

5N ve 10N'luk yükler ile elde edilen grafiklere bakıldığında, artan yük ile sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Cu-%1 Gr takviyeli balatanın deney

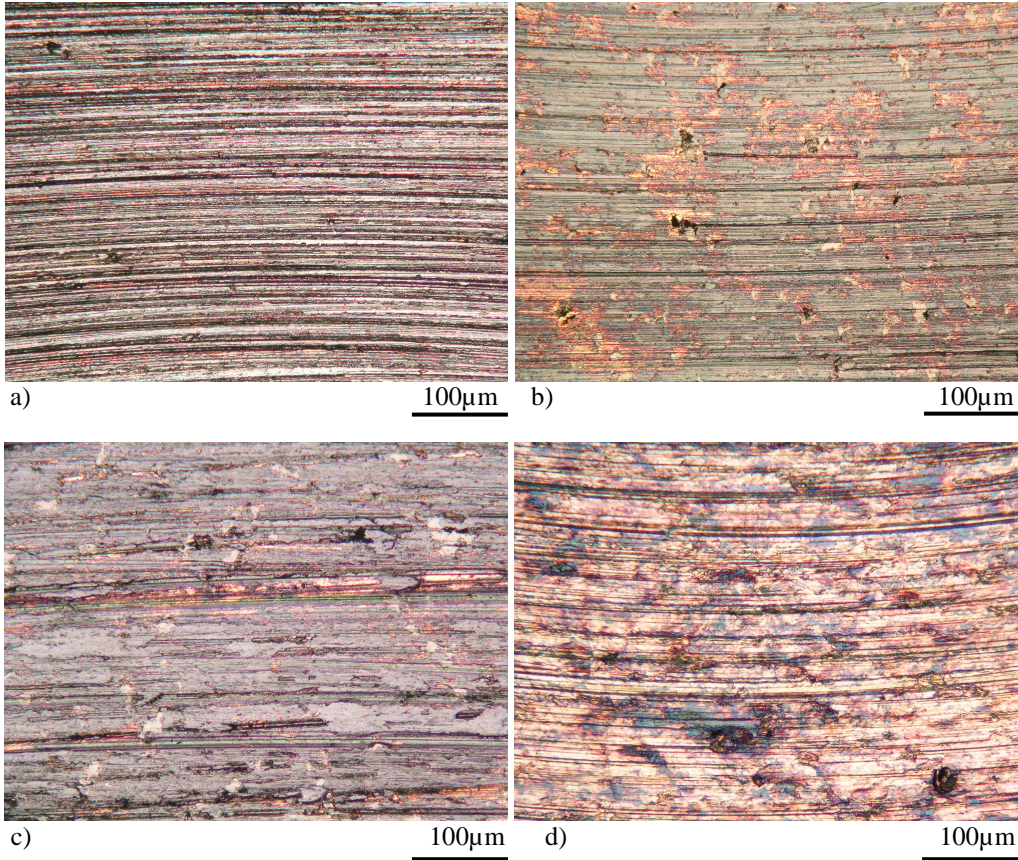
sonuçları incelenirken de bahsedildiği üzere, normal yükün artmasıyla sürtünme katsayısında düşüş gözlenmesi, yükün artmasıyla kayma arayüzeyinde tribooksit tabaka oluşumunun desteklenmesi sonucu yağlayıcı olarak davranan oksit tabakasının sürtünme katsayısı ile aşınma hızında düşüğe sebep olmasına bağlanmaktadır.

Uyyuru ve arkadaşlarının [15] yaptıkları Al-Si/SiCp kompozitinin aşınma deneyleri sırasında, ince tribolojik tabakanın pin malzemesi üzerinde olduğu, bu tabakanın disk malzemesini koruyucu bir tabaka olarak davrandığı, bu sebeple Al-Si/SiCp kompozit ve balata malzemesi çiftinin servis ömrü boyunca tribooksit tabakası oluşumunun aşınma üzerinde büyük rol oynadığı belirtilmektedir.

Benzer şekilde, 10N yükte elde edilen değerlerin, 2N ve 5N'da kaydedilenlerden daha düşük olması, yükün artmasıyla yüzeyde bir tribooksit filmi olduğu fikrini desteklemektedir.

Yükün 20N'a artması ile sürtünme katsayısında önemli bir artış ya da düşüş gözlenmemekle birlikte, ileriki sayfalarda görülebileceği üzere, 20N'luk deneyler sırasında aşınma mekanizmasının değişmesi ve uzun mesafelerde balata malzemesinin aşırı deformasyona uğraması sebebiyle aşınma deney mesafesi 20N yük için toplam 3000 m olarak belirlenmiştir. Grafiğe bakıldığında 20N'luk deneydeki ilk iki değer diğer yüklerde kaydedilenlerden daha düşük çıkarken son deneyde μ değerinde bir artış görülmektedir.

Şekil 7.36. incelendiğinde, balata yüzeylerinde karşı yüzeydeki sert SiC partiküller tarafından oluşturulan düzgün aşınma çizgileri görülmektedir. Artan yük ile takviye malzemesi olan grafitin, kayma ve sürtünme etkisiyle daha iyi yayıldığı görülmektedir. 2N'da alınan görüntüde aşınma çizgileri belirginken 5N'da grafitin yağlayıcılık etkisini göstermesi ile hem sürtünme katsayısında hem de aşınma izlerinde 2N yükte elde edilenlere göre etkin bir azalma görülmektedir.

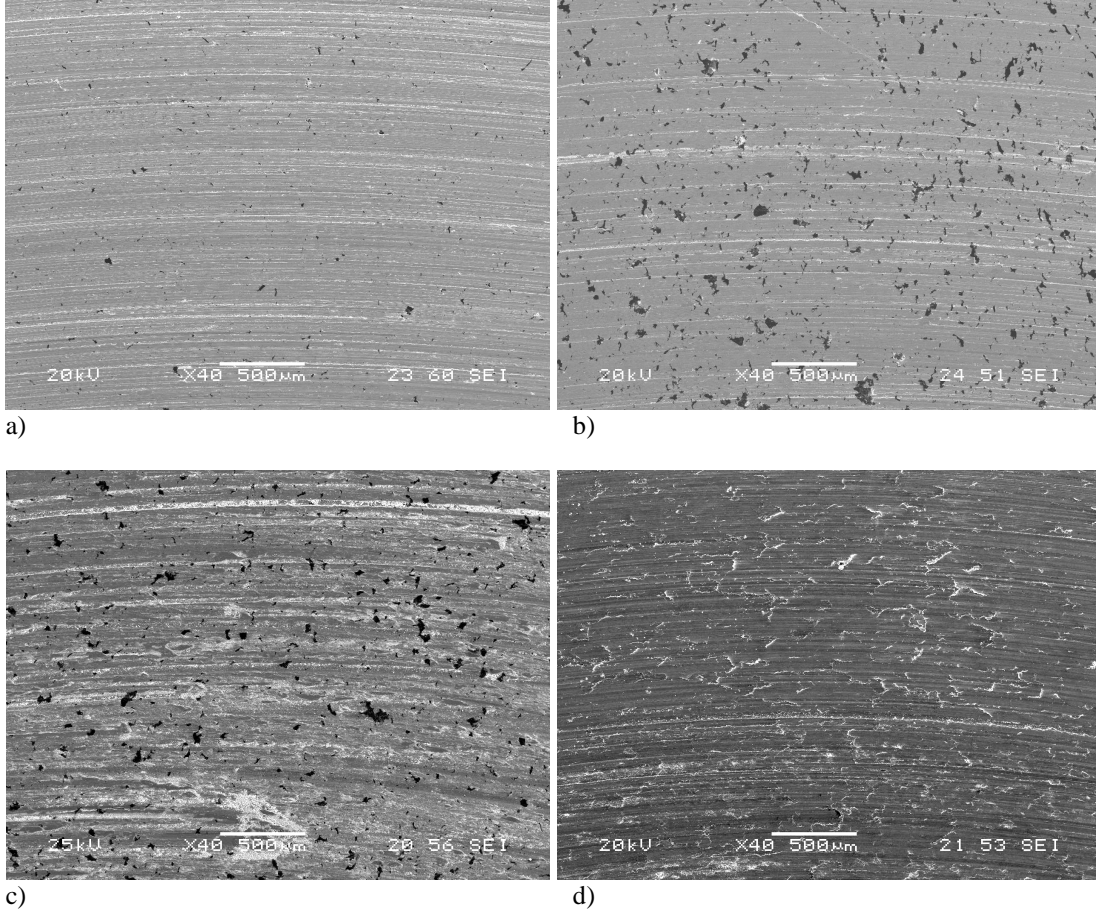


Şekil 7.36. Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında, aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları

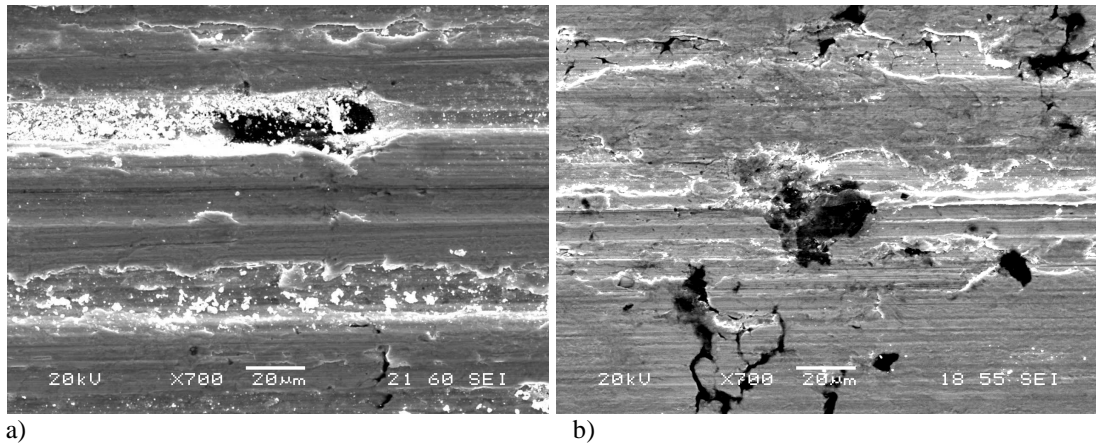
10N'da da grafitin yüzeye sıvanmasının yanı sıra yiv oluşumu görülmektedir. 20N yükte, grafitin yüzeyde herhangi bir yağlayıcı tabaka oluşturamadığı Şekil 7.36d.'de görülmektedir.

Cu-%2 Gr balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, 2N, 5N, 10N ve 20N yükler ile yapılan deneylerden sonra alınan SEM görüntüleri Şekil 7.37. ve Şekil 7.38.'de verilmektedir.

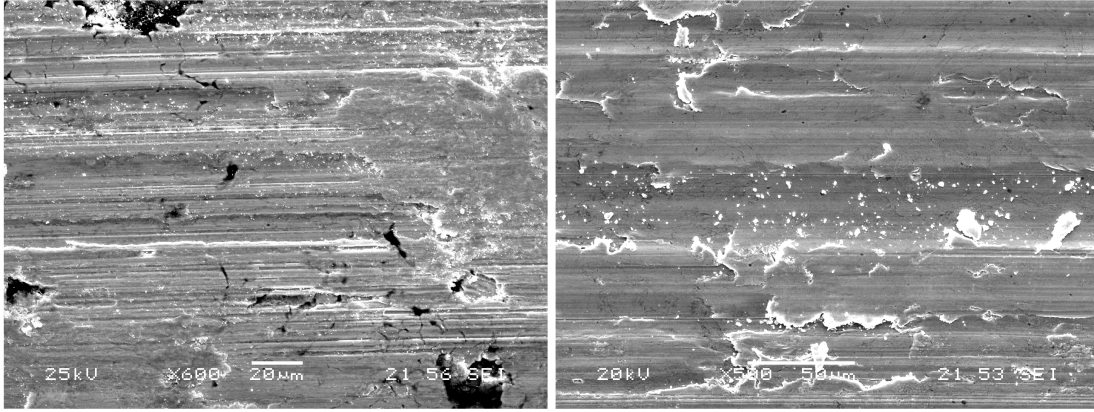
Görüntüler genel olarak incelendiğinde, balata yüzeyinin Al-Si/SiC disk yüzeyinde bulunan sert takviye malzemeleri ve aşınma ile oluşan aşınma ürünleri tarafından karışık adhesiv ve abrazif olarak aşındırıldığı görülmektedir.



Şekil 7.37 Cu-%2 Gr takviyeli balatının a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri



Şekil 7.38. Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri

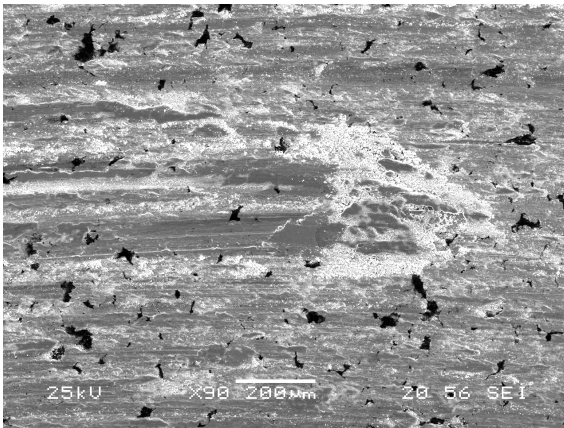


c)

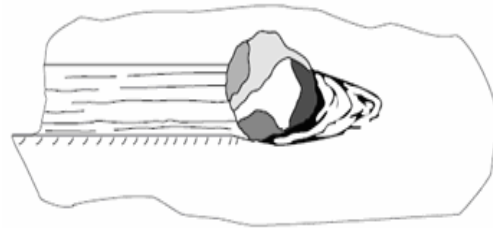
d)

Şekil 7.38. (Devam)

Yüzeylerin her birinde yiv oluşumu ve bu yivlerin etrafında da aşınma ürünlerinin bulunduğu tespit edilmiştir. SEM görüntülerinin tümünde kızaklama türü abrazif aşınma baskın aşınma mekanizması olarak karşımıza çıkmakla birlikte 10N yük ile yapılan deney sonunda elde edilen ve Şekil 7.39a.'da verilen SEM görüntüsünde, yüzeyde Şekil 7.39b.'de şematik olarak gösterilen pulluklama (Wedge forming) abrazif aşınmasının da meydana geldiğini görülmektedir.



a)

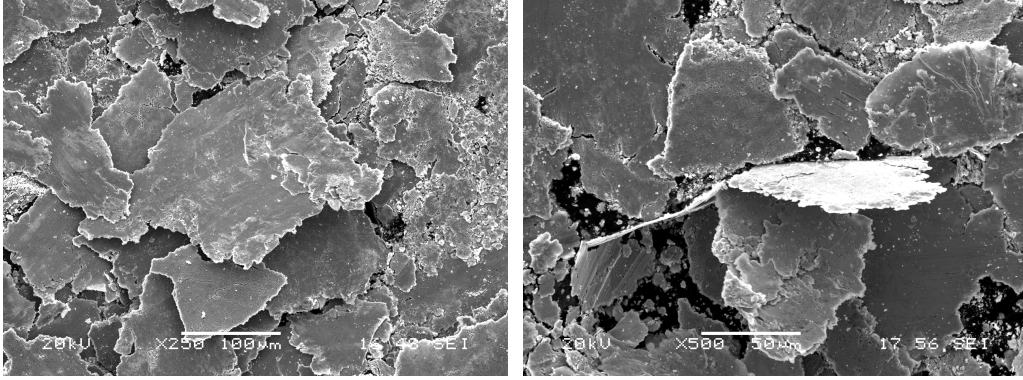


b)

Şekil 7.39. Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 10 yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası aşınma yüzeyinde görülen pulluklama aşınma mekanizmasının görünümü b) Pulluklama (Wedge formation) [24] aşınmasının şematik görünümü

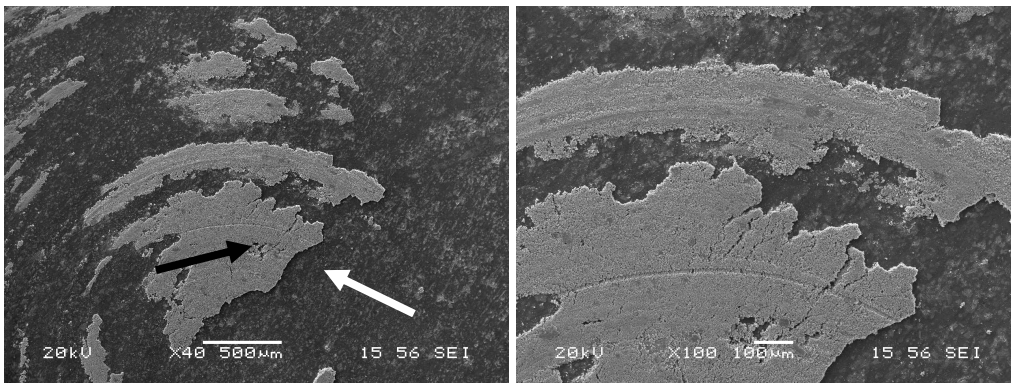
%1 Gr takviyeli balata malzemesinin incelenmesi sırasında anlatılan yüzey deformasyonu ve çatlak oluşumu sonrası çatlakların birbirleri ile bağlanması sonucu yüzeyden delaminasyon ile levhasal ya da plaka şeklinde malzeme kaybı Şekil 7.38d.'de verilen 20N yük ile yapılan deney sonrası kaydedilen SEM görüntüsünde de görülmektedir. Disk yüzeyindeki sert SiC partiküllerin kesici uç gibi davranması

sonucu, balata yüzeyinden abrazif olarak malzeme kaldırılmıştır. Şekil 7.40.'da bu levhasal aşınma partiküllerinin SEM görüntüleri görülmektedir.

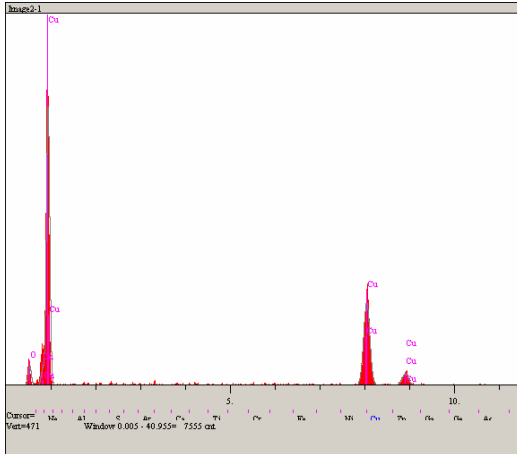


Şekil 7.40. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüsü

Şekil 7.41.'de 20N yük ve 0,5 m/sn kayma hızında gerçekleştirilen deney sonrası incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerde Cu-%2 Gr kompozit balata malzemesinin farklı aşınma mekanizmaları ile disk yüzeyine sıvandığı görülmektedir. Disk yüzeyinde Şekil 7.42a.'da verilen ve Şekil 7.41.'deki SEM görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizine bakıldığında, disk yüzeyine Cu sıvandığı kanıtlanmakla birlikte aşınma ürünlerinin içinde oksijenin varlığına da rastlanmaktadır. Şekil 7.42b. ise beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizidir. Bu sonuçta da oksijenin bulunması, kayma arayüzeyinde bir oksit tabakasının oluştuğu, daha sonra 20N yükte değişen aşınma mekanizması ile yüzey oksitlerinin, yüke dayanamayıp kırılarak aşınma ürünleri ile birlikte disk yüzeyine birikmesi fikrini desteklemektedir.

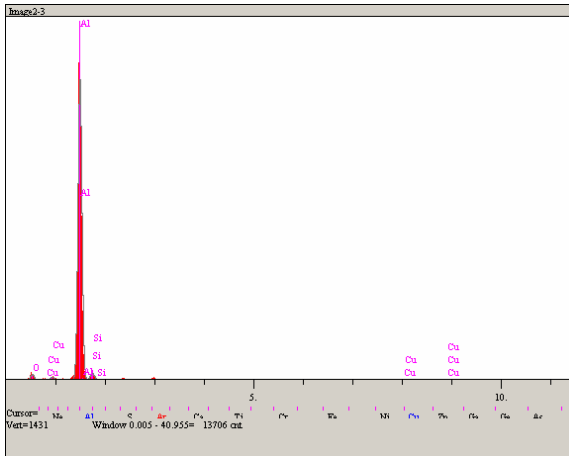


Şekil 7.41. Cu-%2 Gr balata malzemesi ile 20N yük ve 0,5 m/sn hız değerlerinde yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	21.36	37.095	12.928	wt.%
Cu	180.18	62.905	87.072	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

a)

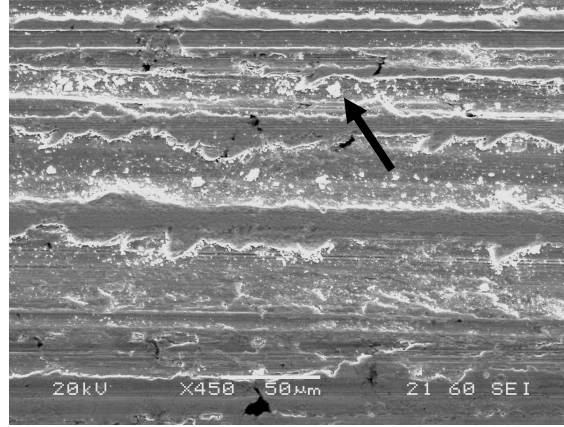


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	17.78	18.073	11.491	wt.%
Al	1,182.26	77.497	83.094	wt.%
Si	25.78	4.096	4.571	wt.%
Cu	2.19	0.334	0.845	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

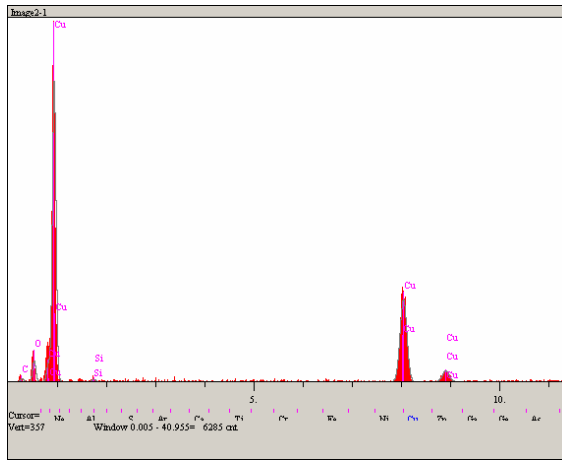
b)

Şekil 7.42 Cu-%2 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinden alınan ve Şekil 7.41’de görülen SEM görüntülerinde a) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Cu-%2 Gr balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında 2N yük ile yapılan deneyler sonrası alınan yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.43.’te, 5N yükteki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.44.’te, 10N yük ile yapılan deney sonrasında elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.45.’te ve 20N yükteki SEM ve EDS analizi de Şekil 7.46.’da verilmiştir.



a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.63	31.897	11.490	wt.%
O	17.66	28.479	13.666	wt.%
Si	2.55	0.633	0.533	wt.%
Cu	139.40	38.991	74.312	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

Şekil 7.43. Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

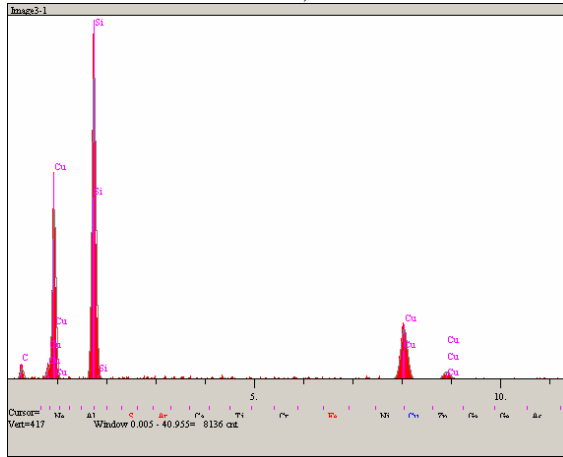
Şekil 7.43.'te verilen 2N yük ile yapılan deney sonrası aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analizi incelendiğinde aşınma yüzeyinde kızıklama türü abrazyif aşınma ile meydana gelen yivler ve aşınma ürünleri görülmektedir. Şekil 7.43b.'deki EDS analizinde balata yüzeyinde aşınma partikülü olarak SiC'ün de bulunduğunu anlaşılmaktadır. Oksijenin varlığı ise yüzey oksitlerinin varlığına işaretler.

5N yük kullanılarak yapılan deney sonrası elde edilen ve Şekil 7.44.'de verilen SEM görüntüleri ile EDS analizleri incelendiğinde, Şekil 7.44b.'deki EDS piklerinden de görüleceği gibi disk yüzeyinden kopan SiC partikülünün balata yüzeyine gömülmüş olduğu görülmektedir.

Şekil 7.44c.'de ise düşük bir oranda da olsa Al ve Si varlığı, disk yüzeyinden kopup balata yüzeyine gömülen aşınma ürününün sadece SiC ile sınırlı olmadığını göstermekte, oksijen varlığı ise yüzeyde triooksit oluştuğunu kanıtlamaktadır.

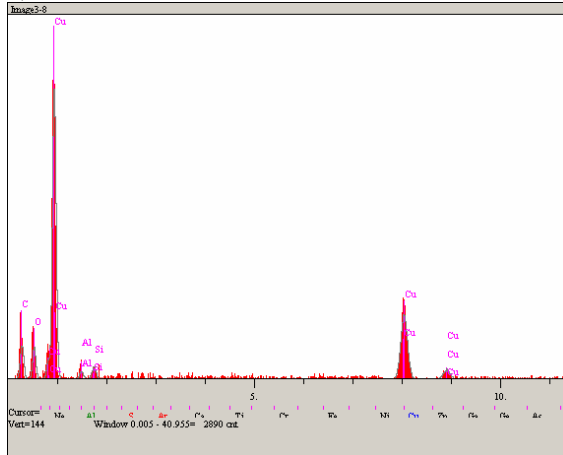


a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	10.46	66.638	37.949	wt.%
Si	366.57	22.880	30.467	wt.%
Cu	99.70	10.483	31.584	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)



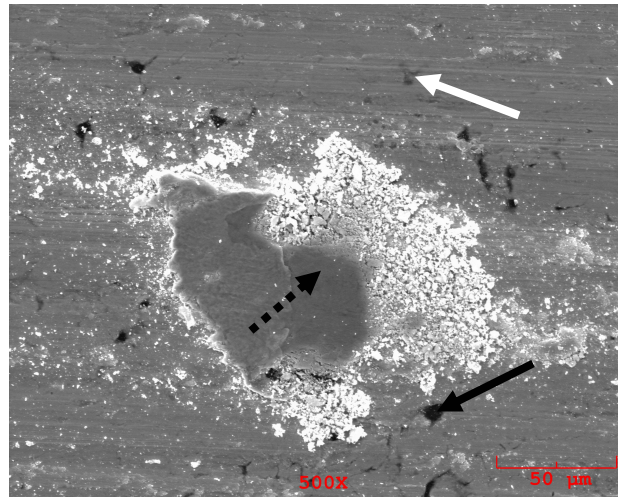
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	12.10	68.171	45.509	wt.%
O	10.53	20.967	18.645	wt.%
Al	2.97	0.542	0.812	wt.%
Si	4.95	0.719	1.122	wt.%
Cu	43.25	9.601	33.911	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)

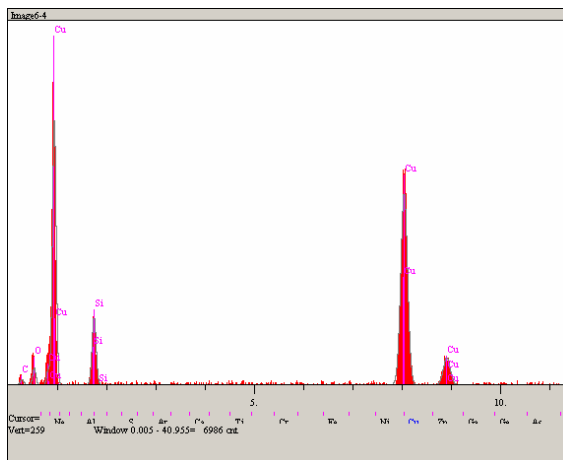
Şekil 7.44. Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.45.'te, Cu-%2 Gr balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında ve 10N yük kullanılarak yapılan deney sonrası alınan SEM görüntüsü ile EDS analizleri görülmektedir. Şekil 7.45a.'da verilen SEM görüntüsünde, balata yüzeyinde aşınma ile kopan ve daha sonra kayma ya da sürtünme etkisiyle balata yüzeyine tekrar yapışan aşınma ürünleri görülmektedir.

Şekil 7.45b.'de verilen EDS analizine bakıldığında, sürtünme ve aşınma ile kopan sert SiC partiküllerin de balata yüzeyine gömüldüğü tespit edilmekle birlikte yine Şekil 7.45b. ve 7.45d.'deki EDS analizlerinde çıkan oksijen pikleri de kayma arayüzeyinde tribooksit tabakasının oluştuğu fikrini desteklemektedir.



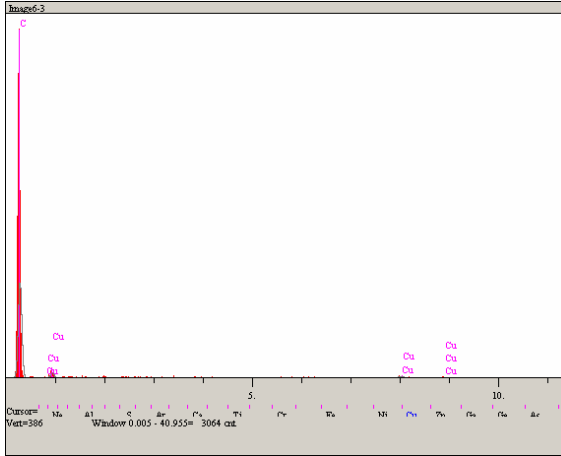
a)



b)

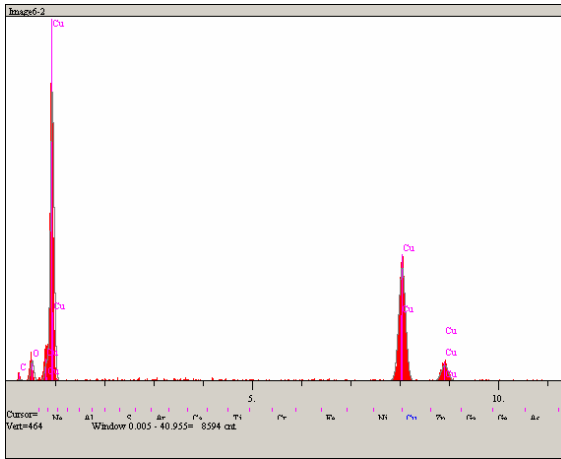
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	3.76	35.544	11.704	wt.%
O	10.41	12.157	5.333	wt.%
Si	50.73	8.383	6.455	wt.%
Cu	235.77	43.916	76.509	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.45. Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) Siyah Kesik çizgi ile gösterilen noktanın EDS analizi



c)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	93.02	99.509	97.456	wt.%
Cu	3.43	0.491	2.544	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

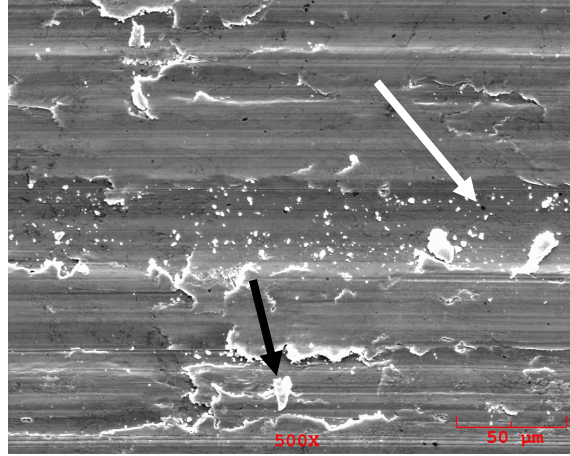


d)

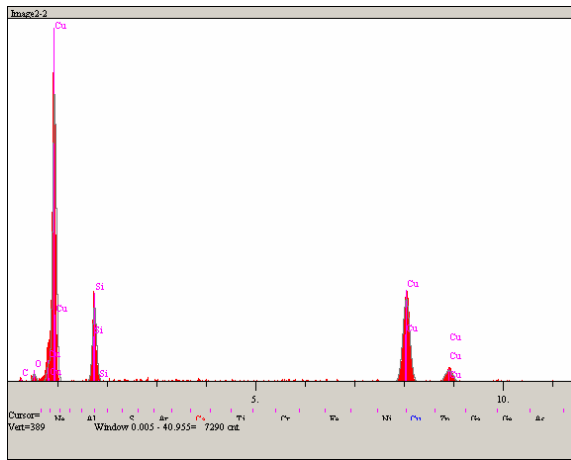
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.28	22.229	6.694	wt.%
O	22.24	25.672	10.298	wt.%
Cu	249.17	52.100	83.008	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.45. (Devam)

Şekil 7.46.'da verilen 20N yük kullanılarak yapılan deney sonrası elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizleri incelendiğinde, baskın aşınma mekanizmasının kızıqlama tipi abrazif aşınma ve delaminasyon olduğu düşünülmektedir. Aşınma partiküllerinden bazılarının balata yüzeyinde kaldığı, disk yüzeyinden kopan SiC partiküllerin ise balata yüzeyine gömüldüğü görülmektedir.

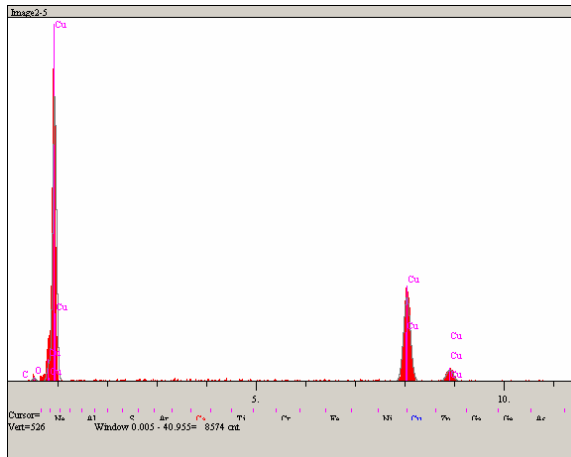


a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	0.78	15.311	4.447	wt.%
O	6.63	12.727	4.924	wt.%
Si	84.32	23.276	15.809	wt.%
Cu	153.44	48.686	74.819	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)



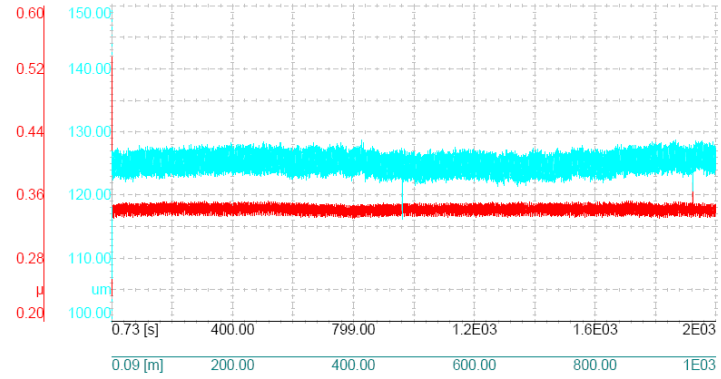
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	0.43	8.068	1.947	wt.%
O	10.26	20.237	6.506	wt.%
Cu	193.64	71.695	91.547	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)

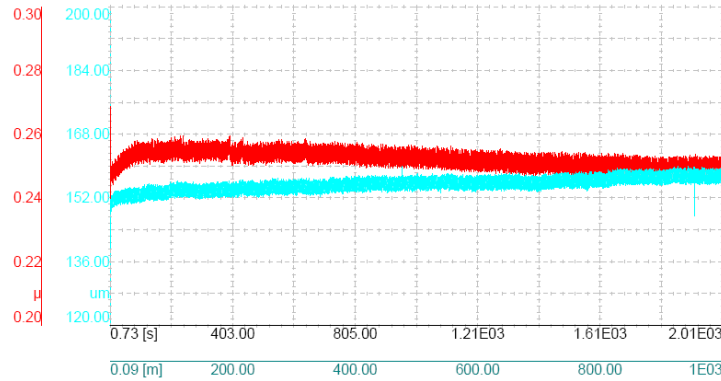
Şekil 7.46. Cu-%2Gr takviyeli balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

2N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.47a.'da, 5N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki

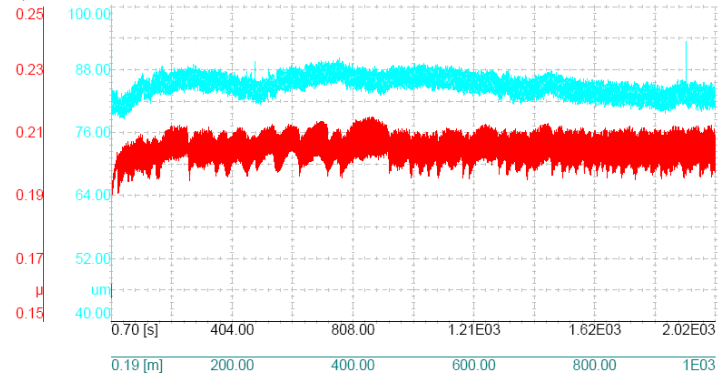
sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.47b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.47c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.47d.'de verilmektedir.



a)

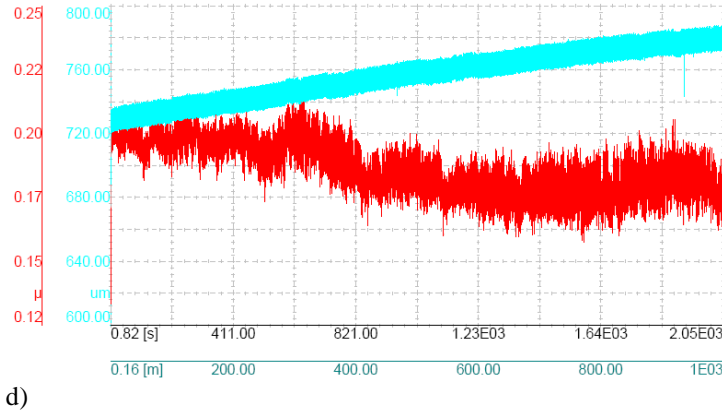


b)



c)

Şekil 7.47. Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c)10N d) 20 N yük, 0,5 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri



d)

Şekil 7.47. (Devam)

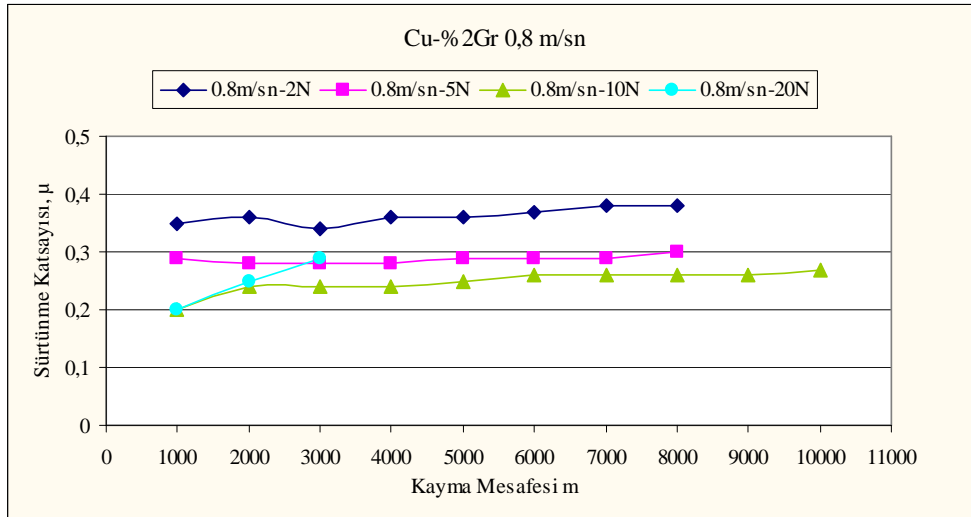
Şekil 7.47a. ve b'de verilen mesafe-sürtünme katsayısı grafiklerinde, μ değerlerinin deney süresince değişmediği ve kararlı kaldığı görülmektedir. Mavi ile gösterilen aşınma derinliği grafiklerine bakıldığında ise 2N ve 5N gibi düşük yüklerde malzeme transferinin gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Şekil 7.47c.'de 10N yük ile yapılan deneyde elde edilen μ değerlerinde az da olsa düşüşler, aşınma derinliği grafiğinde de yerel bazı değişimler görülmektedir. Bunların sebebi, Şekil 7.47.'de verilen SEM görüntüsünde de görülebilen balata yüzeyinde, pulluklama abrazif aşınması ile meydana gelen pürüzlülükler ve yine aşınma ile yerel malzeme transferlerinin meydana gelmesi olabilir.

20N yük ile yapılan deneyde kaydedilen μ değerlerinin mesafeye göre değişimini gösteren Şekil 7.47d. incelendiğinde sürtünme katsayısı değerlerinde düşüş, aşınma derinliği grafiğinde ise bir artış söz konusudur. 20N yükte balata malzemesinin deformasyonu sonucu yüzeyden kopan aşınma ürünlerinin disk yüzeyine birikmesi sonucu aşınma derinliği ya da yüksekliği diye tabir ettiğimiz grafikte değişimin görülmektedir.

Şekil 7.48.'de Cu-%2 Gr numunesinin 0,8 m/sn sabit hız değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kayma mesafesine göre verilmektedir.

Grafik incelendiğinde, 2N yük ile yapılan deneylerde elde edilen μ değerlerinin diğer yüklerle yapılan deney sonuçları ile kıyaslandığında daha yüksek çıktığı

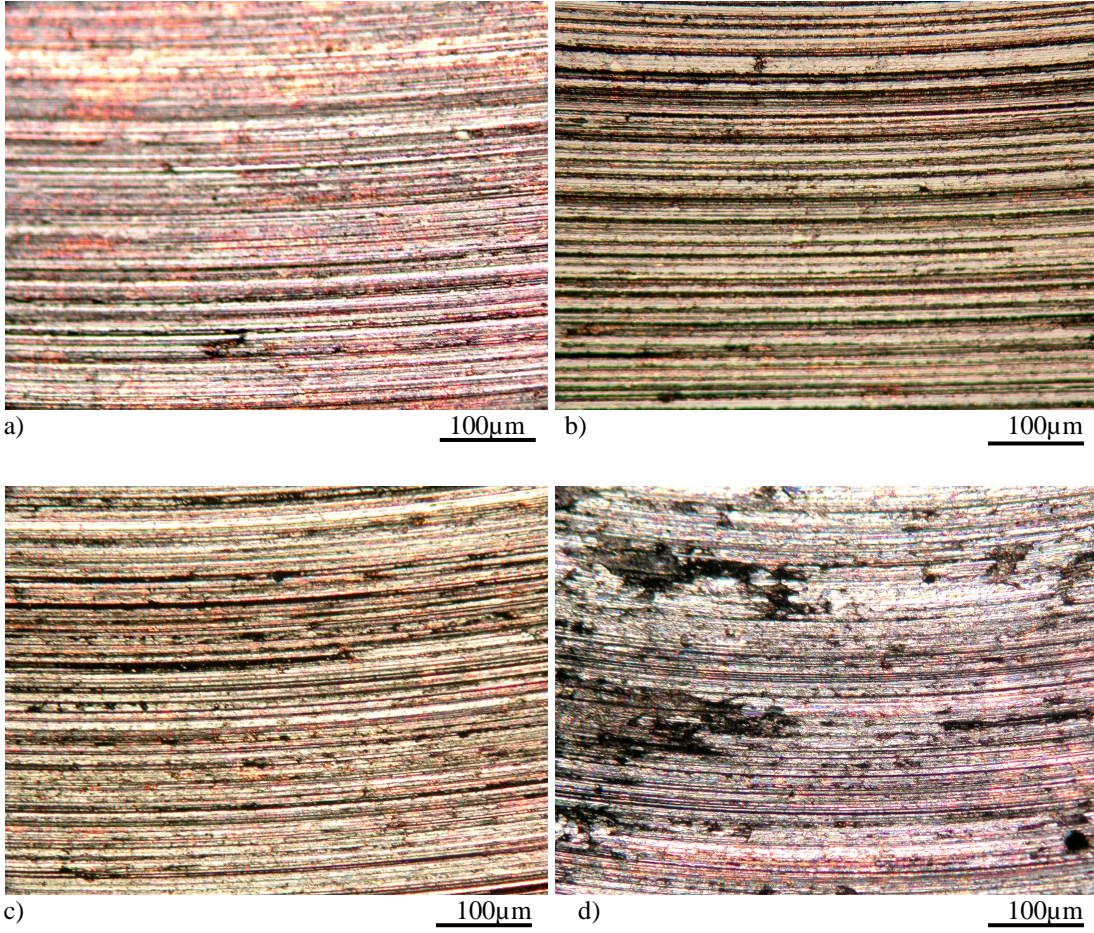
görülmektedir. Önceki bölümde incelenen Cu-%1 Gr balata malzemesinin sürtünme katsayısı-mesafe grafiklerinde de aynı durumla karşılaşmıştır. Cu-%2Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında ve 2N yükte yapılan deneylerinde diğer yüklerle yapılan deneylere nazaran yüksek sürtünme katsayılarının elde edilmesinin sebebi olarak, düşük yüklerde tribooksit tabakasının etkin bir şekilde oluşmadığı düşünülmekle birlikte, takviye malzemesi olan grafitin de etkin bir yağlayıcılık gösteremediği sonucuna varılmaktadır. Yükün artmasıyla hem yüzey oksitlerinin hem de grafitin etkisi daha etkin olarak görülmekte, sürtünme katsayı değerleri düşmektedir.



Şekil 7.48. Cu-%2 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

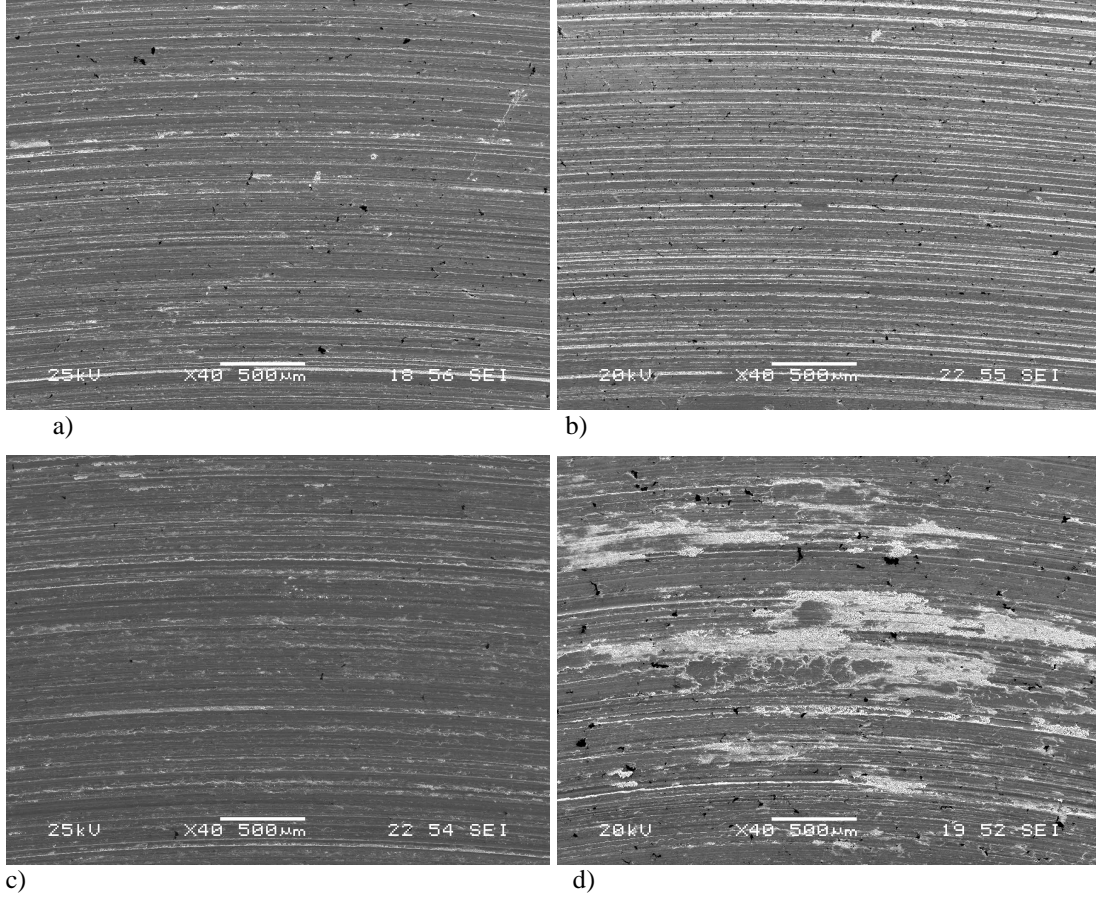
2N, 5N ve 10N yüklerde yapılan deneylerin grafikleri incelendiğinde artan kayma mesafesi ile μ değerlerinde artış çok az görülmekte iken 20N grafiğinde ciddi bir artış eğilimi söz konusudur. Bu artışın sebebi balata yüzeyinde oluşan oksit tabakasının uygulanan yüke dayanmaması ve parçalanması olabilir. Ayrıca daha önce de anlatıldığı üzere yükün 20N'a artırılması sonucu balata yüzeyinde aşırı deformasyon ve disk yüzeyine doğru malzeme transferi gerçekleşmektedir. Bu durum da 20N'daki sürtünme katsayısındaki artışın sebebi olarak gösterilebilir.

Şekil 7.49.'da Cu-%2 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında yapılan deneyleri sonrasında çekilen balata aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir.

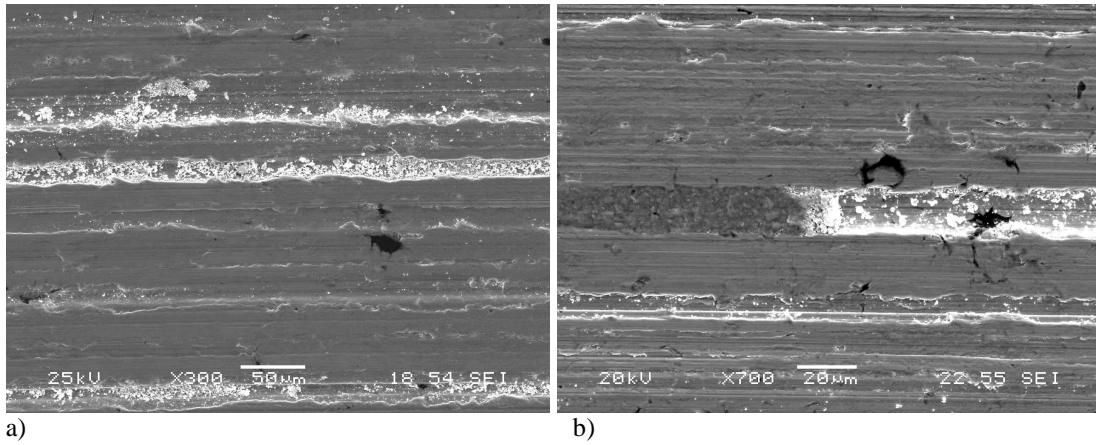


Şekil 7.49. Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları

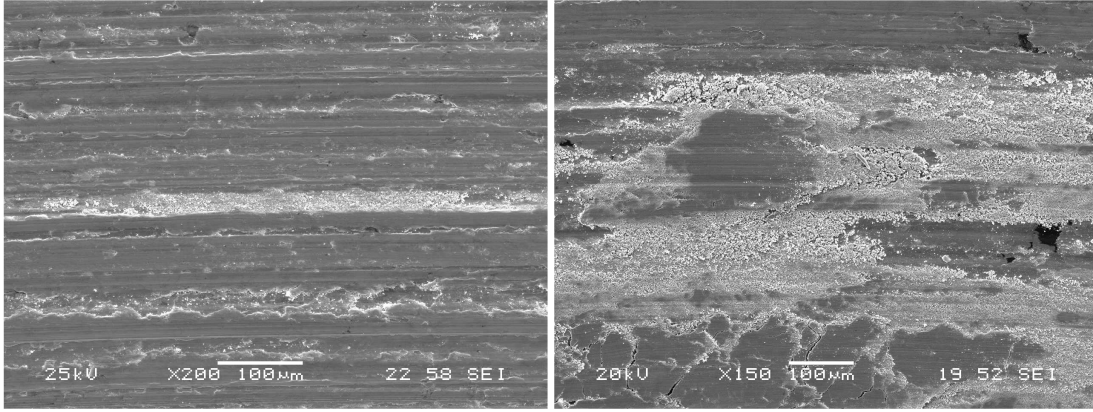
Görüntüler incelendiğinde görüntülerin tümünde aşınma çizgilerinin oluştuğu ve bu çizgilerin ya da yivlerin artan yük ile belirginleştiği görülmektedir. Şekil 7.49a.'da görülen 2N yük ile elde edilen görüntüde grafitin yüzeye tam olarak sıvanmadığı ve bakır matriksin etkin olarak korunamadığı açıktır. 7.49d.'de verilen 20N'luk deney sonrasında aşınma yüzeyinden alınan görüntüde ise balata yüzeyinde deformasyonların olduğu ve bu deformasyon bölgelerinden ya karşı yüzeye ya da tribosistem dışına malzeme transferinin olduğu görülmektedir. Bu malzeme transferi ile yüzeyde yerel olarak çukurlar ve tepeler meydana gelmiştir. Şekil 7.50. ve Şekil 7.51.'de verilen SEM görüntülerinde bu durum daha açık ve net olarak görülmektedir.



Şekil 7.50. Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri



Şekil 7.51. Cu-%2 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin daha yüksek büyütmeledeki SEM görüntüleri

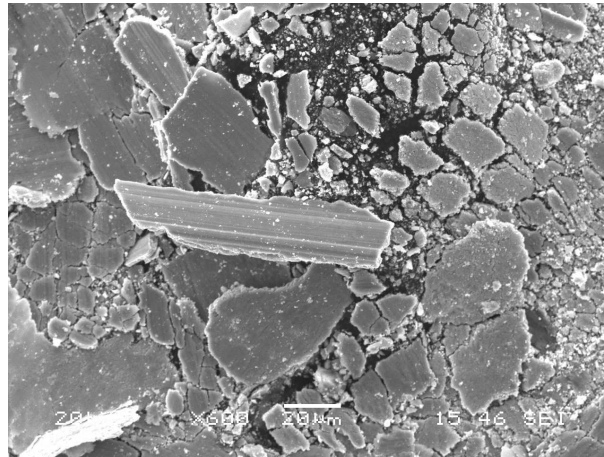


c)

d)

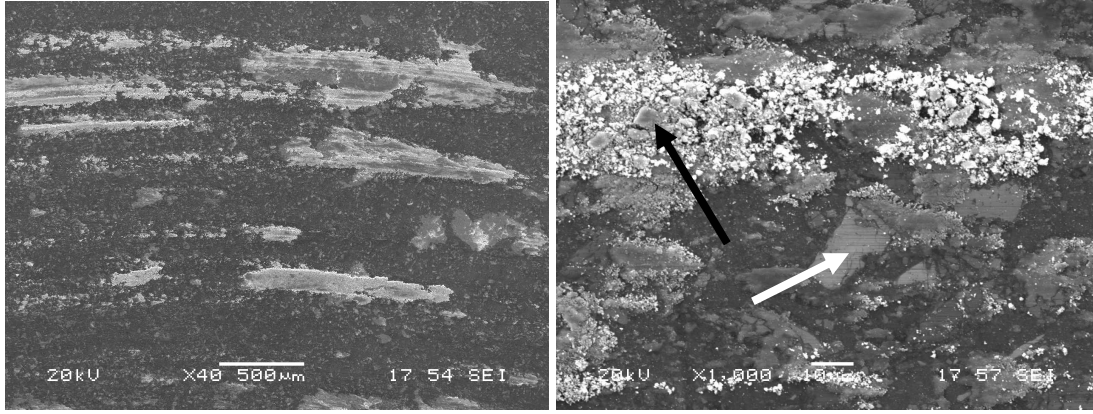
Şekil 7.51. (Devam)

Şekil 7.50. ve Şekil 7.51. incelendiğinde aşınma yüzeylerinde abrazif aşınmanın hakim olduğu görülmektedir. 2N, 5N ve 10N’da yüzeyde düzgün kayma ve aşınma yivleri ile bu yivlerin içinde ya da çevresinde toplanmış aşınma ürünleri görülmekte iken 20N yük kullanılarak yapılan deney sonrası alınan görüntüde balata yüzeyinden kopan aşınma ürünlerinin tekrar aynı yüzeye yapıştığı yani malzeme transferi gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 7.51.’de 20N yükte yapılan deney esnasında tribosistemden uzaklaşan aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri verilmektedir.



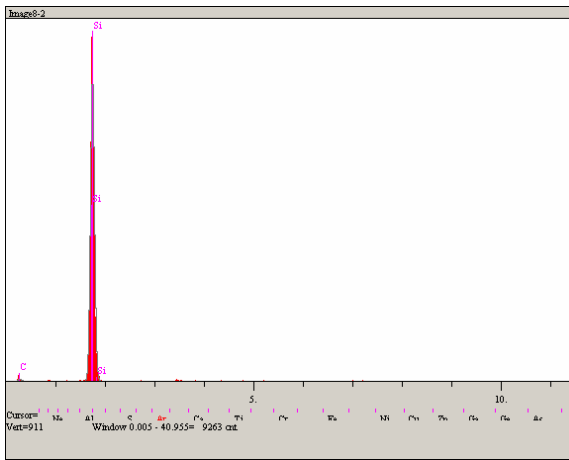
Şekil 7.52. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyi sonrasında çıkan aşınma partiküllerinin SEM görüntüsü

Şekil 7.53.’de ise 20N yük kullanılarak yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmektedir. Görüntüler incelendiğinde, balata yüzeyinden kopup gelen aşınma partiküllerinin kayma etkisi ile disk yüzeyine sıvanmış olduğu görülmektedir.



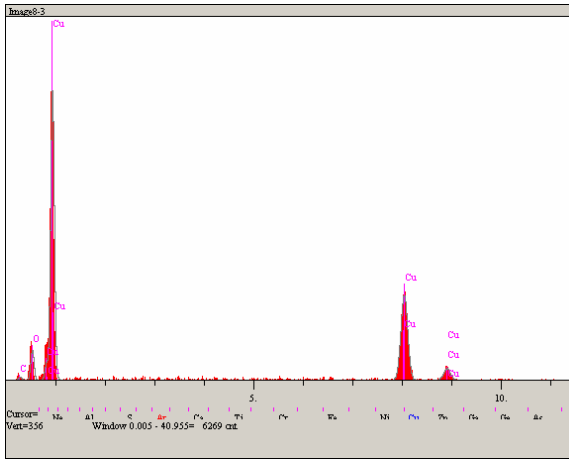
a)

b)



c)

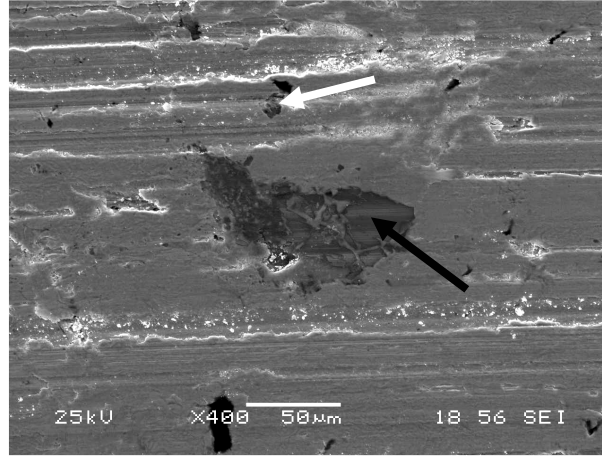
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	6.14	64.624	43.859	wt.%
Si	791.94	35.376	56.141	wt.%
		100.000	100.000	wt.%



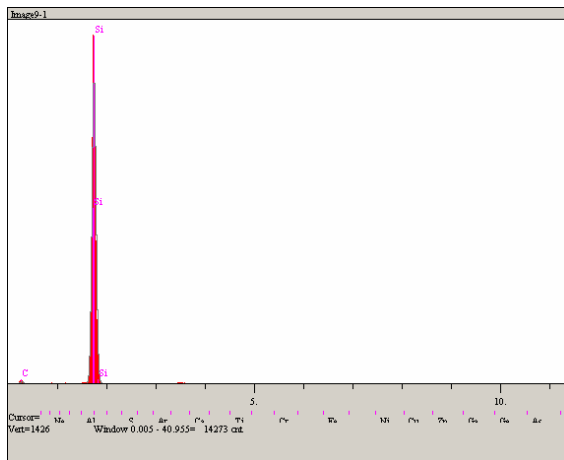
d)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.61	27.801	10.352	wt.%
O	25.44	35.676	17.695	wt.%
Cu	143.84	36.524	71.953	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.53. Cu-2 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn hız ve 20N yük ile yapılan deney sonrasında alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

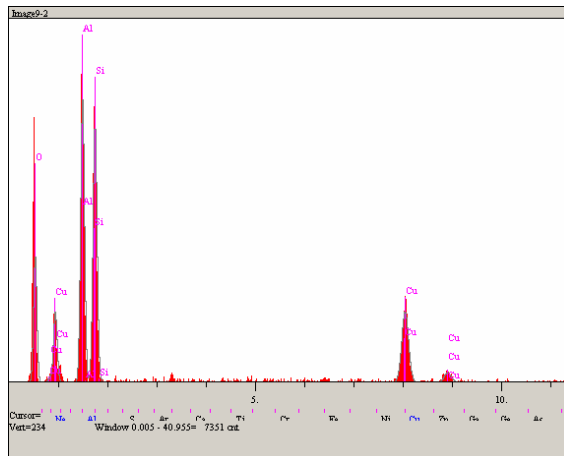


a)



b)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	8.89	63.320	42.470	wt.%
Si	1,251.27	36.680	57.530	wt.%
		100.000	100.000	wt.%



c)

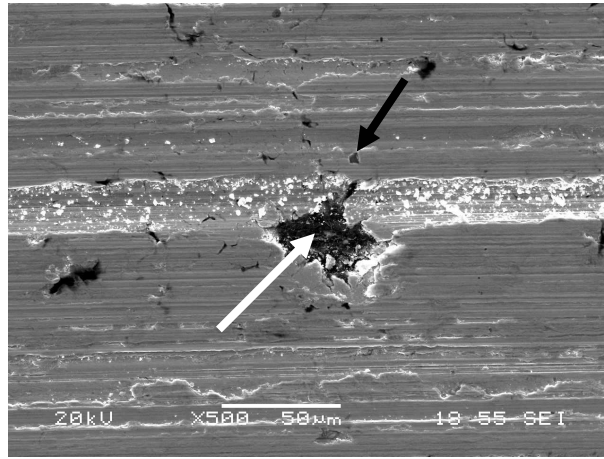
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	69.57	51.389	32.147	wt.%
Al	181.27	19.054	20.261	wt.%
Si	172.42	18.277	20.070	wt.%
Cu	78.34	11.077	27.522	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.54. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası EDS yapılan yüzeyin a) SEM görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

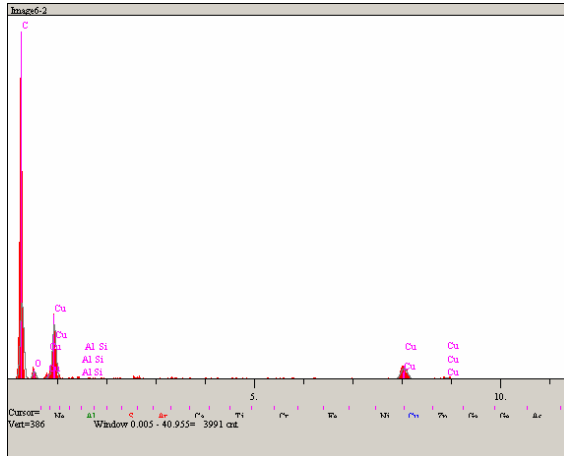
Şekil 7.54b.'den de anlaşılacağı gibi siyah ok ile gösterilen noktada bulunan malzemenin balata yüzeyine gömülen SiC partikülüdür. Beyaz ok ile gösterilen

noktada ise disk yüzeyinden kopup sürtünme arayüzeyinde oksitlenerek balata yüzeyine gömülen, kompozit diskin matriks malzemesi olan Al-Si alaşımının varlığı görülmektedir.

Şekil 7.55.'te 5N yük ve 0,8 m/sn kayma hızı ile yapılan deney sonrası incelenen balata yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizleri verilmiştir.



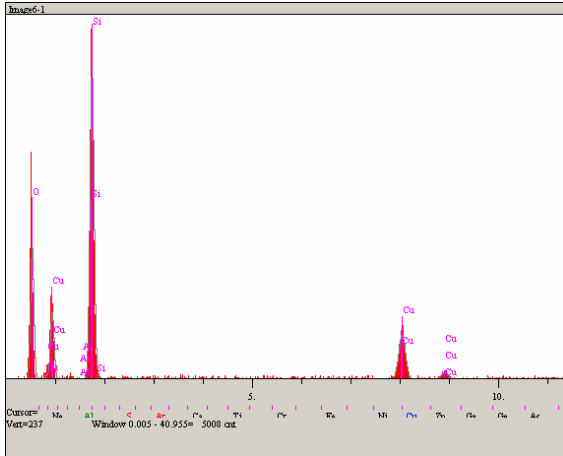
a)

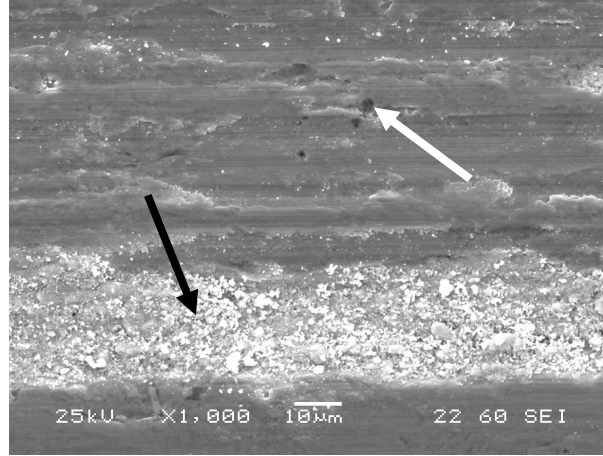


b)

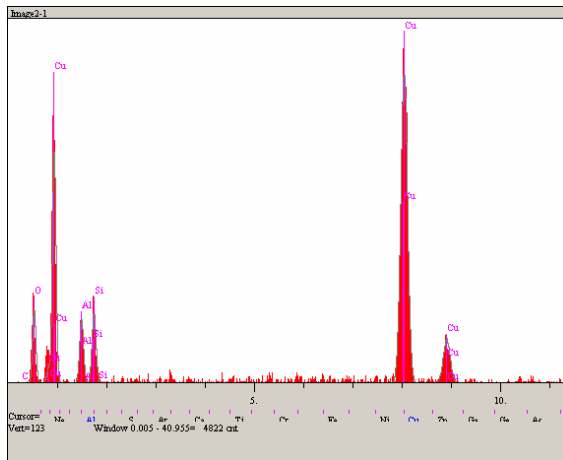
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	75.02	87.166	77.760	wt.%
O	7.11	10.784	12.816	wt.%
Al	0.70	0.041	0.083	wt.%
Si	1.06	0.053	0.110	wt.%
Cu	19.51	1.956	9.231	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.55. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



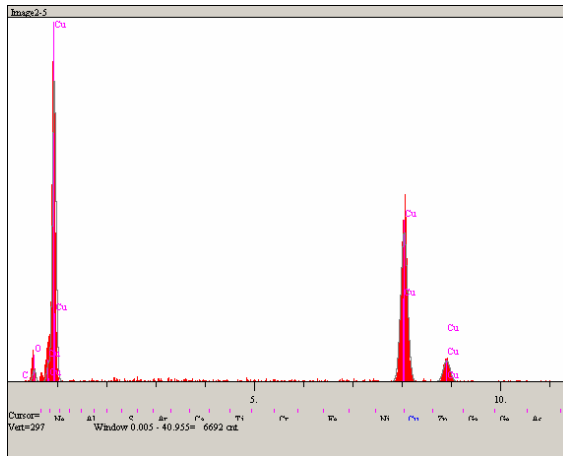


a)



b)

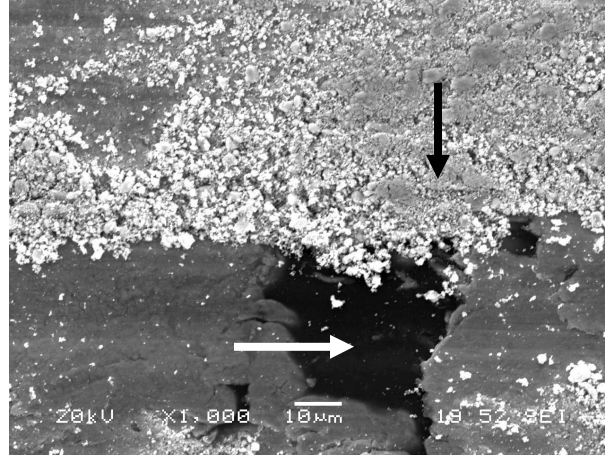
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	21.25	32.605	12.161	wt.%
Al	21.24	7.540	4.743	wt.%
Si	24.18	6.743	4.415	wt.%
Cu	179.51	53.113	78.682	wt.%
		100.000	100.000	wt.%



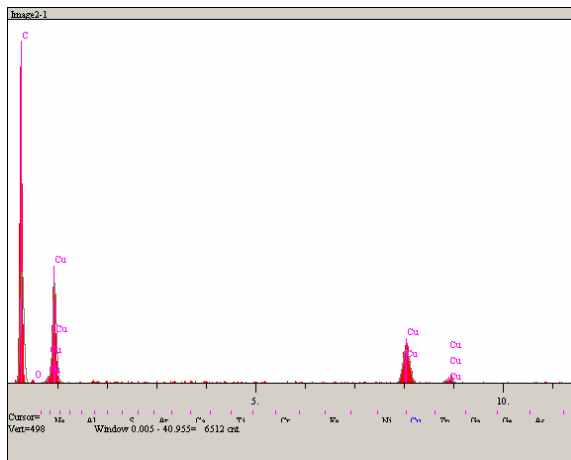
c)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	8.72	17.812	5.174	wt.%
Cu	211.15	82.188	94.826	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.56. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

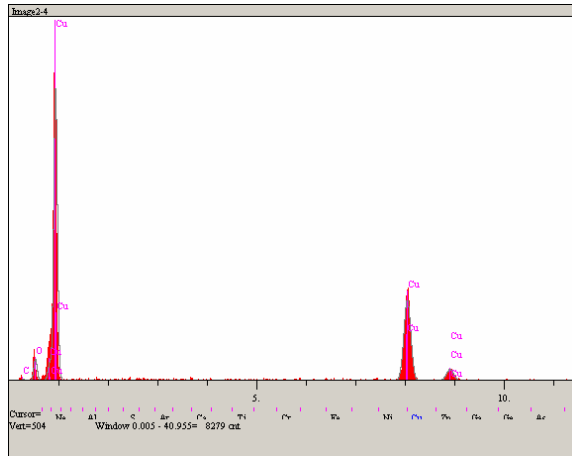


a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	141.95	95.587	81.934	wt.%
O	0.76	0.574	0.655	wt.%
Cu	79.97	3.839	17.411	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)



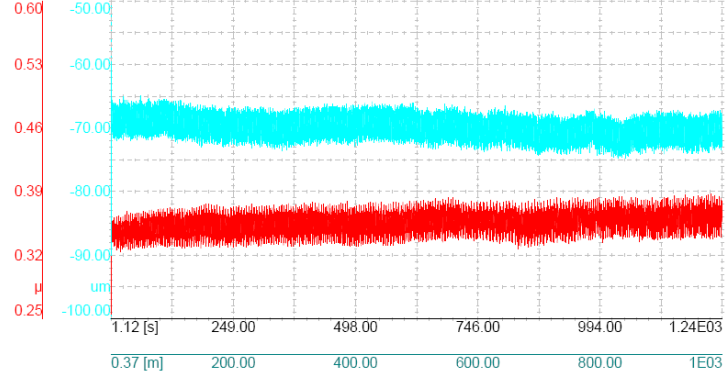
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	1.57	17.882	5.622	wt.%
O	25.52	33.920	14.206	wt.%
Cu	192.52	48.199	80.173	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)

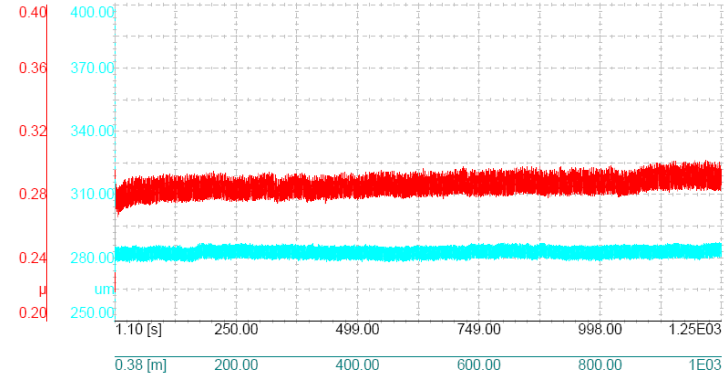
Şekil 7.57. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Cu-%2 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,8 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.58a.'da, 5N yük, 0,8 m/sn hız ile

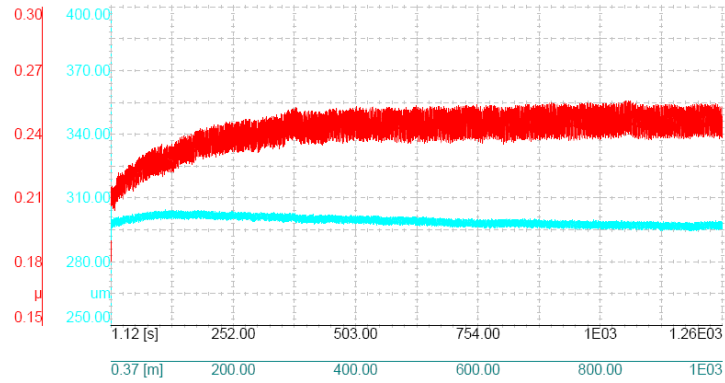
1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.58b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.58c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.58d.'de verilmektedir.



a)

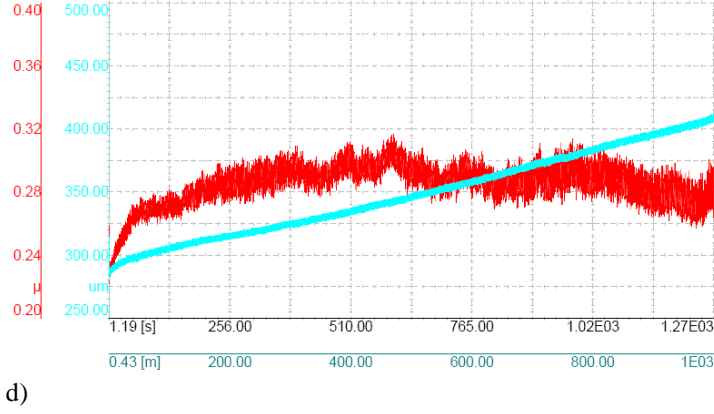


b)



c)

Şekil 7.58. Cu-%2 Gr balata malzemesi a) 2N b) 5N c) 10N d) 20 N yük, 0,8 m/sn kayma hızı ve 1000m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri

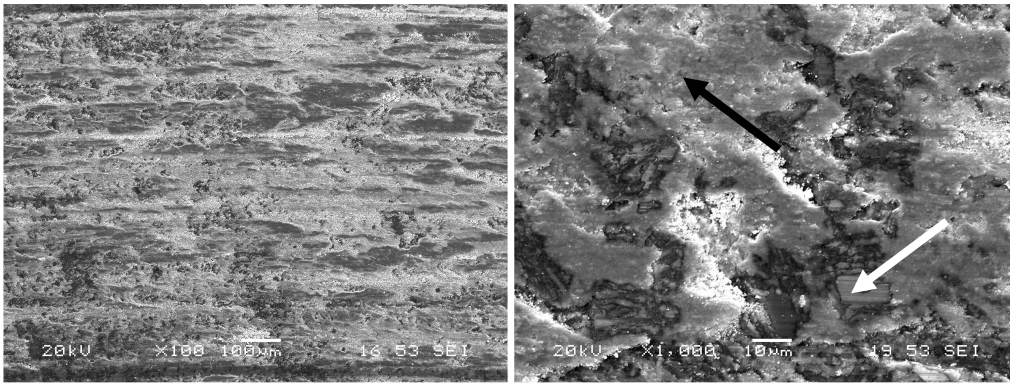


d)

Şekil 7.58. (Devam)

Şekil 7.58a., b, c ve d incelendiğinde, 0,8 m/sn kayma hızında sürtünme katsayısı değerlerinin deney süresince kararlı olduğu görülmektedir. 2N, 5N ve 10N grafiklerinde aşırı bir artış ya da azalma görülmemekle birlikte 20N yük ile yapılan deneyde sürtünme katsayı grafiğinde bazı oynamalar ve aşınma derinliği grafiğinde de sürekli bir artış gözlenmektedir. Sürtünme katsayı grafiğindeki değişimlerin ihmal edilebilir olduğu düşünülmeyle beraber derinlik grafiğindeki artışın balata yüzeyinden disk yüzeyine transfer olan aşınma ürünlerinin etkisi olduğu kesindir.

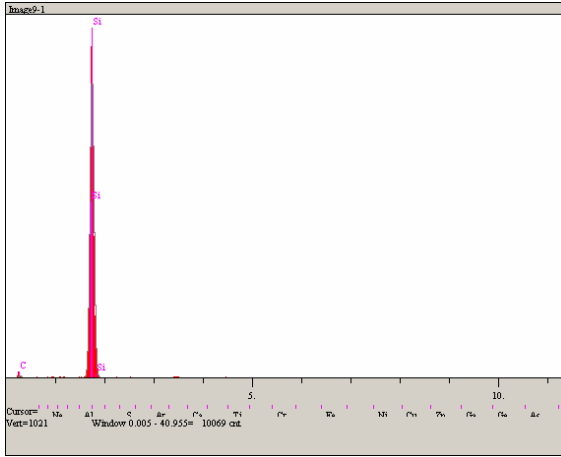
Cu-%2 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn kayma hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinin bitmesinden sonra incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7.59.'da verilmektedir.



a)

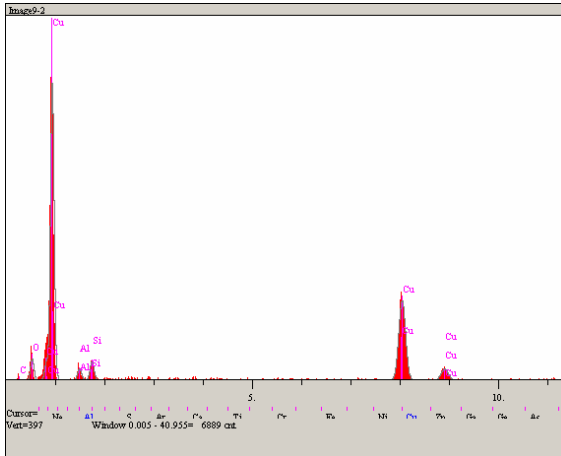
b)

Şekil 7.59. Cu-%2 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinden sonra alınan a), b) Disk yüzeyi SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	6.23	63.309	42.460	wt.%
Si	877.02	36.691	57.540	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	0.43	7.250	2.188	wt.%
O	20.10	33.854	13.610	wt.%
Al	12.34	4.685	3.176	wt.%
Si	21.06	6.208	4.381	wt.%
Cu	149.99	48.002	76.645	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

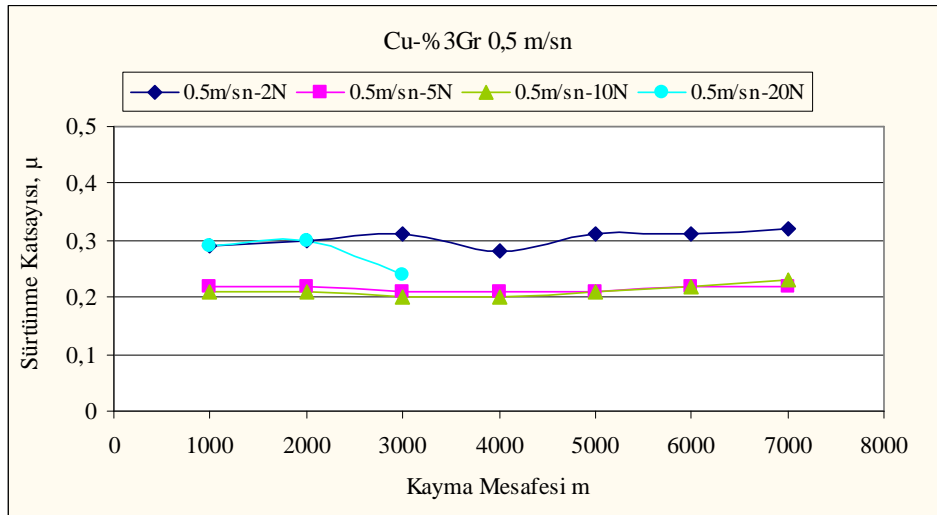
d)

Şekil 7.59. (Devam)

SEM görüntüleri ve EDS analizlerinde farklı aşınma mekanizmaları ile yüzeyden kopan balata malzemesinin disk yüzeyine sıvandığı açıkça görülmektedir.

7.4.3 Cu-%3 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları

Cu-%3 Gr balata malzemesi için farklı mesafelerde ve farklı yükler altında elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları, 0,5 m/sn ve 0,8 m/sn hızlara göre iki farklı grafikte verilmiştir. Şekil 7.60.'ta 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında elde edilen değerlerin grafiği görülmektedir.



Şekil 7.60. Cu-%3 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

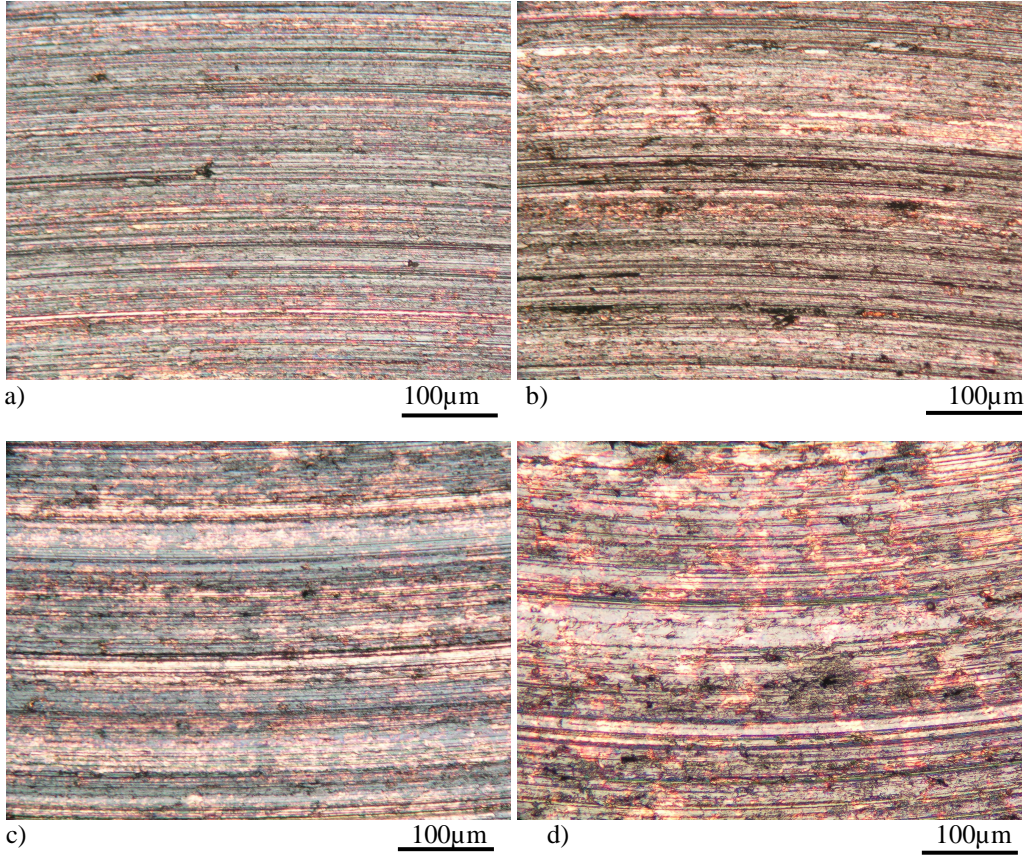
Şekil 7.60.'ta Cu-%3 Gr numunesinin 0,5 m/sn sabit kayma hızı değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kayma mesafesine göre verilmektedir. Grafik incelendiğinde, 2N yük ile yapılan deneylerde elde edilen katsayı değerlerinin 5N ve 10N yüklerle yapılan deney sonuçları ile kıyaslandığında yüksek çıktığı görülmektedir.

5N ve 10N'luk yükler ile elde edilen grafiklere bakıldığında, artan yük ile sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Cu-%1 Gr ve Cu-%2 Gr balata malzemesinin deney sonuçları incelenirken de bahsedildiği üzere, normal yükün artmasıyla sürtünme katsayısında düşüş olması, artan yük ile kayan yüzeyler arasında tribosist tabaka oluşumunun desteklenmesi sonucu yağlayıcı olarak davranan oksit tabakasının sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşe sebep olmasına bağlanmaktadır.

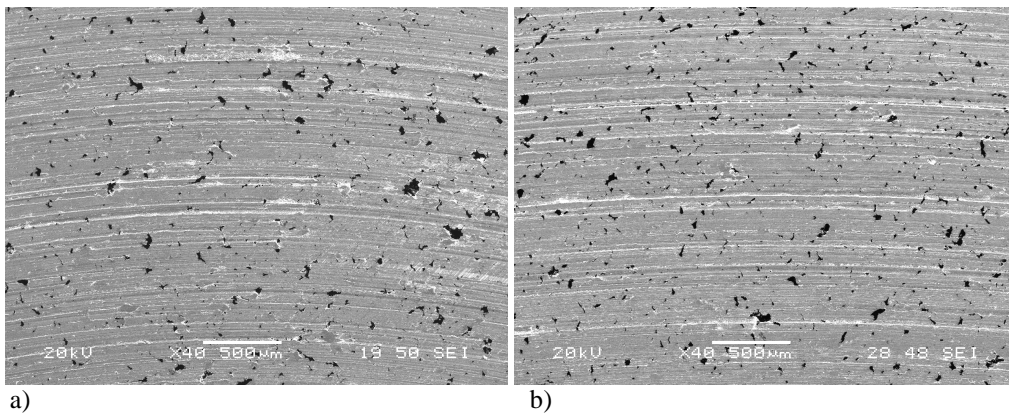
20N yük ile yapılan deney sonucu elde edilen μ -mesafe grafiği başlangıçta 2N'la aynı değerlere sahipken artan mesafe ile μ değerinde düşüş görülmektedir. Bunun sebebi, incelenen diğer balatalara nazaran artan takviye oranının, belirli bir mesafe sonunda kayma arayüzeyinde etkin yağlayıcılık sağlaması olabilir.

Şekil 7.61.'de verilen optik mikroskop görüntüleri ve Şekil 7.62.'de verilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri birlikte incelendiğinde Şekil 7.60'ta verilen sürtünme katsayısı-mesafe grafiklerini destekleyecek şekilde görüntülerin elde edildiği

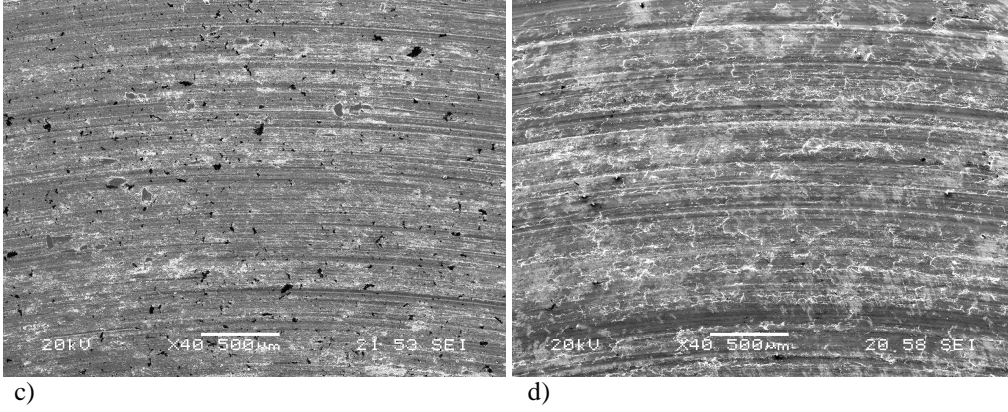
görülebilecektir. 2N’da düşük yük sebebiyle daha az aşınma çizgisi, 5N ve 10N’da artan yük ile aşınma yüzey çizgilerinin görülme sıklığında ve derinliğinde artış gözlemlenmekle birlikte bu durum SEM görüntülerinde daha açık görülebilmektedir.



Şekil 7.61. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları



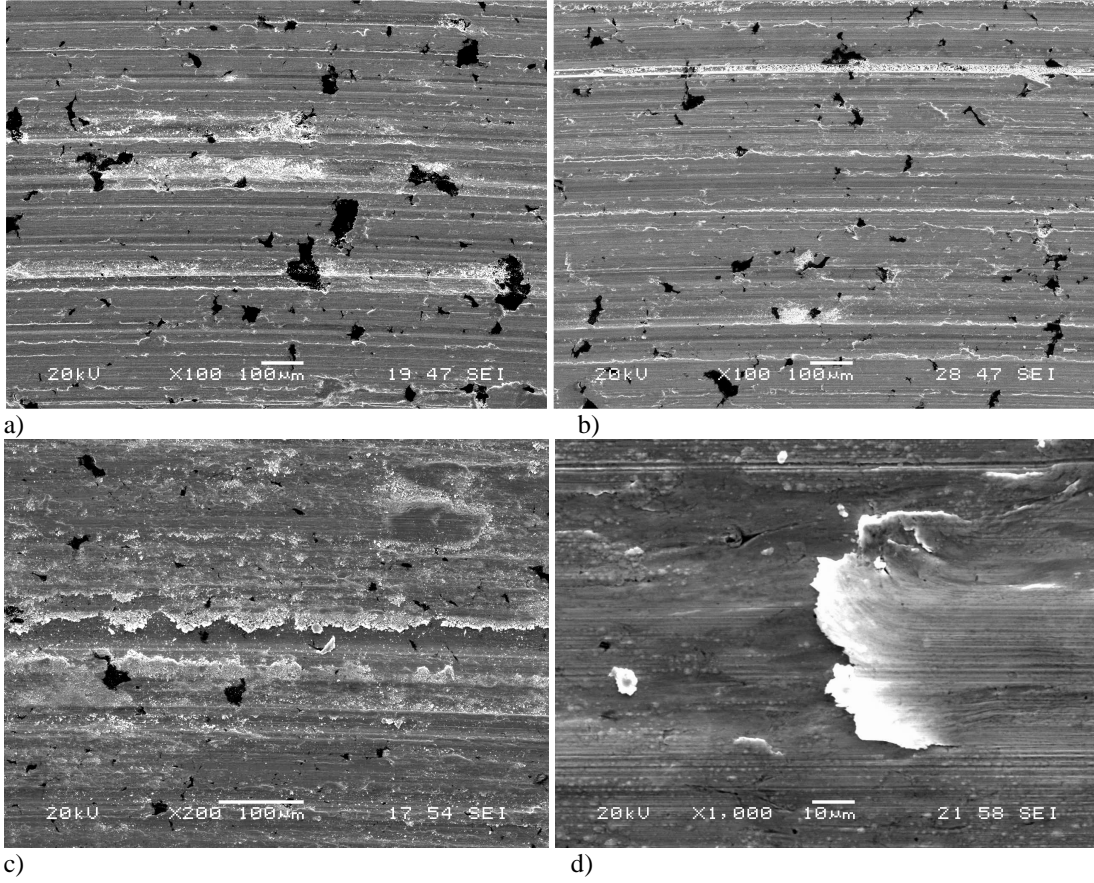
Şekil 7.62. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aynı büyütmede çekilen SEM görüntüleri



Şekil 7.62. (Devam)

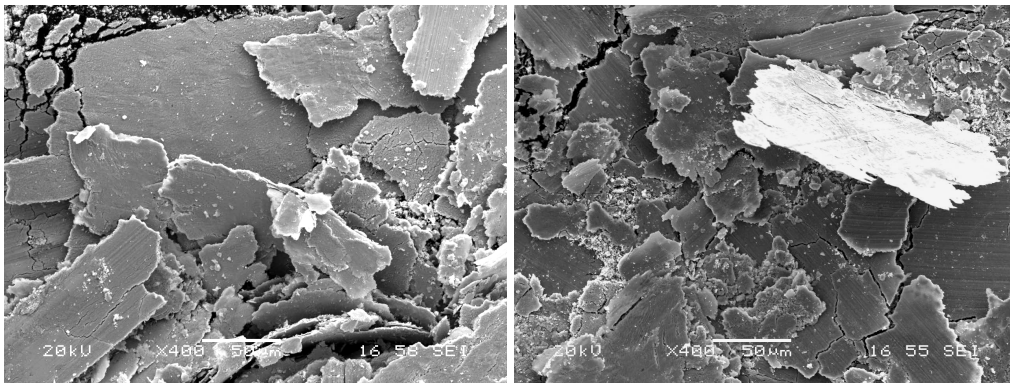
Şekil 7.62. ve Şekil 7.63.'e birlikte bakıldığında da artan yük ile aşınma yivlerinde derinleşme gözlenirken artan grafit miktarının etkisi de Şekil 7.63a.'da ok ile gösterilen yerde açıkça görülmektedir. Aşındırıcı partikül, grafit partikülüne kadar kompozit matriksini çizmiş, grafit ile karşılaşınca üzerinden kayarak yüzeyde herhangi bir iz oluşturmayacak şekilde ilerlemiştir. Balata yüzeylerinde baskın aşınma mekanizması kızaklama ve pulluklama tipi abrazyif aşınma olduğu görülmektedir.

Şekil 7.62d. ve Şekil 7.63d.'deki 20N yük kullanılan deney sonrası alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, %1 ve %2 grafit takviyeli balataların aynı yükteki deneylerinden elde edilen görüntülerle benzer olmayan aşınma yüzey görüntüsü elde edilmiştir. Malzemede deformasyon olmakla birlikte, 5N ya da 10N'da olduğundan da fazla deforme olduğu söylenemez. Baskın aşınma mekanizmasının abrazyif aşınma olduğu, SEM fotoğrafında da görüldüğü gibi özellikle pulluklama mekanizması ve sert SiC partikül içeren disk yüzeyi tarafından delaminasyon aşınmasına uğratıldığı düşünülmektedir.



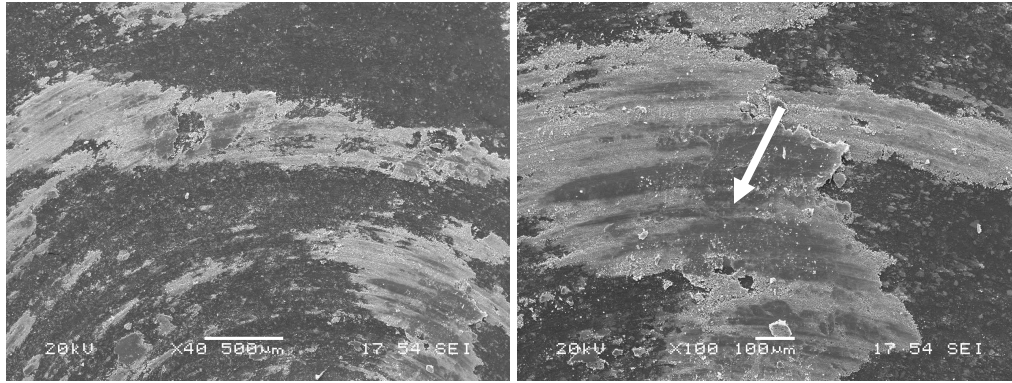
Şekil 7.63. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında farklı büyütmelerde çekilen SEM görüntüleri

Şekil 7.64.'te 20N yük kullanılarak yapılan deneyde tribosistem dışına çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri görülmektedir.



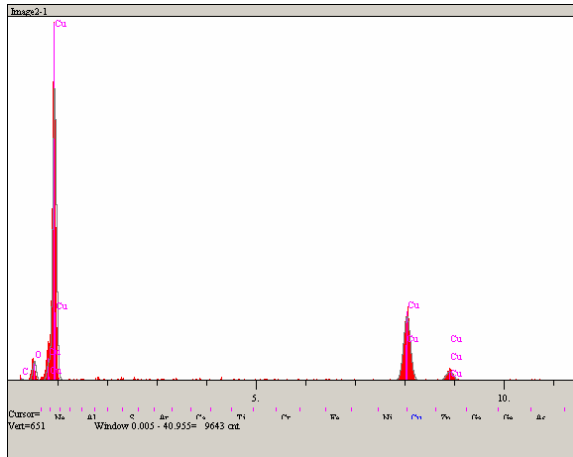
Şekil 7.64. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyi sonrasında çıkan aşınma partiküllerinin SEM görüntüsü

Şekil 7.65.'te Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizi verilmektedir. Görüntü ve analizler incelendiğinde aşınma ile balata yüzeyinden kopan aşınma ürünlerinin disk yüzeyine sıvandığı görülmekle birlikte EDS analizinde görülen oksijen piki yüzey oksitlerinin varlığını göstermektedir.



a)

b)



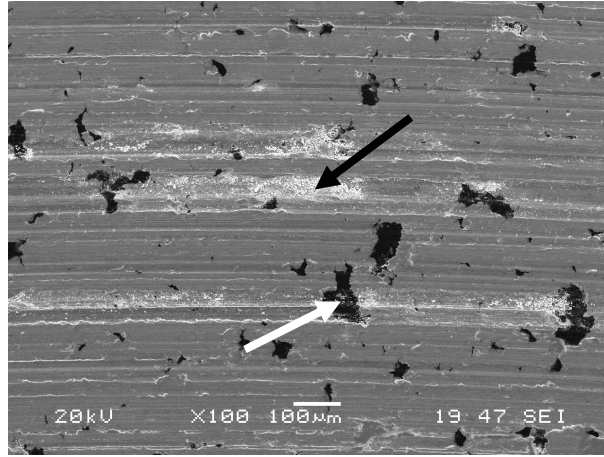
c)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	1.58	16.714	5.374	wt.%
O	30.12	36.973	15.836	wt.%
Cu	197.50	46.313	78.789	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

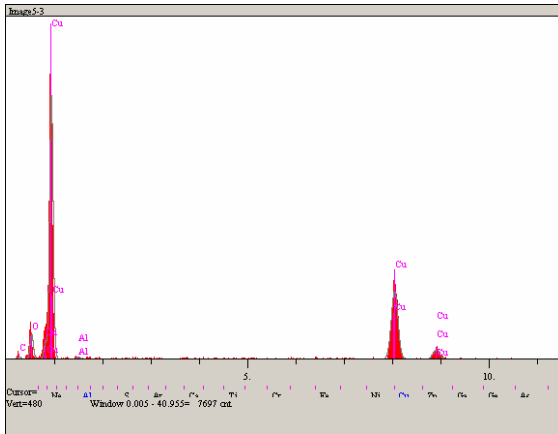
Şekil 7.65. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b) görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.66.'da 2N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrası alınan balata yüzey görüntüsü ve analizinde, yüzeyde yağlayıcılığı sağlayan grafitlerin bulunduğu, disk yüzeyinden transfer olan Al ve sürtünmeden dolayı oluşan tribooksitlerin varlığı görülmektedir.

Şekil 7.67.'de verilen 5N yük ve 0,5 m/sn kayma hızında yapılan deneylerde elde edilen görüntü ve analizlerde, disk yüzeyinden kopan SiC'ün balata yüzeyine transfer olduğu ve bunun yanında yüzeyde grafitin bulunduğu da anlaşılmaktadır.

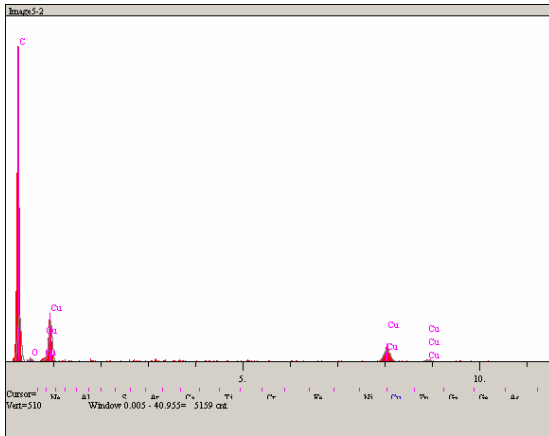


a)



b)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	3.13	28.323	10.694	wt. %
O	29.62	35.408	17.808	wt. %
Al	3.33	0.828	0.702	wt. %
Cu	164.65	35.441	70.796	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

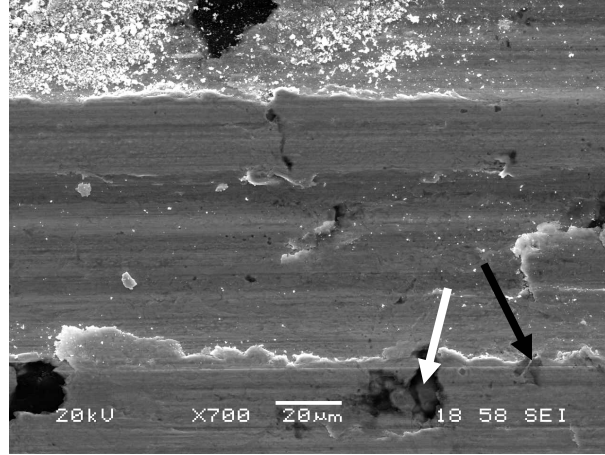


c)

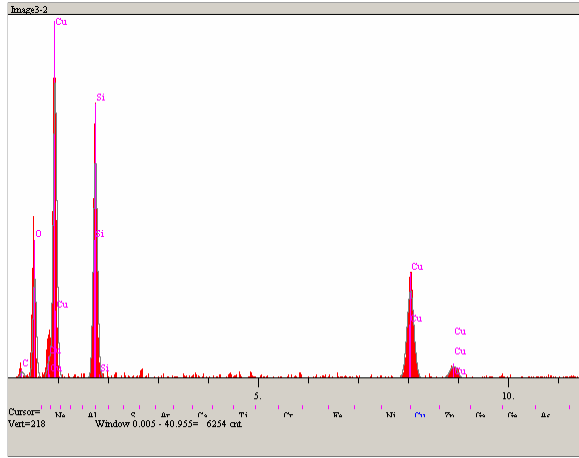
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	63.63	90.453	77.941	wt. %
O	3.99	6.293	7.223	wt. %
Cu	30.79	3.254	14.836	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

Şekil 7.66. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.67.'de 5N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen Cu-%3 Gr balata malzemesinin SEM görüntüsü ve EDS analizlerinde görüldüğü üzere balata yüzeyinde sürtünme ve aşınma etkisi ile kopan aşınma ürünlerinin varlığı görülmektedir. Oksijen piki, sürtünme etkisi ile oluştuğu düşünülen tribooksitlerin varlığını göstermektedir.



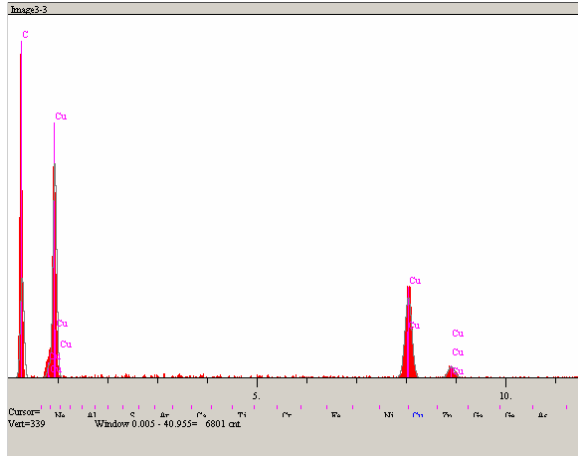
a)



b)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	3.38	25.196	12.942	wt. %
O	51.44	46.463	31.791	wt. %
Si	137.09	14.343	17.227	wt. %
Cu	90.74	13.998	38.041	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

Şekil 7.67. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



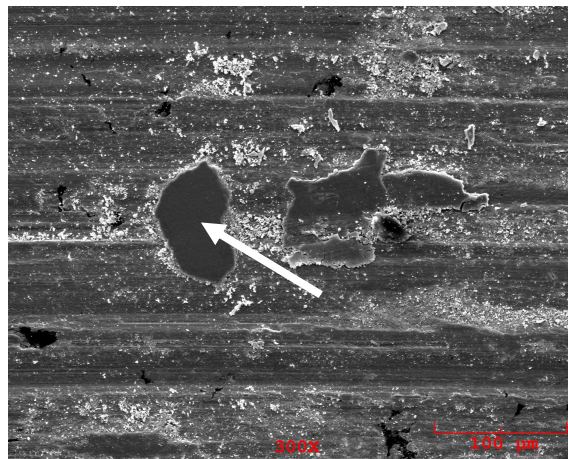
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	87.08	92.828	70.983	wt.%
Cu	130.02	7.172	29.017	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)

Şekil 7.67. (Devam)

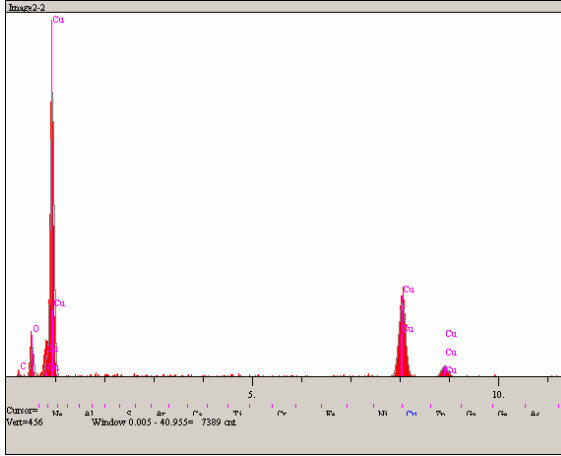
10 yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen Cu-%3 Gr balata malzemesinin SEM görüntüsü ve EDS analizlerinde (Şekil 7.68.) ise sürtünme ve aşınma etkisi ile balata yüzeyinden plaka şeklinde kopan aşınma ürünlerinin tekrar balata yüzeyine yapıştığı ve tribosistemden uzaklaşmayıp yeni bir aşınma yüzeyi oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 7.69.'de verilen 20N yük ile yapılan deneylerde alınan SEM görüntüsünde ve EDS analizinde karşı yüzey olan disk malzemesinden kopan aşınma partikülünün balata yüzeyine gömüldüğü anlaşılmaktadır. Beyaz ok ile gösterilen ve EDS analizinden balata malzemesi olduğu anlaşılan aşınma partikülünün de balata yüzeyini çizerek yiv oluşumuna sebep olduğu görülmektedir.



a)

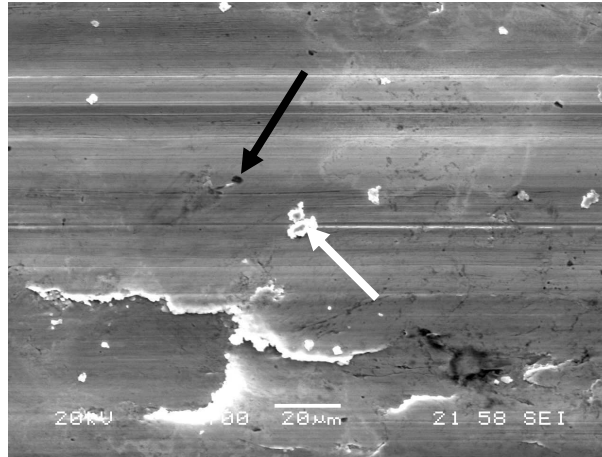
Şekil 7.68. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



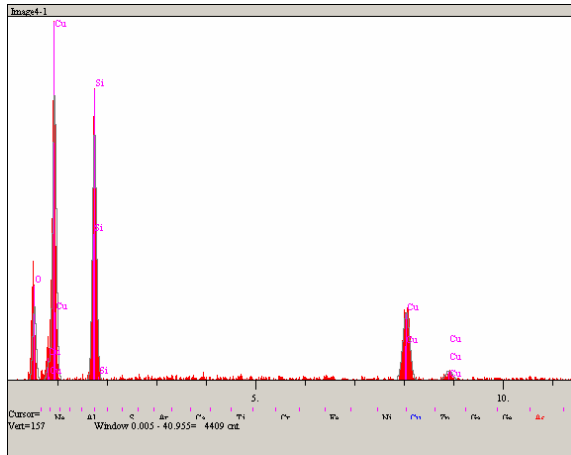
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.48	23.669	8.788	wt.%
O	32.82	39.959	19.763	wt.%
Cu	159.45	36.373	71.449	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

Şekil 7.68. (Devam)



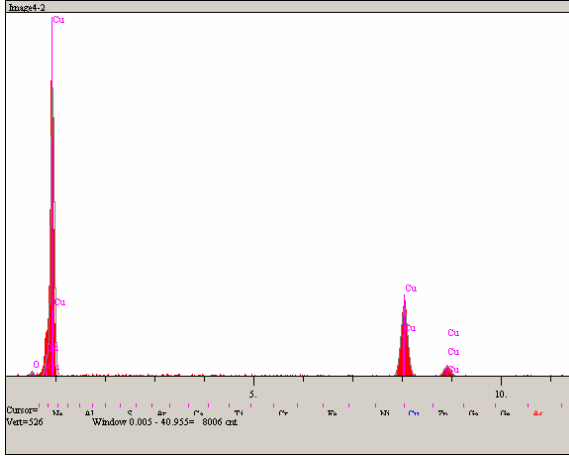
a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	27.41	52.911	29.911	wt.%
Si	112.08	28.446	28.229	wt.%
Cu	50.81	18.643	41.860	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

Şekil 7.69. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

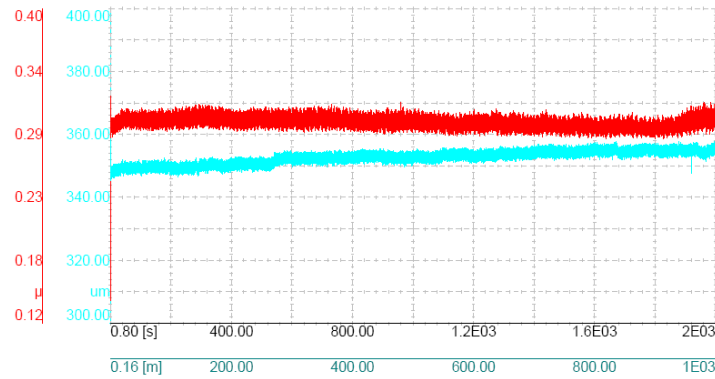


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	5.37	14.271	4.022	wt.%
Cu	170.58	85.729	95.978	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)

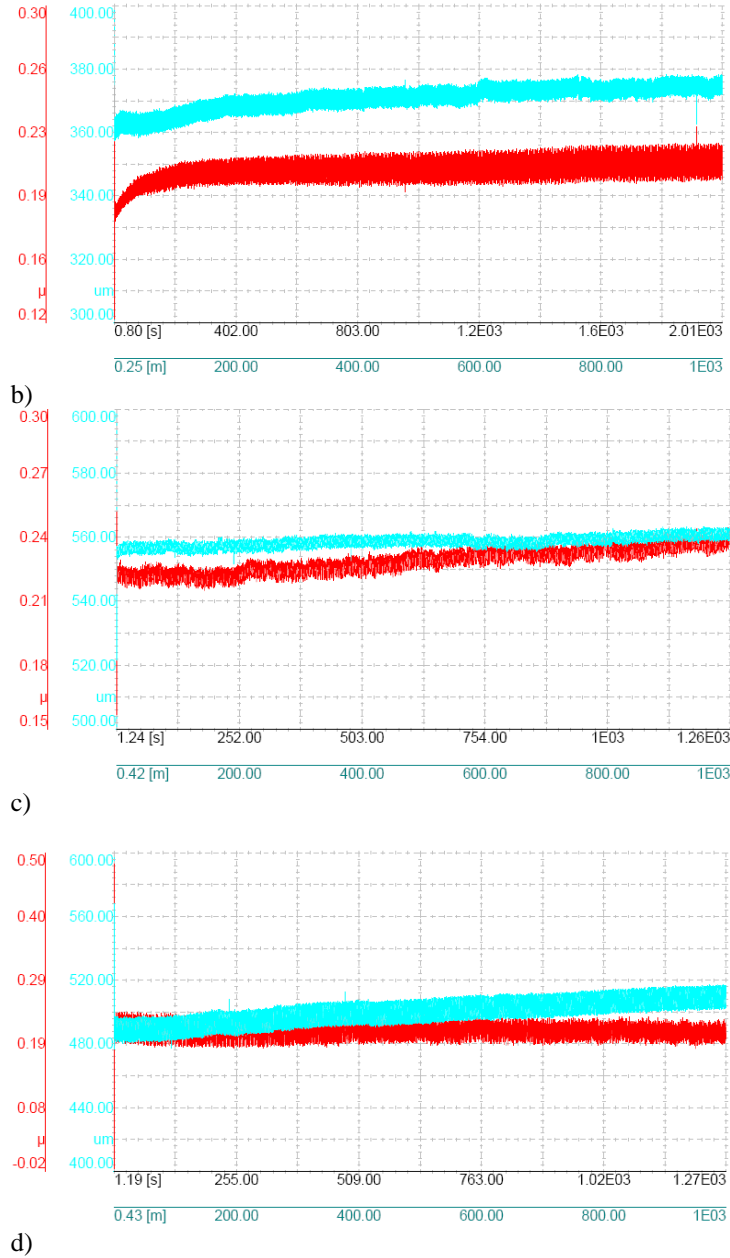
Şekil 7.69. (Devam)

2N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.70a.' da, 5N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.70b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.70c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.70d.'de verilmektedir. Şekil 7.70a., b, c ve d incelenirse, 0,5 m/sn hız ile 1000m boyunca tüm yüklerde kaydedilen sürtünme katsayısı değerlerinin kararlı olduğu, deney süresince aşırı bir artma ya da azalma göstermediği görülmektedir.



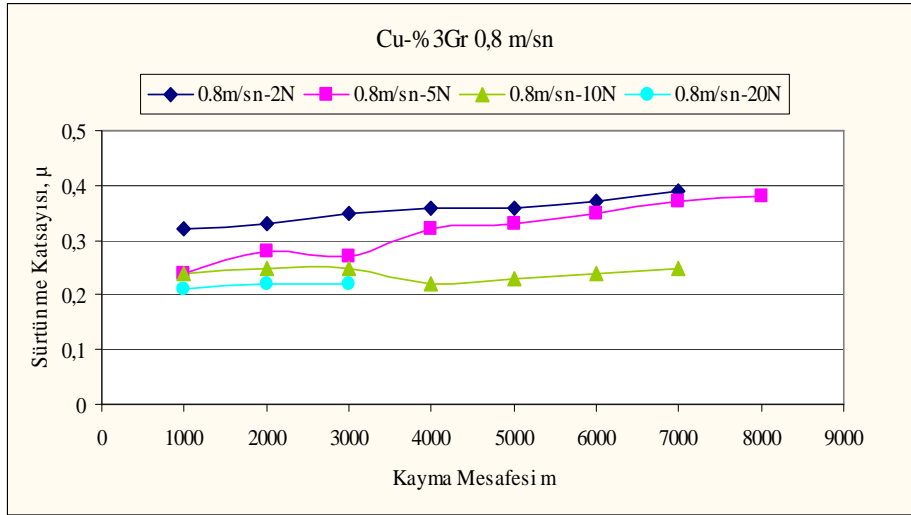
a)

Şekil 7.70. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c)10N d) 20 N yük, 0,5 m/sn kayma hızı ve 1000m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri

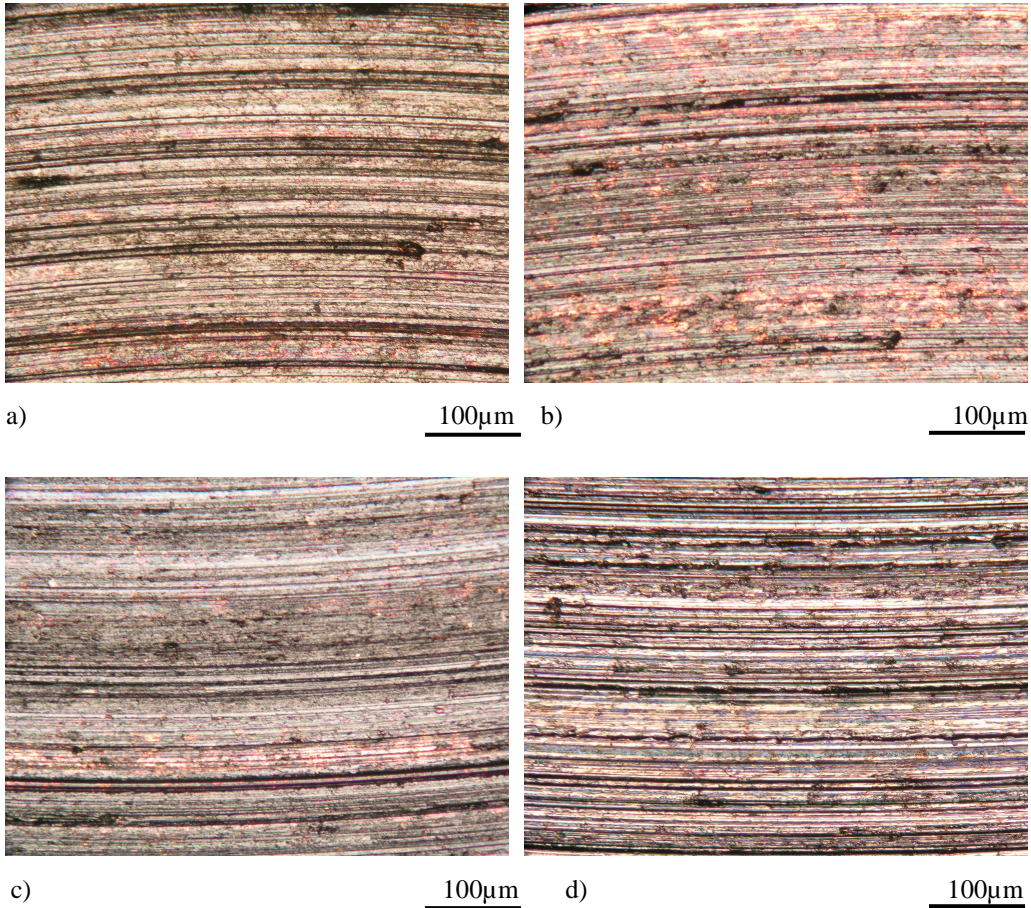


Şekil 7.70. (Devam)

Şekil 7.71.'de Cu-%3 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn sabit hız değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, kayma mesafesine göre verilmektedir. Grafik incelendiğinde, 2N yük ile yapılan deneylerde elde edilen katsayı değerlerinin en yüksek çıktığı, bununla birlikte artan mesafe ile 5N yükteki katsayı değerlerinin 2N'daki değerlere yaklaştığı görülmektedir. Önceki bölümlerde de aktarıldığı üzere yükün artmasıyla sürtünme katsayı değerlerinde görülen azalma bu grafikte de açıkça gözlenmektedir. 10N ve 20N yüklerde düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir.



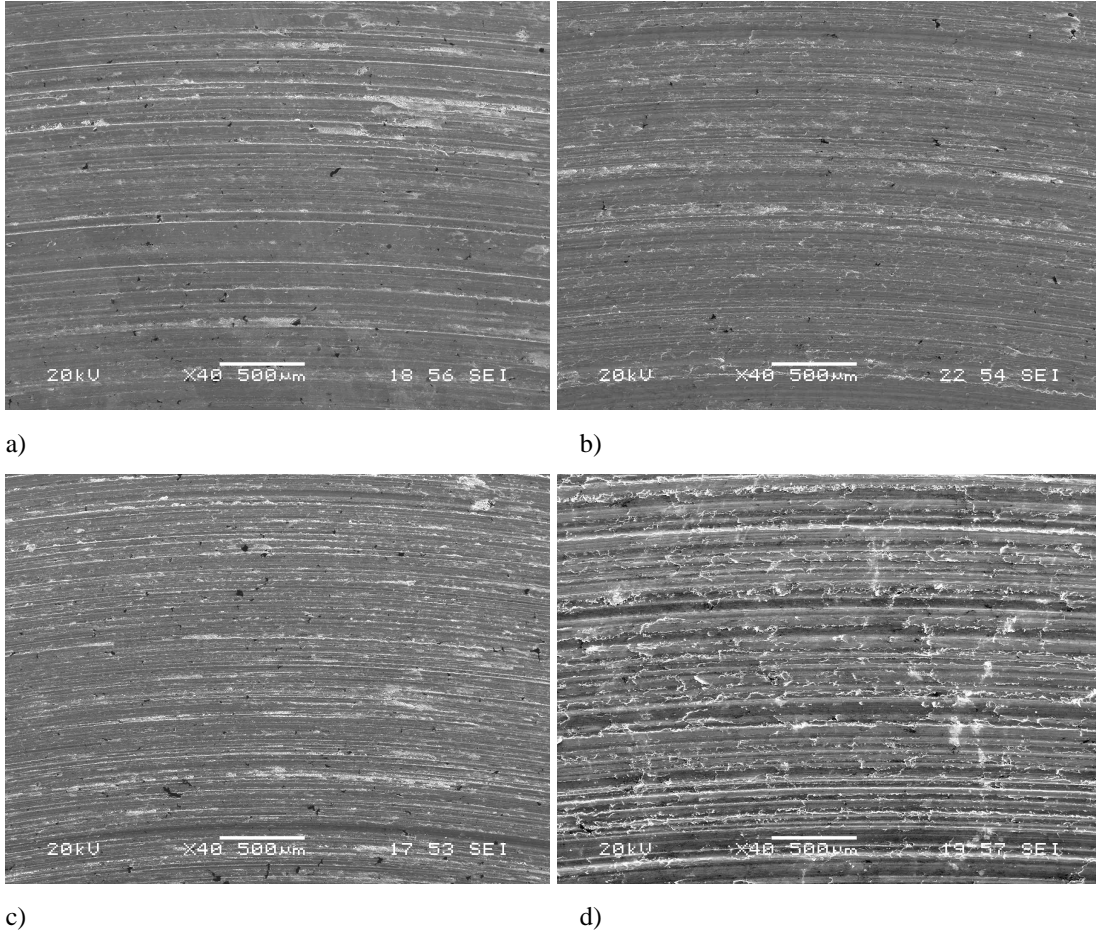
Şekil 7.71. Cu-%3 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle göre sürtünme katsayı değerleri



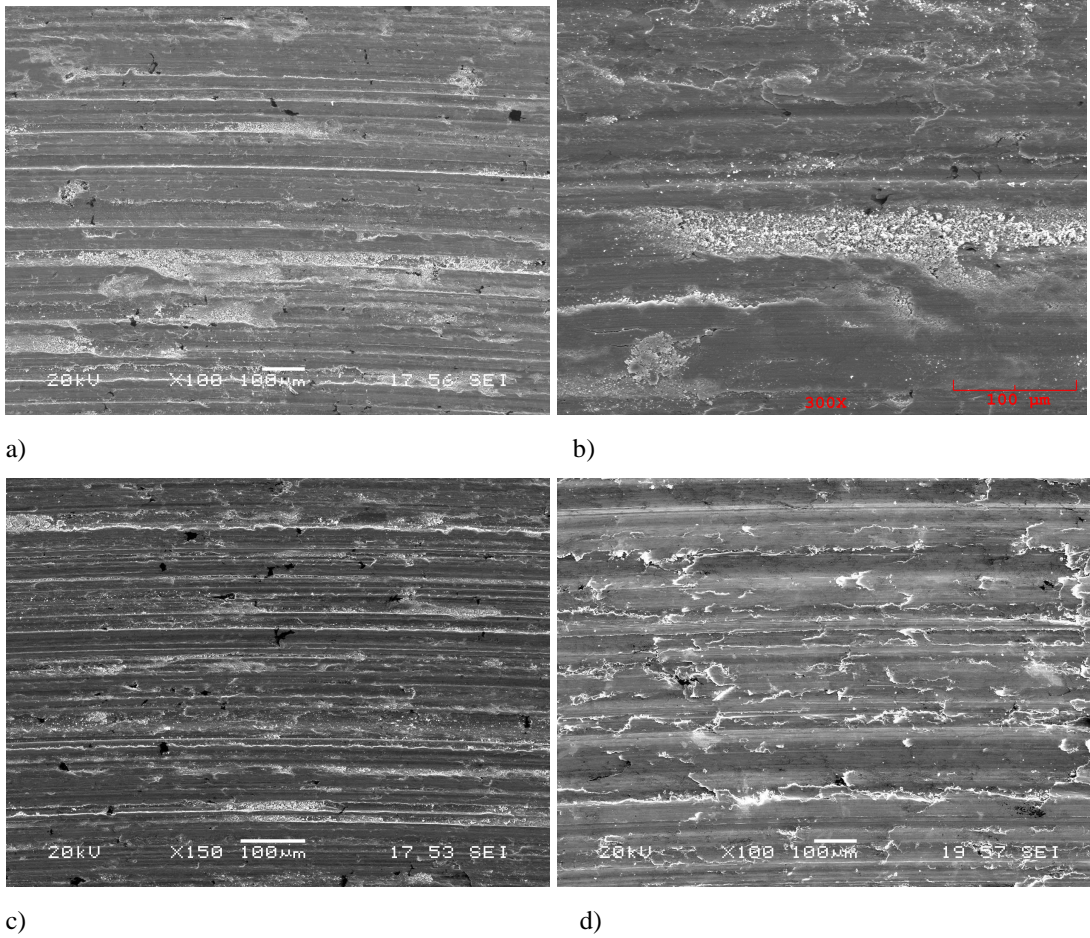
Şekil 7.72. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları

Şekil 7.72.'de verilen optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, tüm yüklerde Cu-%3 Gr balata malzemesinin yüzeyinde aşınma yivlerinin oluştuğu, %1 ve %2 grafit içeren balata malzemelerine nazaran grafitin katı yağlayıcı olarak aşınma yüzeylerine sıvandığı ya da yayıldığı görülmektedir.

Şekil 7.73. ve Şekil 7.74.'te verilen SEM görüntülerine bakıldığı zaman, 2N'dan 10N'a doğru yükün artmasıyla aşınma yivlerinin ve yerel deformasyonların arttığı görülmekle birlikte 20N yük ile yapılan deney sonrası elde edilen SEM görüntüsünde aşınma ve deformasyon mekanizmasının abrazif aşınmadan çok delaminasyon olduğu görülmektedir.



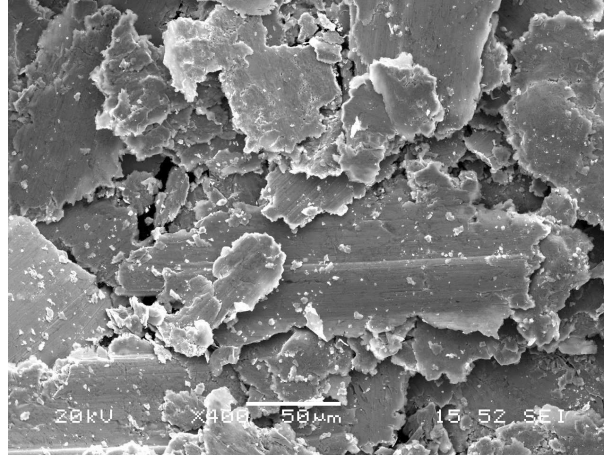
Şekil 7.73. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aynı büyütmeye çekilen SEM görüntüleri



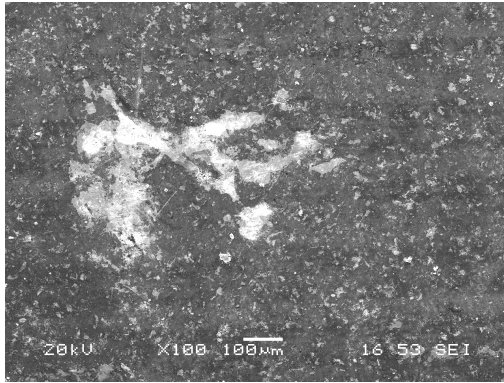
Şekil 7.74. Cu-%3 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yüklerde, 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında farklı büyütmelerde çekilen SEM görüntüleri

Şekil 7.74.'te verilen SEM görüntülerinde balata yüzeylerinin sürtünme ve aşınma etkisi ile karşı yüzeydeki sert SiC partiküller ve arayüzeyde abrazif aşındırıcı gibi davranan aşınma ürünleri tarafından abrazif aşınmaya uğratıldıkları görülmektedir. Şekil 7.74d.'de verilen 20N yük ile yapılan deney sonunda alınan görüntüde ise kızaklama abrazif aşınmasının yanı sıra delaminasyon ile plaka halinde yüzeyden malzeme kalktığı ve Şekil 7.75.'te görülen aşınma ürünlerinin tribosistem dışına çıktığı görülmektedir.

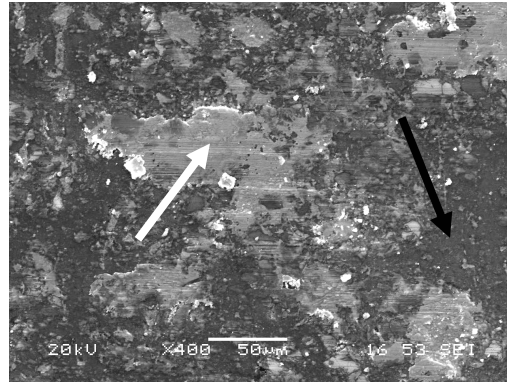
Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7.76.'da verilmektedir.



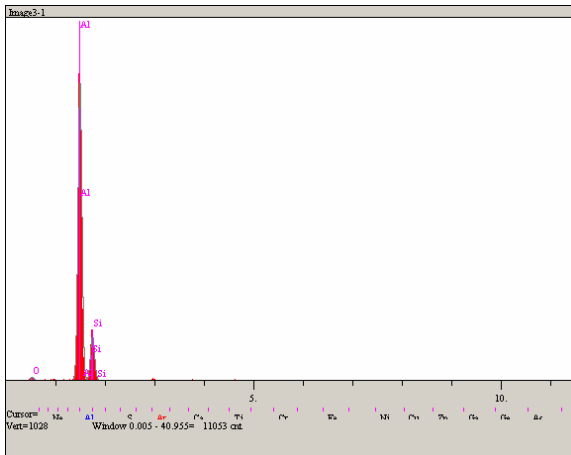
Şekil 7.75. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyi sonrasında çıkan aşınma partiküllerinin SEM görüntüsü



a)



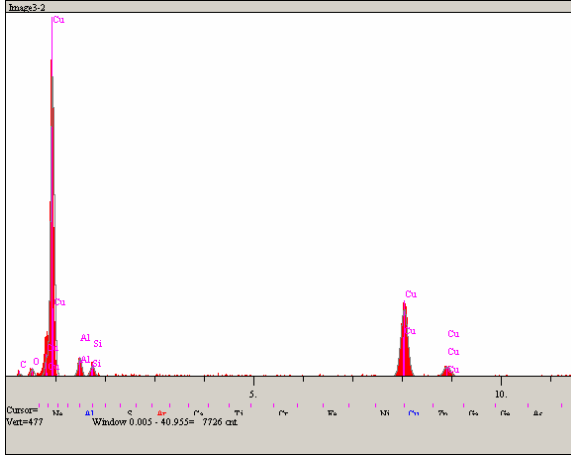
b)



c)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	7.79	11.113	6.837	wt.%
Al	838.16	66.588	69.082	wt.%
Si	128.67	22.299	24.081	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.76. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.65	35.234	12.082	wt.%
O	8.21	13.589	6.207	wt.%
Al	24.06	7.288	5.614	wt.%
Si	14.40	3.480	2.790	wt.%
Cu	152.11	40.408	73.307	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

d)

Şekil 7.76. (Devam)

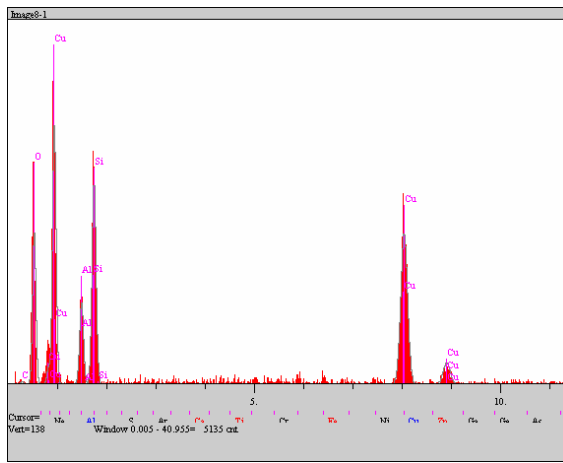
SEM görüntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde disk yüzeyine sıvıyan balata malzemesinin varlığı görülmekle birlikte, %1 ve %2 grafitli balata malzemelerinin aynı yük ve hız değerlerinde yapılan deneyleri sonrası alınan görüntülerinde, disk yüzeyine sıvıyan balata aşınma ürünlerinin, geniş tabakalar halinde yayıldığı gözlenmiş, %3 grafit miktarında ve 0,8 m/sn kayma hızında disk yüzeyinde daha az aşınma ürününün bulunduğu anlaşılmıştır.

Cu-%3 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında 2N yük ile yapılan deneyler sonrası alınan yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.77.'de, 5N yükteki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.78.'de, 10N yük ile yapılan deney sonrasında elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.79.'da ve 20N yükteki SEM görüntüsü ve EDS analizi de Şekil 7.80.'de verilmiştir.

Şekil 7.77.'de, 2N yük ile yapılan deneyler sonrası elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Görüntüde, karşı yüzeyden kopan bazı aşınma ürünlerinin balata yüzeyine gömüldüğü, balata yüzeyinden kopan aşınma ürünlerinin ise yine balata yüzeyindeki aşınma izlerinin üzerinde biriktiği görülmektedir.

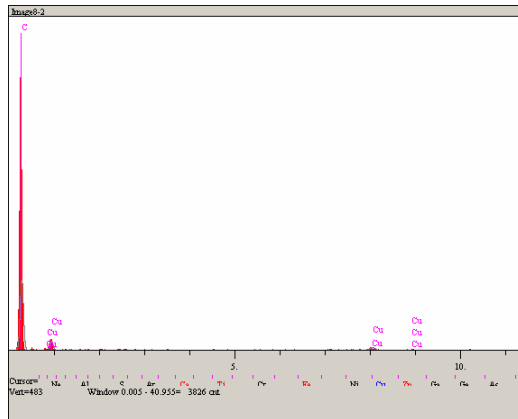


a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	0.65	7.303	3.151	wt.%
O	49.37	52.772	30.337	wt.%
Al	30.71	6.093	5.907	wt.%
Si	79.79	13.061	13.180	wt.%
Cu	98.41	20.771	47.425	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

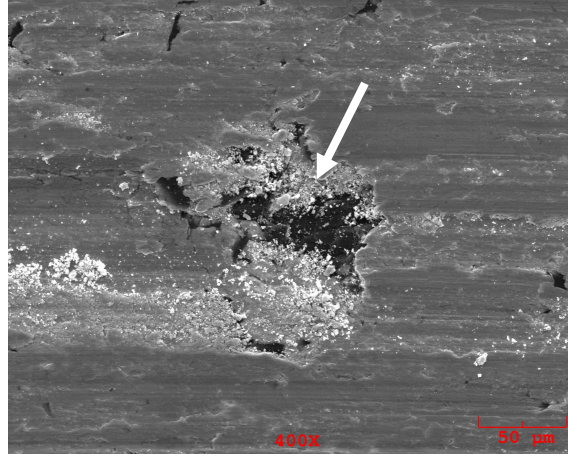
b)



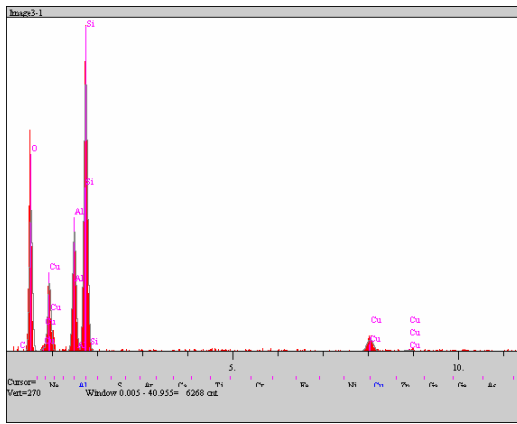
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	94.68	99.103	95.429	wt.%
Cu	7.13	0.897	4.571	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

c)

Şekil 7.77. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktann EDS analizi c) Beyaz ok ile gösterilen noktann EDS analizi



a)

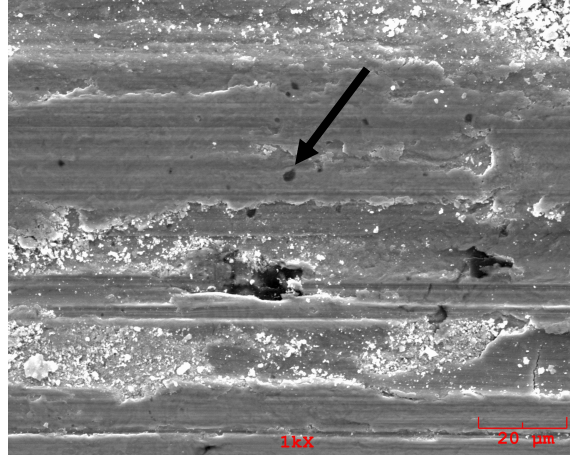


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	98.54	68.332	52.948	wt. %
Al	96.34	8.804	11.505	wt. %
Si	229.24	20.274	27.577	wt. %
Cu	17.36	2.590	7.970	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

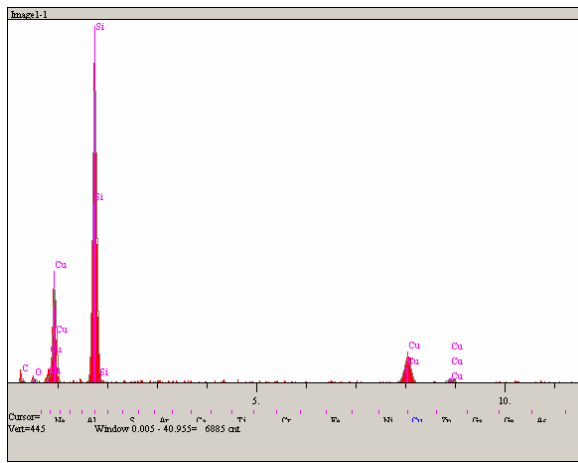
b)

Şekil 7.78. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.78., Şekil 7.79. ve Şekil 7.80.'de verilen Cu-%3 Gr balata malzemesinin sırayla 5N, 10N, 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyleri sonrası alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde karşı yüzeyden kopup gelen aşınma ürünlerinin balata aşınma yüzeyine battığı ya da gömüldüğü görülmektedir.



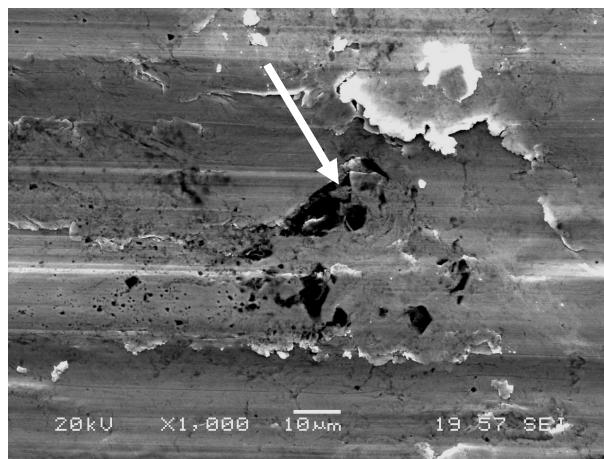
a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	5.17	54.981	31.492	wt.%
O	5.25	7.569	5.775	wt.%
Si	379.41	30.014	40.199	wt.%
Cu	50.82	7.436	22.534	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

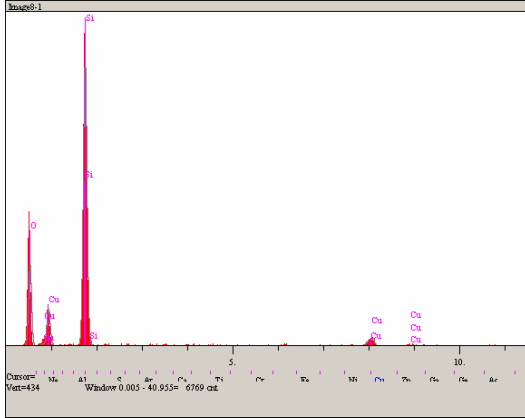
b)

Şekil 7.79. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



a)

Şekil 7.80. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



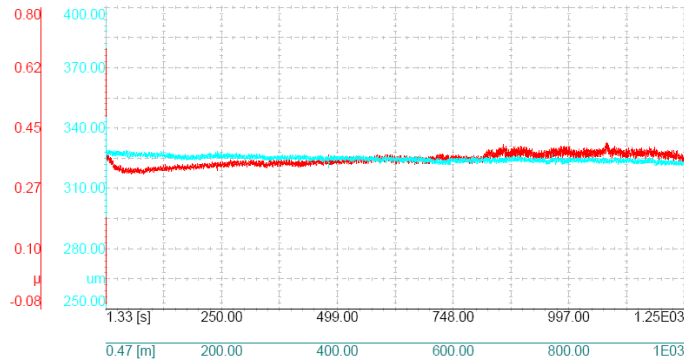
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	90.10	67.834	52.207	wt.%
Si	383.90	29.624	40.023	wt.%
Cu	16.68	2.542	7.770	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

b)

Şekil 7.80. (Devam)

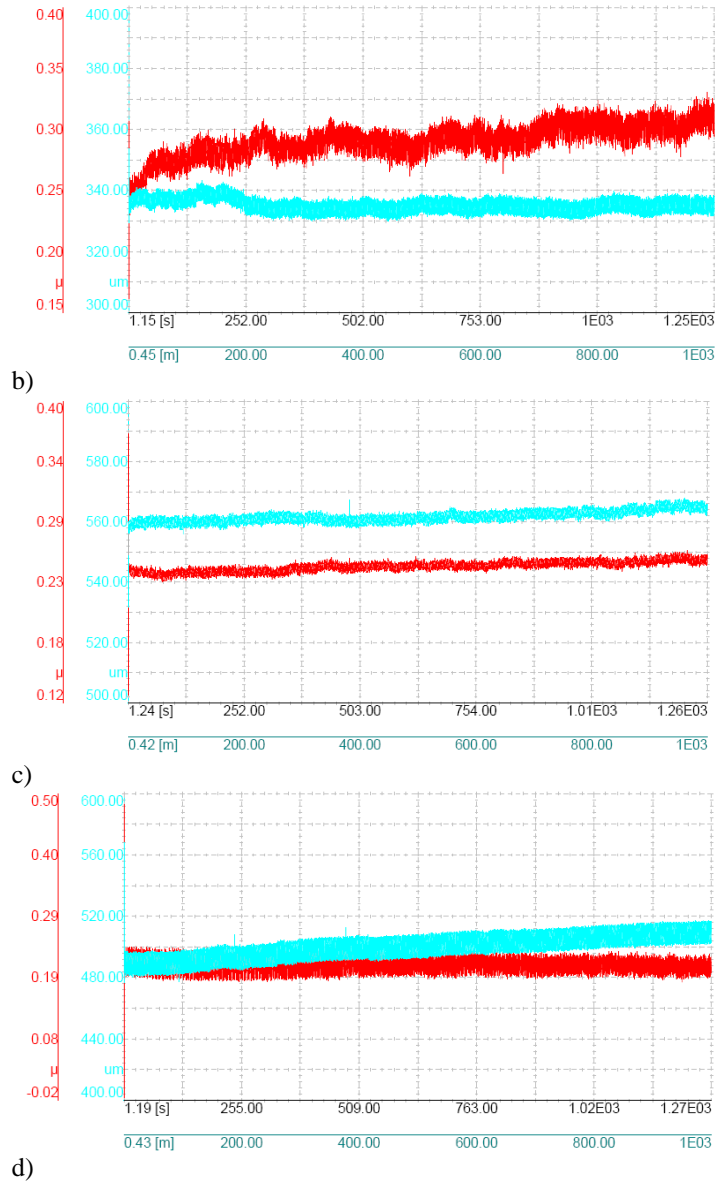
Cu-%3 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,8 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.81a.'da, 5N yük, 0,8 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.81b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.81c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.81d.'de verilmektedir.

Şekil 7.81a., b, c ve d incelendiğinde, Şekil 7.70.'te verilen 0,5 m/sn kayma hızında elde edilen grafiklere benzer olarak 0,8 m/sn kayma hızında da sürtünme katsayısı değerlerinin deney süresince kararlı olduğu görülmektedir. Grafiklerde aşırı bir artış ya da azalma görülmemekle birlikte 20N yük kullanılarak yapılan deneyde aşınma derinliği grafiğinde çok az bir değişim görülmektedir. Yükün artmasıyla balata yüzeyinden disk yüzeyine transfer olan aşınma ürünleri yükseklik değişimine sebep olmaktadır.



a)

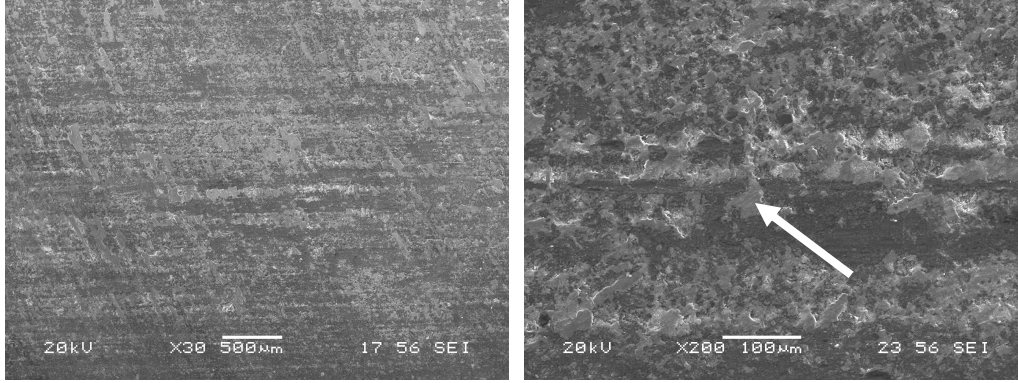
Şekil 7.81. Cu-%3 Gr balata malzemesi a) 2N b) 5N c) 10N d) 20 N yük, 0,8 m/sn kayma hızı ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri



Şekil 7.81. (Devam)

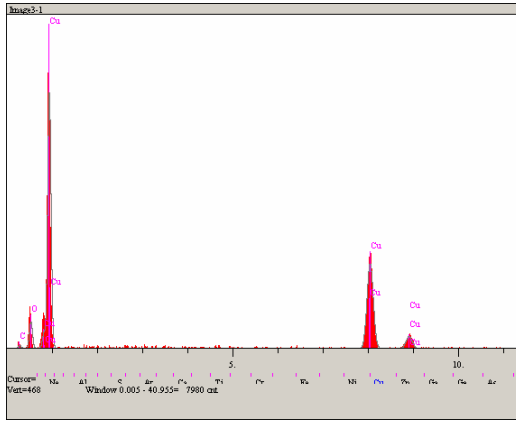
Cu-%3 Gr balata malzemesinin 2N, 5N ve 10N yük ile yapılan tüm deneylerinin bitmesinden sonra incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7.82a., b ve c’de verilmektedir.

Şekil 7.82.’deki görüntüler incelendiğinde aşınan balata malzemesinin disk yüzeyine sıvandığı görülmektedir. Al disk yüzeyine sıvanan Cu ile karşı yüzeydeki Cu malzemeler birbirleri üzerlerinde kayarak disk yüzeyinin korunmasını sağlamıştır.



a)

b)

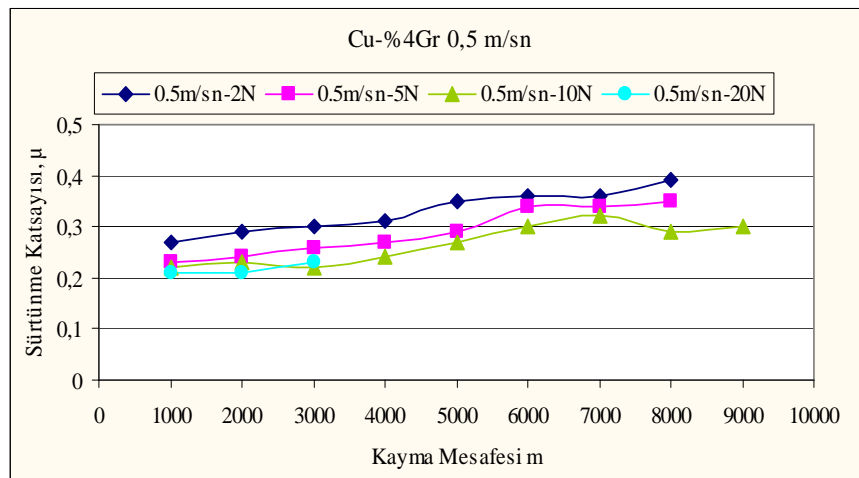


c)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	3.87	29.705	10.955	wt.%
O	32.26	32.960	16.193	wt.%
Cu	205.35	37.335	72.852	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

Şekil 7.82. Cu-%3 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinden sonra alınan a), b) Disk yüzeyi SEM görüntüleri c) b) görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

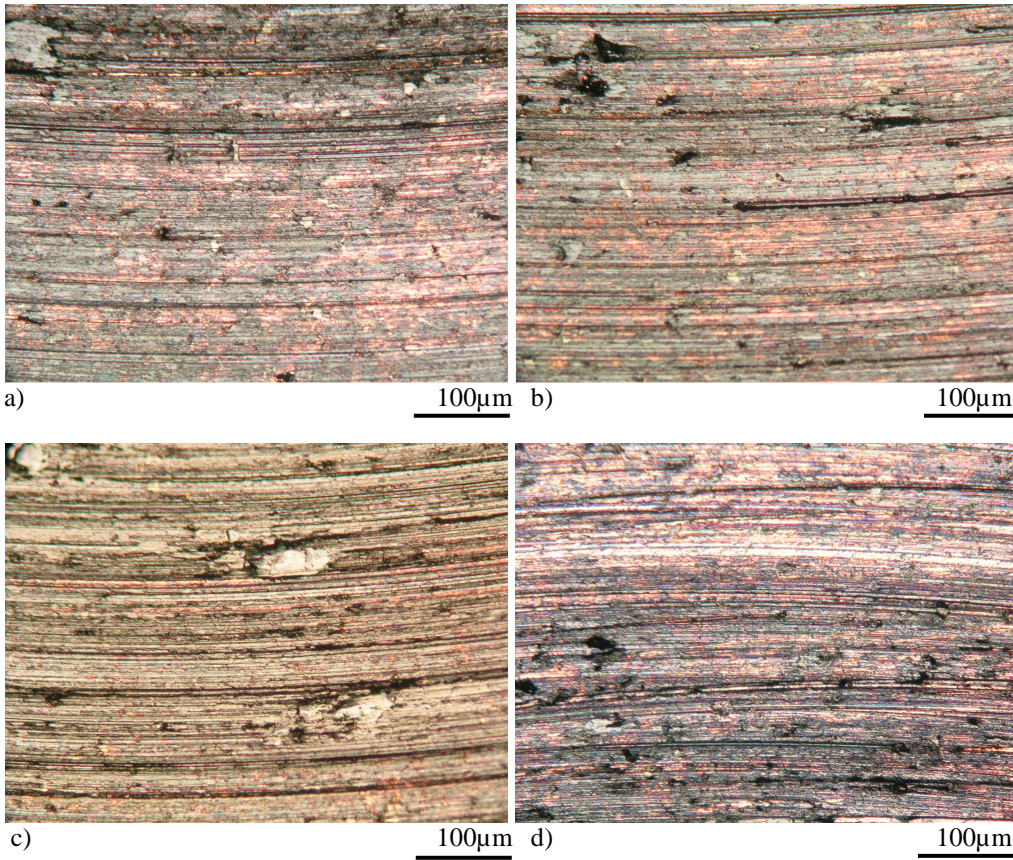
7.4.4 Cu-%4 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



Şekil 7.83. Cu-%4 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

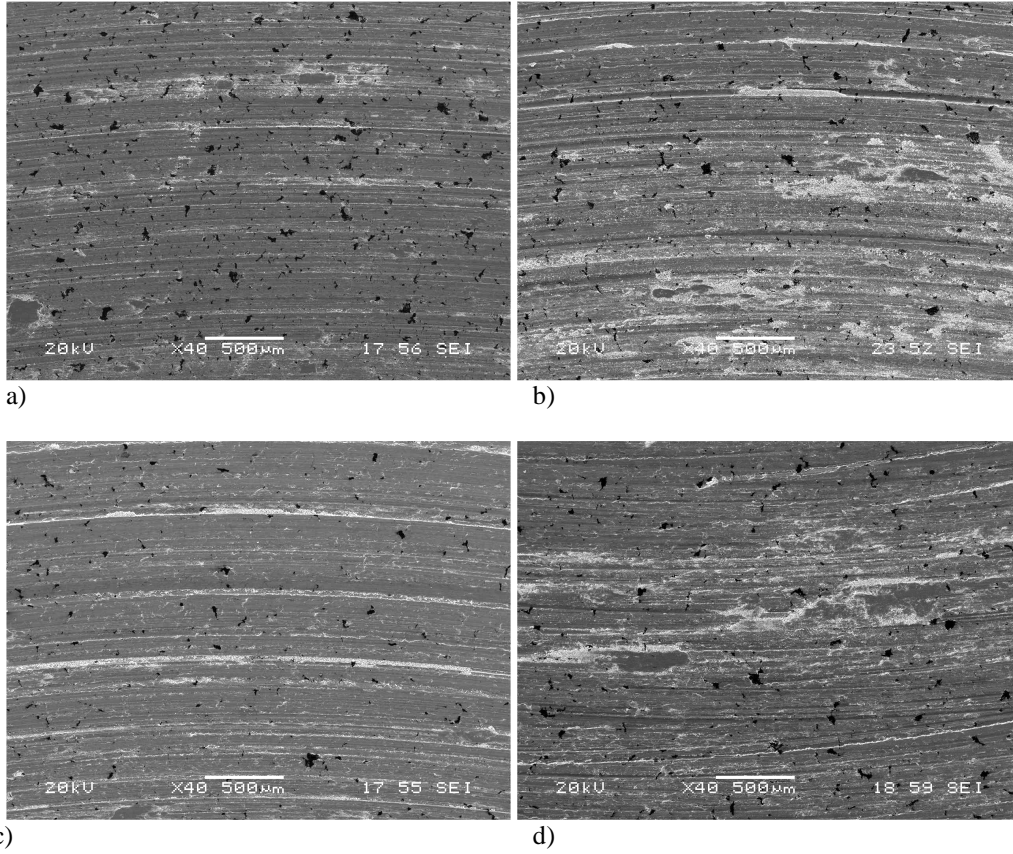
Şekil 7.83.'de Cu-%4 Gr numunesinin 0,5 m/sn sabit kayma hızı değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kayma mesafesine göre verilmektedir. Grafik incelendiğinde, tüm yüklerde artan kayma mesafesi ile birlikte sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı görülmektedir. Yükün artması ile μ değerlerinde azalma olmaktadır. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere normal yükün artmasıyla sürtünme katsayısında düşüş gözlenmesi, yükün artmasıyla kayma arayüzeyinde tribooksit tabaka oluşumunun desteklenmesi sonucu yağlayıcı olarak davranan oksit tabakasının sürtünme katsayısı ile aşınma hızında düşüşe sebep olmasına bağlanmaktadır.

Şekil 7.84.'te gösterilen deney sonrası çekilmiş optik görüntülerde grafitin, balata yüzeyine sıvanmış olduğu, karşı yüzeydeki sert partiküller ve kayma arayüzeyinde biriken aşınma ürünleri tarafından oluşturulan aşınma çizgileri ya da yivleri gözlenmiştir.



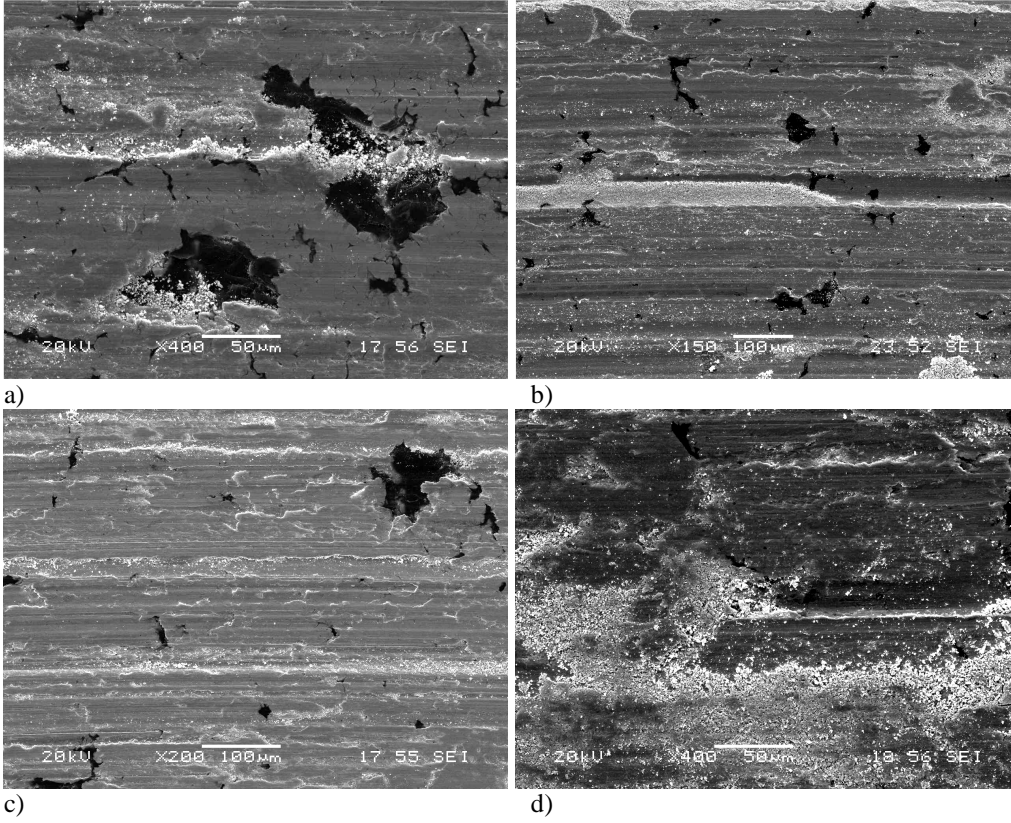
Şekil 7.84. Cu-%4 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları

Şekil 7.85. ve 7.86'da verilen %4 Gr takviyeli balatanın 2N, 5N, 10N, 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri genel olarak incelendiğinde karşılıklı kayma sonucu balata yüzeyinde, karşı yüzeyde bulunan sert SiC partiküller tarafından oluşturulmuş aşınma yivleri görülmektedir.



Şekil 7.85. Cu-%4 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri

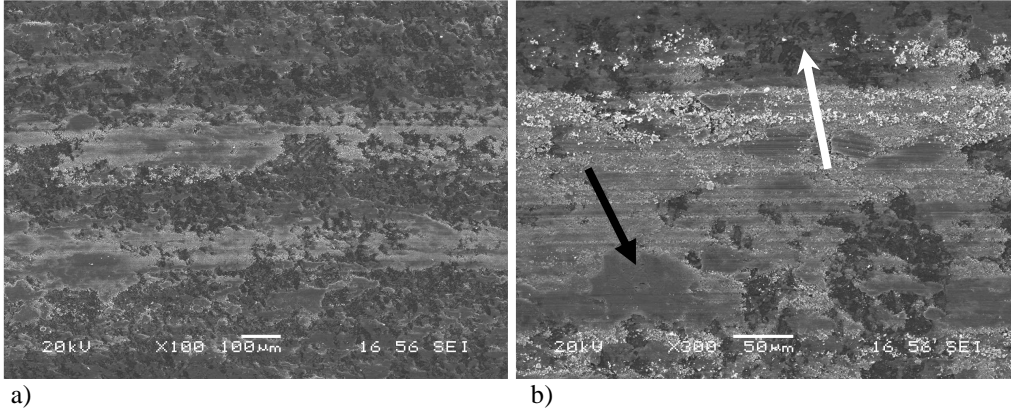
Balata aşınma yüzeylerine ve özellikle Şekil 7.86b. ve d'de belirgin bir şekilde görülebilen aşınma yivlerinin kenarlarına aşınma ürünlerinin biriktiği gözlenmektedir. Bununla birlikte balata yüzeyinden kalkan bazı aşınma ürünlerinin ise tekrar balata yüzeyine yapıştığı ayrıca sürtünme ve kayma ile oluşan yerel deformasyonlarında mevcudiyeti görülmektedir.



Şekil 7.86. Cu-%4 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri

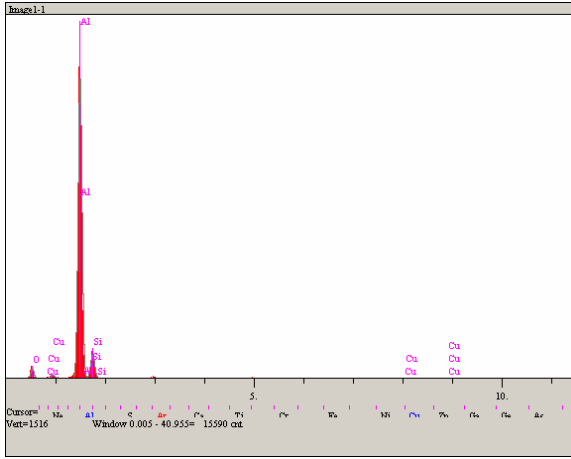
Şekil 7.85. ve 7.86.'daki görüntülerden balata yüzeylerindeki baskın aşınma mekanizmasının kızıklama ve pulluklama tipi abrazyif aşınma olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca kopan aşınma partikülleri iki yüzeyli ve üç yüzeyli aşınmaya sebep olarak yüzeyi deforme etmiştir.

%1, %2 ve %3 grafit takviyeli balata malzemelerinin 20N yük ile yapılan deneylerinde çıkan aşınma ürünleri, %4 grafit takviyeli balata malzemesinde görülmemiştir. Aşınma partikül çıkışı gözlenmemesine rağmen 20N yük ve 0,5 m/sn kayma hızı parametrelerinde yapılan deneyde disk yüzeyine balata malzemesinin sıvandığı Şekil 7.87.'de verilen SEM görüntüleri ve EDS analizlerinde açıkça görülmektedir.



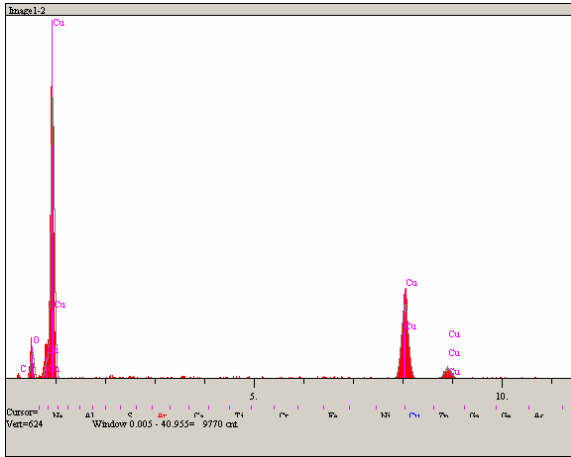
a)

b)



c)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	32.53	24.436	15.869	wt.%
Al	1,246.22	63.885	69.966	wt.%
Si	103.07	11.087	12.639	wt.%
Cu	5.16	0.591	1.525	wt.%
		100.000	100.000	wt.%



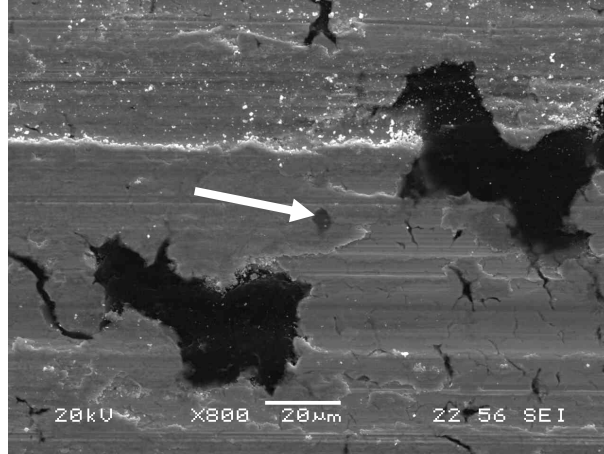
d)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	1.23	11.679	3.733	wt.%
O	39.58	41.969	17.871	wt.%
Cu	220.79	46.352	78.395	wt.%
		100.000	100.000	wt.%

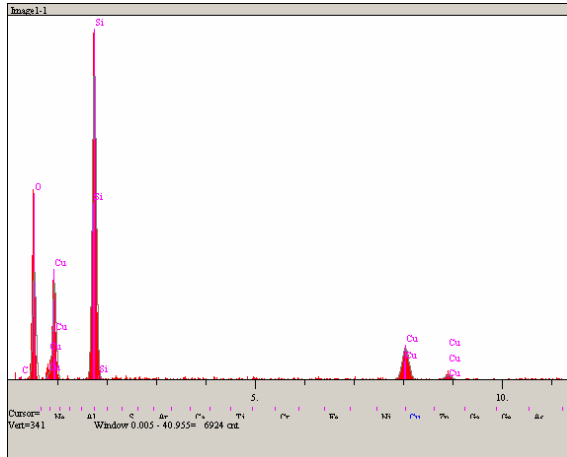
Şekil 7.87. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b) görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b) görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Cu-%4 Gr balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında 2N yük ile yapılan deneyler sonrası alınan yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.88.'de, 5N yükteki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.89.'da, 10N yük ile yapılan deney

sonrasında elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.90.'da ve 20N'teki SEM ve EDS analizi de Şekil 7.91.'de verilmiştir.



a)

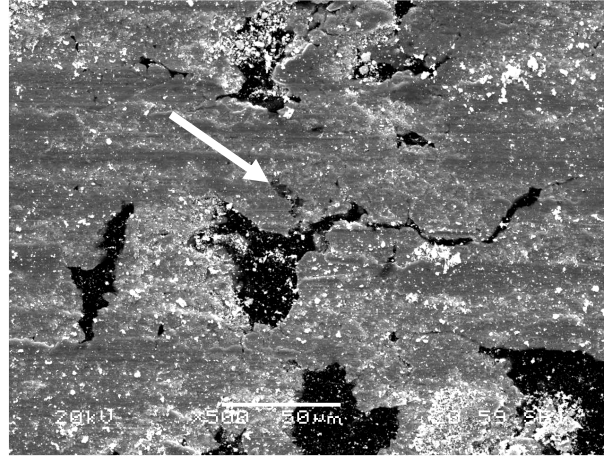


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	87.31	65.232	45.482	wt. %
Si	303.10	27.025	33.077	wt. %
Cu	50.74	7.743	21.441	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

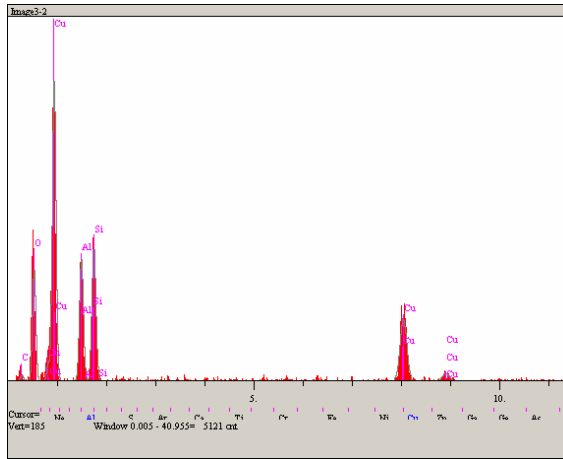
b)

Şekil 7.88. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.88. incelendiğinde, 2N yükte, balata yüzeyinde karşı yüzeydeki SiC partiküllerin oluşturduğu aşınma çizgileri, takviye malzemesi olan grafit ve karşı yüzeyden kopup balata yüzeyine gömülen aşınma partikülü görülmektedir. Benzer olarak Şekil 7.89, 7.90. ve 7.91'de de disk yüzeyinden sürtünme ve aşınma ile ayrılan aşınma partiküllerinin balata yüzeyine gömüldüğü, ise kızaklama abrazyon aşınma mekanizması ile meydana gelen bazı aşınma partiküllerinin ise aşınma yivlerinin kenarlarında biriktiği gözlenmiştir.



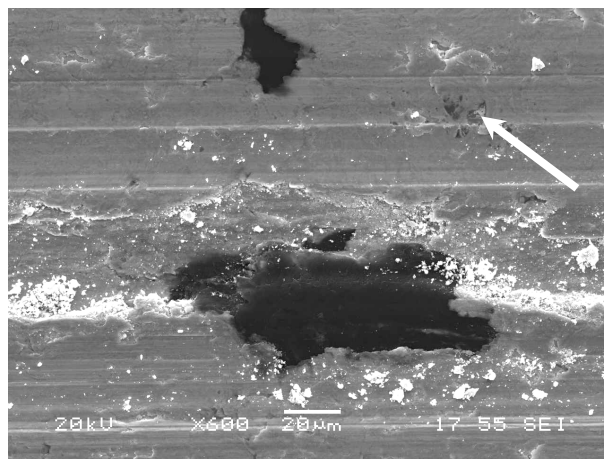
a)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.73	23.288	12.901	wt. %
O	48.61	49.518	36.542	wt. %
Al	61.72	8.631	10.742	wt. %
Si	70.88	8.920	11.555	wt. %
Cu	53.77	9.642	28.261	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

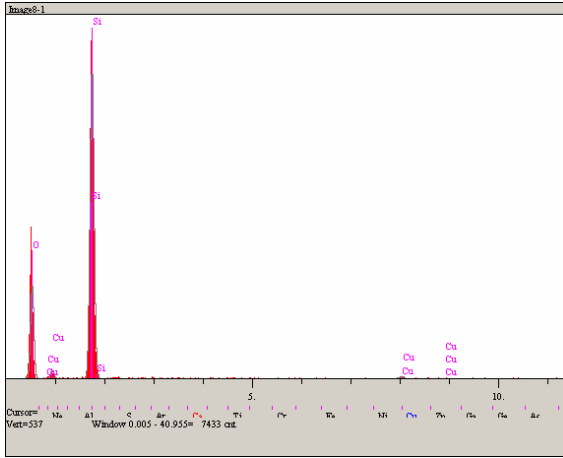
b)

Şekil 7.89. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



a)

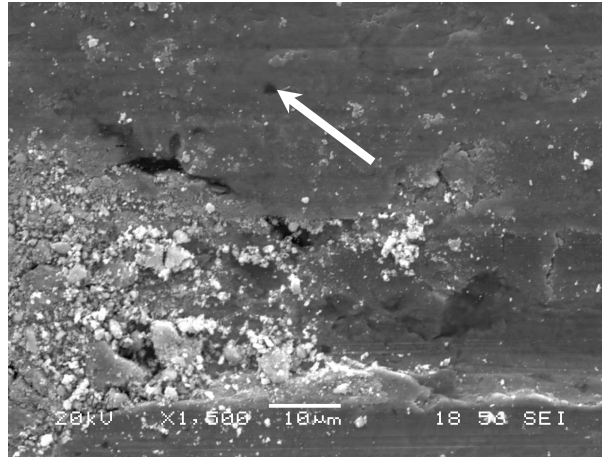
Şekil 7.90. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



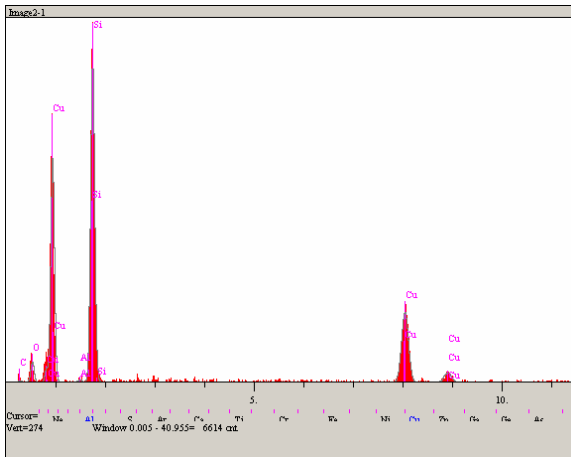
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	118.12	70.921	57.544	wt. %
Si	476.70	28.501	40.594	wt. %
Cu	4.61	0.578	1.862	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

b)

Şekil 7.90. (Devam)



a)



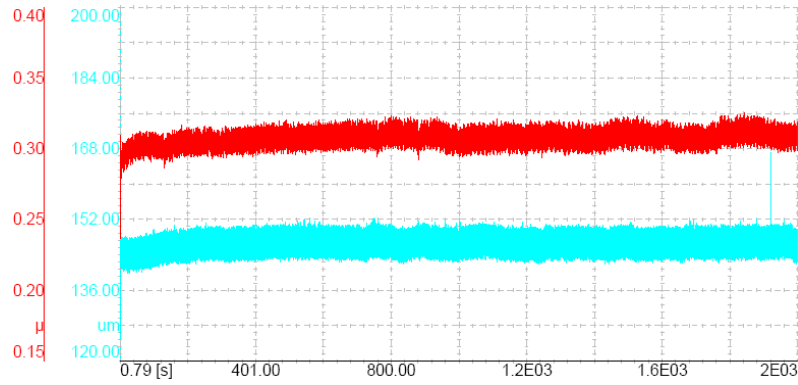
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	1.16	20.278	8.243	wt. %
O	13.31	20.687	11.202	wt. %
Al	2.00	0.373	0.341	wt. %
Si	250.61	38.289	36.396	wt. %
Cu	90.48	20.373	43.817	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

b)

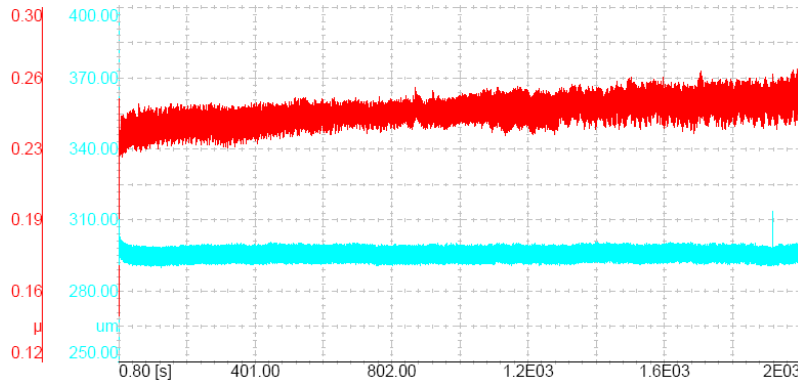
Şekil 7.91. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Cu-%4 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.92a.' da, 5N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 792b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.92c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.92d.'de verilmektedir.

Şekil 7.92a., b, c ve d incelendiğinde, sürtünme katsayısı değerlerinin deney süresince kararlı olduğu görülmektedir. Grafiklerde aşırı bir artış ya da azalma görülmemekle birlikte 10N yük ile yapılan deneyde alınana grafikte, aşınma derinliğinde az bir artış söz konusudur. 20N yük ile yapılan deneyde ise sürtünme katsayı grafiğinde bazı değişimler görülmektedir.

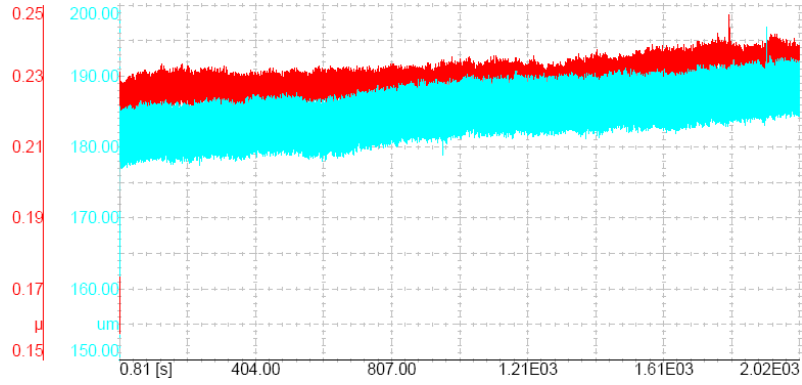


a)

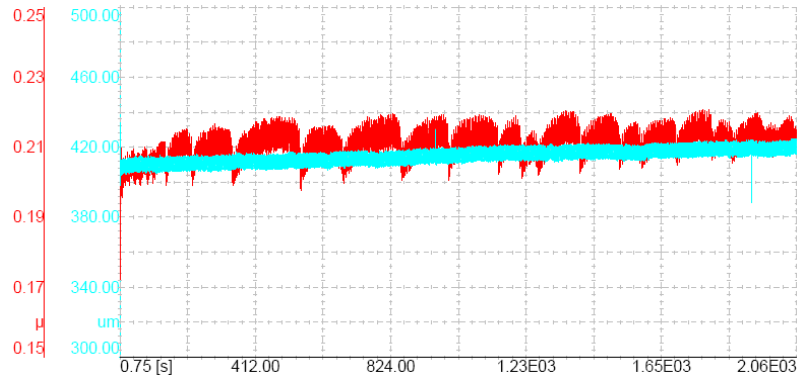


b)

Şekil 7.92. Cu-%4 Gr balata malzemesi a) 2N b) 5N c)10N d) 20 N yük, 0,5 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri



c)

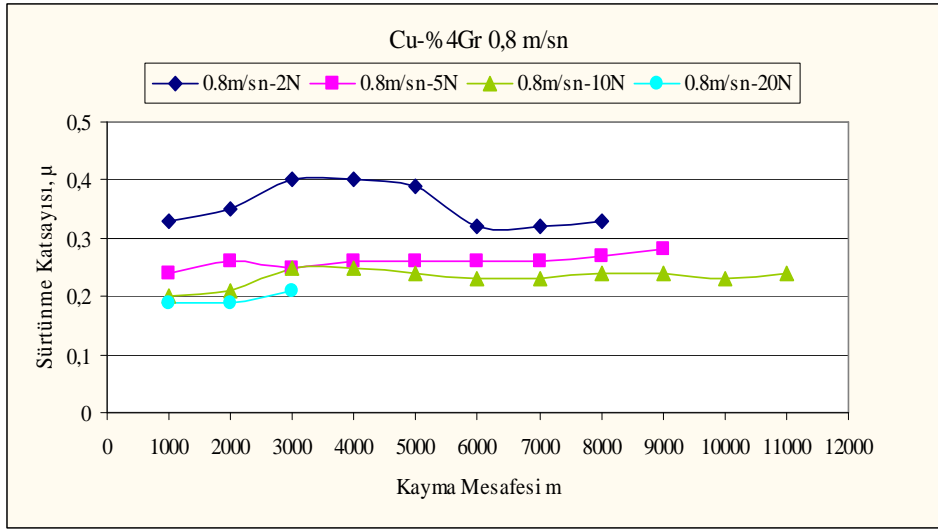


d)

Şekil 7.92. (Devam)

Bu değişimlerin sebebinin aşınma yüzeyinden kopup tekrar aynı yüzeye yapışan ya da kayma arayüzünde birikerek iki ve üç yüzeyli aşındırıcı gibi davranan aşınma partiküllerinin tribosistemde oluşturdukları titreşimler ve yükseklik farkı sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir.

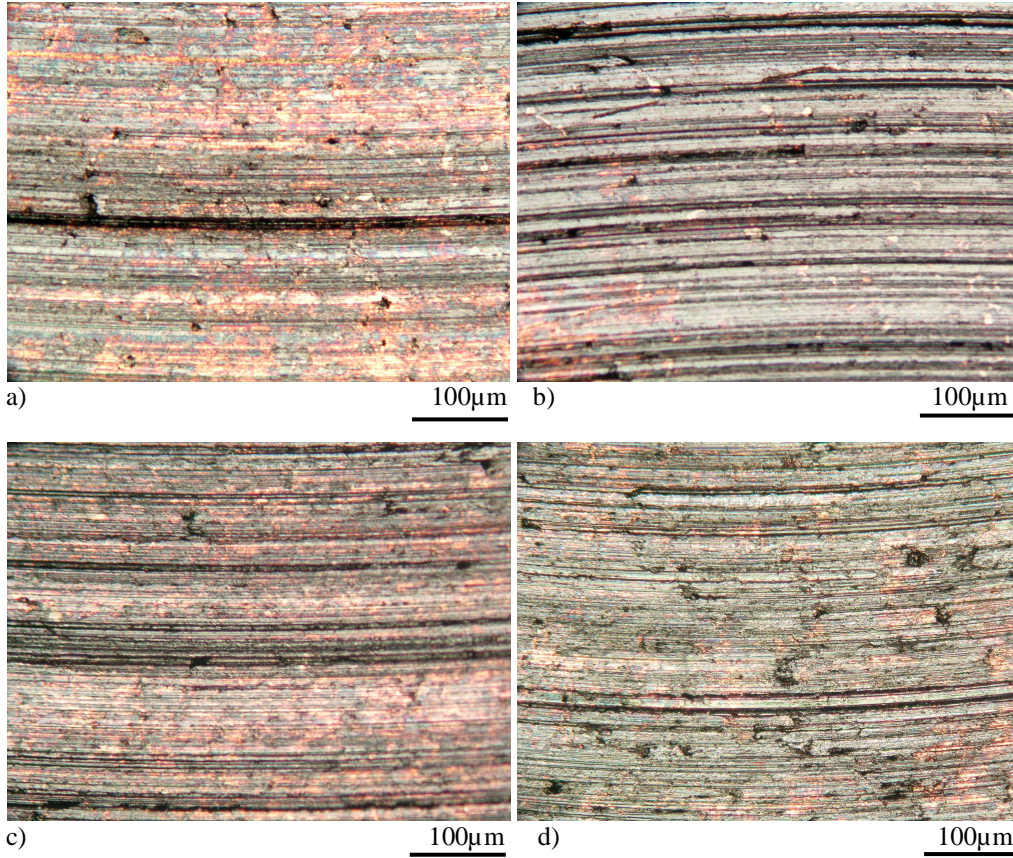
Şekil 7.93.'te Cu-%4 grafitli balata malzemesinin 0,8 m/sn sabit hız değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, kayma mesafesine göre verilmektedir. Grafik incelendiğinde, 2N yük ile yapılan deneylerde elde edilen katsayı değerlerinin diğer yüklere nazaran daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte 5N ve 10N'luk yükler ile elde edilen grafiklerin de yaklaşık aynı değerlerde olduğu açıktır.



Şekil 7.93. Cu-%4 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

Şekil 7.93.'te görülen 2N yükteki deneyin grafiğinde 3000-5000 m aralığında sürtünme katsayı değerlerinin oldukça yüksek çıktığı görülmektedir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, sürtünme etkisi ile kayma arayüzeylerinde oluşan tribooksit tabakası yağlayıcı gibi davranarak sürtünme kuvvetini azaltmaktadır. 2N yükte, deney başlangıcında düşük olan μ değerleri, mesafe arttıkça yükselmiş, 3000-5000 m aralığında en yüksek değerlere ulaşmıştır ki bu da tribooksit tabakasının etkin olarak oluşmadığını düşündürmektedir. 5000 m'den sonra kaydedilen sürtünme katsayısı değerleri ise balata yüzeyinde yağlayıcı oksit tabakasının oluşarak katsayı değerlerini düşürdüğü şeklinde yorumlanabilir. Diğer yandan artan kayma mesafesi ile ağırlıkça %4 oranında takviye edilen grafitin etkinliği artmış, kayma arayüzeyine sıvanarak katsayı değerlerinin düşmesini sağlamış olması mümkündür.

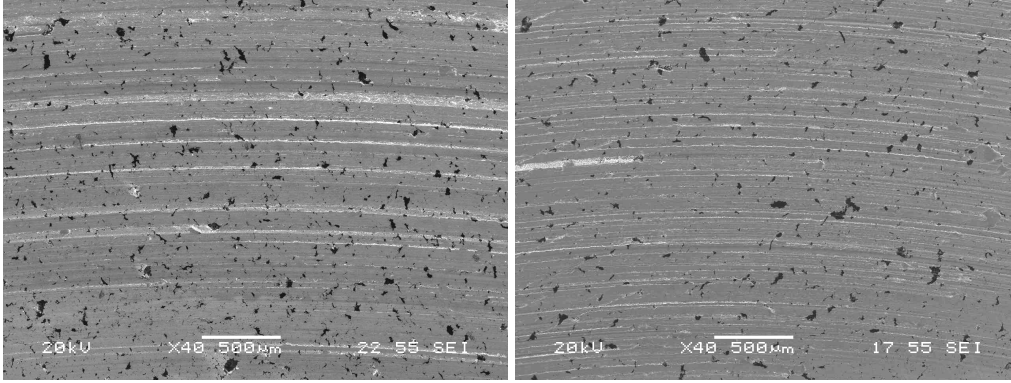
Şekil 7.94.'te gösterilen deney sonrası çekilmiş optik görüntülerde grafitin, balata yüzeyine sıvanmış olduğu görülmektedir. Görüntülerde artan yük ile aşınma yivlerinin arttığı ve derinleştiği gözlenmektedir.



Şekil 7.94. Cu-%4 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları

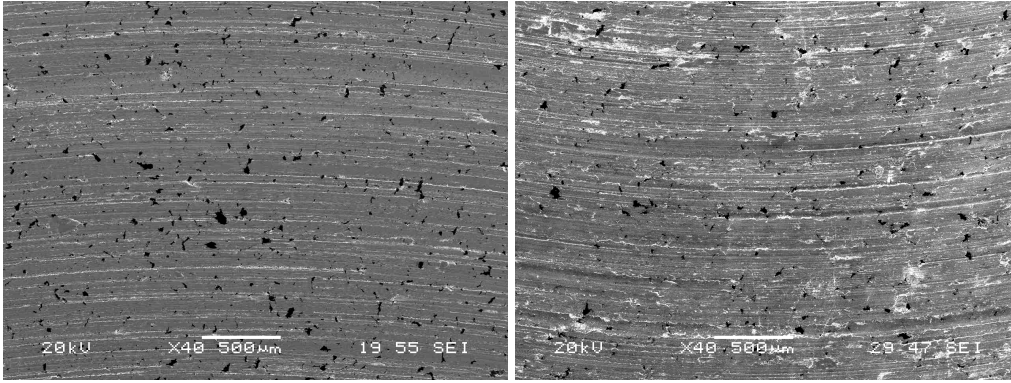
Şekil 7.95. ve Şekil 7.96. incelendiğinde aşınma yüzeylerinde abrazif aşınmanın hakim olduğu görülmektedir. 2N, 5N ve 10N’da yüzeyde düzgün kayma ve aşınma yivleri ile bu yivlerin içinde ya da çevresinde toplanmış aşınma ürünleri görülmekte ayrıca Şekil 7.96a.’da görüldüğü gibi 2N yük kullanılarak yapılan deney sonrası balata yüzeyinden kopan aşınma ürünlerinin tekrar aynı yüzeye yapıştığı yani malzeme transferi gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 7.95d. ve Şekil 7.96d.’de 20N yük kullanılarak yapılan deneyde, diğer yüklerde elde edilen aşınma yüzeylerinden farklı görüntüler görülmektedir. Sürtünme ve aşınma etkisi ile karşı yüzey tarafından deforme edilen balata yüzeyinden malzemenin levhasal olarak kalktığı görülmektedir.



a)

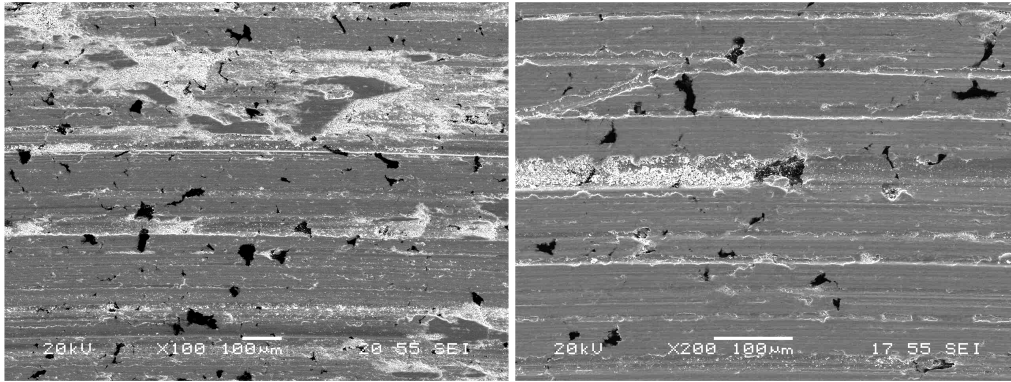
b)



c)

d)

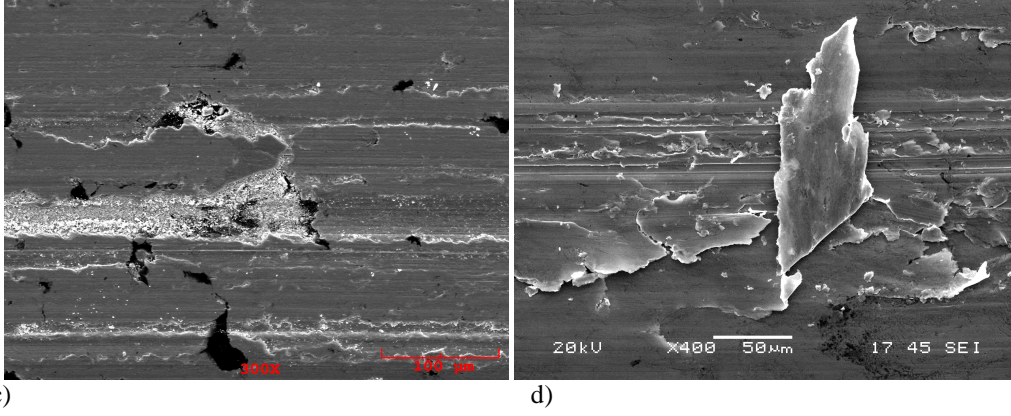
Şekil 7.95. Cu-%4 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri



a)

b)

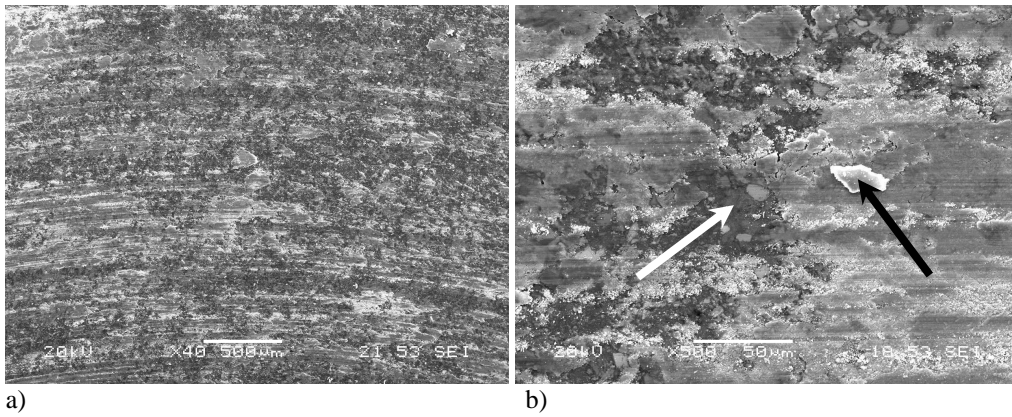
Şekil 7.96. Cu-%4 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri



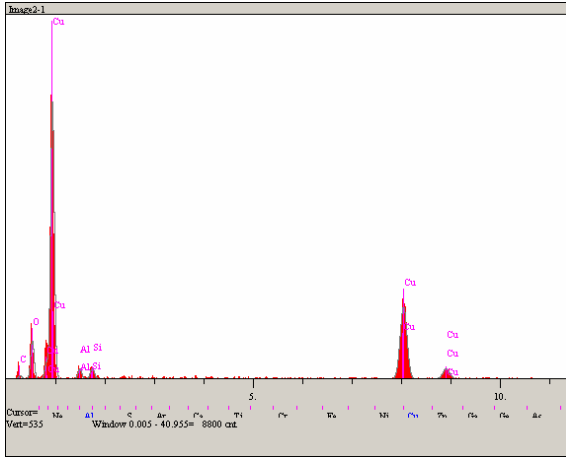
Şekil 7.96. (Devam)

Şimdiye kadar bahsedilen %1, %2 ve %3 grafit takviyeli balata malzemelerinin 20N yük ile yapılan deneylerinde elde edilen aşınma yüzeyleri ile benzer olan yüzey görüntüsü, balata yüzeyinin kesme türü abrasif aşınma ve delaminasyon ile nasıl hasara uğradığını açıkça göstermektedir (Şekil 7.96d.).

Şekil 7.97.'de ise 20N yük kullanılarak yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmektedir. Görüntüler ve analiz incelendiğinde, balata yüzeyinden kopan aşınma partiküllerinin disk yüzeyine sıvanmış olduğu anlaşılmaktadır.

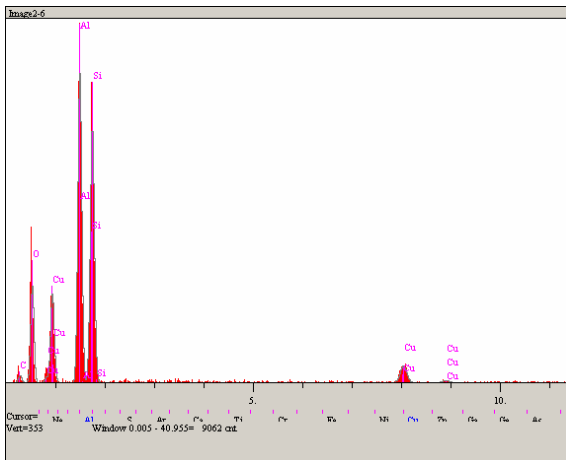


Şekil 7.97. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında disk yüzeyinden alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b) görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b) görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	4.34	27.345	11.510	wt. %
O	48.63	40.598	22.764	wt. %
Al	14.56	2.358	2.230	wt. %
Si	16.92	2.130	2.096	wt. %
Cu	182.76	27.569	61.399	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

c)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	7.05	30.290	19.465	wt. %
O	81.27	42.423	36.314	wt. %
Al	299.16	12.976	18.731	wt. %
Si	259.44	12.211	18.348	wt. %
Cu	27.87	2.100	7.141	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

d)

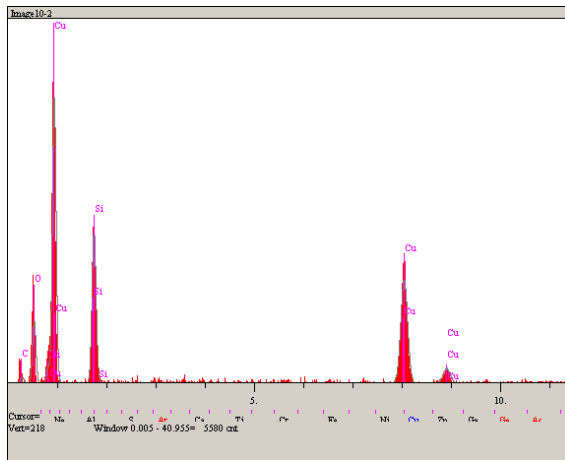
Şekil 7.97. (Devam)

Cu-%4 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında 2N yük ile yapılan deneyler sonrası alınan yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.98.'de, 5N yükteki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.99.'da, 10N yük ile yapılan deney sonrasında elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.100.'de ve 20N'teki SEM ve EDS analizi de Şekil 7.101.'de verilmiştir.

Şekil 7.98., Şekil 7.99. ve Şekil 7.100. incelendiğinde abrazif aşınma ile meydana gelen aşınma partiküllerinin yivlerin üzerinde ve kenarlarında biriktiği, disk yüzeyinden gelen aşınma partiküllerinin de siyah ok ile gösterilen noktaların EDS analizlerine bakıldığında anlaşılacağı üzere balata yüzeylerine gömüldüğü görülmektedir.



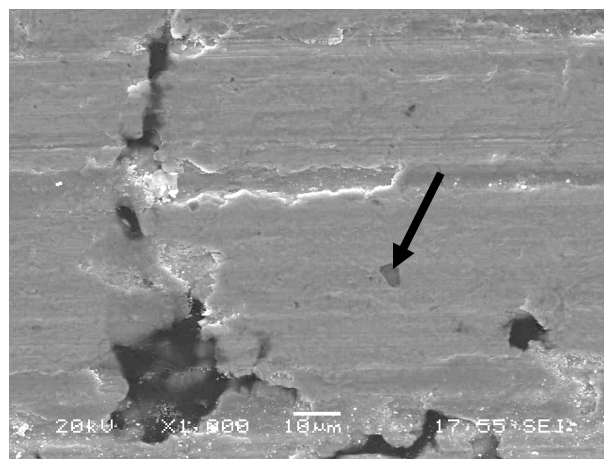
a)



b)

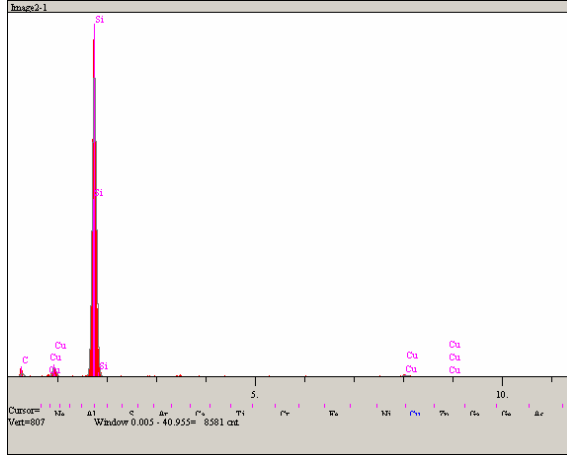
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	3.29	30.134	13.975	wt. %
O	31.93	36.818	22.746	wt. %
Si	93.86	13.008	14.107	wt. %
Cu	106.51	20.040	49.173	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

Şekil 7.98. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



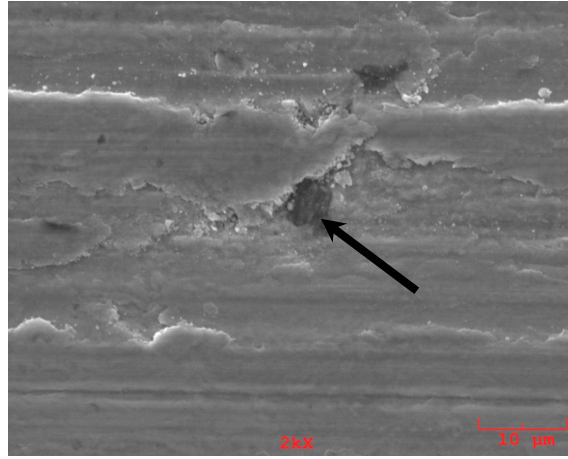
a)

Şekil 7.99. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

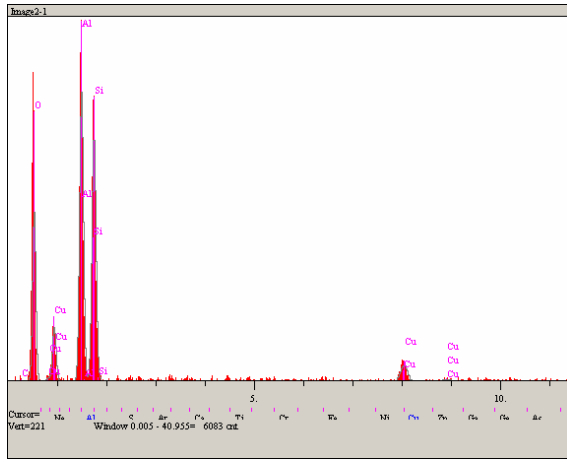


b)

Şekil 7.99. (Devam)



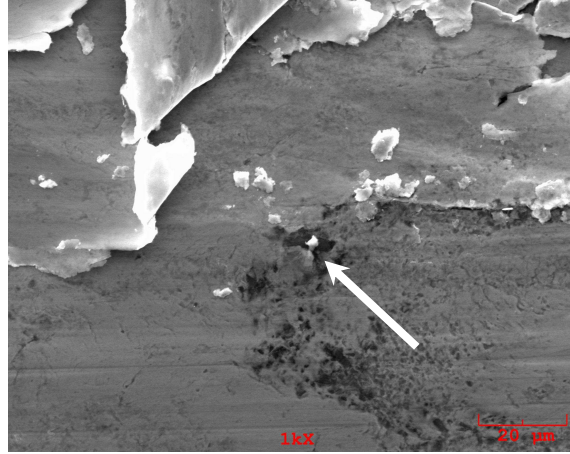
a)



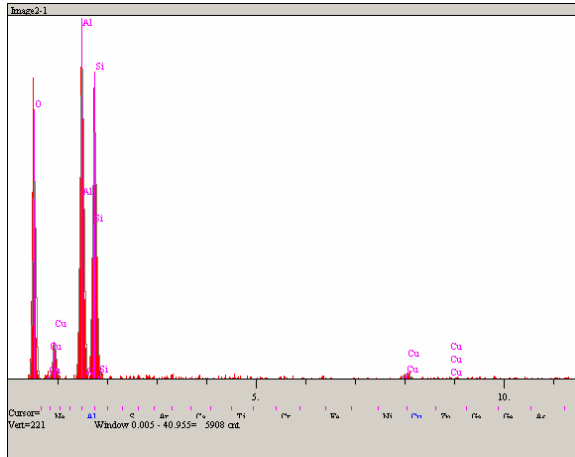
b)

Şekil 7.100. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.101.'de, 20N yük ile yapılan deney sonrasında incelenen aşınma yüzeyi verilmiştir. Yüzeyde plastik olarak deforme olan ve karşı yüzeydeki sert partiküller tarafından kesme abrazif aşınması ile yüzeyden kaldırılan tabakanın altına yerleşmiş aşınma partiküllerinin varlığı görülmektedir.



a)



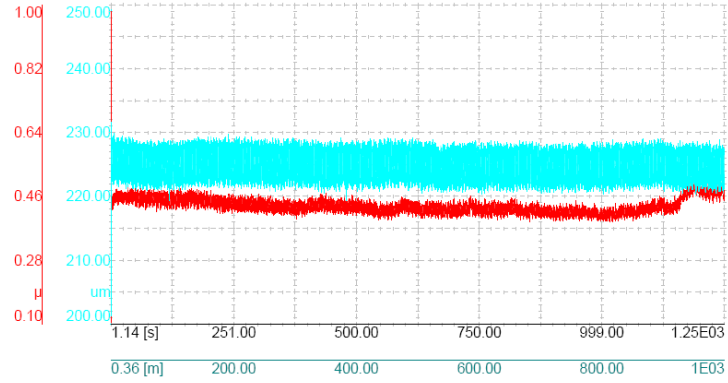
b)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	103.38	68.641	55.222	wt. %
Al	187.77	15.695	21.293	wt. %
Si	159.28	14.901	21.044	wt. %
Cu	5.18	0.764	2.441	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

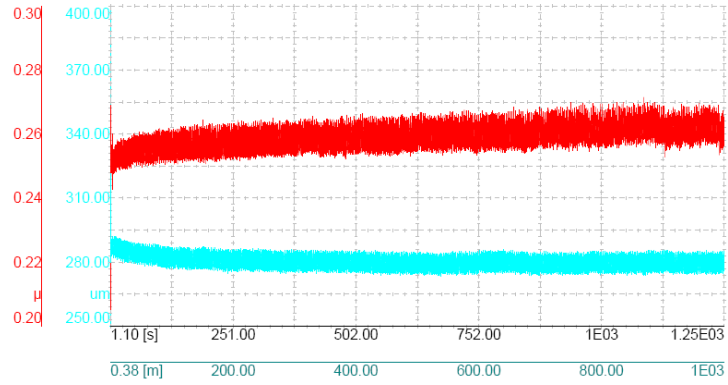
Şekil 7.101. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Cu-%4 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,8 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.102a.'da, 5N yük, 0,8 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.102b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.102c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.102d.'de verilmektedir.

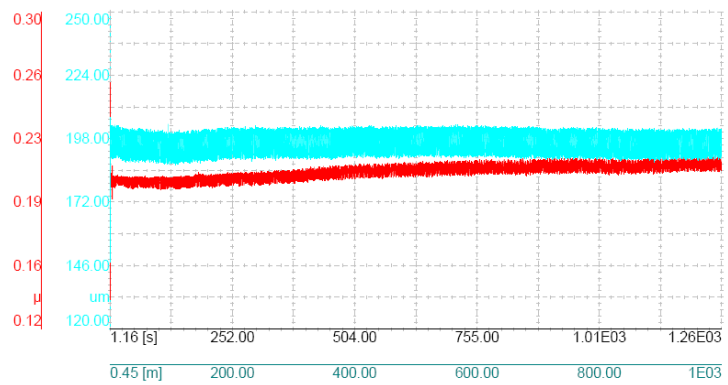
Şekil 7.102a., b, c ve d incelendiğinde, 0,8 m/sn kayma hızında da sürtünme katsayısı değerlerinin deney süresince kararlı olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği değerlerinde aşırı bir artış ya da azalma görülmezken, 20N yük kullanılarak yapılan deneyde, aşınma derinliği grafiğinde önemli sayılabilecek bir artış görülmektedir. Kayma arayüzeyinde biriken ya da balata yüzeyinden disk yüzeyine transfer olan aşınma ürünleri, yükseklik değişimine sebep olmaktadır.



a)

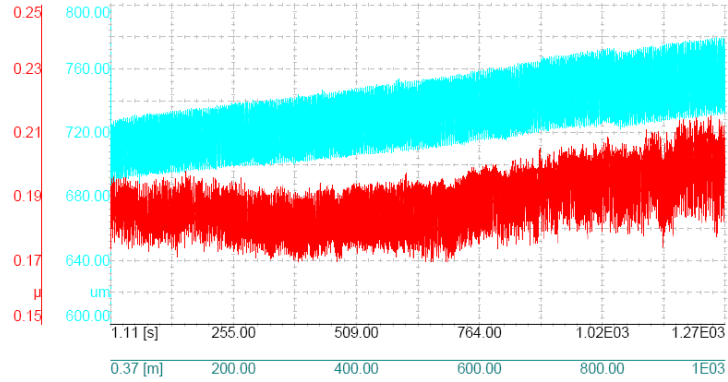


b)



c)

Şekil 7.102. Cu-%4 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,8 m/sn kayma hızı ve 1000m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri

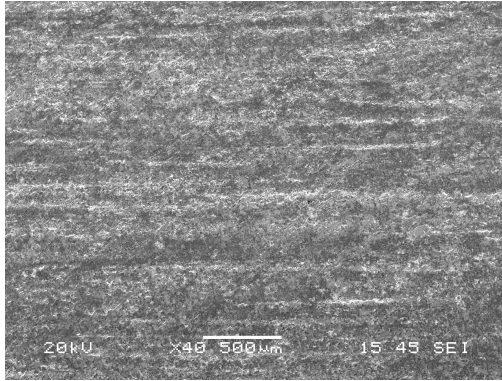


d)

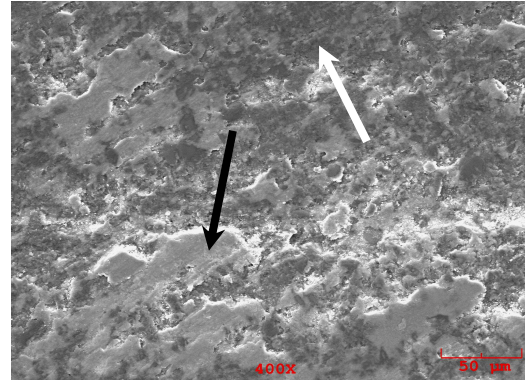
Şekil 7.102. (Devam)

Cu-%4 Gr balata malzemesinin 2N, 5N ve 10N yük ile yapılan tüm deneylerinin bitmesinden sonra incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7.103a., b ve c'de verilmektedir.

Şekil 7.103.'teki görüntüler incelendiğinde farklı aşınma mekanizmaları ile deforme olan balata malzemesinin disk yüzeyine sıvandığı ve sert SiC partiküller arasında biriktiği görülmektedir. EDS analizlerinde görülen oksijen pikleri ise sürtünme ve aşınma etkisi ile yüzeyde oksit tabakasının oluştuğunu göstermektedir.

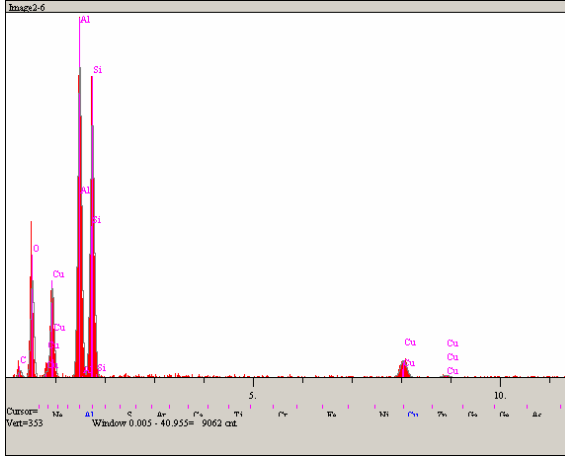


a)



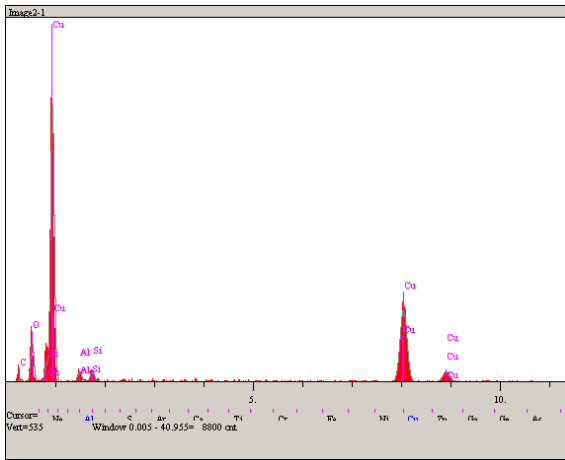
b)

Şekil 7.103. Cu-%4 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinden sonra alınan a), b) Disk yüzeyi SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	7.05	30.290	19.465	wt. %
O	81.27	42.423	36.314	wt. %
Al	299.16	12.976	18.731	wt. %
Si	259.44	12.211	18.348	wt. %
Cu	27.87	2.100	7.141	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

c)



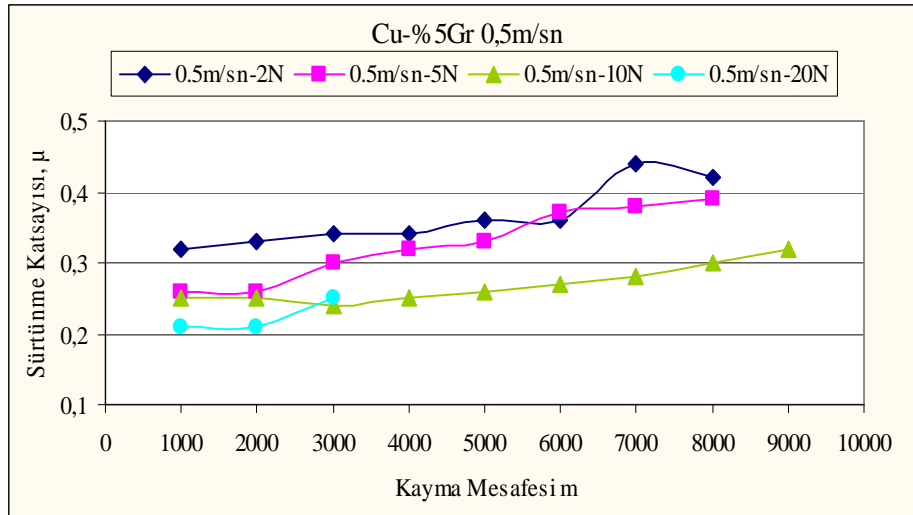
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	4.34	27.345	11.510	wt. %
O	48.63	40.598	22.764	wt. %
Al	14.56	2.358	2.230	wt. %
Si	16.92	2.130	2.096	wt. %
Cu	182.76	27.569	61.399	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

d)

Şekil 7.103. (Devam)

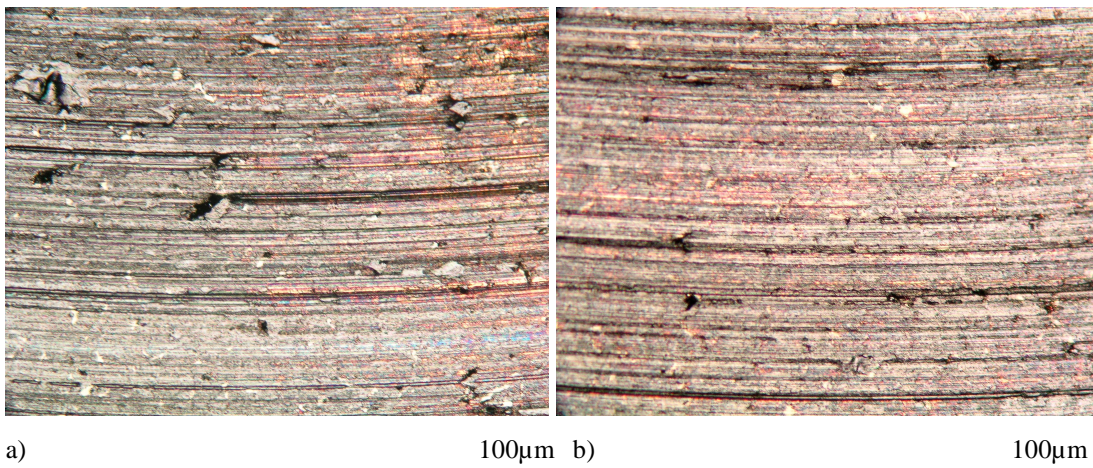
7.4.5 Cu-%5 Gr balata malzemesinin aşınma deney sonuçları

Şekil 7.104.'te Cu-%5 Gr numunesinin 0,5 m/sn sabit kayma hızı değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kayma mesafesine göre grafik halinde verilmektedir. Grafik incelendiğinde, 2N yük ile yapılan deneylerde elde edilen katsayı değerlerinin diğer yüklerle yapılan deney sonuçlarına göre yüksek olduğu, artan yüke göre sürtünme katsayısının düştüğü ancak artan kayma mesafesi ile tüm yüklerde μ değerlerinin arttığı görülmektedir.

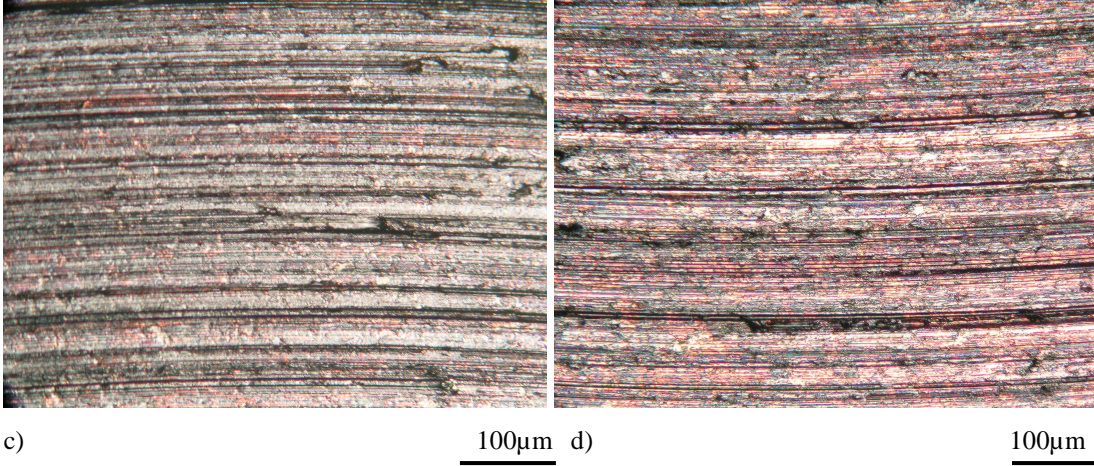


Şekil 7.104. Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

Şekil 7.104. incelendiğinde, özellikle 5N yük kullanılarak yapılan deneyde kaydedilen μ değerlerindeki artış, daha önceki bölümlerde incelenen ağırlıkça %1, %2 ,%3 ve %4 grafit takviyeli malzemelerde gözlenmemiş; grafit miktarının %5 oranına çıkarılması ile birlikte, diğer balata malzemelerine kıyasla farklı aşınma yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 104'teki optik görüntülerde artan yük ile aşınma çizgilerinde artışlar gözlenmekte; takviye malzemesi olan grafitin de yüzeye sıvandığı görülmektedir.



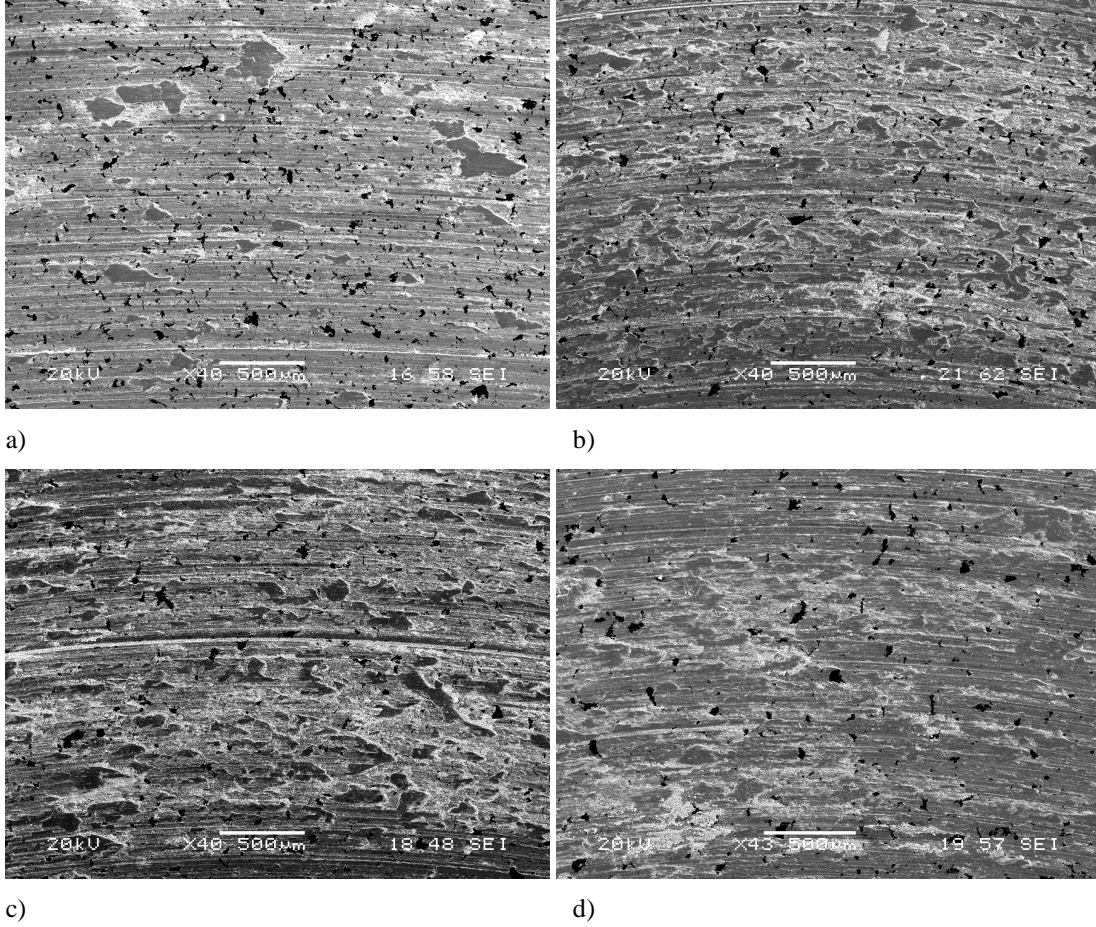
Şekil 7.105. Cu-%5 Gr balata malzemesinin a) 2N b) 5N c) 10N d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında, aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları



Şekil 7.105. (Devam)

Cu-%5 Gr balata malzemesinin, 0,5 m/sn kayma hızı ve 2N, 5N, 10N, 20N yükler ile yapılan deneylerinden sonra alınan SEM görüntüleri Şekil 7.106. ve Şekil 7.107.'de verilmektedir.

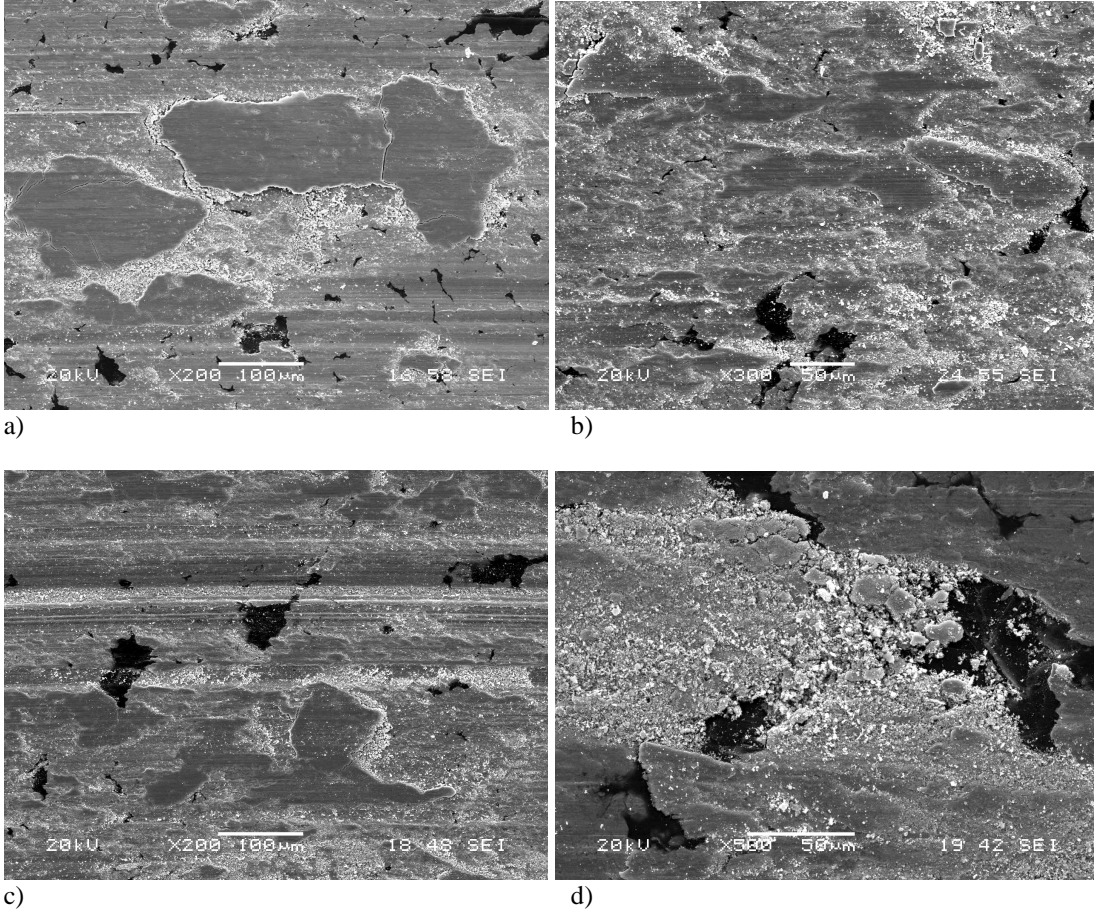
Şekil 7.105. genel olarak incelenirse; tüm yüklerdeki aşınma yüzey görüntülerinde, artan yük ile yüzey deformasyonunun arttığı görülebilir. Daha önceki bölümlerde incelenen diğer balata malzemelerinin yüzeylerine kıyasla, %5 Gr takviyeli bu balatanın tüm yüklerde daha şiddetli bir şekilde hasara uğradığı gözlenmektedir. Diğer balata malzemelerinin yüzeylerinde, abrazif aşınma çizgileri, yerel deformasyon bölgelerinde oluşan çatlaklar ve çukurlar görülürken bu malzemedede, aşınma çizgilerinin ve çatlakların yanı sıra, aşınma ile deforme olarak yüzeyden kalkan ürünlerin tekrar balata yüzeyine yapıştığı ve yüzeylerin aşırı deforme olduğu görülmektedir. Artan grafit miktarının sürtünme ve aşınma üzerinde olumlu etki göstermesi beklenirken, düşük yüklerde bile Şekil 7.106. ve 7.107.'da verilen yüzey görüntülerinde görülen deformasyonların olması, bu malzemeler için takviye malzemesi olan grafitin maksimum %4 oranında etkin olduğunu, bu oranın %5' e çıkarılması ile kompozit yüzeyinin mukavemetinin düşmesinden dolayı yüzey deformasyonunun arttığı düşünülmektedir.



Şekil 7.106. Cu-%5 Gr takviyeli balatanın a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri

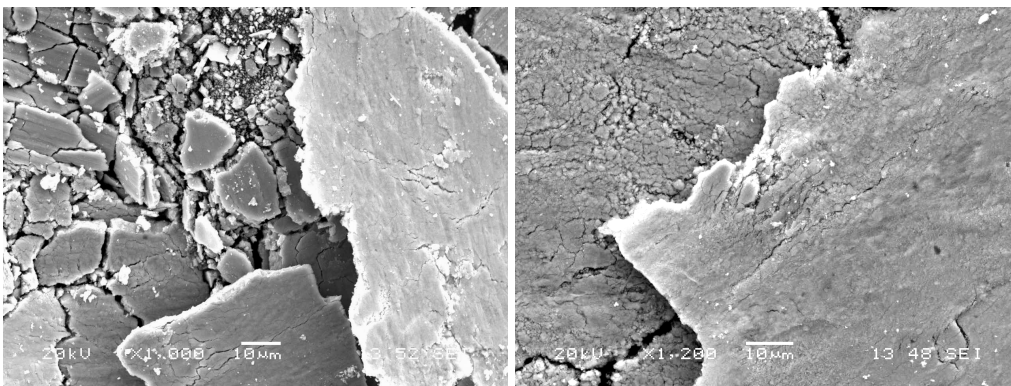
Deneysel çalışmalara göz atıldığında birbiri ile çelişen ifadelerin olduğu görülmektedir. Araştırmacılardan bazıları malzemenin aşınma dayanımının artan takviye hacim oranı ile monoton bir şekilde arttığını bildirirken diğer bazı araştırmacılar artan takviye oranı ile aşınma dayanımının sürekli azaldığını belirtmişlerdir. Bazı diğer çalışmalarda ise malzemenin, takviye partiküllerinin artan ya da azalan hacmi ile monoton olmayan aşınma dayanımı gösterdiklerini, dayanımın ilk halinden maksimuma ulaşana kadar takviye miktarı ile arttığını, maksimum noktadan sonra yine artan takviye oranı ile azaldığını bildirmişlerdir [23].

Şekil 7.107.'de görülen aşınma ile deforme olmuş yüzeylerde, grafit içeriğinin mukavemeti düşürmesinden dolayı ağır abrazyif aşınmanın meydana geldiği açıktır.



Şekil 7.107. Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri

Aşınma partikülleri aşınma yivlerinin etrafında ve içinde birikerek iki ve üç yüzeyle aşınma partikülü olarak davranıp balata malzemesinin daha fazla aşınmasına sebep olmuştur. %1, %2 ve %3 grafit takviyeli malzemelerde olduğu üzere sadece 20N yük ile yapılan deney sonrası aşınma ürün çıkışı gözlenmiş ve Şekil 7.108.'de verilen SEM görüntüleri elde edilmiştir.



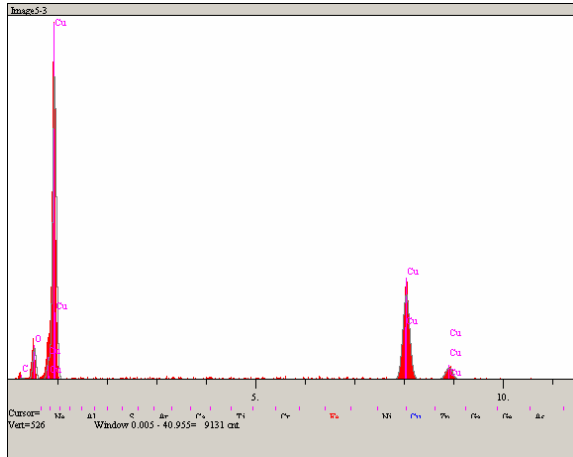
Şekil 7.108. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüsü

Şekil 7.109.'da Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Kayma boyunca balata yüzeyi karşı yüzeydeki sert SiC partiküller tarafından aşındırılmış ve çıkan aşınma ürünleri disk yüzeyine sıvanarak yeni bir kayma yüzeyi oluşturmuştur. EDS analizlerine bakıldığında balata aşınma ürünlerinin yanı sıra Al-Si/SiCp disk yüzeyinde oksit oluşumunun da varlığı görülmektedir.



a)

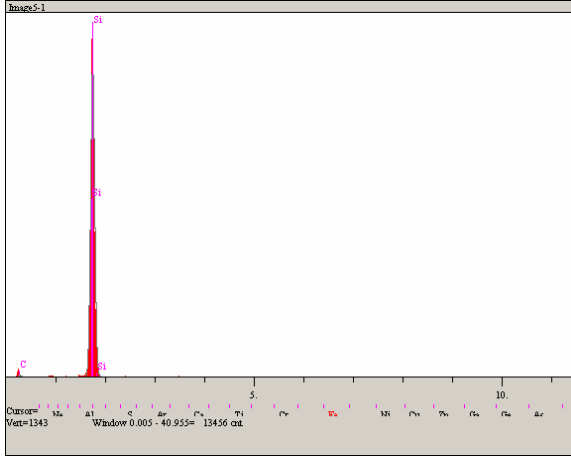
b)



c)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.38	19.930	6.905	wt. %
O	38.62	39.141	18.065	wt. %
Cu	212.53	40.930	75.030	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

Şekil 7.109. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hız ile yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin a) ve b) SEM görüntüleri c) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



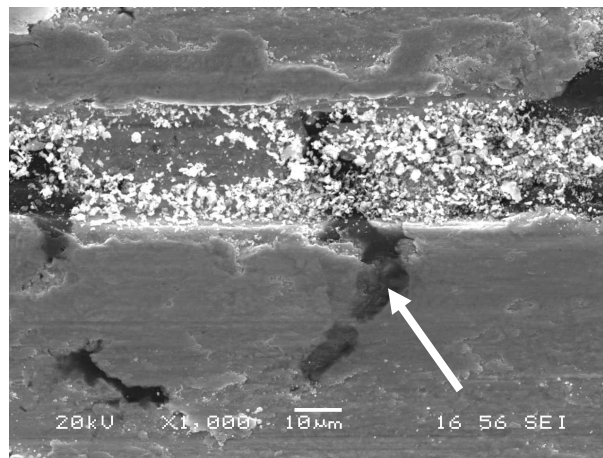
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	6.79	60.027	39.106	wt. %
Si	1,181.50	39.973	60.894	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

d)

Şekil 7.109. (Devam)

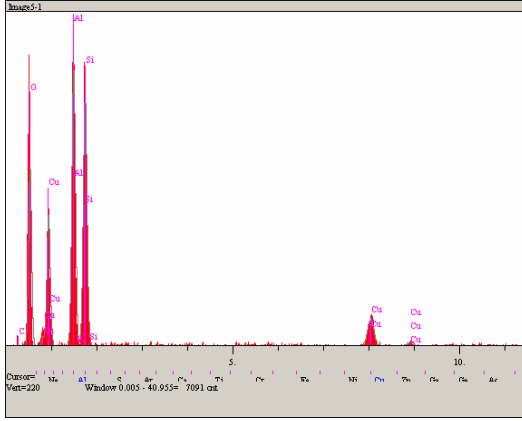
Cu-%5 Gr balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında 2N yük ile yapılan deneyler sonrası alınan yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.110.'da, 5N yükteki SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.111.'de, 10N yük ile yapılan deney sonrasında elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 7.112.'de ve 20N'teki SEM ve EDS analizi de Şekil 7.113.'te verilmiştir.

Şekil 7.110.'da verilen SEM görüntüsünde, yüzeyde belirgin bir şekilde görülen aşınma izinin üzerinde biriken aşınma ürünleri görülmektedir. Beyaz ok ile işaret edilen noktadan alınan EDS analizine bakılınca, karşı yüzeyden kalkan aşınma ürünlerinin balata yüzeyine yapıştığı anlaşılmaktadır.



a)

Şekil 7.110. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Yüzey SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi

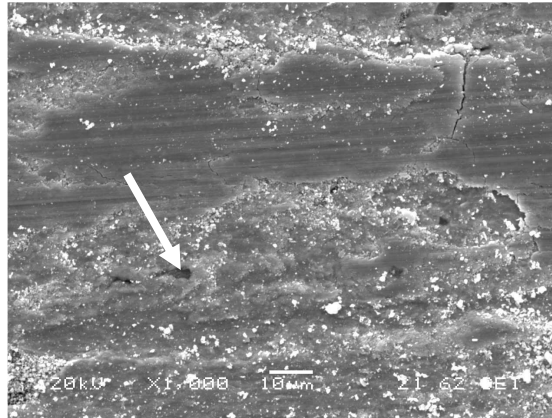


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	0.18	1.583	0.889	wt. %
O	99.99	63.719	47.688	wt. %
Al	181.44	15.490	19.551	wt. %
Si	169.30	15.205	19.976	wt. %
Cu	29.89	4.002	11.897	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

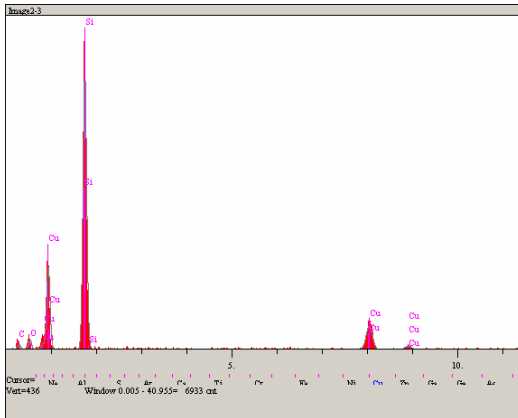
b)

Şekil 7.110. (Devam)

Şekil 7.111. ve Şekil 7.112.'de beyaz oklar ile gösterilen noktalardan alınan EDS analizlerinde aşınma ile kopan disk malzemelerinin balata yüzeyine gömüldüğü görülmektedir.



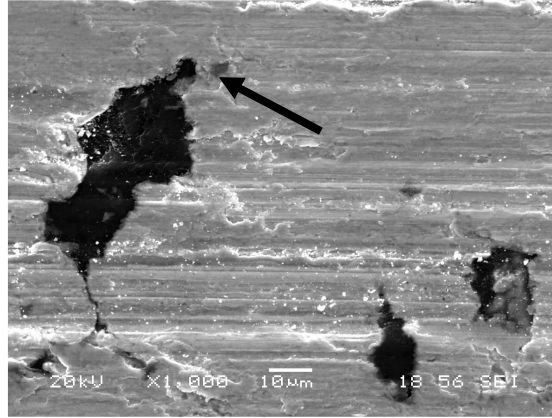
a)



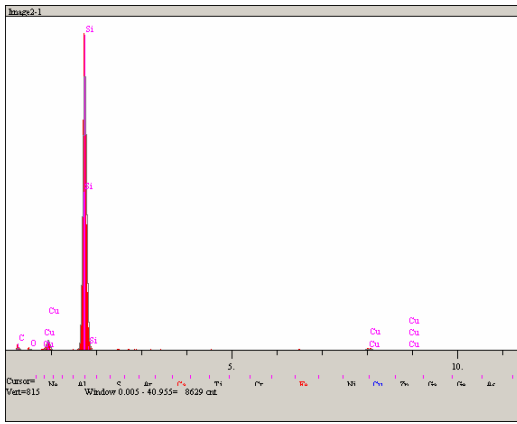
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	5.95	53.010	31.156	wt. %
O	10.57	13.283	10.399	wt. %
Si	371.06	26.724	36.728	wt. %
Cu	52.66	6.984	21.717	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

b)

Şekil 7.111. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Yüzey SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi



a)

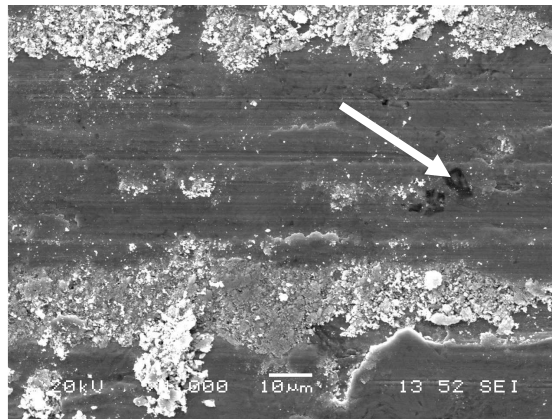


b)

Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	5.16	58.682	38.107	wt. %
O	2.67	4.010	3.469	wt. %
Si	709.42	36.384	55.248	wt. %
Cu	7.49	0.925	3.177	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

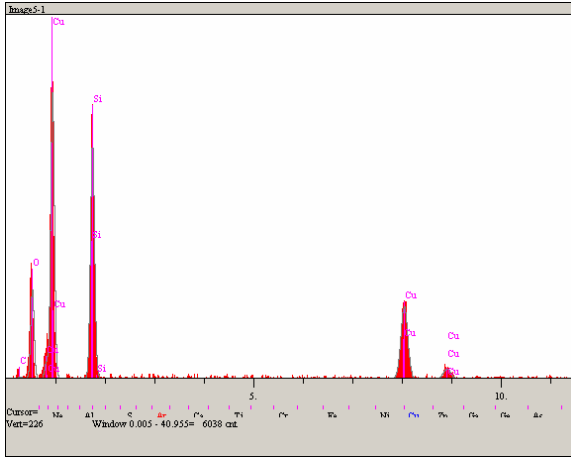
Şekil 7.112. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Yüzey SEM görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi

20N yük ile yapılan deney sonrası alınan SEM görüntüsünde bazı aşınma partiküllerinin balata aşınma yüzeyinde biriktiği, beyaz ok ile gösterilen noktada ise diskten çıkan aşınma ürünlerinin yine balata yüzeyine battığı görülmektedir.



a)

Şekil 7.113. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,5 m/sn hızda yapılan deney sonrası a) Yüzey SEM görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS pikleri ve analizi



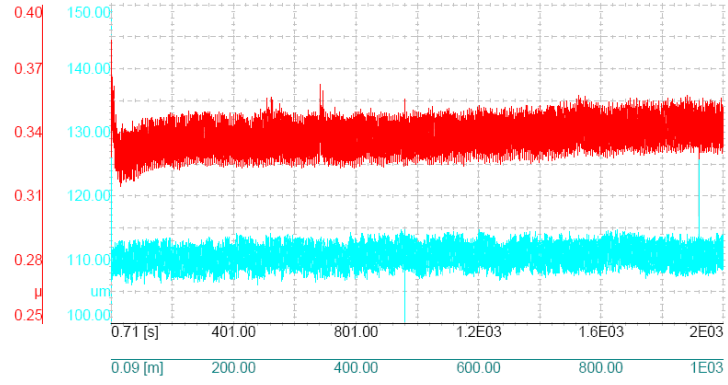
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	1.08	12.189	5.781	wt. %
O	47.71	51.774	32.708	wt. %
Si	152.32	20.650	22.900	wt. %
Cu	77.05	15.388	38.611	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

b)

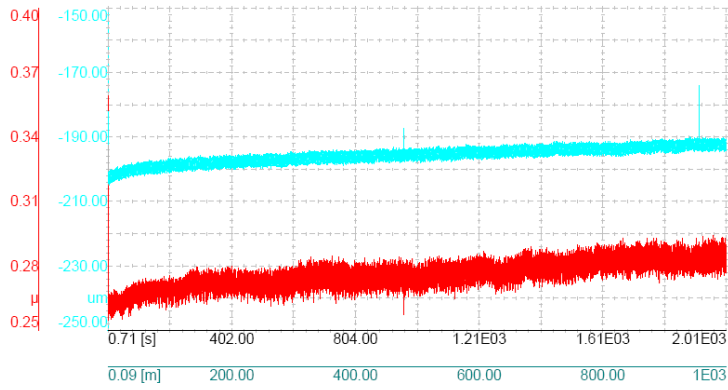
Şekil 7.113. (Devam)

Cu-%5 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.114a.'da, 5N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.114b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.114c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.114d.'de verilmektedir.

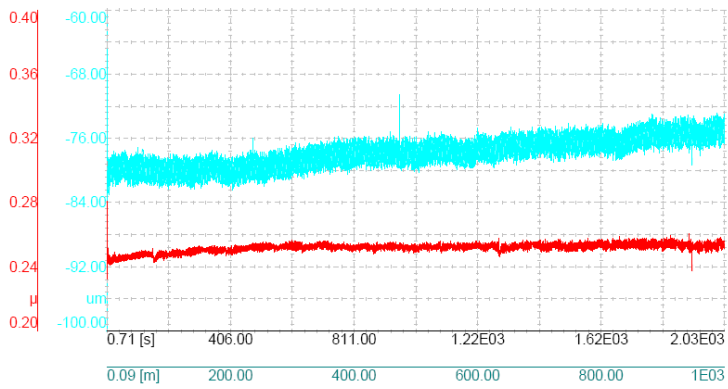
Verilen grafikler incelendiğinde 2N, 5N ve 10N yüklerde elde edilen μ ve aşınma derinliği değerlerinde 1000 m kayma mesafesi boyunca önemli bir değişim olmamakla birlikte 20N yük ile yapılan deney grafiği incelendiğinde hem sürtünme katsayısında hem de aşınma derinliği değerlerinde önemli değişimler görülmektedir. Bu değişimlerin sebebinin, mesafenin artmasıyla artan yüzey deformasyonu sonucu çıkan aşınma ürünleri olduğu düşünülmektedir. Aşınma ürünlerinin bir kısmı, kayma arayüzeyinde iki ve üç yüzeyli aşınma partikülleri gibi davranmış, bir kısmı tribosistemden uzaklaşırken bir kısmı da balata ve disk yüzeyine sıvanarak yeni temas yüzeyleri oluşturmuştur.



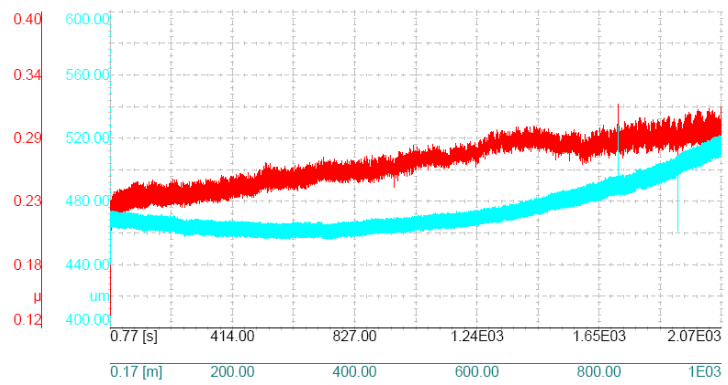
a)



b)



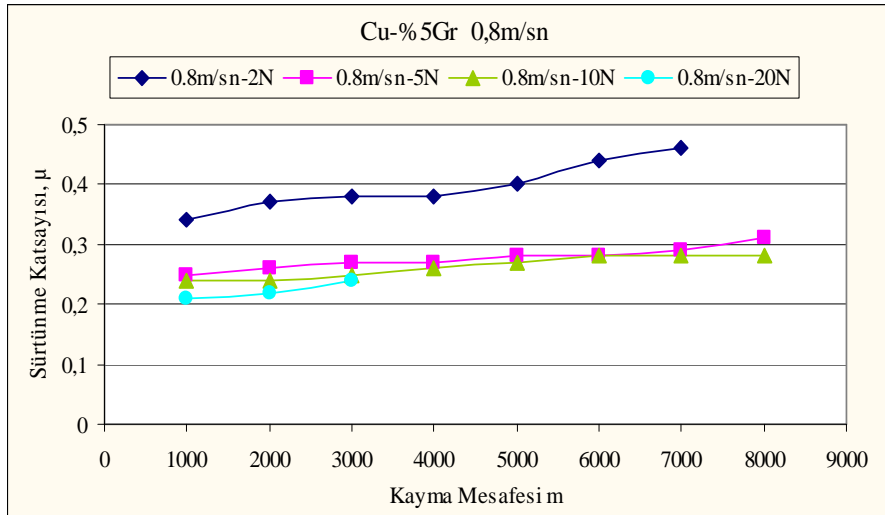
c)



d)

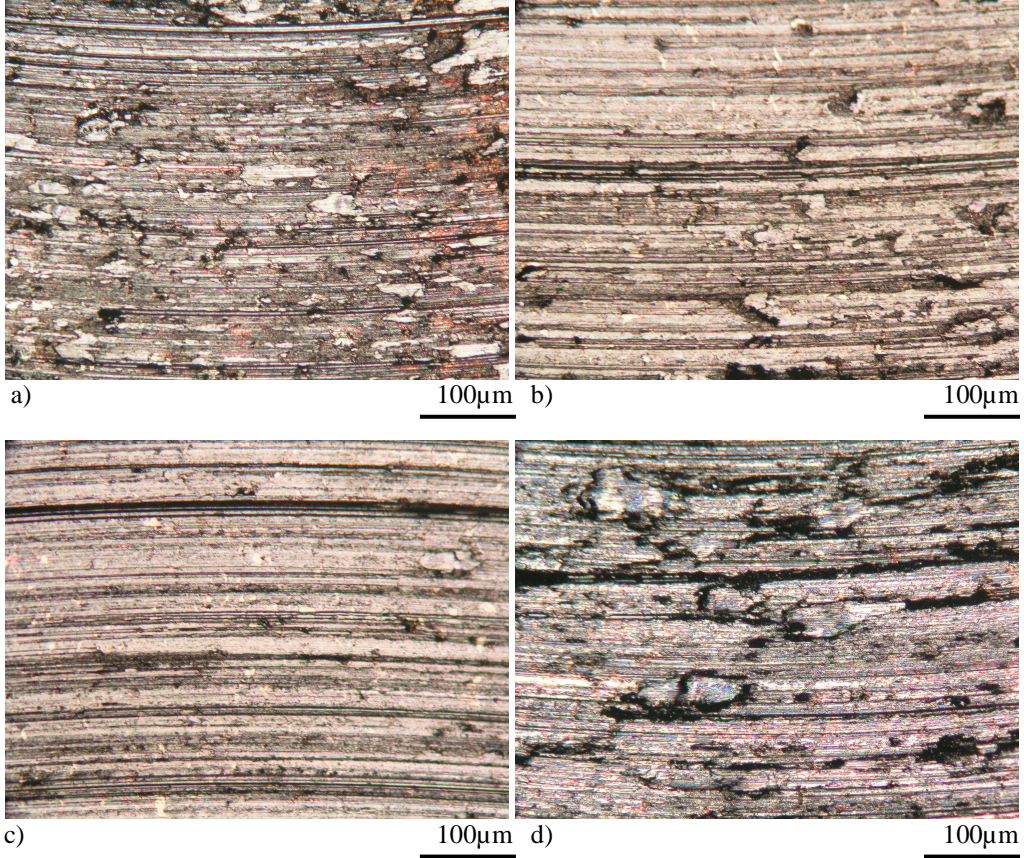
Şekil 7.114. Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin, 0,5 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

Şekil 7.115.'te Cu-%5 grafitli balata malzemesinin 0,8 m/sn sabit hız değerinde, 2N, 5N, 10N ve 20N yüklerle yapılan deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, kayma mesafesine göre verilmektedir. Grafikte, 2N yük kullanılarak elde edilen katsayı değerlerinin diğer yüklerle nazaran daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte 5N ve 10N'luk yükler ile elde edilen grafiklerin de yaklaşık aynı değerlerde oldukları gözlenmekle birlikte 2N yükteki μ değerlerinde artan mesafeye göre artış görülmekte iken diğer yüklerde önemli bir değişim olmamıştır.



Şekil 7.115. Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında, farklı kayma mesafelerinde 2N, 5N, 10N ve 20N yüke göre sürtünme katsayısı değerleri

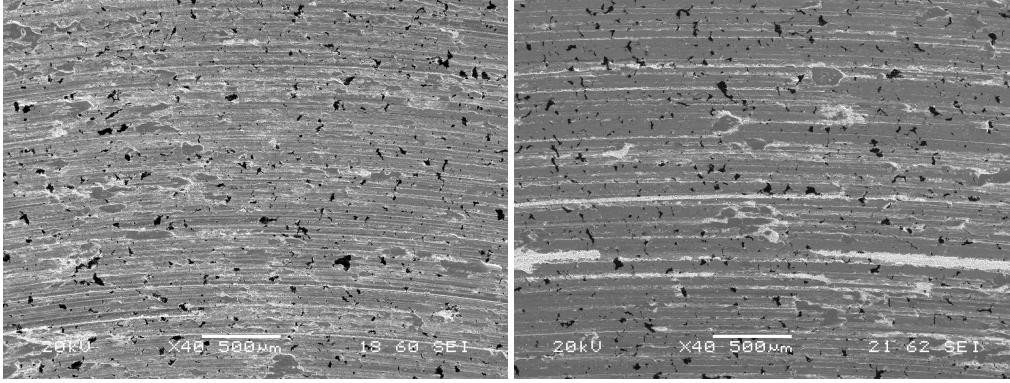
Şekil 7.116'da verilen optik mikroskop fotoğrafları incelendiğinde %5 grafit içeren balata malzemesinin 0,5 m/sn kayma hızında yapılan tüm deneylerinden alınan görüntülere benzer aşınma yüzey görüntülerinin elde edildiği görülmektedir. Diğer balata malzemelerinin aşınma yüzeyleri ile kıyaslandığında ise artan yük ile aşınma yüzeyinde yiv oluşumunun ve deformasyonun ciddi oranda arttığı gözlenmiştir.



Şekil 7.116. Cu-%5 Gr balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c)10 N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin düşük büyütmede çekilmiş optik fotoğrafları

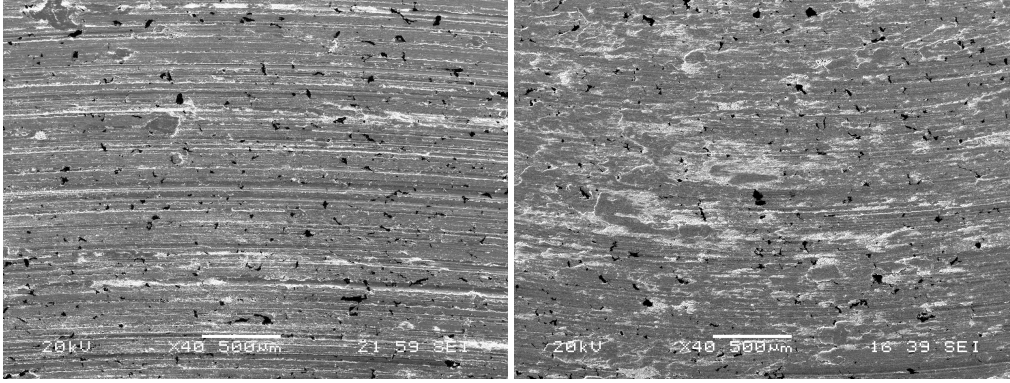
Şekil 7.117.'ye bakıldığı zaman, Şekil 7.116'daki optik fotoğraflara benzer görüntülerin elde edildiği görülmektedir. SEM görüntülerinden, 2N'dan 20N'a doğru yükün artmasıyla aşınma izlerinin ve yerel deformasyonların arttığı anlaşılmaktadır. Grafitin katı yağlayıcı özelliğinden dolayı temas yüzeyini koruması amaçlanırken, %5 oranında takviye edilen grafit, kompozit malzemenin mukavemetinin düşmesine ve bu sebeple yüzeyin aşırı deforme olmasına sebep olmuştur.

Şekil 7.118.'de verilen SEM görüntülerinden de görülebileceği üzere, aşınma yüzeylerinde kızıklama ve kesme abrazif aşınmasının yanı sıra deformasyon sonucu oluşan çatlaklar, karşı yüzeydeki sert SiC partiküller ve aşınma ürünleri tarafından yüzeyden kaldırılan aşınma ürünleri görülmektedir. Balata yüzeyinden kalkan aşınma ürünlerinin bir kısmının, kayma arayüzeyinde aşındırıcı partikül gibi davrandığı, bir kısmının da tekrar balata yüzeyine yapıştığı gözlenmektedir.



a)

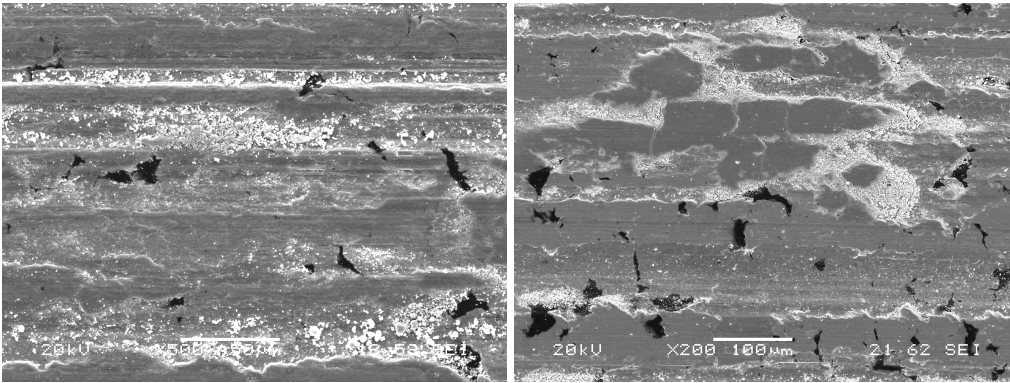
b)



c)

d)

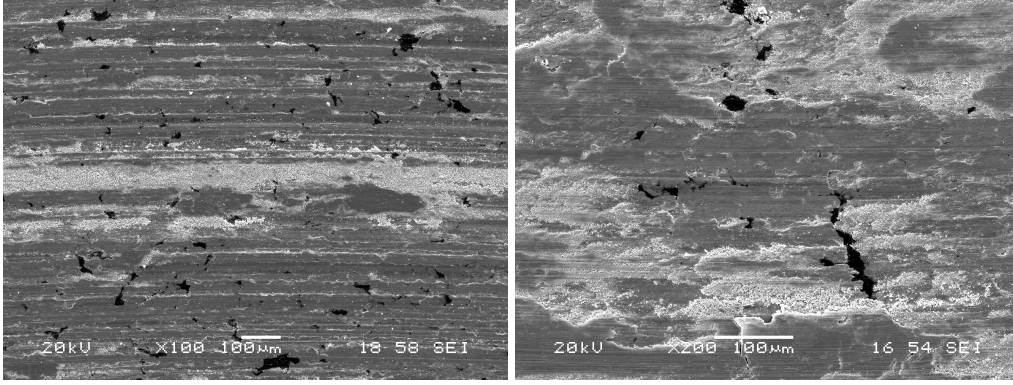
Şekil 7.117. Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında alınan SEM görüntüleri



a)

b)

Şekil 7.118. Cu-%5 Gr takviyeli balata malzemesinin a) 2N, b) 5N, c) 10N, d) 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrasında daha yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri

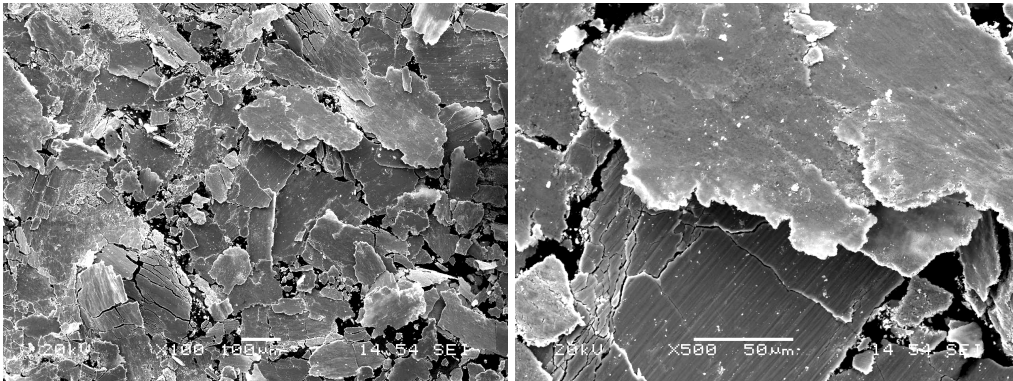


c)

d)

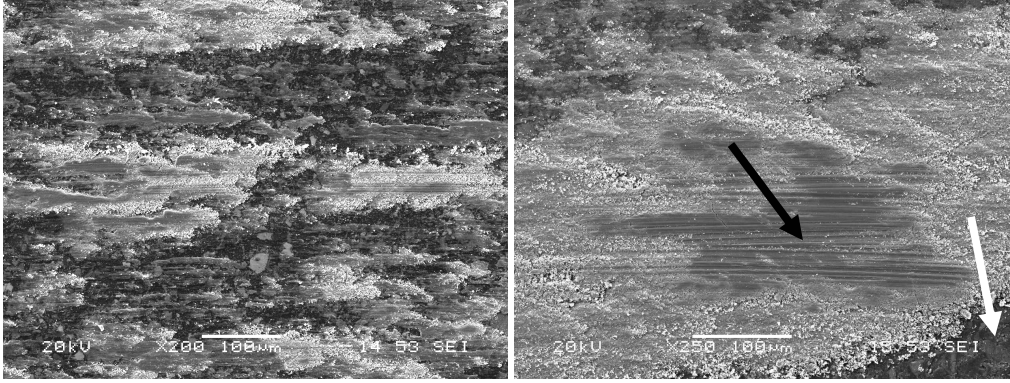
Şekil 7.118. (Devam)

Şekil 7.119.'da, Cu-%5 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında ve 20N yük ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntüler incelendiğinde, Al-Si esaslı kompozit disk yüzeyindeki sert SiC partiküller tarafından abrazif aşındırılan balata yüzeyinden, 100–200µm'dan büyük, levhasal formda partiküllerin koparıldığı görülmektedir.



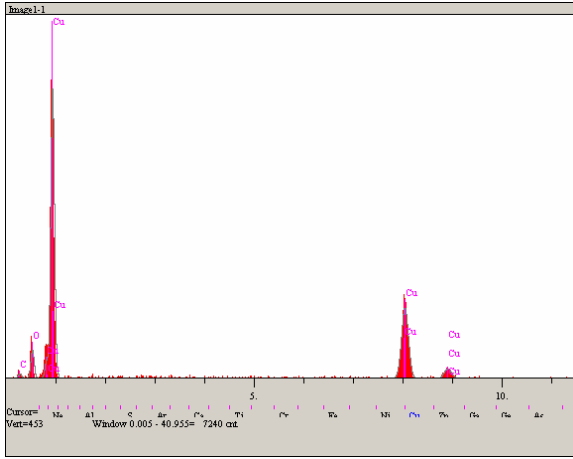
Şekil 7.119. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn kayma hızında ve 20N yük ile yapılan deney sonrası çıkan aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri

Şekil 7.120.'de ise 20N yük kullanılarak yapılan deney sonrası incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmektedir. Aşınma ile kopan balata malzemelerinin kayma etkisi ile disk yüzeyine tabaka halinde sıvandığı ve bu sıvanan tabakanın da yeni bir kayma yüzeyi oluşturarak aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir.



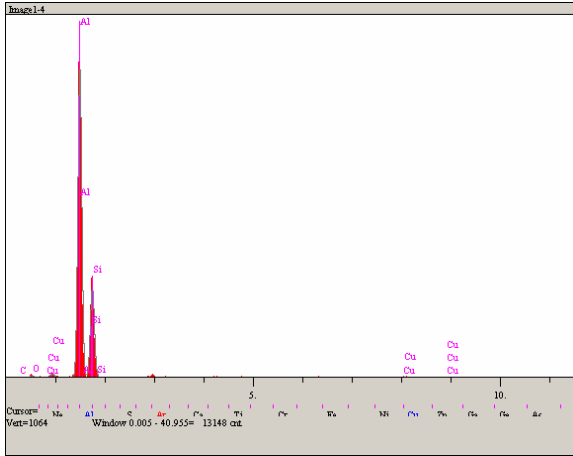
a)

b)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	5.37	38.307	16.495	wt. %
O	30.23	33.464	19.194	wt. %
Cu	151.42	28.229	64.311	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

c)



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	4.60	5.723	3.404	wt. %
Al	899.57	58.964	59.138	wt. %
Si	269.91	34.864	36.398	wt. %
Cu	2.83	0.449	1.059	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

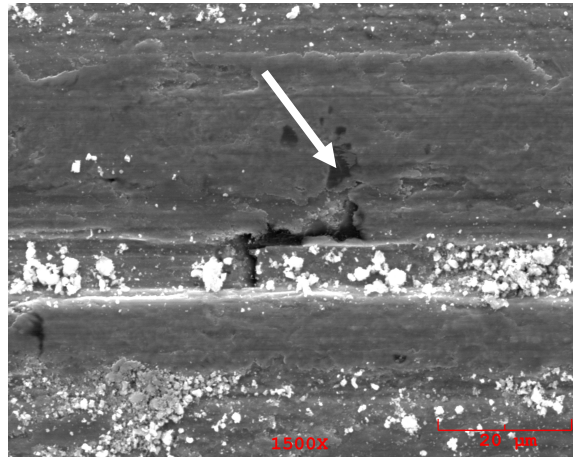
d)

Şekil 7.120. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 0,8 m/sn hız ve 20N yük ile yapılan deneyler sonrasında alınan a) ve b) SEM görüntüleri c) b görüntüsünde siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi d) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

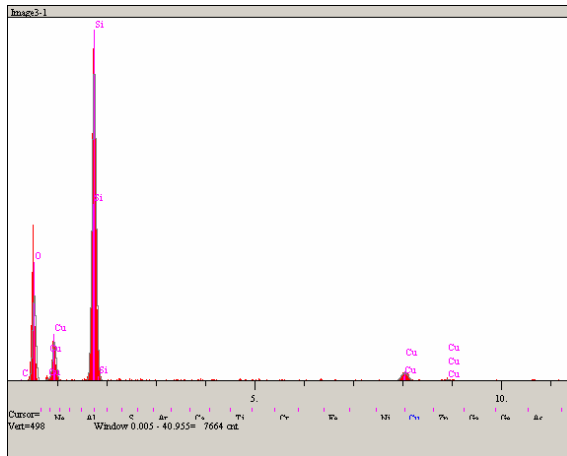
Şekil 7.121.'de verilen 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deneyler sonrası alınan balata yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizinde, karşı malzeme olan Al-Si/SiC diskten kopan aşınma partiküllerinin balata yüzeyine gömüldüğü görülmektedir.

Sürtünmeden dolayı oluşan tribooksitlerin varlığı da EDS analizindeki oksijen pikinden anlaşılmalıdır.

Şekil 7.122.'de ise 5N yük ve 0,8 m/sn kayma hızında yapılan deneylerde elde edilen görüntü ve analizlerde, yine disk yüzeyinden kopan SiC'ün balata yüzeyine transfer olduğu görülmektedir.



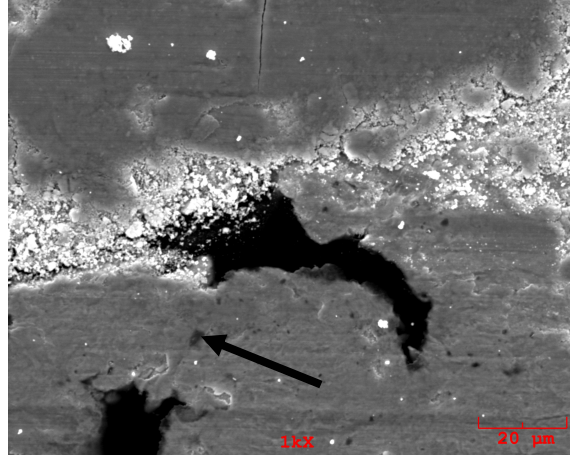
a)



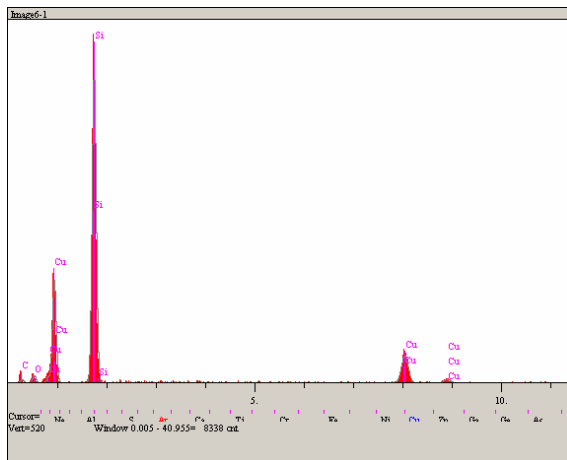
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
O	100.31	67.071	51.297	wt. %
Si	446.66	30.279	40.652	wt. %
Cu	19.81	2.650	8.051	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

b)

Şekil 7.121. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 2N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



a)

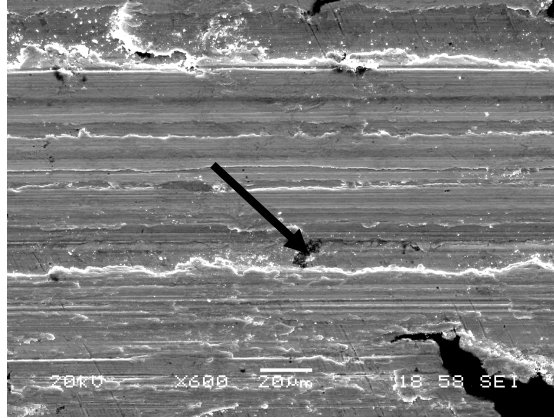


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	4.22	44.743	23.654	wt. %
O	9.60	11.542	8.128	wt. %
Si	460.06	34.632	42.811	wt. %
Cu	67.46	9.084	25.407	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

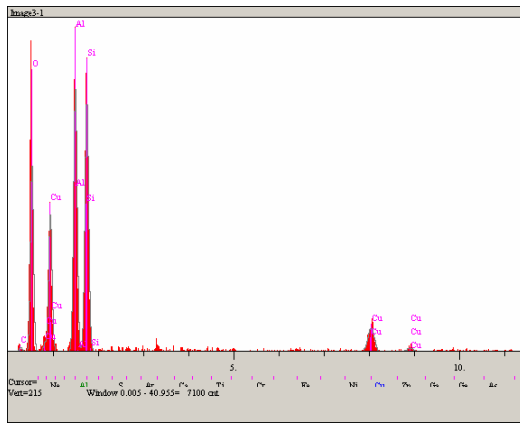
b)

Şekil 7.122. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 5N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

10N yük kullanılarak yapılan deney sonrası elde edilen balata aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizinde (Şekil 7.123), aşınma ile oluşan yivler açıkça görülmekte, disk yüzeyinden sadece SiC'ün değil matriks malzemesinin de koparak balata yüzeyine gömüldüğü anlaşılmaktadır.



a)

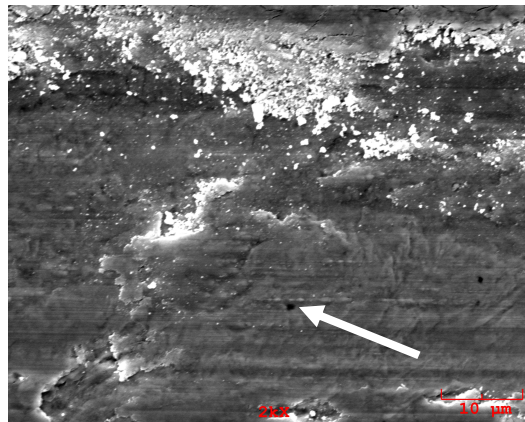


Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.35	14.073	8.644	wt. %
O	102.80	59.471	48.661	wt. %
Al	168.18	11.633	16.052	wt. %
Si	168.90	11.872	17.052	wt. %
Cu	26.73	2.951	9.590	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

b)

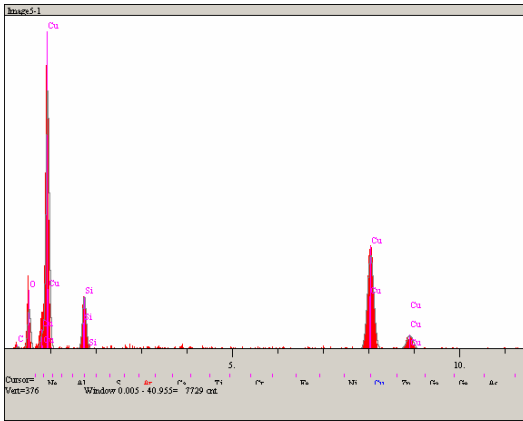
Şekil 7.123. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 10N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Siyah ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

Şekil 7.122.'te de diğer yüklerde elde edilen görüntü ve analizlere benzer olarak, disk malzemesinin aşınması ile balata yüzeyine batan aşınma ürünlerinin varlığı görülmektedir.



a)

Şekil 7.124 Cu-%5 Gr balata malzemesinin 20N yük ve 0,8 m/sn hız ile yapılan deney sonrası a) EDS yapılan yüzeyin görüntüsü b) Beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi



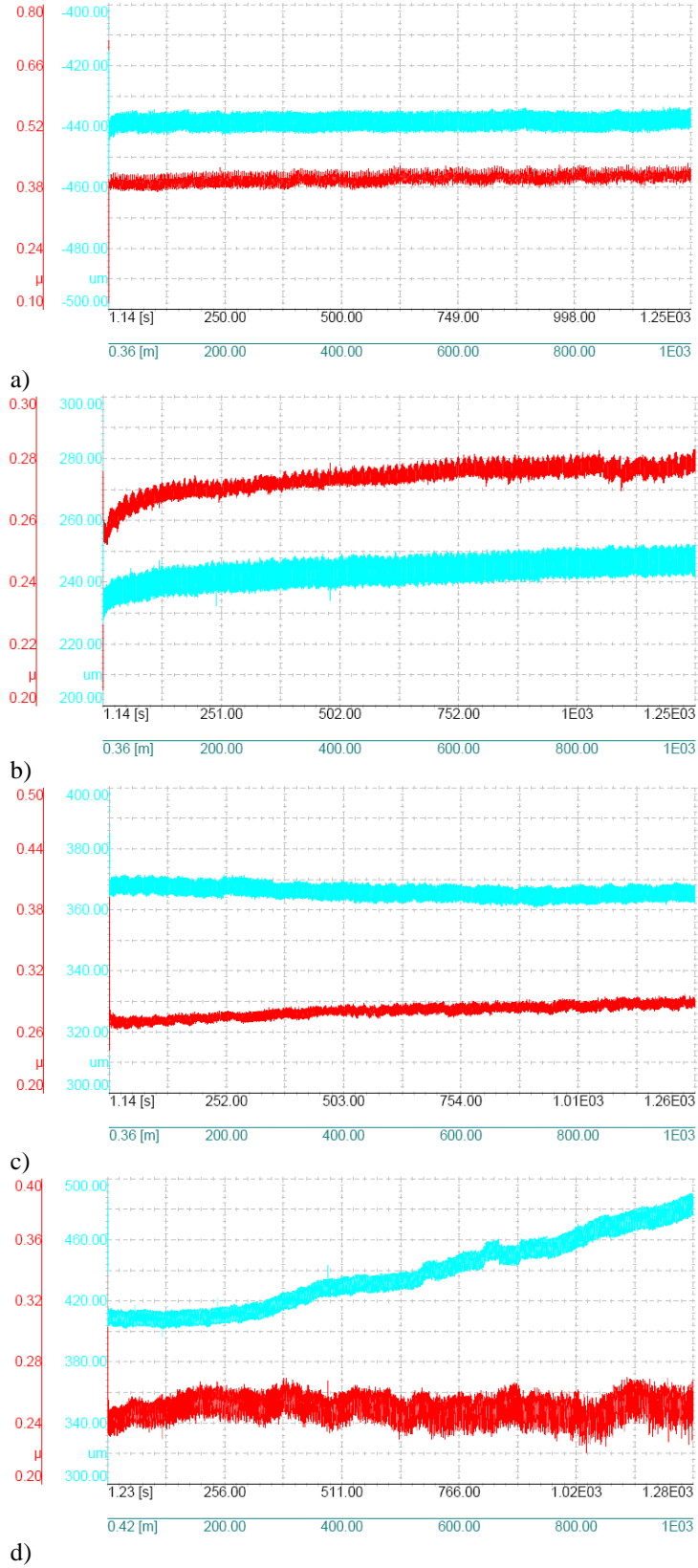
Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	2.45	20.789	7.910	wt. %
O	38.92	38.015	19.266	wt. %
Si	61.43	8.992	8.000	wt. %
Cu	182.94	32.204	64.825	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

b)

Şekil 7.124. (Devam)

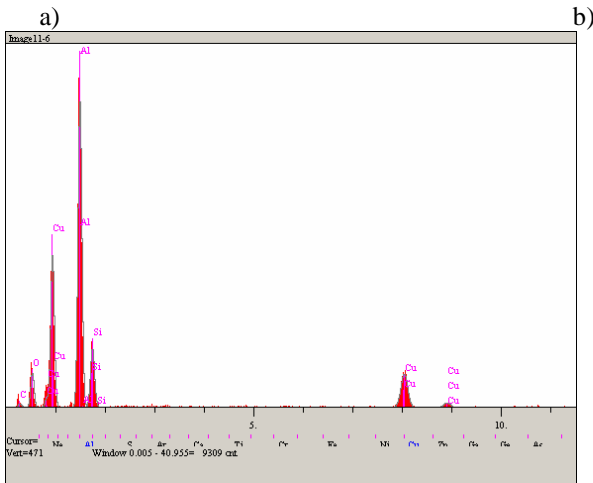
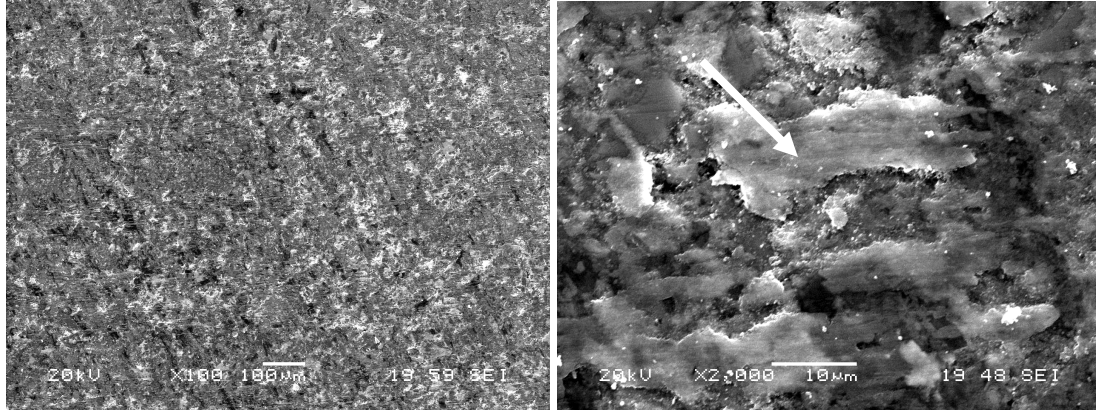
Cu-%5 Gr balata malzemesinin 2N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesinde kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.125a.' da, 5N yük, 0,5 m/sn hız ile 1000m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.125b.'de, 10N yük ile kaydedilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.125c.'de ve 20N yükte elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 7.125d.'de verilmektedir.

Grafikler incelendiğinde, 2N, 5N ve 10N'luk yükler kullanıldığında elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği değerlerinde, önemli bir değişim görülmezken, yükün 20N'a artırılmasıyla aşınma derinlik değerlerinde muazzam değişimlerin olduğu gözlenmektedir. Şekil 7.120.'de verilen 20N yük ile yapılan deney sonrası disk yüzeyinden alınan SEM görüntüsünden de görülebileceği gibi, aşınma partiküllerinin önemli bir kısmı disk yüzeyine tabaka halinde sıvanmıştır ki bu sıvanan aşınma ürünleri de aşınma derinlik grafiğindeki değişimi açıklamaktadır.



Şekil 7.125. Cu-%5 Gr balata malzemesi a) 2N b) 5N c)10N d) 20 N yük, 0,8 m/sn hız ve 1000 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma derinlik grafikleri

Cu-%5 Gr balata malzemesinin 2N, 5N ve 10N yük ile yapılan tüm deneylerinin bitmesinden sonra incelenen disk yüzeyinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7.126.'da verilmektedir. Aşınan balata malzemesinin, deney esnasındaki kayma hareketi ile disk yüzeyine sıvandığı açıkça görülmektedir.



Elt.	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
C	4.76	30.890	16.723	wt. %
O	38.75	27.724	19.994	wt. %
Al	395.61	27.146	33.015	wt. %
Si	80.15	6.583	8.334	wt. %
Cu	74.71	7.657	21.934	wt. %
		100.000	100.000	wt. %

c)

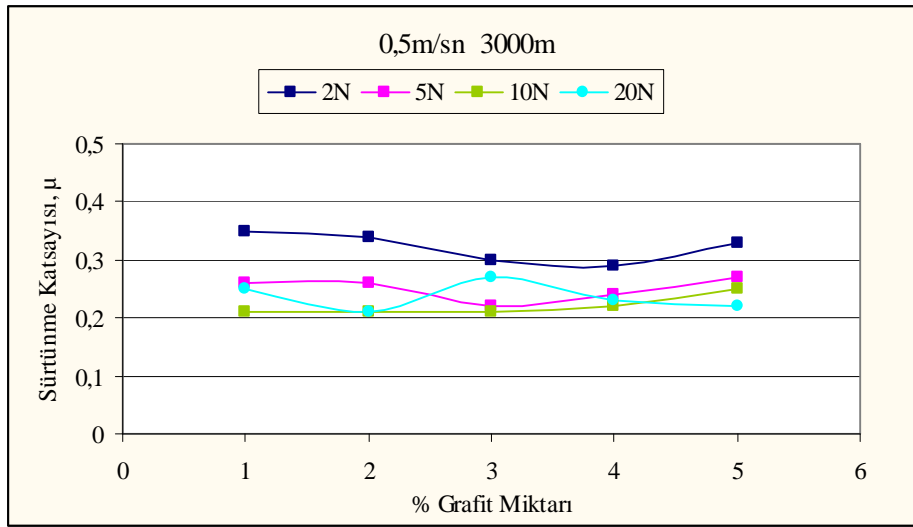
Şekil 7.126. Cu-%5 Gr balata malzemesinin 0,5 ve 0,8 m/sn hızları ile 2N, 5N ve 10N yük kullanılarak yapılan deneylerinden sonra alınan a), b) Disk yüzeyi SEM görüntüleri c) b görüntüsünde beyaz ok ile gösterilen noktanın EDS analizi

BÖLÜM 8. Genel Sonuçlar ve Öneriler

8.1. Sürtünme Katsayısı-Grafit Oranı-Yük Sonuçları

Bu çalışmada geleneksel olarak kullanılan dökme demir disk ve organik balata çiftleri yerine hacimce % 20 SiC partikül takviyeli Al-Si disk ve ağırlıkça % 1-5 grafit partikül takviyeli bakır matriksli balata malzemelerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Al-Si-SiCp diskinde karşı bakır-grafit kompozit balataların sürtünme deneyi sonuçları farklı grafit oranları, yük ve kayma hızı ilişkileri ile birlikte bir önceki bölümde analiz edilmişti. Ancak özellikle grafit miktarının değişimi ile sürtünme katsayısı sonuçlarının değişimi ve uygulanan yükün etkisi tam olarak vurgulanamamıştı. Bu bölümde ise sayılan parametrelerin sürtünme özelliklerine etkileri önemli genel sonuçları ile birlikte verilecektir.

Şekil 8.1. ve 8.2. de ilk deneyden itibaren toplam 3000 m kayma mesafesinden sonra elde edilen μ değerlerinin ortalaması alınarak, sırasıyla 0.5 m/sn ve 0.8 m/sn kayma hızlarında, % Grafit miktarı ve yüke göre sürtünme katsayısı değerleri grafikler şeklinde sunulmaktadır. Şekil 8.1. de 0.5 m/sn katma hızındaki sonuçlara bakıldığında genel olarak artan yük ile sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Bir önceki bölümde de ifade edildiği gibi ve aşınma yüzeylerinin karakterizasyonundan elde sonuçlara göre bu düşüşün nedeni artan yük ile kayma sonucu MMK balata ve diskin yüzeylerinde meydana gelen oksitlenme ve oluşan tribo-oksitlere atfedilmiştir. Grafit miktarının artışı ile sürtünme katsayısı değerlerinde çok önemli olmasa da küçük miktarlarda genel düşüşlerin olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 8.1. 0,5 m/sn hız ve 3000 m mesafe parametrelerinde sürtünme katsayısı-grafit oranı-yük sonuçları

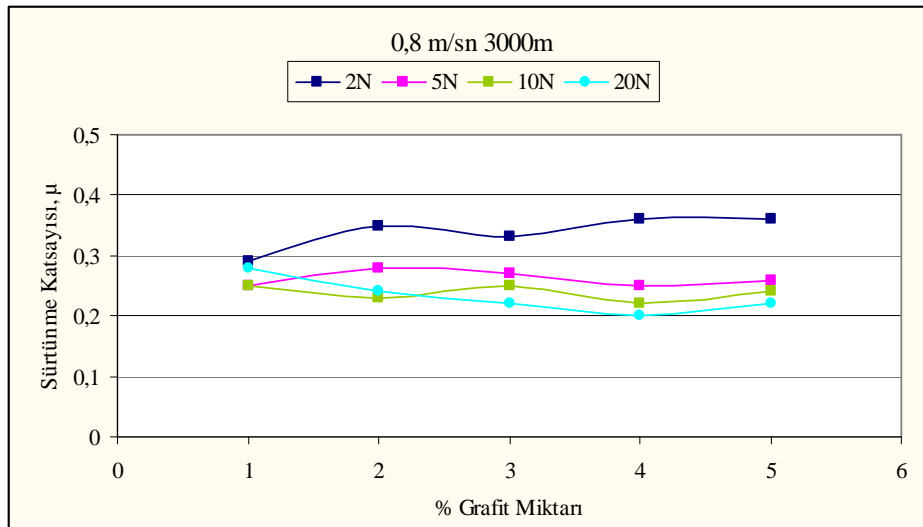
Şekil 8.2.'de benzer şekilde bu kez 0.8 m/sn kayma hızında yapılan sürtünme testlerinde yük ve grafit miktarının değişimi ile sürtünme katsayısı değerlerinin değişimi verilmektedir. Artan yük ile sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşler gözlenmekte ve grafit miktarının % 1 den % 5 değerine artırılmasının sürtünme katsayısında önemli değişikliklere yol açmadığı anlaşılmaktadır.

Yapılan sürtünme deneylerinde kayma hızının 0,5 m/sn den 0,8 m/sn değerine artırılmasının sürtünme katsayısında önemli değişimlere yol açmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum muhtemelen grafitin yağlayıcılık görevinin tüm grafit oranları ve hızlarda etkin olduğunun bir işaretidir.

Kompozit disk ve balata çiftlerinin aşınma ve sürtünme analizleri sonucunda aslında bir optimizasyon yapılarak spesifik bir disk ve balata kompozisyonundan bahsetmek mümkün olamamıştır. Konforlu bir duruş için araçlarda sürtünme katsayısının 0,3–0,5 arasında olması gerektiği belirlenmesine rağmen son yıllarda kullanılan elektronik balans sistemleri ile sürtünme katsayısı değerlerinin 0,3'ten daha da düşük olabileceği de bilinmektedir. Dolayısıyla üretilen tüm balataların Al-Si-SiCp, grafit takviyeli bakır balataların tümünün disk-balata çifti olarak kullanılabilirliği ortaya çıkmaktadır. Yapılan aşınma testlerinde balata ve disk arasında ölçülebilecek aşınma kayıplarının olmaması da bu malzemelerin bir diğer önemli üstünlüğü olarak görülmektedir. Diğer taraftan ısı iletimi değerleri

açısından bir disk ve balata çifti önermek gerekirse grafit oranının % 5 olduğu balataların yerine daha düşük grafit oranına sahip kompozit balataların kullanılması gerekebilir. Ancak termal genişleme katsayısı ele alınarak balata önerilmesi gerekiyorsa bu durumda grafit oranının yüksek olduğu kompozit balataların uygulamaya aktarılması önerilebilir.

Geleneksel dökme demir disk ve organik balataların kullanıldığı sistemlerde balataların içerdiği asbest gibi zararlı ve çok kolay özellik bozulmasına neden olan fenolik reçine gibi polimerik malzemeler balata ömrü açısından dezavantaj doğurmaktadırlar. Ayrıca organik balataların sürtünmeden dolayı ortaya çıkan yüksek ısıyı iletme zorlukları ve yüksek sıcaklıkta aşınma mukavemetlerini kaybetmeleri, adhezyonla sürtünme katsayısı değerlerinin artması diğer istenmeyen dezavantajlardır. MMK disk ve balata dizaynı ile bu çalışmada sayılan zorlukların aşılabileceği görülmektedir.



Şekil 8.2. 0,8 m/sn hız ve 3000 m mesafe parametrelerinde sürtünme katsayısı-grafit oranı-yük sonuçları

Optik mikroyapılar kompozit fren disk ve balata malzemelerinin üretimlerinin başarı ile gerçekleştirildiğini göstermiştir.

8.2. Genel Sonuçlar ve Öneriler

1. Optik mikroyapılar kompozit fren disk ve balata malzemelerinin üretimlerinin başarı ile gerçekleştirildiğini göstermiştir.
2. % Genleşme ve CTE değerlerinin, artan grafit oranı ile düştüğü gözlenmiştir.
3. Al-Si/SiCp kompozitinin CTE değerinin beklendiği mertebede değişim gösterdiği bulunmuştur.
4. Kompozit balataların termal iletkenlik değerleri artan sıcaklığa göre çok düşük bir azalma göstermiştir.
5. Kompozit balataların termal iletkenlik değerlerinde artan grafit takviye yüzdesi ile önemi düşüşlerin olduğu belirlenmiştir.
6. Üretilen balata malzemelerinin içinde en düşük termal iletkenlik değerine sahip olanının bile, ticari olarak kullanılan balata malzemesinin çok üstünde bir iletkenlik değerine sahip olduğu bulunmuştur.
7. Kompozit fren diskinin termal iletkenlik değerleri incelendiğinde sıcaklığın artmasına bağlı olarak iletkenliğin azaldığı görülmüştür.
8. Geleneksel fren disk malzemesi olarak kullanılan dökme demirin termal iletkenlik değerinden çok daha yüksek termal iletkenlik değerine ulaşıldığı görülmüştür.
9. Her balata malzemesi için farklı mesafelerde ve farklı yükler altında elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları, 0,5 m/sn ve 0,8 m/sn kayma hızlara göre ayrılarak tablolar halinde incelenmiştir.
10. Al-Si/SiCp kompozit disk ve Cu-grafit kompozit balataların aşınma deneyleri sonrasında, değerlendirilebilir aşınma kayıpları kaydedilememiştir.
11. Artan yük ile sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşler gözlenmiştir.
12. Grafit miktarının artışı ile sürtünme katsayısı değerlerinde küçük miktarlarda düşüşler olmuştur.
13. 0,5 ve 0,8 m/sn kayma hızlarında yapılan sürtünme deneylerinde artan yük ile sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşler gözlenmiştir.
14. Artan kayma hızı ile sürtünme katsayısı değerlerinde önemli değişimler görülmemiştir.

15. Artan kayma mesafesi ile sürtünme katsayısı değerlerinde küçük artışların gözlenmesine rağmen toplam kayma mesafesi boyunca katsayı değerlerinin kararlı bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir.
16. Tüm deneyler boyunca ortalama sürtünme katsayısı 0,2–0,4 arasında olduğu bulunmuştur.
17. Tüm aşınma deneyleri sonucunda aşınma ile yüzey hasarının en fazla olduğu balata malzemesinin %5 grafit takviyeli balata olduğu görülmüştür.
18. 20N yük kullanılarak yapılan tüm deneylerde, yüzey hasarının en fazla bu yükte meydana geldiği tespit edilmiştir.
19. Tüm aşınma deneyleri sonucunda incelenen Al-Si/SiCp kompozit fren disk numunesinin balata numunelerine kıyasla önemli bir hasara uğramadığı görülmüştür.
20. Üretilen balataların tümünün asbestli geleneksel organik balatalara alternatif olarak asbest içermeyen, çevre dostu malzemeler olarak kullanılabilirliği mümkündür.
21. Disk malzemesinin bileşimi değiştirilerek, termal ve aşınma deneyleri tekrarlanabilir.
22. Balata malzemelerinin bileşimi değiştirilerek, termal ve aşınma deneyleri tekrar edilebilir.
23. Disk ve balata malzemeleri farklı deney parametrelerinde ve farklı çalışma ortamlarında (suda, yağda, vakum altında) deneye tabi tutulabilir.
24. Üretilen disk ve balata malzemelerinin mekanik özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] MAZUMDAR, S., K., Composites manufacturing: materials, product and process engineering. CRC Press LLC, 2002.
- [2] SURESH, S., MORTENSEN, A., NEEDLEMAN, A., Fundamentals of metal-matrix composites. Butterworth-Heinemann, 1993, Chapter 1-2-16.
- [3] AKBULUT, H., Alümina fiber takviyeli Al-Si metal matriksli kompozit üretimi ve mikroyapı özellik ilişkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, İTÜ, 1995.
- [4] MUTLU, İ., Seramik katkı asbestsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel incelenmesi. Doktora Tezi, SA.Ü, 2002.
- [5] ASLAN, S., SiC ve grafit takviyeli çinko alüminyum hibrid kompozit malzemelerin aşınma davranışının incelenmesi. Doktora Tezi, SA.Ü, 2005.
- [6] ALTINKÖK, N., Otomotiv endüstrisinde kullanılan Al₂O₃-SiC partikül destekli metal matriks kompozit üretimi ve mekanik davranışlarının incelenmesi. Makine Eğitimi Bölümü, SA.Ü, 2002.
- [7] KONCZOS, G., BÁRSONY, I., DEÁK, P., Introduction to materials science and technology. The Technical University of Budapest, 1998, Chapter 12.
- [8] STAAB, G. H., Laminar composites. Butterworth-Heinemann, 1999, Chapter 1.
- [9] OGUOCHA, I. N. A., Characterization of aluminum alloy 2618 and its composites containing alumina particles. Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, 1999.
- [10] KENNEDY, F.E., BALBAHADUR, A.C., LASHMORE, D.S., The Friction and wear of Cu-based silicon carbide particulate metal matrix composites for brake applications. Wear 1997, 715-721.
- [11] CLYNE, T.W., Metal matrix composites: matrices and processing. encyclopaedia of materials: science and technology composites: MMC, CMC, PMC, Elsevier, 2001.

- [12] ROHATGI, P.K., LIU, Y., RAY, S., Friction and wear of metal-matrix composites. ASM Handbook, Vol 18, University of Wisconsin-Milwaukee.
- [13] CLYNE, T.W., Introduction to MMC. Elsevier, 2001.
- [14] NAKANISHI, H., NAKAYAMA, A., MURAYAMA, T., Development of aluminum metal matrix composites (Al-MMC) brake rotor and pad. JSAE Review 23, 2002, 365–370.
- [15] UYYURU, R.K., SURAPPA, M.K., BRUSETHAUG S., Tribological behavior of Al–Si–SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions, Tribology International 40, 2007, 365–373.
- [16] MOUSTAFA, S.F., ABDEL-HAMID, Z., ABD-ELHAY, A.M., Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder. Materials Letters 53, 2002, 244–249.
- [17] SUR, G., ŞAHİN, Y., GÖKKAYA, H., Ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum esaslı tanecik takviyeli kompozitlerin üretimi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2005.
- [18] UYYURU, R.K., SURAPPA, M.K., BRUSETHAUG S., Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/brake pad tribo-couple. Wear, Elsevier Science, 2005.
- [19] MOSLEH, M., BLAU, P.J., DUMITRESCU, D., Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials. Wear 256, 2004, 1128–1134.
- [20] BASAVARAJAPPA, S., CHANDRAMOHAN, G., Dry sliding wear behaviour of hybrid metal matrix composites. Department of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, MATERIALS SCIENCE, Vol. 11, No. 3., 2005, 1392–1320.
- [21] STOLARSKI, T.A., Tribology in machine design. Chapter 2, Butterworth-Heinemann, 1990.
- [22] BHUSHAN, B., Principles of tribology. Modern Tribology Handbook, Volume I, CRC Press, 2001.
- [23] COLAÇO, R., VILAR, R., A model for the abrasive wear of metallic matrix particle-reinforced materials, Wear 254, 2003, 625–634.
- [24] STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W., Engineering tribology. TEAM LRN, Butterworth-Heinemann.

- [25] MAJUMDAR, A., BHUSHAN, B., Characterization and modeling of surface roughness and contact mechanics. Handbook of Micro/Nanotribology, Chapter 4, 1999.
- [26] JAIME COLCHERO, J., MEYER, E., MARTI, O., Friction on an atomic scale. handbook of micro/nanotribology, Chapter 6, 1999.
- [27] FERRANTE, J., ABEL, P. B., Surface physics in tribology. Chapter 3, Handbook of Micro/Nanotribology, 2nd ed, 1999.
- [28] LUDEMA, K. C., Introduction to wear. University of Michigan, in ASM Handbook, Vol 18.
- [29] ASHBY, F., JONES, D. R. H., Engineering materials 1, an introduction to their properties and applications. Second Edition Butterworth-Heinemann, Elsevier Science, 1996.
- [30] K. C. LUDEMA, Sliding and Adhesive Wear, ASM Handbook, Vol 18
- [31] BLAU, P., 'The significance and use of the friction coefficient' Tribology International 34 (2001) 585–591.
- [32] CHINOWSKY, S., Friction and wear of carbon-graphite materials, in ASM Handbook, Vol 18.
- [33] YONGZHONG ZHAN AND GUODING ZHANG, Friction and wear behavior of copper matrix composites reinforced with SiC and graphite particles. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 2003.
- [34] ZUM GAHR, K. H., Microstructure and wear of materials, Tribology Series 10, Elsevier, 1987.
- [35] HERLING, D. R., Low-cost cast aluminum metal matrix composites. Automotive Lightweighting Materials FY Progress Report, 2004.
- [36] MIYOSHI, K., Solid lubrication fundamentals and applications friction and wear properties of selected solid lubricating films: case studies. NASA/TM—2000-107249, Chapter 6.
- [37] BAYER, R. G., Mechanical wear fundamentals and testing. Second edition, Marcel Dekker, 2004.
- [38] MORSHED, M. M., HASEEB A. S. M. A., Physical and chemical characteristics of commercially available brake shoe lining materials: a comparative study. Journal of Materials Processing Technology 155–156, 2004, 1422–1427.

- [39] PAUSTENBACH, D. J., FINLEY, B. L., LU, E. T., BRORBY G. P., SHEEHAN P. J., Environmental and occupational health hazards associated with the presence of asbestos in brake linings and pads (1900 to present): a state-of-the-art review. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 2004, 7:33–110.
- [40] BLAU, P., JOLLY, B.C., Wear of truck brake lining materials using three different test methods *Wear* 259, 2005, 1022–1030.
- [41] GÖKTAN, A.G., GÜNEY, A., EREKE, M., Taşıt frenleri. İTÜ Makina Fakültesi, Otomotiv Anabilim Dalı İTÜ Makina Fakültesi, Otomotiv Anabilim Dalı İstanbul, Ocak 1995.
- [42] ERIKSSON, M., Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal. *Comprehensive Summaries Of Uppsala Dissertations From The Faculty Of Science And Technology*, Uppsala 2000.
- [43] ANDERSON, A.E., Friction and wear of automotive brakes. *ASM Handbook*, Vol 18.
- [44] ORTHWEIN, W.C., Clutches and brakes design and selection. Second Edition, Marcel Dekker, 2004.
- [45] K. LADEN, J. D. GUERIN, M. WATREMEZ, J.P. BRICOUT, *Tribology letters* 8, 2000, 237.
- [46] ERIKSSON, M., BERGMAN, F., JACOBSON, S., On the nature of tribological contact in automotive brakes. Uppsala, Sweden, 2001.
- [47] AKIN, E., Bakır hibrid metal matriksli kompozit fren balatası üretimi ve sürtünme özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, SA.Ü.,2006.

ÖZGEÇMİŞ

Deniz GÜLTEKİN, 05.03.1982 de Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2000 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D'de lisansüstü eğitimine başladı. 2005 yılında, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Araştırma Görevlisi olarak atanan Deniz GÜLTEKİN halen görevine devam etmektedir.