



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAKIR ESASLI KOMPOZİT ELEKTRİK MOTOR FIRÇASI ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hüseyin İPEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 09 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 07 / 07 / 2017

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Trabzon 2017

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Hüseyin İPEK Tarafından Hazırlanan**

**BAKIR ESASLI KOMPOZİT ELEKTRİK MOTOR FIRÇASI ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 06 /06/2017 gün ve 1705 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ümit ALVER

Üye : Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

Üye : Prof. Dr. Hikmet ALTUN

Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Üye : Doç. Dr. Murat AYDIN

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Kompozit malzemeler, bileşenlerinin özelliklerini bünyesinde toplayarak, tek başına bir malzeme bulunamayacak niteliklerin bir araya geldiği özel bir malzeme sınıfıdır. Günümüz gelişen teknolojisinde önemli yer tutan kompozit malzemeler edindiği bu yeri yüksek dayanım, hafiflik, üretim kolaylığı gibi özellikler sayesinde kazanmıştır. Kompozit malzemeler başta havacılık ve uzay sanayii olmak üzere tercih edildiği birçok teknoloji sahası mevcuttur.

Bu çalışma ile elektrik – elektronik alanı ve metal matrisli kompozit malzemelerin kesişim noktalarından biri olan elektrik motor fırçaları üretilerek incelenmiştir. Elektrik motor fırçaları, elektrik iletkenliği sağlayan ve hareketli parça ile direk temas halinde olan, zamanla aşınan ve motorda yüksek enerji sarfiyatına karşılık düşük verim gösteren ve hatta motorun çalışmamasına neden olacak şekilde işlevini kaybedebilen önemli bir parçadır. Bu çalışma ile hayati önemi olan fırça malzemelerinin toz metalürjisi yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Bakır esaslı olarak üretilen bu fırçalara farklı takviye malzemeleri değişen oranlarda katılarak özellikleri incelenmiştir.

Bana, birlikte çalışma fırsatı sunan, çalışmamın her aşamasında yakın ilgisini esirgemeyen, kıymetli fikirleriyle bana ışık tutan değerli danışman hocam Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI başta olmak üzere, çalışmalarında beni teşvik eden ve yapıcı eleştirileriyle yol gösteren Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya, beni sürekli olarak destekleyen sevgili eşim Dilek İpek'e, eğitim hayatım boyunca maddi - manevi desteklerini esirgemeyen aileme, her türlü çalışmalarında yardımcı olan değerli mesai arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Temel VAROL, Yrd. Doç. Dr. Fatih ERDEMİR ve Arş. Gör. Serdar ÖZKAYA'ya, değerli sanayici Metin GÖBÜLÜK'e, K.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde görevli Teknisyen Mustafa ZIVALIOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FHD-2016-5709 kodu ile hızlı destek programı kapsamında desteklenmiştir.

Hüseyin İPEK
Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bakır Esaslı Kompozit Elektrik Motor Fırçası Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/07/2017

Hüseyin İPEK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	18
1.1. Giriş.....	18
1.1.1. Kompozit Malzemeler ve Sınıflandırma	19
1.1.2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri.....	21
1.1.3. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları.....	21
1.2. Elektrik Motorları.....	22
1.2.1. Elektrik Motorlarının Türleri.....	23
1.2.2. Elektrik Motorlarının Bileşenleri	25
1.3. Fırçalı Motorlar	26
1.3.1. Elektrik Motor Fırçaları.....	27
1.3.2. Elektrik Motor Fırça Türleri	28
1.3.3. Elektrik Motor Fırçalarının Özellikleri.....	29
1.4. Elektrik Motoru Fırça Malzemeleri.....	36
1.4.1. Bakır (Cu).....	36
1.4.2. Alümina (Al ₂ O ₃).....	37

1.4.3.	Silisyum Karbür (SiC).....	38
1.4.4.	Bor Karbür (B ₄ C)	39
1.4.5.	Grafen ve Grafit (C)	39
1.4.6.	Hegzagonal Bor Nitrür (hBN)	42
1.4.7.	Gümüş (Ag).....	43
1.4.8.	Kalay (Sn).....	45
1.4.9.	Alüminyum (Al)	45
1.4.10.	Molibden Difülfit (MoS ₂).....	46
1.5.	Elektrik Motor Fırçası Üretim Yöntemleri.....	47
1.6.	Elektrik Motor Fırçası Performansını Etkileyen Faktörler.....	48
1.6.1.	Ark Oluşturma Eğilimi/Direnci	48
1.6.2.	Yüzeyde Film Oluşturma Kabiliyeti.....	48
1.6.3.	Kolektör Yüzey Aşınması	49
1.6.4.	Mekanik ve Elektriksel Kayıplar	49
1.6.5.	Fırça Ömrü.....	49
1.6.6.	Akım Taşıma Kapasitesi.....	50
1.6.7.	Kararlı Çalışma.....	50
1.7.	Elektrik Motor Fırçalarında ve Kolektörlerde Karşılaşılan Durumlar	50
1.7.1.	Kolektörde Karşılaşılan Hasarlar ve Durumlar	51
1.7.2.	Fırçalarda Karşılaşılan Yüzey ve Kenar Oluşumları.....	57
1.8.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	64
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	67
2.1.	Kullanılan Malzemeler	67
2.2.	Numune Üretimi	69
2.3.	Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar	72
2.3.1.	Yüksek Enerjili Bilyeli Değirmen	72
2.3.2.	Fırça Numunesi Üretim Kalıbı ve Pres	72

2.3.3.	Sinterleme Fırını	73
2.3.4.	Elektro-Mekanik Aşınma Deney Düzeneği.....	74
2.3.5.	Elektrik İletkenliği ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazları	76
2.3.6.	Deneylerde Kullanılan Hassas Terazi ve Sertlik Ölçüm Cihazı.....	76
2.3.7.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işını Difraktometresi (XRD)	77
3.	BULGULAR	78
3.1.	Fırça Numunelerinin Elektriksel İletkenlikleri.....	78
3.2.	Elektro-Mekanik Aşınma Deneyleri.....	84
3.3.	Fırça Numunelerinin % Porozite Değerleri	115
3.4.	Fırça Numunelerinin Sertlik Değerleri	121
3.5.	Fırça Numunelerinin Aşınma Kayıpları	127
3.6.	Fırça Numunelerinin Yüzey Pürüzlülüğü.....	133
3.7.	Fırça Numunelerinin Sıcaklık Değişimi	139
3.8.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS İncelemeleri	145
3.9.	Fırça Numunelerinin XRD Analizleri	183
4.	İRDELEME	189
5.	SONUÇLAR.....	198
6.	ÖNERİLER	200
7.	KAYNAKLAR.....	201

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

BAKIR ESASLI KOMPOZİT ELEKTRİK MOTOR FIRÇASI ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hüseyin İPEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI
2017, 211 Sayfa

Bu çalışma, elektrik motorlarında hareketli kısım (rotor) ile direkt olarak temas halinde bulunan, elektriksel olarak iletken ve aşınma elemanı olan elektrik motor fırçalarının üretimi ve özelliklerinin incelenmesi üzerine yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, bakır matrisli ve değişen oranlarda grafen (Gr), hegzagonal bor nitrür (h-BN), alümina (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) ve silisyum karbür (SiC) takviyeleri içeren, ikili ve üçlü (hibrit) kompozitlerden oluşan elektrik motor fırçaları üretilmiş ve özellikleri incelenmiştir. Kompozit tozları, 8 saatlik mekanik alaşımlama süresine müteakip 500 MPa (± 5 MPa) basınç altında, soğuk ve tek tesirli hidrolik pres ile kompakt hale getirildi. Kalıplanan numuneler 900 °C'de indirgeyici gaz atmosferinde 1 saat süre ile sinterlendi. Her numune 100 kPa yay basıncı; 8, 16, 24, 32 m/s'lik dönme hızları ve 4, 8, 12, 16 A/cm²'lik akım yoğunluklarında deneye tabi tutulmuştur. Her numunenin elektriksel iletkenlikleri, poroziteleri, sertlikleri, aşınma kayıpları, yüzey pürüzlülükleri ve çalışma esnasındaki oluşan sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Numunelerin elektriksel iletkenlikleri incelendiğinde, artan takviye oranı ile elektrik iletkenliklerinin düştüğü tespit edilmiştir. Elektriksel iletkenlik açısından en olumsuz takviye malzemesinin SiC olduğu tespit edilmiştir. Elektro-mekanik aşınma deneyleri incelendiğinde ağırlıkça %5 grafene ek %1 Al_2O_3 içeren fırçada 0.083 N ile en düşük sürtünme kuvveti ölçülmüştür. Üretilen fırça numunelerinin ağırlık kayıpları değerlendirildiğinde ise en fazla ağırlık kaybının ağırlıkça %20 h-BN bakır esaslı fırçada, 32 m/s'lik dönme hızı ve 16 A/cm²'lik akım yoğunluğu koşullarında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca verilen numune için toplam ağırlık kaybının ortalama 152.4 mg olduğu görülmüştür. Üretilen numunelerin porozite değerleri incelendiğinde ise genel olarak artan takviye oranı ile porozite oranının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca en yüksek porozite oranının ağırlıkça %15 grafen takviyesine ek %1 B_4C içeren numunede % 22.4 olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde genel eğilimin artan takviye oranı ile sertliğin azalması yönünde olduğu görülmüştür. En yüksek sertlik değerinin ise ağırlıkça %5 Gr içeren bakır esaslı kompozit fırçada (20 BSD) olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mekanik öğütme, Kompozit, Elektrik motor fırçaları, Bakır esaslı fırçalar, Hegzagonal Bor Nitrür, Grafen

PhD. Thesis

SUMMARY

PRODUCTION OF COPPER BASED ELECTRICAL MOTOR BRUSHES AND
INVESTIGATION OF PROPERITES

Hüseyin İPEK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Material Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Hamdullah ÇUVALCI
2017, 211 Pages

SUMMARY

This study was carried out on the examination of the production and properties of electric motor brushes which act as electrically conductive and wear elements in direct contact with the moving part (rotor) of electric motors. Within the scope of the study, electric motor brushes were produced and their characteristics were investigated in six different groups consisting of copper matrix composites containing graphene, hexagonal boron nitride, alumina, boron carbide and silicon carbide reinforcements in varying proportions. The composite powders were compacted with a cold and single-acting hydraulic press under a pressure of 500 MPa (± 5 MPa) following 8 hours of mechanical alloying process. The molded samples were sintered at 900 °C for 1 hour in a reducing gas atmosphere. Each sample was tested three times at 100 kPa spring pressure, 8, 16, 24, 32 m/s rotational speeds and current densities of 4, 8, 12, 16 A/cm². In addition to that, the electrical conductivities, porosities, hardness, wear losses, surface roughness and temperature changes (°C) during testing were investigated for each sample. It was determined that the electrical conductivity decreased with increasing reinforcement ratio. In terms of electrical conductivity, it was determined that SiC is the most negative reinforcement material. When the electro-mechanical abrasion tests were examined, the lowest friction force (N) was measured with 0.083 N on a brush containing 5 wt. % graphene with 1 wt. % Al₂O₃. The lowest voltage drop (V) was measured with 0.03 V on a sample containing 10 wt. % Gr. with 0.5 wt. % Al₂O₃. When the weight loss of the brush samples were evaluated, it was determined that the most weight loss was achieved with a sample of 20 wt. % h-BN reinforced copper-based brush, at the rotation speed of 32 m/s with a current density of 16 A/cm². It was also found that the average weight loss for this sample was 152.4 mg. When the hardness values were examined, it was seen that the general tendency in the hardness of samples decreased with the increasing of reinforcement ratio. The highest hardness value was found on the copper based composite brush (20 HB) containing 5 wt. % Gr.

Keywords: Mechanical milling, Composite, Electric motor brushes, Copper based brushes,
Hexagonal Boron Nitride, Graphene

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Malzemelerin sınıflandırması.....	18
Şekil 2. Kompozit malzemelerin sınıflandırması	20
Şekil 3. Elektrik motorlarında basit sınıflandırma.....	23
Şekil 4. Elektrik motorunun kısımları	25
Şekil 5. Yerleştirme şekillerine göre fırça konumları.....	27
Şekil 6. Eşitlik 1’de verilen değişkenlerin şematik gösterimi	30
Şekil 7. Alümina kristal kafes yapısı	38
Şekil 8. Rombohedral (kırmızı) ve hegzagonal (mavi) birim hücreleri	39
Şekil 9. Grafit yapısındaki grafen katmanlarının hegzagonal ve rombohedral	40
Şekil 10. Hegzagonal bor nitrür şematik gösterimi	43
Şekil 11. Molibdenitin kristal kafes yapısı	47
Şekil 12. Elektrik fırçası üretimi genel akış şeması	48
Şekil 13. Farklı renklerin oluştuğu kolektör görünümleri a) İnce film tabakasının	52
Şekil 14. Elektriksel, mekanik ve atmosferik etkileri gösteren kolektör yüzey	54
Şekil 15. Yanma hasarı a) lamel erozyonu, b) yanma ve koyu renk	54
Şekil 16. Gölgeleme ve bantlaşma, a) dönme yönündeki koyu renk	55
Şekil 17. Kolektör lamellerinin aşınması	56
Şekil 18. Kolektör lamellerinin hatası a) yüksek ve düşük lamel, b) yüksek mika, c).....	56
Şekil 19. Pürüzsüz, parlak fırça yüzeyi	57
Şekil 20. Dokulu (hafif gözenekli) kayar yüzey görünüşü.....	58
Şekil 21. İnce çizgili yüzey görüntüsü oluşmuş fırça yüzeyi	58
Şekil 22. İnce tırtıklı yüzey görüntüsü oluşmuş fırça yüzey görüntüsü	59
Şekil 23. Ağır tırtıklı yüzey	59
Şekil 24. Gölgeleme kusuru.....	60
Şekil 25. Yanmış kenar hasarına ait fırça yüzey resmi.....	60
Şekil 26. Çukurcuk oluşmuş yüzey kusuru	61
Şekil 27. Tabakalı fırça yüzey görünüşü	61
Şekil 28. Çift katlı yüzey	62
Şekil 29. Bakır parçaları birikmiş fırça yüzeyi görüntüsü.....	63
Şekil 30. Bir fırçaya ait kırılmış kenar hatası	63

Şekil 31. Deneysel çalışmalarda kullanılan bakır tozuna ait SEM görüntüsü.....	67
Şekil 32. Deneysel çalışmalarda kullanılan hegzagonal bor nitrür tozuna ait.....	68
Şekil 33. Deneysel çalışmalarda kullanılan alümina tozuna ait	68
Şekil 34. Deneysel çalışmalarda kullanılan silisyum karbür tozuna ait SEM.....	68
Şekil 35. Deneysel çalışmalarda kullanılan bor karbür tozuna ait SEM	69
Şekil 36. Deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek enerjili bilyeli değirmen.....	72
Şekil 37. Deneysel çalışmalarda kullanılan otomatik pres	73
Şekil 38. Toz sıkıştırma kalıbı şematik resmi a) kalıp teknik resmi,	73
Şekil 39. Sinterleme fırını görünümü	74
Şekil 40. Fırça deney düzeneği a) üstten görünüş b) profilden görünüş	75
Şekil 41. a) Elektrik iletkenliği ölçüm cihazı b) yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	76
Şekil 42. a) Deneylerde kullanılan hassas terazi b) sertlik ölçüm cihazı	77
Şekil 43. a) Taramalı elektron mikroskobu (SEM) b) X ışınları kırınımı (XRD) cihazı ...	77
Şekil 44. Grafen katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği.....	79
Şekil 45. Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği	80
Şekil 46. Grafen ve Alümina katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği	81
Şekil 47. Grafen ve Silisyum Karbür katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği.....	82
Şekil 48. Grafen ve Bor Karbür katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği.....	83
Şekil 49. Grafen ve Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların elektriksel	84
Şekil 50. %5 Grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	85
Şekil 51. %10 Grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	86
Şekil 52. %15 Grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	87
Şekil 53. %30 Grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	88
Şekil 54. %5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	89
Şekil 55. %10 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	90
Şekil 56. %20 h-BN bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış.....	91
Şekil 57. %5 Grafen ve %0.5 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	92
Şekil 58. %5 Grafen ve %1 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	93
Şekil 59. %10 Grafen ve %0.5 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	94
Şekil 60. %10 Grafen ve %1 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	95
Şekil 61. %15 Grafen ve %0.5 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	96
Şekil 62. %15 Grafen ve %1 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	97
Şekil 63. %5 Grafen ve %0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik.....	98

Şekil 64. %5 Grafen ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	99
Şekil 65. %10 Grafen- %0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış.....	100
Şekil 66. %10 Grafen ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	101
Şekil 67. %15 Grafen -%0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış.....	102
Şekil 68. %15 Grafen ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	103
Şekil 69. %5 Grafen - %0.5 B ₄ C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	104
Şekil 70. %5 Grafen ve %1 B ₄ C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	105
Şekil 71. %10 Grafen - %0.5 B ₄ C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	106
Şekil 72. %10 Grafen ve %1 B ₄ C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	107
Şekil 73. %15 Grafen ve %0.5 B ₄ C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	108
Şekil 74. %15 Grafen ve %1 B ₄ C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	109
Şekil 75. %5 Grafen ve %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış ..	110
Şekil 76. %5 Grafen ve %1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış	111
Şekil 77. %10 Grafen ve %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik.....	112
Şekil 78. %10 Grafen - %1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış.....	113
Şekil 79. %15 Grafen - %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik	114
Şekil 80. %15 Grafen ve %1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik.....	115
Şekil 81. Grafen katkılı bakır fırçaların % porozitesi.....	116
Şekil 82. h-BN katkılı bakır fırçaların % porozitesi.....	117
Şekil 83. Grafen ve Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaların % porozite değerleri.....	118
Şekil 84. Grafen ve SiC katkılı bakır fırçaların % porozitesi.....	119
Şekil 85. Grafen ve B ₄ C katkılı bakır fırçaların % porozitesi	120
Şekil 86. Grafen ve h-BN katkılı bakır fırçaların % porozitesi	121
Şekil 87. Grafen katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği.....	122
Şekil 88. Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği.....	123
Şekil 89. Grafen ve Alümina katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği.....	124
Şekil 90. Grafen ve Silisyum Karbür katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği	125
Şekil 91. Grafen ve Bor Karbür katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği	126
Şekil 92. Grafen ve Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği.....	127
Şekil 93. Grafen katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları	128
Şekil 94. h-BN katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları.....	129
Şekil 95. Grafen ve Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları	130
Şekil 96. Grafen ve SiC katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları.....	131

Şekil 97. Grafen ve B ₄ C katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları	132
Şekil 98. Grafen ve h-BN katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları.....	133
Şekil 99. Grafen katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri	134
Şekil 100. h-BN katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri	135
Şekil 101. Grafen - Al ₂ O ₃ katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey	136
Şekil 102. Grafen ve SiC katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey	137
Şekil 103. Grafen ve B ₄ C katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey	138
Şekil 104. Grafen - h-BN katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey.....	139
Şekil 105. Grafen katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları.....	140
Şekil 106. h-BN katkılı bakır fırçaların ortalama sıcaklık değerleri	141
Şekil 107. Grafen ve Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında.....	142
Şekil 108. Grafen ve SiC katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları	143
Şekil 109. Grafen ve B ₄ C katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında.....	144
Şekil 110. Grafen ve h-BN katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında.....	145
Şekil 111. %30 Grafen katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi).....	146
Şekil 112. %5 Gr katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	147
Şekil 113. %10 Gr katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	148
Şekil 114. %15 Gr katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	149
Şekil 115. %30 Gr katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	150
Şekil 116. % 10 h-BN katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi).....	151
Şekil 117. %5 h-BN katkılı fırçaya ait SEM görüntüsü	152
Şekil 118. %10 h-BN katkılı fırçaya ait SEM görüntüsü	153
Şekil 119. %20 h-BN bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	154
Şekil 120. % 10 Gr - % 0,5 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi)...	155
Şekil 121. %5 Gr ve %0.5 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	156
Şekil 122. %5 Gr ve %1 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	157
Şekil 123. % 10 Gr ve %0.5 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	158
Şekil 124. % 10 Gr ve %1 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	159
Şekil 125. % 15 Gr ve %0.5 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	160
Şekil 126. % 15 Gr ve %1 Al ₂ O ₃ katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	161
Şekil 127. %15 Gr ve % 0,5 SiC katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi)...	162
Şekil 128. %5 Gr ve %0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	163
Şekil 129. %5 Gr ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	164

Şekil 130. %10 Gr ve %0.5 SiC katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	165
Şekil 131. %10 Gr ve %1 SiC katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	166
Şekil 132. %15 Gr ve %0.5 SiC katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	167
Şekil 133. %15 Gr ve %1 SiC katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	168
Şekil 134. % 10 Gr ve % 0,5 B ₄ C katkıli bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi) .	169
Şekil 135. %5 Gr ve %0.5 B ₄ C katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	170
Şekil 136. %5 Gr ve %1 B ₄ C katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	171
Şekil 137. % 10 Gr ve %0.5 B ₄ C katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	172
Şekil 138. % 10 Gr ve % 1 B ₄ C katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	173
Şekil 139. % 15 Gr ve %0.5 B ₄ C katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	174
Şekil 140. % 15 Gr ve % 1 B ₄ C katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	175
Şekil 141. %5 Gr ve % 0,5 h-BN katkıli bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi)...	176
Şekil 142. %5 Gr ve %0.5 h-BN katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	177
Şekil 143. %5 Gr ve %1 h-BN katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	178
Şekil 144. % 10 Gr ve %0.5 h-BN katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	179
Şekil 145. % 10 Gr ve % 1 h-BN katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü	180
Şekil 146. % 15 Grafen ve %0.5 h-BN katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	181
Şekil 147. % 15 Gr ve % 1 h-BN katkıli bakır fırçaya ait SEM görüntüsü.....	182
Şekil 148. Kullanılan toz malzemelerin mekanik alaşımlama öncesi XRD analizleri.....	184
Şekil 149. Kullanılan toz malzemelerinin mekanik alaşımlama sonrası XRD analizleri..	185
Şekil 150. Üretilen numunelerin elektro-mekanik aşınma deneyi sonrasında aşınma.....	186

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları	21
Tablo 2. DC akımla çalışan motorların avantaj ve dezavantajları.....	24
Tablo 3. Çeşitli fırça voltaj düşüş tanımlamaları için voltaj aralıkları	33
Tablo 4. Kullanılan Malzemeler ve özellikleri.....	67
Tablo 5. Elektrik motor fırça bileşimleri ve bazı üretim parametreleri.....	71
Tablo 6. Elektro-mekanik aşınma deney parametreleri.....	75
Tablo 7. Üretilen fırça malzemelerinin elektrik iletkenlik değerleri	78
Tablo 8. Kullanılan toz malzemelerinde mekanik alaşımlama öncesi XRD sonuçları ..	184
Tablo 9. Mekanik alaşımlama işlemi sonrası XRD sonuçları	186
Tablo 10. Elektro-mekanik aşınma deneyi sonrasında XRD sonuçları.....	187
Tablo 11. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler	188

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

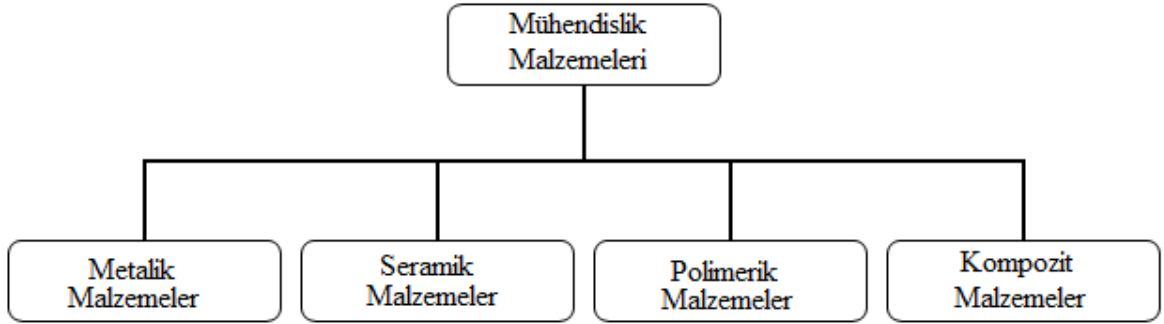
A	Amper
a, b, c	Kafes parametreleri
AC	Alternatif akım
Al-K	Alüminyum elementi K (yörüngesi) enerji seviyesi
Al ₂ O ₃	Alümina
B ₄ C	Bor Karbür
B-K	Bor elementi K (yörüngesi) enerji seviyesi
BSD	Brinell sertlik değeri
C-K	Karbon elementi K (yörüngesi) enerji seviyesi
Cu-K α	Bakır elementinin L yörüngesinden K yörüngesine geçen elektrona ait karakteristik α ışınım enerjisi
CVD	Kimyasal buhar çöktürme
ÇY	Çok yüksek
D	Düşük
DC	Doğru akım
EDS	Enerji dağılım spektrometresi
F	Sürtünme kuvveti
g	gram
H	Hidrojen
h-BN	Hegzagonal Bor Nitrür
IACS	Uluslararası tavllanmış bakır standardı
kPa	Kilopaskal
MA	Mekanik alaşımlama
mag	(İng. magnification) Büyütme
MPa	Megapaskal
N	Azot
N	Kuvvet
N-K	Azot elementi K (yörüngesi) enerji seviyesi
O-K	Oksijen elementi K (yörüngesi) enerji seviyesi

O	Orta
ppm	(İng. parts per million) Milyonda bir
Ra	Ortalama pürüzlülük
Rz	Tepecik ve vadiler arasındaki yükseklik farkı ortalaması
SEM	(İng. Scanning electron microscope)Taramalı elektron mikroskobu
SiC	Silisyum karbür
Si-K α	Silisyum elementinde L yörüngesinden K yörüngesine geçen elektrona ait karakteristik α ışına enerjisi
Y	Yüksek
μ	Sürtünme katsayısı
Å	Angstrom
μm	Mikrometre
ρ_T	Teorik yoğunluk
ρ_g	Görünür yoğunluk
ρ_c	Kompozit yoğunluğu (teorik)
Ω	Ohm - direnç

1.GENEL BİLGİLER

1.1.Giriş

Çevremizde bulunan ve kullandığımız cisimlerin tamamı malzemelerden elde edilmiştir. Malzemeler yapay ya da doğal olarak sınıflandırılabilceği gibi türlerine göre de sınıflandırmak mümkündür. Türlerine göre sınıflandırma Şekil 1’de verilmiştir [1-5].



Şekil 1. Malzemelerin sınıflandırması

Malzemelerin sınıflandırılmasına ilişkin alt başlıklara kısaca değinmek gerekirse;

Metalik malzemeler: Bir veya daha fazla metalik elementten meydana gelen ve bazı metalik olmayan elementleri de içerebilen, organik olmayan maddelerdir. Metaller, atomların düzenli bir şekilde yer aldığı kristal bir yapıdır. Metaller genelde iyi ısı ve elektrik iletimi sağlamalarının yanı sıra çoğunun oda sıcaklığında dayanımı ve tokluğu yüksektir. Ayrıca nispeten yüksek sıcaklıklarda bile dayanımlarını korurlar [3].

Seramik malzemeler: Kimyasal olarak birbirine bağlı metal ve metal olmayan elementlerden oluşan, organik olmayan malzemelerdir. Seramik malzemeler kristalin, kristalsiz veya bunların karışımı olarak bulunabilir. Seramik malzemelerin çoğu yüksek sertliğe ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmak birlikte, gevrek davranış sergilerler [2].

Polimerik Malzemeler: Polimerler, plastik ve lastik malzemeleri kapsayan bir malzeme grubudur. Polimerlerin birçoğu (kimyasal olarak) karbon, hidrojen ve diğer

metalik olmayan elementlerden (O, N ve F) oluşan organik bileşiklerdir. Çok büyük molekül yapıları vardır. Çoğunlukla karbon atomlarının omurga yapısını oluşturduğu zincirlerden oluşur. Bu malzemeler genellikle düşük yoğunluklara sahip ve mekanik özellikleri genellikle metalik ve seramik malzemelerden daha zayıftır. Bununla birlikte, düşük yoğunluklarına dayanarak, kütle esasına göre mukavemet değerleri incelendiğinde ise seramiklerle karşılaştırılabilir niteliktedir. Buna ek olarak, polimerlerin birçoğu son derece sünek ve esnektir, bu da kolayca karmaşık şekillere dönüştürülebildiği anlamına gelir. Genel olarak, birçok polimer kimyasallara karşı nispeten tepkisiz ve birçok ortamda kararlıdır. Polimerlerin en büyük dezavantajı, düşük sıcaklıklarda yumuşama ve / veya bozunma eğiliminde olmalarıdır. Ayrıca, düşük elektriksel iletkenlikleri vardır ve manyetik değildirler [5].

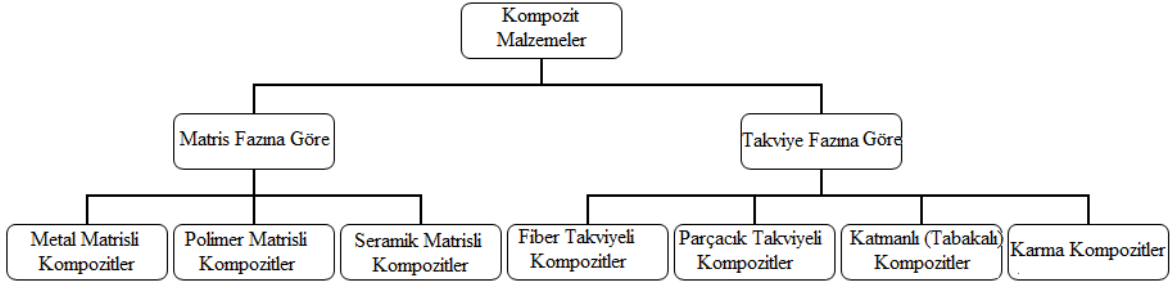
Kompozit (Karma) Malzemeler: Karma malzemeler iki veya daha fazla malzemenin karışımıdır. Polimer esaslı kompozit malzemelerin çoğu, istenen özellikleri elde etmeye uygun dolgu ve güçlendirme malzemeleri ile bağlayıcı reçineden ibarettir. Genelde bileşenler birbiri içinde çözünmez ve birbirinden belirli bir ara yüzle ayrılır [3, 6]. Örneğin; yeni nesil uçak kanatlarında kullanılan kompozit malzeme, karbon fiber ve reçinenin bileşimi olan bir üründür. Farklı üretim yöntemleriyle bir araya getirilen bu malzemeler ile hem alüminyumdan çok daha hafif hem de çelikten daha mukavemetli bir yapı elde edilmiş olur.

1.1.1.Kompozit Malzemeler ve Sınıflandırma

Kompozit malzemeler; metaller, seramikler ve polimerlerin belirli bir amaca yönelik olarak, çeşitli oranlarda bir biri ile karıştırılmasıyla üretilir. Karışım, iki veya daha fazla malzemedan meydana gelir. Kompozit malzemeler, hafif, dayanıklı, şekillenebilir ve iletken ya da yalıtkan gibi özelliklere sahip olarak üretilebilirler [1].

Kompozitler çok fazlı malzeme sayılırlar. Yapılarında sürekli bir ana faz ile onun içinde dağılmış pekiştirici bir donatı fazı bulunur [1, 7].

Kompozit malzemeler matris fazına ve takviye fazına göre sınıflandırılırlar. Kompozit malzemelerin sınıflandırması Şekil 2’de verilmiştir [6].



Şekil 2. Kompozit malzemelerin sınıflandırması

Bünyede miktarca fazla olarak bulunan faz matris fazı olarak adlandırılır. Bu fazın polimerik malzemelerden oluştuğu malzeme grubuna da polimer matrisli kompozitler (PMC) denir. Genellikle matris fazının görevi yapısal bütünlüğü sağlamak iken takviye fazı olarak matriste dağılmış veya oryante edilmiş şekilde bulunan diğer fazın görevi de dayanımı artırmak, iletkenliği sağlamak gibi ek özellikleri bünyeye kazandırmaktır [8, 9].

Matris fazının seramik malzeme olduğu gruba seramik matrisli malzemeler denir. Seramik malzemeler yüksek sıcaklık uygulamalarında kararlı davranışlar sergilemelerine rağmen darbe dayanımı oldukça düşüktür. Dolayısıyla seramik matrisli kompozitlerin geliştirilmesi, başta darbe dayanımı olmak üzere birçok özelliği geliştirmeye yönelik adımları barındırır [10].

Bir metalik fazın bazı takviye malzemeleri ile eritme, vakum emdirme, sıcak presleme veya difüzyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanarak metal matrisli kompozitler (MMC) elde edilirler. MMC'ler genellikle ileri teknoloji gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Metalik malzemelerin genel özellikleri iyi iletkenlik, nispeten yüksek çalışma sıcaklıkları ve kararlı yapıda olmaları iken en önemli dezavantajları yüksek yoğunluk ve pahalı olmalarıdır [11].

Fiber takviyeli kompozitler, fiberin matris fazına dağılmış veya belirli doğrultularda yerleştirilmiş sürekli ya da süreksiz olarak bulunan türüdür. Bu tür kompozitler genellikle seramik ve polimer matrisli bünyelerde oldukça fazla tercih edilirler [10].

Parçacık takviyeli kompozitler de matris fazında süreksiz olarak bulunan ve genellikle belirli boyut aralıklarında parçacıkların takviye fazı olarak kullanıldığı kompozit çeşididir[10].

Karma (hibrit) kompozitler ise fiberlerin, parçacıkların veya farklı türden parçacıkların bir arada bulunduğu kompozitlerdir. Karma kompozitlerin tek bir tür takviye elemanı olarak kullanıldığı durumlar da mevcut olup katmanlı kompozit adı verilmektedir. Katmanlı kompozitler genellikle bir tabaka matris bir tabaka takviye elemanı olacak şekilde yerleştirilmiş kompozitlerdir. Bu tip kompozitlerde takviye elemanının fiber olması durumunda her katmanda farklı yönlere oryante edilmiş kompozitler oluşturmak mümkündür [10].

1.1.2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemelerin üretim amacı, her bir bileşenin üstün özelliklerini alarak bir bünyede toplamaktır. Örneğin bir betonarme bina incelendiğinde, beton (seramik matris) ve çelik çubuklardan (fiber takviyesi) oluşan yapıda matris fazı bütünlük ve ısı yalıtımı gibi özellikleri sağlarken takviye fazı da dayanımı artırma yönünde katkı sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajlarına ilişkin bilgi Tablo 1’de [6] verilmiştir.

Tablo 1. Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları

Kompozit Malzemelerin Avantajları	Kompozit Malzemelerin Dezavantajları
Hafiflik	Üretim zorluğu
Rijitlik ve boyut kararlılığı	Pahalı olması
Yüksek mekanik özellikler	Gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
Yüksek kimyasal direnç	Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı
Yüksek ısı dayanımı	Kırılma uzamasının düşük olması
Ayarlanabilir elektriksel özellikler	

1.1.3. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları

Mühendislikte kullanılan takviye elemanları genel olarak elyaf formunda ve parçacık formunda olmak üzere iki grupta incelenebilir.

Elyaf formundaki takviye elemanlarının dayanım ve rijitlikleri aynı malzemenin kütleli haldeki durumlarından yaklaşık 30-50 kat daha dayanıklı ve 3 kat daha rijit olduklarından kütle halindeki gösterdikleri özelliklerinden daha üstün performans gösterirler. Örneğin; karbon elyaf, kütle halindeki grafitten yaklaşık 50 kat daha fazla mukavemete sahiptir [6].

Çapları genellikle 5-20 µm olan elyafli kompozitlerin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler arasında elyafın şekli, boyu ve yönlendirmeleri ile matrisin mekaniksel özellikleri ile yeterli elyaf-matris ara yüzey bağına sahip olmaları gelmektedir. Takviye elemanı, kompozit üzerine gelen yükün büyük bir kısmını taşımaktadır. Yükün elyafa iletilebilmesi için fazlar arasında fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması, ara yüzey bağının güçlü olması gerekir. Takviye elemanı ile matrisin ısıl genişleme katsayıları arasındaki uyum, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşmasını önleme yönünden önemlidir [6].

Kompozit üretilirken takviye elemanı seçimi, üretim tekniği, üretim esnasında elyafın matris tarafından ıslatılabilmesi, yönlendirilmeleri ve elyaf içeriği; kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Bu nedenle takviye elemanı seçimi ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir [12].

Bu çalışmada, üretimi gerçekleştirilen numuneler bir kompozit malzeme sınıfı olan metal matrisli kompozittir. Takviye elemanlarını oluşturan karbon ametal, diğer bileşikler ise seramik malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Üretimi gerçekleştirilen bu kompozit malzemeler fırça olarak tabir edilen ve elektrik motorlarında kullanılan önemli bir sarf malzemesidir. Elektrik motorlarına ve fırçalara dair daha geniş incelemeler aşağıda verilen başlıklarda verilmiştir.

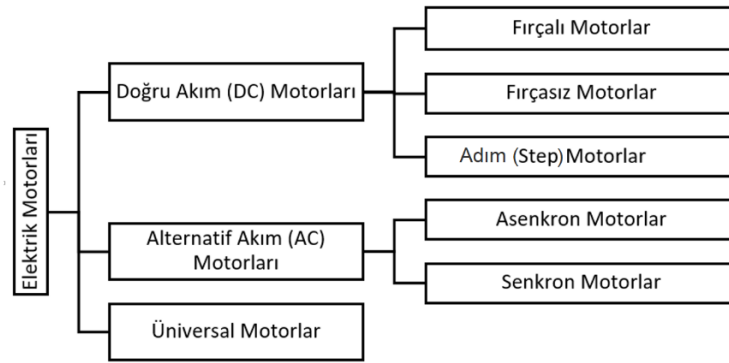
1.2. Elektrik Motorları

Elektrik motorları en genel tanımıyla elektrik enerjisini harekete dönüştüren cihazdır. Bu cihazlar çok çeşitli türleri vardır. AC/DC motorlar, elektrikli trenler, rüzgar türbinleri gibi hem spesifik öneme sahip hem de genel endüstriyel uygulamaların yanı sıra otomotiv uygulamaları, elektrikli ev aletleri ve iş aletleri gibi bir çok alanda ihtiyaç duyulan bir cihazlardır [13].

T.C. Sanayi Bakanlığı'nın açıklamalarına göre; sanayide kullanılan elektriğin %70'ini elektrik motorları kullanmaktadır [14] ve 2012 yılında Türkiye'de kullanılan motorların %80'i düşük verimli ve elektrik sarfiyatı yüksek motorlardan oluşmaktadır. Türkiye'de elektrik motoru üreten firmaların bulunmasına rağmen 190 milyon dolarlık bir ithalatın gerçekleştiği göz önünde bulundurulduğunda verimliliği yüksek motor imalatı önem kazanmaktadır [15]. Keza bakanlığın hedefleri arasında gün be gün düşük verimli motorların yüksek verimli motorlarla değiştirilmesi de vardır [16].

1.2.1. Elektrik Motorlarının Türleri

Elektrik motorları kullandığı akımdan, kullanıldığı yere, üretim parametrelerinden, çalışma mekanizmalarına kadar geniş bir yelpazede üretilebilmektedir. Kullanımının yaygın olmasının diğer bir nedeni de özel isteklere göre özel tasarımların oluşturulabilmesinin altında yatmaktadır. Elektrik motorları; kullandığı akım türüne, faz sayısına, rotor tipi ve verimi vs. gibi başlıklar altında ayrı ayrı sınıflandırılması mümkündür. En basit haliyle bir sınıflandırma yapmak gerekirse, kullandığı akım türüne göre Şekil 3'te verilen sınıflandırma yapılabilmektedir. [13, 17, 18]



Şekil 3. Elektrik motorlarında basit sınıflandırma

DC motorlarda yol alma momentleri yüksek, çalışma devir aralığı oldukça geniştir. Dönüş yönünü değiştirmek için sadece bağlantı polaritesini değiştirmek yeterlidir [19].

Step motorlar ve fırçasız motorlar yapısal olarak oldukça benzerdirler ve yapılarında sabit bobin ve hareketli (endüvi) mıknatıs bulunmaktadır. Fırçalı motorlar da ise mıknatıs

sabit olup endüvi kısmında bobinler bulunur [20]. DC akımla çalışan motorların avantaj ve dezavantajları Tablo 2’de [13, 19-22] verilmiştir.

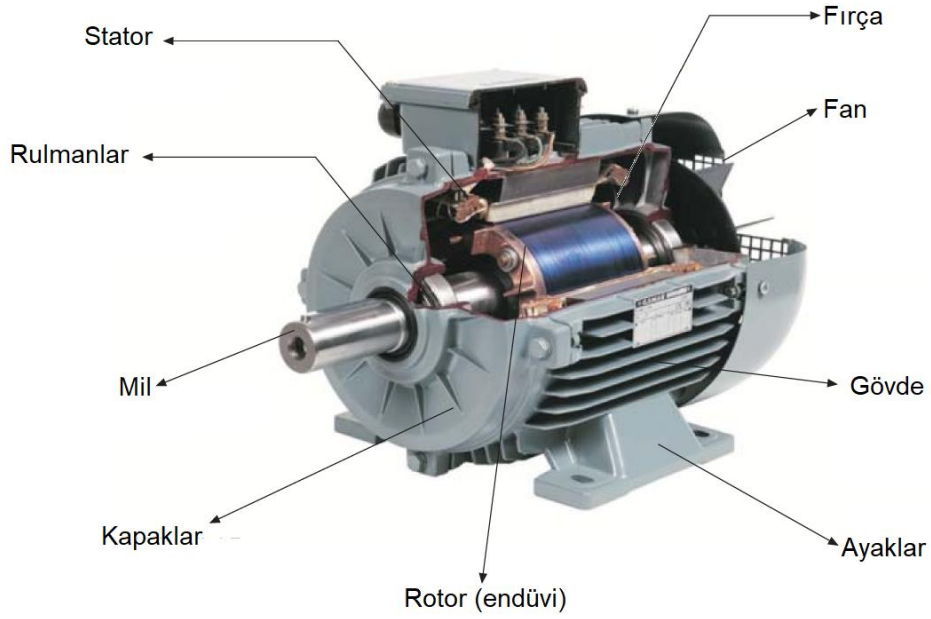
Tablo 2. DC akımla çalışan motorların avantaj ve dezavantajları

Türü	Avantaj	Dezavantaj
Fırçalı	<ul style="list-style-type: none"> -Kullanımları basittir. -Daha ucuzdurlar. -Değişen hız aralıklarında çalışabilirler. -Gerilim girdisini değiştirerek hızları ayarlanabilir. -Mıknatıs özelliği genellikle sargılarla sağlandığı için nispeten yüksek sıcaklıklarda da çalışabilirler. 	<ul style="list-style-type: none"> -Bakım gereksinimi vardır. -Verim çoğunlukla düşüktür. -Daha fazla akım çekerler.
Fırçasız	<ul style="list-style-type: none"> -Verimleri yüksektir. -Doğrusal momentum – hız korelasyonu vardır. -Yüksek moment – hacim oranına sahiptirler. -Az bakım gerektirirler. -Tehlikeli ortamlarda kullanılabilirler. -Az miktarda bakır gerektirirler. -Kıvılcım oluşumu yoktur. -Daha az ısınırlar. -Yüksek torka sahiptirler. -Fırça ve kolektör sistemi gerekmezler. -Nispeten sessiz çalışırlar. 	<ul style="list-style-type: none"> -Harici güç elektroniğine gereksinim vardır. -Uygun çalışma için rotor konum bilgisi gerekir. -Hall ektili sensörlere ve yarıiletken malzemelere ihtiyaç vardır. -Pahalıdır. -Sensörsüz kullanım ilave algoritmalar gerektirir. -Yüksek sıcaklıklarda mıknatıs özelliği azaldığı için performans kaybına uğrari.
Step	<ul style="list-style-type: none"> -Mikrobilgisayar sistemleri ile kolayca kontrol edilebilirler. -Geniş hız aralığına sahiptirler. -Programlanabilirler. -Çalışma hızı gerilimdeki değişmelere bağlı değildir bu yüzden sabit hızda çalışabilir. -Durma ve çalışma komutlarına hızlı tepki verirler. -İmalat maliyeti düşüktür. -Sürekli bir gerilime ihtiyacı yoktur. -Belirli açılarda kısmi hareket verilebilir, hassasiyeti yüksektir. 	<ul style="list-style-type: none"> -Yardımcı elektronik devre gereklidir. -Konum bilgisi gereklidir. -Yüksek sıcaklıklarda mıknatıs özelliği azaldığı için performans kaybına uğrar.

1.2.2.Elektrik Motorlarının Bileşenleri

Elektrik motorları dört temel kısımdan meydana gelir. Bu kısımlar endüvi, gövde, yan kapaklar ve fırça donanımlarıdır [13, 19-23].

Endüvi, motorun dönen kısmıdır. Çelik saclardan yapılmış silindirik bir gövde üzerine açılmış oluklar ve bu oluklara yerleştirilmiş sargılardan oluşur. Bu sargıların uçları üzerine fırça denilen elemanın temas ettiği parçalara (kolektöre) bağlıdır. Doğru akım (DC) ya da alternatif akım (AC) ile çalışan makinelerde, mıknatıs kutuplarını (S-N) oluşturan sargıların (veya mıknatısın) yerleştirildiği indüktör denilen kısım ise sabitleme parçaları ve koruyucu bir kap ile gövdeyi oluşturur. Kolektöre temas ederek akımı ileten parçalara da fırça (kömür) denir. Son olarak yan kapaklar da motoru dış etkilerden korumak ve endüviyi merkezi olarak yataklamak için kullanılan kısımdır [19, 21, 23-26]. Elektrik motorunun bileşenleri Şekil 4'te [24] verilmiştir.

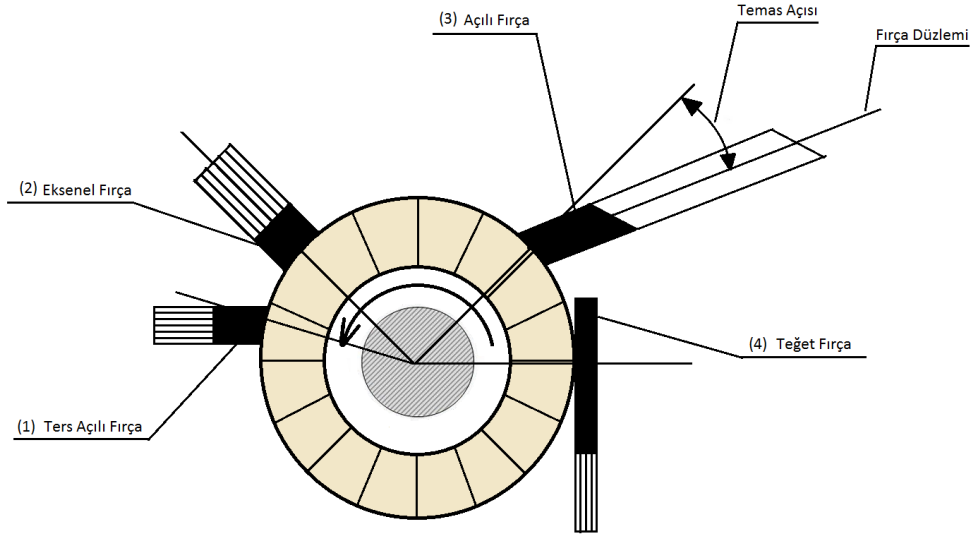


Şekil 4. Elektrik motorunun kısımları

1.3.Fırçalı Motorlar

Elektrik fırçaları yaklaşık 100 yıl önce İngiltere’de bulunmuş ve geliştirilmelerine paralel olarak motorlar da gelişmiştir. İlk fırçalar demet halindeki bakır tellerden oluşmaktaydı. Ancak motorların modifiye edilerek git gide artan bir oranda performans göstermesiyle ilk üretilen fırçaların uyuşmaması ile başlıca bileşeni karbon olan fırçalar geliştirildi [27, 28]. Gerek artan teknoloji ve gerekse motorların artan performansı karşısında, motorların çalışması üzerinde hayati öneme sahip olan fırça malzemeleri üzerinde çalışılmaya başlandı [29, 30]. Elektrik fırçaları bir motor veya jeneratörde hareket eden kısım ve sabit duran kısım arasında akımı iletmekte kullanılır. Kayan (hareketli) temas yüzeyine belirli bir yükü kuvvet uygulamalı ve akım şiddetinin transferini kesintisiz sağlamalıdır. Yüksek yükler fırçada ve/veya kaymanın olduğu yüzeyde sürtünme kayıplarını ve aşınmayı artırır [31, 32].

Farklı fırça tipleri farklı şekillerde kolektör (komütatör) ile teması sağlar. Bakır fırçalar kolektör segmentleri gibi aynı sertliğe sahiptir ve rotor, bakır fırça uçlarına doğru segmentleri kazımadan ve hasara uğratmadan geriye doğru dönmeye. Sonuç olarak, çizgi/lamine bakır fırçalar kolektör ile sadece teğet bir şekilde yerleştirilir. Örgü ve tel fırçalar tek yönde dönen motorlar için segmentler arası geçişi sağlayacak şekilde belirli bir temas açısı ile eğimli olarak yerleştirilir. Karbon fırçanın yumuşaklığı (sertliği) kolektör ile segmentleri hasara uğratmaksızın ve fırça tutucuları ters konumda yeniden yerleştirmeye ihtiyaç duymadan ters yönde dönebilen motorlarda doğrudan radyal temasa olanak sağlar. Yine de sadece tek yönde hareket eden motor uygulamalarında rotor, kolektör ve fırça radyal temastan dolayı hasara uğrayabilir. Kolektör tam temas için fırçaya karşı itme eğiliminde olacak şekilde bir reaksiyon tipindeki tutucuya yerleştirilen karbon fırça ile kolektöre ters eğimli olacak şekilde de temas sağlanabilir [33]. Fırçalar çalışma konumlarına göre ters açılı, eksenel, açılı ve teğet olacak şekilde 4 farklı konumda yerleştirilebilir. Şekil 5 ‘te bu durum şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. Yerleştirme şekillerine göre fırça konumları

1.3.1. Elektrik Motor Fırçaları

Kendinden yağlamalı yataklar ilk olarak 1920'lerde keşfedildiğinde bakır tozlarının ticari üretimi ortaya çıktı. İlk büyük ölçekli bakır üretimi oksit indirgemesi ve elektrolitik biriktirme yöntemiyle olmuştur. Bu gelişmelerin ışığı altında, 1930'larda elektrolitik bakır tozları, bakır-grafit elektrik fırçaları ve temelini bakır oluşturan sürtünme malzemelerinin geliştirilmesinde rol oynadı. Bu süreci takiben 1970'lerde ise hidrometalurjik yöntemler geliştirildi [34] ve bakır temelli malzemelerin üretimi, geliştirilmesi ve kullanım alanlarının yaygınlaşması günümüze kadar uzanan sürecin de başlangıcını oluşturdu.

DC makina fırçaları, kolektör yüzeyinden akım toplamak ve sargı akımının bir yönden diğerine dönüştüğü akımı düzenlemeye tabi tutan bir bobinin indüktif enerjisinin dağılmasına yardımcı olmak için dirençli bir yol sağlamada kullanılır. Fırçalar, fırça tutucularındaki yaylar vasıtasıyla kolektörün silindirik yüzeyine karşı tutulur [13].

Fırçalar kolektör yüzeyinde akımı kesintiye uğratmayacak şekilde durmalıdır. Fırçanın zıplaması, titreşimi, eşit olmayan fırçalar ve zayıf yay basınçları, zayıf ilettime ve dolayısıyla düşük motor verimi ve kısa fırça ömrüne neden olur [13].

Fırçalar çoğunlukla iletkenliği sağlama için bakır gibi bir metal, karbon ve bağlayıcılar içeren malzemelerden imal edilirler [13].

1.3.2. Elektrik Motor Fırça Türleri

Elektrik motor fırçaları genellikle bünyelerini oluşturan ana malzemelerin isimleriyle anılırlar ve sınıflandırması da yine fırça bünyesinde bulunan malzemelere göre yapılmaktadır. Genel olarak metal fırça türlerine ait sınıflandırmada aşağıdaki başlıklar öne çıkmaktadır;

Karbon – Grafit Fırçalar: Karbon – grafit fırçalar, fırça endüstrisinin ilk başladığı yıllarda sektöre girmiş olan bir malzemedir. Bunlar, belirgin bir temizleme etkisi olan yüksek mukavemetli malzemelerdir. Karbon – grafit fırçalar genellikle daha düşük akım yoğunluklarıyla (5-6 A/cm²) sınırlandırılmıştır ve yaklaşık 20 m/s maksimum kolektör yüzey hızına ulaşan daha eski, daha düşük devirli makinelerde kullanılır. Bu tür fırçaların yüksek sürtünme katsayısı, kolektörde mevcut kullanım için cazip olmamasına neden olmaktadır [13].

Elektrografit Fırçalar: Karbonun amorf formunun kristalin yapıya dönüştürülmesiyle grafit elde edilir. Bu yöntem için grafitizasyon adı verilen ve 2400 °C'da gerçekleştirilen bir ısı işlem uygulanır. Bu işlem sırasında karbon grafitte dönüşürken daha yumuşak bir hale geçer. Ayrıca gerekli olan bağlanma bu işlem sırasında gerçekleşir. İçerisinde bulunan abrazyon aşındırıcılardan da arınan grafitin elektriksel direnci %20-25 oranında düşerek iletkenliği daha yüksek bir malzeme haline gelir [35].

Elektrografit fırçalar genellikle yüksek poroziteye sahip olduklarından reçine ile muamele edilirler. Reçine, elektrografit numunede dayanımı ve yağlayıcılığı arttırırken fırça ömründe önemli bir artış sağlar [13].

Grafit Fırçalar: Grafit fırçalar, yumuşak bir fırça malzemesi oluşturmak için reçine veya zift ile bağlanmış doğal veya yapay grafitten oluşur. Doğal grafit genellikle içinde kül ve benzeri atıklar barındırırken yapay olan grafit bu atıkları ve doğal grafitin tabakalı yapısını içermez [13].

Grafit fırçalar genel olarak elektrografit fırçalardan daha fazla aşındırıcı/parlatıcı özelliktedirler. Aşınma özellikleri genellikle çok iyidir ve karakteristik yumuşaklıkları onlara yüksek hızlarda kolektör ile uyumlu çalışmasını sağlayan bir rijitlik verir. Bu özellikleri de 60 m/s gibi yüksek hızlarda 10 A/cm² kadar akım altında çalışabilmesini sağlar[35].

Metal – Grafit Fırçalar: Metal – grafit fırçalar, grafitte ek olarak bünyesinde metal bulunduran malzemelerdir. En yaygın kullanılan metalik katkı bakırdır. Bunun yanında gümüş, kalay ve kurşun da tercih edilebilir. Bu tür fırçalarda kontak direnci çok düşüktür. Doğru akım kullanan, 30 m/s gibi çalışma hızlarına kadar çalışan motorlarda tercih edilirler. Metalik malzemelerin ergime sıcaklıkları düşük olduğundan kıvılcım oluşumuna ve ergimeye izin vermeyecek (çoğunlukla 24 V'a kadar) voltajlarda kullanılırlar. Bünyelerinde %65'lere kadar metal bulunabilir [13, 35, 36].

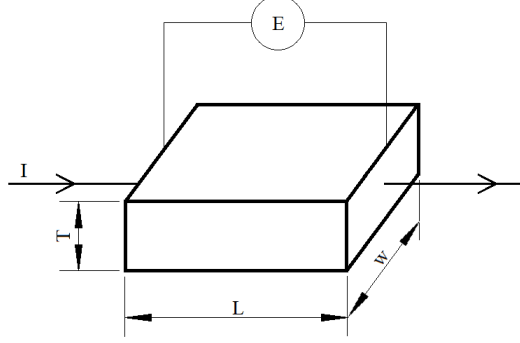
1.3.3. Elektrik Motor Fırçalarının Özellikleri

1.3.3.1. Özgül Direnç

Özgül direnç her malzemenin kendine özgü bir özelliğidir. Fırça malzemelerinde ise bu durum elektrik iletkenliğinin farklı bir göstergesidir. Özgül direnç fırça malzemesinin yerleştirildiği konum doğrultusunda üzerinden geçen akım miktarına gösterdiği dirence eşittir ve eşitlik 1.'de gösterilmiştir [13, 37-39]. Eşitlik ile verilen değişkenler Şekil 6'da şematik olarak gösterilmiştir.

$$4 L \frac{\dot{E}}{\dot{A}} \quad (1)$$

Burada; R , özgül direnci ($\Omega\text{-cm}$); E , numune uzunluğu boyunca voltaj kaybını (V); I , numuneden geçen akımı (A); W , numune genişliğini (cm); T , numune kalınlığını (cm); L ise voltaj kaybının ölçüldüğü mesafeyi (cm) ifade etmektedir.



Şekil 6. Eşitlik 1'de verilen değişkenlerin şematik gösterimi

1.3.3.2. Sertlik

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batmaya çalışan bir nesneye karşı malzemenin gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Ayrıca sertlik aşınma direnci ile de yakından ilişkilidir [1, 40]. Bir aşınma elemanı olarak bu durum elektrik fırçalarının sınıflandırılmasında ve seçiminde önemli bir kıstastır. Ancak fırçalarda sertlik doğrudan bir aşındırıcılık göstergesi olmayabilir. Bunun nedeni ise; fırçanın tane yapısı, kül içeriği ve diğer aşındırıcılarla yaptığı kombinasyonlarla ilgili olmasından kaynaklanmaktadır [13].

1.3.3.3. Görünür Yoğunluk

Görünür yoğunluk basit olarak malzemenin kütlesinin hacme bölümü olarak hesaplanır. Birçok malzeme için önemli bir parametredir. Özellikle kompozit malzemelerde teorik yoğunluk ve görünür yoğunluk arasındaki fark, malzemedeki yapısal kusur veya porozite olduğunu gösterir. Yoğunluk ve porozite arasındaki ters ilişkiyi faydalanılarak malzemelerin özellikleri geliştirilebilir. Gözeneklilik, fırça malzemelerin iletkenliği azaltacağı için tercih edilen bir durum değildir [6, 41]. Eşitlik 2'de malzemelerde elementlerde teorik yoğunluk formülü verilmiştir [8].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Burada; ρ , yoğunluğu (g/cm^3); n , her birim hücre ile ilişkili atom sayısını; A , atom ağırlığını (g/mol); V_c , birim hücre hacmini ($\text{cm}^3/\text{birim hücre}$); N_A , avogadro sayısını ($6,023 \times 10^{23}$ atom/mol) göstermektedir.

Bu çalışmada Eşitlik 3 kullanılarak ağırlıkça verilen bileşim oranları hacimce ve Eşitlik 4 ile de kompozitlerin teorik yoğunlukları hesaplanmıştır [6].

$$\rho_c = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{V_1 + V_2} \quad (3)$$

Burada; V_f , hacimce oranı, W_1 , W_2 , sırasıyla birinci ve ikinci malzemelerin % ağırlıkları, ρ_1 ve ρ_2 ise sırasıyla birinci ve ikinci malzemenin yoğunluklarını göstermektedir.

$$\rho_c = \frac{W_1 \rho_1 + W_2 \rho_2}{W_1 + W_2} \quad (4)$$

Burada; ρ_c , V_1 ve V_2 sırasıyla, kompozitin teorik yoğunluğunu, birinci malzemenin hacim oranı ve ikinci malzemenin hacim oranını ifade etmektedir.

Görünür yoğunluğa ait denklem ve porozite formülleri sırasıyla eşitlik 5 ve 6'da verilmiştir [6, 39].

$$\rho_g L I R \quad (5)$$

$$\rho_g L K N K V E P A : \rho_g \rho_f ; T_{srr} \quad (6)$$

Burada; ρ_g , görünür yoğunluğu (g/cm^3); m , kütleyi (g); v , hacmi (cm^3); $\Delta\rho$, teorik ve deneysel yoğunluklar arasındaki farkı (g/cm^3); ρ_T ise teorik yoğunluğu (g/cm^3) ifade etmektedir.

1.3.3.4. Aşındırıcılık

Fırçanın korozif veya yağlı bir atmosferde çalışması kendi yüzeyinde veya karşı yüzeyde aşırı film oluşumuna neden olur. Fırçanın bu aşırı film oluşma isteğine önleyebilme yeteneğine de aşındırıcılık veya parlatma işlemi denir. Aşındırıcılık fırçanın sertliği, tane yapısı ve içerdiği diğer katkı elemanlarıyla ilgili olup az, orta veya yüksek aşındırıcılık olarak sınıflandırılabilirler [13, 42, 43].

1.3.3.5. Voltaj düşüşü

Kontak düşüşü veya temas gerilimi düşüşü fırçalar ile dönen yüzey arasındaki temas geriliminin düşmesini (voltaj kaybını) belirten bir unsurdur. Bu durum çoğunlukla dalgalanma şeklinde olup fırça akım yoğunluğu, sıcaklık, basınç, hız ve kirlenme gibi faktörler voltaj düşüşünün büyüklüğünü etkiler. Voltaj düşüşüne ait bir sınıflandırma Tablo 3'te verilmiştir [13, 44, 45].

Tablo 3. Çeşitli fırça voltaj düşüş tanımlamaları için voltaj aralıkları

Tanım	Kontak (Voltaj) düşümü aralıkları (V)
ÇY = Çok yüksek	1.7 ve üstü
Y = Yüksek	1.2 – 1.7
O = Orta	0.6 – 1.2
D = Düşük	0.6 altı

1.3.3.6. Akım Taşıma Kapasitesi

Bir fırçanın gerçek akım taşıma kapasitesi, soğutma tipi, sürekli veya aralıklı görev, hız ve diğer faktörler gibi çalışma koşullarından oldukça etkilenir. Bir fırçanın akım taşıma kapasitesi çalışma sıcaklığına bağlıdır. Küçük fırçalara sahip, hacmi ile orantılı olarak geniş yüzey alanına sahip iyi soğutulan makinelerde ve fırçaların kolektör veya halka yüzeyinin yalnızca küçük bir yüzdesini kapladığı durumlarda, konvansiyonel akım yoğunlukları, performansı ciddi şekilde tehlikeye atmadan iki kat akım taşıyabilir. Öte yandan, düşük fırça sıcaklığının muhafaza edilmediği durumlarda akım yoğunluğunu arttırmak, fırça ömrünü birkaç kat azaltabilir. Belli bir makinenin fırça akım yoğunluğu Eşitlik 7 ve 8’de gösterildiği gibi hesaplanabilir [13].

$$I = L \frac{\hat{A}}{C \cdot 6 \cdot \hat{D}} \quad (\text{kolektör için}) \quad (7)$$

$$I = L \frac{\hat{A}}{\hat{D}} \quad (\text{kontak bileziği için}) \quad (8)$$

Burada; D , fırça akım yoğunluğunu (A/cm^2); I , toplam akımı (A); N , bir kolektördeki toplam fırça sayısı veya bir halkadaki fırça sayısını; W , fırça genişliğini (cm); T , fırça kalınlığını (cm) ifade etmektedir.

1.3.3.7. Maksimum Hız

Fırçanın verimli kullanılabilmesi için, motorun dev/dk cinsinden önerilen maksimum hızını ifade eder. Aynı zamanda bu hız fırçanın dayanabileceği ve destekleyebileceği maksimum veya kritik hız olarak da ifade edilir [46]. İzin verilen hız yalnızca fırça malzemesinin özelliklerine değil yay basıncına, akım yoğunluğuna, fırça tutucusunun tipine, fırça açısına, halka veya kolektörün durumuna ve atmosfer koşullarına da bağlıdır [13, 18].

1.3.3.8. Sürtünme katsayısı

Fırça sürtünmesi, fırça sıcaklığı, fırça basıncı, akım, atmosferik koşullar, mekanik koşullar, halka veya kolektör malzemeleri, yüzey filmleri, hız ve diğer faktörler gibi birçok değişkenden etkilenir. Uygun koşullar altında bile, kolektörün yüzeyi, oksidasyon, aşınma ve nem nedeniyle sürekli değişime uğrar. Bazı fırça tutucu konfigürasyonları sürtünme sesini artırabilir ve ilgili fırça aşınmasını hızlandırabilir. Bu, hafif yüklerde ve sürtünme katsayısının nispeten yüksek olduğu durumlarda daha düşük fırça sıcaklıklarında özellikle geçerlidir. Bu koşullar altında sürtünme ses şiddetini azaltmak için belirli fırça tipleri kullanılır. Fırça ile dönen yüzey arasındaki sürtünme, ciddi sıcaklık ile ilgili problemlere neden olabilecek önemli bir ısı kaynağıdır. Kolektörler bozulabilir, kayma halkaları hareket edebilir ve sürtünme katsayısı çok yüksek olduğunda fırça aşınması aşırı olabilir [13].

Sürtünme katsayısı için sürtünme genellikle μ veya f ile gösterilir. Sürtünme katsayısı sürtünme kuvveti ve yük arasındaki ilişki ile hesaplanır. Bu ilişkiyi gösteren formül 9 numaralı Eşitlikte verilmiştir [42].

$$J L \frac{L}{C} \quad (9)$$

Burada; μ , sürtünme katsayısını; F, sürtünme kuvvetini (Newton); N, yükü (Newton) ifade etmektedir.

1.3.3.9. Kesme Dayanımı

Elektrik fırçalarında önemli olan diğer bir parametre de fırçanın kesme dayanımıdır. Fırçanın sürtünme yüzeyi kolektör yüzeyine açılı veya dik olarak yerleştirilir. Kolektörün dönüşü ile fırçada kesme kuvveti etkileri görülebilir. Fırça burada yay basıncı ve sürtünme kuvveti etkisi ile maruz kaldığı kesme kuvvetine dayanacak şekilde tasarlanmalıdır [46-48].

Kesme kuvveti, Eşitlik 10'da gösterilen şekilde kirişlere de uygulandığı gibi hesap edilir [13].

$$5_{\zeta} L \frac{7\text{Å}}{6\text{D} \text{Í}} \quad (10)$$

Burada; S_t , kesme kuvvetini (kPa); P, üst bıçak kenarına uygulanan toplam kuvveti (Newton); L, destekler arası mesafeyi (mm); W, numunenin enini (mm) ve T ise numune kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

1.4. Elektrik Motoru Fırça Malzemeleri

Elektrik fırça malzemeleri fırçanın kullanılacağı motor türü, akım türü, çalışma hızı gibi birçok değişkene bağlı olarak seçilir. Başta bu çalışmada kullanılan ve genelde fırça malzemesi olarak tercih edilen bazı element ve bileşiklere ait bilgiler alt başlıklarda verilmiştir.

1.4.1. Bakır (Cu)

Bakır, iletkenliği yüksek, mükemmel bir kaynaklanabilirlik ve lehimlenebilirliğe sahip olan sünek bir metaldir. Bakır malzemeden teller, saclar, borular, şekilli çubuklar ve düz baralar gibi çeşitli elektrikli ürünler üretilebilir. Elektrik uygulamaları için yüksek iletkenliğe sahip bakır, Ag, Au, As, Sb ve diğer safsızlıkları gideren elektrolitik rafine etme gibi rafine etme işlemleriyle üretilmelidir. Enerji endüstrisinde kullanılan en yaygın bakır, bakırın elektrolitik rafine edilmesiyle üretilen elektrolitik özlü sert (Cu-ETP) bakırdır [43].

ETP bakırının temel eksikliği, hidrojen içinde 370 ° C veya daha yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında maruz kaldığı kırılmalardır. Bu, metal içindeki oksijenin varlığından kaynaklanır ve bu oksijen buhar oluşturmak için hidrojenle reaksiyona girerek iç çatlamaya neden olur. Bu sorunun çözümü, esasen daha düşük oksijen içeriğine sahip bakır kullanmaktır [43].

Fosfor, bakır için etkili bir deoksidan iken, elektrik uygulamaları için uygun bir ürün elde etmek için iletkenliği çok düşürür. Bunun yerine, elektrolitik plakalar oksijensiz asal gaz ve metalik oksitleyici içermeyen özel bir işlemle eritilir ve rafine edilir. Sonuç olarak, oksijensiz yüksek iletkenlikli bakır (OFHC) olarak, oksijen içermez ve oksijensiz yüksek iletken bakır (OFHC) olarak% 0.005'den az bir safsızlığa sahip ve % 99.98 oranında saf bakır içerir [43].

Bakırın iletkenliği sıklıkla Uluslararası Tavlanmış Bakır Standartı (IACS) ile ifade edilir. Dolayısıyla, IACS bakır için 100'e eşittir. Mutlak anlamda, IACS'nin direnci 1.7241 S.cm'dir. Metallerin saflığını tanımlamak için yaygın bir kriter 273 K ve 4.2 K noktasından

öz dirençlerine oranıdır. Bu oran OFHC bakır için 150 ile 400 arasında değişir, ancak rafine edilmiş malzemeler için 1000-5000 ve daha yüksek olabilir [43].

Normal atmosfer koşullarında, bakır korozyona nispeten dirençlidir. Oda sıcaklığında bir oksit tabakası olan Cu_2O , yüzeyi daha fazla oksidasyona karşı korumak için oluşur ve yarı iletkenidir. Daha yüksek sıcaklıklarda, havaya maruz kalmanın sonucu olarak bir CuO oksit tabakası oluşur. Bakırın deniz kıyılarında kullanımı arzu edilmemektedir, çünkü su zerreciklerinin ihtiva ettiği tuzlar ciddi korozyona neden olabilir. Kükürt dioksit içeren nemli ortamlar, karışık bir oksit sülfid tabakasının oluşumuyla sonuçlanan bakıra saldırır [43].

Bakırın yay özellikleri zayıftır fakat berilyum veya fosfor ile alaşımlama bu özellikleri büyük ölçüde geliştirir. Elektrik uygulamaları için bakırın mekanik özellikleri iyileştirilmelidir, ancak bunu yaparken elektrik iletkenliği genellikle azalır. Mukavemet artırma, soğuk öğütme ve / veya bakırın çeşitli elementlerle alaşımlanmasıyla sağlanabilir. Soğuk çekilmiş saf bakır, $200-325^{\circ}C$ 'de tavlama ile yumuşatılabilir, ancak önceki soğuk deformasyonu ve yabancı madde varlığı bu tavlama aralığını değiştirebilir. Önceden soğuk deformasyon derecesi ne kadar yüksek olursa, tavlama sıcaklık değeri de o kadar düşüktür, buna karşın yabancı maddelerin varlığı veya çeşitli elementlerin ilavesi tavlama sıcaklığını yükseltir [43].

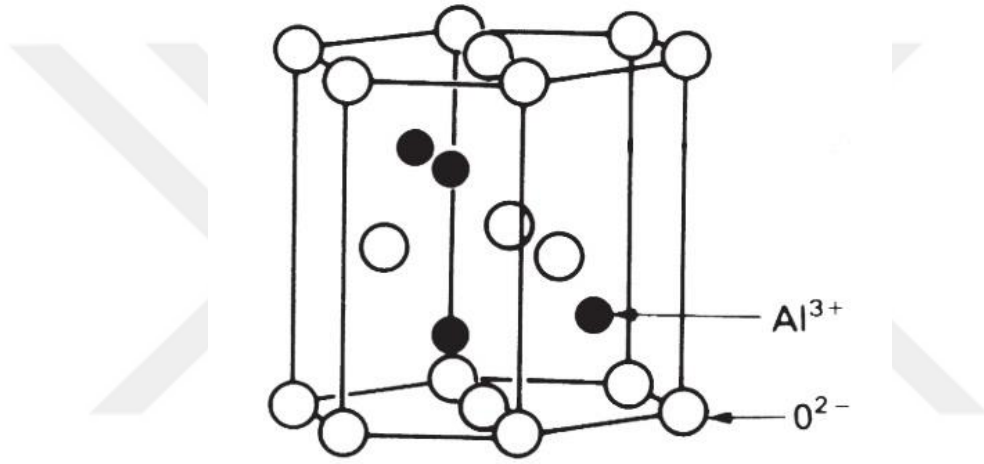
1.4.2. Alümina (Al_2O_3)

Alümina (seramik) veya korindon (alüminyum oksit minerali) α - Al_2O_3 'ü ifade eder. Cr^{3+} ile birleşerek yakut ve Ti iyonu ile birleşerek safir adı verilen malzemeyi oluşturur. Trigonal kafes yapısına sahip olan alümina, hegzagonal oksijen alt-latisleri vardır. Alüminyum oksit, oldukça yaygın kullanılan bir bileşiktir. Tek bir kristal olarak saat yatakları ve basınca dayanıklı pencerelerde kullanılır. Sıkıştırılmış tozlar elektrik yalıtıcıları, mikrodalga fırınları için transparan pencereler, lambalar için zarflar olarak kullanılmaktadır. Polikristal formda refrakter tuğlalar, potalar ve buji izolatörleri olarak kullanılırlar [49]. Ayrıca sızdırmazlık plakaları, baskılı devre levhaları, kesme aletleri, kumlama memeleri, termokupllar için koruyucu tüpler, valfler, tekstil makineleri için iplik

kılavuzları, pompa elemanları, kayma halkaları, insan tıbbi implantları, brülör memeleri ve potalar gibi ürünlerin imalinde sıklıkla kullanılmaktadır [50].

Ergime sıcaklığı 2054 °C olan alüminanın kırılma tokluğu tane boyutu arttıkça artar. Yaklaşık 25 GPa mikro sertlik, 3.95 g/cm³ yoğunluk değerinde ve elektriksel iletkenliği oda sıcaklığında yaklaşık 10⁻¹² S/m'tir [50, 51]. Elektriksel iletkenliği düşük olduğu için fırça malzemelerinde kullanımları kısıtlıdır.

Aşağıda Şekil 6.'da alüminaya ait kristal kafes yapısı şematik olarak verilmiştir [9].



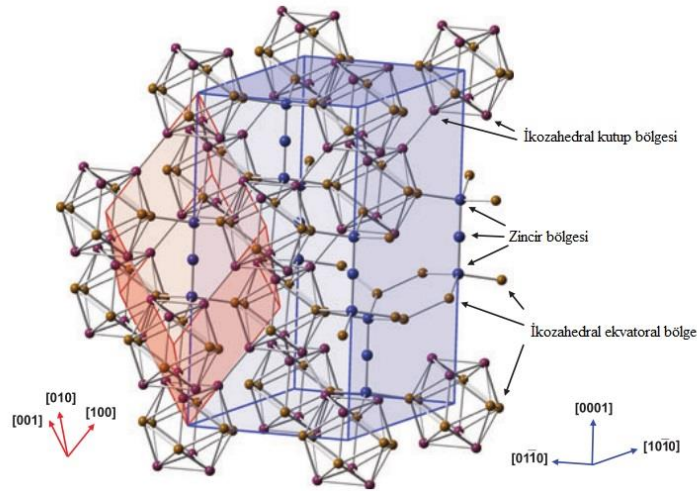
Şekil 7. Alümina kristal kafes yapısı

1.4.3. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür, yüksek sıcaklık fırınları için en yaygın kullanılan oksit dışı seramiktir. SiC ısıtma elemanları koruyucu bir oksit tabakasının oluşması nedeniyle havada 1500 ° C'ye kadar kullanılabilir. 1500-1600 ° C aralığındaki sıcaklıklarda SiC ayrışır [49]. Kullanıldığı alanlar; conta halkaları, ısı eşanjörleri, öğütme malzemeleri, ısıtma elemanları, potalar, kayma halkaları, çekme nozülleri, harçlar, yüksek sıcaklıklar için malzeme test cihazları, gaz türbinleri ve turbo şarj cihazları için bileşenler olarak sıralanabilir. Elektriksel direnci 0.1-100 Ωcm arasında değişir. Nispeten düşük kırılma tokluğuna sahiptir. Ergime sıcaklığı 2650 °C, yoğunluğu 3.2 g/cm³, ve elastisite modülü 450 GPa'dır. [9, 50, 52] Kompozit malzemelerde korozyon direncini arttıran bir etkiye sahiptir [53].

1.4.4. Bor Karbür (B₄C)

Bor karbür seramikler, düşük yoğunluk, son derece yüksek sertlik ve iyi aşınma direnci gibi mükemmel özelliklere sahiptir. Bu nedenle, aşındırıcı ortamlar, kesici aletler ve hafif zırhlardaki çoklu uygulamalar için cazip malzemeler haline gelirler. Daha da önemlisi, B₄C seramikleri nükleer reaktörlerde kontrol çubukları, koruyucu malzemeler ve nötron enerjileri geniş yelpazede yüksek bir nötron soğurma kesitine sahip olan izotop ¹⁰B'nin varlığı nedeniyle nötron dedektörlerinde kullanımı oldukça yaygındır [54]. Sıvı-metal soğutmalı hızlı reaktörlerinde (LMFBR) ve kaynar su reaktörlerinde (BWR) kontrol çubuğu malzemesidir [55]. Birim hücrede B₄C rombohedral ve hegzagonal kristal yapısını gösteren birim şematik yapı Şekil 7'de verilmiştir.



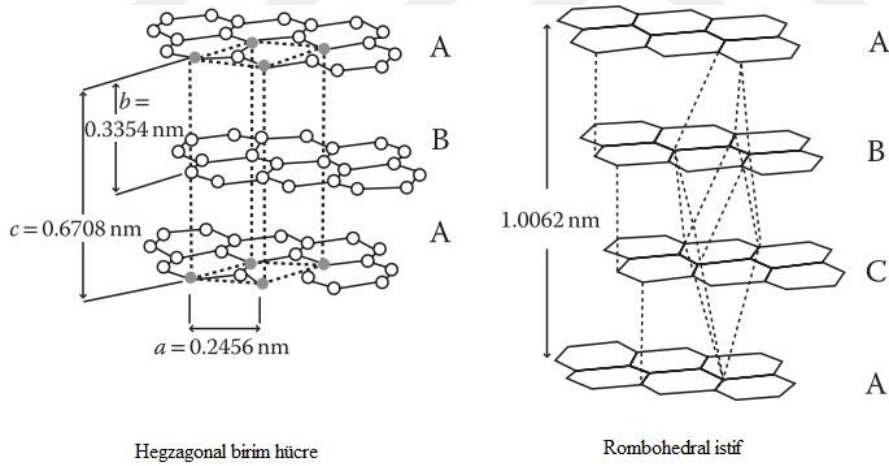
Şekil 8. Rombohedral (kırmızı) ve hegzagonal (mavi) birim hücreleri arasındaki ilişkiyi gösteren bor karbür kafes. (Eşit olmayan kafes bölgeleri oklarla gösterilmiştir.)[56]

1.4.5. Grafen ve Grafit (C)

Karbonu elementi (periyodik tablodaki element 6, atom ağırlığı 12) tüm elementler arasında eşsizdir. Karbon, sadece kendisi ile değil aynı zamanda hidrojen, oksijen, azot ve sülfür gibi çeşitli elementlerle farklı türde bağlar oluşturma kabiliyetine sahiptir. Karbon, tek, çift veya üçlü bağlarla kendine bağlanabilir ve yaklaşık olarak sonsuz çeşitli zincir, halka ve birbirine bağlı üç boyutlu (3-B) ağlar oluşturabilir. Ortam koşullarında normalde karşılaşılan karbonun kristal biçimleri elmas ve grafitir. Elmasın istikrarlı ve rijit yapısı

tüm doğal malzemeler için en sert malzeme olmasını sağlar. Buna karşın, doğal olarak çok yumuşak bir malzeme olan grafit, melezleştirilmiş karbonlarda düzlemsel altıgen halkalar şeklinde bulunur. Sp² "grafen" katmanlarının bu katmanları 3.35 Å uzaklıktadır ve katmandaki karbon-karbon kovalent sigma tipi bağ uzunluğu 1.42 Å 'dır. Buna ek olarak, kalan p orbitalleri uçlara dikey olarak uzanan ve düzlemler arasında zayıf Van-der Waals bağlarına neden olan π-tipi bağlar bulunur. Paralel ve uçlara dik olan yapışma kuvvetleri arasındaki fark, grafitin ısı iletkenliği, sertlik, porozite, elektrik iletkenliği, yüzey etkileri ve kimyasal reaksiyon gibi çeşitli, anizotropik ve endüstriyel olarak ilgili özelliklerinden sorumludur. Grafit endüstrisi bugün kullanılan birçok ürünü üretmek için grafitin kristal yapısını yönlendirmektedir [51, 57].

Grafit yapısı, trigonal olarak bağlı karbon atomlarından oluşur ve istiflenmiş düzlemsel tabakalar biçiminde düzenlenir ve bunlar da grafen katmanları olarak bilinirler. Şekil 8.'da grafit yapısında görünen grafen tabakaları ve kafes parametreleri verilmiştir [57].



Şekil 9. Grafit yapısındaki grafen katmanlarının hegzagonal ve rombohedral paketlenmesi

Şekil 8.'da gösterildiği gibi, düzlemler normalde altıgen ABAB diziliminde istiflenir. Oysa ABCABC rombohedral dizisi, öğütme veya diğer endüstri dallarından kaynaklanan yüksek makaslama oranlarına maruz bırakılan doğal grafitlerin ve grafit malzemelerinin küçük bir kısmında (yaklaşık% 10) görünür [57].

İdeal durumda, kristalografik c doğrultusunda katlar arasında çapraz bağlanma ya da istifleme hataları yoktur, bu durumda ideal ara katman aralığı 3.354 \AA ve yoğunluk 2.268 g/cm^3 'dir. Kovalent sigma tipi bağlar grafen tabakaları içindeki karbon atomları arasında bulunurken (1.42 \AA), katmanlar arasında yalnızca zayıf van der Waals benzeri bağlar gözlemlenir. Aslında, grafitin benzersiz anizotropik özelliklerinden sorumlu katmanlara paralel ve dikey olan kuvvetlerdeki bu farktır [57, 58].

Grafitin özel (spesifik) ısısı oda sıcaklığı ile $2725 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında $0,1723 \text{ cal/gK}$ ila $0,527 \text{ cal/gK}$ arasında değişmektedir. Hammadde kalitesine bağlı olarak grafitin elektriksel direnci $5\text{-}15\mu\Omega\text{m}$ arasında değişmektedir [57, 59].

Grafen ise sp^2 'ye bağlı karbon atomlarının hegzagonal kafes formundaki grafitin tek bir tabakasına verilen isimdir [58, 60].

Grafen ilk olarak 2004 yılında Scotch bandından bir parça grafit soyarak ve kararlı bir SiO_2 altlığına aktararak izole edilmiş ve 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü, Grafenin yapısı ve özellikleri üzerine öncü araştırma yaptıkları için Geim ve Novoselov'a verilmiştir.

Grafenin üretimi için çeşitli sentez yolları vardır [61]. Grafitin mekanik ekfoliasyonu, grafen katmanlarının banda aktarılmasını içerir; daha sonra, tek katmanların bir alt tabaka üzerine biriktirilmesine izin verecek şekilde çözünür. Bir sonraki yöntem $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda silisyum karbürden silisyumun buharlaştırılmasıyla epitaksiyel grafen üretir. Grafen ayrıca CVD (kimyasal buhar çöktürme) ile bakır ve nikel ince metal filmler üzerine sentezlenebilir (kaplanabilir). Bu tabakalar, diğer altlıklara başarıyla aktarıldığında, elektronik uygulamalarda ümit vaat ederler. Son olarak, grafitin kimyasal olarak pul pul dökülmesi, kimyasal indirgeme sonrasında grafene dönüşen grafen oksit ve grafen florür gibi türevleri üretebilir [62]. Günümüzde bu son yöntem, grafene dayalı çeşitli cihazlara dönüştürülebilen geniş hacimli grafen levhaların imalatı için en umut verici yolu sunmaktadır [57, 59].

Grafenin eşsiz fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri birçok yeni ve heyecan verici uygulamaya izin vermektedir [63, 64]. Grafen, yüksek mukavemeti, iyi iletkenliği ve

yüksek termal kararlılığı nedeniyle polimer kompozitlerde dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Grafen aynı zamanda kataliz ve elektrokimyasal sensörlerin içinde kullanılan grafen-metal nanopartikül takviyeli kompozitlerde de kullanılmaktadır. Buna ek olarak, grafen-yarıiletken nano takviyeli kompozitler, Li-ion piller, güneş pilleri ve süper-kapasitör gibi çeşitli enerji ile ilgili alanlarda artan oranda kullanılmaktadır. Özellikle nano boyutlu grafen, alan etkili transistörler, entegre devreler ve bellek aygıtları gibi çeşitli elektronik bileşenlerde kullanılabilir. 2-D düzlemsel yapısından dolayı işlevselleştirilmiş grafen, kimyasal ve biyolojik moleküllerin saptanması için mükemmel bir platform oluşturur. Bu sayede yalnızca birkaç molekülün emiliminin dirençte ölçülebilir bir değişime yol açması mümkündür [57].

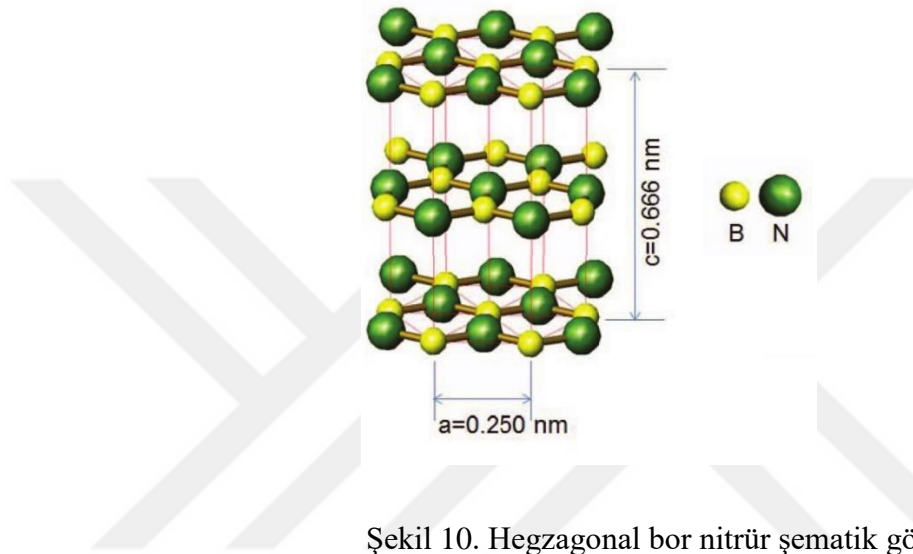
Grafenin esnekliği, sağlamlığı, hafifliği ve inceliği gibi birçok üstün özelliklerinden dolayı sıklıkla tercih edilir hale gelmesini sağlamıştır [57, 65]. Bu özelliklerinin yanı sıra katı yağlayıcı olarak kullanılabilmesi kullanım alanını giderek genişletmiştir. Çok az miktarlarda kullanımı bile madeni yağların sürtünme özelliklerini geliştirmektedir [58, 60]. Ayrıca elektro grafitin elektrik motor fırçası olarak kullanılabilir olması grafenin de aynı alanda kullanılabilmesine olanak tanımaktadır [13].

1.4.6. Hegzagonal Bor Nitrür (hBN)

Hegzagonal bor nitrür (h-BN), grafitin iyi termal taşıma özelliklerine sahip yapısal bir benzeridir. Diğer BN'lerin içinde h-BN, bor ve azot atomlarının düzlemsel olarak birleşmiş katmanlar oluşturduğu için en çok tercih edilen polimorfudur. Hegzagonal bor nitrür (h-BN), düşük yoğunluklu (2.27 g/cm^3), $2600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yakın yüksek erime noktasına, iyi termal şok direncine, mükemmel elektrik yalıtım özelliğine, ayrıca yüksek ısı iletkenliğine, kimyasal inertliğe sahip toksik olmayan, çevre için güvenli bir malzemedir [66, 67].

Hegzagonal bor nitrür yapısal olarak grafene oldukça benzemektedir ve sürtünme-aşınma elemanlarında katı yağlayıcı olarak kullanımı oldukça yaygındır [68-70]. Sinterlenmiş gözenekli yatağa emdirilen yağlayıcıların (sıvı ve katı yağlayıcılar), sürtünme ve aşınmayı azaltmada faydalı olduğu kanıtlanmıştır. Gözenekleri tek başına yağ ile emdirilen veya grafit, molibden disülfür (MoS_2), hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve tungsten

disülfür (WS_2) gibi katı parçacıklarla birleştirilen metal, gözenekli yataklar ve endüstriyel uygulamalarda yer almaktadır. Metal esaslı sinterlenmiş malzemelerde bu gibi çok fazlı yağlayıcıların yük taşıma kapasitelerini geliştirdikleri saptanmıştır. h-BN ile sinterlenmiş metalik gözenekli aşınma malzemelerinin temel avantajları yüksek sıcaklıklara dayanabilmeleridir [71-73]. Şekil 9'da h-BN'ye ait şematik gösterim verilmiştir [74, 75].



Şekil 10. Hegzagonal bor nitrür şematik gösterimi

Katmanların zayıf van-der Waals bağları ile bir birine tutunan tabakalı bir yapıya sahiptir ve katmanlar birbiri arasında kolayca kayabilmektedir. Bu özelliklerin eşsiz kombinasyonu sayesinde, h-BN seramikleri çelik ve demir dışı metal endüstrilerindeki uygulamalar için mükemmel bir malzemedir [66].

Mekanik, elektriksel, dielektrik ve diğer özelliklerin iyileştirilmesine olanak tanıyan, malzemelerin özelliklerini optimize etmek için oldukça ideal bir malzemedir [66].

1.4.7. Gümüş (Ag)

1 ila 600 A arasındaki akımlarda ve 15 g'dan büyük temas kuvvetlerinde çalışan kontaklar için en yaygın kullanılan malzemedir. Tüm metaller içinde en yüksek elektriksel ve termal iletkenlik özelliklerine sahiptir. Sünekliği nedeniyle, katı, boru şekilli ve kompozit perçinler ve katı düğmeler de dahil olmak üzere birçok tasarımda imal edilebilir.

Bununla birlikte, konektörlerin temas parçaları için kaplama veya kaplama malzemesi olarak yaygın olarak kullanılır. Gümüşün temel sakıncası düşük erime ve kaynama noktaları, düşük mekanik mukavemet, muhtemel temas kaynağı ve sülfür filmleri (renk bozulması) oluşturma eğiliminin olmasıdır. Gümüş ile ilgili bir diğer problem de, uygulanan elektrik alanlarının etkisi altında fenolik fiber gibi bazı elektrik izolasyon malzemeleri yoluyla gümüş atomlarının difüzyonudur. Bu da izolasyonun başarısız olmasına neden olabilir [43].

Gümüşün yer kabuğundaki içeriğinin sadece ağırlıkça % 7×10^{-6} olduğu bilinmektedir. Gümüş tüketimi birincil metal üretimini, yani cevherden metal üretimini aşmaktadır. Bu açığı geri dönüşüm ve/veya yeniden kullanım ile telafi etmek gerekmektedir [43].

Gümüşün en büyük dezavantajı, nem ve NO_2 , Cl_2 ve O_2 gibi gazlar, özellikle reaktif olan sülfür içeren bileşiklerin etkisi altında sülfid oluşturma kabiliyetidir. Çevrede bulunabilen, aygıtlarda kullanılan kauçuklardan ve bileşiklerden çıkan ve çevrenin bazı agresif bileşenleri arasındaki reaksiyonlarda salınan serbest sülfür, gümüş için özellikle tehlikelidir. Günümüzde bu tür agresif bileşenler, atıkta, özellikle de büyük şehirlerde, endüstriyel atıklarla çevresel kirlilikten dolayı çok miktarda bulunmaktadır [43].

Gümüşün bakır, kadmiyum, altın, paladyum veya platin ile alaşımlanmasıyla mekanik özellikleri geliştirilebilir. Ayrıca aşınma direncini artırmak için nikel ve demir ile alaşımlandırılabilir [43].

Gümüşü sülfidize olmaya karşı korumak için, paladyum katkı maddesi oldukça etkilidir. Düşük akım temasları için tasarlanan Ag-Pd alaşımlarındaki paladyumun optimum içeriği yaklaşık % 30'dur. Bununla birlikte, bu tür alaşımlar saf gümüşü aşan yüksek bir özgül dirence sahiptirler. Bu nedenle, bu malzemelerin kullanıldığı temasların, temas direnci büyüktür. Ayrıca, sürtünme işlemleri, paladyum için tipik olan katalitik etkinlik nedeniyle temas yüzeylerinde izolasyon filmlerinin oluşumunu indükleyebilir. Son zamanlarda AgPd50 çoğunlukla yüksek hızlı ve hafif yüklü temaslar için kullanılır ve mükemmel aşınma direnci gösterir [43].

1.4.8. Kalay (Sn)

Kalay, yüzeylere yayılma ve ıslatma yeteneğinden ötürü elektronik uygulamalar için kullanılan çoğu lehim alaşımının ana bileşenidir. Kalay, iki farklı kristal yapısı bulunan iki farklı formda mevcuttur: hacim merkezli tetragonal kristal yapılı beyaz kalay ve elmas kübik kristal yapılı gri kalay olarak adlandırılır [43].

Termodinamik olarak beyaz kalay oda sıcaklığında kararlı iken, gri kalay 13 °C'nin altında termodinamik olarak kararlıdır. Sıcaklık 13 °C'nin altına düştüğünde beyaz kalayın gri kalaya dönüşmesi, kalay yapısında çatlama neden olabilecek hacimde büyük bir artışa neden olur. Sonuç olarak, bu durum son derece düşük sıcaklıklarda çalışan uygulamalar için bir problem olabilir. Bu hacim artışı yüzeyde 0.64 mm'ye kadar uzayabilen ince tel benzeri tek-kristal bir büyüme şeklinde görülebilir [43].

Tüm bunlara ek olarak kalay toksik değildir. Ayrıca oda sıcaklığında bile difüzyon oranı o kadar yüksek ki kalay ve bakır birkaç gün içinde bir alaşım oluşturmadan mekanik olarak temas ettirilemez [76]. Bu durum elektrik motor fırçası kullanımını oldukça kısıtlamaktadır. Bu yüzden oksitli bileşikler ve/veya elementlerle kullanılan alaşımları tercih edilebilir [43, 77].

1.4.9. Alüminyum (Al)

Son yıllarda alüminyum gittikçe artan sayıda ekonomik ve mühendislik nedenleriyle kullanılmaktadır. Hafifliği, nispeten iyi elektriksel ve termal özellikleri, kullanılabilirliği ve nispeten düşük üretim maliyeti nedeniyle alüminyum, elektrik sistemlerinde birçok iletken uygulaması için bakıra geçerli bir alternatif olarak düşünülmektedir. Bununla birlikte, alüminyumun bakırın yerini alması halinde, direnç, mekanik mukavemet ve yoğunluk farklılıkları dikkate alınmalıdır. Aynı direnç ve uzunluk için bir alüminyum iletken kesit alanı, eşdeğer bir bakır iletkeninkinden % 60 daha büyük olmalı, buna karşılık alüminyum iletken ağırlığı bakırın % 48'dir. Alüminyumun akım taşıma kapasitesi bakırdakinin % 80'idir [43].

Alüminyum nispeten yüksek termal ve elektrik iletkenliğine sahip sünek bir metaldir. Bakırdan daha yumuşaktır ve ince folyo şeklinde üretilebilir. Bununla birlikte, düşük mekanik mukavemeti nedeniyle, alüminyum ince tel olarak çekilemez. Alüminyumun direnci ve mekanik mukavemeti saflığına ve soğuk çalışma derecesine bağlıdır. Uygun imalat prosesini seçerek, 10 ppm mertebelerinde safsızlık içeren alüminyum elde edilebilir. Yüksek saflıkta alüminyumun direnci (% 99.999) 20 ° C'de 2.635 Scm^{-1} 'dir; buna karşın ticari alüminyumun direnci 2.78 Scm^{-1} 'dir [43].

Ticari alüminyum sınıfı nominal olarak % 0.1'den az Si ve % 0.015'den az, Mn, Ti, Cr, V içerir. Alüminyum iletkenliği üzerindeki yabancı maddelerin (özellikle Ti ve V) etkisini en aza indirmek için, % 0.02 bor sık sık eklenerek, bu kirliliklerin (Mn hariç) borür bileşiklerine dönüşmesi sağlanır [43].

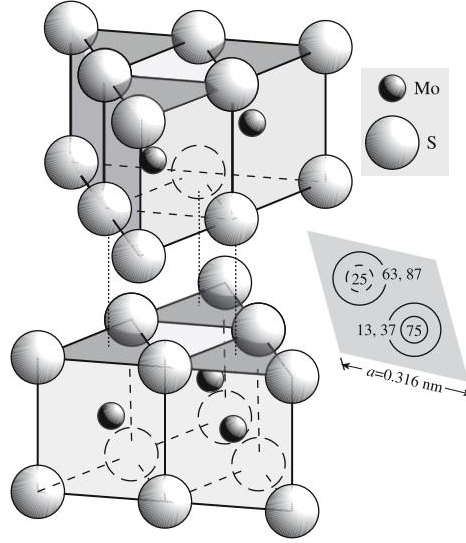
Saf alüminyum, sert çekilmiş olsa dahi, yetersiz mekanik özelliklere sahiptir. Bu eksiklik, diğer metallerin çeşitli alaşımlarıyla bir miktar aşılabılır ve bu da artan gerilme ve sünme mukavemetiyle sonuçlanır. Elektrik uygulamaları için en çok kullanılan alaşımlar, aynı zamanda Fe veya Co içeren Al-Mg veya Al-Mg-Si'dir [43].

Genel olarak, alüminyum ve alaşımlarının uygulanmasının üç ana kategorisi vardır. Bunlar yüksek iletim hatları ve yeraltı kabloları, bobin sarma ve bara iletkenleri. Üstten iletim hatları için, kullanılan alüminyum alaşım genellikle % 0.8 Mg veya % 0.5 MgSi içerir ve nispeten iyi bir elektrik iletkenliği ile birlikte yüksek mukavemete sahiptir. Bununla birlikte, bu alaşımın mekanik gücü her zaman yeterli olmayabilir. Örneğin, yüksek hatlardaki uzun mesafeler için, kompozit konstrüksiyon iletkenleri kullanılır, hattın çekirdeği çelik tellerden oluşur [43].

1.4.10. Molibden Difülfıt (MoS₂)

Molibden difülfıt (veya molibdenit) hegzagonal sıkı paket (HSP) kristal kafes yapısındadır. Molibdenit, Mo atomları HSP yapısının birim hücresine karşılık gelen konumlarda bulunur. Bir S-S çifti, Şekil 10.'da gösterilen yapıya sahip olarak Mo atomlarının tam karşısında bulunan c-doğrultusunda ortalanır. Yığın sırası AbA BaB

olarak yazılabilir; burada büyük küreler S atomlarını, küçük küreler Mo atomlarını göstermektedir [49].



Şekil 11. Molibdenitin kristal kafes yapısı

Bir elektrik motoru düşünülürken, kayma halkaları (kolektör) genellikle bakırdan yapılırken, fırça temasları bakır, gümüş, molibden disülfid MoS_2 ve grafit gibi malzemelerin kombinasyonlarında yapılır. Grafit tek başına, vakum koşullarında gerekli yağlama filmini sağlamadığı için yağlayıcı MoS_2 ilavesi kritik önem taşır. MoS_2 ve benzeri birkaç malzeme zorlu çalışma koşulları için katı yağlayıcı olarak çok önemlidir [43]. Genellikle sürtünme katsayısı çok düşüktür. Örneğin %3.7 MoS_2 ilavesi ile ölçülen sürtünme katsayısı havada 0.04 iken vakumda 0.02 mertebelerindedir. Ancak dikkat edilmesi gereken en önemli husus çalışma sıcaklığıdır. MoS_2 350-370 $^{\circ}\text{C}$ aralıklarında kolayca oksitlenir ve 780 $^{\circ}\text{C}$ 'da da tamamen MoO_3 'e dönüşür. Bu oksitlerin yağlayıcılık özelliği olmadığı gibi aynı zamanda da sert bir malzemedir ve kolektörü aşındırarak hasara uğratar [78-80].

1.5. Elektrik Motor Fırçası Üretim Yöntemleri

Elektrik motor fırçası üretimi temel olarak toz metalürjisine dayanmaktadır. Ancak üretim esnasında izlenen farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler kimi zaman üretici firmanın izlediği politikalar gereği (ömür, kalite, maliyet, vs.) kimi zaman da üretim aşamalarındaki zorunluluklardan kaynaklanmaktadır. Örneğin; üretici grafit fırça imalinde

tüm harmanlama ve karıştırma işleminden sonra grafitizasyon işlemi ile fırça üretebileceği gibi ihtiyacına uygun grafiti satın alarak kalıplama ve sonrasında sinterleme gibi bir yol da izleyebilir. Şekil 12’de genel olarak fırça üretim basamaklarını gösteren akış şemasına yer verilmiştir [26, 27, 81, 82].



Şekil 12. Elektrik fırçası üretimi genel akış şeması

1.6. Elektrik Motor Fırçası Performansını Etkileyen Faktörler

1.6.1. Ark Oluşturma Eğilimi/Direnci

Fırça malzemelerinin katkıları bazı durumlarda ark oluşturma eğiliminde olabilirler. Örneğin; alüminyum içeren bir fırça kontrollü bir atmosferde ve sıcaklıkta kullanılmazsa veya mukavemet artırıcı olarak gereğinden fazla, yapıya Al_2O_3 eklenirse yüzeyde oluşabilecek alüminyum oksit yüzünden yüksek elektriksel direncin neden olduğu ark bölgeleri oluşabilir [43]. Ayrıca sürtünme katsayısının azalması, diğer bir deyişle fırçaya yeterli yay basıncının uygulanmaması da fırça-kolektör ara yüzeyinin temasında bozulmalara neden olur. Bu durumda fırçadan kolektöre akım geçişleri kesintili ve sıramalar şeklinde kendini gösterir. Ark oluşumu hem karşı yüzeyde film oluşumlarını bozarak kolektörün zarar görmesine hem de fırça üzerinde ısının artışından kaynaklanan bölgesel ergimelere ve dolayısıyla yüzey yapısının bozulmasına ve ark aşınmasına neden olur [83].

1.6.2. Yüzeyde Film Oluşturma Kabiliyeti

Karşı yüzeyde film oluşturma kabiliyeti bir çeşit kendini koruma yöntemidir. Elektrik motor kolektörleri az miktarda gümüş içeren elektrolitik bakırdan imal edilirler

[84]. Kullanılan fırçanın bu bakır yüzeyde film tabakası oluşturması istenir ki burada bahsedilen film çoğunlukla CuO ve / veya Cu₂O' tir. Bilindiği üzere oksit filmlerin dayanımları yüksektir ve bu durum bakırda çifte avantaj sağlar. Çünkü diğer metallerin aksine bakırın bahsedilen oksitli formları elektrik iletkenliği açısından da oldukça iyidir. Buradan yola çıkarak fırçanın film oluşturma eğilimi hem kolektörü koruyucu hem de elektriksel olarak iletkenliği olduğu için tercih edilen bir durum oluşturmaktadır [85].

1.6.3. Kolektör Yüzey Aşınması

Motorun çalışması sırasında hem fırçada hem de kolektörde sürtünme ve aşınma meydana gelir [84]. Yeterli kalitede üretilmemiş bir fırça, kolektör yüzeyine oldukça fazla zarar verir ve motorun ömrünü veya servis süresini kısaltır. Kolektör aşınması sanayide kabul edilemeyecek bir durumdur. İstenen ve beklenen aşınmanın fırçada meydana gelmesi istenir. Bu sorunun üstesinden gelmek için her ne kadar kendinden (katı) yağlayıcı ve kaliteli üretilmiş fırçalar geliştirilmiş olsa da ortam tozları, nem, yağ gibi çalışma koşulları her zaman için mevcuttur. Bu durumda kolektörde aşınma olması kaçınılmazdır. Ancak bu aşınmanın ihmal edilebilecek ölçelerde olması motor – fırça kalitesini gösteren bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır [84, 86, 87].

1.6.4. Mekanik ve Elektriksel Kayıplar

Birçok pratik uygulamada düşük mekanik ve elektriksel kayıplar istendiği düşünülürse bu başlığın önemli bir performans kriteri olduğu görülecektir. Sürtünme, yay basıncı, çalışma hızı, akım türü ve yoğunluğu, ark oluşturma, yüzey kalitesi, çalışma ortamı ve fırça bileşenleri gibi birçok parametre mekanik ve elektriksel açıdan motor performansını etkiler [26, 31, 88].

1.6.5. Fırça Ömrü

Fırça ömrü de daha önce belirtilen parametrelerden etkilenmektedir. Ancak burada ek olarak fırça sertliğini de eklemek gerekir. Fırçanın optimum sertlikte olması hem

kolektör hem de fırça ömrünü arttıracak bir durumdur. Aksi takdirde ya kolektör hasara uğrar ya da fırça ömrü çok kısa olacağından motor servis süresi kısalmır [89].

1.6.6. Akım Taşıma Kapasitesi

Fırçanın akım taşıma kararlılığı bir anlamda çalışabileceği minimum ve maksimum akım yoğunluklarını göstermektedir. Her fırça için optimum çalışma hızı – akım yoğunluğu vardır. Bu durum şu şekilde özetlenebilir; fırça minimum akım yoğunluğunun altında akım iletmeye çalışıldığında bileşiminde bulunan takviyelerin özgül direnci, kontak direnci gibi etkilerle akım değeri daha da düşecektir. Yeterli akım iletilmeyen kolektör ise ya motoru çalıştıramayacak ya da motordan beklenen çalışma hızlarına (verimli çalışmaya) ulaşamayacaktır. Öte yandan maksimum akım değerini üzerinde akıma maruz kalan fırçada da ark oluşumu gözlenecek ve bu durum daha önce de değinildiği üzere kolektörü olumsuz etkileyecektir [90, 91].

1.6.7. Kararlı Çalışma

Kararlı çalışma tabiri fırçanın hem mekanik olarak hem de elektriksel olarak kararlılığını ifade eder. Şöyle ki; mekanik olarak kararlı çalışan bir fırça homojen bir yapıya sahiptir ve karşı yüzeyde film oluşturarak bu filmi bozmadan çalışmasına devam eder. Elektriksel olarak da düşük özdirence ve yeterli akım taşıma kapasitesine sahip olduğundan çalışma ömrü uzundur. Ayrıca bu şartları taşıyan bir fırça kendi kadar elektrik motorunun da kararlı (stabil) çalışmasını, diğer bir deyişle her seferinde aynı performansı göstermesini sağlar [92-94].

1.7. Elektrik Motor Fırçalarında ve Kolektörlerde Karşılaşılan Durumlar

Elektrik motorları çalışmaları esnasında çevre ve sürtünme elemanlarıyla sürekli etkileşim halinde bulunurlar. Bu etkileşim sonucunda da özellikle fırça ve kolektörde bir takım beklenen ve beklenmeyen durumlar ile karşılaşılır. Beklenmeyen bu durumlar da hasar olarak adlandırılırlar. Aşağıda fırça ve kolektörde oluşan durumlar ve hasar türleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

1.7.1. Kolektörde Karşılaşılan Hasarlar ve Durumlar

Kolektörün yüzeyinin fiziksel görüntüsüne ilaveten, karbon fırçaların iyi çalışması için yüzey veya yüzey filmi eşit derecede önemlidir. Her bir fırça, çalıştırma ve ortam koşullarından etkilenen karakteristik bir film oluşturur. Yüzey filmi, çoğunlukla bakır oksitler, grafit çökeltileri ve emilmiş sudan oluşur ve görünüşü kolektör setinin çalışma davranışının değerlendirilmesi için önemlidir [87, 91, 95-98].

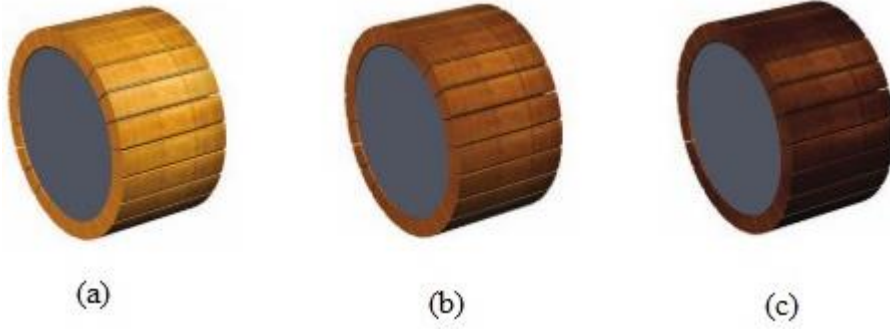
1.7.1.1. Renk Yoğunluğu

Renk yoğunluğu genel olarak üç farklı renk ile gösterilir. Bu renkle oluşan film tabakaları hakkında bilgi verir. Açık renkli, orta ve koyu renkli olarak ayrılabilir [95].

İnce film, iyi bir fırça performansının olduğunu gösterir. Hafif akım yükleri, düşük nem koşulları, film azaltıcı kirliliklerin veya filmi düşük oranlarda bozan fırça kalitesinden kaynaklanır [95].

Orta kalınlıkta, film maksimum fırça ve kolektör ömrü için ideal kolektör koşuludur. Oluşan film homojen, rengi ise bakır kahverengiden koyu kahverengiye giden bir görünüm sergiler [95]

Kalın film, yüksek akım yükü, yüksek nem, yüksek sıcaklık veya film tabakasını çok yavaş aşındıran fırçadan kaynaklanır. Kahverengi tonlarda olmayan renkler kirlenmeyi gösterir, yüksek sürtünme ve yüksek direnç ile sonuçlanır. Şekil 12'de renk yoğunluğu farklı olan kolektör görüntüleri verilmiştir [95].



Şekil 13. Farklı renklerin oluştuğu kolektör görünüşleri a) İnce film tabakasının oluşturduğu renk, b) Orta film tabakasının oluşturduğu renk, c) Kalın film tabakasının oluşturduğu renk

Her ne kadar renklerin film oluşumu hakkında bilgi verse de grimsi, mavimsi ve kırmızımsı tonlar oluşabilir, ancak önemli olan film oluşumunun düzgünlüğüdür.

1.7.1.2. Film Görünümünde Elektriksel, Mekanik ve Atmosferik Etkiler

Burada sekiz farklı durum söz konusudur [91, 97].

Hatalardan ilki, değişik boyuttaki hatlar ve bantlar içeren kolektörde, aşınma olmadan dönüşümlü olarak açık ve koyu renk oluşumudur (Şekil 13-a). Olası sebepleri; yüksek nem, yağ buharı, atmosferdeki agresif gazlar ve fırçalarda düşük elektrik yükü olarak sıralanabilir [95].

Diğer bir hata, ham bakır renginde bantlar veya çok hafif derisi soyulmuş gibi görünen yüzey şeklindedir (Şekil 13-b). En sık görülen nedenleri; kolektörün yüksek nem, yağ buharı, atmosferdeki agresif gazlar ve fırçalarda düşük elektrik yükü gibi durumlara daha yoğun veya uzun süreli maruz kalmasıdır [91, 95-98].

Karşılaşılan başka bir hata ise pürüzsüz film tabakası, pürüzlü yamalı gibi görünen bölgeler ve rastgele noktalar olarak kendini gösterir (Şekil 13-c). Bu durum pürüzlü kolektör yüzeyi ve/veya kirli çalışma koşullarının yanı sıra uygun olmaya fırça seçiminden kaynaklanır [98].

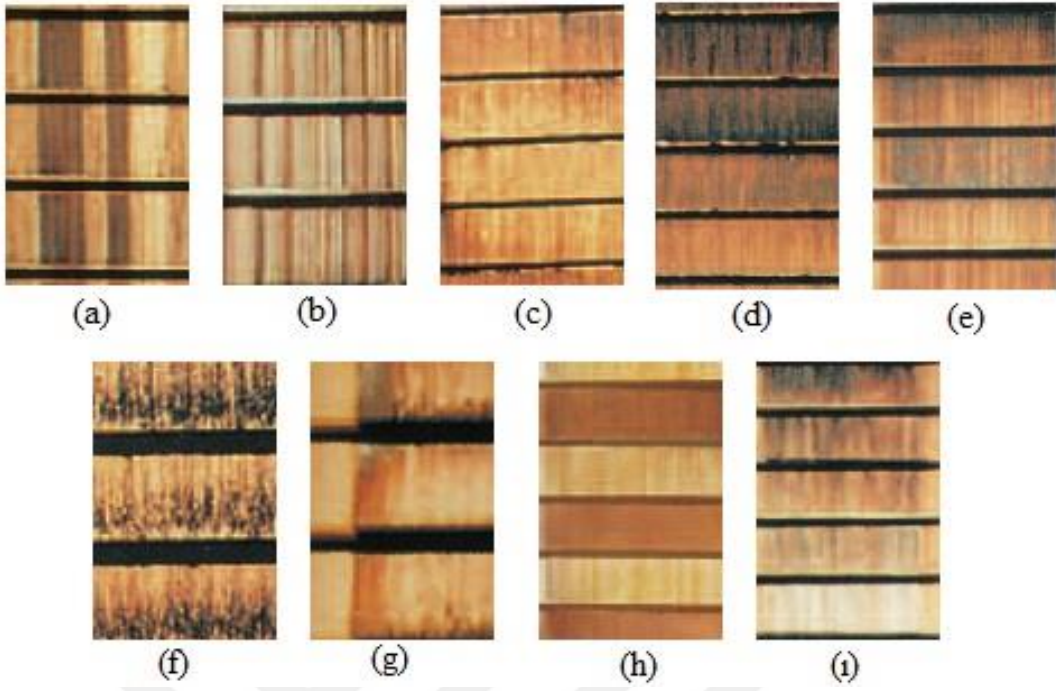
Hatalardan bir diğeri izole edilmiş veya düzenli olarak, karanlık bölgeleri olan, bulanık sınırlara sahip koyu lekeler şeklinde görünür (Şekil 13-d). Olası sebepleri ise, ovalleşmiş kolektör, düzgün ayarlanmamış mil veya hasar görmüş rulmanlardan kaynaklanan motorun titreşimleri gösterilebilir [91, 95, 97].

Başka bir hata ise keskin veya düzensiz kenarlı koyu lekeler, ardından kademeli olarak değişen şekilde daha açık alanlar şeklinde görülür. Renk yoğunluğu kademeli olarak azalır. Bir lameli etkileyen bir arıza veya fırçanın radyal hareketine neden olan lamel grubu bu hataya sebep olur (Şekil 13-e) [91, 95, 97].

Diğer bir hata kolektör segmentlerinin ortasında ya da kenarlarında yamalar varmış gibi görünen bir kusurdur (Şekil 13-f ve g). Genellikle hatalı bakım, kötü taşıma veya aşınma şartlarından kaynaklanır [91, 95, 97].

Kolektör segmentlerinde görülen başka bir hata da bir koyu bir açık renkte kolektör görünümüdür (Şekil 13-h). Sık karşılaşılan bir durumdur. Sorunun kaynağı elektriktir. Aynı yuvada çift sarımın geçişi nedeniyle iki paralel sargı üzerinde eşit olmayan akım dağılımından kaynaklanır. [91, 95, 97]

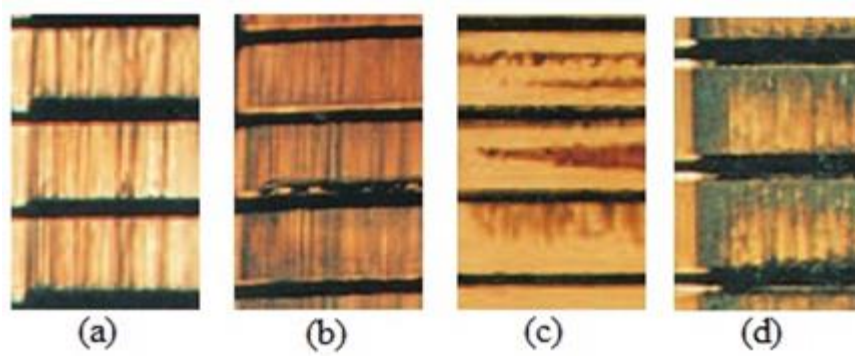
Bu başlık altındaki son hata ise çift kutup geçişlerinde lekelenme şeklinde görülür (Şekil 13-ı). Genellikle lamel veya köprü bağlantılarındaki kusurlu lehimlemeden kaynaklanır. Şekil 13'te elektriksel, mekanik ve atmosferik etkileri gösteren kolektör görünüşleri verilmiştir [91, 95, 97].



Şekil 14. Elektriksel, mekanik ve atmosferik etkileri gösteren kolektör yüzey görüntüleri

1.7.1.3. Yanma

Yanma görüntüsü; kıvılcım derecesine bağlı olarak lamel kenarında metal erozyonu, yanma ve koyu renk lekeler, lamel merkezinde metalik erozyon veya karıncalanmış yüzey şeklinde kendini gösterir. Nedeni büyük elektrik direncinin film tabakasını hasara uğratması (kolektörden kaynaklanan kıvılcımlar) ve/veya fırça yüzeyinde oluşan arktır. Yanma hasarına ilişki görüntü Şekil 14'te verilmiştir [91, 95, 97].

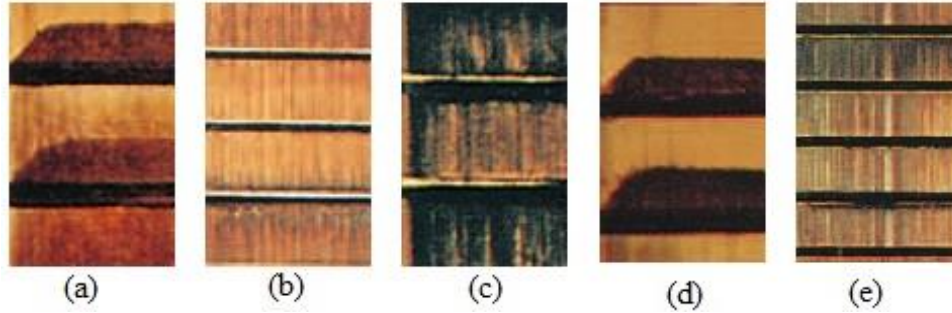


Şekil 15. Yanma hasarı a) lamel erozyonu, b) yanma ve koyu renk lekeler, c) metalik erozyon, d) karıncalanmış yüzey

1.7.1.4. Gölgeleme ve Bantlaşma

Bu hasar; lamellerin dönme yönündeki kenarlarındaki koyu renkli yamalar, bir iz kenarında yanma ve bir lamelin bir sonraki ön kenarında yanma, koyu renkli işaretler, yanan segment kenarlarıyla birlikte oluşmuş koyu renkli işaretler, segment kenarındaki metalik kanatlardan dolayı koyu renkli bar kenar yamaları gibi şekillerde görülebilir [91, 95, 97].

Karşılaşılma nedenleri ise; gerilim altındaki makinenin geçici veya uzun süre durması, çıkıntılı segmentler, düşük veya düz segment, yükselmiş mika veya kötü segmentteki kademeli kenardan kaynaklanır. Şekil 15'te gölgeleme ve bantlaşmanın görüldüğü kolektör örnekleri verilmiştir [91, 95, 97].



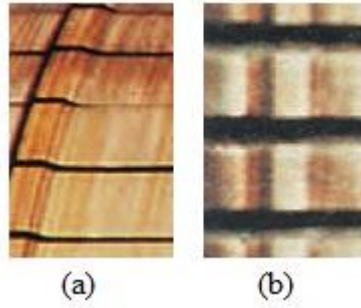
Şekil 16. Gölgeleme ve bantlaşma, a) dönme yönündeki koyu renk yama, b) iz ve lamel kenarında yanma, c) koyu renkli izleri, d) yanmış segment kenarları, e) segment kenar yamaları

1.7.1.5. Kolektör Lamellerinin Aşınması

Bu kolektör hataları genellikle iki şekilde görülür. Bunlardan ilki, aksel profilli kolektörde doğru saptırıcı ile iz büyümesi görülür. Doğru konumlanmış fırça ve düzgün yataklanmış kolektöre rağmen görülebilir. Bu aşınma çok sonra ortaya çıkabilir. Bunun nedeni ise çalışma süresinin çok uzun olmasıdır [91, 95, 97].

Diğer lamel hatası ise; yanlış, uygun olmayan veya farklı sınıfa ait metaller ve atmosferik koşullar neticesinde anormal bir aşınma durumunu gösteren bir hata türüdür.

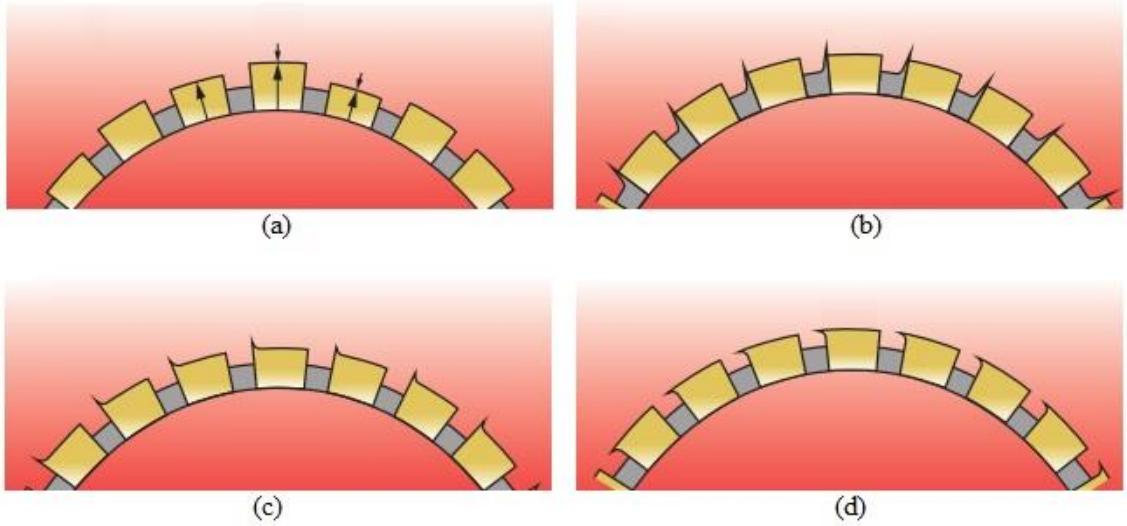
Anormal aşınma, yanlış fırça hizalanması, yanlış fırça malzemesi veya kirlenme vb. sebeplerden kaynaklanır. Şekil 16’da bu hatalara ilişkin görüntü verilmiştir [91, 95, 97].



Şekil 17. Kolektör lamellerinin aşınması

1.7.1.6. Kolektör Lamellerinin Hatası

Bu başlık altında bulunan hasar türleri; yüksek ve düşük lamel, yüksek mika, bakır kanatları ve bakır sürüklenmesi şeklinde özetlenebilir. Bu hatalara ilişkin şematik görüntüler Şekil 17’de verilmiştir [95].



Şekil 18. Kolektör lamellerinin hatası a) yüksek ve düşük lamel, b) yüksek mika, c) bakır kanatları, d) bakır sürüklenmesi

1.7.2. Fırçalarda Karşılaşılan Yüzey ve Kenar Oluşumları

Elektrik motor fırçası, motoru servis ihtiyacı olmadan etkin çalışma süresini belirleyen en önemli parçalardan birisidir. Dolayısı ile fırçada karşılaşılabilecek durumların ve hasarların bilinmesi doğru fırça seçimi açısından oldukça önemlidir. Hasarların bir çoğu kolektör kaynaklıdır. Bu yüzden kolektör hatalarından bağımsız olarak fırça hatalarını değerlendirmek yanıltıcı olabilir. Şöyle ki; kolektörde ki bir segment hatası fırçada ağır hasara sebep olabilir. Bu bağlamda fırça hasar tespit çalışmalarında kolektör ve endüvi gibi parçaların da verimi ve hasar analizleri gerçekleştirilmelidir. Alt başlıklarda, fırçalarda en çok karşılaşılan durumlar ve oluşma nedenleri verilmiştir.

1.7.2.1. Pürüzsüz (Parlak) Yüzey

Bu yüzey görüntüsü genel olarak fırçanın iyi bir performansı olduğunu gösterir. Bununla birlikte, parlatma aynaya benzer (sırlı) ise, düşük akım nedeniyle yüksek frekanslı gıcırdama benzeri titreşimlere neden olabilir. Titreşim belirtileri için fırçanın yan yüzeyleri kontrol edilmelidir. Pürüzsüz fırça görüntüsüne ait fırça görünümü Şekil 18’de verilmiştir [95, 98].



Şekil 19. Pürüzsüz, parlak fırça yüzeyi

1.7.2.2. Dokulu (Hafif Gözenekli) Yüzey

Bu yüzey görüntüsü de iyi bir fırça performansına işaret eder. Yüzey dokusu fırça kalitesine göre değişiklik gösterebilirse de istenen bir durumdur ve Şekil 19'da gösterilmiştir [95, 98].



Şekil 20. Dokulu (hafif gözenekli) kayar yüzey görüntüsü

1.7.2.3. İnce Çizgili Yüzey (Kıllanma)

Bu durum bir başka tatmin edici fırça yüzeyine ait durumdur. İnce çizgiler, atmosferdeki aşındırıcı tozun varlığını gösterir. Bu durum, filtre kullanılması veya makinenin hava kaynağını başka bir alana kanalize edilmesi ile aşılabılır. Durumu gösteren yüzey görüntüsü Şekil 20'de verilmiştir [95, 98].



Şekil 21. İnce çizgili yüzey görüntüsü oluşmuş fırça yüzeyi

1.7.2.4. İnce Oyuklu (Tırtıklı) Yüzey

Bu durum yukarıda bahsedilen ince çizgili yüzey görüntüsünün ilerlemiş halidir. Sebepleri atmosfer kirliliği, düşük yük, toz, yağ veya gres etkisi, zayıf yay basıncı veya yük akımının olmamasıdır. Bu yüzey şeklini gösteren fırça yüzeyi Şekil 21’de verilmiştir [95, 98].



Şekil 22. İnce tırtıklı yüzey görüntüsü oluşmuş fırça yüzey görüntüsü

1.7.2.5. Ağır Oyuklu (Tırtıklı) Yüzey

İnce tırtıklı yüzey görüntüsü gibidir, ancak sorun daha ağır ve derin çizikler vardır. Sebebi ince tırtıklı yüzey oluşumuna neden olan sebeplerin daha uzun süre devam etmesi sonucunda karşılaşılır. Şekil 22’de bu yüzey hasarına ait görüntü verilmiştir [95, 98].



Şekil 23. Ağır tırtıklı yüzey

1.7.2.6. Gölgeleşmiş Yüzey

Bu yüzey kusuru, akım düzeni bozuk olan ve hatalı nötr pozisyon, kutuplar arası problemler veya diğer elektriksel bozulmalardan kaynaklanabilir. Gölgeleşme kusuruna ait yüzey görünümü Şekil 23'te verilmiştir [95, 98].



Şekil 24. Gölgeleşme kusuru

1.7.2.7. Yanmış Kenar

Bu durum normalde fırçanın arka kenarında oluşur. Zayıf akım düzeni, ağır kıvılcımlanma, temassız fırça tutucu, yay basıncının yetersiz olması ve temas kesintisi nedenlerinden kaynaklanır. Yanmış kenar görüntüsü Şekil 24'te verilmiştir [95, 98].



Şekil 25. Yanmış kenar hasarına ait fırça yüzey resmi

1.7.2.8. ukurcuklu Yüzey

Elektriksel aşırı yük veya stabil çalışmayan fırçada temas kesintisi olması sonucu fırça altında aşırı kıvılcımı oluşması nedeniyle oluşan yüzey kusurudur. Bu kusura ait yüzey görüntüsü Şekil 25'te verilmiştir [95, 98].



Şekil 26. Çukurcuk oluşmuş yüzey kusuru

1.7.2.9. Tabakalı Yüzey

Bu, çalışma esnasında gerilim dalgalanmasına neden olan bir sarım hatasından kaynaklanan kayan yüzeyde oluşmuş yanma parçaları görülen bir hasardır. Fırça veya aksamlarından ziyade motorun üretimi esnasında yapılmış hatalardan kaynaklanır. Bu hasar türüne ait yüzey görüntüsü Şekil 26'da verilmiştir [95, 98].



Şekil 27. Tabakalı fırça yüzey görünüşü

1.7.2.10. Çift Katlı Yüzey

Bu durum ikiz fırça kullanılan ve çift yönlü çalışan elektrik makinelerinde oluşur ve fırçanın eğilmesi sonucunda ortaya çıkar. Yani, fırça her iki dönüş yönünde de yatar. Ancak bu sorun genellikle tek başına herhangi bir endişe kaynağı değildir ve Şekil 27’de yüzey görünüşü verilmiştir [95, 98].



Şekil 28. Çift katlı yüzey

1.7.2.11. Bakır Parçacıklı Yüzey

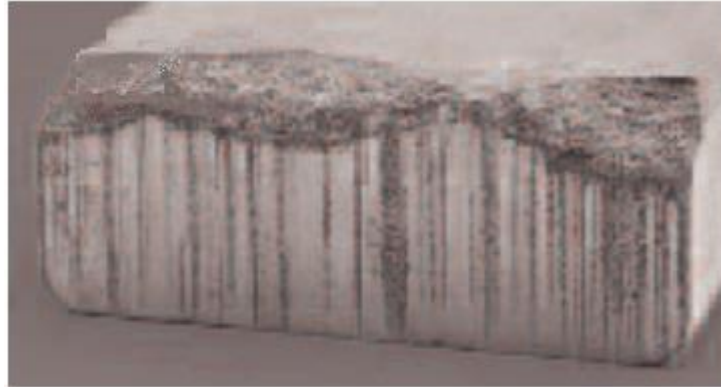
Sürtünme problemlerinden veya yoğun yüklerden dolayı kolektör yüzeyinden fırça yüzeyine bakır birikmesi olabilir. Bu durum fırça yüzeyinde görünse de aslında daha çok kolektörün aşınmasına neden olan ciddi bir problemdir. Sıklıkla bakır sürüklenmesini takip eder. Bakır toplarının ve parçacıklarının biriktiğini gösteren fırça yüzeyine ait görüntü Şekil 28’de verilmiştir [95, 98].



Şekil 29. Bakır parçaları birikmiş fırça yüzeyi görüntüsü

1.7.2.12. Kırılmış Fırça Kenar

Normalde fırçanın ön kenarında oluşur. Kırılma, zayıf akım profili, yüksek mikalar ve ciddi fırça kararsızlıklarından kaynaklanabilir. Yüksek kaldırılmış lameller, ciddi şekilde yuvarlaklığı bozulmuş kolektör, düşük yük ve rölantide çalışma durumlarında karşılaşılabılır. Şekil 29’da kırılmış kenar hatası görünen fırça yüzeyine ait görüntü verilmiştir [95, 98].



Şekil 30. Bir fırçaya ait kırılmış kenar hatası

1.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Sanayide karşılaşılan en büyük problemlerden birisi çalışan hareketli yüzeyler arasında oluşan sürtünme ve aşınmadır [99]. Bu problemlerden birisi de elektrik motor fırçalarında görünen aşınma ve kayıplara bağlı hasarlardır. Günümüzde hala geliştirilmeye çalışılan elektrik motor fırçaları birçok bilimsel çalışmalara konu olmaktadır. Bu çalışmalarda fırça numunelerinin incelenirken odak noktaları triboloji, elektro-triboloji, çalışma atmosferi, iletkenlik veya ark oluşumu/davranışı olabilmektedir.

Triboloji konusunda yürütülen çalışmalarda fırça malzemelerinin aşınma mekanizmaları incelenirken, elektro-triboloji çalışmalarında üretilen fırça numunelerinin gerçek çalışma koşullarını simüle eden çeşitli sistemlerde ve akım altındaki sürtünme ve aşınma davranışları incelenir. Bu incelemeler genel olarak akım türü (AC veya DC) ve fırça kullanım yerine göre (elektrik motor fırçası veya pantograf sistemler) tasarlanmış cihazlarda gerçekleştirilir.

İletkenlik ve ark davranışı konuları ise genel olarak birbiri ile ilişkilendirilerek incelenmektedir. Her ne kadar tribolojik çalışmalar olsa da odak noktası ark karakteristiğini belirlemeye yönelik olan bu çalışmalarda fırça malzemelerinin iletkenlik özellikleri, fırçaların akım taşıma kapasiteleri ve ark oluşturma eğilimleri değerlendirilir.

Motorlar farklı ortamlar için tasarlanıp kullanılır. Doğal olarak kullanım ortamı değişen motorda fırçanın da kullanım ortamı (atmosferi) değişmektedir. Üstelik fırçaların çalışma ortamları akım ve sıcaklık gibi etkilerden dolayı kendisine motorun maruz kaldığı ortamlardan çok daha fazla agresif ortam koşulları oluşturabilir. Bu bağlamda çalışma ortamı/atmosferi, konuya farklı bir yaklaşım getirerek aşınma ve iletkenlik çalışmalarını da kapsayan bir inceleme alanı ortaya çıkartmıştır.

Literatürde bulunan bazı örnekler incelendiğinde;

Argibay N. ve Sawyer W.G.'nin (2012) yaptıkları çalışmada 440 A/cm^2 DC akım yoğunluğunda bakır – berilyum fiber kompozit fırçasını üretmiş ve çeşitli çalışma koşulları incelenmiştir. İncelenen çalışma koşulları özellikler fırçanın maruz kaldığı çevre ile

ilgilidir. Saf su, hidrofloreter ve hidrojenperoksit çeşitli ortamlarında maruz kalan fırça malzemesinde aşınma ve sürtünme kavramlarını incelemiş ve fırça teması boyunca yüksek akım yoğunluğu taşınmasının bir sonucu olarak, fırça aşınma oranını yorulma direncine ve elektrokimyasal olarak yükseltilmiş oksidasyona bağlayan bir kavramsal model önermişlerdir [100, 101].

Ding, T ve arkadaşlarının (2014) yürüttüğü başka bir çalışmada ise pantograf sistemleri için tasarlanmış fırça (pabuç) aksamı yüksek hız ve AC akım altında farklı çalışma koşullarındaki ark davranışı incelenmiştir. İncelemelerinde, fırçanın çalışması sırasında oluşan sıcaklığın sürtünme katsayısını düşürdüğünü, sıcaklık ve ark oluşumuna göre aşınma mekanizması oluşumunu tanımlamışlardır [102-105].

Bakır – gümüş – zirkonyum ve bakır – gümüş – krom numuneler üzerinde çalışan Jia S.G. ve arkadaşları (2007) pantograf sistemlerde nispeten düşük akım yoğunluklarında ve düşük hızlarda ancak yüksek yay basınçlarında çalışmalarını yürütmüşlerdir. Yürüttükleri çalışmalarda artan akıma karşılık aşınma oranlarının arttığını bulmuşlar ve numuneleri için baskın aşınma mekanizmalarını tespit etmişlerdir [106-108].

Takaoka, M. ve arkadaşları(2001), kolektör ve fırçada oluşan aşınma mekanizmalarını farklı çevre şartlarında incelemiş ve aşınma oranlarının ark enerjisi ile orantılı ve sıvı ortamda daha şiddetli olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca oluşan film tabakasının hava ve benzin atmosferlerindeki oluşumunu karakterize etmişlerdir [78].

Çalışmaların odak noktaları yay basıncı, akım yoğunluğu, çalışma hızı, çalışma atmosferi, kaplama gibi farklı alanlar olmasına karşın fırça malzemesinin doğası gereği çalışma parametrelerinin temelini elektrik akımı ve aşınma oluşturmaktadır.

Literatür taraması sonucunda dünya çapında süren bilimsel çalışmalara rağmen elektrik ve/veya aşınma arasındaki gizem günümüzde hala aşılması gereken bir problemdir. İletkenliği düşük malzemeler ark oluşturma eğilimde oldukları için hem çalışma sıcaklığını arttırması hem de ark aşınma mekanizması geliştirmesi bakımında potansiyel bir sorun teşkil etmektedir. Ne var ki sorunun aşılması için sadece iyi iletkenlik özelliği gösteren fırçalar üretmekte çözüm olamamaktadır. İletkenlik özelliğinin

arttırılması çoğu kez bakır ve gümüş gibi iletkenliği yüksek ama buna karşın suneğ malzemelerle geręekleřtirildiđinden aşınma direncini azaltan bir unsur olarak etki göstermektedir [109-111]. İdeal bir fırçada ise, uygun maliyetli olmasının yanı sıra iyi bir aşınma direncine ve ark oluşumunu minimum düzeyde tutacak bileşenlere sahip olması gerekmektedir.

Yürütölen bu çalışmada, bakır matrisli ve ana bileşeni grafen olan elektrik motor fırçası üretilmiştir. Ayrıca üretilen bu fırça numunelerine sistematik olarak az miktarlarda seramik parçacık takviyeleri de eklenerek hibrit kompozit numuneler elde edilmiştir. Böylelikle orta ve/veya düşük voltaj düşümünün yanı sıra aşınma dayanımı yüksek fırça malzemesi üretimi hedeflenmiştir. Literatürde fırça uygulamaları ve farklı uygulamalar için (tribolojik çalışmalar) metal matrisli seramik takviyeli çalışmalar bulunsa da bu çalışmayı diğerlerinden ayıran kısım hem kullanılan bileşim oranlarının benzersiz olması hem de toz metalürjisi ile üretilen bu numunelerin elektro-triboloji deneyleri ile incelenmesidir. Çalışma yürütölürken maliyeti en düşük seviyelerde tutacak üretim parametreleri belirlenerek aşınma kayıpları, iletkenlikleri ve sürtünme kuvvetleri gibi önemli unsurları geliştirmeye yönelik incelemeler yapılmıştır. Böylelikle, verimliliği yüksek ve efektif enerji kullanımını yönündeki talepleri karşılamak için önem arz eden başlıklardan bir tanesi olan fırça malzemesinin geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

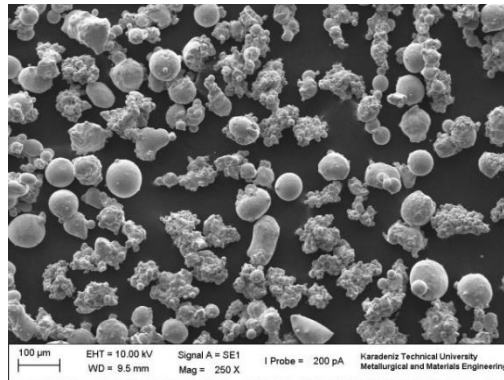
2.1.Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve bazı özellikleri Tablo 4’te verilmiştir.

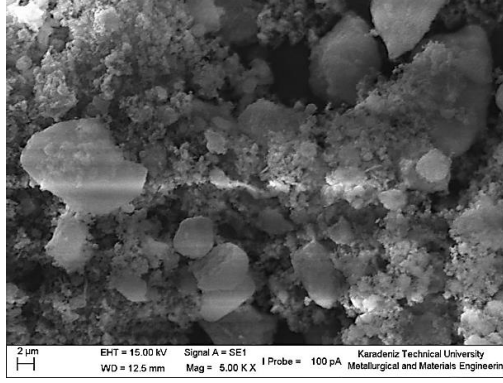
Tablo 4. Kullanılan Malzemeler ve özellikleri

Malzeme	Simgesi	Kullanım amacı	Toz morfolojisi	Toz Boyutu	Sertlik	Yoğunluk (g/cm ³)
Bakır	Cu	Matris	Küresel	37-88 µm	87 Vickers (3Mohs)	8.96
Grafen	C	Takviye	Levha	Kalınlık: 50-100 nm Çap: 5 µm	1-2 Mohs(grafit)	2.25
Bor Karbür	B ₄ C	Takviye	Düzensiz	4-5 µm	30 GPa Knoop (200g) (9-10 Mohs)	2.52
Alümina	Al ₂ O ₃	Takviye	Düzensiz	100 nm	19 GPa Vickers (500g)	3.95
Silisyum Karbür	SiC	Takviye	Düzensiz	40 nm	26 GPa Vickers (500g)	3.21
Hegzagonal Bor Nitrür	h-BN	Takviye	Düzensiz	50 nm	2 Mohs	2.27
Metanol	CH ₃ OH	Yağlayıcı	Sıvı	-	-	-

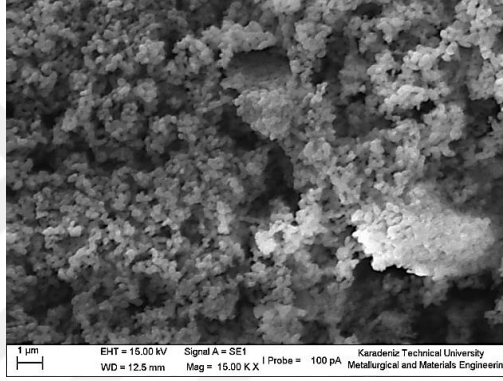
Şekil 31 - 35 arasında deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme tozlarının başlangıç morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. Bakır tozları, bor karbür, silisyum karbür tozları, Alfa Aesar; Grafen tozları, Chemical Industries; alümina tozları Wacker Ceramic; hegzagonal bor nitrür tozları, Ege Nanotek Kimya Sanayi ve metanol, Tekkim firmalarından temin edilmiştir.



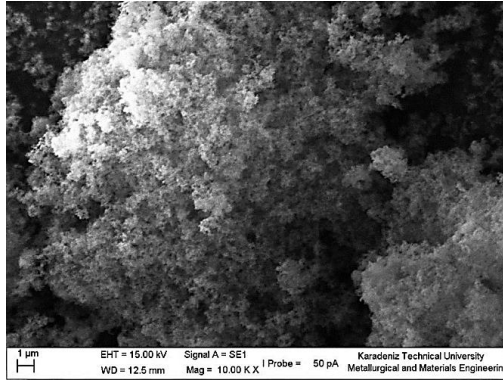
Şekil 31. Deneysel çalışmalarda kullanılan bakır tozuna ait SEM görüntüsü



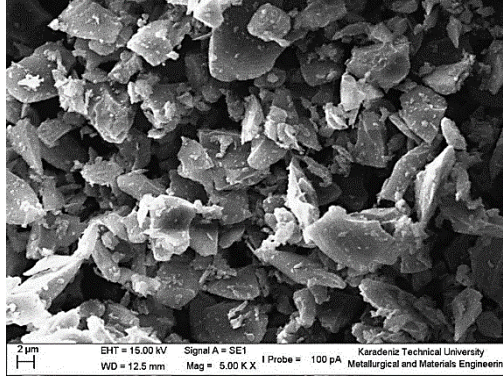
Şekil 32. Deneysel çalışmalarda kullanılan hegzagonal bor nitrür tozuna ait SEM görüntüsü



Şekil 33. Deneysel çalışmalarda kullanılan alümina tozuna ait SEM görüntüsü



Şekil 34. Deneysel çalışmalarda kullanılan silisyum karbür tozuna ait SEM görüntüsü



Şekil 35. Deneysel çalışmalarda kullanılan bor karbür tozuna ait SEM görüntüsü

2.2. Numune Üretimi

Numune üretiminde mekanik alaşımlama olarak bilinen metot kullanılmıştır. Bir toz metalürjisi yöntemi olarak mekanik alaşımlama işlemi hem yüksek oranlardaki bileşenleri homojen dağıtmada [112] oldukça iyi sonuçlar veren hem de küçük ve karmaşık şekillerde numune üretimine uygun [113-116] bir proses olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bakır içerisinde sıvı fazdaki çözünürlüğü düşük olan karbonun [117] yüksek oranlarda kullanımına olanak sağlayan bu yöntemde, bazı özelliklerine yukarıda değinilen toz formundaki malzemeler Tablo 5'te verilen oranlarda kullanılmıştır. Sonrasında klasik toz metalürjisinde olduğu gibi presleme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca, mekanik alaşımlama parametreleri yapılan ön çalışmalar ve literatürden faydalanılarak belirlenmiştir. Mekanik alaşımlama çalışmalarında toz/bilye oranı ağırlıkça 1:5 [118] olarak seçilmiştir. Ayrıca kullanılan bilyelerin etkinliğinin artması ve tozun potaya sıvanmasını önlemek için her karışıma yağlayıcı olarak toplam toz ağırlığının %2 kadar metanol ilavesi yapılmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde çoğu metal matrisli kompozit malzemelerde hacimce takviye oranlarının maksimum %50 mertebelerinde tutulduğu görülmüştür [36, 119, 120] Ayrıca, aşınma dayanımı üzerine yürütülen çalışmalarda seramik partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler için hacimce % 30 - 40 oranları optimum olarak önerilmektedir [121-124]. Bu çalışmaların ışığında; sadece grafen takviyesi içeren numune grubunda maksimum takviye oranı ağırlıkça %30 (hacimce yaklaşık %65) olarak, sadece h-BN içeren numune grubunda ağırlıkça maksimumu %20

(hacimce yaklaşık %50) ve diğer gruplarda toplam takviye oranı maksimum ağırlıkça %16 (hacimce yaklaşık %43) olarak belirlenmiştir.

Mekanik alaşımlama süresinin tayini ön çalışmalarla belirlenmiş olup, %5 grafen - %95 bakır bileşimi kullanılmıştır. Mekanik alaşımlama sırasında grafen tozlarının bakır matrise tamamen gömüldüğü alaşımlama süresi optimum süre olarak tayine edilmiştir. Bu süre aktif olarak 8 saatlik mekanik alaşımlama süresidir. Alaşımlama işlemi 2 dakika çalışma ve 1 dakika dinlenme/soğuma döngüsünde gerçekleştirilmiştir. Dinlenme/soğuma süresi mekanik alaşımlama süresine dâhil edilmemiştir.

Mekanik alaşımlama süresi arttıkça artan deformasyon sertleşmesi, plaka haline gelen tozların önce kırılmasına sonra soğuk kaynak olmasına neden olan bir döngüye girmesine neden olmaktadır. Yapılan ön çalışmalar, bu döngünün birkaç kez gerçekleştiği numunelerde ilave yumuşatma tavlama ihtiyacı duyulduğunu göstermiştir. Ayrıca 8 saatlik alaşımlama süresinin tozların kırılmaya başlamadan önceki son saat olduğu gözlenmiştir. Böylelikle hem grafen tozlarının bakır bünyeye tamamen gömüldüğü, hem de deformasyon sertleşmesinin etkileri nispeten az olduğu alaşımlama süresi belirlendi. Belirlenen bu alaşımlama süresi diğer bileşimdeki toz karışımları için de sabit bir parametre olarak kullanıldı. Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan diğer bir parametre ise değirmenin çalışma hızıdır. Ön çalışmaların yürütüldüğü 400 rpm'lik çalışma hızı numune üretimlerinde sabit bir parametre olarak kullanılmıştır.

Tablo 5. Elektrik motor fırça bileşimleri ve bazı üretim parametreleri

Numune Grubu		Takviye Malzemesi (Ağırlıkça %) (Kalan Cu)	Matris Fazı	Kalıplama Basıncı	Sinterleme Parametresi
Saf	Cu (MA'sız)	-	Yüksek saflıkta (%99,9) küresel bakır tozu	500 MPa basınçta soğuk presleme	900 °C 'de indirgeyici atmosfer (%95N + %5H)
	Cu (MA'lı)	-			
İkili gruplar	Cu + Gr	%5 grafen			
		%10 grafen			
		%15 grafen			
		%30 grafen			
	Cu + h-BN	%5 h-BN			
		%10 h-BN			
Üçlü (Hibrit) gruplar	Cu + Gr + Al ₂ O ₃	%5 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃			
		%5 grafen - %1 Al ₂ O ₃			
		%10 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃			
		%10 grafen - %1 Al ₂ O ₃			
		%15 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃			
		%15 grafen - %1 Al ₂ O ₃			
	Cu + Gr + SiC	%5 grafen - %0.5 SiC			
		%5 grafen - %1 SiC			
		%10 grafen - %0.5 SiC			
		%10 grafen - %1 SiC			
		%15 grafen - %0.5 SiC			
		%15 grafen - %1 SiC			
	Cu + Gr + B ₄ C	%5 grafen - %0.5 B ₄ C			
		%5 grafen - %1 B ₄ C			
		%10 grafen - %0.5 B ₄ C			
		%10 grafen - %1 B ₄ C			
		%15 grafen - %0.5 B ₄ C			
		%15 grafen - %1 B ₄ C			
	Cu + Gr + h-BN	%5 grafen - %0.5 h-BN			
		%5 grafen - %1 h-BN			
%10 grafen - %0.5 h-BN					
%10 grafen - %1 h-BN					
%15 grafen - %0.5 h-BN					
%15 grafen - %1 h-BN					

Mekanik alaşımlamadan sonra kalıba alınan toz karışımı 500 MPa ± (10 MPa) kuvvet altında soğuk olarak preslendi. Kompakt hale gelen numuneler, yapıda bulunabilecek oksit oluşumlarını ve nemi uzaklaştırarak hem sinterleme mekanizmasını iyileştirmek hem de numunelerde oksit ve nem kaynaklı şişme ve çarpılma gibi sorunların önlenmesi için indirgeme fırınında sinterlendi.

2.3.Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar

2.3.1. Yüksek Enerjili Bilyeli Değirmen

Mekanik alaşımlama işlemi Retsch PM200 marka yüksek enerjili planet tipi oğtme cihazı ile gerçekleştirildi. Oğtme işlemi sırasında tungsten karbürden (WC) imal edilmiş potalar ve bilyeler kullanıldı. Çalışmalarda kullanılan oğtc değirmen Şekil 36’da verilmiştir.



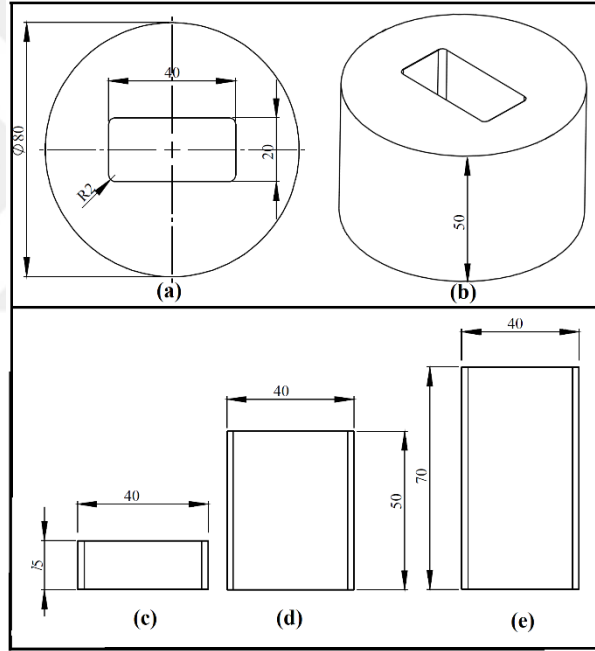
Şekil 36. Deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek enerjili bilyeli değirmen

2.3.2. Fırça Numunesi retim Kalıbı ve Pres

Numuneler, mekanik alaşımlama sonrasında Şekil 37’de verilen 100 ton kapasiteli MSE marka özel yapım otomatik pres ile Őekillendirildikten sonra Şekil 38’de Şematik resmi verilen kalıpta kompakt hale getirildi.



Şekil 37. Deneysel çalışmalarda kullanılan otomatik pres



Şekil 38. Toz sıkıştırma kalıbı şematik resmi a) kalıp teknik resmi, b) kalıp perspektif görünüşü, c) alt zımba, d) üst zımba, e) çıkarma zımbası

2.3.3. Sinterleme Fırını

Kompakt hale getirilen numuneler Şekil 39'da gösterilen ve Metin Otomotiv Firması tarafından özel olarak imal edilen indirgeme fırınında 900 °C'de 1 saat süre ile karışım oranı %95 azot (N) ve %5 hidrojen (H) olan indirgeyici gaz atmosferinde sinterlendi. Fırın ısıtma ve soğutma bölgesi olmak üzere iki kısımda oluşmaktadır. Fırın ısınma esnasında

100 °C' de 60 sn. boyunca sadece azot gazı ile ön süpürme, ardından karışım oranları verilen gaz atmosferi altında ısıtma ve sinterleme işlemini gerçekleştirecek şekilde programlandı. Ayrıca sinterleme süresi sonrasında numuneler açık atmosfere temas etmeden %95N+%5H gaz karışımı atmosferinde soğutma bölgesine alınarak koruyucu atmosfer etkisi altında soğumaları sağlandı.



Şekil 39. Sinterleme fırını görünümü

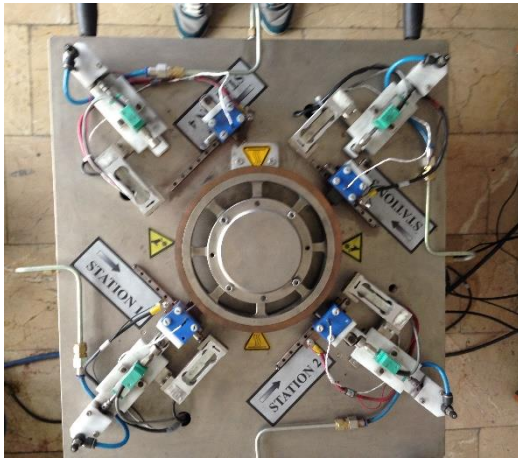
2.3.4. Elektro-Mekanik Aşınma Deney Düzenegi

Şekil 40' ta sinterlenen numunelerin elektro-mekanik davranışları bilgisayar kontrollü, pnömatik basınç ayarlı ve AC-DC akım dönüştürücü ünitelerden meydana gelen Ducom Firması tarafından üretilen elektrik motoru fırça test cihazında (Carbon Brush Tester TR-250) deneylere tabii tutuldu. Dört ayrı istasyondan oluşan cihaz aynı anda dört adet numune ile çalışabilmekte ve numunelerin voltaj düşümü, aşınma miktarı (μm), sürtünme kuvveti ve fırça sıcaklıklarını ölçebilmektedir. Ancak bu çalışmanın daha kontrollü olması için numuneler tek bir istasyon kullanılarak test edilmiştir. Boşta kalan diğer istasyonlara %25 karbon, %65 bakır ve %10 diğer elementleri içeren üç adet ticari karbon fırça yerleştirilmiş ve cihazın bir parçası gibi her numunede sabit olarak kullanılmıştır.

Sinterleme işleminden sonra numunelerin kolektöre temas eden kenarlarına, deney düzeneğindeki kolektör görevinde bulunan halka şeklindeki aşındırıcı disk yüzeyine teğet olarak tam temas edecek şekilde bir eğrilik yarıçapında ön şekil verilmiştir. Bu işlem önce kolektörle benzer yarıçapa sahip başka bir parça üzerinde 600'lük zımparayla ve sonrasında fırça düzeneği üzerinde, 1000'lik zımpara ile yapılmıştır. Daha sonra aşındırılan yüzeye, ön şekil verme işlemini tamamlamak için, 10 m/s hızda akım uygulamaksızın 6650 m.'lik rodaj uygulanmıştır. Rodaj aşamasında, önceki deneylerden oluşmuş olabilecek pürüzlülük ve film tabakası gibi unsurların giderilmesi için kolektör yüzeyi 1200'lük zımpara kullanılarak temizlendi. Ön hazırlık işlemlerinin ardından numuneler Tablo 6'da verilen parametrelerle elektro-mekanik aşınma deneyleri uygulandı. Elektro-mekanik aşınma deneylerinde, akım yoğunluğu ve işlem hızı parametreleri literatür çalışmalarından ve SGL PanTrac GmbH firmasının katalog bilgilerinden faydalanılarak belirlendi.

Tablo 6. Elektro-mekanik aşınma deney parametreleri

Akım yoğunluğu (A/cm ²)	İşlem hızı (m/s)	Mesafe (m)	Yay basıncı (kPa)
4	8	6650 (± 150 m)	100
8	16		
12	24		
16	32		



(a)

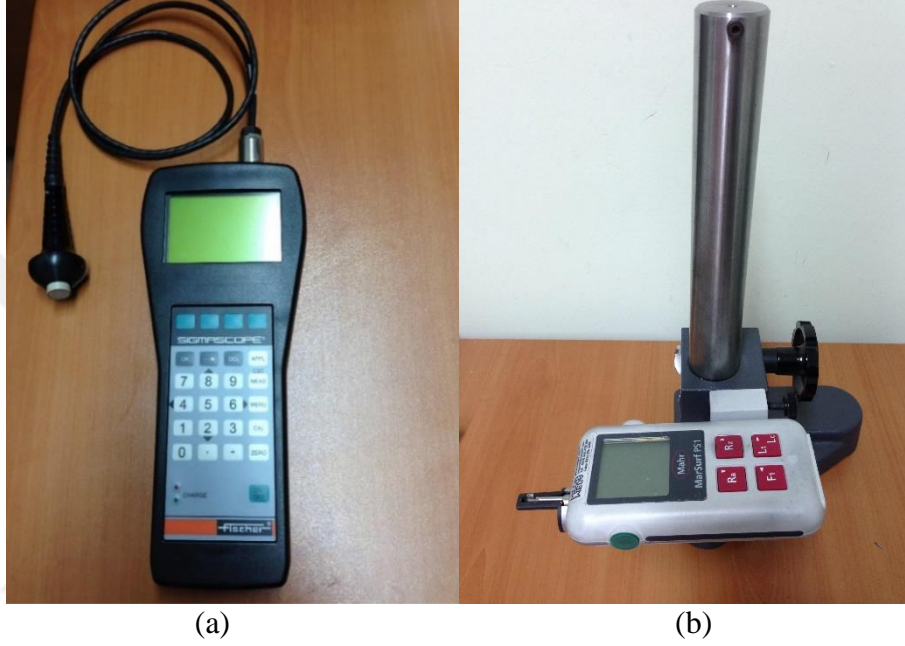


(b)

Şekil 40. Fırça deney düzeneği a) üstten görünüş b) profilden görünüş

2.3.5. Elektrik İletkenliği ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazları

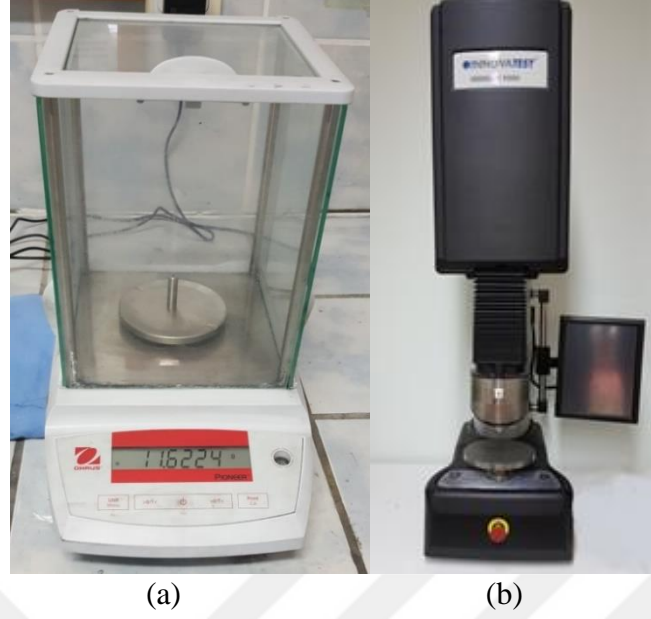
Numunelerin elektriksel iletkenlikleri Fischer – Sigmascope iletkenlik ölçüm cihazı ile ve yüzey pürüzlülükleri Mahr – Mahrsurf PS1 ile ölçüldü. Cihazlara ait görüntüler Şekil 41’de verilmiştir.



Şekil 41. a) Elektrik iletkenliği ölçüm cihazı b) yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

2.3.6. DeneYlerde Kullanılan Hassas Terazi ve Sertlik Ölçüm Cihazı

Numunelerin, üretim aşamasında toz bileşim oranları ve aşınma deneyleri sonrası ağırlık kaybı ölçümleri 0.0001 mg hassasiyetli Ohaus – Pioneer marka hassas terazi ile yapılmıştır. Ayrıca sertlik değerleri Innovatest – Nemesis 9000 marka bilgisayarlı tam otomatik sertlik ölçme cihazında Brinell sertlik değerinde (BSD) 15.625 kg yük ve 2.5mm bilye kullanılarak ölçülmüştür. Cihazlara ait görünüm Şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 42. a) Deneylerde kullanılan hassas terazi b) sertlik ölçüm cihazı

2.3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işını Difraktometresi (XRD)

Numunelerin aşınma yüzeyleri Zeiss marka EVO LS 10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca SEM incelemeleri sırasında numune yüzeylerinden enerji dağılım spektrometre analizi (EDS), haritalama yöntemi ile yapılmıştır. Saf toz numunelerine, mekanik alaşımlama sonrası toz numunelerine ve elektro-mekanik aşınma deneyi sonrasında aşınma yüzeylerine yapılan x - ışınları kırınımı (XRD) araştırmaları Panalytical X'pert³ Powder cihazında ve X'pert High Score Plus yazılımında gerçekleştirilmiştir. Cihazlara ait görünüm Şekil 43'te verilmiştir.



Şekil 43. a) Taramalı elektron mikroskobu (SEM) b) X ışınları kırınımı (XRD) cihazı

3.BULGULAR

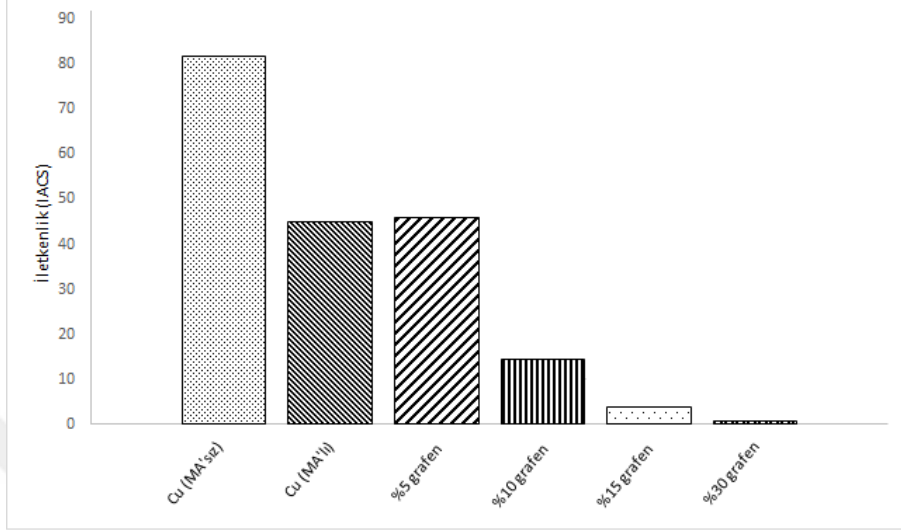
3.1. Fırça Numunelerinin Elektriksel İletkenlikleri

Numunelerin geniş olan yüzeylerinden (alt ve üst yüzey) rastgele noktalardan 5 farklı ölçüm alınmış, en küçük ve en büyük değer iptal edilerek kalan üç değerın ortalamaları alınarak iletkenlik değeri bulunmuştur. Tablo 7’de numunelerin elektriksel iletkenlikleri verilmiş olup uluslararası tavllanmış bakır standardına (IACS) uygun olarak ölçülmüştür.

Tablo 7. Üretilen fırça malzemelerinin elektrik iletkenlik değeri

Numune Grubu	Katkı Elemanı (Kalan % Cu)	Elektrik iletkenliği (IACS)
Cu (MA’sız)	-	81.7
Cu (MA’lız)	-	45
Cu + Gr	%5 grafen	46
	%10 grafen	14.3
	%15 grafen	3.9
	%30 grafen	0.6
Cu + h-BN	%5 h-BN	12.4
	%10 h-BN	Ölçüm alınamadı
	%20 h-BN	Ölçüm alınamadı
Cu + Gr + Al ₂ O ₃	%5 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃	20.2
	%5 grafen - %1 Al ₂ O ₃	7.1
	%10 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃	10.1
	%10 grafen - %1 Al ₂ O ₃	2.8
	%15 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃	3.3
	%15 grafen - %1 Al ₂ O ₃	1
Cu + Gr + SiC	%5 grafen - %0.5 SiC	16.5
	%5 grafen - %1 SiC	4.3
	%10 grafen - %0.5 SiC	1
	%10 grafen - %1 SiC	Ölçüm alınamadı
	%15 grafen - %0.5 SiC	2
	%15 grafen - %1 SiC	Ölçüm alınamadı
Cu + Gr + B ₄ C	%5 grafen - %0.5 B ₄ C	8.2
	%5 grafen - %1 B ₄ C	4.7
	%10 grafen - %0.5 B ₄ C	6.8
	%10 grafen - %1 B ₄ C	2.9
	%15 grafen - %0.5 B ₄ C	1.1
	%15 grafen - %1 B ₄ C	0.1
Cu + Gr + h-BN	%5 grafen - %0.5 h-BN	28.5
	%5 grafen - %1 h-BN	20.5
	%10 grafen - %0.5 h-BN	12.1
	%10 grafen - %1 h-BN	3.8
	%15 grafen - %0.5 h-BN	5.3
	%15 grafen - %1 h-BN	0.6

İletkenlik değerleri Şekil 44 ila 49 arasında verilmiş olup Şekil 44'te saf bakır ve grafen katkılı bakır fırçalardan alınan iletkenlik değerleri grafiği görülmektedir.

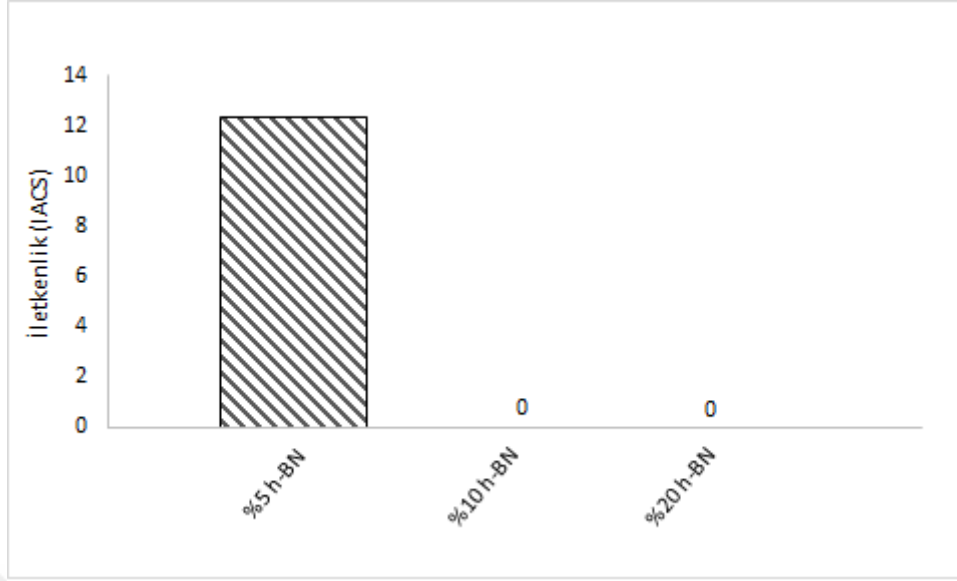


Şekil 44. Grafen katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği

Cu (MA'sız) kodlu numune mekanik alaşımlama/öğütme olmaksızın ve Cu (MA'lı) kodlu numune ise mekanik alaşımlama/öğütme işleminden sonra üretimi gerçekleştirilen numuneleri göstermektedir. Bu fırça numunelerde herhangi bir takviye elemanı kullanılmamıştır. Mekanik alaşımlama/öğütme işlemine tabii tutulmadan üretimi (tozun temin edildiği hali ile) gerçekleştirilen Cu (MA'sız) kodlu numune en yüksek elektriksel iletkenlik değerini göstermiştir. Bu numune için elektriksel iletkenlik değerlerinin ortalaması 81.7 IACS olarak ölçülmüş olup, Cu (MA'lı) ve %5 grafen katkılı fırça numunelerinin yaklaşık 2 katıdır.

Cu (MA'lı) kodlu numunenin iletkenlik değeri 45 IACS olarak ölçülürken %5 grafen katkılı numunenin iletkenlik değeri 46 IACS olarak ölçülmüştür. %5 grafen katkılı numunenin çok az da olsa iletkenlik değeri bir miktar yüksek çıkmıştır. Sonraki numunelerde ise artan grafen oranı ile elektriksel iletkenlik değerlerinin giderek azaldığı saptanmıştır.

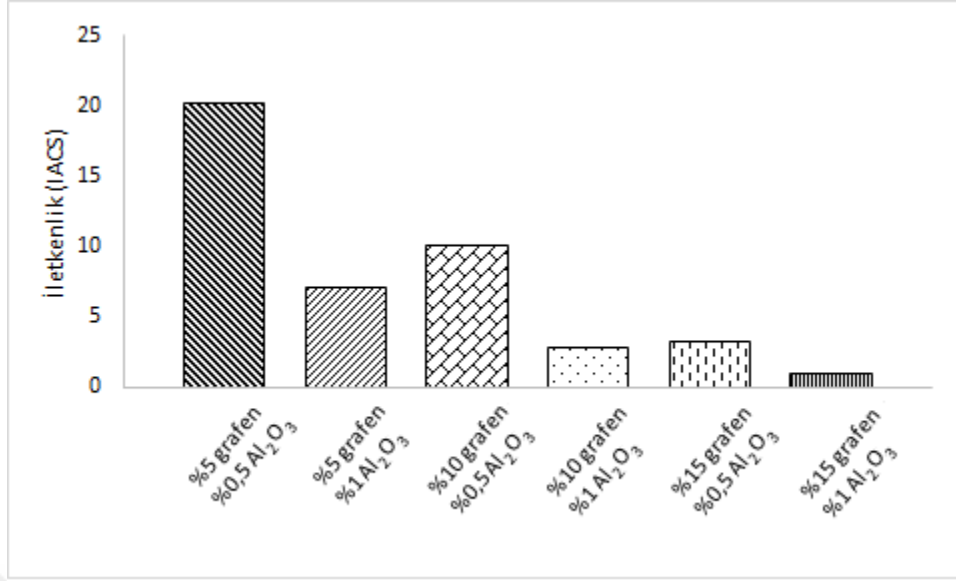
Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliğine ait grafik Şekil 45'de verilmiştir.



Şekil 45. Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği

Grafikte görüldüğü üzere %5 h-BN takviyeli bakır fırçada elektriksel iletkenlik değeri yaklaşık 12 IACS olarak ölçülmüştür. %10 ve %20 h-BN katkılı fırçalarda ise elektriksel iletkenlikleri çok düşük olduğundan kullanılan cihaz ile IACS standardına göre ölçüm alınamamıştır. Ölçüm alınamayan bu numuneler için grafik üzerinde iletkenlik değerleri 0 (sıfır) olarak gösterilmiştir. %5 h-BN katkılı numune ile %5 grafen katkılı numune karşılaştırıldığında grafen katkılı numune yaklaşık 4 kat daha yüksek elektriksel iletkenlik göstermiştir.

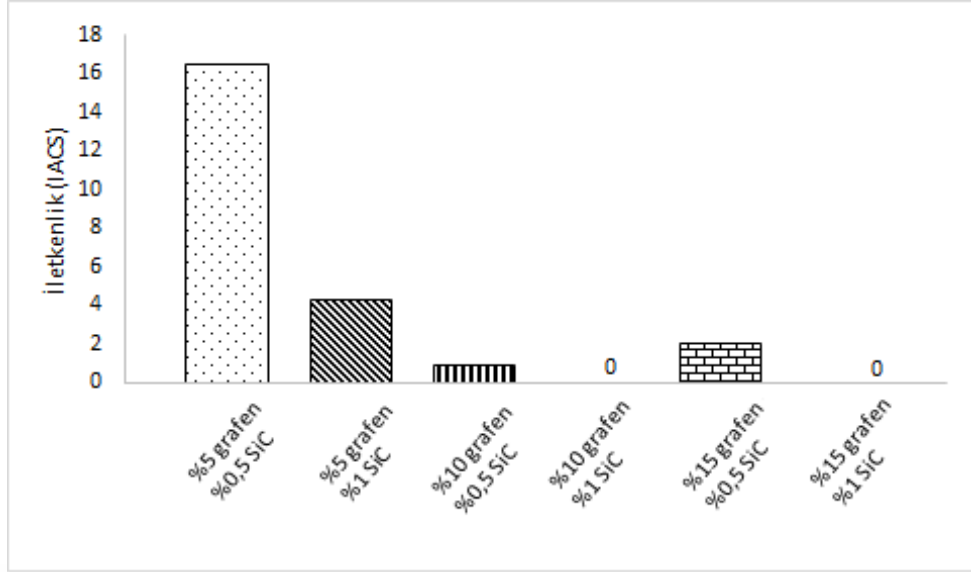
Şekil 46'da grafen ve alümina katkılı numunelere ait elektriksel iletkenlik değerleri görülmektedir.



Şekil 46. Grafen ve Alümina katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği

Grafiğe göre; grafen ve alümina takviyelerinin aynı anda ilave edildiği fırça numunelerinde en yüksek elektriksel iletkenlik değeri, en az katkı oranı içeren %5 grafen-%0.5 Al₂O₃ numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Ancak burada Al₂O₃ katkısının etkisi Şekil 44 ile kıyaslandığında açıkça görülmektedir. Şöyle ki, çok az miktarlar da bile olsa, Al₂O₃ katkısının elektriksel iletkenliği yaklaşık yarı yarıya düşürdüğü tespit edilmiştir.

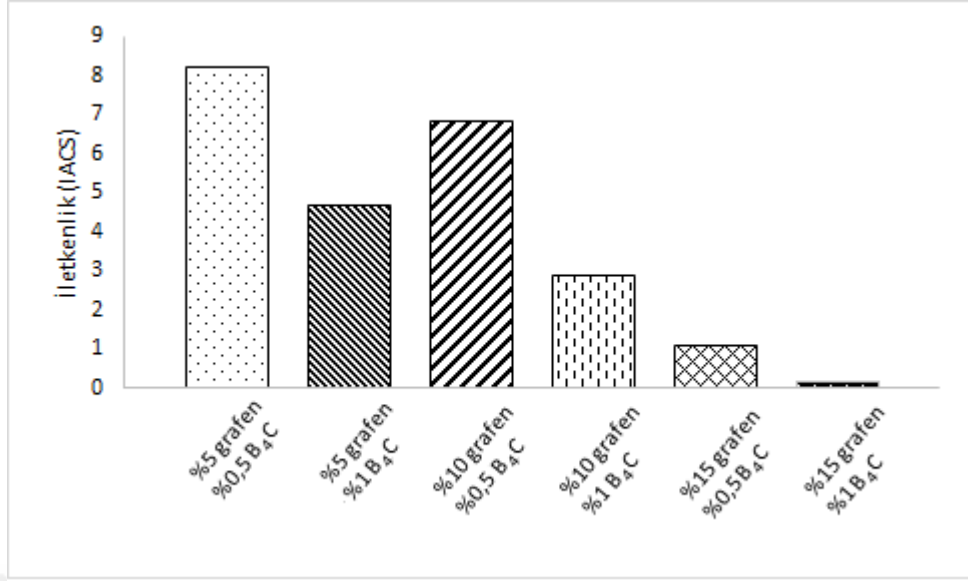
Grafen katkılı fırçaların elektrik iletkenliğine silisyum karbürün (SiC) etkisi Şekil 47'de verilmektedir.



Şekil 47. Grafen ve Silisyum Karbür katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği

Şekilde görüleceği üzere SiC ilavesi ile numunelerin elektriksel iletkenliğinin oldukça fazla düştüğü tespit edilmiştir. %5 grafen katkısında 46 IACS olarak ölçülen elektriksel iletkenlik değerinin %0.5 SiC ilavesi ile yaklaşık 3 kat, %1 SiC ilavesi ile de yaklaşık 10 kat azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca %10 grafen - %1 SiC ve %15 grafen - %1 SiC ilaveli bakır matrisli fırçalarda elektriksel iletkenlik değerinin IACS biriminde ölçüm aralığı dışında kaldığı tespit edilmiş olup grafik üzerinde bu numunelere ait değerler 0 (sıfır) olarak etiketlenmiştir.

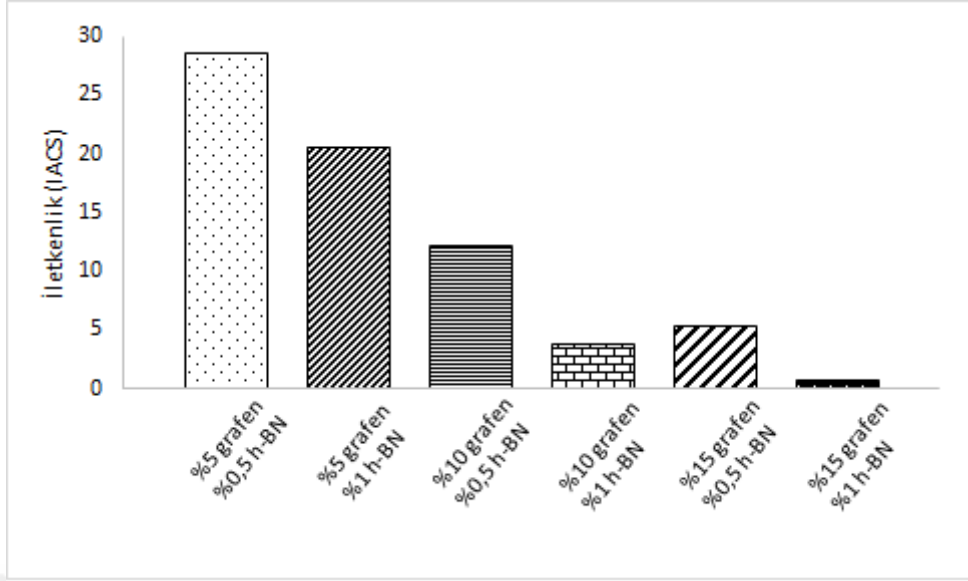
Şekil 48 grafen takviyesine ek olarak bor karbür B₄C ilavesi ile üretilen numunelere ait elektriksel iletkenlik değerlerini göstermektedir.



Şekil 48. Grafen ve Bor Karbür katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği

Grafik incelendiğinde B₄C ilavesinin elektrik iletkenliği düşürdüğü görülmüştür. %0.5 B₄C ilavesi yapılan numunelerin %1 B₄C ilavesi yapılan numunelere göre daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 49'da metal matrisli bakır fırçalarda değişen oranlarda grafen katkısına ek olarak hegzagonal bor nitür (h-BN) parçacık katkısının elektrik iletkenliğine etkisi görülmektedir.



Şekil 49. Grafen ve Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların elektriksel iletkenliği

Grafen katkısına ek olarak bünyeye katılan ilave katkıların tamamı göz önüne alındığında h-BN katkılı numunelerin elektriksel iletkenliklerinin nispeten yüksek olduğu görülmektedir.

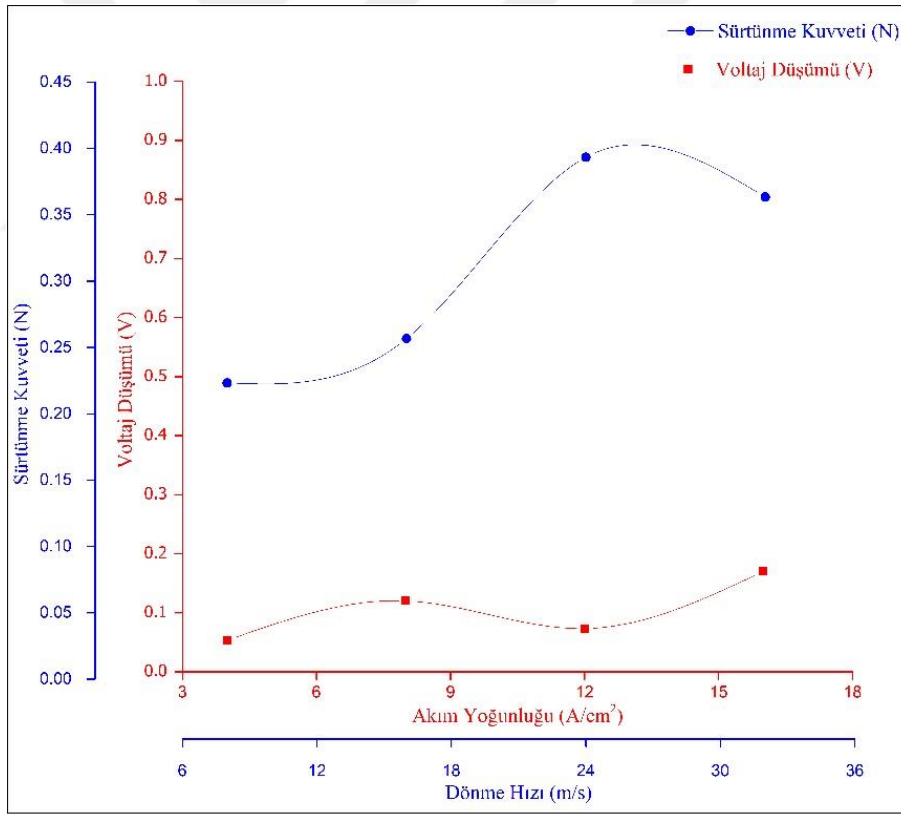
3.2. Elektro-Mekanik Aşınma Deneyleri

Elektro-mekanik aşınma deneyleri uygulanırken Tablo 6'da verilen parametreler kullanılmış olup her bir deney 100 kPa yay basıncı altında, değişen akım yoğunlukları ve dönme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma performansları, sürtünme kuvvetinin dönme hızına göre ve voltaj düşümünün akım yoğunluğuna göre gösterdikleri değişim grafiklerinin birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Ayrıca elektro-mekanik aşınma performansları gerçekleştirilen bu numunelerin her biri için optimum çalışma şartları belirlenmiştir. Ancak unutulmamalıdır ki, belirtilen optimum çalışma koşulları elektrik motorunun çalışacağı ortama ve beklenen performans kriterine göre değişiklik gösterebilir. Örneğin yüksek torklu bir elektrik motoru daha fazla akım çekeceğinden fırçalardan geçen akım yoğunluğu da yüksek olacaktır. Bu tip bir elektrik motorunda kullanılacak olan fırçada akım yoğunluğundan ziyade sadece sürtünme kuvveti değerlerinin uygun olması yeterli olabilir.

Sürtünme kuvveti eksenini malzemenin dönme yüzeyinde kaymaya karşı gösterdiği direnci, voltaj düşümü ise iletilen voltaj değerindeki kayıpları gösterir. Dolayısıyla, bu çalışmada belirtilen optimum çalışma koşulları ideal bir DC elektrik motoru dikkate alınarak, minimum kayıpların görüldüğü noktalar veya aralıklar olarak belirlenmiştir.

Cu (MA'lı) ve Cu (MA'sız) kodlu numuneler bünyelerinde katı yağlayıcı takviyesi bulundurmadığından henüz rodaj aşamasında cihazın kolektörüne sıvama yapma eğilimine girmiş ve test düzeneğine zarar verecek şekilde titreşim üretmiştir. Bun sebepten ötürü elektro-mekanik aşınma deneyleri bu numuneler için gerçekleştirilememiştir.

Şekil 50'de %5 grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış grafiği verilmiştir.

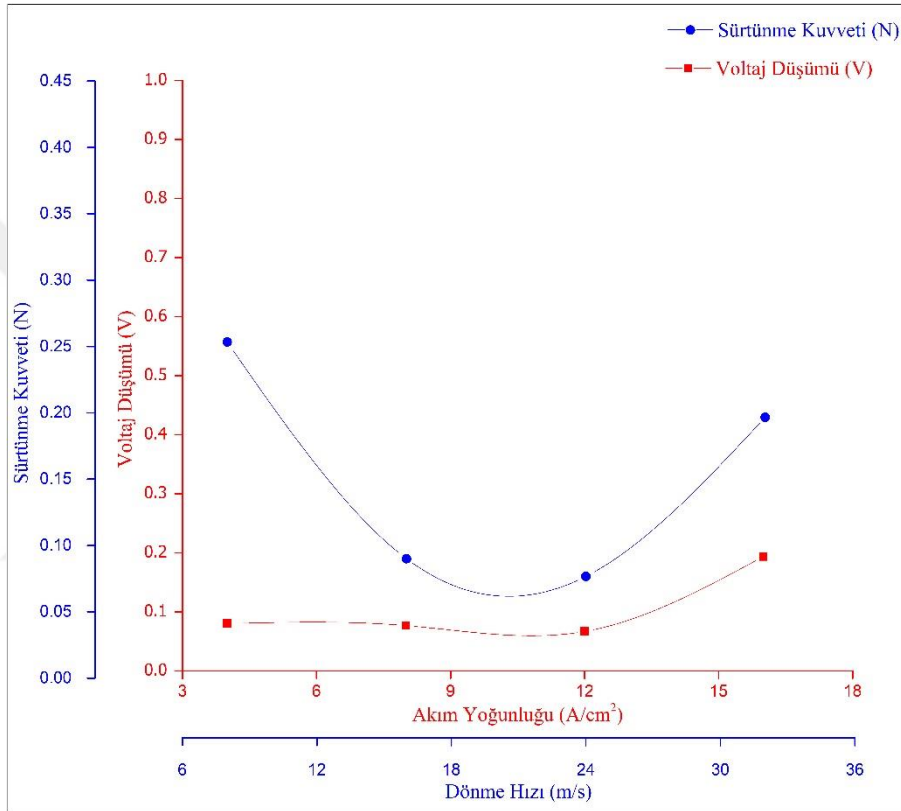


Şekil 50. %5 Grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

%5 grafen takviyeli bakır fırça numunesinde grafikten de görüleceği üzere başlangıçta dönme hızının artışı ile birlikte sürtünme kuvvetinin neredeyse aynı değerlerde ve nispeten düşük olduğu, ancak belirli bir değerden sonra (16 m/s) ani bir yükseliş

gösterdiği belirlenmiştir. Bunun yanında akım yoğunluğunun artmasıyla voltaj düşümünün düzensiz bir seyir izlediği görülmüştür. Bu numune için optimum çalışma şartları sürtünme kuvvetinin en düşük olduğu 8 m/s dönme hızı ile 4 A/cm²'lik akım yoğunluğu olarak tespit edilmiştir.

Şekil 51'de %10 grafen katkılı bakır fırçanın elektro-mekanik davranışı verilmiştir.

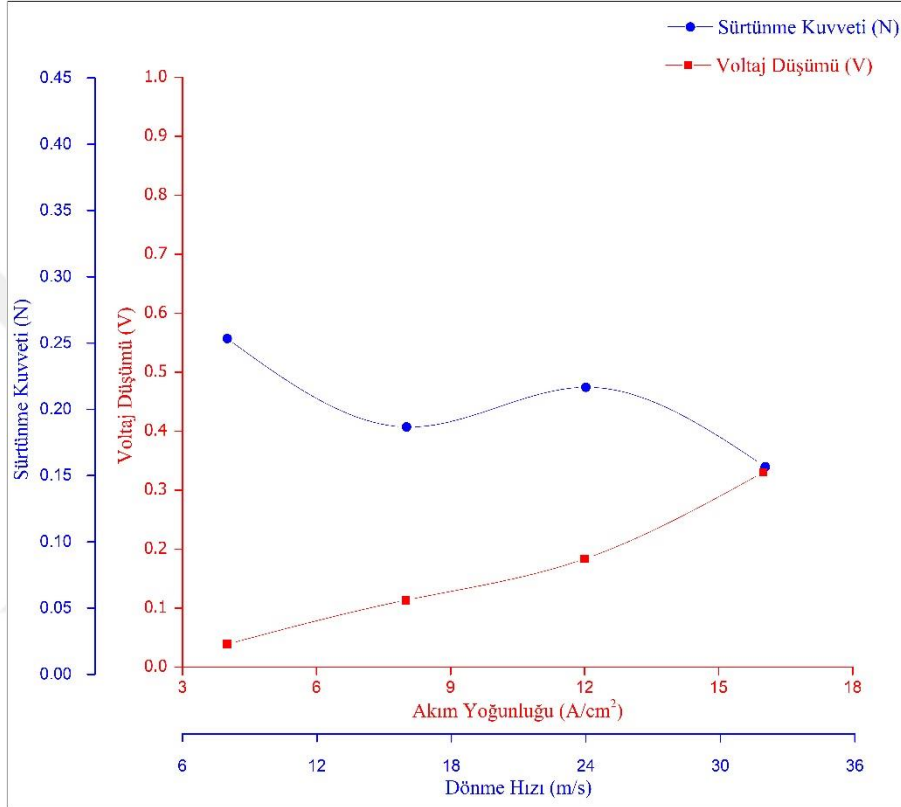


Şekil 51. %10 Grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafikten de görüleceği gibi, grafen oranının artması ile sürtünme kuvveti eğrisi ağırlıkça %5 grafen katkılı fırçaya göre nispeten düşük sürtünme oranları göstermiştir. Nitekim %5 grafen içeren fırçanın 32 m/s'deki sürtünme kuvveti 0.36 N iken, aynı dönme hızında bu değer %10 grafen içeren fırçada 0.2 N olarak gerçekleşmektedir. Ancak akım yoğunluğunun artması ile voltaj düşümünün arttığı görülmektedir. 8-12 A/cm² akım yoğunluklarına karşılık gelen 16-24 m/s çalışma hızları sürtünme kuvveti açısından da minimum noktaları göstermektedir. Bu sebepten dolayı belirtilen noktalar arasındaki

değerler %10 grafen katkılı bakır fırça numuneleri için ideal çalışma koşulları olarak belirlenmiştir.

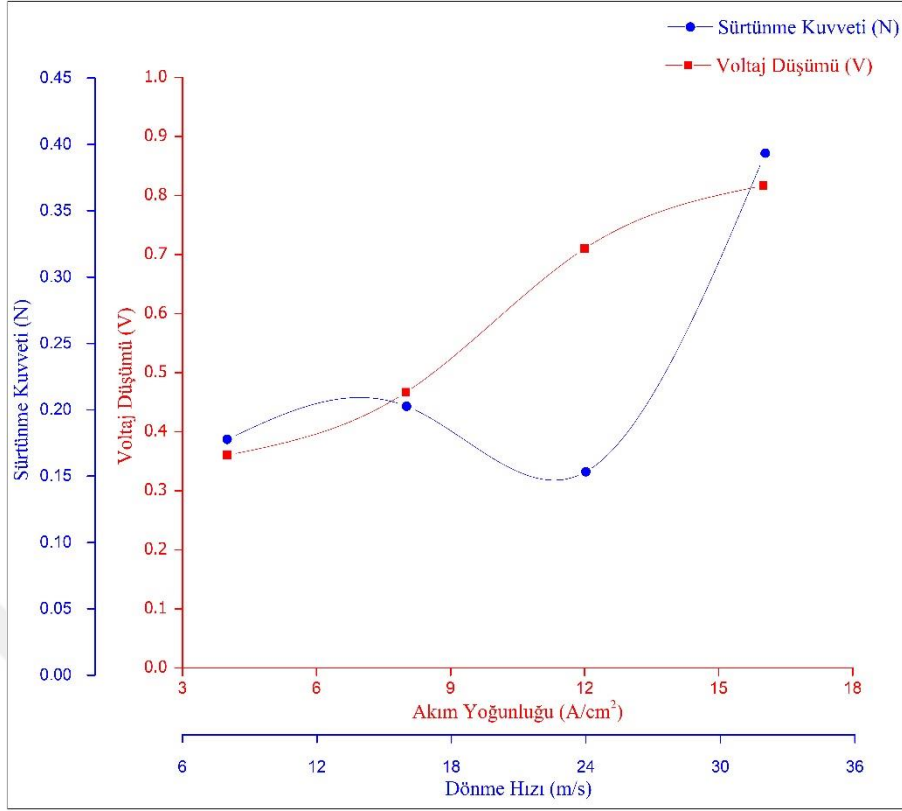
Şekil 52’de ağırlıkça %15 grafen içeren bakır fırçaya ait performans değerlerinden oluşan elektro-mekanik aşınma grafiği verilmiştir.



Şekil 52. %15 Grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafik incelendiğinde voltaj düşümü açısından minimum değer 4 A/cm² akım yoğunluğunda gerçekleşirken, sürtünme kuvvetinin minimum değere 32 m/s dönme hızında ulaşılmıştır. Bu fırça numunesi için optimum çalışma değeri olarak 8 A/cm² akım yoğunluğu ve 16 m/s’lik çalışma hızı belirlenmiştir.

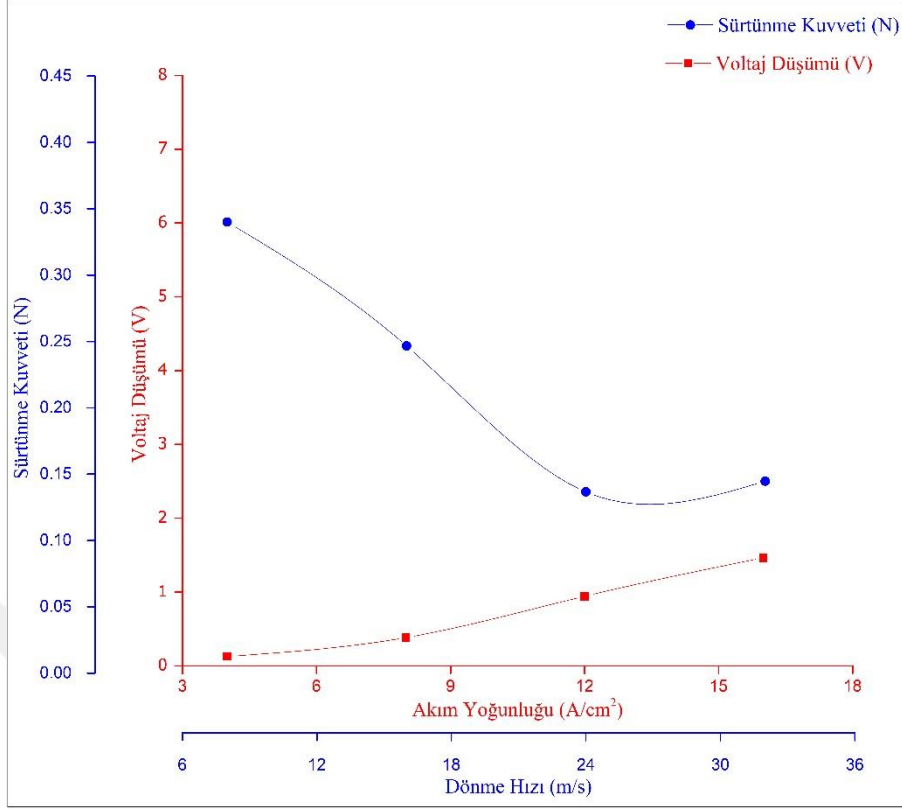
Şekil 53’te grafen katkısı ağırlıkça %30 olan bakır fırçanın elektro – mekanik aşınma performansı incelenmiştir.



Şekil 53. %30 Grafen katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Ağırlıkça %30 grafen katkılı bakır fırça numunesinin performans grafiği incelendiğinde, 24 m/s 'lik dönme hızına kadar nispeten düşük sürtünme kuvveti değerleri gözlenirken, 32m/s'lik sürtünme hızına ulaşıldığında hızlı bir yükseliş sergileyerek 0.39 N mertebelerine ulaşan sürtünme kuvveti değeri tespit edilmiştir. Ayrıca akım yoğunluğunun artması ile de voltaj düşümünün giderek arttığı tespit edilmiştir. Bu fırça için optimum çalışma değerleri 8 m/s hız ve 4 A/cm² akım yoğunluğunun olduğu nokta belirlenmiştir.

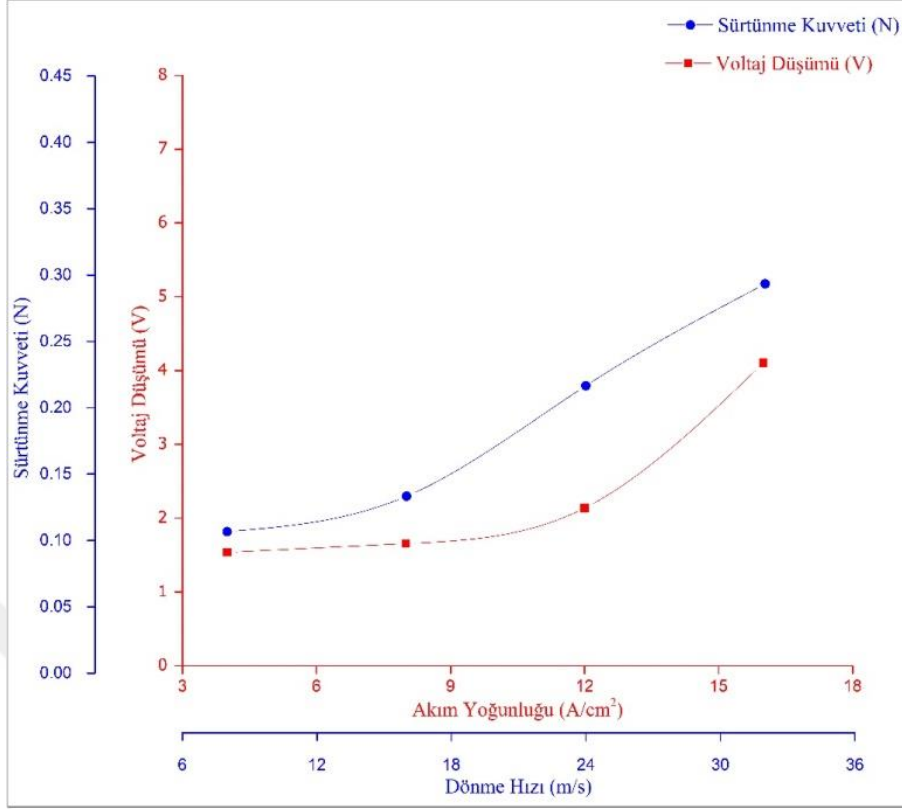
Şekil 54 ila 57 arasında değişik oranlarda h-BN ilavesi yapılan bakır fırçaların performansları verilmektedir. Şekil 54'te ağırlıkça %5 h-BN takviyesi içeren bakır fırça numunesine ait elektro-mekanik aşınma performansı grafiği verilmiştir.



Şekil 54. %5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Ağırlıkça %5 h-BN katkılı numuneye ait grafik incelendiğinde artan dönme hızı ile sürtünme kuvvetinin 24 m/s'lik dönme hızına kadar düştüğü daha sonra ise çok fazla değişmediği görülmüştür. Ayrıca akım yoğunluğunun artmasıyla voltaj kaybının sürekli arttığı görülmektedir. Bu fırça bileşimi için uygun çalışma parametrelerinin 10-12 A/cm² ve 20-24 m/s'lik dönme hızı olduğu görülmektedir.

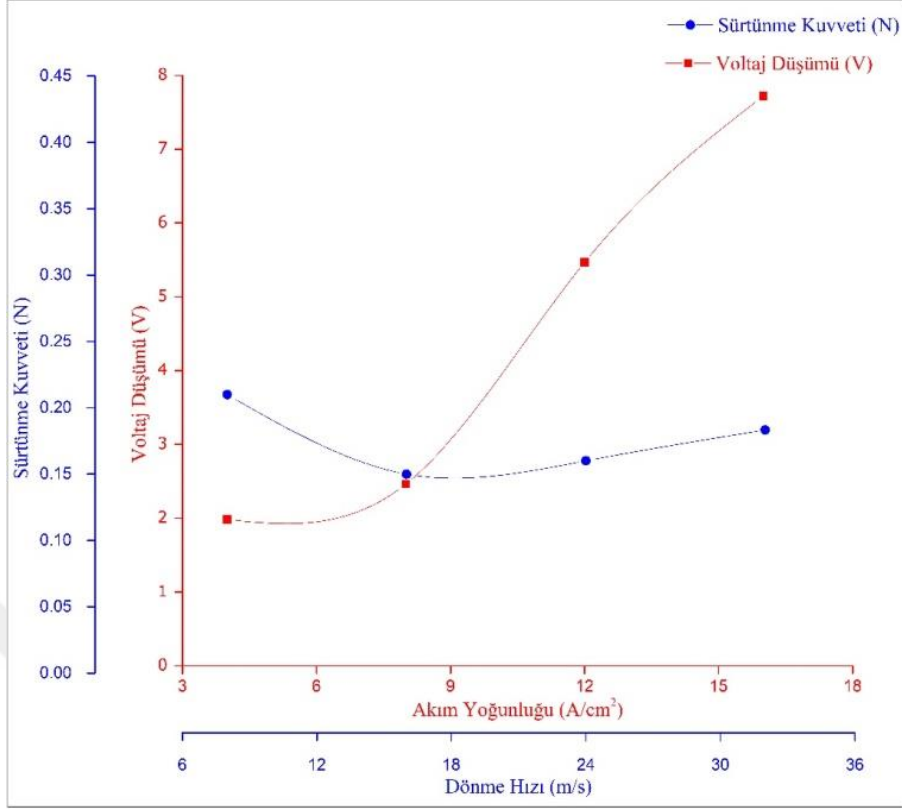
Şekil 55'de ağırlıkça %10 h-BN içeren fırça numunesine ait elektro-mekanik performans grafiği verilmiştir.



Şekil 55. %10 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Ağırlıkça % 10 h-BN takviyeli fırça numunesi grafiği incelendiğinde artan dönme hızı ve akım yoğunluğuyla birlikte hem voltaj kaybının hem de sürtünme kuvvetini arttığı görülmektedir. Bu fırça numunesi için, 8 ve 16 m/s dönme hızına karşı 4 ve 8 A/cm²'lik akım yoğunluğu değerleri ideal çalışma koşulları olarak belirlenmiştir.

Şekil 56'da ağırlıkça %20 h-BN takviyesi içeren bakır fırça numunesine ait elektro-mekanik aşınma deneyine ait performans grafiği verilmiştir.

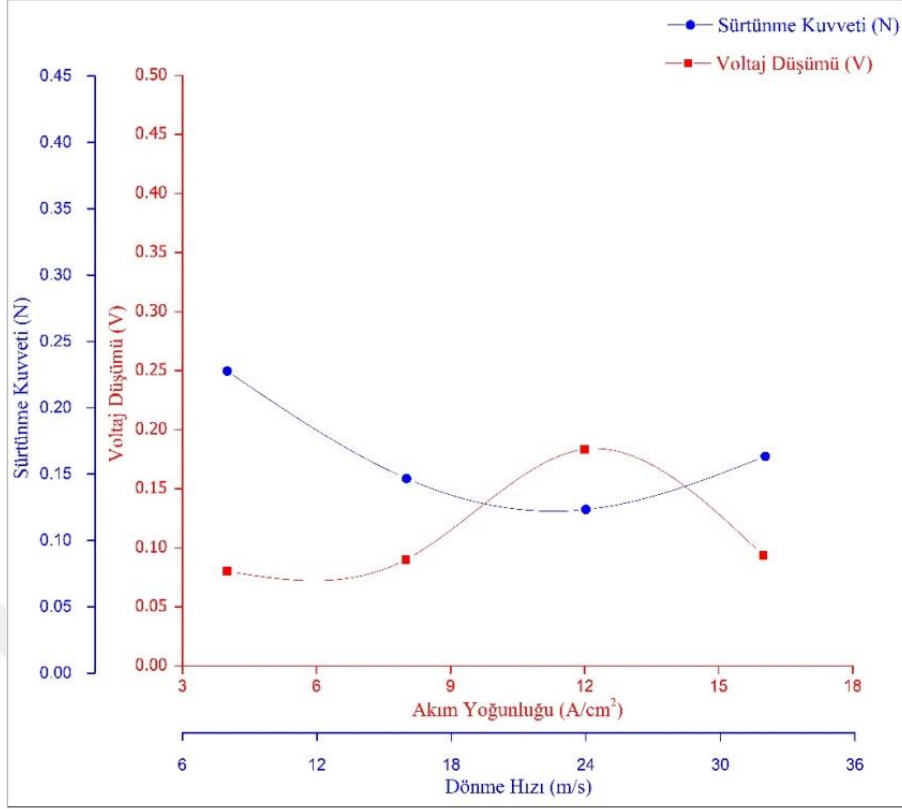


Şekil 56. %20 h-BN bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Ağırlıkça % 20 h-BN içeren performans grafiği (Şekil 56) incelendiğinde, göze çarpan en önemli nokta artan akım yoğunluğu ile artan voltaj düşümüdür ki bu eğrinin başlangıç değeri bile oldukça yüksektir. Tablo 7’de verilen elektrik iletkenliği değerleri göz önüne alındığında voltaj düşümünün artması beklenen bir sonuçtur. Ancak yine de h-BN takviyesi fırça malzemelerinde, sürtünme kuvveti değerlerini 0.25 N değerinin altında tutmuş ve sürtünme kuvveti açısından nispeten karalı bir davranış sergilemiştir. Bu numune için 16 m/s’lik dönme hızı ve 8 A/cm²’lik akım yoğunluğu değeri ideal çalışma parametreleri olarak saptanmıştır.

Şekil 57-62 arasında ağırlıkça %5, %10, %15 grafen katkılarına ilave olarak ağırlıkça %0.5 ve % 1 Al₂O₃ katkısı eklenen bakır fırçalara ait elektro-mekanik davranış grafikleri verilmiştir.

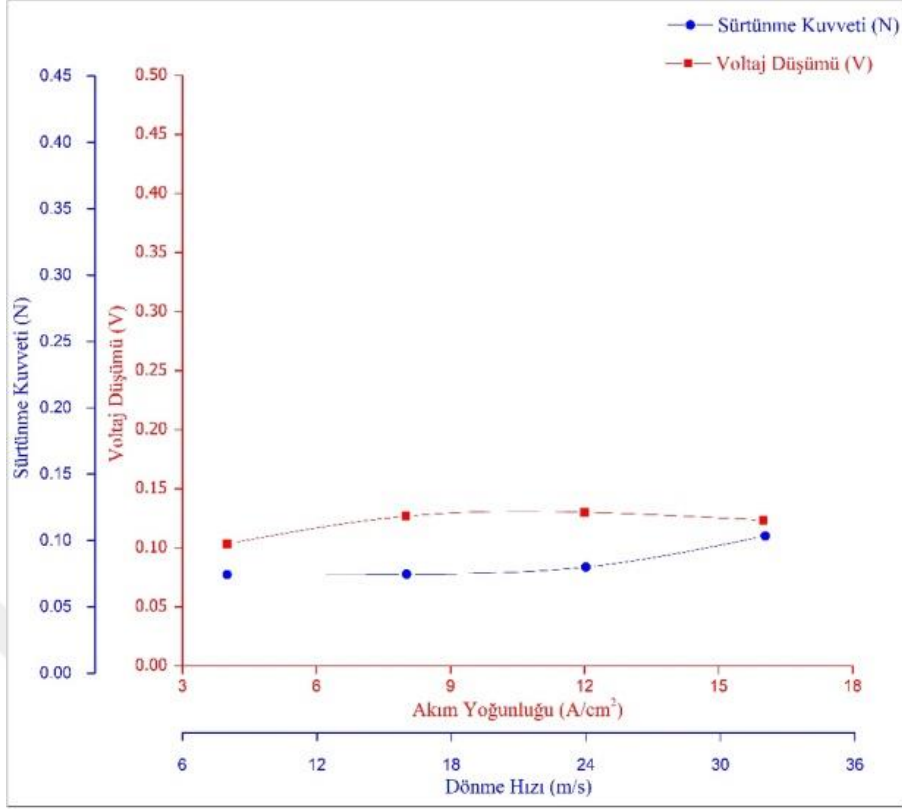
Şekil 57’de ağırlıkça %5 grafen katkısına ek olarak %0.5 Al₂O₃ katkısının dönme hızı – sürtünme kuvveti ve akım yoğunluğu – voltaj düşümü eğrilerini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 57. %5 Grafen ve %0.5 Al₂O₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafik incelendiğinde, akım yoğunluğu ile voltaj düşümü arasındaki ilişkiyi gösteren eğri 12 A/cm² akım yoğunluğu değeri dışında genel olarak düşük bir voltaj kaybı göstermiştir. Verilen grafik Şekil 50 (%5 grafen katkılı bakır fırça) ile karşılaştırıldığında ağırlıkça %5 grafen katkısına ilave alümina katkısının sürtünme kuvvetini bir miktar düşürdüğü görülmüştür. Bu numune için 16 m/s'lik dönme hızına karşılık gelen 8 A/cm²'lik akım yoğunluğu değeri ideal çalışma parametreleri olarak belirlenmiştir.

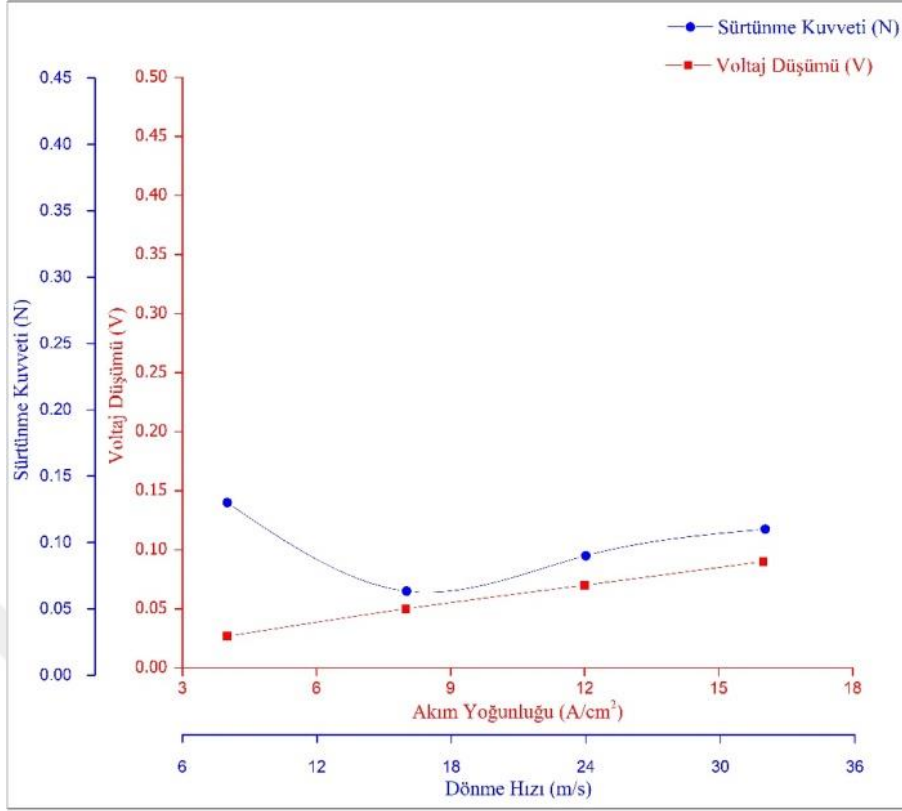
Şekil 58'de ağırlıkça %5 grafene ek %1 Al₂O₃ katkısının elektro-mekanik aşınma performansını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 58. %5 Grafen ve %1 Al₂O₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafiğe göre, artan akım yoğunluğu ve dönme hızına karşılık voltaj düşümünün ve sürtünme kuvveti değerlerinin hemen hemen aynı kaldığı gözlenmiştir. Bu numune için, belirtilen tüm dönme hızı ve akım yoğunluğu değerlerinin kullanılabilir parametreler olduğu tespit edilmiştir.

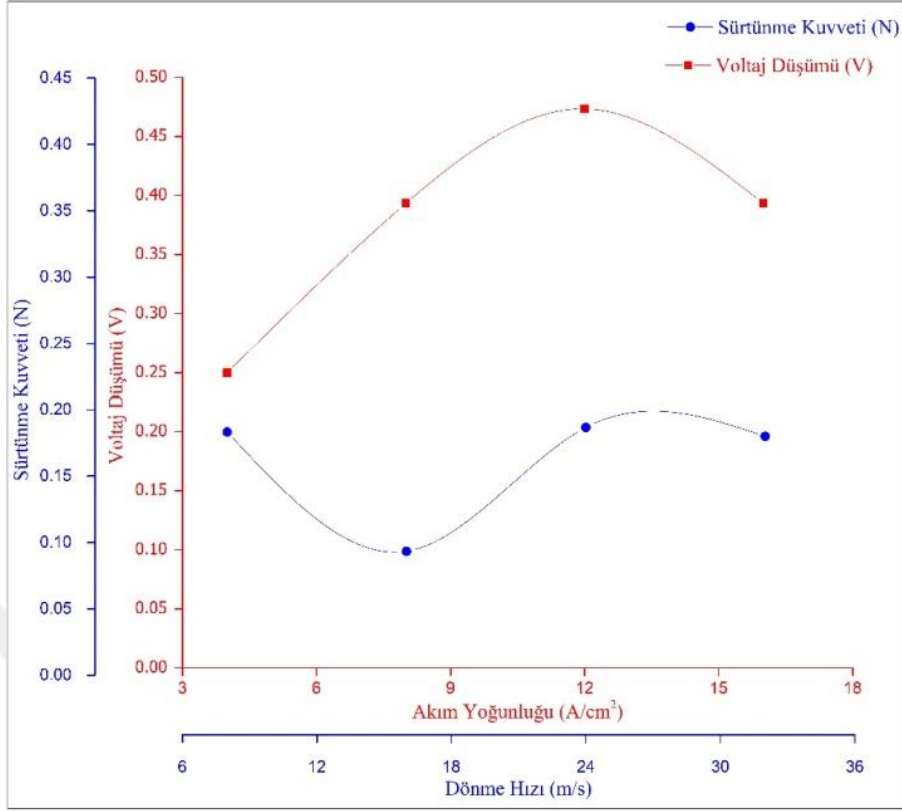
Şekil 59'da, ağırlıkça %10 grafen katkısına ilave olarak %0.5 alümina içeren bakır fırçaya ait performans grafiği verilmiştir.



Şekil 59. %10 Grafen ve %0.5 Al₂O₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafik incelendiğinde grafenin sürtünme kuvveti üzerine etkisi, Şekil 57’de verilen numune mertebelerinde kalmasına rağmen voltaj düşümünün daha istikrarlı ve nispeten düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Bu numune için 16 m/s’lik dönme hızına karşılık gelen 8 A/cm²’lik akım yoğunluğu değeri optimum çalışma değeri olarak belirlenmiştir.

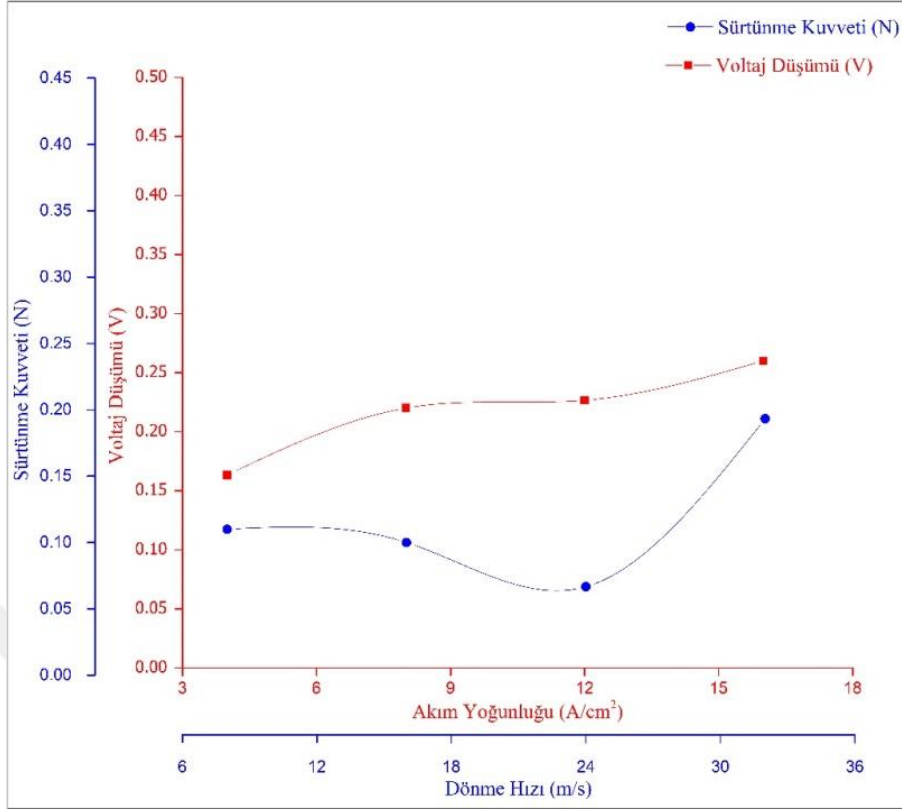
Ağırlıkça %10 grafene ek olarak bünyeye katılan %1’lik alüminanın numune üzerindeki sürtünme ve voltaj düşümü eğrileri Şekil 60’da verilmiştir.



Şekil 60. %10 Grafen ve %1 Al₂O₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Ağırlıkça %10 grafen ve %1 Al₂O₃ takviyesi içeren bu numunede kuvveti kararsız bir davranış sergilerken voltaj düşümü de, ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 alümina katkılı numuneye göre daha yüksek voltaj düşümü değerleri göstermiştir. Bu numune için 8 m/s'lik dönme hızına karşılık gelen 4 A/cm²'lik akım yoğunluğu en uygun çalışma değeri olarak belirlenmiştir.

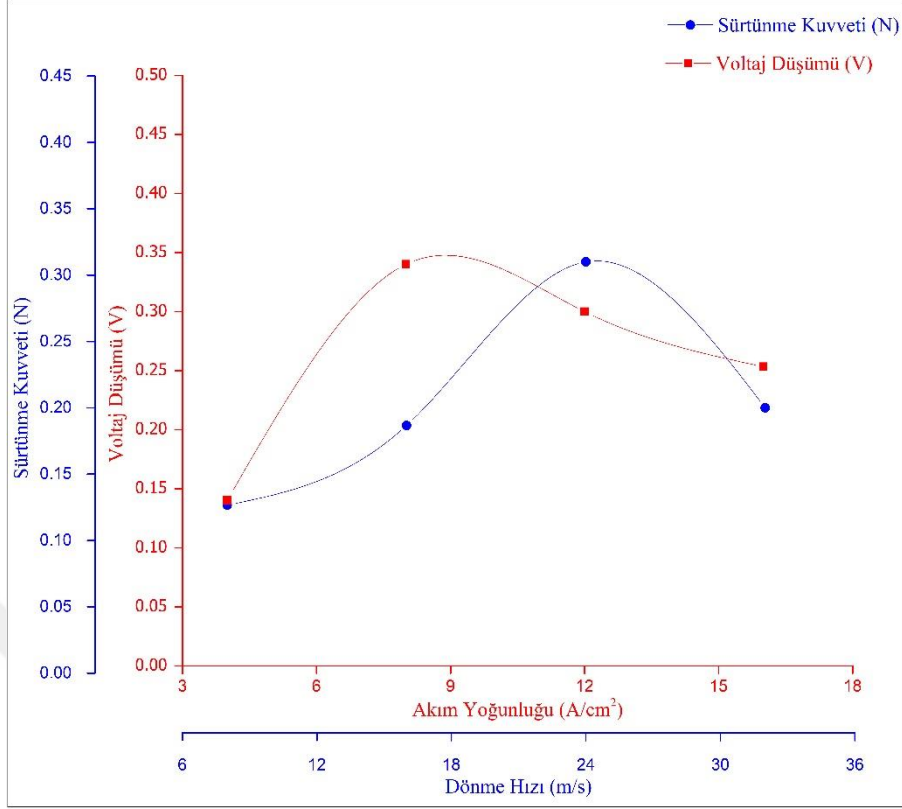
Şekil 61'de ağırlıkça %15 grafen ve %0.5 Al₂O₃ katkılı fırça malzemesine ait elektro-mekanik deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 61. %15 Grafen ve %0.5 Al₂O₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafiğe göre, grafenin sürtünme kuvvetini azaltma yönünde çalıştığı aşikârdır. Ancak 24 m/s'lik çalışma hızı geçildiğinde grafenin katı yağlayıcılık özelliği alüminanın ve akım yoğunluğunun etkisiyle zayıflamış ve sürtünme kuvveti yaklaşık 2 kat artmıştır. Buna karşın voltaj kaybı giderek artan bir eğilim sergilemiştir. Bu numune için, 32 m/s'lik çalışma hızı ve 16 A/cm²'lik akım yoğunluğu dışındaki çalışma koşullarının nispeten uygun çalışma koşulları olduğu görülmüştür.

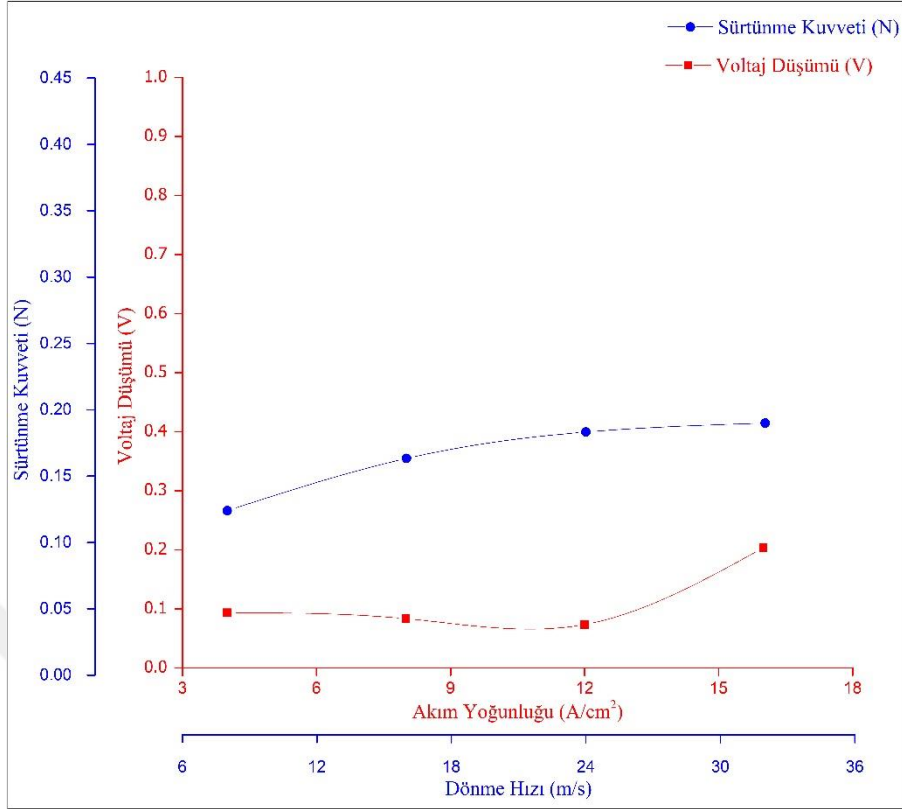
Şekil 62'de ise ağırlıkça %15 grafen katkısına ilave %1'lik alümina ilavesi yapılmış olan bakır fırça numunesine ait performans grafiği verilmiştir.



Şekil 62. %15 Grafen ve %1 Al₂O₃ katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafen katkısının hacimce yaklaşık % 40'a tekabül ettiği bu numunede, hem voltaj düşümü hem de sürtüne kuvveti değerlerini genel olarak kararsız bir seyir izlediği görülmektedir. 8 A/cm² akım yoğunluğu değerinde maksimum voltaj düşümü sergileyen bu numunede, en yüksek sürtünme kuvveti değeri de 24 m/s'lik dönme hızında yaklaşık 0.3 N olarak gerçekleşmiştir. İdeal çalışma parametreleri olarak 8 m/s'lik dönme hızına karşılık gelen 4 A/cm²'lik akım yoğunluğu belirlenmiştir.

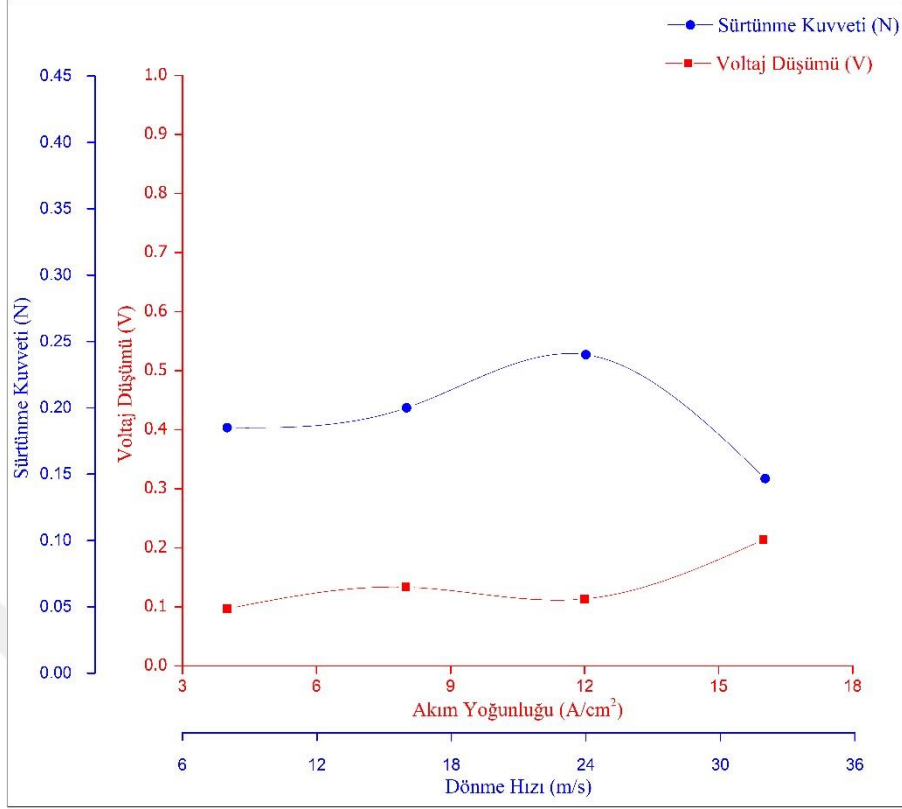
Şekil 63 – 68 arasında farklı oranlarda grafen ve silisyum karbür katkısı yapılan fırça numunelerine ait elektro-mekanik aşınma performanslarını gösteren grafikler verilmiştir. bu grafiklerden ilki ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 SiC içeren fırça numunesine ait elektro-mekanik performans grafiği olup Şekil 63'te verilmiştir.



Şekil 63. %5 Grafen ve %0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Verilen bileşim incelendiğinde artan dönme hızına karşılık sürtünme kuvvetinin az miktarda da olsa giderek arttığı, voltaj düşümünün ise 16 A/cm²'lik akım yoğunluğu değerine kadar neredeyse sabit kaldığı görülmüştür. Bu fırça numunesi için 16 A/cm² akım yoğunluğu ve 32 m/s'lik dönme hızı dışında kalan parametreler fırça numunesinin kullanımı için uygun parametreler olarak tespit edilmiştir.

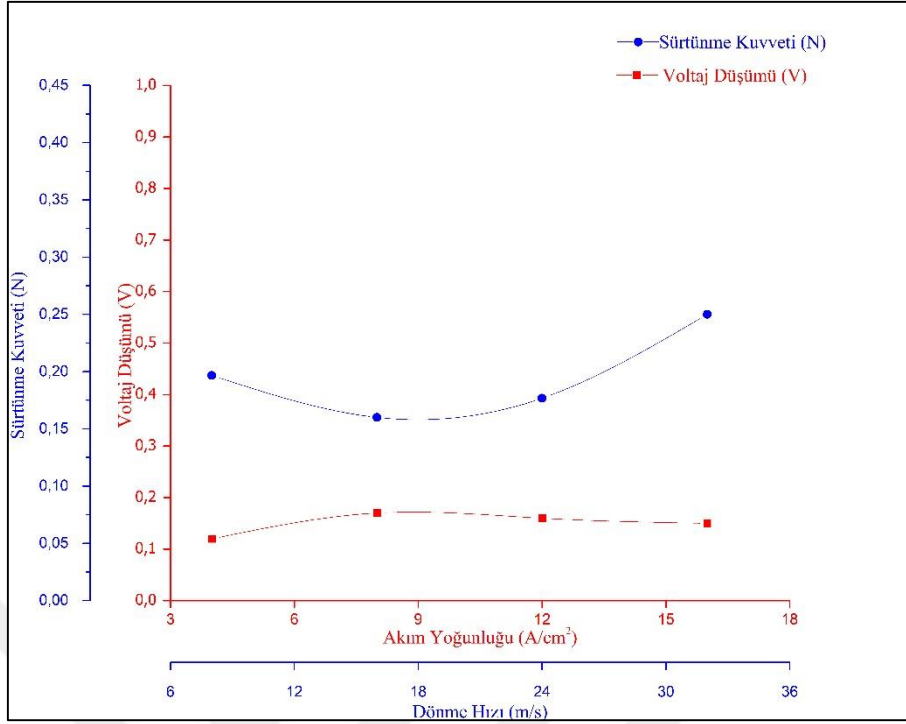
Şekil 64'te ağırlıkça %5 grafen ve %1 SiC içeren bakır fırçaya ait elektro-mekanik aşınma deneyi grafiği verilmiştir.



Şekil 64. %5 Grafen ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Bileşimi verilen bu numunede sürtünme kuvveti değerlerinin 32 m/s'lik dönme hızı değerine kadar nispeten yüksek olduğu ve bu değere ulaşıldığında da bir miktar düştüğü gözlenmiştir. Voltaj düşümü değerlerinin ise 16 A/cm² akım yoğunluğu değerine kadar neredeyse aynı kaldığı ancak bu değere ulaşıldığında bir miktar artış sergilediği tespit edilmiştir. Bu numune için optimum parametreler 4-8 A/cm² akım yoğunluğu ve 8-16 m/s'lik dönme hızı değerleri olarak tespit edilmiştir.

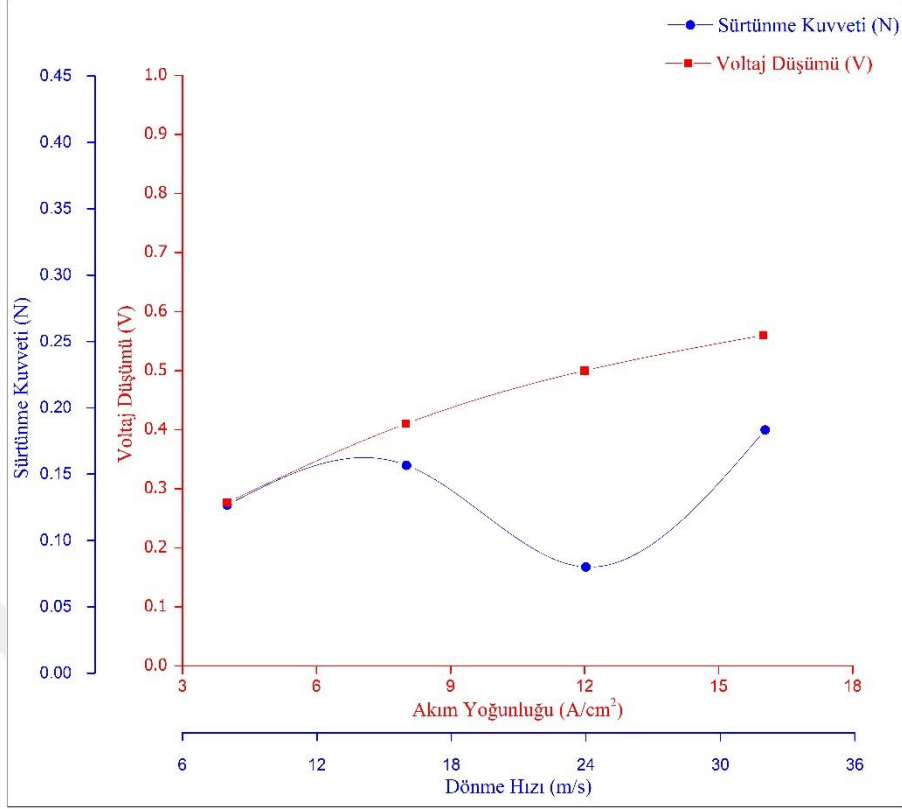
Şekil 65'te ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 SiC içeren numuneye ait elektro-mekanik performans grafiği verilmiştir.



Şekil 65. %10 Grafen- %0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Burada voltaj düşümü birbirine oldukça yakın değerler sergileyerek kararlı bir seyir izlediği tespit edilmiştir. Sürtünme kuvveti değerinin ise 16 m/s'lik dönme hızından itibaren artan dönme hızı ile sürtünme kuvvetinin arttığı gözlenmiştir. Bu numune için optimum çalışma parametrelerinin 16 m/s'lik çalışma hızı ve 8 A/cm²'lik akım yoğunluğu olduğu saptanmıştır.

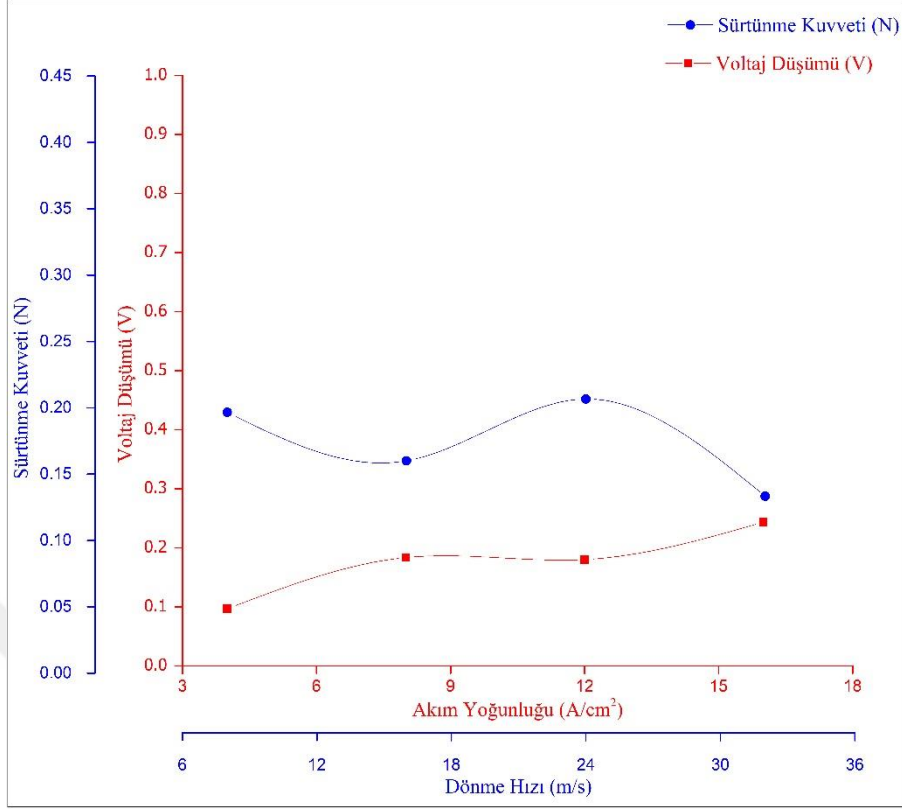
Şekil 66'da verilen grafik ağırlıkça %10 grafen ve %1 SiC içeren numunede gerçekleştirilen deneyler sonrasında elde edilen grafiklerdir.



Şekil 66. %10 Grafen ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Burada SiC ilavesinin sürtünme kuvveti ve volta kaybını arttırdığı görülmektedir. Sürtünme kuvveti nispeten kararsız bir davranış sergilese de voltaj düşümü artan akım yoğunluğu ile artmıştır. Bu fırça için optimum çalışma parametresi olarak 4 A/cm² akım yoğunluğunda ve 8 m/s'lik dönme hızlarının belirlenmiştir.

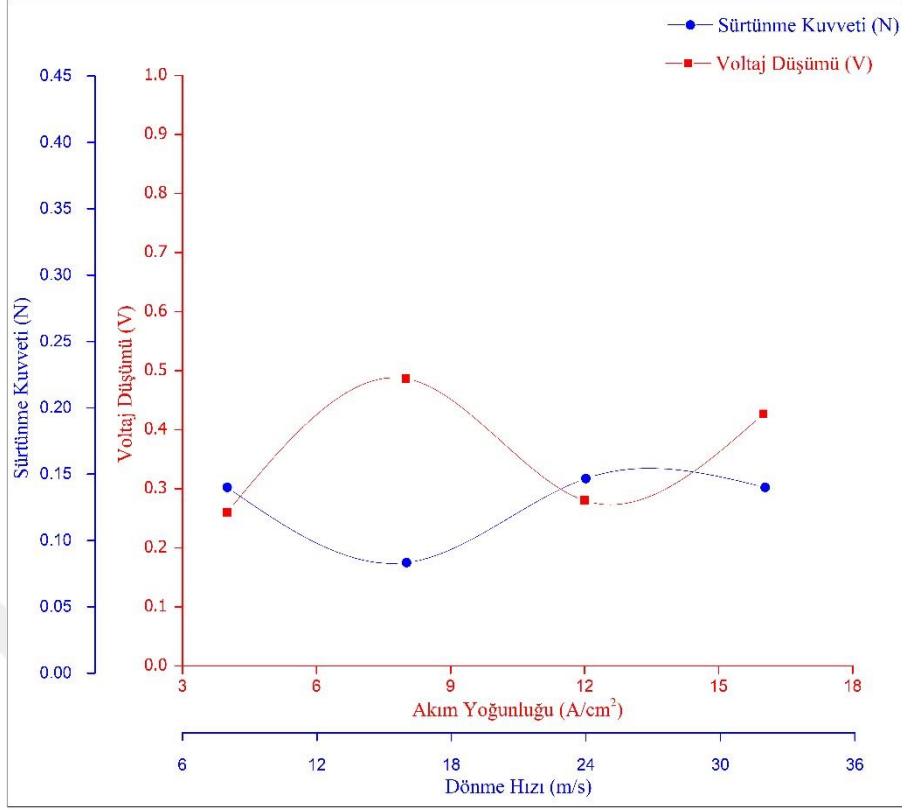
Şekil 67'de ağırlıkça %15 grafen ve %0.5 silisyum karbür içeren numuneye ait elektro-mekanik aşınma deneyine ait grafik verilmiştir.



Şekil 67. %15 Grafen -%0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafik incelendiğinde, grafik formunun Şekil 64'te verilen ağırlıkça %5 grafen - %1 SiC içeren numuneye ait grafik formu ile oldukça benzer olduğu görülmektedir. Voltaj düşümü değerinin artan akım yoğunluğu ile bir miktar arttığı ve sürtünme kuvvetini ise genel olarak istikrarsız bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Bu grafik için 8 A/cm²'li akım yoğunluğu ve 16 m/s'lik dönme hızı değerinin optimum çalışma değeri olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 68'de verilen grafikte ağırlıkça %15 grafen ve %1 SiC katılan numuneye ait performans grafiği verilmiştir.

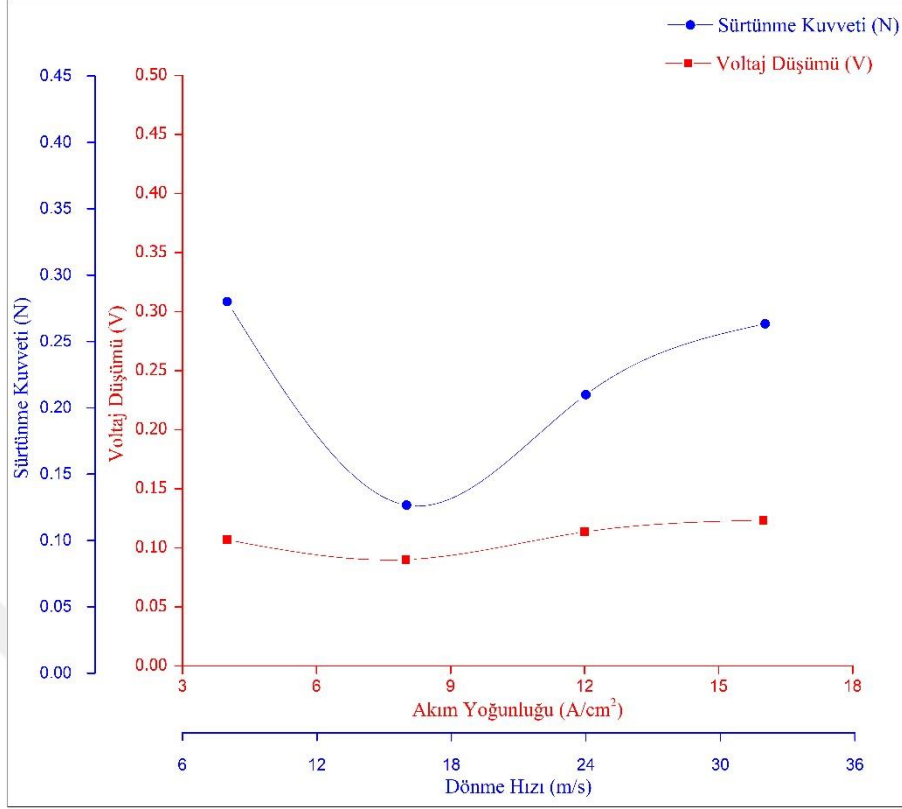


Şekil 68. %15 Grafen ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik Davranış

Grafik incelendiğinde artan akım yoğunluğuna karşılık voltaj düşümü değerinin düzensiz bir seyir izlediği belirlenmiştir. Sürtünme kuvvetinin ise 16 m/s'lik dönme hızı değeri dışında benzer değerler sergilediği tespit edilmiştir. Bu numune için en uygun çalışma şartlarının ise yaklaşık 5 ve 10 A/cm² akım yoğunluğunda, 10 ve 20 m/s'lik dönme hızlarının olduğu belirlenmiştir.

Şekil 69 – 74 arasında verilen grafikler, değişen oranlarda grafen içeren bakır fırçalara ağırlıkça %0.5 ve 1 oranlarında bor karbür ilavesi yapılan numunelere ait sürtünme kuvveti – dönme hızı ve voltaj düşümü – akım yoğunluğu ilişkilerini göstermektedir.

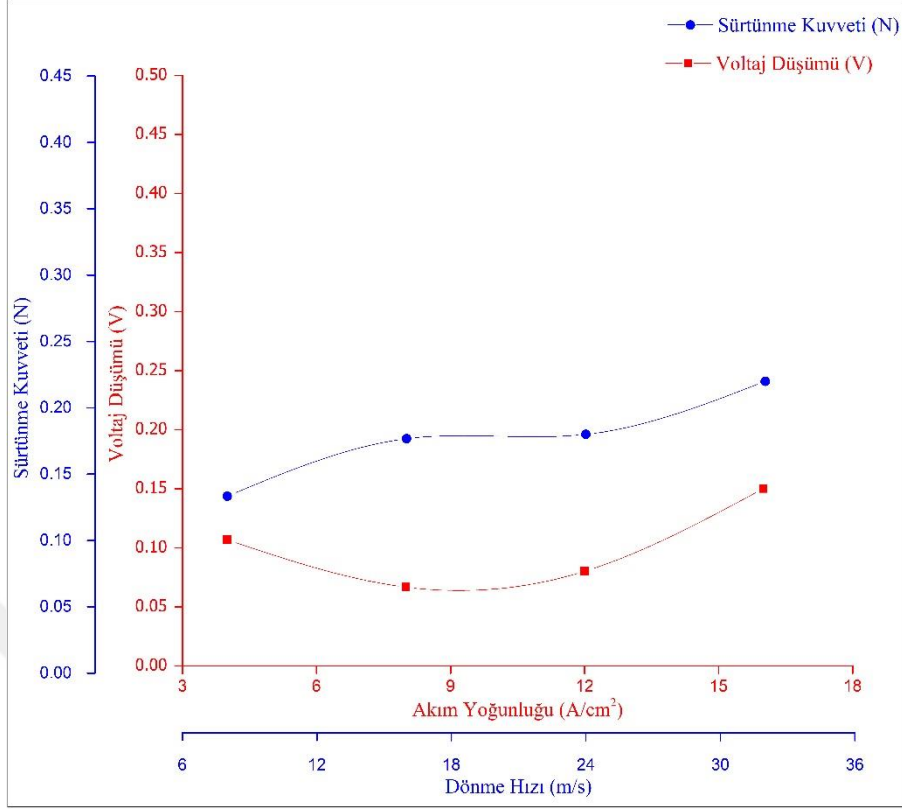
Şekil 69 ve 70 ağırlıkça %5 grafen takviyesine sırasıyla %0.5 ve %1 B₄C takviyesi katılmış bakır fırça numunelerine ait elektro – mekanik aşınma verilerini gösteren performans grafikleri verilmiştir.



Şekil 69. %5 Grafen - %0.5 B₄C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik Davranış

Şekil 69'da sürtünme kuvvetinin ve voltaj kaybının değerlerinin önce bir miktar azaldığı ve sonra bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Grafikte incelendiğinde olarak 8 A/cm² akım yoğunluğu ve 16 m/s'lik dönme hızının en uygun çalışma parametreleri olduğu tespit edilmiştir.

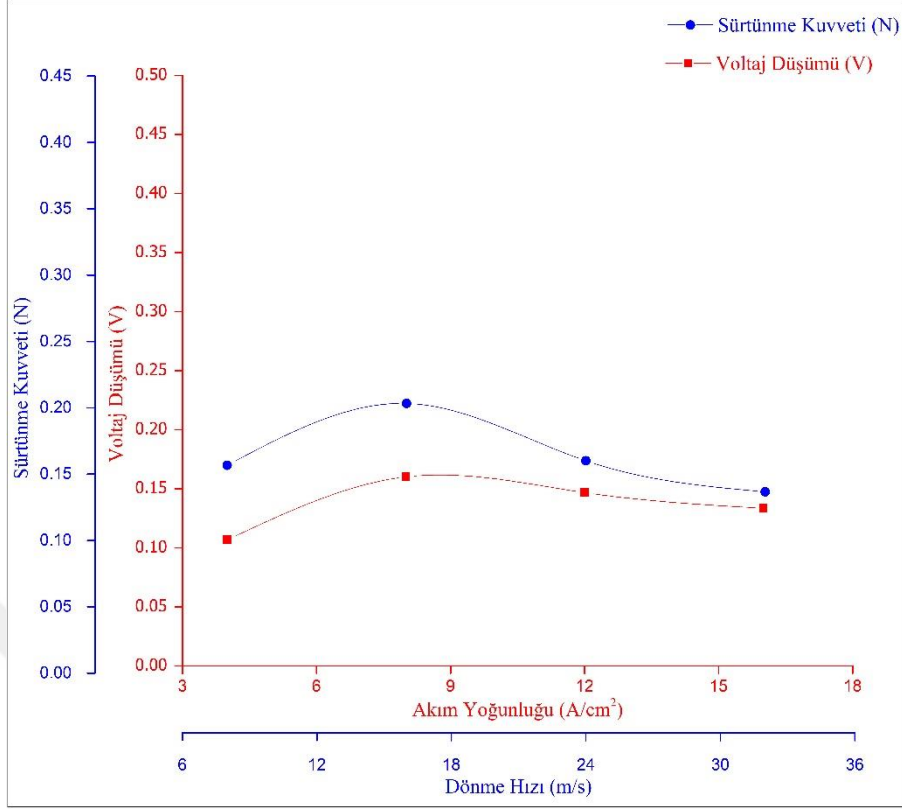
Şekil 70'de %5 grafen takviyesine ilaveten ağırlıkça %1'lik h-BN takviyesi içeren bakır fırçaya ait performans grafiği verilmiştir.



Şekil 70. %5 Grafen ve %1 B₄C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

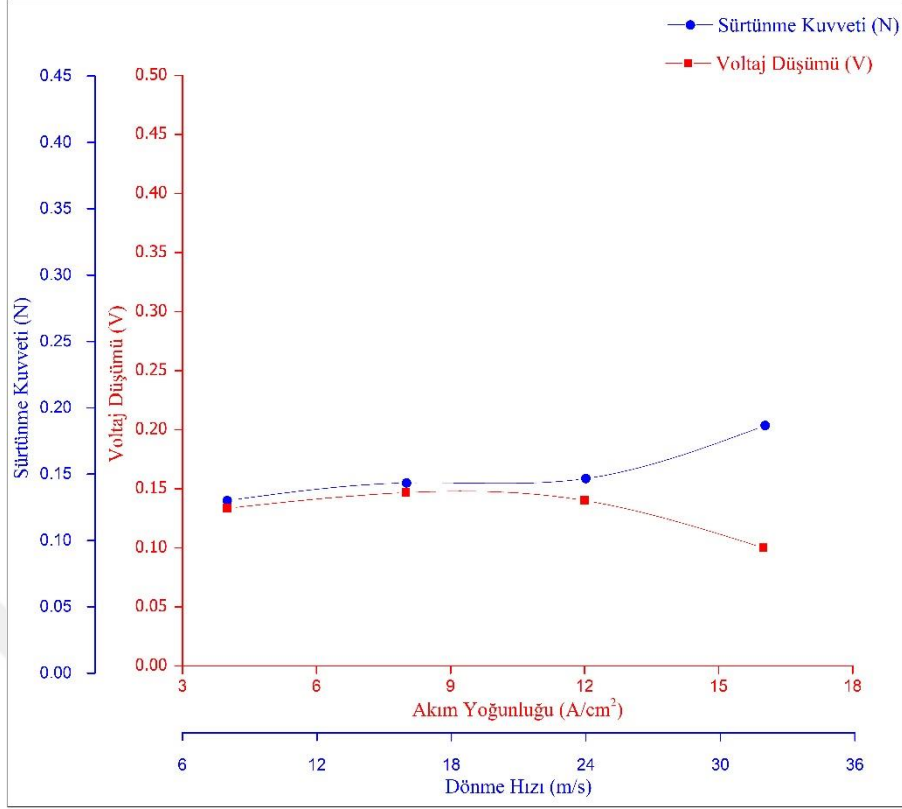
Şekil 70'deki grafiğe bakıldığında ise voltaj düşümünün önce bir miktar azalış ve sonra bir miktar artış göstererek düzensiz bir seyir izlediği görülmektedir. Sürtünme kuvvetinin ise artan dönme hızı ile arttığı tespit edilmiştir. Bu numune için optimum çalışma parametrelerinin voltaj düşümü ya da sürtünme kuvveti değerine göre belirlenmesi daha uygun bir tercih olacaktır. Şöyle ki; 8 A/cm²'lik akım yoğunluğu değeri minimum voltaj düşümünü verirken, 8 m/s'lik dönme hızı da minimum sürtünme kuvveti değerini vermektedir. Dolayısı ile optimum çalışma parametresini belirleyen kriter elektrik motorundan istenen performans değerine göre belirlenmelidir. Ancak yine de yaklaşık 6 A/cm² akım yoğunluğu ve 12 m/s'lik dönme hızı optimum nokta olarak seçilebilir.

Şekil 71'de ağırlıkça %10 grafen takviyesine %0.5 B₄C ve Şekil 72'de de %10 grafen takviyesine %1 B₄C takviyeleri eklenen numunelere ait fırça performansı deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 71. %10 Grafen - %0.5 B₄C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

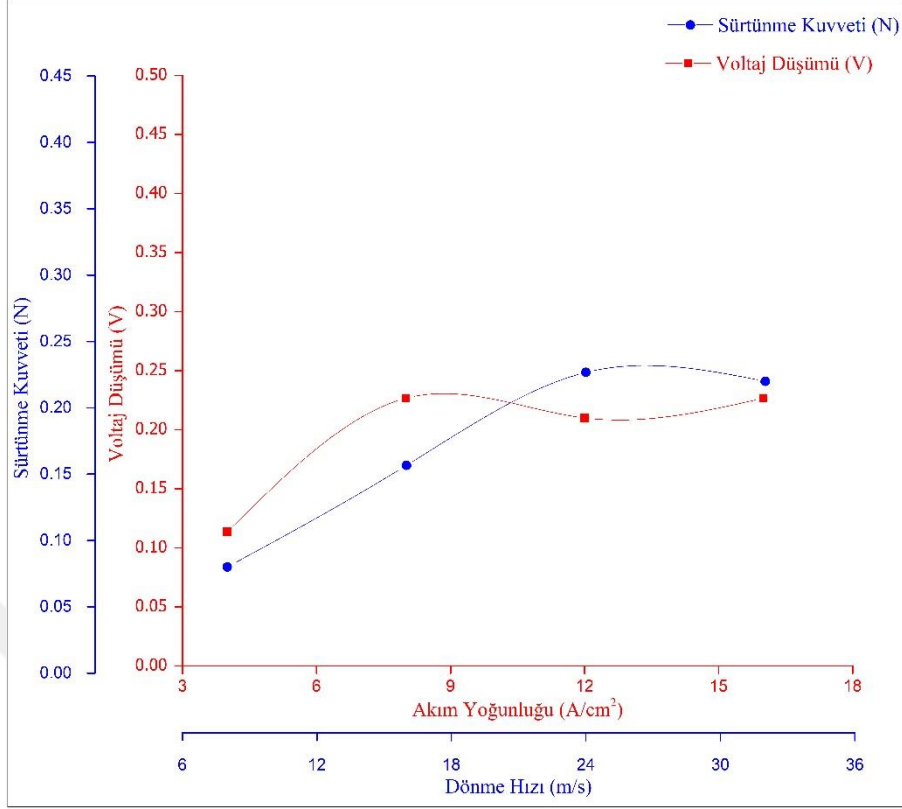
Şekil 71'e bakıldığında sürtünme kuvvetinin ve voltaj düşümünün birbirleri ile oldukça uyumlu bir seyir izlediği görülmektedir. 16 m/s'lik dönme hızı ve 8 A/cm²'lik akım yoğunluğu değerleri haricindeki diğer noktalarda değerlerin birbirine nispeten yakın ve düşük olduğu belirlenmiştir. Bu noktalar, belirtilen fırça numunesi için uygun çalışma parametreleri olarak belirlenmiştir.



Şekil 72. %10 Grafen ve %1 B₄C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Şekil 72’de artan dönme hızı ile sürtünme kuvvetinin artmasına karşın artan akım yoğunluğu ile azalan bir voltaj kaybı göstermektedir. Grafik incelendiğinde, belirtilen fırça için 13 A/cm² akım yoğunluğu ve 26 m/s dönme hızına kadar olan değerlerin tamamının optimum çalışma parametresi olduğu tespit edilmiştir.

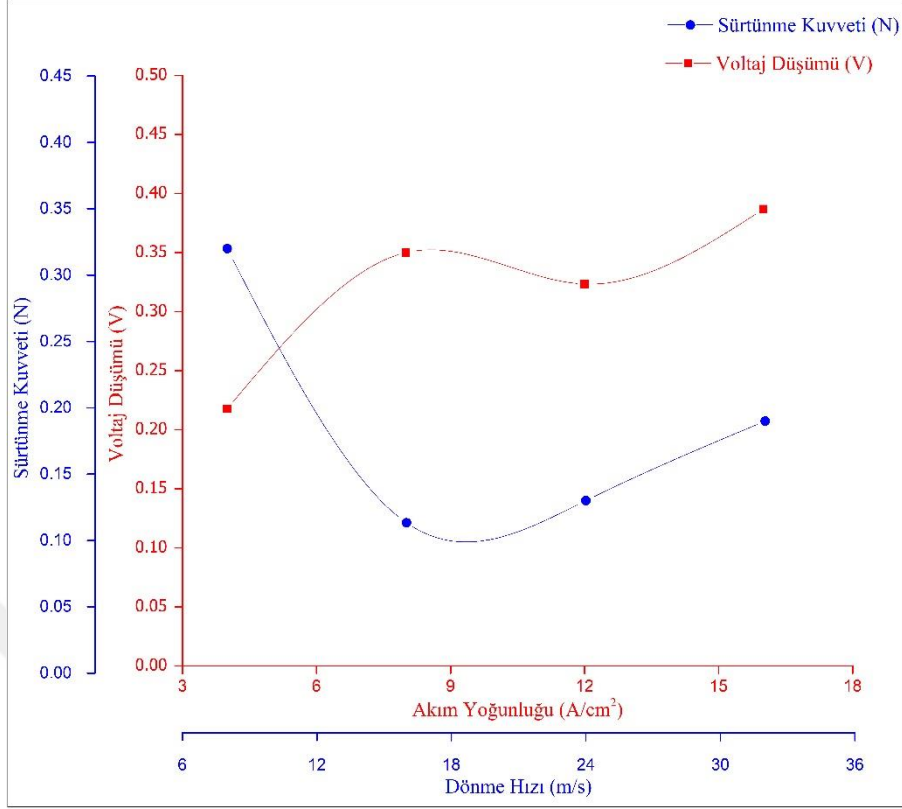
Şekil 73 ve 74’te ağırlıkça %15 grafen ve sırasıyla %0.5 ila %1 B₄C ilavesi yapılmış bakır fırçaların daha önceden belirtilen çalışma koşullarındaki elektro-mekanik incelemesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 73. %15 Grafen ve %0.5 B₄C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Şekil 73'te voltaj düşümü 8 A/cm²'lik akım yoğunluğu değerine kadar bir miktar artmış ve sonraki akım yoğunluğu parametrelerinde benzer voltaj düşümü değerleri göstermiştir. Bununla birlikte sürtünme kuvveti, dönme hızı artışı ile 24 m/s'lik dönme hızı değerine kadar artış göstermiş ve sonrasında hemen hemen aynı kalmıştır. Bu diyagrama göre en düşük dönme hızı ve akım yoğunluğu değerlerini gösteren 4 A/cm²'lik akım yoğunluğu ve 8 m/s'lik dönme hızı noktasının, bu fırça için en uygun çalışma koşulu olduğu tespit edilmiştir.

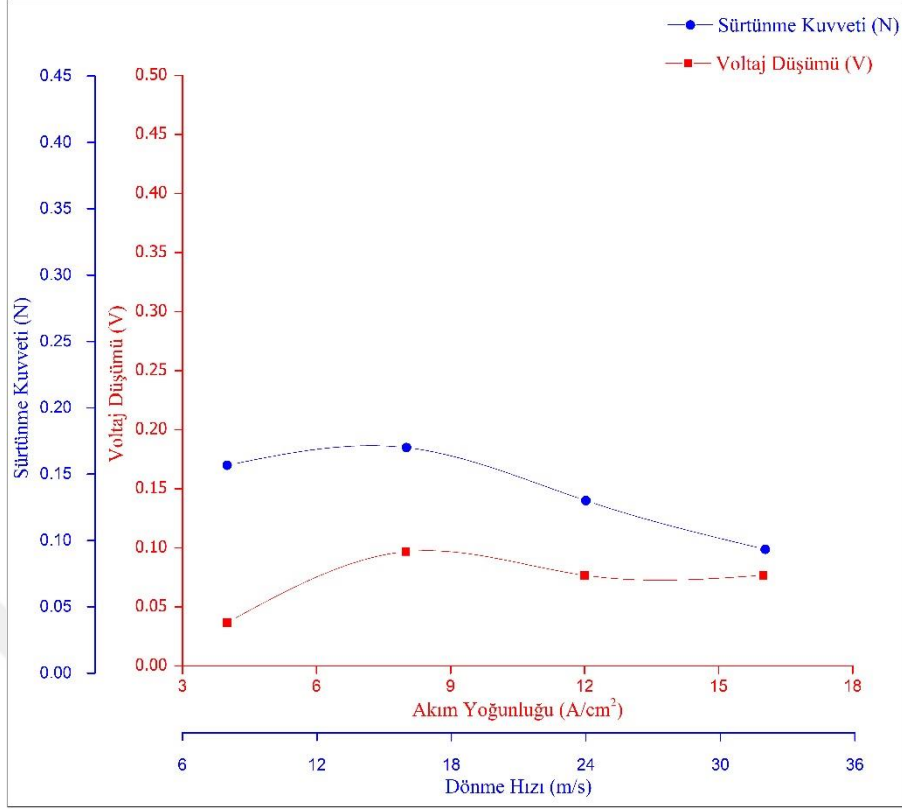
Şekil 74'te %15 Grafen ve %1 B₄C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik aşınma deneyinden alınan performans grafikleri verilmiştir.



Şekil 74. %15 Grafen ve %1 B₄C katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Şekil 74'te ise voltaj düşümü kısmen istikrarlı bir eğilim göstermiştir. Ancak bir önceki numune ile kıyaslandığında ortalama voltaj kaybının artan bor karbür oranı ile arttığı tespit edilmiştir. Sürtünme kuvveti değerinin ise 16 m/s'lik dönme hızı değerinde 0,11 N ile en düşük noktayı gösterirken daha düzensiz bir seyir izlediği görülmüştür. Bu fırça numunesi için 5 A/cm² akım yoğunluğuna karşılık gelen 10 m/s'lik dönme hızının optimum çalışma değeri olduğu tespit edilmiştir.

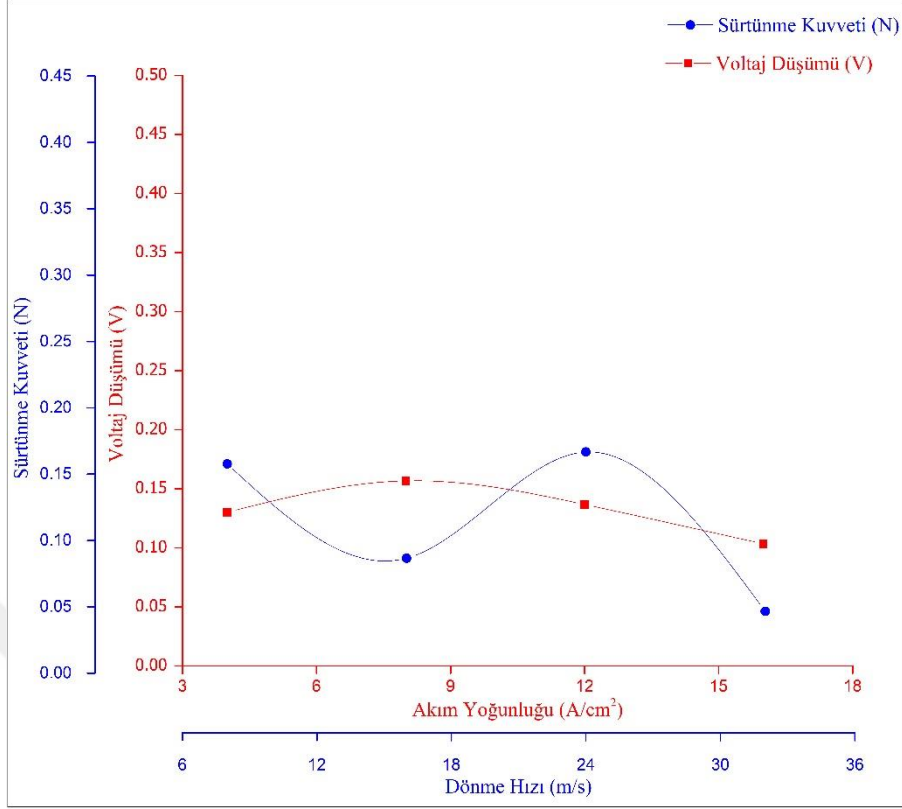
Şekil 75 -80 arasında verilen grafikler bakır – grafen – h-BN'den oluşan hibrit kompozit fırçalara ait elektro-mekanik deney sonuçlarını göstermektedir. Şekil 75'te ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 h-BN içeren bakır fırçaya ait deney verilerini içeren grafik verilmiştir.



Şekil 75. %5 Grafen ve %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Grafik incelendiğinde voltaj düşümü önce bir miktar arttığı sonra neredeyse sabit kaldığı görülmüştür. Sürtünme kuvveti de artan işlem hızı ile bir miktar azalma göstermiştir. Bu grafik için en uygun çalışma performansı gösteren nokta olarak 32 m/s'lik dönme hızı ve 16 A/cm²'lik akım yoğunluğu belirlenmiştir.

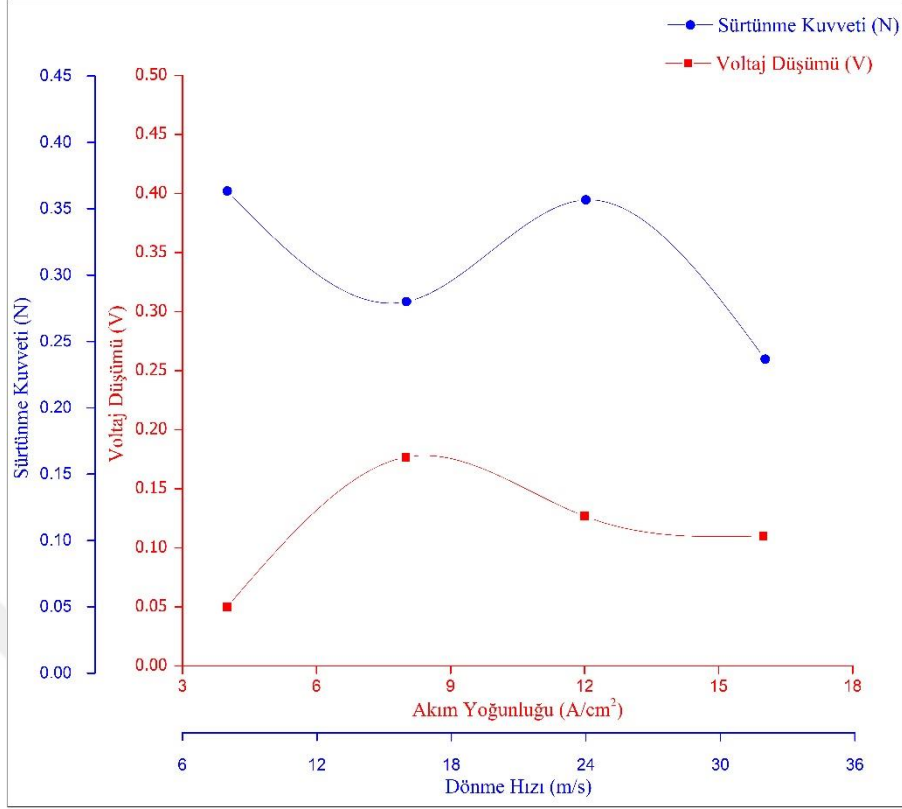
Şekil 76'da ağırlıkça %5 grafen ve %1 h-BN içeren bakır fırçaya ait deney verilerini içeren grafik verilmiştir.



Şekil 76. %5 Grafen ve %1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

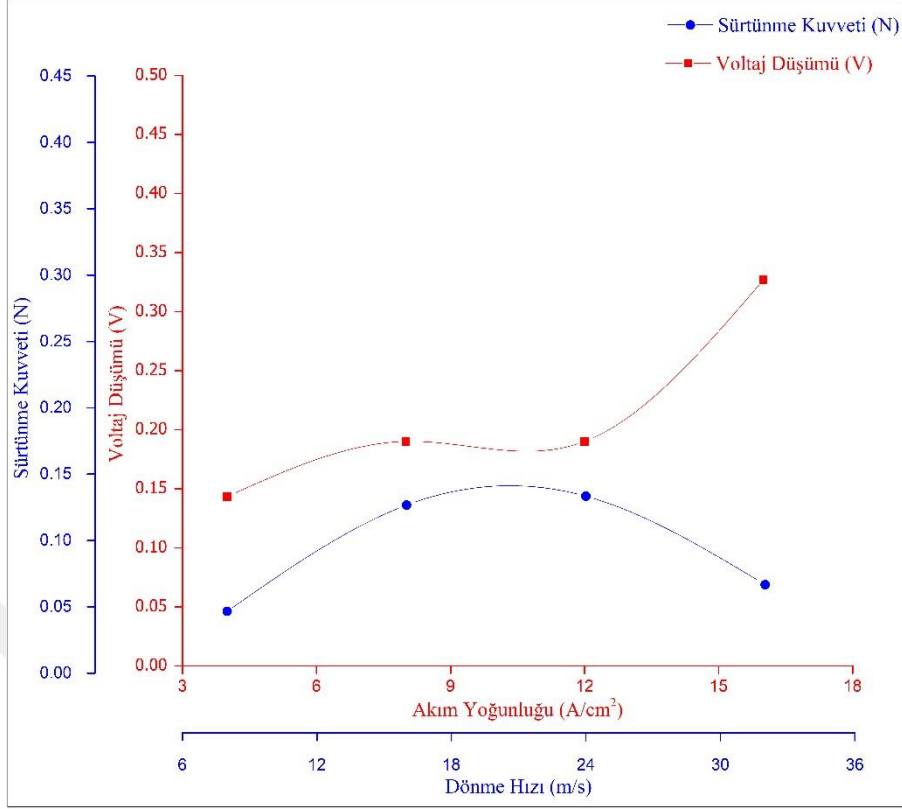
Şekli 76'da %5 grafen ilavesine ek ağırlıkça %1'lik h-BN takviyesi eklenmiştir. Bu diyagrama göre h-BN oranının artmasıyla voltaj düşümü değerleri artan akım yoğunluğuna karşılık çok az değişmiş olması rağmen önceki grafiğe göre daha yüksek değerler sergilediği görülmüştür. Sürtünme kuvveti eğrisi ise kararsız bir davranış izlemiştir. Optimum çalışma parametresi olarak da en düşük kayıpların görüldüğü 32 m/s'lik dönme hızı ve 16 A/cm²'lik akım yoğunluğu noktası belirlenmiştir.

Şekil 77'de ağırlıkça %10 grafen takviyesine %0.5 h-BN takviyesi ve Şekil 78'de ise ağırlıkça %10 grafen takviyesine %1 h-BN takviyesi yapılan bakır fırçalara ait performans değerleri bulunmaktadır.



Şekil 77. %10 Grafen ve %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

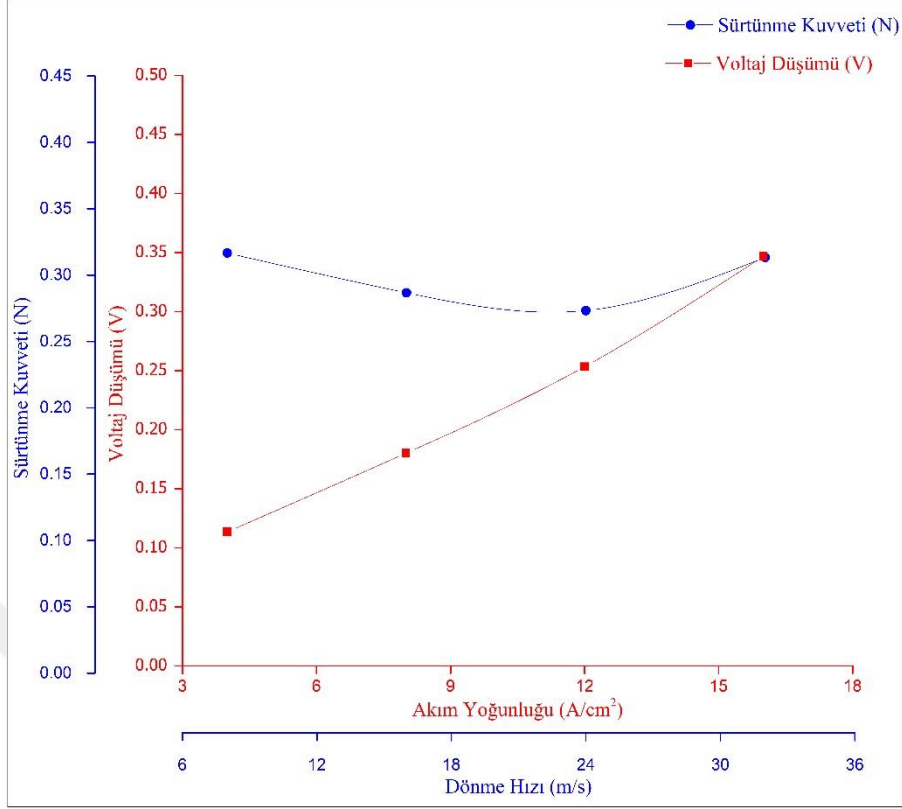
Şekil 77 incelendiğinde voltaj düşümü bir noktada (8 A/cm^2) pik yapıp daha sonra azalış göstermektedir. Sürtünme kuvveti ise Şekil 75 ve 76 ile kıyaslandığında artan grafen oranına rağmen yükseldiği tespit edilmiştir. Bu fırça numunesi için uygun çalışma parametresi olarak, sürtünme kuvvetinin en düşük ve voltaj düşümünün de nispeten düşük bir değer sergilediği 32 m/s 'lik dönme hızına karşılık 16 A/cm^2 'lik akım yoğunluğunun olduğu nokta belirlenmiştir.



Şekil 78. %10 Grafen - %1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

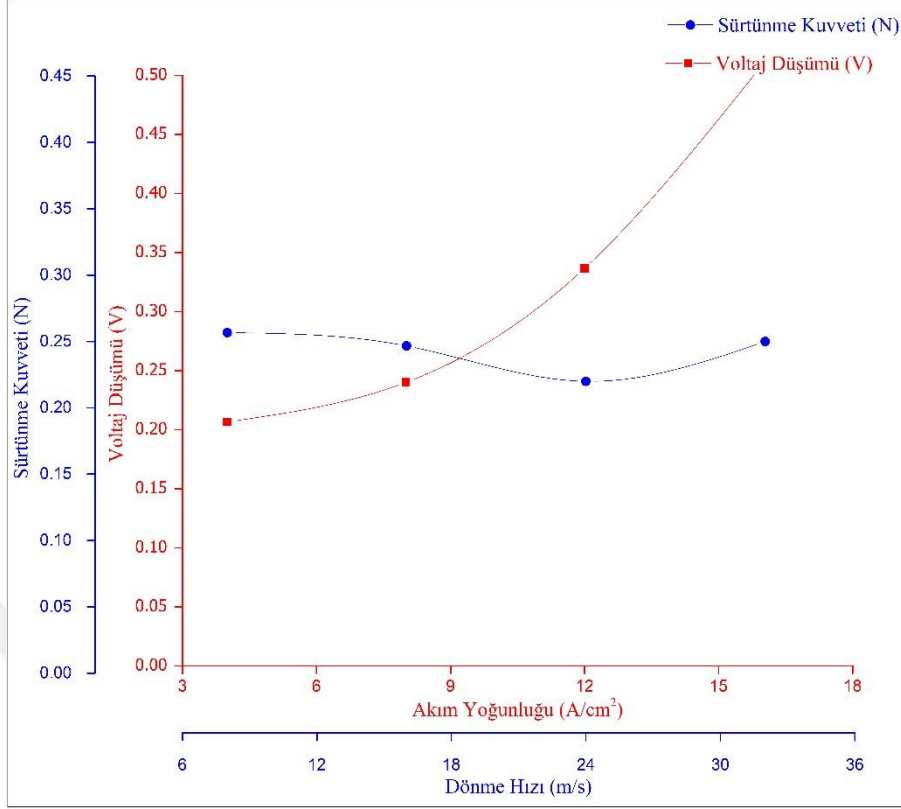
Şekil 78’de verilen grafik incelendiğinde artan h-BN oranının etkisi görülmektedir. Bu etki artan akım yoğunluğu ile artan voltaj düşümü şeklinde kendini göstermiştir. Özellikle 16 A/cm²’lik akım yoğunluğu noktasına geldiğinde voltaj düşümü değeri başlangıç değerinin neredeyse 3 katı olmuştur. Buna karşın sürtünme kuvveti değeri nispeten düzensiz bir davranış sergilemiş olmasına rağmen bir önceki numuneye göre çok daha düşük sürtünme kuvveti değerleri sergilemiştir. Bu numune için optimum çalışma parametresi 4 A/cm² akım yoğunluğu ve 8 m/s dönme hızı olarak tespit edilmiştir.

Şekil 79 ve 80 ile verilen grafikler h-BN ilaveli olan grubun son bileşimlerini göstermektedir ve ağırlıkça %15 grafen takviyesine sırasıyla %0.5 ve %1 oranlarında h-BN eklenen bakır fırçaların çalışma koşullarına karşı gösterdikleri davranışı vermektedir.



Şekil 79. %15 Grafen - %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

Şekil 79 incelendiğinde artan akım yoğunluğu ile artan voltaj düşümü görülmekte ve başlangıç değeri ile bitiş değeri arasında bir önceki grafiğe benzer şekilde 3 kat kadar bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Artan dönme hızına karşılık az da olsa düşen sürtünme kuvveti ise kararsız bir seyir izlemiştir. Yaklaşık 8 A/cm² akım yoğunluğu ve 16 m/s'lik dönme hızına tekabül eden nokta en uygun çalışma parametresi olarak tespit edilmiştir.



Şekil 80. %15 Grafen ve %1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait elektro-mekanik davranış

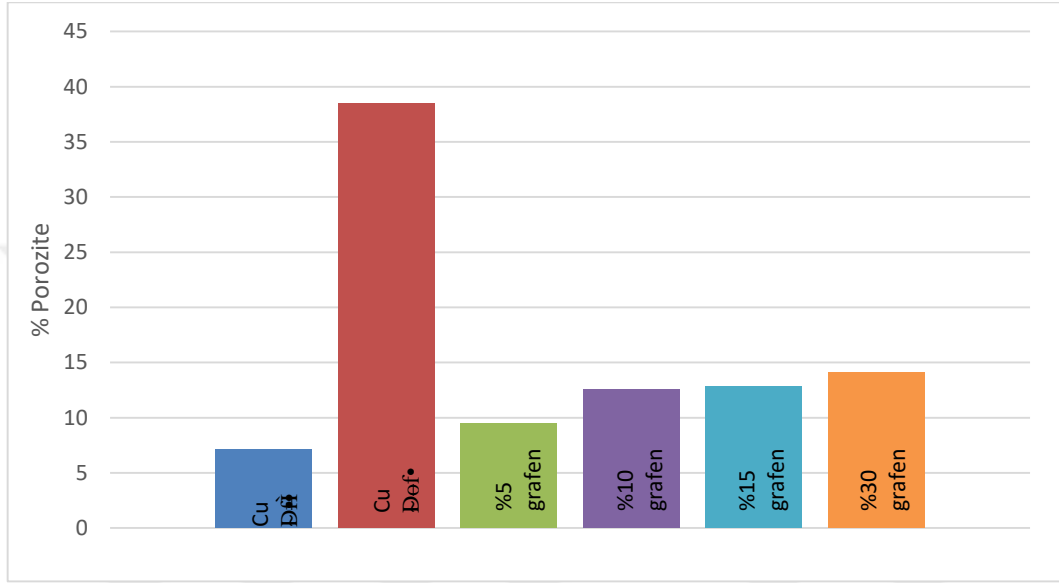
Şekil 80’de verilen grafikte voltaj düşümü değerinin artan akım yoğunluğu ile arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu grafikteki voltaj düşümü grafene ek h-BN takviyeli numuneler arasında, 16 A/cm² akım yoğunluğu noktasında en yüksek (0.51 V) kayıp değerlerini vermektedir. Ek olarak sürtünme kuvvetinin de Şekil 79’daki grafiğe benzer bir seyir izlediği ancak nispeten daha düşük sürtünme kuvveti değerleri sergilediği görülmektedir. Bu numune için yaklaşık olarak 9 A/cm² akım yoğunluğu ve 18 m/s’lik dönme hızı optimum çalışma parametresi olarak belirlenmiştir.

3.3. Fırça Numunelerinin % Porozite Değerleri

Üretilen fırça numunelerinin porozite oranları belirlenirken teorik yoğunluk ve hacimce yüzdeler kullanıldı. Ağırlıkça oranları hacimce oranlara çevirmek için Eşitlik 3 kullanıldı. Daha sonra Eşitlik 4 ile her numunenin teorik yoğunluğu, Eşitlik 5 ile de numunelerin gerçek yoğunlukları hesaplandı. Teorik ve gerçek yoğunluklar Eşitlik 6 ile %

porozite değerlerine dönüştürüldü. Şekil 81-86 arasında numunelere ait % poroziteleri gösteren grafikler verilmiştir.

Şekil 81’de saf bakırdan ve bakıra ilave grafen takviyeli fırçaların % porozite oranları verilmiştir.



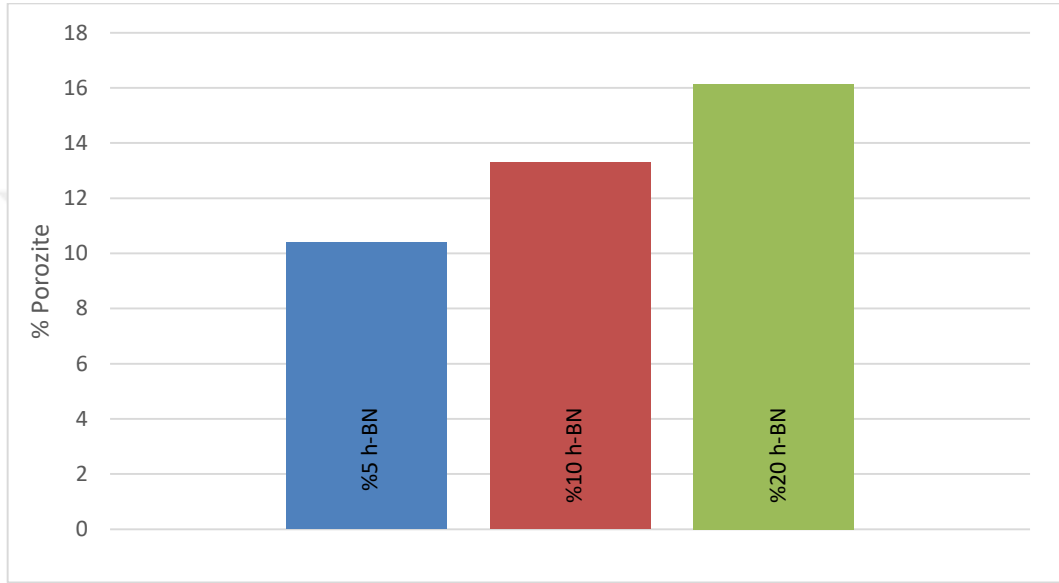
Şekil 81. Grafen katkılı bakır fırçaların % porozitesi

Grafikten de görüleceği üzere Cu (MA'sız) kodlu mekanik alaşımlama/öğütme yapılmamış saf bakır numunesi en düşük porozite değerini verirken, Cu (MA'lı) kodlu mekanik alaşımlama/öğütme işlemine tabii tutulmuş saf bakır fırça numunesi de en yüksek porozite (%38.5) değerini vermiştir. Tablo 4'te bakır tozlarının boyutlarının 37-88 μm aralığında olduğu görülmektedir. Toz boyutunun geniş aralıkta değişmesi, mekanik alaşımlama/öğütme işlemine tabii tutulmamış tozların paketlenmesi sırasında nispeten büyük boşlukların daha küçük toz parçacıkları tarafından doldurularak ham yoğunluğun artmasını ve dolayısı ile porozitenin düşmesi şeklinde kendini göstermiştir.

Grafen takviyeli numunelere gelindiğinde ise, Cu (MA'lı) kodlu numuneye göre porozite değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Burada, grafen tozları hem paketleme sırasında oluşabilecek boşlukları doldurarak hem de plaka haline gelen toz tanelerini birbiri üstünden kaydırarak gözeneklerin kapanmasına yardımcı olan bir mekanizma ile ham yoğunluğu arttırmaya yönelik işlev görmüştür. Ancak grafen takviyeli

numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde artan grafen oranı ile porozite değerleri bir miktar artmaktadır. Bu durum ise grafenin yoğunluğu ile ilgili olup beklenen bir sonuçtur.

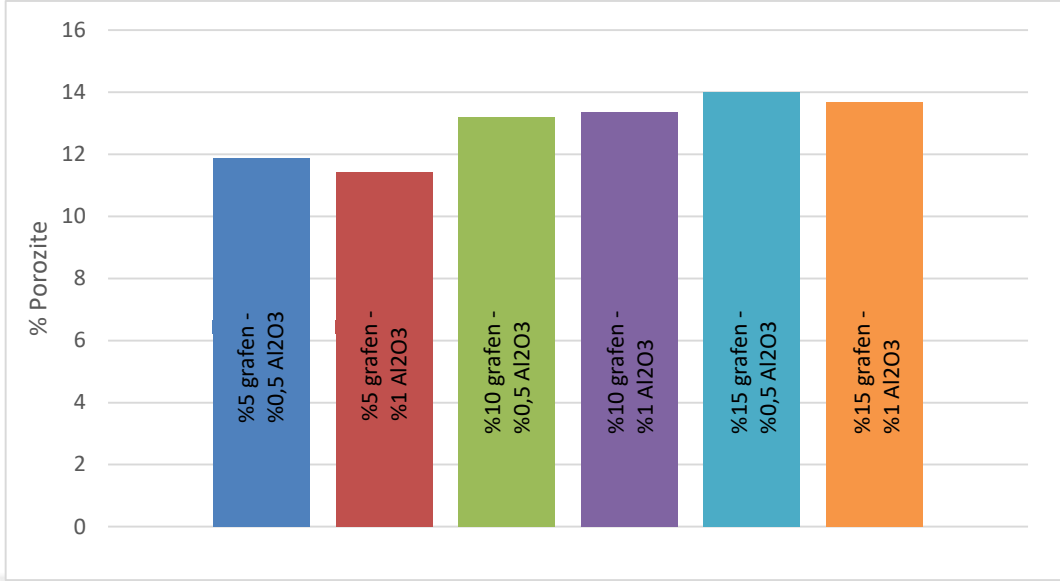
Şekil 82’de hegzagonal bor nitrür katkılı bakır fırçaların porozite değerleri verilmiştir.



Şekil 82. h-BN katkılı bakır fırçaların % porozitesi

Bu grafikteki değerler, grafen katkısında olduğu gibi bir davranış göstermiş olup artan takviye miktarı ile porozite oranları artmıştır. Nitekim %5 grafen oranında porozite %9 iken, %5 h-BN oranında bu değer %11 mertebelerinde gerçekleşmiştir.

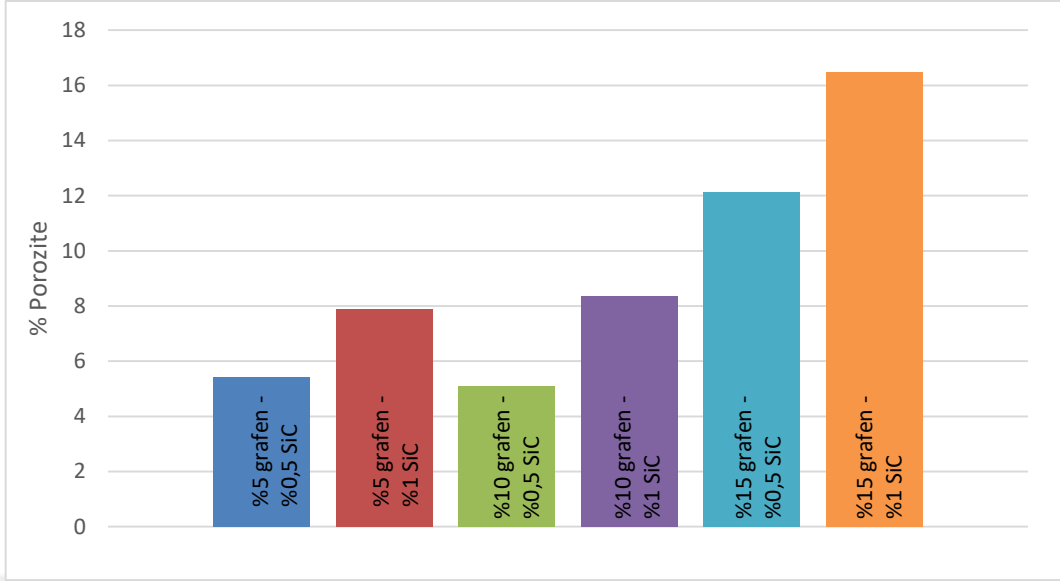
Şekil 83’te grafen takviyesine ek olarak alümina takviyesi yapılan bakır fırçaların porozite değerleri görülmektedir.



Şekil 83. Grafen ve Al₂O₃ katkılı bakır fırçaların % porozite değerleri

Grafen oranının artmasıyla Şekil 80'deki gibi porozite artmıştır. Grafen oranı %30 olan numune ile %15 grafen ve %1 Al₂O₃ takviyeli numunelerin porozite değerleri yaklaşık olarak aynı gerçekleşmiştir. Bahsi geçen fırça numunelerinin grup içlerinde en çok takviye oranı içeren numuneler olduğu göz önüne alındığında Al₂O₃ takviyesinin porozite üzerinde dikkat çekici bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

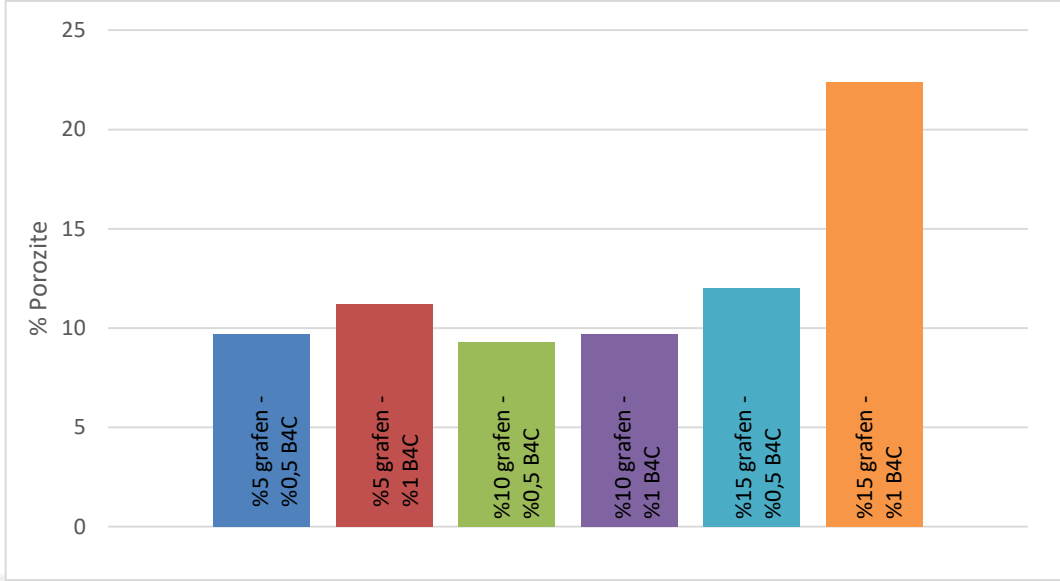
Şekil 84'te grafen takviyesine ilaveten yapılan silisyum karbür takviyeli bakır fırçalara ait porozite grafiği verilmiştir.



Şekil 84. Grafen ve SiC katkılı bakır fırçaların % porozitesi

Bu grafik incelendiğinde düzensiz bir porozite dağılımı göze çarpmakla birlikte porozite oranlarını sadece grafen içeren ikili bakır fırçalara göre (Şekil 80) daha düşük değerler verdiği görülmüştür. Ufak sapmalar olsa da genel olarak değerlendirildiğinde bu grupta da artan takviye oranıyla porozite değerlerinin azalmıştır. Ayrıca benzer grafen takviyeleri için, ağırlıkça %0.5 SiC içeren numunelerin porozite değerleri ağırlıkça %1 SiC içeren numunelere göre bir miktar düşük çıkmıştır. Burada artan SiC miktarının poroziteyi arttırdığı tespit edilmiştir.

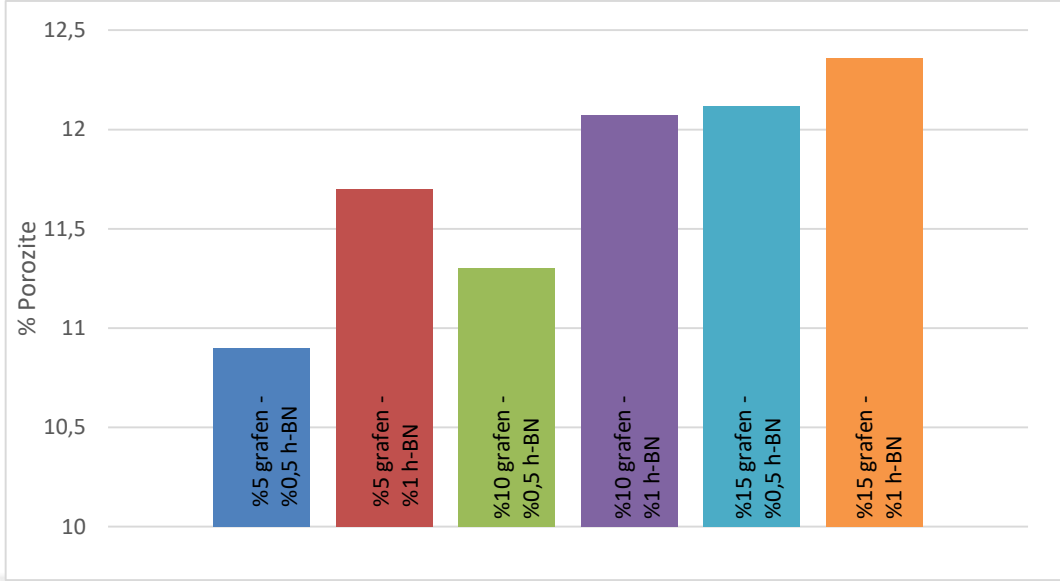
Şekil 85'te grafen takviyesine ek olarak bor karbür takviyesinin eklendiği numunelere ait porozite grafiğine yer verilmiştir.



Şekil 85. Grafen ve B₄C katkılı bakır fırçaların % porozitesi

Bu gruptaki numunelerin porozite oranlarının, %15 grafen - % 1 B₄C içeren fırça numunesi hariç yaklaşık olarak aynı (%10 mertebelerinde) olduğu görülmektedir. En yüksek porozite oranı gösteren numunede ise porozitenin yaklaşık %23 düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Şekil 83'teki gibi artan B₄C takviyesi ile porozite değerleri benzer grafen takviyelerinde bir miktar artış sergilemiştir.

Şekil 86'da grafen takviye malzemesine ek h-BN takviyesinin bulunduğu gruba ait porozite oranını gösteren grafik verilmiştir.

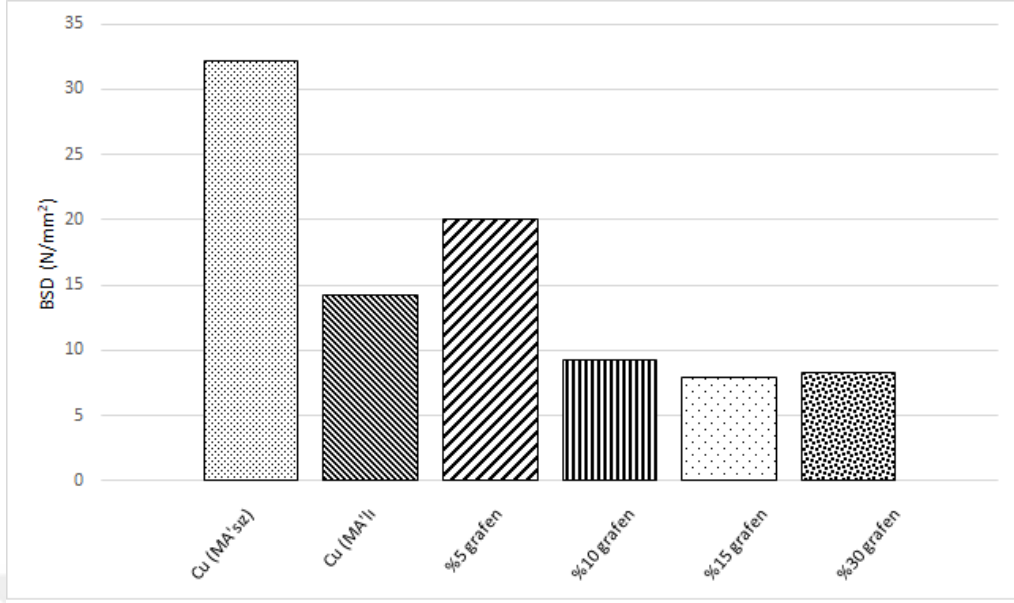


Şekil 86. Grafen ve h-BN katkıli bakır fırçaların % porozitesi

Verilen grafikten de görüleceği üzere artan takviye oranı ile porozite değerleri artmıştır. Önceki grafiklerde de göze çarpan, benzer grafen takviyelerindeki artan ikinci takviye oranı ile (bu grafik için h-BN) porozitenin arttığı tespit edilmiştir. En yüksek porozite oranı ise ağırlıkça %15 grafen ve %1 h-BN takviyeli bakır fırça bileşiminde ve %12 dolaylarında olduğu gözlenmiştir.

3.4. Fırça Numunelerinin Sertlik Değerleri

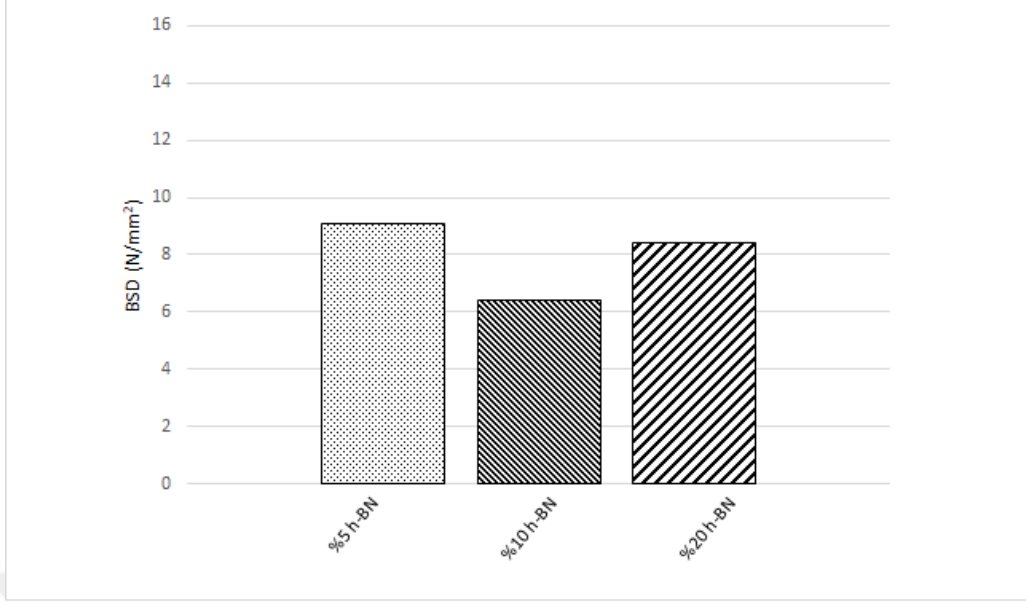
Şekil 87 ve 92 arasında verilen grafikler deneysel çalışmalarda üretilen numunelerin sertliklerini kendi grupları içerisinde kıyaslamaya yardımcı olacak şekilde verilmiştir. Şekil 87 sadece bakırdan üretilmiş fırçalar ve bakır matrise, değişen oranlarda katılan grafen takviyeli numuneleri göstermektedir.



Şekil 87. Grafen katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği

En yüksek sertlik değeri mekanik alaşımlama/öğütme yapılmaksızın üretilen Cu (MA'sız) kodlu numunede ve yaklaşık 33 BSD olarak gerçekleşmiştir. Mekanik alaşımlama/öğütme yapılan Cu (MA'lı) kodlu numunede ise ilk numunenin neredeyse yarısı kadar bir sertlik değeri ölçülmüştür. Burada mekanik alaşımlama/öğütme aşamasında numunelerin maruz kaldığı deformasyon malzemenin iç enerjilerini yükselterek daha etkin bir sinterleme mekanizması geliştirmiş ve numunenin yumuşamasına neden olmuştur. Grafen içeren numunelerde ise bahsedilen mekanizmaya ilave olarak grafen malzemesinin yumuşak bir takviye elemanı olması neticesinde artan grafen miktarı ile sertlik azalmıştır.

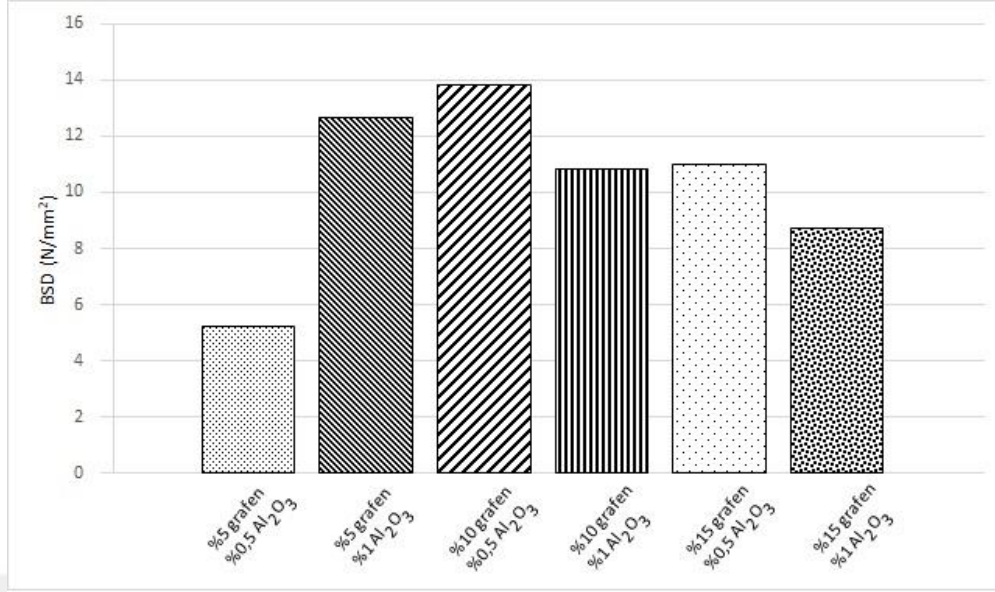
Şekil 88'de değişen oranlarda h-BN içeren bakır fırçaya ait sertlik grafiği verilmiştir.



Şekil 88. Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği

Grafikten görüleceği üzere h-BN takviyesi eklenen bakır fırça numunelerinde sertlik düzensiz bir dağılım sergilemiştir. Ağırlıkça %5 h-BN katkısı ile 9.1 BSD olarak ölçülen sertlik değeri artan h-BN oranlarıyla önce bir miktar azalmış sonrasında ise bir miktar artmıştır.

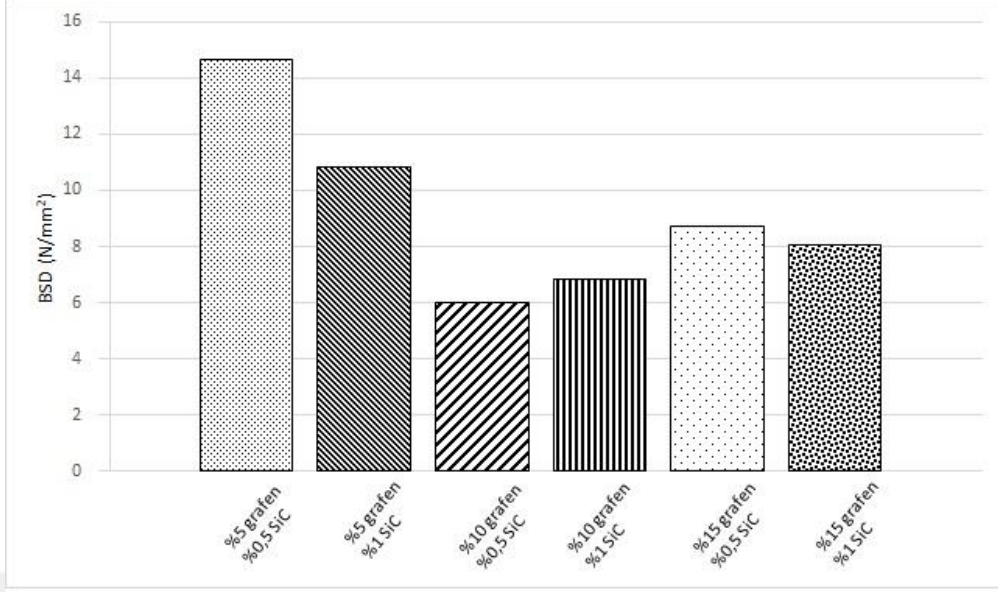
Şekil 89’te bakır – grafen – alümina hibrit kompozitine (fırçasına) ait sertlik değerleri verilmiştir.



Şekil 89. Grafen ve Alümina katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği

Grafik incelendiğinde Al₂O₃ parçacıklarının sertliği yüksek seramik tozlar olmasına rağmen bakır – grafit ikili fırçalarına göre daha yumuşak bir sertlik değeri gösterdiği tespit edilmiştir. Ağırlıkça %5 grafen takviyesinde ağırlıkça %0.5 Al₂O₃ takviyeli numunenin sertliği ile %1 Al₂O₃ takviyeli numunenin sertlik değeri arasında yaklaşık 2 katlık bir sertlik artışı olduğu tespit edilmiştir. Bu iki numune arasındaki sertlik farkı beklenen şekilde gerçekleşmiş olmasına karşın artan grafen oranı ile alüminanın etkinliği azalmış ve sertlik değerleri bakır – grafit ikilisinde bulunan değerlerin hemen üstünde bir sertlik değeri göstermiştir.

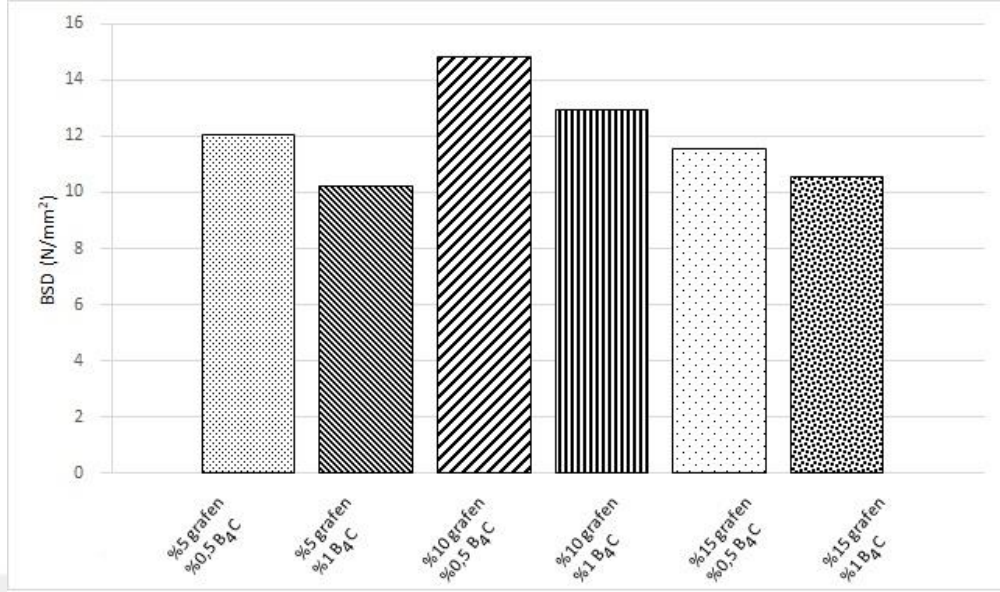
Şekil 90'da grafen ve SiC takviye edilmiş bakır fırça numunelerine ait sertlik değerleri verilmiştir.



Şekil 90. Grafen ve Silisyum Karbür katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği

Şekil 90'da verilen sertlik grafiği incelendiğinde grafene ek silisyum karbür ilavesinin alümina katkısının aksine artan grafen oranı ile sertlik değeri azalma eğilimi sergilemiş ve ağırlıkça %10 grafene ek %0.5 silisyum karbür içeren bakır fırçada en düşük sertlik değerine ulaşılmıştır. Bu numuneden sonra ise artan takviye oranları ile sertlik değerlerinin az bir miktar yükseldiği görülmüştür.

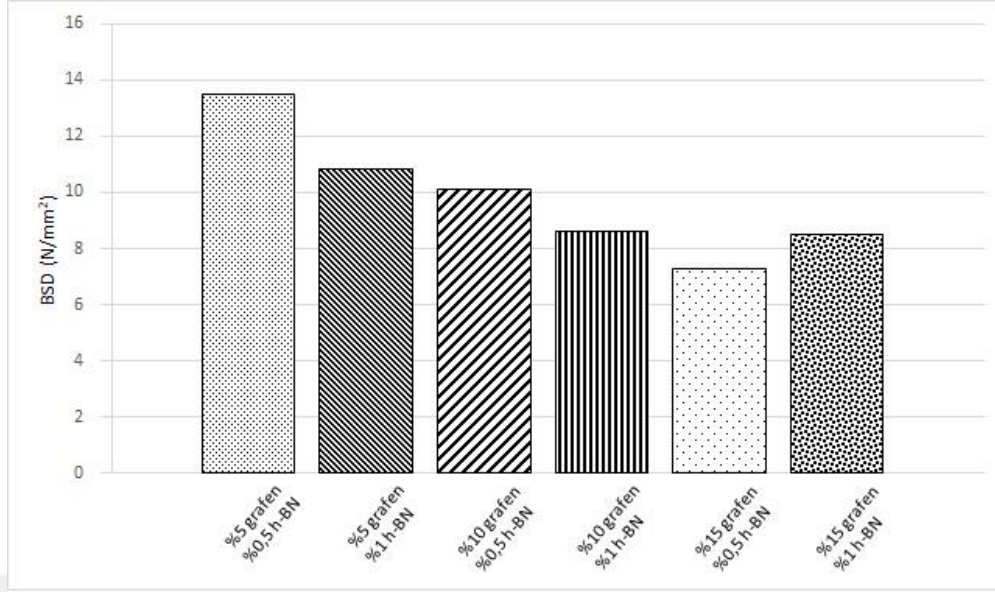
Şekil 91'de verilen sertlik grafiği incelendiğinde grafen katkısına ek bor karbür katkısının etkileri görülmektedir.



Şekil 91. Grafen ve Bor Karbür katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği

Bor karbürün grafen üzerindeki etkinliği tüm numunelerde benzer bir tutum sergilemiştir. Bor karbür ilavesi içeren bu numuneler incelendiğinde sertlik değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Ancak bor karbür içeren bu numuneler grafen oranları temel alınarak incelenirse, ağırlıkça %0.5 bor karbür içeren numuneler, %1 bor karbür içeren numunelere göre sertlik değerlerinin bir miktar yüksek olduğu görülmüştür.

Şekil 92’de verilen grafik, grafene ek hegzagonal bor nitrür takviye elemanı içeren bakır fırçaların sertlik değerlerini göstermektedir.



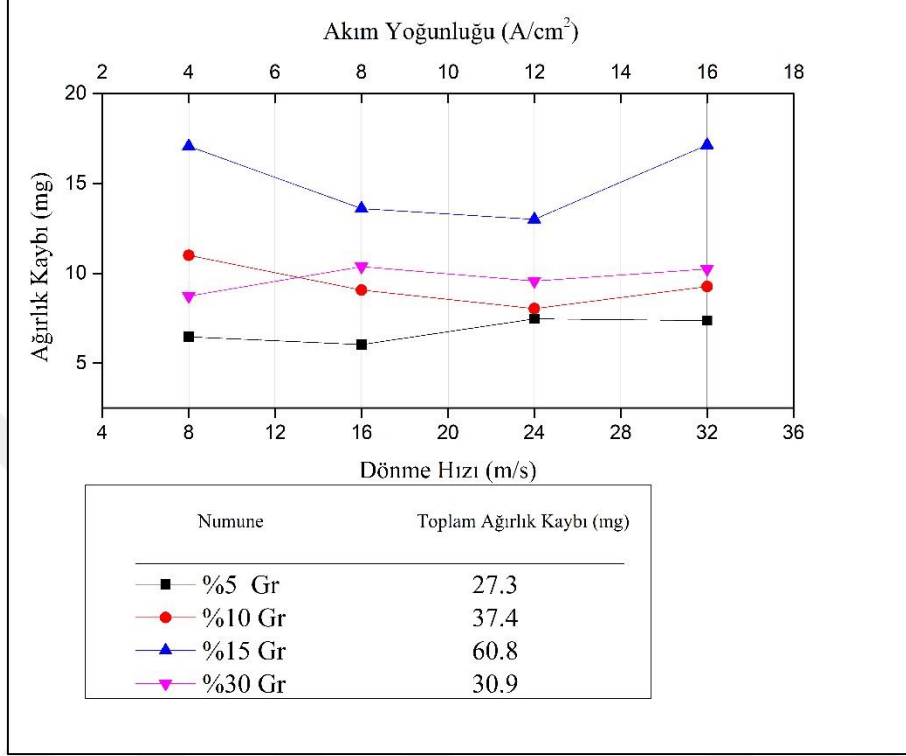
Şekil 92. Grafen ve Hegzagonal Bor Nitrür katkılı bakır fırçaların Brinell sertliği

Ağırlıkça %15 grafen ve %1 h-BN içeren numune küçük bir değer farkı ile istisnai bir tutum sergilemiş olsa da artan grafen oranı ve h-BN oranı ile sertlik değerlerinin giderek düştüğü tespit edilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere sertliği en yüksek olan numune ile (ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 h-BN) en düşük olan numune (ağırlıkça %15 grafen ve %0.5 h-BN) arasında yaklaşık 2 katlık bir fark vardır.

3.5. Fırça Numunelerinin Aşınma Kayıpları

Sürtünen ve aşınan malzemelerdeki bir diğer unsur da aşınmadan kaynaklanan ağırlık kayıplarıdır. Bu kayıplar bir malzemenin kullanım ömrünü tayin etmede oldukça faydalıdır. Şekil 93 ila 98 arasında performans deneylerinden sonra alınan ölçümler sonucu ağırlık kayıpları hesaplanan numunelerin grafiklerini göstermektedir. Grafiklerde verilen eğriler her deney için ayrı ayrı aşınma kaybını gösterirken, grafik altında verilen tablolarda bir numunenin deney boyunca toplamda gösterdiği ağırlık kaybını vermektedir. Takviye elemanı bulunmayan Cu (MA'lı) ve Cu (MA'sız) kodlu numuneler elektro-mekanik aşınma deneyine tabii tutulamadıklarından bu iki fırça numunesine ait ağırlık kaybı grafiği bulunmamaktadır.

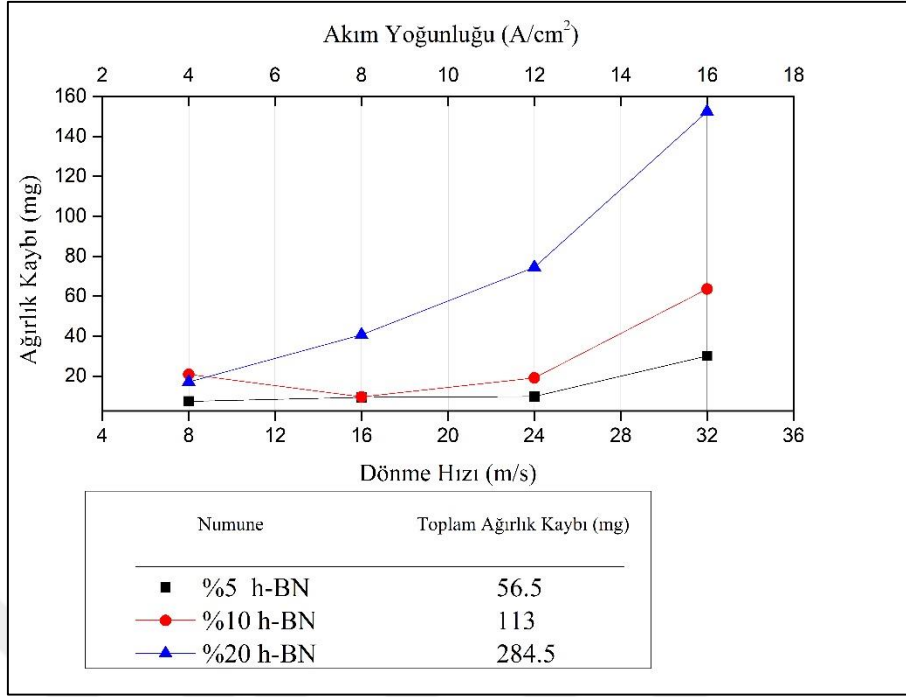
Şekil 93'te bakır fırçalara grafen katkısının aşınma üzerindeki etkisini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 93. Grafen katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları

Grafiğe göre en istikrarsız ve toplamda da en fazla aşınmayı gösteren numune ağırlıkça %15 grafen katkılı bakır fırça olarak tespit edilmiştir. Toplamda en az ağırlık kaybını gösteren numunenin ise ağırlıkça %5 grafen içeren numunede gerçekleştiği tespit edilmiştir.

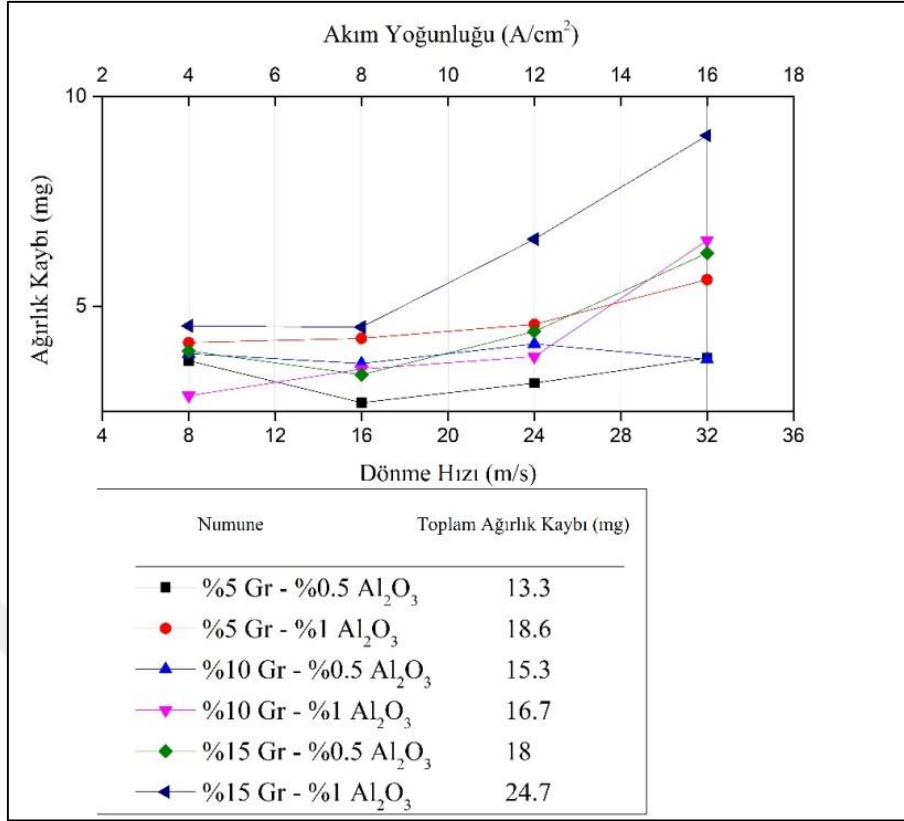
Şekil 94'te h-BN katkılı bakır fırçaya ait ağırlık kaybını gösteren numunelerin grafiği verilmiştir.



Şekil 94. h-BN katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları

Grafik incelendiğinde; h-BN içeren numunelerin, benzer oranlarda grafen içeren numunelere göre toplamda daha fazla ağırlık kaybına uğradığı görülmektedir. Ancak burada en dikkat çekici ağırlık kaybını ağırlıkça %20 h-BN içeren numune göstermiştir. Şöyle ki; düşük dönme hızları ve akım yoğunluklarında diğer numunelere benzer ağırlık kayıpları sergilediği halde en yüksek dönme hızı ve akım yoğunluğu değerine gelindiğinde ani bir sıçrayış ile aynı çalışma koşullarında %5 h-BN katkılı fırçaya göre yaklaşık 5 kat fazla ağırlık kaybı sergilemiştir.

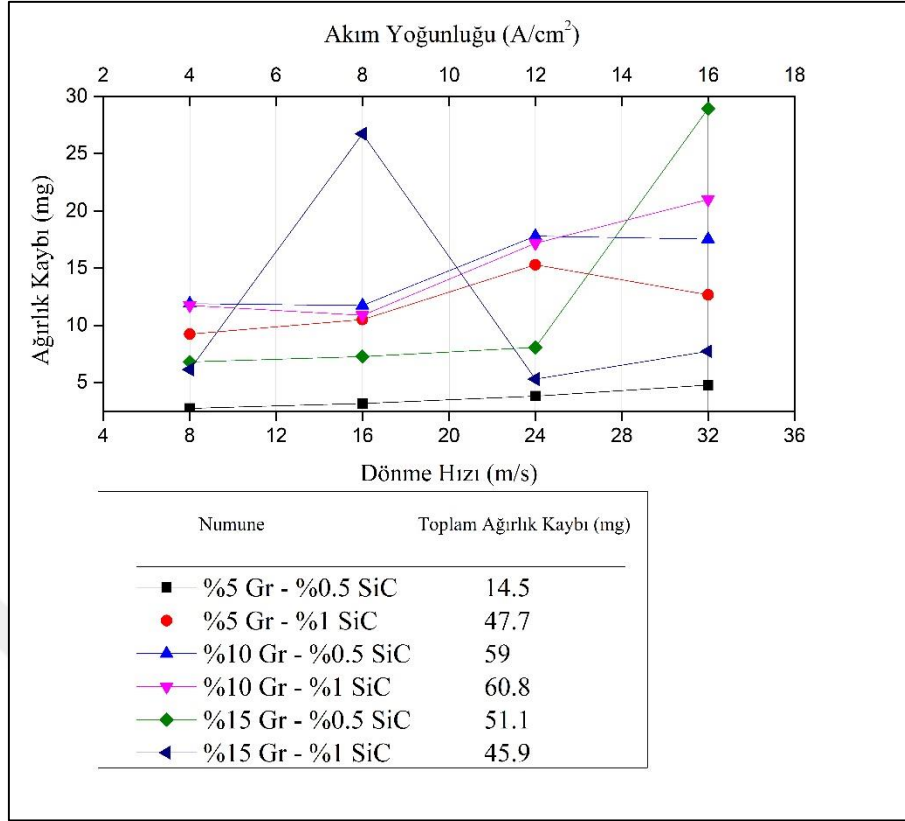
Şekil 95'te grafene ek alümina katkısının ağırlık kaybı üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 95. Grafen ve Al₂O₃ katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları

Grafikten de görüleceği üzere en yüksek aşınma kaybının ağırlıkça %15 grafen ve %1 alümina içeren numunede olduğu görülmektedir. Bu numune Şekli 93'te verilen benzer oranda grafen takviyesi içeren numuneye göre daha düşük bir aşınma kaybı sergilemiştir. Alümina takviyesi içeren bakır fırçanın Şekil 89'da verilen sertlik grafiği incelendiğinde, sertliğin çok yüksek çıkmamasına karşın malzemeyi destekleyerek aşınma kayıplarını azalttığı tespit edilmiştir.

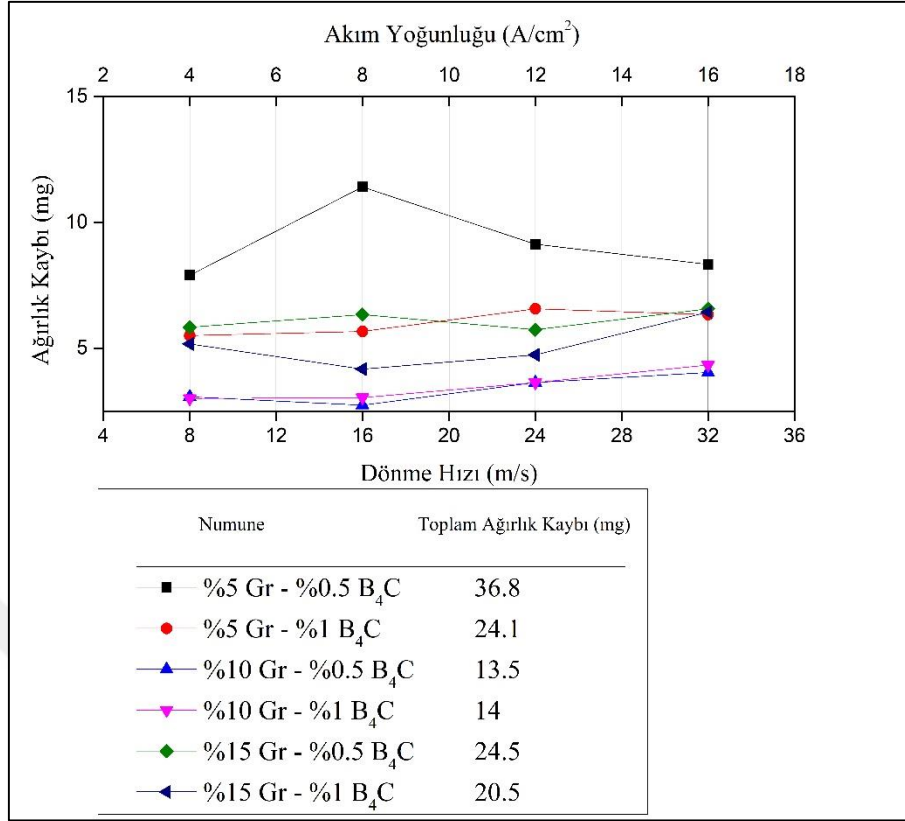
Şekil 96'da grafen takviyesine ek olarak silisyum karbür partikülleri içeren bakır fırçaların ağırlık kayıpları incelenmiştir.



Şekil 96. Grafen ve SiC katkıli bakır fırçalarda ağırlık kayıpları

Grafik incelendiğinde görülen en yüksek aşınma kaybının ağırlıkça %10 grafen – %0.5 SiC ve %10 grafen – %1 SiC içeren numuneler olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 90’da verilen sertlik grafiği ile de uyumlu bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Şöyle ki, en düşük sertlik değerlerinin tespit edildiği bu numuneler en yüksek aşınma kayıplarını sergilemişlerdir.

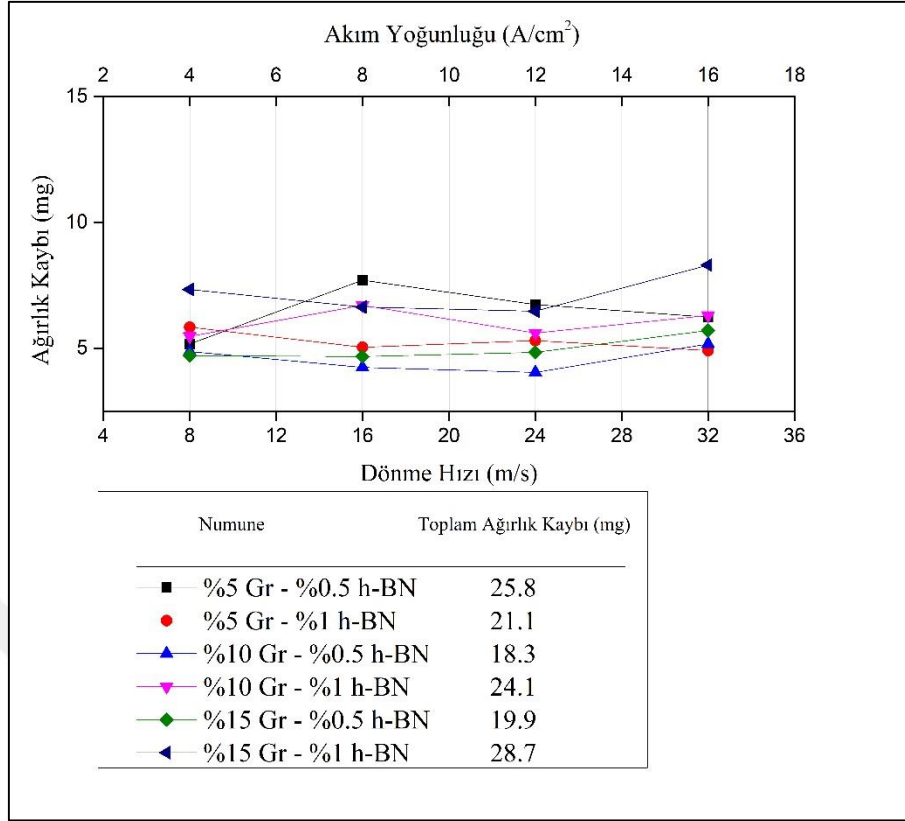
Şekil 97, grafen katkısına ek olarak h-BN içeren numune grubunun performans deneyleri sonrasında uğradıkları ağırlık kayıplarını göstermektedir.



Şekil 97. Grafen ve B₄C katkıli bakır fırçalarda ağırlık kayıpları

Bu grup incelendiğinde en çok aşınmanın gerçekleştiği numune olarak ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 bor karbür içeren numune olduğu görülmektedir. Grafen ve h-BN'ün katı yağlayıcı olarak sanayide kullanıldığı göz önüne alındığında artan takviye oranlarıyla aşınma kayıplarının azalması beklenen bir sonuçtur. Ancak ağırlıkça %15 grafene ek %0.5 ve %1 B₄C içeren numunelerin toplam ağırlık kayıpları incelendiğinde ağırlık kayıplarında bir miktar artış görülmektedir. Şekil 85'te verilen porozite değerleri incelendiğinde bu iki numuneye ait porozite değerlerinin nispeten yüksek ve Şekil 91'de verilen sertlik grafiği incelendiğinde ise ağırlıkça %10 grafene ek %0.5 ve %1 B₄C takviyeli numunelere göre sertliklerinin bir miktar düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu bulguya göre de toplam ağırlık kayıplarındaki artış makul bir sonuçtur.

Şekil 98'de grafen takviyesine ilaveten h-BN içeren bakır fırçalara ait ağırlık kayıpları verilmiştir.



Şekil 98. Grafen ve h-BN katkılı bakır fırçalarda ağırlık kayıpları

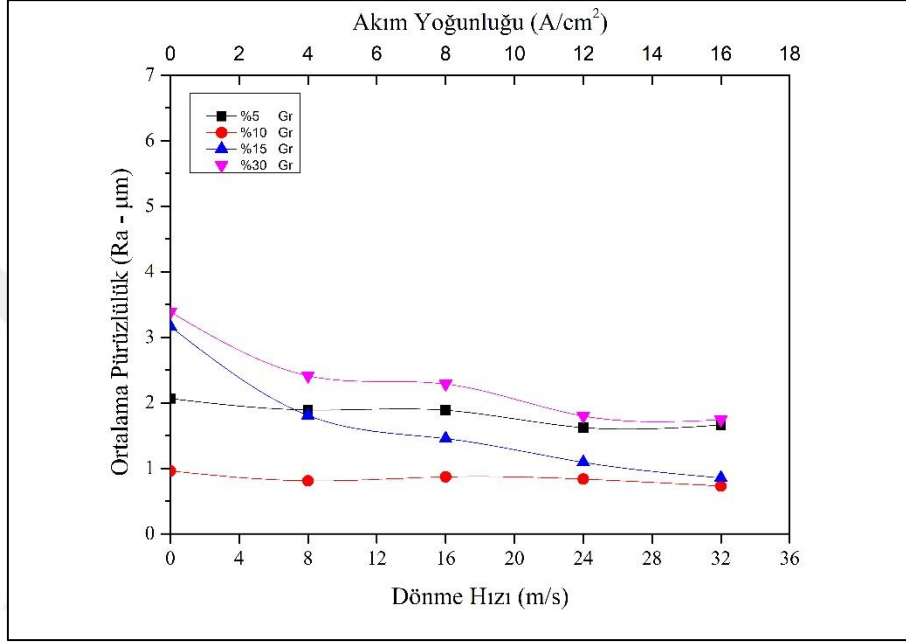
Bu grupta yapılan incelemede aşınma kayıplarının en düşük olan numunelerin her çalışma koşulunda neredeyse aynı aşınma kaybı sergilediği görülmüştür. Diğer taraftan farklı dönme hızı ve farklı akım yoğunluğu değerlerinde nispeten düzensiz aşınma kaybı sergileyen numunelerin ise aşınma kayıplarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu grupta toplamda en çok aşınma kaybı gösteren numune 28.7 mg ile ağırlıkça %15 grafen ve %1 h-BN içeren numune olduğu ve aynı numunenin 32 m/s dönme hızı ve 16 A/cm² akım yoğunluğu çalışma koşullarında 8.3 mg ile en fazla ağırlık kaybı sergileyen fırça olduğu belirlenmiştir.

3.6. Fırça Numunelerinin Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri her numune için performans deneyleri sonrasında alınmış olup Şekil 99 – 104 arasında numunelerin ortalama pürüzlülük değerleri (Ra) verilmiştir. Bu grafiklerde dönme hızı ve akım yoğunluğu 0 (sıfır) olarak alınan değerler

performans deneylerine geçilmeden önceki ilk yüzey pürüzlülük değerleri olup bu değerler rodaj işlemi sonrasında alınmıştır.

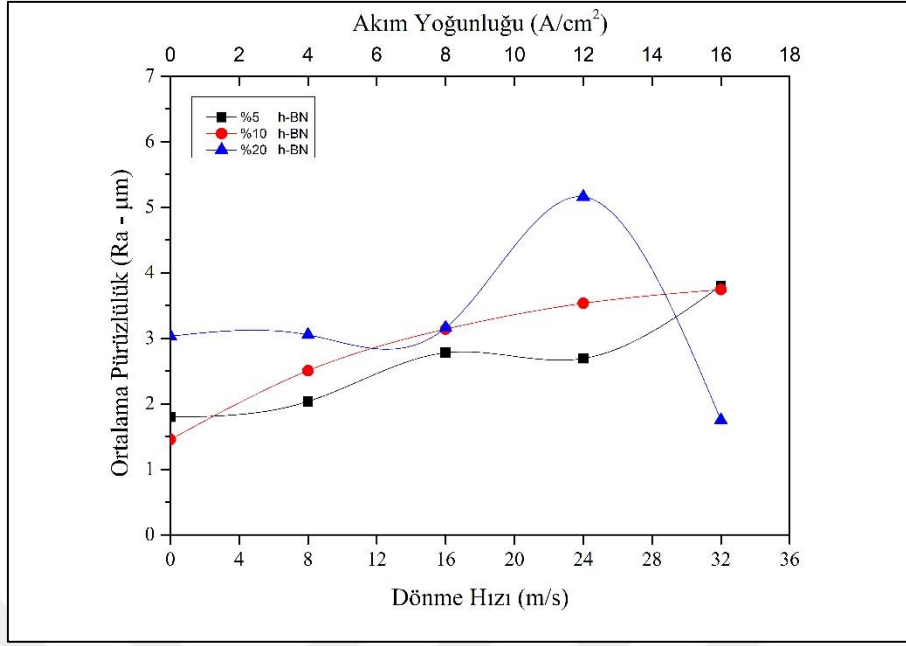
Şekil 99’da grafen katkıli fırça numunelerine ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri verilmiştir.



Şekil 99. Grafen katkıli numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri

Genel olarak numuneler incelendiğinde, artan dönme hızı ve akım yoğunluğu ile pürüzlülüğün azaldığı görülmektedir. Ayrıca grafikten de görüleceği gibi grafen oranı %30 olan numunede yüzey pürüzlülüğü en yüksek değerleri göstermiştir.

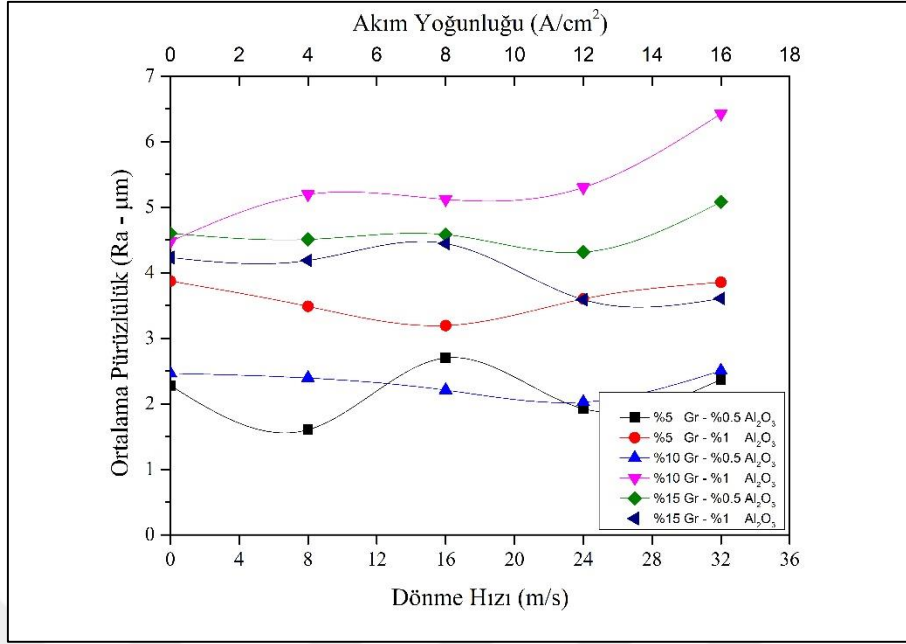
Şekil 100’de h-BN katkıli fırça numunelerine ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri verilmiştir.



Şekil 100. h-BN katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri

En yüksek yüzey pürüzlülüğü ağırlıkça %20 h-BN içeren numunede 24 m/s dönme hızı ve 12 A/cm² akım yoğunluğu değerinde ölçülmüştür ve ortalama pürüzlülük değeri 3 µm'nin üstündedir. Ayrıca grafen katkılı numunelerin aksine artan takviye oranı ile yüzey pürüzlülüğü artma eğilimi sergilemiştir.

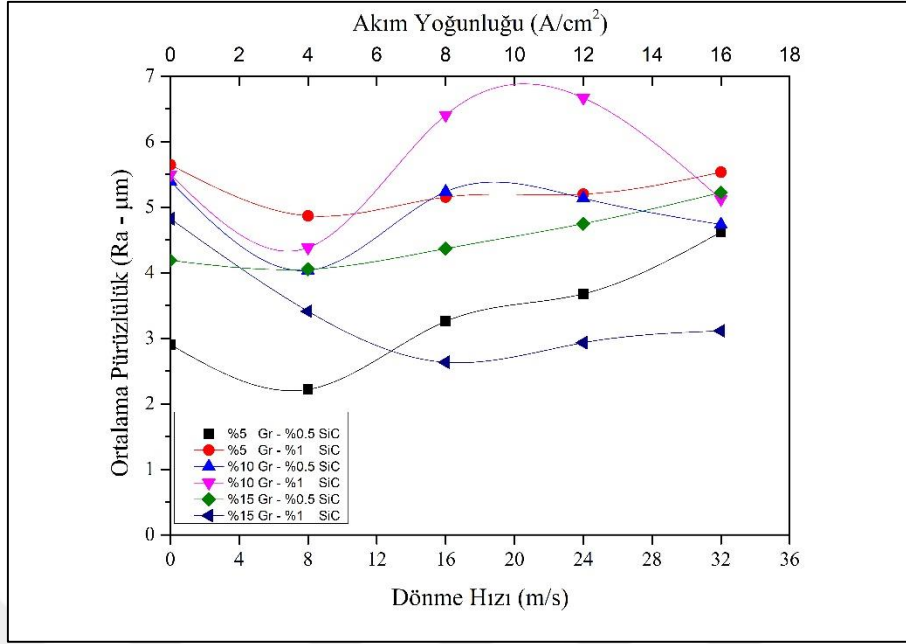
Şekil 101'de grafen ve Al₂O₃ katkılı fırça numunelerine ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri verilmiştir.



Şekil 101. Grafen - Al₂O₃ katkıli numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri

Gr – Al₂O₃ takviyeli numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ile grafen katkıli fırçaların yüzey pürüzlülüklerinin hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür. Ancak istisnai bir durum olarak ağırlıkça %10 grafen ve %1 alümina takviyesi bulunan numunede pürüzlülük değerinin 5 µm'nin üstüne çıktığı görülmektedir.

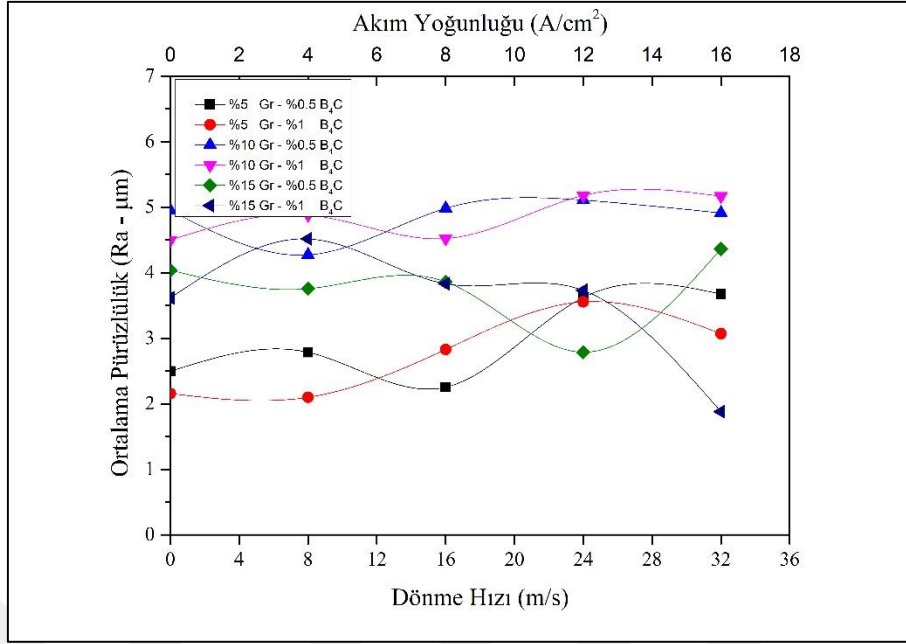
Şekil 102'de grafen ve SiC katkıli numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri verilmiştir.



Şekil 102. Grafen ve SiC katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri

Grafikten de görüleceği üzere bu gruba ait numunelerde başlangıç değerleri bile oldukça yüksek ölçülmüştür. Ağırlıkça %15 Gr-%1 SiC içeren numune dışındaki fırçaların genel olarak artan dönme hızı ve akım yoğunluğu ile artan yüzey pürüzlüğü eğilimi sergilediği tespit edilmiştir.

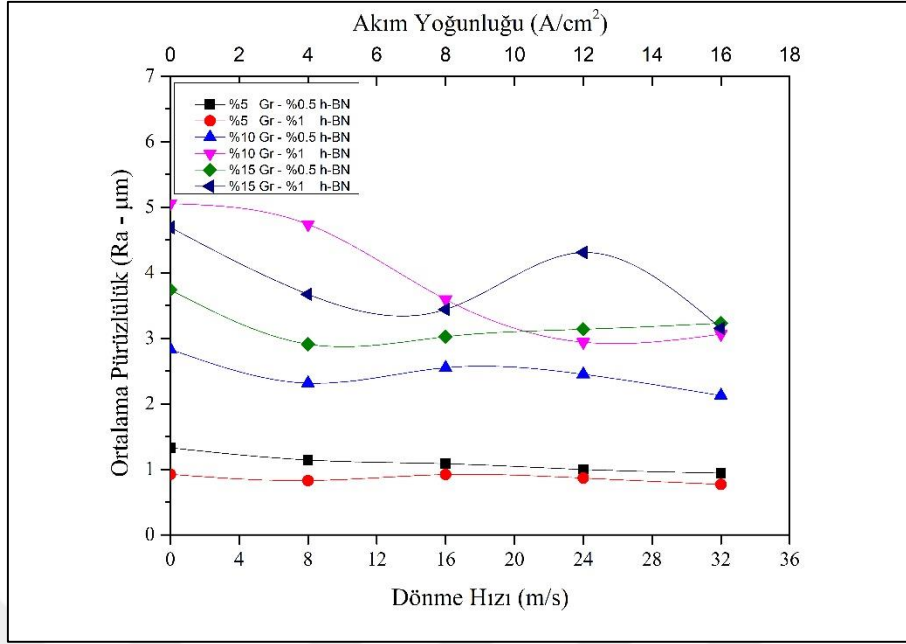
Şekil 103 grafen ve B₄C katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülüklerini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 103. Grafen ve B₄C katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri

Numunelerin pürüzlülük değerleri küçük dalgalanmalar sergilese de genel davranışlarının rodaj sonrası sahip oldukları yüzey pürüzlülüklerini korumaya yönelik olduğu saptanmıştır.

Şekil 104 grafen ve h-BN katkılı numunelere ait ortalama yüzey pürüzlülüklerini gösteren grafik verilmiştir.



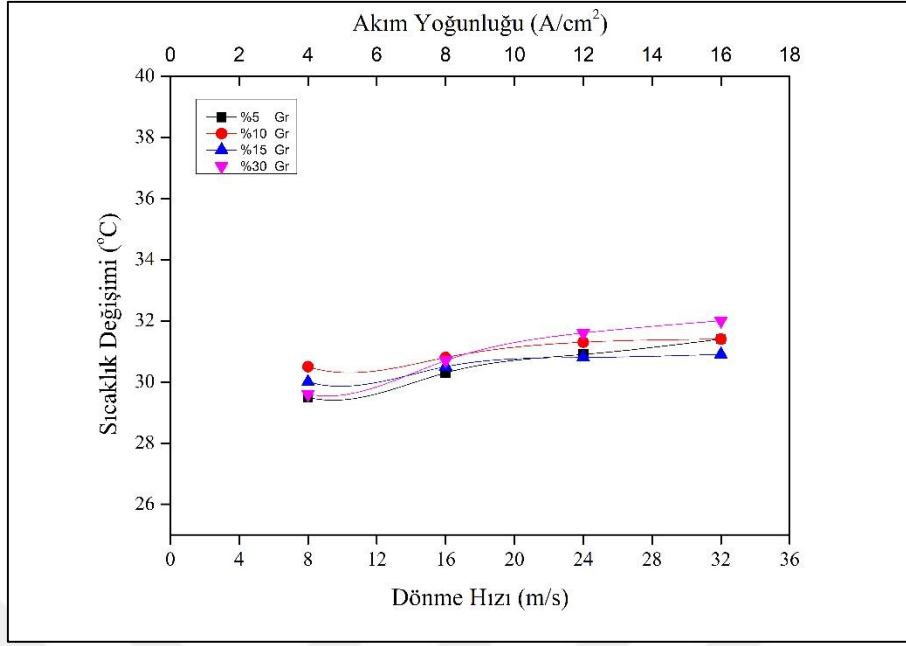
Şekil 104. Grafen - h-BN katkılı numunelere ait Ra – ortalama yüzey pürüzlülükleri

En yüksek pürüzlülük değerini gösteren %10 grafen - %1 h-BN takviyeli numunenin yüzey pürüzlülüğü bir miktar düştükten sonra genel olarak pürüzlülüğünü muhafaza etmiştir. Diğer numunelerde ise önce az bir miktar azalan pürüzlülük değerleri sonraki çalışma parametrelerinde hemen hemen sabit bir pürüzlülük değeri sergilediği belirlenmiştir.

3.7. Fırça Numunelerinin Sıcaklık Değişimi

Oda sıcaklığında bulunan fırçalara ait sıcaklık değerleri sırasıyla 8, 16, 24, 32 m/s'lik dönme hızların ve 4, 8, 12, 16 A/cm² akım yoğunluğu değerlerinde tamamlanan performans deneyleri sonrasında alınan ortalama sıcaklık değerlerini içermekte olup Şekil 105 – 110 arasında verilmiştir.

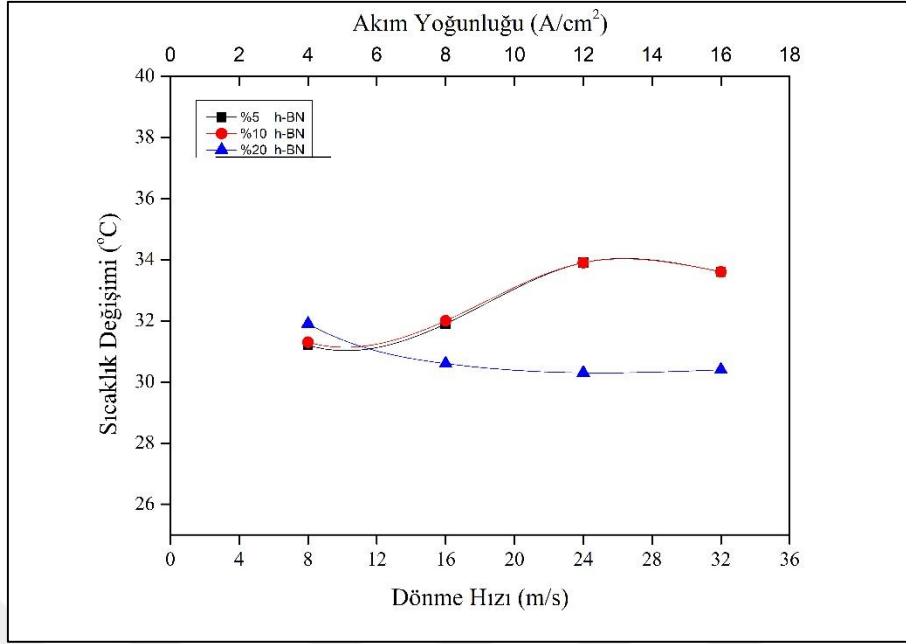
Şekil 105'te grafen katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları sıcaklık değerleri verilmiştir.



Şekil 105. Grafen katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları sıcaklık değerleri

Fırça sıcaklıklarının artan çalışma hızları ve voltajları ile arttığı tespit edilmiştir. En yüksek sıcaklık değerinin ise %30 grafen katkılı fırçada olduğu görülmüştür.

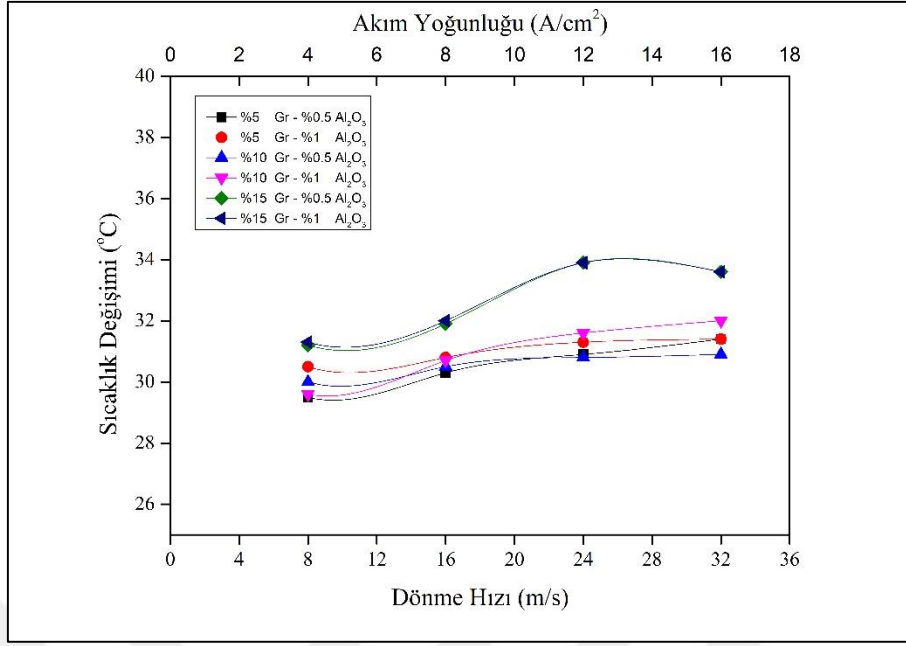
Şekil 106'da grafen ve h-BN katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları ortalama sıcaklık değerleri verilmiştir.



Şekil 106. h-BN katkıli bakır fırçaların ortalama sıcaklık değerleri

Şekil 106'da verilen grafik incelendiğinde sıcaklık değerinin ağırlıkça %5 ve %10 h-BN takviyeli numunelerde artan dönme hızı ve akım yoğunluğu ile önce bir miktar arttığı sonrasında ise hemen hemen sabit kaldığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %20 h-BN takviyeli numunede ise artan çalışma parametreleri ile sıcaklık azalma eğilimi sergilemiştir. Ortalamalara bakıldığında ise en yüksek sıcaklık değerine % 10 h-BN katkıli fırça numunesinde 32.7 °C olarak gerçekteleşmiştir.

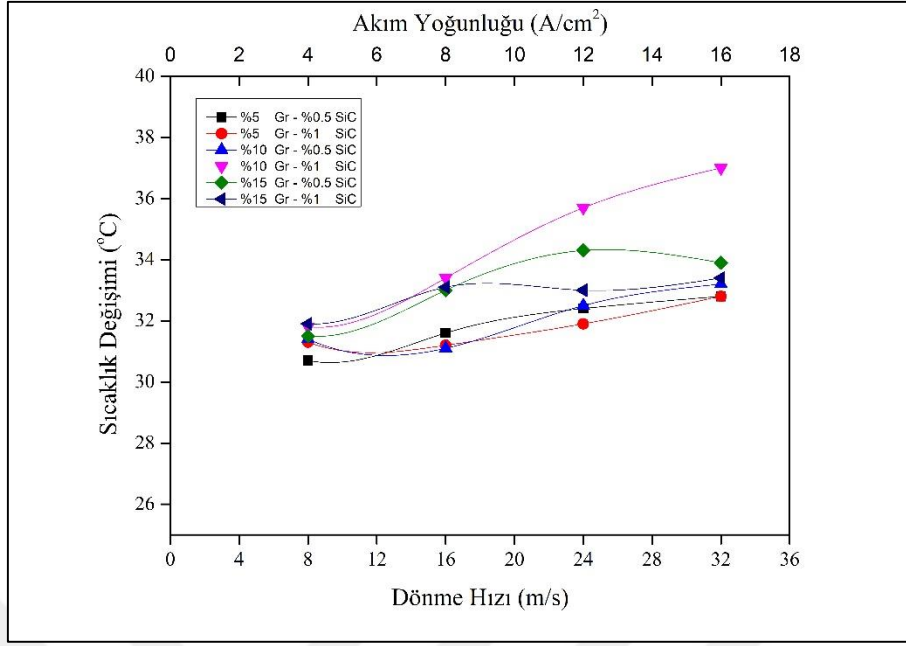
Şekil 107'de grafen Al₂O₃ katkıli fırça numunelerinin çalışma sıcaklığı değerleri verilmiştir.



Şekil 107. Grafen ve Al₂O₃ katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları sıcaklık değerleri

Grafikten de görüldüğü gibi numunelerin çalışma parametrelerine karşı gösterdikleri sıcaklık değerleri benzer eğilim sergilemektedir. Sıcaklık değerleri arasında çok yüksek farklar bulunmasa da en yüksek çalışma sıcaklığına, %15 grafen takviyeli %0.5 ve %1 Al₂O₃ katkılı numunelerde ulaşılmıştır.

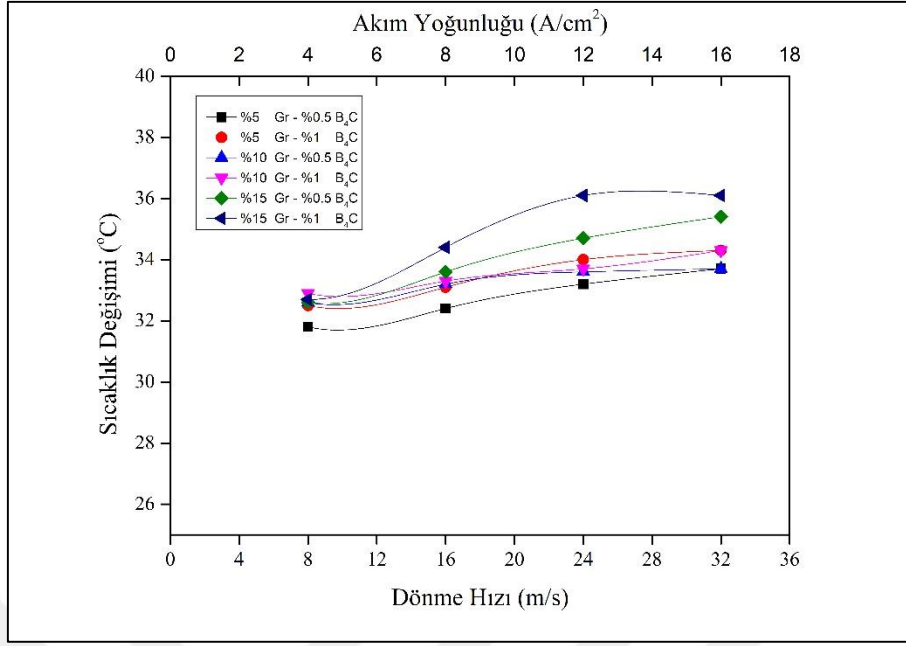
Şekil 108'de grafene ek SiC takviye malzemesi ile üretilen bakır matrisli fırçalara ait ortalama çalışma sıcaklıklarını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 108. Grafen ve SiC katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları sıcaklık değerleri

En yüksek ortalama sıcaklık değerine 32 m/s dönme hızı ve 16 A/cm² akım yoğunluğunda %10 grafene ilave %1 SiC içeren numunede yaklaşık 34.5 °C olarak gerçekleşmiştir. Numunelerin genel davranışı ise artan çalışma parametreleri ile artan sıcaklık davranışı şeklindedir.

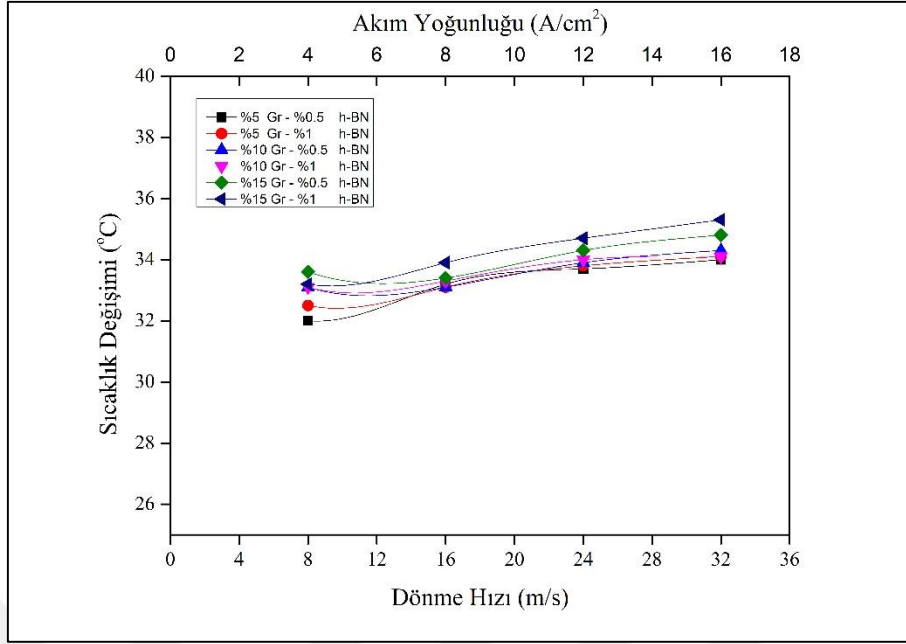
Şekil 109'da grafene ek B₄C takviye malzemesi ile üretilen bakır matrisli fırçalara ait çalışma sıcaklıklarını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 109. Grafen ve B₄C katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları sıcaklık değerleri

En yüksek sıcaklık değerine 32 m/s dönme hızı ve 16 A/cm² akım yoğunluğunda %15 grafene ve %1 B₄C içeren numunede ulaşılmış olmasına rağmen genel olarak sıcaklık değerleri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır.

Şekil 110'da grafene ek h-BN takviye malzemesi ile üretilen bakır matrisli fırçalara ait çalışma sıcaklıklarını gösteren grafik verilmiştir.



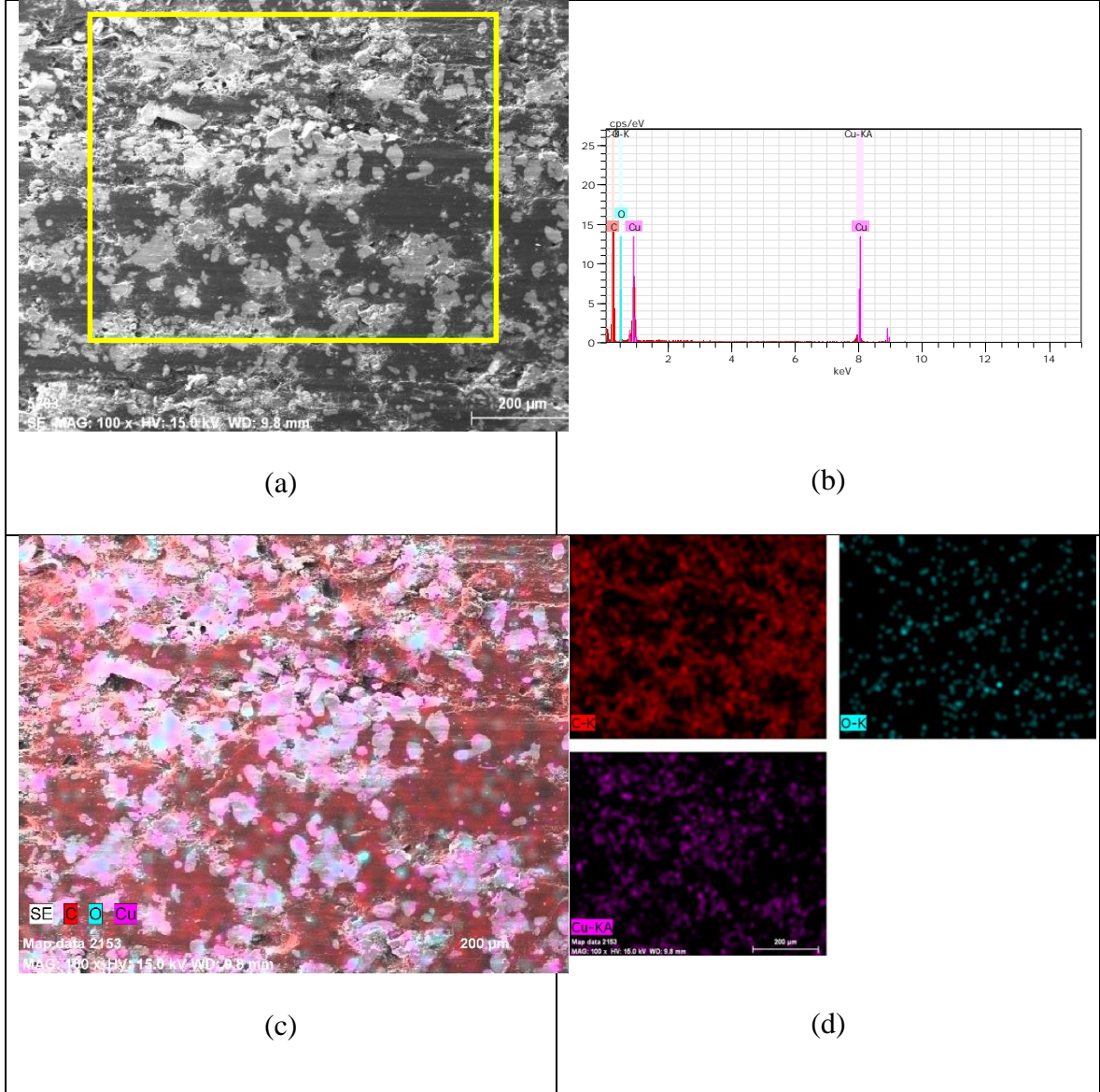
Şekil 110. Grafen ve h-BN katkılı bakır fırçaların çalışma sırasında oluşturdukları sıcaklık değerleri

Genel sıcaklık davranışı artan çalışma parametreleri ile artış yönündedir. Ancak grafikten de görüleceği üzere hem farklı bileşimlerde hem de farklı çalışma hızlarında sıcaklık değerleri birbirine çok yakındır. Sıcaklık değerlerinin bu gruptaki numuneler için 33.2 ile 34.2 °C arasında değiştiği belirlenmiştir.

3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS İncelemeleri

Şekil 111 ile 147 arasında verilen görüntüler numunelerin elektro-mekanik aşınma deneylerinden sonra aşınma yüzeyine yapılan EDS ve SEM incelemelerini kapsamaktadır. EDS analizleri her grup için bir tane kullanılmış olup hangi numuneye ait olduğu belirtilmiştir.

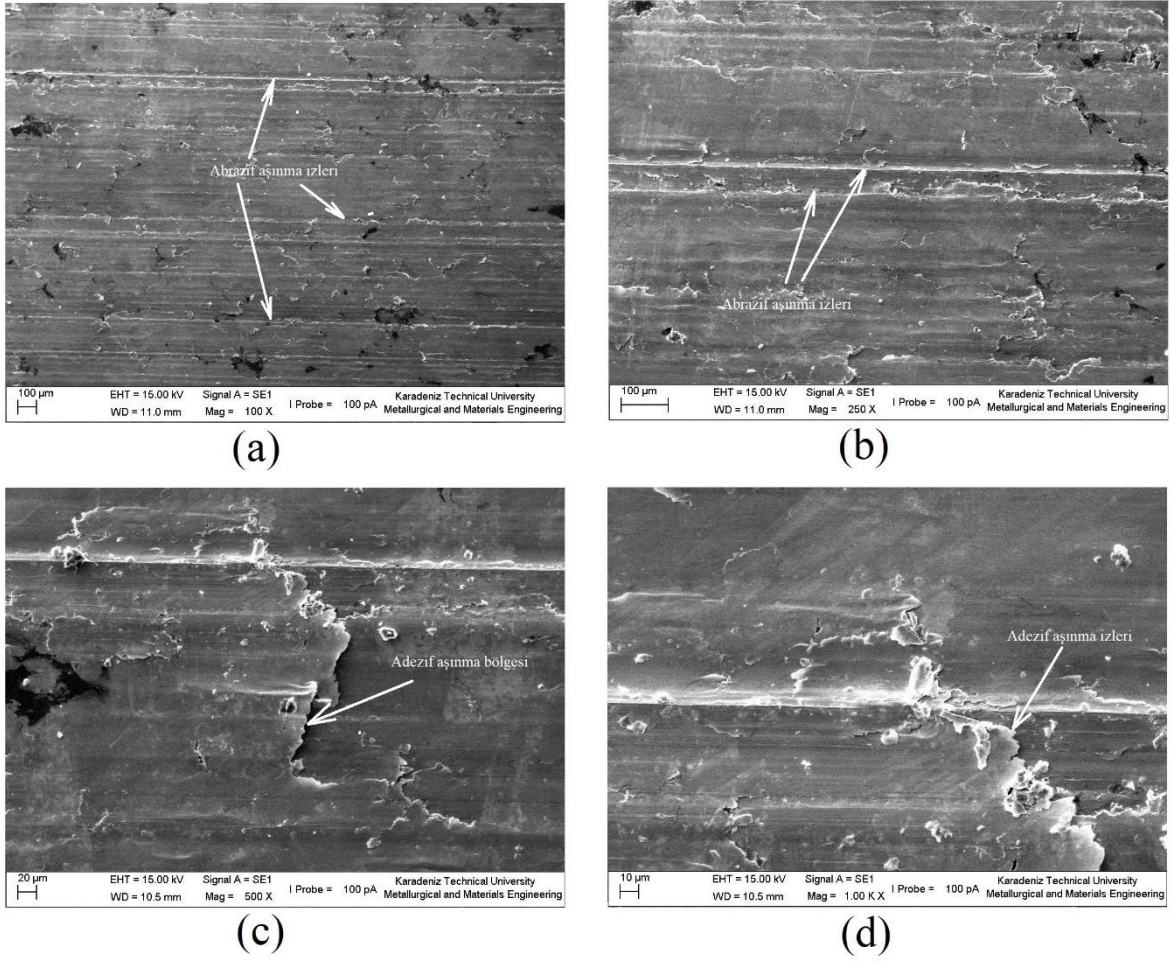
Şekil 111 ağırlıkça %30 grafen katkılı bakır fırçaya yapılan EDS haritalama metodunu göstermektedir.



Şekil 111. %30 Grafen katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi) a) Haritalama yapılan alan b) Elementel analiz c) Haritalama yapılan alandaki elementel dağılım d) Haritalamada bulunan elementel dağılımın ayrı ayrı dağılımı (C-K, O-K, Cu-KA Mag:100x HV:15.0kV)

Şekil 112 - 115 arasındaki şekiller grafen katkılı bakır fırçaların ayrı ayrı ve değişik büyütme ölçeklerindeki performans deneyleri sonrası aşınma yüzeyini göstermektedir.

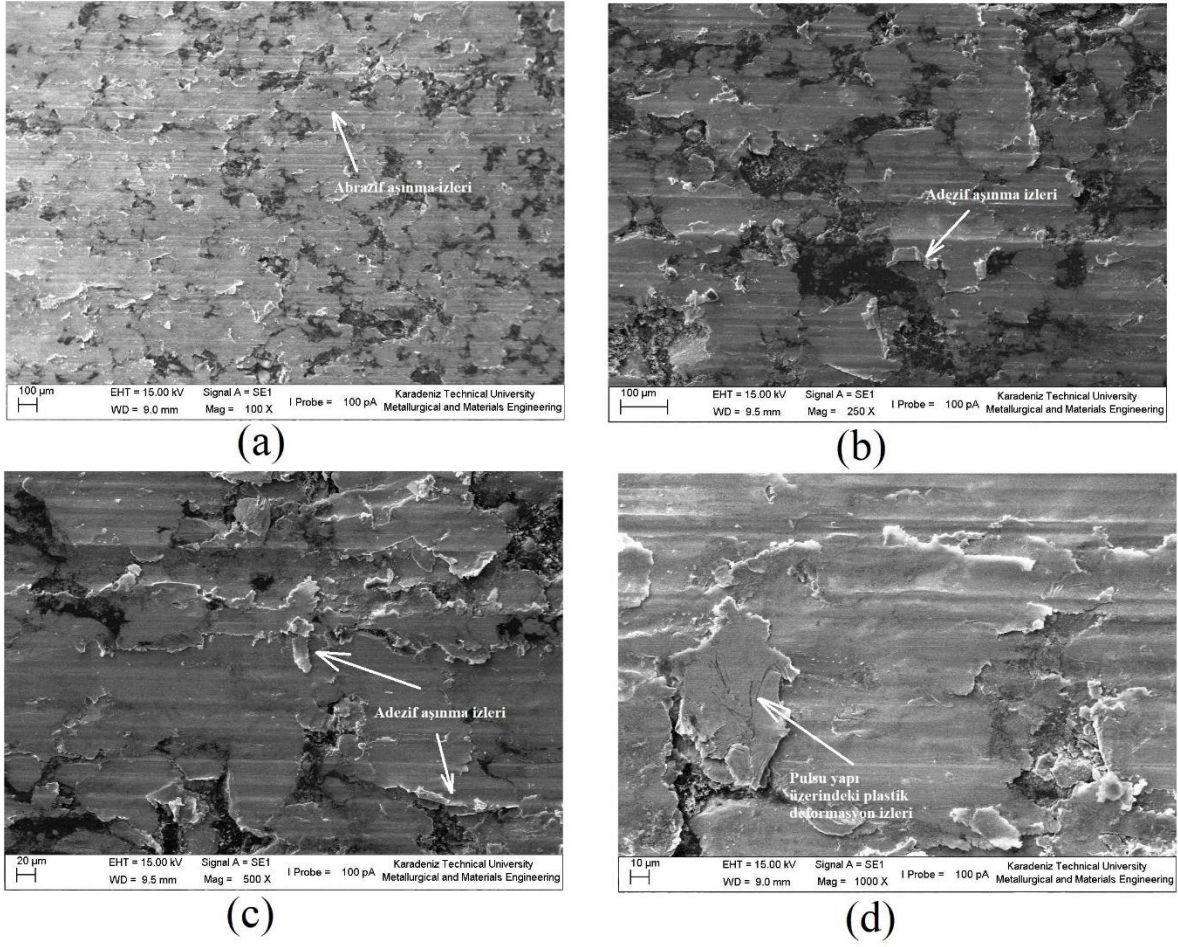
Şekil 112 ağırlıkça %5 grafen içeren numuneye ait farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntülerini göstermektedir.



Şekil 112. %5 Gr katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Görüntüler incelendiğinde aşınma mekanizması olarak hem abrazif hem de adezif aşınma belirtileri görülmüştür. İki aşınma mekanizmasının da hemen hemen aynı yoğunlukta dağıldığı söylenebilir.

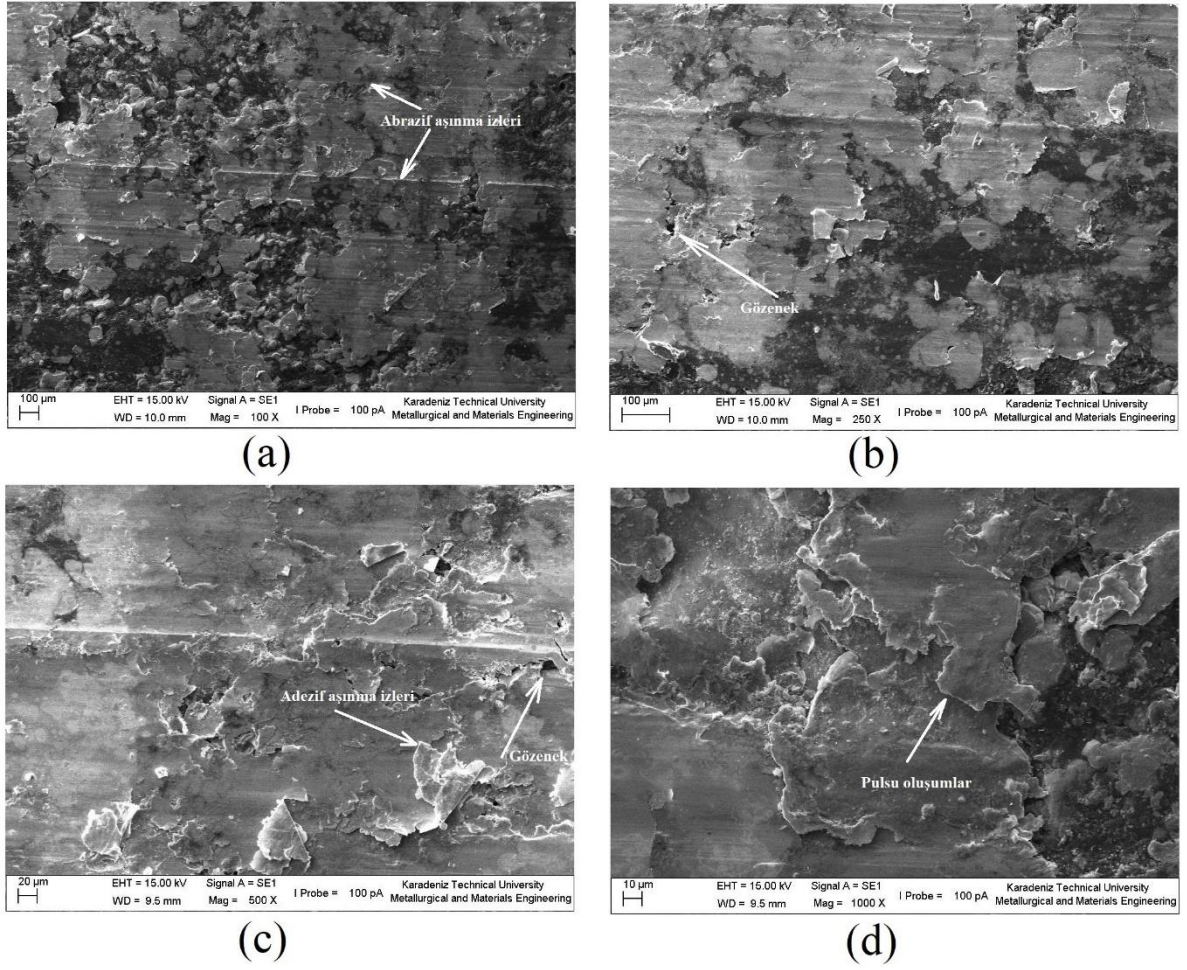
Şekil 113 ağırlıkça %10 grafen içeren bakır fırçanın farklı büyütmelelerdeki SEM incelemesini göstermektedir.



Şekil 113. % 10 Gr katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Grafen oranının artmasıyla adezif aşınma mekanizmasının yoğunluğunun artmaya başladığı görülmektedir. Abrazif aşınma izleri olan çizikler yapıda bulunmasına karşın belirginlikleri (derinlikleri) azalmıştır. Ayrıca adezif aşınma ile oluşan pulsu yapıların üzerlerinde plastik deformasyon izleri de görülmektedir.

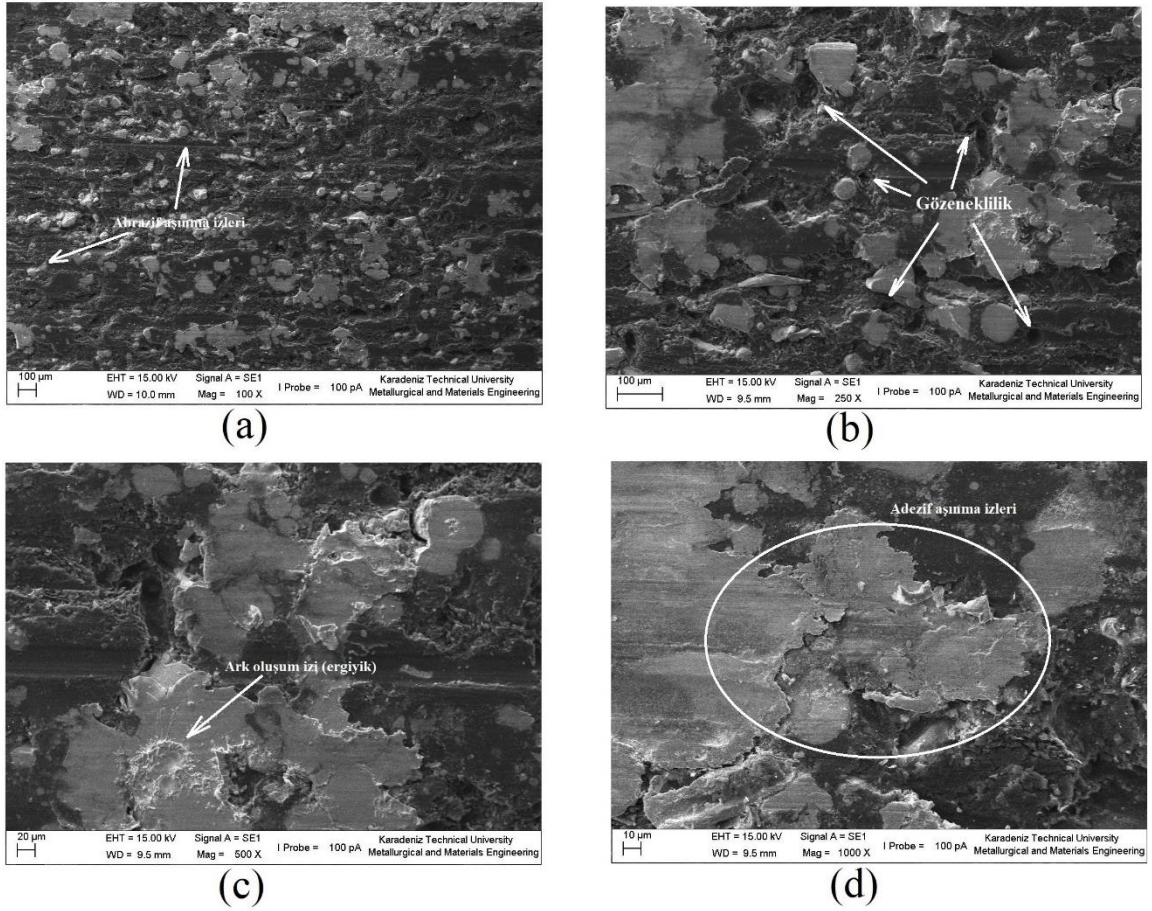
Şekil 114'te ağırlıkça %15 grafen içeren bakır fırçaya ait SEM görüntüleri gözükmemektedir.



Şekil 114. % 15 Gr katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Bu görüntüler incelendiğinde artan grafen oranı ile sertliği azalan numunedeki hem abrazyif aşınma mekanizmasına hem de adezif aşınma mekanizmasına ait izlerin oldukça belirgin hale geldiği görülmüştür. Ayrıca yüzeyde gözeneklerin varlığı da dikkat çekmektedir.

Şekil 115'te ağırlıkça %30 oranında grafen katkısının bakır fırça aşınma yüzeyi üzerindeki etkisini göstermektedir.

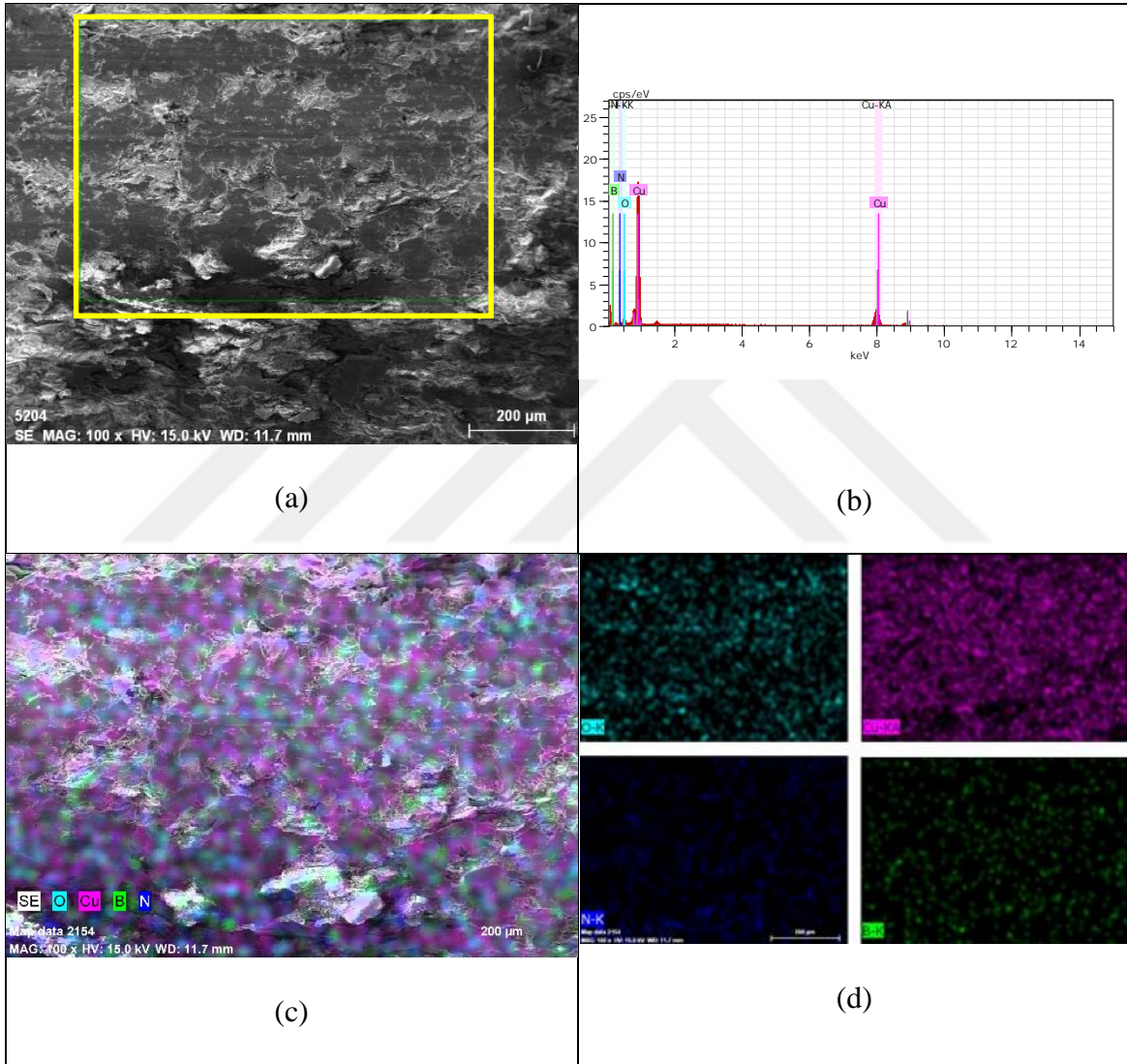


Şekil 115. %30 Gr katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Görüntülerde abrazyif çiziklerin derinliğinin ve yoğunluğunu arttığı görülmektedir. Bu durum grafenin yumuşak bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak Şekil 93'te verilen ağırlık kaybı grafiği göz önüne alındığında artan abrazyif aşınma izlerine karşılık ağırlık kaybını nispeten düşük kaldığı görülecektir. Bu durum ise grafenin bir başka özelliği olan yağlayıcılık ile açıklanabilir. Şöyle ki, her ne kadar oluşan izlerin yoğunluğu ve derinliği artış gösterse de adezif aşınma mekanizmasının etkin çalışmasıyla malzeme kaybı nispeten düşük mertebelerde kalmıştır. Ayrıca yapıdaki gözeneklerin de bir önceki numuneye göre arttığı saptanmıştır. Grafen takviyeli bakır fırçaların porozite oranları incelendiğinde, artan grafen takviyesi ile artan porozitenin etkisi aşınma yüzeyinde açıkça görülmektedir.

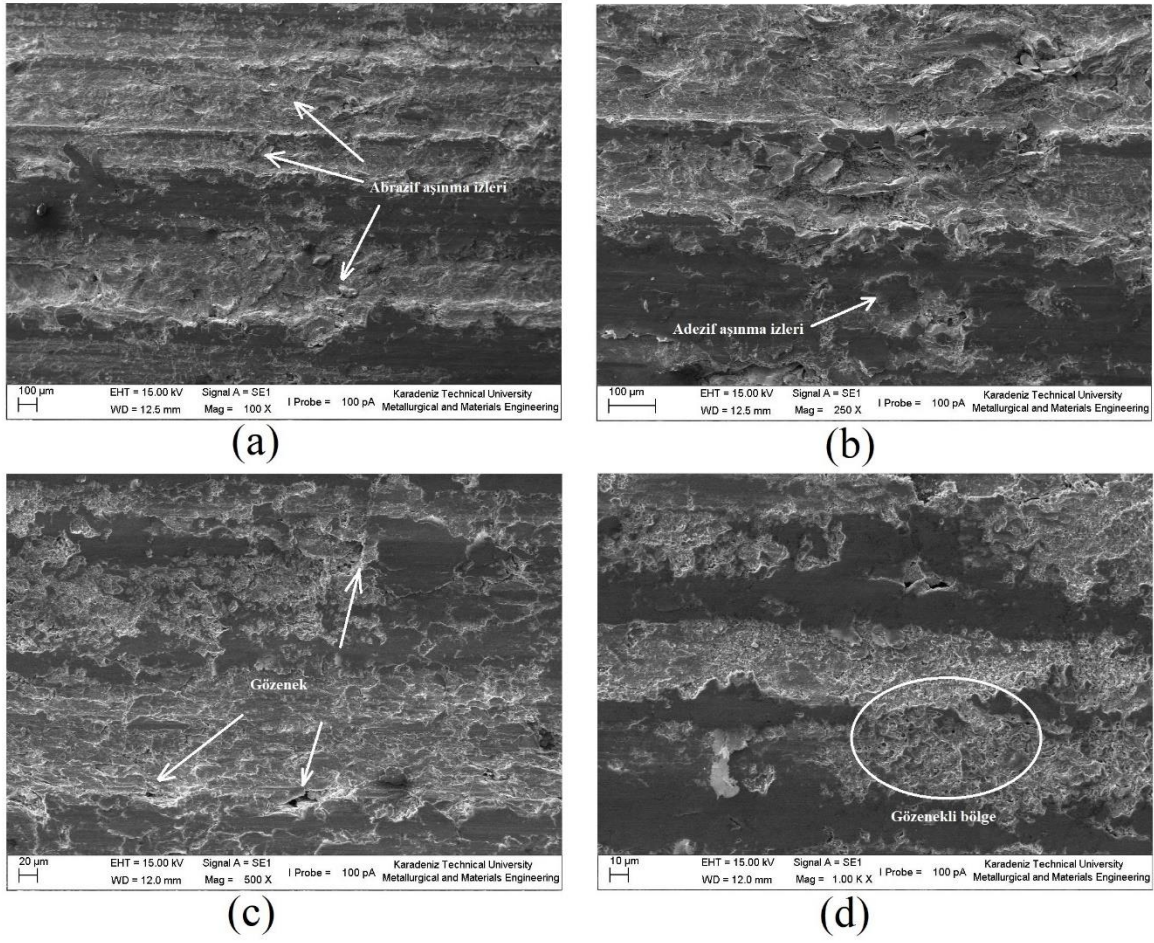
Yapıda başka bir aşınma mekanizması olan ark aşınması izlerine de rastlanmıştır. Şekil 53'te verilen performans grafiği incelendiğinde artan akım yoğunluğuna karşılık artan voltaj düşümünün etkisini yüzeyde ark aşınması şeklinde gösterdiği tespit edilmiştir.

Şekil 116 ağırlıkça %10 hegzagonal bor nitrür katkılı bakır fırçaya ait EDS analizini göstermektedir. Haritalama metodunun kullanıldığı bu EDS analizinde a) görüntüsü haritalama yapılan bölgeyi, b) görüntüsü haritalama yapılan bölgede tespit edilen elementleri, c) haritalama yapılan bölgedeki elementel analizin SEM görüntüsü üzerindeki toplu dağılımı ve d) görüntüsü elementel analizin siyah zemin üzerinde ayrı ayrı dağılımı göstermektedir.



Şekil 116. % 10 h-BN katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi) a) Haritalama yapılan alan b) Elementel analiz c) Haritalama yapılan alandaki elementel dağılım d) Haritalamada bulunan elementel dağılımın ayrı ayrı dağılımı (O-K, Cu-KA, B-K, N-K Mag:100x HV:15.0kV)

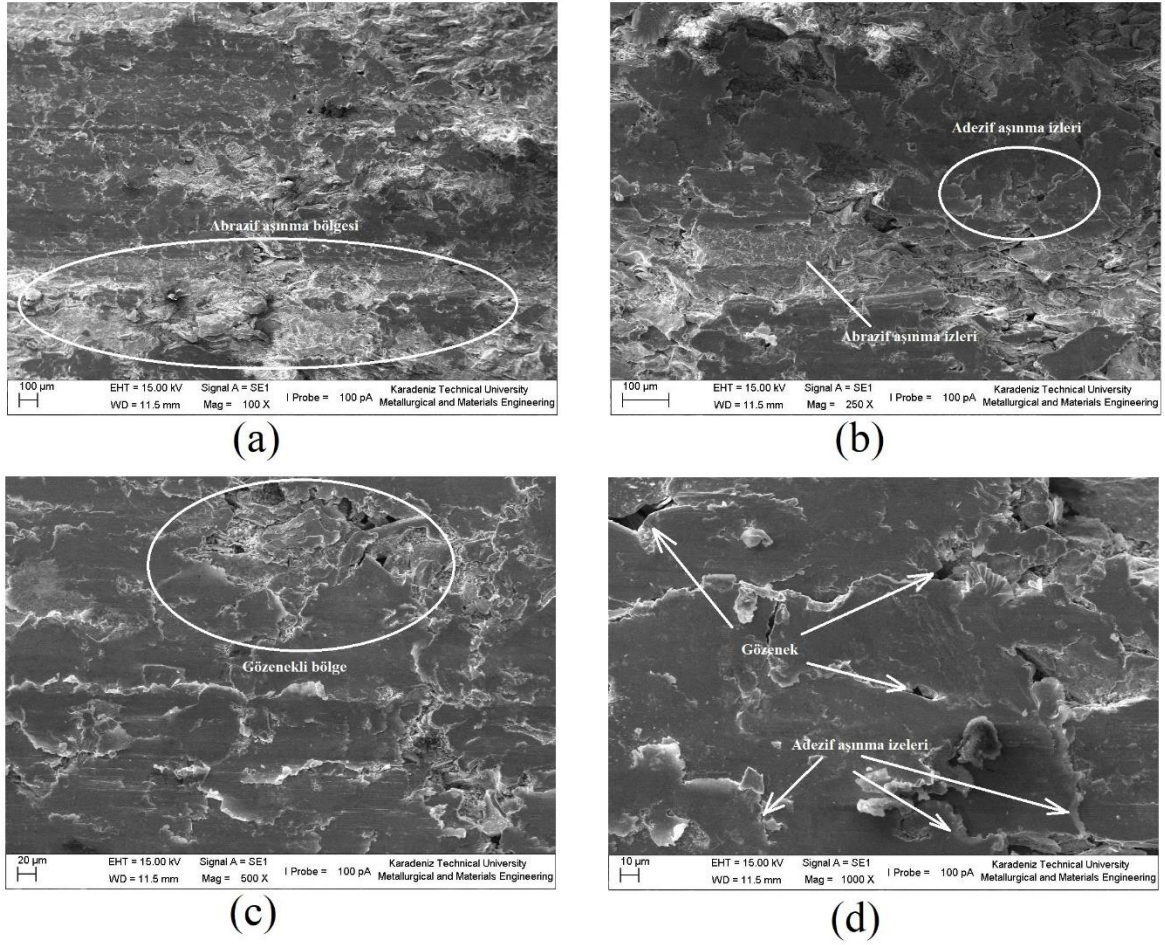
Şekil 117 ağırlıkça %5 h-BN içeren bakır fırçaya ait SEM görüntülerini içermektedir.



Şekil 117. %5 h-BN katkılı fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Bu görüntülere göre abrazif aşınma mekanizmasının oldukça yoğun işlediği hatta abrazif aşınmanın bazı bölgelerdeki adezif aşınma izlerini silecek kadar kuvvetli olduğu görülmektedir. Ayrıca numunede yer yer gözeneklerin bulunduğu görülmektedir.

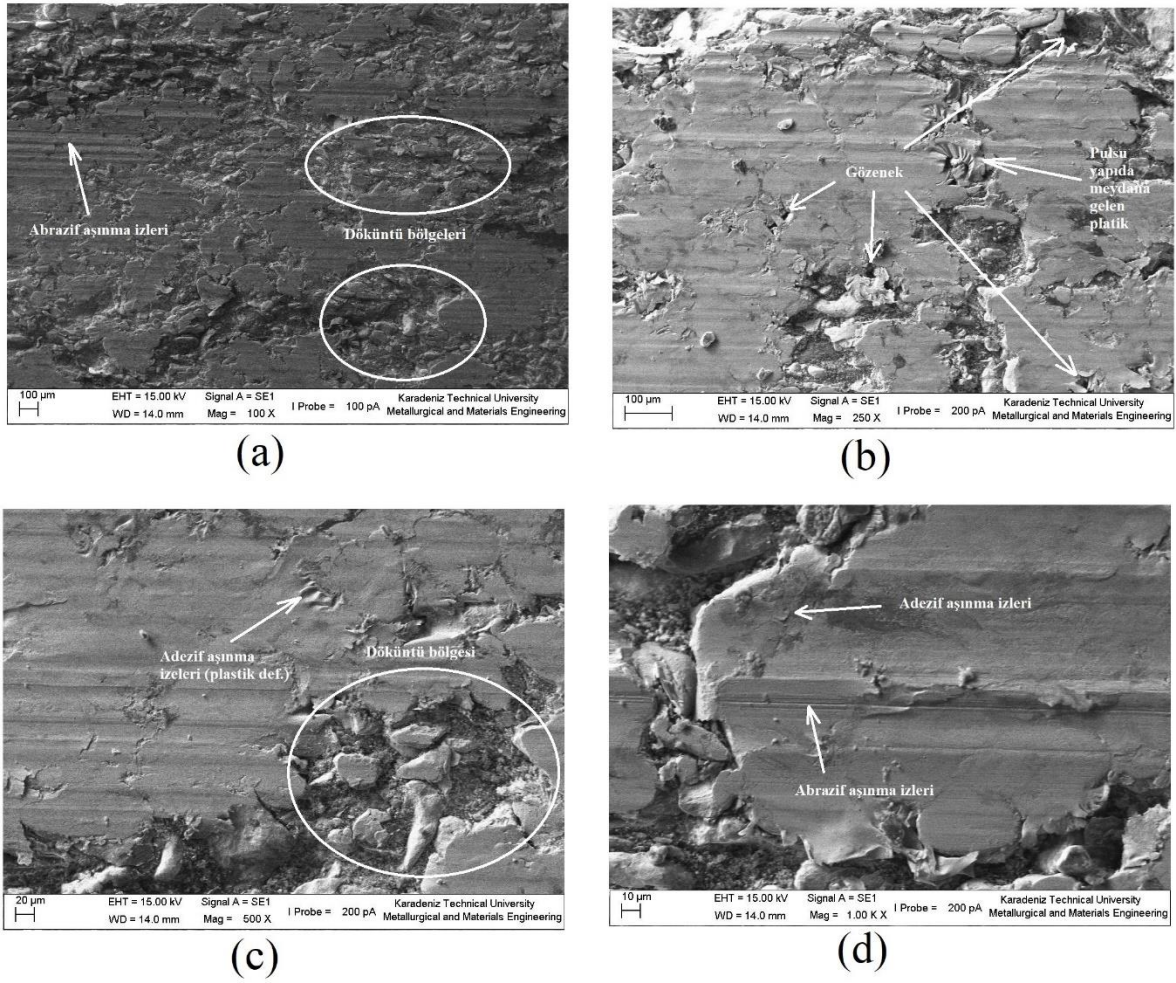
Şekil 118’de ağırlıkça %10 h-BN içeren bakır fırça numunesine ait aşınma sonrası yüzey SEM fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 118. %10 h-BN katkılı fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Şekillerde gözeneklilik miktarının artışı ilk göze çarpan unsurdur. Bunun dışında, abrazif aşınma izlerin çok daha derin ve geniş oldukları görülmektedir. Ayrıca adezif aşınma mekanizmasının da yoğun olduğu bölgeler göze çarpmaktadır. Ancak buradaki adezif aşınma izleri ezilme bölgeleri gibi görünmektedir.

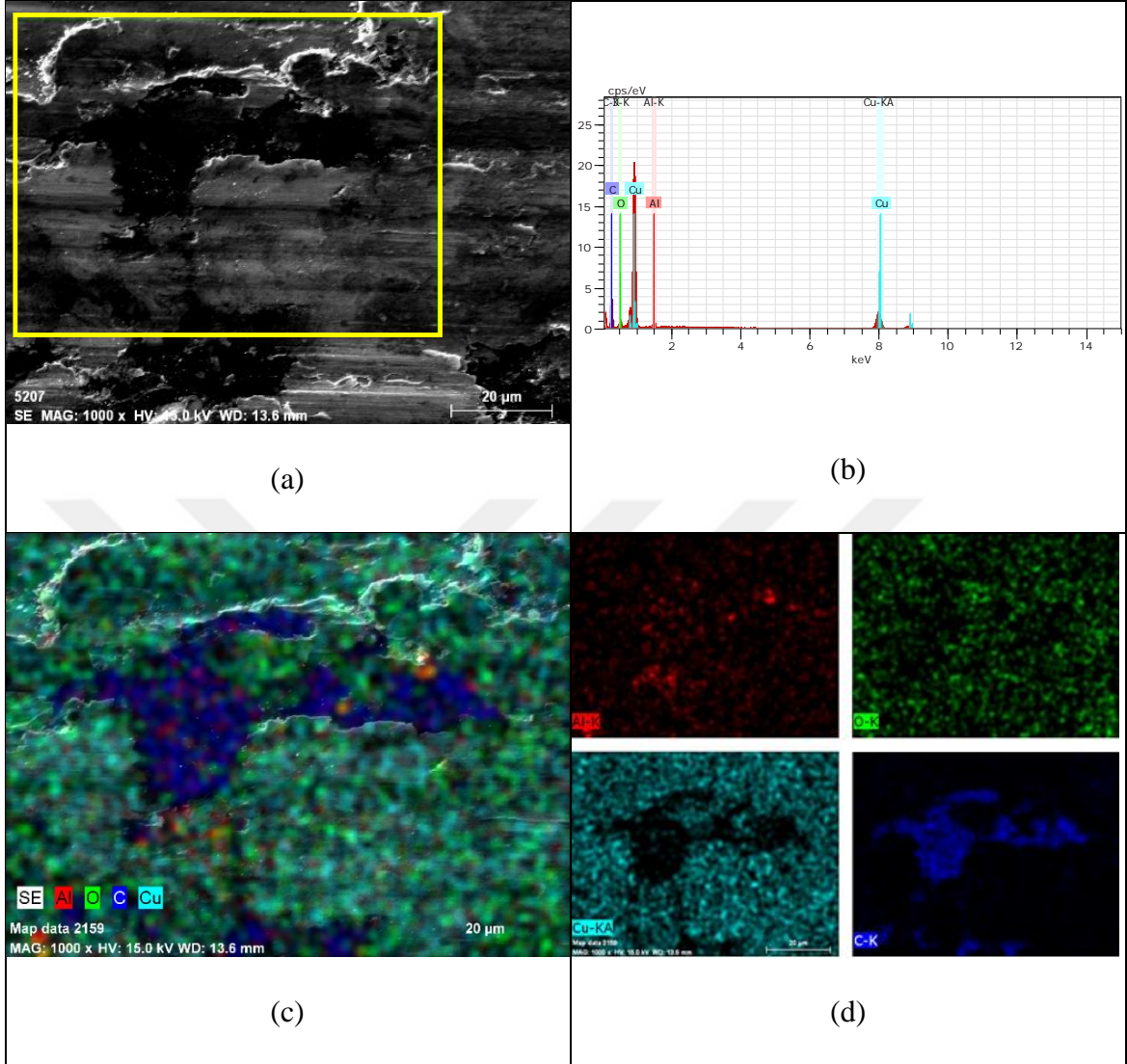
Şekil 119'da en yüksek oranda h-BN (%20) içeren bakır fırçaya ait aşınma sonrası SEM görüntülerini gösteren farklı büyütmelelerdeki fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 119. %20 h-BN bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

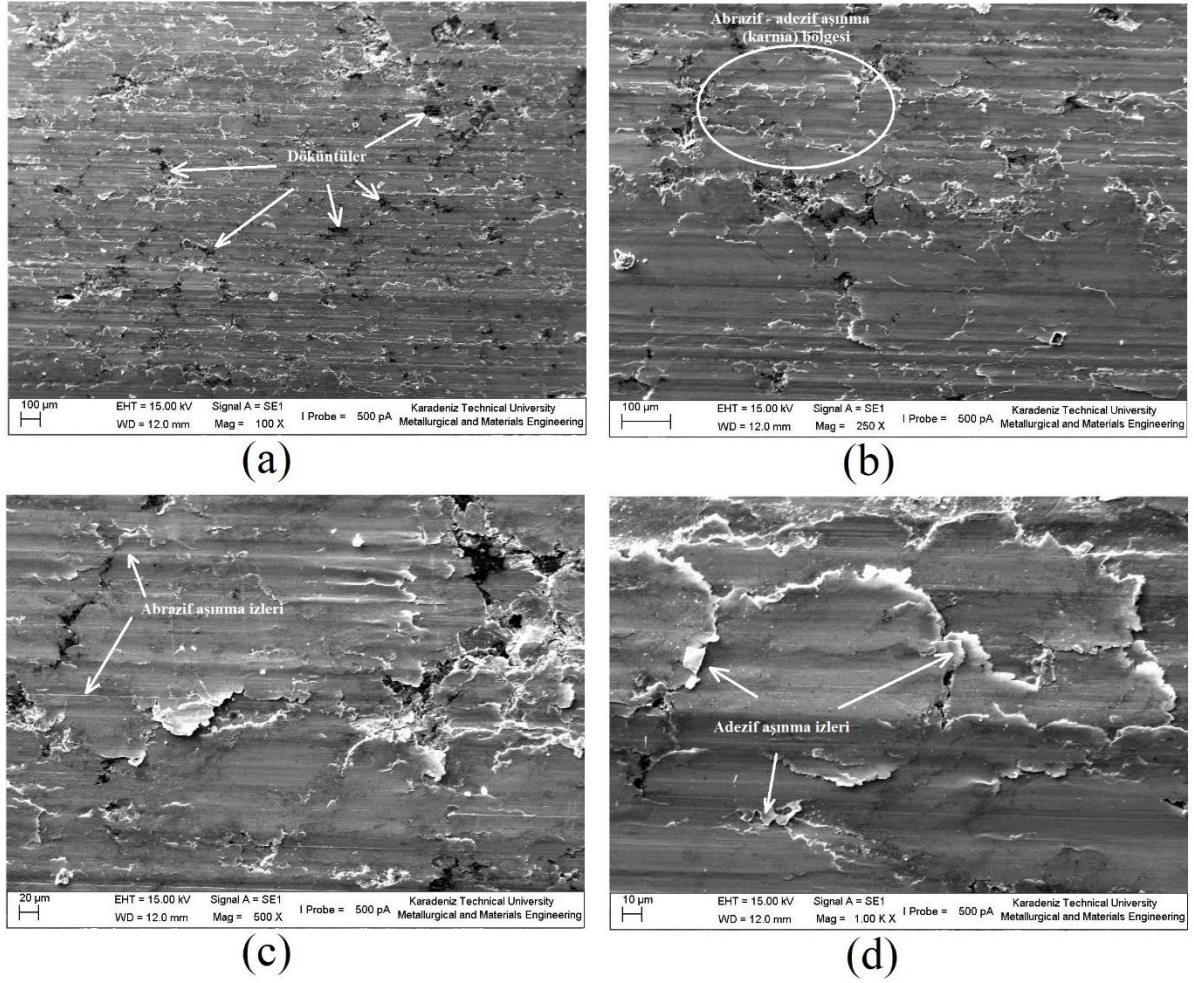
Bu görüntülerde gözenek yapısının daha da arttığı, abrazyon aşınma izlerinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca yüzeylerde dökülmeler mevcuttur. Grup içinde en fazla porozite ve tüm numuneler içinde en fazla ağırlık kaybı gösteren numunenin ağırlıkça %20 h-BN içeren bu numune olduğunu göz önüne alındığında aşınma yüzey görüntüsünün verilen sonuçlarla paralel doğrultuda çıktığı görülmüştür.

Şekil 120 ağırlıkça %10 grafit ve %0.5 alümina katkılı bakır fırçaya ait EDS analizini göstermektedir. EDS analizinin haritalama metodunun kullanıldığı bu analizinde a) görüntüsü haritalama yapılan bölgeyi, b) görüntüsü bu bölgede tespit edilen elementleri, c) görüntüsü haritalama yapılan bölgedeki elementel analizin SEM görüntüsü üzerindeki toplu dağılımı ve d) görüntüsü elementel analizin siyah zemin üzerinde ayrı ayrı dağılımı göstermektedir.



Şekil 120. % 10 Gr ve % 0,5 Al₂O₃ katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi)
 a) Haritalama yapılan alan b) Elementel analiz c) Haritalama yapılan alandaki elementel dağılım d) Haritalamada bulunan elementel dağılımın ayrı ayrı dağılımı (Al-K, O-K, C-K, Cu-KA Mag:1000x HV:15.0kV)

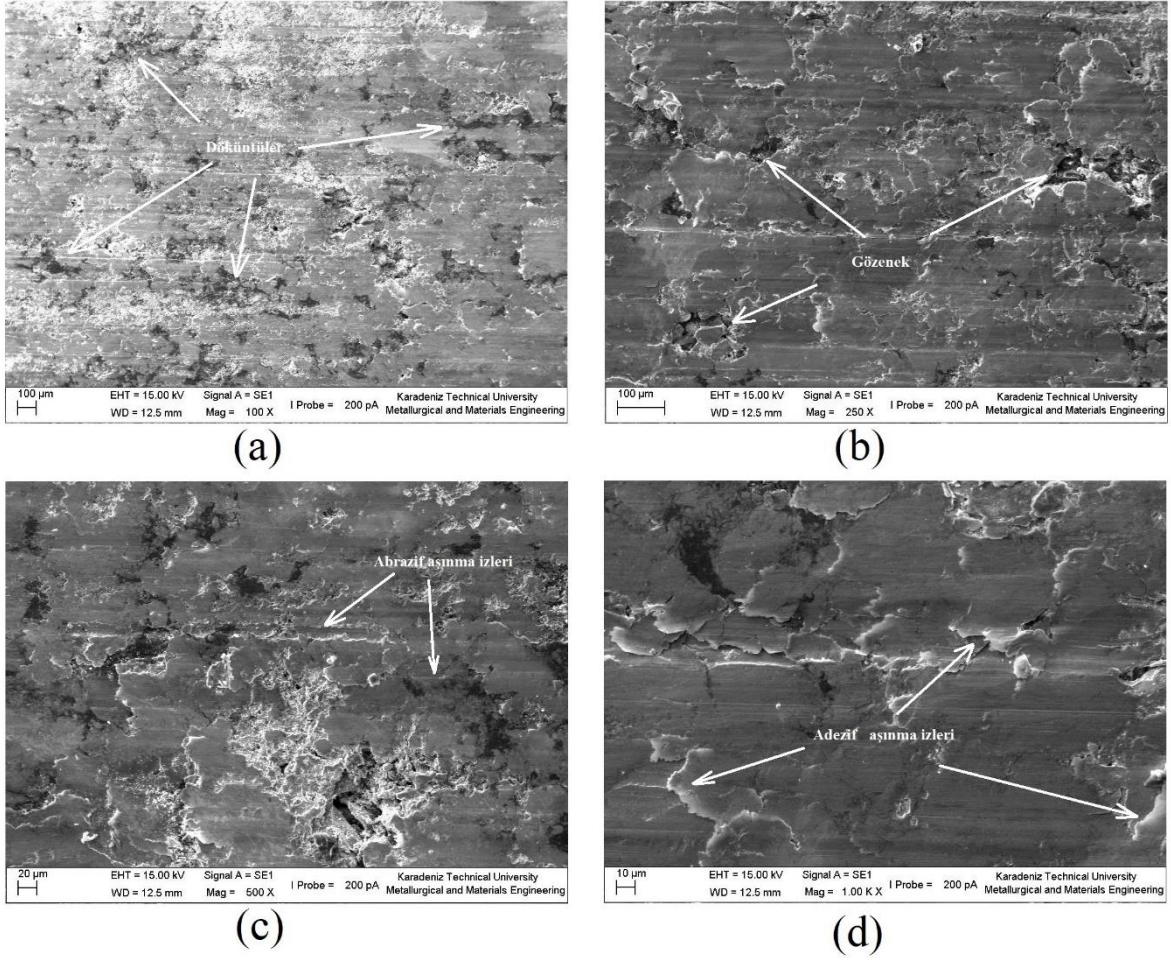
Şekil 121’de ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 alümina içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 121. %5 Gr ve %0.5 Al₂O₃ katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

SEM fotoğrafları incelendiğinde hem abrazif hem de adezif aşınma mekanizmasının neredeyse eşit oranlarda etkin olduğu görülmektedir. Ayrıca adezif aşınma işareti olan pullar arasında çok küçük dökümelere rastlanmıştır.

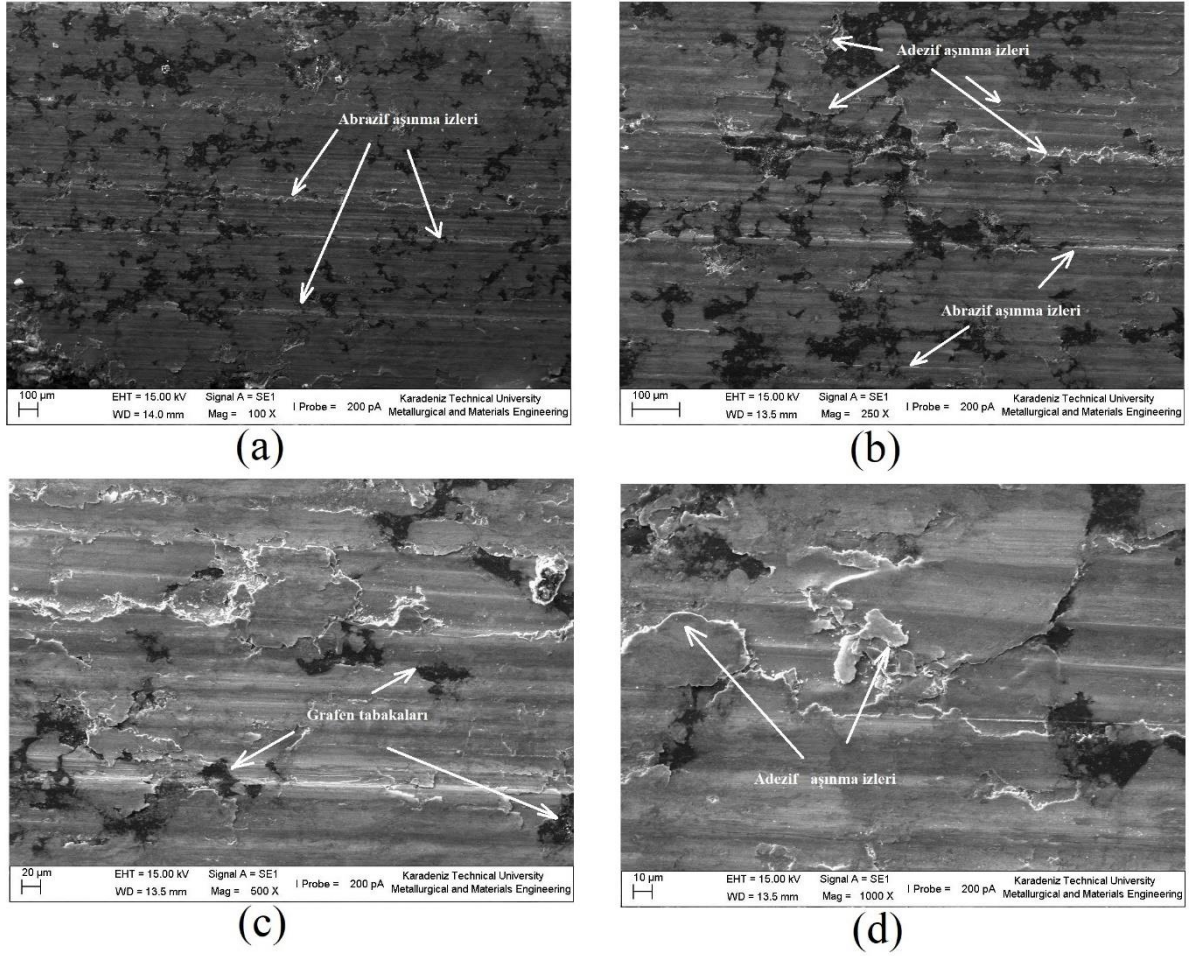
Şekil 122’de ağırlıkça %5 grafen ve %1 alümina içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 122. %5 Gr ve %1 Al_2O_3 katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Görüntüler incelendiğinde, küçük büyütmelerde abrasif aşınma izlerinin oldukça yoğun olduğu görülmektedir. Ancak yüzeyi etkileyen ağırlıklı aşınma mekanizması adezif aşınmadır. Adezif aşınma bölgelerinde bulunan pulsu yapılarıdaki dökülme miktarı bir önceki numuneye göre artış göstermiştir.

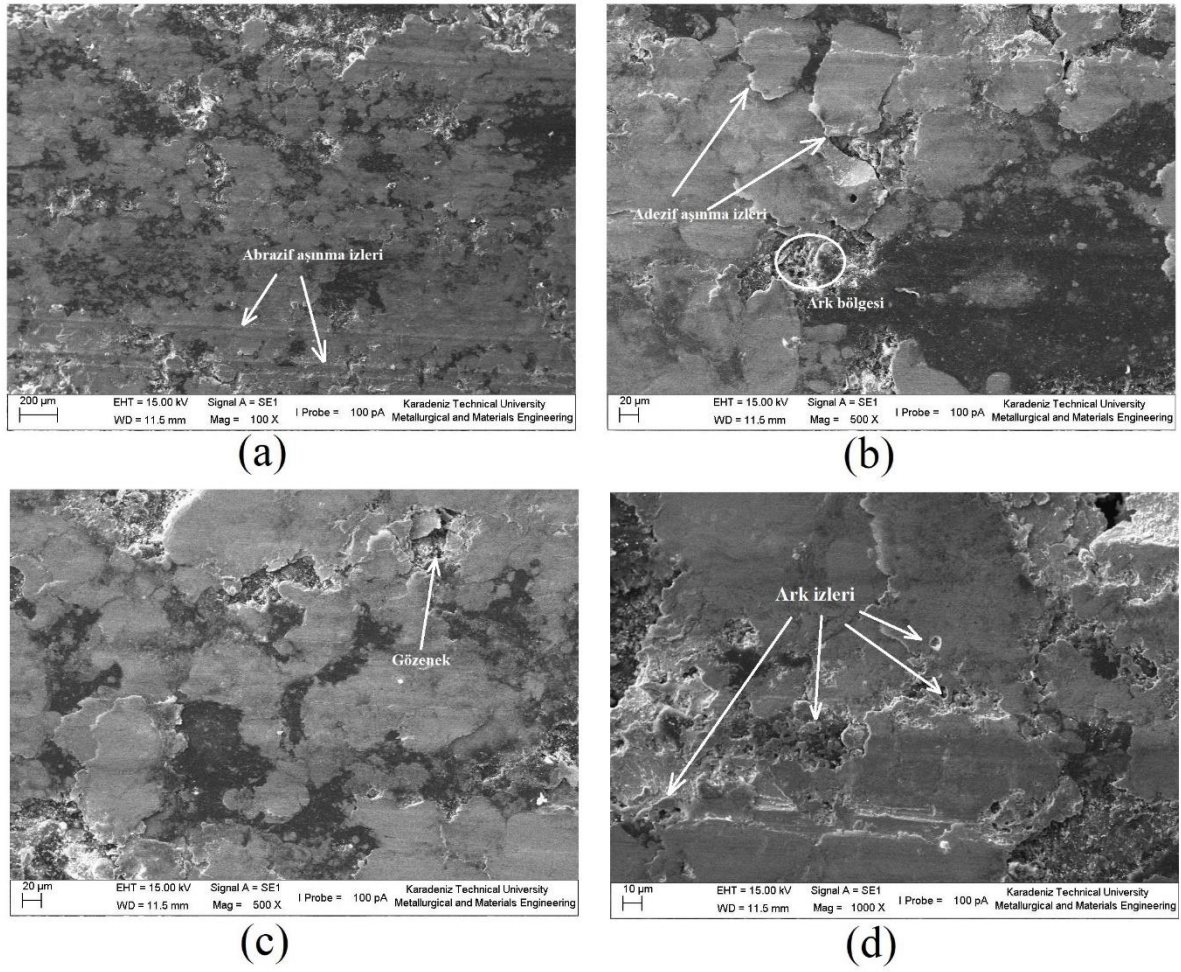
Şekil 123'te ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 alümina içeren numunenin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 123. % 10 Gr ve %0.5 Al_2O_3 katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Bu numunede de abrazyif aşınmaya eşlik eden adezyif aşınma izleri net bir şekilde görünmektedir. Ayrıca grafen oranı arttıkça yüzeyde görünen grafen tabakalarında da artış gözlenmiştir.

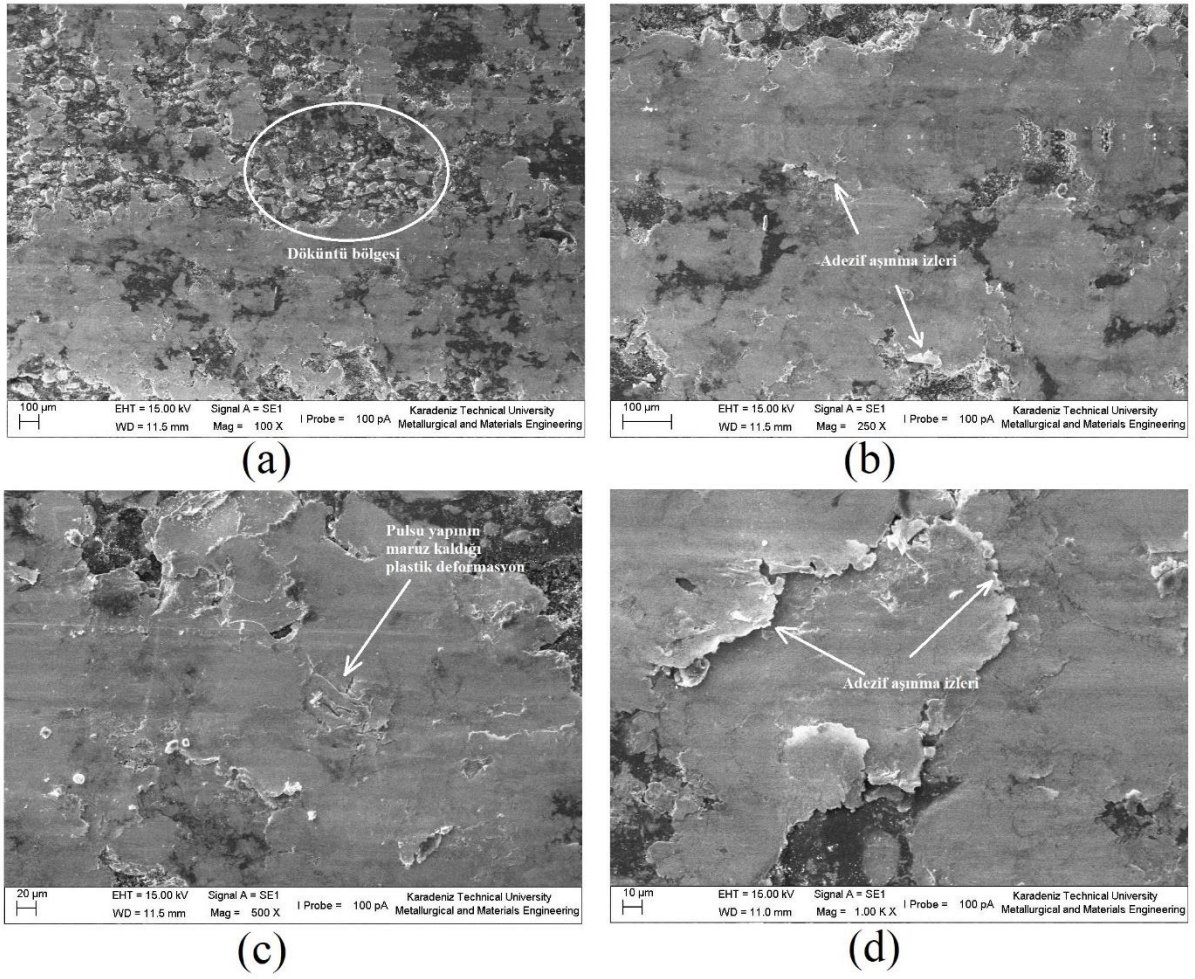
Şekil 124'te ağırlıkça %10 grafen ve %1 alümina içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 124. % 10 Gr ve % 1 Al_2O_3 katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Verilen numunede abrazif aşınma izleri olsa da etkin aşınma mekanizmasının adezif aşınma olduğu göze çarpmaktadır. Numune yüzeyinde kısmi dökülmeler ve nispeten gözenekli bir yapı bulunduğu görülmüştür. Gözeneklerin bazıları ark aşınmasına dair izler taşımaktadır. Şekil 60'ta verilen voltaj düşümü değerleri göz önüne alındığında, gruptaki numuneler içinde en yüksek voltaj düşümü değerini bu numunede olduğu görülmektedir. Dolayısıyla ile numunede ark aşınması izlerine rastlamak olağan bir sonuçtur.

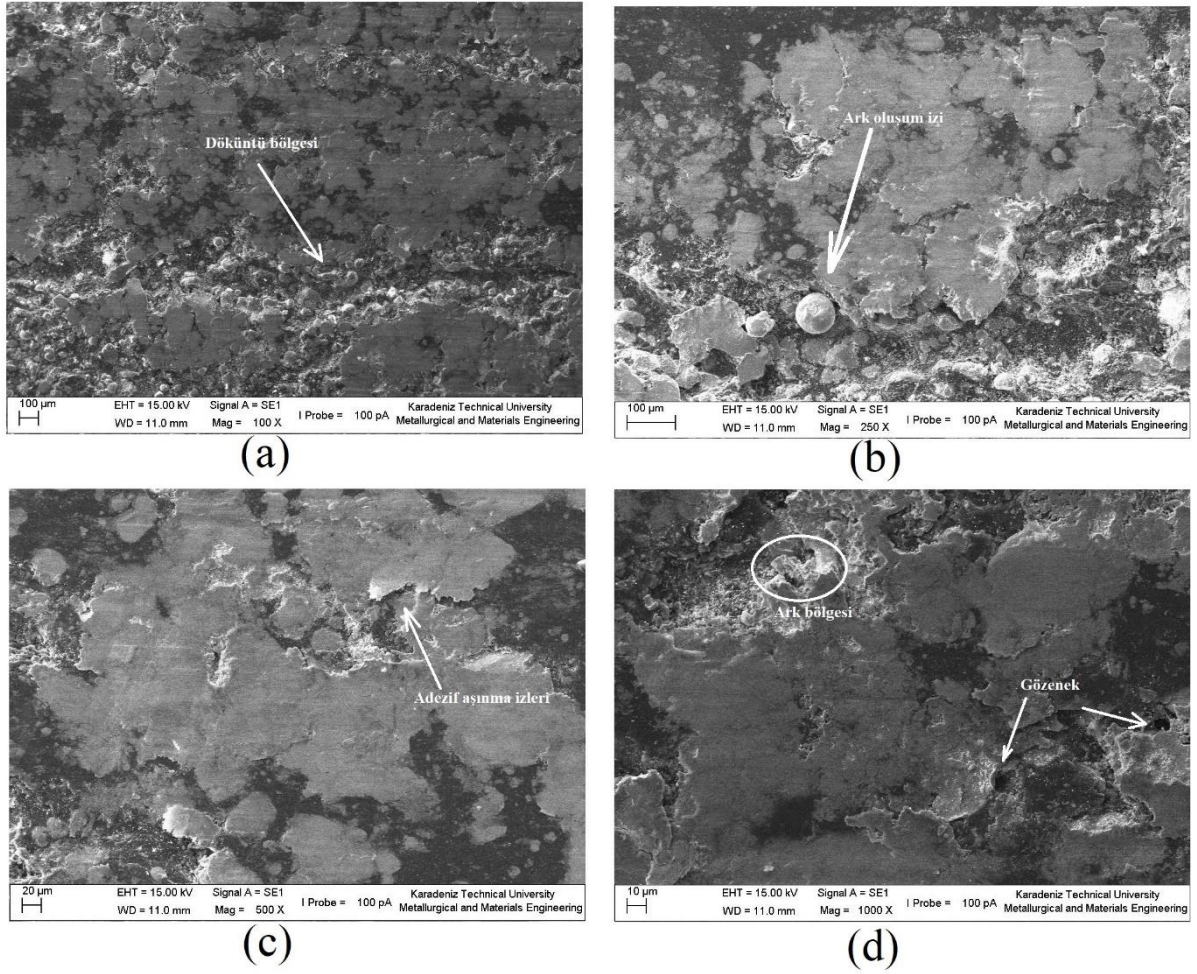
Şekil 125'te ağırlıkça %15 grafit ve %0.5 alümina içeren numunenin SEM görüntüleri farklı büyütme oranlarında verilmiştir.



Şekil 125. % 15 Gr ve %0.5 Al₂O₃ katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Etkin aşınma mekanizmasının adezif aşınma olduğu göze çarpan ilk bulgudur. Bununla birlikte, bir önceki numuneye nazaran yüzeyde daha büyük oranlarda dökülmeler görünmektedir. Şekil 125'teki -d- şekline bakıldığında adezif aşınmadan kaynaklanan pulsu yapı ve bu yapının yüzeyden ayrılacakmış gibi durduğu görülebilir. Şekil 94'teki ağırlık kaybı grafiğine bakıldığında bu grup içindeki en yüksek aşınma kaybı gösteren numunelerden birisi olduğu görülecektir. Tüm bu değerlendirmeler ışığında pulsu yapıların yüzeyden dökülme eğilimde oldukları değerlendirilebilir.

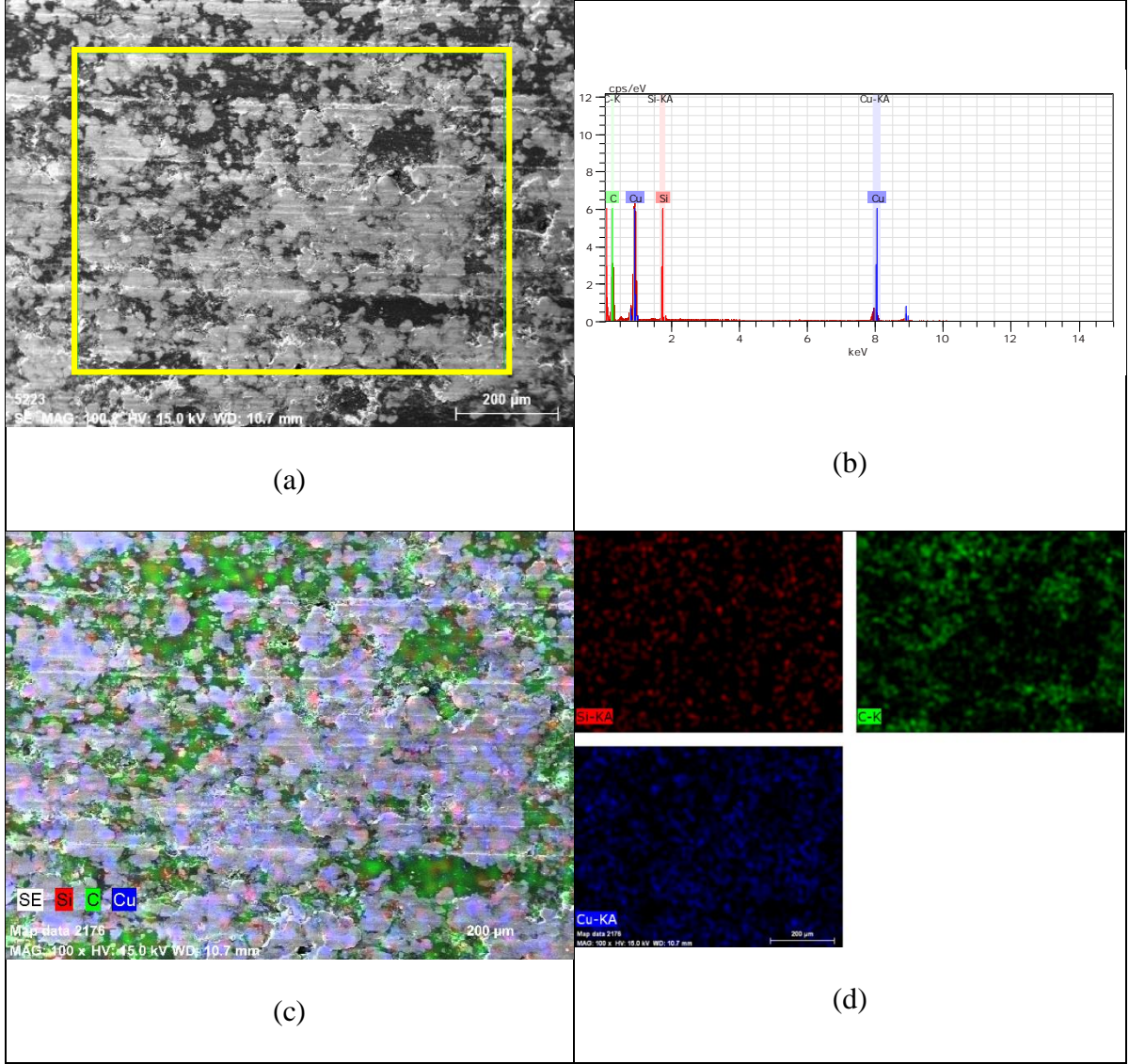
Şekil 126 ağırlıkça %15 grafen ve %1 alümina içeren numuneye ait SEM görüntülerini göstermektedir.



Şekil 126. % 15 Gr ve % 1 Al_2O_3 katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

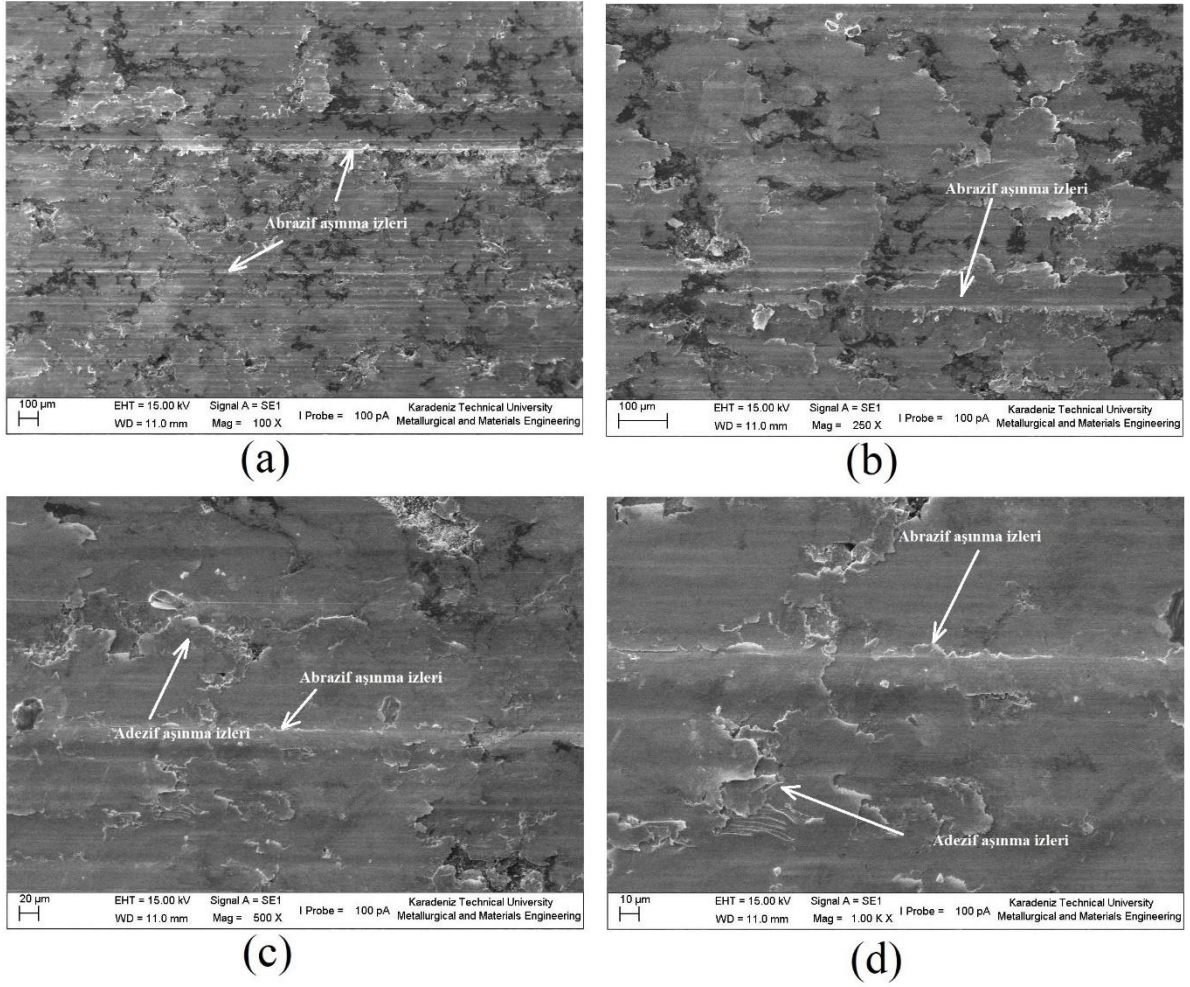
Numune fotoğrafları incelendiğinde artan grafit oranı ile derin oyukların varlığının arttığı görülmüştür. Ayrıca alümina oranının artmasıyla da yüzeydeki dökülmeler artmıştır. Şekil 126-b görüntüsü incelendiğinde ise ark oluşumunun izlerine rastlanmaktadır. Bu fotoğrafta yüzeyde bulunan küresel yapı aşınma sırasında ark oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 127 ağırlıkça %15 grafit ve %0.5 silisyum karbür katkılı bakır fırçaya ait EDS analizini göstermektedir. EDS analizinin haritalama metodunun kullanıldığı bu analizde a) görüntüsü haritalama yapılan bölgeyi, b) görüntüsü bu bölgede tespit edilen elementleri, c) haritalama yapılan bölgedeki elementel analizin SEM görüntüsü üzerindeki toplu dağılımı ve d) görüntüsü elementel analizin siyah zemin üzerinde ayrı ayrı dağılımı göstermektedir.



Şekil 127. % 15 Gr ve % 0,5 SiC katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi)
 a) Haritalama yapılan alan b) Elementel analiz c) Haritalama yapılan alandaki elementel dağılım d) Haritalamada bulunan elementel dağılımın ayrı ayrı dağılımı (Si-KA, C-K, Cu-KA Mag:100x HV:15.0kV)

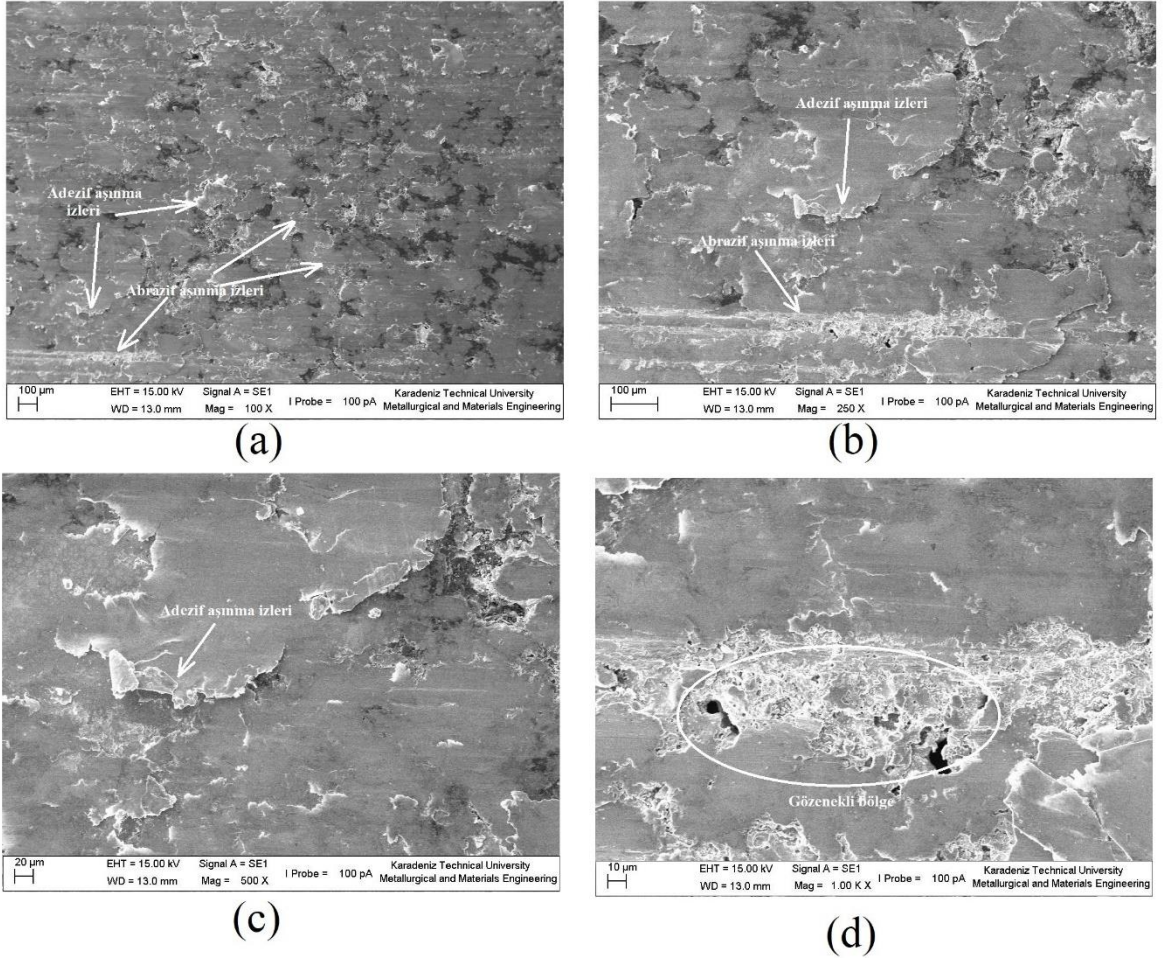
Şekil 128'de ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 silisyum karbür içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 128. %5 Gr ve %0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Numune yüzey morfolojisi incelendiğinde derin ve geniş çizikler görülmektedir. Bu numune için etkin aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğu tespit edilmiştir.

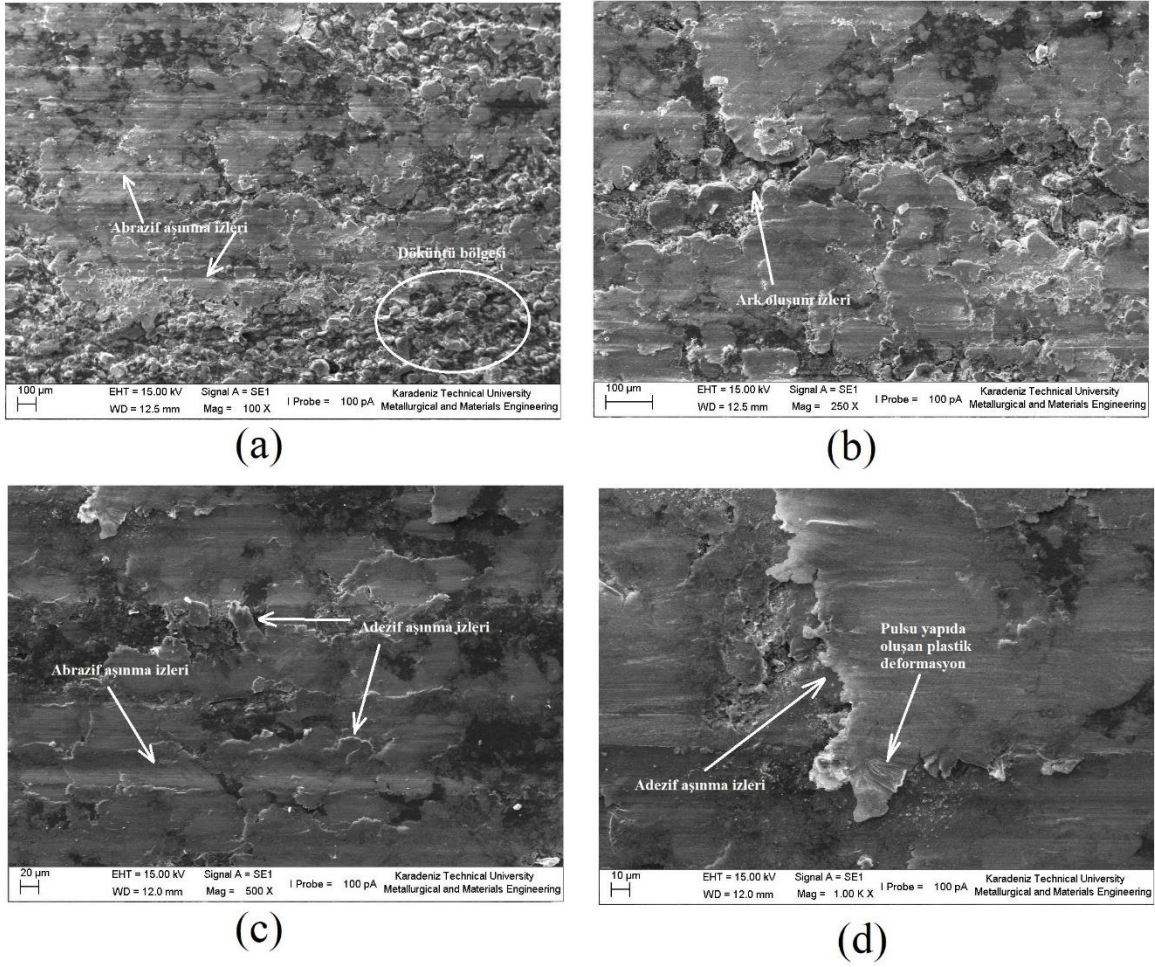
Şekil 129'da ağırlıkça %5 grafen ve %1 SiC içeren bakır fırça numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 129. %5 Gr ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Yüzey görüntüsü incelenen numunenin düşük grafen oranına göre oldukça gözenekli bir yüzey morfolojisi dikkat çekmektedir. Ancak ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 SiC içeren numune ile porozite oranları kıyaslandığında daha düşük bir porozite oranına sahip olduğu görülmektedir. Dolayısı ile bu gözeneklerin homojen olmayan bir numune yapısına işaret etmektedir.

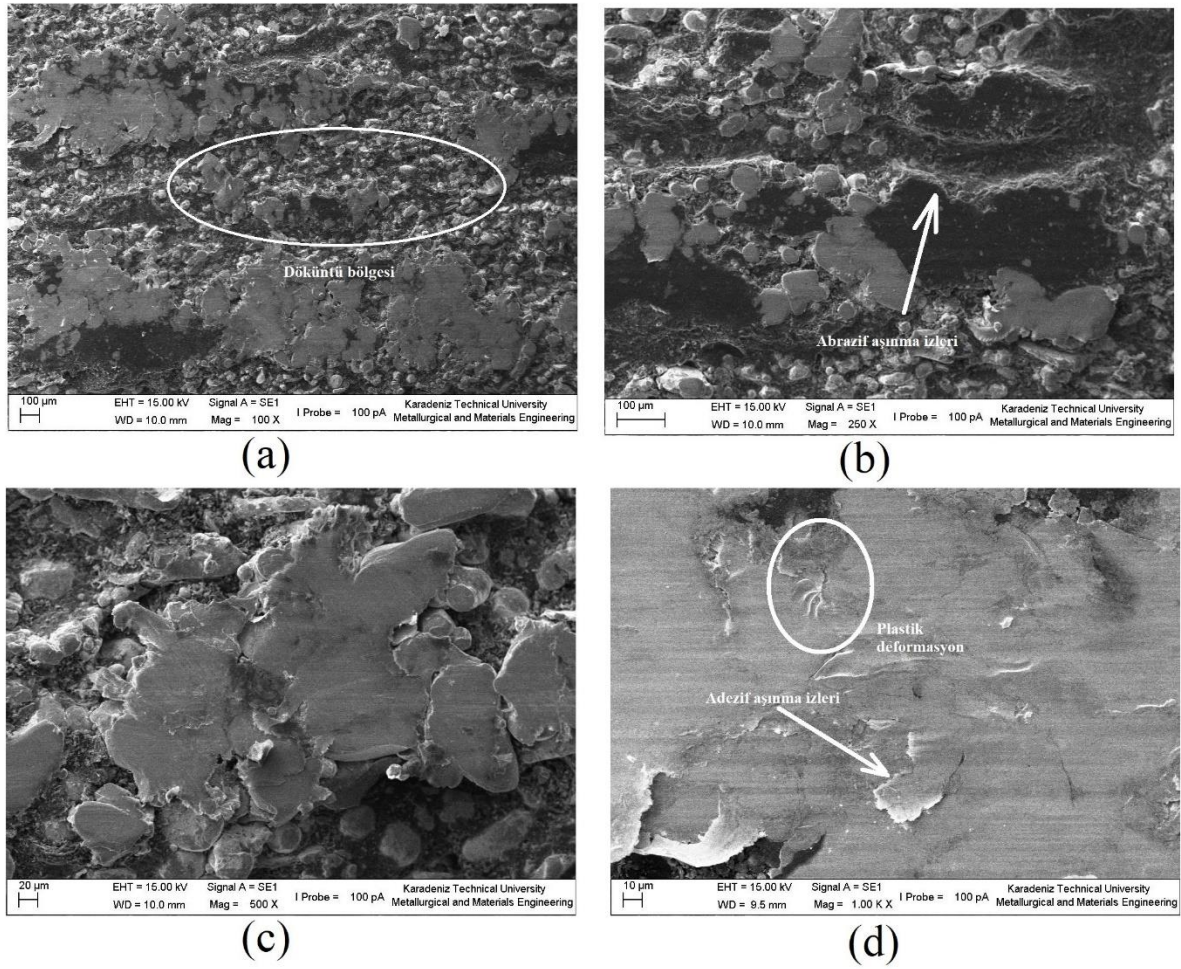
Şekil 130'da ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 130. % 10 Gr ve %0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Görüntülerde oldukça pürüzlü bir yüzey morfolojisi dikkat çekmektedir. Ayrıca yüzeylerde geniş döküntü bölgeleri vardır. Abrasif ve adezif aşınma izlerini taşıyan yüzeyde ark oluşumuna işaret eden küçük ergiyik damlası izlerine de rastlanmıştır.

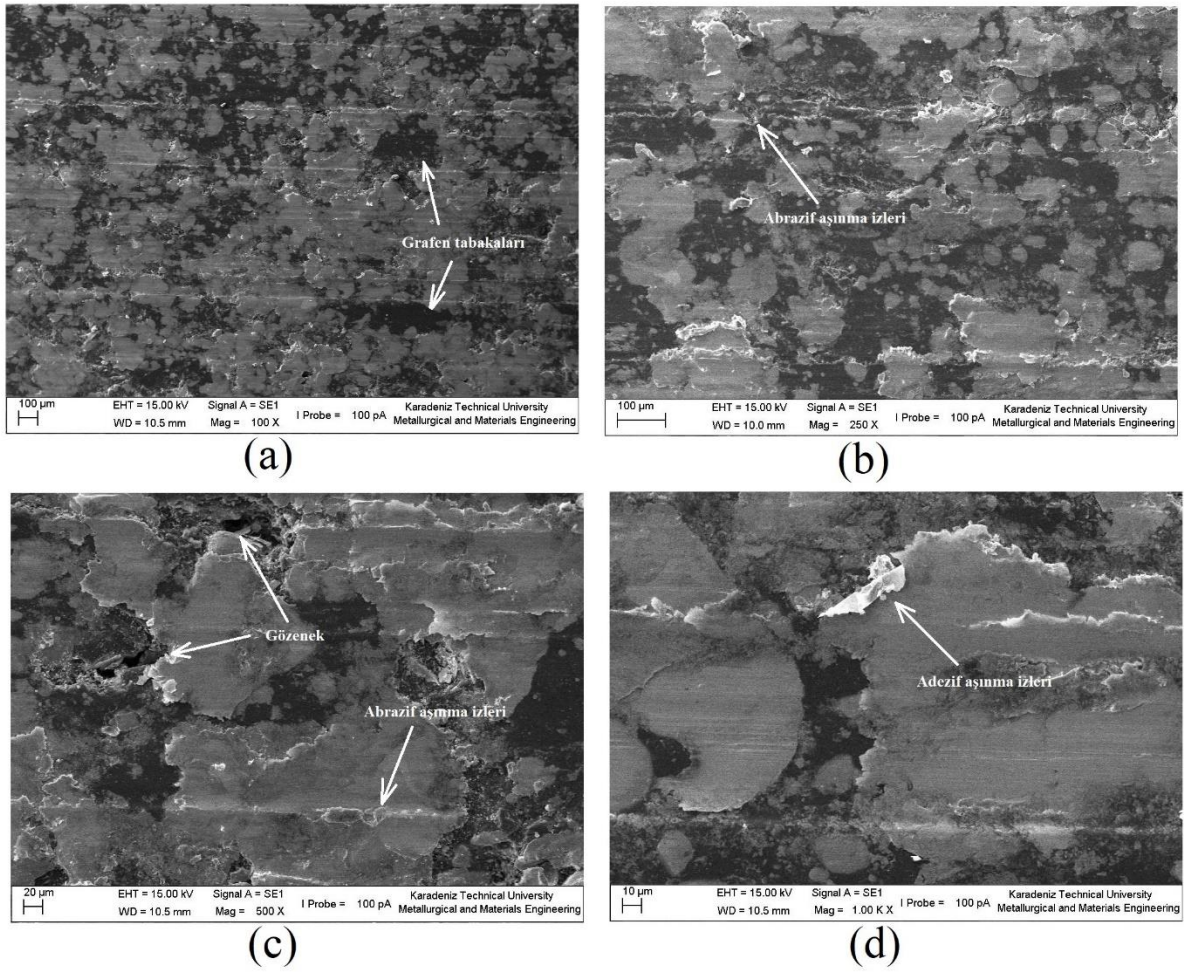
Şekil 131'de ağırlıkça %10 grafen ve %1 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 131. %10 Gr ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Numune yüzeyin sinterlenmemiş gibi bir yüzey görüntüsü sergilemesi ilk dikkat çeken husustur. Bu bölgeler yüzeyden dökülen pulsu yapıların nispeten kalın olduğunu ve alt tabakaya kadar indiği bölgeleri göstermektedir. Şekil 96'da verilen ağırlık kayıpları grafiğine bakıldığında en fazla aşınmanın bu numunede görüldüğü düşünülürse sonuçların tutarlı olduğu görülecektir. Ayrıca yüzeyde derin çiziklerin (b fotoğrafı) bulunduğu ve ayrılan pulsu yapıların yüzeyi sıvama eğiliminde olduğu (d fotoğrafı) görülmektedir.

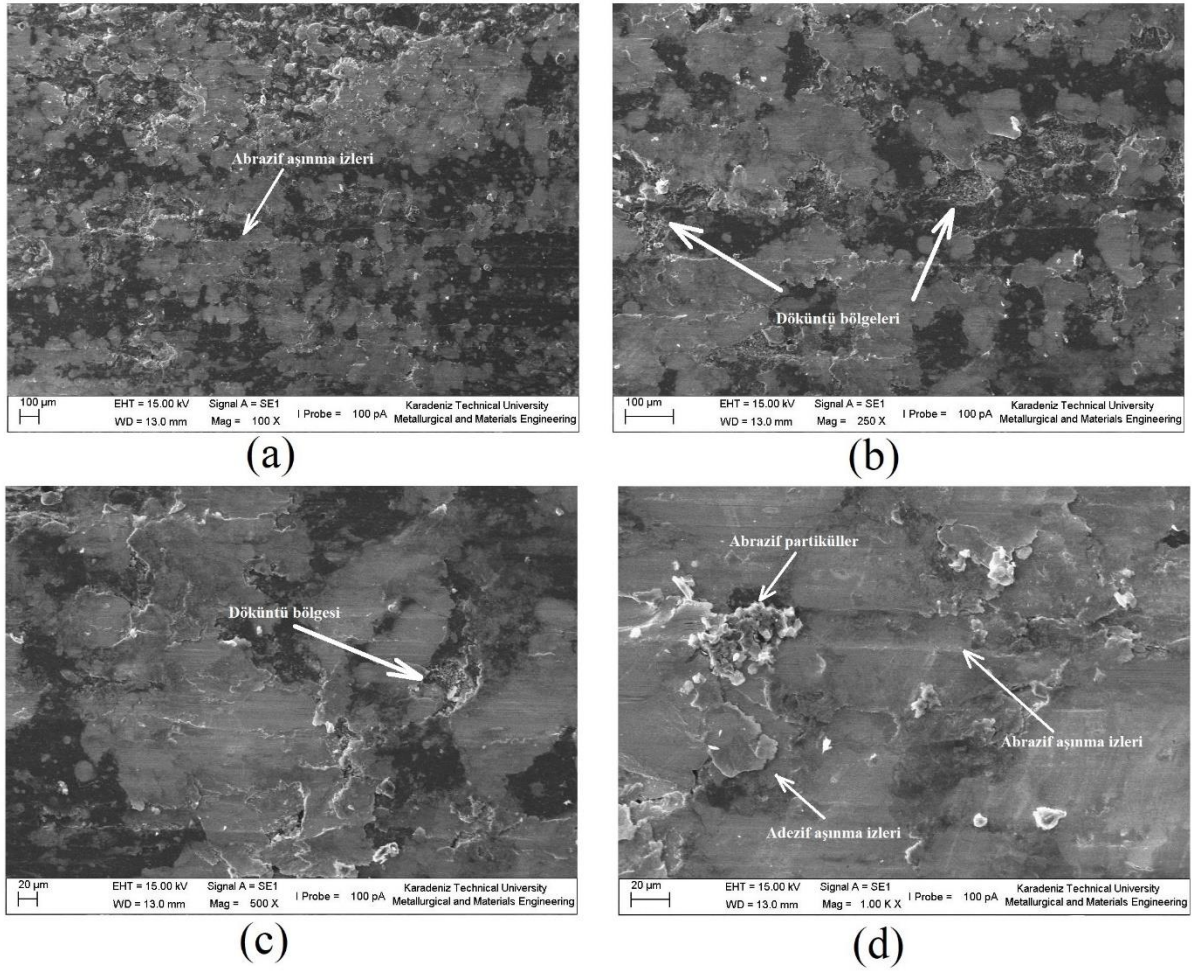
Şekil 132'de ağırlıkça %15 grafen ve %0.5 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 132. %15 Gr ve %0.5 SiC katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Numune yüzeyinde artan grafenin etkisi oldukça belirgin bir şekilde fark edilmektedir. Şekil 90'da verilen sertlik grafiğine bakıldığında bir önceki numuneye göre sertlik değerinin bir miktar arttığı görülecektir. Bu durum yüzey morfolojisine yansımış ve yüzeysel döküntü görülen alanların gözle görülür bir şekilde azalmasına neden olduğu saptanmıştır. Adezif aşınma izlerini gösteren pulsu yapılar yüzey morfolojisinde mevcut olsa da yoğun ve kısmen derin çiziklerin bulunması baskın aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğunu göstermektedir.

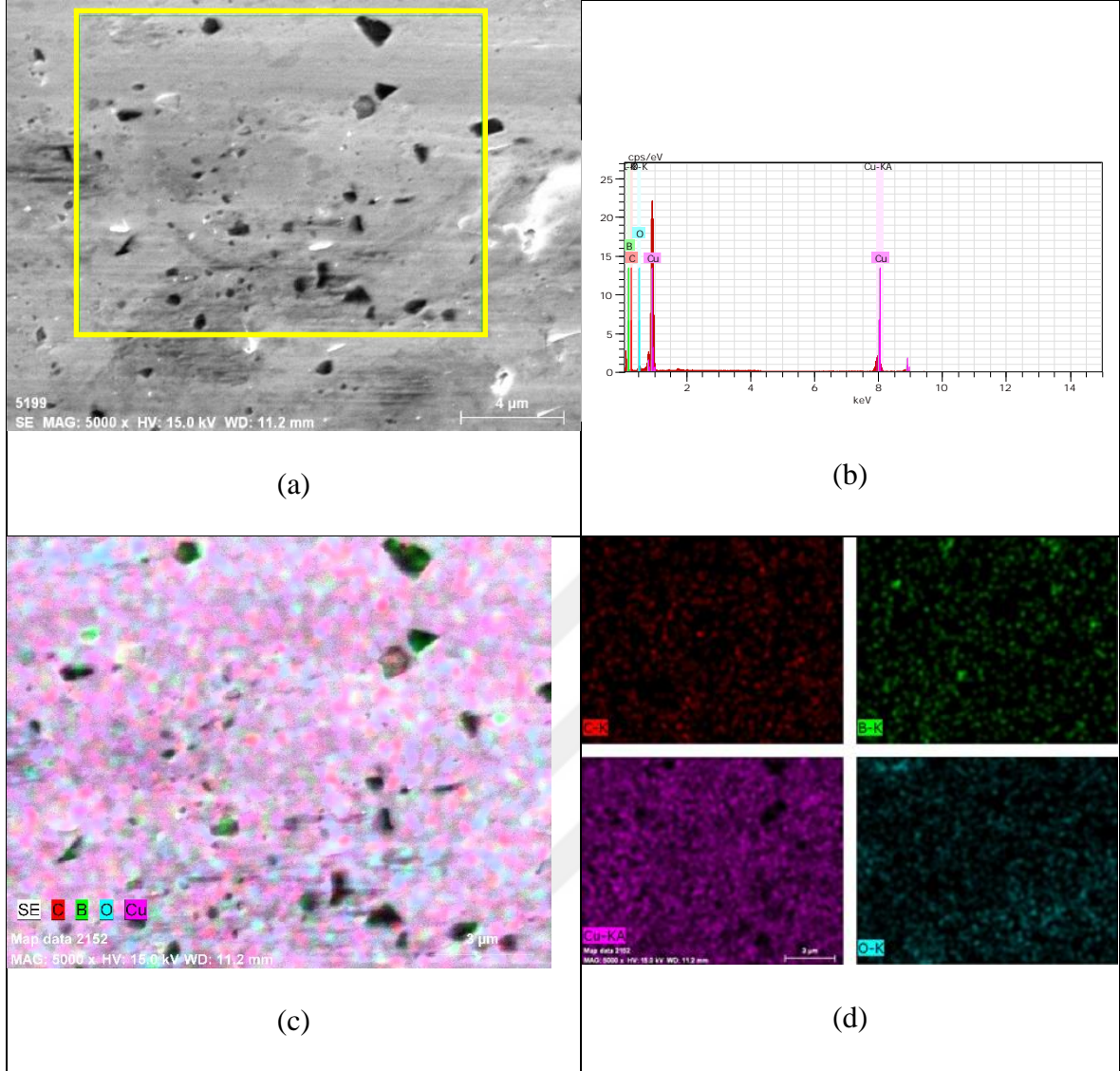
Şekil 133'te ağırlıkça %15 grafen ve %1 SiC içeren elektrik fırçasının elektro-mekanik aşınma sonrasında yüzeyinden alınan farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 133. %15 Gr ve %1 SiC katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

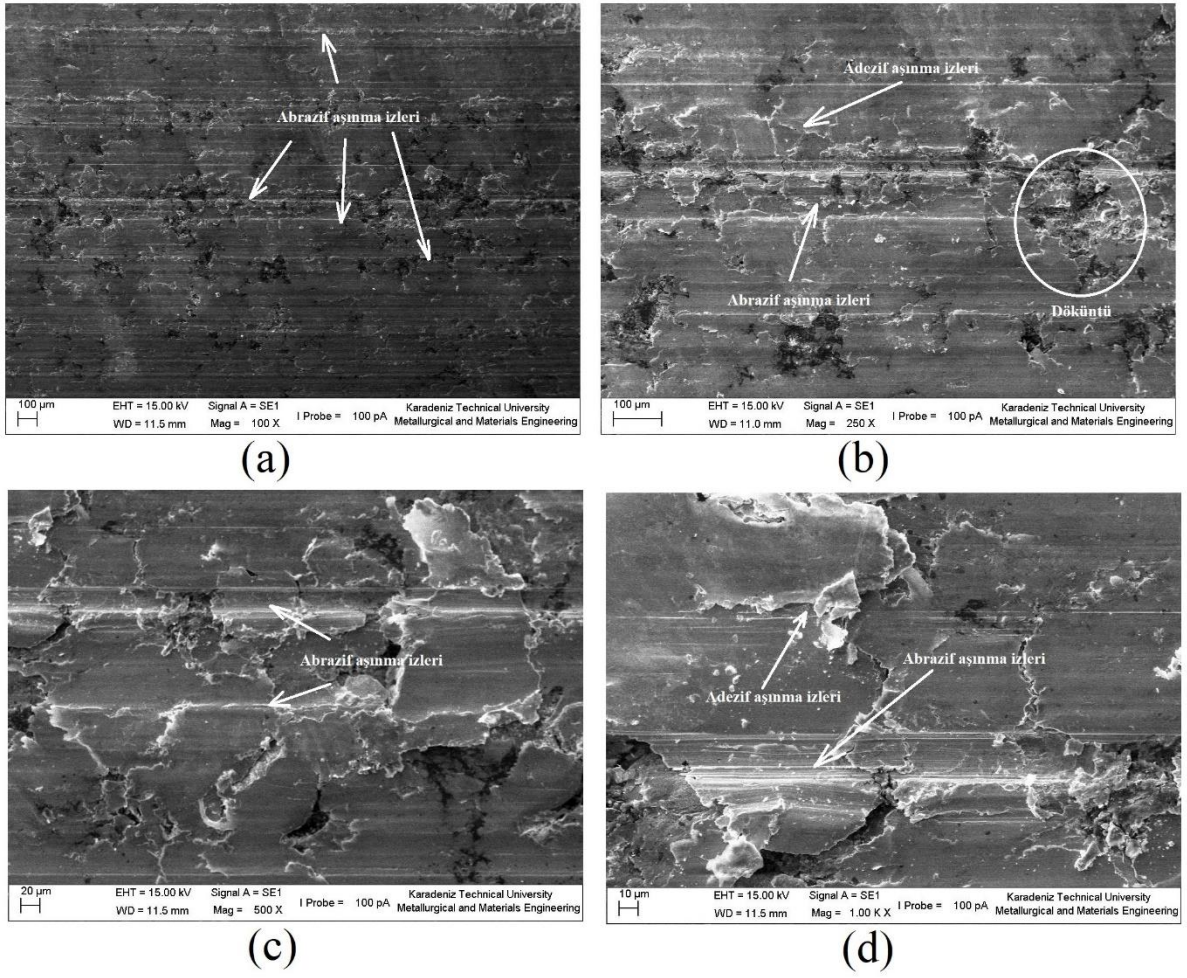
Grafen ve SiC oranının artmasıyla bir önceki numuneye göre nispeten büyük oranlarda bölgesel dökülmeler görülmektedir. Abrazif aşınma mekanizmasının bu numune için etkin aşınma mekanizması olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca d şeklinde (aşındırıcı) abrazif partiküller de görülmektedir.

Şekil 134 ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 B₄C katkılı bakır fırçaya ait EDS analizini göstermektedir. EDS taramasının haritalama metodunun kullanıldığı bu analizinde a) görüntüsü haritalama yapılan bölgeyi, b) görüntüsü bu bölgede tespit edilen elementleri, c) haritalama yapılan bölgedeki elementel analizin SEM görüntüsü üzerindeki toplu dağılımı ve d) görüntüsü elementel analizin siyah zemin üzerinde ayrı ayrı dağılımı göstermektedir.



Şekil 134. % 10 Gr ve % 0,5 B₄C katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi) a) Haritalama yapılan alan b) Elementel analiz c) Haritalama yapılan alandaki elementel dağılım d) Haritalamada bulunan elementel dağılımın ayrı ayrı dağılımı (C-K, B-K, O-K, Cu-KA Mag:5000x HV:15.0kV)

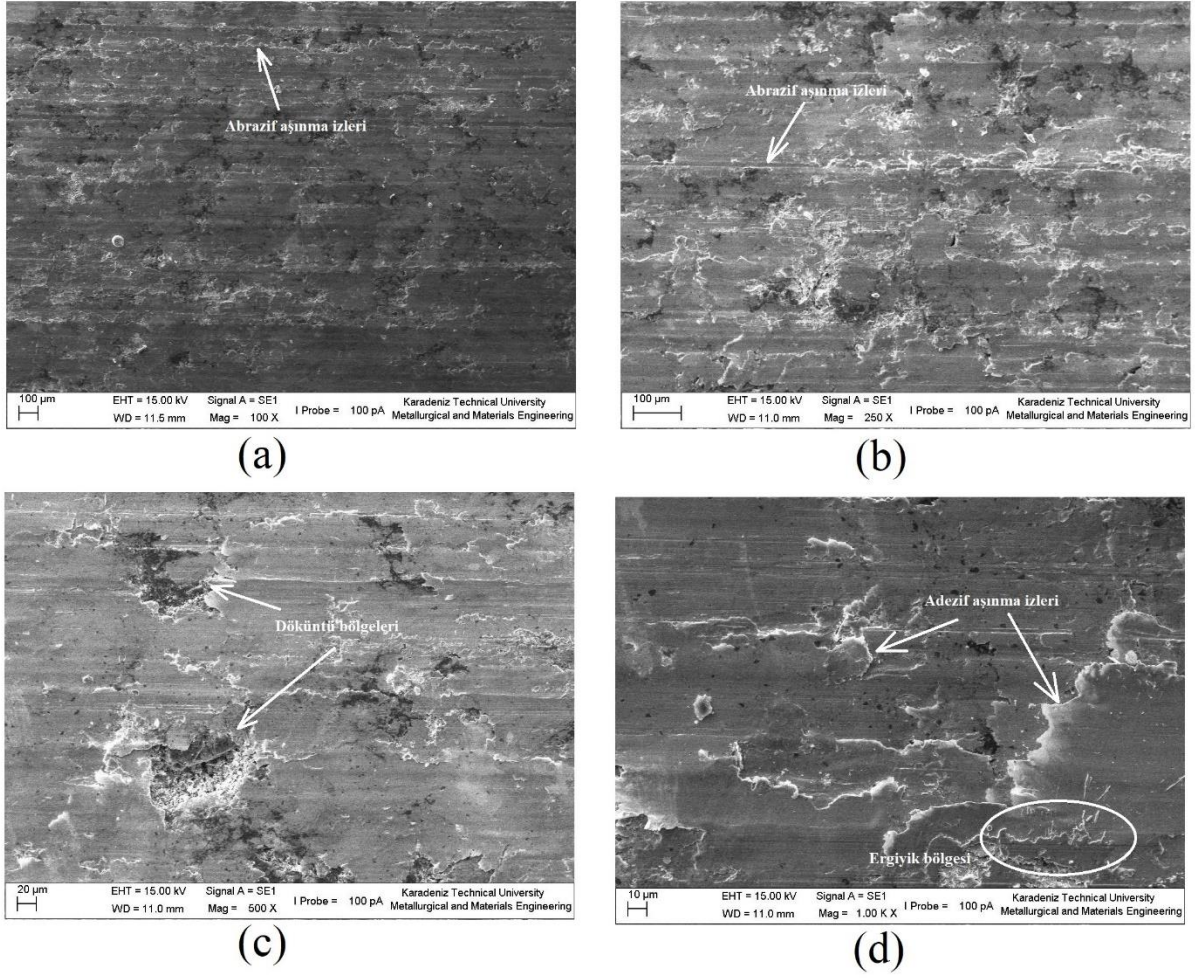
Şekil 135'te ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 B₄C içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 135. %5 Gr ve %0.5 B₄C katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Belirtilen oranlarda takviye malzemelerinin katıldığı numune yüzeyinde hem çok yoğun hem de derin çizikler göze çarpmaktadır. SEM fotoğrafların görünen morfoloji fotoğrafları incelendiğinde baskın aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğu tespit edilmiştir.

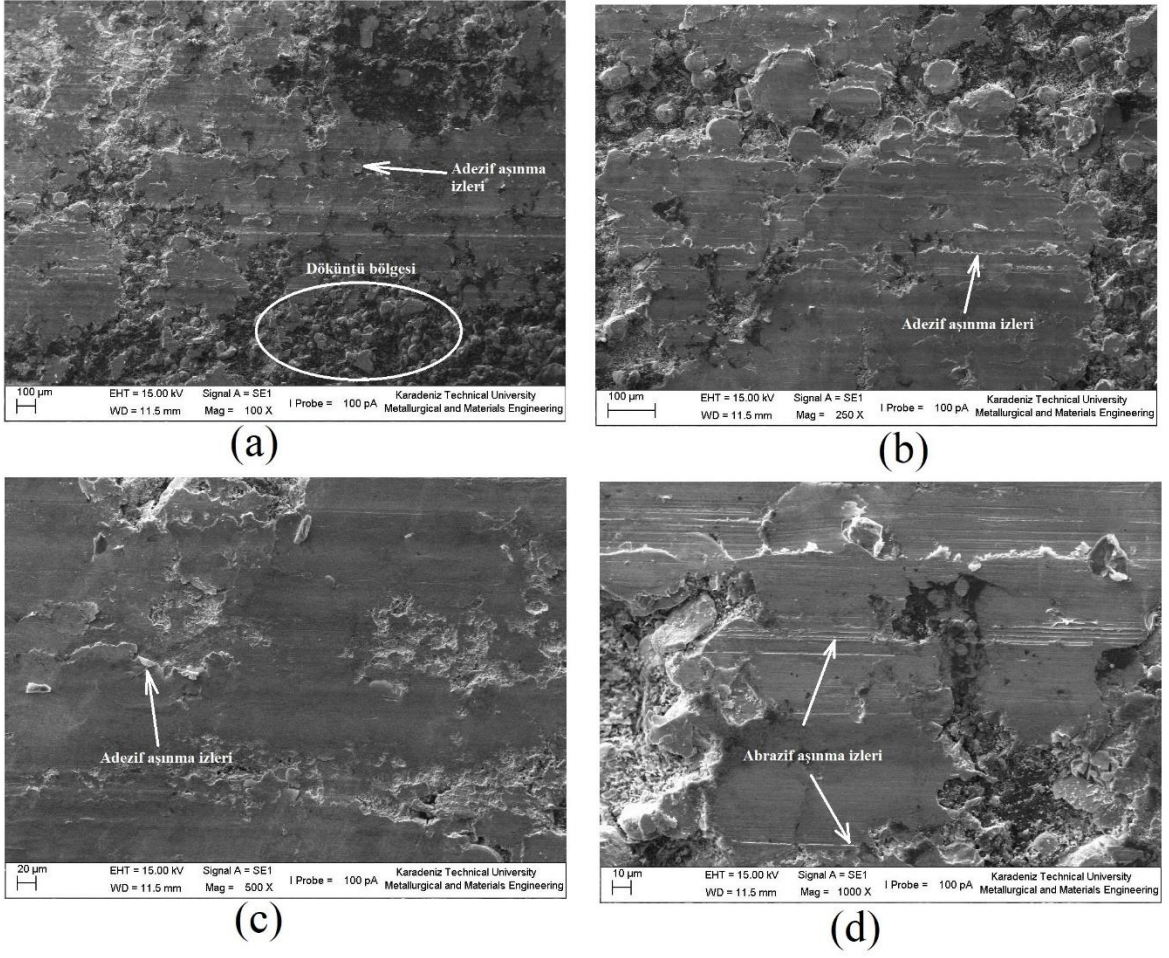
Şekil 136'da ağırlıkça %5 grafen ve %1 B₄C içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 136. %5 Gr ve %1 B₄C katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Yüzey fotoğrafları incelendiğinde çiziklerin yoğunluğu fark edilmesine karşın çizik derinlikleri bir önceki numune yüzeyine göre daha yüzeysel olduğu görülmektedir. Ayrıca yüzeyde ark oluşum izlerini gösteren ergiyik serpintisi de tespit edilmiştir.

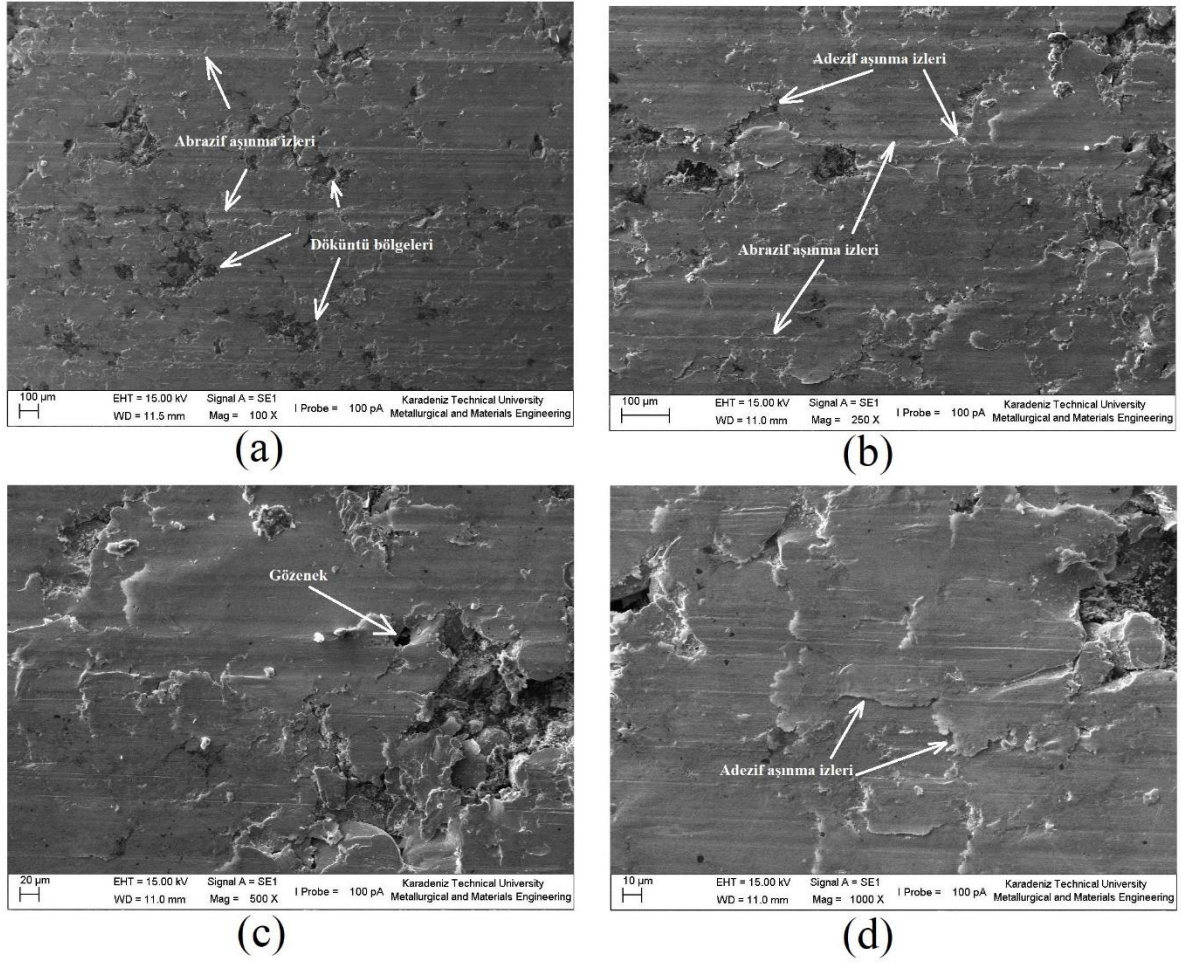
Şekil 137’de ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 B₄C içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 137. % 10 Gr ve %0.5 B₄C katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Belirtilen numune yüzeyi incelendiğinde derin çiziklerin yanı sıra adezif aşınma izleri de görülmektedir. Ayrıca yüzeyde döküntü oluşan bölgelerin varlığı da göze çarpmaktadır.

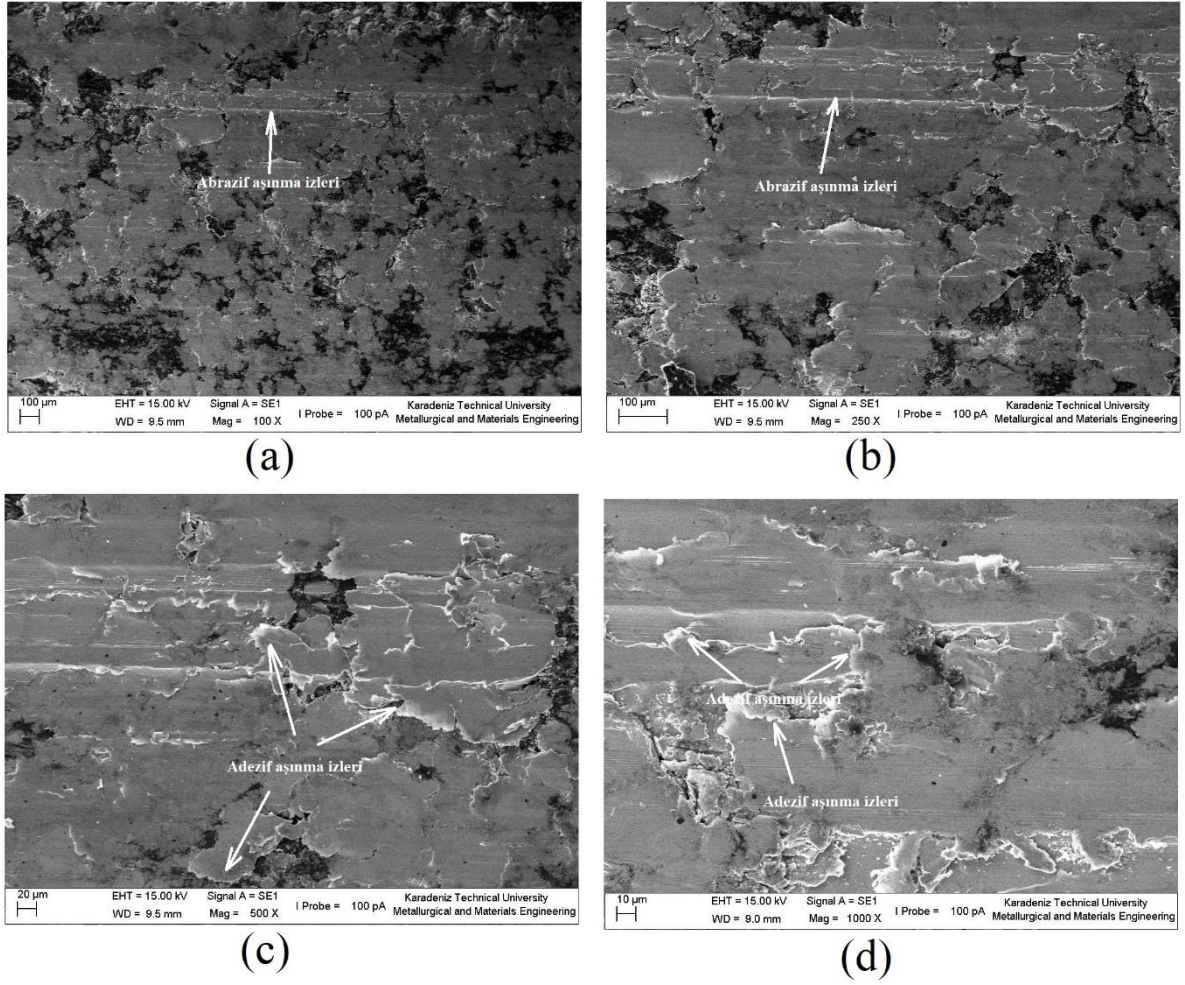
Şekil 138’de ağırlıkça %1 grafen ve %1 B₄C içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 138. %10 Gr ve %1 B₄C katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Verilen yüzey görüntüleri incelendiğinde bir önceki numune ile oldukça benzer bir yüzey morfolojisine sahip olduğu görülmektedir. Ancak bir önceki numuneye göre aşınma yüzeyinde bulunan çiziklerin yoğunluğunun artmasına karşın çizik derinliklerinin nispeten az olduğu belirlenmiştir.

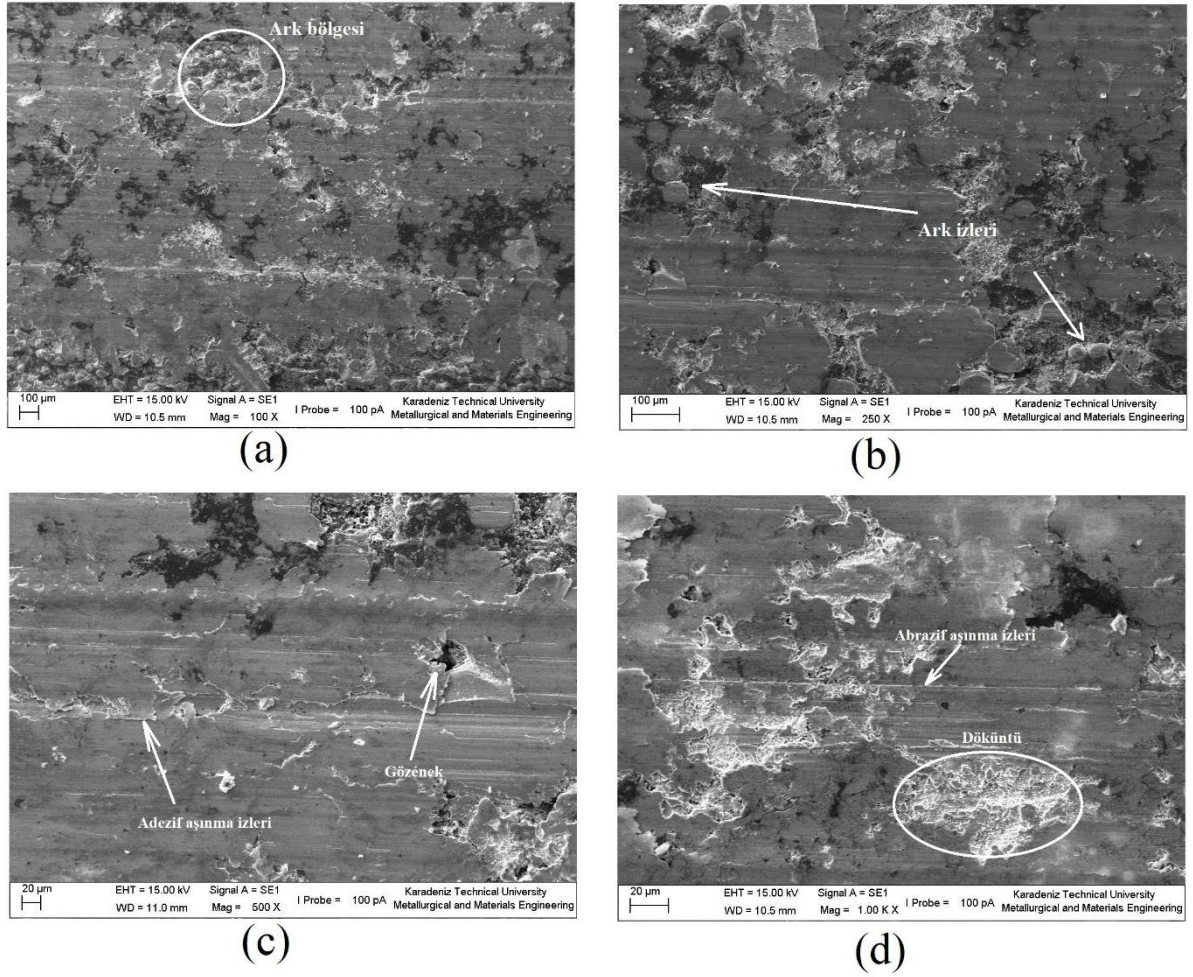
Şekil 139'da ağırlıkça %15 grafen ve %0.5 B₄C içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 139. %15 Gr ve %0.5 B₄C katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Artan grafen oranı ile yüzeyde görünen tabakalı yapının arttığı ve abrazif aşınma izlerinin bulunmasına karşın baskın aşınma mekanizmasının adezif aşınma olduğu tespit edilmiştir.

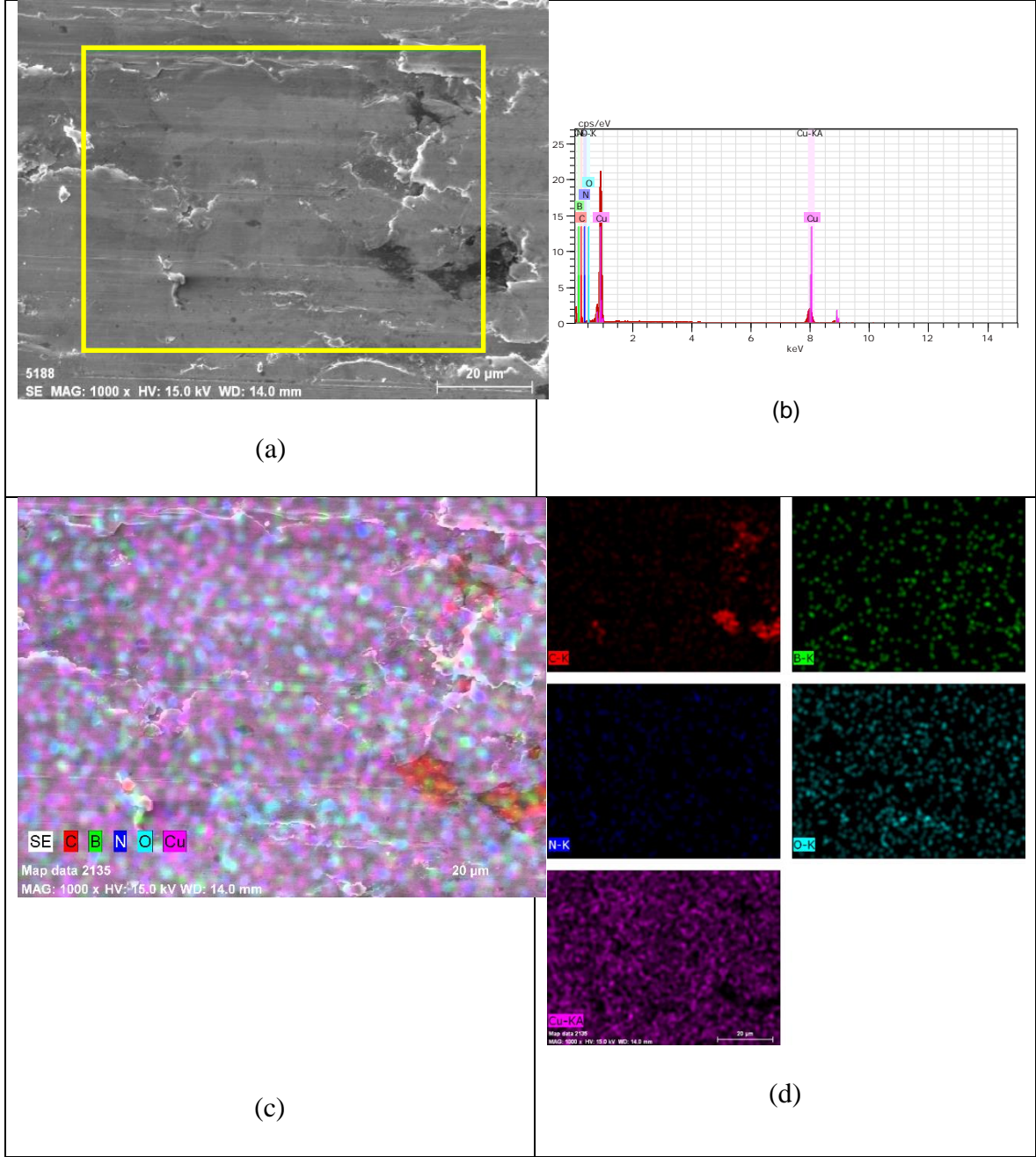
Şekil 140'ta ağırlıkça %15 grafen ve %1 B₄C içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 140. %15 Gr ve %1 B₄C katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

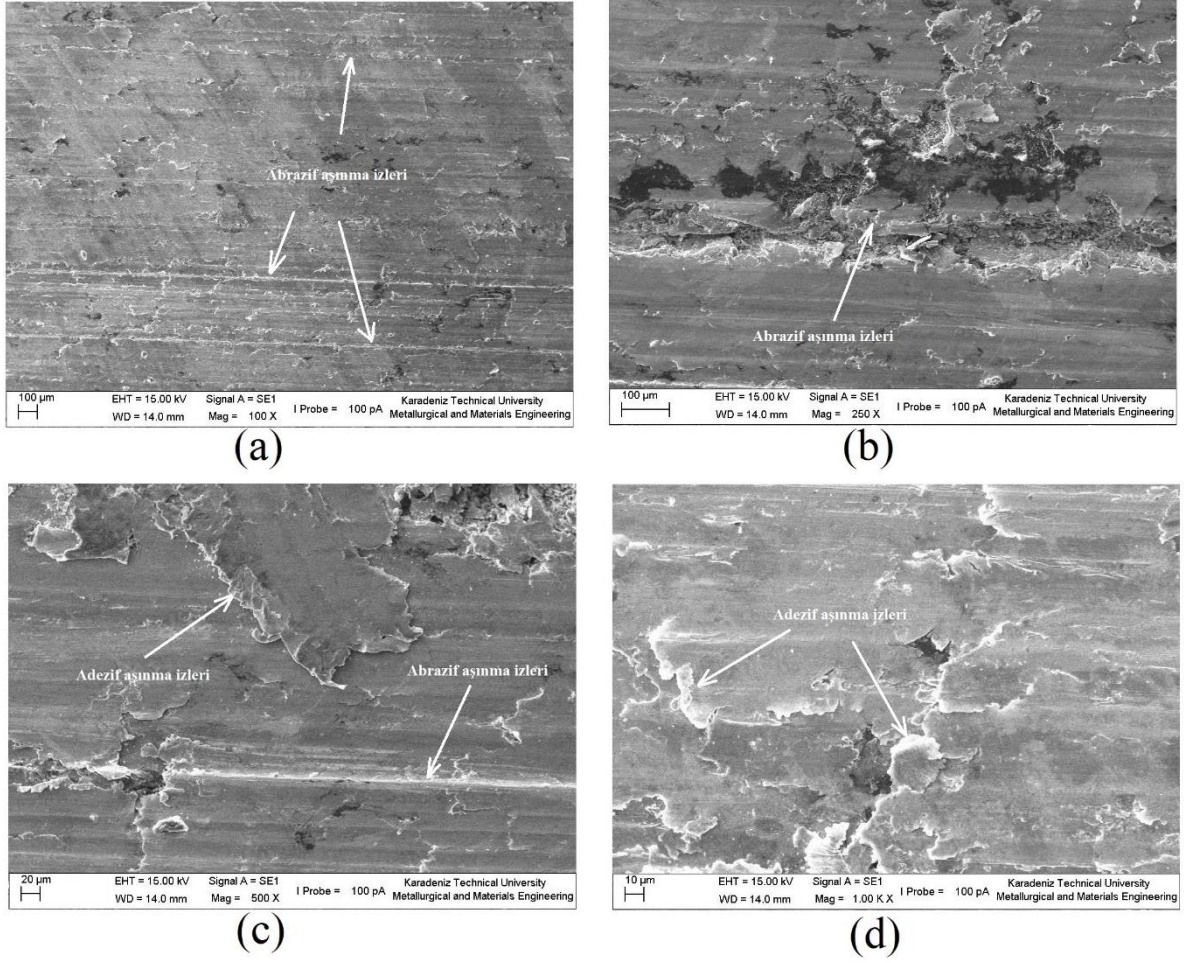
Bu numuneye ait SEM görüntüsü incelendiğinde adezif aşınma izlerinin olmasının yanı sıra baskın aşınma mekanizması abrazif aşınma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca numune yüzeyinde ark erozyonu izlerine de rastlanmıştır.

Şekil 141 ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait EDS analizini göstermektedir. EDS analizinin haritalama metodunun kullanıldığı bu incelemede a) görüntüsü haritalama yapılan bölgeyi, b) görüntüsü bu bölgede tespit edilen elementleri, c) haritalama yapılan bölgedeki elementel analizin SEM görüntüsü üzerindeki toplu dağılımı ve d) görüntüsü elementel analizin siyah zemin üzerinde ayrı ayrı dağılımı göstermektedir.



Şekil 141. %5 Gr ve % 0,5 h-BN katkılı bakır fırça EDS analizi (haritalama yöntemi) a) Haritalama yapılan alan b) Elementel analiz c) Haritalama yapılan alandaki elementel dağılım d) Haritalamada bulunan elementel dağılımın ayrı ayrı dağılımı (C-K, B-K, N-K, O-K, Cu-KA Mag:1000x HV:15.0kV)

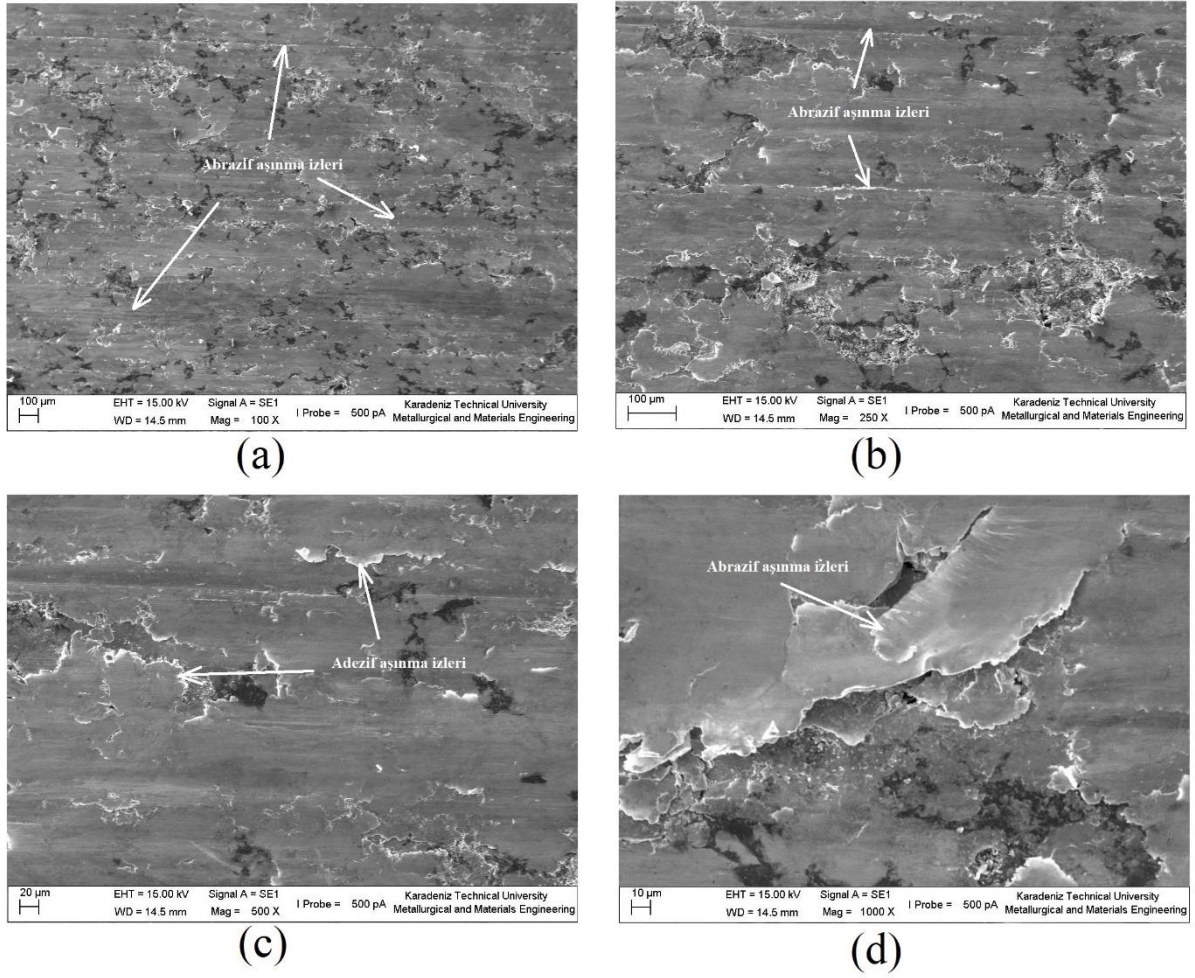
Şekil 142’de ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 h-BN içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 142. %5 Gr ve %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Genel görünüşün verildiği -a- resmine bakıldığında abrazyif aşınma izleri rahatlıkla görülmektedir. Adezif aşınma belirtilerinin de olduğu yüzey morfolojisinde baskın aşınma mekanizmasının abrazyif aşınma olduğu tespit edilmiştir.

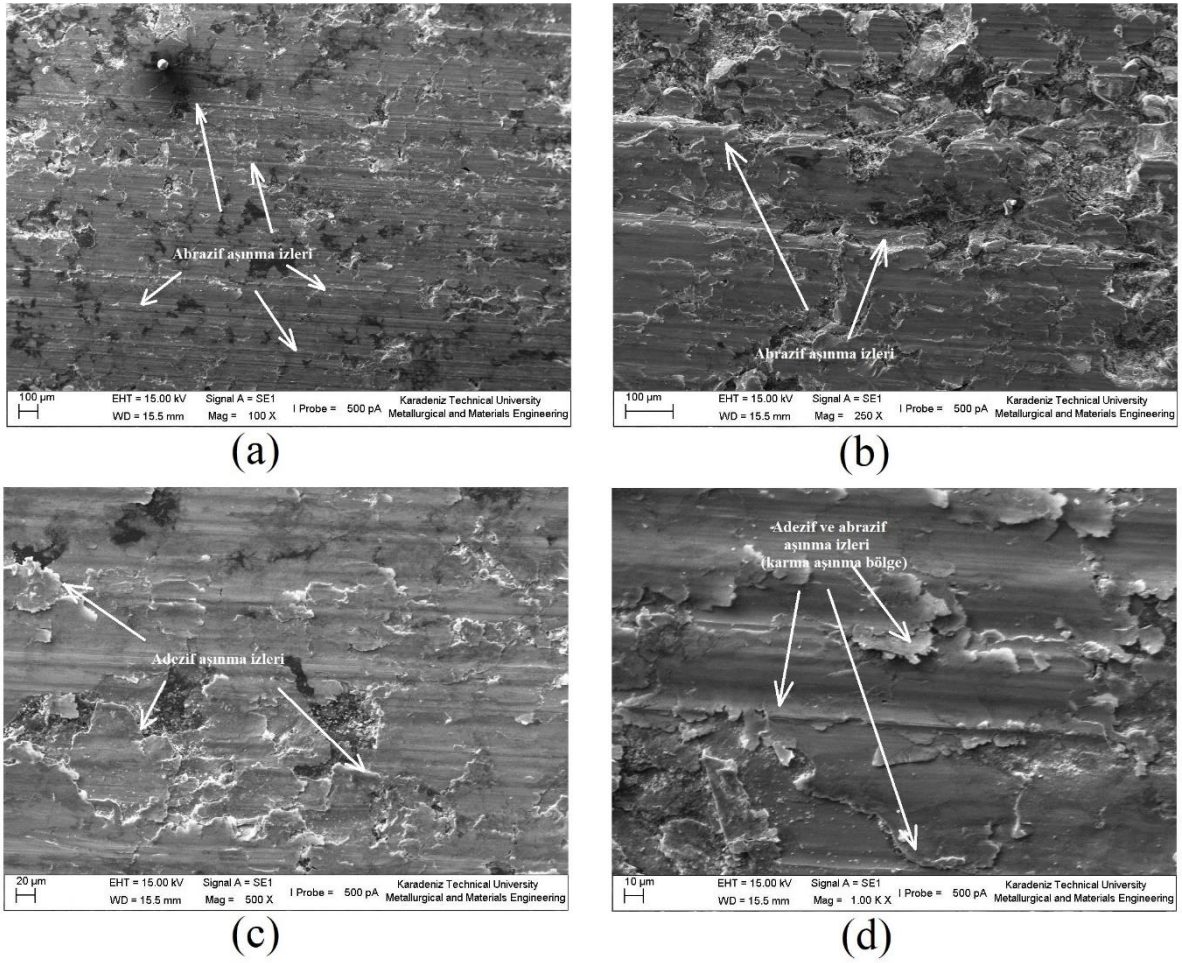
Şekil 143'te ağırlıkça %5 grafen ve %1 h-BN içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 143. %5 Gr ve %1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Bir önceki numune ile benzer aşınma mekanizmaları bulunan bu numunede grafen takviyesine ek h-BN'nin artışıyla yüzeyde nispeten daha düz ve pürüzsüz bir yüzey morfolojisinin oluştuğu saptanmıştır. Bu numune için hem abrazyif hem de adezyif aşınma mekanizmasının hemen hemen aynı oranda etkin olduğu belirlenmiştir.

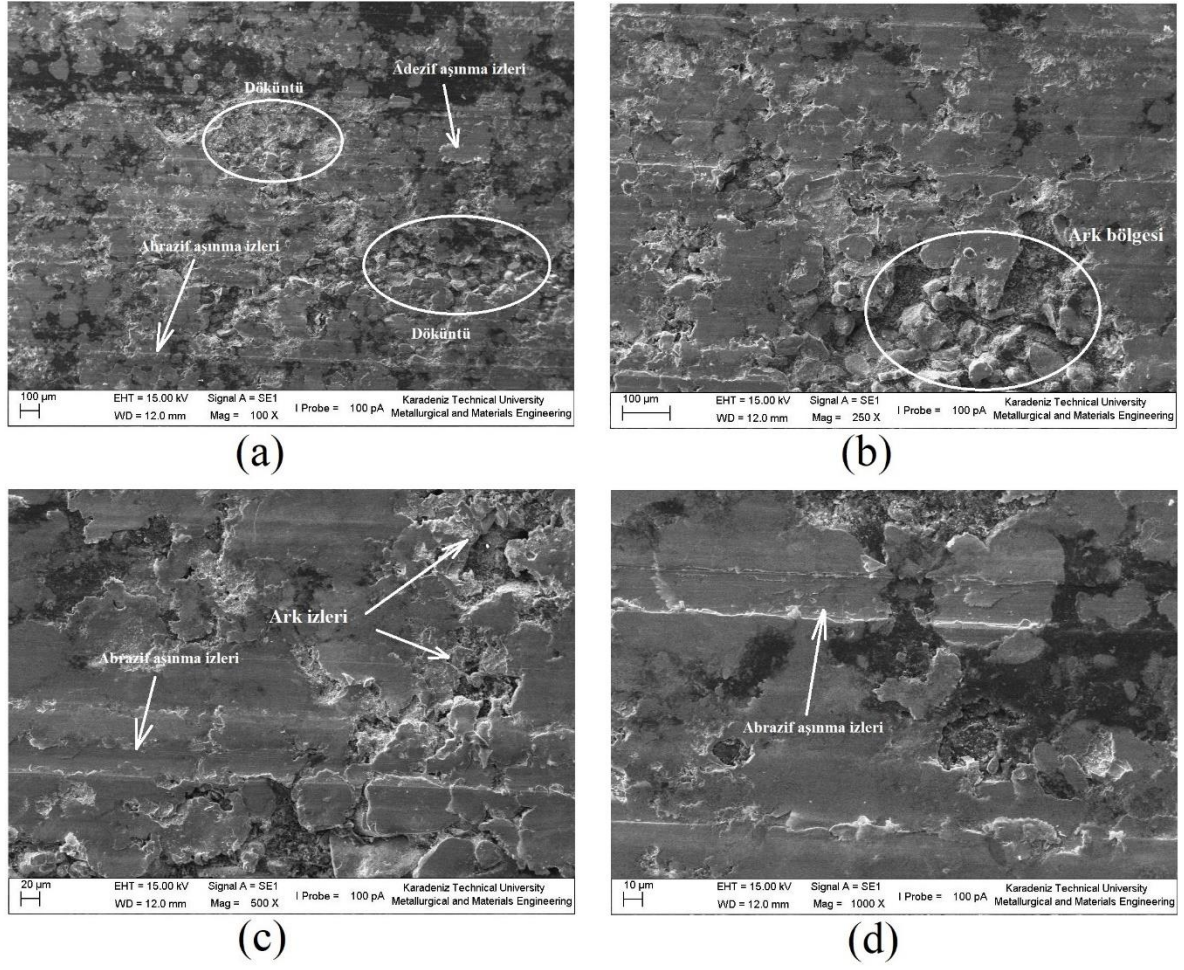
Şekil 144'te ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 h-BN içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 144. %10 Gr ve %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Grafen oranının artmasıyla sertliğin düştüğü Şekil 91’de daha önce belirtilmişti. Dolayısıyla incelenen yüzey morfolojisinde oluşan çiziklerin daha büyük hasar verdiği, derin çiziklerin oluştuğu görülmektedir. Bu da bir önceki numuneye kıyasla yüzey pürüzlülüğünün artması (Şekil 104) şeklinde kendini göstermektedir. Ayrıca bu numunede Şekil 144-d görüntüsü incelendiğinde adezif aşınma belirtisi olan pulsu yapıların yüzeyindeki abrazif aşınma çizgilerinin varlığı dikkat çekmektedir.

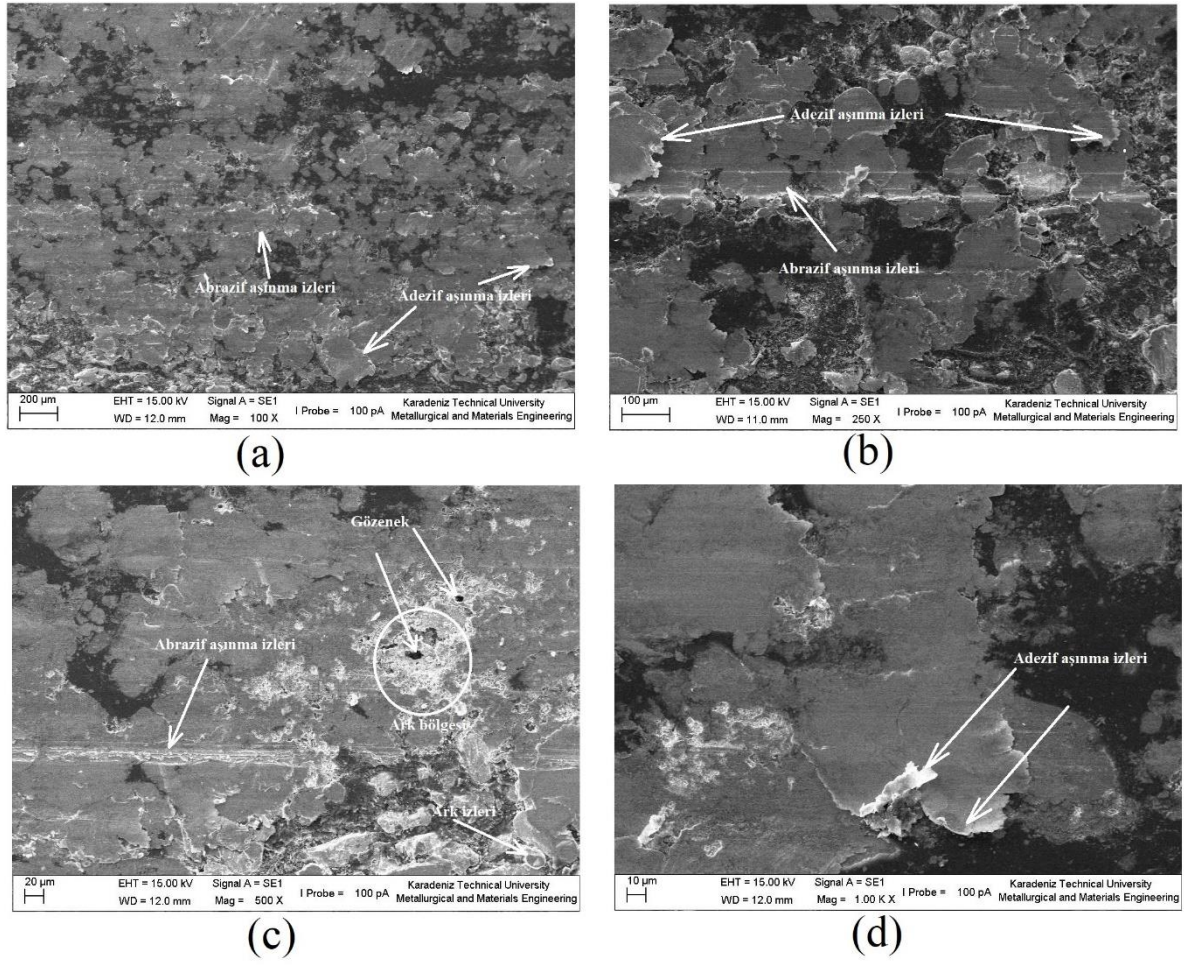
Şekil 145’de ağırlıkça %10 grafen ve %1 h-BN içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 145. % 10 Gr ve % 1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Aşınma sırasında oluşan krater benzeri yapılarda ark oluşumu izleri görülmektedir. Ayrıca yüzeyden ayrılan tabakaların neden olduğu döküntü bölgelerinin bazılarında ark oluşumunu gösteren izler tespit edilmiştir.

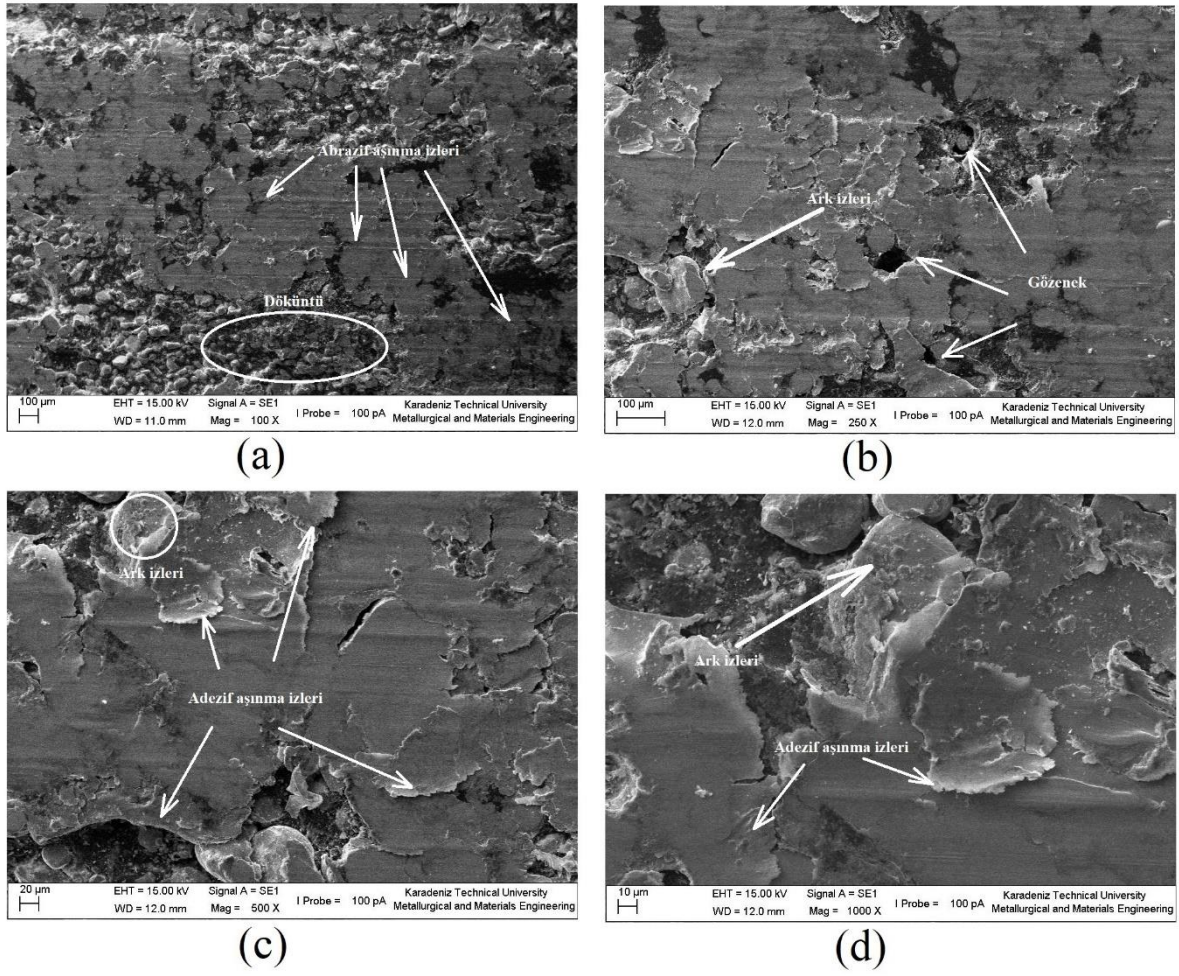
Şekil 146'da ağırlıkça %15 grafen ve %0.5 h-BN içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 146. % 15 Grafen ve %0.5 h-BN katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Aşınma yüzeyi incelendiğinde, yüzeyde abrazyif ve adezif alınma izlerinin hemen hemen aynı yoğunlukta olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu numune yüzeyinde de ark oluşumu izlerine rastlanmıştır.

Şekil 147’de ağırlıkça %15 grafen ve %1 h-BN içeren numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 147. % 15 Gr ve % 1 h-BN katkılı bakır fırçaya ait SEM görüntüsü a)100x b)250x c)500x d)1000x

Artan grafen ve h-BN ile numune yüzeyi incelendiğinde adezif aşınma izlerine rastlansa da etkin mekanizmanın adezif aşınma mekanizması olduğu görülmektedir. Bu etkin aşınma mekanizmasına eşlik eden diğer mekanizma ise ark aşınması olarak kendini göstermektedir. Çoğunlukla döküntü oluşan bölgelerde ark etkisi ile oluşan lokal ergime bölgeleri görülmektedir. Ark neticesinde oluşan yapıların çalışan kolektörün etkisi ile yüzeye sıvanma eğilimi göstermiştir. Bu durum -b ve -d fotoğrafı ile verilmiş olup ergiyik serpintileri ve bu serpintilerin düzleşen pürüz tepeleri görülmektedir. Ayrıca artan porozite Şekil 86'dan da görüleceği gibi artış göstermiştir.

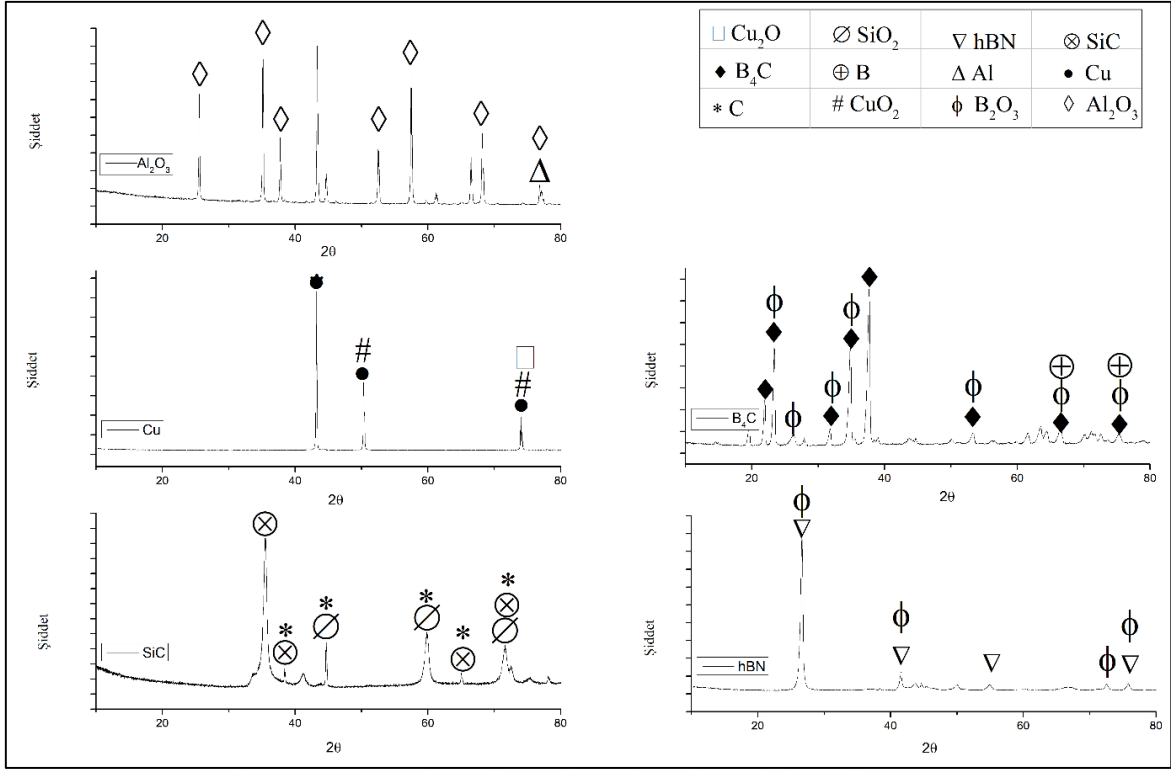
3.9. Fırça Numunelerinin XRD Analizleri

XRD incelemesi numune tozlarının tedarik edilme aşamasından performans deneyleri sonrasına kadar oluşmuş olabilecek farklı fazların tespit edilmesine yardımcı olabilmesi için gerçekleştirilmiştir. Ancak bu incelemenin bazı kısıtlamaları vardır. Bünyede bulunan katkı veya fazların oranlarının %3-5'ten az olduğu durumlarda verilerin doğruluğu azalmaktadır. Bu sebepten dolayı kullanılan X'pert High Score Plus yazılımına ilaveten bazı fazların Gibbs serbest enerjileri de (ΔG) değerlendirilmiştir.

Grafiklerde bir pike ait birden fazla fazı temsilen semboller yerleştirilmiştir. Bu durum ise kullanılan yazılımda aynı pike ait birden fazla fazın eşleşmesinden kaynaklanmaktadır. Hem eşleşen piklerde hem düşük şiddetlerde bulunan piklerde fazların oluşma ihtimalleri değerlendirilirken de yine Gibbs serbest enerjilerinden faydalanılmıştır.

Gibbs serbest enerjisinde bir yazılım ile yapılan hesaplamalarda kimyasal denklemlerden faydalanılır. Denklemlerden bulunan enerji değerinin negatif çıkması o fazın belirtilen sıcaklıkta kendiliğinde oluşabileceğini pozitif çıkması ise o fazı oluşturmak için dışardan enerji verilmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

Şekil 148'de temin edilen tozların herhangi bir işleme maruz kalmadan önceki XRD analizlerini göstermektedir.



Şekil 148. Kullanılan toz malzemelerin mekanik alaşımlama öncesi XRD analizleri

Verilen grafiklerde kullanılan toz numunenin hangi piklerde olduğu açıkça görülmektedir. Ancak yapılan analiz sonrasında kullanılan yazılımda beklenmeye bazı bileşik ve elementlerin oluşmuş olabileceği görüldü. Bahsi geçen bu bileşik ve elementlerin oluşma ihtimallerinin Gibbs serbest enerjisi ile de desteklenmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme Tablo 8’de verilmiş olup, atmosfer koşullarında oluşup oluşamayacakları değerlendirilmiştir.

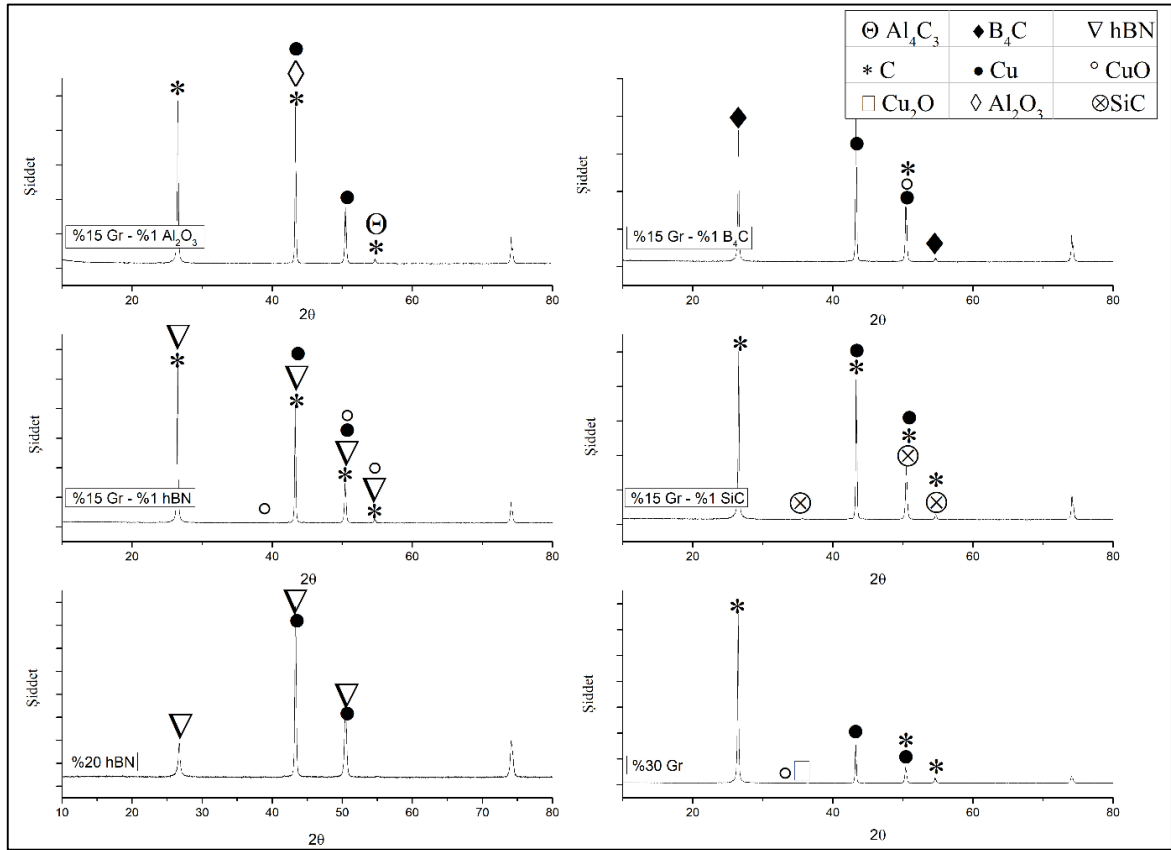
Tablo 8. Kullanılan toz malzemelerinde mekanik alaşımlama öncesi XRD sonuçları

Oluşma ihtimali olan bileşik ve elementler								
	Cu₂O	SiO₂	B		CuO₂	Al	B₂O₃	
Reaksiyon	$2\text{Cu} + 1/2\text{O}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons \text{Cu}_2\text{O}$	$\text{SiC} + \text{O}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons \text{SiO}_2 + \text{C}$	$\text{B}_4\text{C} + \text{O}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons 4\text{B} + \text{CO}_{2(\text{g})}$	$\text{B}_4\text{C} \rightleftharpoons 4\text{B} + \text{C}$	$\text{Cu} + \text{O}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons \text{CuO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \rightleftharpoons 2\text{Al} + 3/2\text{O}_{2(\text{g})}$	$\text{B}_4\text{C} + 7/2\text{O}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons 2\text{B}_2\text{O}_3 + \text{CO}_{(\text{g})}$	$2\text{BN} + 5/2\text{O}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons \text{B}_2\text{O}_3 + 2\text{NO}_{(\text{g})}$
ΔG (0/1000°C)	Negatif	Negatif	Negatif	Pozitif	-	Pozitif	Negatif	Negatif
Durum	Oluşabilir	Oluşabilir	Oluşabilir	Oluşamaz	Belirlenemedi	Oluşamaz	Oluşabilir	Oluşabilir

XRD grafiklerinde bulunan bileşik ve elementlerin Gibbs serbest enerjileri değerlendirildiğinde Cu_2O , SiO_2 , B_2O_3 bileşiklerinin 0 – 1000 °C aralıklarında

kendiliğinden oluşabileceği görüldü. B elementinin oluşma durumunun ise reaksiyona bağlı olduğu tespit edildi. Al_2O_3 'ten ise Al elementinin belirtilen sıcaklıklarda dışardan enerji vermeksizin oluşamayacağı belirlendi.

Şekil 149'da mekanik alaşımlama işleminden sonra alınan toz numunelerine ait XRD analizleri verilmiştir.



Şekil 149. Kullanılan toz malzemelerinin mekanik alaşımlama sonrası XRD analizleri

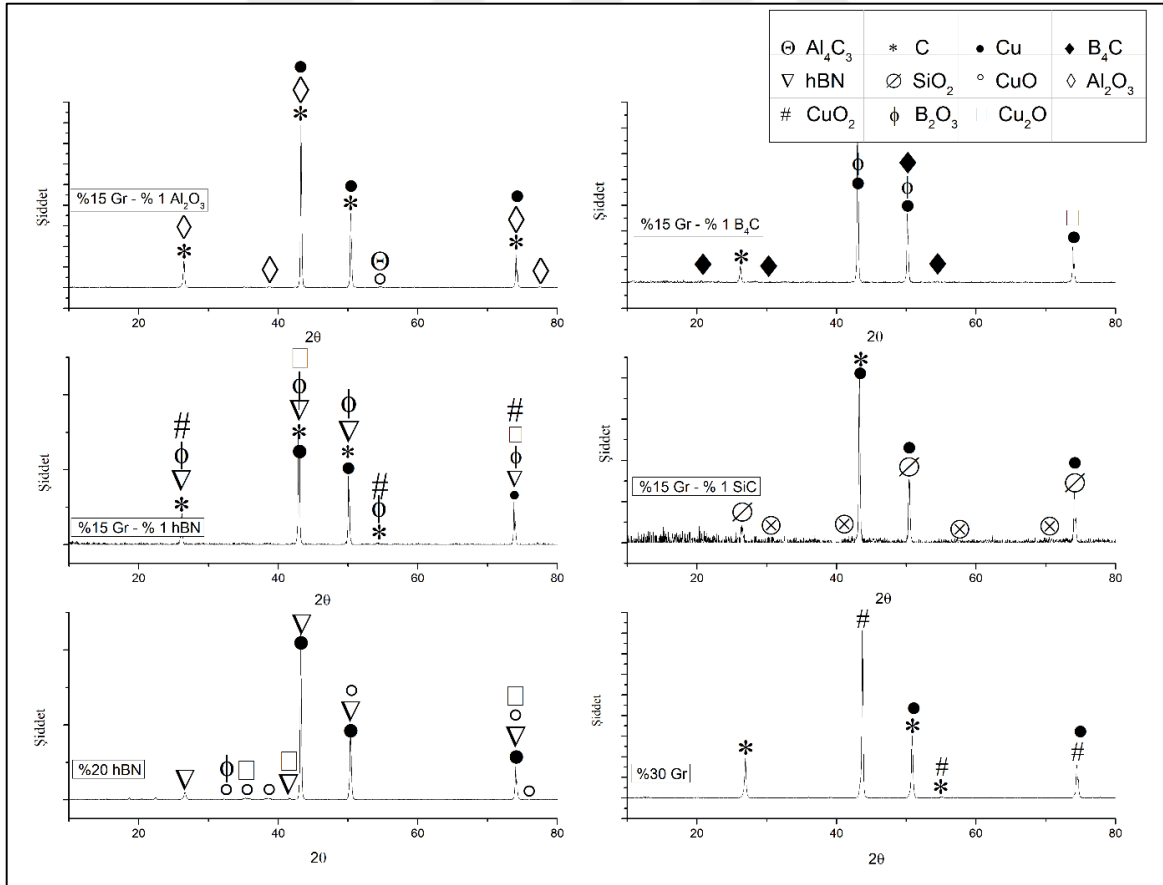
Verilen XRD grafiklerinde Al_4C_3 , Cu_2O , CuO bileşiklerine dair piklere rastlanmıştır. Bu piklerin değerlendirilmesi ait Tablo 9'da irdelenmiştir.

Tablo 9. Mekanik alaşımlama işlemi sonrası XRD sonuçları

Oluşma ihtimali olan bileşikler			
	Al₄C₃	Cu₂O	CuO
Reaksiyon	2Al ₂ O ₃ +3C \rightarrow Al ₄ C ₃ +3O ₂ (g)	2Cu+1/2O ₂ (g) \rightarrow Cu ₂ O	2Cu+O ₂ (g) \rightarrow 2CuO
ΔG (0/1000°C)	Pozitif	Negatif	Negatif
Durum	Oluşamaz	Oluşabilir	Oluşabilir

Tablo 9 incelendiğinde Al₄C₃ bileşiğinin Gibbs serbest enerjisi değerlerine göre kendiliğinden oluşamayacağı, Cu₂O ve CuO bileşiklerinin ise Gibbs serbest enerjisi değerlerine göre kendiliğinden oluşabileceği tespit edilmiştir.

Şekil 150'de elektro-mekanik aşınma performansları gerçekleştirilen numunelerin aşınma yüzeylerine yapılan XRD analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 150. Üretilen numunelerin elektro-mekanik aşınma deneyi sonrasında aşınma yüzeylerine ait XRD analizleri

Elektro – mekanik aşınma deneyi sonrasında yapılan XRD incelemeleri sonucunda Al_4C_3 , CuO_2 , SiO_2 , B_2O_3 , CuO ve Cu_2O bileşiklerine ait piklerin olabileceği görülmüştür. Bu piklerin mümkün olma olasılıkları Tablo 10'daki verilerin ışığında incelenmiştir.

Tablo 10. Elektro-mekanik aşınma deneyi sonrasında XRD sonuçları

Oluşma ihtimali olan bileşik ve elementler							
	Al_4C_3	SiO_2	CuO_2	CuO	Cu_2O	B_2O_3	
Reaksiyon	$2Al_2O_3+3C \rightarrow Al_4C_3+3O_2(g)$	$SiC+O_2(g) \rightarrow SiO_2+C$	$Cu+O_2(g) \rightarrow CuO_2$	$2Cu+O_2(g) \rightarrow 2CuO$	$2Cu+1/2O_2(g) \rightarrow Cu_2O$	$B_4C+7/2O_2(g) \rightarrow 2B_2O_3+CO(g)$	$2BN+5/2O_2(g) \rightarrow B_2O_3+2NO(g)$
ΔG (0/1000°C)	Pozitif	Negatif	-	Negatif	Negatif	Negatif	Negatif
Durum	Oluşamaz	Oluşabilir	Belirlenemedi	Oluşabilir	Oluşabilir	Oluşabilir	Oluşabilir

Tablo 10'daki elektro-mekanik aşınma deneyi sonrasında aşınma yüzeyine yapılan XRD verileri incelendiğinde Al_4C_3 bileşiğinin Gibbs serbest enerjisine göre kendiliğinden oluşamayacağı; SiO_2 , B_2O_3 , CuO ve Cu_2O bileşiklerinin ise kendiliğinden oluşabilecek fazlar olduğu görülmüştür. Cu_2O bileşiğinin durumu ise belirlenememiştir.

Ancak burada dikkat edilmesi gereken bir husus daha vardır. Bahsi geçen faz ve element oluşumları belirtilen sıcaklıklarda kendiliğinden oluşma eğilimi göstermektedir. Oysa yürütülen çalışmada toz numuneler mekanik alışımla işlemine tabii tutulmuştur. Bu da toz taneciklerine enerji verildiği anlamına gelmektedir. Literatürde yürütülen çalışmalarda oranların değişmesi ile Al_4C_3 gibi istenmeyen fazların oluştuğuna değinilmiştir [125]. Faz ve/veya element oluşum durumlarının daha net incelenebilmesi ise XRD analizlerine ve dolayısıyla kompozite malzemeye katılan takviye oranlarına bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi XRD analizinde daha net sonuçlar için her bir bileşenin minimum %3-5 mertebelerinde olması gerekmektedir.

Bu bölümde üretilen numunelere ait bulgular verilmiş olup değerlendirmelerin kolay bir şekilde kıyaslanabilmesi açısından deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler

Takviye Malzemesi (Ağırlıkça %) (Kalan Cu)	Sürtünme Kuvveti (ortalama) (N) ¹	Voltaj Düşümü (ortalama) (V) ²	Aşınma Kaybı (toplam) (mg) ³	Rodaj Esnasındaki Sürtünme kuvveti (V)	Sertlik (BSD) (N/mm ²)	Porozite (%)	İletkenlik (IACS)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra - μm) ⁴
Saf Cu (MA'sız)	-	-	-	-	32.2	7.1	81.7	-
Saf Cu (MA'lı)	-	-	-	-	14.2	38.5	45	-
%5 grafen	0.31	0.1	27.3	0.55	20	9.5	46	1.82
%10 grafen	0.15	0.1	37.4	0.57	9.2	12.6	14.3	0.84
%15 grafen	0.2	0.17	60.8	0.52	7.9	12.9	3.9	1.67
%30 grafen	0.23	0.59	38.9	0.64	8.3	14.2	0.55	2.32
%5 h-BN	0.22	0.73	56.5	0.41	9.1	10.4	12.4	2.62
%10 h-BN	0.19	2.36	113	0.38	6.4	13.3	-	2.88
%20 h-BN	0.18	4.41	284.5	0.31	8.4	16.1	-	3.23
%5 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃	0.17	0.11	13.3	0.51	5.2	11.9	20.2	2.18
%5 grafen - %1 Al ₂ O ₃	0.08	0.12	18.6	0.48	12.6	11.4	7.1	3.60
%10 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃	0.1	0.06	15.3	0.47	13.8	13.2	10.1	2.32
%10 grafen - %1 Al ₂ O ₃	0.16	0.38	16.7	0.44	10.8	13.4	2.8	5.30
%15 grafen - %0.5 Al ₂ O ₃	0.12	0.22	18	0.53	11	14	3.3	4.62
%15 grafen - %1 Al ₂ O ₃	0.21	0.26	24.7	0.45	8.7	13.7	1	4.01
%5 grafen - %0.5 SiC	0.17	0.11	14.5	0.58	14.7	5.4	16.5	3.34
%5 grafen - %1 SiC	0.19	0.14	47.7	0.58	10.8	7.9	4.3	5.28
%10 grafen - %0.5 SiC	0.2	0.16	59	0.37	6	5.1	0.9	4.91
%10 grafen - %1 SiC	0.14	0.44	60.8	0.26	6.8	8.4	-	5.61
%15 grafen - %0.5 SiC	0.17	0.18	51.1	0.38	8.7	12.1	2	4.52
%15 grafen - %1 SiC	0.13	0.36	45.9	0.2	5	16.5	-	3.38
%5 grafen - %0.5 B ₄ C	0.22	0.11	36.8	0.45	12.1	9.7	8.2	2.97
%5 grafen - %1 B ₄ C	0.18	0.1	24.1	0.46	10.2	11.2	4.7	2.74
%10 grafen - %0.5 B ₄ C	0.16	0.14	13.5	0.27	14.8	9.3	6.8	4.85
%10 grafen - %1 B ₄ C	0.15	0.13	14	0.25	12.9	9.7	2.9	4.85
%15 grafen - %0.5 B ₄ C	0.17	0.19	24.5	0.39	11.6	12	1.1	3.76
%15 grafen - %1 B ₄ C	0.19	0.32	20.5	0.32	10.5	22.4	0.1	3.52
%5 grafen - %0.5 h-BN	0.14	0.07	25.8	0.33	13.5	10.9	28.5	1.10
%5 grafen - %1 h-BN	0.11	0.13	21.1	0.36	10.8	11.7	20.5	0.86
%10 grafen - %0.5 h-BN	0.31	0.12	18.3	0.36	10.1	11.3	12.1	2.45
%10 grafen - %1 h-BN	0.1	0.21	24.1	0.3	8.6	12.1	3.8	3.88
%15 grafen - %0.5 h-BN	0.3	0.22	19.9	0.43	7.3	12.1	5.3	3.21
%15 grafen - %1 h-BN	0.24	0.32	28.7	0.31	8.5	12.4	0.6	3.85

1 – Tüm çalışma parametrelerinde elde edilen sürtünme kuvveti değerlerinin ortalaması

2 – Tüm çalışma parametrelerinde elde edilen voltaj düşümü değerlerinin ortalaması

3 – Tüm çalışma parametrelerinde elde edilen ağırlık kayıplarının toplamı

4 – Tüm çalışma parametrelerinde elde edilen pürüzlülük değerlerinin ortalaması

4.İRDELEME

Numunelerin elektriksel iletkenlikleri uluslararası tavllanmış bakır standardına (IACS) göre ölçülmüştür. Saf bakır numuneden Cu (MA'sız) kodlu mekanik alaşımlama işlemine tabii tutulmadan üretilen numunenin elektriksel iletkenlik değeri 81.7 AICS olarak ölçülmüştür. Yine saf bakır tozundan ancak mekanik alaşımlama/öğütme işlemine tabi tutulan Cu(MA'lı) kodlu numuneye ait elektriksel iletkenlik değeri ise 45 IACS olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar incelendiğinde elektriksel iletkenliğin yaklaşık % 45 oranında düştüğü saptanmıştır. İletkenlik değerindeki bu düşüş hem deformasyondan hem de yapısal olarak porozitenin artışından kaynaklanmaktadır. Şöyle ki; Bettinali ve arkadaşlarının (2014) yürütmüş olduğu çalışmada yaklaşık %50 oranında deforme edilen saf bakırda oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde elektriksel iletkenlik değerinde yaklaşık % 7 oranında bir azalma tespit etmişlerdir [126]. Ayrıca yapılan ölçümlerde porozite değerinin ise % 80'in üzerinde bir artış sergilediği görülmüştür. Grafen takviyeli numuneler arasında ise en yüksek elektrik iletkenliğine sahip numunenin ağırlıkça %5 grafen içeren numunede olduğu görülmektedir. Bu numune aynı zamanda takviye elemanı içeren numuneler arasında da en yüksek iletkenlik değerine sahip olan numunedir. Burada dikkat çeken en önemli nokta ise ağırlıkça %5 grafen takviyesi içeren numunenin elektriksel iletkenlik değerinin (46 IACS) takviyesiz olan Cu(MA'lı) kodlu numunenin sahip olduğu elektriksel iletkenlik değerinden çok az da olsa yüksek çıkmasıdır. Rajkumar ve Aravindan'ın (2013) yaptığı çalışmalarda nanografite partiküllerinin %15 oranına kadar elektriksel iletkenliği geliştirdiğinin ortaya koymuşlardır [127]. Ağırlıkça %5 oranında ölçülen iletkenlik değerinin nispeten yüksek olması literatür ile de uyumlu çıkmıştır. Ve yine aynı çalışmaya göre belirli seviyelerin üzerine çıkan takviye oranları ile iletkenlik azalmaktadır. Ancak Rajkumar ve Aravindan'ın (2013) yaptıkları çalışmada kullandıkları nanografite takviyesinin aksine nanografite levha ile üretilen fırça numunelerinde elektriksel iletkenlik değeri %5 takviye oranının üzerine çıkıldığında oldukça olumsuz bir seyir izlemiş ve elektriksel iletkenlik değeri hızlı bir düşüş sergilemiştir. Bu değer ağırlıkça %30 grafen takviyesinde 0.55 IACS değerine kadar düşmüştür. Grafen düzlemsel olarak metalik karakter gösterdiği için iyi bir elektriksel iletkenliği vardır. Ancak tabakalar arasında etki gösteren zayıf Van der Waals bağları nedeniyle düzleme dik olan konumlarda elektriksel iletkenlik değerleri oldukça zayıftır [128]. Dolayısıyla yönlendirilmemiş ve mekanik

alaşım ile dağıtılmış olan grafen oranı arttıkça elektriksel iletkenlik değerleri azalmaktadır.

h-BN takviyeli bakır esaslı numuneler değerlendirildiğinde ağırlıkça %5 h-BN takviyesi içeren numunede elektrik iletkenliği değeri 12.4 IACS olarak ölçülmüştür. Diğer takviye oranlarında ise (%10 ve %20) IACS biriminde ölçüm alınamamıştır. h-BN katı yağlayıcı [69, 71] olarak çokça tercih edilen bir malzeme olmasının yanı sıra bir çok fiziksel özelliği anizotropik [129] davranış sergileyen dielektrik [130] bir malzemedir. Bundan dolayı h-BN ilavesinin artmasıyla iletkenlik değerinin düşmesi beklenen bir sonuçtur. h-BN takviyeli bu malzeme grubunun asıl üretim amacı katı yağlayıcılık özelliğinden faydalanarak fırça malzemelerindeki kullanılabileceği maksimum takviye oranını belirlemektir. (Yağlayıcılık özelliğine ilişkin verilere aşağıdaki paragraflarda değinilecektir.)

Üretimi gerçekleştirilen bir diğer numune grubu grafen ve az miktarlarda (%0.5 ve %1) Al₂O₃ takviyesi içeren bakır esaslı elektrik motor fırçalarıdır. Bu numunelerin elektrik iletkenlikleri incelendiğinde en yüksek iletkenlik değerinin ağırlıkça %5 grafen - %0.5 Al₂O₃ içeren numunede 20.2 IACS olduğu tespit edilmiştir. Takviye oranı en düşük olan numune olarak bu durum beklenen bir sonuçtur. Ancak burada dikkat çeken önemli nokta ağırlıkça %5 grafen takviyeli numune ile karşılaştırıldığında elektriksel iletkenlik değerindeki %55'nin üzerinde bir değer kaybı göstermesidir. Saf Cu(MA'sız) ve Cu(MA'lı) kodlu numuneler incelendiğinde mekanik alaşımlama işleminin elektriksel iletkenliği düşürdüğü tespit edilmişti. Ayrıca grafen takviyesinin (%5 grafen takviyeli bakır fırçada) elektriksel iletkenlik üzerindeki etkisinin çok küçük olduğu da görülmüştü. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ise Al₂O₃ katkısının [131] iletkenlik özelliğinin düşürdüğü belirtilmiştir. Dolayısı ile Al₂O₃ katkısının elektriksel iletkenliği düşürmesi beklenen bir sonuçtur. Ayrıca grupta bulunana diğer numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri incelendiğinde ağırlıkça %5, %10 ve %15 grafen oranlarına ek %0.5 Al₂O₃ takviyesi içeren numunelerin %5, %10 ve %15 grafen oranlarına ek %1 Al₂O₃ takviyesi içeren numunelere göre iletkenlik değerlerini yaklaşık %65 -72 oranlarında düşürdüğü tespit edilmiştir.

Grafen takviyelerine ilave SiC içeren numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri incelendiğinde Al_2O_3 takviyesine göre iletkenlik değerini daha fazla düşürdüğü tespit edilmiştir. Ancak bu grupta da Al_2O_3 takviyeli grupta olduğu gibi ağırlıkça %0.5 SiC takviyesi içeren numunelerde iletkenlik değerleri ağırlıkça %1 SiC takviyesi içeren numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Hatta %10 grafen - %1 SiC ve %15 grafen - %1 SiC takviyesi içeren numunelerde IACS biriminde ölçüm alınamamıştır. Bu grupta dikkat çeken bir diğer unsur da %15 grafen - %0.5 SiC takviyesi içeren numunenin (2 IACS) elektriksel iletkenlik değerinin %10 grafen - %0.5 SiC takviyesi içeren numuneye (0.9 IACS) göre daha yüksek bir değer sergilemiş olmasıdır. Bu durum %15 grafen takviyesi içeren bakır esaslı fırça ile kıyaslandığında SiC' ün elektriksel iletkenliği bir miktar azalttığını doğrulasa da %10 grafen takviyeli numune ile %10 grafen - %0.5 SiC takviyeli numune incelendiğinde beklenenin aksine daha düşük değerde bir iletkenlik sergilemiştir. Bu durum literatürde, parçacıkların matris fazı içerisindeki dağılımına dayandırılmıştır [132].

Diğer bir grup olan grafene ek ağırlıkça %0.5 ve %1 oranlarında B_4C takviyeli numunelerin oluşturduğu diğer bir grup incelendiğinde de ağırlıkça %0.5 oranında B_4C takviyesi içeren numunelerin %1 oranında B_4C takviyesi içeren numunelere göre daha yüksek elektriksel iletkenlik değeri verdiği görülmüştür. Ancak elektriksel iletkenlik ölçülemeyen numune olmamasına rağmen en düşük oranda takviye içeren fırça numunesinde (%5 grafen - %0.5 B_4C) iletkenlik değerinin 8.2 IACS değerinde kaldığı tespit edilmiştir. Benzer oranda Al_2O_3 ve SiC takviyesi içeren numunelerde bu değer çok daha yüksek olduğu dikkat çekici bir husustur. Bu durum B_4C 'nin yarıiletken bir malzeme [56] olmasında kaynaklanabileceği gibi, XRD grafiklerinde muhtemel izlerine rastlanan ve Gibbs serbest enerji analizi ile oluşabileceği belirlenen B ve B_2O_3 gibi bileşenlerden de kaynaklanabileceği tespit edilmiştir.

Grafen takviyesine ek ağırlıkça %0.5 ve %1 oranlarında h-BN takviyesi içeren gruba gelindiğinde yine ağırlıkça %1 h-BN takviyesi içeren numunelerin elektriksel iletkenliklerinin ağırlıkça %0.5 h-BN içeren numunelere göre bir miktar daha yüksek elektriksel iletkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında grafen takviyeli numunelerin diğer takviye elemanlarına göre elektriksel iletkenliklerini daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

Takviye elemanı ilave edilmeden üretilen Cu(MA'lı) ve Cu(MA'sız) kodlu numuneler, kullanılan cihazda henüz rodaj aşamasında çok yüksek sarsıntılara neden olduğu için Elektro-mekanik aşınma deneyleri gerçekleştirilememiştir. Yürütülen deneyler genel olarak incelendiğinde ise ağırlıkça %5 grafen ve %1 Al₂O₃ içeren fırçada minimum sürtünme kuvveti tespit edilmiş olup ortalamasının 0.08 N olduğu görülmüştür. En yüksek sürtünme kuvveti değerinin ise ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 h-BN iç katkılı numunede olduğu tespit edilmiş olup ortalama sürtünme kuvveti değerinin 0.31N olduğu görülmüştür. Sürtünme deneyleri ile ölçülen voltaj kaybı değerlerinin maksimum ve minimum noktalarını veren numune bileşimleri ve voltaj değerlerinin ortalamaları sırasıyla, ağırlıkça %20 h-BN içeren numune ile 7.72 V ve ağırlıkça %10 grafene - %0.5 Al₂O₃ içeren numune ile 0.03 V olarak ölçülen fırçalar olduğu tespit edilmiştir.

Cu – grafen takviyeli fırça numunelerine ait performans grafikleri incelendiğinde her ne kadar bazı çalışma koşullarında sapmalar olsa da genel voltaj düşümü davranışı artan akım yoğunluğu ve dönme hızı ile artış gösterme eğilimdedir. Bu durum düşen iletkenlik değeri ile uyumlu bir sonuçtur. Numunelerin sadece sürtünme kuvveti değerleri incelendiğinde ise farklı çalışma koşullarında sürtünme kuvveti değerlerinin farklı tavır sergilediği ve belirli bir kalıba uymadığı tespit edilmiştir. Örneğin ağırlıkça %5 grafen takviyeli bakır fırçada artan çalışma koşullarında sürtünme kuvveti artarken ağırlıkça %15 grafen takviyeli fırça numunesinde artan akım yoğunluğu ve dönme hızı ile sürtünme kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum malzemelerin elektriksel iletkenlikleri ve grafenin akım karşısında gösterdiği davranış ile yakından ilgilidir.

h-BN takviyeli bakır fırçaların performans deneylerine ait grafikler incelendiğinde ağırlıkça %5 h-BN takviyeli fırça numunesinde artan artan dönme hızı ile sürtünme kuvvetinin azaldığı ve h-BN'nin katı yağlayıcı olarak ideal bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Buna karşın elektriksel iletkenlik değerine paralel olarak, ölçülen voltaj düşümü değerinin artan akım yoğunluğu ile arttığı gözlenmiştir. Ancak ağırlıkça %10 h-BN içeren numunede sürtünme kuvveti ve voltaj düşümü değerlerinin artan çalışma parametreleri ile arttığı ve ağırlıkça %20 h-BN içeren numunede ise düzensiz ancak oldukça yüksek sürtünme kuvvetlerinin yanı sıra yine artan çalışma parametreleri ile artan bir voltaj düşümü sergilediği tespit edilmiştir. Hem grafenin hem de h-BN'nin katı yağlayıcı olarak

kullanılan malzemeler olmasına rağmen çalışmada belirtilen metotlarla üretimi gerçekleştirilen fırça numunelerinde sürtünme kuvvetlerinin, seramik partikül içeren numunelerde daha yüksek çıktığı görülmüştür. Örneğin, %10 grafen ve %1 h-BN içeren fırça numunesinin ortalama sürtünme kuvveti değeri 0.09 N iken %5 grafen ve % Al₂O₃ içeren numunede ortalama sürtünme kuvveti 0.08 N olduğu tespit edilmiştir. Bu durum grafen ve h-BN'nin akım altında farklı davranış karakterleri sergilediğini göstermektedir.

Grafen - Al₂O₃ ve grafen - SiC takviyelerini içeren bakır esaslı motor fırça numunelerinin performans grafikleri incelendiğinde hem sürtünme kuvveti hem de voltaj düşümü değerlerinin düzensiz davranışlar sergilediği görülmüştür. Sadece grafen takviyesi yapılan numunelerde de benzer düzensizliklerin gözlemlendiği düşünülürse bu durumun uyumlu bir sonuç olduğu görülecektir. Bu sonuçlar literatürde, grafene yapılan radikal ilaveler ve işlem süreleri ile iletkenliğinin azalabileceği [128, 133] ve önceden belirlenen bant boşlukları ile foksionelleştirilerek yarıiletken bir form kazandırılabilceği [134] ile açıklanmaktadır.

B₄C takviyesi içeren numuneler incelendiğinde voltaj düşümü değerinin ortalamada artan bor karbür oranı ile arttığı görülmektedir. Bu bakımdan değerlendirildiğinde bor karbür elektrik iletkenliği konusunda numuneyi olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bu durum Şekil 48'de gösterilen elektrik iletkenliği grafiğinde de açıkça görülmektedir. Bor karbür için yapılan bu değerlendirmede bir çelişki söz konusu olsa da kompozit malzemelerin üretimi, ihtiva ettikleri katkı malzemeleri, porozite gibi birçok değişkenin etkili olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin iletkenlik değeri 46 IACS olan %5 grafen katkılı fırça numunesinde voltaj düşümü ortalaması yaklaşık 0.1 V iken, iletkenlik değeri 0.55 IACS olarak ölçülen %30 grafen takviyeli bakır fırça numunesinde ortalama voltaj düşümü değeri yaklaşık 0.6 V seviyelerinde ölçülmüştür. Ancak voltaj kayıplarında; toz metalürjisi yöntemleri, sinterleme prosesleri, takviye elemanları ve porozite gibi birçok parametrenin de etkinliği göz önünde bulundurulmalıdır. Elektriksel iletkenliğin azalması ile malzemenin elektriksel direncini yükselteceğinden malzeme üzerinden geçen akım değerini azaltacaktır. Dolayısı ile azalan elektriksel iletkenlik ile voltaj kayıplarının artması olağan bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca grafen ve h-BN takviyeli gruplar genel olarak değerlendirilecek olursa h-BN katkısının beklentinin aksine sürtünme kuvvetinde belirgin bir katkı yapmadığını söylemek mümkündür.

Elektro-mekanik aşınma deney grafikleri genel olarak incelendiğinde ise çoğu eğrinin düzensiz bir seyir izlediği görülmektedir. Zhao, H. ve arkadaşlarının (2001) [135] yaptığı çalışmada bu durum; akımsız olarak yürütülen çalışmalarda aşınmanın Archard eşitliği ile doğrudan örtüştüğü ama akım kullanılarak yürütülen deneylerde işleyen sisteminin çok daha karmaşık olduğu şeklinde açıklanmış ve bu durumun akımın oluşturduğu ısı etkisinden kaynaklanmış olabileceğine değinilmiştir. Ayrıca Benameur, M. M. ve arkadaşlarının (2015) [136] yürüttüğü çalışmada grafenin yük altında elektrik direncinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca grafenin Hall etkisi ve ayarlanabilir bant genişliğine sahip bir malzeme olması [137] fırça çalışmalarında yay basıncı, sürtünme ve akım etkisinde farklı davranışlar sergilemesine sebep olmaktadır.

Üretilen elektrik fırça numunelerinde porozite değerleri incelendiğinde ağırlıkça %15 grafen ve %1 B₄C içeren numunenin porozitesi en yüksek numune olduğu görülmüş ve % porozite değeri 22.4 olarak tespit edilmiştir. En düşük porozite değerine sahip fırça numunesi ağırlıkça %10 grafen ve %0.5 SiC takviyeli numune olarak tespit edilmiş olup % porozite değeri 5.1 olarak ölçülmüştür. Bu numune porozite değerinin önemli olduğu çalışmalarda (ör. nemli ortamlarda) tercih edilebilecek bileşim olarak tespit edilmiştir.

Alınan Brinell sertlik değerlerine göre sertliği en yüksek olan numune ağırlıkça %5 grafen içeren bakır fırça olduğu tespit edilmiştir. Bu fırça numunesinin sertliği 20 BSD olarak tespit edilmiştir. Nispeten yüksek sertlikte olması beklenen ancak sertliği en düşük olarak tespit edilen hibrit fırça ise ağırlıkça %5 grafen ve %0.5 Al₂O₃ içeren bakır fırça bileşiminde bulunmuş olup 5.2 BSD olarak ölçülmüştür.

Ağırlık kayıpları verileri incelendiğinde, üretimi gerçekleştirilen numuneler arasında minimum ağırlık kaybı gösteren numunenin %5 grafen -%0.5 B₄C bileşimine sahip bakır matrisli fırça numunesi olduğu ve 16 m/s'lik dönme hızı ile 8 A/cm²'lik akım yoğunluğundaki çalışma koşullarında 2.7 mg aşınma kaybı tespit edilmiştir. En fazla aşınmanın ise ağırlıkça %20 h-BN içeren numunede, 32 m/s kayma hızı ve 16 A/cm²'lik akım yoğunluğu değerlerindeki performans değerleri sonucunda toplam 152.4 mg olarak ölçülmüştür. Toplam ağırlık kayıplarında en çok aşınma kaybı gösteren numunenin de yine ağırlıkça %20 h-BN içeren numune olduğu görülmüştür.

Üretilen bakır fırçaların yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde sadece grafen takviyeli numunelerin yüzey pürüzlülükleri çoğunlukla azalma, sadece h-BN takviyeli numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri çoğunlukla artma ve diğer gruptaki numunelerin ise çoğunlukla başlangıç değerlerini koruma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda nanografite parçacıkların boşlukları doldurma [127] eğilimi olduğu bildirilmiştir. Dolayısıyla ile grafen takviyeli bakır fırçada yüzey pürüzlülüğünün azalması beklenen bir sonuçtur. h-BN takviyeli bakır fırça numunelerinde aşınma kayıplarının oldukça fazla olduğu Şekil 94'te de görülmektedir. Bu bağlamda h-BN ilavesinin grafen gibi davranmadığı tespit edilmiştir. h-BN'nin sinterlenme durumunun zayıf olduğu [66] literatür çalışmalarında da bildirilmiş bir durumdur. Dolayısıyla karşılaşılan bu durumun sinterleme mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Diğer takviye elamanlarında ise (Al_2O_3 , SiC, B_4C) yüzey pürüzlülük değeri neredeyse başlangıç değerlerini korumuştur. Her ne kadar yüzeyde abrasif aşınma izlerine rastlansa da yapıyı destekleyen bu sert patiküllerin pürüzlülük üzerine olumlu davranış sergilediği görülmektedir. Ayrıca pürüzlülük grafikleri genel olarak değerlendirildiğinde en düşük pürüzlülük sergileyen numunelerin çoğunlukla takviye oranları en düşük olan numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Pürüzlülük değeri $4.5 \mu m$ ile en yüksek ortalama pürüzlülük değerinin olduğu grafen – SiC takviyeli grupta, $5.6 \mu m$ 'lik ortalama pürüzlülük değeri sergileyen numune ağırlıkça %10 grafen - %1 SiC takviyeli bakır fırçada ölçülmüştür. En düşük pürüzlülük değeri ise ağırlıkça %10 grafen takviyeli bakır fırçada $0.8 \mu m$ olarak gerçekleşmiştir.

Numunelerin çalışmaları esnasında hem akım etkisiyle hem de sürtünme etkisiyle oluşan sıcaklık değişimleri incelendiğinde hemen hemen her numunede artan akım yoğunluğu ve dönme hızı ile sıcaklık değişimi artış sergilemiştir. İstisnai bir durum olarak %20 h-BN takviyeli numunede artan akım yoğunluğu ve dönme hızı ile birlikte sıcaklığın önce çok az bir miktar azaldığı ve sonrasında neredeyse aynı kaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, hacimce yaklaşık %50 oranına tekabül eden bu bileşimde h-BN'nin termal iletkenliğinin yüksek olmasıdır [138]. $34.8 \text{ }^\circ C$ sıcaklık değeri ile en yüksek ortalama sıcaklık değeri ağırlıkça %15 grafen - %1 B_4C takviyeli numunede, $30.5 \text{ }^\circ C$ sıcaklık ile en düşük ortalama sıcaklık değeri ağırlıkça %5 grafen - % $0.5Al_2O_3$ takviyeli numunelerde gerçekleşmiştir.

SEM görüntüleri incelendiğinde grafen oranı artan bakır esaslı motor fırçalarında abrasif aşınmadan adezif aşınmaya doğru değişen baskın aşınma mekanizması dikkat çekmektedir. Bu durum grafenin tabakalı yapısından kaynaklanmaktadır. h-BN takviyeli grup incelendiğinde artan takviye oranı ile mevcut olan abrasif aşınma mekanizmasının giderek baskın hale geldiği tespit edilmiştir. h-BN takviyeli bu grubun sürtünme kuvveti, grafen takviyeli ilk gruba göre nispeten düşük çıkmasına karşın aşınma dayanımı konusunda yeterince iyi bir tutum sergileyememiştir. Grafen – Al₂O₃ takviyeli bakır fırçaların SEM görüntüleri incelendiğinde abrasif ve adezif aşınma mekanizmalarının neredeyse aynı yoğunluk görüldüğü tespit edilmiştir. Ağırlıkça %1 Al₂O₃ takviyesi içeren numunelerde abrasif aşınma mekanizmasının bir miktar daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. Grafen takviyesine ek SiC takviyesi içeren numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde ise baskın aşınma mekanizmasının abrasif aşınma olduğu tespit edilmiştir. Grafene ek B₄C takviyesi içeren bakır esaslı fırça numuneleri incelendiğinde ise aşınma hem adezif aşınma izlerine hem de abrasif aşınma izlerine rastlanmıştır. Grafene ek h-BN takviyesi içeren numuneler incelendiğinde abrasif aşınma izlerini gösteren çiziklerin bulunmasına karşın baskın mekanizmanın adezif aşınma olduğu tespit edilmiştir. Abrasif ve adezif aşınma izlerinin yanı sıra bazı numunelerde ark aşınması izlerine de rastlanmıştır. Bu aşınma mekanizması hiçbir numunede bakın mekanizma olmamakla birlikte %30 Gr, %10 Gr - %1 Al₂O₃, %15 Gr - %1 Al₂O₃, %10 Gr - %0.5 SiC, %5 Gr - %1 B₄C, %15 Gr - %1 B₄C, %10 Gr - %1 h-BN, %15 Gr - %0.5 h-BN, %15 Gr - %1 h-BN numunelerinde ark aşınma belirtisi olan ergiyik bölgelerine rastlanmıştır.

Saf toz numunelerinin XRD analizi sonrasında beklenmeyen bazı bileşik ve elementlerin oluşmuş olabileceği görüldü. Bahsi geçen bu bileşik ve elementlerin oluşma ihtimallerinin Gibbs serbest enerjisi değerlerine bakılarak incelendiğinde Cu₂O, SiO₂, B₂O₃ bileşiklerinin 0 – 1000 °C aralıklarında kendiliğinden oluşabileceği görüldü. B elementinin oluşma durumunun ise reaksiyona bağlı olduğu tespit edildi. Al₂O₃'ten ise Al elementinin belirtilen sıcaklıklarda dışardan enerji vermeksizin oluşamayacağı belirlendi. Mekanik alaşımlama işleminden sonra yapılan analizlerde Al₄C₃, Cu₂O, CuO bileşikleri oluştuğuna dair piklere rastlanmıştır. Al₄C₃ bileşiğinin Gibbs serbest enerjisi değerlerine göre kendiliğinden oluşamayacağı, Cu₂O ve CuO bileşiklerinin ise Gibbs serbest enerjisi değerlerine göre kendiliğinden oluşabileceği tespit edilmiştir. Elektro – mekanik aşınma deneyi sonrasında yapılan XRD incelemeleri sonucunda Al₄C₃, CuO₂, SiO₂, B₂O₃, CuO ve

Cu₂O bileşiklerine ait piklerin oluştuğu görülmüştür. XRD verileri incelendiğinde Al₄C₃ bileşiğinin Gibbs serbest enerjisine göre kendiliğinden oluşamayacağı; SiO₂, B₂O₃, CuO ve Cu₂O bileşiklerinin ise kendiliğinden oluşabilecek fazlar olduğu görülmüştür. Cu₂O bileşiğinin durumu ise belirlenememiştir. Ancak literatürde [43] koruyucu bir oksit tabakası olarak oluşabileceği belirtilmiştir. Bahsi geçen faz ve element oluşumları belirtilen sıcaklıklarda kendiliğinden oluşma eğilimi göstermektedir. Oysa yürütülen çalışmada toz numuneler mekanik alaşımla işlemine tabii tutulmuştur. Bu da toz taneciklerine enerji verildiği anlamına gelmektedir. Literatürde yürütülen çalışmalarda farklı oranlarda yapılan çalışmalarda Al₄C₃ gibi istenmeyen fazların oluştuğuna değinilmiştir [125]. Güvenilir sonuçlar için XRD analizlerinin minimum %3-5 oranlarında takviye elemanları içermesi önerilmektedir.

Yapılan çalışmalarda, elektro-mekanik aşınma deneyi öncesi tüm numuneler rodaj işlemine tabii tutulmuştur. 10 m/s kayma hızında, 6650 m (\pm 150 m) yol ve akımsız olarak yapılan rodaj işleminde numunelerin gösterdiği sürtünme kuvveti değerleri de veri olarak alınmıştır. Bu verilere göre tüm numunelerin rodaj esnasında gösterdikleri sürtünme kuvveti değerleri akım altında gösterdikleri sürtünme kuvveti değerlerinden fazladır. Buradan elektrik akımının bir yağlayıcı gibi görev yaptığı tespit edilmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarına [13, 35, 36] göre tüm ihtiyaçları karşılayacak bir fırça üretmenin neredeyse imkansız olduğu görülmektedir. Genel olarak çalışmalar ve piyasa talepleri incelendiğinde ise ihtiyaca uygun fırça üretimi gündeme gelmektedir. Yürütülen bu çalışmada da bir fırçanın tüm özelliklerinin iyi olmasından ziyade bir özelliğin hangi bileşende iyi olduğunun belirtilmesi daha yerinde olacaktır. Örneğin hassas çalışmalarda sürtünme kayıpları önem arz edeceğinden sürtünme kuvveti en az olan %5 grafen takviyeli bakır fırçanın kullanılması yerinde olacaktır. Ya da daha uzun süre çalışması istenen bir elektrik motorunda uzun ömürlü bir fırça ihtiyaca cevap verecektir. Bu numune ise en az ağırlık kaybı sergileyen %5 grafen - %0.5 Al₂O₃ takviyeli bakır fırçadır. Yine hassas bir motorda voltaj değişimlerinin etkisini azaltmak için minimum voltaj değişimi sunması nedeniyle %10 grafen - %0.5 Al₂O₃ takviyeli bakır fırçanın tercih edilmesi yerinde olacaktır.

5.SONUÇLAR

- 1- Kompozit fırçalara yapılan takviye elemanları elektriksel iletkenliği düşürmüştür. Elektriksel iletkenliği en çok düşüren takviye fazları SiC ve B₄C olarak saptanmıştır.
- 2- Kompozit fırçalarda elektro-mekanik deneyler sürtünme kuvvetinin en az olduğu kompozisyon ikili kompozit fırçalarda ağırlıkça %5 grafen katkısında görülmektedir.
- 3- Kompozit fırçalarda elektro-mekanik deneyler en az sürtünme kuvvetinin olduğu bileşim üçlü kompozit fırçalarda değişik oranlarda grafen ve Al₂O₃ takviyesi içeren numunelerde görülmüştür.
- 4- Genelde artan takviye oranı ile birlikte voltaj kayıplarının arttığı tespit edilmiştir. h-BN takviyesinin voltaj kaybını en fazla arttırdığı belirlenmiştir.
- 5- Üretilen fırça malzemelerinde genel olarak artan takviye oranı ile porozite değerinin arttığı belirlenmiştir.
- 6- Porozite değerleri incelendiğinde, grafen – h-BN kompozisyonundaki numunelerin ortalama % porozite değerinin en yüksek olduğu ve h-BN ilavesinin poroziteyi arttırdığı tespit edilmiştir.
- 7- En düşük porozite oranının bakır – grafen – SiC üçlü fırça bileşiminde olduğu görülmüştür.
- 8- Artan grafen oranının artışı ile sertliğin düştüğü tespit edilmiştir.
- 9- Grafen takviyesine ilave olarak eklenen B₄C parçacıkları, diğer katkı (Al₂O₃, B₄C, SiC, h-BN) malzemelerine göre sertliği nispeten yüksek tuttuğu görülmüştür.

- 10- Sadece h-BN takviyesi içeren bakır fırçaların ortalamada en fazla aşınma kaybı gösteren numuneler olduğu tespit edilmiştir.
- 11- Grafen takviyesine ek B₄C içeren fırçaların ortalamada en az aşınma kaybı gösteren numuneler olduğu tespit edilmiştir.
- 12- Bakır – grafen kompozisyonu ve bakır – grafen – h-BN kompozisyonuna sahip numunelerin en düşük yüzey pürüzlülük değerleri sergilediği belirlenmiştir.
- 13- Bakır – SiC kompozisyonuna sahip olan fırçaların yüzey pürüzlülüğü değerlerinin en yüksek olan fırça grubu olduğu tespit edilmiştir.
- 14- En yüksek çalışma sıcaklığı değerinin bakır – B₄C içeren bileşim oranında olduğu saptanmıştır.

6.ÖNERİLER

- 1- Bu çalışmada üretilen numuneler farklı mekanik alaşımlama sürelerinde üretilip incelenebilir.
- 2- Bu çalışmada üretilen seriler karıştırma yöntemi ile üretilip mekanik alaşımlama ile kıyaslanabilir.
- 3- Kalıplama yöntemi (sıcak presleme) ve kalıplama basınçları değiştirilebilir.
- 4- Sinterleme süresi ve sıcaklığı değiştirilebilir. Sıvı faz sinterleme yöntemi ile numune üretimine gidilebilir.
- 5- Fırça bileşimlerinde kullanılan sert parçacıklara ilaveten daha yumuşak (alüminyum veya gümüş gibi) ve iletkenlikleri daha yüksek malzemeler kullanılabilir. Hatta matris malzemesi değiştirilerek takviye fazları aynı oranda kalacak şekilde üretilebilir.
- 6- Akım türü olarak alternatif akım (AA) kullanılabilir.
- 7- Her bileşim için kolektör film oluşumu izlenerek kolektör ömrü üzerine çalışmalar yürütülebilir.

7.KAYNAKLAR

1. Askeland, D.R., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, M. Erdoğan, 1, Nobel Yayın Dağıtım Ltd.Şti., Ankara, 1998.
2. Onaran, K., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 11, Bilim Teknik Yeynevi, İstanbul, Türkiye, 2009.
3. Smith, W., F., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, N. Kınikoğlu, G., 3, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 2001.
4. H.J. Bargel, P.C., H. Hilbrans, G. Schulze, G. Wurzel, Malzeme Bilgisi A.A. Şefik Güleç, G.S. H.J. Bargel editor, 1, İ.T.Ü., İstanbul, 1988.
5. Callister, W.D. ve Rethwisch, D.G., Materials science and engineering, 5, John Wiley & Sons NY, 2011.
6. Şahin, Y., Kompozit malzemelere giriş, Gazi Kitabevi, 2000.
7. http://www.teknolojikarastirmalar.com/eegitim/yapi_malzemesi/icerik/kompozit.htm 14 Ocak 2011.
8. William D. Callister, J., Materials Science and Engineering An Introduction, 7, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2007.
9. Michael F. Ashby, D.R.H.J., Engineering Materials 2, 2, Butterworth-Heinemann, Great Britain 1998.
10. William D. Callister, J.a.D.G.T., Fundamentals of Materials Science and Engineerig, 3, John Wiley and Sons, Inc., 2008.
11. Chung, D.D.L., Applied Materials Science, CRC Press, USA, 2001.
12. Aran, A., Elyaf takviyeli karma malzemeler, İ.T.Ü. Rektörlük Ofset Atölyesi, İstanbul, 1990.
13. Handbook of Electric Motors, G.B.K. H.A. Toliyat editor, G.B.K. Hamid A. Toliyat editor, 2, CRC Press, 2004.
14. Anonim, S.v.T.B. T.C. Bilim, Türkiye Sanayi Stratejisi Belgesi 2011-2014,2011.
15. Anonim, S.v.T.B. T.C. Bilim, Türkiye Sanayi Stratejisi Belgesi 2007-2010,2007.
16. Anonim, S.v.T.B. T.C. Bilim, Türkiye Sanayi Stratejisi Belgesi 2015-2018,2015.
17. MEGEP, Tesisat Teknolojisi ve İklimlendirme T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2014. http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Elektrik%20Motor%20Ba%C4%9Flant%C4%B1lar%C4%B1.pdf.

18. Tong, W., Mechanical Design of Electric Motors, CRC Press, 2014.
19. Anonim, Elektrik Elektronik Teknolojisi - Elektrikli Ev Aletlerinde DC Motorlar T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011. http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Elektrikli%20Ev%20Aletlerinde%20Dc%20Motorlar.pdf.
20. Anonim, Bilişim Teknolojileri - Motorlar, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2013. <http://immibilisim.com/moduller/4-%20Motorlar.pdf>.
21. Anonim, Elektrik Elektronik Teknolojisi - Doğru Akım Motorları, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011. http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Do%C4%9Fru%20Ak%C4%B1m%20Motorlar%C4%B1.pdf.
22. Anonim, Elektrik Elektronik Teknolojisi - AC ve DC Makineler, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011. http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Ac%20Ve%20Dc%20Makineler.pdf.
23. Anonim, DC Motor ve Parçaları.
24. Anonim, Genel Ürün Kataloğu. Asenkron Motorlar, (2016).
25. Adak, S., Endüstride PLC Kullanımı ve Asenkron Motorların Dinamik Frenlenmesi
26. Yaşar, İ., Metal-Grafit Esaslı Elektrik Fırçalarının Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002.
27. Xia, J.-t., Hu, Z.-l., Chen, Z.-h. ve Ding, G.-y., Preparation of carbon brushes with thermosetting resin binder, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17,6 (2007) 1379-1384.
28. Argibay, N., Bares, J.A. ve Sawyer, W.G., Asymmetric wear behavior of self-mated copper fiber brush and slip-ring sliding electrical contacts in a humid carbon dioxide environment, Wear, 268,3-4 (2010) 455-463.
29. Hu, Z.L., Chen, Z.H., Xia, J.T. ve Jing, G.Y., Properties of electric brushes made with Cu-coated graphite composites and with copper powders, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17 (2007) S1060-S1064.
30. Hu, Z.L., Chen, Z.H., Xia, J.T. ve Ding, G.Y., Wear property of high-resistivity carbon brushes made with and without MoS(2) in variable humidity, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18,2 (2008) 340-345.
31. Yasar, I., Canakci, A. ve Arslan, F., The effect of brush spring pressure on the wear behaviour of copper-graphite brushes with electrical current, Tribology International, 40,9 (2007) 1381-1386.

32. Jeff D. Koenitzer, P.E., The Effect of Spring Pressure on Carbon Brush Wear Rate. (2008) 1-8.
33. Hawkins, N., Hawkins Electrical Guide...: Questions, Answers & Illustrations; a Progressive Course of Study for Engineers, Electricians, Students and Those Desiring to Acquire a Working Knowledge of Electricity and Its Applications; a Practical Treatise, T. Audel & Company, 1917.
34. Abkowitz, e.a.S., ASM Handbook, P.K.S.a.J.W. Newkirk editor, 7, ASM International, USA, 1992.
35. (Ed), W.C.K., Carbon, Graphite and Metal Graphite Brushes, National Carbon Company, Inc., University of Wisconsin, 1946. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=wu.89083898155;view=1up;seq=2>.
36. Lu, C.T. ve Bryant, M.D., Simulation of a Carbon Graphite Brush with Distributed Metal Particles, Ieee Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A, 17,1 (1994) 68-77.
37. Dorsey, G. ve Hayes, R., The effects of apparent contact area on thermal and electrical properties of Ag-MoS₂-C-graphite brushes in contact with coin-silver slip rings, Electrical Contacts - 1997: Proceedings of the Forty-Third Ieee Holm Conference on Electrical Contacts, (1997) 272-280.
38. Anderson, P.et all, ASM Handbook, G.E. Dieter editor, ASM International, USA, 1997.
39. KuhlmannWilsdorf, D., Electrical fiber brushes - Theory and observations, Ieee Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A, 19,3 (1996) 360-375.
40. Chawla, N.C.a.K.K., Metal Matrix Composites, Springer, USA, 2006.
41. Martin, J.W., Materials for Engineering, 3, CRC Press, USA, 2006.
42. all, A.E.A.a.e., ASM Handbook, P.J. Blau editor, 18, ASM International, USA, 1992.
43. Milenko Braunovic ´, V.V.K., and Nikolai K. Myshkin, Electrical Contacts Fundamentals, Applications and Technology, CRC Press, Taylor and Francis Group, NW, USA, 2007.
44. Kroef, J.J.A., Carbon Brushes for Electrical Machines. (1997).
45. Taylor, O.S. ve Reichner, P., Mechanical Load Aspects of High-Current Brush System-Design, Ieee Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 2,1 (1979) 95-99.
46. Chalmers, B.J., Electric Motor Handbook, Elsevier Science, 2013.

47. Henney, K., Walsh, C. ve Laboratory, W.A.D.C.E.C., *Electronic Components Handbook*, McGraw-Hill, 1957.
<https://books.google.com.tr/books?id=SBDSAAAAMAAJ>.
48. Yohe, W.E. ve Division, S.C.C., *Carbon Brush Engineering Handbook*, Stackpole Corporation, 1982.
49. Carter, C.B. ve Norton, M.G., *Ceramic Materials: Science and Engineering*, Springer New York, 2013.
50. Munz, D. ve Fett, T., *Ceramics: Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection*, Springer, 1999.
51. Brook, R.J., *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, Elsevier Science, 2012.
52. Roesler, J., Harders, H. ve Baeker, M., *Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites*, Springer Berlin Heidelberg, 2007.
53. Erdemir, F., Canakci, A., Varol, T. ve Ozkaya, S., Corrosion and wear behavior of functionally graded Al₂O₃/SiC composites produced by hot pressing and consolidation, *Journal of Alloys and Compounds*, 644 (2015) 589-596.
54. Ge, D., Domnich, V., Juliano, T., Stach, E.A. ve Gogotsi, Y., Structural damage in boron carbide under contact loading, *Acta Materialia*, 52,13 (2004) 3921-3927.
55. Tan, Y.Q., Zhang, H.B. ve Peng, S.M., Electrically conductive graphene nanoplatelet/boron carbide composites with high hardness and toughness, *Scripta Materialia*, 114 (2016) 98-102.
56. Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R.A. ve Chhowalla, M., Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress, *Journal of the American Ceramic Society*, 94,11 (2011) 3605-3628.
57. Mukhopadhyay, P. ve Gupta, R.K., *Graphite, Graphene, and Their Polymer Nanocomposites*, Taylor & Francis, 2012.
58. Choi, W. ve Lee, J., *Graphene: Synthesis and Applications*, CRC Press, 2016.
59. Lu, W., Baek, J.B. ve Dai, L., *Carbon Nanomaterials for Advanced Energy Systems: Advances in Materials Synthesis and Device Applications*, Wiley, 2015.
60. Geim, A.K. ve Novoselov, K.S., The rise of graphene, *Nature Materials*, 6,3 (2007) 183-191.
61. Zhu, Y.W., Murali, S., Cai, W.W., Li, X.S., Suk, J.W., Potts, J.R. ve Ruoff, R.S., Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications, *Advanced Materials*, 22,35 (2010) 3906-3924.

62. Compton, O.C. ve Nguyen, S.T., Graphene Oxide, Highly Reduced Graphene Oxide, and Graphene: Versatile Building Blocks for Carbon-Based Materials, Small, 6,6 (2010) 711-723.
63. Huang, D.H., Gumbs, G. ve Roslyak, O., Field-enhanced electron mobility by nonlinear phonon scattering of Dirac electrons in semiconducting graphene nanoribbons, Physical Review B, 83,11 (2011).
64. Huang, B., Xu, Q. ve Wei, S.H., Theoretical study of corundum as an ideal gate dielectric material for graphene transistors, Physical Review B, 84,15 (2011).
65. Tjong, S.C., Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets, Materials Science & Engineering R-Reports, 74,10 (2013) 281-350.
66. Ni, D.W., Zhang, G.J., Kan, Y.M. ve Sakka, Y., Textured h-BN Ceramics Prepared by Slip Casting, Journal of the American Ceramic Society, 94,5 (2011) 1397-1404.
67. Ahmad, S., Sultan, A., Raza, W., Muneer, M. ve Mohammad, F., Boron nitride based polyaniline nanocomposite: Preparation, property, and application, Journal of Applied Polymer Science, 133,39 (2016).
68. Yang, H.J., Chen, G.X., Gao, G.Q., Wu, G.N. ve Zhang, W.H., Experimental research on the friction and wear properties of a contact strip of a pantograph-catenary system at the sliding speed of 350 km/h with electric current, Wear, 332 (2015) 949-955.
69. Motealleh, A., Ortiz, A.L., Borrero-Lopez, O. ve Guiberteau, F., Effect of hexagonal-BN additions on the sliding-wear resistance of fine-grained alpha-SiC densified with Y3Al5O12 liquid phase by spark-plasma sintering, Journal of the European Ceramic Society, 34,3 (2014) 565-574.
70. Chatterjee, S., Ganesh, P., Palai, R., Wu, J.A., Kaul, R., Majumdar, J.D. ve Choudhury, A.R., Effect of h-BN addition on the properties of nanostructured Al2O3-TiB2-TiN based coatings developed by combined SHS and laser surface alloying, Surface & Coatings Technology, 204,11 (2010) 1702-1709.
71. Urbaniak, W., Kaldonski, T., Kaldonski, T.J. ve Pawlak, Z., Hexagonal boron nitride as a component of the iron porous bearing: friction on the porous sinters up to 150 A degrees C, Meccanica, 51,5 (2016) 1157-1165.
72. D'Souza, R. ve Mukherjee, S., Thermoelectric transport in graphene/h-BN/graphene heterostructures: A computational study, Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures, 81 (2016) 96-101.
73. Beiranvand, R. ve Valedbagi, S., Electronic and optical properties of h-BN nanosheet: A first principles calculation, Diamond and Related Materials, 58 (2015) 190-195.
74. Golberg, D., Bando, Y., Huang, Y., Terao, T., Mitome, M., Tang, C.C. ve Zhi, C.Y., Boron Nitride Nanotubes and Nanosheets, Acs Nano, 4,6 (2010) 2979-2993.

75. Uddin, M.R., Doan, T.C., Li, J., Ziemer, K.S., Lin, J.Y. ve Jiang, H.X., Electrical transport properties of (BN)-rich hexagonal (BN)C semiconductor alloys, *Aip Advances*, 4,8 (2014).
76. Uecker, A., Lead-free carbon brushes for automotive starters, *Wear*, 255 (2003) 1286-1290.
77. Kim, B.Y., Ratcliff, E.L., Armstrong, N.R., Kowalewski, T. ve Pyun, J., Ferrocene Functional Polymer Brushes on Indium Tin Oxide via Surface-Initiated Atom Transfer Radical Polymerization, *Langmuir*, 26,3 (2010) 2083-2092.
78. Takaoka, M., Aso, T. ve Sawa, K., A commutation performance and wear of carbon-fiber brush in gasoline, *Proceedings of the Forty-Seventh Ieee Holm Conference on Electrical Contacts*, (2001) 44-49.
79. Wu, B., Xu, B.S., Zhang, B. ve Lu, Y.H., Preparation and properties of Ni/nano-Al₂O₃ composite coatings by automatic brush plating, *Surface & Coatings Technology*, 201,16-17 (2007) 6933-6939.
80. Ma, G.Z., Xu, B.S., Wang, H.D., Wang, X.H., Li, G.L. ve Zhang, S., Research on the microstructure and space tribology properties of electric-brush plated Ni/MoS₂-C composite coating, *Surface & Coatings Technology*, 221 (2013) 142-149.
81. Anonim, Carbon-Graphite Products Carbon Brush.
82. Anonim, Manufacturing Process and Material Properties of Carbon and Graphite Materials. (2004).
83. Ding, T., Chen, G.X., Bu, J. ve Zhang, W.H., Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph-catenary systems, *Wear*, 271,9-10 (2011) 1629-1636.
84. Groth, K., Heidenfelder, F. ve Holinski, R., Advancements of tribological performance of carbon brushes in electrical motors, *Industrial Lubrication and Tribology*, 53,1 (2001) 5-9.
85. Gencyilmaz, O. ve Taskopru, T., Effect of pH on the synthesis of CuO films by SILAR method, *Journal of Alloys and Compounds*, 695 (2017) 1205-1212.
86. McNab, I.R. ve Johnson, J.L., High-Current Brushes .3. Performance Evaluation for Sintered Silver-Graphite Grades, *Ieee Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 2,1 (1979) 84-89.
87. Anonim, How to Select Carbon Brushes for Motors and Generators. 1 (2009).
88. Bares, J.A., Argibay, N., Mauntler, N., Dudder, G.J., Perry, S.S., Bourne, G.R. ve Sawyer, W.G., High current density copper-on-copper sliding electrical contacts at low sliding velocities, *Wear*, 267,1-4 (2009) 417-424.

89. Johnson, J.L., Sliding Monolithic Brush Systems for Large Currents, Ieee Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 10,1 (1987) 3-17.
90. McNab, I.R., Recent Advances in Electrical-Current Collection, Wear, 59,1 (1980) 259-276.
91. Anonim, Brushes for Electrical Machines - Technical Guide.
92. Qian, G., Feng, Y., Li, B., Huang, S.Y., Liu, H.J. ve Ding, K.W., Effect of Electrical Current on the Tribological Behavior of the Cu-WS₂-G Composites in Air and Vacuum, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 26,2 (2013) 384-392.
93. Tu, J.P., Jiang, C., Guo, S.Y., Zhu, L.P., Fu, F.M. ve Zhao, X.B., Friction and wear properties of aligned film of amorphous carbon nanorods on anodic aluminum oxide template in vacuum, Surface & Coatings Technology, 198,1-3 (2005) 464-468.
94. Wang, Y.A., Li, J.X., Yan, Y. ve Qiao, L.J., Effect of electrical current on tribological behavior of copper-impregnated metallized carbon against a Cu-Cr-Zr alloy, Tribology International, 50 (2012) 26-34.
95. Anonim, Carbon Brushes A Comprehensive Guide, for Industrial and Railway Technology. (2013).
96. Anonim, Carbon Brush Troubleshooting Guide.
97. Anonim, Carbon Brushes for Industrial and Railway Technology
98. Anonim, Carbon Brush & Holder Technical Handbook. Engineering, (2013).
99. Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S.S. ve Dash, R.R., Tribo-performance of polyester hybrid composites: Damage assessment and parameter optimization using Taguchi design, Materials & Design, 30,1 (2009) 57-67.
100. Argibay, N. ve Sawyer, W.G., Low wear metal sliding electrical contacts at high current density, Wear, 274 (2012) 229-237.
101. Argibay, N., Bares, J.A., Keith, J.H., Bourne, G.R. ve Sawyer, W.G., Copper-beryllium metal fiber brushes in high current density sliding electrical contacts, Wear, 268,11-12 (2010) 1230-1236.
102. Ding, T., Chen, G.X., Li, Y.M., He, Q.D. ve Xuan, W.J., Friction and Wear Behavior of Pantograph Strips Sliding Against Copper Contact Wire with Electric Current, Aasri Conference on Power and Energy Systems, 2 (2012) 288-292.
103. Ding, T., Chen, G.X., Li, Y.M., Yang, H.J. ve He, Q.D., Arc erosive characteristics of a carbon strip sliding against a copper contact wire in a high-speed electrified railway, Tribology International, 79 (2014) 8-15.
104. Ding, T., Chen, G.X., Shen, M.X., Zhu, M.H. ve Zhang, W.H., Effect of Arc Discharge on Friction and Wear Behaviors of Stainless Steel/copper-impregnated

- Metalized Carbon Couple under Electric Current, Advances in Composites, Pts 1 and 2, 150-151 (2011) 1364-1368.
105. Ding, T., Chen, G.X., Wang, X., Zhu, M.H., Zhang, W.H. ve Zhou, W.X., Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds, Tribology International, 44,4 (2011) 437-444.
 106. Jia, S.G., Liu, P., Ren, F.Z., Tian, B.H., Zheng, M.S. ve Zhou, G.S., Electrotribological property of the Cu-Ag-Cr alloy with high-strength and high-conductivity, Metals and Materials International, 13,1 (2007) 25-30.
 107. Jia, S.G., Liu, P., Ren, F.Z., Tian, B.H., Zheng, M.S. ve Zhou, G.S., Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways, Wear, 262,7-8 (2007) 772-777.
 108. Jia, S.G., Liu, P., Ren, F.Z., Tian, B.H., Zheng, M.S. ve Zhou, G.S., Wear behavior of Cu-Ag-Cr alloy wire under electrical sliding, Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 398,1-2 (2005) 262-267.
 109. Findik, F. ve Uzun, H., Microstructure, hardness and electrical properties of silver-based refractory contact materials, Materials & Design, 24,7 (2003) 489-492.
 110. Wu, C.P., Yi, D.Q., Li, J., Xiao, L.R., Wang, B. ve Zheng, F., Investigation on microstructure and performance of Ag/ZnO contact material, Journal of Alloys and Compounds, 457,1-2 (2008) 565-570.
 111. Yang, X.H., Liang, S.H., Wang, X.H., Xiao, P. ve Fan, Z.K., Effect of WC and CeO₂ on microstructure and properties of W-Cu electrical contact material, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 28,2 (2010) 305-311.
 112. Madavali, B., Lee, J.H., Lee, J.K., Cho, K.Y., Challapalli, S. ve Hong, S.J., Effects of atmosphere and milling time on the coarsening of copper powders during mechanical milling, Powder Technology, 256 (2014) 251-256.
 113. Jabur, A.S., Effect of powder metallurgy conditions on the properties of porous bronze, Powder Technology, 237 (2013) 477-483.
 114. Bolzoni, L., Ruiz-Navas, E.M. ve Gordo, E., Influence of sintering parameters on the properties of powder metallurgy Ti-3Al-2.5V alloy, Materials Characterization, 84 (2013) 48-57.
 115. Samal, C.P., Parihar, J.S. ve Chaira, D., The effect of milling and sintering techniques on mechanical properties of Cu-graphite metal matrix composite prepared by powder metallurgy route, Journal of Alloys and Compounds, 569 (2013) 95-101.
 116. Boland, C.D., Hexemer, R.L., Donaldson, I.W. ve Bishop, D.P., Industrial processing of a novel Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy, Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 559 (2013) 902-908.

117. Guillet, A., Nzoma, E.Y. ve Pareige, P., A new processing technique for copper-graphite multifilamentary nanocomposite wire: Microstructures and electrical properties, Journal of Materials Processing Technology, 182,1-3 (2007) 50-57.
118. Varol, T. ve Canakci, A., An investigation on wear behavior of Cu-graphite nanocomposites prepared by flake powder metallurgy, Industrial Lubrication and Tribology, 69,1 (2017) 8-14.
119. Tu, J.P., Yang, Y.Z., Wang, L.Y., Ma, X.C. ve Zhang, X.B., Tribological properties of carbon-nanotube-reinforced copper composites, Tribology Letters, 10,4 (2001) 225-228.
120. Calin, R., Pul, M., Citak, R. ve Şeker, U., The effect of reinforcement ratio on the composite structure and mechanical properties in Al-MgO composites produced by the melt stirring method, 20, 2011.
121. Totten, G.E., Xie, L. ve Funatani, K., Handbook of Mechanical Alloy Design, Taylor & Francis, 2003.
122. Lee, H.L., Lu, W.H. ve Chan, S.L.I., Abrasive Wear of Powder-Metallurgy Al-Alloy 6061-Sic Particle Composites, Wear, 159,2 (1992) 223-231.
123. Zumgahr, K.H., Abrasive Wear of Coarse 2-Phase Metallic Materials, Zeitschrift Fur Metallkunde, 75,11 (1984) 881-889.
124. Alpas, A.T. ve Embury, J.D., Sliding and Abrasive Wear Behavior of an Aluminum (2014)-Sic Particle Reinforced Composite, Scripta Metallurgica Et Materialia, 24,5 (1990) 931-935.
125. Şenel, M., Gurbuz, M. ve Koç, E., New Generation Composites with Graphene Reinforced Aluminum Composites-"GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ YENİ NESİL KOMPOZİTLER", 56, 2015.
126. Bettinali, L., Tosti, S. ve Pizzuto, A., Mechanical and Electrical Properties of Cryo-worked Cu, Journal of Low Temperature Physics, 174,1-2 (2014) 64-75.
127. Rajkumar, K. ve Aravindan, S., Tribological behavior of microwave processed copper-nanographite composites, Tribology International, 57 (2013) 282-296.
128. Georgakilas, V., Functionalization of Graphene, Wiley, 2014.
129. Oshima, C. ve Nagashima, A., Ultra-thin epitaxial films of graphite and hexagonal boron nitride on solid surfaces, Journal of Physics-Condensed Matter, 9,1 (1997) 1-20.
130. Wu, H.C. ve Kessler, M.R., Multifunctional Cyanate Ester Nanocomposites Reinforced by Hexagonal Boron Nitride after Noncovalent Biomimetic Functionalization, Acs Applied Materials & Interfaces, 7,10 (2015) 5915-5926.
131. Amirjan, M., Khorsand, H., Siadati, M.H. ve Eslami Farsani, R., Artificial Neural Network prediction of Cu-Al₂O₃ composite properties prepared by powder

metallurgy method, Journal of Materials Research and technology, 2,4 (2013) 351-355.

132. Varol, T. ve Canakci, A., The Effect of Flake Microstructure on the Preparation and Properties of Cu-Graphite Sintered Nanocomposites, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 55,7-8 (2016) 426-436.
133. Zhao, X., Zhang, Q.H., Hao, Y.P., Li, Y.Z., Fang, Y. ve Chen, D.J., Alternate Multilayer Films of Poly(vinyl alcohol) and Exfoliated Graphene Oxide Fabricated via a Facial Layer-by-Layer Assembly, Macromolecules, 43,22 (2010) 9411-9416.
134. Liu, S., Ou, J.F., Li, Z.P., Yang, S.R. ve Wang, J.Q., Layer-by-layer assembly and tribological property of multilayer ultrathin films constructed by modified graphene sheets and polyethyleneimine, Applied Surface Science, 258,7 (2012) 2231-2236.
135. Zhao, H., Barber, G.C. ve Liu, J., Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current, Wear, 249,5-6 (2001) 409-414.
136. Benameur, M.M., Gargiulo, F., Manzeli, S., Autes, G., Tosun, M., Yazyev, O.V. ve Kis, A., Electromechanical oscillations in bilayer graphene, Nature Communications, 6 (2015).
137. Ray, S., Applications of Graphene and Graphene-Oxide based Nanomaterials, Elsevier Science, 2015.
138. Han, S.A., Lee, K.H., Kim, T.H., Seung, W., Lee, S.K., Choi, S., Kumar, B., Bhatia, R., Shin, H.J., Lee, W.J., Kim, S., Kim, H.S., Choi, J.Y. ve Kim, S.W., Hexagonal boron nitride assisted growth of stoichiometric Al₂O₃ dielectric on graphene for triboelectric nanogenerators, Nano Energy, 12 (2015) 556-566.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin İPEK 1986 yılında Merzifon / AMASYA' da doğdu. 2004 yılında Amasya Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında Afyon Kocatepe Üniversite Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği' nden bölümünde lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü' nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 yılında Arş. Görevlisi olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne atandı ve 2011 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak doktora eğitimine başladı. 2014 yılında dünya evine giren Hüseyin İPEK, 2015 yılında ÖSYM'nin düzenlediği Mühendislik Tamamlama Sınavı ile yerleştiği Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü' nde fark derslerini başarıyla tamamlayarak Metalurji ve Malzeme Mühendisi Unvanı aldı.