

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ BAKIR ESASLI FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİNİN ÜRETİMİ
VE KARAKTERİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

Makine Müh. Temel VAROL

**OCAK 2016
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Temel VAROL Tarafından Hazırlanan

NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ BAKIR ESASLI FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİNİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29 /12/2015 gün ve 1633 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Yeliz PEKBEY

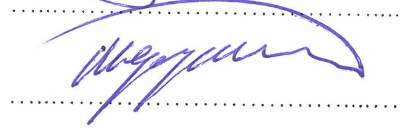
Üye : Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

Üye : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI

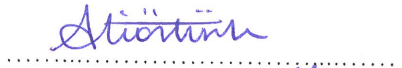
Üye : Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK

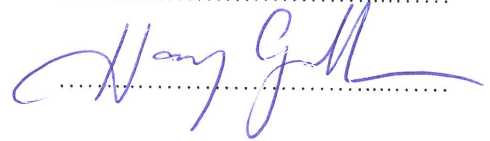
Üye : Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ











Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Gelişen teknoloji ve artan gereksinimler üstün özelliklere sahip ileri malzeme türlerinin üretimini mecbur kılmakta ve bu malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Günümüzde enerji, elektrik-elektronik, savunma, uçak ve otomotiv sanayinde farklı malzemelerin kullanımı ile birçok özelliği bir arada bulunduran ideal malzemeler olarak tanımlanan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ileri teknoloji malzemelerinin önemli bir sınıfını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada Cu esaslı nanografite, nanografite ve karbon nanotüp parçacık takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş yeni tür elektrik kontak malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üretildi. Çalışmanın ilk aşamasında elektrik kontak malzemeleri farklı takviye çeşidi ve farklı takviye miktarları kullanılarak geleneksel kompozit olarak üretildi ve fiziksel ve mekanik özellikleri, aşınma davranışı ve kontak performansları araştırıldı. Bir sonraki aşamada ise üretilen kompozitler içersinden en iyi iletkenlik, en iyi mukavemet ve en iyi ark performansını veren bileşimler fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin katmanları olarak belirlendi ve bu katmanlar kullanılarak üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin özellikleri araştırıldı.

Doktora çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya teşekkür ederim. Doktora çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI, Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK, Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye, çalışmalarımda bana yardımcı olan Arş. Gör. Fatih ERDEMİR'e, Arş. Gör. Hüseyin İPEK'e, Arş. Gör. Serdar Özkaya'ya ve Elektrik Mühendisi Sinan AMRAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Doktora Tezimin gerçekleşmesinde 114M070 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak gösterdikleri özveri ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve eşime teşekkür ederim.

Temel VAROL
Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Nano partikül takviyeli bakır esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretimi ve karakterizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda 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.15.01.2016

Temel VAROL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Fonsiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM)	4
1.3. Üretim Yöntemleri.....	8
1.3.1. Filtrasyon Yöntemi	8
1.3.2. Sıvı Metal Emdirme (İnfiltrasyon) Yöntemi	9
1.3.3. Santrifuj (Savurma) Döküm Yöntemi	10
1.3.4. Şerit Döküm Yöntemi.....	11
1.3.6. Lazer Kaplama.....	14
1.3.7. Toz Metalurjisi	14
1.3.7.1. Toz Üretimi	16
1.3.7.2. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu.....	18
1.3.7.3. Tozların Preslenmesi	22
1.3.7.4. Sinterleme	28
1.3.8. Mekanik Alaşımlama / Öğütme.....	31
1.3.8.1. Mekanik Alaşımlamanın Avantajları	32
1.3.8.2. Öğütme Sistemi	33
1.3.8.3. Öğütücü Türleri	35
1.3.8.4. İşlem Parametreleri.....	37
1.4. Aşınma.....	38
1.4.1. Adhesive Aşınma	38

1.4.2.	Abrasiv Aşınma.....	39
1.4.3.	Deleminasyon Aşınması.....	40
1.5.	Elektrik Kontak Malzemeleri.....	40
1.5.1.	Elektrik Kontaktlarının Karakteristik Özellikleri.....	46
1.5.1.1.	Kontak Direnci.....	46
1.5.1.2.	Ark Erozyonu ve Malzeme Taşınımı.....	48
1.5.1.3.	Kaynak Oluşumu.....	49
1.5.1.4.	Köprü Oluşumu.....	50
1.6.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	51
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	58
2.1.	Malzeme.....	58
2.2.	Malzeme Bileşimleri.....	60
2.3.	Mekanik Öğütme.....	63
2.4.	Parçacık Boyutu.....	64
2.5.	Presleme.....	64
2.7.	Metalografik İşlemler.....	67
2.8.	Morfoloji ve İyapı İncelemeleri.....	68
2.9.	Mekanik Özellikler.....	69
2.10.	Tribolojik Özellikler.....	70
2.11	Kontak Deneyleri.....	71
3.	BULGULAR.....	72
3.1.	Toz Karakterizasyonu.....	72
3.1.1.	Toz Morfolojisi.....	72
3.1.1.1.	Cu Tozları.....	75
3.1.1.2.	Cu-Nanografıt Kompozit Tozları.....	75
3.1.1.3.	Cu-Grafen nanolevha Kompozit Tozları.....	77
3.1.1.4.	Cu-Karbon nanotüp takviyeli Kompozit Tozları.....	78
3.1.2	Partikül Boyutu.....	82
3.1.3.	Görünür Yoğunluk.....	83
3.2.	Ham Özelliklerin İncelenmesi.....	84

3.2.1.	İçyapı İncelemeleri	84
3.2.2.	Ham Numune Özellikleri	86
3.2.2.1.	Yoğunluk	86
3.2.2.2.	Elektriksel İletkenlik	87
3.3.	Sinterleme Sonrası Özelliklerin İncelenmesi	88
3.3.1.	İçyapı İncelemeleri	88
3.3.1.1.	Makroyapı.....	88
3.3.1.2.	Mikroyapı	90
3.3.1.3.	Yoğunluk	94
3.3.1.4.	Elektrik İletkenliği.....	94
3.4.	Aşınma Davranışı	96
3.5.	Kontak Performansı ve Ark Erozyon Davranışı	130
3.5.1.	Ark Morfolojisi.....	130
3.5.1.1	Cu Kontak Malzemeleri.....	131
3.5.1.2.	Cu-Nanografite Kontak Malzemeleri.....	133
3.5.1.3.	Cu-Nanografen Kontak Malzemeleri.....	139
3.5.1.4.	Cu-Karbon nanotüp Kontak Malzemeleri.....	145
3.5.2.	Ark Kayıpları.....	151
3.5.3.	Ark Bölgesi Analizleri.....	155
3.6.	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kontaklar için Katman Seçimi.....	164
3.7.	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kontak Malzemelerinin Özellikleri.....	166
3.7.1.	İçyapı.....	166
3.7.1.1.	Katman İçyapıları.....	166
3.7.2.	Yoğunluk.....	178
3.7.3.	İletkenlik.....	179
3.7.4.	Sertlik.....	180
3.7.5.	Aşınma.....	181
3.7.6.	Kontak Performansı.....	190
4.	İRDELEME.....	199

5.	SONUÇLAR.....	212
6.	ÖNERİLER	215
7.	KAYNAKLAR.....	216
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ BAKIR ESASLI FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Temel VAROL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç.Dr. Aykut ÇANAKÇI
2015, 231 Sayfa,

Bu çalışmanın amacı toz metalurjisi yöntemi kullanılarak nanopartikül takviyeli bakır matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerini üretmek, partikül türü ve partikül miktarı ile üretilen elektrik kontak malzemelerinin fiziksel özellikleri, mekanik özellikleri, aşınma direnci ve ark erozyon davranışı arasındaki ilişkiyi araştırmaktır. Nanokompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine takviye türü ve takviye oranlarının etkisi, yoğunluk, elektrik iletkenliği ve sertlik değerleri ölçülerek belirlenmiştir. İkinci adımda, en iyi iletkenlik, en iyi aşınma direnci ve en iyi kontak performansını sağlayan nanokompozitler fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretiminde katman olarak kullanılmıştır. Sinterlenmiş Cu-grafen nanolevha nanokompozitlerinin elektrik iletkenliği 78.5-61.5 IACs aralığındadır. Cu-nanografrit ve Cu-karbon nanotüp nanokompozitlerinin sertliği, Cu-grafen nanolevha nanokompozitlerinin sertliğinden daha düşük bulunmuştur. Bakır esaslı nanokompozitlerin aşınma direncininin takviye malzemesi olarak grafen nanolevha kullanıldığında önemli miktarda arttığı gözlemlenmiştir. Saf bakır ve Cu-karbon nanotüp numunelerle karşılaştırıldığında Cu-nanografrit ve Cu-nanolevha nanokompozitleri yüksek iletkenlikleri ve kabul edilebilir aşınma direnci nedeniyle ark erozyon davranışı üzerinde önemli bir iyileşme göstermiştir. FDM'lerin mikroyapı ve özellikleri incelendiğinde katmanlı yapının FDM'lerin elektrik iletkenliği, sertliği, aşınma direnci ve ark erozyon özelliklerinde önemli iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur. FDM'lerin elektrik iletkenliği kalınlık boyunca 73 IACs ile 90 IACs arasında değişmiştir. FDM'lerin sertlik değerleri ise kalınlık boyunca 29 IACs ile 34 IACs arasında değişmiştir. Aşınma ve ark erozyon kayıpları iki ve üç katmanlı FGM kullanımı ile azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler, Toz Metalurjisi, Nanokompozit

PhD. Thesis

SUMMARY

THE FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF NANO PARTICLE REINFORCED-COPPER MATRIX FUNCTIONALLY GRADED ELECTRICAL CONTACT MATERIALS

Temel VAROL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering
Supervisor: Associated Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2015, 231 Pages

The aim of the present work was to study the production of nano particle reinforced Cu matrix functionally graded electrical contact materials using powder metallurgy method and to investigate the relationship of the particle type and particle content with physical properties, mechanical properties, wear resistance and arc erosion behavior of fabricated electrical contact materials. The effects of reinforcement type and weight percentage (wt%) on the physical and mechanical properties of the the composites were determined by measuring the density, electrical conductivity and hardness values. At the second step, the nanocomposites providing the best conductivity, the best wear resistance and the best contact performance was used for the production of functionally graded electrical contact materials. The electrical conductivity is in the range of 78.5-61.5 IACs for sintered Cu-graphene nanosheets nanocomposites. Hardness of Cu-nanographite and Cu-carbon nanotube nanocomposites is lower than that of the Cu-graphene nanosheet nanocomposites. It was observed that the wear resistance of Cu-based nanocomposites has been improved significantly when graphene nanosheet particles are used as reinforcement particles. Compared to monolithic copper and Cu-Carbon nanotube samples, Cu-nanographite and Cu-graphene nanosheet nanocomposites show the remarkable improvement on the arc erosion behavior due to higher electrical conductivity and acceptable wear resistance. Microstructure and properties of functionall graded materials shows that the gradation resulted in a remarkable enhancement of electrical conductivity, hardness, wear resistance and arc erosion properties. The electrical conductivity of FGM samples was changed from 73 IACs to 90 IACs along the thickness. The Brinell hardness of FGM samples was changed from 29 IACs to 34 IACs along the thickness. Wear rate and arc erosion rate were decreased by using two and three layers FGM.

Keywords: Functionally Graded Materials, Powder Metallurgy, Nanocomposite

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Modern malzemelerin gelişim aşamaları.....	5
Şekil 1.2. FGM'ye örnek diş yapısı.....	6
Şekil 1.3. FGM'ye örnek deri yapısı	7
Şekil 1.4. Roket fırlatma odası ve fonksiyonel derecelendirilmiş kaplama içyapısı.....	7
Şekil 1.5. Çeşitli FGM içyapıları; (a) Al ₂ O ₃ -YSZ FGMs, (b) Fe-Al ₂ O ₃ FGM.....	8
Şekil 1.6. Filtrasyon yöntemleri, a) Gaz basınçlı filtrasyon, b) Sıvı basınçlı filtrasyon.....	9
Şekil 1.7. Sıvı metal emdirme.....	10
Şekil 1.8. Savurma Döküm düzeneği ve ana elemanları.....	11
Şekil 1.9. Şerit Döküm İş Akış Şeması	12
Şekil 1.10. Şerit Döküm yöntemi ile üretilen bir FGM içyapısı.....	12
Şekil 1.11.FGM kaplama üretim ünitesi.....	13
Şekil 1.12. Katmanlı termal bariyer kaplama.....	13
Şekil 1.13 Lazer toz kaplama.....	14
Şekil 1.14. Toz metalurjisi parçalara örnekler.....	15
Şekil 1.15. Geleneksel toz metalurjisi işlemi aşamaları	16
Şekil 1.16. Toz üretim yöntemleri.....	17
Şekil 1.17. Toz morfolojileri.....	18
Şekil 1.18. T/M kapsamı içerisinde toz bileşenleri.....	19
Şekil 1.19. Elek düzeneği.....	20
Şekil 1.20. (a) Logaritmik esaslı histogram, (b) Kümülatif parçacık boyut dağılımı.....	21
Şekil 1.21. Görünür yoğunluk ölçüm cihazı, Hall akış ölçer	21
Şekil 1.22. Toz preslemede basamakları.....	22
Şekil 1.23. Sıcak presleme işlemi.....	24
Şekil 1.24. Extrüzyon işlemi.....	25
Şekil 1.25. Toz enjeksiyon kalıplama iş akış şeması.....	26
Şekil 1.26. Soğuk izostatik presleme.....	27
Şekil 1.27. Sıcak izostatik presleme.....	27
Şekil 1.28. Mikroskopik ölçekte sinterleme.....	29

Şekil 1.29. Farklı sinterleme sıcaklıklarının gözenek miktarına etkisi.....	30
Şekil 1.30. Katı faz sinterleme.....	31
Şekil 1.31. Sıvı faz sinterleme.....	31
Şekil 1.32. Mekanik alaşımlama esnasında Bilye-Toz etkileşimi.....	32
Şekil 1.33. Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi.....	34
Şekil 1.34. Sünek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi.....	35
Şekil 1.35. Gezegen tip bilyeli öğütücülerde bilye-toz etkileşimi.....	36
Şekil 1.36. SPEX tipi bilyeli değirmen	36
Şekil 1.37. Atritör için şematik resim.....	37
Şekil 1.38. Adhesiv Aşınma.....	39
Şekil 1.39. Abrasiv Aşınma	40
Şekil 1.40. Elektrik kontaklarının çalışma prensibi.....	41
Şekil 1.41. (a) Elektrik kontakları, (b) Kontaktör ve elemanları.....	41
Şekil 1.42 Grafenin bal peteği örgüsü şeklindeki kristal yapısı.....	44
Şekil 1.43. (a) Grafit ve grafen arasındaki diziliş farklılıkları (b) Grafen morfolojisi.....	44
Şekil 1.44. Grafenin diğer metallerle karşılaştırmalı özellikleri.....	45
Şekil 1.45. Karbon nanotüp formları.....	46
Şekil 1.46. Kontak Yüzeyi.....	47
Şekil 1.47. Kontak teması ve metal köprü oluşumu.....	48
Şekil 1.48. Metalik faz arkı	48
Şekil 1.49. Gaz faz arkı	49
Şekil 1.50. Dinamik Kaynak oluşum aşamaları.....	50
Şekil 1.51. Statik Kaynak oluşum aşamaları.....	50
Şekil 2.1. Bakır tozlarının başlangıç morfolojisi.....	58
Şekil 2.2. Bakır tozlarına ait partikül boyutu analizi.....	58
Şekil 2.3. Takviye malzemelerine ait morfolojiler.....	59
Şekil 2.4. İş Akış Şeması.....	62
Şekil 2.5. Fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemeleri.....	63
Şekil 2.6. Öğütme cihazı.....	64
Şekil 2.7. Partikül boyutu ölçüm cihazı.....	64

Şekil 2.8. (a) Sıcak presleme cihazı, (b) Pres bünyesindeki fırın.....	65
Şekil 2.9. Vakumlu sinterleme fırını.....	66
Şekil 2.10. Kademeli sinterleme.....	66
Şekil 2.11. Numune Hazırlama cihazları.....	68
Şekil 2.12. Metalografik işlemler uygulanmış numune.....	68
Şekil 2.13. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	69
Şekil 2.14. Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı.....	70
Şekil 2.15. Aşınma test cihazı	70
Şekil 2.16. Kontak deney düzeneği ve kontak kodları.....	71
Şekil 3.1. % 2.5 nanogرافit takviyesi için elde edilen morfolojiler.....	72
Şekil 3.2. % 2.5 grafen nanolevha takviyesi için elde edilen morfolojiler.....	73
Şekil 3.3. % 2.5 karbon nanotüp takviyesi için elde edilen morfolojiler.....	74
Şekil 3.4. Bakır tozlarının 5 saatlik öğütme sonrası morfolojileri.....	75
Şekil 3.5. Cu-nanogرافit tozlarına ait morfolojiler.....	75
Şekil 3.6. Cu-grafen tozlarına ait morfolojiler.....	77
Şekil 3.7. Cu-karbon nanotüp tozlarına ait morfolojiler.....	78
Şekil 3.8. Cu- Grafit nano partikül kompozit tozları için elementel haritalama.....	79
Şekil 3.9. Cu-Grafen nanolevha kompozit tozları için elementel haritalama.....	80
Şekil 3.10. Cu-Karbon nanotüp kompozit tozları için elementel haritalama.....	81
Şekil 3.11. Bakır tozları için partikül boyutu dağılımı.....	82
Şekil 3.12. Takviye türü ve takviye miktarı ile partikül boyutunun değişimi	83
Şekil 3.13. Takviye türü ve takviye miktarı ile görünür yoğunluğun değişimi	83
Şekil 3.14. Bakır numuneye ait ham içyapı görüntüsü	84
Şekil 3.15. Cu-Nanogرافit kompozitlerine ait ham içyapı görüntüleri.....	84
Şekil 3.16. Cu-Grafen nano levha kompozitlerine ait ham içyapı görüntüleri.....	85
Şekil 3.17. Cu-Karbon nano tüp kompozitlerine ait ham içyapı görüntüleri.....	86
Şekil 3.18. Ham yoğunluk değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi.....	87
Şekil 3.19. İletkenlik değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi.....	89
Şekil 3.20. Cu-Grafit nano partikül kompozit makroyapısı.....	88
Şekil 3.21. Cu-Grafen nano levha kompozit makroyapısı.....	89
Şekil 3.22. Cu-Karbon Nanotüp kompozit makroyapısı.....	89
Şekil 3.23. Cu-Grafit nano partikül kompozit mikroyapısı.....	90
Şekil 3.24. Cu-Grafen nano levha kompozit mikroyapısı.....	91

Şekil 3.25. Cu-Karbon nano tüp kompozit mikroyapısı.....	91
Şekil 3.26. Cu- Grafit nano partikül kompozitleri için elementel haritalama.....	92
Şekil 3.27. Cu-Grafen nanolevha kompozitleri için elementel haritalama.....	93
Şekil 3.28. Cu-Karbon nanotüp kompozitleri için elementel haritalama.....	93
Şekil 3.29. Sinterleme sonrası yoğunluk değerleri.....	94
Şekil 3.30. Sinterleme sonrası iletkenlik değerleri.....	95
Şekil 3.31. Sertlik değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi.....	95
Şekil 3.32. Aşınma yüzeyleri; (a) GNP-2, (b) GNP-5, (c) GNP-8.....	96
Şekil 3.33. GNP-2 için aşınma yüzeyi elementel analizi.....	97
Şekil 3.34. GNP-5 için aşınma yüzeyi elementel analizi.....	98
Şekil 3.35. GNP-8 için aşınma yüzeyi elementel analizi.....	99
Şekil 3.36. aşınma yüzeyleri; (a) GRNL-2, (b) GRNL-5, (c) GRN8	101
Şekil 3.37. GRNL-2 için aşınma yüzeyi elementel analizi.....	101
Şekil 3.38. GRNL-5 için aşınma yüzeyi elementel analizi.....	103
Şekil 3.39. GRNL-8 için aşınma yüzeyi elementel analizi.....	104
Şekil 3.40. Aşınma yüzeyleri; (a) KNT-2, (b) KNT -5, (c) KNT-8.....	105
Şekil 3.41. KNT-2 için aşınma yüzeyi elementel analizi.....	106
Şekil 3.42. KNT-5 için aşınma yüzeyi elementel analiz.....	107
Şekil 3.43. KNT-8 için aşınma yüzeyi elementel analizi.....	108
Şekil 3.44. Cu aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	110
Şekil 3.45. GNP-2 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	111
Şekil 3.46. GNP-5 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	112
Şekil 3.47. GNP-8 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	113
Şekil 3.48. GRNL-2 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	114
Şekil 3.49. GRNL-5 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	115
Şekil 3.50. GRNL-8 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	116
Şekil 3.51. KNT-2 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	117
Şekil 3.52. KNT-5 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	118
Şekil 3.53. KNT-8 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler.....	119
Şekil 3.54. 5N yük altında aşınma kayıpları.....	120
Şekil 3.55. 7N yük altında aşınma kayıpları.....	123
Şekil 3.56. 10N yük altında aşınma kayıpları.....	127
Şekil 3.57. (Bakır) BIU'ya ait ark morfolojisi.....	131

Şekil 3.58. (Bakır) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	132
Şekil 3.59. (GNP-2) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	133
Şekil 3.60. (GNP-2) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	134
Şekil 3.61. (GNP-4) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	135
Şekil 3.62. (GNP-4) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	136
Şekil 3.63. (GNP-7) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	137
Şekil 3.64. (GNP-7) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	138
Şekil 3.65. (GRNL-2) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	139
Şekil 3.66. (GRNL-2) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	140
Şekil 3.67. (GRNL-4) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	141
Şekil 3.68. (GRNL-4) B1A'ya ait ark morfoloji.....	142
Şekil 3.69. (GRNL-7) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	143
Şekil 3.70. (GRNL-7) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	144
Şekil 3.71. (KNT-2) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	145
Şekil 3.72. (KNT-2) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	146
Şekil 3.73. (KNT-4) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	147
Şekil 3.74. (KNT-4) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	148
Şekil 3.75. (KNT-7) B1U'ya ait ark morfolojisi.....	149
Şekil 3.76. (KNT-7) B1A'ya ait ark morfolojisi.....	150
Şekil 3.77. Ark kaybının değişimi.....	152
Şekil 3.78. GNP-4 için A1A numunesi noktasal analizleri.....	155
Şekil 3.79. GRNL-4 için A1A numunesi noktasal analizleri.....	156
Şekil 3.80. KNT-4 için A1A numunesi noktasal analizleri.....	158
Şekil 3.81. GNP-4 için A1U numunesi elemental haritalama.....	159
Şekil 3.82. GRNL-4 için A1U numunesi elemental haritalama.....	161
Şekil 3.83. KNT-4 için A1U numunesi elemental haritalama.....	162
Şekil 3.84. Fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozitler.....	165
Şekil 3.85. FDM-2 kodlu nanokompozitdeki GNP-2 katmanına ait içyapı.....	166
Şekil 3.86. FDM-6 kodlu nanokompozitdeki GNP-2 katmanına ait ait içyapı.....	166
Şekil 3.87. FDM-10 kodlu nanokompozitdeki GNP-2 katmanına ait ait içyapı.....	167
Şekil 3.88. FDM-13 kodlu nanokompozitdeki GNP-2 katmanına ait ait içyapı.....	167
Şekil 3.89. FDM-1 kodlu nanokompozitdeki GRNL-3 katmanına ait ait içyapı.....	167
Şekil 3.90. FDM-3 kodlu nanokompozitdeki GRNL-3 katmanına ait ait içyapı.....	168

Şekil 3.91. FDM-7 kodlu nanokompozitdeki GRNL-3 katmanına ait içyapı	168
Şekil 3.92. FDM-9 kodlu nanokompozitdeki GRNL-3 katmanına ait içyapı.....	168
Şekil 3.93. FDM-4 kodlu nanokompozitdeki GRNL-4 katmanına ait içyapı.....	169
Şekil 3.94. FDM-6 kodlu nanokompozitdeki GRNL-4 katmanına ait içyapı.....	169
Şekil 3.95. FDM-11 kodlu nanokompozitdeki GRNL-4 katmanına ait içyapı.....	169
Şekil 3.96. FDM-13 kodlu nanokompozitdeki GRNL-4 katmanına ait içyapı	170
Şekil 3.97. FDM-1’de bakır katmanına ait elementel analiz.....	170
Şekil 3.98. FDM-4’de bakır katmanına ait elementel analiz.....	171
Şekil 3.99. FDM-7’de bakır katmanına ait elementel analiz.....	171
Şekil 3.100. FDM-11’de bakır katmanına ait elementel analiz.....	172
Şekil 3.101. FDM-2’de GNP-2 katmanına ait elementel analiz.....	173
Şekil 3.102. FDM-6’da GNP-2 katmanına ait elementel analiz.....	173
Şekil 3.103. FDM-10’da GNP-2 katmanına ait elementel analiz.....	173
Şekil 3.104. FDM-13’de GNP-2 katmanına ait elementel analiz.....	174
Şekil 3.105. FDM-1’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz.....	174
Şekil 3.106. FDM-3’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz.....	175
Şekil 3.107. FDM-7’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz.....	175
Şekil 3.108. FDM-9’da GRNL-3 katmanına ait elementel analiz.....	176
Şekil 3.109. FDM-4’da GRNL-3 katmanına ait elementel analiz.....	176
Şekil 3.110. FDM-6’da GRNL-3 katmanına ait elementel analiz.....	177
Şekil 3.111. FDM-11’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz.....	177
Şekil 3.112. FDM-13’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz.....	178
Şekil 3.113. FDM’lerin yoğunluk değerleri.....	178
Şekil 3.114. FDM’lerin iletkenlik değerleri.....	179
Şekil 3.115. FDM’lerin sertlik değerleri.....	180
Şekil 3.116. FDM-1’de oluşan aşınma yüzeyleri.....	181
Şekil 3.117. FDM-4’de sonucunda oluşan aşınma yüzeyleri.....	182
Şekil 3.118. FDM-6’da oluşan aşınma yüzeyleri.....	182
Şekil 3.119. FDM-7’de oluşan aşınma yüzeyleri.....	182
Şekil 3.120. FDM-9’da oluşan aşınma yüzeyleri.....	183
Şekil 3.121. FDM-11’de oluşan aşınma yüzeyleri.....	183
Şekil 3.122. FDM-1 için aşınma kaybı.....	184
Şekil 3.123. FDM-2 için aşınma kaybı.....	184

Şekil 3.124. FDM-3 için aşınma kaybı.....	185
Şekil 3.125. FDM-4 için aşınma kaybı.....	185
Şekil 3.126. FDM-5 için aşınma kaybı.....	186
Şekil 3.127. FDM-6 için aşınma kaybı.....	186
Şekil 3.128. FDM-7 için aşınma kaybı.....	187
Şekil 3.129. FDM-8 için aşınma kaybı.....	187
Şekil 3.130. FDM-9 için aşınma kaybı.....	188
Şekil 3.131. FDM-10 için aşınma kaybı.....	188
Şekil 3.132. FDM-11 için aşınma kaybı.....	189
Şekil 3.133. FDM-12 için aşınma kaybı.....	189
Şekil 3.134. FDM-13 için aşınma kaybı.....	190
Şekil 3.135. FDM-14 için aşınma kaybı.....	190
Şekil 3.136. FDM-1’de B2U numunesine ait ark morfolojisi ve nokta analizleri.....	191
Şekil 3.137. FDM-4’de B2U numunesine ait yüzey morfolojisi ve noktasal analizler.....	191
Şekil 3.138. FDM-6’da B2U numunesine ait yüzey morfolojisi ve noktasal analizler....	192
Şekil 3.139. FDM-7’de B2U numunesine ait yüzey morfolojisi ve noktasal analizler.....	192
Şekil 3.140. FDM-9’da B2U numunesine ait yüzey morfolojisi ve noktasal analizler.....	193
Şekil 3.141. FDM-11’de B2U numunesine ait yüzey morfolojisi ve noktasal analizler....	193
Şekil 3.142. FDM-1 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	194
Şekil 3.143. FDM-2 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	194
Şekil 3.144. FDM-3 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	194
Şekil 3.145. FDM-4 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	195
Şekil 3.146. FDM-5 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	195
Şekil 3.147. FDM-6 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	195
Şekil 3.148. FDM-7 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	196
Şekil 3.149. FDM-8 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	196
Şekil 3.150. FDM-9 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	196
Şekil 3.151. FDM-10 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	197
Şekil 3.152. FDM-11 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	197
Şekil 3.153. FDM-12 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	197
Şekil 3.154. FDM-13 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	198
Şekil 3.155. FDM-14 kodlu kontakta ark kaybının değişimi.....	198

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Kontak malzemeleri ve özellikleri.....	42
Tablo 1.2. Kontak malzemeleri ve kullanım alanları.....	43
Tablo 2.1. Nanografıt partiküllerine ait özellikler	59
Tablo 2.2. Kompozit bileşimleri ve kodları	60
Tablo 2.3. Aşınma parametreleri.....	70
Tablo 3.1. Teorik yoğunluk değerleri.....	86
Tablo 3.2. Karşılaştırmalı özellikler.....	164

SEMBOLLER DİZİNİ

FDM	: Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme
TM	: Toz metalurjisi
MA	: Mekanik alaşımlama
BPR	: Bilye-toz ağırlık oranı
PCA	: İşlem kontrol katkısı
GNP	: Grafit nanopartikül
GRNL	: Grafen nanolevha
KNT	: Karbon nanotüp
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
IACs	: Uluslar arası tavlı bakır standardı
d ₅₀	: Ortalama toz boyutu
BSD	: Brinell sertlik değeri
µm	: Mikrometre
N	: Newton
m	: Metre
MPa	: Mega paskal
Cu	: Bakır

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Malzemeler insanlık tarihi boyunca toplumların gelişiminde, kendilerini doğa koşullarına karşı korumada ve diğer toplumlara karşı üstünlük sağlamalarında çok önemli bir yere sahiptir. İnsanoğlu tarafından malzemelerin ilk kullanımları incelendiğinde avlanma ve savunma amaçlı olarak kılıç ve mızrak gibi aletlerde metallerin, giyim ve barınma amaçlı olarak kullanılan çadırlarda çeşitli hayvan derilerinin ve yine barınma amaçlı olarak yapılan ev benzeri yapılarda taş ve ağaç gibi malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Günümüzde ise ulaşım, giyim, konut, gıda, iletişim araçlarının imalatı gibi neredeyse günlük yaşantımızın her alanı deyim yerinde ise malzemeler tarafından çevre kuşatılmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi ilk insanlar doğada kendiliğinden bulunan yâda oldukça basit yöntemlerle birtakım değişiklikler yaparak geliştirdikleri malzemeleri kullanabiliyordu. Bununla birlikte zaman içerisinde doğadaki mevcut malzemelere göre daha üstün özelliklere sahip malzemeleri üretecek yeni teknikler keşfettiler. Bunun da ötesinde başka maddelerin eklenmesi ve ısıl işlem yoluyla malzeme özelliklerinin geliştirilebileceğini tecrübe ettiler. Bu noktadan sonra artık malzemelerden yararlanma işlemi sınırlı sayıda olmayan ve bir dizi malzeme içersinden kullanım yerine göre en uygun özelliklere sahip olanı seçme işlemi haline gelmiştir. Bilim adamlarının ise gerçek anlamda malzemelerin yapı bileşenleri ile özellikleri arasındaki ilişkileri anlayabilmeleri ancak yakın tarihte gerçekleşmiştir. Yaklaşık olarak son yüzyıl boyunca elde edilen bu bilgi birikimi, bilim adamları ve mühendisler malzeme özelliklerini istenilen amaca göre tasarlayabilme olanağını sunmuştur. Bu sayede modern toplumumuzun ihtiyaçlarını karşılamak üzere, belirli özelliklere sahip çok sayıda farklı malzeme geliştirilmiştir [1].

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve polimer malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar. Birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri bulunan bu malzemeler, mevcut özellikleri iyileştirmek amacıyla metal-metal, metal-seramik ve metal-polimer olarak, makro ve mikro düzeyde birleştirilerek bir arada kullanılabilirler. Metallerin birbirleriyle ya da başka elementlerle mikro düzeyde, homojen olarak ağırlıkça çeşitli oranlarda sıvı faz ortamında karıştırılarak elde edilen ve üstün mekanik değerler taşıyan bu yeni metal türüne alaşım adı verilir. Her bir saf metal kendisine ait temel karakteristik

özelliklere sahiptir. Bu nedenle kendi özelliklerine uygun ve sınırlı kullanma alanları vardır. Saf metallerin özelliklerini belirli üretim süreçleri ve koşulları altında değiştirmek mümkündür. Soğuk şekillendirme ve ısı işlemlerle sağlanan özellik değişimi, endüstrinin gerektirdiği sayısız özellikleri (mukavemet, tokluk, aşınma dayanımı, korozyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliği) kazandırmak için alaşım malzemelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Alaşımın tarihi milattan önce 4000 yıllarına kadar uzanmaktadır. En bilinen alaşımlara, bronz (bakır-kalay), pirinç (bakır-çinko), lehim (kalay-kurşun) örnek verilebilir. Alaşım, uygulamaların gerektirdiği fiziksel özelliklere sahip malzemelerin üretilmesini sağlar. Üretim teknolojisinde alaşım, havacılık sanayi, otomotiv sanayi, savunma sanayi ve elektrik-elektronik sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilen ısı iletkenlik, aşınma ve korozyon dayanımı gibi avantajlar özellikle termal gerilmeye maruz uygulamalarda da alaşımın tercih edilmesine sebep olmuştur. Bununla birlikte gelişen teknoloji üstün özelliklere sahip malzeme ihtiyacını büyük ölçüde artırmıştır. Bilinen metal ve alaşım malzemeler bu ihtiyacı karşılayamaz hale gelmiş ve kullanım yerine göre yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur [2]. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda ileri teknoloji malzemeleri olarak adlandırdığımız kompozitler [3-5], fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler [6, 7], yarı iletkenler [8], biyomalzemeler [9, 10], şekil bellekli malzemeler [11, 12] ve nanomalzemeler [13, 14] geliştirilmiştir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) geleneksel kompozit malzemelerin yetersiz kaldığı birden fazla özelliğin aynı anda talep edilmesi durumları için geliştirilmiş bir ileri malzemedir. Bu malzemelerde içyapı, fiziksel ve mekanik özellikler yüzeyden itibaren derinliğe doğru malzeme bileşimine bağlı olarak değişmektedir. FDM'lerin bu özelliği kullanılarak üst tabakası aşınmaya veya ısıl gerilmelere karşı çok dayanıklı bununla birlikte alt tabakalarında oldukça tok ve mukavemetli olan malzemeler üretilmektedir [15]. FDM'lerin çok fonksiyonlu özellikleri sağlamalarından dolayı havacılık, otomotiv, savunma, elektrik-elektronik, biyomedikal ve enerji sektörlerindeki kullanımı giderek artmaktadır. Enerji sektöründe yaygın olarak kullanılan kontak malzemeleri için, temas halindeki yüzeylerdeki en önemli gereksinim yüzey özellikleri (aşınma direnci, sertlik ve ark erozyon direnci) iken altlık bölgelerindeki en önemli gereksinim elektriksel ve termal iletkenliktir. Kontak malzemelerindeki bu bölgesel gereksinimler elektrik kontak malzemelerinin fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler

olarak üretilebilirliğini ve uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte şimdiye kadar elektrik kontak malzemelerinin fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme olarak üretimi yapılmamıştır.

Elektrik kontak malzemeleri, elektrik anahtarları, kontaktörler, devre kesiciler, voltaj regülâtörleri, ark elemanları ve geciktiriciler gibi çok farklı elemanlar olarak kullanılmaktadır. Elektrik kontağı olarak kullanılan malzemeler, elektrik iletkenliği, aşınma dayanımı, ark erozyon direnci gibi özellikleri bir bütün olarak sağlamalıdır. Yaygın olarak kullanılan kontak malzemeleri gümüş, altın, tungsten, nikel, bakır, kalay ve bu malzemelerin alaşımlarıdır. Bu malzemelerden gümüş ve altın metallerinin pahalı olması kontak malzemelerinin üretim maliyetlerini yükseltmektedir. Kalay gibi diğer malzemelerin de düşük ark erozyon ve aşınma direnci göstermesi alternatif kontak malzemelerinin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Karbon ve türevleri (grafit nano parçacıkları, grafen nanolevha ve karbon nanotüp) sahip olduğu üstün fiziksel ve mekanik özelliklerden dolayı son yıllarda literatürde en çok çalışılan konular arasında yer almaktadır. Grafitin katı yağlayıcı olarak sağladığı avantajlar, grafen nanolevhaların üstün elektriksel özellikleri ve karbon nanotüplerin yüksek mekanik dayanımları literatürde vurgulanan özelliklerdir. Örneğin, grafen nanolevhaların termal iletkenliği ve mekanik özelliklerinin elektrik kontak üretiminde kullanılan gümüş, krom ve nikel gibi geleneksel malzemelere oranla yüksek olması grafen takviyeli elektrik kontak malzemelerinin üretilebilirliğini ve uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu malzemelerin hem elektrik kontak malzemelerinde hem de fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinde göstereceği performansla ilgili henüz bir bilimsel araştırma yapılmamıştır. Matris veya altlık malzemesi olarak da yukarıda bahsedilen metallerle karşılaştırıldığında bakırın gümüşten sonra en iyi elektrik iletkenliğine, çok değişik formlarda üretilme, yüksek ergime derecesi (1083°C), düşük maliyete ve değerli metallerle karşılaştırıldığında kolayca elde edilebilirliğe sahip olması onun kontak malzemelerinde matris malzemesi olarak kullanımını ön plana çıkarmıştır.

Bu çalışmada ağırlıkça yedi farklı oranda (% 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 ve 5) nanografite, grafen nanolevha ve karbon nanotüp takviyeli bakır matrisli elektrik kontak malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Farklı takviye türü ve miktarlarının, morfoloji, partikül boyutu ve görünür yoğunluk gibi toz özellikleri üzerine ve içyapı, yoğunluk,

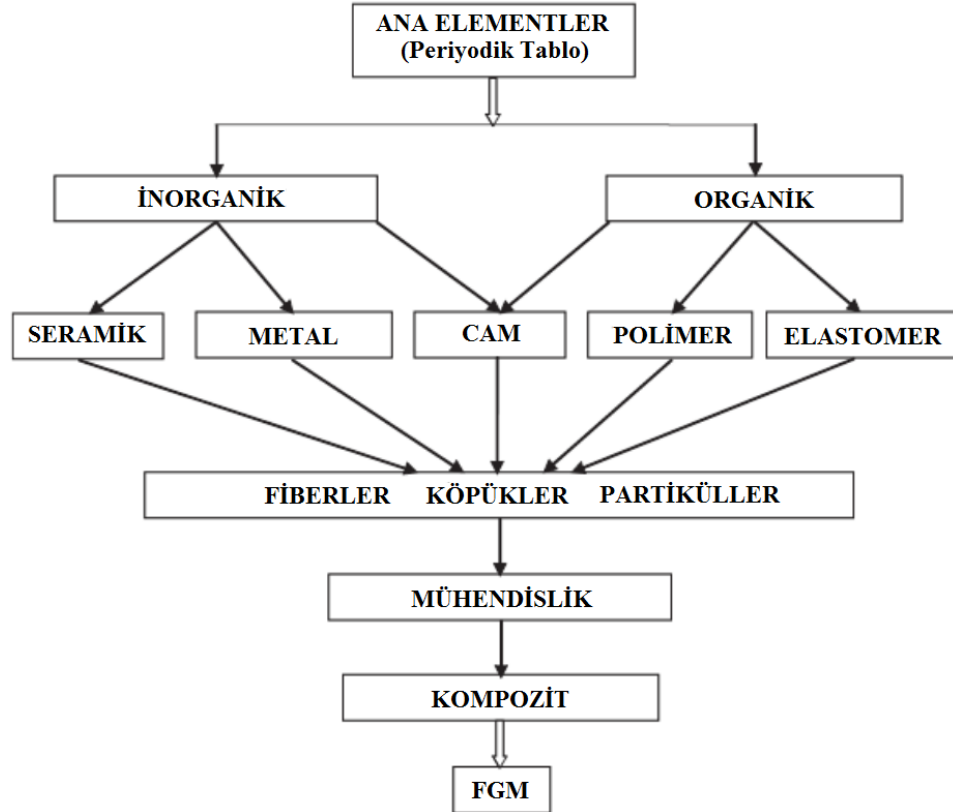
iletkenlik ve sertlik gibi kompozit özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca ilk aşamada üretilen kompozitler için aşınma ve kontak deneyleri yapılarak bu kompozitlerin aşınma dayanımı ve ark erozyon davranışı incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise en iyi iletkenlik, aşınma direnci ve kontak performansını sağlayan bileşimler FDM'lerde katman olarak kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemeleri üretilmiştir. Üretilen bu yeni tür fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin içyapı, fiziksel ve mekanik özellikleri, aşınma dayanımı ve ark erozyon davranışı incelenerek bir elektrik kontak malzemesi için en iyi özellikleri sağlayacak katman ve bileşim tasarımına sahip yeni bir elektrik kontak malzemesi geliştirilmiştir.

1.2. Fonsiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM)

Şekil 1.1'de görüldüğü gibi ana elementlerden başlayan malzeme gelişimi artan talepler doğrultusunda yeniden şekillenerek günümüzdeki ileri malzemeler sınıfı ortaya çıkmıştır [16]. FDM'ler geleneksel kompozit malzemelerin yetersiz kaldığı uygulamalar için geliştirilen ileri bir malzeme sınıfıdır. Kompozit malzemeler genellikle; matris ve takviye malzemesi olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Kompozit içinde genellikle daha sert ve daha yüksek dayanıma sahip bileşen takviye olarak adlandırılır. Kompozitin ana yapı malzemesi olarak da tanımlanan, nispeten daha düşük dayanıma sahip olan fakat genellikle sünekliği yüksek olan bileşen matris olarak adlandırılır. Matris malzemesinin kompozit sisteminde kompozit malzemeye gelen yükleri takviye malzemelerine iletmek, kompozit malzemenin tokluğunu artırmak, kırılan elyaflardan çatlağın yayılmasını önlemek, kompozit malzemenin mukavemetine katkıda bulunmak, takviye elemanlarını bir arada tutmak (bağlayıcı faz görevi yapmak), takviye malzemelerini ortamın etkilerinden ve darbelerden korumak gibi görevleri vardır. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde kompoziti oluşturan matris ve takviye malzemelerinin özellikleri, matris ve takviye malzemelerinin hacim oranları, matris takviye arasındaki arayüzey bağı, takviye malzemesinin şekli, yapısı ve kompozit içerisindeki yönelmesi etkili olmaktadır [17]. Kompozit yapılarda, yapıyı oluşturan malzemelerin ısıl genişleme katsayılarının farklı olması yüksek sıcaklık uygulamalarında katmanlar arası ayrışmaya neden olmaktadır. Bu durumun önünde geçebilmek için Japon bilim adamları tarafından 1980'li yıllarda kompozit yüzeyine kaplama yapılarak ısıl bariyer oluşturulmuş ve malzemenin bütüncül

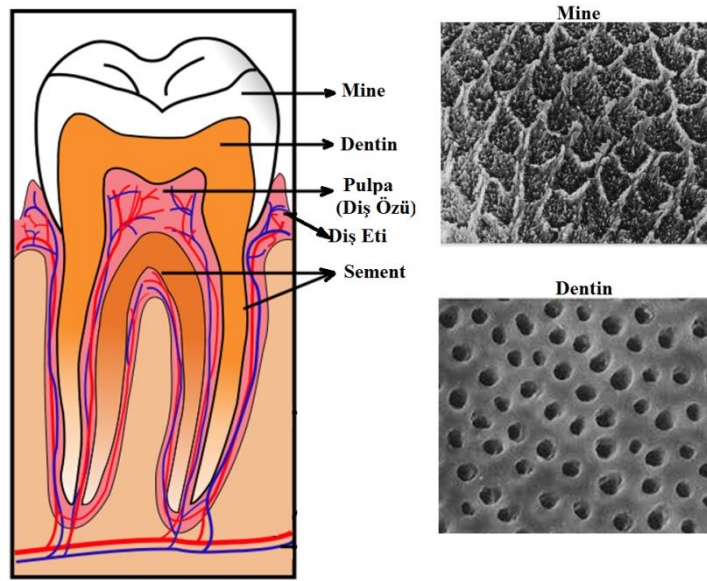
yapısının korunması sağlanmıştır. Elde edilen bu malzemeye FDM denilmiştir. FDM'lerde kompozit malzemelerden farklı olarak daha düzgün ara yüzey elde edilebilmekte, malzeme yapı ve bileşimi malzeme içerisinde kademeli olarak değişmekte ve bu sayede istenilen özelliklerde malzeme elde edilebilmektedir. Bahsedilen özellikleriyle FDM'ler yeni bir malzeme türü olup, kompozit ve malzemelerden ayrı bir kategoride yer almaktadır [18].

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), tanımlanmış bir fonksiyona bağlı olarak malzeme özelliklerinin, malzeme üzerinde bir yüzeyden diğer yüzeye farklılık gösterdiği heterojen kompozitler olarak tanımlanabilir. Bu heterojen kompozitlerin bilim dünyasıyla tanışması ilk olarak 1980'li yıllarda gerçekleşmiştir. Yüzey gerilmelerini azaltma özellikleri, aşınma direncini artırma yeteneği ve tokluk ile sertlik özelliklerinin kombinasyonunu oluşturabilme özelliğinden dolayı FDM'ler, ortaya çıktıklarından itibaren havacılık, savunma sanayi, elektrik-elektronik, enerji, kimya mühendisliği, optik malzemeler ve biyomedikal mühendisliği olmak üzere çok geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır [19].



Şekil 1.1. Modern malzemelerin gelişim aşamaları [16]

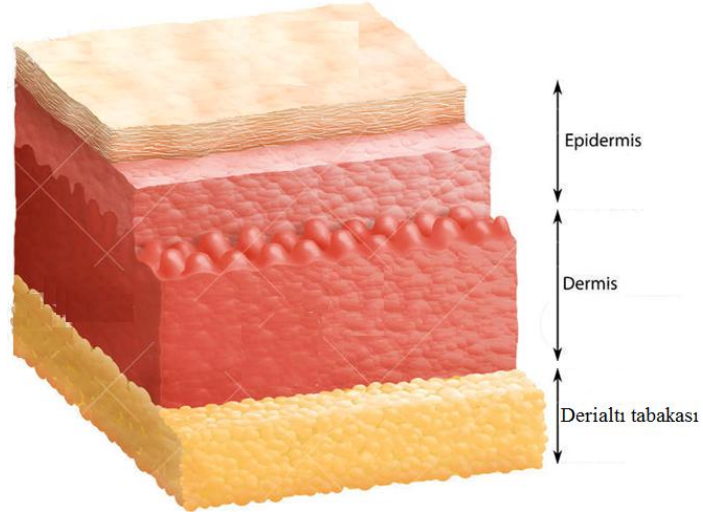
Her ne kadar FDM'ler araştırmacılar tarafından geliştirilsede taramalı elektron mikroskobunun geliştirilmesi ile kemik yapıları, ağağ gövdeleri ve insan derisi gibi birçok yapı içersinde bu tür bir fonksiyonelliğin olduğu görülmüştür. Örneğin insanın diş yapısı tipik bir FDM olarak gösterilebilir. Diş'in en üst kısmında bulunan ve diş minesi olarak adlandırılan kısım vücuttaki en sert maddedir. Diş minesi herhangi bir sinir hresi içermez ve herhangi bir darbeye veya aşınmaya karşı dişi korur. Diş minesinin altında yer alan dentin tabakası ise diş yapısının üçte ikisini oluşturur ve çok sayıda gözenekli yapı yâda kanal içerir. Diş minesine göre daha yumuşak ve oldukça gözenekli olan bu yapının görevi diş minesini için darbe sönümleyici olarak davranmaktır [20, 21].



şekil 1.2. FDM'ye örnek diş yapısı [20]

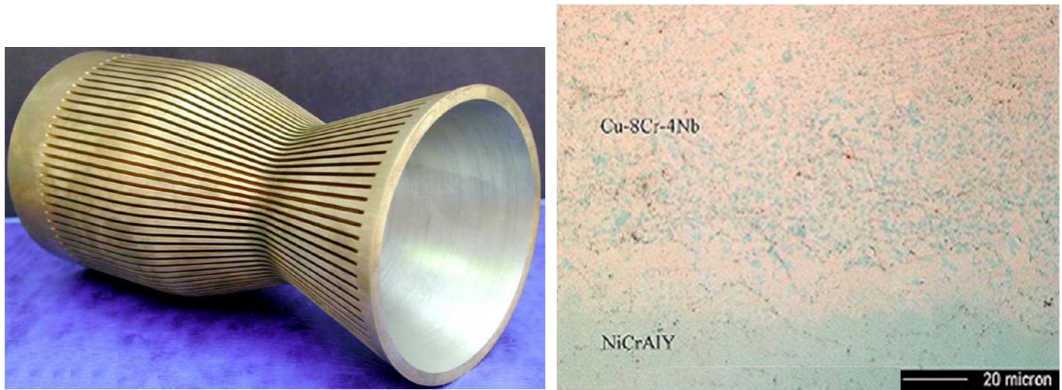
İnsan vücudundaki FDM'lere verilebilecek bir diğer örnek olarak deridir. Deriyi, bedeni ve organizmayı diş dünyadan koruyan ve vücudun bütünlüğünü sağlayan bir duvar olarak tanımlayabiliriz. Epidermis olarak adlandırılan üst deri derinin alt tabakalarını koruyan katmandır. Bu katman kan damarları ve sinirleri içermez. Üst derinin en diş bölümü l hücrelerden oluşmuştur. Bu katmanın deriyi güneşten gelen zararlı işınlardan korur ve derinin rengini belirleyen hücreleri barındırır. Dermis olarak adlandırılan alt deri hissetmemizi sağlayan serbest sinir uçları, dokunma ve basınç algılayıcıları gibi yapıları içerir ve epidermisin deriye sağlam bir şekilde tutunmasını sağlar. Bünyesinde bulunan kılcal damar ağları ile epidermise kan akışını sağlar. Çeşitli tipte salgılar üreten ter ve yağ bezleriyle bunların salgılanmasında rol oynayan kas hücreleri ile birlikte kıl ve tüylerle ilgili yapılar da bu tabaka içinde yer alır. En alttaki tabaka ise deri altı tabakası olarak

adlandırılır ve bu tabakanın temel işlevi taşımak ve bağlamaktır. Enerji deposu ve mekanik tampon görevi de yapar ve vücudu sıcaklık dalgalanmalarından korur. Deri altı tabakası içinde de kan damarları, sinirler ve lenf damarlarının geçtiği bağ doku perdelerinin birbirine bağladığı yağ dokusu topkacıkları (lobülleri) bulunur [22, 23]. Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşıldığı gibi deri içerisindeki her bir katman farklı bir işlevsellik içererek görevini mükemmel olarak yerine geterecek şekilde tasarlanmıştır.



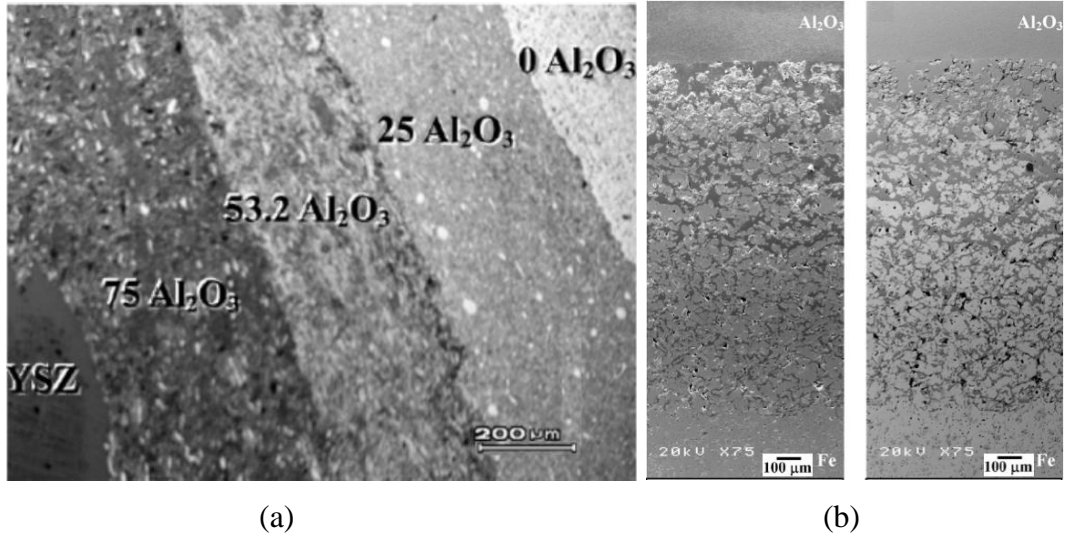
Şekil 1.3. FDM'ye örnek deri yapısı [22]

Araştırmacılar bu bilgiler ışığında ilk olarak çeşitli kaplama yöntemlerini kullanarak yüksek sıcaklık uygulamalarında malzemelerin deforme olmaması için fonksiyonel derecelendirilmiş termal bariyer kaplamaları üretmişlerdir.



Şekil 1.4. Roket fırlatma odası ve fonksiyonel derecelendirilmiş kaplama içyapısı [16]

FDM'ler üzerine yapılan araştırma faaliyetlerinin genişlemesi ile birlikte fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit üretimi de giderek yaygınlaşmıştır. Günümüzde balistik özellikleri [24, 25], aşınma dayanımını [26, 27] veya korozyon direncini [28, 29] iyileştirmek için fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 1.5' de farklı bileşime sahip ve farklı amaçlar için üretilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelere ait iç yapı resimleri verilmiştir.

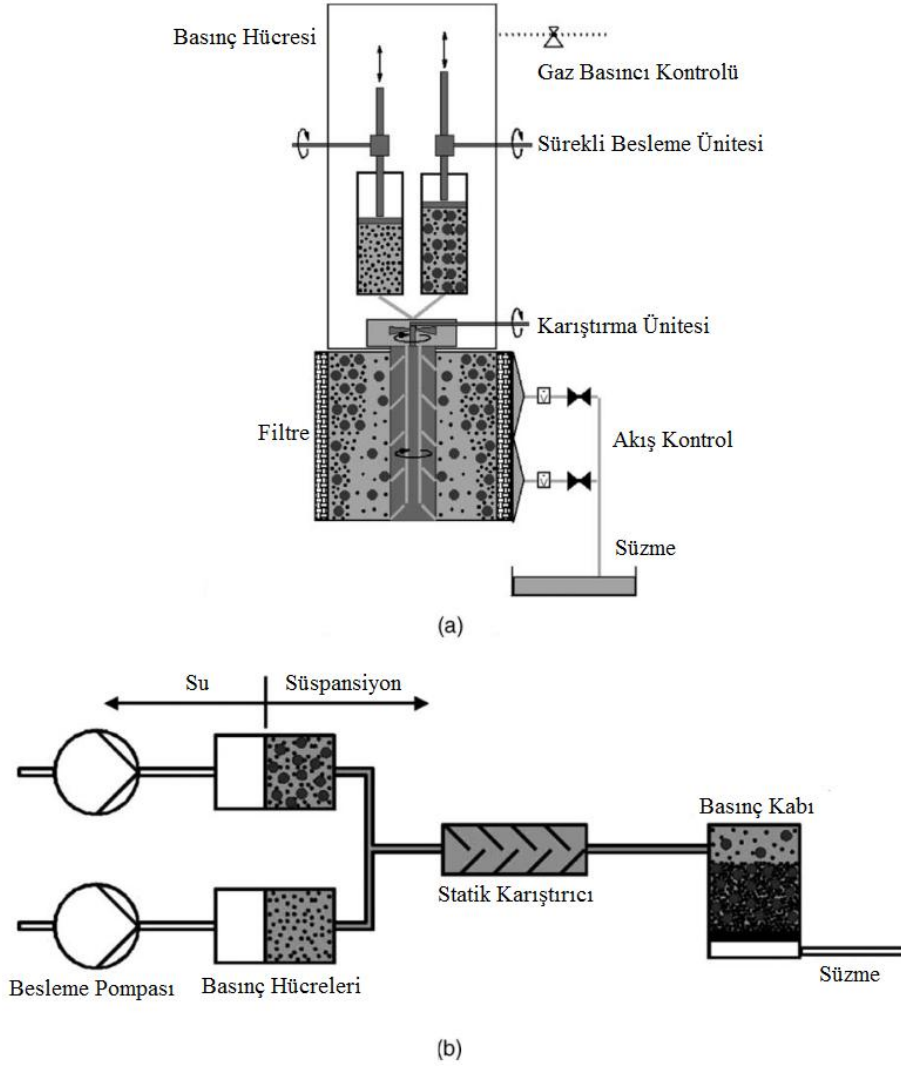


Şekil 1.5. Çeşitli FDM içyapıları [30-31]; (a) Al₂O₃-YSZ FGMs, (b) Fe-Al₂O₃ FGM

1.3. Üretim Yöntemleri

1.3.1. Filtrasyon Yöntemi

Filtrasyon sistemine, bileşimi ve miktarı istenildiği gibi ayarlanabilen bulamaç halindeki karışımın sürekli olarak sevk edilmesi ile istenilen aşamada istenilen malzeme bileşimi elde edilerek FDM üretimi yapılabilir. Bu yöntemde bulamaç malzemesinin sevkinde gaz ve sıvı basıncı kullanılabilir. Ham numunelerin elde edilmesinden sonra kurutma işlemi uygulanır ve sinterleme işlemi yapılarak nihai ürünler üretilebilir. Bulamaç oluşturma gerekliliği, ilave basınç ve kurutma sistemleri ve seri üretime çok uygun olmaması bu yöntemin yaygın olarak kullanılmasını engellemiştir [30-32].

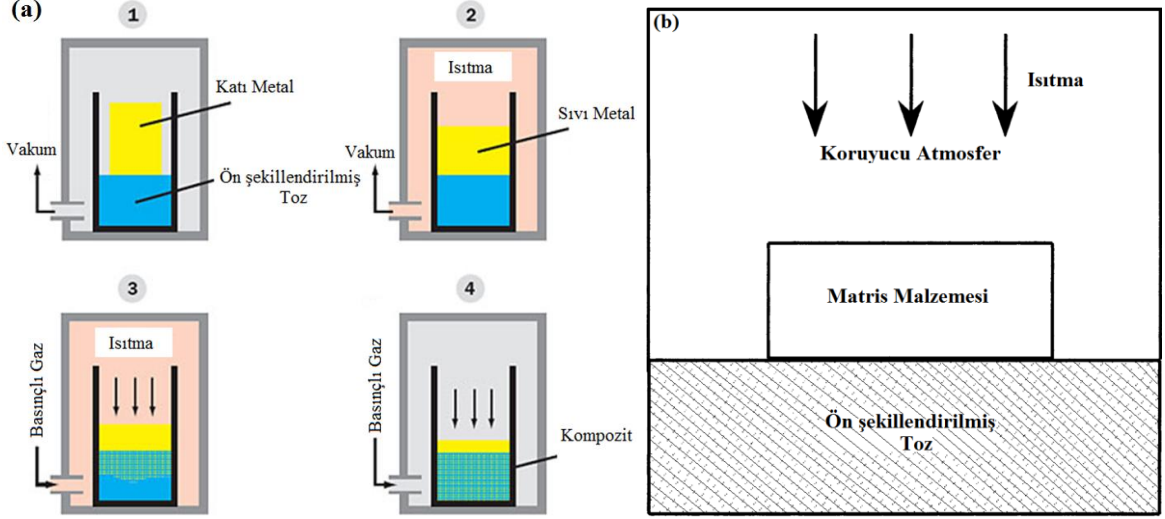


Sekil 1.6. Filtrasyon yöntemleri, a) Gaz basınçlı filtrasyon, b) Sıvı basınçlı filtrasyon [30].

1.3.2. Sıvı Metal Emdirme (İnfiltrasyon) Yöntemi

Bu yöntemde ilk olarak takviye malzemesine presleme ile ön şekil verilmektedir. Takviye malzemeleri genellikle sert malzemeler olduğu için belirli bir şekil alabilmeleri için bağlayıcı malzemeler kullanılabilir. Bu ön şekil verme aşamasında takviye malzemesinin şekli ve gözenek miktarı ayarlanabilmektedir. Ön şekil verilmiş ham takviye kütlesi kalıba monte edilir ve kalıp içerisine ergimiş metal emdirilerek kompozit veya FDM üretimi yapılır. Ergimiş metalin toz kütlesi içerisinde emdirilmesi takviye hacminin yüksek olması durumunda oldukça zordur. Takviye malzemeleri arasındaki mesafenin az olduğu durumlarda ergimiş metal ya basınç altında veya vakumla emdirilmektedir [33-37].

Şekil 1.7’de basınçlı ve basınçsız sıvı metal emdirme yöntemlerinin şematik resimleri görülmektedir [38, 39].

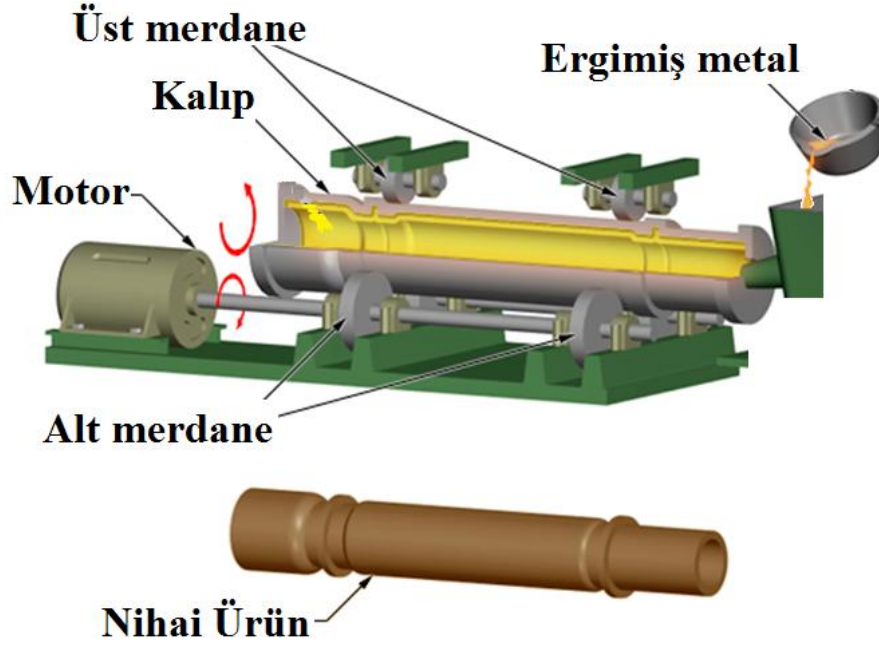


Şekil 1.7. Sıvı metal emdirme (İnfiltrasyon sistemlerinin şematik gösterimi; (a) Basınçlı İnfiltrasyon [38], (b) Basınçsız İnfiltrasyon [39])

1.3.3. Santrifuj (Savurma) Döküm Yöntemi

Farklı ergitme yöntemleri kullanılarak ergitilen metalin bir eksen etrafında döndürülecek şekilde tahrik edilen kalıbın içine dökülüp merkezkaç kuvvetine maruz bırakılması sonucunda parça dış kısmının kalıbın şeklini alması ve şekillenerek katılaşması işlemine “savurma döküm” denir (Şekil 1.8). Merkezkaç kuvveti hem ergiyiğin kalıp içinde homojen bir şekilde yayılmasını hem de gözeneksiz temiz bir içyapı elde edilmesini sağlar. Merkezkaç kuvveti ile düşük özgül kütleli kum, curuf parçacıkları, metal olmayan kalıntılar ve gazlar dönme ekseninde sürüklenerek ince taneli gözeneksiz yapı elde edilmiş olur. Genel olarak silindirik parçaların imalinde tercih edilen bu yöntemle üretilen malzemelerinin gerilme dayanımları normal koşullardaki diğer döküm yöntemlerine göre daha fazladır. Bu yöntemin avantajları, sıvı metalin yüzeye tam olarak yayılması, katılaşma esnasında yüksek basınç oluşması, boru ve benzeri delikli silindirik parçaların maçasız üretimine olanak tanınması, gözeneksiz temiz bir içyapının elde edilmesi ve yüksek mekanik değerlere ulaşılması, yolluk sistemi olmadığından hurda kayıplarının olmaması ve oldukça küçük tolerans değerleri ile çalışılabilmesi ve iyi yüzey kalitesinin elde edilebilmesidir. Bununla birlikte merkezkaç kuvvetin temini için gerekli mekanizmadan

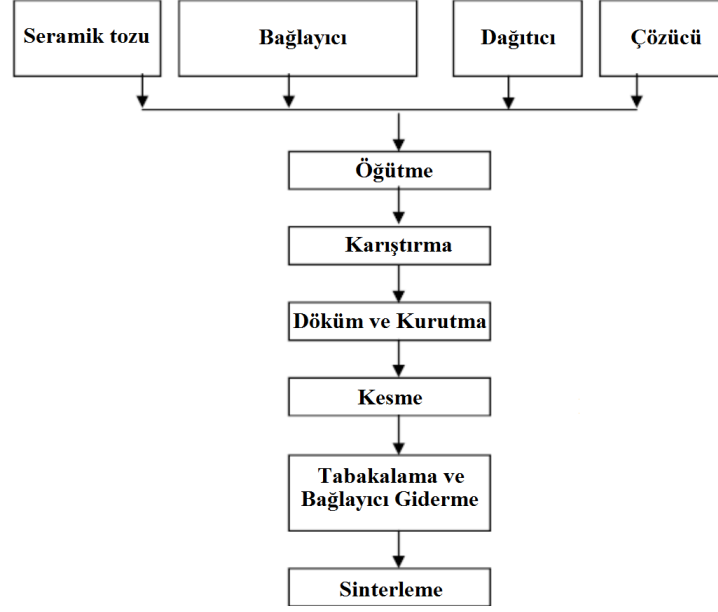
dolayı ortaya çıkan yüksek yatırım, şekil sınırlaması, yoğunluk farkı fazla olan metalleri yâda malzemeleri içeren bileşimlerde segregasyon oluşumu sözkonusudur [40-45].



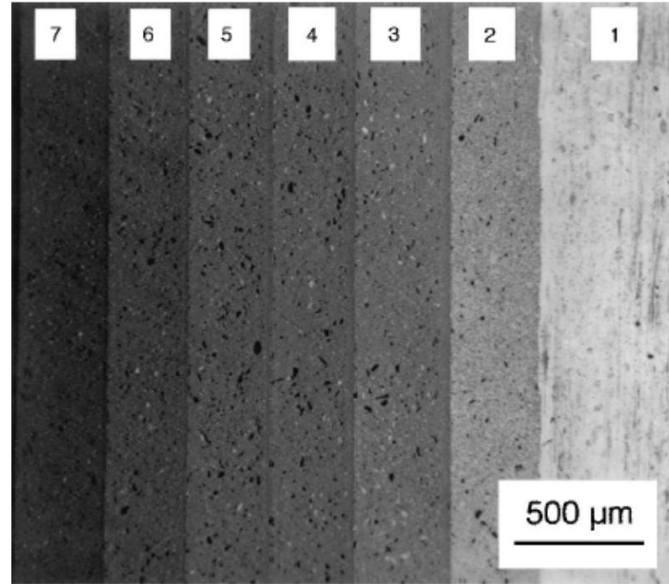
Şekil 1.8. Savurma Döküm düzeneği ve ana elemanları

1.3.4. Şerit Döküm Yöntemi

Şerit döküm yöntemi genellikle seramik esaslı kompozitlerin ve FDM'lerin üretilmesinde tercih edilen bir yöntem olup bu yöntem geniş alanlı, ince ve düzgün seramik parçaların üretiminde tercih edilir. Bu yöntemin avantajı μm ($<1\mu\text{m}$) ölçeğinde kalınlığa sahip plakaların üretilebilmesidir. Mikro elektronik alanındaki gelişmeler, düz ve iletken olmayan devre altlıklarının önemini daha da arttırmıştır. Bu altlık malzemeleri belirli bir termal iletkenliğe sahip olmalı ve ısınma durumunda dayanımını muhafaza etmelidir. Ayrıca kimyasallardan etkilenmemelidir. Bir diğer gereksinim, yüksek yüzey hassasiyeti ve kolay şekilledirilebilmedir [46-49]. Bu özellikler şerit döküm yöntemi ile elde edilebilmektedir. Bununla birlikte uzun ve çok kademeli üretim süreci bu yöntemin maliyetini artırmakta ve kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Şerit döküm yöntemi için iş akış şeması Şekil 1.9'da verilmiştir. Şekil 1.10 şerit döküm yöntemi ile üretilmiş bir FGM'nin içyapısını göstermektedir.



Şekil 1.9. Şerit Döküm İş Akış Şeması [46]

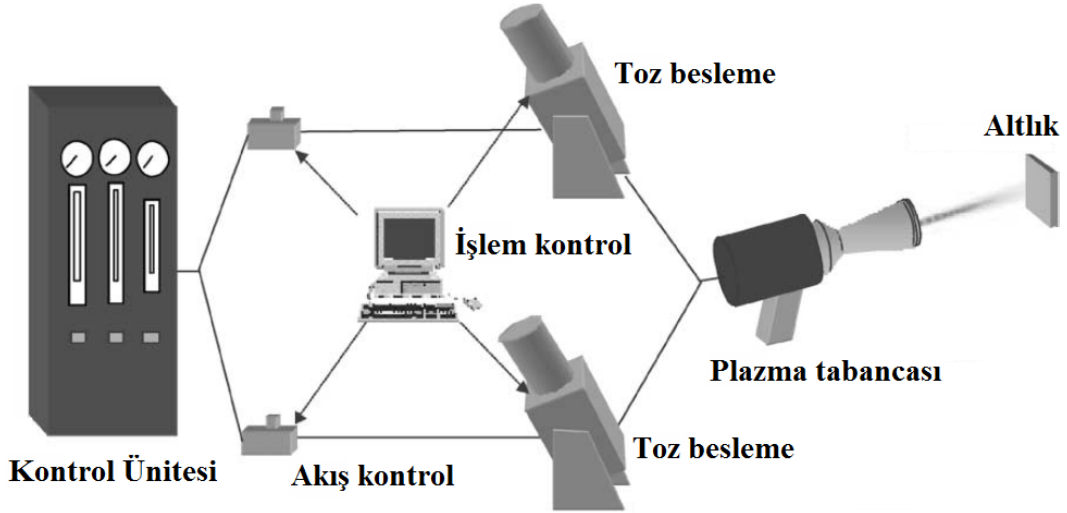


Şekil 1.10. Şerit Döküm yöntemi ile üretilen bir FGM içyapısı [50]

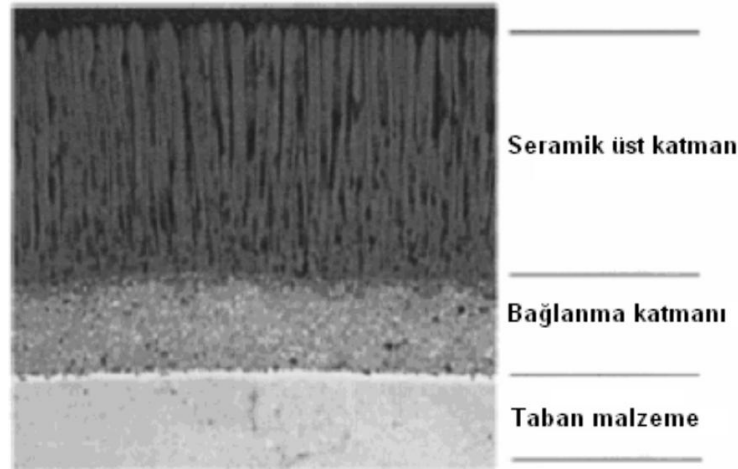
1.3.5 Termal Sprey

Termal sprej yöntemi kademeli kaplama (Termal Bariyer Kaplama) ve kompozit kaplama işlemleri için kullanılmaktadır (Şekil 1.11). Bu yöntem bir altlık üzerine toz biriktirme esasına dayanmaktadır. Termal bariyer kaplama sistemleri, yüksek sıcaklık şartlarında çalışan gaz türbini yâda motor parçalarına uygulanarak, metal esaslı bu parçaların sıcaklıklarının düşürülmesi ve çeşitli fiziksel özelliklerinin artırılması amacıyla kullanılmaktadır. Termal bariyerlerin uygulandığı parçalar oksitlenme ve korozyon direnci

bakımından daha dayanıklı bir seviyeye ulaşarak daha yüksek sıcaklıkta çalışmaya elverişli bir duruma gelir ve böylece hem genel performans hem de parça ve sistem ömrü artar. Termal bariyer kaplamalar çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Standart bir sistemde en altta taban malzeme bulunur. Bu yalıtım için gerekli katmandır. Bağlanma tabakaları sistemde iki önemli görev üstlenirler. Bağlanma katmanı oksitlenme direncini yükseltmek ve çevre sıcaklığına bağlı olarak gelişen sıcaklık korozyonunu engellemek açısından önemlidir. Böylece taban malzemenin oksitlenme oranı düşürülmüş ve korozyon direnci artırılmış olur. İkinci ve en önemli özelliği ise seramik üst katmanın taban malzemeye uyumlu bir şekilde yapışıp bağlanmasını sağlarlar [51-54]. Şekil 1.12’de katmanlı bir termal bariyer kaplama görülmektedir.



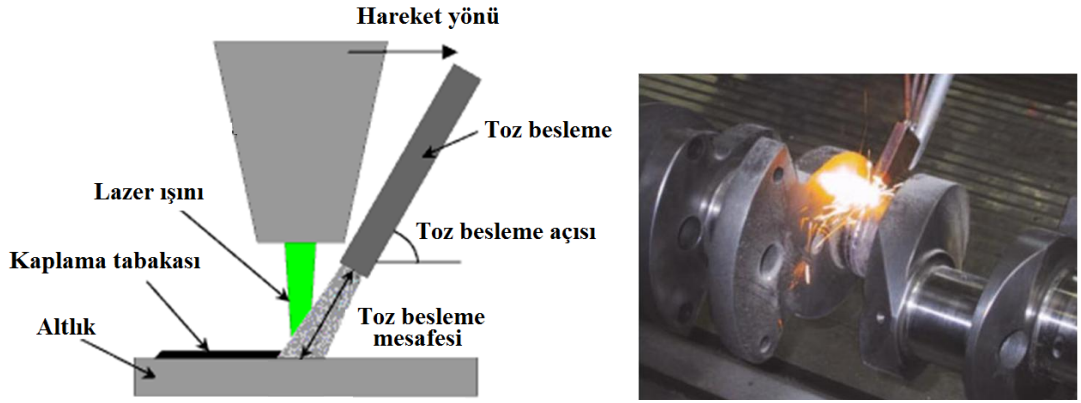
Şekil 1.11. FDM kaplama üretim ünitesi [51]



Şekil 1.12. Katmanlı termal bariyer kaplama [52]

1.3.6. Lazer Kaplama

Bu yöntemde Şekil 1.13a'da görüldüğü gibi lazer ışını kullanılarak ayrı bir besleme hattından gelen tozlar altlık yüzeyine kademeli olarak kaplanabilir veya FDM üretilebilir. Bu yöntemin en büyük avantajı aynı sistem içerisinde her türlü toz (seramik, metal) ile işlem yapılabilmesi ve kaplama, kompozit ve FDM malzeme üretimine olanak sağlamasıdır. Hem ticari hemde bilimsel anlamda oldukça yeni olan bu yöntem ile çok küçük parçalar üretilebileceği gibi şekil 1.13b'de görüldüğü gibi krank mili gibi büyük parçalarda üretilebilir. Mevcut durumda bu yöntemin en büyük dez avantajı ilk yatırım maliyetinin oldukça yüksek olmasıdır [55-58].



Şekil 1.13. a) Lazer toz kaplama ünitesi, b) Krank milinin Lazer toz kaplama yöntemi ile kaplanması [55, 56]

1.3.7. Toz Metalurjisi

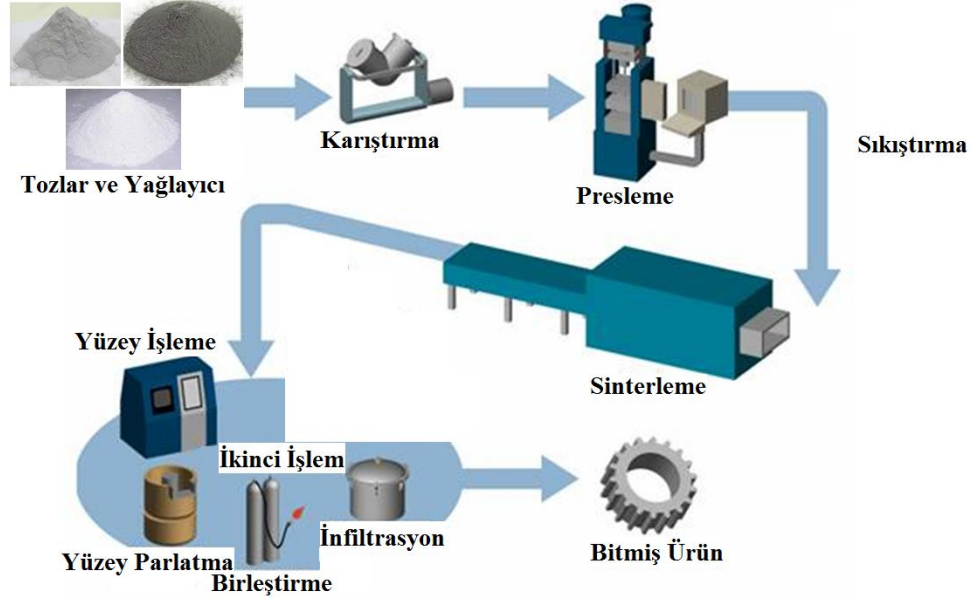
Toz metalurjisi; saf metal, alaşım veya kompozit tozlarının herhangi bir yoğunlaştırma yöntemi ile şekillendirilerek üretilen ham parçaların, bir ısıl işlem türü olan sinterleme işlemi ile mukavemetlerinin artırılarak nihai ürün üretme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Toz metalurjisiyle üretim yapılırken ilk olarak metalik tozlar, yağlayıcı ve alaşım elementleri ile homojen bir karışım elde etmek için karıştırılmaktadır. Yağlayıcı kullanmanın amacı, tozların kendi aralarında rahatça yerleşimini sağlamak, toz ile kalıp arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve parçaların kalıptan kolayca çıkartılmasını sağlamaktır. Metal tozlarının şekillendirilmesinde, tek veya çift yönlü presleme, soğuk izostatik presleme ve sıcak izostatik presleme, sıcak presleme, toz enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon teknikleri kullanılmaktadır. Preslenen metal tozları, ergime sıcaklıklarının

yaklaşık yarısının üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldıklarında aralarında sıkı bağ oluştururlar. Bu olay sinterleme olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte sıcak presleme yâda sıcak ekstrüzyon gibi şekillendirme yöntemlerinde ikincil bir sinterleme işlemine gerek kalmayabilir. Genellikle sinterleme toz partikülleri arasında boyun oluşumu, boyun gelişimi, gözenek miktarının azalması, gözeneklerin etrafının sarılması, yoğunlaşma veya gözenek daralması ve eğer aşırı sinterleme yapılırsa gözenek irileşmesi aşamalarından oluşmaktadır. Sinterleme genel olarak katı hal sinterlemesi ve sıvı hal sinterlemesi olarak ikiye ayrılmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen parçalara örnek olarak araç motor aksamları ve yatak malzemeleri verilebilir (Şekil 1.14). Toz metalurjisinin avantajları; hurda kaybının çok az olması, seri üretime uygunluk, talaşlı işleme duyulan ihtiyacın azlığı, kimyasal bileşim kontrolü, gözenekli parçaların üretilmesi ve yoğunluk farkı nedeniyle döküm yöntemi ile üretimi oldukça zor olan metal matrisli kompozitlerin bu yöntemle üretilmesidir. Toz metalurjisinin dezavantajları ise; yüksek ilk yatırım maliyeti; yüksek kalıp maliyeti, düşük mekanik özellikler ve üretilebilecek parça boyut ve şeklinin sınırlı olmasıdır. [59-65].



Şekil 1.14. Toz metalurjisi parçalara örnekler

Toz metalurjisi (TM) yöntemi, ilk olarak geleneksel döküm, sıcak ve/veya soğuk presleme ve talaş kaldırma yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. TM üretim basamakları; imal edilecek parçanın karmaşıklığı, dayanım özellikleri ve içermesi gereken alaşım tozlarına göre değişiklik göstermektedir. En karmaşık ve dayanım özellikleri bakımından en iyi özellikleri elde etmek amacıyla uygulanması gereken başlıca TM parça üretim basamakları; tozların karıştırılması veya öğütülmesi, karışım tozların kalıba konulması, soğuk presleme ve sinterleme olarak sıralanabilir [63].

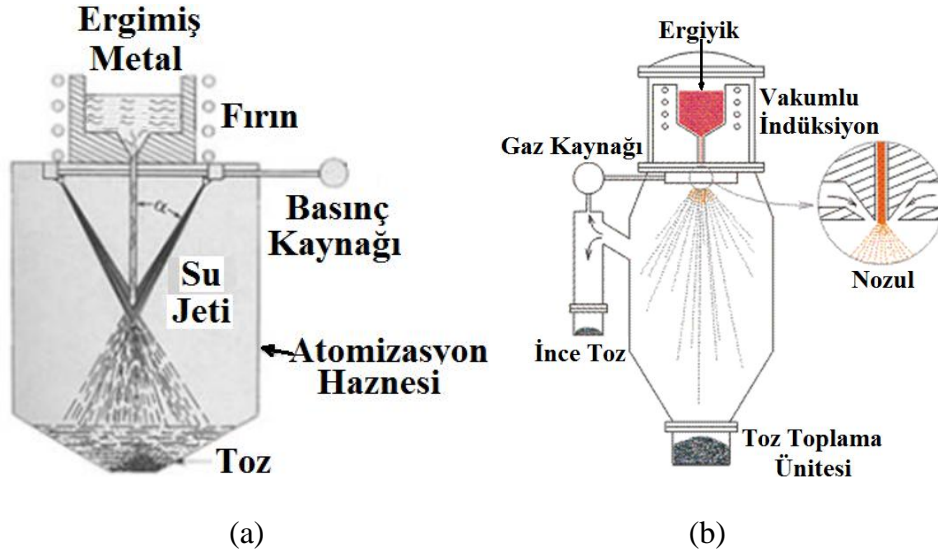


Şekil 1.15. Geleneksel toz metalurjisi işlemi aşamaları [66].

1.3.7.1. Toz Üretimi

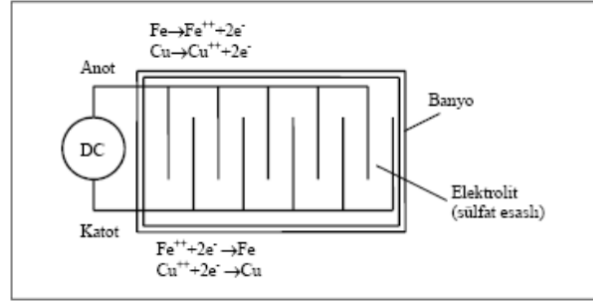
Toz metalurjisi yönteminin başlangıç adımını metal tozlarının üretimi ve üretilen bu tozların özelliklerinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Toz metalurjisinin ana elemanları parçacıklardır. Bir toz için en büyük boyut 1 mm' nin altında kalan çok ince ve parça halindeki katı cisim olarak tanımlanır. Parçacık boyutu için uygun birim, 10^{-6} m olan mikrometredir (μm). Bununla birlikte günümüzde nano parçacıkların (10^{-9} m) kullanımı ön plana çıkmaktadır. Toz metalurjisi işleminde kullanılan parçacık boyutları incelendiğinde seramik parçacıkların çok küçük boyutlarda, polimer parçacıkların büyük boyutlarda metal toz parçacıklarının ise bu ikisinin arasında olduğu görülmektedir. Bu boyut aralığı 1-500 μm olarak tanımlanabilir. Birçok mükendislik uygulamasında istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için karşımı tozları değişik malzemelerin belli oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir. Bunlara toz metalurjisi alanında başlangıç tozları adı verilmektedir. Örneğin metal matrisli kompozitler metal matris tozu ile seramik takviye tozlarının karıştırılması ile üretilmektedir. Alaşım malzemeleri ise alaşımın bileşiminde bulunan elementlerin ağırlıkça miktarlarına göre karıştırılması ile üretilmektedir. Metal tozlarının üretimi için 4 ana yöntem kullanılmaktadır. Bunlar mekanik öğütme yâda alaşımlama, kimyasal indirgeme, elektrolitik biriktirme ve sıvı metal atomizasyonudur. Bu dört yöntem arasında en çok tercih edilen yöntem % 70-80'lik bir paya sahip olan atomizasyon yöntemidir.

Metal tozların şekilleri üretim yöntemine göre küreselden karmaşık yapıya kadar değişebilir. Parçacık toz yüzeyi, tozun akış özelliklerini, yüzey alanını ve presleme sonrası yoğunluğunu önemli oranda etkileyen bir özelliktir. Atomizasyon, bir sıvı demetinin çeşitli yöntemlerle farklı boyutlardaki çok sayıda damlacıklara ayrılmasıdır. Sıvı atomizasyon yönteminde ergimiş metal akarken su veya başka bir sıvı püskürtülerek ani soğutma ile küçük parçacıklar elde edilmektedir (Şekil 1.16a). Su atomizasyonu metali çok hızlı soğutur bu sebeple daha düzensiz şekilli parçalar elde edilir. Daha uygun bir atomizasyon yöntemi ergimiş metale inert bir gaz püskürtülmesidir (Şekil 1.16b). Bu yöntemle (Gaz Atomizasyon Yöntemi) malzeme daha yavaş soğutulur böylece daha yuvarlak şekilli tozlar elde edilebilir. Bir başka yöntem de ergimiş metali dönen bir disk üzerine dökülmesi ile yapılır. Bu şekilde malzeme dönen diskten fırlayarak kabın duvarlarına çarpar ve toz elde edilir. Kimyasal indirgeme metal tozları üretimi için bir başka yöntemdir. Farklı kimyasal reaksiyonlar içeren bu yöntem metalin elementel toz haline indirgenmesidir. Elektroliz yöntemi de bir başka toz üretim tekniğidir (Şekil 1.16c). Bu yöntem elektriği kullanarak metali çözüp çok ince toz haline getirme işlemidir. Bu yöntemle oldukça saf tozlar elde edilebilir. Sistemde anot, toz elde edilmek istenen malzemeden üretilir. Elektroliz işlemi ile malzeme anottan katoda taşınır ve kolayca yıkanabilen bir film üstüne yapıştırılır. Bu filmler temizlenip kurutulularak istenilen toz elde edilmiş olur [3, 67-74].



Şekil 1.16. Toz üretim yöntemleri, a) Su atomizasyon yöntemi, b) Gaz atomizasyon yöntemi, c) Elektroliz yöntemi [3, 67]

Şekil 1.16'nin devamı

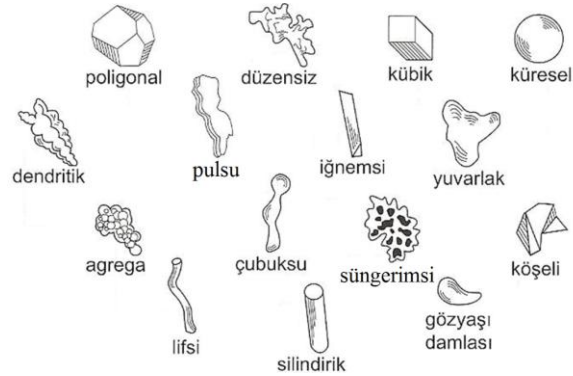


(c)

1.3.7.2. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

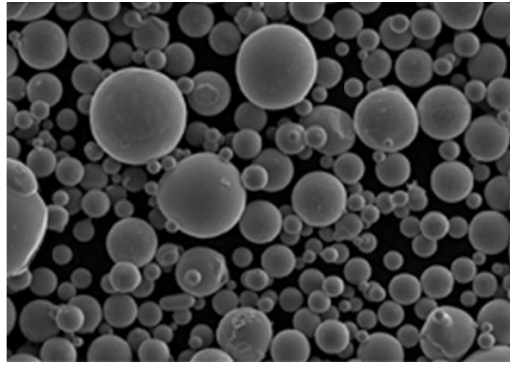
1.3.7.2.1. Toz Morfolojisi

Üretim yöntemine göre elde edilen toz parçacıklarının şekli yani morfolojisi değişebilir. Gaz atomizasyon yöntemlerinde genellikle küresel morfoloji elde edilirken sıvı atomizasyon yöntemlerinde düzensiz yâda çubuksu morfoloji elde edilir. Burada kritik parametre katılma hızıdır. Su soğutmalı sistemlerde çok hızlı katılma meydana geldiği için ergiyik daha küresel şekle dönüşmeden katılma meydana gelir ve morfoloji çubuksu haliyle kalır. Gaz atomizasyon yönteminde ise damlacıklar halinde parçalanmış ergiyik küresel forma dönüşecek kadar zaman bulabildiğinden küresel morfoloji elde edilebilir. Burada unutulmaması gereken önemli bir faktörde ergimiş metalin akıcılığıdır. Akış özelliği iyi olmayan metallere toz üretimi esnasında düzensiz katılma meydana gelir ve tam olarak toz üretilmez bu durumda tozdan ziyade şerit türü oluşumlar görülebilir. Şekil 1. 17'de çeşitli toz morfolojileri görülmektedir.

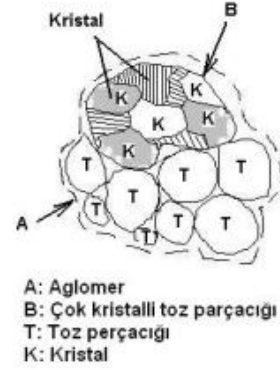


Şekil 1.17. Toz morfolojileri [59]

Toz parçacıkları tek bir taneden oluşur (Şekil 1.18). Taneler düzenli kristal yapıda olabilecekleri gibi amorf yapıda da olabilirler. Ayrıca taneler tek kristalli tek bir tane yapısında olabileceği gibi çok kristalli (polikristal) tane yapısına da sahip olabilirler. Toz taneleri bazen ikincil taneler oluşturabilirler. Bu ikincil tane oluşumuna aglomerasyon denir ve daha çok kontrol edilemeyen toz üretim süreçlerinde istem dışı olarak oluşur. Aglomerasyon, birden çok parçacığın katı halde tek yapıda bir arada bulunmasıdır [3].



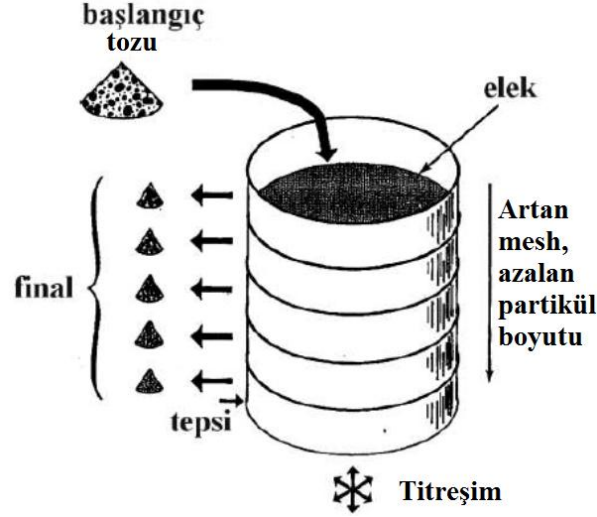
(a)



(b)

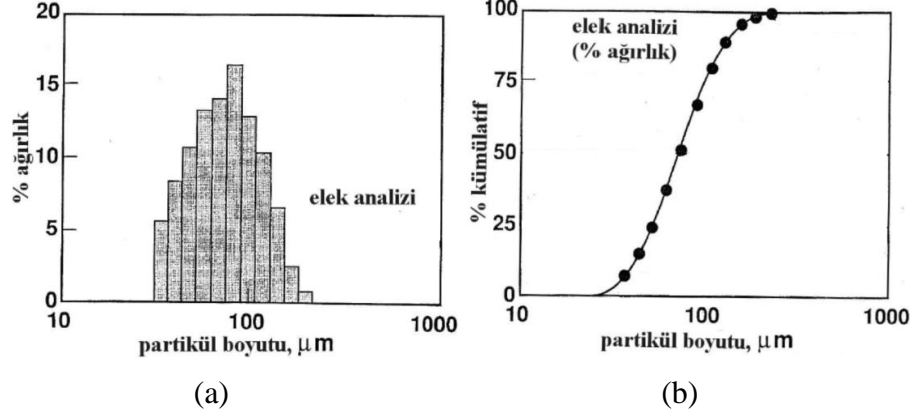
Şekil 1.18. TM kapsamı içerisinde toz bileşenleri

Tozların karakterizasyonunda diğer bir özellik de toz boyutudur. Ayrıca parçacık boyut analizi toz metalurjisi yönteminde önemli bir yer tutmaktadır. Çeşitli toz boyutu ölçüm yöntemleri vardır. Bunlar elek analizi, sedimentasyon, mikroskopik inceleme, ışık saçılımı ve kırınımı, ışık engelleme, elektriksel alan algılaması ve X-Işını teknikleri olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntemler içerisinde elek analizi partikül boyutunu belirlemede kullanılan en eski ve en temel yöntemdir. Günümüzde ise en yaygın kullanılan yöntem ışık saçılımı ve kırınımı yöntemidir. Burada bilinmesi gereken en önemli nokta ölçülen parametrelerdeki farklılıklar nedeniyle farklı partikül boyutu analiz teknikleri ile elde edilen sonuçlarda farklılıklar olabileceğinin bilinmesidir. Şekil 1.19'de bir elek sistemi görülmektedir.



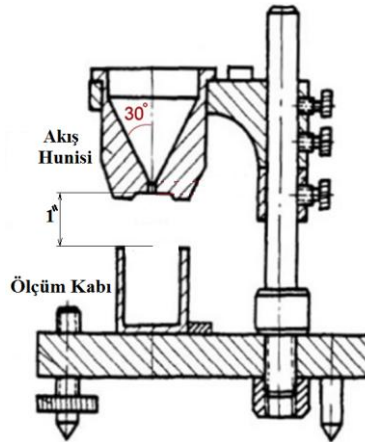
Şekil 1.19. Elek düzeneği [3]

Elek analizi işlemi farklı büyüklükteki tanelerden oluşan toz parçacıklarının “Tane Boyu Dağılımı”nı saptamak için yapılmaktadır. Boyut dağılımı, bir numunede tanelerin boyutları ile miktarları arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Bir toz kütesinin boyut dağılımı, bu numunede hangi boyutta ne kadar partikül olduğunu göstermektedir. Elek analizi, eleklerin azalan elek açıklıklarında istiflenmesi ile başlar. En küçük açıklık boyutu en alttaki elektedir. Toz kütesi en üstteki elek üzerine doldurulur ve elek sistemi 10-20 dakika süre ile çalıştırılır. Titreştirme işlemi tamamlandıktan sonra her bir boyut aralığına düşen toz miktarı tartılır ve toz kütesinin yüzde kaçının bu aralığa düştüğü hesaplanır. Bir elekten geçen toz – işareti ile gösterilerken üzerinde kalan toz + işareti ile gösterilir. Çok kısa eleme işlemi küçük partiküllerin eleklerin tarafından geçmesi için yetersiz olurken çok uzun elek işlemi ise partikülleri aşındırma yâda kırma etkisi göstereceğinden boyut dağılımını daha küçük değerlere düşürebilir. Parçacık boyut dağılımı Şekil 1.20a’da gösterildiği gibi her bir boyut artışıdaki parçacık miktarını gösteren bir histogramla ifade edilebileceği gibi, her bir elek aralığındaki yüzdelerin toplanması ile elde edilen kümülatif parçacık boyut dağılımı şeklinde de verilebilir (Şekil 1.20b) [3].



Şekil 1.20. (a) Logaritmik esaslı histogram, (b) Kümülatif parçacık boyut dağılımı [3]

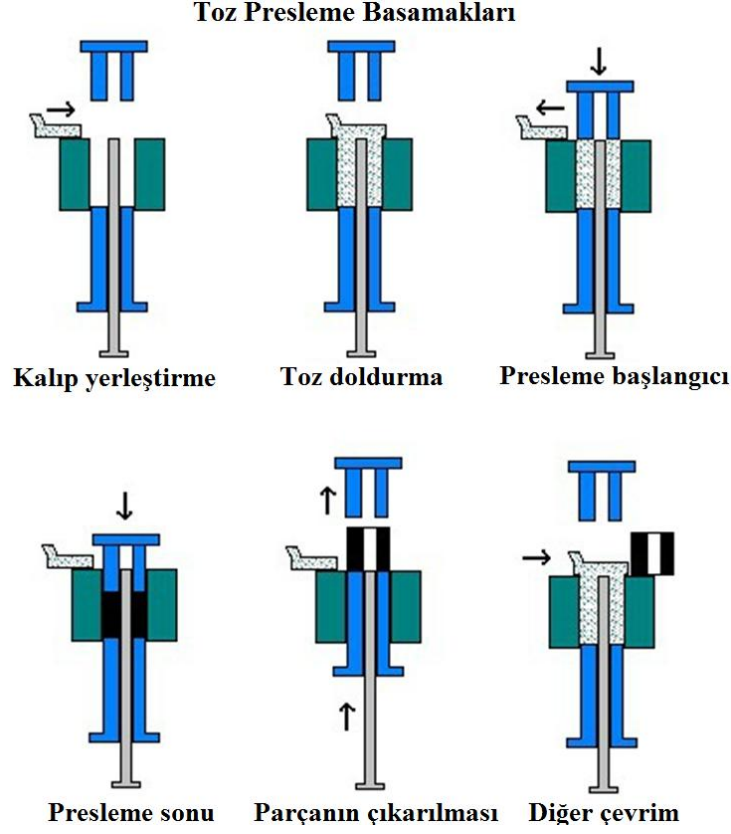
Toz partiküllerine ait diğer özellik görünür yoğunluktur. Gevşek durumdaki toz kütesinin yoğunluğu görünür yoğunluk olarak adlandırılmaktadır. Görünür yoğunluğun önemi tozların akışı ve paketlenme yâda yoğunlaştırma karakteristikleri hakkında ön bilgi vermesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek görünür yoğunluğa sahip toz parçacıklarının paketlenmesi sonucunda yüksek ham yoğunluk ve yüksek sinter yoğunluğu elde edilmektedir. Şekil 1.21'de görünür yoğunluk ölçümü için kullanılan Hall akış metrenin teknik çizimi görülmektedir. Burada akış hunisi içersinde doldurulan toz partikülleri aşağı kısımda bulunan ve hacmi 25cm^3 olan yoğunluk ölçüm kabına serbest şekilde akıtılır. Yoğunluk ölçüm kabı üzerindeki toz parçacıkları düz bir plaka ile sıyrılır ve kab içersindeki toz kütlesi tartılarak ağırlığı belirlenir. Daha sonraki aşamada bu ağırlık hacme bölünerek görünür yoğunluk belirlenir. Toz boyutu, toz şekli ve içersindeki katkı türü ile miktarı tozun akıcılığını etkilemektedir.



Şekil 1.21. Görünür yoğunluk ölçüm cihazı, Hall akış ölçer.

1.3.7.3. Tozların Preslenmesi

Presleme aşamasında üretilmek istenen malzemenin şekline göre hazırlanan kalıp içersine tozlar dökülerek, pres tek etkili ise yalnızca üst zımba ile, çift etkili ise hem üst hemde alt zımba ile sıkıştırma işlemi uygulanmaktadır. Uygulanan basınç sonucunda taneler arasında soğuk kaynaklı temas bölgeleri oluşarak toz partikülleri birbirine kenetlenir. Presleme basıncı, parçanın fiziksel özelliklerini ve sinterleme sırasında oluşacak büzülme ya da genişlemeyi kontrol eder. Artan presleme basıncıyla beraber preslenmiş parçanın dayanımı da yükselir (Şekil 1.22). Sıkıştırma işleminde kullanılacak değişik tür ve kapasitelerde presler mevcuttur. Tozun sahip olduğu özellikler, preslenmiş parçadan beklenen özellikler, parça geometrisi gibi kriterlere bağlı olarak kapasitesi, hızı, zımba uzunluğu ve hareket sayısı değişebilen presler kullanılmaktadır. En çok tercih edilen presler mekanik ve hidrolik preslerdir. Tek yönlü preslemede, toz karışım kalıba doldurulduktan sonra üst zımba ile basma gerçekleştirilir ve alt zımba sabittir. Tek yönlü sıkıştırma ile istenilen yoğunluk dağılımı sağlanmadığından, parçanın alt ve üst bölgelerinde eşit sıkıştırılmasını sağlamak, çift hareketli zımba ile mümkün olur. Çift yönlü preslemede toz parçacıkları, birbirine zıt yönde hem alt hem de üst zımba tarafından aynı anda yoğunlaştırılmaktadır. Çift yönlü presleme ile her bir yönde eşit veya farklı miktarlarda basınç uygulanabilir. Bu yöntemle kalıp içerisindeki toz kütlelerine boydan boya dengeli bir sıkıştırma uygulanabilmektedir [75-77].



Şekil 1.22. Toz preslemede basamakları.

Sıkıştırma işlemi üç aşamada ele alınabilir:

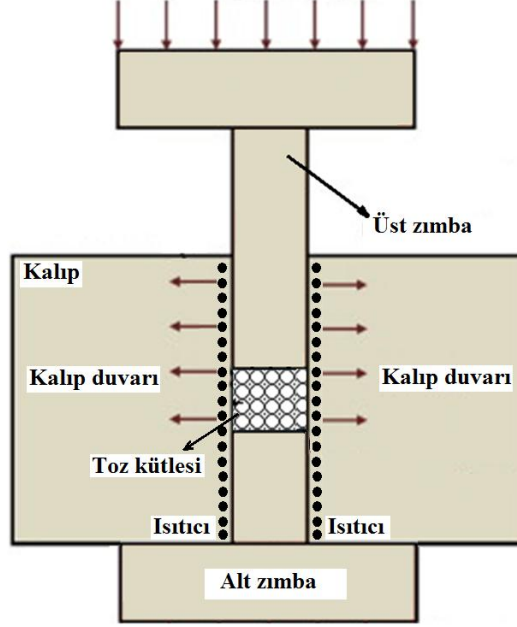
1. Sıkıştırma basıncının ilk uygulanmasına müteakip parçacıkların yer değişmesi ve yeniden pozisyon belirlemesi gerçekleşir. Plastik şekil değişimi yoktur. Bu aşamada parçacık boyutu, toz boyut dağılımı, parçacık şekli ve yüzey özellikleri ile parçacıklar arası sürtünme önemli rol oynar.

2. Toz sıkıştırmanın ikinci aşamasında elastik ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Bu aşamada parçacıklar arası soğuk şekillendirmeye bağlı bağlar oluşabilir. Ayrıca parçacıkların mekaniksel kilitlemeleri ile parçacık-parçacık etkileşimleri bu aşamada önem kazanan durumlardır.

3. Presleme basıncının arttığı sıkıştırmanın son aşamasında toz parçacıklarının kırılması ve plastik deformasyon ile boşlukların doldurulması sağlanmış olur. Bu aşamada toz parçacıkları arasında soğuk kaynak olabilir [3, 76].

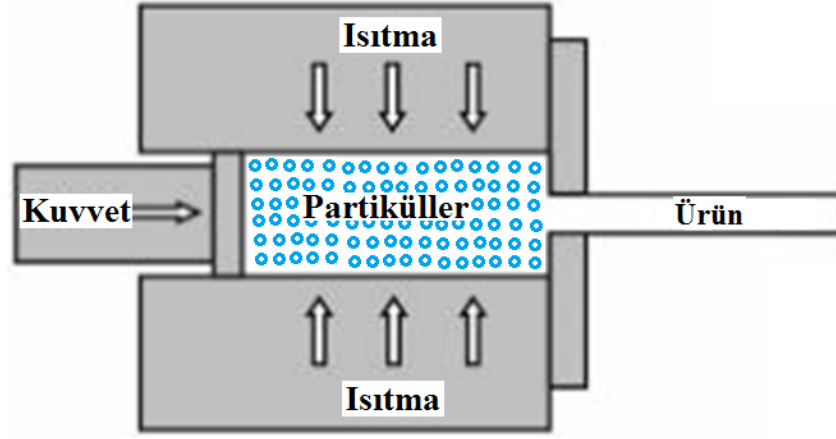
Toz yoğunlaştırmada kullanılan ikinci bir yöntem sıcak preslemedir. Bu yöntemle uygun kalıp ve fırın kullanıldığında sinterleme işlemi ile presleme işlemi aynı anda yapılarak hem yüksek yoğunluklu parçalar üretilebilir hemde işlem zamanı ve maliyetten

tasarruf sağlanabilir. Sıcak preslemede dikkat edilmesi gereken husus kalıp malzemesinin yüksek sıcaklık çalışma koşullarına dayanıklı olmasıdır [78-80].



Şekil 1.23. Sıcak presleme işlemi

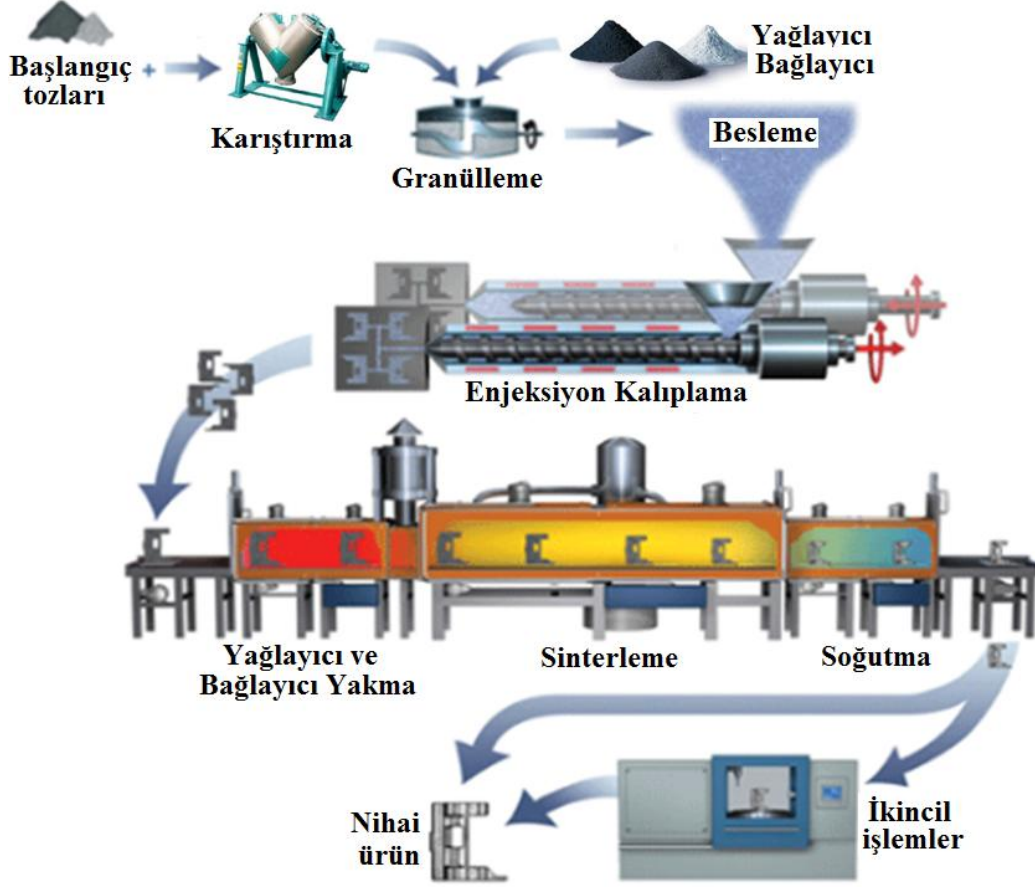
Bir diğer toz yoğunlaştırma yöntemi olarak ekstrüzyon işlemini sayabiliriz. Bu yöntemde toz partikülleri ince et kalınlığına sahip tüp (Al veya Bakır) içerisinde yerleştirilerek ekstrüzyon haznesi içersine yerleştirilir. Bir sonraki aşamada ise yoğunlaştırma kabileyetini artırmak için ısıtma uygulanır bununla birlikte ekstrüzyon işlemi talep edilen malzeme özelliklerine göre soğuk olarak da yapılabilir. Son aşamada basınç uygulanarak yoğunlaştırma ve buna ek olarak şekil verme işlemi uygulanır. Ekstrüzyon işleminde kalıp içersinde yoğunlaştırılan tozlar ikinci bir kesit değişimine maruz kalarak ikincil bir plastik deformasyona maruz kalmaktadır. Bu ikincil deformasyon yüksek yoğunluklu toz metalurjisi parçalarının üretimi için oldukça önemlidir. Ayrıca ikinci deformasyon kompozit tozlar içersindeki partiküllerin matris içersinde dağılımı açısından da olumlu bir etki yaratabilir [81-84].



Şekil 1.24. Extrüzyon işlemi [85]

Bir diğer toz yoğunlaştırma işlemi ise toz enjeksiyon kalıplama yöntemidir. Toz enjeksiyon kalıplama işlemi farklı büyüklükteki metal ve seramik parçaların üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Çok fazla sayıda ürün çıkışı ve üretim maliyetlerinin düşük olması gibi avantajlarından dolayı tercih edilen bir prosestir. Karmaşık şekilli parçaların üretiminde net ölçülere ulaşmak mümkündür. Toz enjeksiyon kalıplama işlemi yüksek performanslı, metalik ve seramik esaslı parçaların seri üretimine uygundur. Küçük, karmaşık şekilli, yüzey kalitesi yüksek, hassas toleranslı ve fazla işlem gerektiren parçaların üretimi toz enjeksiyon kalıplamaya oldukça uygundur. Bu yöntemin en önemli avantajı toz metalurjisinin diğer teknikleriyle üretilemeyen karmaşık şekilli parçaların imal edilebilmesidir. İlk olarak 1920'li yıllarda roket ateşleme parçalarının üretimi, seramik malzemeler kullanılarak toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Nikel esaslı tozlar kullanılarak bazı uranyum zenginleştiricilerin parçaları II. Dünya Savaşı yıllarında toz enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiştir. Daha sonraki yıllarda seramik tozlar çeşitli mumlar kullanılarak şekillendirilmiştir. Karbür ve seramik tozlardan meydana gelen parçaların üretiminde mum, epoksi ve selülozik esaslı bağlayıcılar kullanılmıştır. Ancak üretilen parça sayısı çok azdır. 1979 yılında en iyi dizayn ödülünü toz enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş iki parça almıştır. Bu toz enjeksiyon kalıplama için dönüm noktası olmuştur. Üretilen parçalardan biri niyobyum esaslı roket motoru diğeri ise jet motoru parçasıdır. 2000'li yıllarda bu teknoloji kullanım alanını genişletmiş ve bu alanda üstün olduğunu kanıtlamıştır. Şekil 1.25'de görüldüğü gibi toz enjeksiyon kalıplama işlemi farklı aşamaları içermektedir. Bunlar, toz ve bağlayıcının seçilmesi, toz ve bağlayıcının karıştırılması (Karıştırma), toz ve bağlayıcı karışımlarının granül hale getirilmesi

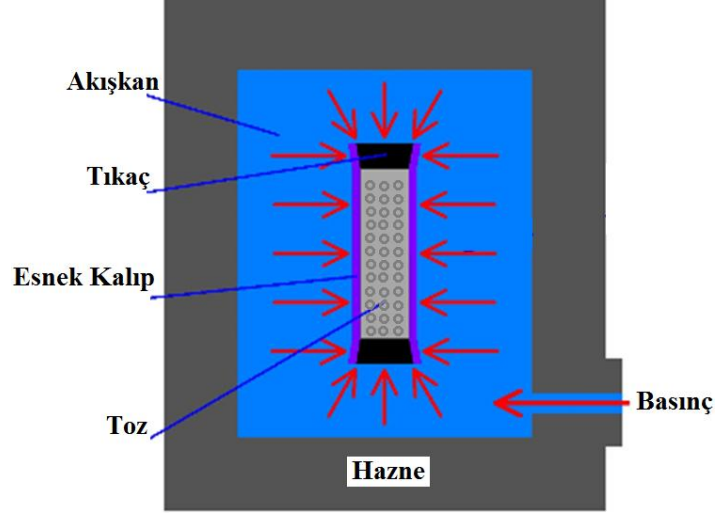
(Granülleme), karışımın kalıplanarak şekillendirilmesi (Kalıplama), kalıplanmış parçaların bağlayıcılarının giderilmesi (Bağlayıcı Yakma), sinterleme ve ikincil işlemlerdir [86-90].



Şekil 1.25. Toz enjeksiyon kalıplama iş akış şeması [89, 90]

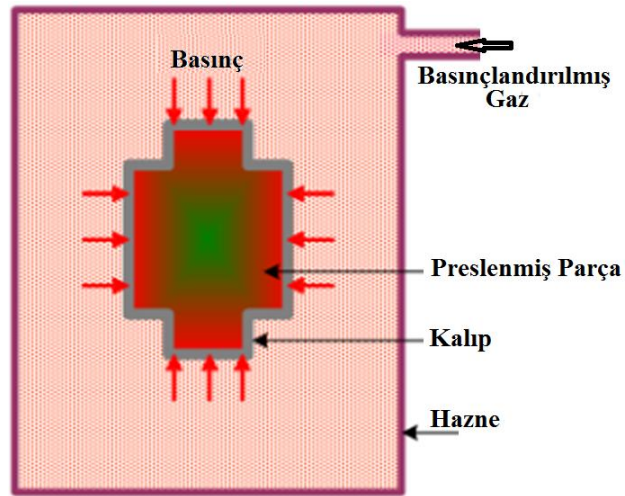
İzostatik presleme yöntemide toz yoğunlaştırma işleminde kullanılan yöntemlerdendir. Soğuk ve sıcak izostatik presleme olmak üzere iki farklı teknikle toz partiküllerinin yoğunlaştırılması gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde, toz kütlesi her yönden eşit basınçta sıkıştığından homojen bir yoğunlaşma elde edilmektedir. Geometrinin karmaşık olduğu durumlarda bu yöntem avantajlıdır. Ancak pahalı ve üretim hızı yavaş olan bir yöntemdir. Yağlayıcı katılmadığından yüksek ham mukavemetli parçalar elde edilir. Soğuk izostatik preslemede bir yağ pompası tarafından basınçlandırılan yağ hazne içersinde kauçuk yâda polimer kalıp içersindeki tozu sıkıştırarak yoğunlaşmasını sağlamaktadır. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken hususlardan biri kalıp malzemesinin tozu şekillendirecek kadar esnek diğer taraftan uygulanan basınca dayanacak kadar

mukavemetli olması gerektirir. Aksi halde kalıp deforme olur ve yoğunlaştırma işlemi gerçekleştirilemez [66, 69, 91, 92].



Şekil 1.26. Soğuk izostatik presleme [66, 92]

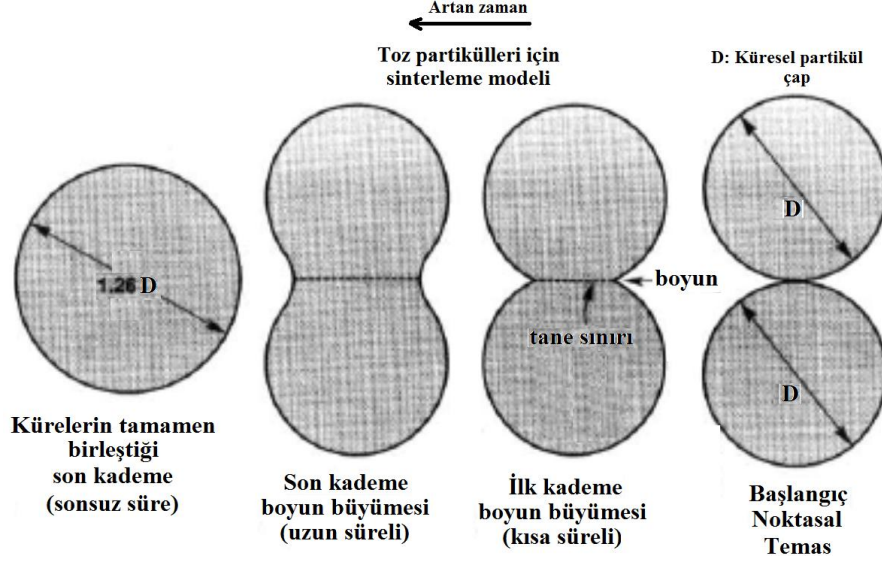
İzostatik preslemedeki diğer yöntem sıcak izostatik preslemedir. Bu yöntem 1950'li yıllarda Battelle Institute (USA) tarafından geliştirilmiştir. Sıcak izostatik presleme metodu, tozun deforme olabilen bir kabın içine doldurulması, vakumlama ve kabın kapatılması ve sonrasında sistem içerisine konularak istenilen sıcaklık ve basıncın uygulanması basamaklarını içerir (Şekil 1.27) [93].



Şekil 1.27. Sıcak izostatik presleme

1.3.7.4. Sinterleme

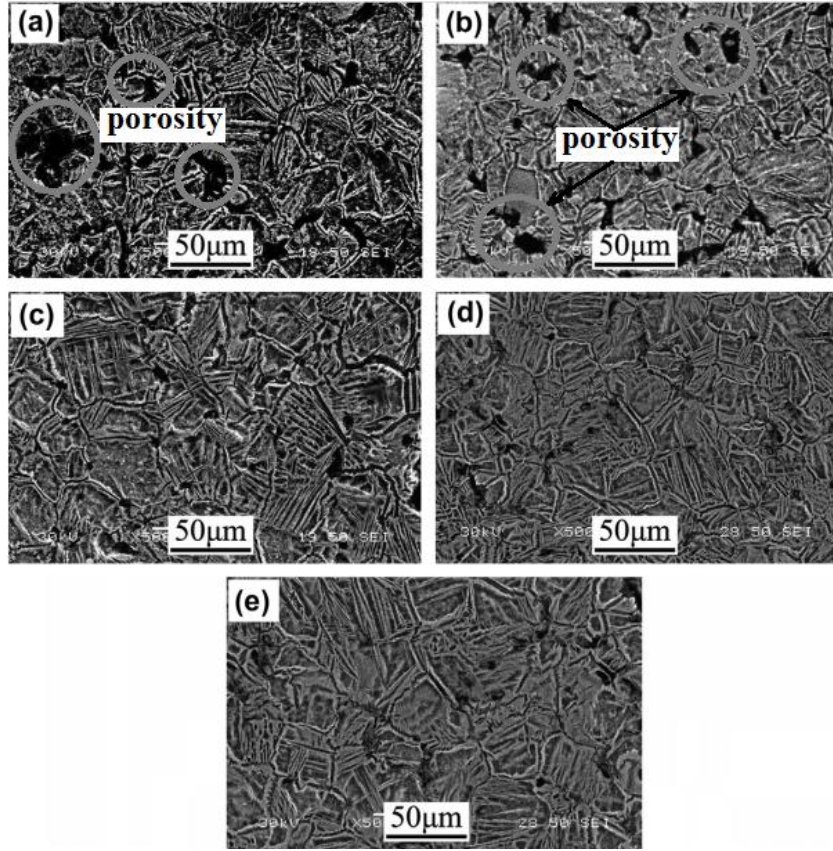
Sinterleme, preslenmiş malzemelere uygulanan ısı bir operasyon olarak tanımlanacağı gibi, presleme esnasında şekillendirilen parçaya uygulanan bir işlem olarak tanımlanabilmektedir. Sinterlemede amaç; difüzyon, basınç ve ısının tesiriyle, cismin bünyesinde mevcut olan boşluğun ortadan kaldırılmasıdır. Sinterlenen malzemenin üstün özelliklere sahip olabilmesi için, bünyesinde bulunan boşluğun, olabildiğince sıfıra yaklaşması gerekmektedir. Sinterleme mekanizması, tamamen ısı ve kütle taşınımı olayına dayanmaktadır. Kütle taşınımını kolaylaştırmak için mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklarda çalışılmalıdır. Sinterlenmeyi sağlayan itici güç; yüksek sıcaklıklarda yüzey enerjisinde meydana gelen azalmadır. Yüzey enerjisinde azalma meydana geldikçe difüzyon hızı artar ve özellikle karşılıklı atomların difüzyonu şeklinde, birbirleriyle temas halinde olan tozlar arasında bir boyun bölgesi oluşur ve tozlar birbirine nüfuz eder (Şekil 1.28) [3, 94]. Sinterlenme işleminin etkinliğini ve toz malzemenin sinterleme sonrası mikroyapısını belirleyen pek çok faktör vardır. Sinterleme esnasındaki yayılım katsayısı, yüzey gerilimi, partikül boyutu, ilk gözeneklilik hacmi gibi birçok parametre içerir. Bu faktörleri içyapıya ve dış yapıya ait olanlar şeklinde ikiye ayırmak da mümkündür. İçyapıya ait özellik olarak yüzey gerilimi, yayılım katsayısı, buhar basıncı, viskozite ve bunun gibi özellikler gösterilebilir. Bu özellikler kimyasal bileşim, işlem atmosferi yâda sıcaklığı değiştiğinde değişen özellikler olarak bilinir. Dış yapıya ait özellikler ise sistemin geometrik ve topolojik detaylarına dayanmaktadır. Sinterleme işlemi toz metalurjisi yönteminin en karmaşık konusu ve aynı zamanda ham numuneyi yüksek performanslı malzemeye dönüştürdüğünden toz metalurjisinin en önemli ve en kritik aşamasıdır. Sinterleme sırasında polimer yakılması, parçacıklar arası bağlanma, boyut değişimi ve mikroyapının kayda değer miktarda irileşmesi gibi birçok önemli olay meydana gelmektedir. Sinterlenen parçaların istenilen özellikleri taşınması ve aynı zamanda parçanın istenilen boyutlarda olması oldukça önemlidir [59, 95, 96].



Şekil 1.28. Mikroskopik ölçekte sinterleme: (1) noktasal temas; (2) boyun büyümesi başlangıcı; (3) boyun büyümesi sonu; ve (4) birleşme [59].

Sinterleme işlemi genel olarak mutlak ergime sıcaklığının yarısından fazla olan sıcaklıklarda ($T > 0.5T_e$) ham malzemeye uygulanan bir ısıl işlemdir. Uygulanan sıcaklıklarda yayınma kontrollü kütle taşınımı meydana gelmelidir. Toz üretim sürecinde malzemede oluşan yüksek enerji, sinterleme sırasında yüksek sıcaklıkta atomların yayınımı ve küçük parçacıkların yüzey enerjilerinin azaltılmasıyla giderilir. Sinterleme mekanizmaları genellikle yüzey, tane sınırı yâda kristal kafesinde oluşan yayınım işlemleridir. Sinterleme sırasında meydana gelen geometrik değişimler atomların hareketini sağlayan ısıtmadan kaynaklanmaktadır. Sinterlemede itici güç katı-buhar arayüzey alanını (kendisini çevreleyen buhar ile temas halinde olan alanların tümü) en aza indirmek ve toz malzeme temaslarındaki keskin alanları gidermektir. Sinterlemenin ilk aşamalarında temas eden partiküller arasında atomik yayınımla gerçekleşen kütle transferi ile küçük boyun oluşumları ve büyümesi gözlenir. İnce partiküller sinterlemede itici gücü arttırırlar çünkü birim alana düşen yüksek yüzey alanı toplam katı-buhar arayüzey enerjisini arttırır. Sinterleme sıcaklığı ergime noktasına yaklaştıkça, hareket eden atomların sayısı da artacağından sinterleme hızı da artar. Birçok ham parçada sinterleme sırasında boyut, yoğunluk, mukavemet, sertlik, elektrik ya da ısıl iletkenlik, elastik modül gibi özelliklerde değişme gözlenmektedir. Sinterleme esnasında malzeme bünyesinde oluşması istenilen özelliklerin yanında oluşması istenmeyen bazı özelliklerde ortaya çıkabilmektedir. En büyük değişimler, dayanım, elastiklik modülü, sertlik, kırılma tokluğu,

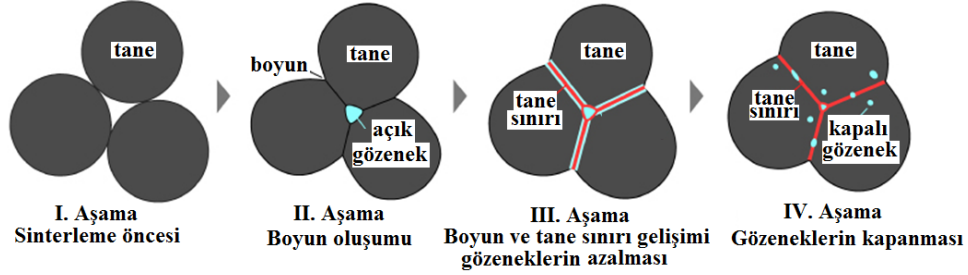
elektrik ve termal iletkenlik, sıvı ve gaz geçirgenliği, ortalama tane sayısı, boyut ve şekli, tane sınırlarının ve şeklinin dağılımı, ortalama gözenek boyutu ve şekli dağılımı, kimyasal bileşim ve kristal yapıda meydana gelmektedir. Sinterleme kinetiği, ham yoğunluk, malzeme türü, partikül boyutu, sinterleme atmosferi ve sinterleme sıcaklığı gibi parametrelerle belirlenir. Şekil 1.29’da sinterleme sıcaklığının içyapıdaki gözenek miktarına etkisi açık bir şekilde görülmektedir [59, 95-98]. Artan sinterleme sıcaklığı ile gözeneklerin boyutunda ve miktarında önemli bir azalma meydana gelmiştir.



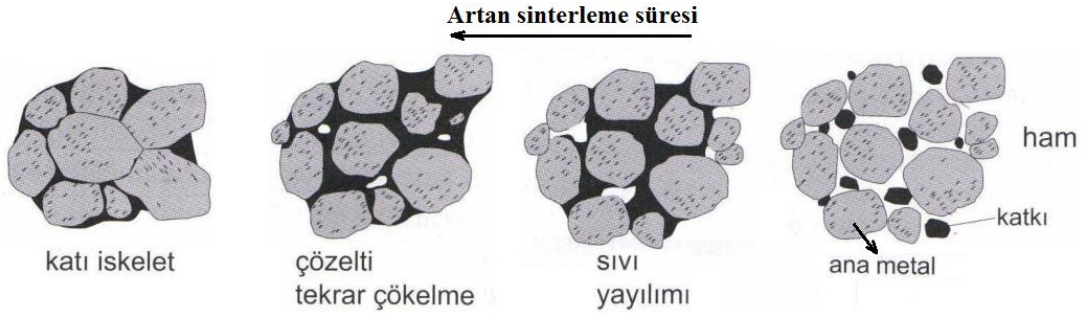
Şekil 1.29. Farklı sinterleme sıcaklıklarının gözenek miktarına etkisi; (a) 1150 °C, (b) 1200 °C, (c) 1250 °C, (d) 1300 °C, (e) 1350 °C [98].

Sinterleme katı faz sinterleme ve sıvı faz sinterleme olarak ikiye ayrılmaktadır. Metal veya alaşımın ergime noktası altında bir sıcaklıkta yapılan sinterleme işlemi katı hal sinterlemedir (Şekil 1.30). Sıvı faz sinterleme esnasında meydana gelen sıvı faz oluşumu sinterleme hızını önemli ölçüde artırır. Sıvı faz sinterleme için gerekli ön koşul ıslatmadır. Başlangıç aşamasındaki ısıtma esnasında taneler katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanmakta ve daha sonra sıvı oluşumu ile taneler yeniden düzenlenerek hızlı bir

yoğunluk artışı sağlanmaktadır. Bu aşamada oluşan sıvı katıyı ıslatarak oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlemeyi sağlar (Şekil 1.31).



Şekil 1.30. Katı faz sinterleme [99].

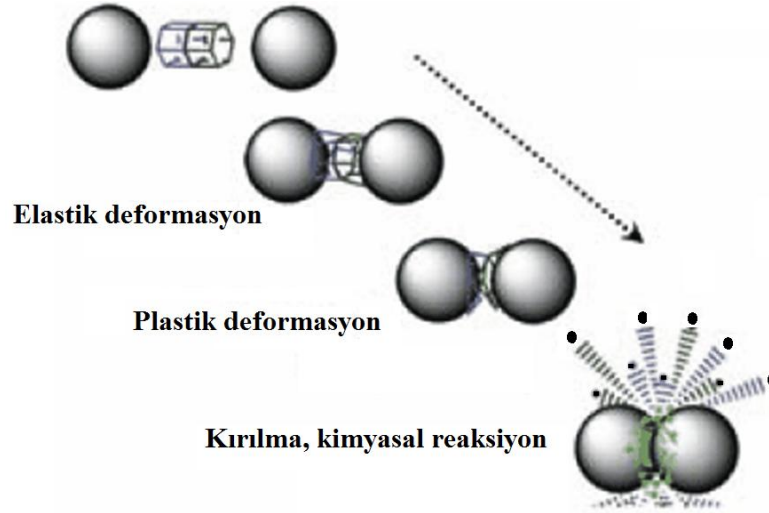


Şekil 1.31. Sıvı faz sinterleme [59, 100, 101]

1.3.8. Mekanik Alaşımlama / Öğütme

Mekanik Alaşımlama (MA) yâda öğütme işleminin tarihsel gelişimi incelendiğinde, ihtiyaçlar doğrultusunda bir gelişim gösterdiği söylenebilir. 1966 yılında John Benjamin ve arkadaşları (P.D. Merica Res. Lab. of the Nichel Comp Inco) tarafından geliştirilen bir yöntemdir. MA yöntemi kullanılarak yüksek sıcaklık dayanımlı oksit parçacıklarıyla takviye edilmiş Ni esaslı süper alaşımlar üretilmiştir. Uygulama sonrası elde edilen malzemelerle gaz türbinlerinde istenilen özelliklerin sağlanması amaçlanmıştır. Aynı ekip, 1970'lerde farklı denemeler sonucunda bilyalı öğütme tekniğini kullanarak en iyi sonuçları elde etmiştir. Çünkü bu metod sayesinde parçacıkların yüksek deformasyonundan dolayı kırılması ve tekrar soğuk kaynaklanması işleminin ardışıklığı, ince parçacıkların üretilmesine imkân vermektedir. Bu yöntemle üretilen nikel esaslı alaşım 1977 yılında bir motorda kullanılmıştır. MA yönteminin gelişmesiyle birlikte kullanım alanları yaygınlaşmıştır. En başta bu gelişmenin öncü sektörleri havacılık sanayi ve otomobil endüstrisi olmuştur. MA işlemi normalde kuru ve yüksek enerjili bilyeli öğütme tekniğidir.

Aynı zamanda son derece ince ve homojen mikro yapılar üretmek için toz malzemelerin inert bir ortamda yoğun öğütme işlemiyle sürekli olarak kırılma, soğuk kaynak ve yeniden kırılma ile yeniden soğuk kaynağına maruz bırakılan düşük sıcaklıkta yapılan alaşım sentezleme yâda öğütme yöntemidir. Bir başka ifadeyle mekanik alaşımlama, tozların tungsten karbür ve paslanmaz çelik öğütücü kaplar içerisinde sertleştirilmiş çelik bilyeler veya tungsten bilyeler ile istenilen sürelerde öğütülerek ve karıştırılarak yapılan bir katı hal alaşımlama işlemidir (Şekil 1.32). Bu teknik bilimsel ve ticari olarak kullanılabilen malzemelerin üretilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta eğer iki farklı metal kullanılarak gerçek anlamda bir alaşımlama işlemi yapılıyorsa bu işleme mekanik alaşımlama işlemi yok eğer metal matrisli kompozit üretimi için kompozit toz üretim işlemi yapılıyorsa buna da mekanik öğütme işlemi adı verilmesidir. Geleneksel alaşımlama işlemleri sırasında karşılaşılan ergime problemleri, heterojenlik, üretim esnasında meydana gelen istenmeyen reaksiyonlar, mekanik alaşımlama ile ortadan kaldırılabilir. Aynı zamanda ekonomik ve uygulama alanının fazla olması bu yöntemin yaygın bir şekilde kullanımını sağlamaktadır. Bunların başında geleneksel döküm yöntemleriyle birbiriyle karışamayan elementlerin karıştırılabilmesi gelir. Bunu başka tekniklerle gerçekleştirmek mümkün değildir [3, 102-110].



Şekil 1.32. Mekanik alaşımlama esnasında bilye-toz etkileşimi

1.3.8.1. Mekanik Alaşımlamanın Avantajları

Mekanik alaşımlama yöntemi, deneysel ve üretim süreçleri olarak tüm ikili, üçlü ve çoklu sistemlere kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu yüzden MA yöntemi üretim ve ticari

anlamda çeşitli avantajlar sunmaktadır [3, 102, 111-114]. Bu avantajlar su şekilde sıralanabilir;

1-MA işlemi, bir katı hal işlemi olmasından dolayı, normal ergitme teknikleriyle üretilmesi zor ve/veya olanaksız olan kompozitlerin (WC-Co gibi) üretilebilmesi,

2-Birbiri içinde sıvı fazda (Cu-Pb) veya katı fazda (Fe-Cu) çözünmeyen elementlerin alaşımlanması,

3-Oldukça farklı ergime sıcaklığına sahip malzemelerden metaller arası bileşiklerin (intermetaliklerin) üretilebilmesi,

4-Katı-sıvı-gaz şeklinde alaşımlama sırasında oksit, nitrür ve karbürlerin takviye edilebilmesi,

5- Homojen bir toz yapısının sağlanabilmesi,

6-Korozyon ve aşınma direnci yüksek, termal kararlılığı gelişmiş uygun malzeme üretilebilmesi,

7-Üretilen toz miktarının ihtiyaca göre düzenlenebilmesi

8-Sinterleme ile birlikte kritik sıcaklıklarda ısı işlem imkanı sağlanması,

9-Nano kristalli malzemelerin üretimine uygunluk

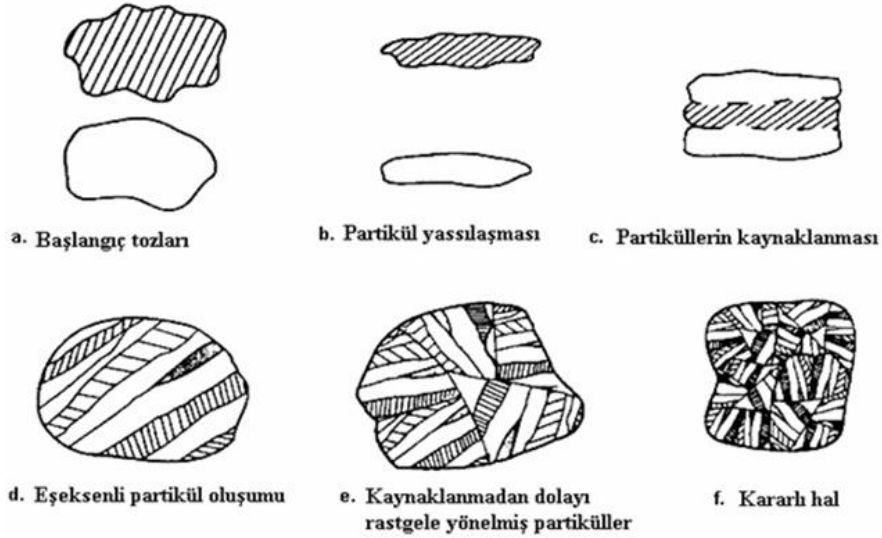
10-Presleme ve sinterleme işlemleriyle %100'e yakın yoğunlukta parça üretilmesi.

1.3.8.2. Öğütme Sistemi

Kullanılan ve üretilmek istenilen bileşime göre MA işleminde üç tür öğütme sistemi mevcuttur. Bunlar her iki yâda daha fazla başlangıç malzemesinin tamamının sünek malzeme olduğu Sünek-Sünek sistem, bileşimde en az bir malzemenin gevrek seramik partiküllerden oluştuğu Sünek-Gevrek sistem ve başlangıç malzemelerinin tamamının gevrek malzemelerden oluştuğu Gevrek-Gevrek sistemdir.

Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama yâda öğütme işleminin başlangıç safhasında toz parçacıkları yumuşaktır ve birbirleriyle soğuk kaynak olarak büyük toz parçacıkları oluşturma eğilimleri yüksektir. Bu aşamada parçacık boyutu büyüyerek başlangıç parçacık boyutunun üç katına kadar ulaşabilir. Bu durumu kontrol etmek amacıyla bileşime işlem kontrol katkısı ilave edilmektedir. Öğütmenin bu aşamasında kompozit parçacıklar başlangıç toz karışımlarının çeşitli kombinasyonlarını içeren tabakalaşmış bir yapıya sahiptir. Devam eden deformasyonlarla birlikte, bir yorulma mekanizmasıyla ve/veya kırılmalı levhalaşmış toz parçacıklarının tekrar kırılmasıyla

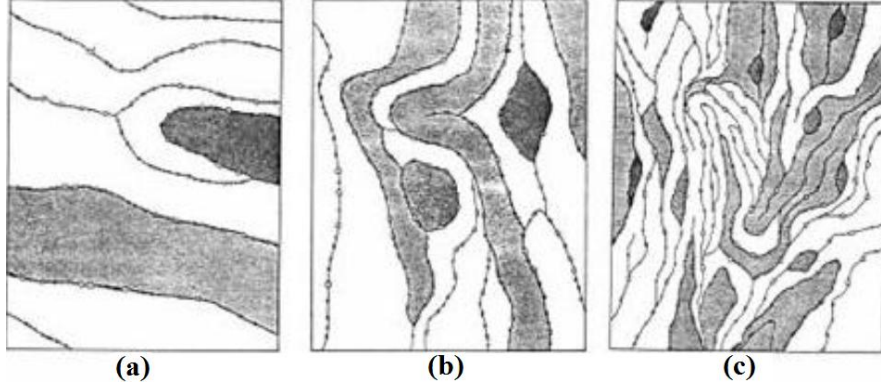
sertleşme devam eder. Öğütücü bilyelerin artan darbe etkisinden dolayı, parçacıkların yapısı kararlı ve başlangıç kompozisyonu açısından homojen bir hale dönüşür. Fakat parçacık boyutu aynı kalmaya devam eder. Neticede, her bir toz parçacığı içerisinde bulunan alaşım tabakaları arasındaki boşluklar azalırken, aynı zamanda bu alaşım tabakalarının sayısı artar. Belirli bir süre öğütmenin ardından, ortalama parçacık boyutunu arttıran kaynaklaşma ve ortalama kompozit parçacık boyutunu azaltan kırılma miktarları arasında bir dengeye varıldığında kararlı hal durumuna ulaşılır (Şekil 1.33). Kararlı aşamaya gelinceye kadar mekanik alaşımlama sırasında toz parçacıkları ağır bir deformasyona maruz kalırlar. Toz parçacıklarındaki dislokasyonlar, boşluklar ve tane sınırlarındaki artma gibi pek çok kristal hatalarının varlığı bu durumu açıklamaktadır. Bu kusurların varlığı bir katı hal çözeltisini oluşturacak olan element veya elementlerin matris içerisine difüzyonunu arttırır. Devam eden mekanik alaşımlamayla birlikte, homojen ve incelen mikroyapı sebebiyle difüzyon mesafeleri azalır. Bununla beraber, öğütme sırasındaki çok az sıcaklık artışı difüzyona yardımcı olur ve sonuçta bileşenler arasında gerçek alaşımlama ortaya çıkar [3, 102].



Şekil 1.33. Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi

Sünek-gevrek bileşime sahip MA işlemi düşünüldüğünde, öğütmenin ilk aşamalarında, sünek metal tozu partikülleri bilye-toz çarpışmaları ile pulsu yapıya geçip yassılaştırırken, gevrek partiküller kırılır. Kırılan gevrek partiküller sünek partiküller içersine gömülür. Gevrek bileşen lameller arası boşluklar boyunca yerleşir (Şekil 1.34a). Öğütme

işlemi devam ettiğinde, sünek partiküller sertleşir, lameller ikizlenir ve tane incelmeleri meydana gelir. Son aşamada lameller daha da inceler, lameller arası mesafe kısalır, gevrek partiküllerin çözünmediği durumda sünek faz içinde homojen olarak dağılır (Şekil 1.34c) [102, 111-114].



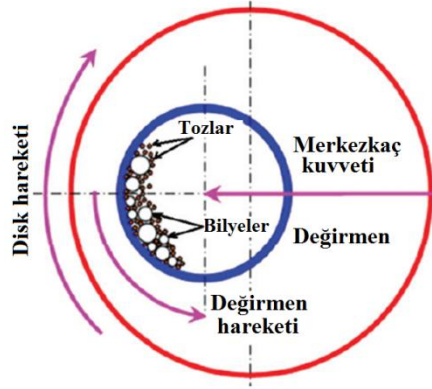
Şekil 1.34. Sünek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi [102, 111].

İki veya daha fazla gevrek malzemeden oluşan bir sistemde alaşımlama gerçekleşmeyebilir. Bunun nedeni sünek bileşenin olmaması nedeniyle herhangi bir soğuk kaynak işleminin olmaması ve dolayısıyla alaşımlamanın da olmamasıdır. Bununla beraber, Si-Ge ve Mn-Bi gibi bazı gevrek-gevrek sistemlerde alaşımlamanın olduğu da belirlenmiştir. Gevrek tozlar, öğütme sırasında parçalanmakta ve parçacık boyutları sürekli olarak azalmaktadır. Gevrek malzemelerin öğütülmesi sırasında, malzeme transferine katkıda bulunan muhtemel mekanizmalar; sıcaklık artışı, hatasız yapıda mikro deformasyon, yüzey deformasyonu ve/veya öğütme sırasında tozlarda hidrostatik gerilim durumuyla oluşabilen plastik deformasyonu içerir [3, 102].

1.3.8.3. Öğütücü Türleri

MA'nın önemli bir kısmını teşkil eden öğütme işlemi, tane boyutunu küçültme, harmanlama ve alaşımlama gibi evreleri kapsar. Bu aşamalarda amaca yönelik çok çeşitli öğütücüler kullanılır. Öğütücüler ve/veya değirmenler kapasiteleriyle, öğütme etkinlikleriyle, soğutma ve ısıtma gibi ek üniteleriyle farklılık gösterirler. Mekanik alaşımlama için kullanılan öğütücü tiplerinden biri planet (gezegen) tip bilyeli öğütücülerdir. Bu öğütücülerin kapları gezegen benzeri hareket yaptıklarından dolayı adlarını da buradan almışlardır. Bu kaplar dönen bir taşıyıcı disk üzerine yerleştirilmiş ve

özel bir mekanizma tarafından döndürülen bu disk üzerinde ve kendi merkezlerinde dönmektedirler (Şekil 1.35). Hem taşıyıcı diskin oluşturduğu hem de kendi merkezinde dönmekte olan öğütücü kabın oluşturduğu merkez kaç kuvveti sebebiyle öğütme kabının içerisindeki ana malzeme ve öğütücü bilyeler hareketlenmektedir [3, 102].



Şekil 1. 35. Gezegen tip bilyeli öğütücülerde bilye-toz etkileşimi

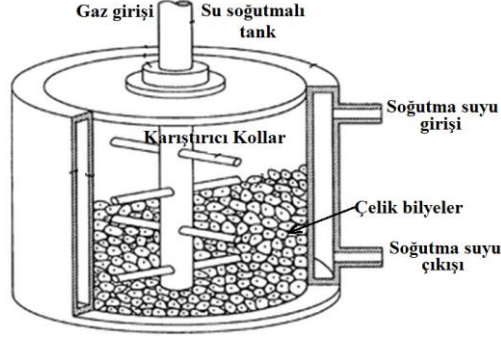
Bir diğer öğütücü tipi SPEX tipi öğütücülerdir ve bu öğütücüler bir kerede yaklaşık 10-20 gr arasında toz öğütebilen ve laboratuvar çalışmaları için kullanılan öğütücülerdir. Şekil 1.36’da SPEX tipi bir öğütücü görülmektedir.



Şekil 1.36. SPEX tipi bilyeli değirmen [102]

Yukarıda bahsedilen öğütücü tiplerinden farklı olarak 0,5 kg ‘dan 40 kg kadar toz öğütebilen atritör öğütücüler mekanik alaşımlama işleminde kullanılan diğer bir öğütücü tipidir. Tipik bir atritör haznesi yarıya kadar küçük bilyelerle dolu, karıştırıcı kolları kendi

ekseni etrafında dönen ve haznesinde atmosfer kontrolü sağlanabilen bir yapıya sahiptir (Şekil 1.37). Karıştırıcı kolların bulunduğu mil döndükçe bilyeler metal tozlarına ve alaşımlama haznesinin iç cidarına çarparlar [102].



Şekil 1.37. Atritör için şematik resim

1.3.8.4. İşlem Parametreleri

Mekanik alaşımlama işleminde istenilen sonuca ulaşmak için işlem parametrelerini en iyi şekilde seçmek gereklidir. Bununla birlikte çok sayıda işlem parametresinin olması mekanik alaşımlama işlemi hakkında iyi bir bilgi birikimi ve tecrübe gerektirir. Bu parametreleri sıralayacak olursak

- 1-Değirmen Tipi
- 2- Öğütücü Kap
- 3- Öğütme Hızı
- 4- Öğütme Zamanı
- 5- Bilye-Toz Ağırlık Oranı (BPR)
- 6- Öğütücü Kap Doluluk Oranı
- 7- İşlem Kontrol Katkısı (PCA)
- 8- Öğütücü bilyelerin cinsi ve boyutu
- 9- Öğütme Atmosferi

10- Öğütme Sıcaklığı

Bu değişkenler az yâda çok birbiri ile ilgilidir ve mekanik alaşımlama sisteminde kararlı hale ulaşmada bütün parametreler düşünülerek işleme başlanmalıdır. Örneğin ulaşılmak istenen parçacık boyutu için bilye çapı en uygun değerinde alınmamışsa ne kadar öğütme yapılırsa yapılsın istenilen boyuta ulaşılamayacaktır. Yine işlem kontrol katkısı miktarı optimum miktarda ayarlanmamışsa sistem ya boşa çalışacak yada en kısa sürede kırılan parçacık yüzeyleri tarafından emilerek etkisini kaybedecek ve soğuk kaynak sisteme hakim olacaktır. Öğütme hızı açısından düşünecek olursak diğer parametreler en iyi şekilde ayarlanıp öğütme hızı düşük seçilecek olursa bu seferde ancak uzun öğütme süreleri sonunda istenilen toz özelliklerine ulaşılabilecektir. Öğütme zamanı iyi tespit edilemezse istenilen özelliklere sahip tozlar üretilmeyecektir. Toz bilye ağırlık oranı yüksek seçilmişse bilyeler kendi aralarında yâda değirmen yüzeyi ile aşırı derecede etkileşime girecek ve bu durumda bilyeler aşınarak toz bileşimine öğütücü malzemelerinin karışması söz konusu olacaktır. Toz bilye ağırlık oranının düşük seçildiği durumlarda ise etkin çarpışmalar oluşmayacak ve uzun öğütme süreleri kullanılmak zorunda kalınacaktır. Sonuç olarak mekanik alaşımlama işleminin sahip olduğu değişkenlerin çokluğu elde edilecek bilimsel veri sayısını artırabileceği gibi verimsiz çalışmalara da neden olabilir [115-126].

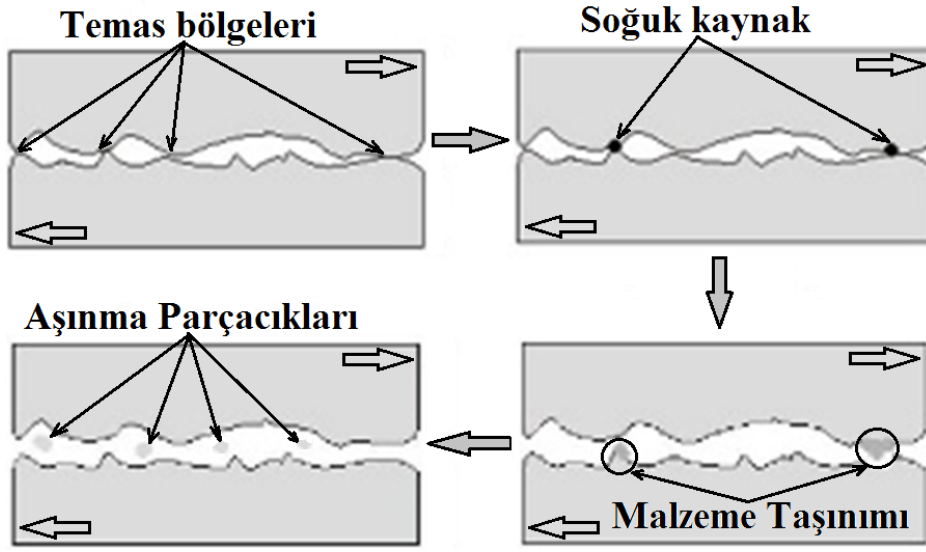
1.4. Aşınma

Aşınma genel olarak birbiri ile temas halinde olan hareketli parçalar arasındaki mekanik veya kimyasal etkileşimler sonucu oluşan malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma olayı farklı tür aşınma mekanizmaları sonucunda meydana gelmektedir. Bu aşınma mekanizmaları dört ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlar adhesiv (yapışmalı) aşınma, abrasiv aşınma, yorulmalı aşınma (deleminasyon aşınması) ve korozif aşınmadır.

1.4.1. Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, birbirleriyle kayma sürtünmesi yapan yüzeylerde soğuk kaynak ya da bölgesel bağlanmalar sonucu bir yüzeyden diğerine malzeme transferi ve daha sonra

kayma hareketi sonucunda malzeme kaybı şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 1.38). Temas halindeki yüzeylerdeki yüzey pürüzlülükleri üzerindeki basıncın bölgesel plastik deformasyona yetecek kadar yükselmesi durumunda küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç etkir. Bu noktalardaki gerilme, pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyon, pürüzlerin birbirini çizmesi ve sıvanıp kaynaklaşma olayları başlar. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur.

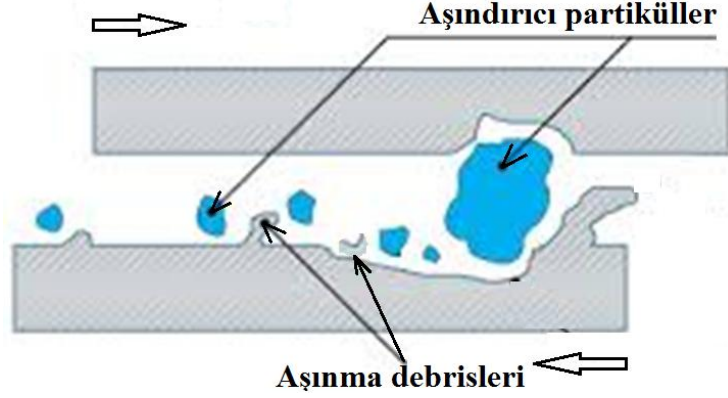


Şekil 1.38. Adhesiv Aşınma

1.4.2. Abrasiv Aşınma

Çizilme yâda yırtılma aşınması olarak da adlandırılabilen abrasiv aşınma, birbiri ile eş çalışan malzeme çiftinde hızlı ve büyük oranda hasar oluşturabilecek oldukça önemli bir aşınma türüdür. Bu aşınma türü, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan parçacıklarla basınç altında etkileşmesi ile sert parçacıkların malzeme yüzeylerinden parçacık kaldırılması şeklinde tanımlanabilir (Şekil 1.39). Bu aşınma türüne yatak malzemesi içersine olumsuz çalışma koşulları nedeniyle giren toz parçacıklarının oluşturduğu aşınma örnek gösterilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus metal matrisli kompozitlerde olduğu gibi malzeme bünyesinden kopan çok sert aşındırıcı seramik partiküllerin de abrasiv aşınmayı önemli ölçüde artırmasıdır. Eğer aşınma olayı malzeme çifti arasındaki sertlik farkından meydana geliyorsa iki cisimli aşınma, diğer

tarafından ilave aşındırıcı partiküller de aşınmayı etkiliyorsa bu aşınma türü de üç cisimli aşınma olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1.39. Abrasiv Aşınma

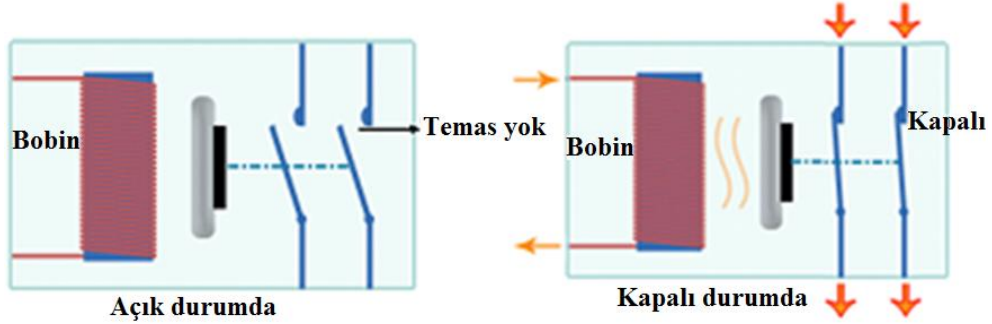
1.4.3. Deleminasyon Aşınması

Delaminasyon, kesme gerilmesinin yüzeyde oluşturduğu plastik deformasyon sonucu yüzey altı çatlaklarının oluşumu ve bunların yüzeye doğru ilerlemesi ile oluşan ve tabakalar halinde aşınma kayıplarının olduğu bir aşınma türüdür. Bu aşınma türünde yüzey tabakalarının plastik deformasyona uğraması sonucunda deformasyona uğramış tabakalarda çatlak çekirdeklenmesi meydana gelmekte ve bu çatlakların yüzeye doğru ilerlemesi ile bu bölgelerin pulsu partiküller halinde malzeme yüzeyinden ayrılması gözlemlenmektedir.

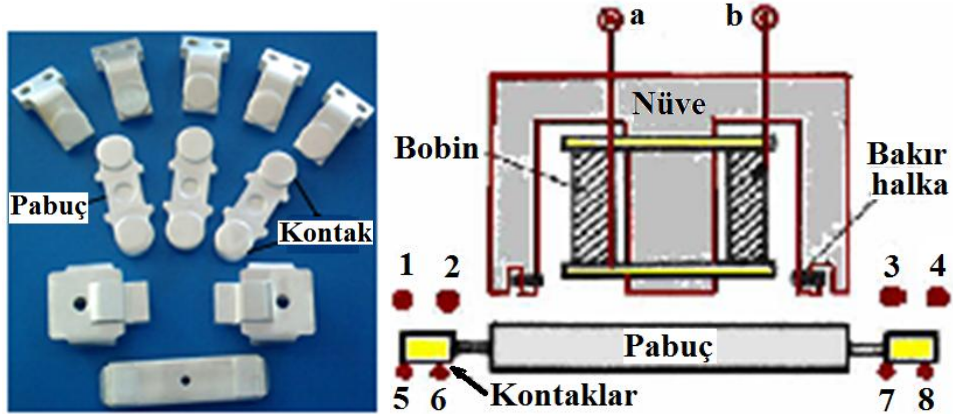
1.5. Elektrik Kontak Malzemeleri

Elektrik kontak malzemeleri, kayarak veya sabit temas sağlayarak elektrik devrelerini istenen zamanda açmak ve kapatmak için kullanılan metal esaslı parçalardır (Şekil 1.40). Günümüzde, yaşamın ve iş hayatının vazgeçilmez bir unsuru olan elektriğin bulunduğu her yerde elektrik ile çalışan cihazları kontrol etmek amacıyla kontak malzemeleri kullanılmaktadır (Şekil 1.40a). Kontak malzemeleri elektrik devrelerini açıp kapamaya yarayan elemanlardır. Büyük güç anahtarları olarak bilinen kontaktörler; başta elektrik motorlarının ve kompanzasyon ısıtma gibi elektrik tesislerinin kablo ile uzaktan kumanda edilmelerine imkân sağlarlar (Şekil 1.40b). Termik röleler ile kullanıldıklarında

cihazları ve tesisleri aşırı yük akımlarına karşı korurlar. Kontaktörler kumanda ettiği devreyi nominal akım altında açıp kapayabildiği gibi belirli orandaki aşırı akımları da kesebilmektedirler. Kontak malzemeleri açma-kapama ve kısa devre esnasında elektrik, termik, mekanik ve kimyasal yönden çok zorlanmaktadır. Kontaklarda sürekli açma kapanma hareketi olduğu için meydana gelen elektrik sıçramaları (ark) zamanla kontakların oksitlenmesine ve iletkenlik özelliklerini kaybetmelerine neden olmaktadır. Şekil 1.40'da görüldüğü gibi kumanda devresindeki bobin beslendiği anda bir manyetik alan oluşmakta ve bunun sonucunda da güç noktaları kapanarak bu kontaklardan geçen akım sayesinde elektrikli aletlerin çalışması sağlanmaktadır. Ark, kontakların çalışması esnasında akımın aktarılmaya başlanması veya kesilmesi esnasında meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklık ve akım yoğunluğu sonucunda kontak malzemesinde yüzey korozyonu oluşur ve aşınma meydana gelir. Bu nedenle bir kontak malzemesinin çalışma süresince verimli çalışmayı sürdürebilmesi için malzemenin yüksek elektriksel ve ısıl iletkenliğe, yüksek ergime sıcaklığına, yüksek korozyon ve ark aşınması direncine sahip olması gerekmektedir [127-130].



Şekil 1.40. Elektrik kontaklarının çalışma prensibi



Şekil 1.41. (a) Elektrik kontakları, (b) Kontaktör ve elemanları

Uzun bir kullanım ömrü istenen elektrik kontak malzemelerinden en iyi performansın elde edilebilmesi için istenilen özelliklere göre tasarlanıp üretilmesi gerekmektedir. Kontak malzeme bileşimi kantağın kullanım yeri ile doğrudan ilişkilidir. Refrakter esaslı kontak malzemeleri yüksek gerilim ve yüksek akımın mevcut olduğu koşullarda emniyetli bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek akım şartlarında kullanılan elektrik cihazları ise; kontaktörler, devre kesiciler, röleler ve anahtarlardır. Tablo 1.1’de ticarileşmiş ve kullanımı yaygınlaşmış kontak malzemelerinin özellikleri Tablo 1.2’de ise kontak malzemelerinin kullanım alanları verilmiştir. Tablo 1’de görüldüğü gibi seramik takviyeler elektrik kontak malzemelerinin sertliğini artırırken iletkenliklerini düşürmektedir [131].

Tablo 1.1 Kontak malzemeleri ve Özellikleri [131]

Kimyasal Bileşim	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (BSD)	İletkenlik (%IACS)
Ag ₅₀ -W ₅₀	13.06	50	57
Ag ₃₅ -W ₆₅	14.32	75	50
Ag ₂₅ -W ₇₅	15.32	85	45
Ag ₅₀ -Mo ₅₀	9.94	70	45
Ag ₂₅ -Mo ₆₅	9.90	82	38
Ag ₈₅ -Ni ₁₅	9.60	48	79
Ag ₆₀ -Ni ₄₀	9.21	63	53
Ag ₉₈ -C ₂	9.19	23	82
Ag ₉₅ -C ₅	8.30	20	54
Ag ₉₀ -C ₁₀	7.23	10	40
Ag ₈₈ -Ni ₁₀ -C ₂	9.04	22	58
Ag ₇₇ -Ni ₂₀ -C ₃	8.61	47	50
Cu ₉₅ -C ₅	7.33	38	40
Ag ₉₀ -CdO ₁₀	9.60	45	70
Ag ₈₅ -CdO ₁₅	9.46	60	65
Cu ₇₅ -W ₂₅	9.72	20	55
Cu ₅₀ -W ₅₀	11.75	65	50
Cu ₃₀ -W ₇₀	13.76	85	40
Cu ₂₀ -W ₈₀	15.04	95	30
Ag ₆₅ -WC ₃₅	11.15	45	50

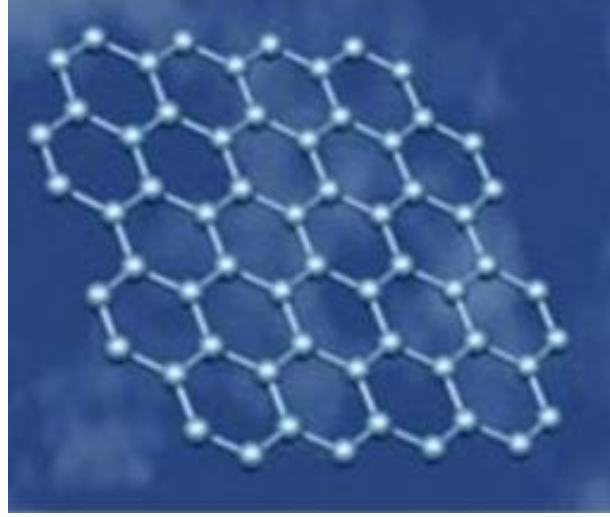
Tablo 1’de verilen elektrik kontak malzemelerinden başka hem ticari olarak kullanılan hem de üzerinde araştırma yapılan elektrik kontak malzemeleri de mevcuttur. Gümüş-bakır, bakır-krom, bakır-berilyum, bakır-nikel, bakır-kalay, bakır-zirkonyum, gümüş-kalay oksit, gümüş-çinko oksit gibi elektrik kontak malzemeleri de bazı uygulamalarda kullanılmaktadır.

Tablo 1.2. Kontak malzemeleri ve kullanım alanları [131]

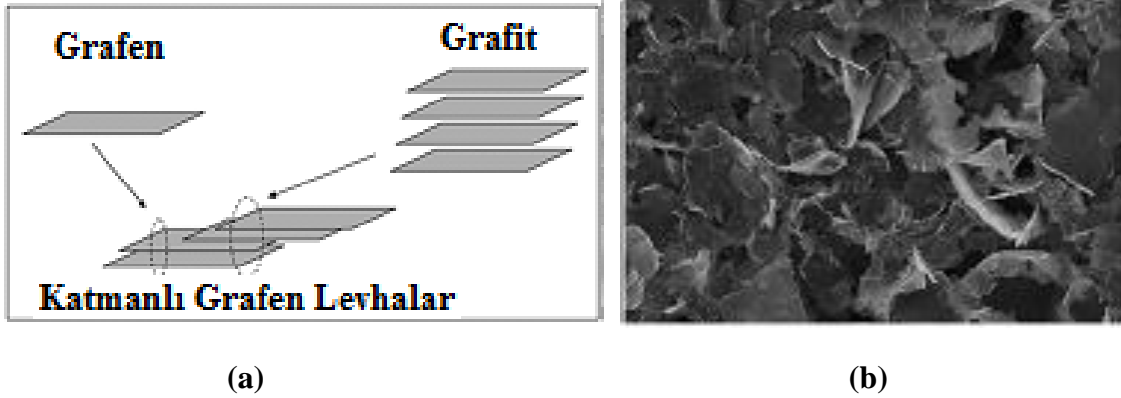
Kontak	Kullanım Yeri
Ag	Düşük akım röleleri, devre elemanları, otomobil jeneratör kontakları
Ag-W	Hava üflemeli devre kesici, kontaktörler, motor işletme anahtarı, yarı iletkenler, düşük ve yüksek akım röleleri, salterler, voltaj düzenleyiciler, klima kontakları
Ag-WC	Hava üflemeli devre kesiciler, düşük ve yüksek akım röleleri, salterler
Ag-Mo	Hava üflemeli devre kesiciler, kontaktörler, motor işletme anahtarı, yarı iletkenler, düşük ve yüksek akım röleleri, salterler
Ag-C	Reostalar, kaygan kontaklar, röleler, devre kesiciler, kontaktörler, düşük ve yüksek akım röleleri, devre kesici ve temas etmeyen düğmeler için sürgü halkaları
Ag-Ni	Hava üflemeli devre kesici, kontaktörler, motor işletme anahtarı, düşük ve yüksek akım röleleri, salterler, otomobil devreleri, uçak röleleri, buzdolabı asırı yük düğmeleri, motor koruyucuları
Ag-Ni-C	Hava üflemeli devre kesiciler, salterler, sürgü parçaları
Ag-Cu	Isık röleleri, elektrik fırın kontaktörleri, küçük motor koruyucuları
Ag-CdO	Motor işletme anahtarları, kontaktörler, düşük ve yüksek akım röleleri, şalterler, devre anahtarları
Cu-C	Motor işletme anahtarı, salterler, sürgü parçaları, kontaktörler
Cu-W	Yağlı devre kesiciler, devre kesici ark uçları ve ark baslatıcıları
Cu-Cr	Vakum devre kesiciler, ark uçları ve baslatıcıları

Tablo 1.1. ve Tablo 1.2’de ki elektrik kontak malzemesi bileşimleri incelendiğinde Ag-C, Cu-C gibi kontak türlerinde karbonun takviye malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. Karbon’un yağlayıcılık özelliğinden dolayı elektrik kontaklarının çalışma verimini artırmakta bununla birlikte bileşimdeki miktarı arttıkça mekanik dayanım azalmaktadır. Bununla birlikte nanografite partikül, grafen nanoloveha ve carbon nanotüplerin sahip oldukları özelliklerden dolayı elektriksel özelliklerden çok taviz vermeden mekanik özellikleri geliştirebilecekleri düşünülmektedir.

Şekil 1.42 grafenin bal peteği örgüsü şeklindeki kristal yapısını göstermektedir. Şekil 1.43a grafen, grafit ve katmanlı grafen arasındaki diziliş farklarını, 1.43b ise grafen levhalara ait morfolojik resmi göstermektedir. Şekil 1.42’de görüldüğü gibi grafen iki boyutlu, bir atom kalınlığında, mekanik, elektrik, termal ve optik özellikleri ile bilimde çığır açan yeni keşfedilmiş bir karbon allotropudur. Bilim dünyasında heyecan yaratmış olsa da aslında çok nadir bulunan bir malzeme değildir. Grafit, grafen tabakalarının üst üste binmesinden oluşmuştur [132].

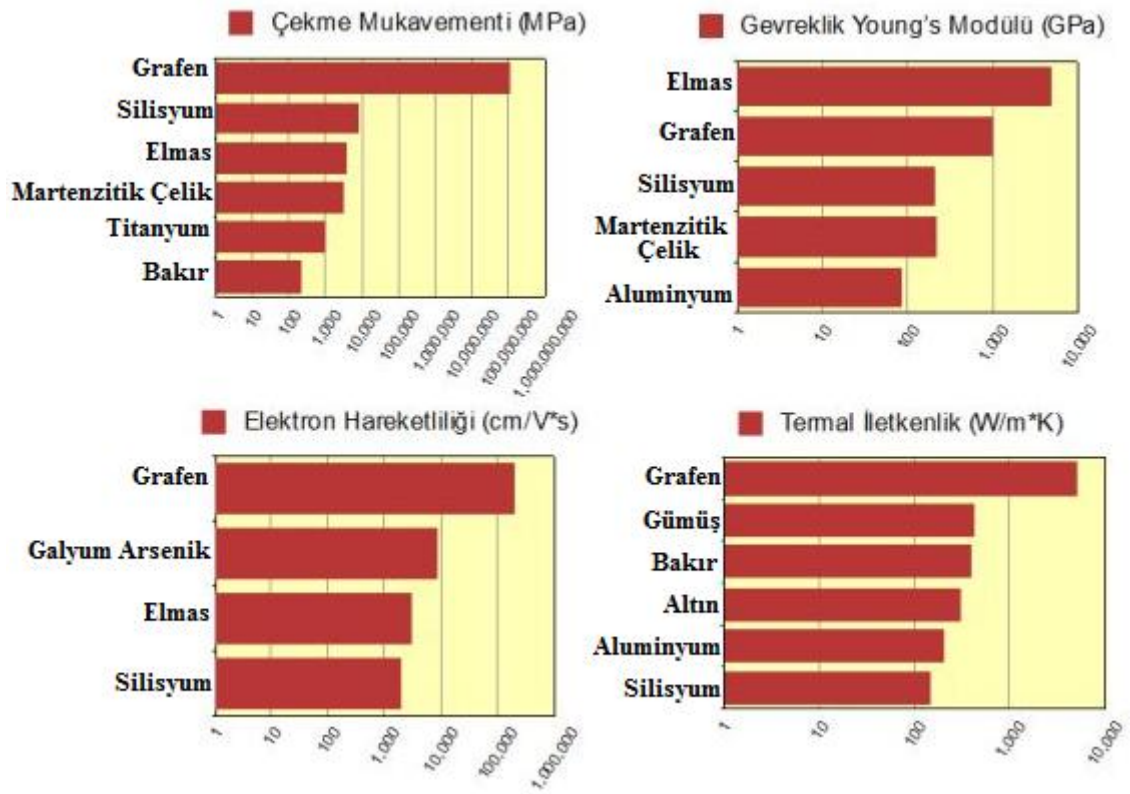


Şekil 1.42. Grafenin bal peteği örgüsü şeklindeki kristal yapısı



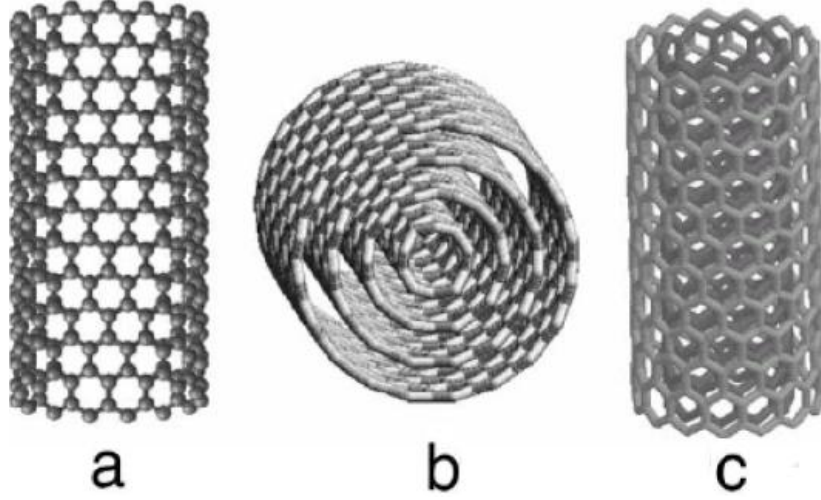
Şekil 1.43. (a) grafit ve grafen arasındaki diziliş farklılıkları (b) grafen morfolojisi

Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş olduğu grafen formu, doğada iki boyutlu tek malzeme örneğini oluşturmasının yanı sıra, grafene olağanüstü özelliklerini de kazandırmaktadır. Elektronlar bu tek atom kalınlığındaki karbon tabakası içerisinde sanki hiç kütleleri yokmuşçasına hızlı hareket etmektedir. Grafen bilinen en ince malzeme olmasına rağmen aynı zamanda en güçlü malzemedir. Şekil 1.44'deki grafiklerde görüldüğü gibi çelikten 100 kat daha güçlüdür ve şu anda bilinen en iyi ısı iletkenidir [132]. Grafen takviyeli kompozitlerle ilgili yapılan çalışmalar grafen nanolevhalar'ın grafen partiküllerine göre daha yüksek iletkenlik sağladığını ortaya koymuştur [133, 134]. Bunun nedeni nanolevhaların iletim köprüsü oluşturma yeteneğinin grafen partiküllerine göre daha iyi olmasıdır.



Şekil 1.44. Grafenin diğer metallerle karşılaştırmalı özellikleri [132].

Karbon nanotüpler ilk olarak 1991 yılında ortaya çıkmıştır. Yukarıda açıklanan grafen yapının şekil 1.45’de görüldüğü gibi bir silindir şekline sarılması ve uçlarının küresel bir silindir kapağı şeklinde kapatılmasıyla oluşturulur. Çok hafif olması, yüksek elastiklik modülüne sahip olması ve bilinen en dayanıklı fiber olması, karbon nanotüplerin (KNT) en önemli özelliklerindedir. Grafenin simetrisi ve kendine has elektriksel yapısından ötürü, karbon nanotüp’ün yapısı ve elektriksel özelliklerini önemli bir şekilde etkilemektedir. Karbon nanotüplerin çeşitlerine yani atomların diziliş şekline göre elektriksel özellikleri de değişmektedir [135]. Bununla birlikte elektriksel özelliklerin tam olarak belirlenmesi ve kullanım yerlerinin tanımlanması ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir.



Şekil 1.45. Karbon nanotüp formları; (a) Tek duvarlı KNT, (b-c) Çok duvarlı KNT

1.5.1. Elektrik Kontaklarının Karakteristik Özellikleri

1.5.1.1 Kontak Direnci

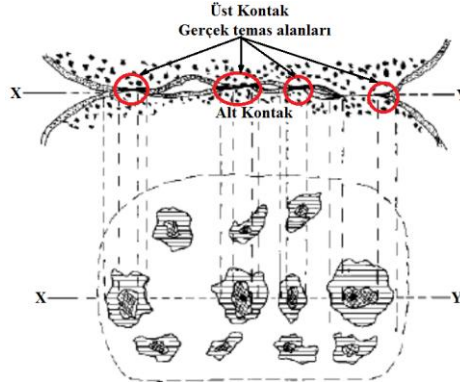
Kontakların temas halinde olduğu yani akım geçtiği durumlarda akımın iletiildiği gerçek temas yüzeyi Şekil 1.46'da gösterildiği gibi toplam kontak yüzeyinin oldukça küçük bir kısmıdır. Birbiri ile temas halinde olan yüzeyler metalik ve iletken olabileceği gibi çalışma esnasında oluşan yüzey filmi yâda diğer partiküller nedeniyle metal dışı ve iletken olmayan özellikler gösterebilirler. Gerçek temas alanı kontak malzemelerine uygulanan kuvvete bağlıdır. Temas halindeki yüzeylerde oluşan kontak direncinin tek bir malzemenin hacimsel direncinden oldukça fazla olmasının ve kontak boyutundan ziyade yüzey şartları ve kontaklar arasındaki kuvvete bağlı olmasının sebebi bu kontak kuvvetidir [136].

Holm'a göre [137] toplam kontak direnci üç faktör tarafından etkilenir. Bunlar yüzey filmi, temas (baskı) direnci ve hacimsel dirençtir. İki kontak malzemesi arasındaki gerçek mekanik temas alanı küçük bir iz alanı olarak kabul edilebilir. Bu iz alanının dairesel yarıçapı α Hertz elastik kontak teorisine göre tahmin edilebilir [138]:

$$\alpha = \left(\frac{3.r.F}{4.E} \right)^{1/3} \quad (1.1)$$

Burada, r görünür kontak yüzeyi olarak adlandırabileceğimiz kontak yüzeyinin yarıçapını, F kontak kuvvetini ve E elastisite modülünü ifade etmektedir. Genellikle her bir kontak

temas alanında şekil 1.46'da görüldüğü gibi birden fazla gerçek temas alanı (iz alanı) mevcuttur ve bunlar kontak yüzeyinin oldukça küçük bir kısmını oluştururlar. Temas bölgelerinin sayısı oldukça az ve boyutu oldukça küçük olduğu için elektrik devresinde dolaşan akımla karşılaştırıldığında bu bölgelerdeki akım yoğunluğu oldukça yüksektir. Bundan dolayı oluşan kontak direnci, kaynak, erozyon ve sıcaklık artışı gibi etkenler kontak performansını olumsuz yönde etkilerler [136].



Şekil 1.46. Kontak Yüzeyi [136]

Yassı bir şekle sahip gerçek temas alanında oluşturulan temas direnci R_c aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$R_c = \frac{\rho}{2\alpha} = \rho \sqrt{\frac{\pi \cdot H}{4 \cdot F}} \quad (1.2)$$

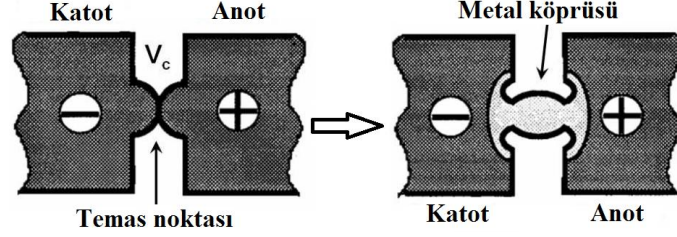
Burada ρ elektriksel direnç H ise temas halindeki olan yüzeyin sertliğidir. Bu eşitlik temas direnci ile kontak kuvveti arasındaki önemli bir ilişki olduğunu açıkça göstermektedir. Bir A temas alanı için temas kuvveti ve malzeme sertliği arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir [138].

$$A = \alpha^2 \cdot \pi = \frac{F}{H} \quad (1.3)$$

Yüksek kontak direnci sıcaklık artışına sebebiyet verir ve sıcaklık artışı da kontakların akım taşıma kapasitelerini sınırlar. Eğer kontak kuvveti artarsa temas alanı da artacak ve temas alanındaki bu artış sıcaklık yükselişini engelleyecek bununla birlikte kontak aşınması artacaktır. Kontak direncini azaltmak için temas özellikleri iyi olan metalik malzeme seçimi, uygun temas kuvvetinin belirlenmesi ve kontak sisteminin uygun tasarımı gereklidir. Kontak yüzeyi üzerinde oluşan oksit filmleri ve korozyon ürünleri gerçek temas alanını azaltır ve kontak direncinin artırır [139].

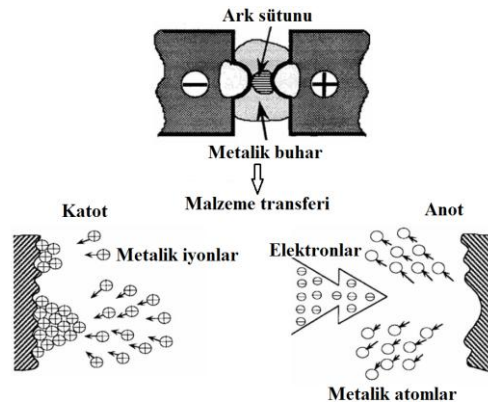
1.5.1.2 Ark Erozyonu ve Malzeme Taşınımı

Kontakların açılıp kapanma işlemi sırasında (Şekil 1.47) kaynak oluşumu ve akım geçişi esnasında yumuşama ve yapışma ile bir kontakten diğerine malzeme taşınımıyla oluşan elektriksel aşınma (ark erozyonu) olayı kontakların kullanım ömrü ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

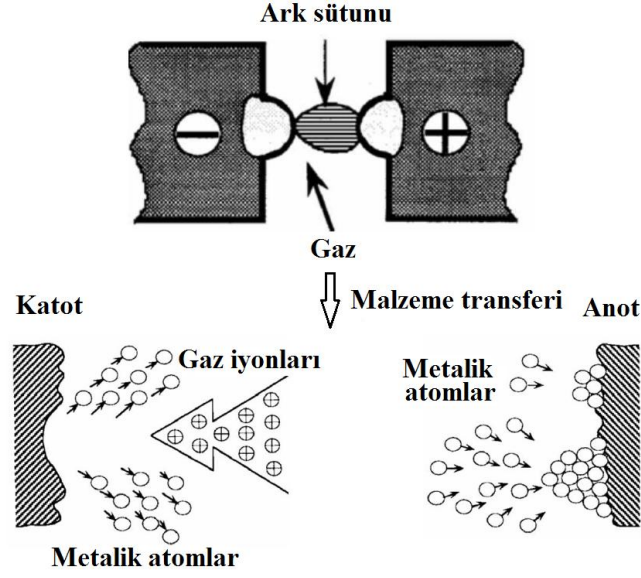


Şekil 1.47. Kontak teması ve metal köprü oluşumu [140]

Kontaklar çalıştığı zaman temas noktasında yükselen sıcaklık burada bir ısı merkezi oluşturur, bu da elektron emisyonuna yol açar, kontağı ısıtır ve artan ısı ile kontaktaki metal parçacıklar erir ve kontaklar arasında köprü oluşturur. Ark ile oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle köprü metallerinin bazıları buharlaşır ve bazıları da artan sıcaklık nedeniyle kontakten sıçrayarak ayrılır. Bir kontakten ayrılan metallere bazıları diğer kontağa yapışır ve malzeme taşınımı meydana gelir. Bu duruma ark erozyonu denir. Köprü oluşumu ile başlayan ark erozyonu devam ettiği takdirde anot durumundaki kontakten katot durumundaki kontağa malzeme taşınımı (metalik faz arkı) (Şekil 1.48) ve ilerleyen süreçte de gerekli şartlar oluşursa katottan anota malzeme taşınımı (gaz faz arkı) (Şekil 1.49) meydana gelir [135, 136, 140].



Şekil 1.48. Metalik faz arkı [140]



Şekil 1.49. Gaz faz arkı [140]

Holm [135, 137] tarafından ortaya konulan aşağıdaki eşitlikte malzeme sertliğinin (H), sadece mekanik aşınmayı değil aynı zamanda ark ile malzeme taşınımını da (ark erozyonu) etkilediği anlaşılmaktadır.

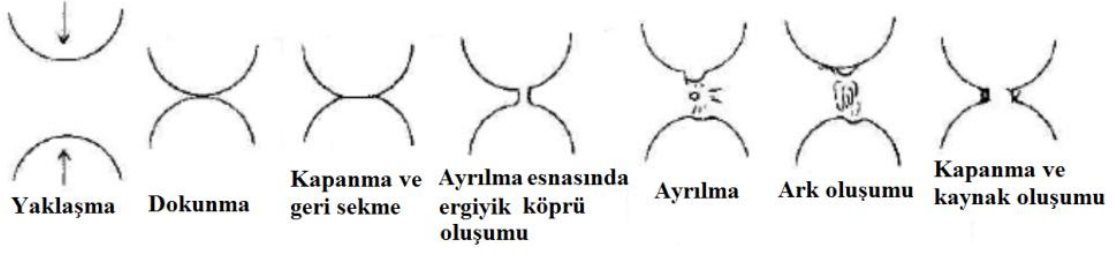
$$G = K_1 \cdot K_2 \cdot [I_0 U_0 V_A E / V \sqrt{H}] \quad (1.4)$$

Denklemden, G taşınan malzeme miktarını (gr), I_0 ark akımını (A), U_0 karakteristik ark voltajını (V), E elektromotor kuvvetini (V), V kontak kapama hızını (cm/s), V_A atom hacmini, H Brinell sertliği ifade ederken K_1 ve K_2 ise sabitlerdir.

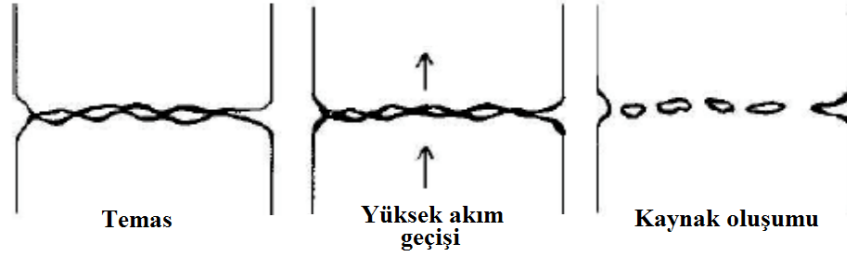
1.5.1.3 Kaynak Oluşumu

Elektrik kontaktların çalışması esnasında birbirlerine yapışması olarak tanımlayabileceğimiz kaynak oluşumu iki şekilde meydana gelmektedir. Birincisi kontaktlar yüklü durumda ve kapalı konumda iken meydana gelen kontak sekmesinin oluşturduğu “dinamik kaynak” oluşumdur. Kontaktların geri sekmesi sonucu oluşan ark sonucunda temas bölgelerinde metal ergimesi meydana gelmekte ve şekil 1.50’de görüldüğü gibi bu ergiyikler kontaktların birbirine kaynak olmasına neden olmaktadır. İkincisi ise kapalı konumdaki kontak çiftlerinden kısa süreli ağır akım geçişi sonucunda meydana gelen ve şekil 1.51’de gösterilen statik kaynak oluşumdur. Küçük temas

alanlarında oluşan yüksek enerji konsantrasyonu bölgesel erimelere ve dolayısıyla kaynak oluşumuna sebep olmaktadır [136].



Şekil 1.50. Dinamik Kaynak oluşum aşamaları [132]



Şekil 1.51. Statik Kaynak oluşum aşamaları [132]

1.5.1.4 Köprü Oluşumu

Sürekli açma kapama sonucu kontak temas alanlarında azalma meydana gelmektedir. Kontak metallерinin sürekli açılması eriyen metallерin akım taşıyan köprü haline dönüşmesine neden olur. Erimiş köprüünün sıcaklığı kontak noktaları ayrıldıkça yükselmeye devam eder. Metali eritecek ve devreyi kesecek duruma gelinceye kadar yükselebilir. Kontak çiftlerinin açılması durumundaki köprü durumu hafifçe kontak yüzeylerine zarar verir ve köprü malzemesini ergitir. Bu genelde bir kontak yüzeyinde çukurlaşma, diğerinde tepeleşme şeklinde gözlemlenir. Düzgün olmayan sürekli metal transferi kontaklardan birinde sürekli malzeme kaybı oluşturur ve onu tüketir. Bu sırada meydana gelen yüzey deformasyonu kontak çiftlerini kitleyerek sürekli olarak açma kapama yapmalarını engelleyebilir [135].

Yukarıda belirtilen kontak direnci, ark erezyonu, kaynak oluşumu ve köprü oluşumu gibi olumsuzlukları minimize etmek için kontak malzemeleri yüksek elektriksel iletkenlik, iyi ısıl özellikler, üstün kimyasal kararlılık ve yüksek mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Yüksek elektriksel iletkenlik yüksek akım yoğunluğunu engelleyerek ısı artışını

durduracak ve bölgesel ergimeler meydana gelmeyecektir. Kontak çiftleri yüksek ergime derecesine sahip metallere üretildiğinde çalışma esnasında ergime kayıpları olmayacaktır. Kimyasal kararlılığa sahip kontak malzemeleri oksit gibi istenmeyen yüzey filmlerinin oluşumunu engelleyecektir. Yüksek sertliğe sahip kontak malzemelerinde aşınma az oluşacak dolayısıyla kontak ömrü artacaktır. Ayrıca kontak malzemeleri ucuz ve kolay üretilebilir olmalıdır [135, 141-144].

1.6. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Grafit, kompozit malzemelerde ve elektrik kontak malzemelerinde katı bir yağlayıcı olarak uzun bir süredir kullanılmaktadır. Moustafa ve arkadaşları [145] matris malzemesi olarak bakır, takviye malzemesi olarak ise grafit kullanarak yaptıkları çalışmada ağırlıkça % 8, % 15 ve % 20 grafit kullanımıyla bakır-grafit kompozitlerini üreterek yoğunluk, sertlik ve aşınma davranışı özelliklerini incelemişlerdir. Bu araştırmanın sonuçlarına göre bağlı yoğunluk değerleri ağırlıkça % 20 grafit kullanımında % 86'ya kadar sertlik değerleri ise 12.5 BHN sertlik değerine kadar gerilemiş buna karşın grafit kullanımı ile aşınma dayanımında önemli iyileşmeler olduğu görülmüştür. Rajkumar ve Aravindan [146] tarafından yapılan başka bir çalışmada ise ağırlıkça % 5'den % 30 kadar grafit takviyeli ve bakır esaslı kompozit malzemeler üretilmiş ve üretilen malzemelerin yoğunluk miktarları ile sertlik değerleri araştırılmıştır. Bu çalışma sonuçlarına göre de yine artan grafit miktarı ile yoğunluk ve sertlik değerleri değerleri azalmıştır. Sinterlenmiş yoğunluk değerleri yaklaşık olarak 7.6 gr/cm^3 den 6.6 gr/cm^3 değerine sertlik değeri ise yaklaşık olarak 85Hv'den 55 Hv değerine gerilemiştir. Bu çalışmada Rajkumar ve Aravindan yoğunluk değerlerindeki azalışın sebebinin artan grafit miktarı ile yapıdaki grafit partiküllerinin oluşturduğu topaklanma bölgelerinin sayısındaki artışa sertliğin azalışını ise grafitin düşük sertliğine bağlamışlardır. Yukarıda ifade edilen iki çalışmada olduğu gibi grafit kullanımı katı bir yağlayıcı olarak aşınma dayanımını artırmakta bununla birlikte fiziksel ve mekanik özellikleri düşürmektedir. Dolayısıyla literatürde doldurulması gereken boşluklardan biri aşınma dayanımını iyileştirirken fiziksel, mekanik ve elektriksel özelliklerden fazla taviz vermeyen yâda onları da geliştiren yeni tür elektrik kontak malzemelerinin üretimidir. Rajkumar ve Aravindan yukarıdaki çalışmalarının bilimsel sonuçlarını bilim dünyası ile paylaştıktan sonra 2013 yılında grafit kullanımının olumsuzluklarını gidermek adına yeni bir çalışma yapmışlardır. Rajkumar ve Aravindan [147], yaptıkları bu çalışmada nanografit

tozu kullanarak ürettikleri Cu-nanografite kompozitlerinin fiziksel, mekanik, elektriksel ve aşınma özelliklerini grafit partikülleri kullanılarak ürettikleri diğer grup malzemelerle karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre ağırlıkça % 15'e kadar nanografite kullanımında hem elektriksel özellikler hem de fiziksel, mekanik ve aşınma özellikleri grafitte göre oldukça geliştirilmiştir. Rajkumar ve Aravindan [147], nanografite tozlarının ısıyı emme yeteneklerinden dolayı bu malzeme grubu için sinterleme işleminin daha verimli olduğunu dolayısıyla daha az gözenekli parçalar üretilebileceğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte hacimce % 15 nanografite miktarından sonraki miktarlar için ise oluşan topaklanmaların malzeme özelliklerini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Yine bu araştırma sonuçlarına göre en düşük sürtünme katsayısı ve en düşük aşınma oranı hacimce % 15 nanografite takviyeli malzeme grubuna aittir. Rajkumar ve Aravindan [147], bu sonucun nedeni olarak nanografite partiküllerinin malzeme yüzeyi üzerinde oluşan pürüzlerin arasını tam olarak doldurup orada sürekli bir yağlayıcı yüzey oluşturabilmesine diğer taraftan ise büyük boyutlu grafit partikülleri için bu durumun geçerli olmamasını göstermişlerdir. Bu çalışma açık bir şekilde nano boyutlu karbon türevlerinin elektrik kontak malzemelerinin özelliklerinin geliştirilmesi açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Grafen nanolevha ve karbon nanotüpler sahip oldukları üstün fiziksel ve mekanik özelliklerden dolayı bu malzemeler üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır. İlk yapılan çalışmalar bu malzemelerin kullanımı ile mekanik özelliklerin artırılmasına yöneliktir. Wang ve arkadaşları [148], grafen nanolevha takviyeli Al matrisli kompozit üretimi yaparak grafen nanolevhaların çekme mukavemeti üzerine etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar ağırlıkça % 0.3 grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin saf Al alaşımından üretilen malzemeye göre çekme mukavemetinin % 62 oranında artarak 249 MPa değerine yükseldiğini göstermiştir. Bu sonuç grafen ve türevlerinin metal matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olarak büyük bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermesi açısından son derece önemlidir. Wang ve arkadaşları (2012) mekanik özelliklerdeki bu olağan üstü artışı grafen nanolevhaların yük taşıma kapasitesi ve dislokasyon hareketini engellemedeki etkinliklerine bağlamıştır. Chen ve arkadaşları [149] Mg-Grafen nanolevha metal matrisli kompozit malzemelerini üreterek bu malzemelerin içyapılarını ve özelliklerini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre hacimce % 1.2 grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin sertlik değerinin grafen nanolevha kullanılmayan Mg alaşımından % 78 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Wang ve arkadaşları [150] gümüş esaslı elektrik kontak malzemelerinde grafit ve karbon nano

tüp kullanımının kontak malzemelerinin özelliklerine olan etkisini karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucu olarak karbon nanotüp ilavesinin sertlik ve elektrik iletkenlik değerlerini artırdığını aynı grafit oranına sahip kompozitlere göre aşınma oranının ise oldukça azaldığı belirtilmiştir. Uddin ve arkadaşları [151] karbon nanotüp takviyeli bakır esaslı kompozit malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üreterek bu malzemelerin özellikleri üzerine partikül boyutu, şekli, sinterleme sıcaklığı ve basıncı gibi işlem parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda üretim parametrelerinin malzeme özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu ve nanotüp kullanımı ile sertlik değerlerinde % 47'ye kadar elektrik iletkenliği değerlerinde ise % 20'ye kadar iyileşmenin sağlanabileceği vurgulanmıştır. Yukarıda verilen çalışmalarda görüldüğü gibi grafen nanolevha ve karbon nanotüplerin takviye malzemesi olarak kullanıldıkları durumda mekanik özelliklerde ve iletkenlik değerlerinde iyileşmeler sağlanmaktadır. Sunulan projede üretilecek olan fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemeleri ile bu özelliklerin en uygun şekilde daha da geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Elektrik kontak malzemesi olarak üretilen ve araştırması yapılan malzemeler incelendiğinde gümüş ve bakır esaslı kontak malzemeleri üzerine daha çok araştırma yapıldığı dikkat çekicidir. Gümüş esaslı kontak malzemelerinin avantajları yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, yüksek ark ve kaynak direnci, düşük kontak direnci, yüksek sertliği ve mukavemetidir [152]. Bununla birlikte gümüş esaslı elektrik kontak malzemelerinde mukavemeti artırmak, ark erozyon direncini yükseltmek ve daha iyi çalışma performansı sağlamak için çeşitli oksit takviyeleri kullanılmaktadır. Bunlardan biri CdO malzemesi ile takviye edilen Ag-CdO elektrik kontak malzemeleridir ve bu malzemeler elektrik endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [143]. Bununla birlikte bu kontak türlerindeki en büyük problem çalışma esnasında zehirli kadmiyum buharının açığa çıkmasıdır. Ag-CdO elektrik kontak malzemelerinin iyi çalışma performansına rağmen bu olumsuzluğundan dolayı araştırmacılar alternatif kontak malzemeleri üzerine yönelmişlerdir. Bazı araştırmacılar CdO yerine SnO₂ (kalay oksit) kullanmayı denemişler fakat bu seferde yüksek sıcaklık koşullarında çalışma performansı oldukça kötüleşmiştir. Wu ve arkadaşları [153] ise CdO yerine ZnO kullanarak yeni bir kontak malzemesi geliştirmişlerdir. Wu ve arkadaşlarının geliştirdiği Ag-ZnO kontak malzemelerinin elektriksel iletkenliği 82 IACs bağıl yoğunluğu ise % 98 dir. Bununla birlikte bu çalışmada (2008) Ag-ZnO kontak malzemeleri üretilirken kullandıkları iç

oksidasyon yöntemi ve diğer ikinci işlemler hem maliyeti yükseltmiş hem de işlem süresini uzatmıştır. Gümüş metalinin pahalı olmasının yanında bu işlem maliyetleri de bunlara eklendiğinde alternatif kontak malzemeleri üzerine çalışma yapma zorunluluğu kaçınılmaz olmuştur. Fındık ve Uzun yaptıkları bir araştırmada [152] Ag-W, Ag-WC ve Ag-WC-C elektrik kontak malzemelerini üreterek içyapı, sertlik ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre artan gümüş miktarı iletkenliği artırmış fakat sertliği düşürmüştür. Buna karşın WC ilavesi sertlik değerini yükseltmiş fakat bu seferde iletkenlik değeri azalmıştır. Bu çalışmada en iyi sonuçlara ağırlıkça % 37 WC ve % 3 grafit takviyeli Ag esaslı kontak malzemeleri ile ulaşılmıştır. Bakır alaşımları ve bakır esaslı kompozitler ise üzerinde yoğun olarak çalışılan diğer elektrik kontak malzemesi türüdür. Bakırın gümüşten sonra en iyi elektriksel iletkenliğe sahip olması, gümüş metaline göre çok daha ucuz olması, üretilebilirliğinin kolay olması elektrik kontak malzemelerinde bakır kullanımını yaygınlaştırmıştır [154]. Bununla birlikte bakır esaslı kontak malzemelerinin en büyük olumsuzluğu gümüş esaslı kontak malzemelerine göre düşük akma mukavemeti ve düşük aşınma direncidir. Bu nedenle araştırmacılar bakır esaslı kontak malzemelerinin elektrik iletkenliğini düşürmeden mekanik özelliklerini geliştirmeye çalışmaktadır. Yang ve arkadaşları [155] ağırlıkça % 0.5, % 0.8, % 1.2, % 1.5, % 2 ve % 3 WC takviyeli bakır esaslı elektrik kontak malzemelerini üreterek özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda ağırlıkça % 1.5 WC miktarına kadar sertlik ve iletkenlik değerlerini artırdığı fakat daha yüksek oranlarda ise bu değerlerde azalma olduğunu gözlemlenmiştir. Guler ve Evin [128] bakır esaslı ZnO, Al₂O₃ ve Y₂O₃ takviyeli elektrik kontak malzemelerini üreterek karşılaştırmalı olarak özelliklerini araştırmışlardır. Bütün oksit takviyeleri için katılma oranları ağırlıkça % 1 ile % 6 arasında seçilmiş ve üretim yöntemi olarak toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Guler ve Evin (2009) tarafından yapılan bu araştırma sonucunda üç farklı takviye tipi içinde en yüksek iletkenlik değerlerinin ağırlıkça % 4 oranında elde edildiği gözlemlenmiştir. En yüksek iletkenlik % 4 ZnO kullanımında ve yaklaşık olarak 75 IACs değeri olarak belirlenmiştir. Kontak performans deneylerinde ise en düşük ağırlık kaybına 9000 açma-kapama sonucunda yine ZnO takviyeli bakır esaslı kontak malzemelerinde ulaşılmıştır. Ağırlık kaybı yaklaşık olarak 8×10^{-2} gr olarak tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada mekanik öğütme yöntemi ile oksit tozlarının matris malzemesi içersine homejen dağıtılmasının elektrik kontak malzemelerinin özellikleri ve çalışma performansı için oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır. Yukarıda bakır esaslı kontak malzemeleri ile ilgili bahsedilen çalışmalarda görüldüğü gibi çeşitli karbür ve oksit

takviyeleri ile mekanik özellikler geliştirilebilmekte fakat iletkenlik değerleri düşmektedir. Bu çalışmalarda iletkenlik değerleri saf bakır metaline göre (100 IACs) %25 ile % 50 arasında gerilemektedir. Bu durum kontak malzemelerinin uzun çalışma süreleri için kullanılamayacağı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada bakır ile birlikte kullanılacak nanografite, grafit nanolevha ve karbon nanotüplerinin sahip olduğu iletkenlik özellikleri fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tasarımı ile birleştiğinde hem iletkenlik hem de mekanik özellikler bakımından önemli kazanımlar elde edileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla bu çalışma önceki araştırmaların yukarıda bahsedilen eksiklerini gidererek literatüre önemli katkılar yapacaktır. Ayrıca şu ana kadar yapılan çalışmalar genellikle üretim aşamasında kalmış ve üretilen bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bununla birlikte üretilen bu malzemelerin kontak performansı (kontak ömrü ve kontak ark dayanımı) ile ilgili araştırmalar yok denecek kadar azdır. Bu çalışmada kontak performansı ile ilgili araştırmaların gerçek çalışma şartları altında yapılması ve direkt ürüne yönelik sonuçlar ortaya konulması çalışmaya hem endüstriyel hemde bilimsel anlamda özgünlük katmaktadır.

Bilimsel araştırmalarda kullanılan malzemelerin özgünlüğü yanında kullanılacak yöntemde malzemelerin üstün özelliklerini ön plana çıkaracak şekilde seçilmiş olması gerekmektedir. Dolayısıyla üretim yöntemi veya yöntemleri ile ilgili bir literatür araştırması verilmelidir. Elektrik kontak malzemelerinin üretim yöntemleri incelendiğinde toz metalurjisi yönteminin ön plana çıktığı görülmektedir. Bu yöntemin elektrik kontak malzemelerinin üretiminde kullanılma sebepleri üretim kolaylığı, aynı anda çok sayıda kontak malzemesinin üretilmesi, hurda kayıplarının olmaması, yoğunluk ve ergime noktasındaki farklılıklar nedeniyle başka yöntemlerle üretimi mümkün olmayan alaşım ve kompozit üretiminin yapılabilmesi sayılabilir [154]. Karbonun bakır içerisindeki çözünürlüğünün çok sınırlı olması ve karbon'un ergimiş bakır tarafından ıslatılabilirliğinin kötü olmasından dolayı bu tür elektrik kontak malzemelerinin döküm yöntemi gibi sıvı faz yöntemleri ile üretilirliği çok kısıtlıdır [156]. Toz metalurjisi yönteminde bu tür olumsuzlukların olmaması bu yöntemin elektrik kontak malzemelerinde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Toz metalurjisi çok küçük parçacıkları birbirine bağlayarak parça haline getirme işlemidir. Daha geniş bir ifadeyle toz metalurjisi mekanik olarak yâda mekanik alaşımlamayla hazırlanan toz karışımlarının preslenmesi ve takiben uygun sıcaklık ve atmosferde sinterlenmesi ile parça imalatını kapsamaktadır. İnce parçacık şeklindeki saf metal, alaşım, karbon, seramik ve polimer toz malzemeler birbirleriyle karıştırılarak basınç

altında şekillendirilebilirler. Daha sonra bu parçalar ana bileşenin (matris malzemesi) ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlenerek parçacıkların temas yüzeyleri arasında kuvvetli bir bağ oluşturulur ve böylece istenilen özellikler elde edilir. Toz metalurjisi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına son derece uygundur [157-160]. Toz metalurjisi yöntemindeki en önemli problem takviye malzemesinin matris malzemesi içerisinde homojen olarak dağıtılamamasıdır. Yapılan araştırmalar mekanik öğütme ile takviye partiküllerinin matris tozları içesine gömülerek homojen bir şekilde dağıtılabileceğini göstermiştir [161-162]. Topaklanma yoğunluğu, matris ve takviye tozlarının boyutu, sertliği ve yoğunlaştırma işleminin türüne bağlı olarak değişmektedir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerle ilgili oldukça fazla çalışma olmasına rağmen [163-167] fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemeleri ile ilgili henüz bir araştırma yapılmamıştır. Bu çalışma açısından fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin sağlayacağı en büyük avantaj, üretilecek olan elektrik kontak malzemelerinde en iyi ömür (ark dayanımı), en iyi ömür-en iyi iletkenlik ve en iyi iletkenliğe sahip katmanları aynı malzeme bünyesi içerisinde oluşturmak olacaktır. Kademeli olarak kimyasal bileşimi değişimi ile hangi bölgede hangi özelliğe gereksinim varsa bu gereksinimi sağlamak ve böylelikle elektriksel iletkenliği düşürmeden ark erozyon ve aşınma direnci arttırılabilecektir.

Bu çalışmada mevcut elektrik kontak malzemelerine alternatif olabilecek daha iyi çalışma performansına ve daha düşük maliyete sahip elektrik kontak malzemelerinin üretimi amaçlanmıştır. Grafen nanolevha, karbon nanotüp ve grafit nanoparçacık takviyeli bakır esaslı elektrik kontak kompozit malzemeleri toz metalurjisi ve mekanik öğütme yöntemleri kullanarak ileri bir teknoloji malzemesi olan fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme olarak üretilerek bu üç tür kontak malzemesi arasından en iyi performansı sağlayan elektrik kontak malzemesi belirlenecek ve karakterize edilecektir. Çalışmada ulaşılmak istenen amaçları aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

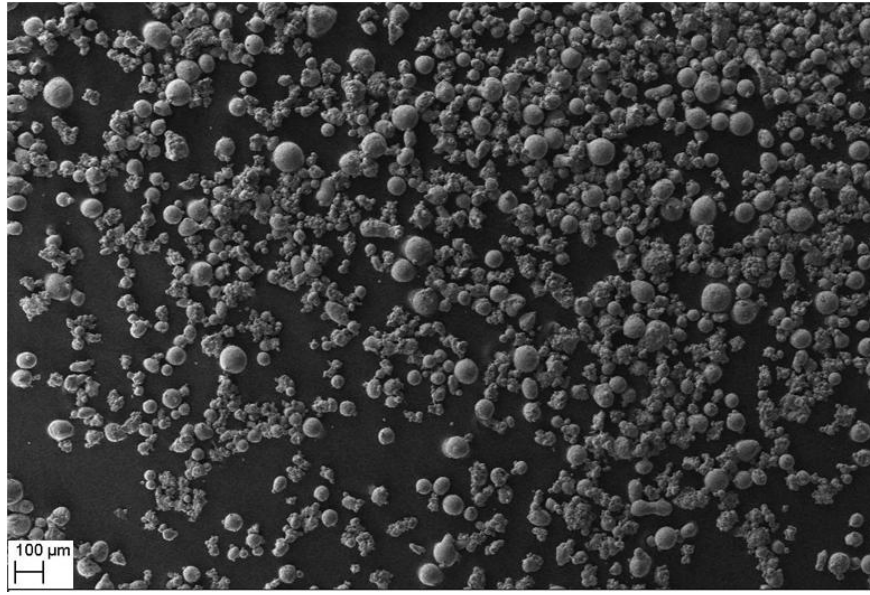
► Grafen nanolevha, karbon nanotüp ve grafit nanoparçacık takviyeli bakır esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak kompozit malzemelerinin nanoteknolojik malzemelerin üretiminde de önemli bir yeri olan toz metalurjisi yöntemi ile yeni ve ileri teknoloji malzeme sınıfı olan fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme olarak üretimi ve karakterizasyonu.

- ▶ Üretilen yeni elektrik kontak malzemelerinin fiziksel, mekanik, mikroyapı, elektriksel, aşınma ve elektrik ark özelliklerinin incelenmesi.
- ▶ Aynı üretim şartlarında üretilecek olan fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin özelliklerinin araştırılması.
- ▶ Aynı üretim şartlarında fonksiyonel olmayan grafen nanolevha, karbon nanotüp ve grafit nanoparçacık takviyeli bakır esaslı elektrik kontak kompozit malzemelerinin üretimi ve bunların fonksiyonel derecelendirilmiş grafen nanolevha, karbon nanotüp ve grafit nanoparçacık takviyeli bakır esaslı elektrik kontak kompozit malzemelerinin özellikleri ile karşılaştırılması.
- ▶ En iyi performans, özellik ve uygulama alanı belirlenerek üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemelerinin karakterizasyonu.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme

Matris malzemesi olarak küresel morfolojiye sahip (Şekil 2.1) ve ortalama toz boyutu değeri 58.5 μm (Şekil 2.1) olan bakır tozları (8.94 gr/cm^3) kullanılmıştır. Bu tozlar Alfa Aesar firmasından temin edilmiştir ve % 99,9 saflığa sahiptir.



Şekil 2.1. Bakır tozlarının başlangıç morfolojisi

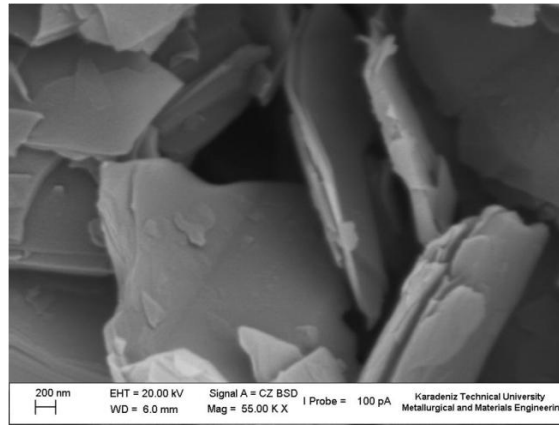
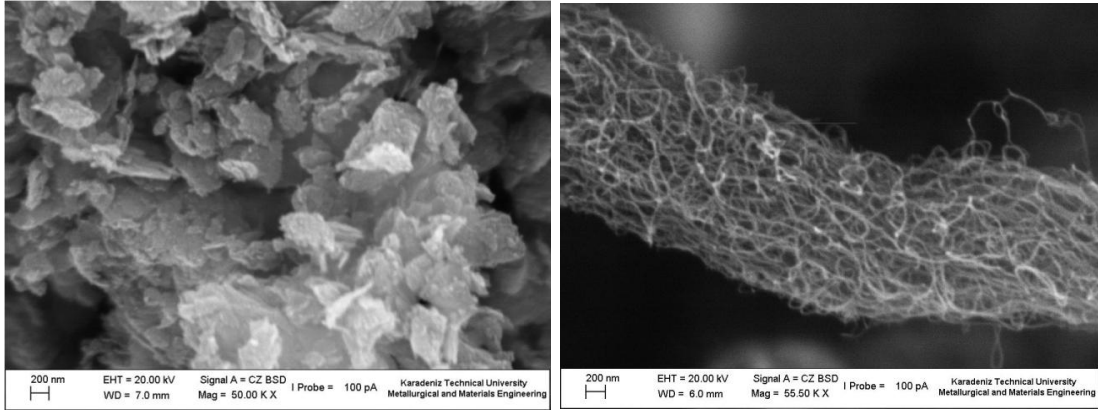


Şekil 2.2. Bakır tozlarına ait partikül boyutu analizi

Takviye malzemesi olarak kullanılan nanogرافit (GNP) (2.2 gr/cm^3), grafen nanolevha (GRNL) (2 gr/cm^3) ve çok duvarlı karbon nanotüp (KNT) (2.1 gr/cm^3) partikülleri Grafen Future firmasından temin edilmiştir. Üç farklı takviye partiküllerine ait özellikler Tablo 2.1’de başlangıç morfolojileri ise şekil 2.3’de verilmiştir. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi nanogرافit partiküllerinin morfolojisi yarı pulsu bir morfoloji, karbon nanotüplerin morfolojisi çubuksu-ipliksi bir morfoloji ve grafen nanolevhaların morfolojisi ise pulsu yâda düzlemsel bir morfolojidir.

Tablo 2.1 Nanogرافit partiküllerine ait özellikler

Malzeme	Saflık (%)	Yüzey Alanı (m^2/g)	Partikül boyutu (nm)	Kalınlık (nm)	Çap ($\mu\text{m}/\text{nm}$)	Uzunluk (μm)
Nanogرافit partikülleri	99.9	350	100	-	-	-
Grafen nanolevha	96-99	13	-	50-100	$5\mu\text{m}$	-
Karbon nanotüp	90	250-300	-	-	9.5nm	1.5



Şekil 2.3. Takviye malzemelerine ait morfolojiler, (a) nanogرافit partikülleri, (b) karbonnanotüp ve (c) grafen nanolevha

2.2. Malzeme Bileşimleri

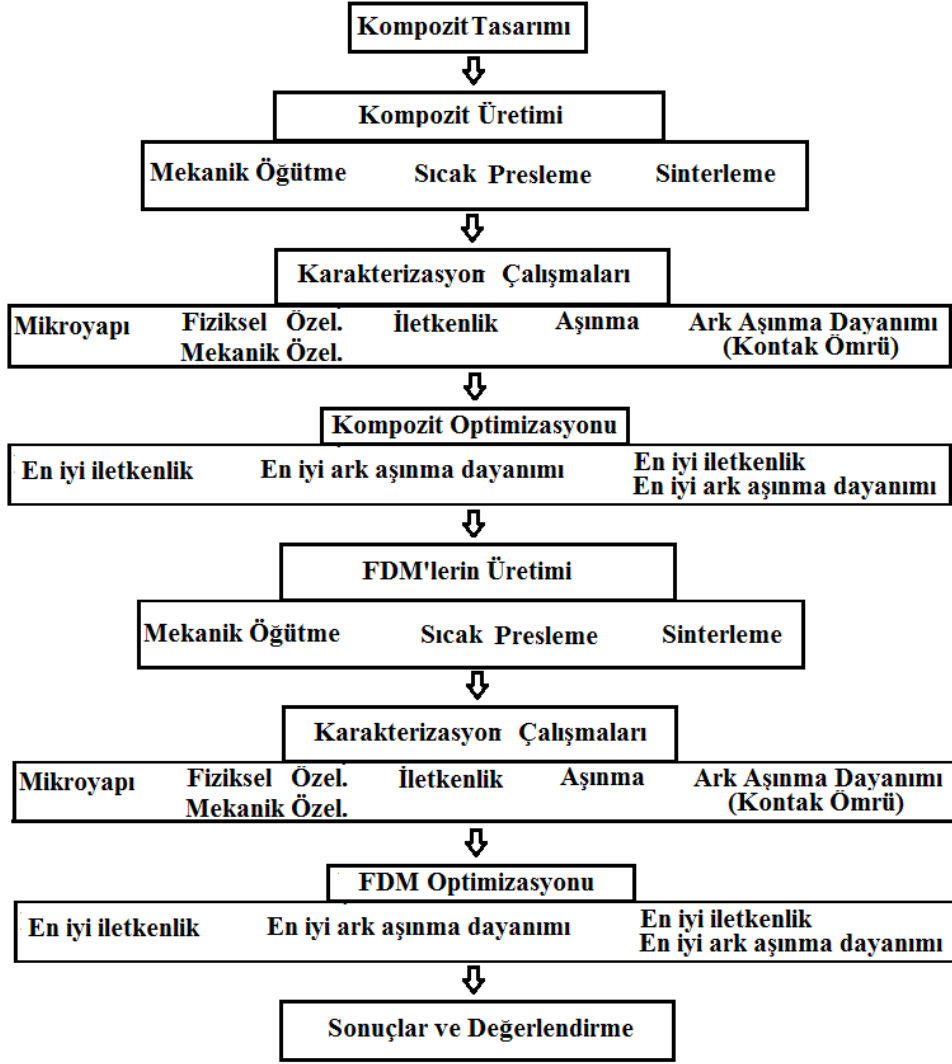
Üretilecek olan kompozit bileşimleri ve herbir malzeme için belirlenen kodlamalar Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Kompozit bileşimleri ve kodları

Numune Kodu	Takviye türü	Takviye oranı (% ağırlıkça)
	Grafit nanopartikül (GNP)	
GNP-1	-	0
GNP-2	-	0.5
GNP-3	-	1
GNP-4	-	1.5
GNP-5	-	2
GNP-6	-	2.5
GNP-7	-	3
GNP-8	-	5
	Grafen nanolevha (GRNP)	
GRNL-1	-	0
GRNL-2	-	0.5
GRNL-3	-	1
GRNL -4	-	1.5
GRNL -5	-	2
GRNL -6	-	2.5
GRNL -7	-	3
GRNL -8	-	5
	Karbon nanotüp	
KNT-1	-	0
KNT-2	-	0.5
KNT-3	-	1
KNT-4	-	1.5
KNT-5	-	2
KNT-6	-	2.5
KNT-7	-	3
KNT-8	-	5

Çalışma kapsamında ilk olarak en iyi performansı sağlayacak malzeme seçimi ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bunun için kontak malzemeleri Cu-nanografrit, Cu-grafen nanolevha ve Cu-karbon nanotüp nanokompozitler olarak üç grupta üretilmiştir. Birinci grup olarak nanografrit takviyeli bakır esaslı kontak malzemeleri 6 farklı takviye miktarına göre (% ağı. 0.5, 1, 1.5, 2, 3 ve 5) ikinci grup grafen nanolevha takviyeli bakır esaslı kontak malzemeleri 6 farklı takviye miktarına göre (% ağı. 0.5, 1, 1.5, 2, 3 ve 5), üçüncü grup ise karbon nanotüp takviyeli bakır esaslı kontak malzemeleri 6 farklı takviye miktarına göre (% ağı. 0.5, 1, 1.5, 2, 3 ve 5) üretilmiştir. Elektrik kontak malzemelerinde istenilen özellikler iyi bir elektrik iletkenliği ve iyi bir ark aşınması dayanımıdır. Bunun için bu çalışmada en iyi iletken, en iyi ark aşınma dayanımı ve en iyi iletken+en iyi aşınma dayanımını sağlayacak bileşenler her bir grup için belirlenmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra kendi aralarında veya farklı malzeme grupları arasında eşleşmeler yapılarak uygun 2'li ve 3'lü fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozit malzemeler tasarlanıp üretilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozit malzemelerde önemli bir problem olarak görülen ayrılma, tabakalaşma probleminin önlenmesi için ön sıcak presleme ve nanografrit, grafen nanolevha ve karbon nanotüplerin matris içersine homojen dağıtılmasının sağlanması için mekanik öğütme yöntemi kullanılmıştır. Üretim aşamasından sonra içyapı, sertlik, aşınma ve kontak ömür deneyleri yapılarak karakterizasyon işlemleri tamamlanarak fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretimine geçilmiştir.

Şekil 2.4'de verilen iş akış şemasında görüldüğü gibi ilk aşamada en iyi özellikleri sağlayacak (en iyi iletken; en iyi ark aşınma dayanımı; en iyi iletken + en iyi ark aşınma dayanımı) bileşimin belirlenmesi için nanokompozit malzemeler üretilmiştir. Bu aşama her üç grup kompozit için de gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada birinci aşamada belirlenen ve en iyi özellikleri sağlayan bileşimler kullanılarak 2'li ve üç'lü fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozit malzemelerin tasarımı belirlenerek en iyi özellikleri sağlayan FDM'leri bulmak için şekil 2.4'de belirtilen karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında 2'li ve 3'lü fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozitler içersinden en iyi kontak performansını sağlayanlar belirlenmiştir. Bu aşamada üretilecek olan 2'li ve 3'lü fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozitler karşılaştırılarak en iyi performans sağlandığı tabaka sayısı optimize edilmiştir.



Şekil 2.4. İş akış şeması

Kompozit özelliklerinin incelenmesi sonucunda belirlenen bileşimler üretilecek olan fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak kompozitlerinin katmanlarını oluşturacaktır. Bu katman bileşimleri kullanılarak 1 ile 3 arasında katman sayısı değişen fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemeleri üretilecektir. Bu çalışmada farklı tür takviyeler için belirlenen ve en iyi özellikleri (en iyi ömür (en iyi ark aşınma dayanımı)), en iyi iletken ve en iyi ömür + en iyi iletken özelliklerini sağlayan kompozitler şekil 2.5'de tasarım modelleri verilen fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak kompozitlerinin üretiminde kullanılacaktır. Şekil 2.5a'da 6 adet 2'li fonksiyonel derecelendirilmiş, şekil 2.5b'de ise 8 adet 3'lü fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemeleri üretilerek özellikler araştırılacak ve en iyi fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemesi belirlenecektir.

İki Kademeli FDM'ler

En iyi ömür (En iyi ark aşınma dayanımı)	En iyi ömür + En iyi iletkenlik
En iyi ömür + En iyi iletkenlik	En iyi iletkenlik
En iyi ömür	En iyi ömür + En iyi iletkenlik
En iyi iletkenlik	En iyi ömür
En iyi ömür	En iyi ömür + En iyi iletkenlik
Cu	Cu

(a)

Üç Kademeli FDM'ler

En iyi ömür (En iyi ark aşınma dayanımı)	En iyi ömür + En iyi iletkenlik
En iyi ömür + En iyi iletkenlik	En iyi iletkenlik
En iyi iletkenlik	En iyi ömür
En iyi ömür	En iyi ömür + En iyi iletkenlik
En iyi iletkenlik	En iyi ömür
En iyi ömür + En iyi iletkenlik	En iyi iletkenlik
En iyi ömür	En iyi ömür + En iyi iletkenlik
En iyi ömür + En iyi iletkenlik	En iyi iletkenlik
Cu	Cu
En iyi ömür	En iyi ömür + En iyi iletkenlik
En iyi iletkenlik	En iyi ömür
Cu	Cu

(b)

Şekil 2.5. Fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemeleri: (a) İki kademeli FDM, b) Üç kademeli FDM

2.3. Mekanik Öğütme

Bu çalışmada toz karışımlarına gezegen tip bilyeli öğütücüde (Retsch PM 200) (Şekil 2.6) 300 dev/dak öğütme hızında mekanik öğütme işlemi uygulanmıştır. Öğütme işlemindeki amaç takviye partiküllerinin matris tozlarına gömülmesini sağlayarak topaklanma oluşumunu engellemektir. Bu nedenle 5 saatlik tek bir öğütme süresi seçilmiştir. Öğütme işlemi tungsten karbür değirmen ve bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öğütücü kap hacni 125ml ve bilye boyutu ise 10 mm dir. Herbir öğütücü kaba şarz edilen toz miktarı 60gr ve bilye-toz ağırlık oranı 5:1 olarak seçilmiştir.



Şekil 2.6. Öğütme cihazı

2.4. Parçacık Boyutu

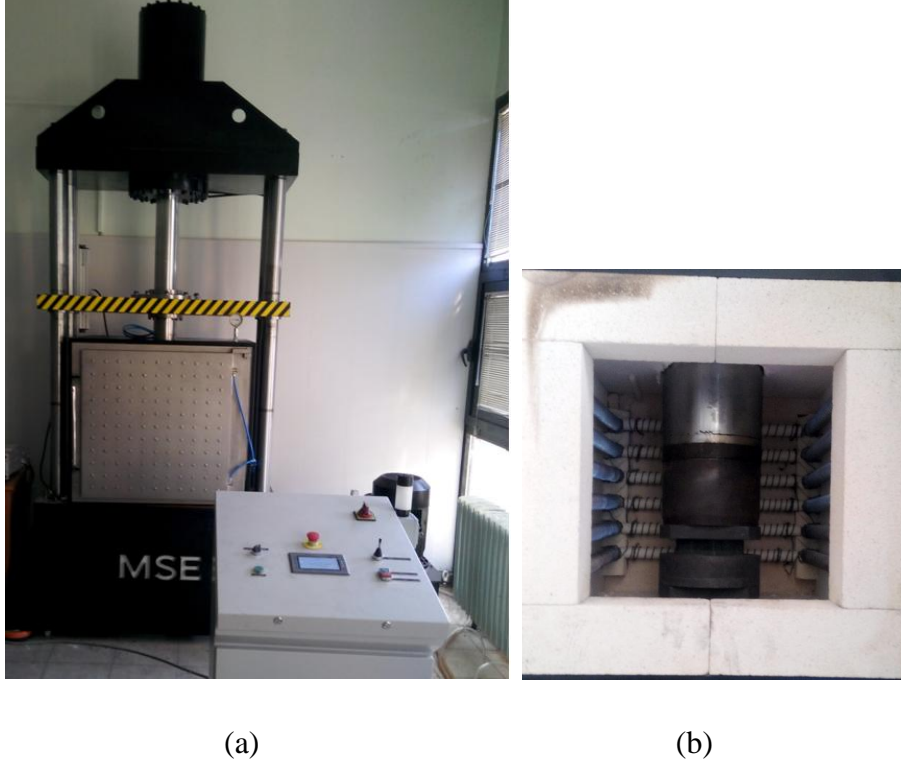
Başlangıç tozları ve öğütülmüş tozların boyutsal incelemeleri Malvern Instruments™ marka Mastersizer 2000e (Şekil 2.7) model lazer ışık kırınımı prensibine göre çalışan parçacık boyut ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemleri saf su ortamında yapılmıştır.



Şekil 2.7. Partikül boyutu ölçüm cihazı

2.5. Presleme

Hazırlanan toz karışımı ilk önce soğuk olarak ön sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur (200 Mpa). Bir sonraki aşamada ileri yoğunlaştırma için sıcak presleme (500 MPa ve 500 °C) işlemi uygulanarak ham numuneler elde edilmiştir (Şekil 2.8).



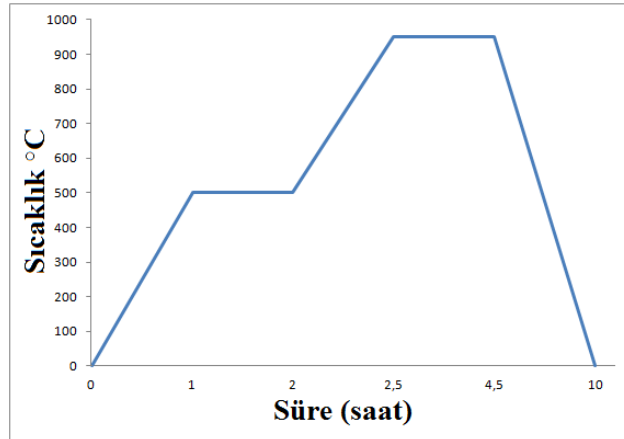
Şekil 2.8. (a) Sıcak presleme cihazı, (b) Pres bünyesindeki fırın

Fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinde kademeler yâda tabakalar yine aynı presleme tekniği kullanılarak serme usulü ile oluşturulmuştur. Şöyle ki ilk kademeye ait toz kalıba dökülmüş ve ön sıkıştırma basıncı ile yoğunlaştırılmıştır. Bir sonraki katmana ait tozlar bu tabakanın üzerine dökülmüş ve tekrar ön sıkıştırma işlemi uygulanarak kademeler oluşturulmuştur. Hem kompozit hemde FDM'lere ait ham numuneler üretildikten sonra bu numunelere sinterleme işlemi uygulanmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Vakumlu sinterleme fırını

Sinterleme işlemi esnasında çarpılma ve boyutsal değişimleri minimize edebilmek için kademeli sinterleme işlemi kullanılmıştır. Kademeli sinterleme işlemi aşamaları şekil. 2.10'da görülmektedir. Sıcaklık 1 saat de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ çıkarılarak numuneler bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra 30 dakikalık bir sürede sıcaklık $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltilerek bu sıcaklıkta 2 saatlik sinterleme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu süre tamamlandıktan sonra 5.5 saatlik bir süre zarfında sıcaklık oda sıcaklığına düşürülmektedir.



Şekil 2.10. Kademeli sinterleme

2.6. Fiziksel Özellikler

Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları karışımlar kuralına göre bulunmuş deneysel yoğunlukları ise Arşimed yöntemi ile ölçülmüştür.

$$\delta_t = [(\%W)_1 * \delta_1] + [(\%W)_2 * \delta_2] + \dots + [(\%W)_n * \delta_n] \quad (2.1)$$

Burada;

δ_t : Kompozitin teorik yoğunluğu

$(\%W)_n$: Her bir takviyenin karışım içindeki ağırlıkça yüzdesi

δ_n : Her bir takviyenin yoğunluğu

Bağıl yoğunluk = $[(\delta_t - \delta_d) / \delta_t] * 100$

Burada;

δ_d : deneysel yoğunluğu tanımlamaktadır.

Üretilen numunelerin iletkenlik ölçümleri Sigmascope SMP10 HF marka demir dışı metaller için kullanılan iletkenlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. İletkenlik değeri olarak 6 ölçümün ortalaması alınmıştır.

2.7. Metalografik İşlemler

Üretilen kompozit ve fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin içyapı incelemeleri için gerekli metalografik işlem olarak kesme işlemleri otomatik kesme makinesi, kalıplama işlemleri bakalite alma cihazı ve zımparalama ve parlatma işlemleri otomatik zımpara ve parlatma cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.11). Dağlama işleminde araç olarak 100 ml su, 50 ml HCl (Hidro Klorik asit) ve 5gr FeCl₃ (Demir Klorür) malzemelerinin karıştırılması ile oluşturulan dağlama çözeltisi kullanılmıştır.



(a)

(b)



(c)

Şekil 2.11. Numune Hazırlama; (a) Kesme makinesi, (b) Bakalite alma cihazı, (c) Otomatik zımparalama ve parlatma



Şekil 2.12. Metalografik işlemler uygulanmış numune

2.8. Morfoloji ve İyapı İncelemesi

Başlangıç tozlarına ait morfolojiler, öğütölmüş kompozit tozlara ait morfolojiler, kompozit ve FDM içyapıları taramalı elektron mikroskobu kullanılarak (SEM) incelenmiştir.



Şekil 2.13. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.9. Mekanik Özellikler

Kompozit numunelerin makro sertlikleri ise aşağıda şekli verilen Brinell sertlik ölçüm cihazı yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 2.14). Cihazdan alınan iz çapları Brinell sertlik ölçüm formülünde yerine konarak kompozit sertlikleri bulunmuştur.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (2.2)$$

Burada;

HB: Brinell Sertlik

P: Uygulanan Kuvvet

d: Oluşan iz çapı

D: Kullanılan bilye çapı (mm)



Şekil 2.14. Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı

2.10. Tribolojik Özellikler

Sertlik ölçümleri tamamlandıktan sonra aşınma deneylerine geçmiştir. Ball-on-disk aşınma testi ile üretilen malzemelerin aşınma deneyleri yapılmıştır (Şekil 2.15). Aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.



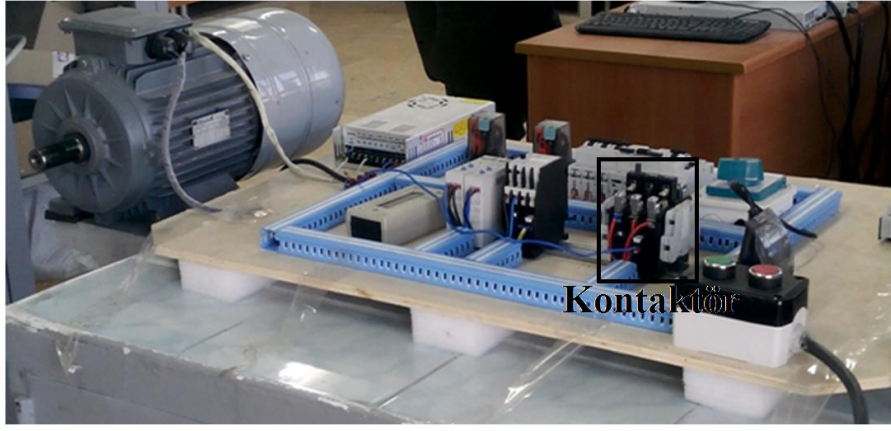
Şekil 2.15. Aşınma test cihazı

Tablo 2.3. Aşınma Parametreleri

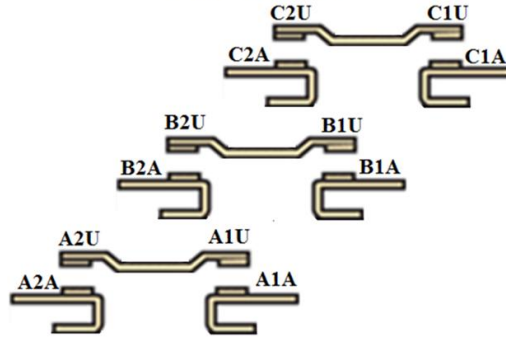
Yük (N)	Yol (m)	Hız (m/sn)	Devir (d/dk)	İz Çapı
5	100m-200m-300m-400m	0.25	240	20mm
7	100m-200m-300m-400m	0.25	240	20mm
10	100m-200m-300m-400m	0.25	240	20mm

2.11. Kontak Deneyleri

Kontak performansı incelemesinde açma kapama sayısına göre ağırlık kayıpları ve ark bölgelerindeki yüzey morfolojilerinin değişimi araştırılmıştır. Mevcut kontak deney düzeneği, kapasitif yük, indüktif yük ve yüklemesiz gerilim altında kontak malzemeleri ve rölelerin ayrı ayrı çalışma performanslarının incelenmesine imkân sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.16). Kontakların birim zamandaki açma kapama sayısı zaman röleleri ile ayarlanabilmekte olup çevrim sayısı da mikro işlemcili bir sayaç ile kayıt altına alınmıştır.



Kontaktör



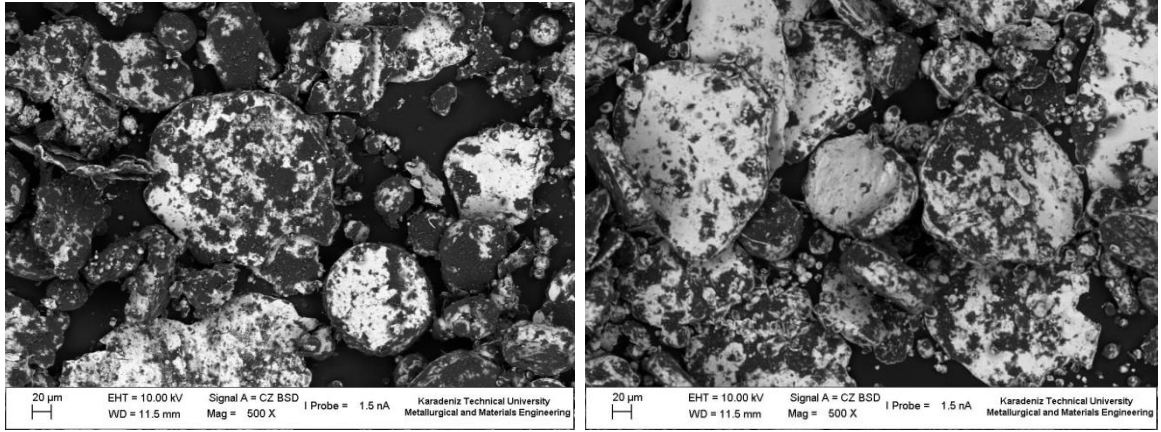
Şekil 2.16. Kontak deney düzeneği ve kontak kodları

3. BULGULAR

3.1. Toz Karakterizasyonu

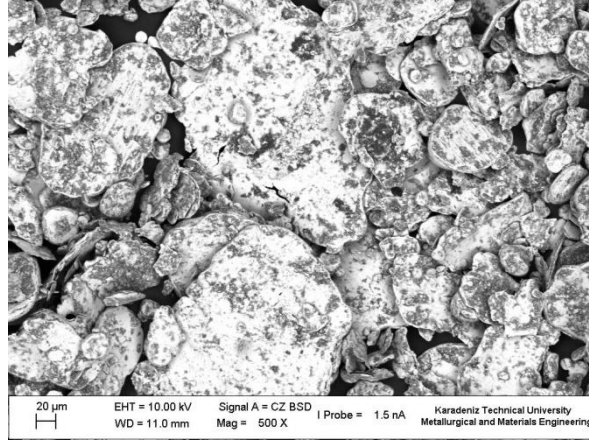
3.1.1. Toz Morfolojisi

Karbon esaslı takviye malzemeleri olan nanografite, grafen nanolevha ve karbon nanotüpler yağlayıcılık açısından aynı etkiye sahip olmasada öğütme işlemi için oldukça fazla yağlayıcılık etkisi göstermiştir. Bu nedenle öğütme saati olarak takviye malzemelerinin bakır matris tozları içersine gömüldüğü ve benzer morfolojinin elde edildiği tek bir öğütme saati belirlenerek tüm öğütme işlemleri için belirlenen bu saat kullanılmıştır. Bu öğütme saatini belirlemek için ağırlıkça % 2.5 takviye oranında 3 takviye grubuna ait tozlar 2, 5 ve 10 saatlik öğütme işlemine tabi tutulmuş ve 5 saatlik öğütme işleminin takviye-matris etkileşimi açısından yeterli olduğu görülmüştür. Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'de her bir takviye gurubu için 2, 5 ve 10 saat sonunda elde edilen morfolojiler verilmiştir.

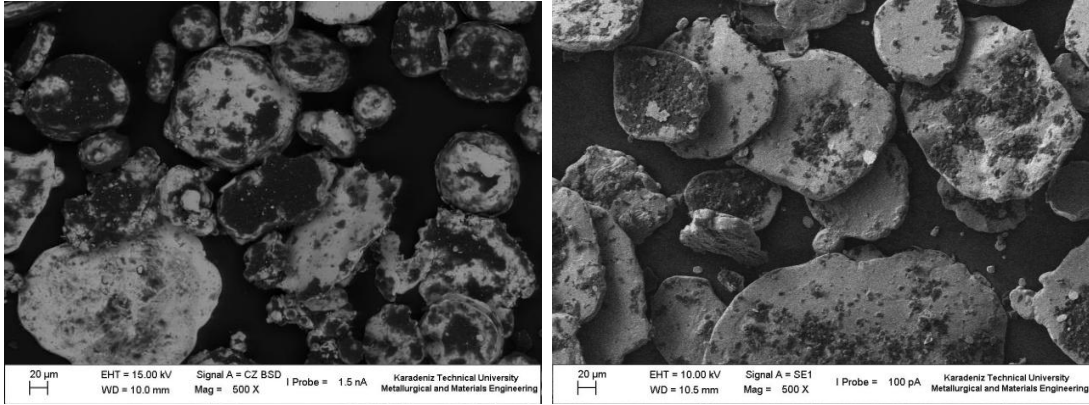


Şekil 3.1. % 2.5 nanografite takviyesi için elde edilen morfolojiler, (a) 2, b) 5, c) 10 saat

Şekil 3.1'in devamı

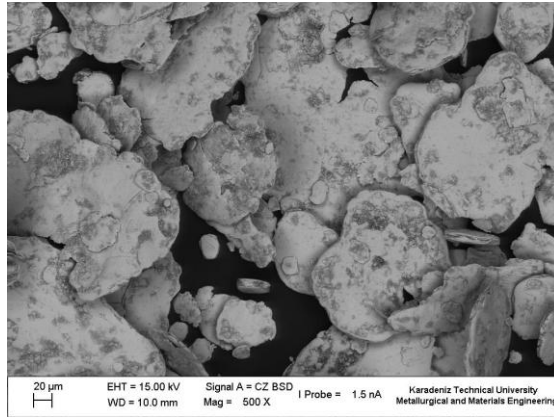


(c)



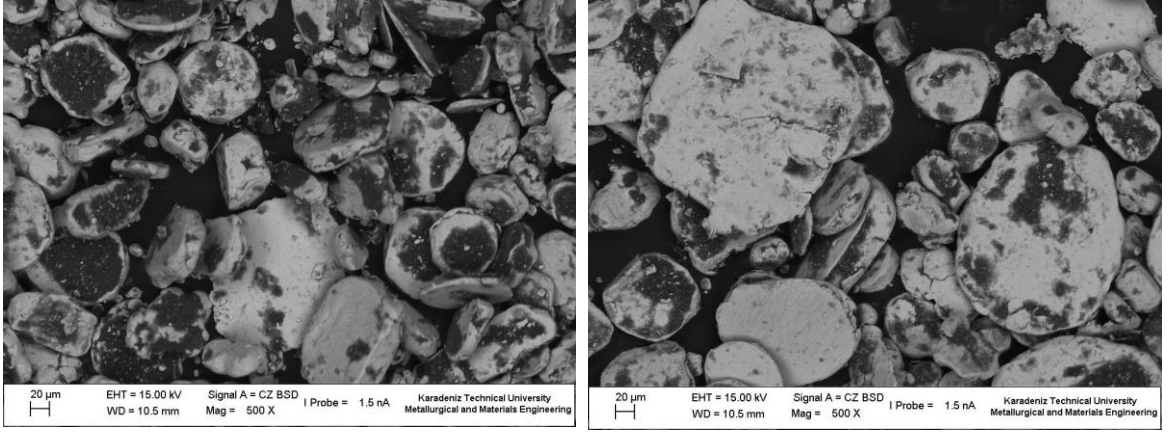
(a)

(b)



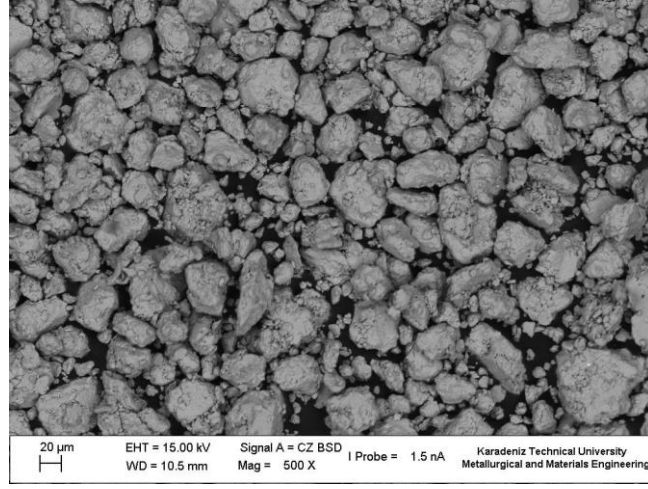
(c)

Şekil 3.2. % 2.5 grafen nanolevha takviyesi için elde edilen morfolojiler, (a) 2, b) 5, c) 10 saat



(c)

(b)



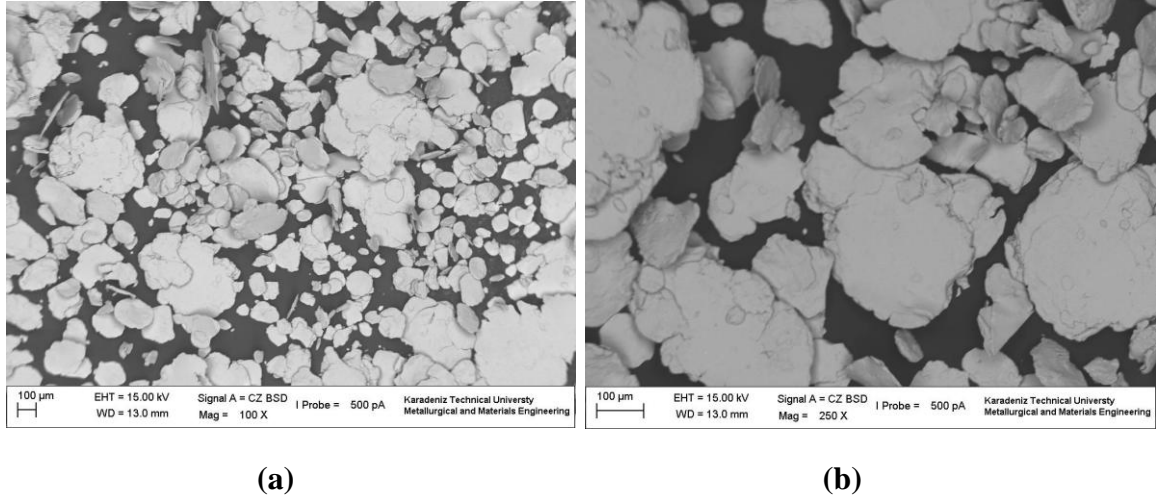
©

Şekil 3.3. % 2.5 karbon nanotüp takviyesi için elde edilen morfolojiler, (a) 2, b) 5, c) 10 saat

Morfolojiler incelendiğinde 2 saatlik öğütme işlemi sonucunda, takviye partiküllerinin matris tozları üzerinde yeterince homojen dağılmadığı 10 saatlik öğütme işleminde ise karbon nanotüp takviyeli tozların soğuk kaynak prosesine maruz kaldığı görülmektedir. Bu nedenle 5 saatlik öğütme işleminin bütün takviye oranları için kullanılmasına karar verilmiştir.

3.1.1.1. Cu Tozları

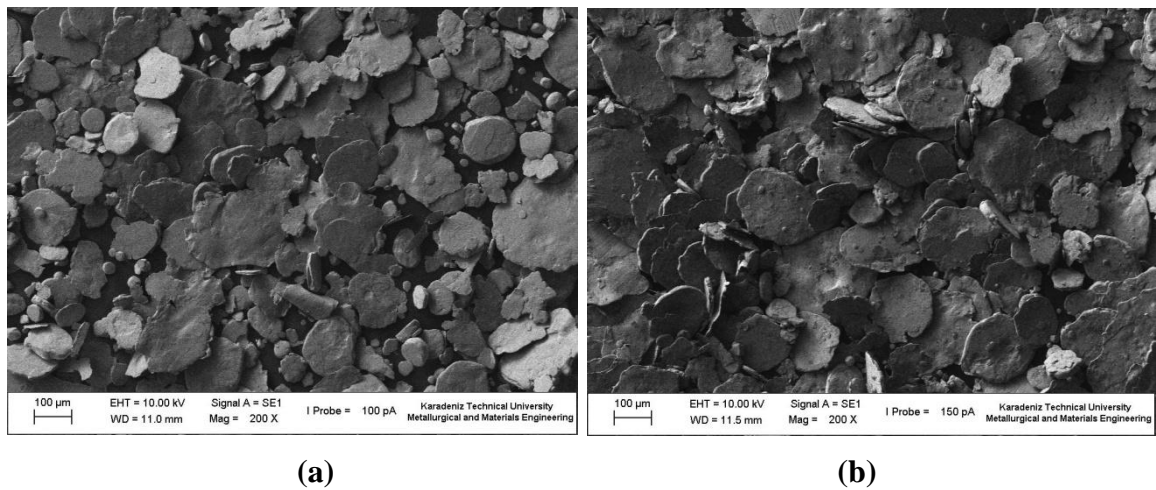
Şekil 3.4.'de görüldüğü gibi bakır tozlarının herhangi bir takviye içermemesi durumunda pulsu morfolojiyi takiben küçük boyutlu tozlar ile büyük boyutlu tozlar soğuk kaynak olarak birleşmekte ve toz boyutu artmaktadır.



Şekil 3.4. Bakır tozlarının 5 saatlik öğütme sonrası morfolojileri; (a) Küçük büyütme, (b) Büyük büyütme

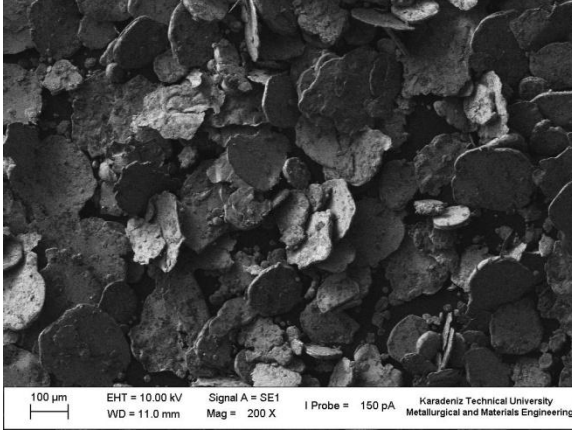
3.1.1.2. Cu-Nanografit Kompozit Tozları

Şekil 3.5'den görüldüğü gibi artan takviye oranı ile birlikte matris tozlarına gömülen takviye partiküllerinin miktarı artmıştır.

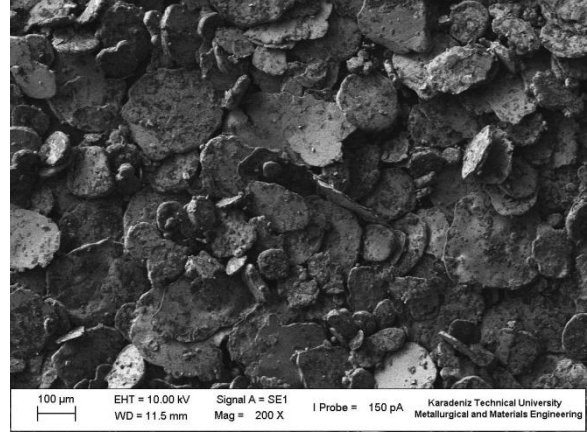


Şekil 3.5. Cu-nanografit tozlarına ait morfolojiler, ağı. % (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5, (d) 2, (e) 2.5, (f) 3, (g) 5 nanografit

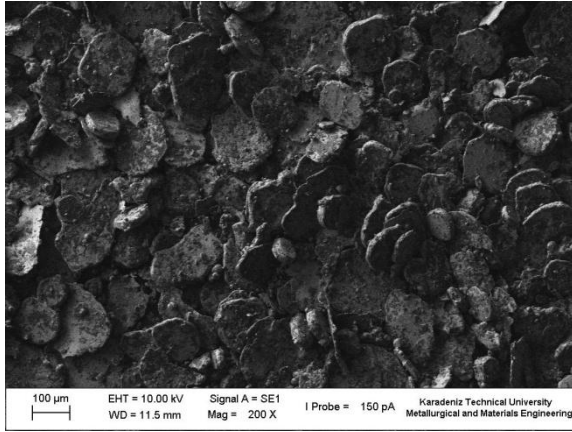
Şekil 3.5'in devamı



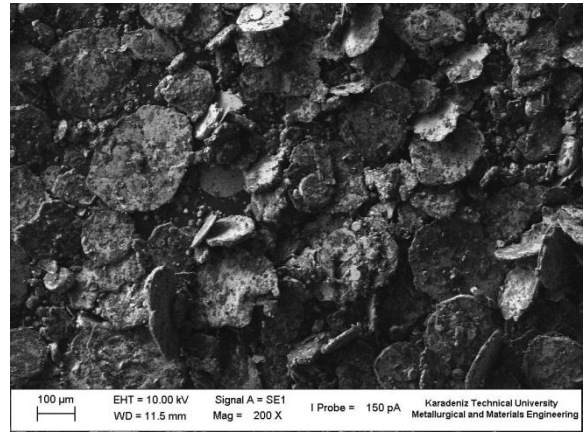
(c)



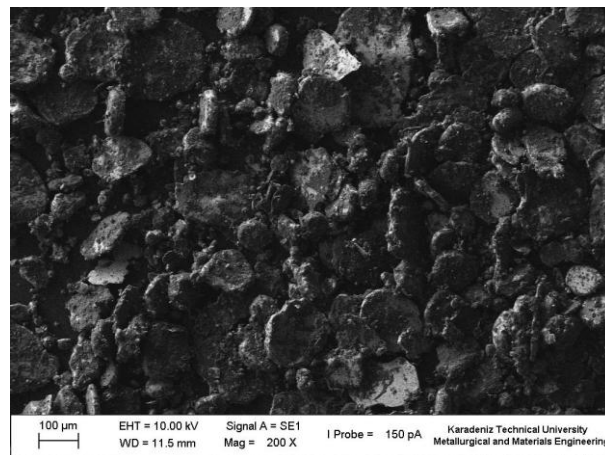
(d)



(e)

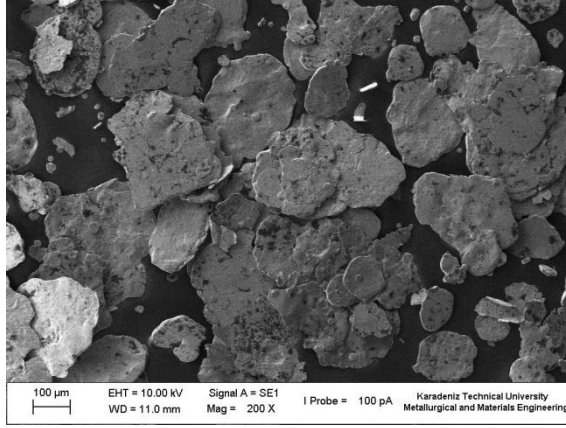


(f)

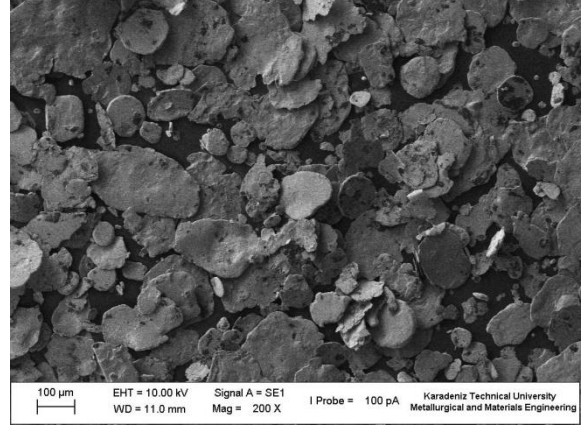


(g)

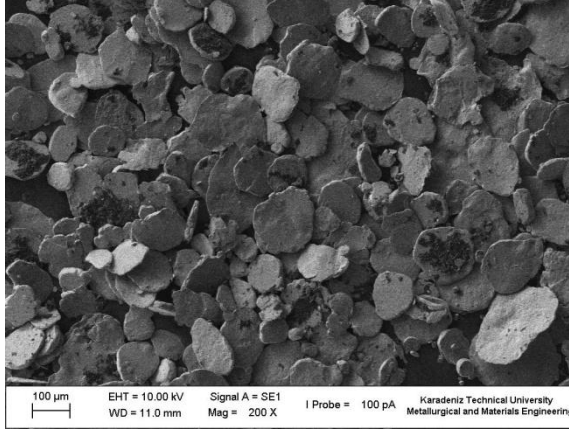
3.1.1.3. Cu-Grafen nanolevha Kompozit Tozları



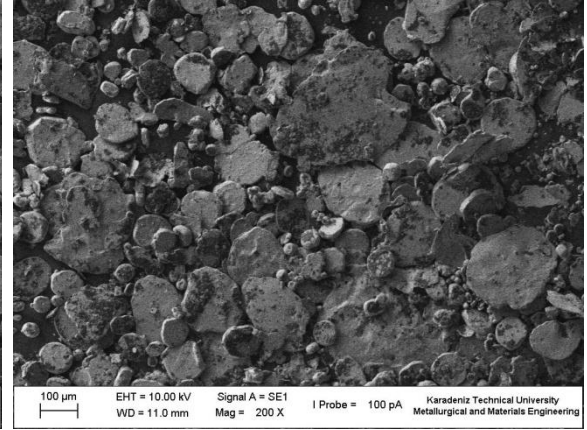
(a)



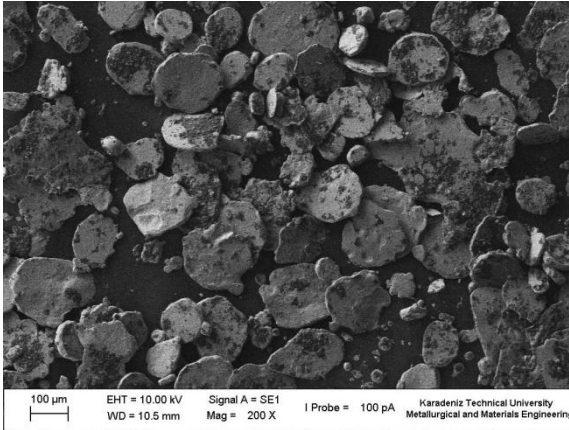
(b)



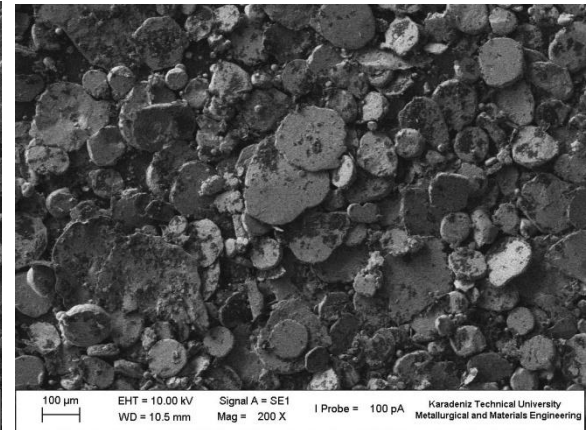
(c)



(d)



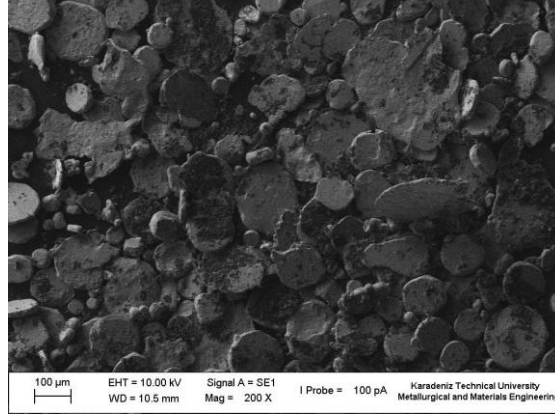
(e)



(f)

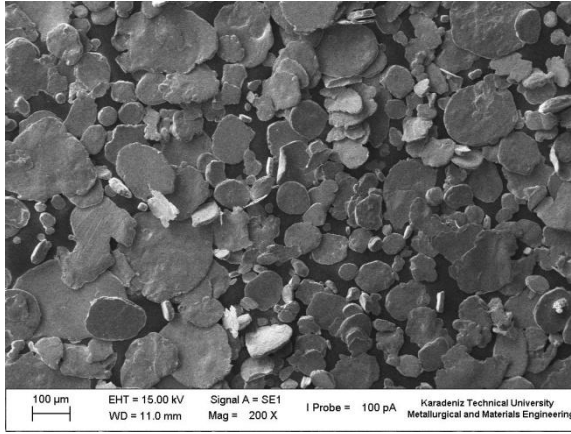
Şekil 3.6. Cu-grafen tozlarına ait morfolojiler, ağırlık % (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5, (d) 2, (e) 2.5, (f) 3, (g) 5 grafen nanolevha

Şekil 3.6'nın devamı

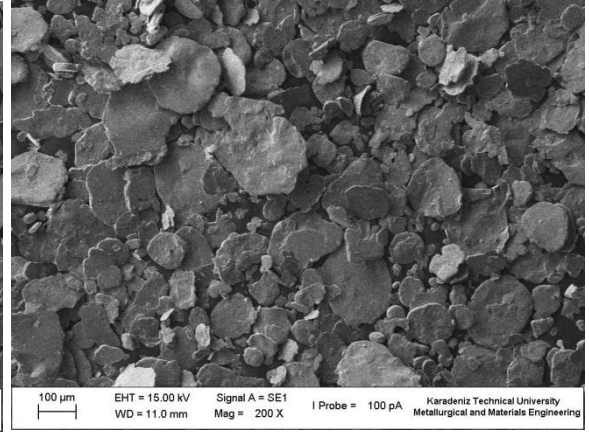


(g)

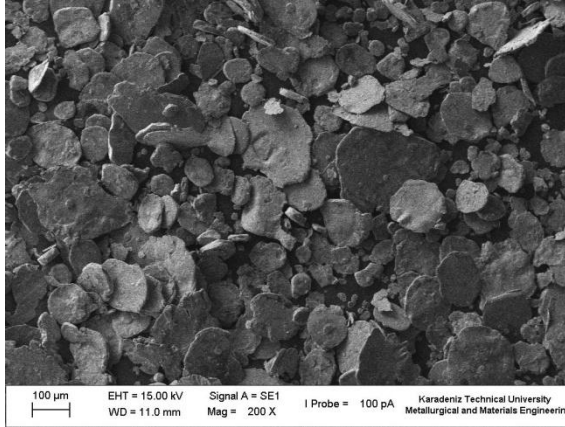
3.1.1.4. Cu-Karbon Nanotüp Takviyeli Kompozit Tozları



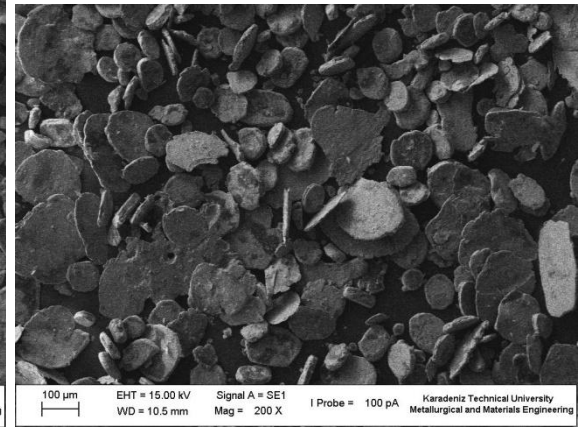
(a)



(d)



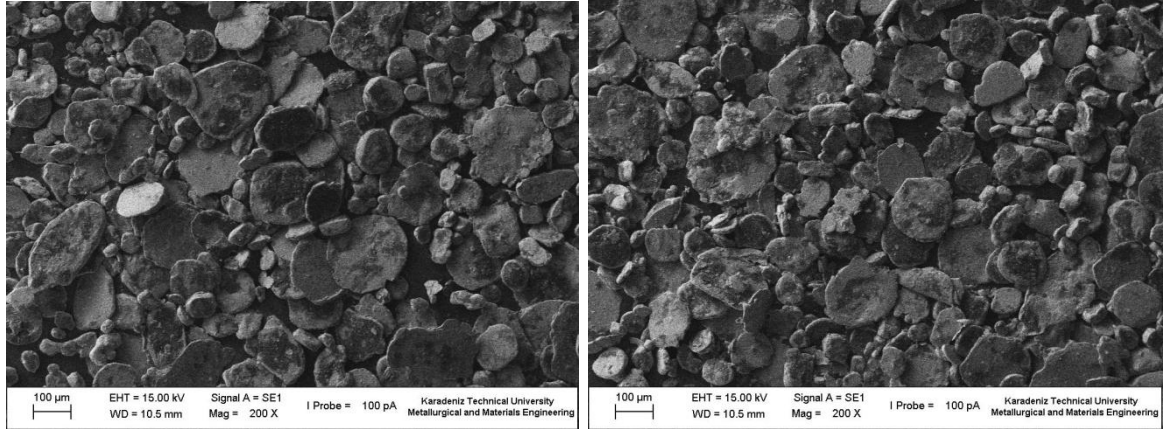
(c)



(d)

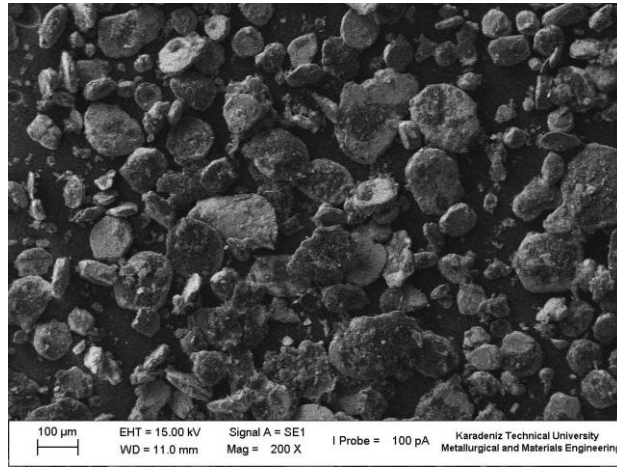
Şekil 3.7. Cu-karbon nanotüp tozlarına ait morfolojiler, ağırlık % (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5, (d) 2, (e) 2.5, (f) 3, (g) 5 karbo nanotüp

Şekil 3.7'nin devamı

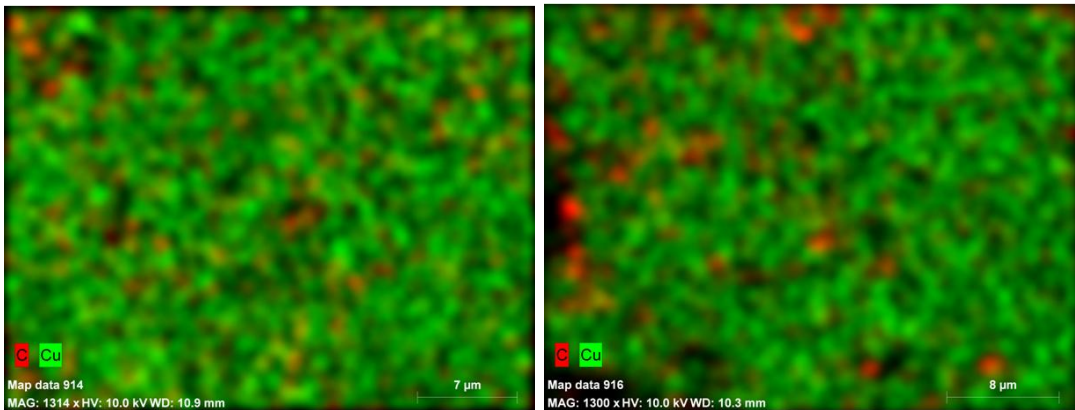


(e)

(f)



(g)

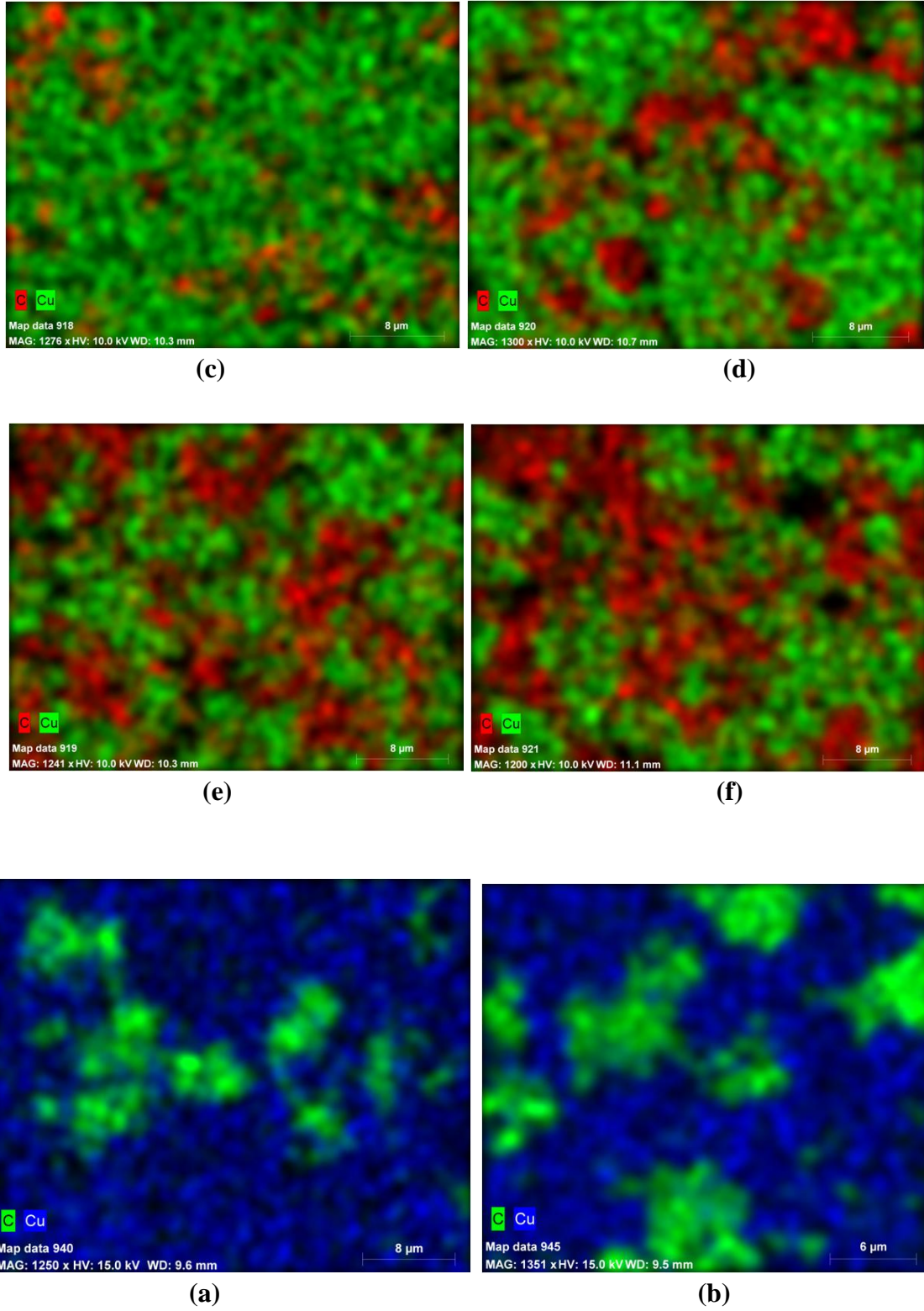


(a)

(b)

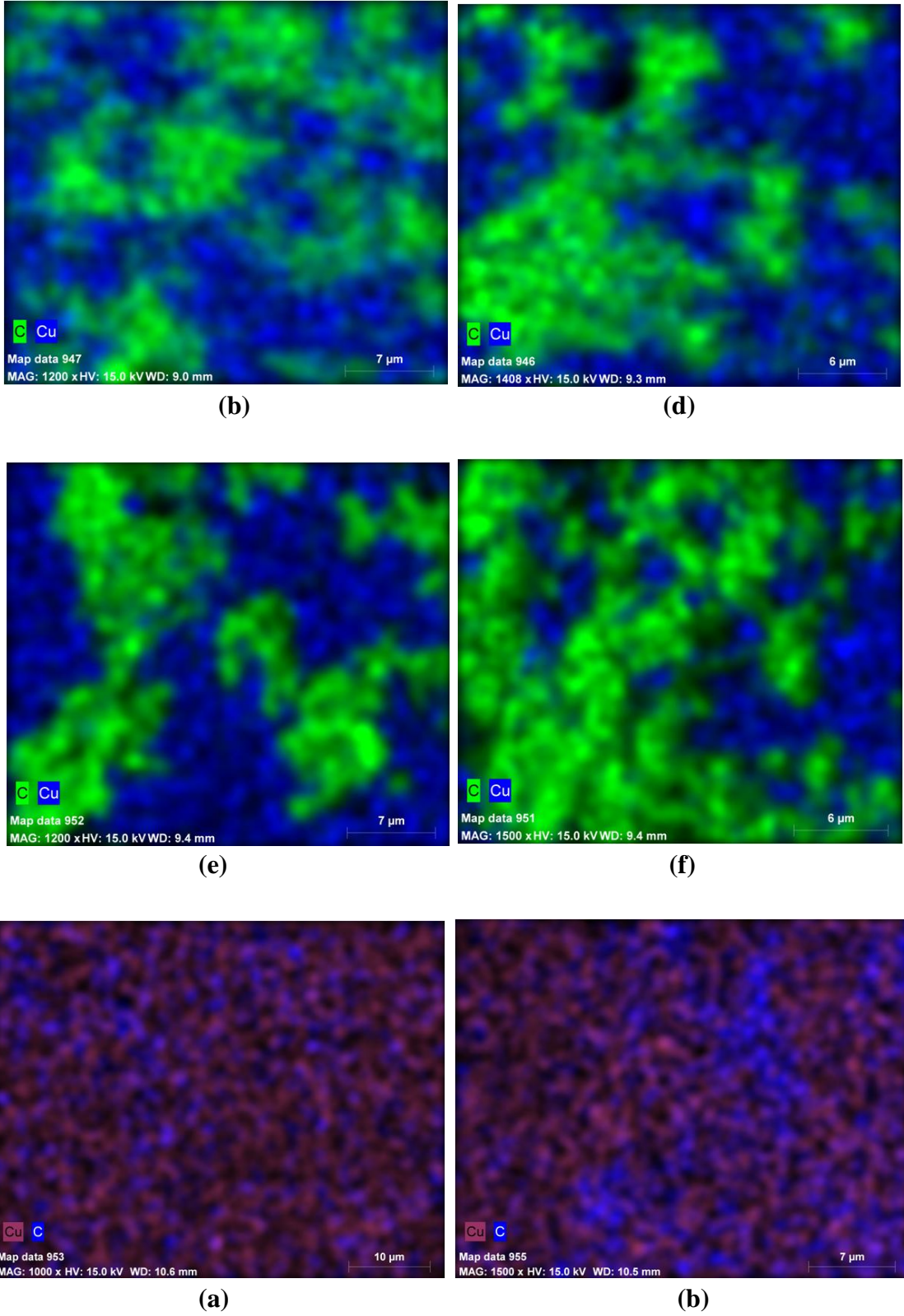
Şekil 3.8. Cu- Grafit nano partikül kompozit tozları için elementel haritalama,
(a) GNP-2, (b) GNP-4, (c) GNP-5, (d) GNP-6, (e) GNP-7, (f) GNP-8

Şekil 3.8'in devamı



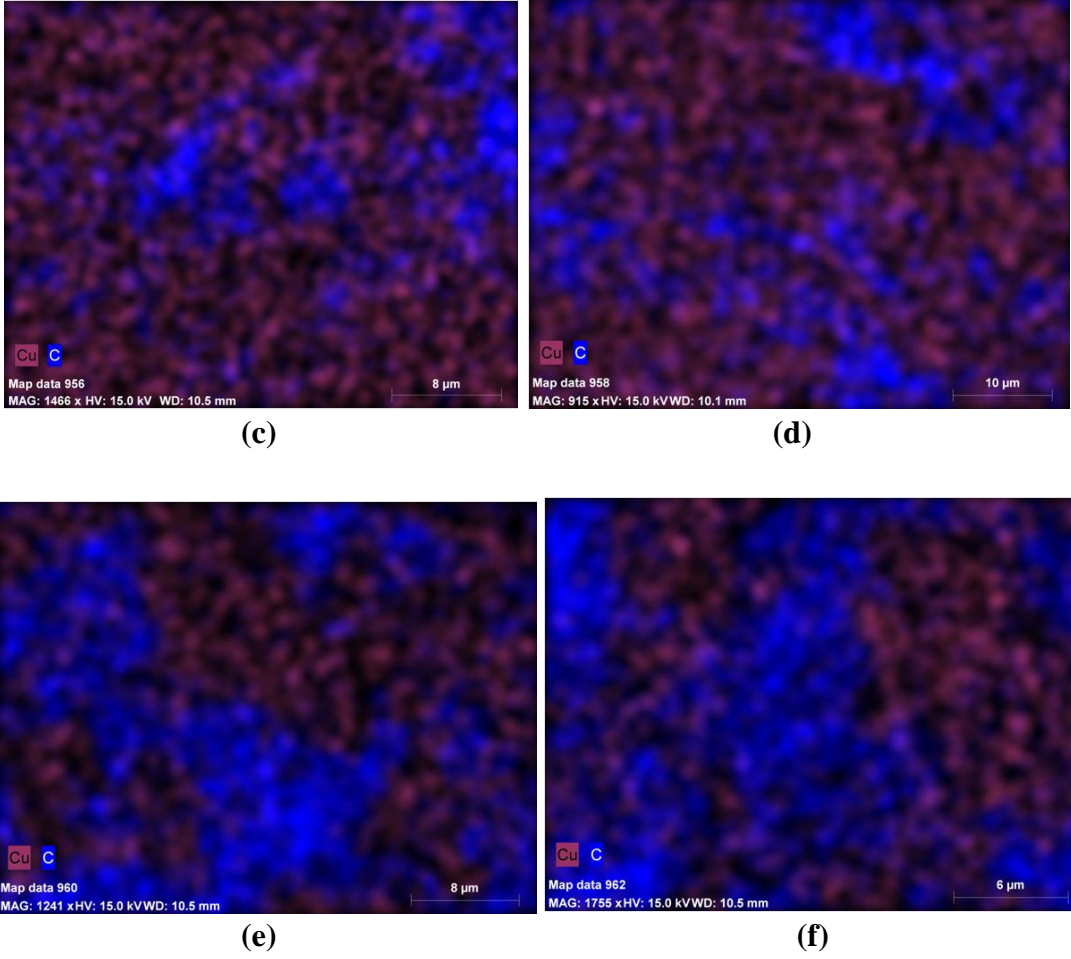
Şekil 3.9. Cu-Grafen nanolevha kompozit tozları için elementel haritalama, (a) GRNL-2, (b) GRNL-4, (c) GRNL-5, (d) GRNL-6, (e) GRNL-7, (f) GRNL-8

Şekil 3.9'un devamı



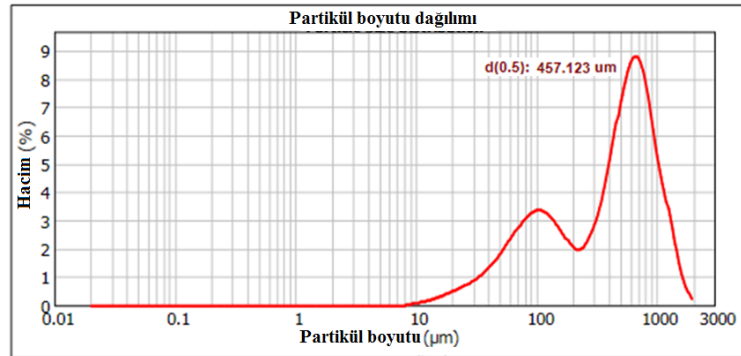
Şekil 3.10. Cu-Karbon nanotüp kompozit tozları için elementel haritalama, (a) KNT-2, (b) KNT-4, (c) KNT-5, (d) KNT-6, (e) KNT-7, (f) KNT-8

Şekil 3.10'un devamı



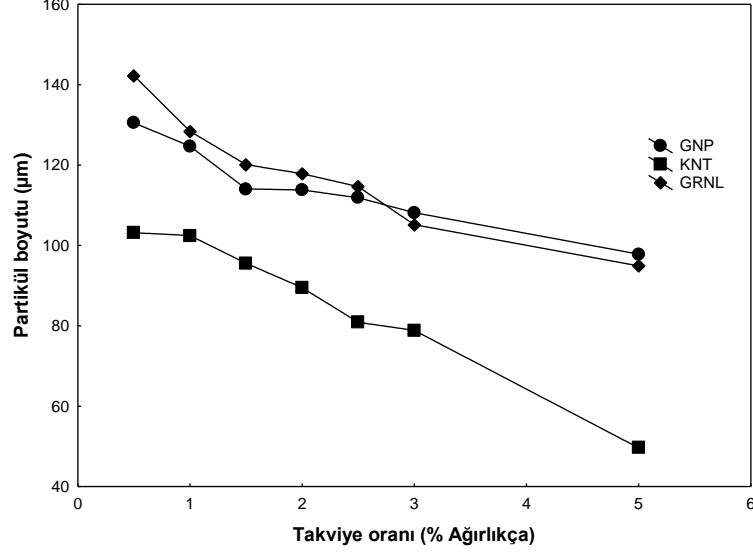
3.1.2 Partikül Boyutu

Şekil 3.11'de görüldüğü gibi takviye içermeyen bakır tozlarının öğütülmesi sonucunda oldukça yüksek toz boyutuna ulaşılmış (d_{50}) ve 5 saatlik öğütme sonucunda bimodal partikül boyutu dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 3.11. Bakır tozlarının 5 saatlik öğütme sonundaki partikül boyutu dağılımı

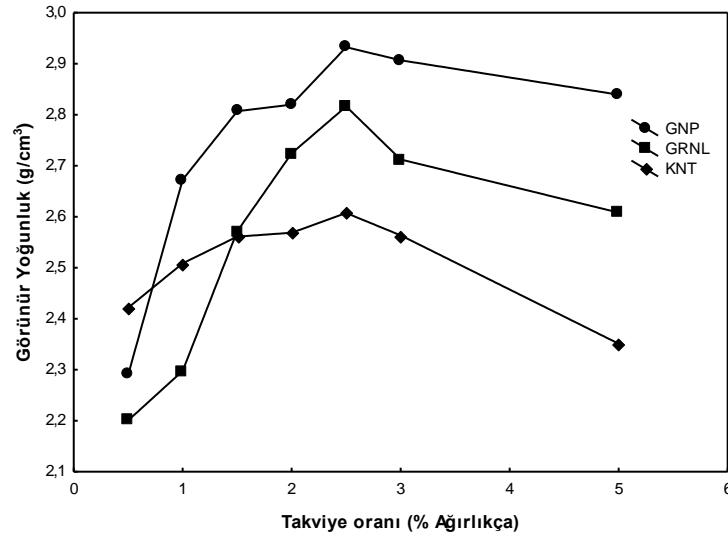
Şekil 3.12’de 5 saatlik öğütme işlemi sonucunda elde edilen kompozit nanotozların boyutu üzerine takviye miktarı ve takviye türünün etkisi görülmektedir. Grafiğe göre en düşük toz boyutu karbon nanotüp takviyeli nanokompozitler için elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Takviye türü ve takviye miktarı ile partikül boyutunun değişimi

3.1.3. Görünür Yoğunluk

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi, % 2.5 takviye oranına kadar nanokompozit tozların görünür yoğunluk değerleri artmakta daha ileri takviye miktarı için ise azalmaktadır.

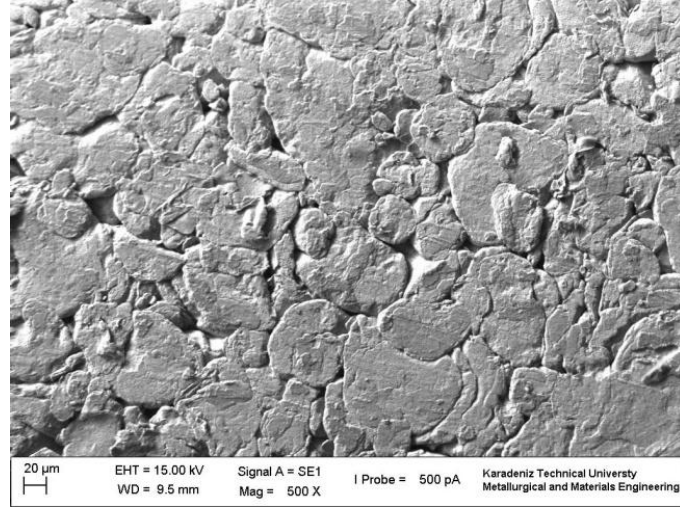


Şekil 3.13. Takviye türü ve takviye miktarı ile görünür yoğunluğun değişimi

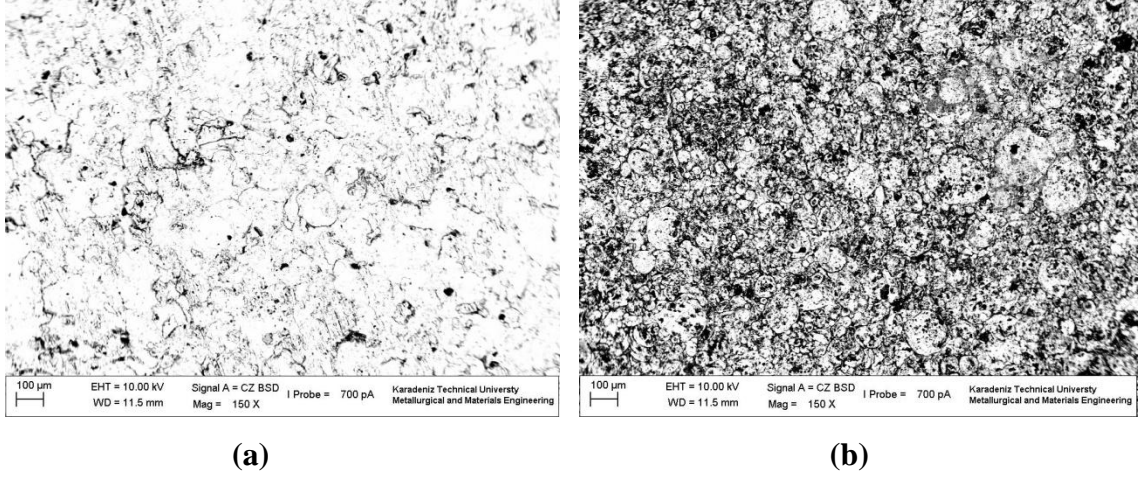
3.2. Ham Özelliklerin İncelenmesi

3.2.1. İçyapı İncelemeleri

Şekil 3.14 takviyesiz bakır numunenin ham içyapısını göstermektedir. Şekil 3.15-17'de nanokompozit numunelerin ham içyapıları verilmiştir.

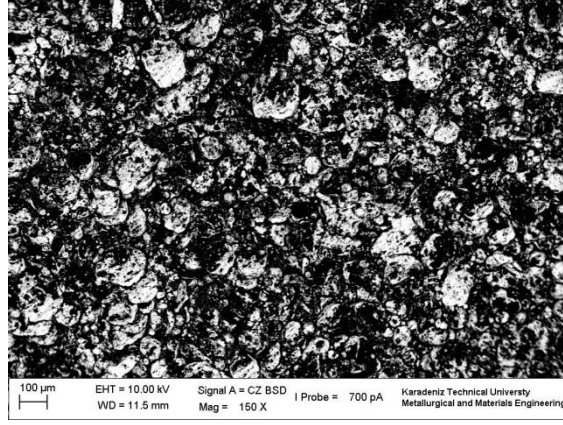


Şekil. 3.14 Bakır numuneye ait ham içyapı görüntüsü

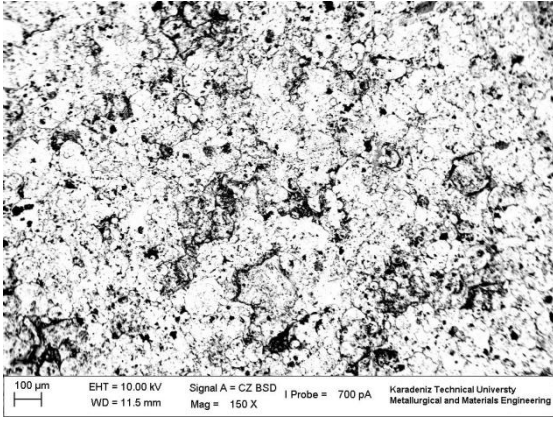


Şekil 3.15. Cu-Nanografite kompozitlerine ait ham içyapı görüntüleri; (a) GNP-2, (b) GNP- 5, (c) GNP -8

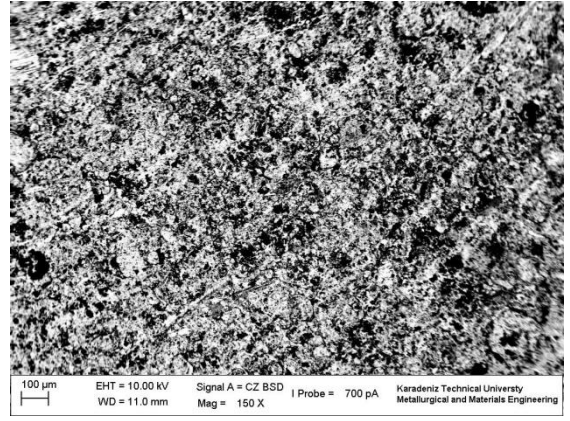
Şekil 3.15'in devamı



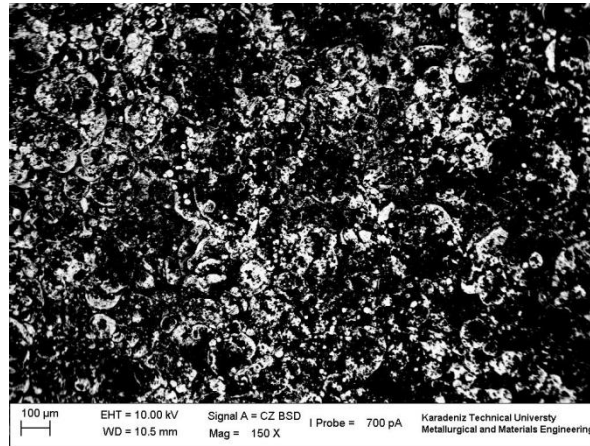
(c)



(a)

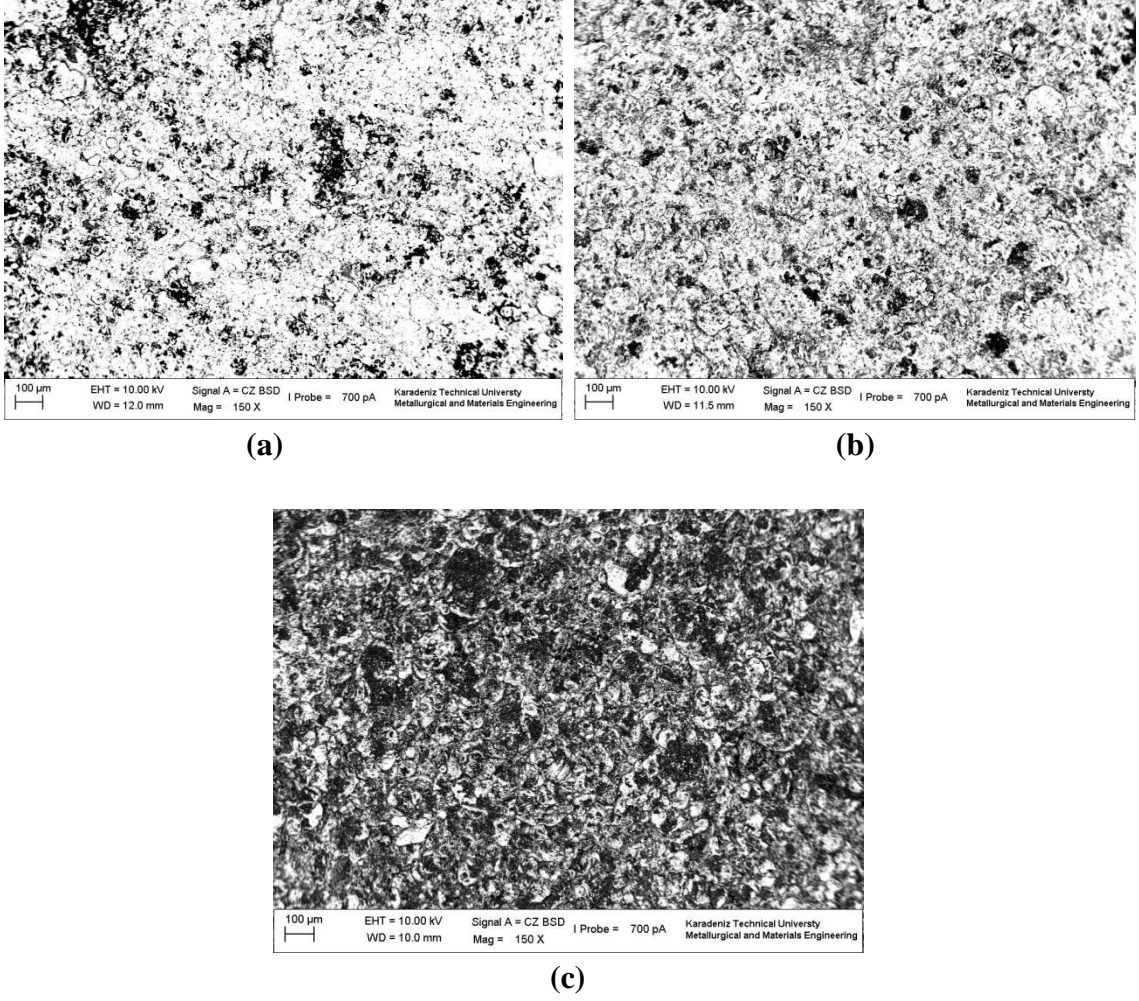


(b)



(c)

Şekil 3.16. Cu-Grafen nano levha kompozitlerine ait ham içyapı görüntüleri; (a) GRNL-2, (b) GRNL-5, (c) GRNL-8



Şekil 3.17. Cu-Karbon nano tüp kompozitlerine ait ham içyapı görüntüleri; (a) KNT-2, (b) KNT-5, (c) KNT-8

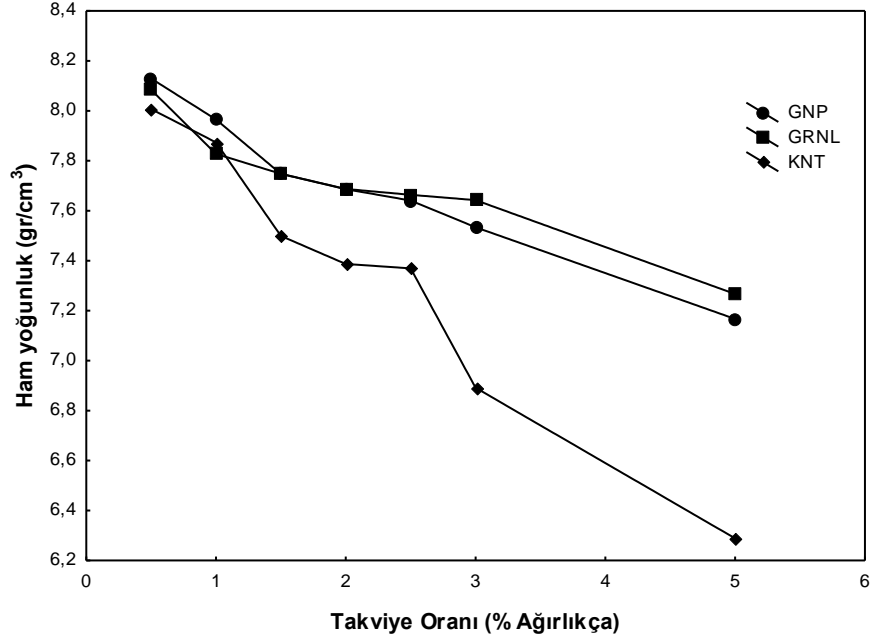
3.2.2. Ham numune Özellikleri

3.2.2.1. Yoğunluk

Şekil 3.18’de nanografite, grafen nanolevha ve karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin ham yoğunluk değerleri görülmektedir.

Tablo 3.1. Teorik yoğunluk değerleri

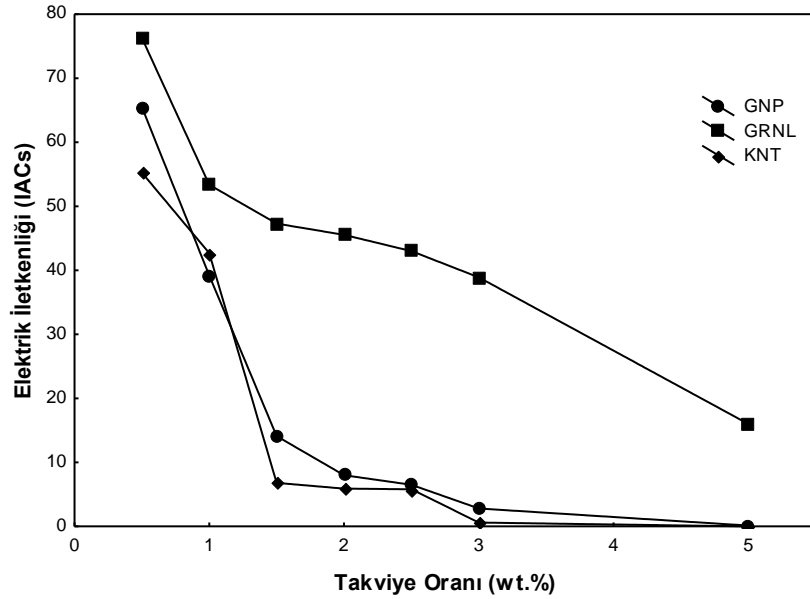
Kompozit türü	Takviye Oranı (% ağırlıkça)						
	%0.5	%1	%1.5	%2	%2.5	%3	%5
GNP	8.9063	8.8526	8.8389	8.8052	8.7715	8.7388	8.603
GRNL	8.9053	8.8706	8.8359	8.8012	8.7665	8.7318	8.593
KNT	8.9058	8.8716	8.8374	8.8032	8.7690	8.7348	8.598



Şekil 3.18. Ham yoğunluk değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi

3.2.2.2. Elektriksel İletkenlik

Yapılan ölçümler sonucunda ham bakır numenin iletkenlik değeri 84 IACs olarak tespit edilmiş olup şekil 3.19 elektrik iletkenliği değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimini göstermektedir.



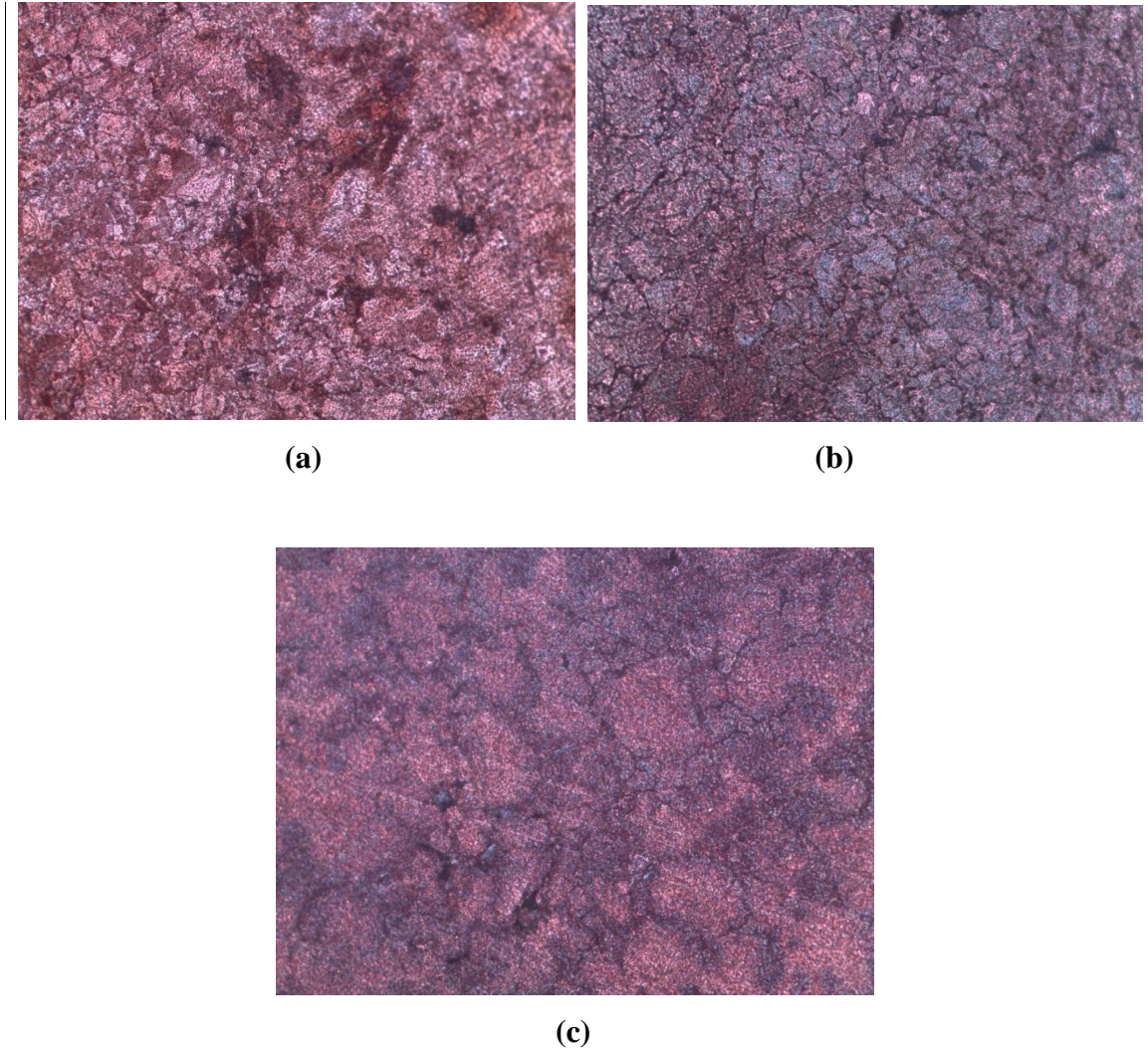
Şekil 3.19. İletkenlik değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi

3.3. Sinterleme Sonrası Özelliklerin İncelenmesi

3.3.1. İçyapı İncelemeleri

3.3.1.1. Makroyapı

Dağlama sonrası numune yüzeylerinden yapılan optik incelemeler Şekil 3.20-22'de verilmiştir.

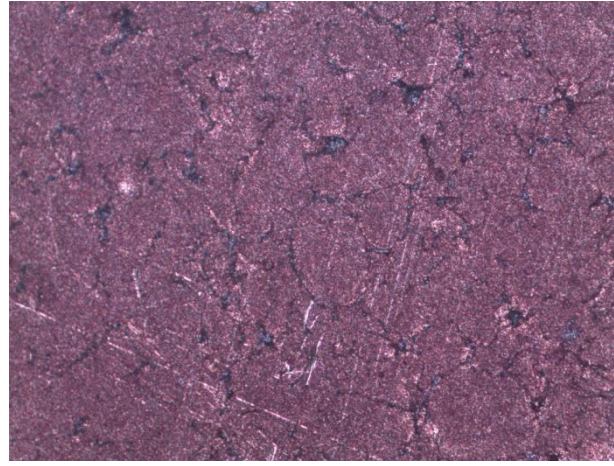


Şekil 3.20. Cu-Grafit nano partikül kompozitlerine ait makroyapı görüntüleri; (a) GNP-2, (b) GNP-5, (c) GNP-8



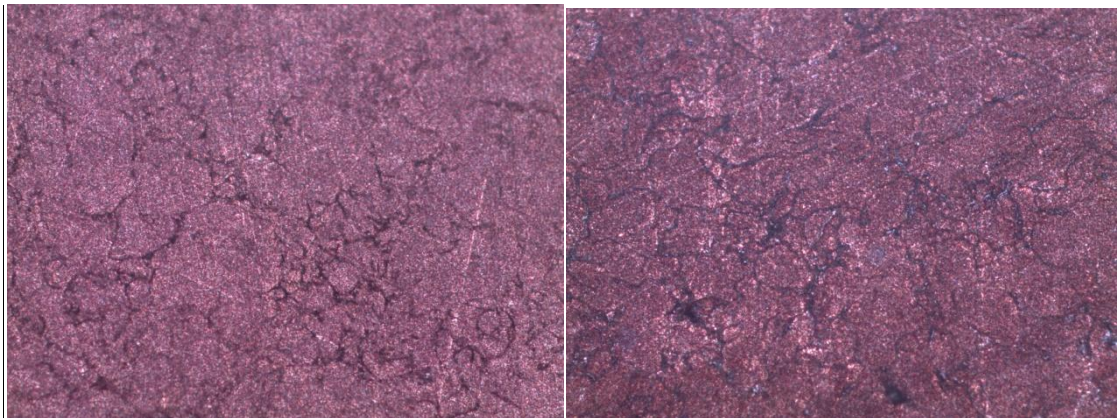
(a)

(b)



(c)

Şekil 3.21. Cu-Grafen nano levha kompozitlerine ait makroyapı görüntüleri; (a) GRNL-2, (b) GRNL-5, (c) GRNL-8

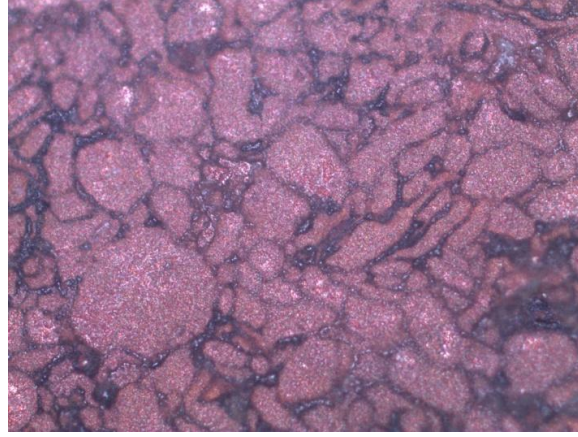


(a)

(b)

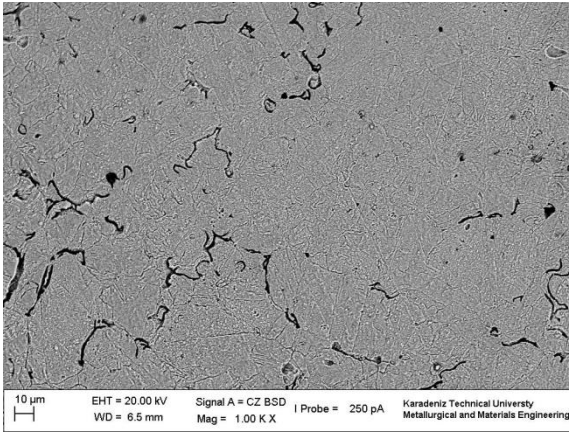
Şekil 3.22. Cu-Karbon Nanotüp kompozitlerine ait makroyapı görüntüleri; (a) KNT-2, (b) KNT-5, (c) KNT-8

Şekil 3.22'nin devamı

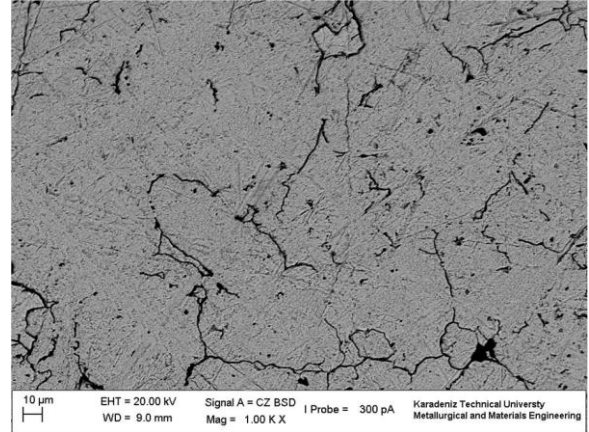


(c)

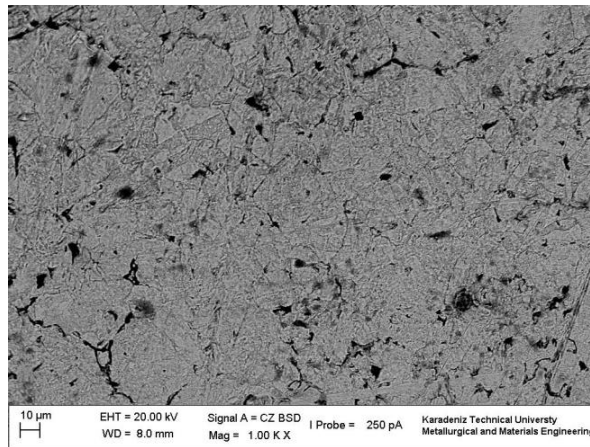
3.3.1.2. Mikroyapı



(a)

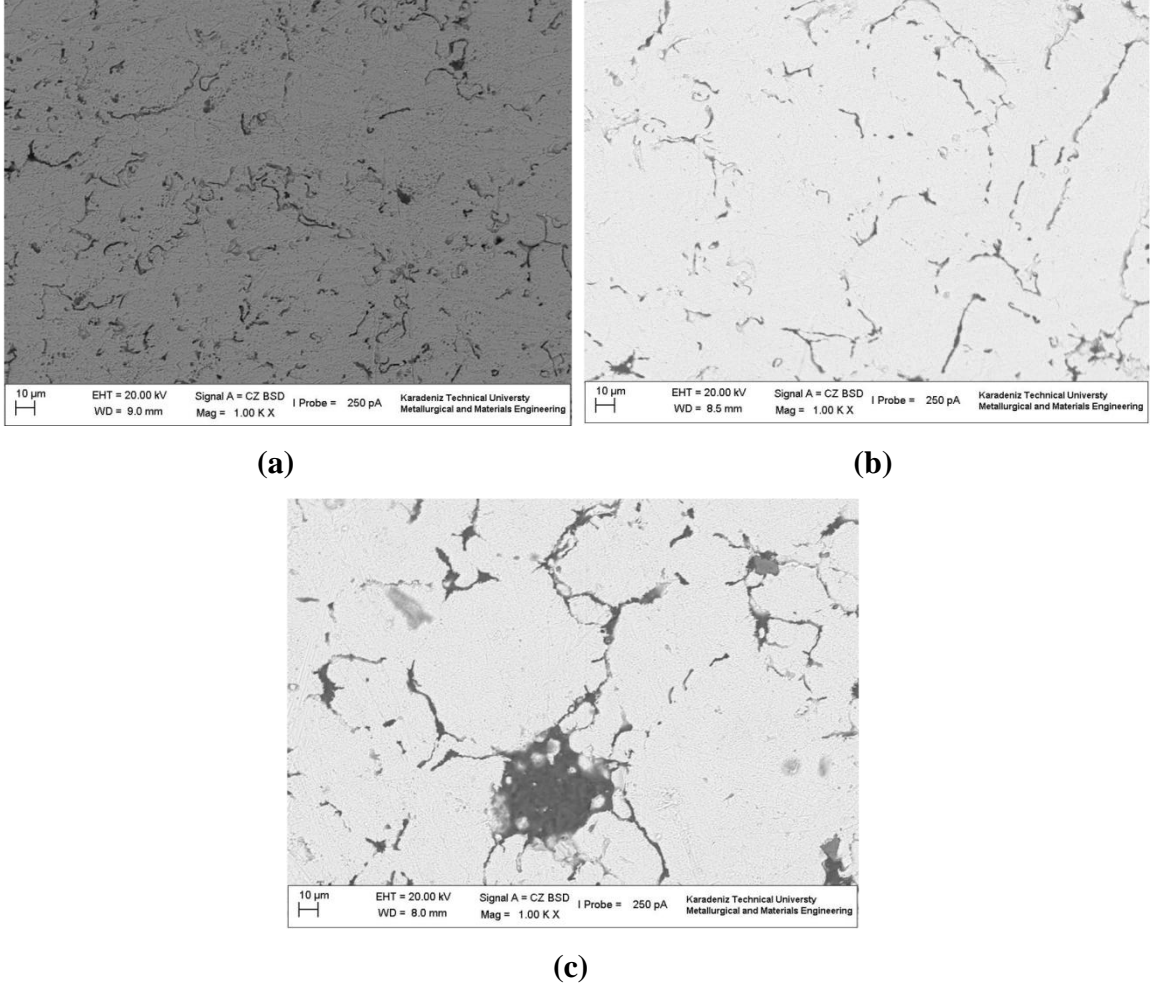


(b)

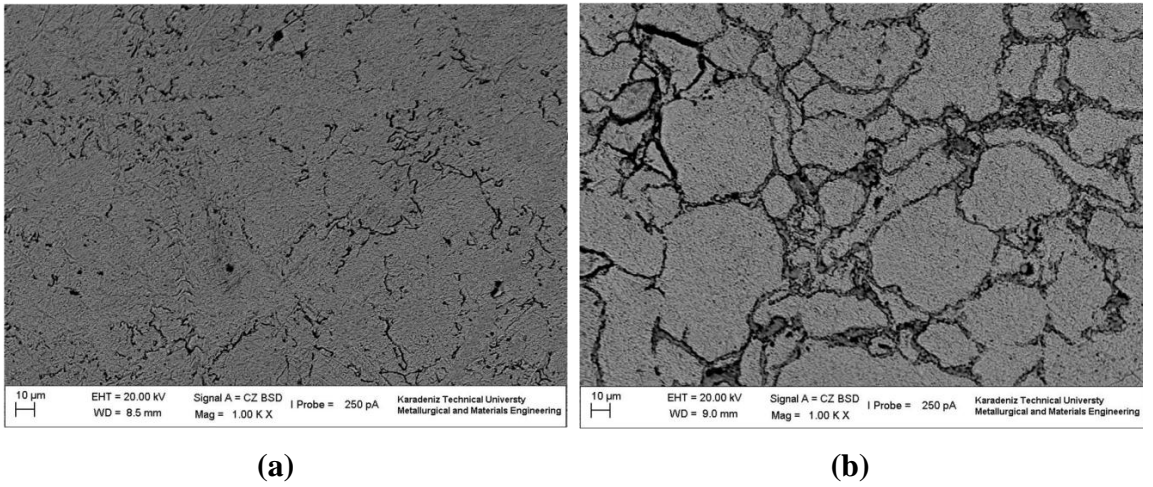


(c)

Şekil 3.23. Cu-Grafit nano partikül kompozitlerine ait mikroyapı görüntüleri; (a) GNP-2, (b) GNP-5, (c) GNP-8

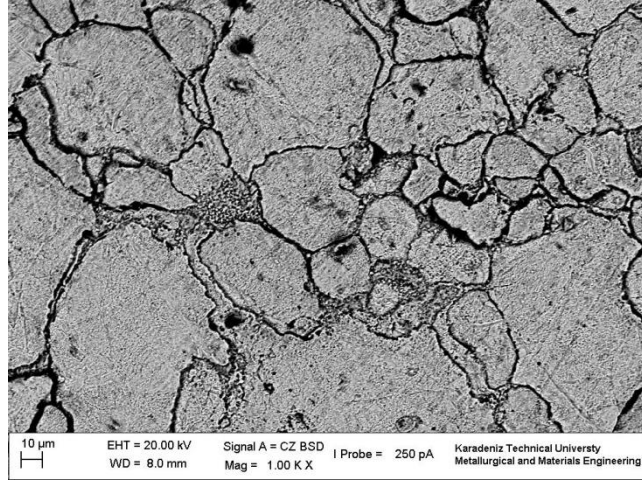


Şekil 3.24. Cu-Grafen nano levha kompozitlerine ait mikroyapı görüntüleri; (a) GRNL-2, (b) GRNL-5, (c) GRNL-8

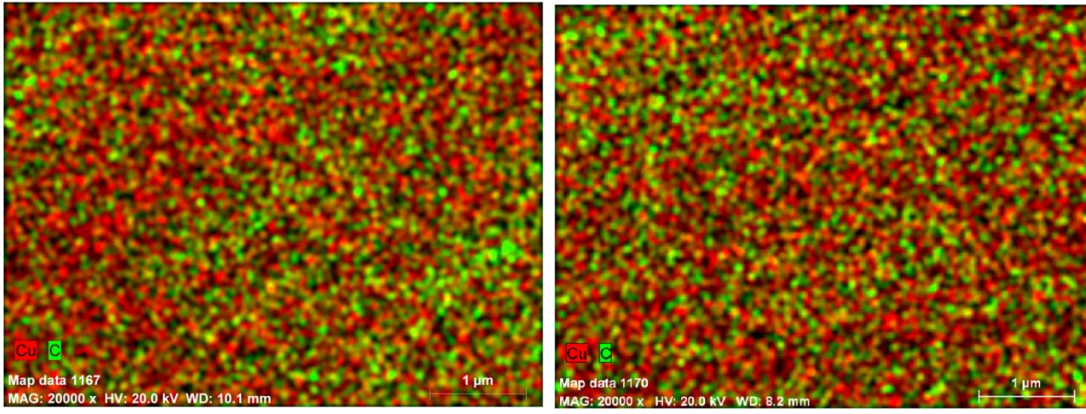


Şekil 3.25. Cu-Karbon nano tüp kompozitlerine ait mikroyapı görüntüleri; (a) KNT-2, (b) KNT-5, (c) KNT-8

Şekil 3.25'in devamı

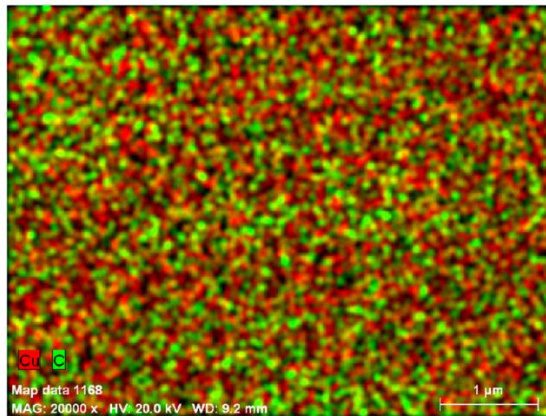


(c)



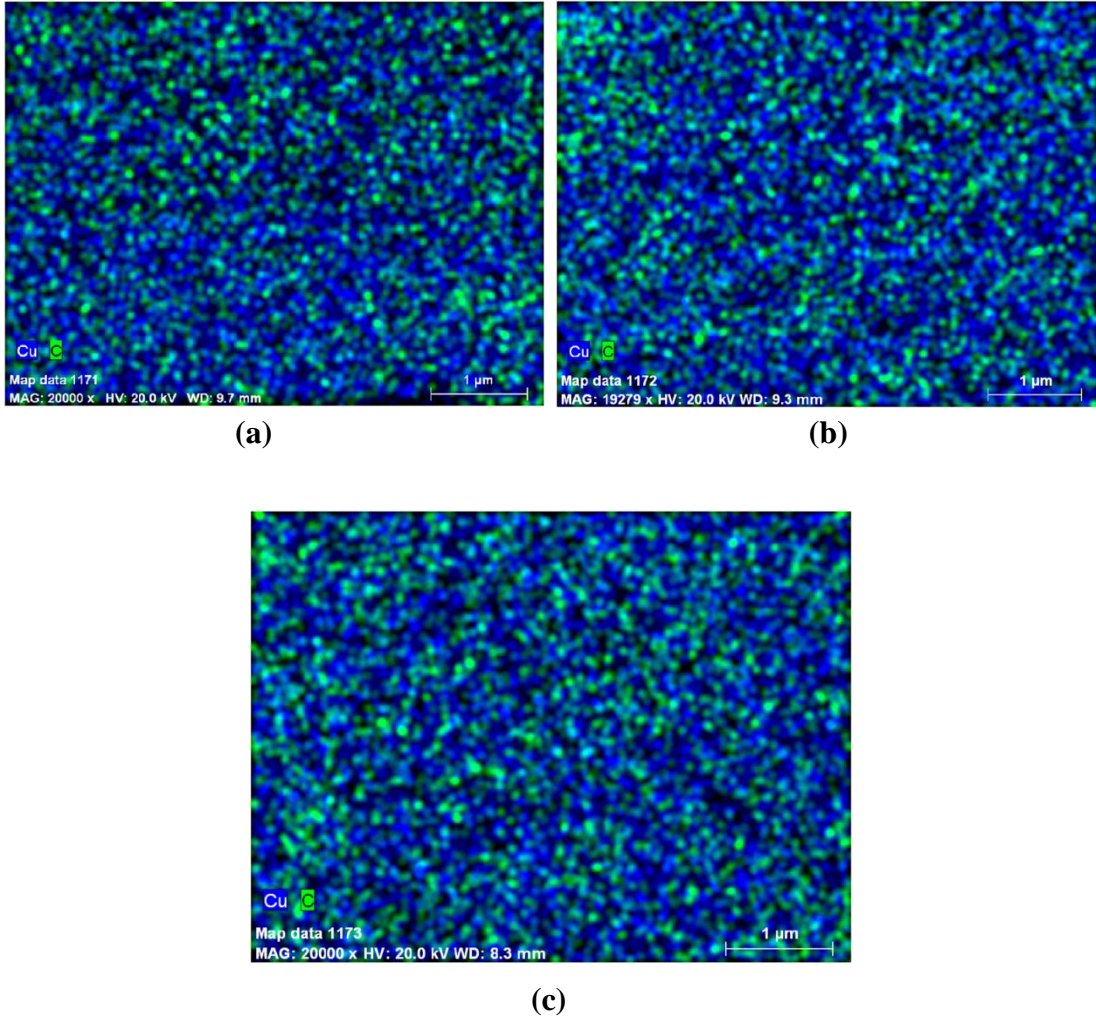
(a)

(b)

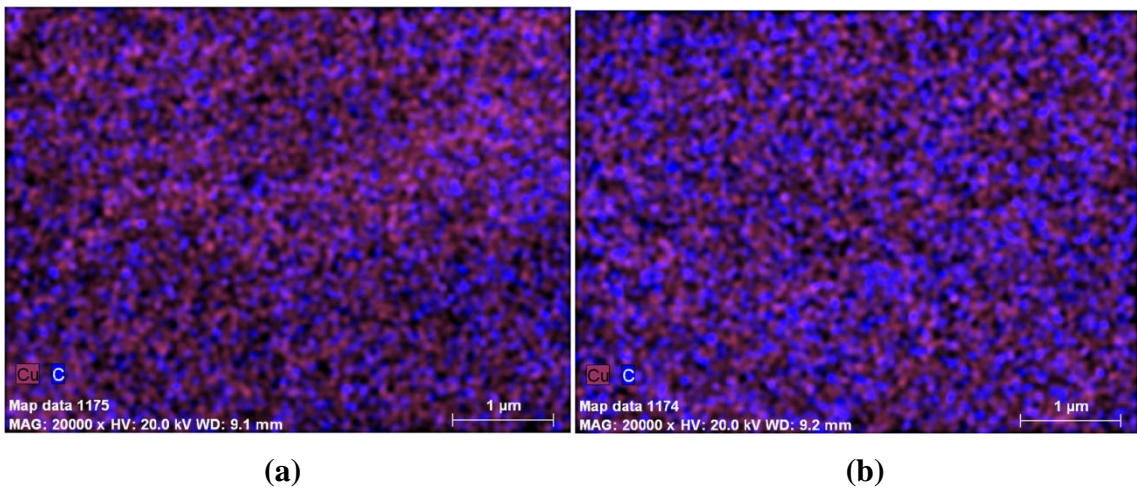


(c)

Şekil 3.26. Cu- Grafit nano partikül kompozitleri için elementel haritalama, (a) GNP-2, (b) GNP-5, c) GNP-8

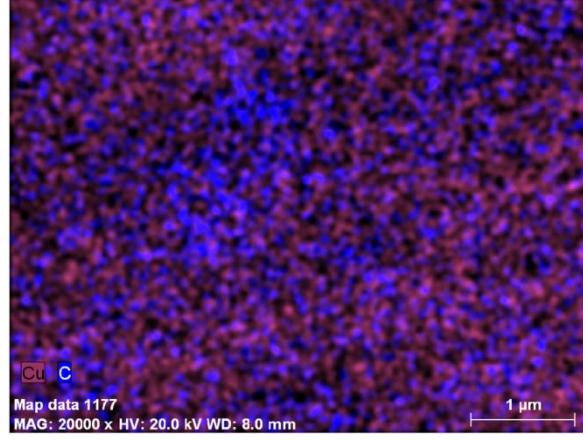


Şekil 3.27. Cu-Grafen nanolevha kompozitleri için elementel haritalama, (a) GRNL-2, (b) GRNL-5, (c) GRNL-8



Şekil 3.28. Cu-Karbon nanotüp kompozitleri için elementel haritalama, a) KNT-2, (b) KNT-5, c) KNT-8

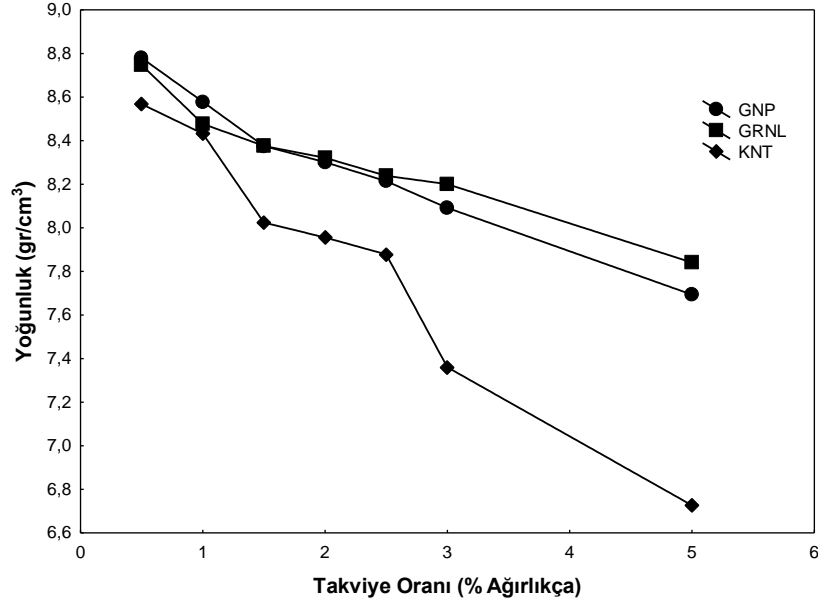
Şekil 3.28'in devamı



(c)

3.3.1.3. Yoğunluk

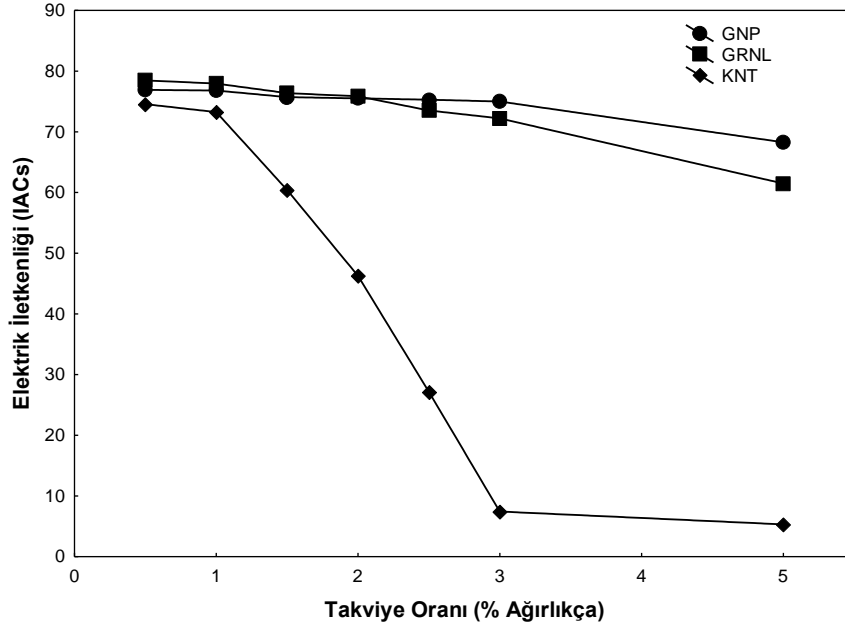
Sinterleme sonrası elde edilen yoğunluk değerleri şekil 3.29'da verilmiştir. Artan takviye oranı ile sinter yoğunlukları azalmakta özellikle ağırlıkça % 2.5 oranından sonra bu azalış oranı daha da artmaktadır.



Şekil 3.29. Sinterleme sonrası elde edilen yoğunluk değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi

3.3.1.4. Elektrik iletkenliği

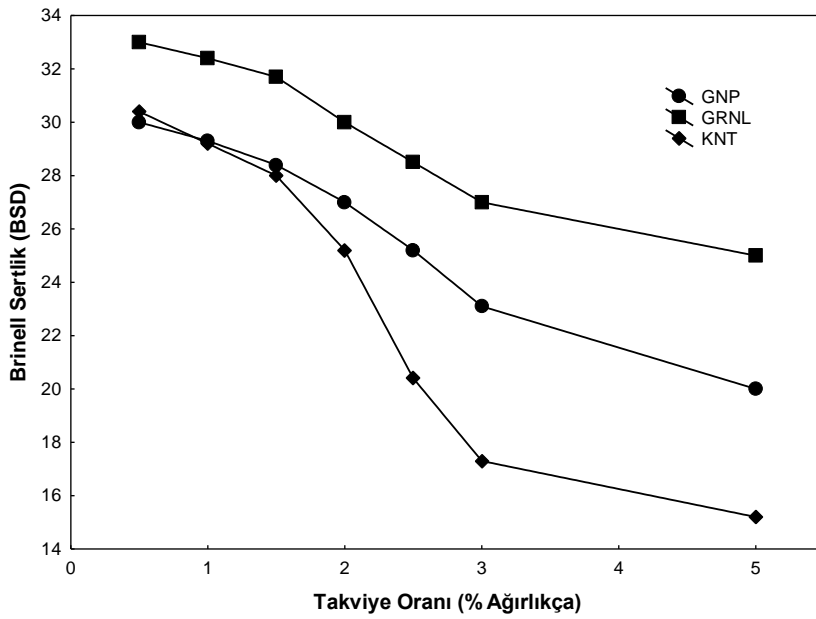
Şekil 3.30'da sinterleme sonrası iletkenlik değerlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 3.30. Sinterleme sonrası elde edilen iletkenlik değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi

3.3.1.5. Sertlik

Şekil 3.31’de nanokompozitlerin sertlik değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı gibi grafen nanolevha takviyeli nanokompozitlerin sertlik değerleri diğer nanokompozit türlerinin sertlik değerlerinden daha yüksektir.

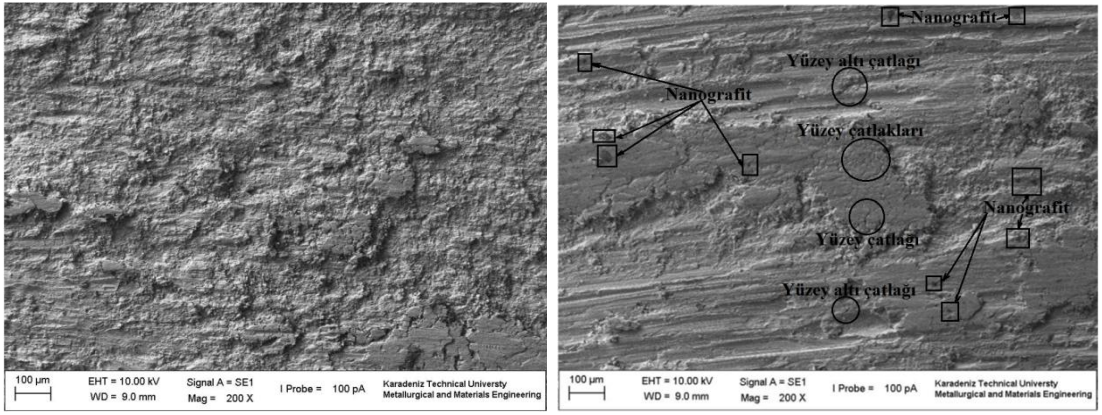


Şekil 3.31. Sertlik değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi

3.4. Aşınma Davranışı

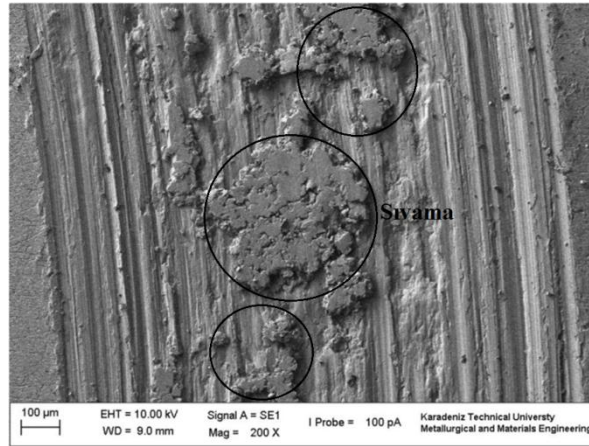
3.4.1. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Aşağıdaki şekillerde (şekil 3.32-3.40) verilen aşınma yüzeyleri incelendiğinde bütün takviye türleri, oranları ve yükler için ana aşınma mekanizmalarının plastik deformasyon kaynaklı adhesiv aşınma ve delemantasyon aşınması olduğu anlaşılmaktadır.



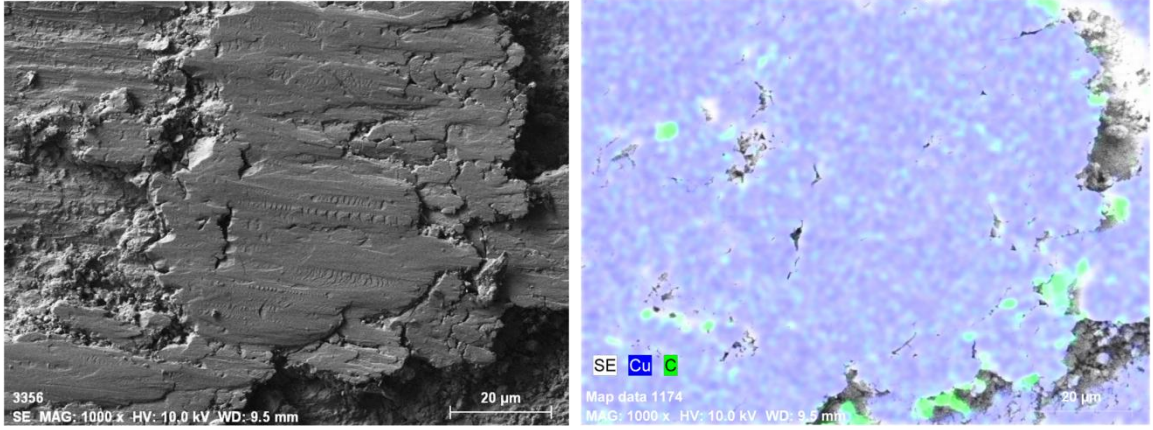
(a)

(b)



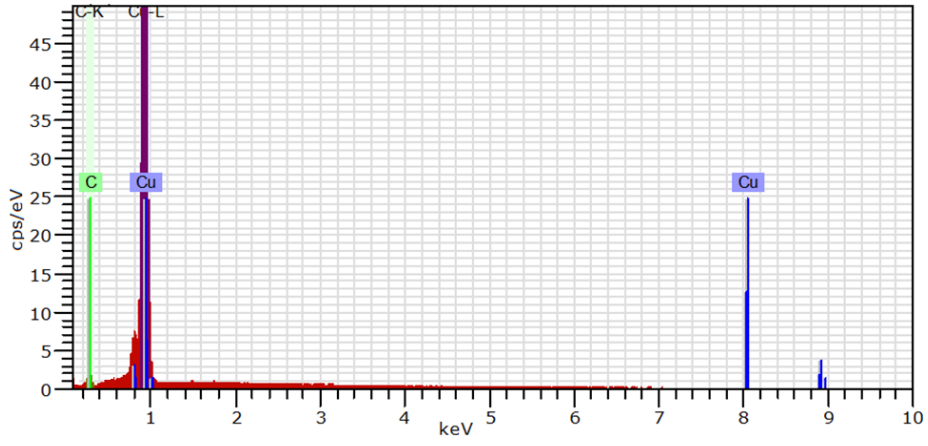
(c)

Şekil 3.32. 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri; (a) GNP-2, (b) GNP-5, (c) GNP-8

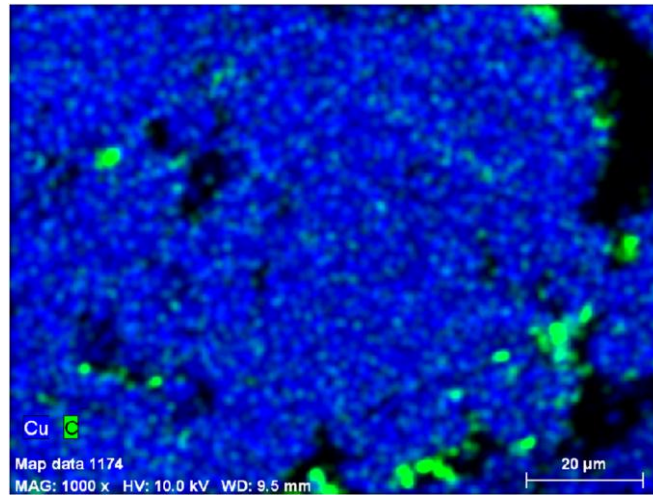


(a)

(b)



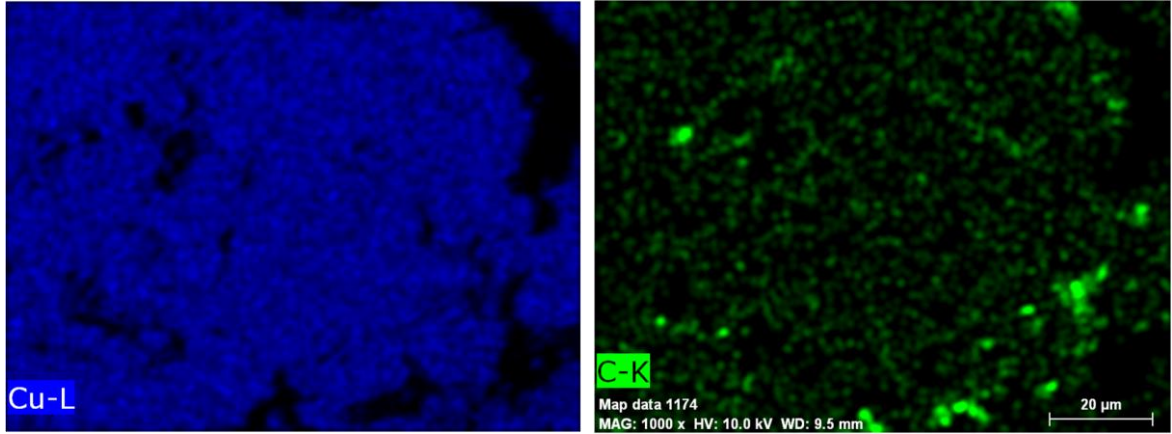
(c)



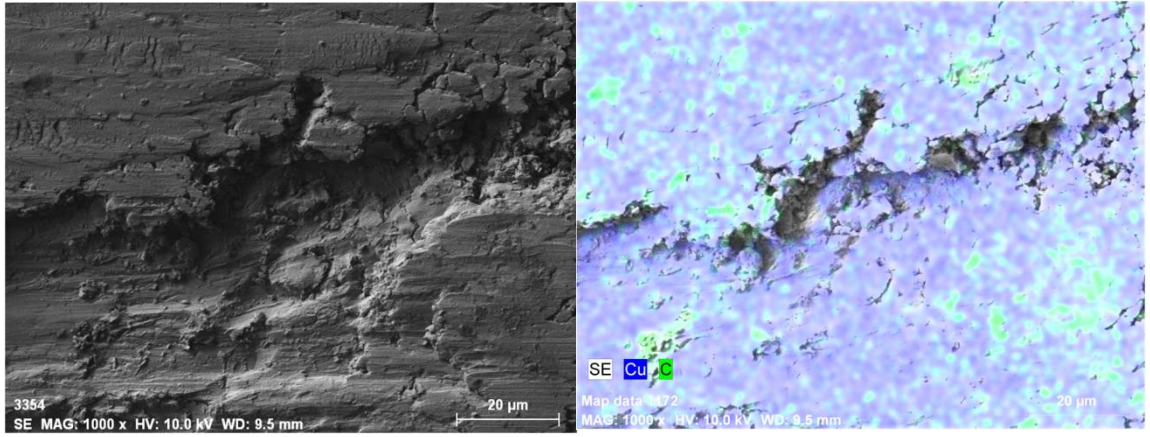
(d)

Şekil 3.33. GNP-2 kodlu kompozit malzemeler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

Şekil 3.33'ün devamı

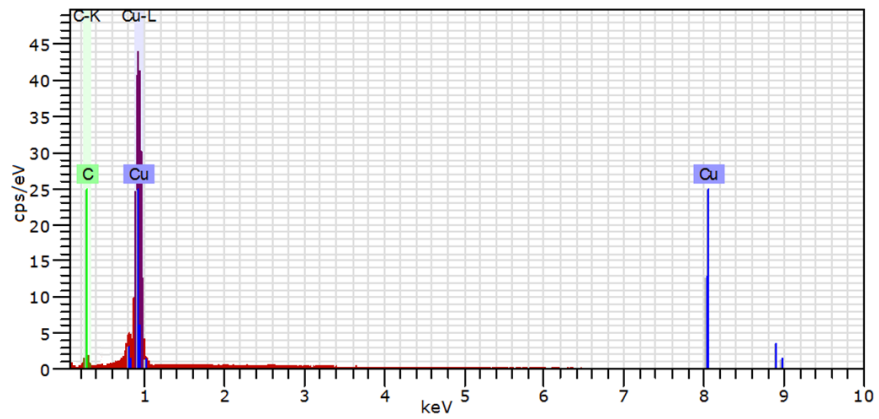


(e)



(a)

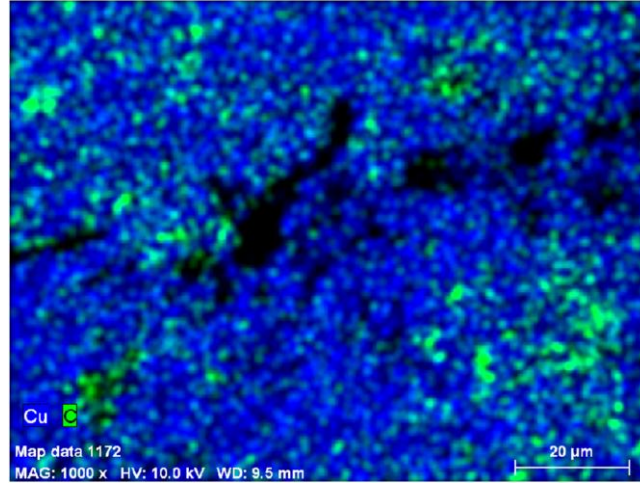
(b)



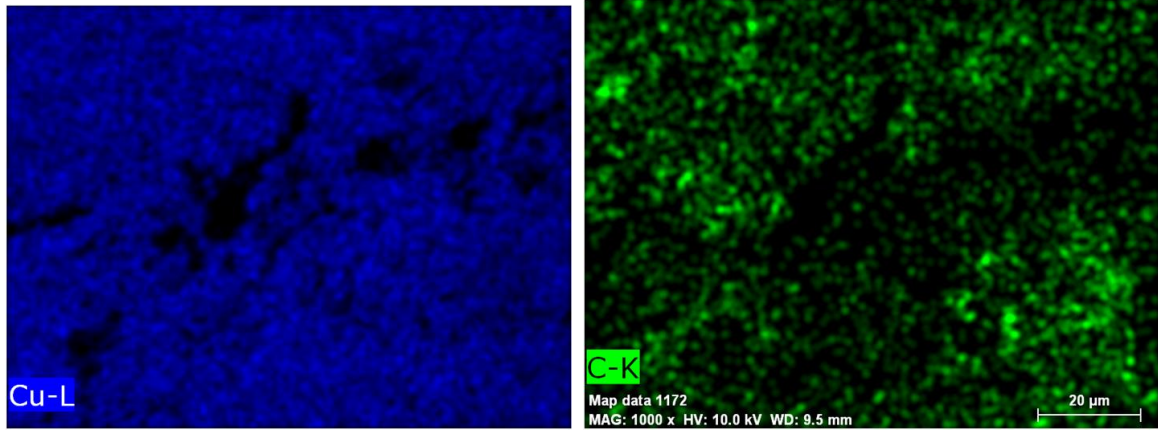
(c)

Şekil 3.34. GNP-5 kodlu kompozit malzemler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

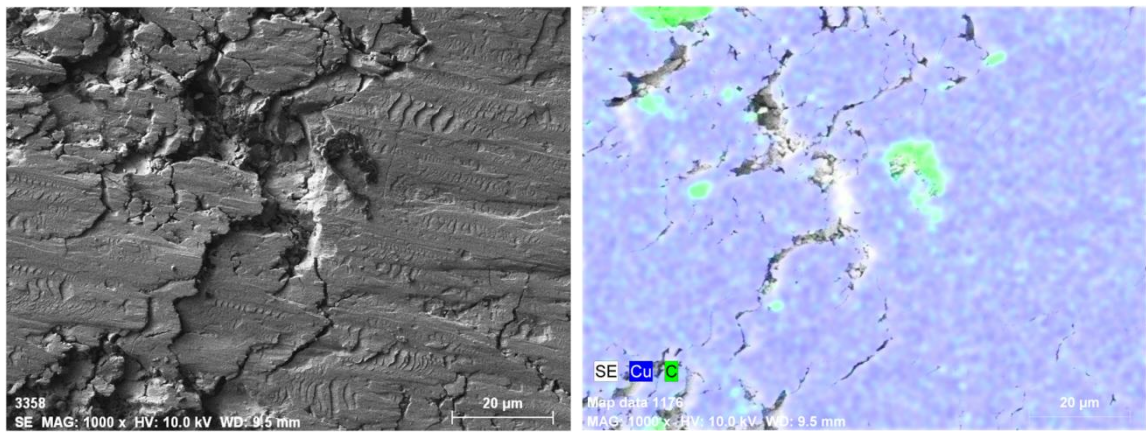
Şekil 3.34'ün devamı



(d)



(e)

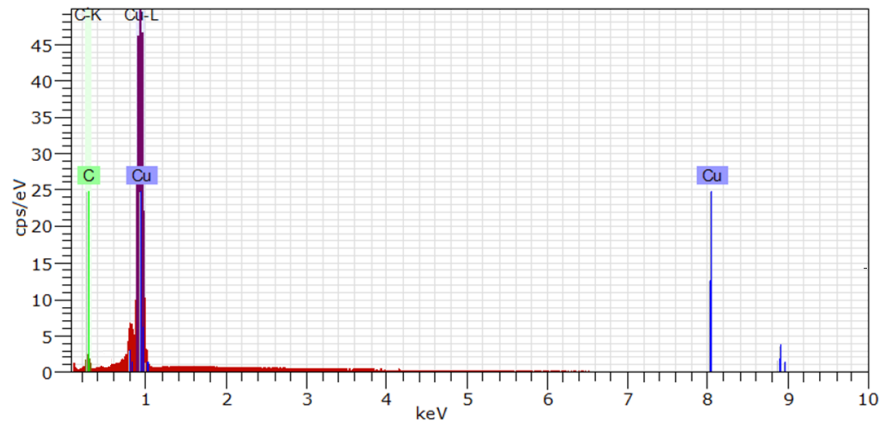


(a)

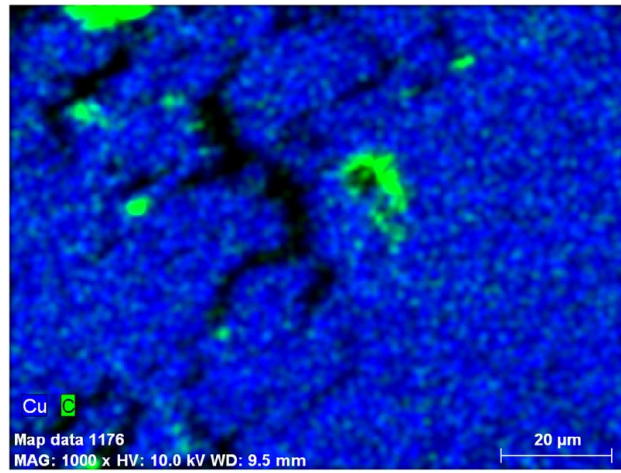
(b)

Şekil 3.35. GNP-8 kodlu kompozit malzemler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

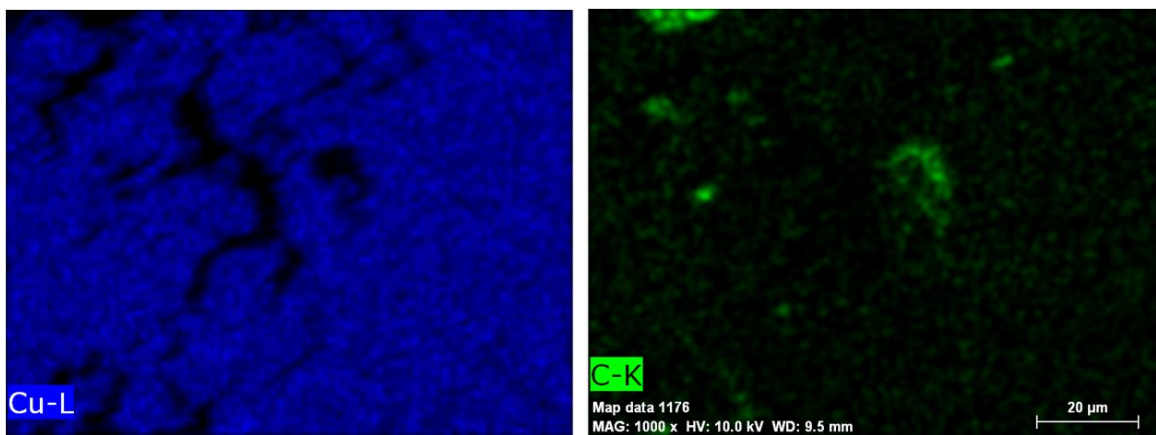
Şekil 3.35'in devamı



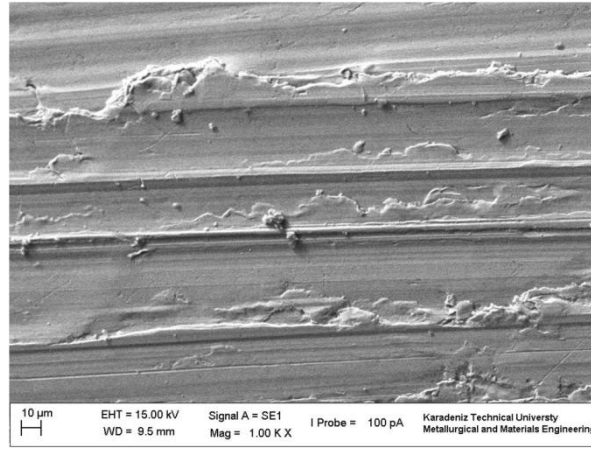
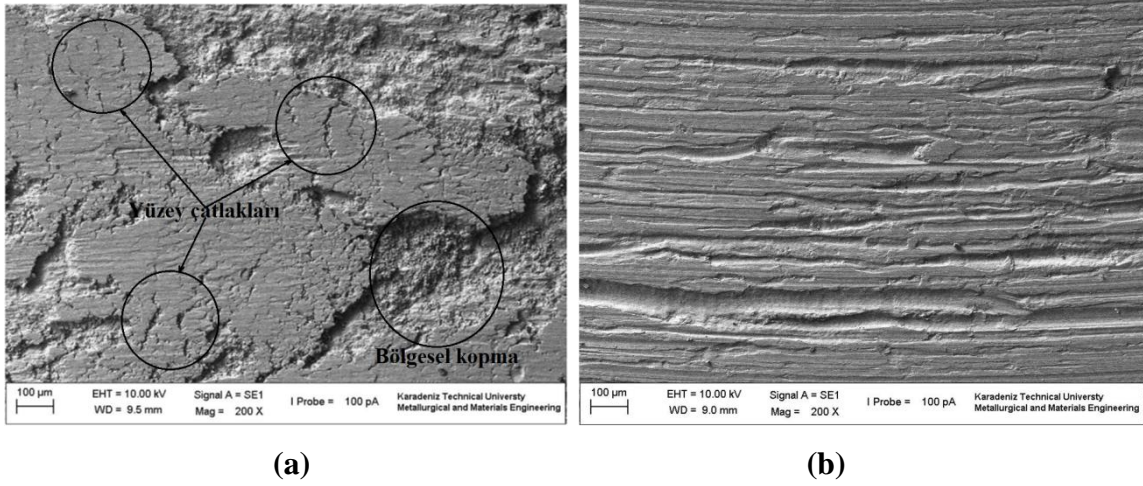
(c)



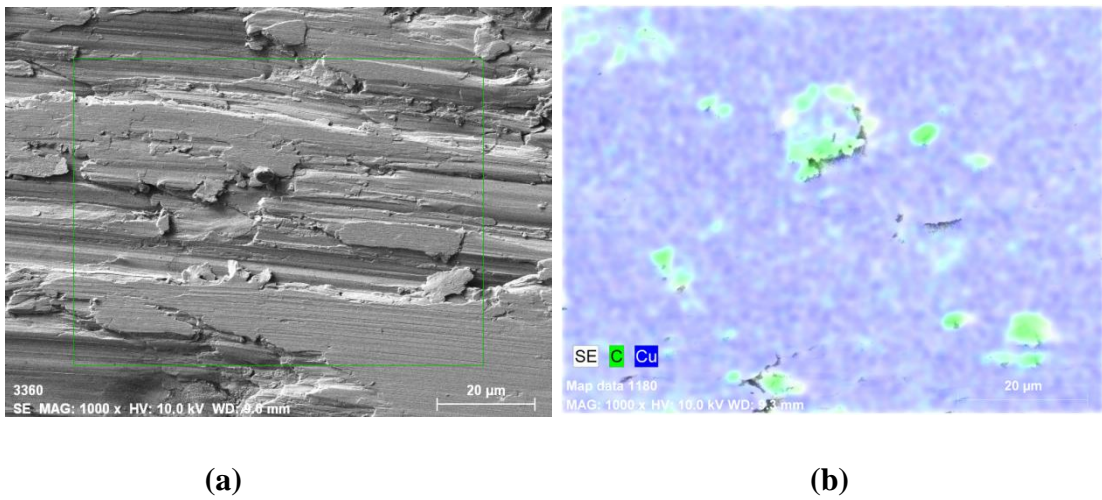
(d)



(e)

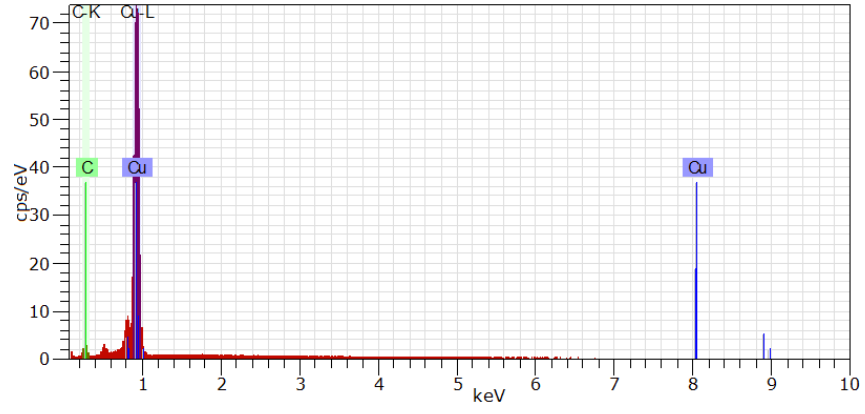


Şekil 3.36. 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri; (a) GRNL-2, (b) GRNL-5, (c) GRNL-8

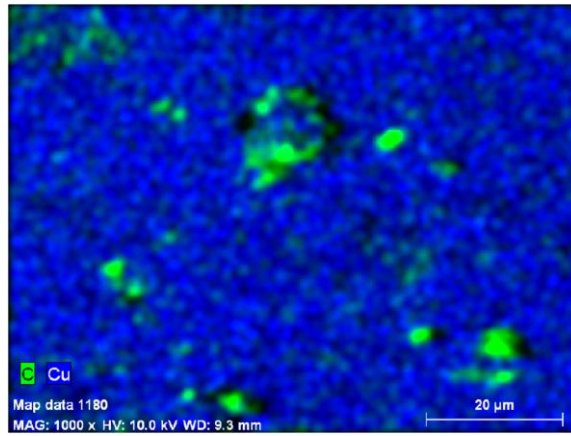


Şekil 3.37. GRNL-2 kodlu kompozit malzemler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

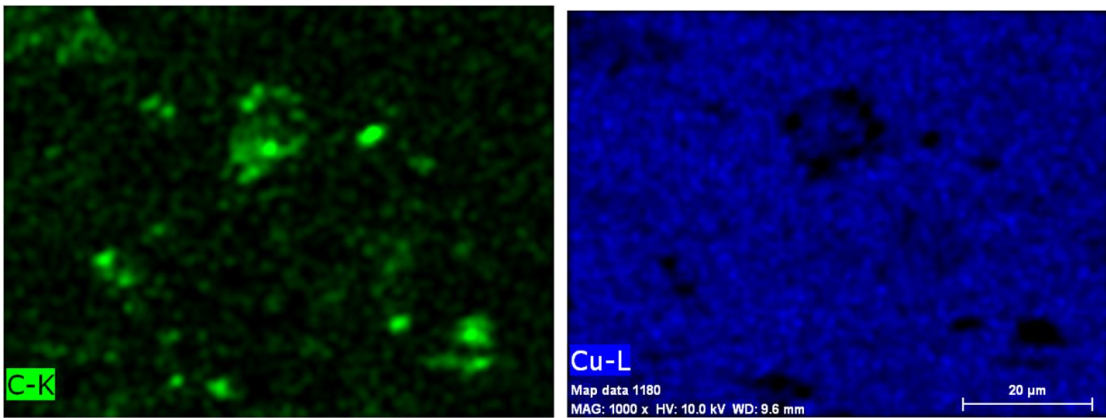
Şekil 3.37'nin devamı



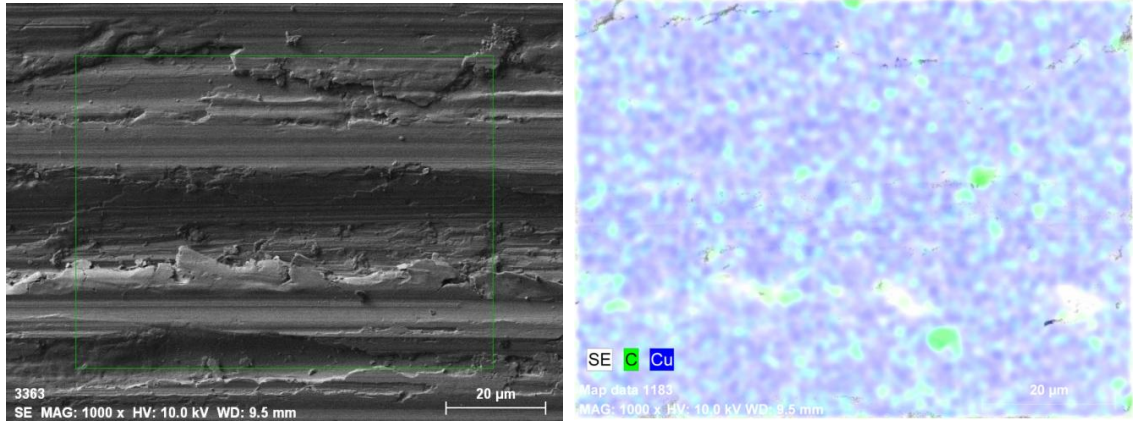
(c)



(d)

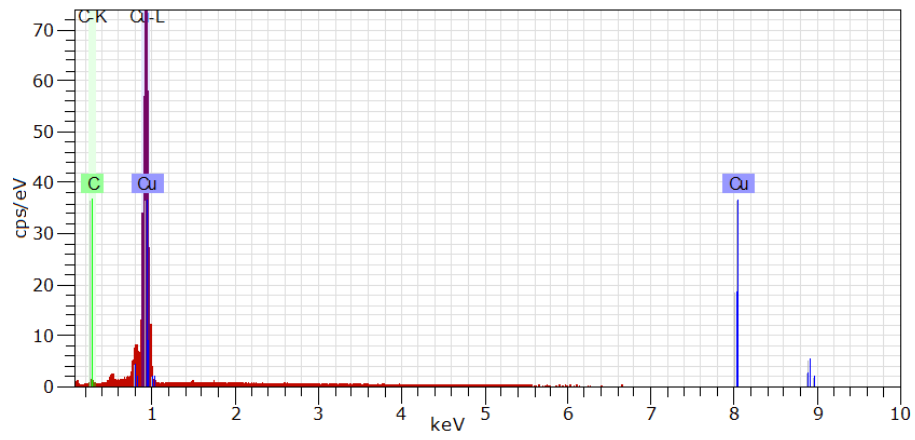


(e)

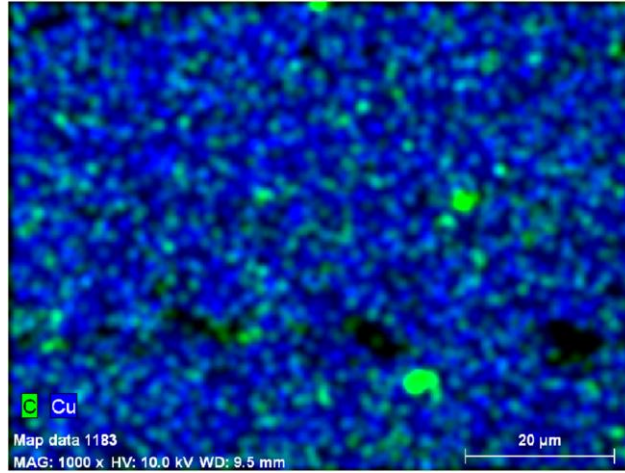


(a)

(b)



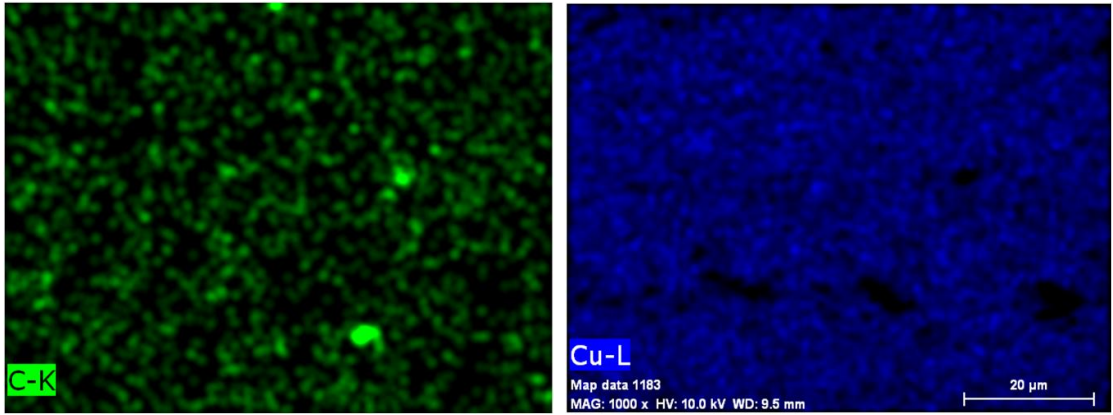
(c)



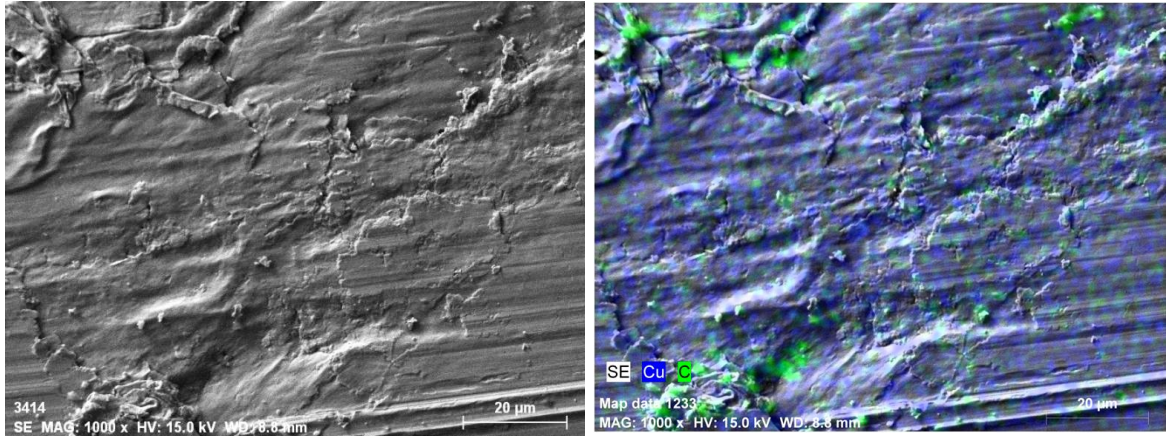
(d)

Şekil 3.38. GRNL-5 kodlu kompozit malzemler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

Şekil 3.38'in devamı

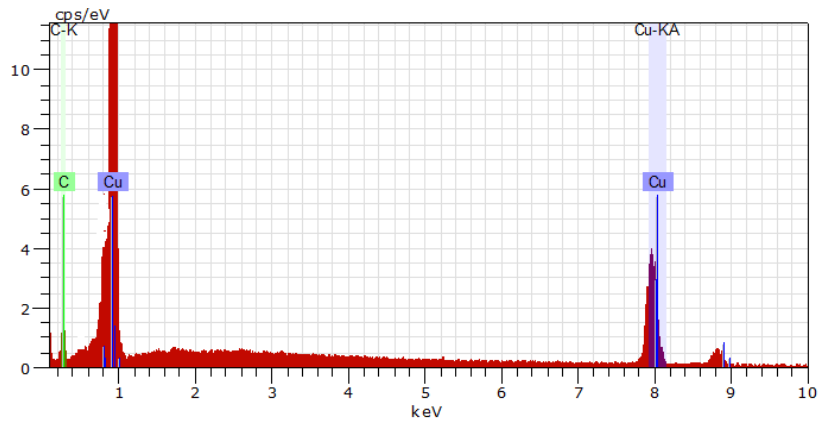


(e)



(a)

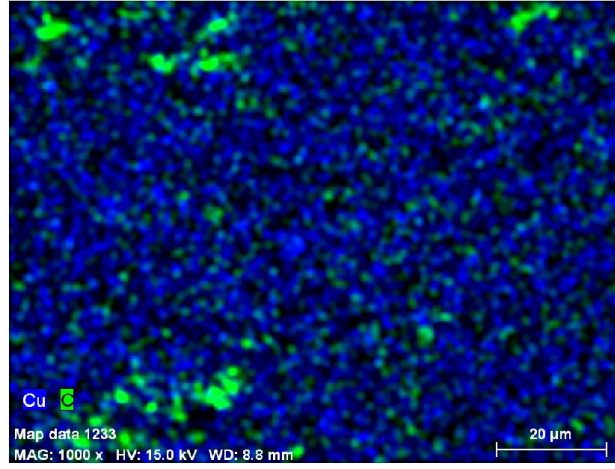
(b)



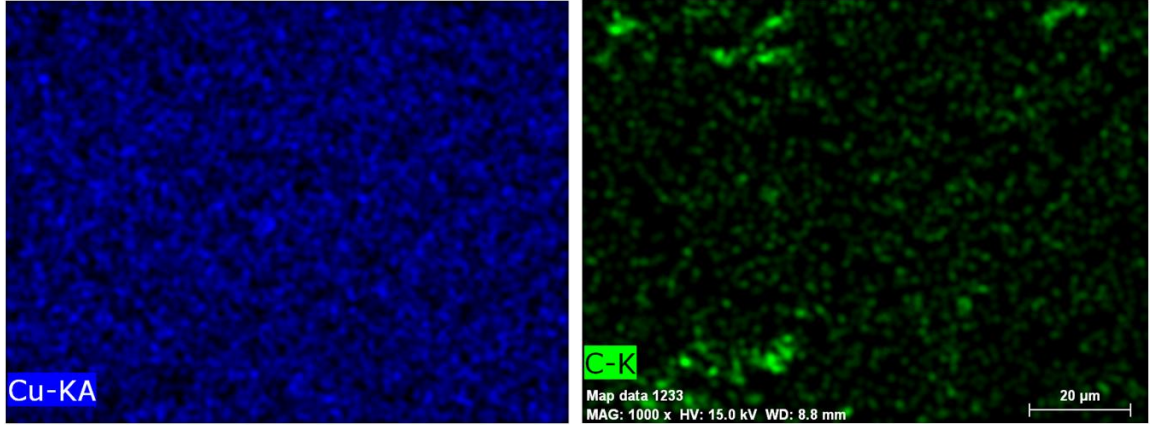
(c)

Şekil 3.39. GRNL-8 kodlu kompozit malzemeler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

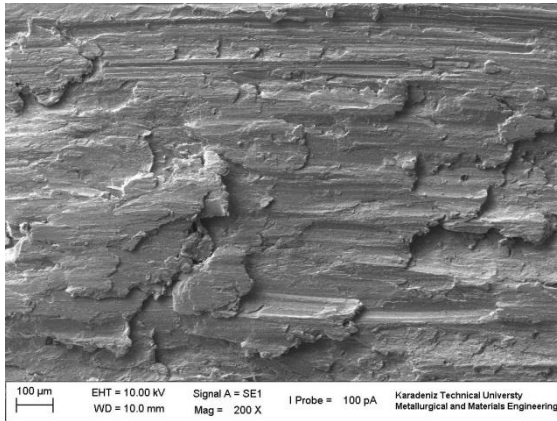
Şekil 3.39'un devamı



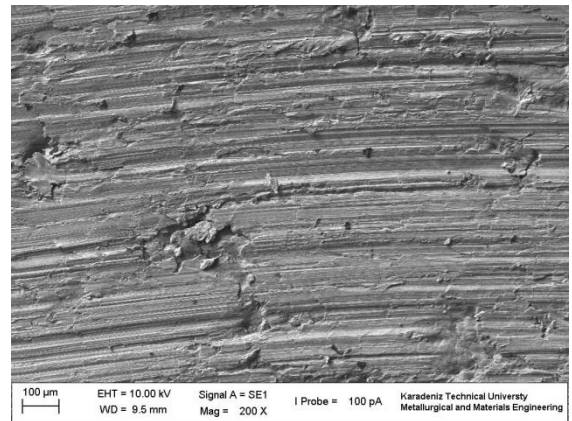
(d)



(e)



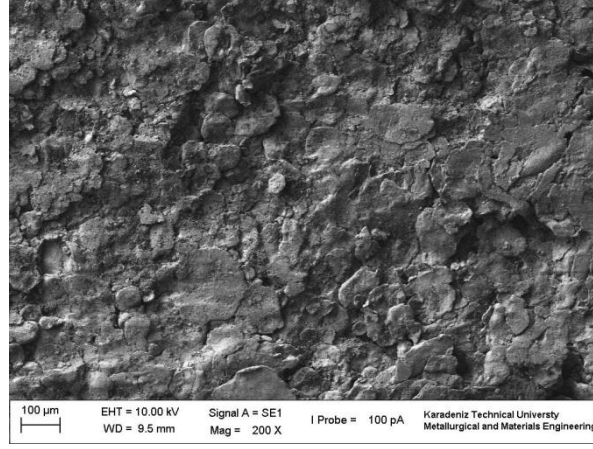
(a)



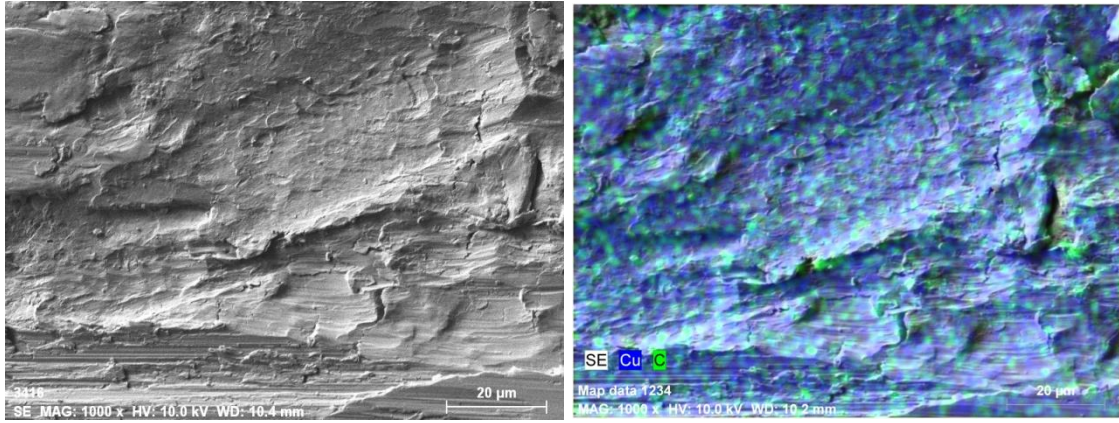
(b)

Şekil 3. 40. 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri; (a) KNT-2, (b) KNT -5, (c) KNT-8

Şekil 3.41'in devamı

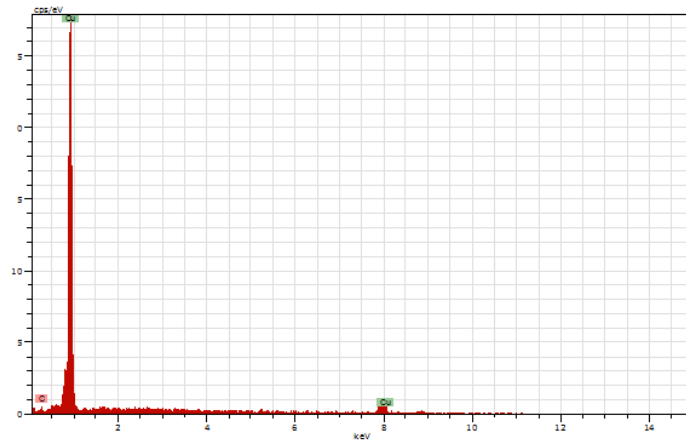


(c)



(a)

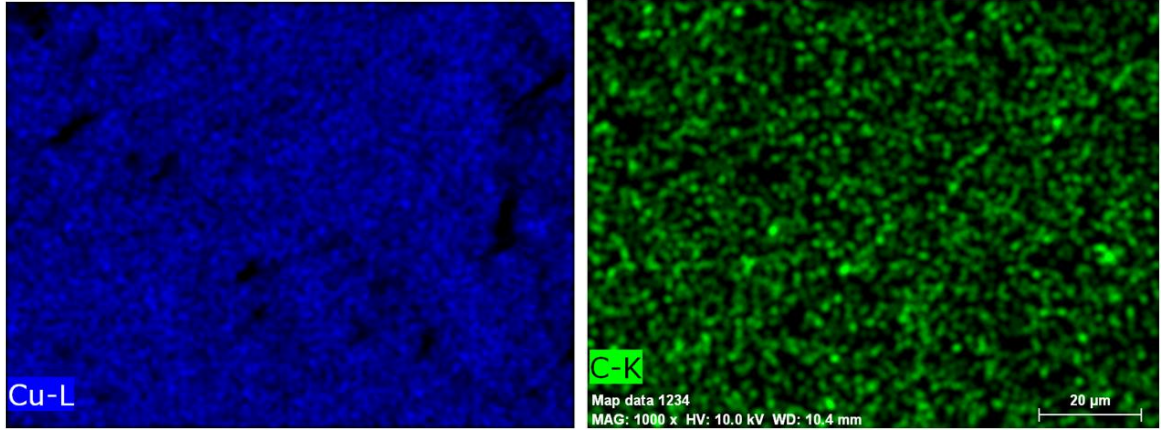
(b)



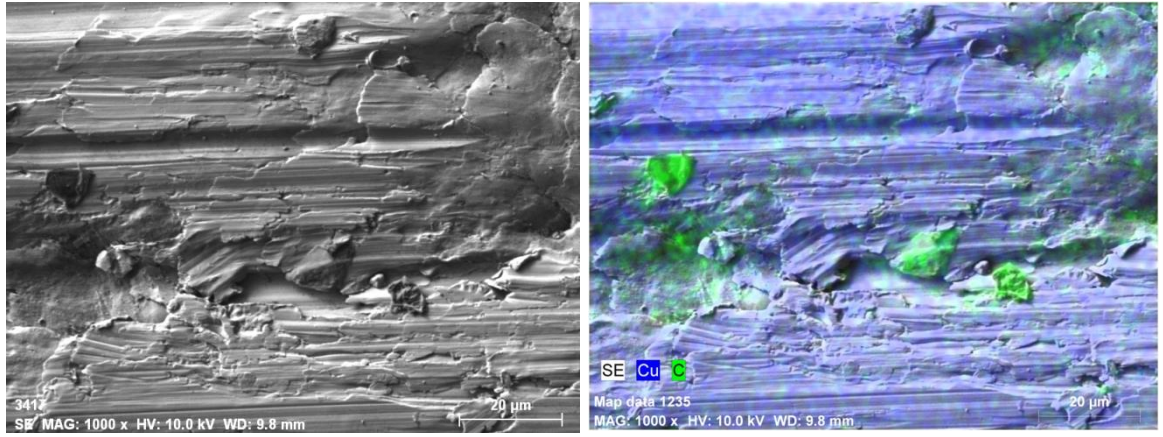
(c)

Şekil 3.41. KNT-2 kodlu kompozit malzemler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

Şekil 3.41'in devamı

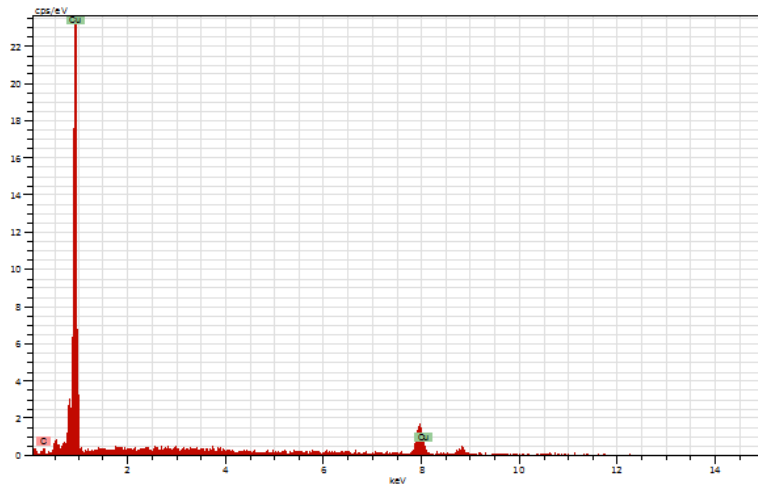


(d)



(a)

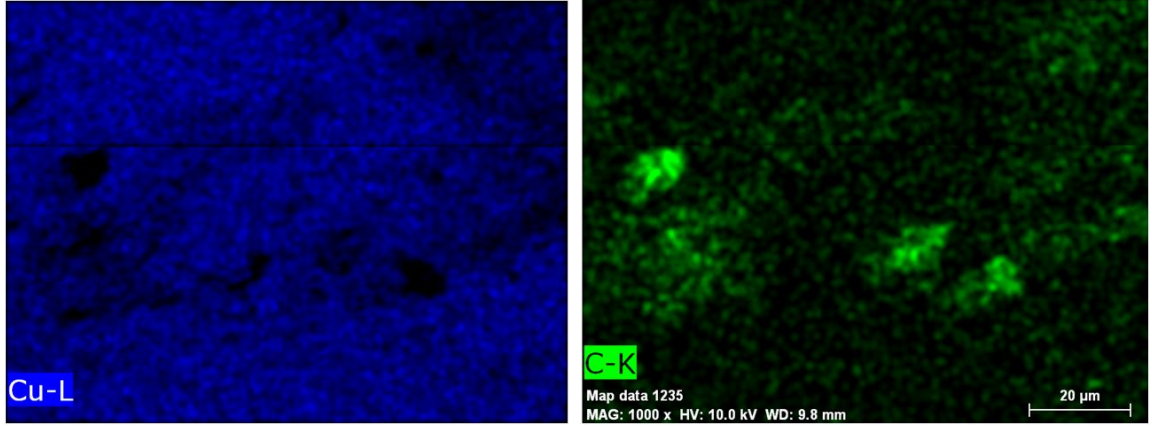
(b)



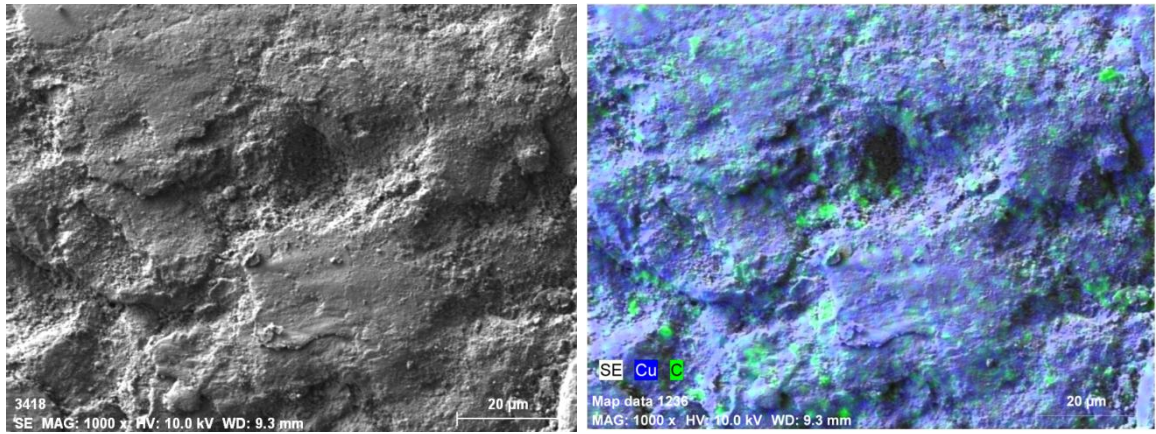
(c)

Şekil 3.42. KNT-5 kodlu kompozit malzemler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

Şekil 3.42'nin devamı

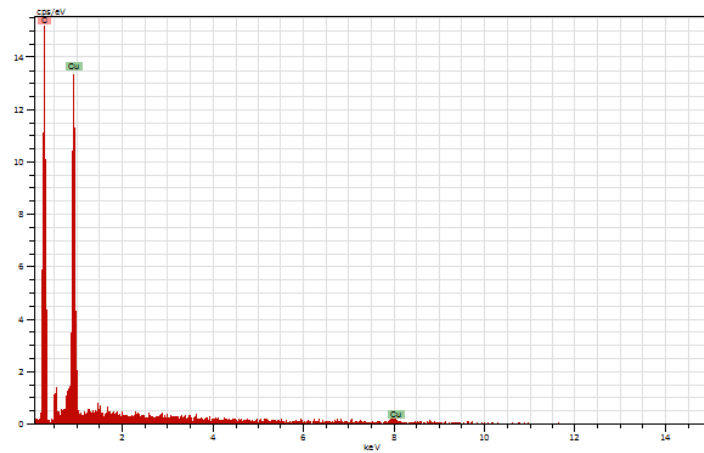


(d)



(a)

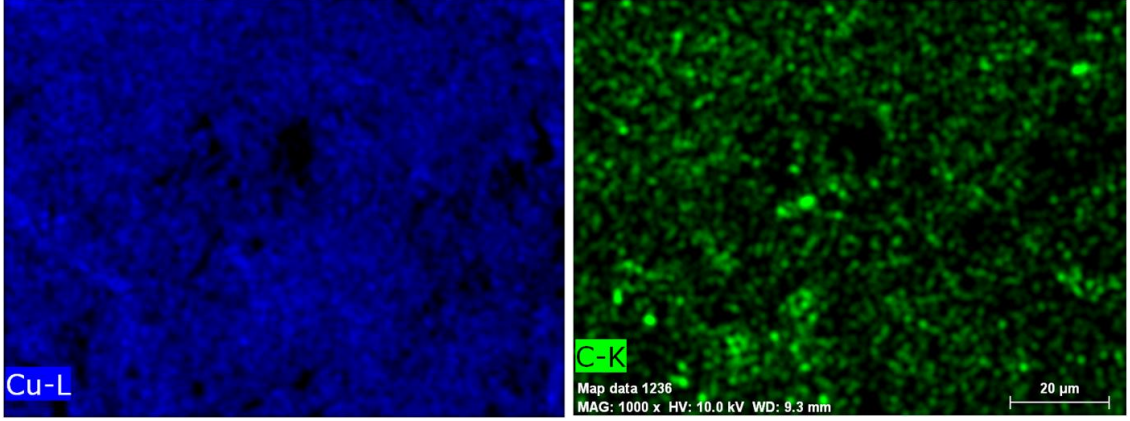
(b)



(c)

Şekil 3.43. KNT-8 kodlu kompozit malzemler için 5N yük ve 200m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyi için elementel analiz

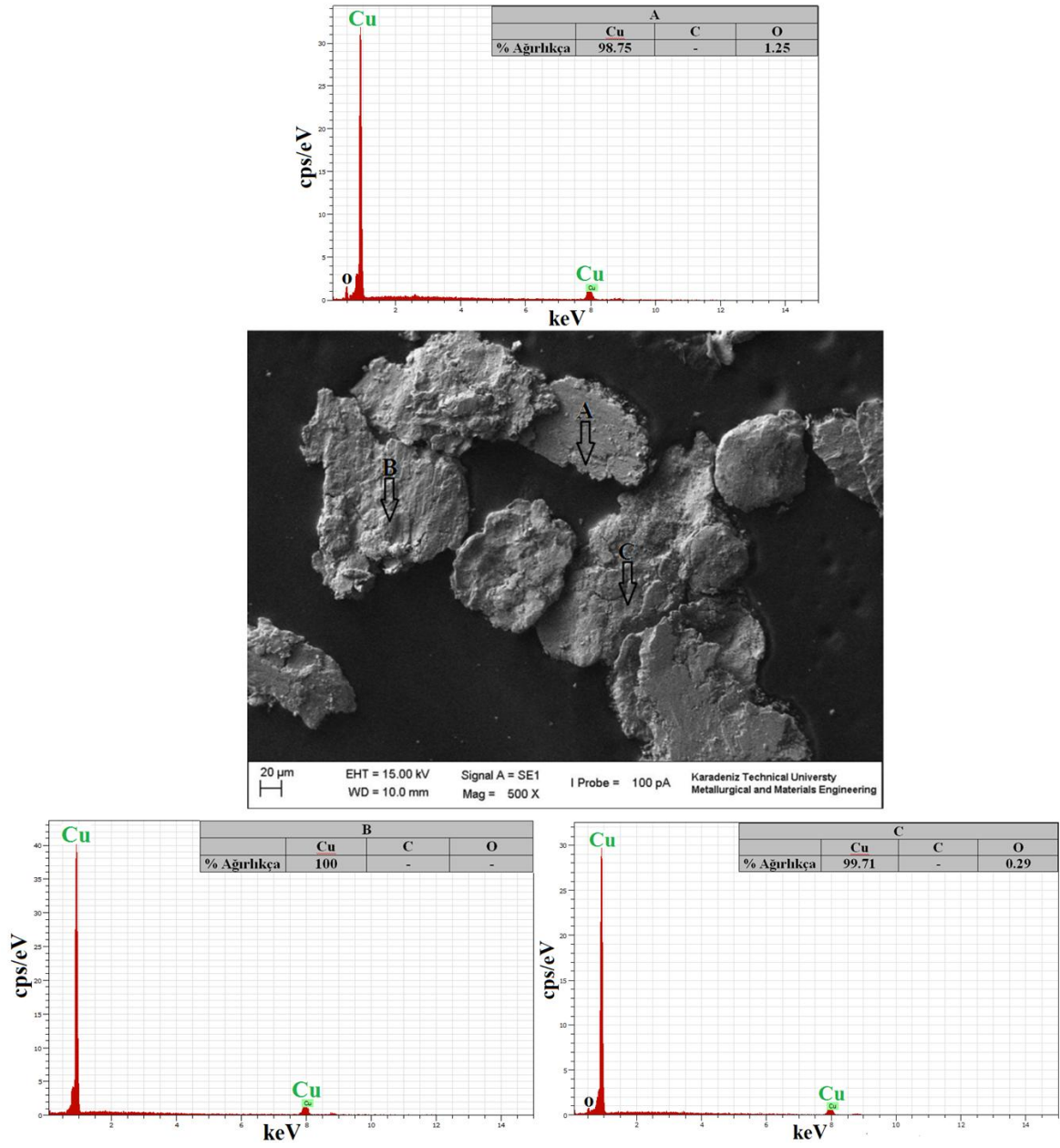
Şekil 3.43'ün devamı



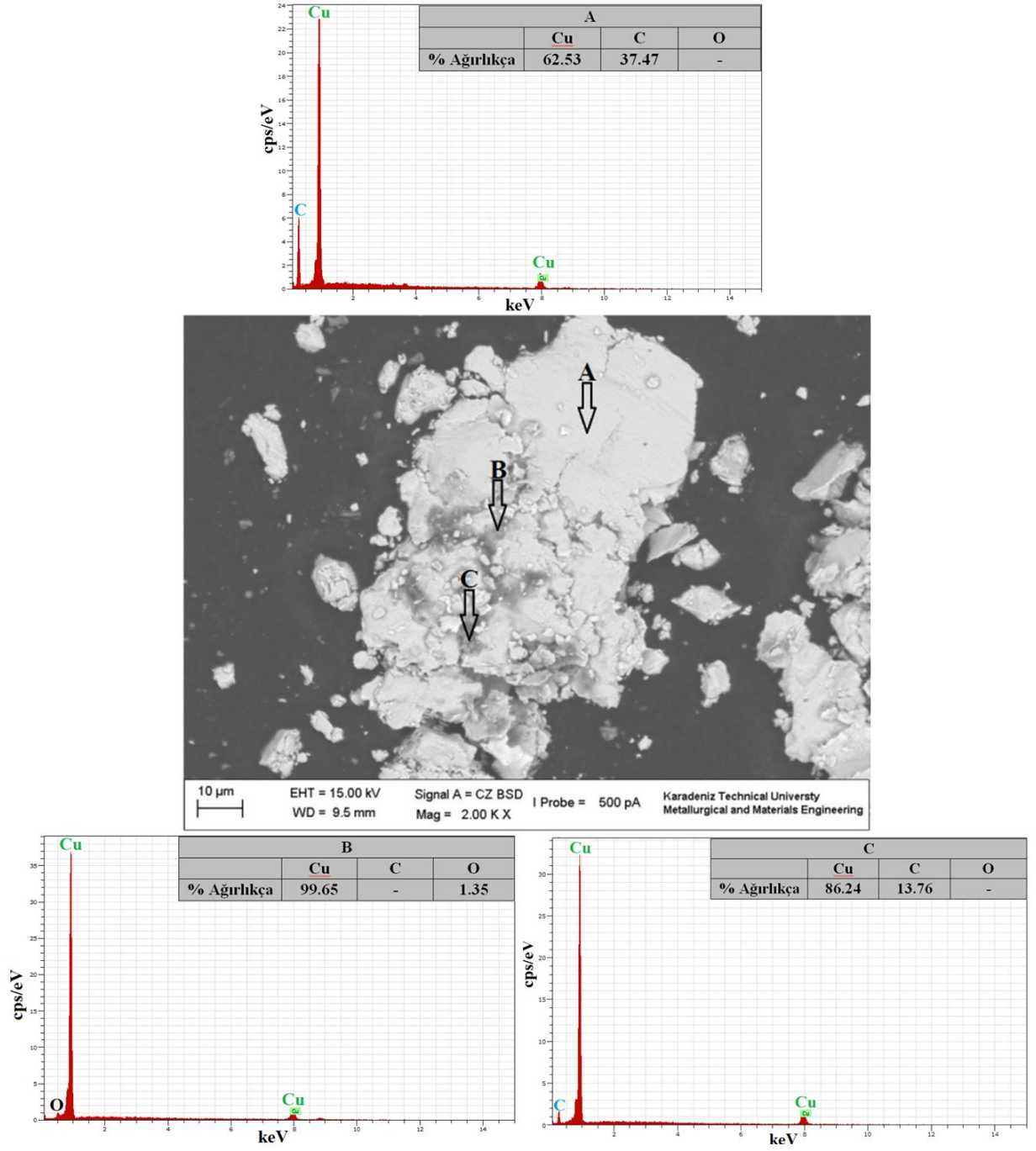
(d)

3.4.2. Aşınma Debrislerinin İncelenmesi

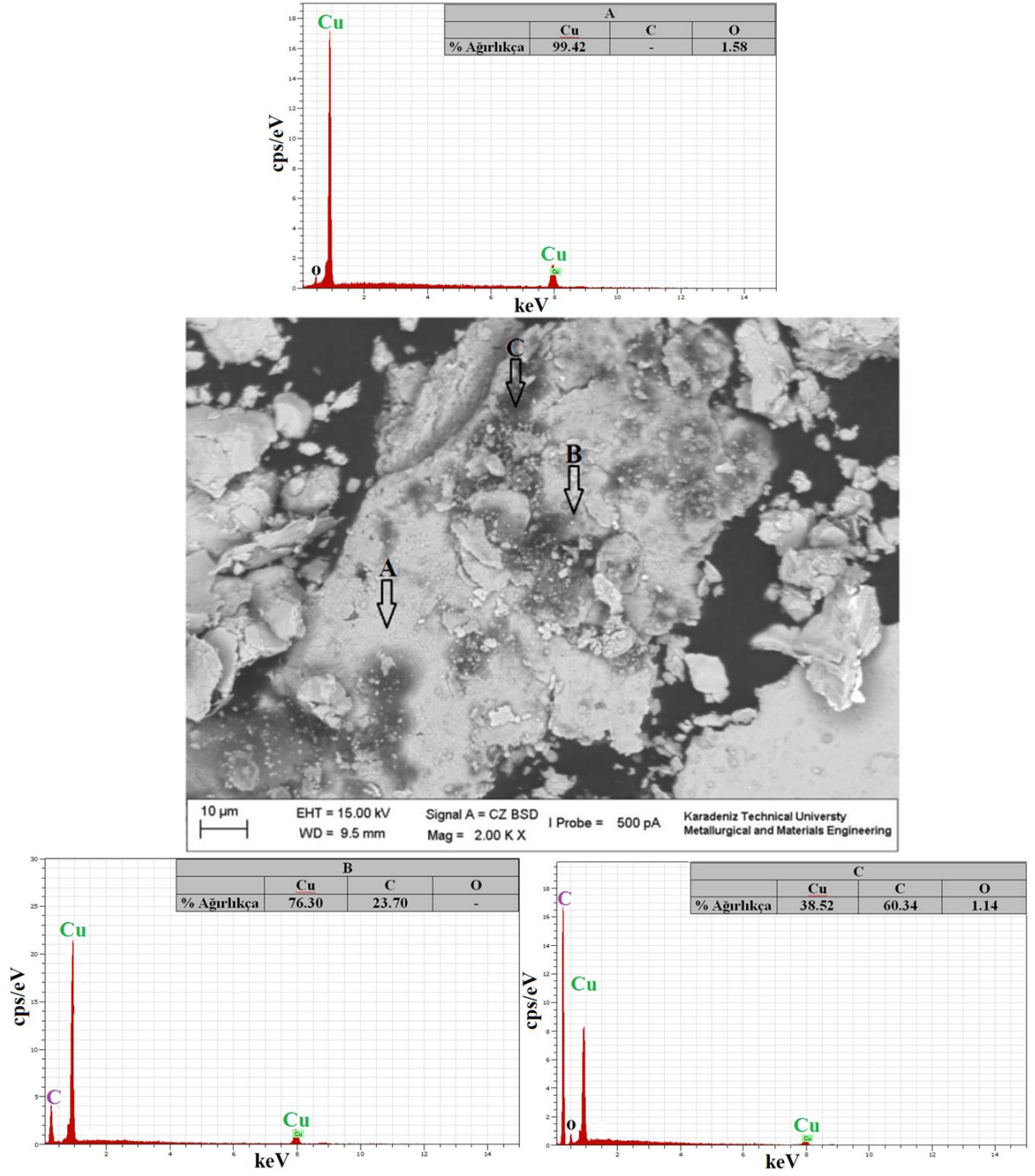
Takviyesiz bakır ve ağırlıkça % 0.5, % 2 ve % 5 nanografite, grafen nanolevha ve karbon nanotüp takviyeli malzemeler için 10N ve 300m aşınma koşullarında elde edilen aşınma debrislerinin morfolojik görüntüleri ve bu debrisler üzerinde yapılan noktasal element analizlerinin sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Analiz sonuçlarında bazı aşınma debrislerinde oksit oluşumunun varlığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç bakır esaslı partiküllerin oksitlenmeye karşı hassasiyetini ortaya koymaktadır. Ayrıca noktasal analizlerde dikkat çekici diğer bulgu seçilen noktaya göre element oranlarının farklılık göstermesidir. Bunun nedeni matris partikülleri içersindeki nano boyutlu takviye partiküllerinin farklı şekilde dağılımıdır.



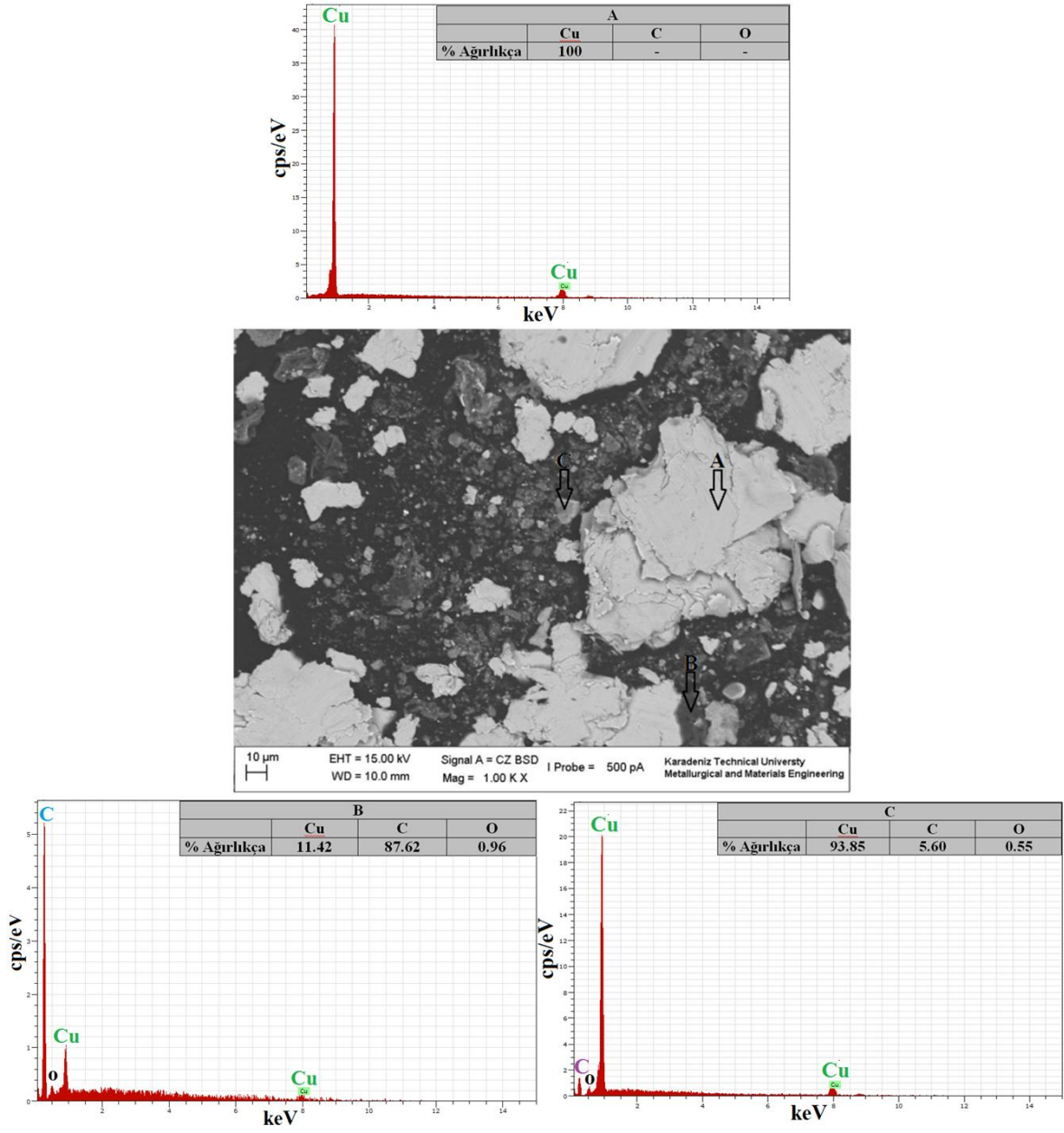
Şekil 3.44. Cu aşınma debrisleri ve noktasal analizler



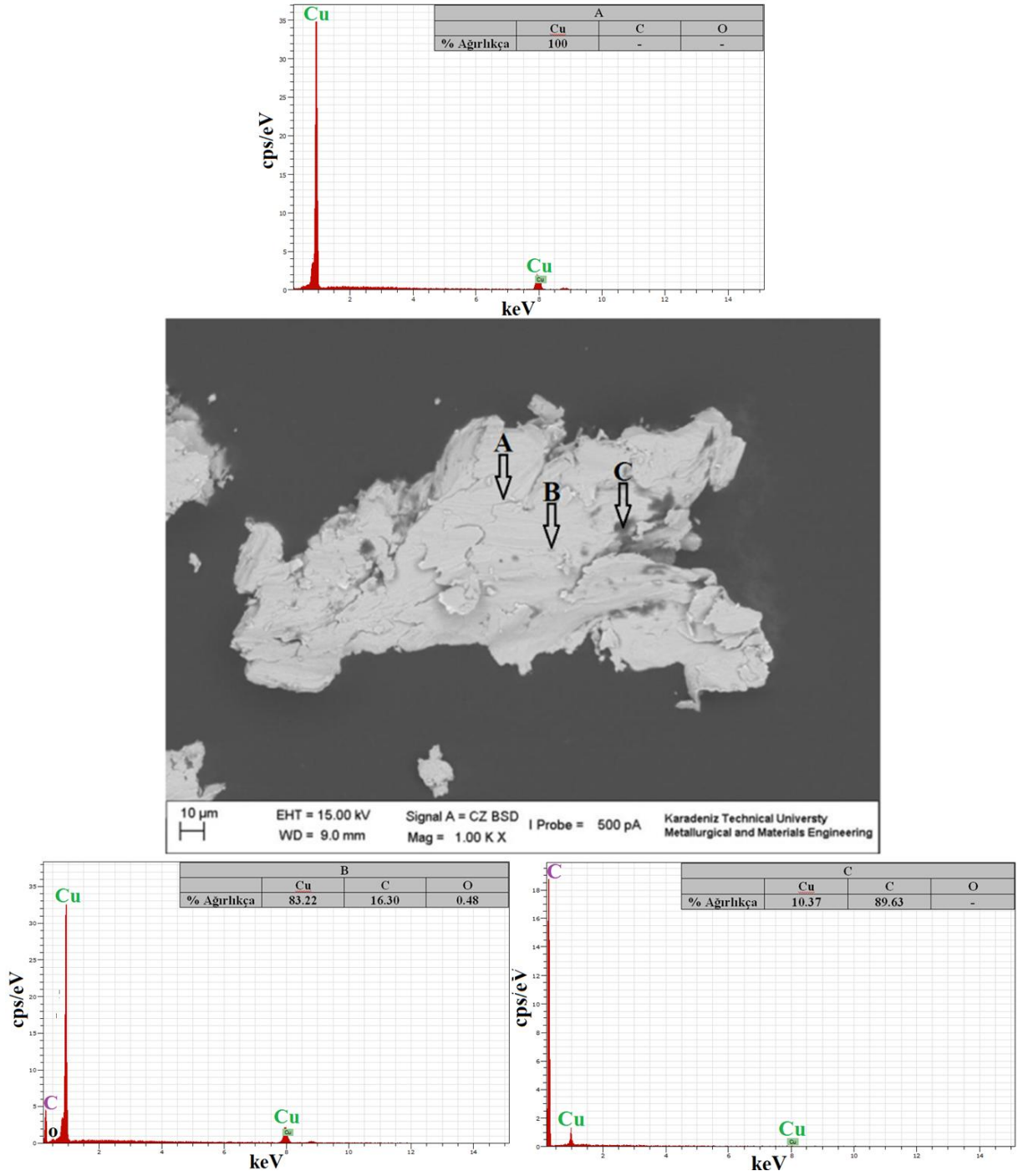
Şekil 3.45. GNP-2 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler



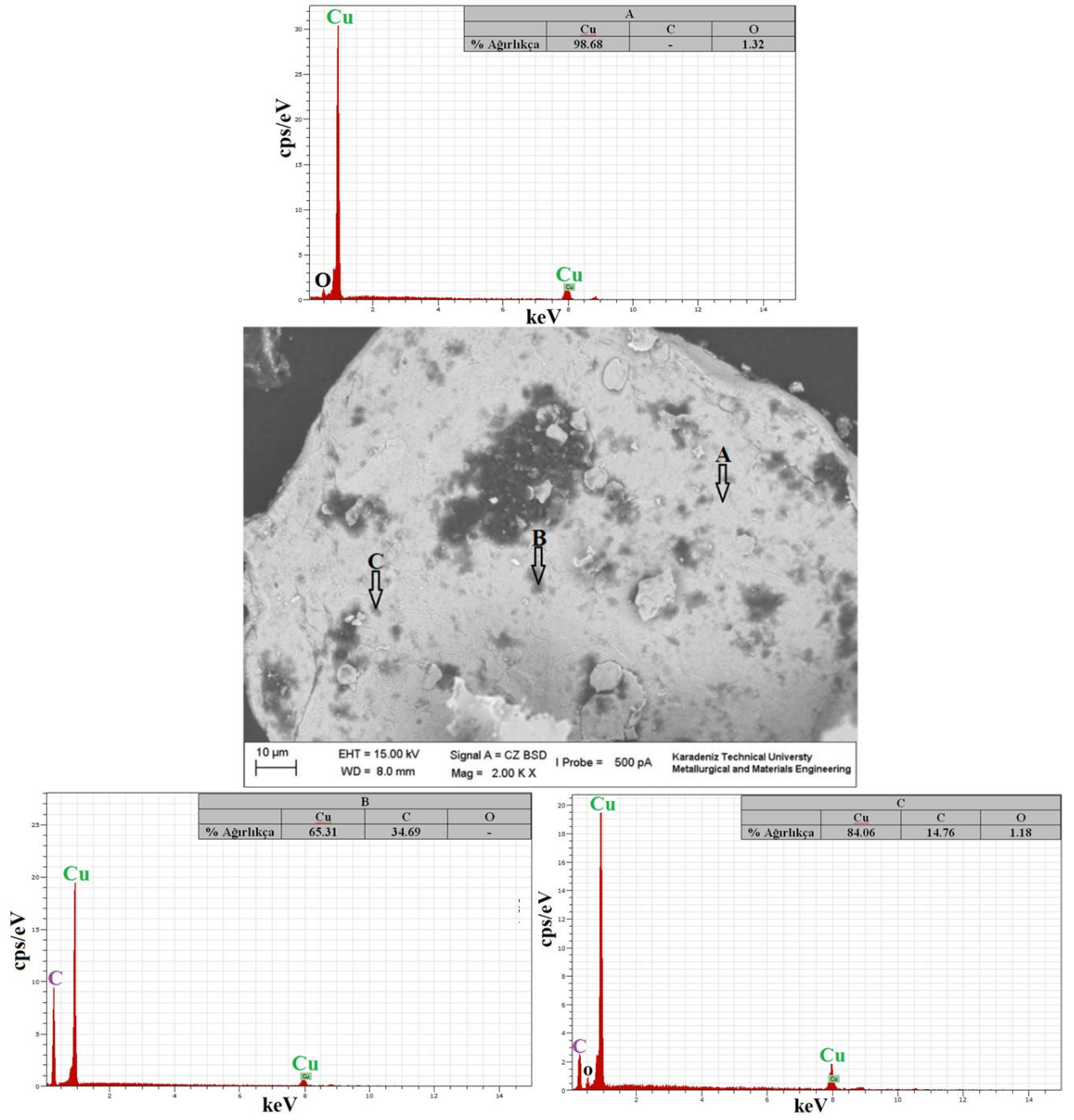
Şekil 3.46. GNP-5 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler



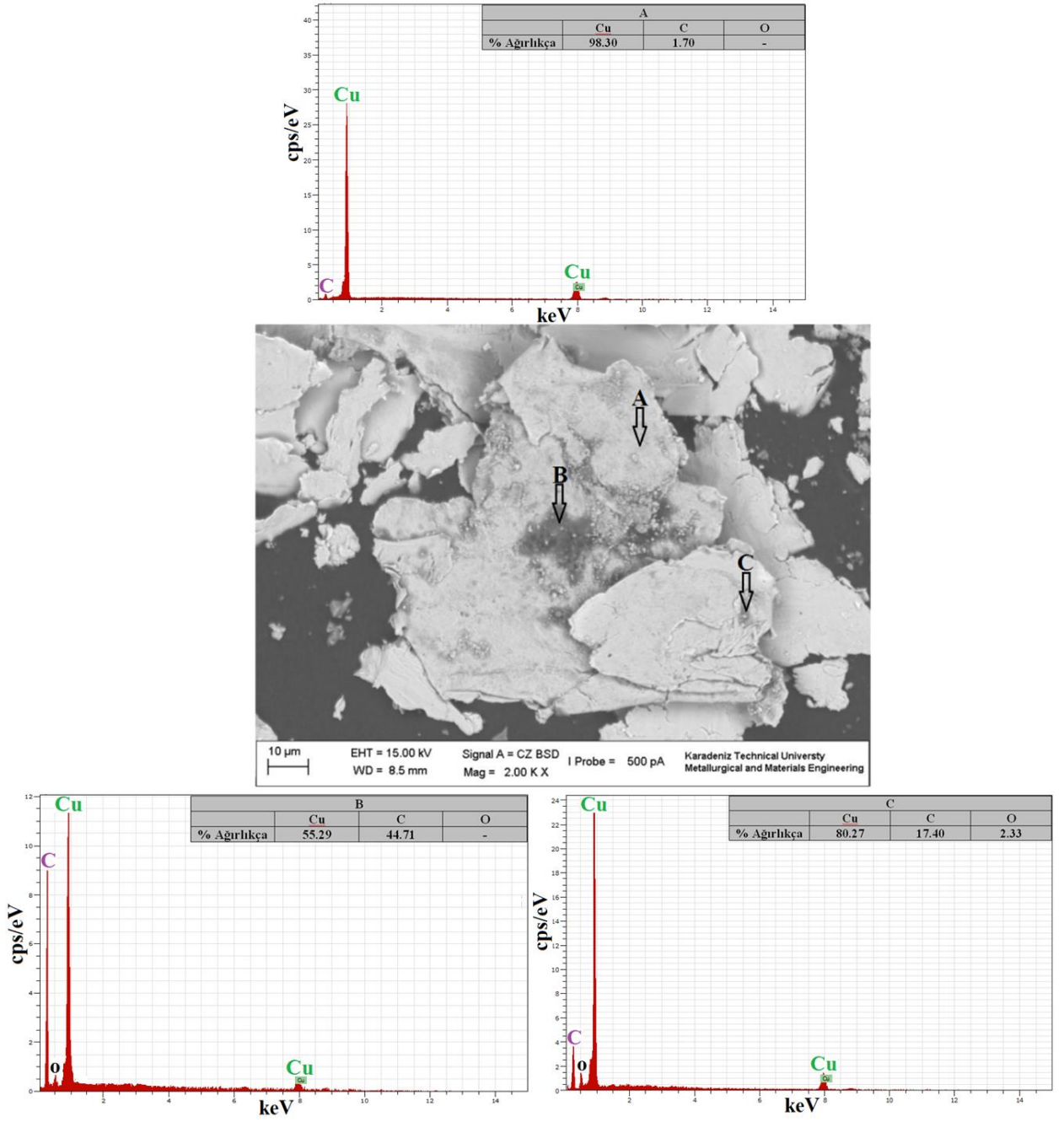
Şekil 3.47. GNP-8 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler



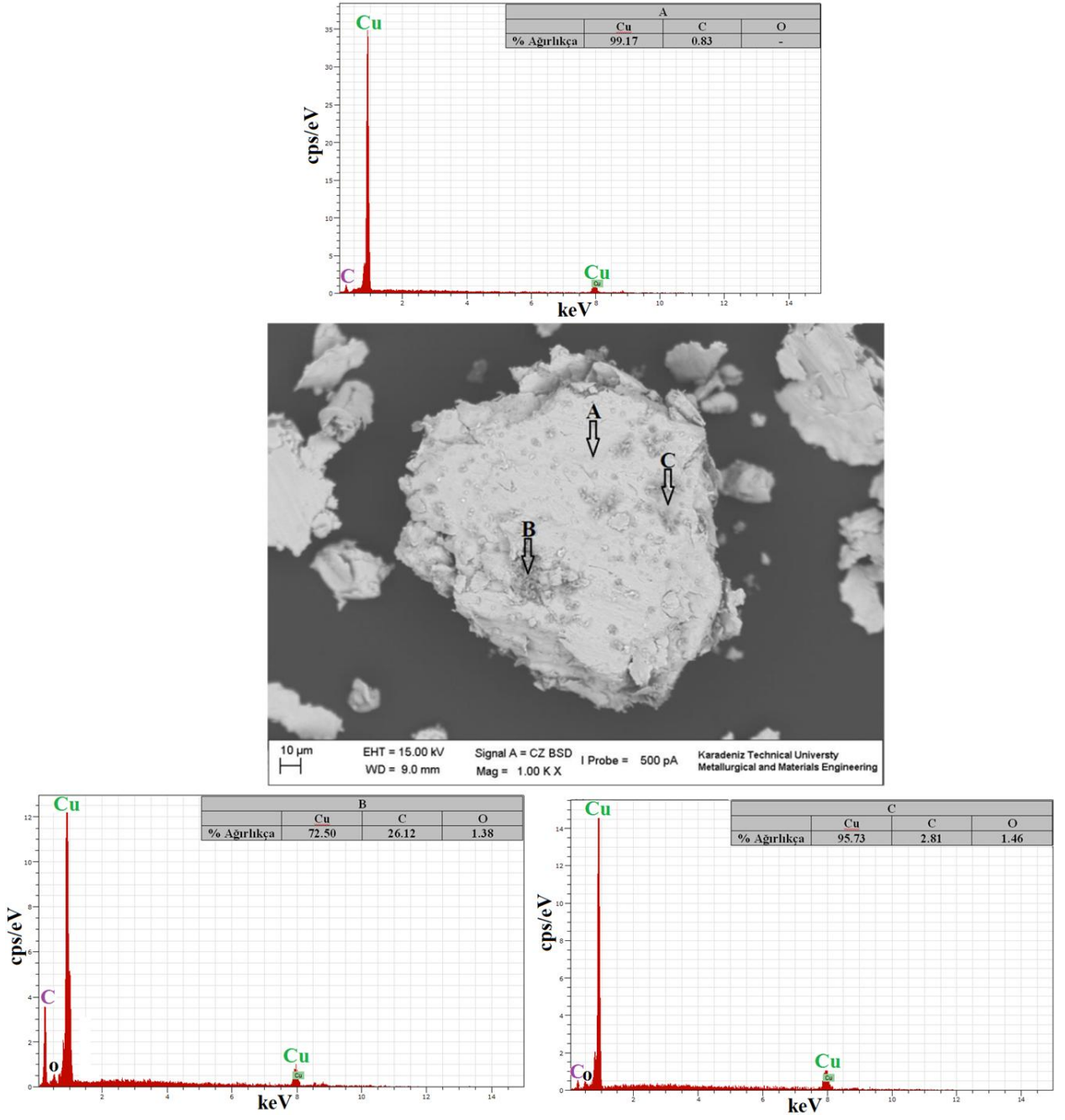
Şekil 3.48. GRNL-2 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler



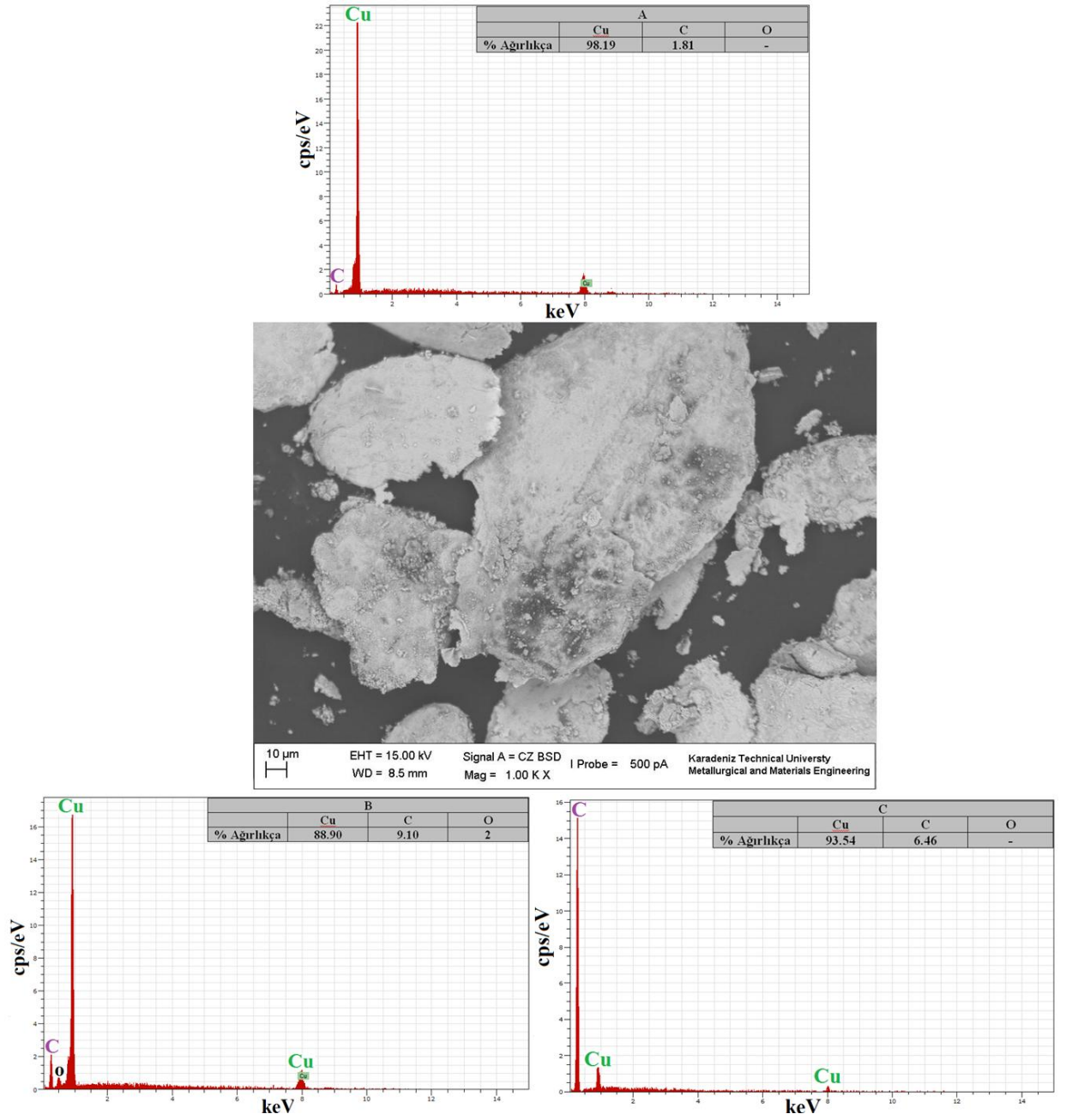
Şekil 3.49. GRNL-5 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler



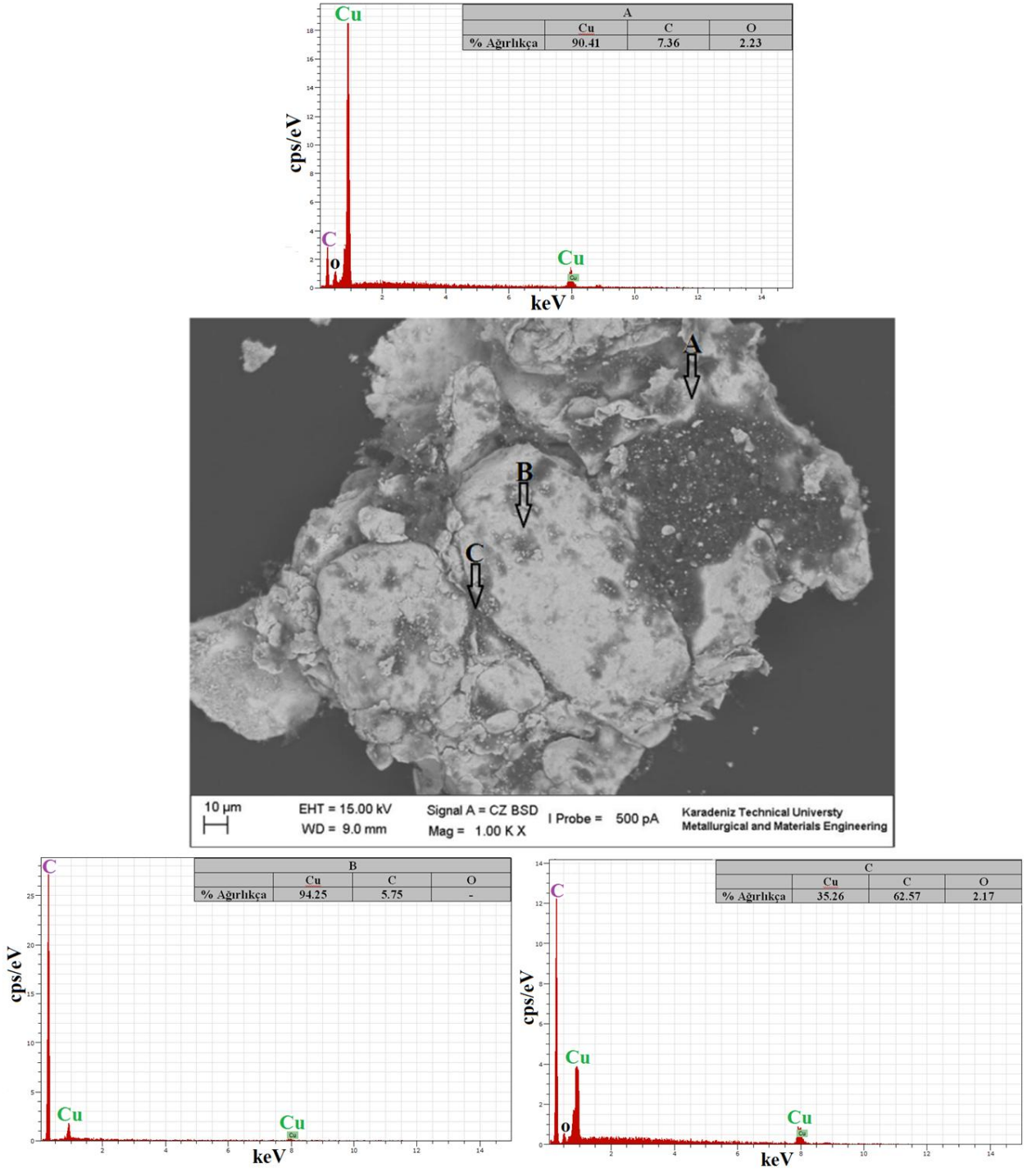
Şekil 3.50 GRNL-8 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler



Şekil 3.51. KNT-2 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler



Şekil 3.52. KNT-5 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler

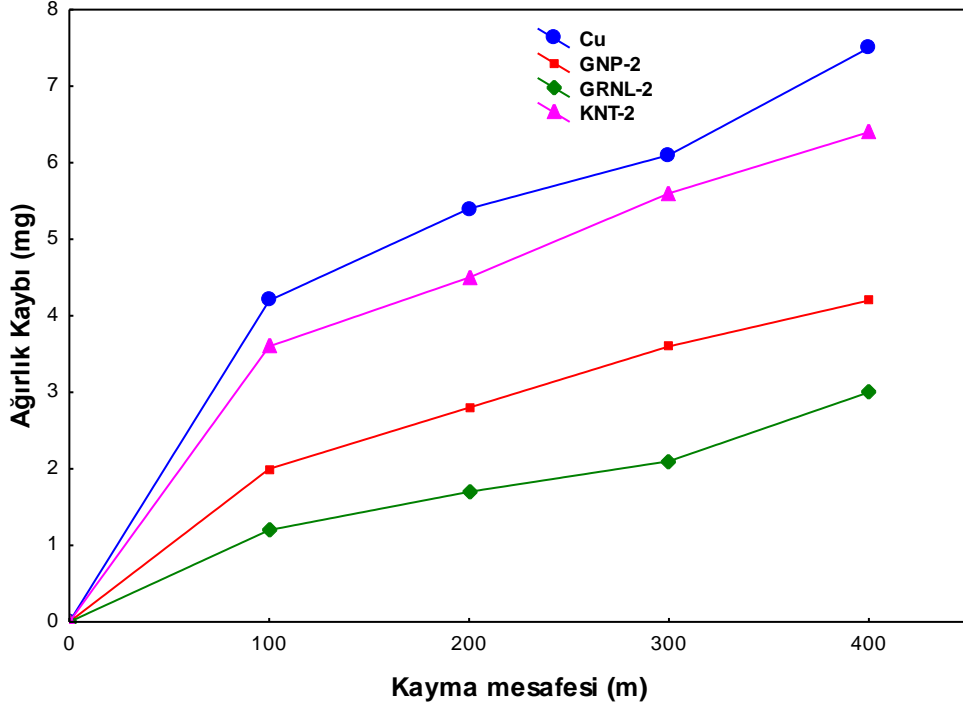


Şekil 3.53. KNT-8 için aşınma debrisleri ve noktasal analizler

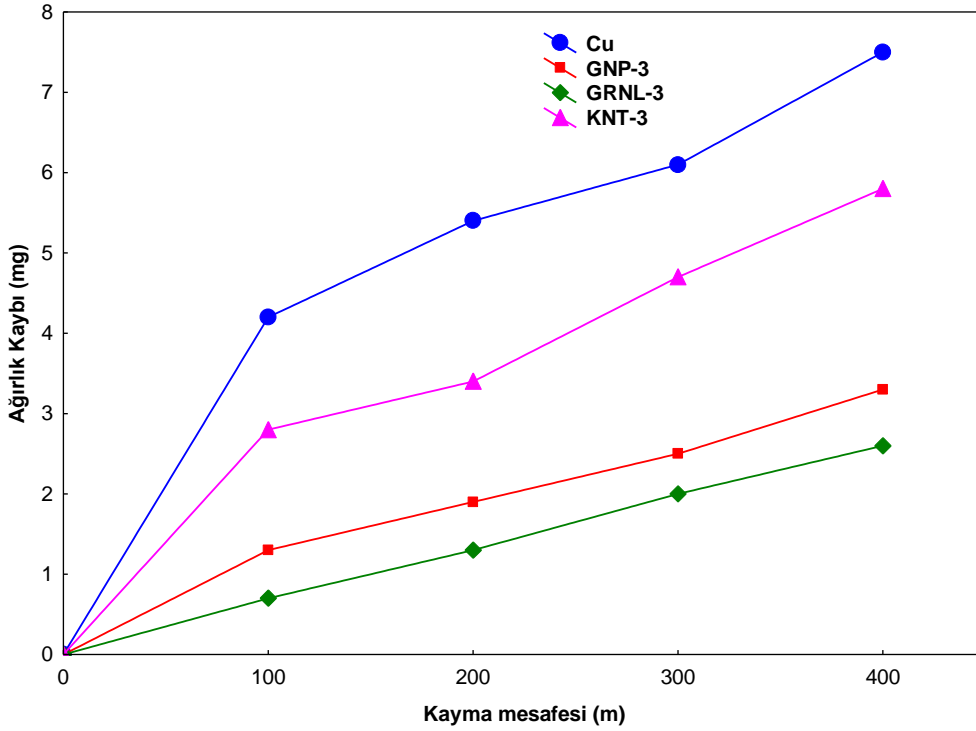
3.4.3. Aşınma Kayıpları

Aşağıdaki grafiklerde kayma mesafesi yâda aşınma yolu ve malzeme bileşimi ile nanokompozit malzemelerde meydana gelen aşınma kayıplarının değişimi verilmiştir.

Uygulanan bütün yükler için (5N, 7N ve 10N) en iyi aşınma direncini dolayısıyla en düşük aşınma kaybını gösteren nanokompozitler grafen nanolevha takviyeli nanokompozitlerdir.



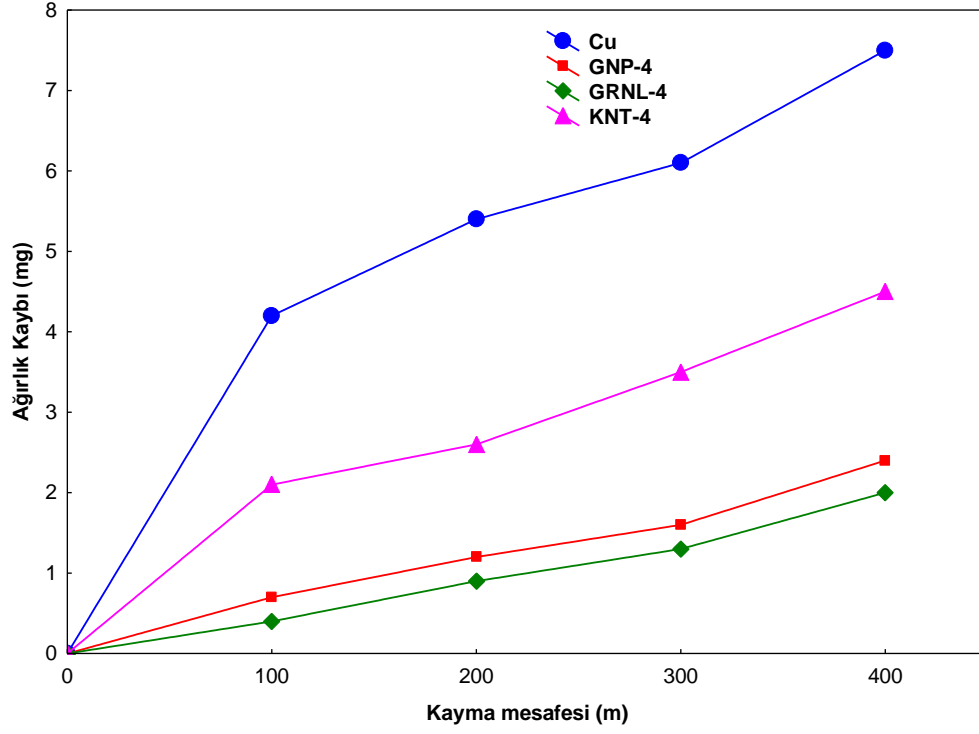
(a)



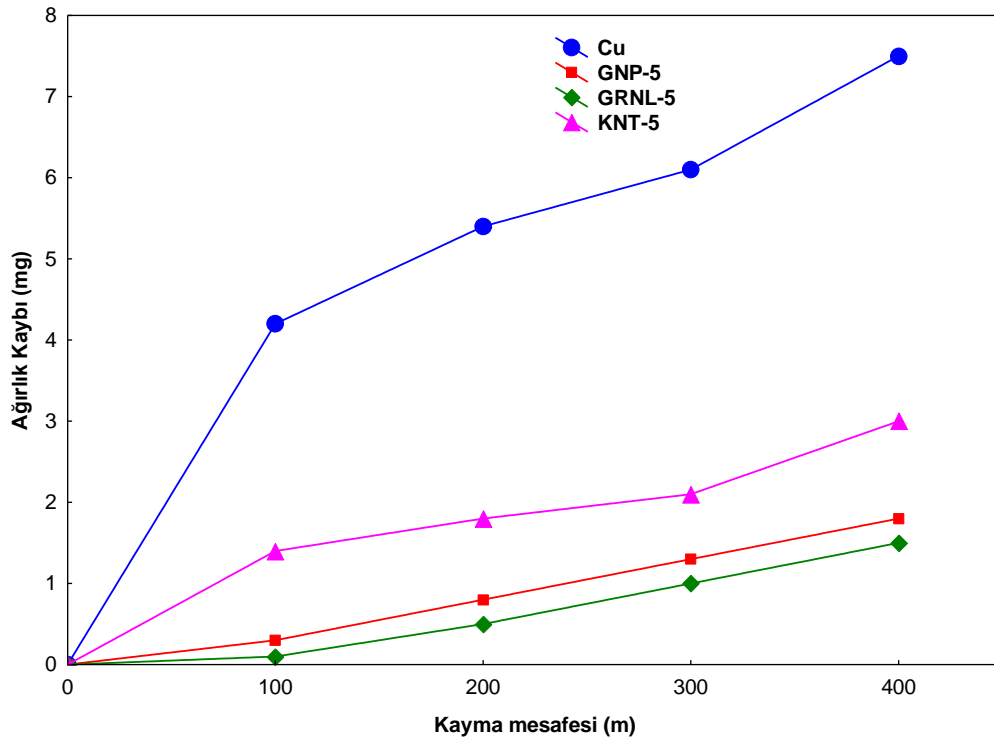
(b)

Şekil 3.54. 5N yük altında aşınma kayıpları; ağ. % (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5, (d) 2, (e) 2.5, (f) 3 ve (g) 5 nanopartikül takviyeli nanokompozitler

Şekil 3.54'ün devamı

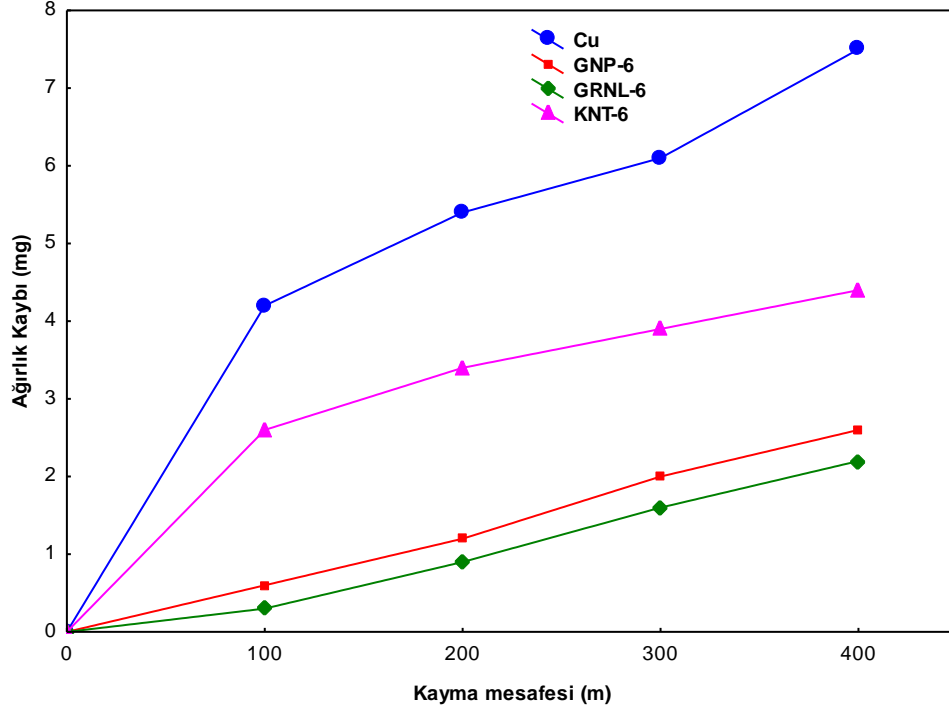


(c)

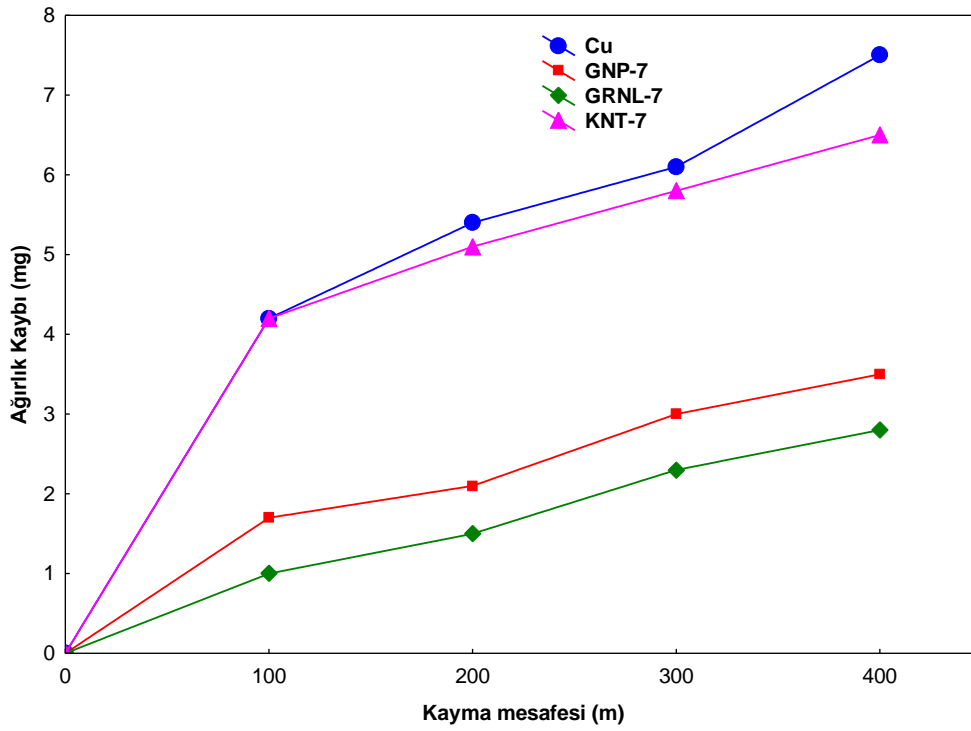


(d)

Şekil 3.54'ün devamı

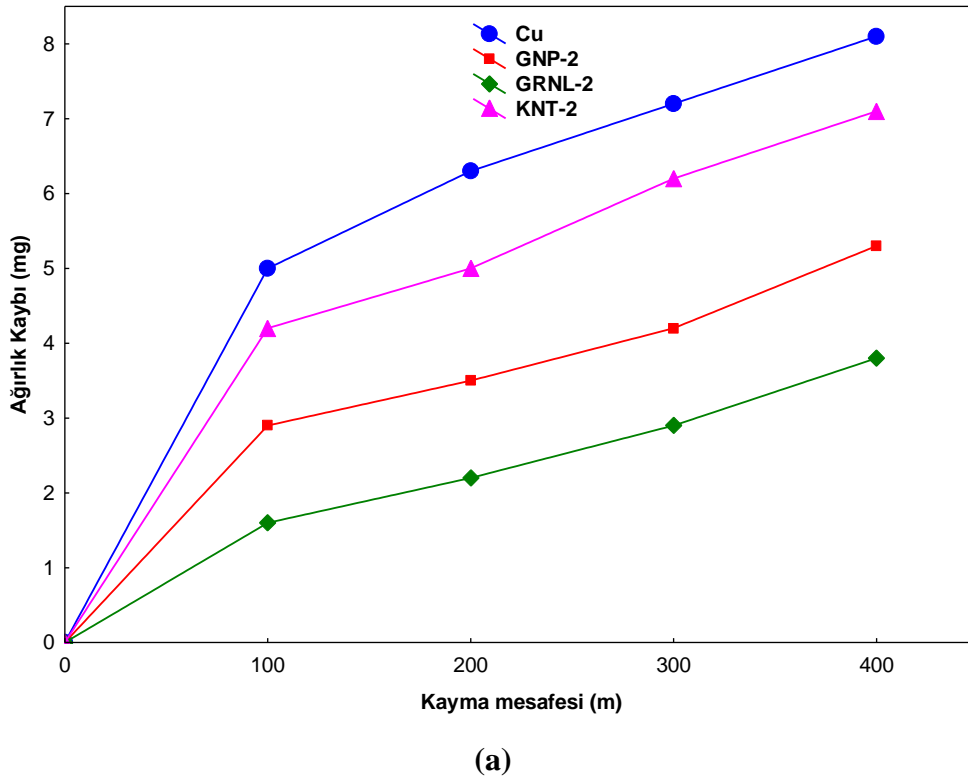
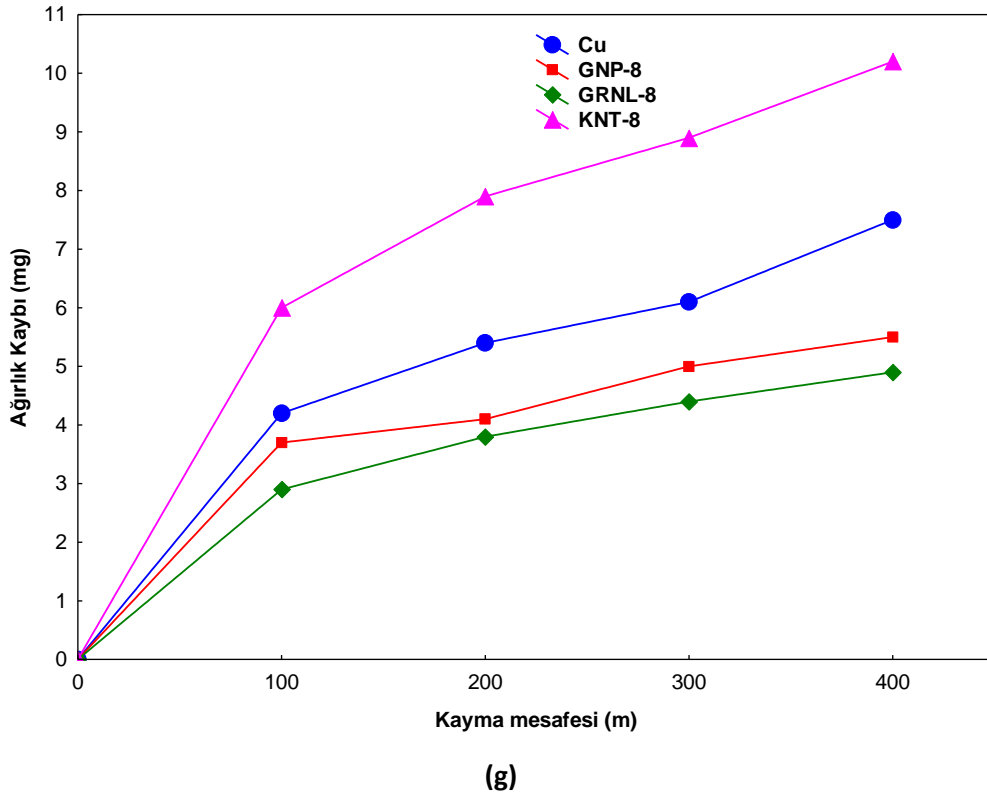


(e)



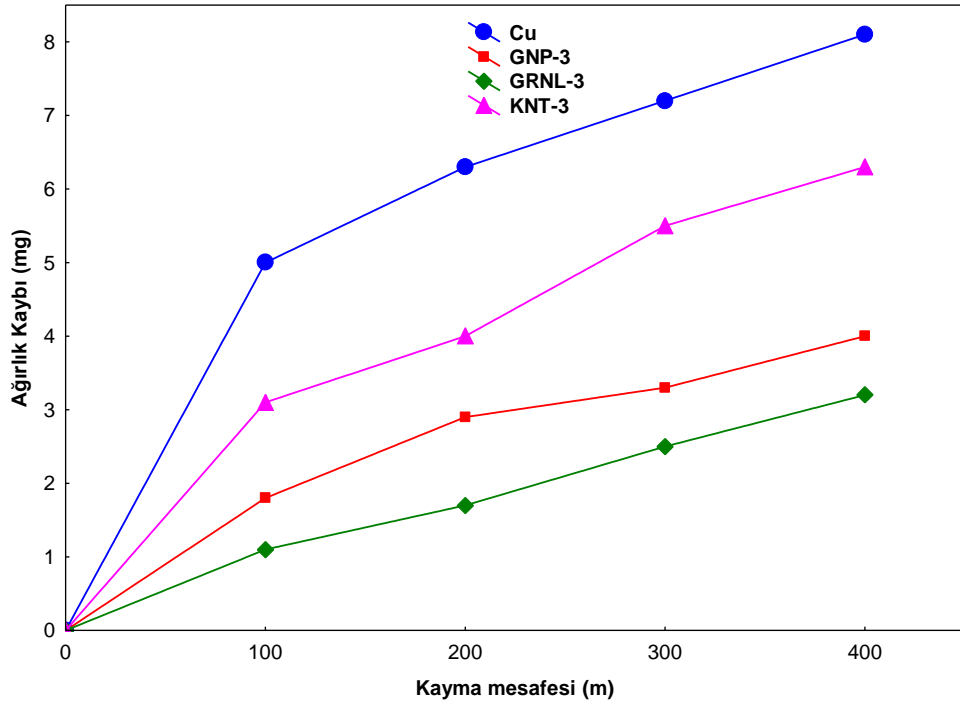
(f)

Şekil 3.54'ün devamı

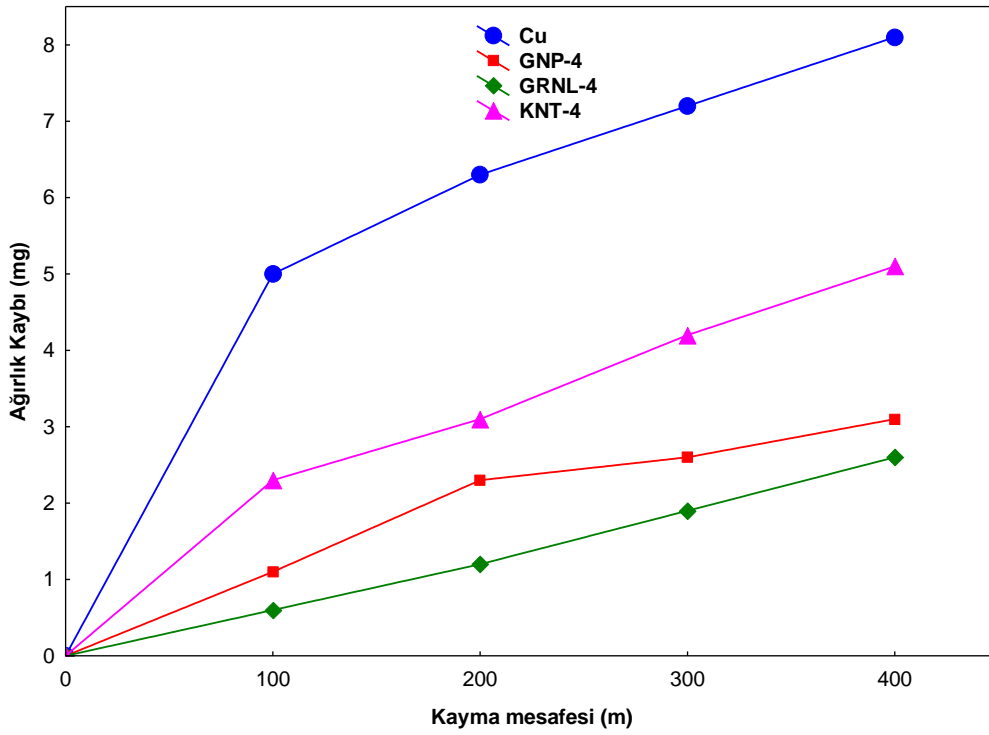


Şekil 3.55. 7N yük altında aşınma kayıpları; ağ. % (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5, (d) 2, (e) 2.5, (f) 3 ve (g) 5 nanopartikül takviyeli nanokompozitler

Şekil 3.55'in devamı

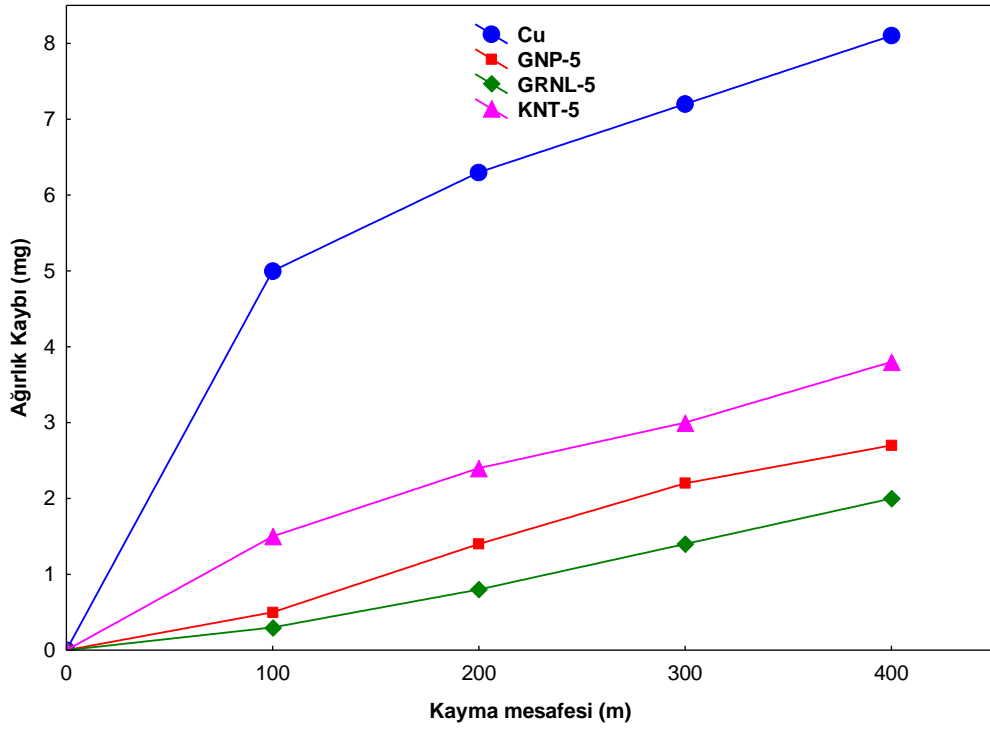


(b)

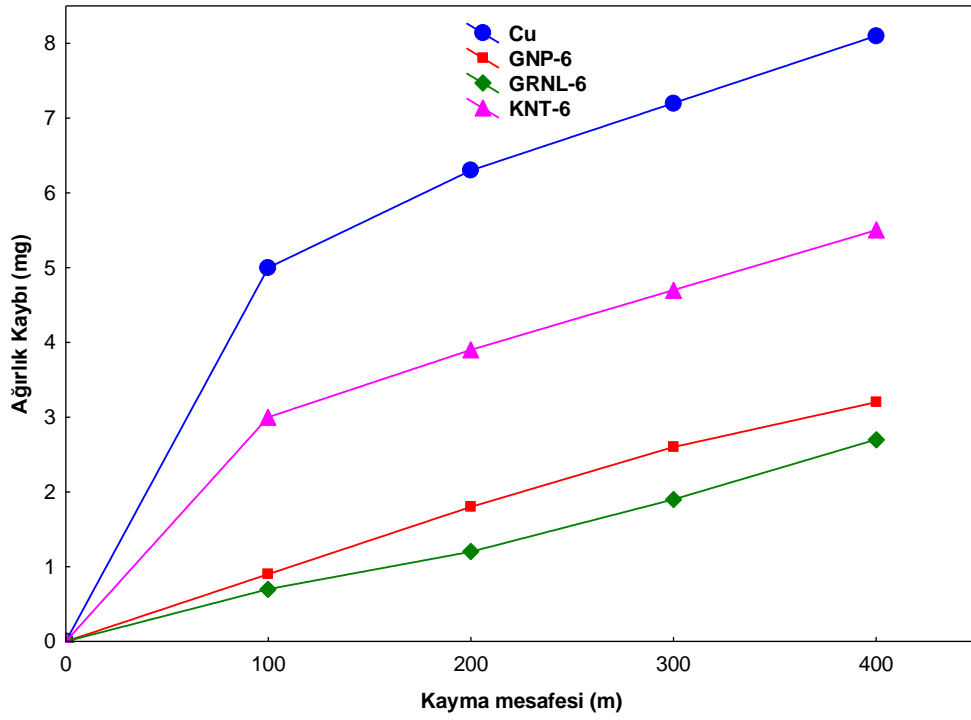


(c)

Şekil 3.55'in devamı

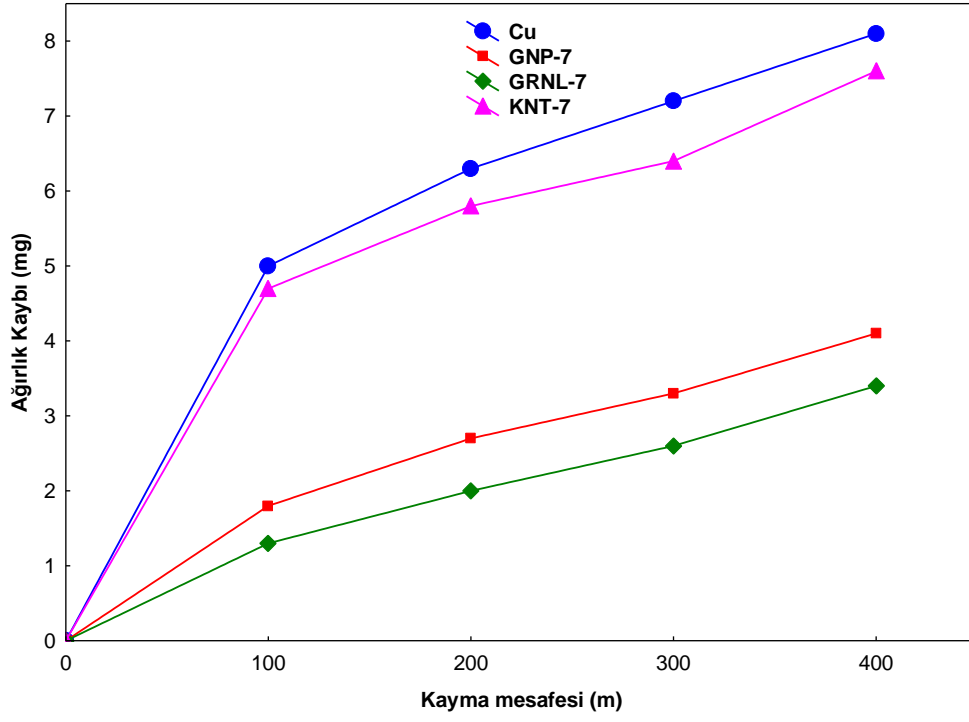


(d)

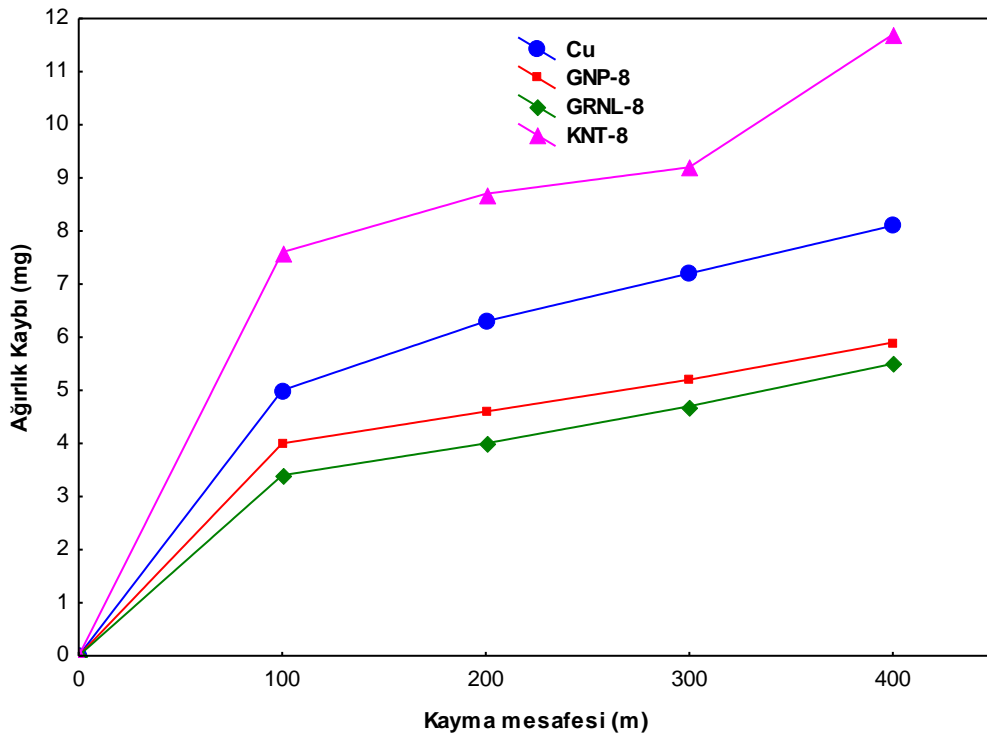


(e)

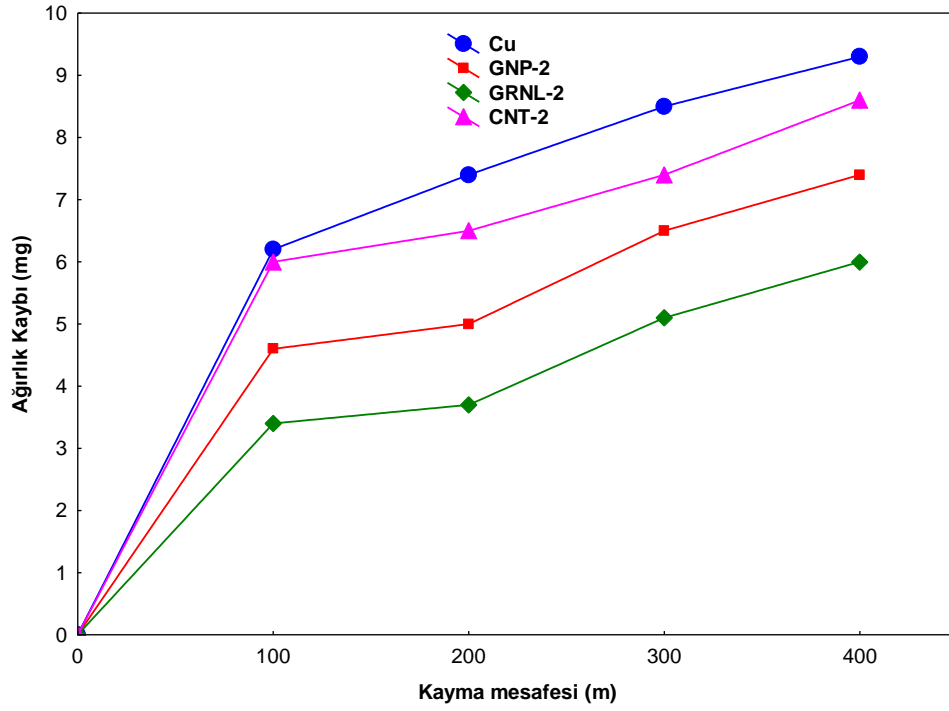
Şekil 3.55'in devamı



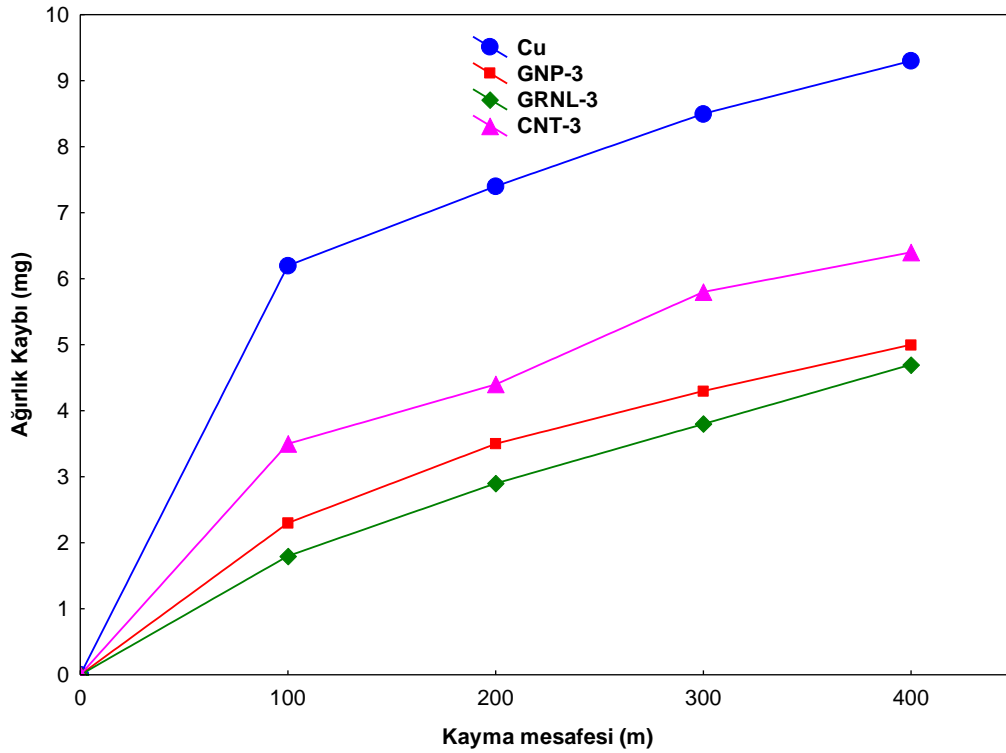
(f)



(g)



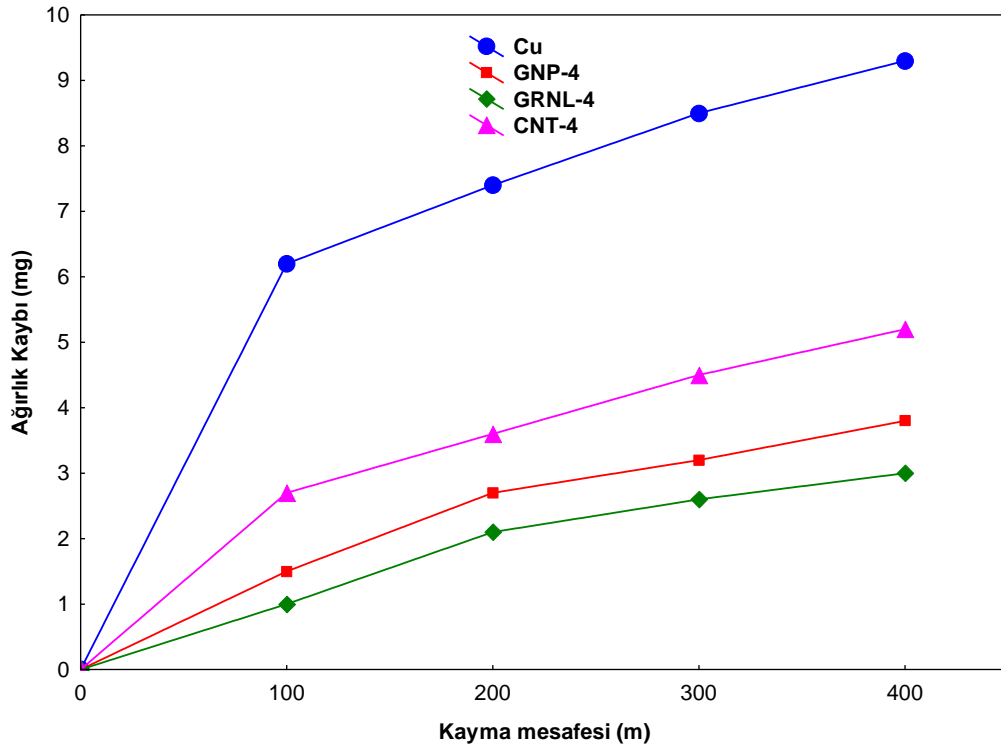
(a)



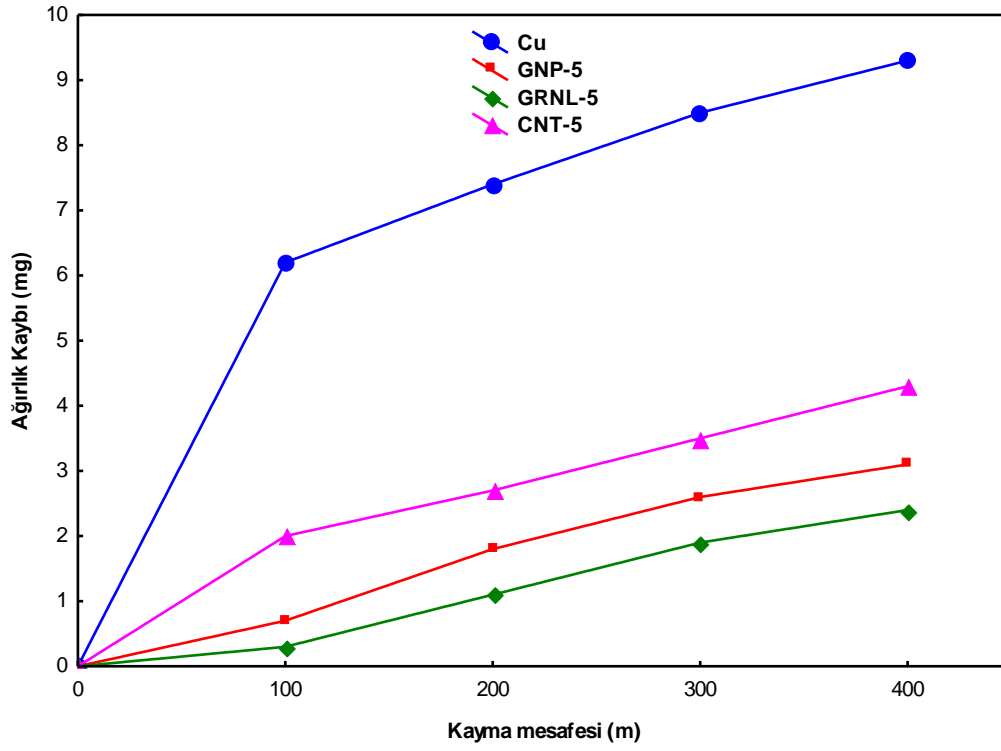
(b)

Şekil 3.56. 10N yük altında aşınma kayıpları; ağ. % (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5, (d) 2, (e) 2.5, (f) 3 ve (g) 5 nanopartikül takviyeli nanokompozitler

Şekil 3.56'nın devamı

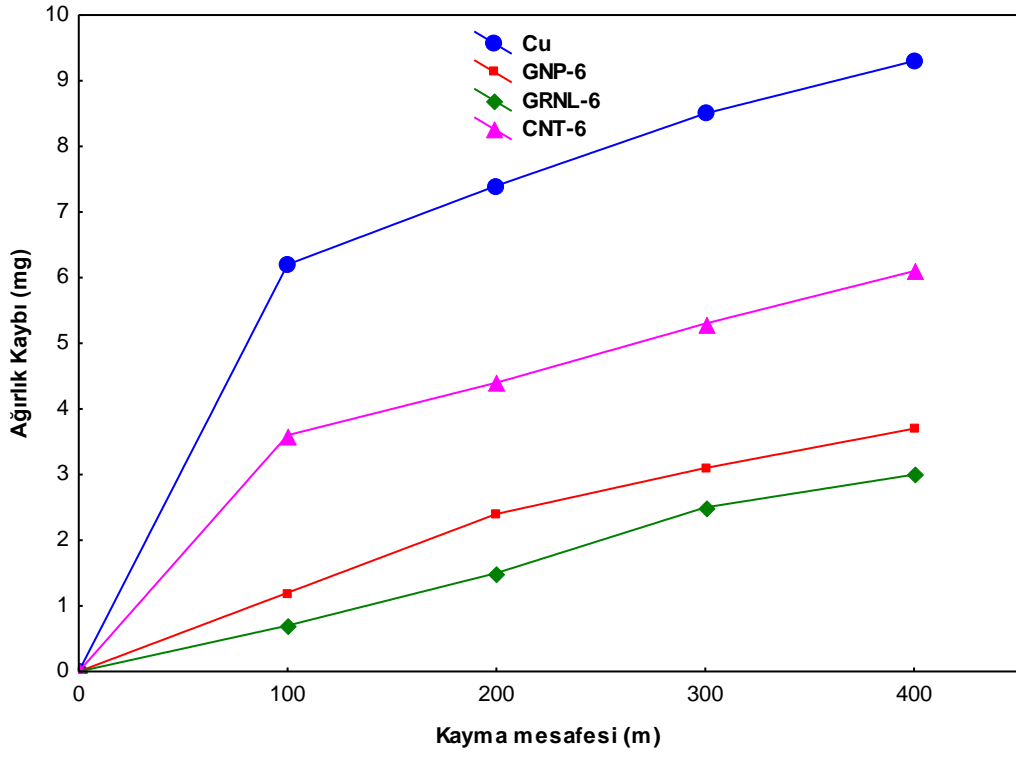


(c)

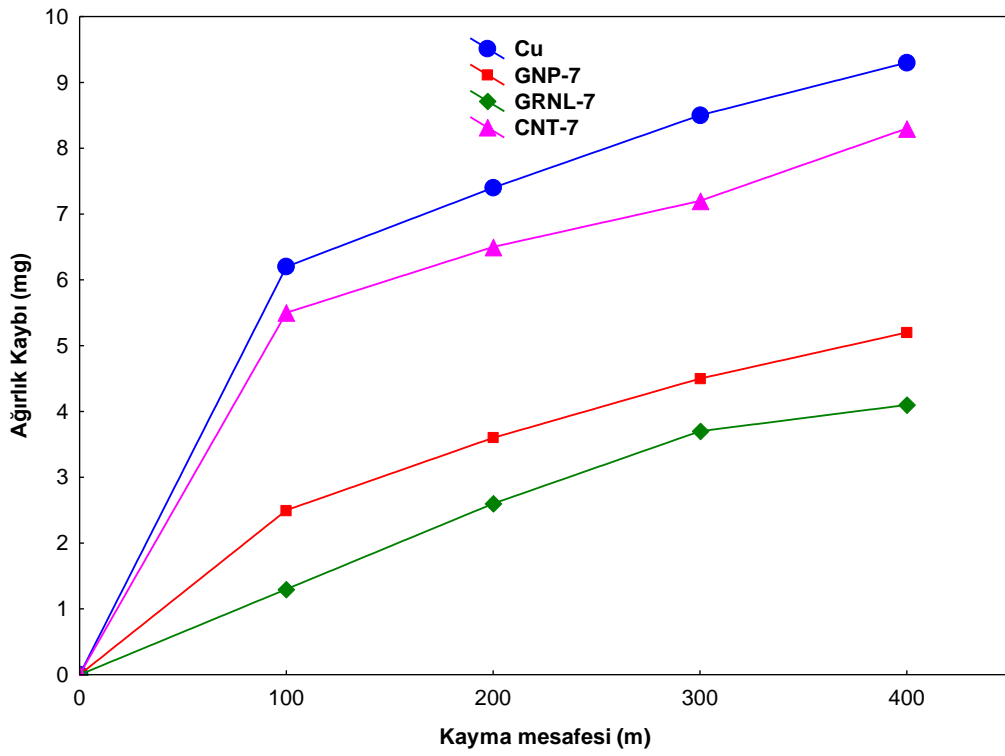


(d)

Şekil 3.56'nın devamı

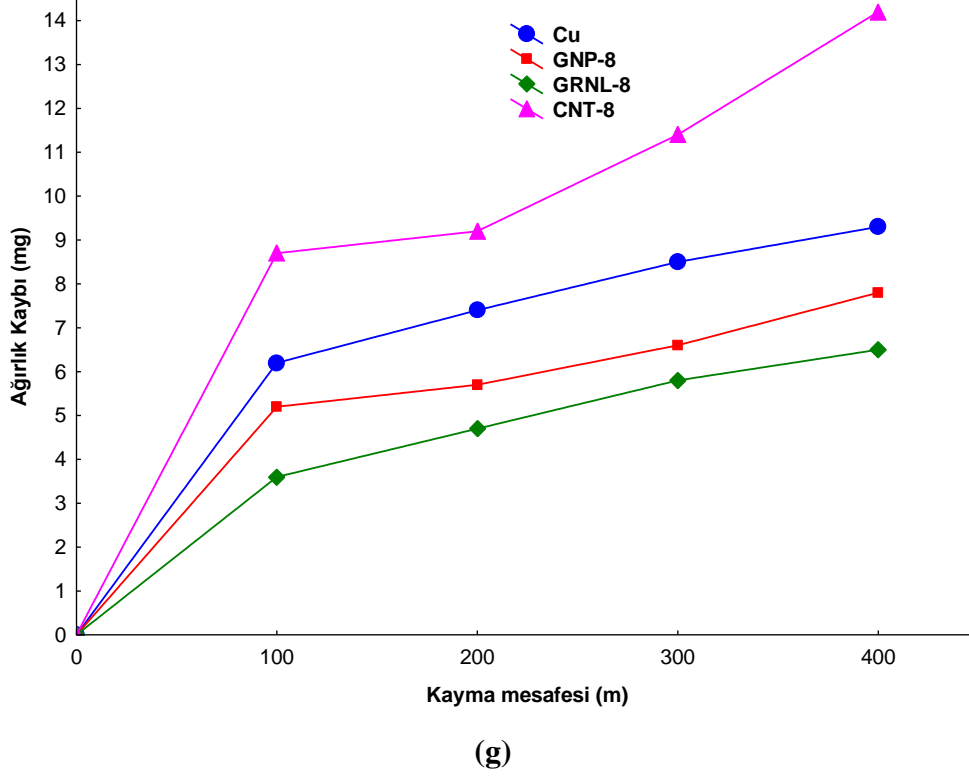


(e)



(f)

Şekil 3.56'nın devamı

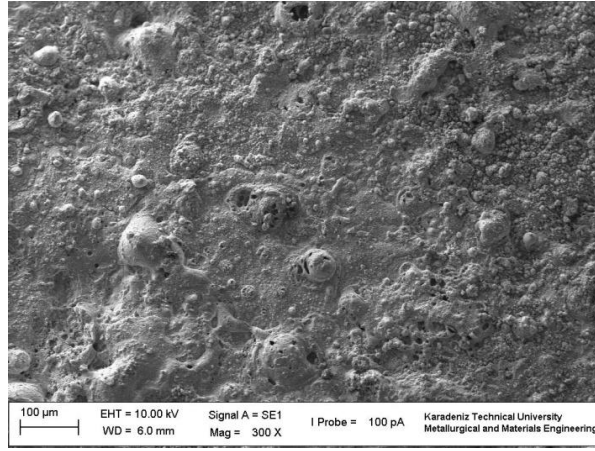


3.5. Kontak Performansı ve Ark Erozyon Davranışı

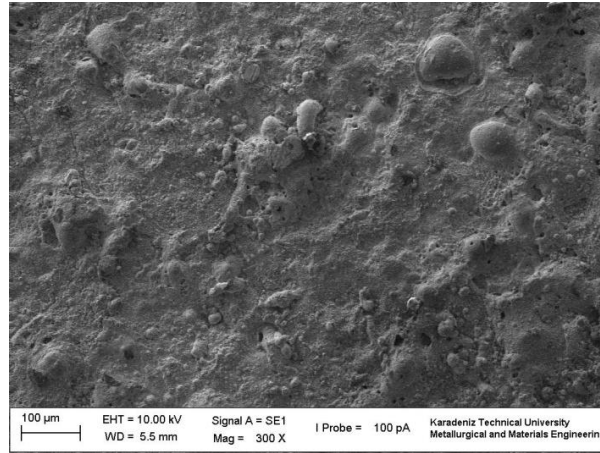
3.5.1. Ark Morfolojisi

Aşağıdaki şekillerde Cu, Cu-nanografrit, Cu-grafen nanolevha ve Cu-karbon nanotüp bileşimlerinden oluşan kontak malzemelerinde 2000, 5000 ve 10000 açma-kapama işlemi sonucunda oluşan ark bölgelerinin yüzey morfolojileri verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi ark morfolojileri bölgesel ergime, deformasyon ve kontak memelerini içeren tipik ark karakteristiklerini içermektedir.

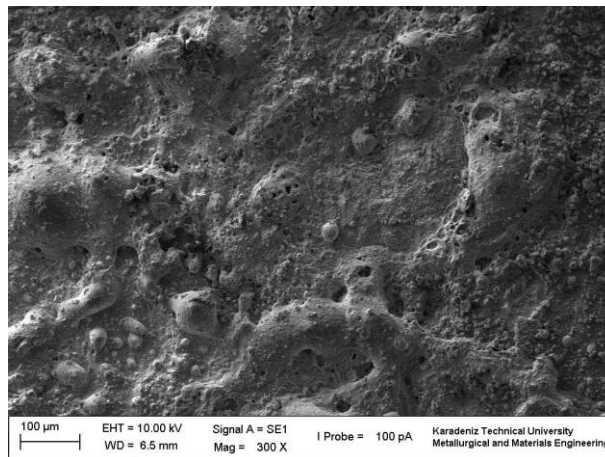
3.5.1.1. Cu Kontak Malzemeleri



(a)

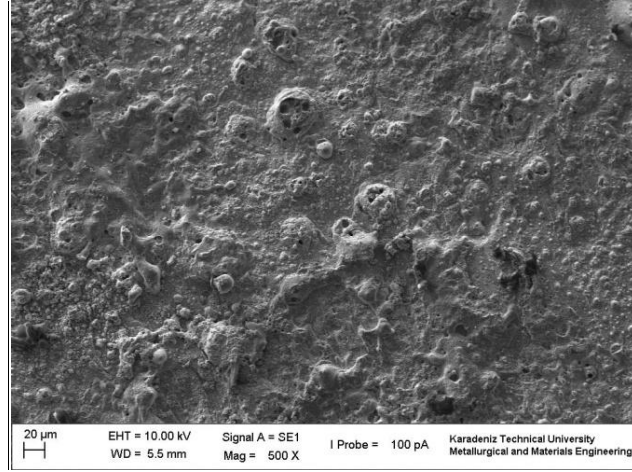


(b)

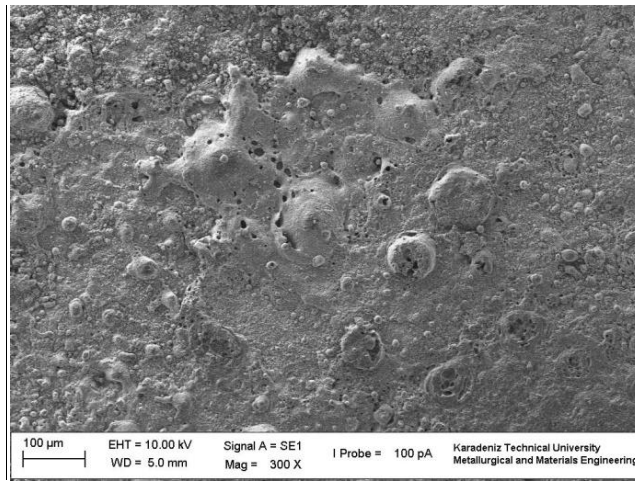


(c)

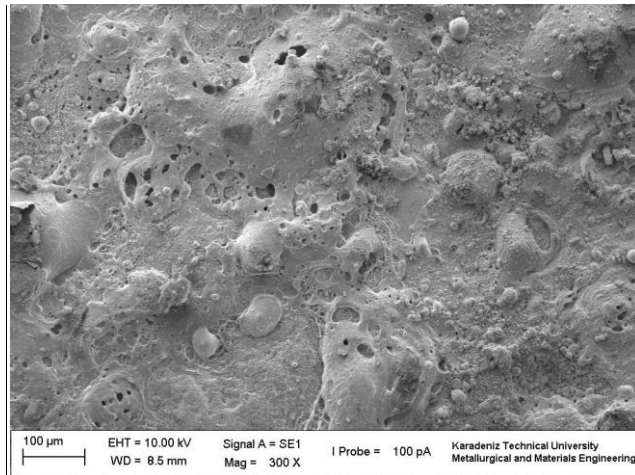
Şekil 3. 57. (Bakır) B1U'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)



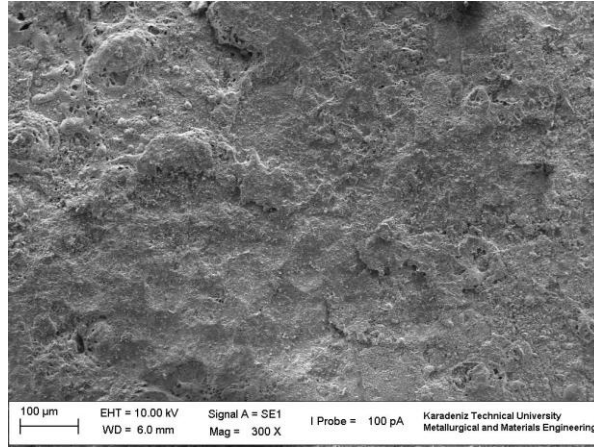
(b)



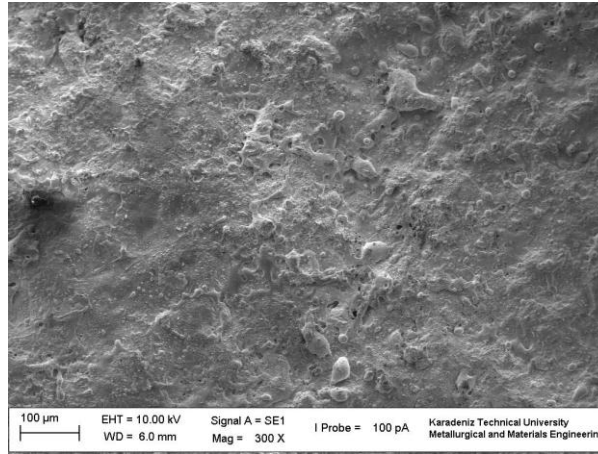
(c)

Şekil 3.58. Bakır B1A'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çövrüm

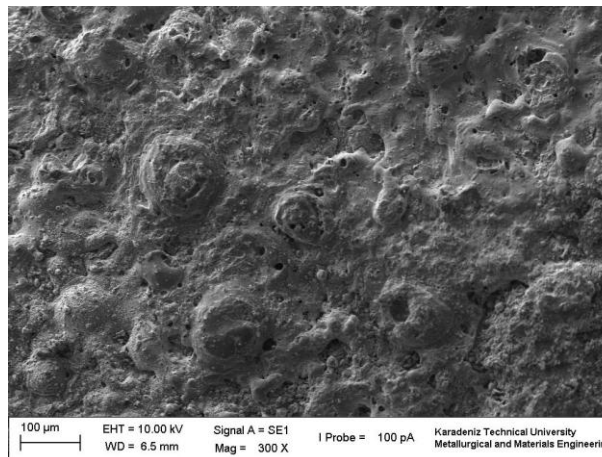
3.5.1.2. Cu-Nanografit kontak malzemeleri



(a)

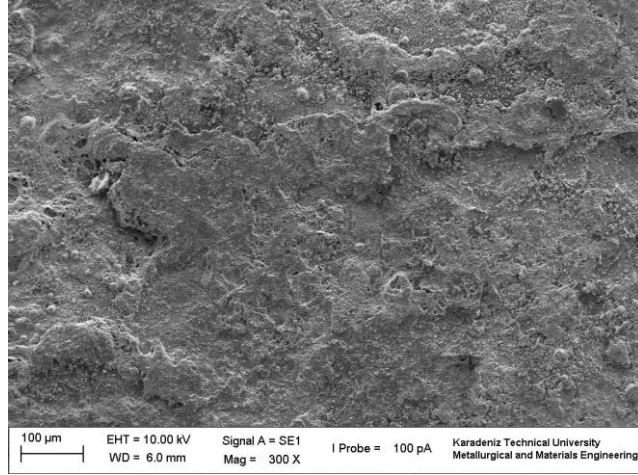


(b)

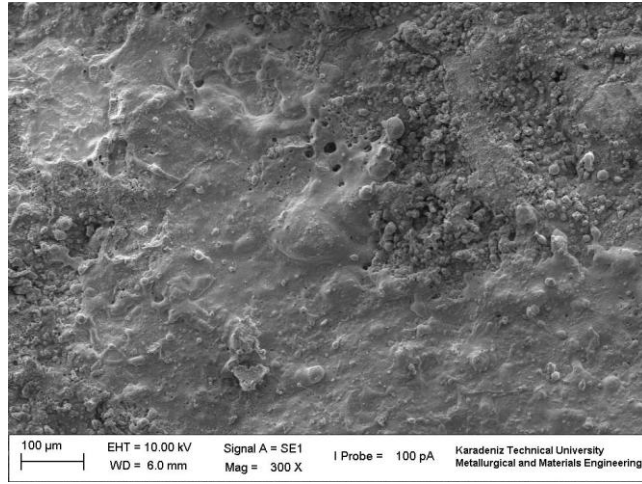


(c)

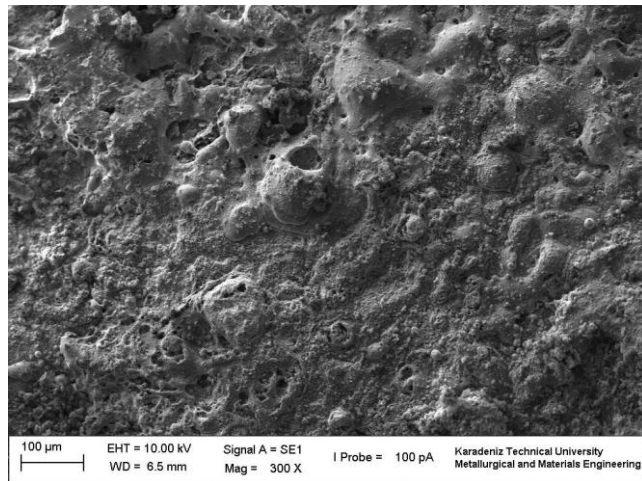
Şekil 3.59. (GNP-2) B1U'ya ait ark morfolojisi
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

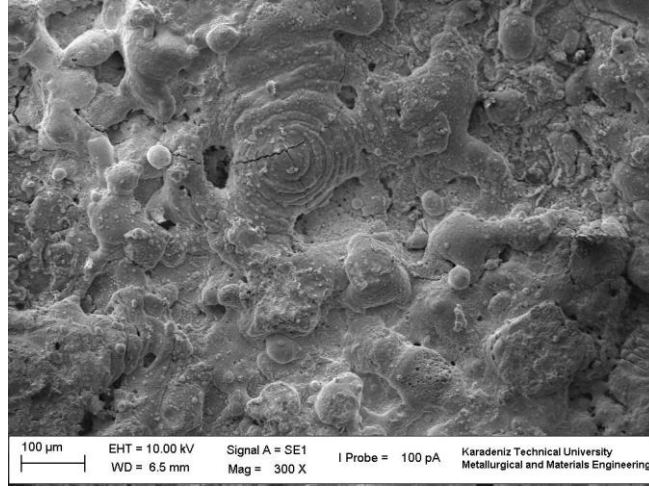


(b)

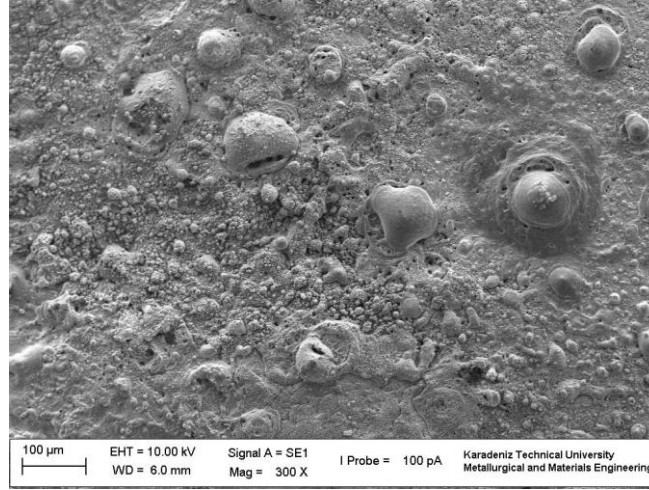


(c)

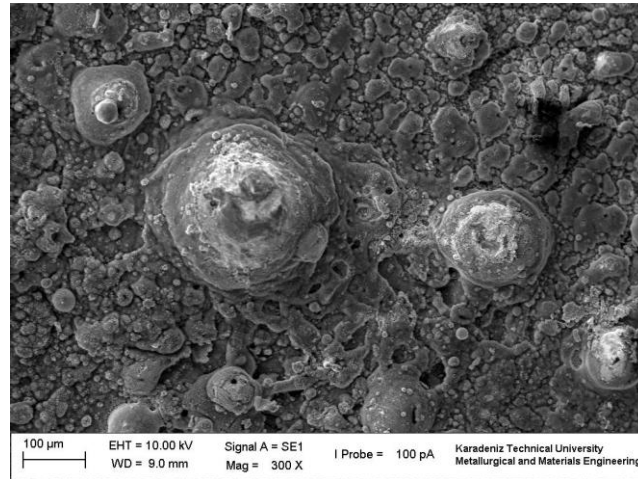
Şekil 3.60. (GNP-2) B1A'ya ait ark morfolojisi
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

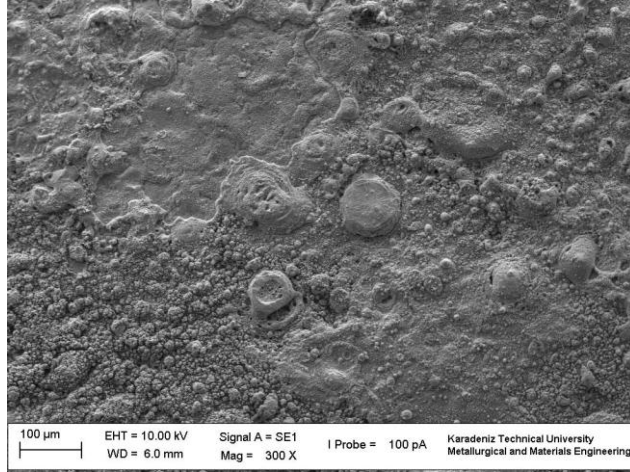


(b)

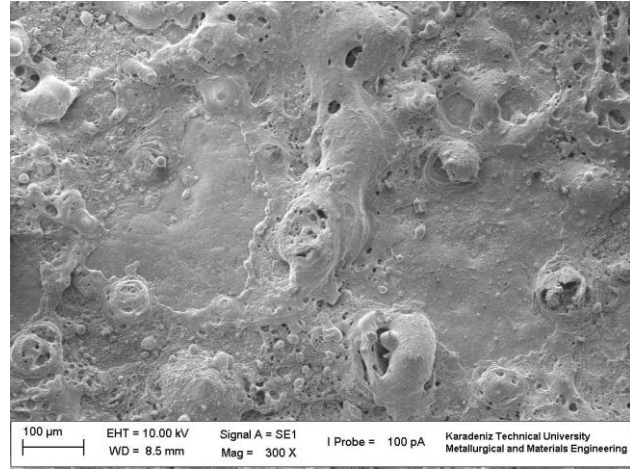


(c)

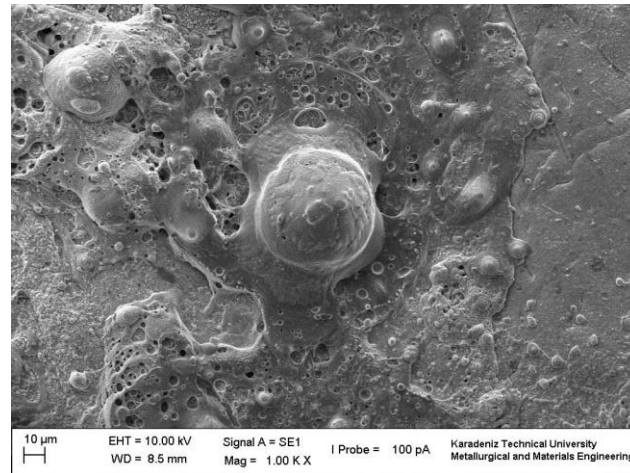
Şekil 3.61. (GNP-4) B1U'ya ait ark morfolojisi
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

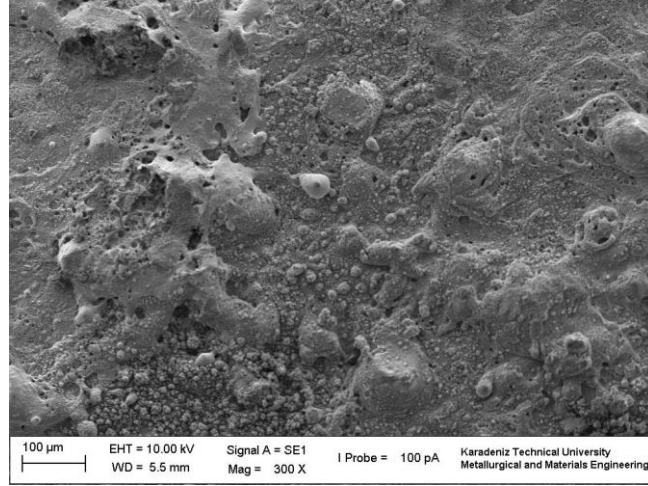


(b)

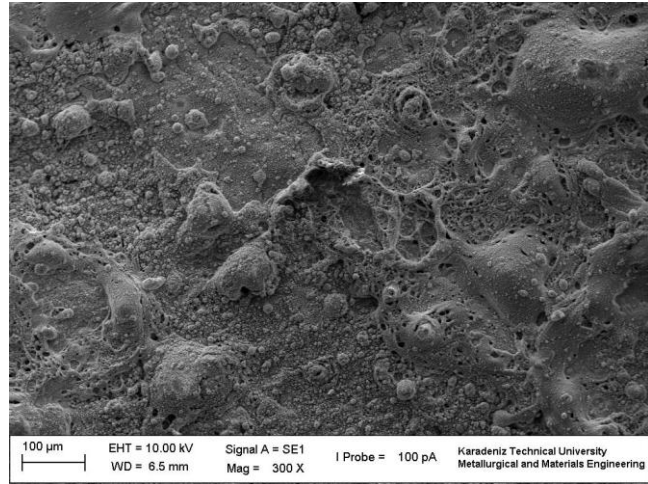


(c)

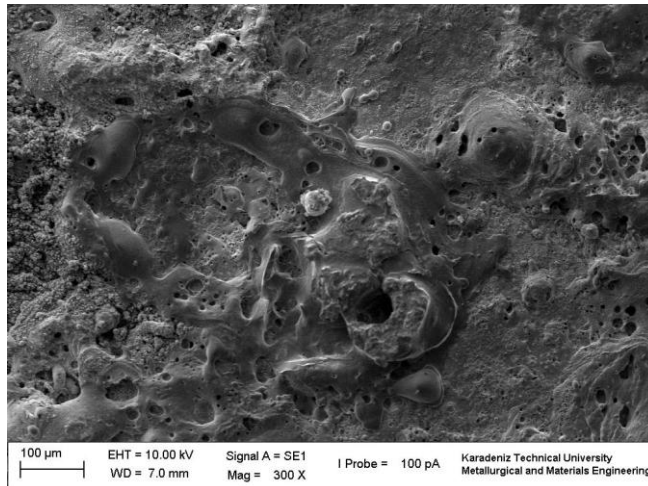
Şekil 3.62. (GNP-4) B1A'ya ait ark morfolojisi
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

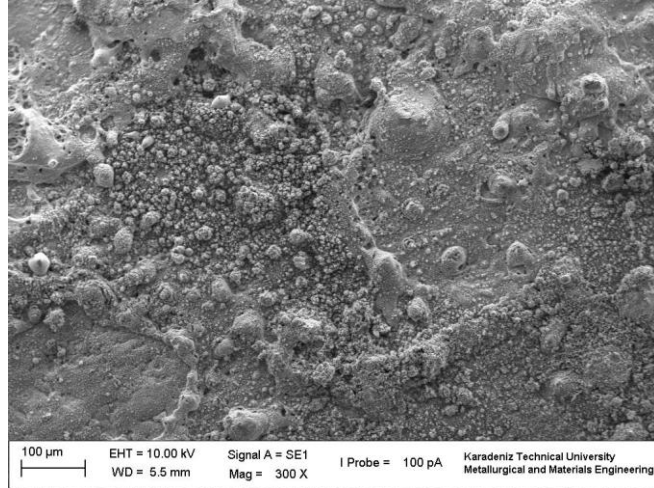


(b)

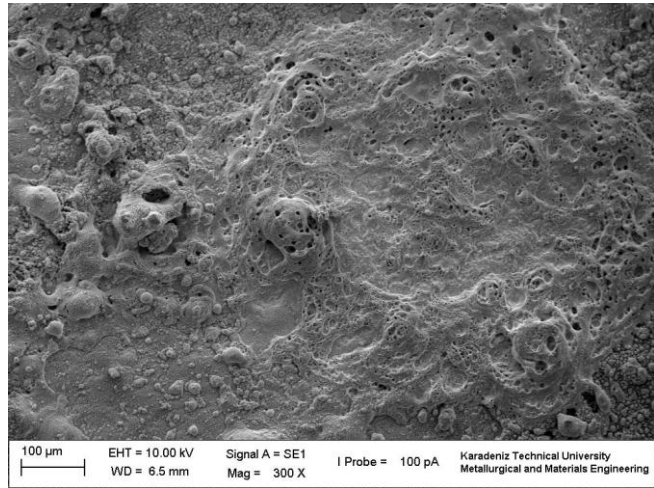


(c)

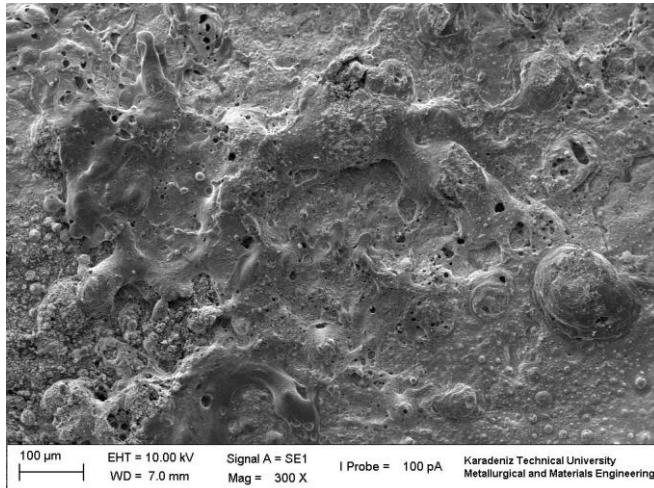
Şekil 3.63. (GNP-7) B1U'ya ait ark morfolojisi
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)



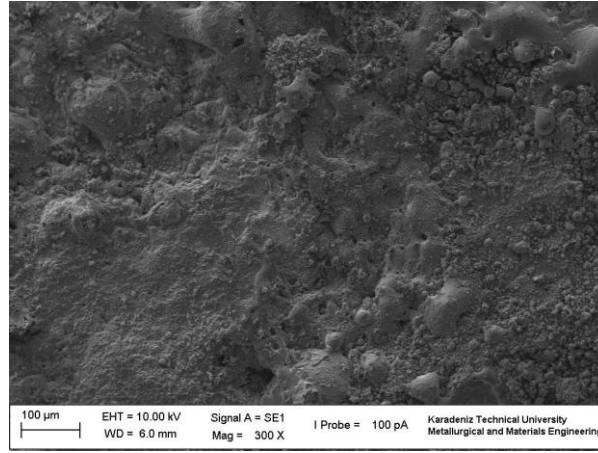
(b)



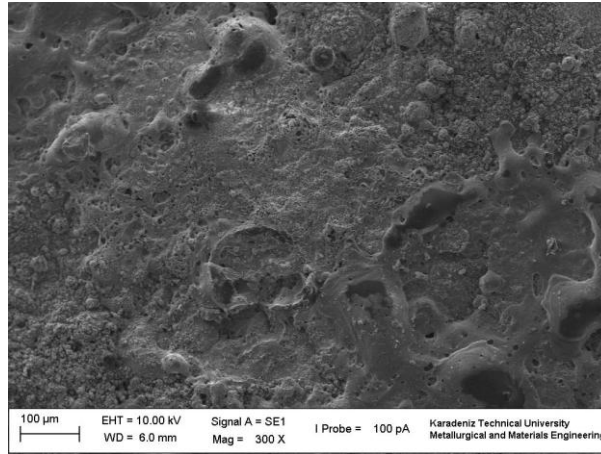
(c)

Şekil 3.64. (GNP-7) B1A'ya ait ark morfolojisi
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

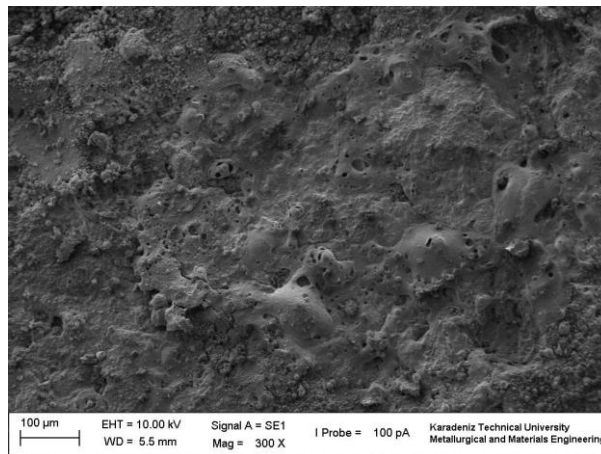
3.5.1.3. Cu-Grafen nanolevha Kontak Malzemeleri



(a)

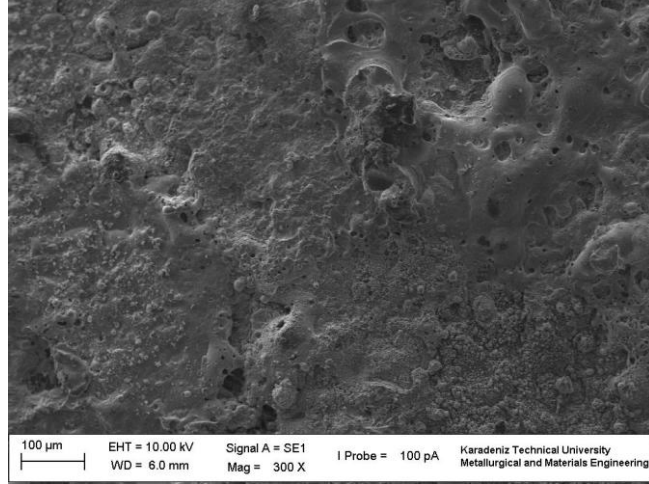


(b)

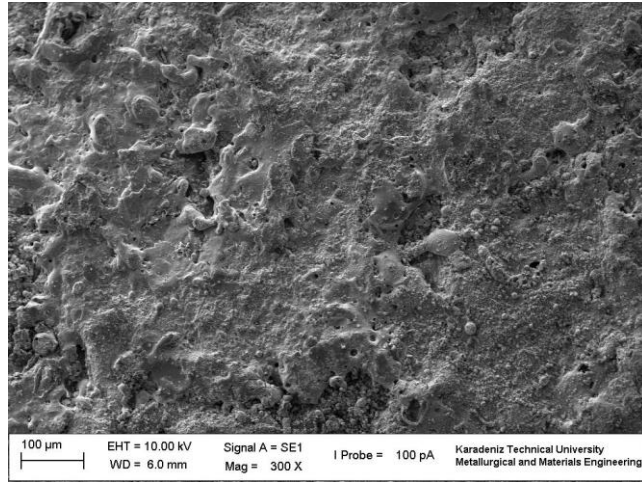


(c)

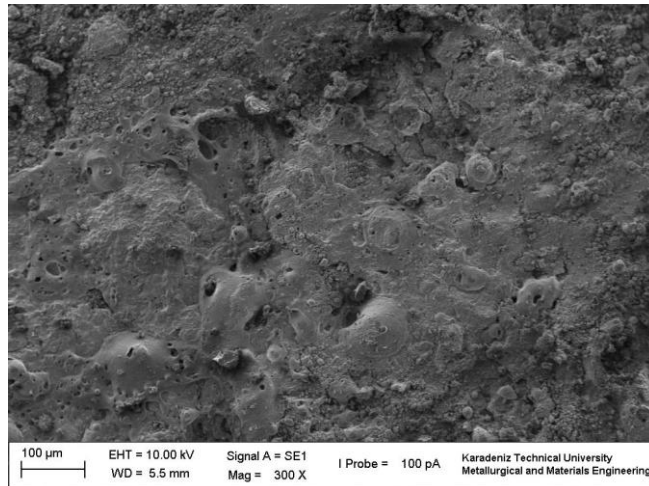
Şekil 3.65. (GRNL-2) B1U'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

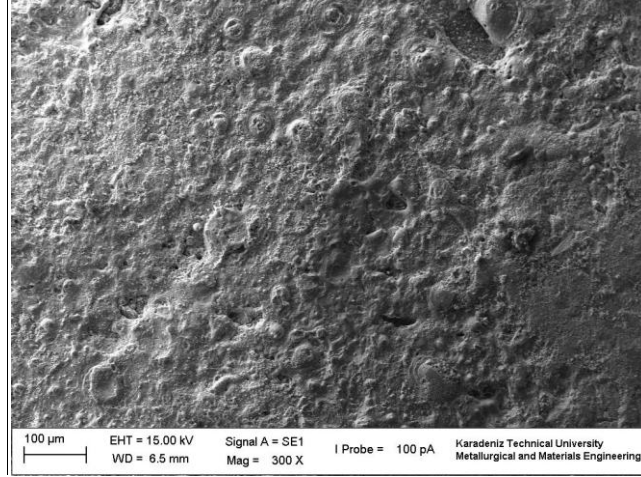


(b)

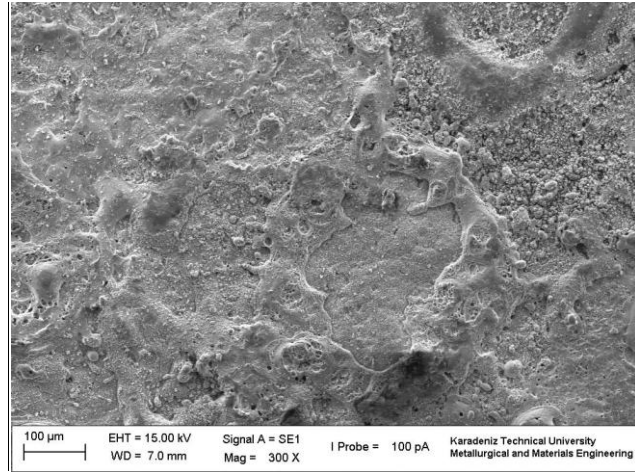


(c)

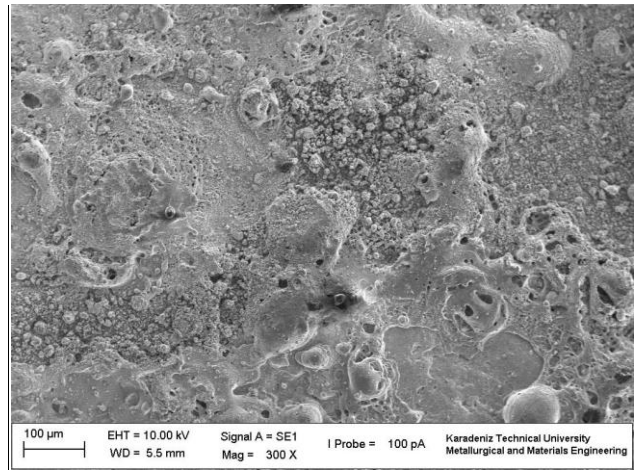
Şekil 3.66. (GRNL-2) B1A'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

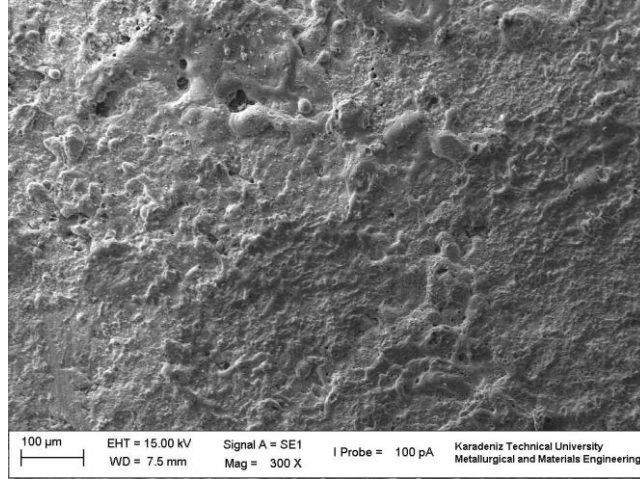


(b)

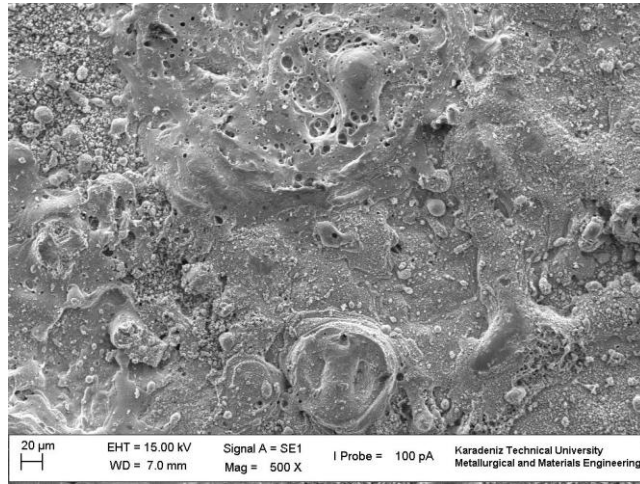


(c)

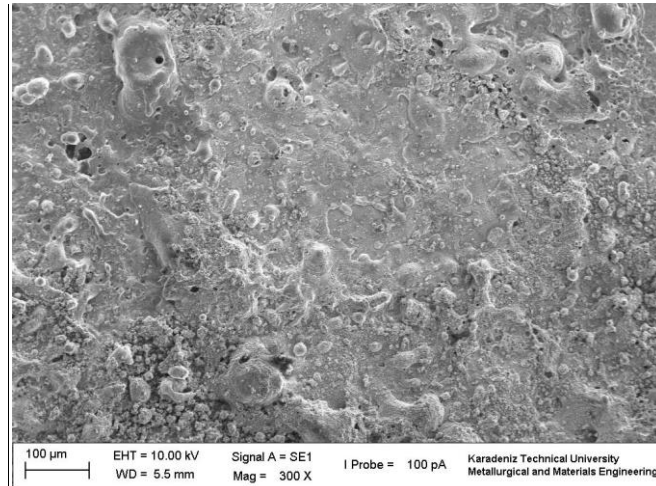
Şekil 3.67. (GRNL-4) B1U'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

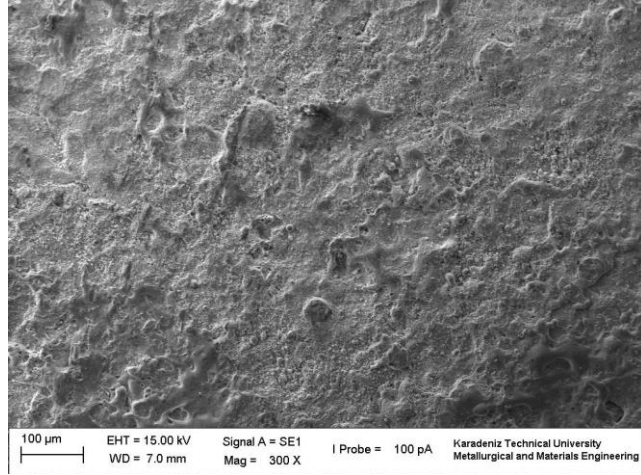


(b)

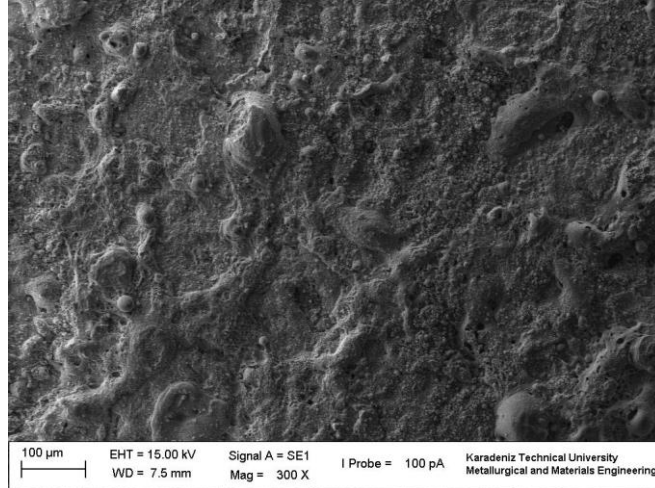


(c)

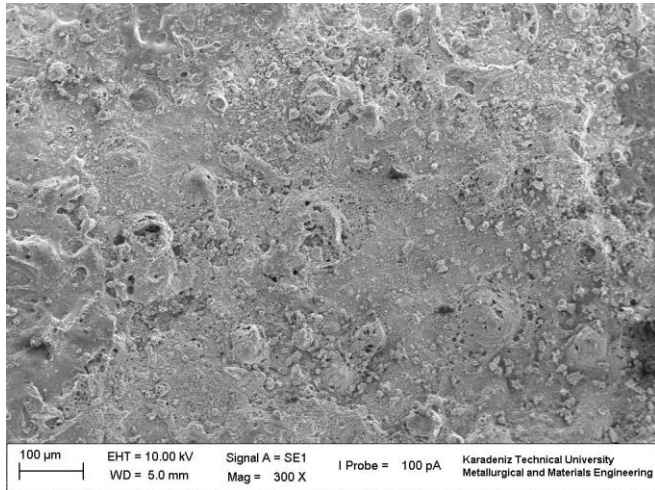
Şekil 3.68. (GRNL-4) B1A'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

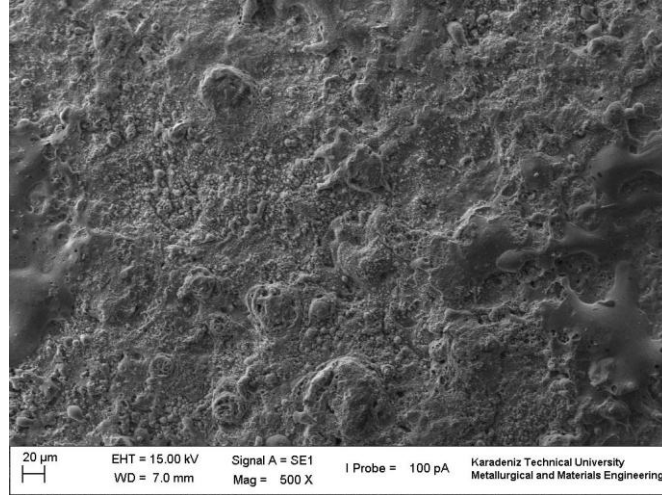


(b)

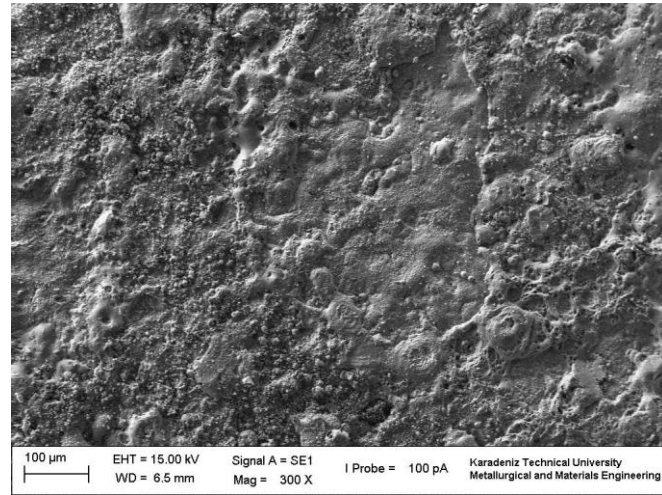


(c)

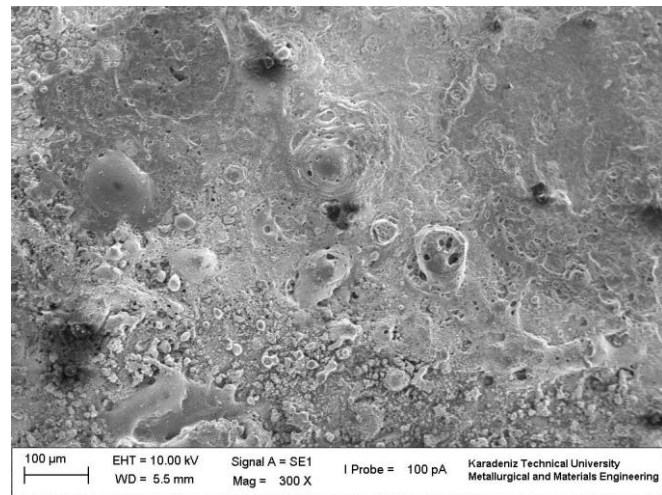
Şekil 3.69. (GRNL-7) B1U'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)



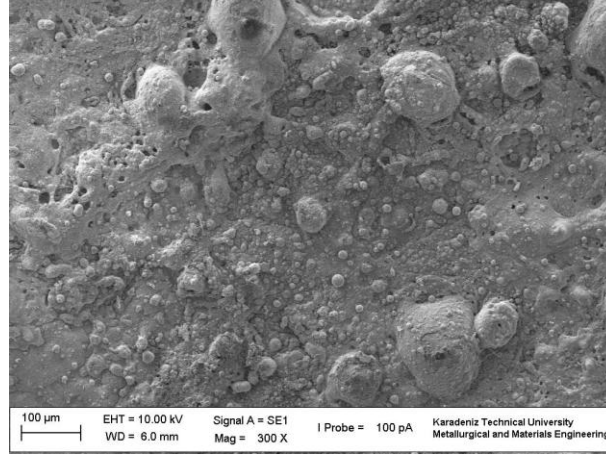
(b)



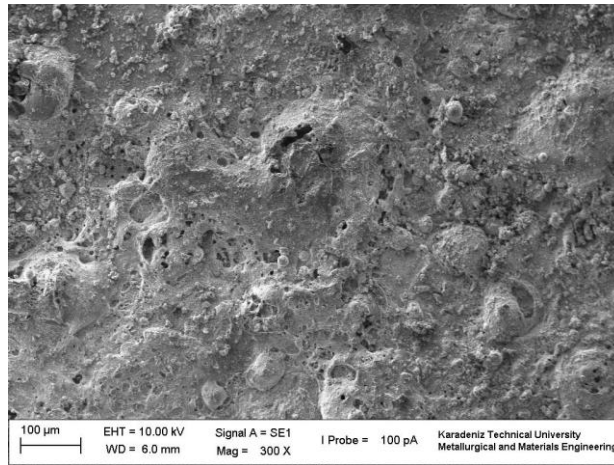
(c)

Şekil 3.70. (GRNL-7) B1A'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

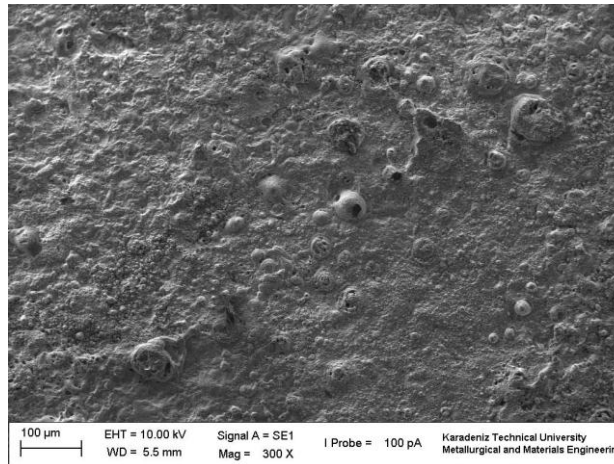
3.5.1.4. Cu-Karbon nanotüp Kontakt Malzemeleri



(a)

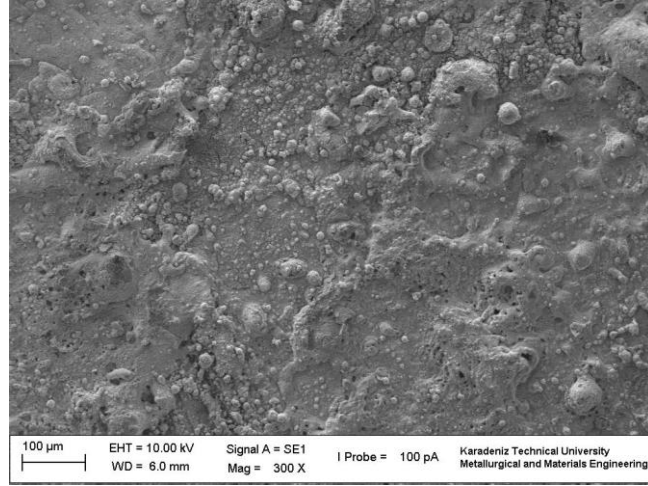


(b)

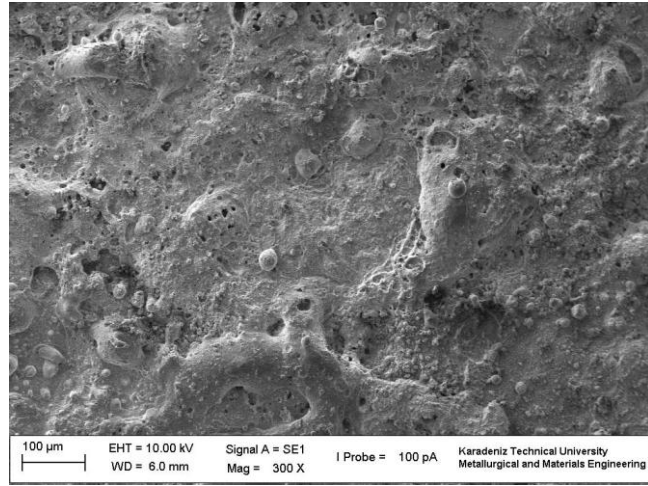


(c)

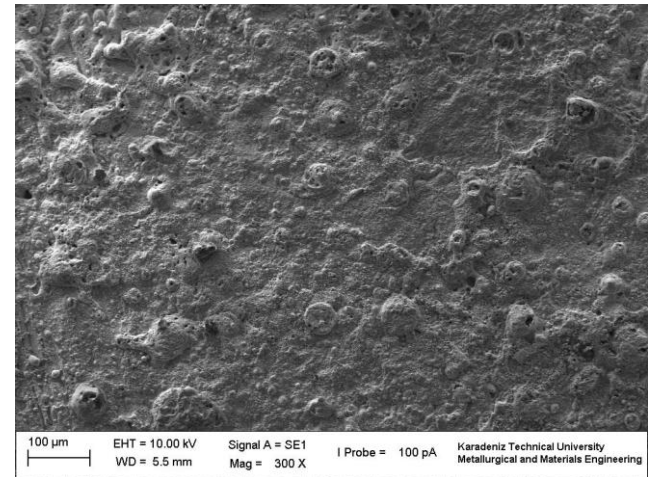
Şekil 3.71. (KNT-2) B1U'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

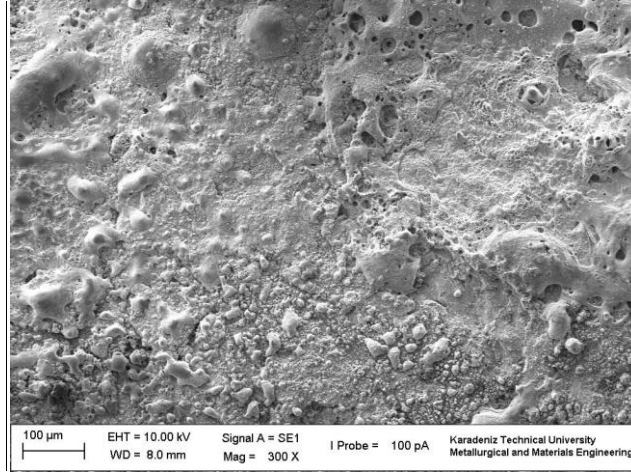


(b)

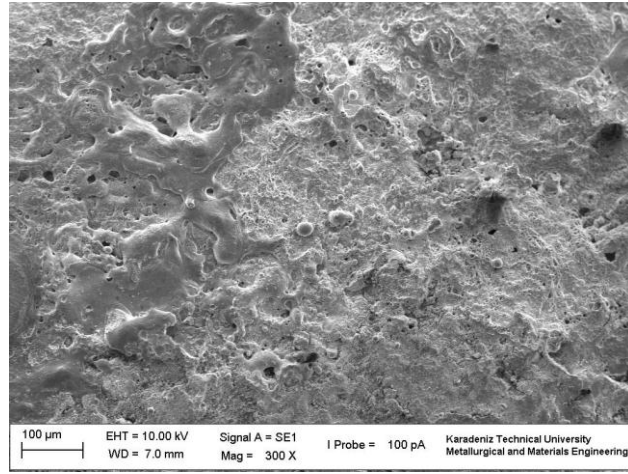


(c)

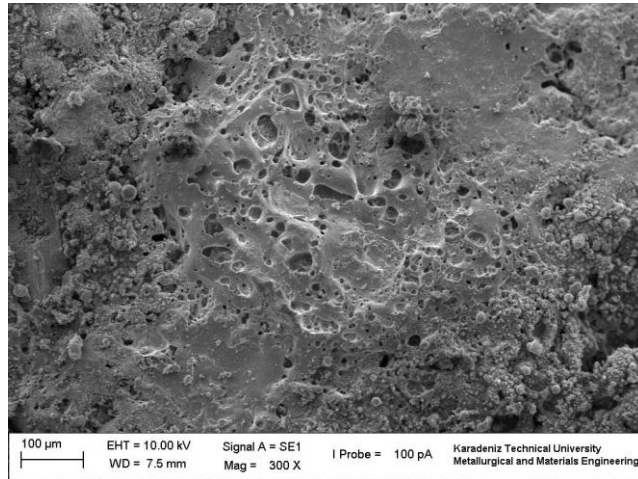
Şekil 3.72. (KNT-2) B1A'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

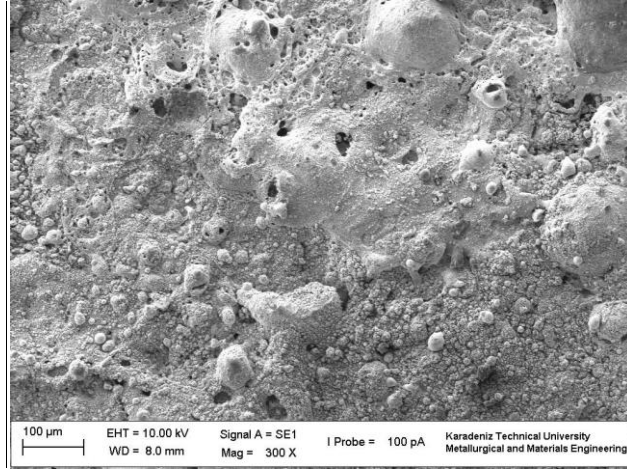


(b)

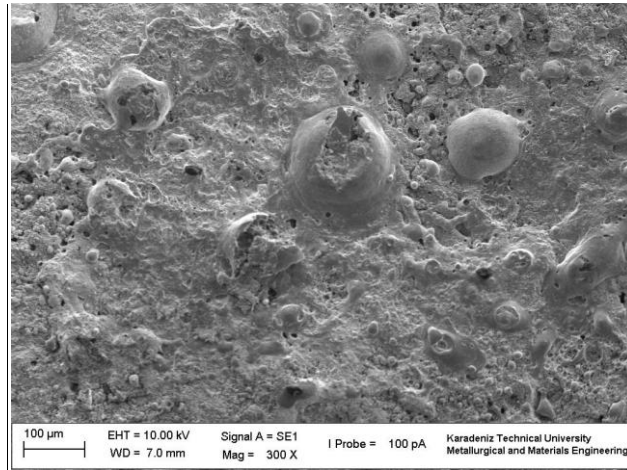


(c)

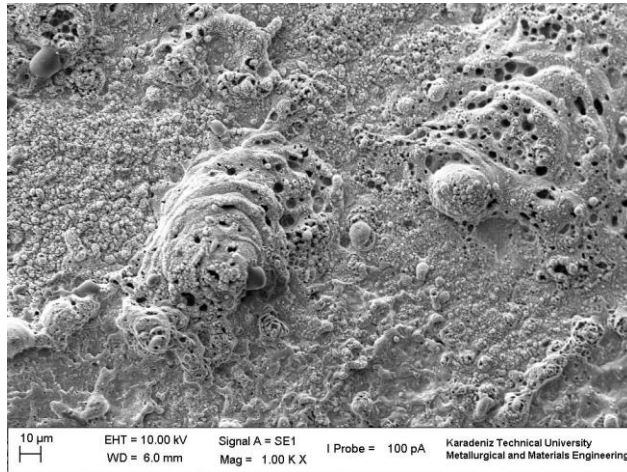
Şekil 3.73. (KNT-4) B1U'ya ait ark morfolojisi
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

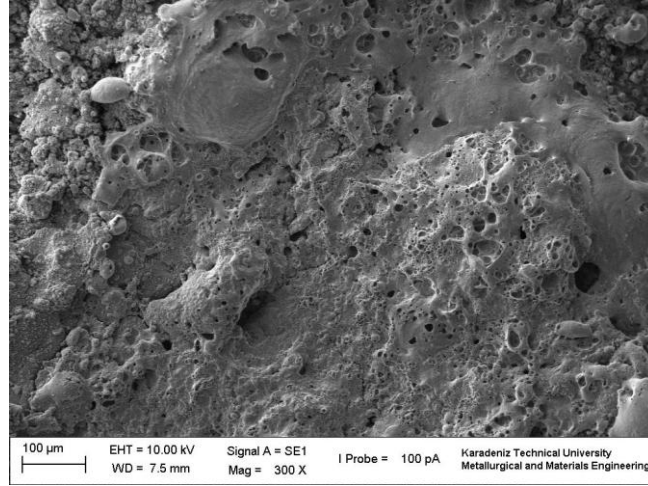


(b)

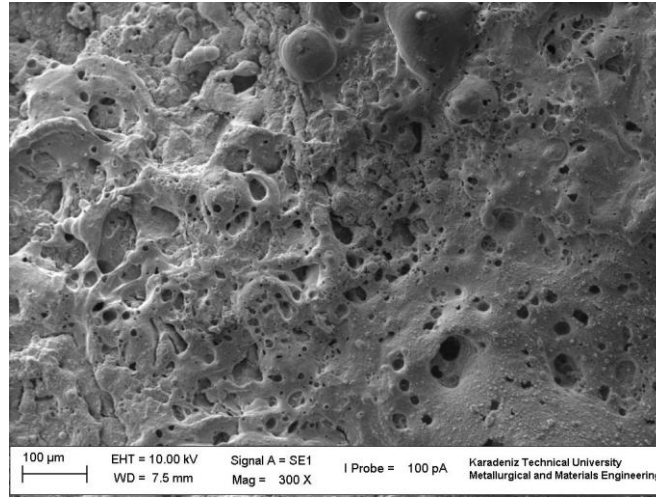


(c)

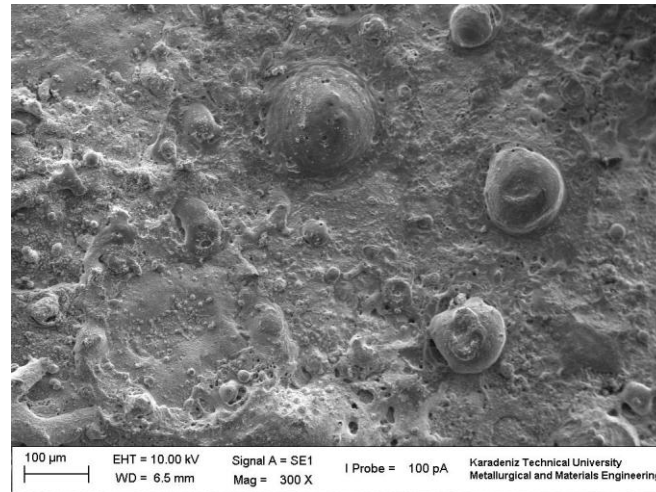
Şekil 3.74. (KNT-4) B1A'ya aiy ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)

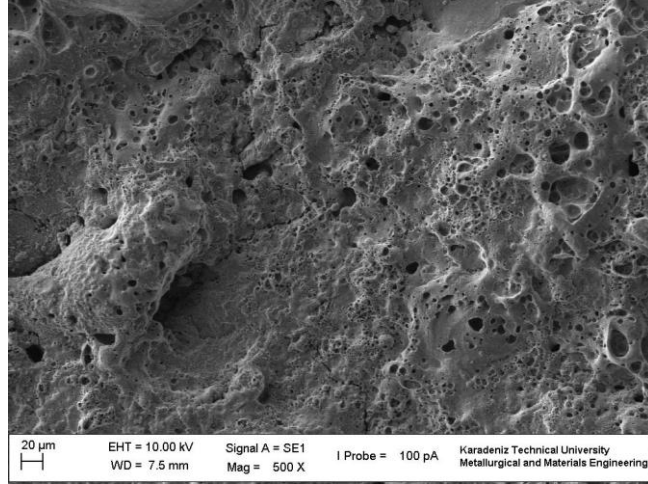


(b)

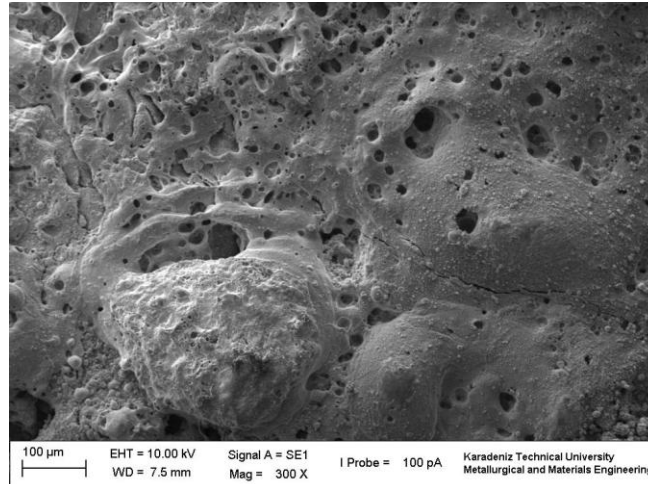


(c)

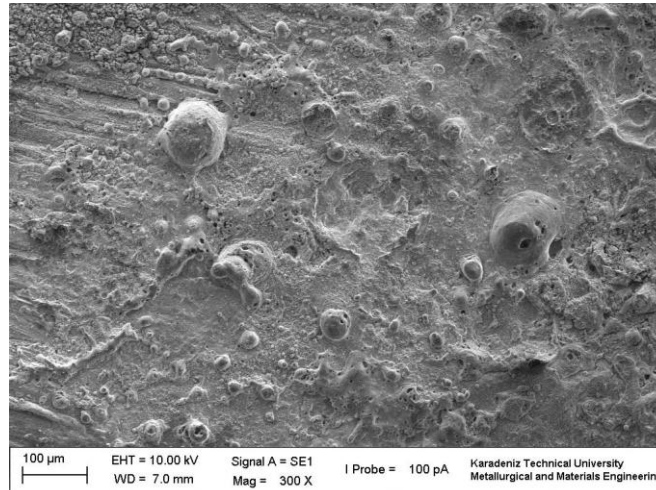
Şekil 3.75. (KNT-7) B1U'ya ait ark morfolojisi;
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim



(a)



(b)

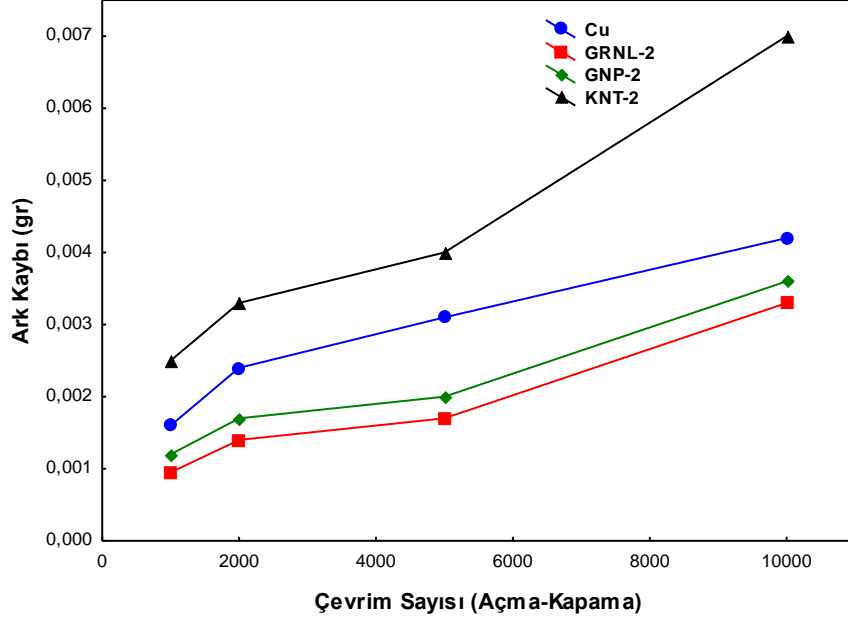


(c)

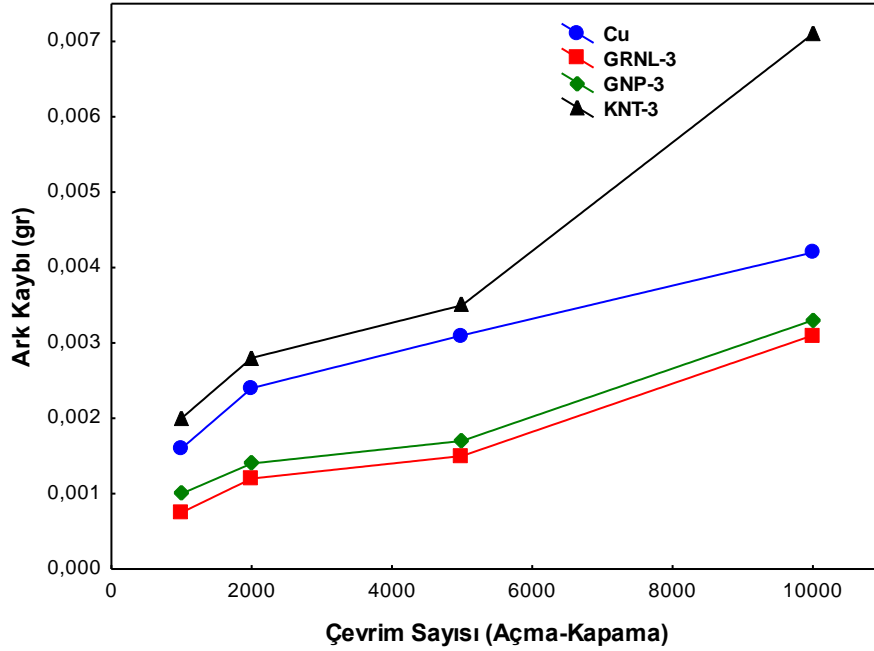
Şekil 3.76. (KNT-7) B1A'ya ait ark morfolojisi
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

3.5.2. Ark Kayıpları

Kontak performas deneyleri sonucunda, artan çevrim sayısı ile ark kayıplarının artış gösterdiği bununla birlikte artış eğilimlerinin malzeme bileşimine göre farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir.



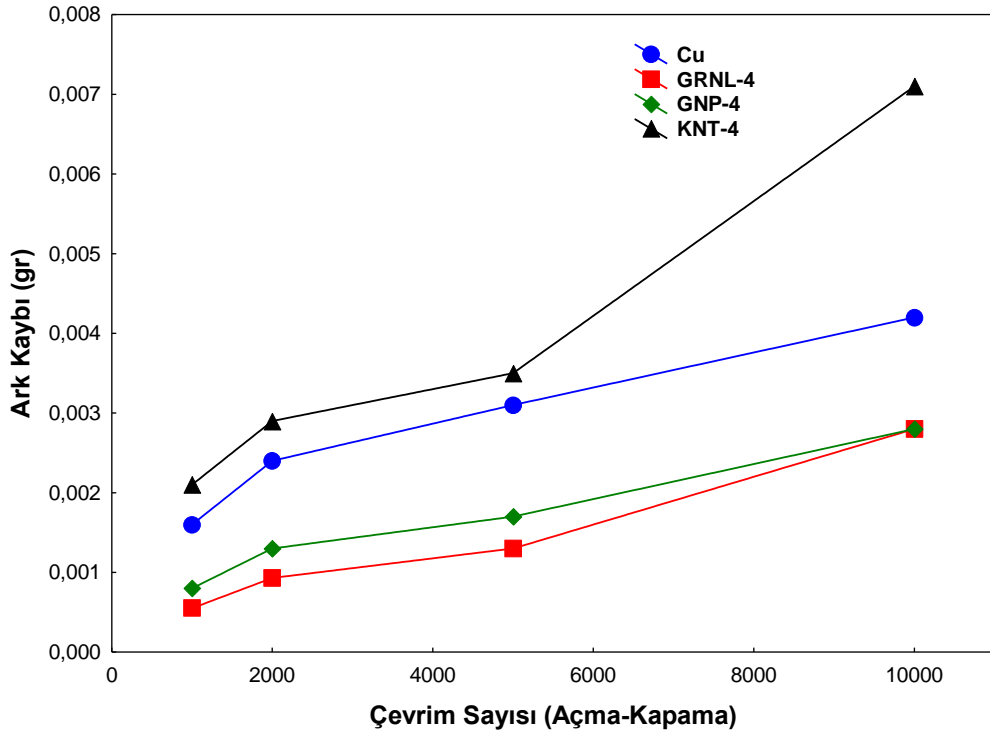
(a)



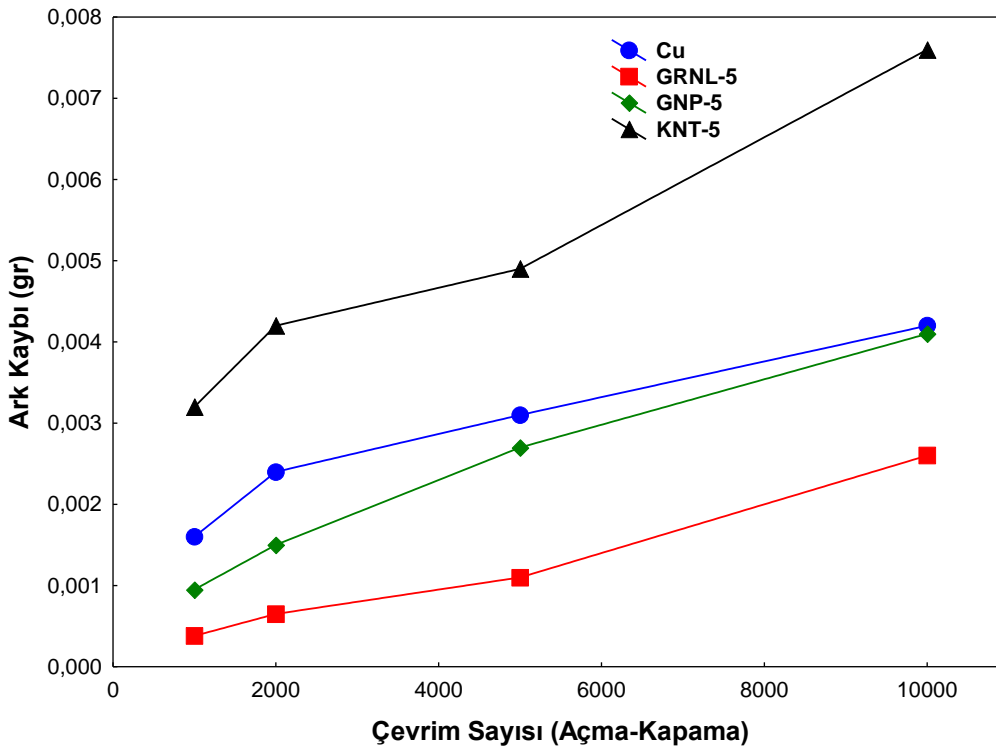
(b)

Şekil 3.77. Ark kaybının değişimi; ağ. % (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5, (d) 2, (e) 2.5, (f) 3 ve (g) nanopartikül takviyeli nanokompozitler

Şekil 3.77'nin devamı

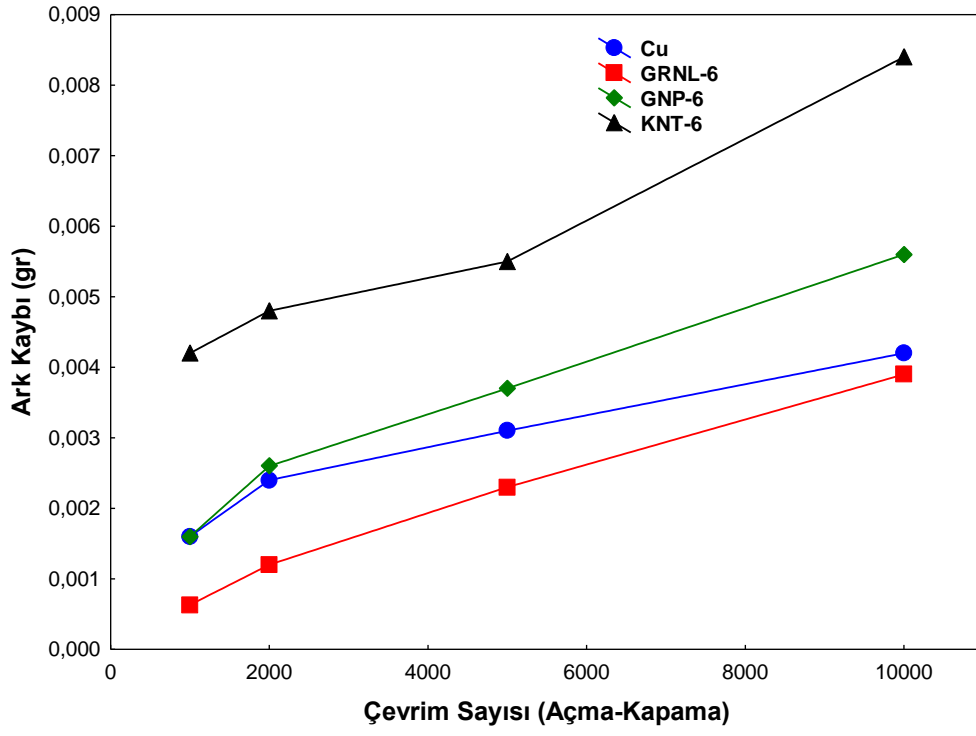


(c)

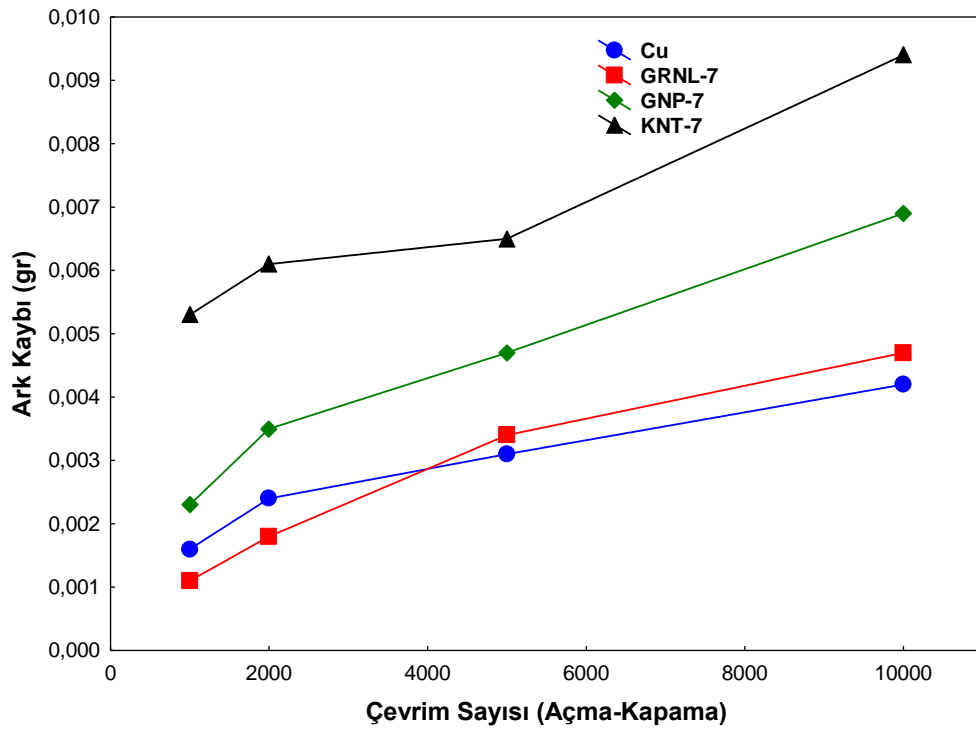


(d)

Şekil 3.77'nin devamı

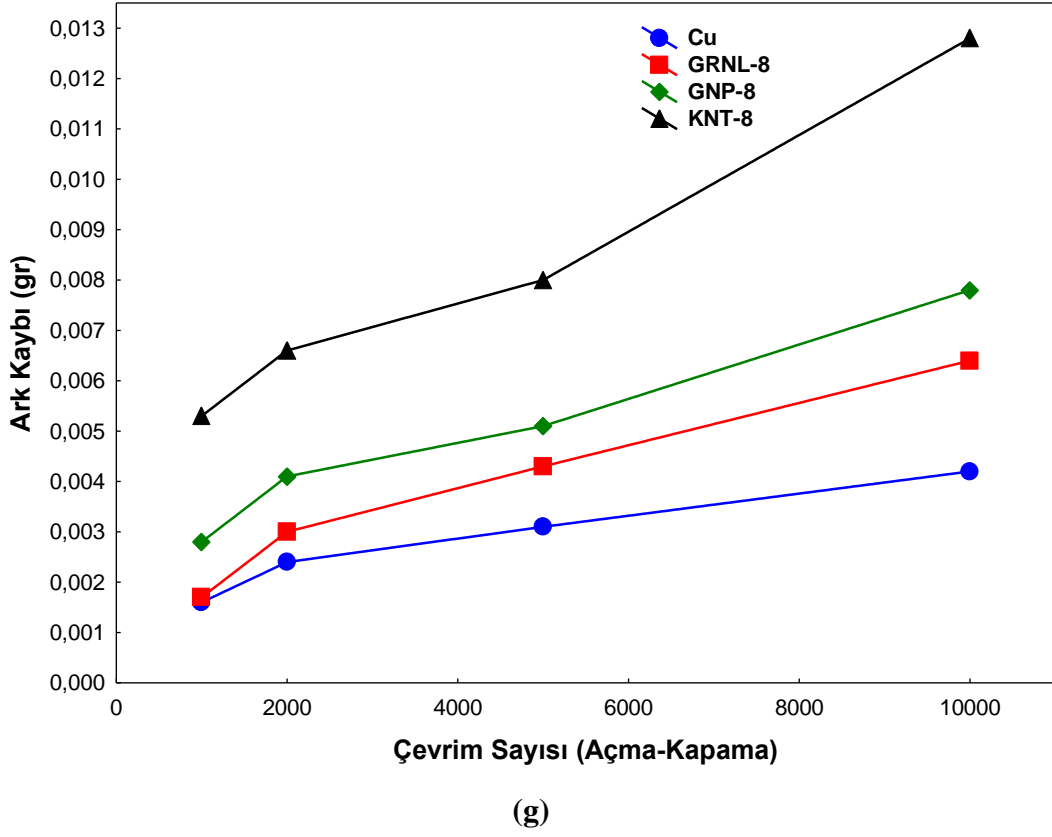


(e)

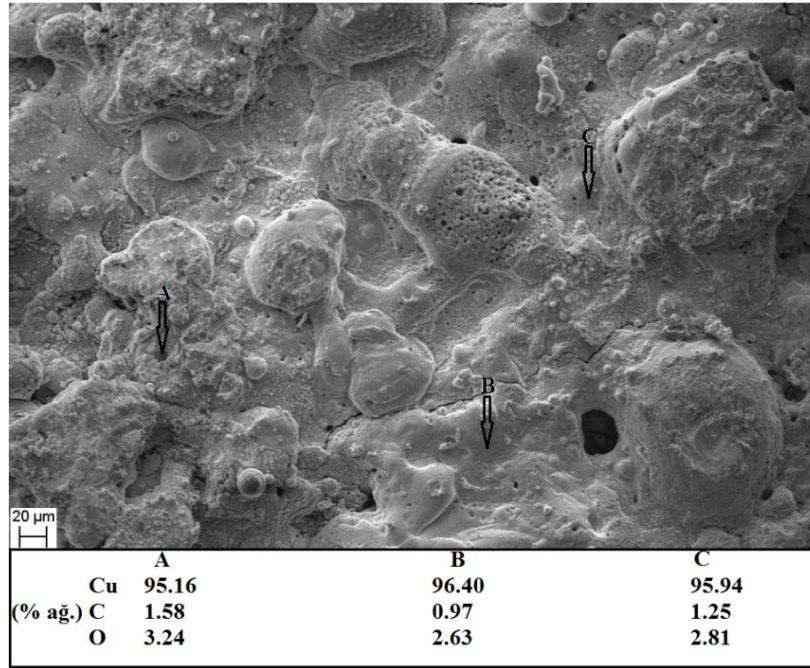


(f)

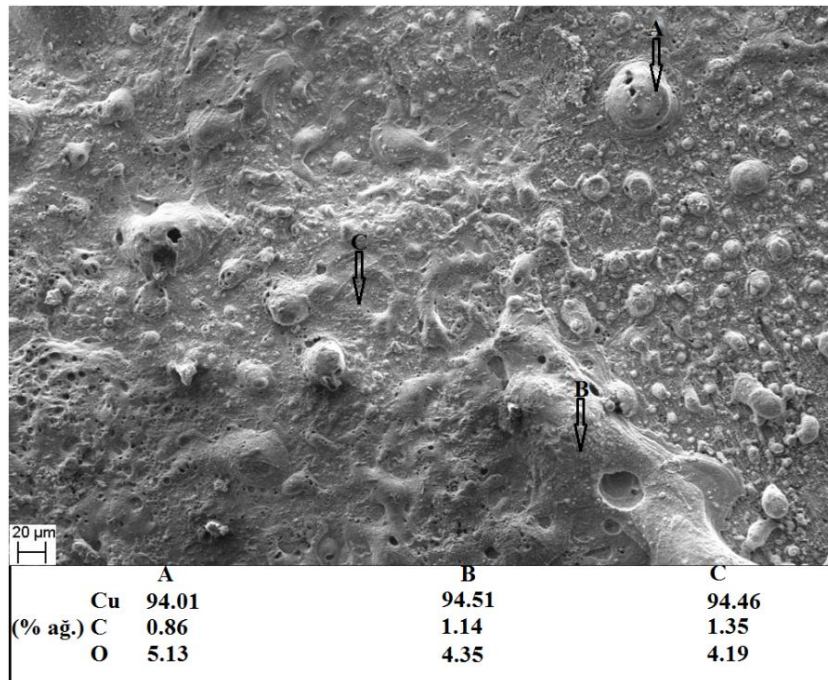
Şekil 3.77'nin devamı



3.5.3. Ark Bölgesi Analizleri



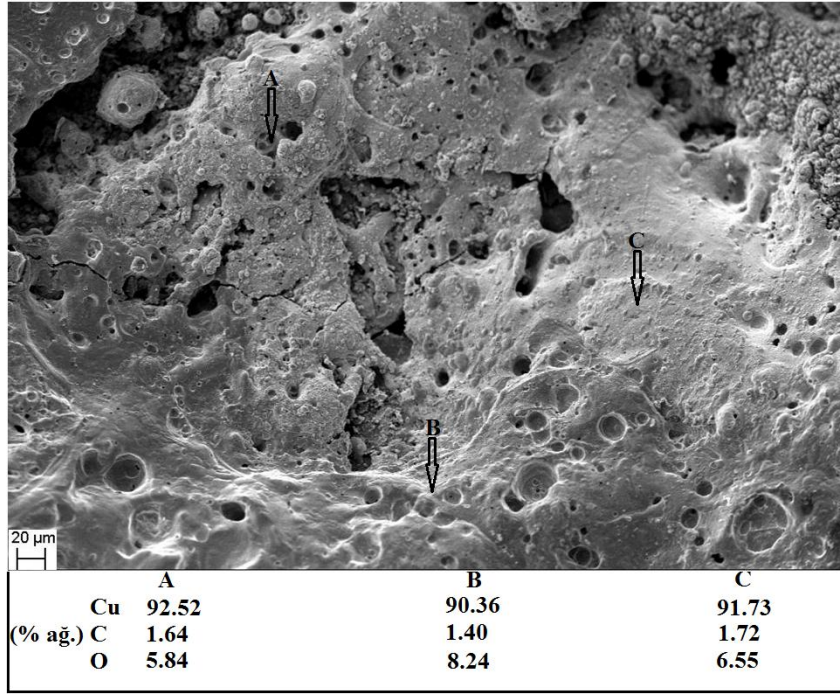
(a)



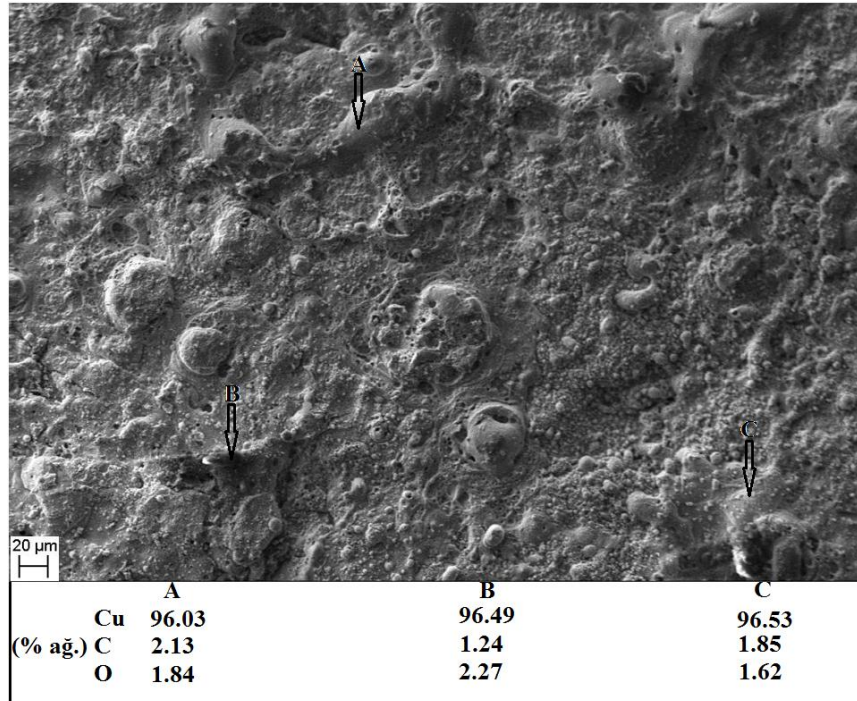
(b)

Şekil 3.78. GNP-4 kodlu kontaklardan A1A numunesi için noktasal analiz; (a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

Şekil 3.78'in devamı



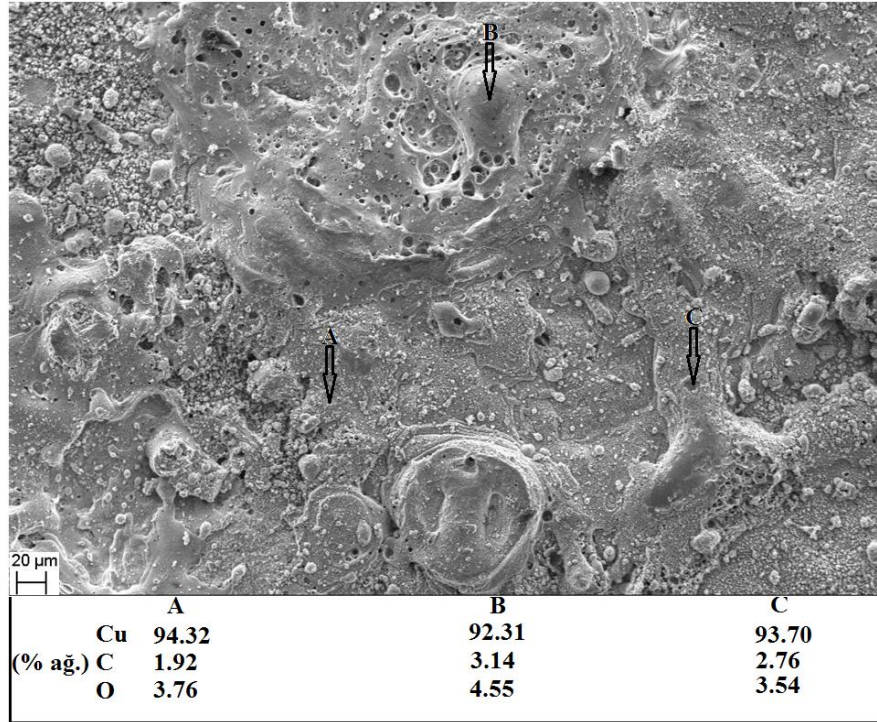
(c)



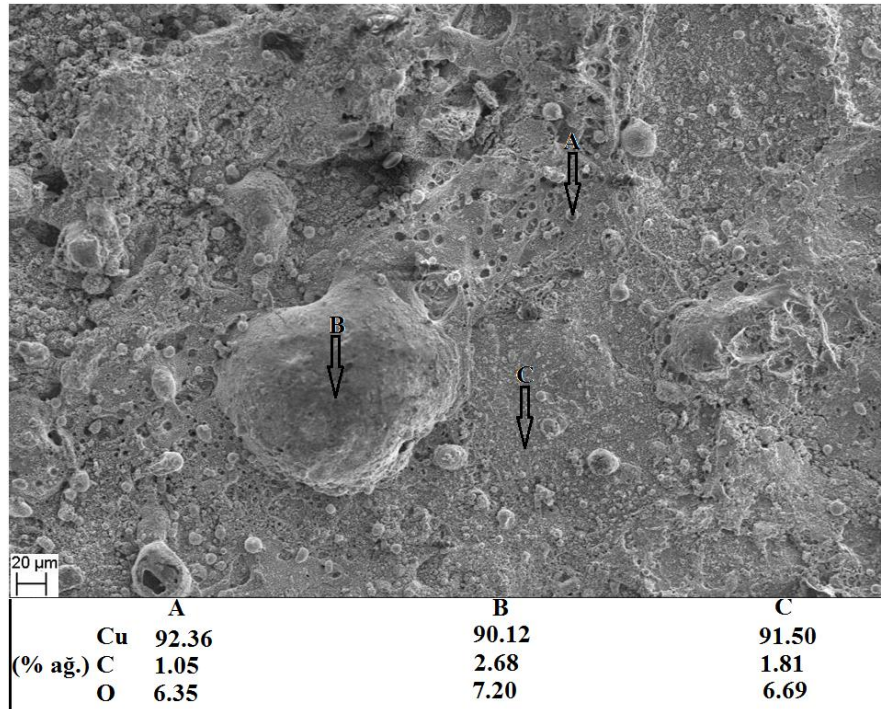
(a)

Şekil 3.79. GRNL-4 kodlu kontaklardan A1A numunesi için noktasal analiz; (a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

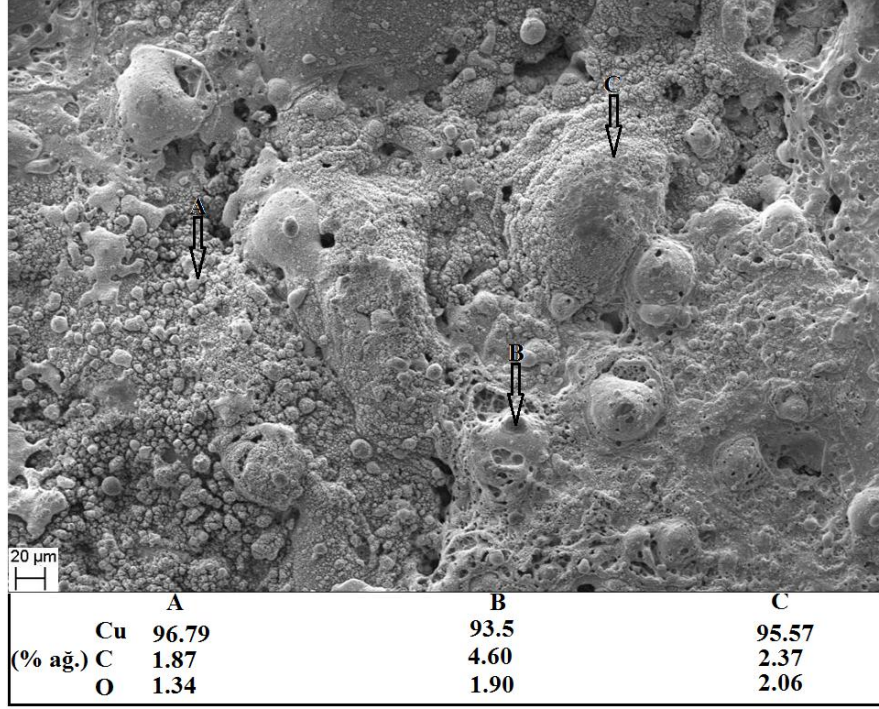
Şekil 3.79'un devamı



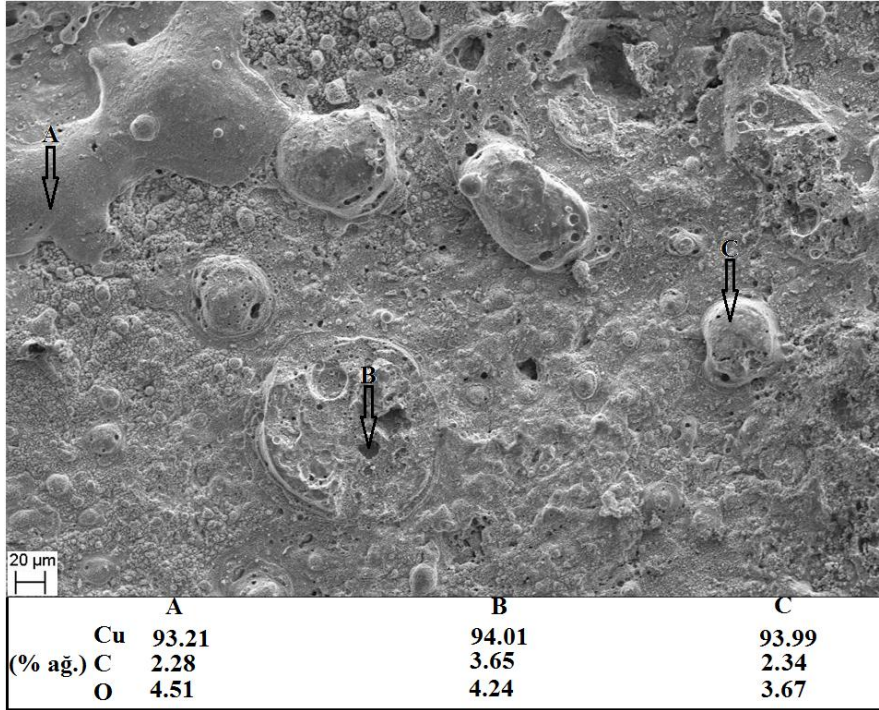
(b)



(c)



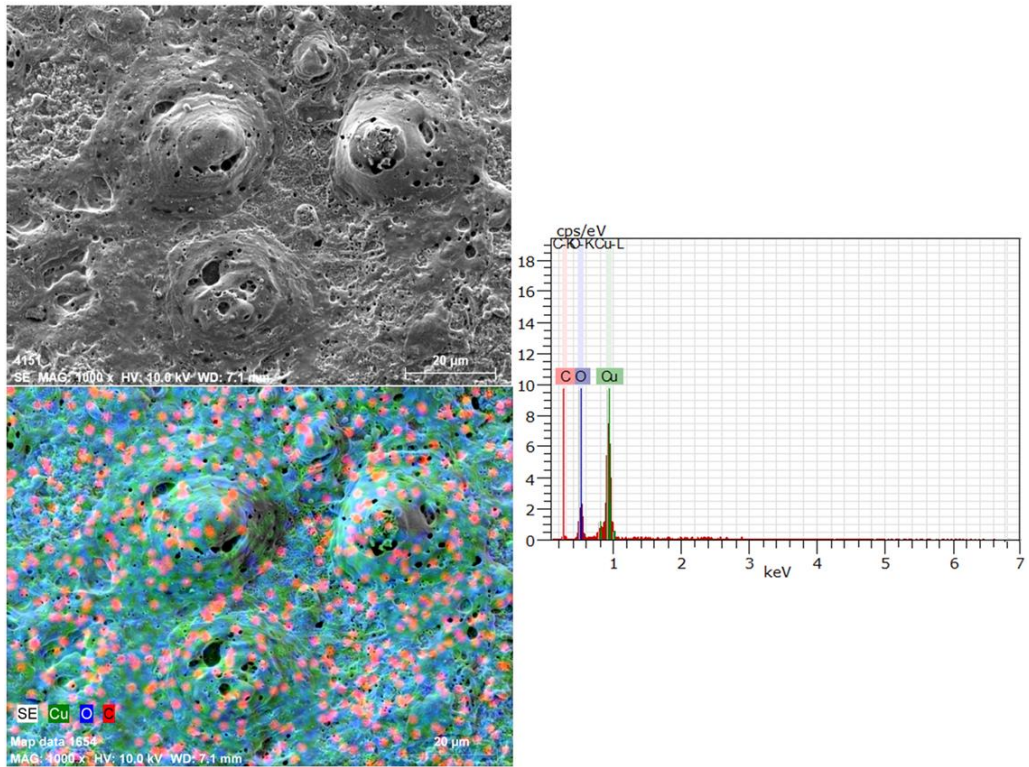
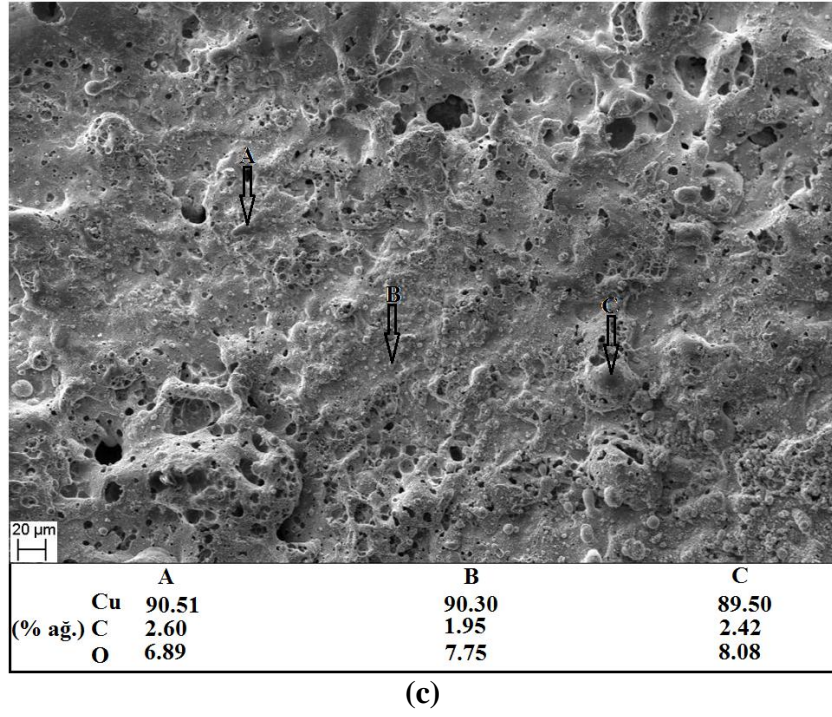
(a)



(b)

Şekil 3.80. KNT-4 kodlu kontaklardan A1A numunesi için noktasal analiz (a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

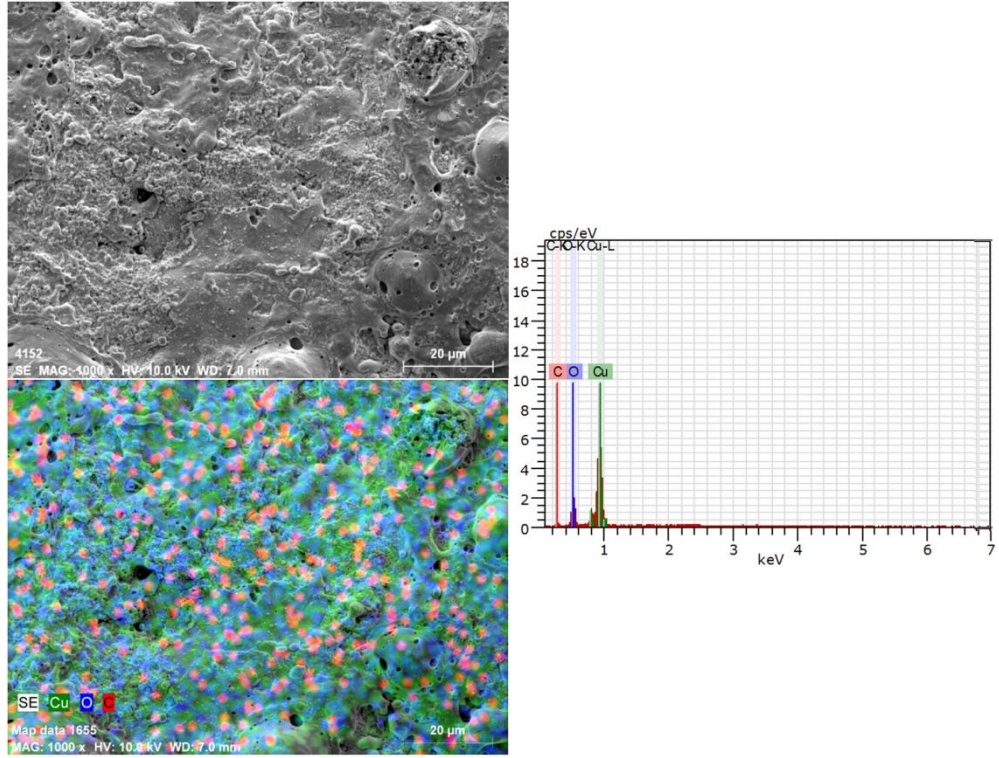
Şekil 3.80'in devamı



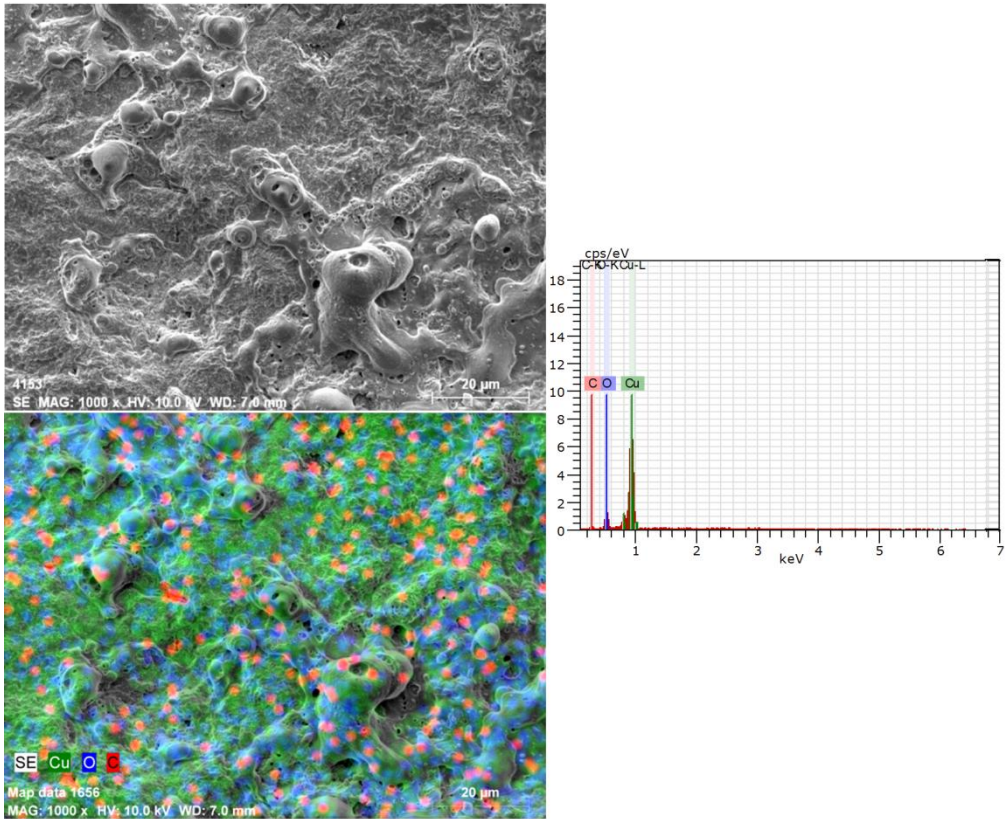
(a)

Şekil 3.81. GNP-4 kodlu kontaklardan A1U numunesi için elemental haritalama
(a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

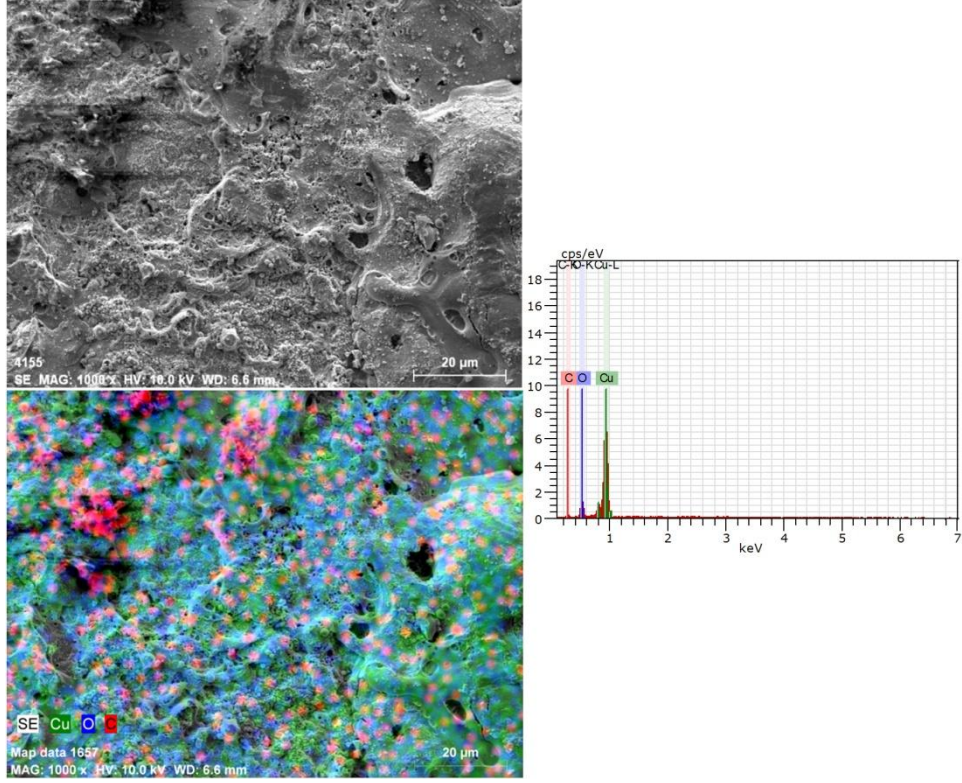
Şekil 3.81'in devamı



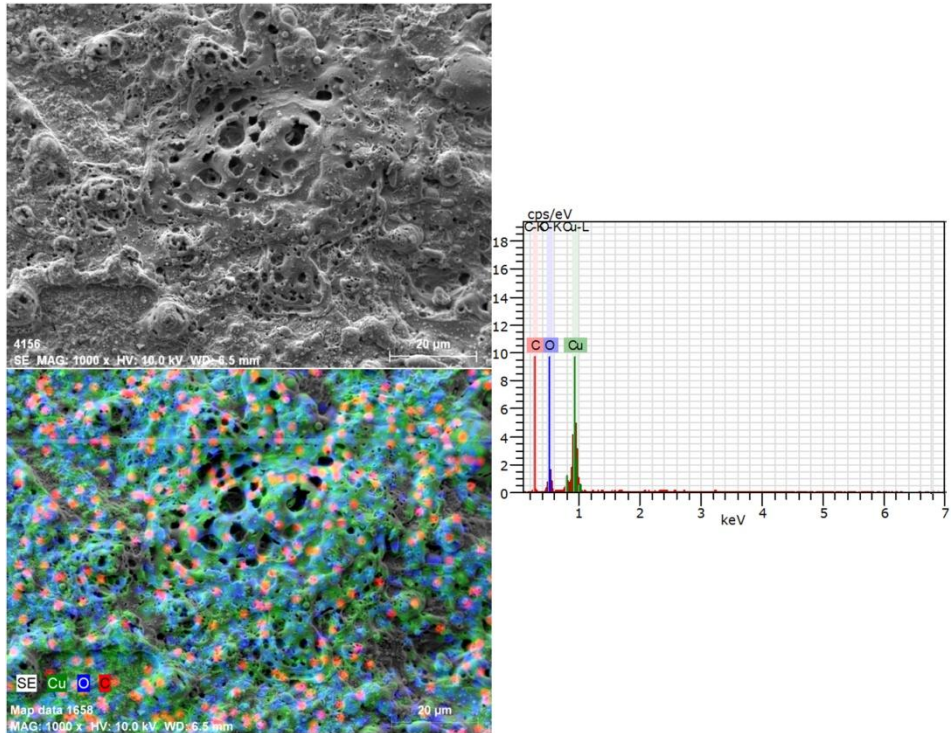
(b)



(c)



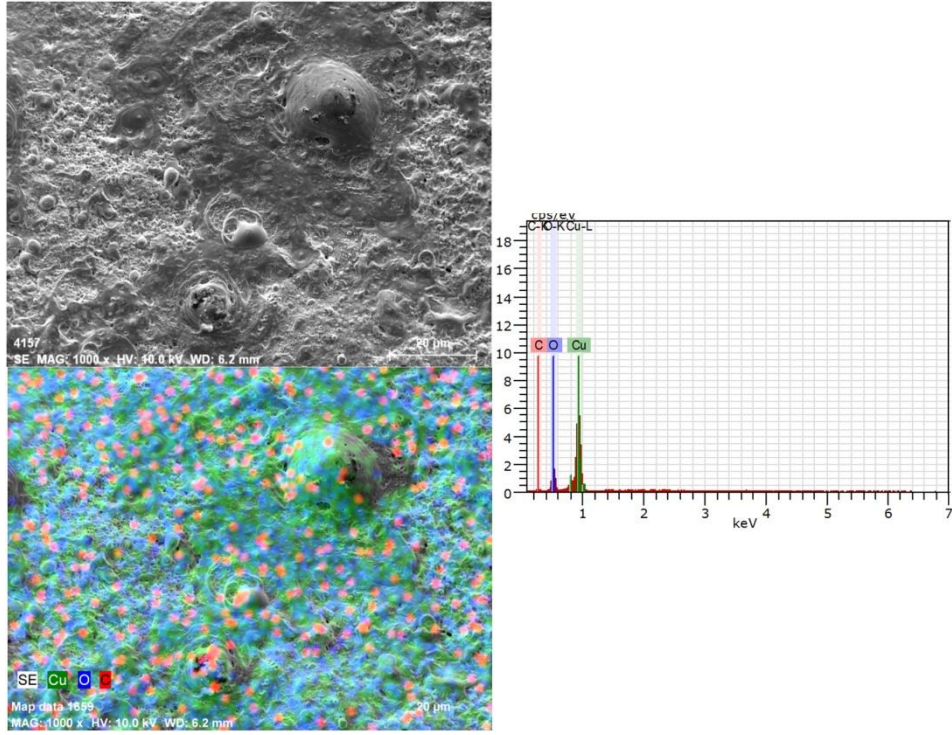
(a)



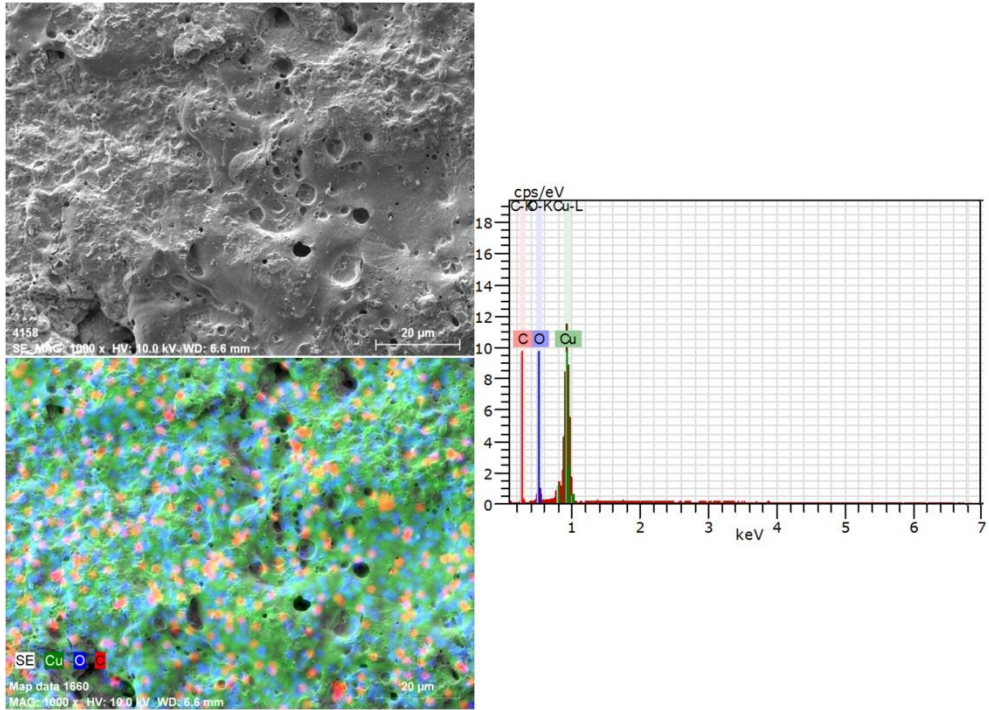
(b)

Şekil 3.82. GRNL-4 kodlu kontaklardan A1U numunesi için elemental haritalama (a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

Şekil 3.82'nin devamı



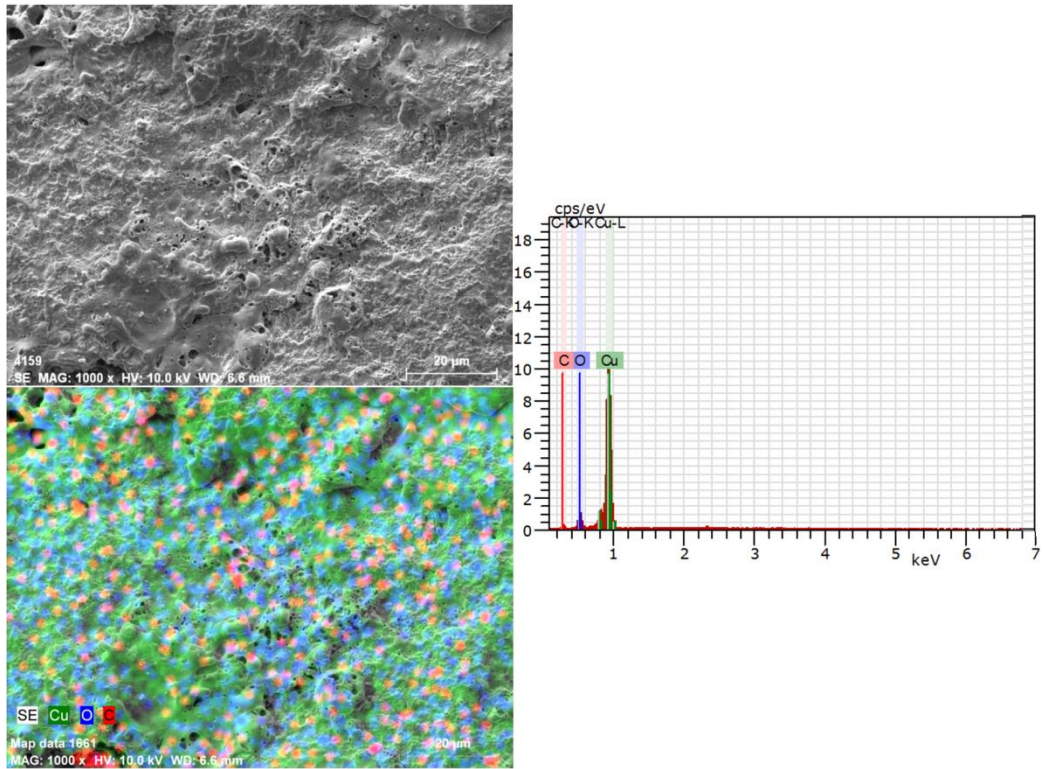
(c)



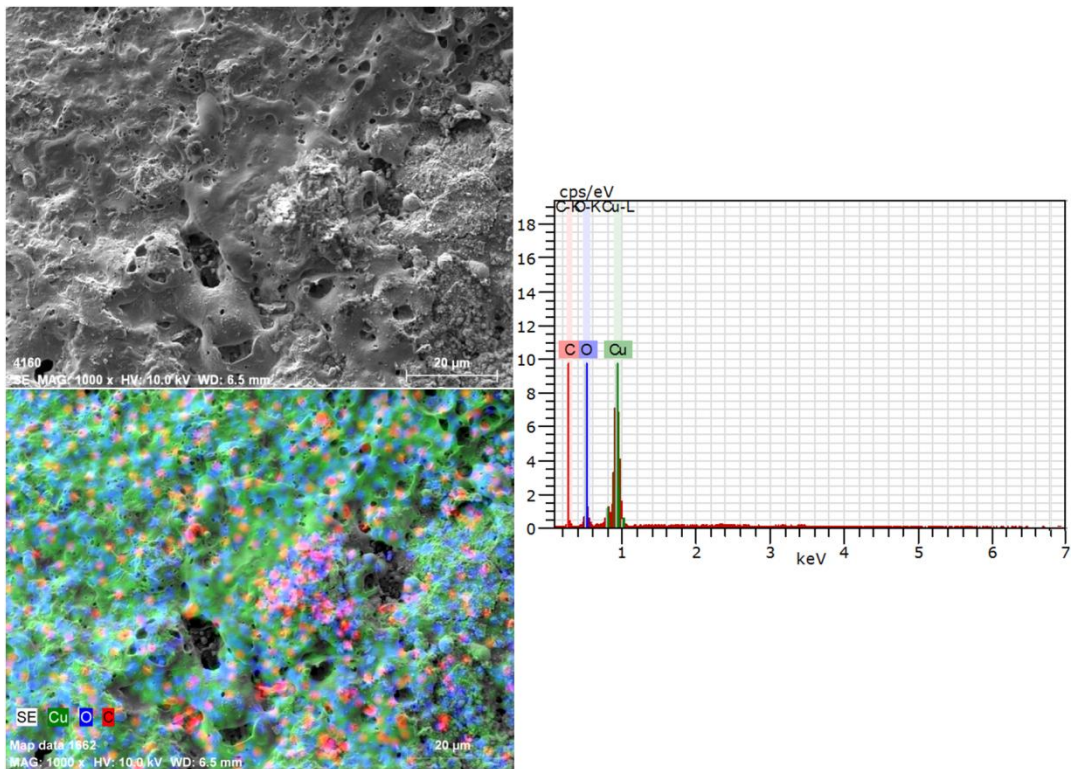
(a)

Şekil 3.83. KNT-4 kodlu kontaklardan A1U numunesi için elemental haritalama (a) 2000, (b) 5000 ve (c) 10000 çevrim

Şekil 3.83'ün devamı



(b)



(c)

3.6. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kontaklar İçin Katman Seçimi

Fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretimi için en iyi özelliklerini sağlayan bileşimlerin belirlenmesi gereklidir. Dolayısıyla şimdiye kadar yapılan deneysel araştırmaların sonuçlarını bir tablo halinde vererek fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretiminde katman olarak kullanılacak kompozit bileşimlerinin belirlenmesi gereklidir. Tablo 3.1'e göre en iyi iletkenlik katmanı için **GNP-2**, en iyi ömür yâda ark erozyon direnci için **GRNL-3** ve en iyi ömür + en iyi iletkenlik katmanı için ise **GRNL-4** kodlu kompozit seçilmiştir.

Tablo 3.2. Karşılaştırmalı özellikler (■ Çok iyi, ■ İyi, ■ Düşük, ■ Kötü)

	Yoğunluk	İletkenlik	Sertlik	Aşınma direnci	Ark erozyon direnci	Maliyet
Cu	****	****	****	*	**	Düşük
GNP-2	****	****	****	**	**	Düşük
GNP-3	****	****	***	**	**	Düşük
GNP-4	**	****	**	**	**	Düşük
GNP-5	**	**	**	**	**	Düşük
GNP-6	**	**	**	**	**	Düşük
GNP-7	**	**	**	**	*	Düşük
GNP-8	*	**	**	**	*	Düşük
GRNL-2	****	****	****	**	**	Yüksek
GRNL-3	****	****	****	**	**	Yüksek
GRNL-4	**	****	****	**	****	Yüksek
GRNL-5	**	**	**	****	**	Yüksek
GRNL-6	**	**	**	**	**	Yüksek
GRNL-7	**	**	**	**	**	Yüksek
GRNL-8	**	**	**	**	*	Yüksek
KNT-2	**	**	****	*	**	Yüksek
KNT-3	**	**	**	**	**	Yüksek
KNT-4	*	**	**	**	**	Yüksek
KNT-5	*	**	**	**	*	Yüksek
KNT-6	*	*	**	**	*	Yüksek
KNT-7	*	*	*	*	*	Yüksek
KNT-8	*	*	*	*	*	Yüksek

İki Kademeli FDM'ler

GRNL-3	GRNL-4
GRNL-4	GNP-2
FDM-3	FDM-6
GRNL-3	GRNL-4
GNP-2	GRNL-3
FDM-2	FDM-5
GRNL-3	GRNL-4
Cu	Cu
FDM-1	FDM-4

(a)

Üç Kademeli FDM'ler

GRNL-3	GRNL-4
GRNL-4	GNP-2
GNP-2	GRNL-3
FDM-10	FDM-14
GRNL-3	GRNL-4
GNP-2	GRNL-3
GRNL-4	GNP-2
FDM-9	FDM-13
GRNL-3	GRNL-4
GRNL-4	GNP-2
Cu	Cu
FDM-8	FDM-12
GRNL-3	GRNL-4
GNP-2	GRNL-3
Cu	Cu
FDM-7	FDM-11

(b)

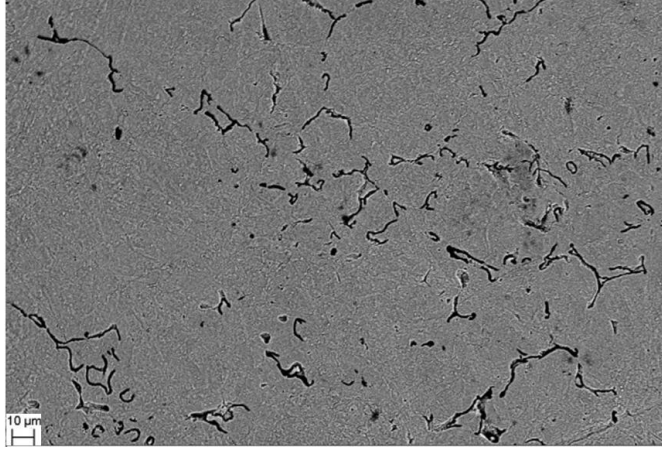
Şekil 3.84. Fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozitler

3.7. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kontak Malzemelerinin Özellikleri

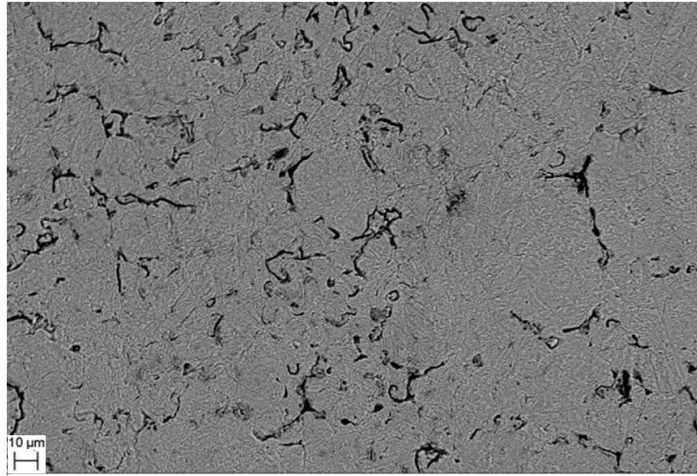
3.7.1. İçyapı

3.7.1.1. Katman İçyapıları

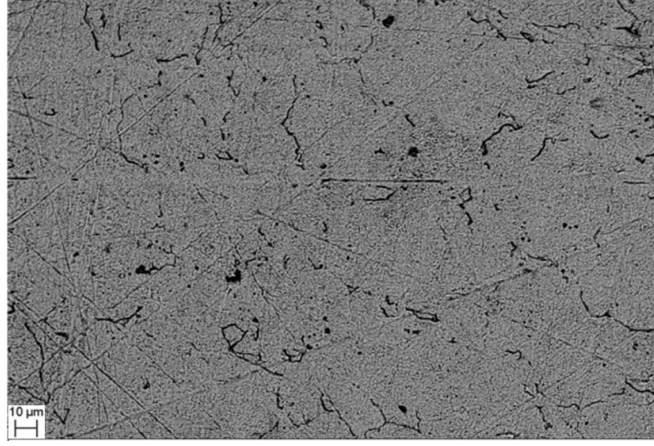
Aşağıdaki resimlerde fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozit malzemelerde katman yâda tabakaları oluşturan GNP-2, GRNL-3 ve GRNL-4 kodlu bileşimlere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.



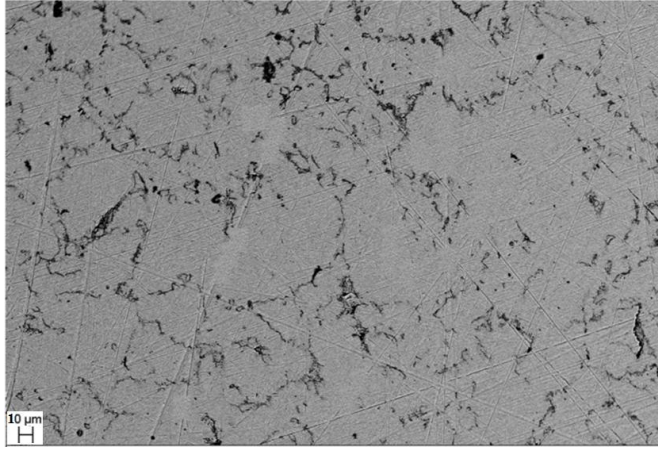
Şekil. 3.85. FDM-2 kodlu nanokompozitdeki GNP-2 katmanına ait içyapı



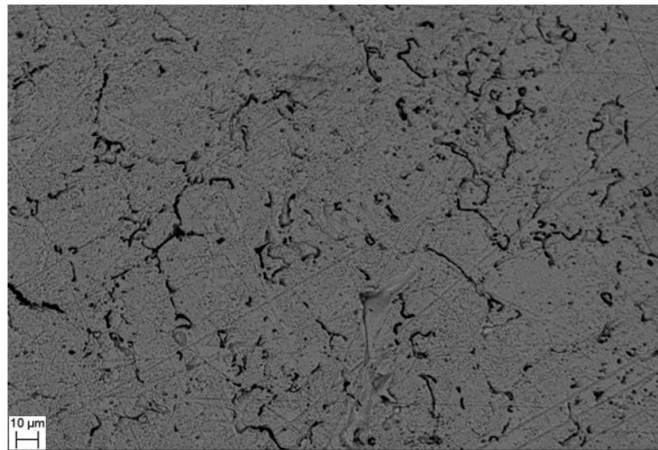
Şekil. 3.86. FDM-6 kodlu nanokompozitdeki GNP-2 katmanına ait içyapı



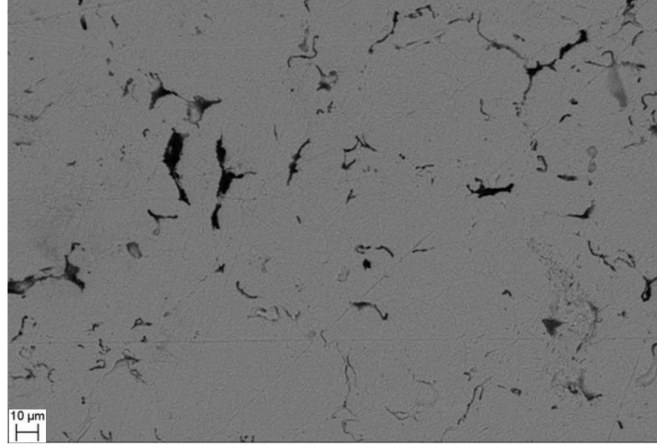
Şekil. 3.87. FDM-10 kodlu nanokompozitdeki GNP-2 katmanına ait içyapı



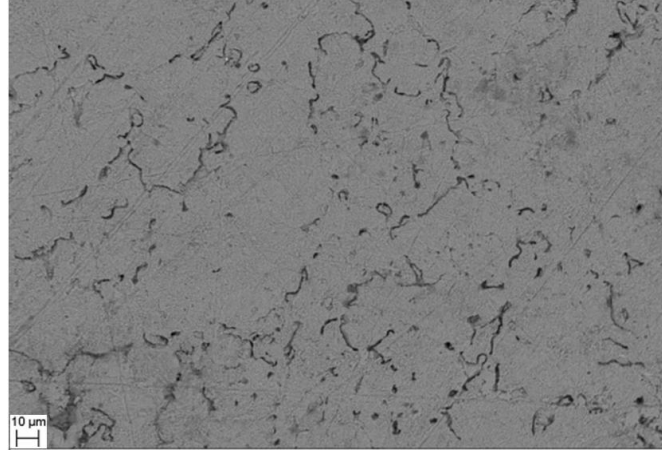
Şekil. 3.88. FDM-13 kodlu nanokompozitdeki GNP-2 katmanına ait içyapı



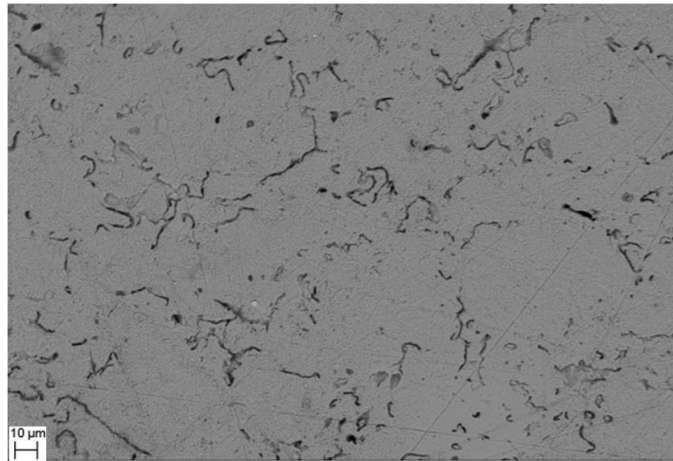
Şekil.3.89 FDM-1 kodlu nanokompozitdeki GRNL-3 katmanına ait içyapı



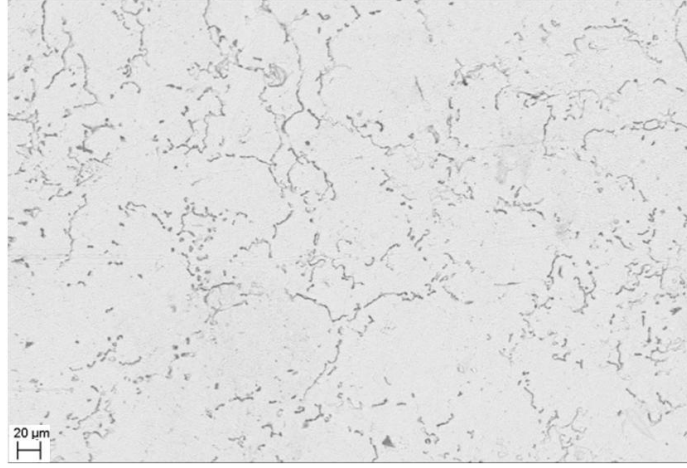
Şekil 3.90. FDM-3 kodlu nanokompozitdeki GRNL-3 katmanına ait içyapı



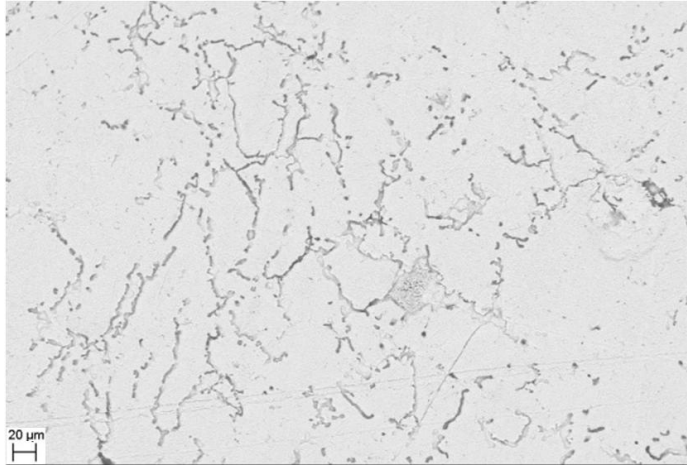
Şekil 3.91. FDM-7 kodlu nanokompozitdeki GRNL-3 katmanına ait içyapı



Şekil 3.92. FDM-9 kodlu nanokompozitdeki GRNL-3 katmanına ait içyapı



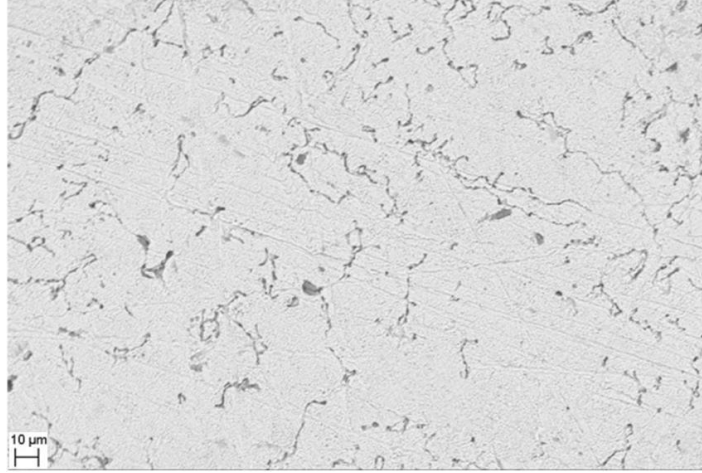
Şekil 3.93. FDM-4 kodlu nanokompozitdeki GRNL-4 katmanına ait içyapı



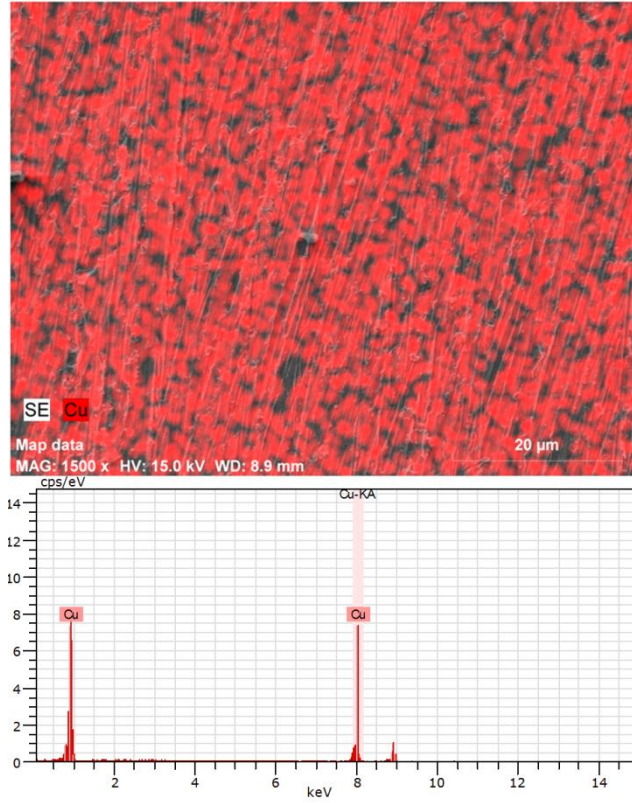
Şekil 3.94. FDM-6 kodlu nanokompozitdeki GRNL-4 katmanına ait içyapı



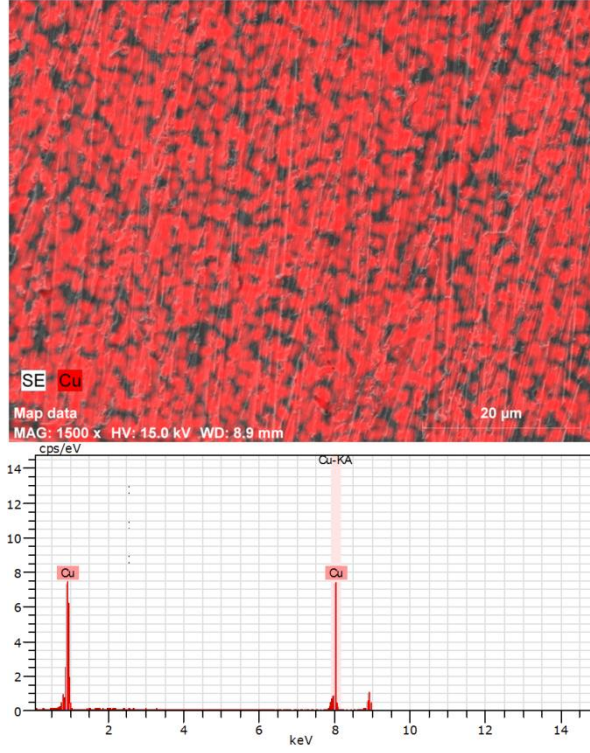
Şekil 3.95. FDM-11 kodlu nanokompozitdeki GRNL-4 katmanına ait içyapı



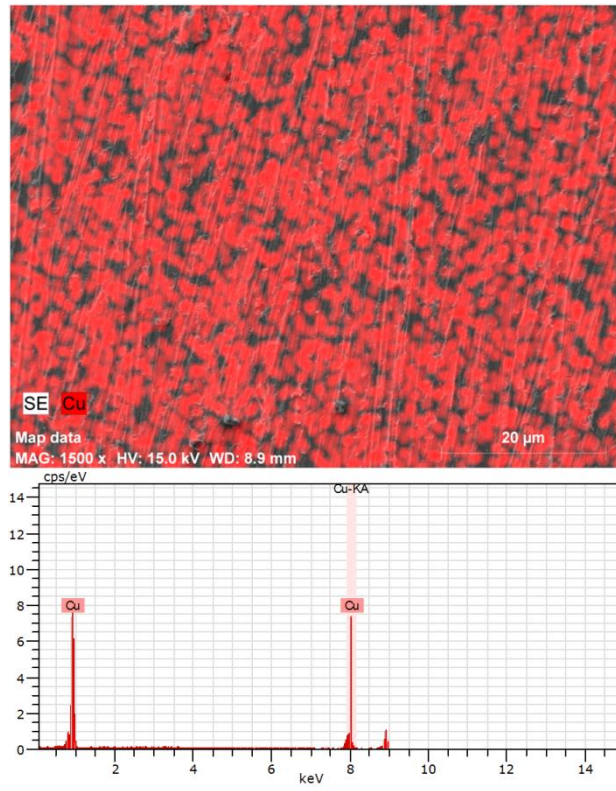
Şekil 3.96. FDM-13 kodlu nanokompozitdeki GRNL-4 katmanına ait içyapı



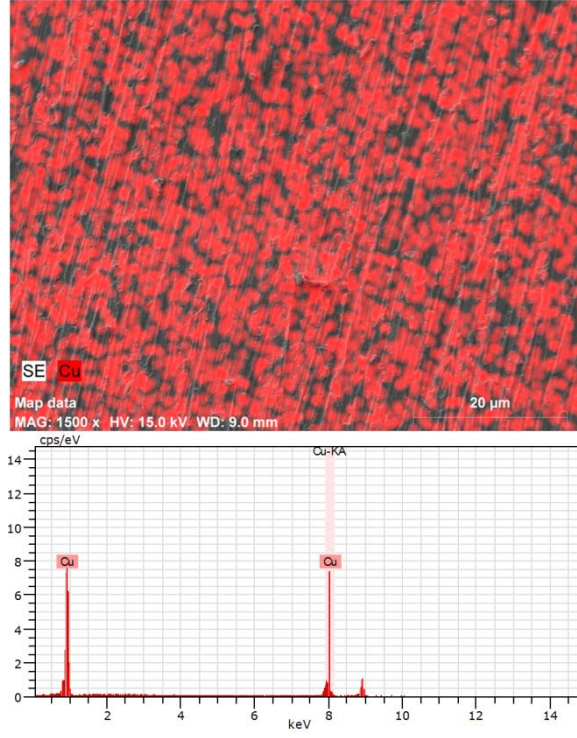
Şekil 3.97. FDM-1 kodlu iki katmanlı FDM’de bakır katmanına ait elementel analiz



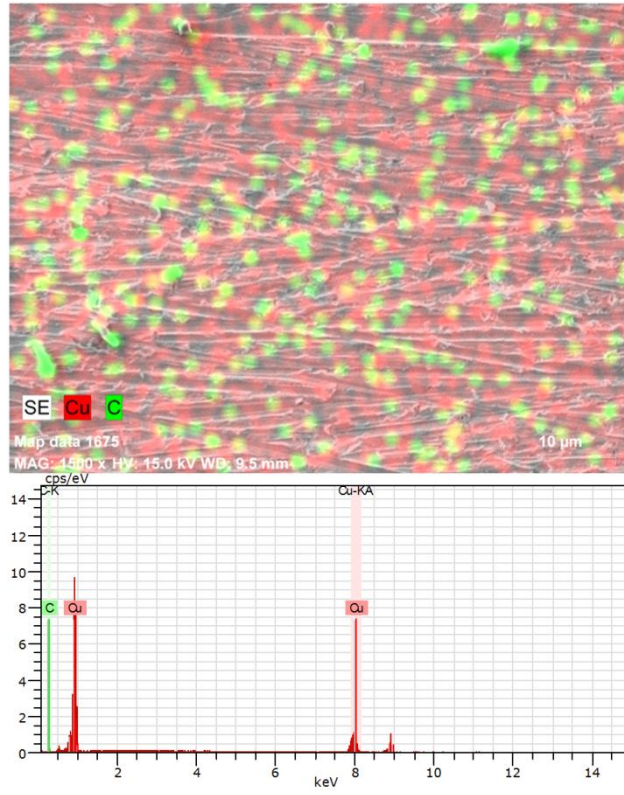
Şekil 3.98. FDM-4 kodlu iki katmanlı FDM’de bakır katmanına ait elementel analiz



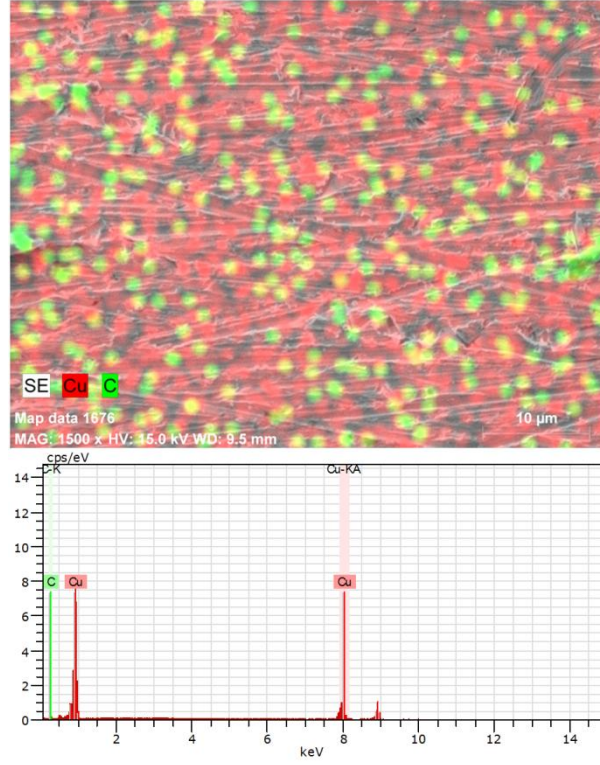
Şekil 3.99. FDM-7 kodlu FDM’de bakır katmanına ait elementel analiz



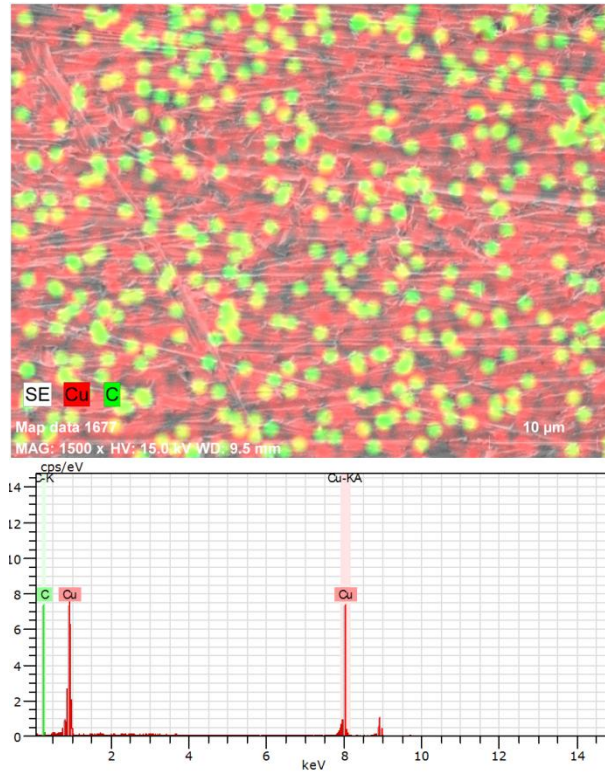
Şekil 3.100. FDM-11 kodlu üç katmanlı FDM’de bakır katmanına ait elementel analiz



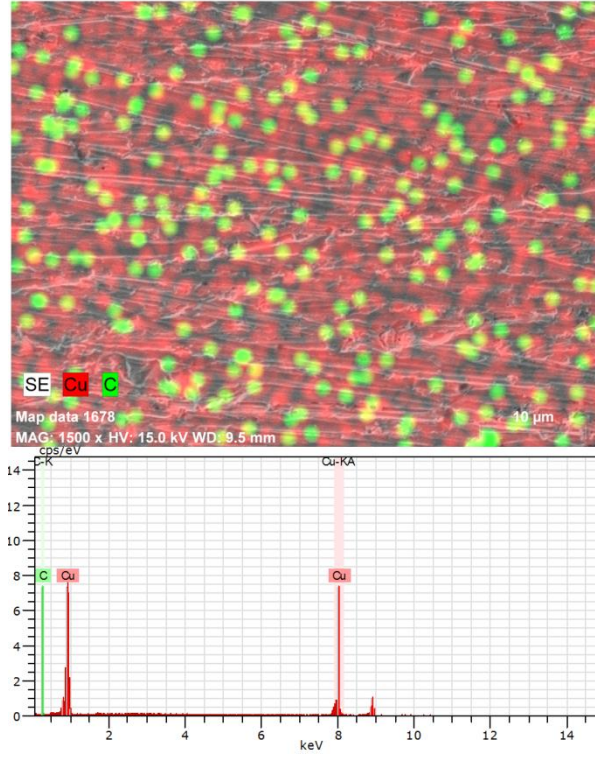
Şekil 3.101. FDM-2 kodlu iki katmanlı FDM’de GNP-2 katmanına ait elementel analiz



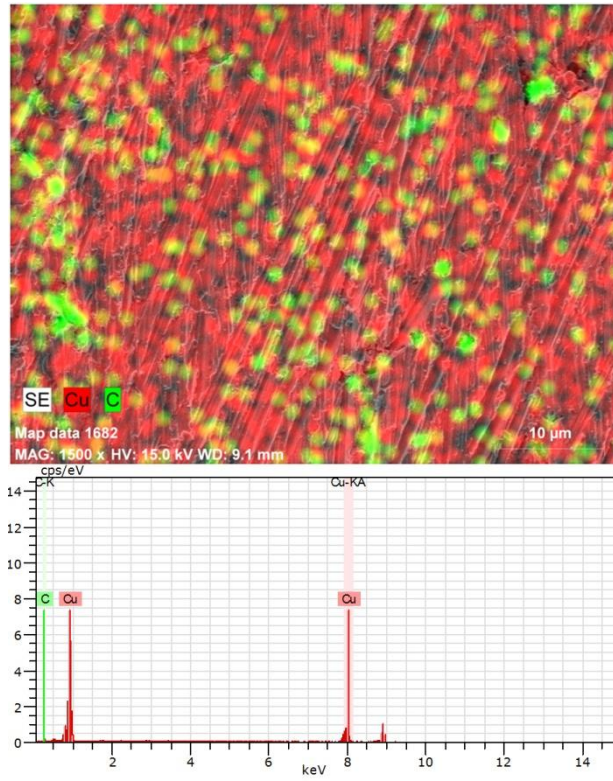
Şekil 3.102. FDM-6 kodlu iki katmanlı FDM’de GNP-2 katmanına ait elementel analiz



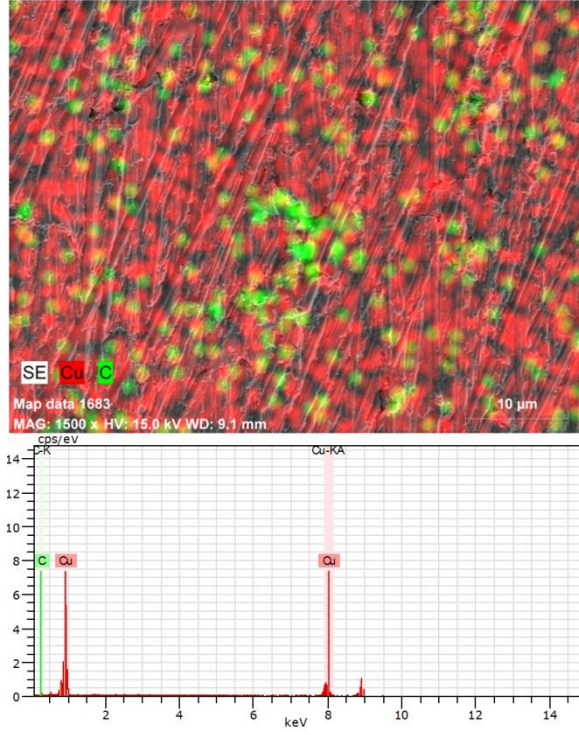
Şekil 3.103. FDM-10 kodlu üç katmanlı FDM’de GNP-2 katmanına ait elementel analiz



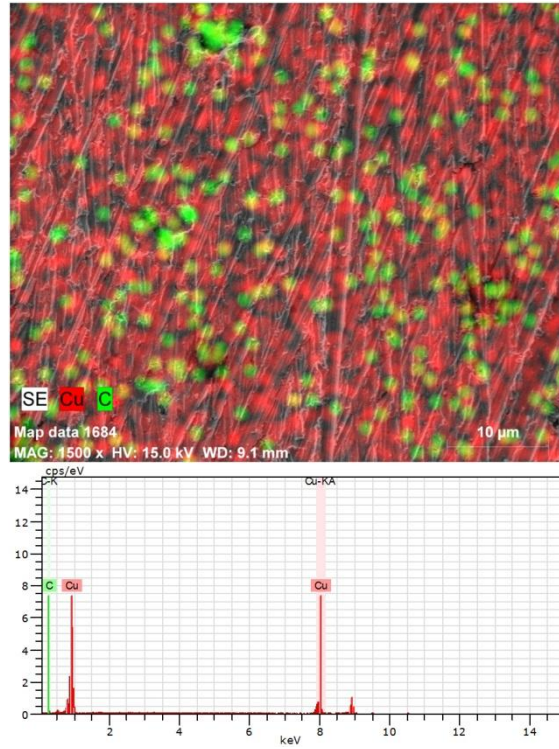
Şekil 3.104. FDM-13 kodlu üç katmanlı FDM’de
GNP-2 katmanına ait elementel analiz



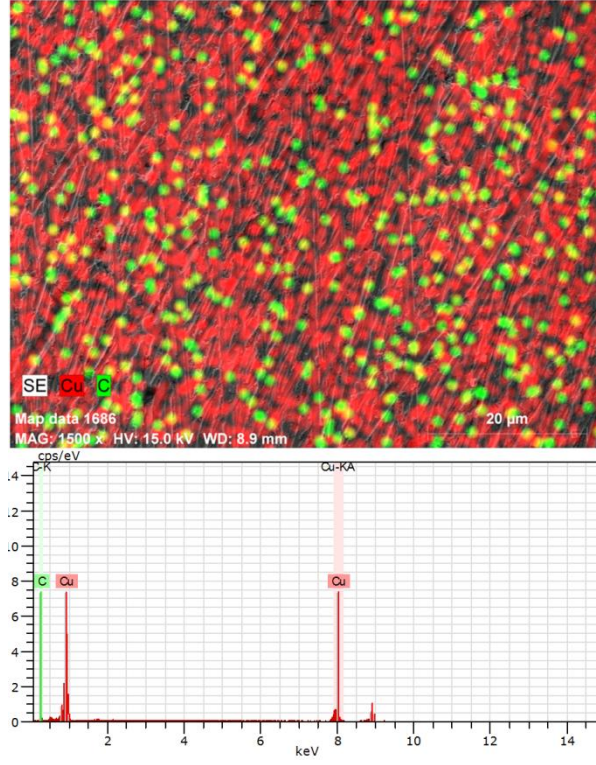
Şekil 3.105. FDM-1 kodlu iki katmanlı FDM’de
GRNL-3 katmanına ait elementel analiz



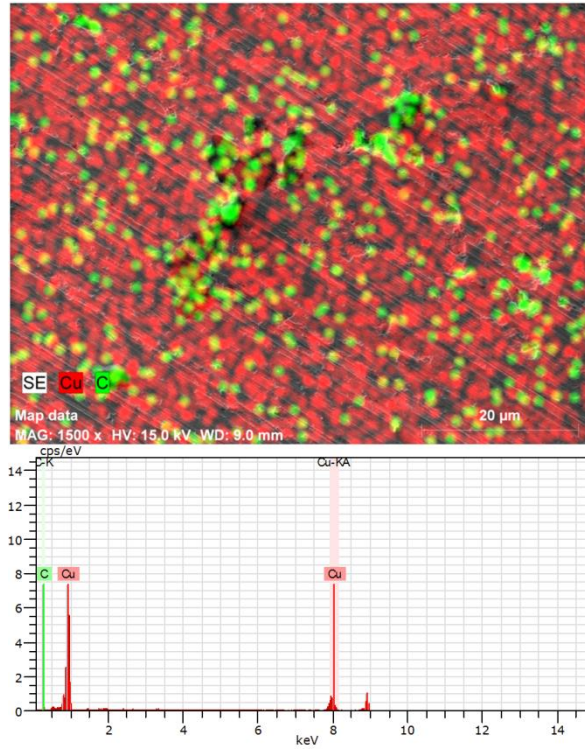
Şekil 3.106. FDM-3 kodlu iki katmanlı FDM’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz



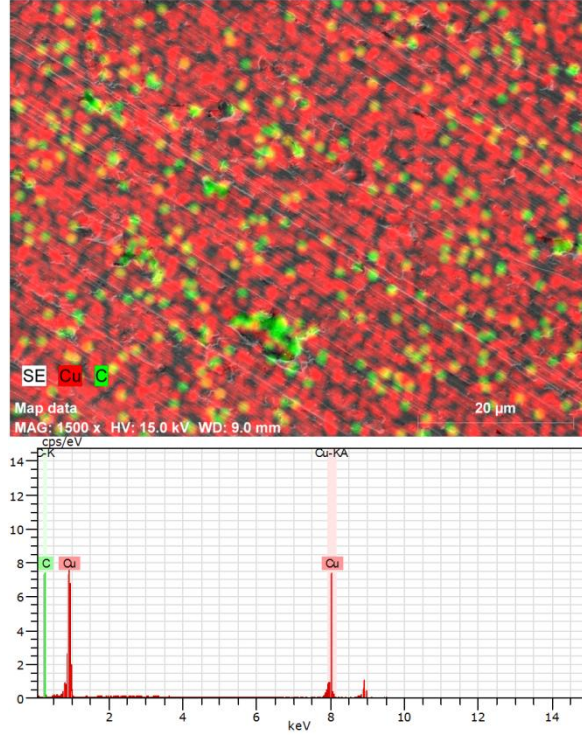
Şekil 3.107. FDM-7 kodlu üç katmanlı FDM’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz



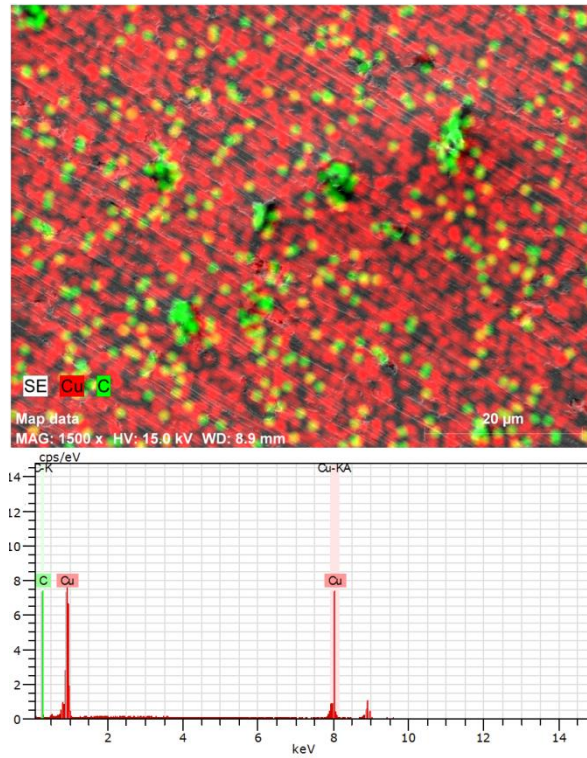
Şekil 3.108. FDM-9 kodlu üç katmanlı FDM’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz



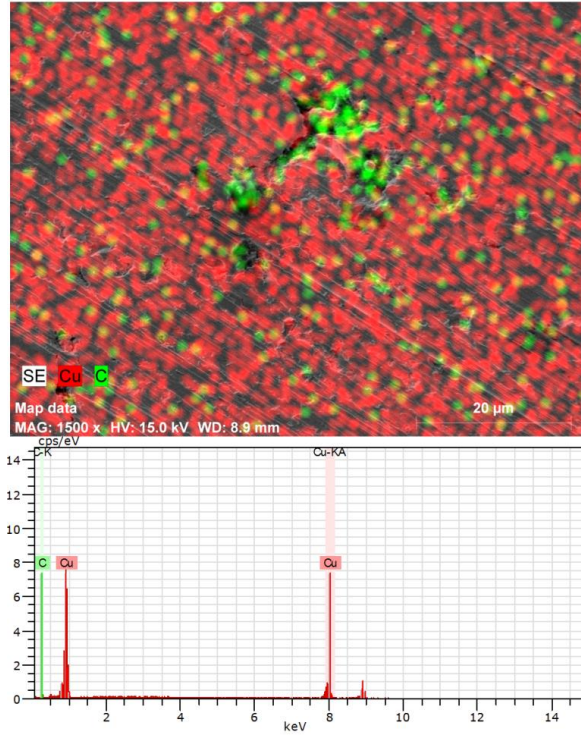
Şekil 3.109. FDM-4 kodlu iki katmanlı FDM’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz



Şekil 3.110. FDM-6 kodlu iki katmanlı FDM’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz



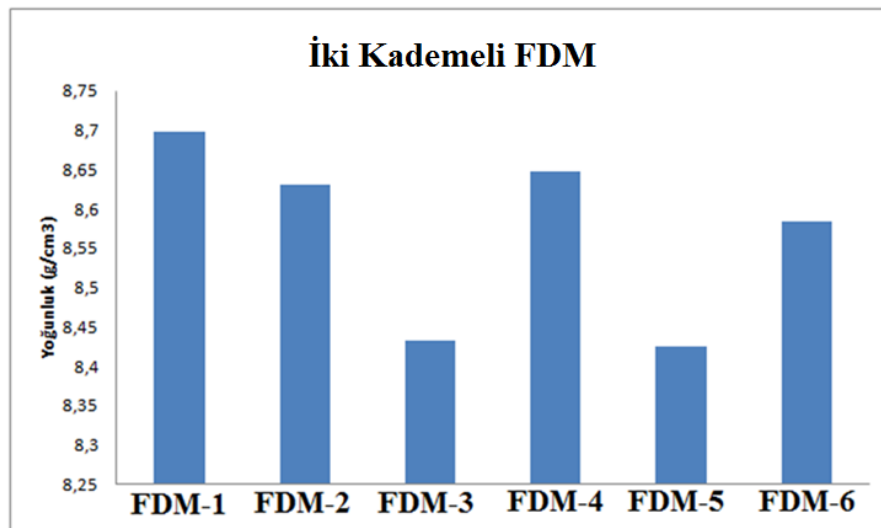
Şekil 3.111. FDM-11 kodlu üç katmanlı FDM’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz



Şekil 3.112. FDM-13 kodlu iki katmanlı FDM’de GRNL-3 katmanına ait elementel analiz

3.7.2. Yoğunluk

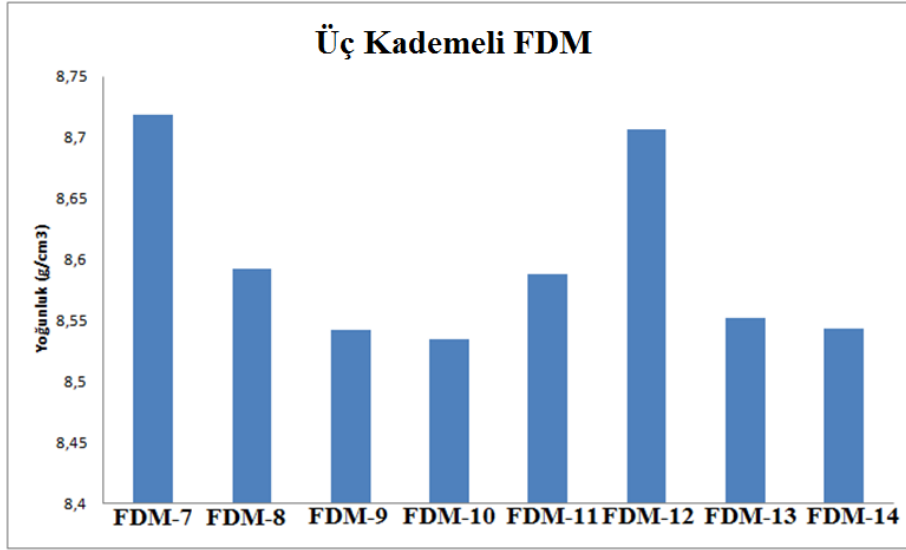
Aşağıdaki grafiklerde FDM yoğunlukları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



(a)

Şekil 3.113. FDM’lerin sinterlenmiş yoğunluk değerleri; (a) iki kademeli FDM’ler, (b) üç katmanlı FDM’ler

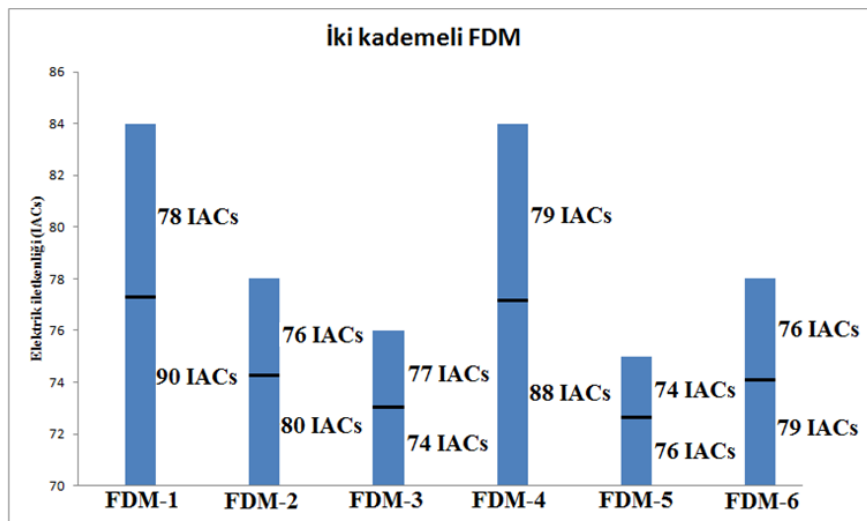
Şekil 3.113'ün devamı



(b)

3.7.3. İletkenlik

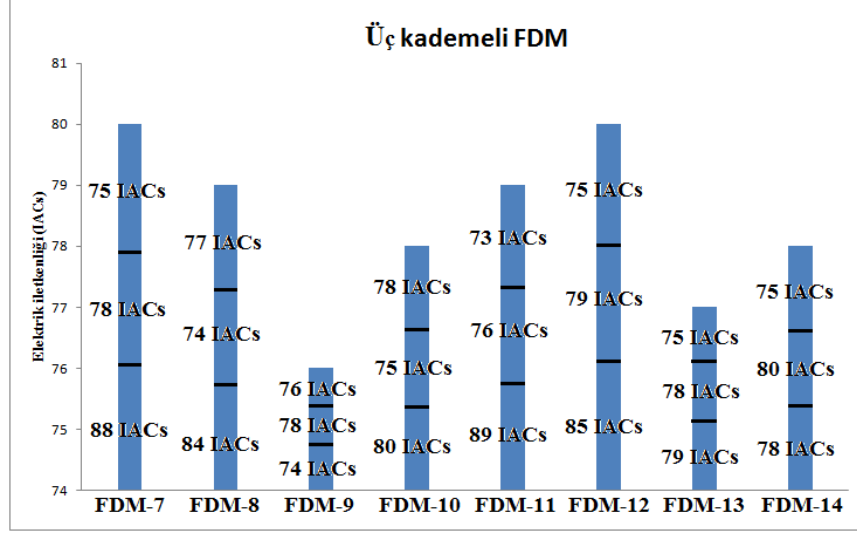
Aşağıdaki grafiklerde iki ve üç kademeli FDM'ler için ortalama ve her bir katmana ait elektrik iletkenliği değerleri verilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde katmanların özelliklerinin nasıl değiştiği veya değiştirilip-değiştirilemeyeceği sorusunun cevabı aşağıdaki iletkenlik değerlerinin katmandan katmana nasıl farklılık gösterdiği ile net bir şekilde ispatlanmıştır.



(a)

Şekil 3.114. FDM'lerin iletkenlik değerleri; (a) iki kademeli FDM'ler, (b) üç katmanlı FDM'ler

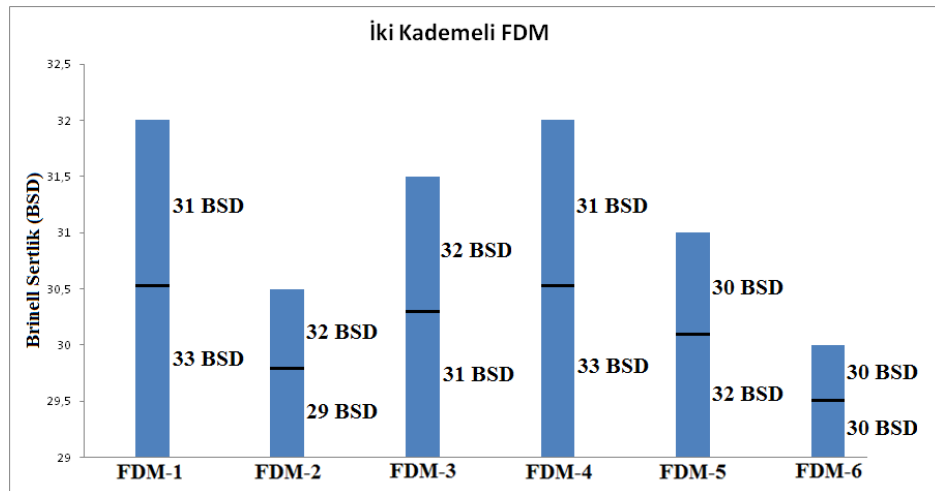
Şekil 3.114'ün devamı



(b)

3.7.4. Sertlik

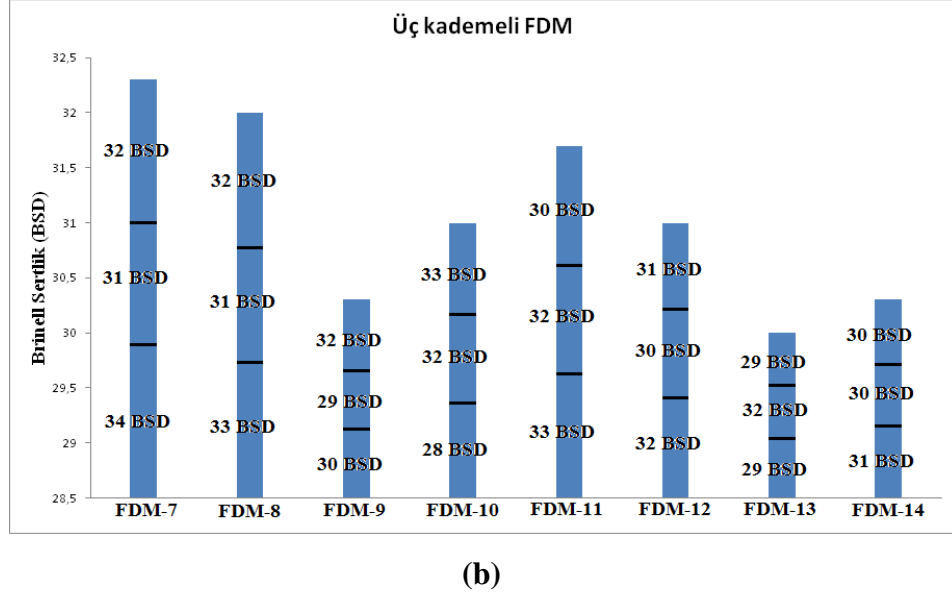
Şekil 3.115a ve şekil 3.115b'de iki kademeli ve üç kademeli FDM'lere ait sertlik değerleri verilmiştir. Sertlik değerleri iki kademeli FDM'lerde 29 BSD ile 33 BSD arasında değişirken üç kademeli FDM'lerde 28 BDS ile 34 BSD arasında değişmiştir.



(a)

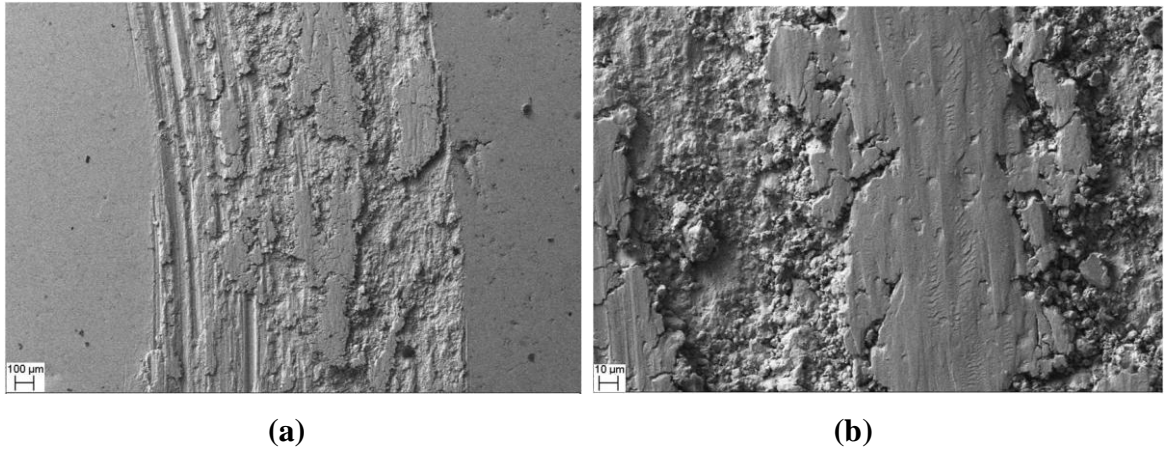
Şekil 3.115. FDM'lerin sertlik değerleri; (a) iki katmanlı FDM'ler, (b) üç katmanlı FDM'ler

Şekil 3.115'in devamı

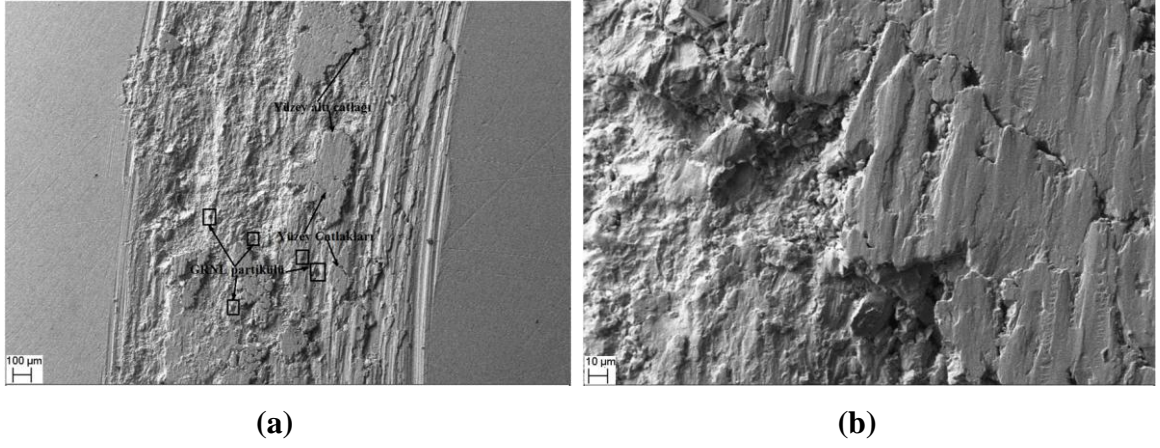


3.7.5. Aşınma

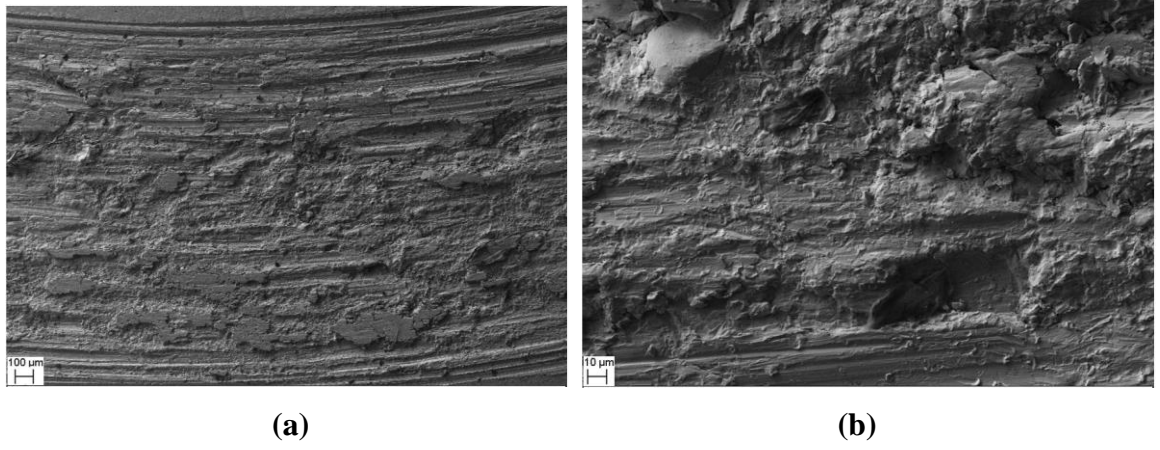
Aşağıdaki şekillerde iki ve üç kademeli FDM'lere ait aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma yüzeyleri verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi ortaya çıkan aşınma yüzeyleri FDM'lerdeki aşınma mekanizmasının tek kademeli nanokompozit malzemelerde olduğu gibi adhesiv ve delemantasyon aşınması olduğunu ortaya koymaktadır.



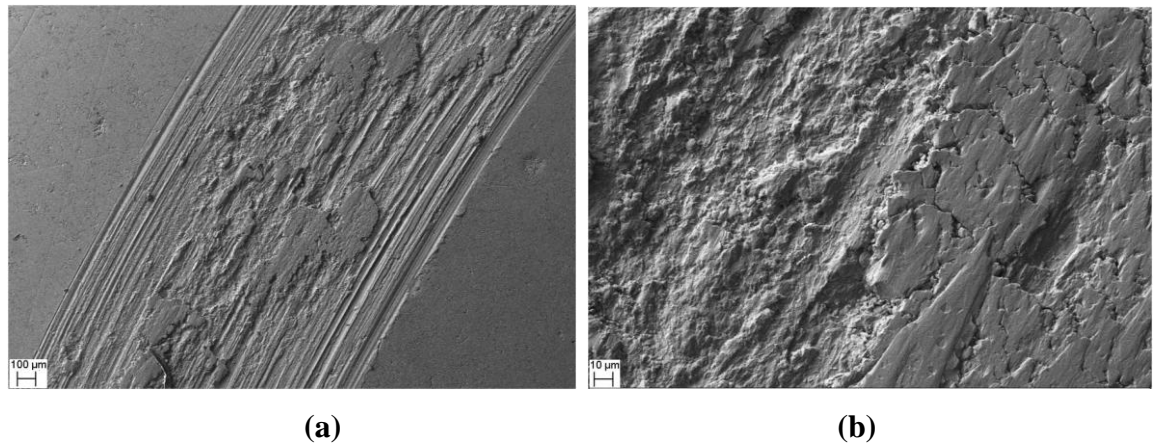
Şekil 3.116. FDM-1 kodlu FDM'de 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyleri; (a) küçük büyütme, (b) büyük büyütme



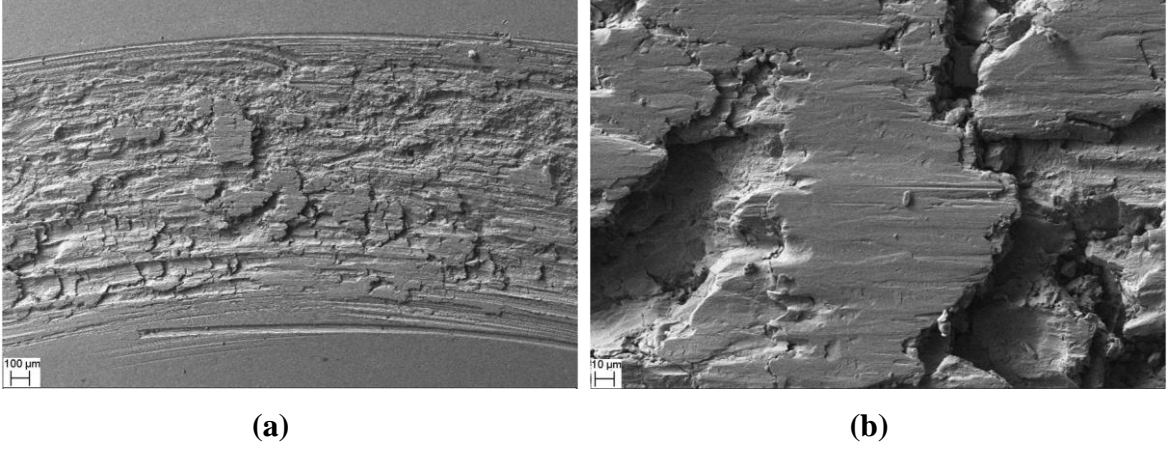
Şekil 3.117. FDM-4 kodlu FDM’de 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyleri; (a) küçük büyütme, (b) büyük büyütme



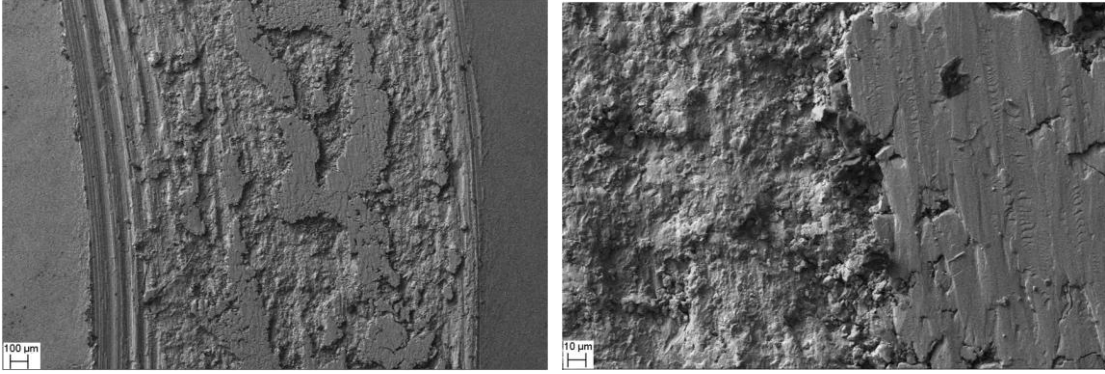
Şekil 3.118. FDM-6 kodlu FDM’de 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyleri; (a) küçük büyütme, (b) büyük büyütme



Şekil 3.119. FDM-7 kodlu FDM’de 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyleri; (a) küçük büyütme, (b) büyük büyütme

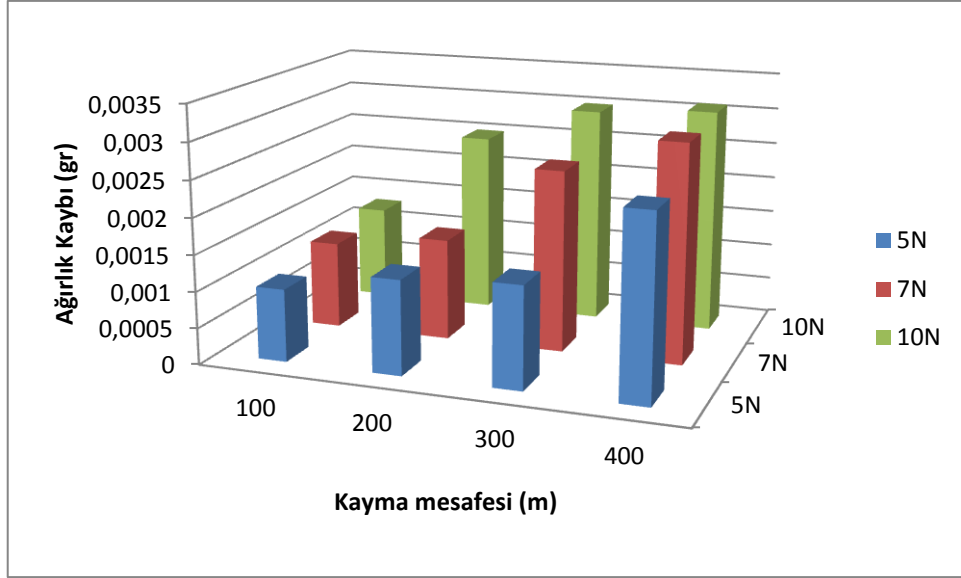


Şekil 3.120. FDM-9 kodlu FDM’de 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyleri; (a) küçük büyütme, (b) büyük büyütme

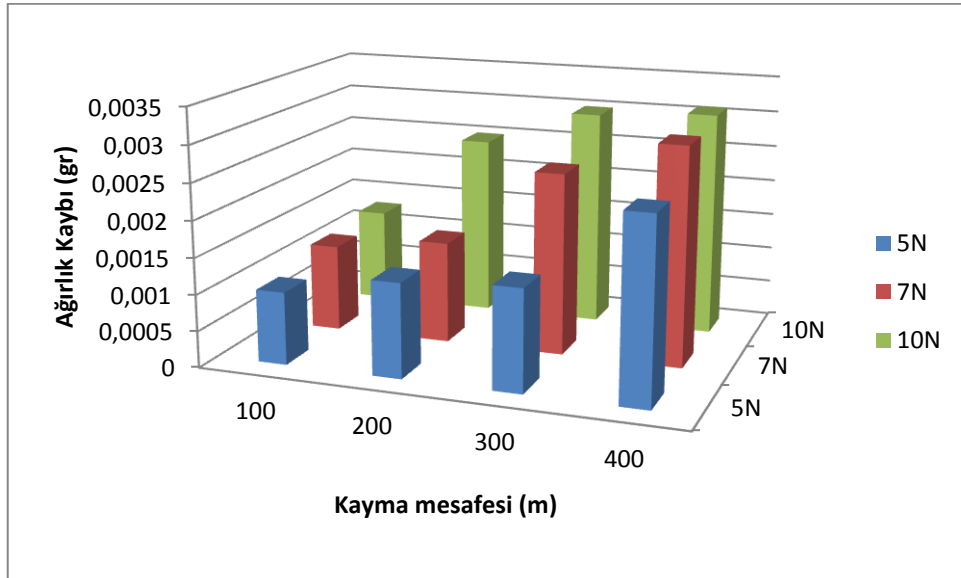


Şekil 3.121. FDM-11 kodlu FDM’de 7N yük ve 400m aşınma yolu sonucunda oluşan aşınma yüzeyleri; (a) küçük büyütme, (b) büyük büyütme

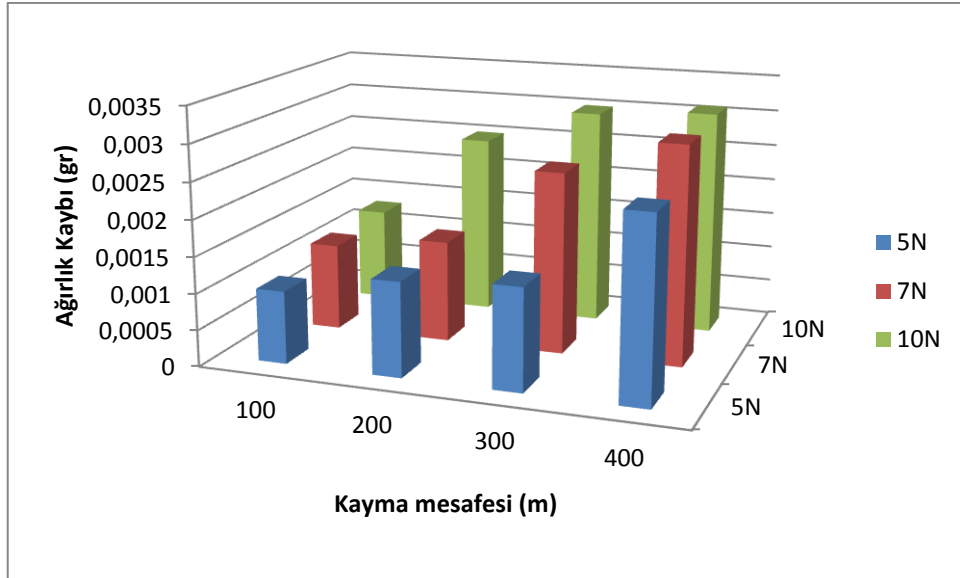
Aşağıdaki grafiklerde iki katmanlı ve üç katmanlı FDM’ler için kayma mesafesi yâda aşınma yolu ve uygulanan yük ile ağırlık kaybı değişimleri verilmiştir. Grafiklerdende görüldüğü gibi artan kayma mesafesi ve artan yükle aşınma sonucunda oluşan ağırlık kaybı miktarı artmıştır.



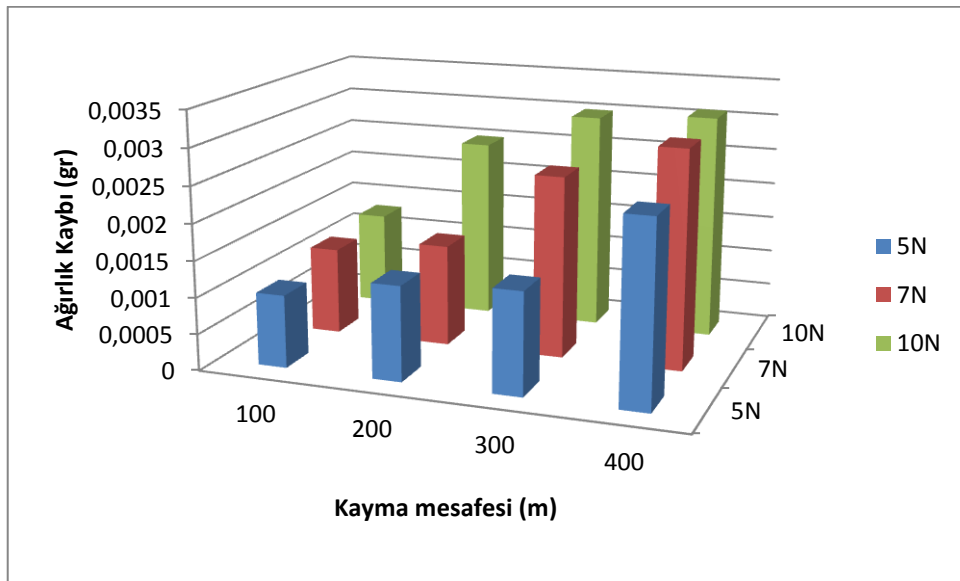
Şekil 3.122. FDM-1 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yüklerle değişimi



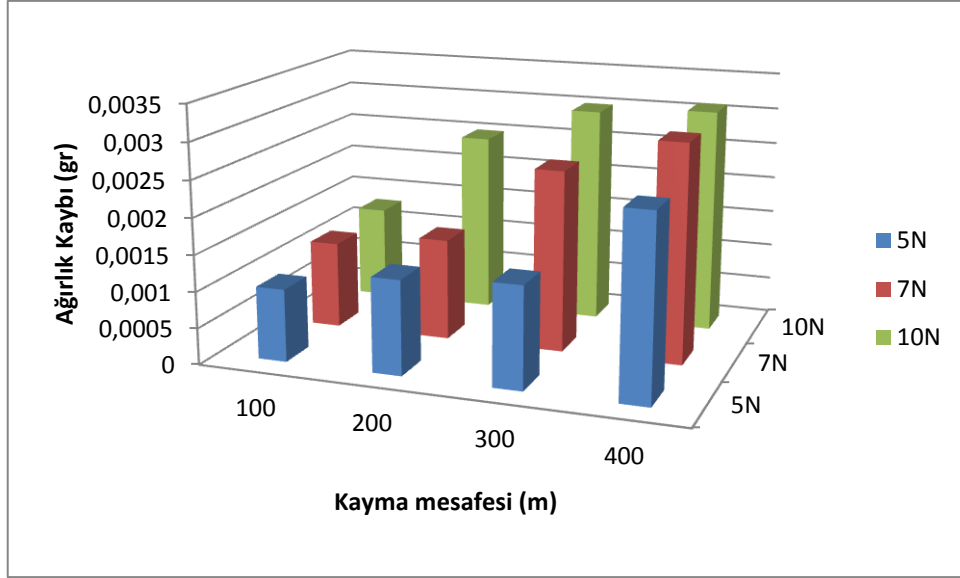
Şekil 3.123. FDM-2 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yüklerle değişimi



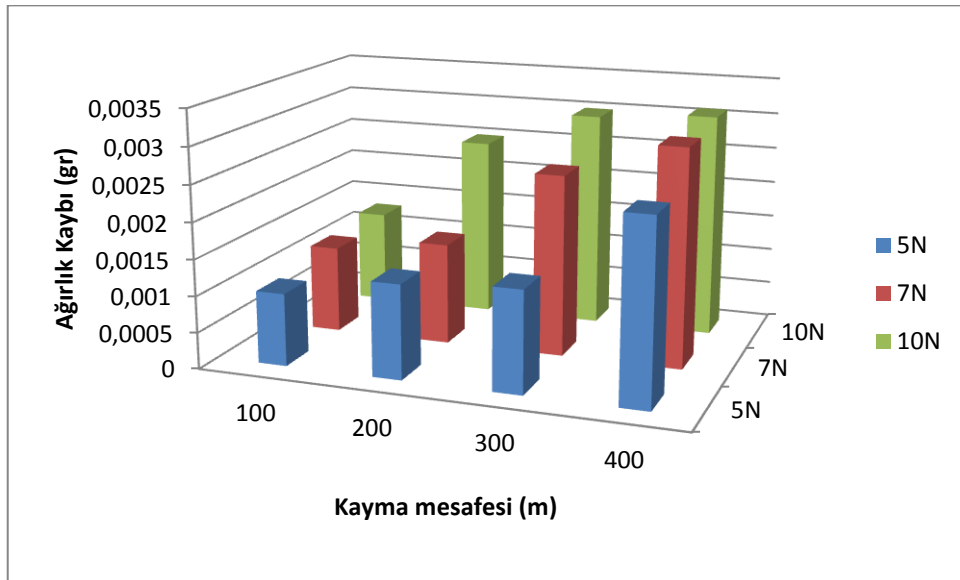
Şekil 3.124. FDM-3 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



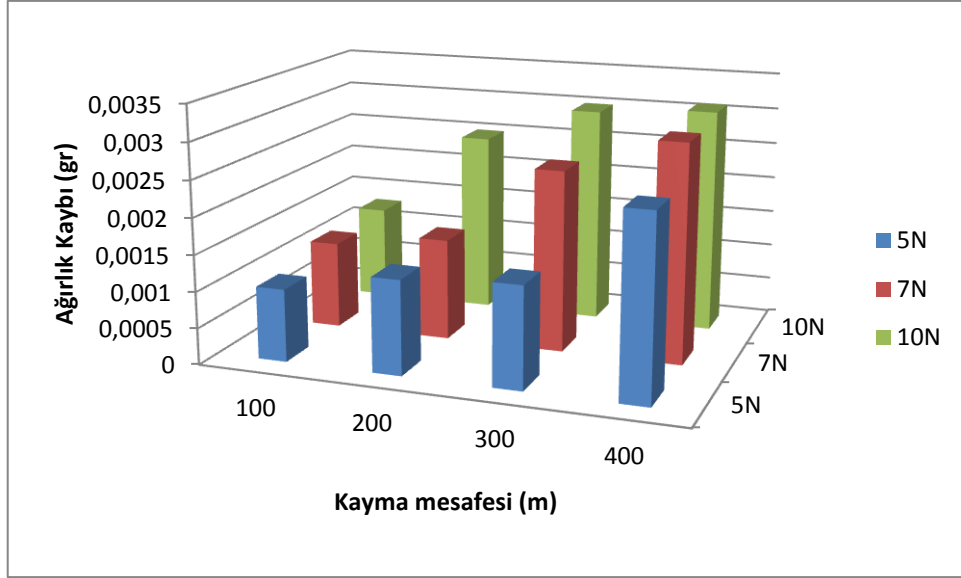
Şekil 3.125. FDM-4 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



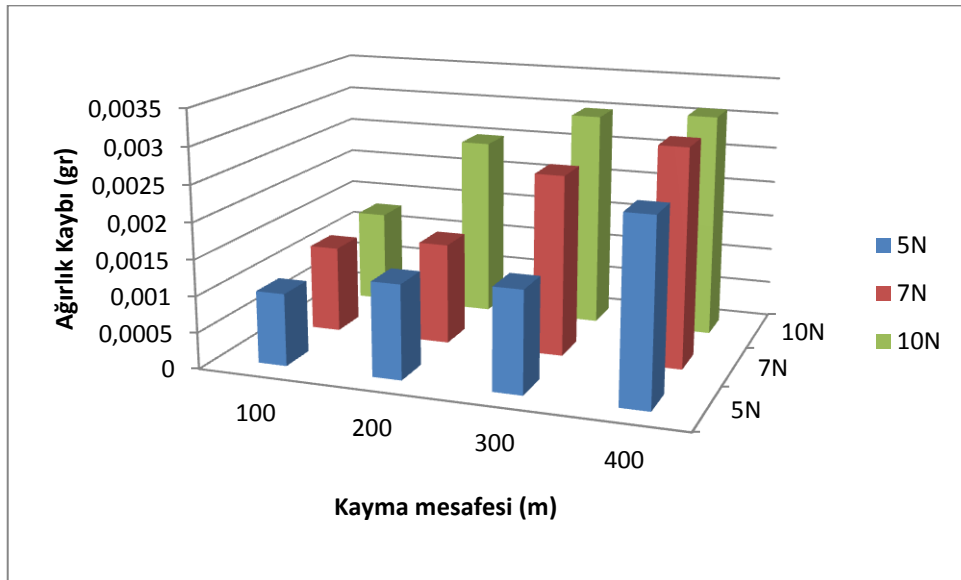
Şekil 3.126. FDM-5 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



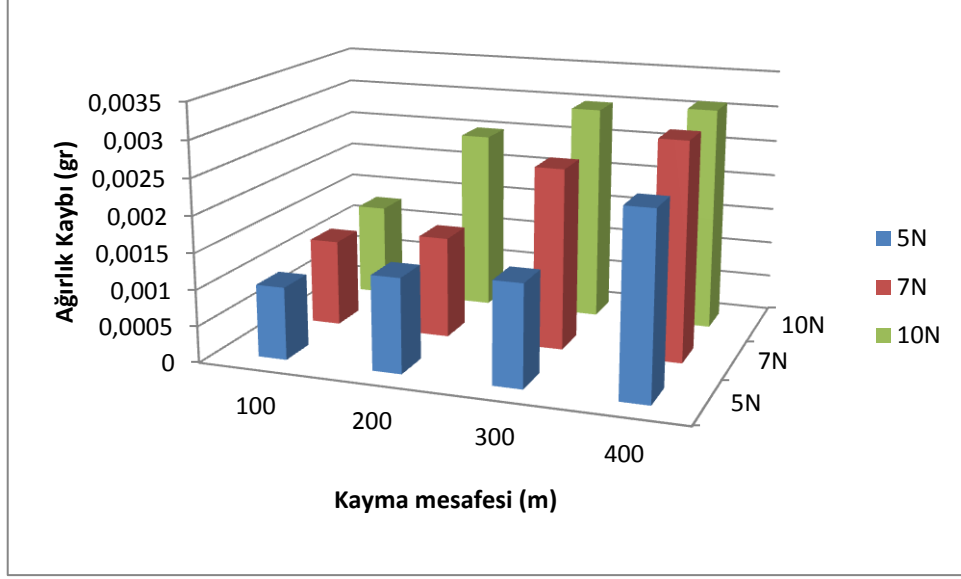
Şekil 3.127. FDM-6 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



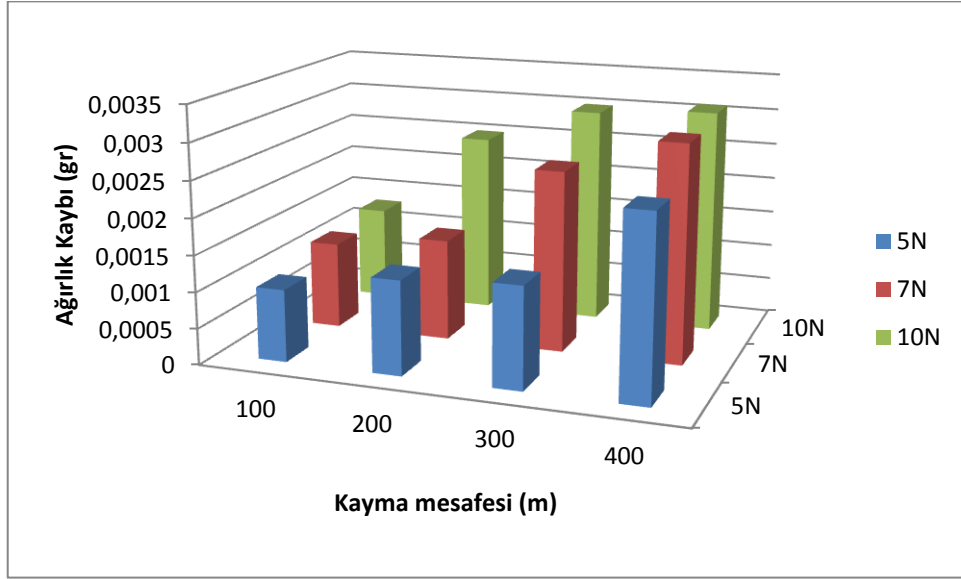
Şekil 3.128. FDM-7 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



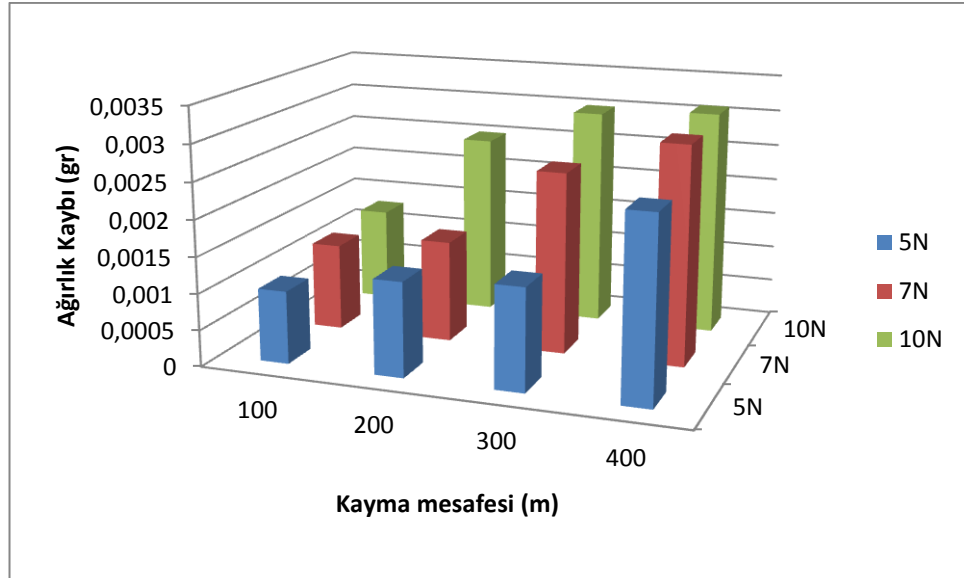
Şekil 3.129. FDM-8 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



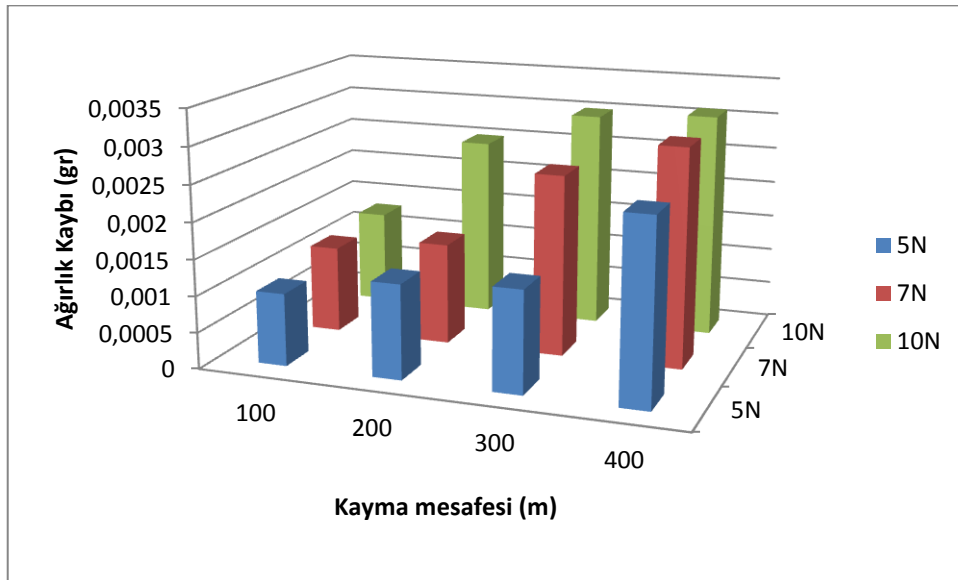
Şekil 3.130. FDM-9 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yüklerle değişimi



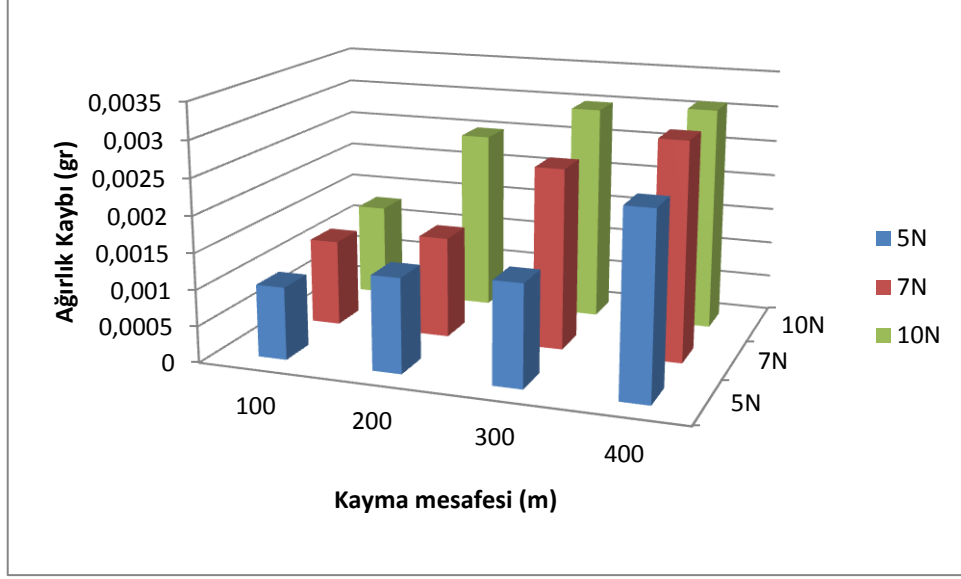
Şekil 3.131. FDM-10 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yüklerle değişimi



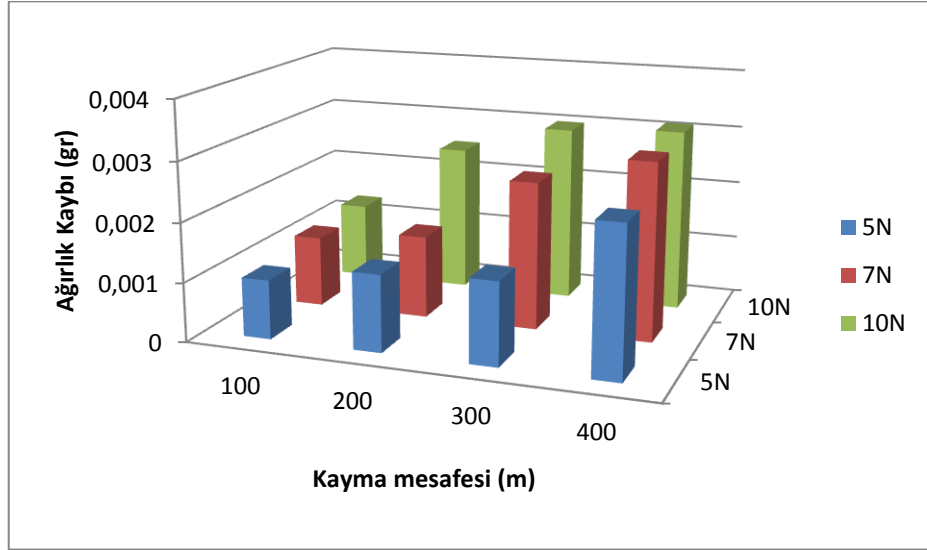
Şekil 3.132. FDM-11 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



Şekil 3.133. FDM-12 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



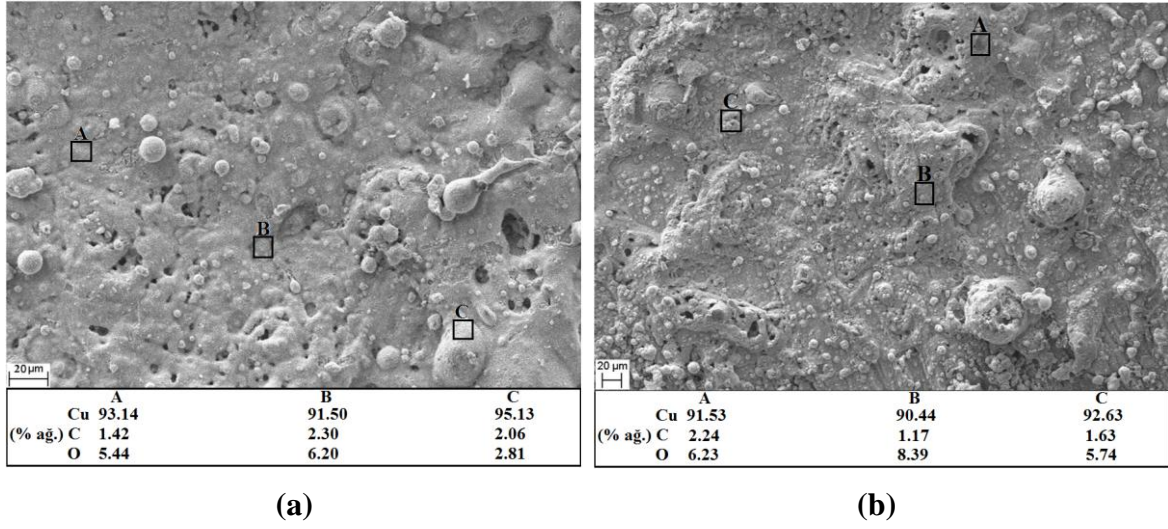
Şekil 3.134. FDM-13 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi



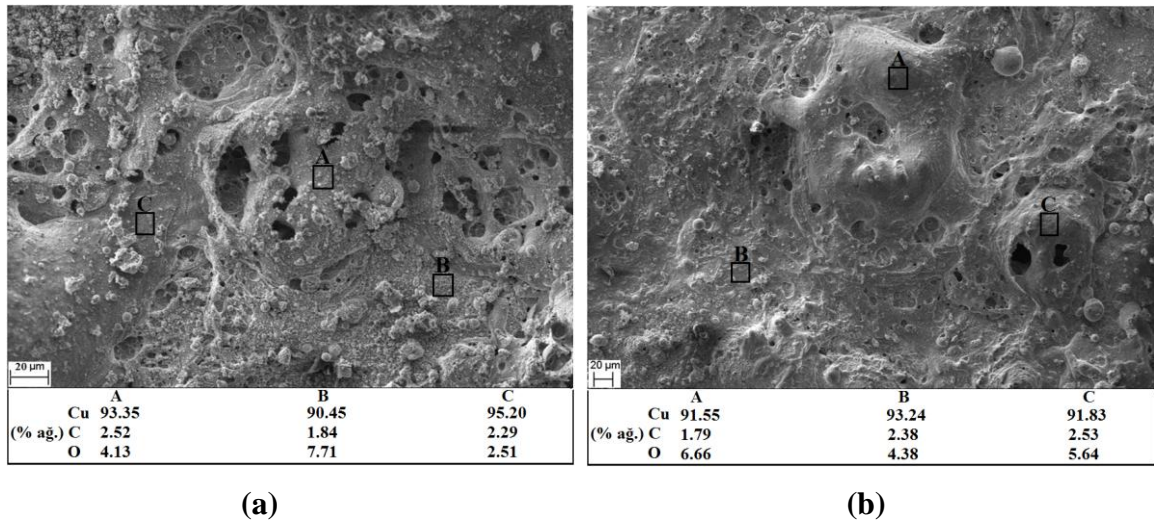
Şekil 3.135. FDM-14 kodlu FDM için aşınma kaybının kayma mesafesi ve uygulanan yükü değişimi

3.7.6. Kontak Performansı

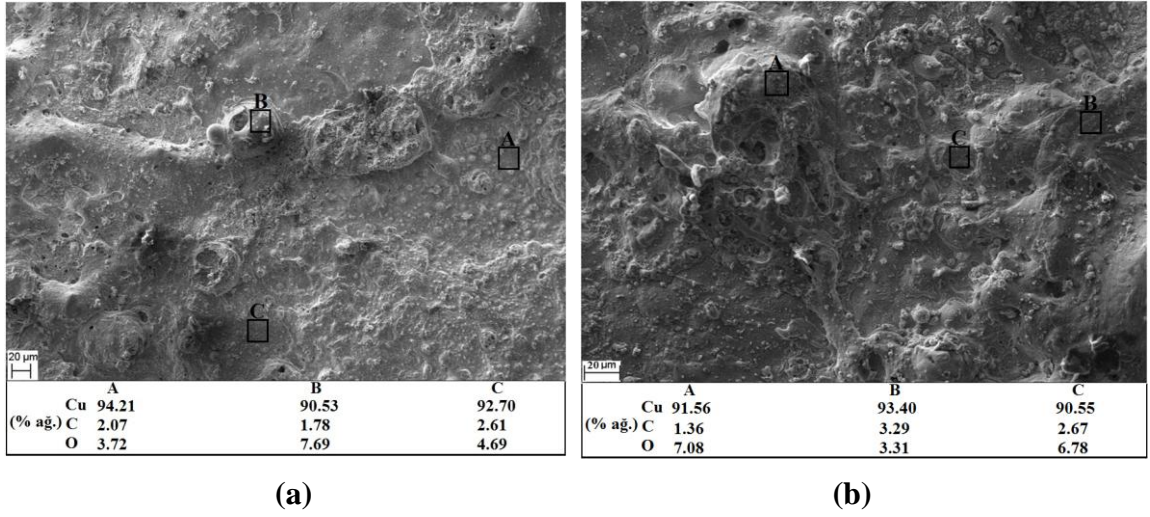
Aşağıdaki şekillerde farklı FDM'lerde 2000 ve 10000 açma-kapama (çevrim) işlemi sonucunda oluşan ark bölgelerinin yüzey morfolojileri verilmiştir. Ark yüzeyine ait morfolojiler tipik ark erozyonu etkilerini gösteren bölgesel ergimeler, kontak memesi oluşumları ve deformasyon bölgelerini içermektedir.



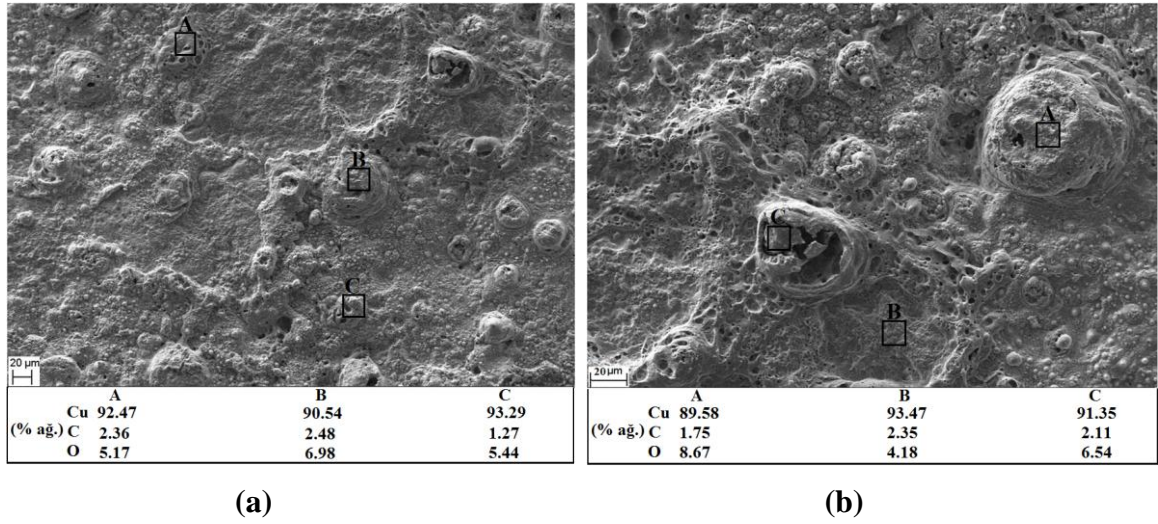
Şekil 3.136. FDM-1 kodlu kontağa ait B2U numunesinden alınan ark morfolojisi ve nokta analizleri; (a) 2000, (b) 10000 çevrim



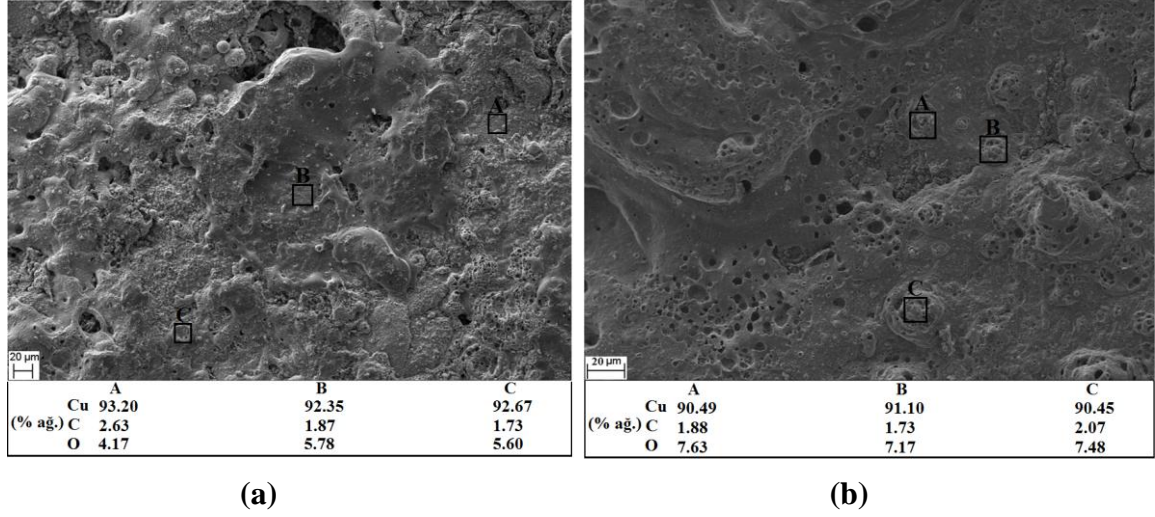
Şekil 3.137. FDM-4 kodlu kontağa ait B2U numunesinden alınan yüzey morfolojisi ve noktasal analizler; (a) 2000, (b) 10000 çevrim



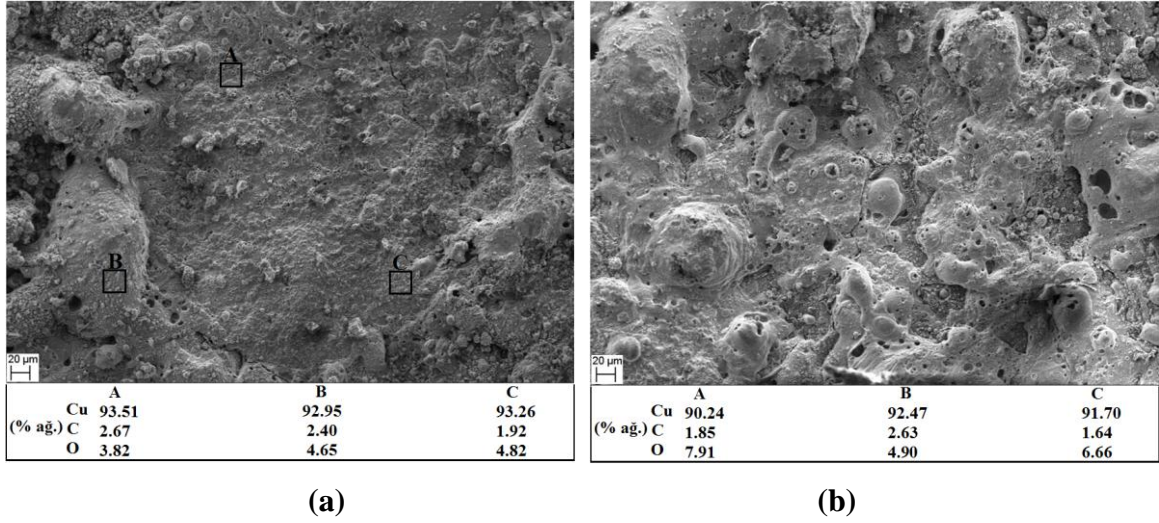
Şekil 3.138. FDM-6 kodlu kontakta ait B2U numunesinden alınan yüzey morfolojisi ve noktasal analizler; (a) 2000, (b) 10000 çevrim



Şekil 3.139. FDM-7 kodlu kontakta ait B2U numunesinden alınan yüzey morfolojisi ve noktasal analizler; (a) 2000, (b) 10000 çevrim

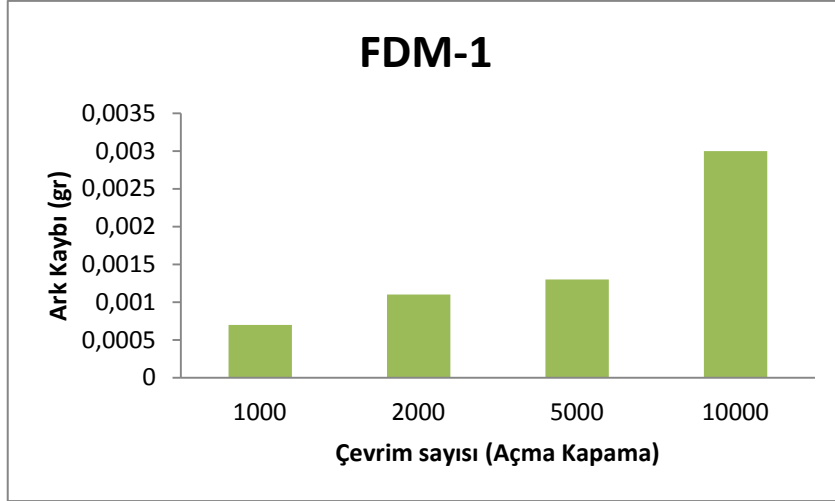


Şekil 3.140. FDM-9 kodlu kontağa ait B2U numunesinden alınan yüzey morfolojisi ve noktasal analizler; (a) 2000, (b) 10000 çevrim

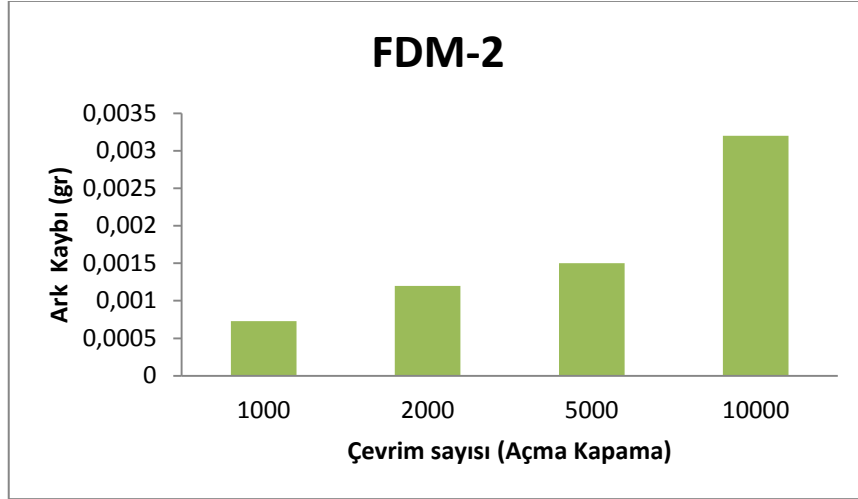


Şekil 3.141. FDM-11 kodlu kontağa ait B2U numunesinden alınan yüzey morfolojisi ve noktasal analizler; (a) 2000, (b) 10000 çevrim

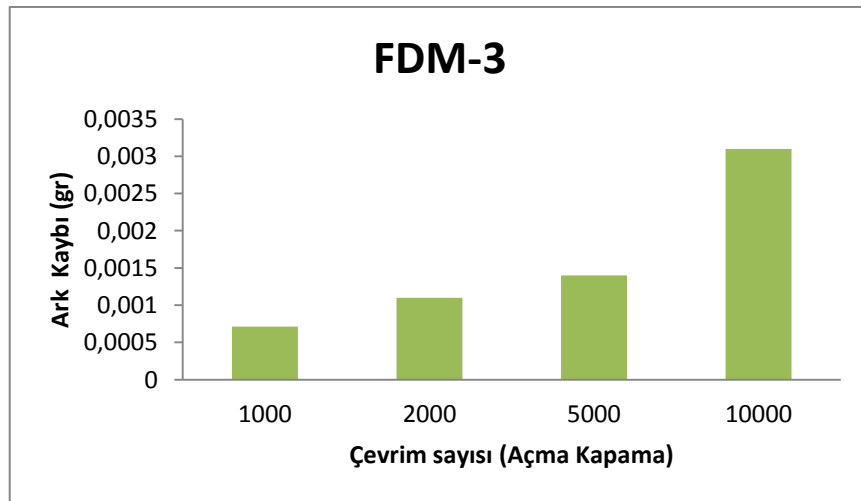
Fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemelerine uygulanan kontak performans deneyleri sonucunda elde edilen ark kayıpları incelendiğinde nanokompozit kontak malzemelerinde olduğu gibi artan çevrim sayısı ile ark kayıplarının artış gösterdiği bununla birlikte artış eğilimlerinin malzeme bileşimine göre farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir.



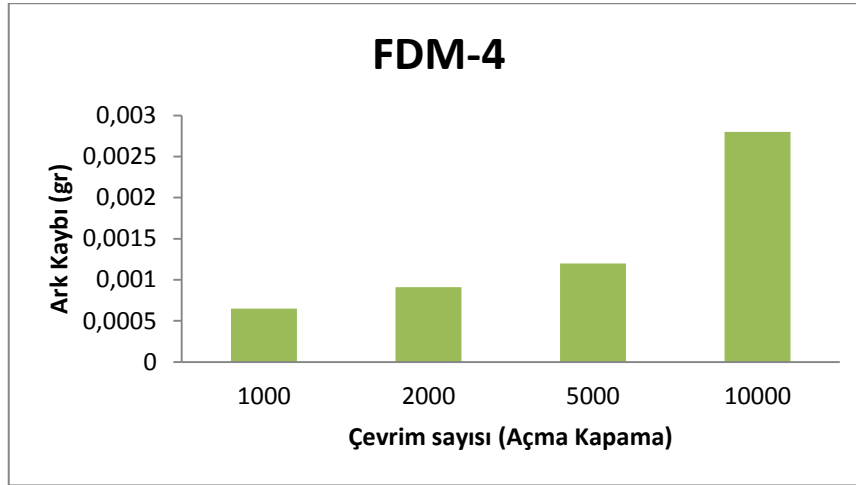
Şekil 3.142. FDM-1 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



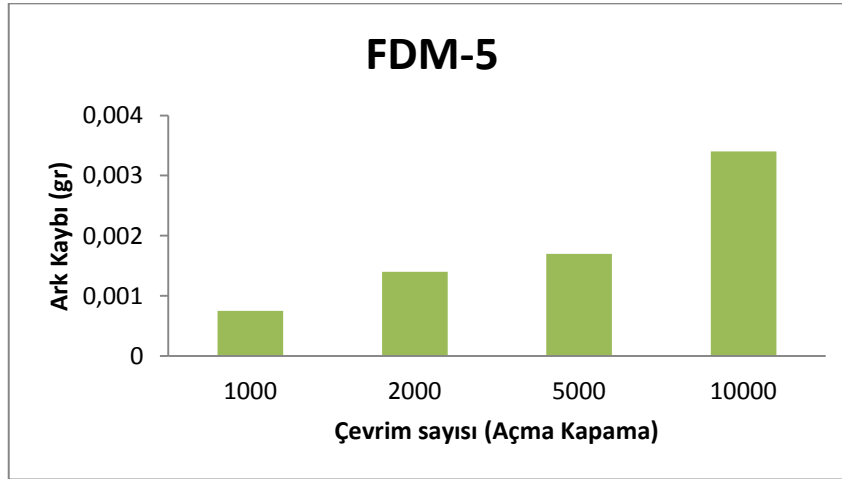
Şekil 3.143. FDM-2 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



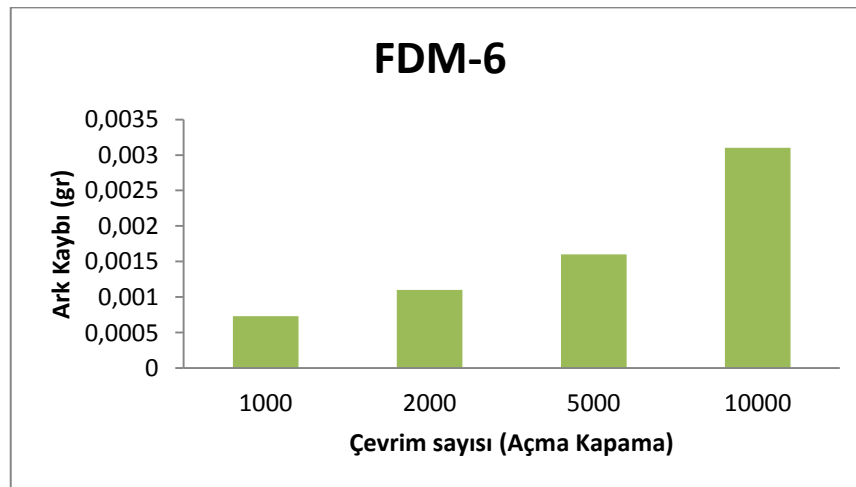
Şekil 3.144 FDM-3 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



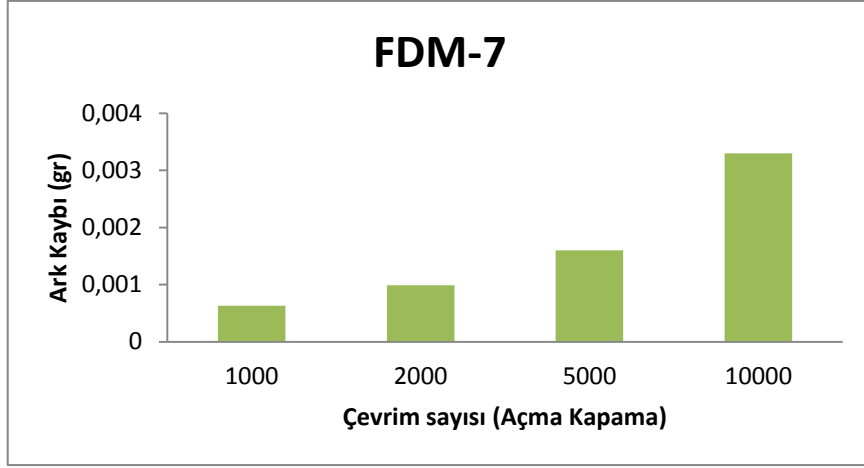
Şekil 3.145. FDM-4 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



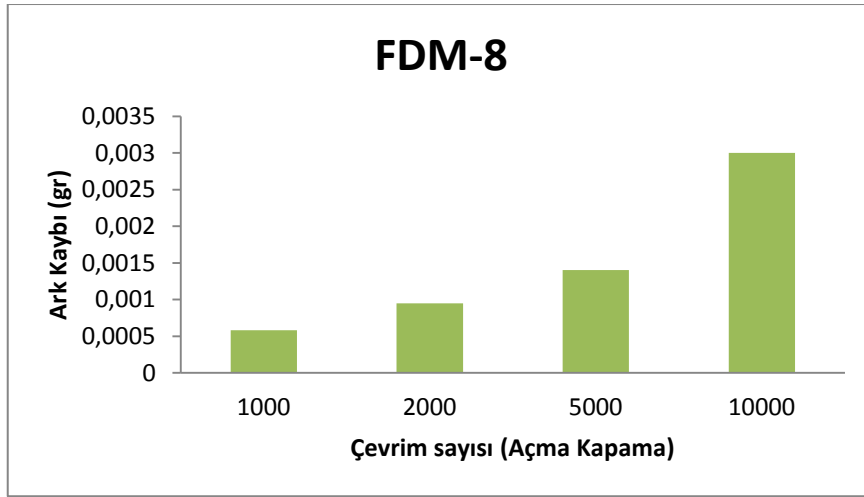
Şekil 3.146. FDM-5 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



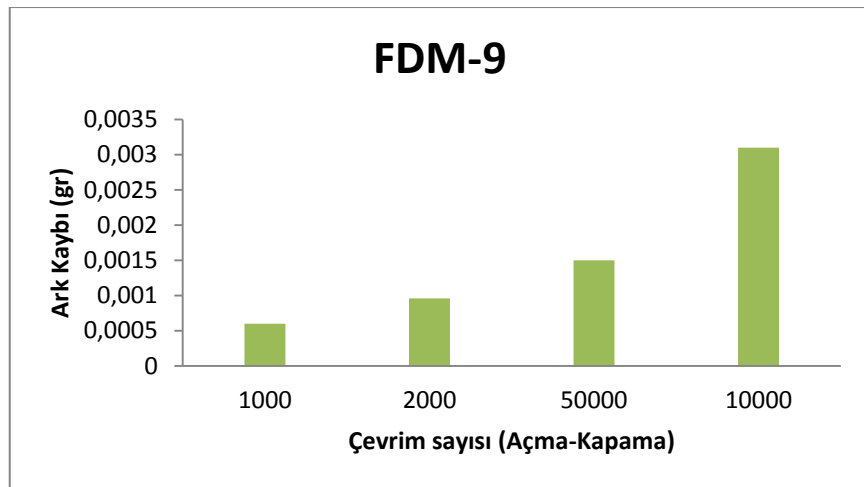
Şekil 3.147. FDM-6 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



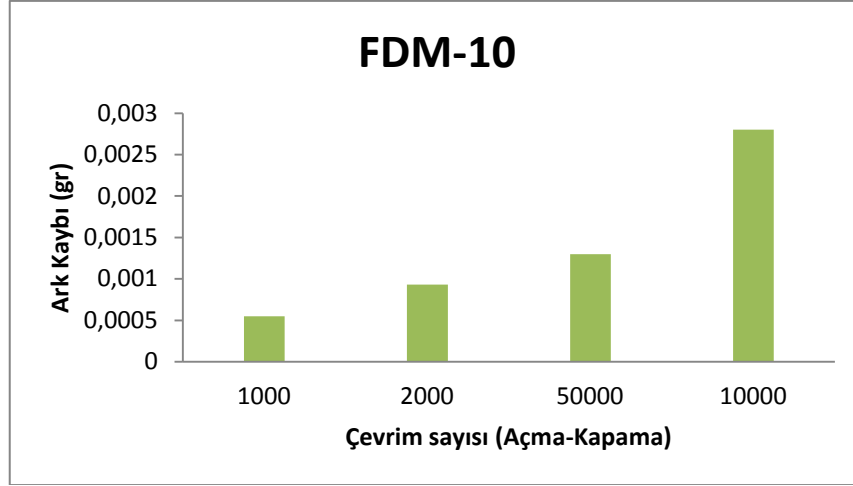
Şekil 3.148. FDM-7 kodlu kontakt ark kaybının değişimi



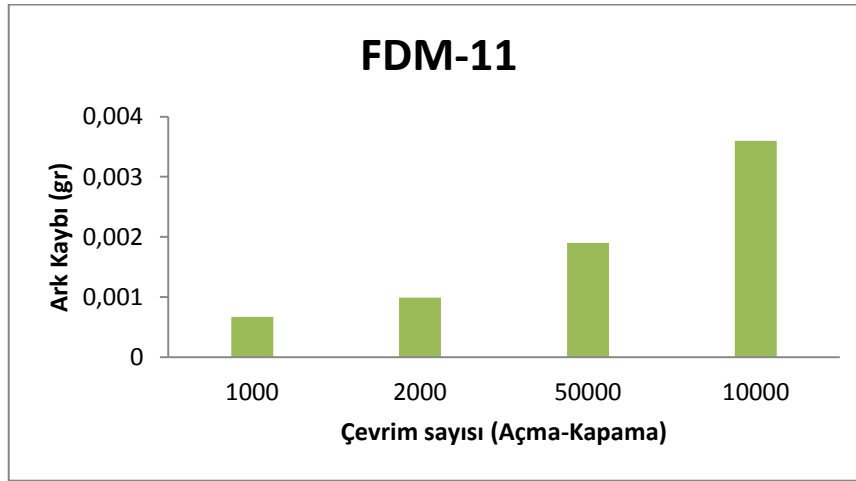
Şekil 3.149. FDM-8 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



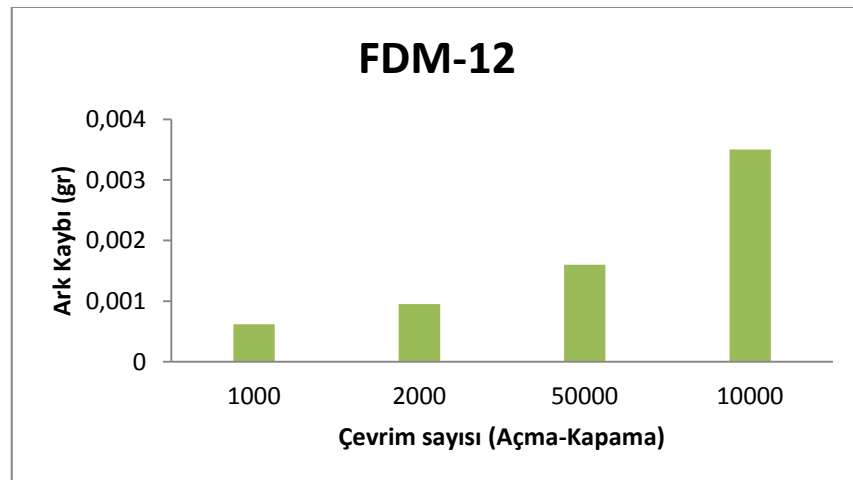
Şekil 3.150. FDM-9 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



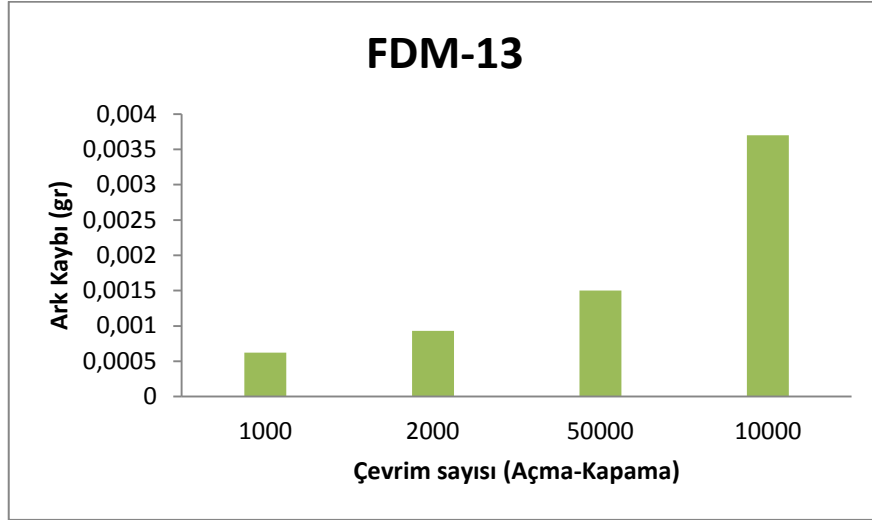
Şekil 3.151. FDM-10 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



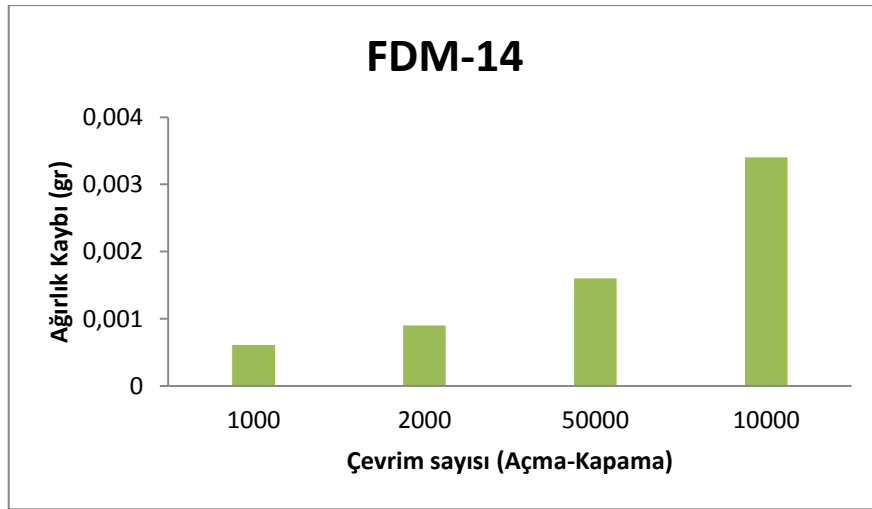
Şekil 3.152. FDM-11 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



Şekil 3.153. FDM-12 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



Şekil 3.154. FDM-13 kodlu kontakta ark kaybının değişimi



Şekil 3.155. FDM-14 kodlu kontakta ark kaybının değişimi

4. İRDELEME

Şekil 3.11, 5 saatlik öğütme sonucunda takviyesiz bakır tozlarının partikül boyutundaki değişimi göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi öğütme prosesinin tutarlılığı bakımından işlem kontrol katkısının oldukça düşük tutulduğu ve takviye içermeyen bakır tozlarının öğütülmesi sonucunda oldukça yüksek toz boyutuna (d50) ulaşılmış olup ayrıca 5 saatlik öğütme sonucunda bimodal partikül boyutu dağılım elde edilmiştir. Bu sonuçlar düşük düzeyde yağlayıcı kullanımı sonucunda deformasyon mekanizmasının hızlı bir şekilde gelişmesi ile küresel bakır partiküllerinin pulsu yapıya dönüşmesi ve bunu takiben bakır partiküllerinin soğuk kaynak olarak birleşmesiyle açıklanmaktadır. Elde edilen bu sonuç mekanik öğütme işleminde üretim homojenliği ve verimliliği bakımından işlem kontrol katkısı yâda onunla benzer işlevi görecektir grafit türü yağlayıcıların ne kadar önemli olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [168-170]. Şekil 3.12'de 5 saatlik öğütme işlemi sonucunda elde edilen kompozit tozların boyutu üzerine takviye miktarı ve takviye türünün etkisi görülmektedir. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi 5 saatlik öğütme işlemi sonucunda en düşük partikül boyutuna karbon nanotüp takviyeli kompozit tozlarda ulaşılmıştır. Bunun nedeni karbon nanotüplerin diğer takviye türleri olan nanografite ve grafen nanolevhaya göre daha düşük partikül boyutuna sahip olmasıdır. Bakır tozlarının başlangıç boyutu (58,478µm) dikkate alındığında 5 saat sonunda elde edilen pulsu morfolojinin başlangıç boyutunu oldukça yükselttiği görülmektedir. Artan takviye miktarı ile kompozit toz boyutunun düştüğü şekil 3.12'de görülmektedir. Bu düşüşün sebebi takviye miktarının artışı ile toplam toz kütlesi içerisindeki küçük boyutlu nanopartikül sayısındaki artıştır [171-172]. Şekil 3.13'de görüldüğü gibi, % 2.5 takviye oranına kadar kompozit tozların görünür yoğunluk değerleri artmakta daha ileri takviye boyutları için ise azalmaktadır. Bunun sebebi olarak bu takviye oranına kadar takviye tozlarının matris tozları arasına rahatlıkla girerek boşlukları doldurması gösterilebilir. % 2.5 takviye oranından yüksek takviye oranlarında ise nano tozların hacimce çok yer kaplamaya başlaması matris tozlarının hareketini kısıtlamakta ve bunun sonucu olarak da toz yerleşimi olumsuz bir şekilde etkilenerek görünür yoğunluk değerleri azalmaktadır. Şekil 3.13'deki görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde nanografite partiküllerin en iyi görünür yoğunluk değerlerine sahip olduğu buna karşın en kötü görünür yoğunluk değerlerinin karbon nanotüp takviyeli kompozit tozlarda elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni karbon nanotüplerin topaklanma eğiliminin grafene nanolevha ve nanografite

partiküllerine göre çok daha fazla olmasıdır [173-175]. Nanografite partikülleri ile takviye edilmiş kompozit tozların grafen nanolevha ile takviye edilmiş kompozit tozlardan daha iyi görünür yoğunluğa sahip olma sebebi olarak da nanografite partiküllerine göre daha homojen düzlemsel morfolojiye sahip grafen nanolevhaların matris tozları arasında kalan boşlukları doldurma yeteneğinin daha az olmasıdır.

Şekil 3.14’de takviyesiz bakır numunenin ham iç yapısını göstermektedir. Bu şekilde bakır partiküllerinin yoğunlaştırma işlemi sonucu oluşturduğu temas yüzeyleri ve temas bölgelerindeki gözenekler açıkça görülmektedir. Şekil 3.15-17’de görüldüğü gibi bütün takviye türleri için takviye tozları bakır yâda matris tozlarına gömülmüştür. Ağırlıkça % 0.5 gibi düşük takviye oranlarında matris tozları rahatlıkla görülebilirken artan takviye miktarı ile topaklanma eğilimi artmakta ve takviye tozları bütün iç yapıyı kaplamaktadır. Buradan nano boyuttaki partiküllerin hacimsel olarak ne kadar fazla bölgeyi kapladığı rahatlıkla görülebilmektedir. Metal matrisli kompozit çalışmalarında makro yâda mikro takviye boyutları için ağırlıkça % 5 takviye oranı istenilen özelliklerin elde edilmesinde yeterli görülmezken şekil 3.15-17’de görüldüğü gibi nano boyutta ağırlıkça % 5 takviye oranı kritik takviye oranı değerinin oldukça üzerindedir [175-180]. Bilindiği gibi ham yoğunluk değeri preslenmiş fakat sinterlenmemiş malzemenin yoğunluk değeridir [3]. Çalışma kapsamında sıcak presleme yapılmış olmasına rağmen sıcak preslemenin yapılmış olduğu sıcaklık değeri (500 °C) bakır ve kompozitlerinin sinterleme sıcaklığından oldukça düşük olduğu için ham yoğunluk kavramı kullanılabilir. Çalışma kapsamında sıcak presleme kullanılmasının nedeni yağlayıcılık özellikleri çok iyi olan karbon türevlerinin takviye malzemesi olarak kullanıldığı kompozitlerin yoğunlaştırılmasındaki güçlükleri ortadan kaldırmak ve sinterleme öncesi yoğunluk değerlerini artırmaktır. Tablo 3.1’de üretilen kompozitlerin teorik yoğunlukları verilmiştir. Saf bakır numunenin teorik yoğunluk değeri 8.96 gr/cm³ dir. Bu çalışma kapsamında saf bakır numunenin ham yoğunluk değeri 8.23 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. Şekil 3.18’de görüldüğü gibi ham yoğunluk değerleri artan takviye miktarı ile azalmaktadır. Bu azalmanın sebebi artan takviye miktarı ile matris tozları arasındaki etkileşimin zayıflaması ve oluşan topaklanmalar nedeniyle yoğunlaşma kabiliyetinin azalmasıdır [181, 182]. Şekil 3.18’de nanografite ve grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin ham yoğunluk değerlerinin birbirine yakın ve karbon nanotüp takviyeli kompozitlere göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 3.18’den gözlemlenen diğer bir sonuç takviye türünün sertliği arttıkça ham yoğunluk değerlerinin azalmasıdır. Bundan dolayı en yüksek ham yoğunluk değerleri

nanografite takviyeli kompozitlerde elde edilirken en düşük ham yoğunluk değerleri de karbon nanotüp takviyeli kompozitlerde elde edilmiş ve grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin ham yoğunluk değerleride nanografite takviyeli kompozitlere göre bir miktar düşüş göstermiştir. Karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin yoğunluk değerlerinin diğer takviye türlerine göre oldukça düşük ham yoğunluk değeri vermesinin nedeni aşırı topaklanma eğilimidir [183]. Yapılan ölçümler sonucunda ham bakır numunenin iletkenlik değeri 84 IACs olarak tespit edilmiş olup Şekil 3.19 elektrik iletkenliği değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimini göstermektedir. Artan takviye miktarı ile bütün takviye türleri için iletkenlik değerleri azalmıştır. Bunun nedeni olarak artan takviye miktarı ile azalan yoğunluk ya da artan gözenek miktarıdır [184]. Şekil 3.19'dan gözlemlenen en ilginç sonuç grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin iletkenlik değerlerinin nanografite partikül takviyeli ve karbon nanotüp takviyeli kompozitlere göre daha iyi olmasıdır. % 0.5 takviye oranı için ölçülen iletkenlik değeri grafen nanolevha takviyeli kompozitler için 76.3 IACs, nanografite partikül takviyeli kompozitler için 65.5 IACs ve karbon nanotüp takviyeli kompozitler için 55.3 IACs dir. Bununla birlikte nanografite partikül takviyeli kompozitler ve karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin iletkenlik değerleri % 1 takviye oranından sonra ani bir düşüş göstermektedir. % 1.5 takviye oranı için ölçülen iletkenlik değeri nanografite partikül takviyeli kompozitler için 14.1 IACs, karbon nanotüp takviyeli kompozitler için ise 6.8 IACs değerine düşmüştür. Diğer taraftan aynı takviye oranı için grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin iletkenlik değeri 47.3 IACs dir. Grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin ham numune iletkenlik değerlerinin oldukça iyi olması sinterleme ile daha da iyi iletkenlik değerlerinin elde edileceğini göstermesi açısından oldukça önemlidir.

Dağlama sonrası numune yüzeylerinden yapılan optik incelemeler Şekil 3.20-22'de verilmiştir. Optik incelemeler sonucunda ortaya çıkan en belirgin özellik artan takviye oranının sinterleme sürecini olumsuz bir şekilde etkileyerek presleme sonrası mekanik bir etki ile birbirine bağlanmış partiküllerin birleşmesini engellemesidir. Cu-nanografite ve Cu-grafen nanolevha takviyeli kompozitlere göre Cu-karbon nanotüp takviyeli kompozitlerde bu durum daha belirgindir (Şekil 3.22c). Şekil 3.22c'de görüldüğü gibi bakır partikülleri sinterleme öncesi ham numune iç yapısında olduğu gibi bireysel konumda olup partikül sınırları karbon nanotüp partikülleri tarafından doldurulmuştur. Bu durumun sebebi karbon nanotüp partiküllerinin nanografite ve grafen nanolevha partiküllerine göre yoğunlaştırma kabiliyetinin düşük olması ve topaklanma eğiliminin yüksek olmasıdır. Mikroyapı ve

elemental haritalama resimleri incelendiğinde takviye partiküllerinin sinterleme sonrası genellikle partikül sınırlarında biriktiği gözlemlenmektedir. Şekil 3.23-3.25’de görüldüğü gibi artan takviye miktarı ile partiküllerin sinterleme esnasında birleşmesi engellenmiş ve partikül sınırları tamamen ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte düşük takviye oranları için sinterleme prosesinin oldukça verimli olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.26-3.28’deki elemental haritalama resimleride bu gözlemi destekler niteliktedir. Sinterleme sonrası elde edilen yoğunluk değerleri şekil 3.29’da verilmiştir. Ham yoğunluk değerleri ile karşılaştırıldığında sinterlenmiş yoğunluk değerlerinde önemli bir artış elde edilmiştir. Bununla birlikte artan takviye miktarı ile sinterlenmiş yoğunluk değerleri azalmıştır. Bu azalışın sebebi artan takviye miktarı sonucu oluşan topaklanma bölgelerinin sayısı ve yoğunluğundaki artıştır. Temas bölgelerinde biriken takviye partikülleri tane sınırı difüzyonunu engelleyerek matris partiküllerinin birbirine bağlanmasını engellemektedir [185]. Artan takviye miktarı ile yoğunluk değerinin değişimi nanografite partikül ve grafen nanolevha takviyeli kompozitlerde benzerdir fakat karbon nanotüp takviyeli kompozitlerdeki yoğunluk azalışı daha hızlıdır. Bunun nedeni olarak karbon nanotüp partiküllerinin oluşturduğu aglomerasyon bölgelerinin fazlalığı gösterilebilir. Şekil 3.30 sinterleme sonrası iletkenlik değerlerinin takviye türü ve takviye miktarı ile değişimini göstermektedir. Ham numunelerin elektrik iletkenliği değerleri ile sinterlenmiş numunelerin iletkenlikleri oldukça farklı olup sinterleme sonrası iletkenlik değerleri oldukça artmıştır. Takviyesiz bakır numunenin ham iletkenlik değeri 84 IACs iken bu değer sinterleme işlemi sonrası 93 IACs değerine yükselmiştir. Ham numunelerde ağırlıkça %1 takviye oranından sonraki oranlar kullanılarak üretilen numuneler için elde edilen iletkenlik değerleri nanografite partikül takviyeli kompozitler için 39.2 IACs, grafen nanolevha takviyeli kompozitler için 53.36 IACs ve karbon nanotüp takviyeli kompozitler için 42.68 IACs değerinin altındadır. Sinterleme sonrası ise %5 takviye oranında nanografite partikül takviyeli kompozitler için ise 68.28 IACs, grafen nanolevha takviyeli kompozitler için 61.48 IACs gibi oldukça yüksek iletkenlik değerleri, karbon nanotüp takviyeli kompozitler için ise %5 takviye oranında 5.32 IACs değeri elde edilmiştir. Karbon nanotüp takviyeli kompozitler için iletkenlik değeri açısından kritik değer ağırlıkça % 2 takviye oranıdır ve bu oranda elektriksel iletkenlik değeri 46.26 IACs değeridir. Şekil 3.31’de nanokompozitlerin sertlik değerlerinin takviye türü ve takviye oranı ile değişimi verilmiştir. Takviye türü ve takviye oranı ile sertlik değerlerinin değişimi incelendiğinde grafen nanolevha takviyeli kompozit malzemelerin sertlik değerleri nanografite partikül

takviyeli ve karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin sertlik değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Karbon nanotüp partiküllerinin preslenme kabiliyetinin düşük ve topaklanma eğiliminin yüksek olmasından dolayı yapıdaki gözenek miktarının çok olması düşük sertlik değerlerinin sebebidir. Ayrıca nanografite partiküllerinin grafen nanolevha partiküllerine göre daha yumuşak olması nedeniyle nanografite partikül takviyeli kompozitlerin sertliği grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin sertliğinden daha düşüktür [186-189].

Şekil 3.32-3.43'de verilen aşınma yüzeyleri incelendiğinde bütün takviye türleri, oranları ve yükler için ana aşınma mekanizmalarının plastik deformasyon kaynaklı adhesiv aşınma ve delemantasyon aşınması olduğu kolayca anlaşılmaktadır. Ağırlıkça % 0.5, % 2 ve %5 nanografite takviyeli kompozitlerin 7N yük ve 400 metre mesafe sonucunda elde edilen aşınma görüntülerinde adhesiv aşınmanın tipik karakteri olan malzeme kopmasını takiben yüzeye sıvanma olayı açıkça görülmektedir (Şekil 3.32c). Ayrıca şekil 3.32b'de görülen yüzey altı çatlakları, yüzey çatlağı ve bölgesel kopmalar delemantasyon aşınmasını gösteren önemli bulgulardır [190-193]. Şekil 3.33'de ağırlıkça %0.5 nanografite takviyeli kompozitlerin 5N yük altında ve 200 metre aşınma yolu sonunda elde edilen aşınma yüzeyine ait elementel haritalama sonuçları verilmiştir. Şekil 3.33'den görüldüğü gibi nanografite partikülleri aşınma yüzeylerinde bulunmakta ve yağlayıcılık görevlerini sürdürmektedir. Bununla birlikte delemantasyon aşınması sonucu görülen bölgesel yâda tabakalı kopmalar ile bu tabakalar içerisindeki nano partiküllerin matris bünyesinden ayrılmasından dolayı aşınma performansının olumsuz bir şekilde etkilemesi kaçınılmazdır. Ayrıca yapılan elementel analiz sonucu yapı içerisinde bakır ve karbon harici başka bir element, örneğin aşındırıcı bilyeden gelebilecek demir yâda oksitlenme sonucu oluşan oksit varlığı saptanmamıştır. Şekil 3.34 ve şekil 3.35'de yine 5N yük altında ve 200 metre aşınma yolu sonunda ağırlıkça % 2 ve % 5 nanografite takviyeli kompozitler için elementel haritalama ve analiz sonuçları verilmiştir. Bu resimlerden de görüldüğü gibi elde edilen dağılım ve elementel analiz sonuçları benzerdir. Ağırlıkça % 0.5, % 2 ve %5 grafen nanolevha takviyeli kompozitlerde 7N yük ve 400 metre mesafe sonucunda elde edilen aşınma görüntüleri şekil 3.36'da verilmiştir. Ağırlıkça % 0.5 grafen nanolevha oranları için malzeme yüzeyindeki deformasyon ve buna bağlı olarak meydana gelen aşınma miktarı şekil 3.36a'da görülmektedir. Artan grafen nanolevha miktarının bölgesel kopmaları engellediği ve yüzeyde iyi bir yağlayıcı işlev gördüğü şekil 3.36b'de ve şekil 3.36c'den anlaşılmaktadır. Ağırlıkça % 0.5 grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin 5N yük altında

ve 200 metre aşınma yolu sonunda elde edilen aşınma yüzeyine ait elementel haritalama Şekil 3.37’de verilmiştir. Bu çalışma şartlarına ait aşınma yüzeylerinden de açıkça görüldüğü gibi temel aşınma mekanizmaları adhesiv ve delemantasyon aşınmasıdır. Şekil 3.37’de görüldüğü gibi aşınma yüzeyleri nanokompozit içersinde yağlayıcılık görevi gören grafen nanolevha partiküllerini içermektedir. Yapılan elementel analiz sonucu yapı içersinde bakır ve grafen nanolevha partikülleri harici başka bir element, örneğin aşındırıcı bilyeden gelebilecek demir yâda oksitlenme sonucu oluşan oksijen varlığı, saptanmamıştır. Şekil 3.38 ve şekil 3.39’de 5N yük altında ve 200 metre aşınma yolu sonunda ağırlıkça % 2 ve % 5 grafen nanolevha takviyeli kompozitler için verilen elementel haritalama ve analiz sonuçlarında farklı bir element varlığı gözlemlenmemiştir. Şekil 3.40 incelendiğinde ağırlıkça % 0.5, % 2 ve %5 karbon nanotüp takviyeli kompozitlerde 7N yük ve 400 metre mesafe sonucunda oluşan plastik deformasyon miktarı ve aşınma izi derinliklerinin nanogرافit ve grafen nanolevha takviyeli kompozitlerde elde edilen plastik deformasyon miktarı ve aşınma izi derinliklerine göre oldukça büyük olduğu görülmektedir. Şekil 3.40c’de görüldüğü gibi ağırlıkça %5 takviye oranında yüzey tamamen deforme olmuş ve aşınmaya karşı direnç tamamen ortadan kalkmıştır. Bu olumsuz sonucun en önemli sebebi karbon nanotüplerin matris partiküllerinin sınırlarında oluşturduğu topak bölgelerinin yoğunluğudur. Bu topak bölgeleri sinterleme sırasında tane sınırı difüzyonunu engelleyerek sinterleme verimini diğer bir deyişle sinterlenebilirliği azaltmaktadır. Artan karbon nanotüp takviye miktarının sinterlenebilirliği ne kadar olumsuz etkilediği şekil 3.40c’de verilen aşınma yüzeyinde görülen başlangıç partiküllerinin sinterleme işlemi sonrasında hemen hemen hiçbir değişime uğramaması ile de kanıtlanmaktadır. Takviyesiz bakır ve ağırlıkça % 0.5, % 2 ve %5 nanogرافit, grafen nanolevha ve karbon nanotüp takviyeli malzemeler için 10N ve 300m aşınma koşullarında elde edilen aşınma debrislerinin morfolojik görüntüleri ve bu debrisler üzerinde yapılan noktasal element analizlerinin sonuçları şekil 3.44-53’de verilmiştir. Bakır ve diğer takviyeli kompozitlerden elde edilen aşınma debrislerinin düzlemsel yâda puls morfolojiye sahip olması ana aşınma mekanizmalarının adhesiv ve delemantasyon aşınması olduğunun başka bir kanıtıdır. Noktasal element analizleri incelendiğinde analiz yapılan bölgedeki takviye miktarına bağlı olarak farklı bileşimler elde edilmiştir. Bu sonuç nanogرافit, grafen nanolevha ve karbon nanotüp takviye malzemelerinin aşınma debrisleri içersindeki miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Bu gözlemlerden elde edilen bir diğer sonuç nanogرافit, grafen nanolevha ve karbon nanotüp takviye malzemelerinin aşınma esnasında matris içersine gömülerek yağlayıcılık görevini

sürdürmeden ziyade aşınma debrisleri ile matris içersinden ayrılmasıdır. Bu sonuç aşınma performansı için olumsuz bir durumdur ve aşınma kayıpları için önemli bir faktördür. Noktasal element analiz sonuçlarında dikkat çeken diğer bir husus bazı debrislerdeki oksit varlığıdır. Bu sonuç yüzey alanı oldukça küçük olan aşınma debrislerinin oksitlemeye olan ilgisinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.54-3.56'da kayma mesafesi yâda aşınma yolu ve malzeme bileşimi ile nanokompozit malzemelerde meydana gelen aşınma kayıplarının değişimi verilmiştir. Uygulanan bütün yükler için (5N, 7N ve 10N) en iyi aşınma direncini dolayısıyla en düşük aşınma kaybını gösteren nanokompozitler grafen nanolevha takviyeli nanokompozitlerdir. Aşınma kaybı eğrilerinde de görüldüğü gibi en düşük aşınma direnci yeterli yağlayıcılık özelliğine sahip olmayan katkısız bakır numunelerde görülmüştür. Nanografit, grafen nanolevha ve karbon nanotüp partikülleri ile takviye edilmiş nanokompozitlere ait ağırlık kaybı grafikleri incelendiğinde artan takviye oranı ile aşınma kaybı eğrilerinin bakır numuneye ait aşınma kaybı eğrisinden uzaklaştığı ağırlıkça % 2 takviye oranından sonra ise aşınma eğrisi eğrilerinin yeniden bakır numuneye ait aşınma kaybı eğrisine yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca KNT-8 kodlu nanokompozitler için aşınma kaybı değerleri bütün yol ve yükleme şartları için bakır numunelerden daha fazladır. Bu sonuç KNT-8 kodlu nanokompozit malzemelerin düşük fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle. Nanografit takviyeli nanokompozitlerin aşınma kaybı değerleri grafen nanolevha takviyeli kompozitlere göre daha fazla, diğer taraftan bakır ve karbon nanotüp partiküllerine göre daha iyidir.

Şekil 3.57-76'da Cu, Cu-nanografit, Cu-grafen nanolevha ve Cu-karbon nanotüp bileşimlerinden oluşan kontak malzemelerinde 2000, 5000 ve 10000 açma-kapama işlemi sonucunda oluşan ark bölgelerinin yüzey morfolojileri verilmiştir. Ticari kontak malzemelerinde de görüldüğü gibi çalışma esnasında kontak malzemelerinin yüzeyinde iki farklı bölge meydana gelmektedir. Bunlar ark erezyonunun meydana geldiği ark tesirli bölge ve arkın gözlemlenmediği ark tesirsiz bölgedir [194]. Ark tesirsiz bölge içersinde kontaklar arasında ark oluşumunun meydana gelmemesinden dolayı kontak yüzeylerinde oldukça az bir deformasyon mevcuttur. Bu deformasyonun kontak ömrüne olan etkisi oldukça azdır. Ark tesirli bölge ise yerel ergimelerin, kontak memelerinin ve malzeme kaybının meydana geldiği ve kontak ömrünü önemli oranda etkileyen bölgedir. Ark tesirli bölgede çevrim esnasında oluşan sıcaklık artışı nedeniyle yerel ergimeler görülmekte ve bunun sonucu olarakta üst ve alt kontaklar bazı noktalardan birleşmeye zorlanmakta bunun sonucu olarak da meme oluşumu gözlenmektedir. Artan çevrim sayısı ile yerel ergime

bölgelerinin ve kontak memesi sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca artan çevrim sayısı ile ark tesirli bölgedeki oksit miktarı önemli oranda arttığından bu durum kontak direncini artırmakta ve ark oluşumunu kolaylaştırmaktadır [195]. Ark tesirli bölgedeki malzeme kaybı kontak memelerinin açma hareketi esnasında birbirinden ayrılırken yüzeyden kopmaları, oldukça sert olan oksit partiküllerinin yüzeyden ayrılması ve ark esnasında oluşan ark sıçramaları nedeniyledir. Şekil 3.57-3.76'da görüldüğü gibi artan çevrim sayısı ile kontak memesi miktarı ve büyüklüğü artmıştır. Yerel ergime bölgelerinin düzensiz katılaşması sonucu oluşan gözenekli yapıların sahip olduğu büyük yüzey alanlarında bu bölgelerdeki oksit oluşumunu artırmakta ve bu bölgeleri daha kırılğan yaparak malzeme kaybı miktarını da artırmaktadır. Yüzey morfolojilerinde dikkat çekici diğer bir husus ark tesirli bölgede yerel ergimenin görülmediği deformasyon bölgeleridir [196]. Burada meydana gelen deformasyonu oluşturan itici güç sıcaklıktır. Artan çevrim sayısı ile sıcaklık yükselmekte ve kontakların açılıp kapanması esnasındaki deformasyon ve dolayısıyla malzeme kaybı miktarı artmaktadır. Şekil 3.77a-g incelendiğinde artan çevrim sayısı ile ark kayıplarının artış gösterdiği bununla birlikte artış eğilimlerinin malzeme bileşimine göre farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bütün çevrim sayıları ve bütün takviye oranları için en büyük ark kaybı karbon nanotüp takviyeli kontak malzemelerinde görülmüştür. Bunun nedeni karbon nanotüp takviyeli kontak kompozitlerinin içyapısındaki karbon nanotüplerin oluşturduğu topaklanma bölgeleridir. Bu bölgelerin iletkenliği daha düşük olduğu için bu bölgelerde yüksek ark direnci oluşmakta ve kayıplar artmaktadır. Takviyesiz bakır numunelerin ark erozyon direnci karbon nanotüp takviyeli kontak malzemelerine göre daha iyi olmakla birlikte % 2 takviye oranına kadar nanografite ve grafen nanolevha takviyeli kompozitlerden daha düşüktür. Bakır numuneler, % 2 takviye oranından sonra nanografite takviyeli kontak malzemelerden, % 3 takviye oranından sonra ise grafen nanolevha takviyeli kompozitlerden daha düşük bir ark erozyon direnci göstermiştir. Bu sonuç özellikle % 2 takviye oranından sonra nanografite ve grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin sertlik ve iletkenlik değerlerinin azalışı ve artan takviye topaklanması nedeniyledir. Nanokompozit kontakların kendi içersinde bir karşılaştırmasını yapacak olursak bütün çevrim sayıları ve bileşimler için en düşük ark kayıpları grafen nanolevha takviyeli kompozitlerde elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak bu nanokompozit kontakların diğer nanokompozit kontaklara göre daha iyi bir yüzey sertliği göstermesi ve dolayısıyla daha iyi aşınma direncine sahip olması, iletkenlik değerlerinin artan takviye oranı ile daha az değişimi, morfolojik açıdan matris ile takviye partiküllerinin uyumu ve

daha az topaklanma eğilimi gösterilebilir. Yapılan elementel analizlerde (şekil 3.78-83) iki önemli husus dikkati çekmektedir. Bunlardan birincisi 2000'den 10000'e doğru artan çevrim sayısı ile oksit varlığının artışıdır. Bu artışın sebebi çevrim sayısındaki artış ile bölgesel ergimelerin artışı ve dolayısıyla oksit oluşumunun artışıdır. Diğer önemli bir husus karbon nanotüp takviyeli kontak malzemelerine ait ark bölgesinde yapılan noktasal analizlerde karbon elementi miktarının diğer takviye türlerine göre daha fazla çıkmasıdır. Bu sonuç karbon nanotakviyeli kompozitlerde oluşan topaklanma bölgelerinin yüksek yoğunluğu ile açıklanmaktadır.

Tablo 3.1'den görüldüğü gibi kompozit malzemeler içerisinde en iyi iletkenlik değerlerine GNP-2, GNP-3, GRNL-2 ve GRNL-3 kompozitlerinde ulaşılmıştır. En iyi iletken katmanının seçimi dikkate alınarak ark erozyon direnci daha düşük olmasına rağmen düşük maliyetinden dolayı grafen nanolevha takviyesi yerine grafit nanopartikül takviyeli kompozit bileşimi tercih edilmiştir. Kendi aralarında ise GNP-2 kompozitinin sertliği, aşınma ve ark erozyon direnci GNP-3 kompozitine göre daha yüksek olduğundan nanokompozit malzemeler içinde en iyi iletkenlik katmanı için GNP-2 kodlu kompozit türü seçilmiştir. Tablo 3.1'de verilen performans göstergelerine göre en iyi ark performansı gösteren kompozit türü GRNL-3 ve GRNL-4 kodlu grafen nanolevha takviyeli kompozitlerdir. Tablo 3.1 incelendiğinde bu iki kompozit türü için elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu bununla birlikte GRNL-3 kodlu kompozit türü için yoğunluk ve iletkenlik değerlerinin bir derece iyi olduğu anlaşılmaktadır. Maliyet kriteri de göz önüne alınarak en iyi ömür yâda ark erozyon direnci için GRNL-3 kodlu kompozit türü seçilmiştir. En iyi ömür + en iyi iletkenlik katmanı için ise tablodaki göstergelere göre en uygun kompozit türü GRNL-4 kodlu kompozittir. Bu kompozit türü bütün kompozit türleri içerisinde en iyi ömür + en iyi iletkenlik özelliklerini sağlamaktadır. Performans karşılaştırmaları sonucu elde edilen bir diğer önemli sonuç ise karbon nano tüp takviyeli kompozit türlerinin kontak malzemeleri için nanorafit ve grafen nanolevha takviyeli kompozit türlerinin sağladığı özellikler yanında oldukça düşük performansta kalmasıdır.

Şekil 3.113'de verilen karşılaştırmalı grafiklerden de görüldüğü gibi farklı katman bileşimlerine sahip FDM'ler için farklı yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi her bir katmanın yoğunlaşma kabiliyetinin farklı olmasıdır. Yoğunluk değerleri incelendiğinde en dikkat çekici sonuç alt katmanları Cu ve GNP-2 bileşimlerinden oluşan FDM'lerin diğer FDM'lere oranla daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip olmasıdır. Bu sonuç Cu ve GNP-2 bileşimlerinin sertlik değerlerinin diğer katman bileşimlerine göre

düşük olmasından dolayıdır. Saf bakır numune için elde edilen sinterlenmiş yoğunluk değeri olan 8.91 değeri dikkate alındığında FDM'ler için elde edilen yoğunluk değerleri çalışma performansı bakımından yeterlidir. Şekil 3.114'de iki ve üç kademeli FDM'ler için ortalama ve her bir katmana ait elektrik iletkenliği değerleri verilmiştir. Grafiklerdende görüldüğü gibi en yüksek iletkenlik değerleri saf bakır katmanlarda elde edilmiş olup takviye malzemesinin nanokompozit içyapısındaki ağırlıkça oranı arttıkça iletkenlik değerleri düşmüştür. Bununla birlikte ölçülebilen en düşük elektrik iletkenliği değeri 73 IACs dir ki bu değer üretilen FDM'lerin elektrik kontak malzemesi olarak kullanılabileceğinin en büyük göstergesidir. Katmanlar kendi aralarında karşılaştırıldığında elektrik iletkenliği değerleri 73 IACs ile 90 IACs arasında değişmektedir. Nanokompozit karakterizasyonu çalışmaları sonucunda nanokompozit malzemelerin iletkenlik değerleri 78.5 IACs (GRNL-2) ile 5.3 IACs (KNT-8) arasında değişmekte iken yapılan optimizasyon işlemi sonucunda en iyi sonuçları veren katmanların seçimi ile iletkenlik değerleri 90 IACs ile 73 IACs arasındaki değerlere yükseltilmiştir. Bu sonuç FDM üretimi sonucunda elde edilen malzeme özellikleri ile geleneksel kompozit malzeme özellikleri arasındaki farkı açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 3.115a ve şekil 3.115b'de iki kademeli ve üç kademeli FDM'lere ait sertlik değerleri verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi en düşük sertlik değeri olarak 28 BSD en büyük sertlik değeri olarak ise 33 BSD elde edilmiştir. Nanokompozit karakterizasyonu çalışmaları sonucunda nanokompozit malzemelerin sertlik değerleri 33 BSD (GRNL-2) ile 15.2 BSD (KNT-8) arasında değişmekte iken yapılan optimizasyon işlemi sonucunda en iyi sonuçları veren katmanların seçimi ile sertlik değerleri 28 BSD ile 34 BSD arasındaki değerlere yükseltilmiştir. Yine bu sonuç FDM üretimi ile elde edilen malzeme özellikleri ile geleneksel kompozit malzeme özellikleri arasındaki farkı açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 3.116-3.121'de iki ve üç kademeli FDM'lere ait aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma yüzeyleri verilmiştir. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde ana aşınma mekanizmalarının tek kademeli geleneksel kompozit malzemelerde olduğu gibi plastik deformasyon sonucu meydana gelen adhesiv aşınma ve delemantasyon aşınması olduğu anlaşılmaktadır. Aşınma resimlerinde görüldüğü gibi aşınma yüzeylerinde yüzey çatlakları, bölgesel kopmalar ve yüzey altı çatlak oluşumları mevcuttur. Ayrıca aşınma esnasında yüzeyden ayrılan partiküllerden bazılarının aşınma yüzeyine sıvandığı açıkça görülmektedir. Tek kademeli nanokompozit malzemelerde de görüldüğü gibi FDM'lerde de delemantasyon aşınması sonucu görülen bölgesel yâda tabakalı kopmalar ile bu tabakalar

içersindeki takviye partikülleri matris bünyesinden ayrılmakta ve bu durum aşınma performansını olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Şekil 3.122-135’de iki katmanlı ve üç katmanlı FDM’ler için kayma mesafesi yâda aşınma yolu ve uygulanan yük ile ağırlık kaybı değişimleri verilmiştir. Grafiklerdende görüldüğü gibi artan kayma mesafesi ve artan yükte aşınma sonucunda oluşan ağırlık kaybı miktarı artmıştır. Aşınma yüzeylerinden de anlaşıldığı gibi ağırlık kaybına neden olan temel mekanizma plastik deformasyon sonucu meydana gelen adhesiv aşınma ve delemantasyon mekanizmasıdır. Aşınma esnasında yüzeyde oluşan plastik deformasyon sonucu partikül veya tabaka şeklinde ayrılmalar olmaktadır. Partikül şeklindeki ayrılmalar yüzeydeki nanopartiküllerin yağlayıcılık etkisini çok fazla azaltmamaktadır bununla birlikte delemantasyon aşınması şeklinde oluşan tabakalı kopmalar yüzeydeki nanopartiküllerin de ayrılmasına neden olduğu için yağlayıcı tabakayı ortadan kaldırarak ağırlık kaybının fazla olmasına neden olmaktadır. Bu durum alt yüzeydeki yağlayıcı nanopartiküllerin yeniden bir yağlayıcı yüzey oluşturmasına kadar devam etmektedir. 5N aşınma yükü altındaki ağırlık kayıpları incelendiğinde, nanokompozit malzeme için 0.0001 gr (GRNL-5) ile 0.0102 gr (KNT-8) değerleri elde edilmişken aynı yük için FDM’lerdeki aşınma kayıpları 0.0006 gr ile 0.0029 gr aralığında değişmektedir. 7N aşınma yükü altındaki ağırlık kayıpları (mg) incelendiğinde, nanokompozit malzeme için 0.0003 gr (GRNL-5) ile 0.0117 gr (KNT-8) değerleri elde edilmişken aynı yük için FDM’lerdeki aşınma kayıpları 0.0008 gr ile 0.0035 gr aralığında değişmektedir. 10N aşınma yükü altındaki ağırlık kayıpları (mg) incelendiğinde ise nanokompozit malzeme için 0.0007 gr (GRNL-5) ile 0.0142 gr (KNT-8) değerleri elde edilmişken aynı yük için FDM’lerdeki aşınma kayıpları 0.0010 gr ile 0.0046 gr aralığında değişmektedir. En iyi özellikler veren bileşimlerin FDM kademesi olarak seçilmesiyle aşınma sonucunda oluşan maksimum ağırlık kayıpları yaklaşık olarak dört kat azalmıştır.

Şekil 3.136-141’de farklı FDM’lerde 2000 ve 10000 açma-kapama (çevrim) işlemi sonucunda oluşan ark bölgelerinin yüzey morfolojileri verilmiştir. FDM’lerde de tek kademeli nanokompozit kontak malzemelerinde görüldüğü gibi kontak performans deneyleri sonucunda kontak malzemelerinin yüzeyinde ark tesirli bölge ve ark tesirsiz bölge olarak tanımlanan iki farklı bölge oluşmuştur. Ark morfolojisi resimlerinden de görüldüğü gibi ark tesirli bölgede yerel ergimeler ve kontak memeleri oluşmakta bunun sonucunda da kontak performansını ve ömrünü olumsuz bir şekilde etkileyen malzeme kayıpları oluşmaktadır. Ark tesirli bölgede meydana gelen sıcaklık artışı yerel ergimelere sebep olmakta ve kontaklar temas noktalarından birleşmeye zorlanarak kontak memeleri

oluşmaktadır. Nanokompozit kontak malzemelerinde gözlemlendiği gibi, FDM'lerde de artan çevrim sayısı ile yerel ergime bölgesi ve kontak memesi sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir hususta çevrim sayısı artışı ile ark tesirli bölgedeki oksit miktarı artmakta ve bunun sonucu olarakta kontak direnci artarak ark oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Çevrim esnasında kontak memelerinin kontak yüzeyinden kopması, sert oksit partiküllerinin yüzeyden ayrılması ve ark sıçramaları ark tesirli bölgedeki malzeme kaybının sebeplerini oluşturmaktadır. Artan çevrim sayısı ile kontak memesi miktarı ve büyüklüğündeki artış yüzey morfoloji incelemeleri sonucunda elde edilen önemli bir sonuçtur. Nanokompozit kontak malzemelerinde gözlemlendiği gibi yerel ergime bölgelerinin düzensiz katılaşması sonucu oluşan gözenekli yapıların sahip olduğu büyük yüzey alanları bu bölgelerdeki oksit oluşumunu artırmakta ve bu bölgeleri daha kırılğan yaparak malzeme kaybı miktarını artırmaktadır. Noktasal elementel analizlerinde dikkat çeken en önemli husus artan çevrim sayısı ile birlikte ark tesirli bölgedeki oksit miktarının artışıdır. Bu artışın nedeni çevrim sayısındaki artış ile bölgesel ergimelerin artışı ve dolayısıyla oksit oluşumunun artışıdır. Ayrıca noktasal analiz sonuçlarından görüldüğü gibi kontak memesi oluşan bölgelerdeki oksit miktarı oldukça fazladır. Bunun nedeni kontak memesi bölgelerindeki yüksek sıcaklık oluşumudur. Fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemelerine uygulanan kontak performans deneyleri sonucunda elde edilen ark kayıpları incelendiğinde nanokompozit kontak malzemelerinde olduğu gibi artan çevrim sayısı ile ark kayıplarının artış gösterdiği bununla birlikte artış eğilimlerinin malzeme bileşimine göre farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.142-155). Nanokompozit kontak malzemelerinde 2000 açma-kapama işlemi sonucunda belirlenen en düşük ark kaybı 0.0007 gr (GRNL-4), en büyük ark kaybı ise 0.0066 gr (KNT-8) iken fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemelerinde bu değerler 0.00090 gr ile 0.0014 gr değerleri arasında değişmektedir. Aynı şekilde nanokompozit kontak malzemelerinde 10000 açma-kapama işlemi sonucunda belirlenen en düşük ark kaybı 0.0026 gr (GRNL-4) en büyük ark kaybı ise 0.0128 gr (KNT-8) iken fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemelerinde bu değerler 0.0028 gr ile 0.0037 gr (FDM-13) değerleri arasında değişmektedir. Nanokompozit kontak malzemeleri ile fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemeleri arasındaki ark kaybı farkları kontak malzemesi olarak FDM malzemelerin üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Sonuç olarak tek kademeli nanokompozit malzemelerin en iyi özellikleri belirlenerek üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemelerinin

nanokompozit malzemelerin özelliklerini koruduğu ve katman sayısına bağlı olarak verimli çalışma ömrünü 2, 3 hatta 4 kat arttırdığı ortaya konulmuştur.

5. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulguların değerlendirilmesinden çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1-5 saatlik öğütme işlemi sonucunda elde edilen nanokompozit tozlarının morfolojisi pulsu yâda tabakalı morfolojidir. Takviye malzemesi olarak kullanılan nanopartiküller pulsu morfolojiye sahip bakır matris tozlarının içine gömülmüş durumdadır. Bununla birlikte artan nanopartikül miktarı ile matris tozları üzerinde oluşan topaklanma bölgelerinin sayısı ve yoğunluğu artmıştır.

2-Bütün nanokompozit toz bileşimleri için artan takviye oranı ile ortalama toz boyutu azalmıştır. En düşük ortalama toz boyutu karbon nanotüp takviyeli nanokompozit tozları için elde edilmiştir. Bunun nedeni nanopartiküller içerisinde en düşük başlangıç toz boyutuna karbon nanotüp partiküllerinin sahip olmasıdır.

3-En iyi görünür yoğunluk değerleri nanografite takviyeli nanokompozit tozları için elde edilmişken en düşük görünür yoğunluk değerleri karbon nanotüp takviyeli nanokompozit tozları için elde edilmiştir. Nanografite tozlarının yarı düzlemsel-yarı küresel morfolojiye sahip olması partiküller arası yerleşimi kolaylaştırırken karbon nanotüp takviyeli nanokompozit tozlarının sahip olduğu düşük ortalama toz boyutu topaklanma eğilimini artırmıştır.

4-Nanografite ve grafen nanolevha takviyeli nanokompozitlerin ham yoğunluk ve iletkenlik değerleri karbon nanotüp takviyeli nanokompozit değerlerinden yüksek olup kendi aralarında birbirine yakındır. Artan takviye oranı ile birlikte ham durumdaki bütün nanokompozitler için yoğunluk ve iletkenlik değerleri azalmıştır.

5-Sinterleme işlemi sonucunda yoğunluk ve iletkenlik değerlerinde iyileşmeler görülmüştür. En yüksek iletkenlik değerleri ağırlıkça %0.5 grafen nanolevha takviyeli nanokompozitlerde 78.5 IACs olarak, en düşük iletkenlik değeri ise ağırlıkça %5 karbon nanotüp takviyeli nanokompozitlerde 5.3 IACs olarak elde edilmiştir. Sinterlenmiş durumda da artan takviye oranı ile bütün nanokompozit türleri için yoğunluk ve iletkenlik değerleri azalmıştır.

6- Grafen nanolevha takviyeli nanokompozit malzemelerin sertlik değerleri nanografite partikül takviyeli ve karbon nanotüp takviyeli nanokompozitlerin sertlik değerlerinden daha yüksektir. Karbon nanotüp partiküllerinin presleme kabiliyetinin düşük ve

topaklanma eğiliminin yüksek olmasından dolayı yapıdaki gözenek miktarının çok olması düşük sertlik değerlerinin sebebidir.

7-Bütün nanokompozit türleri için ball-on-disk aşınma deneyi sonucunda gözlemlenen aşınma mekanizmaları adhesive ve delemantasyon aşınmasıdır. Aşınma kayıpları artan aşınma yükü ve aşınma yolu ile artmaktadır. En yüksek aşınma kayıpları karbon nanotüp takviyeli nanokompozitlerde gözlemlenmiştir. Bunun nedeni karbon nanotüp takviyeli nanokompozit içyapısındaki gözeneklerin çokluğu ve düşük sertliktir.

8-Kontak performans deneyleri sonucunda bütün nanokompozit kontak malzemelerinin yüzeyinde ark tesirli bölge meydana gelmiş olup ark kayıpları bu bölgede oluşmuştur. Ark tesirli bölge üzerinde yerel ergimeler, kontak memeleri ve bölgesel kırılmalar görülmüştür. Çevrim sayısındaki artış ile ark yüzeylerindeki oksit oluşumu artmıştır. En düşük ark kayıpları grafen nanolevha takviyeli kompozitlerde görülmüştür. Bunun nedeni grafen nanotakviyeli nanokompozit kontakların diğer nanokompozit kontaklara göre yüksek yüzey sertliği ve iletkenlik değeridir.

9-Nanokompozit optimizasyonu sonucu en iyi özellikleri veren ve FDM üretimi için kullanılacak bileşimler belirlenmiştir. En iyi iletkenlik katmanı için GNP-2 kodlu nanokompozit, en iyi ömür yâda ark erozyon direnci için GRNL-3 kodlu nanokompozit, En iyi ömür + en iyi iletkenlik katmanı için ise GRNL-4 kodlu nanokompozit seçilmiştir.

10-FDM'lerdeki elektrik iletkenliği değerleri 73 IACs ile 90 IACs değerleri arasında değişmektedir. Nanokompozit karakterizasyonu çalışmaları sonucunda nanokompozit malzemelerin iletkenlik değerleri 78.5 IACs (GRNL-2) ile 5.3 IACs (KNT-8) arasında değişmekte iken yapılan optimizasyon işlemi sonucunda en iyi sonuçları veren katmanların seçimi ile iletkenlik değerleri 90 IACs ile 73 IACs arasındaki değerlere yükseltilmiştir.

11- FDM'lerdeki sertlik değerleri 28 BSD ile 33 BSD arasında değişmektedir. Nanokompozit karakterizasyonu çalışmaları sonucunda nanokompozit malzemelerin sertlik değerleri 33 BSD (GRNL-2) ile 15.2 BSD (KNT-8) arasında değişmekte iken yapılan optimizasyon işlemi sonucunda en iyi sonuçları veren katmanların seçimi ile sertlik değerleri 28 BSD ile 34 BSD arasındaki değerlere yükseltilmiştir.

12-FDM'lerde gözlemlenen aşınma türleri nanokompozit malzemelerde tespit edilen adhesiv ve delemantasyon aşınmalarıdır. En iyi bileşimlerin seçilmesi ile aşınma kayıpları nanokompozitlere göre dört kat azalmıştır.

13-FDM'lere uygulanan kontak performans deneyleri sonucunda ark kayıplarının önemli oranda azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın en önemli sebebi FDM bünyesindeki yüksek

iletkenlik ve sertlik değerleridir. Ark tesirli bölgelerde yerel ergime bölgeleri ve kontak memeleri gözlemlenmiştir. Ark kayıpları artan çevrim sayısı ile birlikte artmıştır. Aynı şekilde nanokompozit kontak malzemelerinde 10000 açma-kapama işlemi sonucunda belirlenen en düşük ark kaybı 0.0026 gr (GRNL-4) en büyük ark kaybı ise 0.0128 gr (KNT-8) iken fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemelerinde bu değerler 0,0028 gr ile 0,0037 gr (FDM-13) değerleri arasında değişmektedir.

14-Sonuç olarak nanokompozit kontak malzemelerin sahip olduğu en iyi özellikler kullanılarak üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş kontak malzemeleri hem bu özellikleri korumuş hemde kullanım yeri için daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler içeren ve daha uzun çalışma ömrü sağlayan malzeme olarak geliştirilmişlerdir.

6. ÖNERİLER

1-Farklı ve daha uzun öğütme süreleri kullanılarak, öğütme süresinin nanokompozit ve dolayısıyla FDM özellikleri üzerine etkisi araştırılabilir.

2-Farklı sinterleme sıcaklığı ve süreleri kullanılarak sinterleme sıcaklığı ve süresinin nanokompozit ve dolayısıyla FDM özellikleri üzerine etkisi araştırılabilir.

3-Yapılan bu çalışmada kullanılan nanografite, grafen nanolevha ve karbon nanotüp takviye malzemeleri ile elde edilen yağlayıcılık ve iletkenlik değerleri oldukça iyi olmakla birlikte sertlik değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Nanokompozit bileşimi içersine ağırlıkça %0.1-0.5 arasında sert seramik partikülleri katılarak iletkenlik değerlerinde önemli bir düşüş olmadan sertlik değerleri arttırılarak aşınma direnci daha da geliştirilebilir.

4-Nanokompozit kontak malzemeleri ve dolayısıyla FDM'ler hibrit nanokompozit şeklinde üretilerek farklı bileşimlerin özellikler üzerine etkisi araştırılabilir.

7. KAYNAKLAR

1. Callister, W.D., ve Rethwisch D.G, Materials Science and Engineering, Çeviri Editörü, Prof. Dr. Genel, K., 1.Cilt, 8.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2013.
2. Ersan, Ç., Fonksiyonel Derecelendirilmiş Disklerde Termal Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2008.
3. Varol, T., AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, 2012.
4. Varol, T. ve Canakci, A., Effect of weight percentage and particle size of B₄C reinforcement on physical and mechanical properties of powder metallurgy Al₂O₃-B₄C composites, Metals and Materials International, 19 (2013) 1227-1234.
5. Varol, T., Canakci A. ve Özsahin S., Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al₂O₃-B₄C composites produced by powder metallurgy, Composite Part B, 54 (2013) 224-233.
6. Sun, L., Sneller, A. ve Kwon, P., Fabrication of alumina/zirconia functionally graded material: From optimization of processing parameters to phenomenological constitutive models, Materials Science and Engineering A, 488 (2008) 31-38.
7. Erdemir, F., Canakci, A, Varol, T. ve Ozkaya, S. ve 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.
8. Wang, P., Tan K.L., Kang E.T., ve Neoh, K.G., Preparation and characterization of semi-conductive poly (Vinylidene fluoride)/polyaniline blends and membranes, Applied Surface Science, 193 (2002) 36-45.
9. Staiger, M.P., Pietak, A.M., Huadmai, J. ve Dias, G., Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review, Biomaterials, 27 (2006) 1728-1734.
10. Arifin, A., Sulong, A.B., Muhamad, N., Syarif, C. ve Ramli, M.I., Material processing of hydroxyapatite and titanium alloy (HA/Ti) composite as implant materials using powder metallurgy: A review, Materials and Design,55 (2014) 165-175.
11. Jani, J.M., Leary, M., Subic, A. ve Gibson, M.A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, Materials and Design, 56 (2014) 1078-1113.
12. Zheng, H.X., Mentz, J., Bram, M., Buchkremer, H.P. ve Stöver D., Powder metallurgical production of TiNiNb and TiNiCu shape memory alloys by combination of pre-alloyed and elemental powders, Journal of Alloys and Compounds, 463 (2008) 250-256.
13. Tian, K., Zhao, Y., Jiao, L., Zhang, S., Zhang, Z. ve Wu, X., Effects of in situ generated ZrB₂ nano-particles on microstructure and tensile properties of 2024Al matrix composites, Journal of Alloys and Compounds, 594 (2014) 1-6.

14. Wang, H., Shi, P., Yu, He. ve Xu, B., Preparation and Micro Mechanical Properties of Nano-Al₂O₃ Particles Strengthened Ni-based Composite Coatings, Physics Procedia, 50 (2013) 225-230.
15. Ruys, A.J., Popov, E.B., Sun, D., Russell, J.J. ve Murray, C.C.J., Functionally graded electrical/thermal ceramic systems, Journal of the European Ceramic Society, 21 (2001) 2025-2029.
16. Jha, D.K., Kant, T. ve Singh, R.K., A critical review of recent research of on functionally graded plates, Composite structures, 96 (2013) 833-849.
17. Canakci, A., Ozsahin, S. ve Varol, T., Modeling the influence of a process control agent on the properties of metal matrix composite powders using artificial neural Networks, Powder Technology 228 (2012) 26-35.
18. Sarıkan, B., İşlevsel Derecelendirilmiş Bor Karbür Takviyeli AA7075 Esaslı Kompozitlerin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermiler Karşısındaki Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
19. Karahalil, B., Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerde Gerilme Yığılımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
20. Chu, C.Y., Kuo, T.C., Chang, S.F, Shyu Y.C. ve Lin, C.P., Comparison of the microstructure of crown and root dentin by a scanning electron microscopic study, Journal of Dental Sciences, 5 (2010) 14-20.
21. Eltit, F., Ebacher, V. ve Wang, R., Inelastic deformation and microcracking process in human dentin, Journal of Structural Biology 183 (2013) 141-148.
22. Stephanie, H.M., Heinz, R. ve Ursula, G.F., The use of skin models in drug development, Advanced Drug Delivery Reviews, 69-70 (2014) 81-102.
23. Kato, S., Matsui, H., Saitoh, Y. ve Miwa N., Fish collagen-containing drink is subcutaneously absorbed and attenuates the UVA-induced tissue-integrity destruction and DNA damages in 3D-human skin tissue model, Journal of Functional Foods, 3 (2011) 50-55.
24. Übeyli, M., Balci, E., Sarıkan, B., Öztaş M.K., Camuşcu, N., Yıldırım R.O. ve Keleş, Ö., The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy, Materials and Design, 56 (2014) 31-36.
25. Pettersson, A., Magnusson, P., Lundberg, P. ve Nygren, M., Titanium-titanium diboride composites as part of a gradient armour material, International Journal of Impact Engineering, 32 (2005) 387-399.
26. Leon-Patino, C.A., Aguilar-Reyes, E.A., Bedolla-Becerril, E., Bedolla-Jacuinde, A. ve Mendez-Diaz, S., Dry sliding wear of gradient Al-Ni/SiC composites, Wear, 30 (2013) 688-694.

27. Vieira, A.C., Sequeira, P.D., Gomes, J.R. ve Rocha, L.A., Dry sliding wear of Al alloy/SiCp functionally graded composites: Influence of processing conditions, Wear, 267 (2009) 585-592.
28. Ferreira, S.C., Rocha, L.A., Ariza, E., Sequeira, P.D., Watanabe, Y. ve Fernandes, J.C.S., Corrosion behaviour of Al/Al₃Ti and Al/Al₃Zr functionally graded materials produced by centrifugal solid-particle method: Influence of the intermetallics volume fraction, Corrosion Science, 53 (2011) 2058-2065.
29. Elkedim, O., Cao, H.S. ve Guay, D., Preparation and corrosion behavior of nanocrystalline iron gradient materials produced by powder processing, Journal of Materials Processing Technology, 121 (2002) 383-389.
30. Kieback, B., Neubrand, A. ve Riedel, H., Processing techniques for functionally graded materials, Materials Science and Engineering A, 362 (2003) 81-105.
31. Sknchez-Herencia, A.J, Morinaga, K. ve Moya, J.S., Al₂O₃/Y-TZP Continuous Functionally Graded Ceramics by Filtration-Sedimentation, Journal of the European Ceramic Society, 17 (1997) 1551-1554.
32. Kaya, C., Boccaccini, A.R. ve Trusty P.A., Processing and Characterisation of 2-D Woven Metal Fibre-reinforced Multilayer Silica Matrix Composites Using Electrophoretic Deposition and Pressure Filtration, Journal of the European Ceramic Society, 19 (1999) 2859-2866.
33. Bilici, İ., Ti-Fe Alaşımlarından Basıncısız İnfiltrasyon Yöntemiyle Seramik Metalik Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
34. Wittig, D., Glauche, A., Aneziris, C.G., Minghetti, Schelle, T.C., Graule, T. ve Kuebler, J., Activated pressureless melt infiltration of zirconia-based metal matrix composites, Materials Science and Engineering A, 488 (2008) 580-585.
35. Parras-Medecigo, E., Pech-Canul, M.I., Rodriguez-Reyes, M. ve Gorokhovskiy, A., Effect of processing parameters on the production of bilayer-graded Al/SiCp composites by pressureless infiltration, Materials Letters, 56 (2002) 460-464.
36. Eker, A.A., Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları, İstanbul, 2008.
37. Candan E., Effect of alloying additions on the porosity of SiCp preforms infiltrated by aluminum, Materials Letters, 60 (2006) 1204-1208.
38. Bollina, R. ve Knippscheer, S., Advanced metal diamond composites - love and heat relationship, Electronics Cooling, 14 (2008) 18-25.
39. Lee, K.B., Ahn, J.P. ve Kwon, H., Characteristics of AA6061/BN Composite Fabricated by Pressureless Infiltration Technique, Metallurgical and Materials Transactions A, 32 (2001) 1007-1018.

40. Aran, A., Metal Döküm Teknolojisi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1993.
41. Gülmez, T., İmal Usulleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları, İstanbul, 2012.
42. Melgarejo, Z.H, Suarez, O.M. ve Sridharan, K., Microstructure and properties of functionally graded Al-Mg-B composites fabricated by centrifugal casting, Composites: Part A, 39 (2008) 1150-1158.
43. Watanabe, Y., Eryu, H. ve Matsuura, K., Evaluation of three-dimensional orientation of α_2 ti platelet in al-based functionally graded materials fabricated by a centrifugal casting technique, Acta materialia, 49 (2001) 775-783.
44. Watanabe, Y., Kawamoto, A. ve Matsuda, K., Particle size distributions in functionally graded materials fabricated by the centrifugal solid-particle method, Composites Science and Technology, 62 (2002) 881-888.
45. Rajan, T.P.D., Pillai, R.M. ve Pai, P.C., Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites, Materials Characterization, 61 (2010) 923-928.
46. Ceylan, A., Şerit döküm yöntemi kullanılarak fonksiyonel aşamalı SiAlON seramiklerinin üretimi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
47. Jung Y.G. ve Choi S.C., Fabrication of 3Y-TZP/SUS304 functionally graded materials by slip casting; application of porous alumina molds, Materials Letters, 37 1998. 312-319.
48. Garmendia, N., Santacruz, I., Morreno, R. ve Obieta I., B., Slip casting of nanozirconia/MWCNT composites using a heterocoagulation process, Journal of the European Ceramic Society, 29 (2009) 1939-1945.
49. Peng, X., Yan M. ve Shi, W., A new approach for the preparation of functionally graded materials via slip casting in a gradient magnetic field, Scripta Materialia, 56 (2007) 907-909.
50. Herencia, A.J.S., Moreno, R. ve Jorado J.R., Electrical transport properties in zirconia/alumina functionally graded materials, Journal of the European Ceramic Society, 20 (2000) 1611-1620.
51. Prchlik, L., Sampath, S., Gutleber, J., Bancke, G. ve Ruff A.W., Friction and wear properties of WC-Co and Mo-Mo₂C based functionally graded materials, Wear, 249 (2001) 1103-1115.
52. Minisker, M.E., Termal sprej yöntemiyle oluşturulan kaplamaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.

53. Su, B., Yan, H.G., Chen, G., Shi, J.L., Chen J.H. ve Zheng, P.L., Study on the preparation of the SiCp/Al-20Si-3Cu functionally graded material using spray deposition, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 6660-6665.
54. Stewart, S., Ahmed, R. ve Itsukaichi, T., Contact fatigue failure evaluation of post-treated WC–NiCrBSi functionally graded thermal spray coatings, Wear, 257 (2004) 962-983.
55. Muller, P., Mognol, P. ve Hascoet, J.Y., Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing, Journal of Materials Processing Technology, 213 (2013) 685-692.
56. Shah, K., Hag, I.U., Khan, A., Shah, S.A., Khan, M. ve Pinkerton, A.J, Parametric study of development of Inconel-steel functionally graded materials by laser direct metal deposition, Materials and Design, 54 (2014) 531-538.
57. Yakovlev, A., Trunova, E., Grevey, D., Pilloz, M. ve Smurov I., Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects, Surface & Coatings Technology, 190 (2005) 15-24.
58. Zhang, Y., Wei, Z., Shi, L. ve Xi, M., Characterization of laser powder deposited Ti-TiC composites and functional gradient materials, Journal of Materials Processing Technology, 206 (2008) 438-444.
59. Randall, M.G., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşleme, Çeviri Süleyman Sarıtaş, Mehmet Türker ve Nuri Durlu, Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 2007.
60. Canakci, A., Varol, T. ve Ertok, S., The effect of mechanical alloying on Al₂O₃ distribution and properties of Al₂O₃ particle reinforced Al-MMCs, Science and Engineering of Composite Materials, 19 (2012) 227-235.
61. Mutlu, İ., Toz metalurjisi yöntemiyle elde edilen gözenekli martenzitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikler, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
62. Canakci, A., Varol, T. ve Nazik, C., Effects of amount of methanol on characteristics of mechanically alloyed Al-Al₂O₃ composite powders, Materials Technology, 27 (2012) 320-327.
63. Günay, M., Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
64. Kaya, M., Toz metalurjisi ile üretilen NiTi şekil hatırlamalı alaslamların metalurjik ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.

65. Canakci, A., Varol, T. ve Ozsahin S., Prediction of effect of volume fraction, compact pressure and milling time on properties of Al-Al₂O₃ MMCs using neural networks, Metals and Materials International, 19 (2013) 519-526.
66. Ünal, R., Toz Metalurjisi Ders Notlar, Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları, Ankara 2013.
67. Randal, M.G., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşleme, Çeviri Süleyman Sarıtaş, Mehmet Türker ve Nuri Durlu, Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 2007.
68. Çalışkan, N.K., Powder metallurgy of high density W-Ni-Cu alloys, Master Thesis, Middle East Technical University, Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2006.
69. Kevenlik, O.F., Toz Metalurjisi Yöntemi ile SiC Takviyeli Al 2014 Esaslı Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2013.
70. Yiğit Y., İkincil faz içeren çelik kompozitin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve metalurjik karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2013.
71. Canakci, A. ve Varol, T., The Effect of Gradual Process Control Agent Technique on the Morphology of Al Powders Fabricated by High Energy Ball Milling, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara 2011, Bildiriler Kitabı, 701-710.
72. Yamanoğlu, R., Atomizasyon Teknikleri ile Toz Üretimi, Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011.
73. Aydın, M., Gaz Atomizasyon Yönetiminde Yeni bir Nozul Tasarımı ve Toz Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2005.
74. Sarı, D., Elektroliz Yöntemi İle Toz Üretiminde Anot Yüzey Alanı ve Bakır Sülfat Oranının Toz Boyutu ve Şekline Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2010.
75. Topuz, A., Sha, Döküm ve Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Üretilen AA2014-Al₄C₃ Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
76. Hafizpour, H.R., Simchi, A. ve Parvizi, S., Advanced Powder Technology, 21 (2010) 273-278.
77. Altay, M.C., Karbon Katkılı Bakır İçeren Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.

78. Yan, B. ve Li, G., Mg alloy matrix composite reinforced with TiNi continuous fiber prepared by ball-milling/hot-pressing, Composites: Part A, 36 (2005) 1590-1594.
79. Ünal, N., Kern, F., Öveçoğlu, M.L. ve Gadow, R., Influence of WC particles on the microstructural and mechanical properties of 3 mol% Y₂O₃ stabilized ZrO₂ matrix composites produced by hot pressing, Journal of the European Ceramic Society, 31 (2011) 2267-2275.
80. Melendez, M.I., Neubauer, E. ve Danninger, H.S., Consolidation of titanium matrix composites to maximum density by different hot pressing techniques, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 4466-4473.
81. Tavighi, K., Emamy, M. ve Emami, A.R., Effects of extrusion temperature on the microstructure and tensile properties of Al-16 wt% Al₄Sr metal matrix composite, Materials and Design, 46 (2013) 598-604.
82. Soltani, N., Jafari Nodooshanve, H.R., Bahrami, A., Pech-Canul, M.I., Liu, V. ve Wu, G., Effect of hot extrusion on wear properties of Al-15 wt.% Mg₂Si in situ metal matrix composites, Materials and Design, 53 (2014) 774-781.
83. Poudens, A., Bacroix, B. ve Bretheau, T., Influence of microstructures and particle concentrations on the development of extrusion textures in metal matrix composites, Materials Science and Engineering A, 196 (1995) 219-228.
84. Jiang, X., Galano, M. ve Audebert, F., Extrusion textures in Al, 6061 alloy and 6061/SiCp nanocomposites, Materials Characterization, 88 (2014) 111-118.
85. Theisen, W. ve Karlsohn M., Hot direct extrusion-A novel method to produce abrasion-resistant metal-matrix composites, Wear, 263 (2007) 896-904.
86. Engin, G., Mikro Gözenekli Titanyum Parçaların Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemiyle Üretilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
87. Loh, N.H., Tor, S.B. ve Khor K.A., Production of metal matrix composite part by powder injection molding, Journal of Materials Processing Technology, 108 (2001) 398-407.
88. Z.Y. Liu, D. Kent, G.B. Schaffer, Powder injection moulding of an Al-AlN metal matrix composite, Materials Science and Engineering A, 513-514 (2009) 352-356.
89. Arslan, M., Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi İle Paslanmaz Çelik (316L) Malzemenin Üretim ve Özelliklerinin İncelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2007.
90. Çakar, Y., Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Parçalarda İşlem, Yapı ve Özellik ilişkileri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
91. İ.Ekşi, A. ve Sarıtaş, S., Isostatic compaction behavior of metallic and ceramic powders, Romanian First International and Fourth National Conference on Powder Metallurgy, Ro PM'96, Romanya 1996, Bildiriler Kitabı, 75-80.

92. Ekşi, A. ve Sarıtaş, S., Comparison and investigation of mechanical properties of bronze and copper powders compressed by computer-controlled uniaxial die and cold isostatic pressing methods, 3th. International Powder Metallurgy Conference, Gazi Üniversitesi, Ankara 2002, Bildiriler Kitabı, 794-803.
93. Çelik, Y., Bor Karbür'ün Spark Plazma Yöntemiyle Sinterlenmesi, Çeşitli Sinterleme Katkılarının Sinterleme Ve Malzeme Özelliklerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
94. Ergün, N., Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Reaktif Sıcak Presleme ile Üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
95. Duttibi, C., Mekanik Alaşımlama ve Sinterleme süreçleriyle Al₁₂Si-XSiC ve Al₁₂Si-XB₄C (X = Ağırlıkça %5, %10 Ve %15) Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyon Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
96. Erdemir, F., Hızlı Katılaştırma Yöntemi ile Üretilmiş Nikel-Bakır (Monel 400) Alaşımı Tozların Presleme ve Sinterleme Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
97. Gülüzade, R., Alüminyum ve Çelik Testere Talaşlarından Sinterleme ile Üretilen Metal Matris Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Kırılma Davranışları, Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2011.
98. Guo, S., Chu, A., Wu, H., Cai, C. ve Qu, X., Effect of sintering processing on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of Ti-24Nb-4Zr-7.9Sn alloy for biomedical applications, Journal of Alloys and Compounds, 597 (2014) 211-216.
99. Tanaka, H., Yamamoto, A., Shimoyama, Jun-ichi, Ogino, H. ve Kishio K., Strongly connected ex situ MgB₂ polycrystalline bulks fabricated by solid-state self-sintering, Superconductor Science And Technology, 25 (2012) 1-7.
100. Apak, B., Spark Plazma Sinterleme Yöntemi İle Işık Geçirgenliğine Sahip Alümina Seramiklerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
101. Maneshian, M.H. ve Simchi, A., Solid state and liquid phase sintering of mechanically activated W-20 wt.% Cu powder mixture, Journal of Alloys and Compounds, 463 (2008) 153-159.
102. Suryanarayana, C., Mechanical Alloying and Milling, Progress in Materials Science, 46 (2001) 1-184.
103. Şelte, A., Mekanik Alaşımlama Yönteminin Sızdırma Tekniğiyle Üretilen WC-Cu Sisteminin Yoğunlaşma Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.

104. Yılmaz, T.A., AA 2014/Al₂O₃ Metal Matrisli Kompozitin Mekanik Alaşım Yöntemi ile Üretimi ve Yaşlandırılabilirlik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
105. Jeyasimman, D., Sivasankaran, S., Sivaprasad, K., Narayanasamy, R. ve Kambali, R.S., An investigation of the synthesis, consolidation and mechanical behaviour of Al 6061 nanocomposites reinforced by TiC via mechanical alloying, Materials & Design, 57 (2014) 394-404.
106. Varol, T. ve Canakci, A., Synthesis and characterization of nanocrystalline Al 2024-B₄C composite powders by mechanical alloying, Philosophical Magazine Letters, 93 (2013) 339-345.
107. Xueran L., Yongbing L., Xu R., Jian A., ve Zhanyi C., Fabrication of supersaturated solid solution of carbon in copper by mechanical alloying, Materials Characterization, 58 (2007) 504-508.
108. Varol, T. ve Canakci, A., Effect of particle size and ratio of B₄C reinforcement on properties and morphology of nanocrystalline Al2024-B₄C composite powders, Powder Technology, 246 (2013) 462-472.
109. Canakci, A. ve Varol, T., Structural Evolution and Characterization of Nanostructured Al-Al₂O₃ Composite Fabricated by Mechanical Alloying Method, Romanian Journal of Materials, 43 (2013) 312-319.
110. Kermani, M., Razavi, M., Rahimipour, M.R. ve Zakeri, M., The effect of mechanical alloying on microstructure and mechanical properties of MoSi₂ prepared by spark plasma sintering, Journal of Alloys and Compounds, 593 (2014) 242-249
111. Peştreli, D., Mekanik Alaşım Yönteminin Wc-Co Sert Metal Sisteminin Sinterleme Davranışı Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
112. Ward, T.S., Chen W., Schoenitz, M., Dave, R.N. ve Dreizin, E.L., A study of mechanical alloying processes using reactive milling and discrete element modeling, Acta Materialia, 53 (2005) 2909-2918.
113. Canakci, A., Erdemir, F., Varol, T. ve Patır, A., Determining the effect of process parameters on particle size in mechanical milling using the Taguchi method: Measurement and analysis, Measurement, 46 (2013) 3532-3540.
114. Söyler, A.U., Mekanik Alaşım Yöntemleri İle Üretilmiş Al-Fe Tabanlı Sic Ve Y₂O₃ Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
115. Yuping, D., Yahong, Z., Tongmin, W., Shuchao, G., Xin, L. ve Xingjun, L., Evolution Study of Microstructure and Electromagnetic Behaviors of Fe-Co-Ni Alloy with Mechanical Alloying, Materials Science and Engineering B, 185 (2014) 86-93.
116. Canakci, A., Varol, T., Özşahin, S., Analysis of the effect of a new process control agent technique on the mechanical milling process using aneural network model: Measurement and modeling, Measurement, 46 (2013) 1818-1827.

117. Ertok, Ş., Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemi ile Üretimi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
118. Canakci, A., Erdemir, F., Varol, T., Ozkaya, S., Formation of Fe-Al intermetallic coating on low-carbon steel by a novel mechanical alloying technique, Powder Technology, 247 (2013) 24-29.
119. Lu, L. ve Lai, M.O. Mechanical Alloying, Kluwer Academic Publishers, 1998.
120. El-Eskandarany, M.S., Mechanical Alloying for Fabrication of Advanced Engineering Materials, Noyes Publications / William Andrew Publishing, 2001.
121. Soni, P.R., Mechanical Alloying: Fundamentals and Applications, Cambridge International Science Publishing, 2001.
122. Zadra, M., Mechanical alloying of titanium, Materials Science & Engineering A, 583 (2013) 105-113.
123. Başoğlu, M., Mekanik Alaşım Yönteminin YBa₂Cu₃O_{7-x} Superiletkenin Yapısı Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2007.
124. Canakci, A. ve Varol, T., The effect of Gradual Process Control Agent Technique on the Morphology of Al powders Fabricated by High Energy Ball Milling, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara 2011, Bildiriler Kitabı, 701-710.
125. Çelik, Ş., Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilen Titanyum Bazlı Kompozit Malzemelerin Ögütülebilirliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2004.
126. Xiao, Z., Fang, M., Li, Z., Xiao, T. ve Lei, Q., Structure and Properties of Ductile CuAlMn Shape Memory Alloy Synthesized By Mechanical Alloying And Powder Metallurgy, Materials & Design, 58 (2014) 451-456.
127. Gök, M.G. ve Kaplan, M., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Elektrik Kontak Malzemesi Üretimi ve Kontak Performansının Araştırılması, 6th International Advanced Technologies Symposium, Fırat Üniversitesi, Elazığ 2011, Bildiriler Kitabı, 294-298.
128. Güler, Ö. ve Evin, E., The investigation of contact performance of oxide reinforced copper composite via mechanical alloying, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009) 1286-1290.
129. Song, J., Koch, C. ve Wang, L., Correlation between Wear Resistance and Lifetime of Electrical Contacts, Advances in Tribology, 893145 (2012) 1-9.
130. Buggy, M. ve Conlon, C., Material selection in the design of electrical connectors, Journal of Materials Processing Technology, 153-154 (2004) 213-218.
131. Güler, Ö., Oksit Takviyel Bakır Kompozitin Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilmesi ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.

132. Ürkmez B, Mucize malzeme-Grafen, Açık bilim dergisi, Aralık 2012
133. Marinho, B., Ghislandi. M., Tkalya, E., Koning, C.E. ve Gijbertus, de With., Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder, Powder Technology, 221 (2012) 351–358.
134. Fan, Y., Wang, L., Li, J., Li, J., Sun, S., Chen, F., Chen, L., Jiang, W., Preparation and electrical properties of graphene nanosheet/ Al_2O_3 composites, Carbon, 48 (2010) 1743-1749.
135. Küçükyıldırım, B.O. ve Eker, A.A., Karbon nanotüpler, sentezleme yöntemleri ve kullanım alanları, TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 630, s. 34-44.
136. Copper Development Association, Copper in Electrical Contacts, Technical Note 23 (1980) 1-21.
137. Holm, R., “Electric Contacts: theory and application,” Springer, Berlin / Heidelberg / New York, 2000
138. Mützel, T., Braumann, P. ve Niederreuther, R., Temperature Rise Behavior of Ag/SnO₂ Contact Materials for Contactor Applications, The Fifty-Fifth IEEE Holm Conference On Electrical Contacts, 2009, Proceeding Book, 200-205
139. Bıyık, S., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Gümüş-Bor Oksit Esaslı Kontak Malzemesi Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2008.
140. Pons, F., Electrical Contact Material Arc Erosion: Experiments And Modeling Towards The Design of an Agcdo Substitute, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2010.
141. Xu, C., Yi, D., Wu, C., Liu, H. ve Li, W., Microstructures and properties of silver-based contact material fabricated by hot extrusion of internal oxidized Ag-Sn-Sb alloy powders, Materials Science and Engineering A, 538 (2012) 202-209.
142. Li, Q., Jie, W., Fu, L., Zhang, X., Wang, X., Bai, X. ve Zha, G., Investigation on the electrical properties of metal-Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te contacts, Materials Science and Engineering B, 135 (2006) 15-19.
143. Uzun, H., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Gümüş-Kadmiyum Oksit Esaslı Kontak Malzemesi Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 1996.
144. Yang, X., Liang, S., Wang, X., Xiao, P. ve Fan, Z., Effect of WC and CeO₂ on microstructure and properties of W-Cu electrical contact material, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 28 (2010) 305-311.
145. Moustafa, S.F., El-Badry, S.A., Sanad, A.M. ve Kieback, B., Friction and wear of copper-graphite composites made with Cu-coated and uncoated graphite powders, Wear, 253 (2002) 699-710.

146. Rajkumar, K. ve Aravindan, S., Microwave sintering of copper–graphite composites, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009) 5601-5605.
147. Rajkumar, K. ve Aravindan S., Tribological behavior of microwave processed copper-nanographite composites, Tribology International, 57 (2013) 282-296.
148. Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z. ve Zhang, D., Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites, Scripta Materialia, 66 (2012) 594-597.
149. Chen, L.Y., Konishi, H., Fehrenbacher, A., Ma, C., Xu, J.Q., Choi, H., Xu, H.F. ve Frank, E., Pfefferkorn and Xiao-Chun Li, Novel nanoprocessing route for bulk graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites, Scripta Materialia, 67 (2012) 29-32.
150. Wang, J., Feng, Y., Li, S. ve Lin, S., Influence of graphite content on sliding wear characteristics of CNTs-Ag-G electrical contact materials, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19 (2009) 113-118.
151. Uddin, S.M., Mahmud, T., Wolf, C., Glanz, C., Kolaric, I., Volkmer, C., Höller, H., Wienecke, U., Roth, S. ve Fecht, H.J., Effect of size and shape of metal particles to improve hardness and electrical properties of carbon nanotube reinforced copper and copper alloy composites, Composites Science and Technology, 70 (2010) 2253-2257.
152. Fındık, F. ve Uzun, H., Microstructure, hardness and electrical properties of silver-based refractory contact materials, Materials and Design, 24 (2003) 489-492.
153. 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 (2008) 565-570.
154. Mula, S., Sahani, P., Pratihari, S.K., Mal, S. ve Koch, C.C., Mechanical properties and electrical conductivity of Cu-Cr and Cu-Cr-4% SiC nanocomposites for thermoelectric applications, Materials Science and Engineering A, 528 (2011) 4348-4356.
155. Yang, X., Liang, S., Wang, X., Xiao, P. ve Fan, Z., Effect of WC and CeO₂ on microstructure and properties of W-Cu electrical contact material, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 28 (2010) 305-311.
156. 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 (2007) 50-57.
157. Jabur A.S., Effect of powder metallurgy conditions on the properties of porous bronze, Powder Technology, 237 (2013) 477-483.
158. 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.

159. 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.
160. Boland, C.D., Hexemer, R.L., Donaldson, I.W. ve Bishop, D.P., Industrial processing of anovel Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy, Materials Science & Engineering A, 559 (2013) 902-908.
161. 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.
162. Guel, I.E., Gallardo, C.C., Porras, C.L. ve Sanchez, R.M., Effect of process parameters on micro and macro-properties of an Al-based nanocomposite prepared by means of mechanical milling, Journal of Alloys and Compounds 586 (2014) 85-89.
163. Rubio, W.M., Paulino, G.H. ve Silva, E.C.N., Analysis, manufacture and characterization of Ni/Cu functionally graded structures, Materials and Design, 41 (2012) 255-265.
164. Canakci, A., Varol, T., Gokhan, İ.Z. ve Özkaya, S., Production of Al- B₄C functionally graded material by powder metallurgy method, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, 49-56, 2011.
165. Cho, D.G., Yang, S.K., Yun, J.C., Kim, H.S., Lee, J.S. ve Lee, C.S., Effect of sintering profile on densification of nano-sized Ni/Al₂O₃ composite, Composites: Part B, 45 (2013) 159-164.
166. Kieback, B., Neubrand, A. ve Riedel H., Processing techniques for functionally graded materials, Materials Science and Engineering A, 362 (2003) 81-105.
167. Aminzare, M., Eskandari, A., Khalife-Soltani, S.A., Tofighi, G., Ehsani, N. ve Amoozegar, Z., Reaction-bond sintering of C/SiC functionally graded nanostructured materials (FGNMs), Materials Science and Engineering A, 565 (2013) 445-449.
168. Hong, S.M., Park, J.J., Park, E.K., Kim, K.Y., Lee, J.G., Lee, M.K., Rhee, C.K. ve Lee, J.K., Fabrication of titanium carbide nano-powders by a very high speed planetary ball milling with a help of process control agents, Powder Technology, 274 (2015) 393-401.
169. Gheisari, K. ve Javadpour, S., The effect of process control agent on the structure and magnetic properties of nanocrystalline mechanically alloyed Fe-45% Ni powders, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 343 (2013) 133-137.
170. Khayati, G.Z. ve Janghorban, K., An investigation on the application of process control agents in the preparation and consolidation behavior of nanocrystalline silver by mechanochemical method, Advanced Powder Technology 23 (2012) 808-813.
171. Haiping, Z., Lianxi, H., Hongfei, S. ve Xianjue, C., Synthesis of nanocrystalline Mg-based Mg-Ti composite powders by mechanical milling, Materials Characterization, 106 (2015) 44-51.

172. Raghavendra, K.G., Dasgupta, A., Bhaskar, P., Jayasankar, K., Athreya, C.N., Panda, P., Saroja, S., Sarma, V.S. ve Ramaseshan, R., Synthesis and characterization of Fe-15 wt.% ZrO₂ nanocomposite powders by mechanical milling, Powder Technology, 287 (2016) 190-200.
173. Bustamante, R.P., Bustamante, F.P., Guel, I.E., Jimenez, L.L., Yoshida, M.M. ve Sanchez, R.M., Effect of milling time and CNT concentration on hardness of CNT/Al₂₀₂₄ composites produced by mechanical alloying, Materials Characterization, 75 (2013) 13-19.
174. Basariya, M.R., Srivastava V.C. ve Mukhopadhyay N.K., Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites produced by ball milling, Materials and Design, 64 (2014) 542-549.
175. Hao, X.N., Zhang, H.P., Zheng, R.X., Zhang, Y.T., Ameyama, K. ve Ma, C.L., Effect of mechanical alloying time and rotation speed on evolution of CNTs/Al-2024 composite powders, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24 (2014) 2380-2386.
176. Mendoza-Duarte, J.M., Guel I.E., Gallardo, C.C. ve Sanchez, R.M., Study of Al composites prepared by high-energy ball milling; Effect of processing conditions, Journal of Alloys and Compounds, 643 (2015) 172-177.
177. Rikhtegar, F., Shabestari, S.G. ve Saghafian, H., The homogenizing of carbon nanotube dispersion in aluminium matrix nanocomposite using flake powder metallurgy and ball milling methods, Powder Technology, 280 (2015) 26-34.
178. Munir, K.S., Li, Y., Liang, D., Qian, M., Xu, W. ve Wen, C., Effect of dispersion method on the deterioration, interfacial interactions and re-agglomeration of carbon nanotubes in titanium metal matrix composites, Materials and Design, 88 (2015) 138-148.
179. Mousavian, R.T., R. Khosroshahi, A., Yazdani, S., Brabazon, D., ve Boostani, A.F., Fabrication of aluminum matrix composites reinforced with nano- to micrometer-sized SiC particles, Materials and Design, 89 (2016) 58-70.
180. Rashad, M., Pan, F., Zhang, J. ve Asif, M., Use of high energy ball milling to study the role of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes reinforced magnesium alloy, Journal of Alloys and Compounds, 646 (2015) 223-232.
181. Rashad, M., Pan, F., Tang, A. ve Asif, M., Effect of Graphene Nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method, Progress in Natural Science: Materials International, 24 (2014) 101-108.
182. Chen, F., Ying, J., Wang, Y., Du, S., Liu, Z., Huang, Q., Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites, Carbon, 96 (2016) 836-842.
183. Shukla, A.K., Nayan, N., Murty, S.V.S.N., Mondal, K., Sharma, S.C., George, K.M. ve Bakshi, S.R., Processing copper-carbon nanotube composite powders by high energy milling, Materials Characterization, 84 (2013) 58-66.

184. Liu, Z.Y., Xiao, B.L., Wang, W.G. ve Ma, Z.Y., Tensile Strength and Electrical Conductivity of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites Fabricated by Powder Metallurgy Combined with Friction Stir Processing, Journal of Materials Science and Technology, 30 (2014) 649-655.
185. Varol, T. ve Canakci, V., Microstructure, Electrical Conductivity and Hardness of Multilayer Graphene/Copper Nanocomposites Synthesized by Flake Powder Metallurgy, Metals and Materials International, 21 (2015) 704-712.
186. Tjong, S.C., Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets, Materials Science and Engineering R, 74 (2013) 281-350.
187. Varol, T. ve Canakci, V., The effect of type and ratio of reinforcement on the synthesis and characterization Cu-based nanocomposites by flake powder metallurgy, Journal of Alloys and Compounds 649 (2015) 1066-1074.
188. Varol, T. ve Canakci, V., Effect of the CNT Content on Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Cu-Based Electrical Contact Materials Produced by Flake Powder Metallurgy, Arabian Journal for Science and Engineering 40 (2015) 2711-2720.
189. Moghadam, A.D., Omrani, E., Menezes, P.L. ve Rohatgi, P.K., Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene-A review, Composites Part B, 77 (2015) 402-420.
190. Bastwros, M.M.H., Esawi, A.M.K. ve Wifi, A., Friction and wear behavior of Al-CNT composites, Wear, 307 (2013) 164-173.
191. Das, A. ve Harimkar, S.P., Effect of Graphene Nanoplate and Silicon Carbide Nanoparticle Reinforcement on Mechanical and Tribological Properties of Spark Plasma Sintered Magnesium Matrix Composites, Journal of Materials Science and Technology, 30 (2014) 1059-1070.
192. Wei, X., Rui, H., Jin-shan, L. ve Heng-zhi, F., Effect of electrical current on tribological property of Cu matrix composite reinforced by carbon nanotubes, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21 (2011) 2237-2241.
193. Bustamante, R.P., Escobedo, J.L.B., Lobato, J.J., Guel, I.E., Yoshida, M.M., Jimenez, L.L. ve Sanchez, R.M., Wear behavior in Al2024-CNTs composites synthesized by mechanical alloying, Wear, 292-293 (2012) 169-175.
194. Wu, C., Yi, D., Weng, W., Li, S., Zhou, J. ve Zheng, F., Arc erosion behavior of Ag/Ni electrical contact materials, Materials and Design, 85 (2015) 511-519.
195. Wang, X., Yang, H., Chen, M., Zou, J. ve Liang, S., Fabrication and arc erosion behaviors of AgTiB2 contact materials, Powder Technology, 256 (2014) 20-24.

196. Ray, N., Kempf, B., Mützel, T., Froyen, L., Vanmeensel, K. ve Vleugels, J., Effect of WC particle size and Ag volume fraction on electrical contact resistance and thermal conductivity of Ag-WC contact materials, Materials and Design 85 (2015) 412-422.

ÖZGEÇMİŞ

Temel VAROL 1980 yılında Trabzon'da doğdu. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2003-2006 yılları arasında çeşitli firmalarda doğal gaz projelendirme ve imalat mühendisi olarak çalıştı. 2006 yılında Tokat 48. Piyade eğitim alayında kısa dönem asker olarak askerlik hizmetini tamamladı. 2006-2009 yılları arasında ticari faaliyetler yürüttü. 2010 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve aynı yıl K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü 50/d kadrosuna Araştırma Görevlisi olarak atandı ve halen bu görevini sürdürmektedir. Evli ve 2 çocuk babasıdır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

Doktora Tezi Kapsamında Yapılan Yayınlar (SCI-Expanded)

Varol, T. ve Canakci, A., The effect of type and ratio of reinforcement on the synthesis and characterization Cu-based nanocomposites by flake powder metallurgy, Journal of Alloys and Compounds, 649 (2015) 1066-1074.

Varol, T. ve Canakci, A., Microstructure, Electrical Conductivity and Hardness of Multilayer Graphene/ Copper Nanocomposites Synthesized by Flake Powder Metallurgy, Metals and Materials International, 21(2015) 704-712.

Varol, T. ve Canakci, A., Effect of the CNT Content on Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Cu-Based Electrical Contact Materials Produced by Flake Powder Metallurgy, Arabian Journal for Science and Engineering, 40 (2015) 2711-2720.