

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TiO₂ TAKVİYESİ İÇEREN AgSnO₂ ESASLI ELEKTRİK KONTAK
MALZEMELERİNİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ARK-EROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Makina Müh. Serkan BIYIK

TEMMUZ 2015

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

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

Serkan BIYIK Tarafından Hazırlanan

TiO₂ TAKVIYESİ İÇEREN AgSnO₂ ESASLI ELEKTRİK KONTAK
MALZEMELERİNİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ARK-EROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09/06/2015 gün ve 1605 sayılı kararıyla
oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

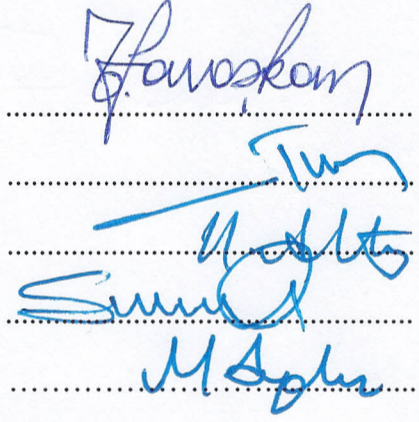
Başkan : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Üye : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Üye : Prof. Dr. Hikmet ALTUN

Üye : Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK

Üye : Doç. Dr. Murat AYDIN


.....
.....
.....
.....
.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kontakt teknolojisi, gün geçtikçe artan enerji odaklı taleplere karşılık verebilme adına sürekli olarak yenilenmektedir. Şüphesiz bu yenilenme üretimsel ve performansa dayalı birtakım deneylerle gerçekleştirilebilmektedir. Toz metalurjisi ve mekanik alaşımlama yöntemlerinde kaydedilen üretimsel odaklı gelişmelere paralel olarak elektrik kontak malzemelerinin aşınma performanslarında da iyileşmeler gözlenmektedir. Bu alan yeni malzemelerin bulunmasına veya mevcut malzemelerin geliştirilmesine son derece açık olmasına karşın ülkemizde elektrik kontak malzemeleri ile ilgili bu zamana kadar yapılmış olan çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu yüzden bu tez çalışmasında tasarım ve imalatı yapılmış olan ark-erozyon deney düzeneğini kullanarak kompozit kontak malzemelerinin endüktif yükler altında gerçek çalışma koşullarına yakın olarak test edilmelerini sağlayıp, ülkemizde görülen bu açığı kapatabilme amaçlanmıştır.

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam sayın Doç. Dr. Murat AYDIN'a müteşekkirim.

Tez izleme komitesi toplantılarındaki değerli katkı ve değerlendirmelerinden dolayı tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN ve Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK'e de ayrıca teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmalar esnasındaki yardımlarından dolayı sayın Prof. Dr. Ekrem YANMAZ, Doç. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU ve Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın yazımı ve düzenlenmesi aşamasında beni fikirleri ile yönlendiren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Adem BAYRAM'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın gerçekleştirilmesi için vermiş oldukları maddi destekten dolayı KTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek hep yanımda olan saygıdeğer babam sayın Prof. Dr. Cemal BIYIK, annem Nurşen BIYIK ve ablam Öğr. Gör. Şule BIYIK BAYRAM'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Hazırlamış olduğum bu tezin bundan sonra elektrik kontak malzemeleri ile ilgili yapılacak olan diğer çalışmalara yön gösterici olması dileklerimle...

Serkan BIYIK

Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “TiO₂ Takviyesi İçeren AgSnO₂ Esaslı Elektrik Kontak Malzemelerinin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Ark-Erozyon Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Murat AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/07/2015

Serkan BIYIK

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| ÖNSÖZ..... | III |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ..... | IV |
| İÇİNDEKİLER..... | V |
| ÖZET..... | VIII |
| SUMMARY..... | IX |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | X |
| TABLolar DİZİNİ..... | XV |
| SEMBOLLER DİZİNİ..... | XVI |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 1 |
| 1.1. Giriş..... | 1 |
| 1.2. Kontak Sistemleri..... | 4 |
| 1.2.1. Elektrik Kontakları..... | 4 |
| 1.2.2. Elektrik Kontak Malzemeleri..... | 6 |
| 1.3. Kontak Malzemelerinin Üretim Yöntemleri..... | 9 |
| 1.4. Kontak Malzemelerinin Aşınma Özellikleri..... | 11 |
| 1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı..... | 13 |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR..... | 15 |
| 2.1. Kompozit Toz Üretimi..... | 16 |
| 2.2. Mekanik Alaşım Yöntemi ve Üretim Parametreleri..... | 17 |
| 2.2.1. Başlangıç Toz Boyutları ve Kimyasal Bileşimleri..... | 17 |
| 2.2.2. Öğütücü Tipi..... | 18 |
| 2.2.3. Öğütme Kabının Malzemesi ve Bilyeler..... | 19 |
| 2.2.4. Yağlayıcı (PCA) Oranı..... | 21 |
| 2.2.5. Öğütme Hızı..... | 22 |
| 2.2.6. Bilye-Toz-Ağırlık Oranı (BPR)..... | 22 |
| 2.2.7. Öğütme Süresi..... | 23 |
| 2.3. Toz Metalurjisi Yöntemi ve Üretim Parametreleri..... | 24 |
| 2.3.1. Sıkıştırma Basıncı ve Bekleme Süresi..... | 24 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 2.3.2. | Sinterleme Atmosferi..... | 25 |
| 2.3.3. | Sinterleme Sıcaklığı ve Süresi..... | 25 |
| 2.4. | Üretilen Kompozitlerin Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi..... | 26 |
| 2.5. | Üretilen Kompozitlerin Ark-Erozyon Performansının İncelenmesi..... | 27 |
| 2.5.1. | Ark-Erozyon Deney Düzenegi..... | 28 |
| 2.5.2. | Ark-Erozyonuna Maruz Kalan Yüzeylerin İncelenmesi..... | 31 |
| 3. | BULGULAR..... | 32 |
| 3.1. | Başlangıç Tozları ve Karakterizasyonu..... | 32 |
| 3.1.1. | Toz Morfolojisi..... | 32 |
| 3.1.2. | MA Deneylerindeki İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu..... | 34 |
| 3.1.2.1. | PCA Miktarı..... | 36 |
| 3.1.2.2. | Öğütme Hızı..... | 41 |
| 3.1.2.3. | Bilye-Toz-Ağırlık Oranı (BPR)..... | 45 |
| 3.1.3. | Öğütme Süresi ile Ag8SnO ₂ -TiO ₂ Kompozit Toz Morfolojisinin Değişimi..... | 48 |
| 3.1.4. | Matris-Takviye Etkileşimi..... | 55 |
| 3.1.5. | Öğütme Süresi-Toz Boyutu İlişkisi..... | 58 |
| 3.2. | Üretilen Ham Numunelerin ve Kompozitlerin İÇyapıları..... | 60 |
| 3.3. | Üretilen Kompozitlerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri..... | 68 |
| 3.4. | Ark-Erozyon Deneyi Sonucunda Oluşan Aşınma Yüzeyleri..... | 69 |
| 3.5. | Ark-Erozyon Deneylerinden Elde Edilen Bulgular..... | 84 |
| 3.6. | Optimum Aşınma Performansı Gösteren Kontakt Malzemesinin Geliştirilmesi...91 | |
| 3.6.1. | Sinterleme Süresinin Mikroyapıya Etkileri..... | 92 |
| 3.6.2. | Sinterleme Süresinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisi..... | 94 |
| 3.6.3. | Geliştirilen Malzemenin Ark-Erozyon Deneylerinden Elde Edilen Veriler..... | 95 |
| 3.7. | Ark-Erozyonu Etkisi Altında Kalan Bölgelerin EDS Analizleri..... | 99 |
| 3.7.1. | EDS Nokta Analizleri..... | 100 |
| 3.7.2. | EDS Çizgi Analizleri..... | 103 |
| 3.7.3. | EDS Haritalama Analizleri..... | 107 |
| 4. | İRDELEME..... | 111 |
| 5. | SONUÇLAR..... | 118 |
| 6. | ÖNERİLER..... | 120 |

| | |
|-------------------|-----|
| 7. KAYNAKLAR..... | 121 |
| ÖZGEÇMİŞ | |

Doktora Tezi

ÖZET

TiO₂ TAKVİYESİ İÇEREN AgSnO₂ ESASLI ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİNİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE ARK-EROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Serkan BIYIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Murat AYDIN
2015, 129 sayfa

Bu çalışmada, farklı oranlarda TiO₂ takviyesi içeren AgSnO₂ esaslı kompozit elektrik kontak malzemeleri mekanik alaşımlama (MA) ve toz metalurjisi (TM) yöntemleri kullanılarak üretildi. Öncelikle başlangıç tozları belirlenen oranlarda karıştırılarak gezegen hareketli bilyeli öğütücüde homojen karışım sağlanıncaya kadar öğütüldü. Bu şekilde elde edilen kompozit tozlar geleneksel TM yöntemi ile kalıpta presleme ve vakum ortamında sinterleme işlemlerine tabi tutularak kompozitler üretildi. Söz konusu kompozitler bu çalışma için özel olarak tasarlanan ve imal edilen ark-erozyon deney düzeneğinde endüktif yükler altında aşınma deneylerine tabi tutuldu ve artan TiO₂ takviyesi ile kontak yüzeylerindeki bozunumlar ve kütle kayıpları karşılaştırıldı. Başlangıç ve kompozit tozlarının, ham kompaktların, kompozitlerin ve aşınma deneyleri sonucunda oluşan yüzey bozunumlarının karakterize edilmesinde taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (EDS) yöntemleri kullanıldı. % 1'lik TiO₂ takviyesinin boyut küçülmesine belirgin bir etkisi olmadığı görülürken özellikle % 3'ün üzerindeki TiO₂ takviyesinin öğütme sonrası elde edilen kompozit toz boyutunu düşürdüğü gözlemlendi. Artan TiO₂ takviyesiyle kompozitlerin sertlik değerlerinin arttığı belirlendi. Ayrıca gözenek miktarının % 1'lik TiO₂ takviyesine kadar azaldığı, % 3'ün üzerinde ise arttığı tespit edildi. Ağırlıkça % 5 oranına kadar artan TiO₂ takviyesi ile ark-erozyonu sonucunda meydana gelen kütle kayıpları kademeli olarak azalma gösterdi. Ark-erozyon deneyleri sonrası yapılan yüzey incelemeleri ve ölçülen kütle kayıplarının birlikte değerlendirilmesi sonucunda optimum ark-erozyon performansı gösteren bileşim % 5 TiO₂ takviyeli kompozit olarak belirlendi. Optimum ark-erozyon performansı sergileyen kontak malzemesi, fiziksel, mekanik ve aşınma özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla farklı sürelerde sinterlemeye tabi tutuldu ve optimum sinterleme süresi 5 saat olarak belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Ark-erozyon deney düzeneği, Elektrik kontak malzemeleri, Mekanik alaşımlama, Metal matrisli kompozitler, TiO₂, Toz metalurjisi

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF ARC-EROSION BEHAVIOR OF TiO₂ REINFORCED AgSnO₂ BASED ELECTRICAL CONTACT MATERIALS PRODUCED BY POWDER METALLURGY

Serkan BIYIK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Murat AYDIN
2015, 129 Pages

In this study, AgSnO₂ based composite electrical contact materials doped with various amounts of TiO₂ reinforcement were produced by powder metallurgy and mechanical alloying techniques. First of all, starting powders were mixed to prepare powder mixtures having different chemical compositions. Powder mixtures were then milled in a high-energy planetary-type ball mill to achieve homogeneously mixed composite powders, followed by pressing in a closed die to obtain green compacts with a cylindrical shape, and sintering under vacuum to obtain composites. Composites were subjected to electrical wear tests under inductive loads to investigate the arc-erosion performance of electrical contacts in a new life-test rig designed and built for this work. Surface deteriorations and mass losses of electrical contacts were also evaluated as a function of increasing TiO₂ reinforcement. Characterization of the starting and composite powders, green compacts, composites and arc-originated surface deteriorations was carried out using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The degree of particle size reduction was found to be higher in compositions having 3 to 7 wt% TiO₂ than that in 1 % TiO₂. Hardness of the composites was increased with increasing TiO₂ content. In addition, porosity ratio was found to decrease up to 1 % TiO₂ and to increase from 3 to 7 % TiO₂. Comparison between surface morphologies and mass losses of arc-eroded specimens reveals that the Ag₈SnO₂-5TiO₂ composite exhibits optimum arc-erosion performance among all compositions. The Ag₈SnO₂-5TiO₂ composite was also subjected to several sintering tests thereafter to improve its physical, mechanical and wear properties. Optimum sintering time was determined as 5 h.

Key Words: Arc-erosion test rig, Electrical contact materials, Mechanical alloying, Metal matrix composites, Powder metallurgy, TiO₂

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Şekil 1. Akım daralması ve gerçek temas alanının şematik gösterimi..... | 6 |
| Şekil 2. Deneysel çalışma aşamalarını gösteren iş akış şeması..... | 16 |
| Şekil 3. Gezegen hareketli bilyeli öğütücü..... | 19 |
| Şekil 4. Öğütücü kap ve bilyelerin bir arada görünümü..... | 20 |
| Şekil 5. Kompozit tozların preslenmesinde kullanılan kalıbın görünümü..... | 24 |
| Şekil 6. Archimedes yönteminde kullanılan terazi..... | 26 |
| Şekil 7. Archimedes yönteminde kullanılan ekipmanın detaylı görünümü..... | 26 |
| Şekil 8. Sabit ve hareketli kontakların kontaktör üzerindeki görünümü..... | 27 |
| Şekil 9. Kontakların aşınma performansının incelendiği ark-erozyon deney düzeneği...29 | 29 |
| Şekil 10. Ark-erozyon deney düzeneğinin dış görünümü..... | 29 |
| Şekil 11. Endüktif yüklerin kaynağı olan transformatörler ile devre kesiciler ve soğutma sisteminin görünümü..... | 30 |
| Şekil 12. Başlangıç Ag tozunun parçacık boyut dağılımı..... | 32 |
| Şekil 13. 25 µm elek altında kalan Ag toz parçacıklarının görünümü..... | 33 |
| Şekil 14. Elek analizi sonrası Ag tozunun parçacık boyut dağılımı..... | 33 |
| Şekil 15. Başlangıç SnO ₂ tozunun SEM görüntüsü..... | 34 |
| Şekil 16. Başlangıç TiO ₂ tozunun SEM görüntüsü..... | 35 |
| Şekil 17. Başlangıç Cu tozunun SEM görüntüsü..... | 35 |
| Şekil 18. Başlangıç W tozunun SEM görüntüsü..... | 36 |
| Şekil 19. Başlangıç Cu tozunun parçacık boyut dağılımı..... | 36 |
| Şekil 20. Cu ₂₅ W toz boyutunun PCA oranı ve öğütme süresinin fonksiyonu olarak değişimi..... | 37 |
| Şekil 21. % 2 ve % 3 PCA katkıları ile öğütülen Cu ₂₅ W toz karışımının (a-b) 0,5, (c-d) 2, (e-f) 3 ve (g-h) 4 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri..... | 39 |
| Şekil 22. 16 ve 25 saatlik öğütme süreleri sonunda (a-b) % 1, (c-d) % 2 ve (e-f) % 3 PCA katkısı ile sentezlenen Cu ₂₅ W kompozitlerinin morfolojik görünüşleri..... | 40 |
| Şekil 23. Cu ₂₅ W toz boyutunun öğütme hızı ve öğütme süresinin fonksiyonu olarak değişimi..... | 42 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Şekil 24. | 200, 300 ve 400 d/dk'lık farklı öğütme hızlarında öğütme işlemine tabi tutulan Cu ₂₅ W toz karışımlarının (a-b-c) 0,5, (d-e-f) 2, (g-h-i) 4 ve (j-k-l) 7 saat sonundaki morfolojik görünüşleri..... | 43 |
| Şekil 25. | 10, 16 ve 25 saatlik süreler sonunda (a-b-c) 200, (d-e-f) 300 ve (g-h-i) 400 d/dk'lık farklı öğütme hızlarında öğütme işlemine tabi tutulan Cu ₂₅ W toz karışımlarının morfolojik görünüşleri..... | 44 |
| Şekil 26. | Cu ₂₅ W toz boyutunun BPR ve öğütme süresinin fonksiyonu olarak değişimi.. | 46 |
| Şekil 27. | 5:1, 10:1 ve 20:1'lik farklı BPR değerlerinde öğütme işlemine tabi tutulan Cu ₂₅ W toz karışımlarının (a-b-c) 0,5, (d-e-f) 2, (g-h-i) 4 ve (j-k-l) 7 saat sonundaki morfolojik görünüşleri | 47 |
| Şekil 28. | 5:1, 10:1 ve 20:1'lik farklı BPR değerlerinde öğütme işlemine tabi tutulan Cu ₂₅ W toz karışımlarının (a-b-c) 16 ve (d-e-f) 25 saat sonundaki morfolojik görünüşleri..... | 48 |
| Şekil 29. | Sentezlenen Ag ₈ SnO ₂ kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri..... | 50 |
| Şekil 30. | Sentezlenen % 1 TiO ₂ takviyeli Ag ₈ SnO ₂ kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri..... | 51 |
| Şekil 31. | Sentezlenen % 3 TiO ₂ takviyeli Ag ₈ SnO ₂ kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri..... | 52 |
| Şekil 32. | Sentezlenen % 5 TiO ₂ takviyeli Ag ₈ SnO ₂ kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri..... | 53 |
| Şekil 33. | Sentezlenen % 7 TiO ₂ takviyeli Ag ₈ SnO ₂ kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri..... | 54 |
| Şekil 34. | Ag ₈ SnO ₂ ham kompaktının EDS analizi sonucu; a) haritalama yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki dağılımı..... | 55 |
| Şekil 35. | Ag ₈ SnO ₂ ham kompaktındaki element dağılımlarının ayrı ayrı görünümü; a) Gümüş, b) Kalay, c) Oksijen..... | 56 |
| Şekil 36. | % 1 TiO ₂ takviyeli malzemenin EDS analizi sonucu; a) haritalama yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki dağılımı..... | 57 |
| Şekil 37. | % 1 TiO ₂ takviyeli malzemedeki element dağılımlarının ayrı ayrı görünümü; a) Gümüş, b) Kalay, c) Titanyum..... | 58 |
| Şekil 38. | Kompozit toz boyutunun öğütme süresine göre değişimini gösteren eğriler..... | 59 |
| Şekil 39. | Ag ₈ SnO ₂ ham kompaktının görünümü..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Şekil 40. Ag ₈ SnO ₂ ham kompaktının yandan görünümü..... | 61 |
| Şekil 41. Ag ₈ SnO ₂ ham kompaktının 700°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı..... | 62 |
| Şekil 42. Ag ₈ SnO ₂ ham kompaktının 800°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı..... | 62 |
| Şekil 43. Ag ₈ SnO ₂ ham kompaktının 900°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı..... | 63 |
| Şekil 44. % 1 TiO ₂ takviyeli ham kompaktın görünümü..... | 64 |
| Şekil 45. % 1 TiO ₂ takviyeli ham kompaktın 900°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı..... | 64 |
| Şekil 46. % 3 TiO ₂ takviyeli ham kompaktın görünümü..... | 65 |
| Şekil 47. % 3 TiO ₂ takviyeli ham kompaktın 900°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı..... | 65 |
| Şekil 48. % 5 TiO ₂ takviyeli ham kompaktın görünümü..... | 66 |
| Şekil 49. % 5 TiO ₂ takviyeli ham kompaktın 900°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı..... | 66 |
| Şekil 50. % 7 TiO ₂ takviyeli ham kompaktın görünümü..... | 67 |
| Şekil 51. % 7 TiO ₂ takviyeli ham kompaktın 900°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı..... | 67 |
| Şekil 52. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan Ag ₈ SnO ₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim..... | 70 |
| Şekil 53. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan % 1 TiO ₂ takviyeli Ag ₈ SnO ₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim..... | 73 |
| Şekil 54. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan % 3 TiO ₂ takviyeli Ag ₈ SnO ₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim..... | 76 |
| Şekil 55. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan % 5 TiO ₂ takviyeli Ag ₈ SnO ₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim..... | 79 |
| Şekil 56. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan % 7 TiO ₂ takviyeli Ag ₈ SnO ₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim..... | 82 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 57. Ark-erozyon deneyleri sonucunda Ag8SnO ₂ kompozit kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları..... | 85 |
| Şekil 58. Ark-erozyon deneyleri sonucunda % 1 TiO ₂ takviyeli kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları..... | 86 |
| Şekil 59. Ark-erozyon deneyleri sonucunda % 3 TiO ₂ takviyeli kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları..... | 86 |
| Şekil 60. Ark-erozyon deneyleri sonucunda % 5 TiO ₂ takviyeli kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları..... | 87 |
| Şekil 61. Ark-erozyon deneyleri sonucunda % 7 TiO ₂ takviyeli kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları..... | 87 |
| Şekil 62. Ark-erozyon deneyleri sonucunda bütün kompozitlerin sabit kontaklarında meydana gelen kütle kayıpları..... | 88 |
| Şekil 63. Ark-erozyon deneyleri sonucunda bütün kompozitlerin hareketli kontaklarında meydana gelen kütle kayıpları..... | 88 |
| Şekil 64. Ark-erozyon deneyleri sonucunda bütün kompozitlerde meydana gelen toplam kütle kayıpları..... | 89 |
| Şekil 65. Ark-erozyon deneyleri sonucunda sabit kontaklarda meydana gelen kütle kayıplarının TiO ₂ oranı ile değişimi..... | 89 |
| Şekil 66. Ark-erozyon deneyleri sonucunda hareketli kontaklarda meydana gelen kütle kayıplarının TiO ₂ oranı ile değişimi..... | 90 |
| Şekil 67. Ark-erozyon deneyleri sonucunda bütün kompozitlerde meydana gelen toplam kütle kayıplarının TiO ₂ oranı ile değişimi..... | 90 |
| Şekil 68. Ag8SnO ₂ -5TiO ₂ kompozit kontak malzemesinin 2 saatlik sinterleme sonrası içyapısı..... | 92 |
| Şekil 69. Ag8SnO ₂ -5TiO ₂ kompozit kontak malzemesinin 3 saatlik sinterleme sonrası içyapısı..... | 93 |
| Şekil 70. Ag8SnO ₂ -5TiO ₂ kompozit kontak malzemesinin 4 saatlik sinterleme sonrası içyapısı..... | 93 |
| Şekil 71. Ag8SnO ₂ -5TiO ₂ kompozit kontak malzemesinin 5 saatlik sinterleme sonrası içyapısı..... | 94 |
| Şekil 72. Optimize edilen % 5 TiO ₂ takviyeli kontaklarda ark-erozyonu sonucu meydana gelen kütle kayıpları..... | 96 |
| Şekil 73. Optimize edilen % 5 TiO ₂ takviyeli kontakların 20 A akım şiddetindeki ark-erozyonu sonucu oluşan aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim..... | 97 |
| Şekil 74. % 3 TiO ₂ takviyeli kompozite ait nokta analiz görüntüsü..... | 100 |
| Şekil 75. % 5 TiO ₂ takviyeli kompozite ait nokta analiz görüntüsü..... | 101 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Şekil 76. | % 7 TiO ₂ takviyeli kompozite ait nokta analiz görüntüsü..... | 102 |
| Şekil 77. | % 3 TiO ₂ takviyeli malzemenin EDS çizgi analizi sonucu; a) analiz yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki değişimi..... | 104 |
| Şekil 78. | % 7 TiO ₂ takviyeli sabit kantağa ait EDS çizgi analizi sonucu; a) analiz yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki değişimi..... | 105 |
| Şekil 79. | % 7 TiO ₂ takviyeli hareketli kantağa ait EDS çizgi analizi sonucu; a) analiz yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki değişimi..... | 106 |
| Şekil 80. | % 3 TiO ₂ takviyeli malzemenin EDS haritalama analizi sonucu; a) haritalama yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki dağılımı..... | 107 |
| Şekil 81. | % 3 TiO ₂ takviyeli malzemedeki element dağılımlarının ayrı ayrı görünümü; a) Gümüş, b) Kalay, c) Titanyum..... | 108 |
| Şekil 82. | % 7 TiO ₂ takviyeli malzemenin EDS haritalama analizi sonucu; a) haritalama yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki dağılımı..... | 109 |
| Şekil 83. | % 7 TiO ₂ takviyeli malzemedeki element dağılımlarının ayrı ayrı görünümü; a) Gümüş, b) Kalay, c) Titanyum..... | 110 |

TABLolar DİZİNİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Tablo 1. MA deneyleri için belirlenen parametreler..... | 23 |
| Tablo 2. Ark-erozyon deneylerinde kullanılan parametreler..... | 30 |
| Tablo 3. Farklı miktarlarda PCA kullanılarak yapılan MA deneyleri sonucu Cu25W toz karışımında öğütme süresine bağlı olarak değişen ortalama toz boyutu değerleri..... | 37 |
| Tablo 4. Farklı öğütme hızlarında yapılan MA deneyleri sonucu Cu25W toz karışımında öğütme süresine bağlı olarak değişen toz boyutu değerleri..... | 41 |
| Tablo 5. Farklı öğütme hızlarında yapılan MA deneyleri sonucu Cu25W toz karışımında öğütme süresine bağlı olarak toz parçacıklarının şeklinde meydana gelen değişimler; D: Düzensiz, P: Pulsu, KE: Kısmi Eşksenli, E: Eşksenli..... | 45 |
| Tablo 6. Farklı BPR kullanılarak yapılan MA deneyleri sonucu Cu25W toz karışımında öğütme süresine bağlı olarak değişen toz boyutu değerleri..... | 45 |
| Tablo 7. Her bir kompozit tozun farklı sürelerdeki öğütülmesi sonucu elde edilen ortalama toz boyutu değerleri..... | 59 |
| Tablo 8. Farklı sıcaklıklarda yapılan sinterleme işlemi sonucu üretilen Ag8SnO ₂ kompozitinin fiziksel ve mekanik özellikleri..... | 68 |
| Tablo 9. Farklı kimyasal bileşime sahip Ag8SnO ₂ esaslı kompozit kontak malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri..... | 68 |
| Tablo 10. Farklı kimyasal bileşimlerde üretilen kompozit kontaklarda artan çevrim sayısı ile meydana gelen kütle kayıpları..... | 85 |
| Tablo 11. Sinterleme süresinin Ag8SnO ₂ -5TiO ₂ kompozitinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi..... | 95 |
| Tablo 12. Geliştirilen Ag8SnO ₂ -5TiO ₂ kontak malzemesinin sabit ve hareketli kontaklarında artan çevrim sayısı ile meydana gelen kütle kayıpları..... | 96 |
| Tablo 13. Ark-erozyon deneyi sonunda % 3 TiO ₂ takviyeli kompozit kontak yüzeyinden alınan beş farklı noktadaki elementlerin oranı..... | 101 |
| Tablo 14. Ark-erozyon deneyi sonunda % 5 TiO ₂ takviyeli kompozit kontak yüzeyinden alınan beş farklı noktadaki elementlerin oranı..... | 102 |
| Tablo 15. Ark-erozyon deneyi sonunda % 7 TiO ₂ takviyeli kompozit kontak yüzeyinden alınan beş farklı noktadaki elementlerin oranı..... | 103 |

SEMBOLLER DİZİNİ

BPR : Bilye-toz-ağırlık oranı

BSE: Geri saçılmış elektron

MA : Mekanik alaşımlama

MeO: Metal oksit

PCA : Yağlayıcı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Elektrik kontakları, bir veya daha fazla sayıdaki elektrik devresi üzerinden geçen akımı, arzu edilen zamanlarda gerek taşıyarak gerekse keserek söz konusu devre veya devrelerin kontrolünü sağlayan elemanlar olup, çoğunlukla röle veya kontaktör gibi elektromanyetik anahtarlarda kullanılırlar. Modern mühendislikte elektrik kontaklarının çok disiplinli olarak yani fizik, kimya, makine mühendisliği, malzeme bilimi, elektrik/elektronik mühendisliği ve çevre bilimini kapsayacak şekilde detaylı olarak analiz edilmesi kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir [1]. Çünkü üzerinden elektrik akımı geçen tüm cihaz veya elektronik ürünlerin sorunsuz bir şekilde çalışmasında kontaklar kritik öneme sahiptir. Günümüzde bütün elektrik iletim ve dağıtım mekanizmalarında kontrol ve bilgi dönüşümü, en az bir elektrik kontağının üzerinden elektrik akımının geçmesiyle gerçekleşir. Elektrik kontağındaki bir arıza metropollerde enerji çöküşü, telefon sistemlerinin bozulması ve hatta bir uçağın kontrolden çıkması gibi çeşitli trajik sonuçlar doğurabilir [2]. Bu ve bunun gibi hususlar düşünüldüğünde elektrik kontaklarının sağlıklı bir şekilde işlevlerini yerine getirmelerinin ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle elektrik kontaklarının çalışması sırasında oluşabilecek problemlerin ve bunların çözümlerinin ayrıntılı bir biçimde incelenerek yapı, kimyasal bileşim ve üretim yöntemi gibi parametrelerin elektrik kontaklarının performansı ve çalışma ömrü üzerindeki etkileri ortaya konulmalıdır.

Karşılıklı olarak çalışan, akım taşıma ve akım kesme görevlerini üstlenen kontaklar, açılıp-kapanma sırasında oluşan ark etkisi ile aşırı şekilde ısınmakta, gerek ergime gerekse buharlaşma yolu ile önemli miktarlarda malzeme kaybına uğramaktalar [3]. Ayrıca çalışma sırasında kontakların yüzeyleri bozulmakta ve bir kontakdan diğerine malzeme transferi sonucunda kontaklar zamanla işlevlerini yerine getiremez hale gelmektedirler. Bu ve buna benzer olumsuzlukları en aza indirerek, kontak performansını artırmak ve ömrünü uzatmak için seçilecek kontak malzemelerinin;

- akımın geçişi sırasında oluşan kontak direncini minimize edecek yüksek elektriksel iletkenliğe,

- ortaya çıkan ark ısını iletcek yüksek ısı iletkenliğe,
- kontakların yüzeylerinde birikerek yalıtkanlığa sebep olan oksit, sülfür ve diğer bileşiklere karşı yüksek reaksiyon direncine,
- ark-erozyonunu, malzeme transferini ve kaynak oluşumunu (yapışmayı) sınırlayacak yüksek ergime noktasına,
- ve iyi bir ark-erozyon direnci için yüksek sertliğe sahip olması gerekir [4, 5].

Ancak hiçbir malzeme bütün bu özelliklere tek başına sahip olmadığından emniyet, tedarik edilebilme, ömür ve maliyet gibi parametreler göz önüne alınarak belirlenen her uygulama için en uygun malzeme seçiminin yapılmasında, farklı özelliklere sahip malzemelerin bir araya getirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Öte yandan kontak malzemelerinin seçiminde, elektrik devresinin karakteristikleri (akım, gerilim v.b.), kontaklara uygulanan kuvvet, kontakların açılıp-kapanma sayısı veya sıklığı ve güvenilirlik gibi faktörlerin de dikkate alınması gerekir [1, 5]. Ayrıca kontaklardan geçen akımın türü (alternatif ya da doğru akım), şiddeti ve yükün cinsi (endüktif, kapasitif, direnç ya da motor yükü) de malzeme seçiminde göz önüne alınması gereken parametreler içerisinde yer alır [2, 6]. Diğer taraftan metallerin ömrünü önemli oranda azaltan atmosfer etkisi, kirleticiler, gazlar, tozlar, nem ve organik buharlar gibi çevresel faktörler de kontak malzemesinin seçiminde önemli rol oynamaktadır [7]. Bütün bu parametrelerin etkisi düşünüldüğünde her uygulama için ayrı ayrı optimum performans sergileyen kontak malzemelerinin tasarlanması gereği ortaya çıkmaktadır.

Elektrik endüstrisindeki çoğu kontak uygulamalarında gümüş (Ag) esaslı kontaklar; saf metal, alaşım veya toz metal kombinasyonları şeklinde kullanılmaktadır [8]. Saf gümüşün diğer metaller içinde en yüksek ısı ve elektriksel iletkenliğe sahip olması, kontak malzemesi olarak kullanımını cazip hale getirmesine karşın, ark-erozyon direncinin düşük olması, çalışma sırasındaki kaynak oluşumu ve yapışma eğilimi kullanılmasını kısıtlayan faktörler arasında sayılabilir [1-3, 9]. Bu olumsuzlukları gidermek veya en aza indirmek ve ayrıca gümüşün mukavemetini artırmak için gümüşün metal oksit (MeO) veya refrakter içerikli bazı malzemeler ile birleştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu durum katı çözelti sertleştirilmesi veya dağılımla mukavemetlendirme gibi iki farklı mukavemet artırma yöntemi ile sağlanabilir. Ancak katı çözelti sertleştirilmesi kontak uygulamaları için çok kullanılmayan bir mukavemet artırma yöntemidir [10]. Çünkü bu yöntemle elde edilen mukavemet artışı nispeten düşük olmasına karşın, elektriksel iletkenlik değeri önemli ölçüde düşmektedir [11]. Dağılımla mukavemetlendirme yöntemi uygulanması durumunda

ise, mukavemet daha fazla artmakta ve elektriksel iletkenlikteki düşüş daha az olmaktadır [12]. Bu nedenle gümüşe yukarıda bahsedilen özelliklerin dağılımla mukavemetlendirme yöntemiyle kazandırılması daha uygun görülmektedir. Bu bağlamda Ag esaslı elektrik kontak malzemelerine çeşitli seramik takviyeler katılmaktadır [13-17]. Takviye malzemesinin seçiminde yüksek kararlılığa sahip olmasının yanında elektriksel ve ısıl iletkenliğinin de nispeten yüksek olması gibi bazı şartlar aranmaktadır. Bu özellikleri sağlayan başlıca seramik takviyeler içerisinde ZnO, SnO₂ ve CdO gibi metal oksitler ön plana çıkmaktadır [18-22].

Saf gümüşe MeO takviyesi değişik üretim yöntemleri kullanılarak yapılabilir. Burada en uygun üretim yöntemi kontaklardan beklenen özelliklere göre seçilmelidir. Çünkü kontakların performansını etkileyen önemli bir parametre de üretim yöntemidir. Kontaklar element halindeki metallere, kompozitlerden veya alaşımlardan ergitme-döküm metodu, iç oksidasyon veya toz metalurjisi (TM) aracılığıyla üretilebilirler [5]. Döküm yolu ile üretilemeyen kontak malzemeleri, TM ve iç oksidasyon yöntemleri ile elde edilebilmektedir [8]. İç oksidasyon kullanılması durumunda yüksek oranda sertlik ve yoğunluk elde edilebilmektedir [23]. Ancak iç oksidasyon için gerekli zamanın çok uzun olması, oksit dağılımının, büyüklüğünün, şeklinin düzensiz ve oksit içeriğinin sınırlı oranda olması gibi nedenlerle, TM tekniği iç oksidasyona tercih edilmektedir [11]. Ayrıca TM ile üretilmiş malzemelerin elektriksel iletkenliği iç oksidasyonla üretilen malzemelere nazaran genellikle daha yüksek seviyelerdedir [23]. Bu durumun iç oksidasyon yönteminde görülen kafes çarpılmasının elektronların ortalama serbest yörüngesini değiştirerek elektriksel iletkenliği olumsuz etkilemesinden kaynaklandığı bilinmektedir [23]. İç oksidasyon yöntemi ile istenilen kompozisyonun üretilmesinde oksijen difüzyonunu hızlandırmak ve oksidasyonu kolaylaştırmak amaçlarıyla bizmut ve indiyum gibi bazı katkı maddelerine ihtiyaç duyulması da kompozit seçiminde kısıtlama yarattığı ve maliyeti arttırdığı için TM yöntemine göre bir dezavantaj oluşturmaktadır [23]. TM yönteminin en önemli avantajı ise bileşim seçimi konusunda esnek bir yöntem olmasıdır. Bu değerlendirmeler sonucunda Ag esaslı kompozit kontakların üretiminde en uygun yöntemin TM olduğu görülmektedir.

TM yöntemi kullanılarak istenilen özelliklerde ürünlerin elde edilebilmesi, aşağıdaki işlem değişkenlerinin doğru olarak seçilmesine ve kontrolüne bağlıdır [24-26]:

- Toz özellikleri,
- Tozun hazırlanış yöntemi,

- Presleme parametreleri,
- Preslemenin yapıldığı kalıp ve aletlerin tasarımı,
- Sinterleme fırınının tipi,
- Sinterleme atmosferinin bileşimi,
- Sinterleme sıcaklığı ve zamanı,
- İkincil uygulamalar ve ısıl işlem.

Ancak TM ile kompozit kontak malzemesi üretimi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Örneğin kontak malzemesi olarak kullanılan kompozit tozların hazırlanmasında homojenliğin sağlanması son derece önemlidir. Homojenliğin sağlanamaması ve yerel bileşim farklılıkları (segregasyon) gibi durumlar kontakların performansını olumsuz etkileyecektir. Bu ve buna benzer olumsuzlukların giderilmesi için elektrik kontaklarının üretiminde TM yönteminin mekanik alaşımlama (MA) tekniği gibi ilave bir işlemle desteklenmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada MA ve TM yöntemleri kullanılarak farklı oranlarda TiO_2 takviyesi içeren $AgSnO_2$ esaslı kontak malzemeleri üretilerek bunların takviye oranına bağlı olarak kontakların ark-erozyon performansındaki değişimin incelenmesi amaçlanmıştır.

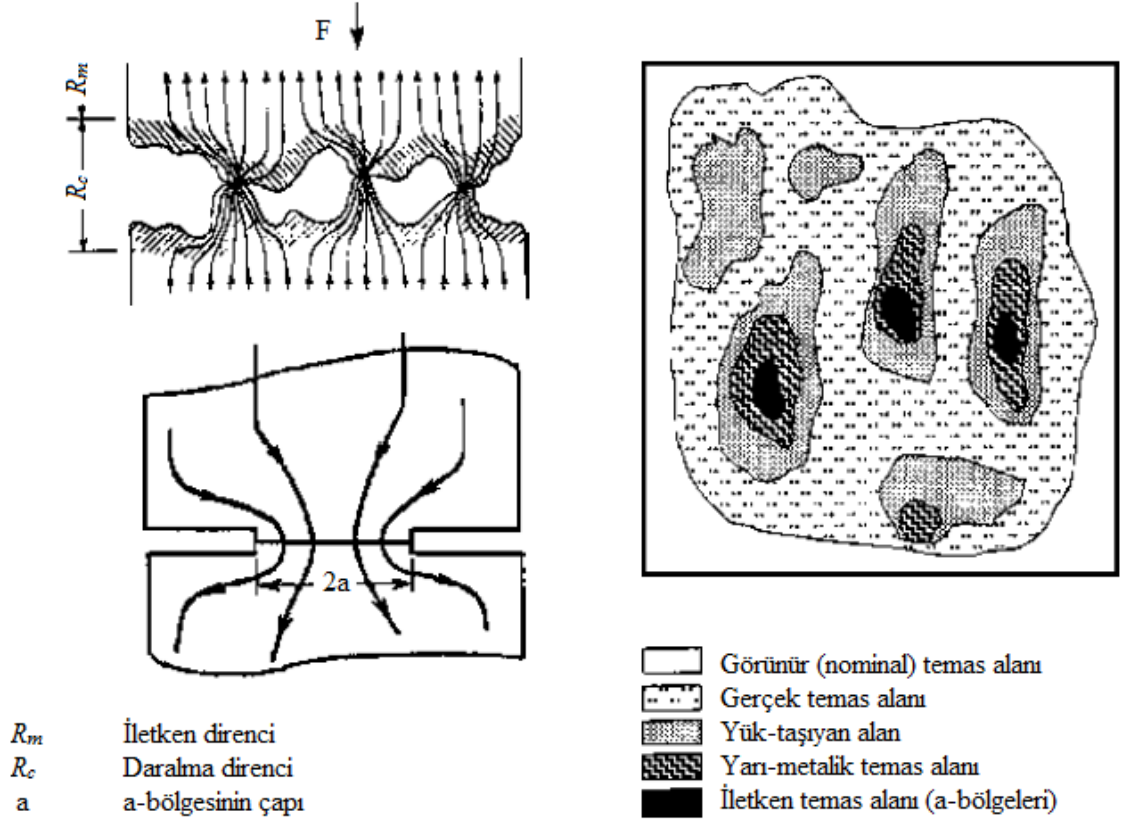
1.2. Kontak Sistemleri

1.2.1. Elektrik Kontakları

İki iletken temas yüzeyi arasında bulunan ve sistemden geçen akım ile gerilimi kontrol eden bağlantı elemanlarına “kontak” adı verilir. Elektrik kontağı, bir akım devresinin kapanması ya da açılması için kullanılır. İki metalin kontak oluşturması veya temas etmesi sonucunda aralarında ortaya çıkan elektrik akımı geçişi ile birlikte bu akıma karşı bir direnç oluşur. Bu dirence “kontak direnci” adı verilir. Bu direnç kısmen kontak yüzeyini oluşturan metallerin öz direnci ile ilişkilidir. Öz direncin yanı sıra geçiş direnci ve film direnci de kontak direncinin oluşmasında etkilidir. Yani kontak direnci öz direnç, geçiş direnci ve film direncinin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Geçiş direncinin oluşmasının nedeni Şekil 1’de görüldüğü gibi kontak yüzeylerinin pürüzlü bir yapıda olması ve tam temasın sağlanamamasıdır [27]. Aynı kesitli iki metal parçası üst üste geldiğinde, akımın bu kontakları oluşturan yüzeyleri tam olarak kapladığı düşünülür. Oysa kontak

yüzeylerinin pürüzlü olması nedeniyle temasta olan yüzeylerin gerçek kesiti söz konusu yüzeylerden çok daha küçüktür. Şekil 1’de de görüldüğü gibi elektrik akımının transferi sadece birbiriyle tam temas halindeki iletken hat olan a-bölgeleri üzerinden gerçekleşmektedir [2, 7]. Ayrıca kontak yüzeylerinde filmlerin oluşması da kontak direncini artırır. Kontak yüzeylerinin atmosferle reaksiyonunun bir sonucu olarak meydana gelen bu filmler genellikle oksit veya sülfür formundadırlar [28]. Örneğin bakır elementinin oksit, gümüşün ise sülfür oluşturma eğilimine sahip olduğu söylenebilir [28]. Oksit veya sülfür filmleri genelde yarıiletken, bazı durumlarda ise yalıtkan özelliği taşır. Bu durum geçiş direncinin çok yükselmesine ve hatta bazen de kontakların görevini yapamamasına neden olur. Öte yandan kontakların temas alanları, kontakları birbirine iten kuvvetle de ilişkilidir. Şöyle ki temas kuvveti arttıkça oksit filmleri kırılır ve kontaklar arası metal-metal temas alanı artar, yani geçiş direnci azalır. Bu durum orta ve yüksek akım uygulamalarında geçerlidir. Hafif yük uygulamalarında ise kontak kuvveti ve akım şiddeti gibi mekanik ve elektriksel parametreler oksit filmlerinin kırılması için yeterli seviyede olmadığından geçiş direncini kontrol etmek için çok yüksek oksitlenme direncine sahip olan platin, rodyum, paladyum ve altın gibi kıymetli metallere ihtiyaç duyulur [29]. Çünkü bu metaller yüksek sıcaklıklarda, hatta ergime sıcaklığı seviyelerinde bile film oluşturmadan bütünlüğünü koruyabilmektedir. Geçiş direncini etkileyen diğer bir faktör de kontaklar arasına toz ve kirleticiler gibi değişik yabancı maddelerin veya parçacıkların girmesidir. Bu durum ark-erozyonunu ve çukurlaşmayı artırarak kontak sistemlerinin çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Kontak sistemlerinin görevini sağlıklı bir şekilde yapabilmesi açısından tehdit oluşturan diğer bir unsur da elektrik arkının kontak yüzeylerini bozunuma uğratması sonucunda oluşan reaksiyon ürünleridir. Söz konusu reaksiyon ürünleri metal yüzeyleri üzerinde adezif (yapıştırıcı) kuvvet etkisi yaparak yüzey gerilimini artırdıkları için kontak direncinin artmasına sebep olurlar [1].

Bu bilgilerin ışığında kontak direncinin malzemenin özellikleri, şalt gerilimi, kontak kuvveti, sürtünme, mekanik ve elektriksel kontak aşınması ve atmosfer koşulları gibi pek çok parametreye bağlı olduğu söylenebilir [30].



Şekil 1. Akım daralması ve gerçek temas alanının şematik gösterimi [27].

1.2.2. Elektrik Kontak Malzemeleri

Kontakların çok yönlü kullanımları ve değişik çalışma koşulları dikkate alındığında kendilerinden beklenen performansı gösterebilmeleri ve servis ömrünün artırılabilmesi için kontak malzemelerinin aşağıda sıralanan özelliklere sahip olması istenir:

- Ark-erozyonuna karşı yüksek direnç,
- Düşük kontak direnci,
- Yüksek elektriksel ve ısı iletim,
- Yanmaya karşı dayanıklılık,
- Oksitlenme ve korozyona karşı direnç,
- Yapışma ya da kaynak oluşumuna karşı direnç.

Yukarıda sayılan bütün özelliklere tek başına sahip olan ve bütün yük uygulamalarında kullanılacak kapasiteye sahip ideal bir kontak malzemesinin varlığından söz etmek pek mümkün değildir [17]. Çünkü kontak malzemesinin bileşiminin

optimize edilmesinde bir özelliğin iyileştirilmesi diğer bir özelliğin bozulmasına sebep olabilir. Örneğin hafif yük veya düşük gerilim uygulamalarında gümüşte sülfat kaynaklı kararma meydana gelmesini engellemek amacıyla gümüşe belirli oranlarda paladyum gibi daha kıymetli metal takviyesi yapılabilir. Ancak kararmayı engellemek için gerekli olan takviye oranı ağırlıkça % 50 seviyelerinde olup, bu miktar kontak direncinin ve üretim masraflarının artması anlamına gelmektedir [29]. Öte yandan oksidasyon ve korozyon direncinin önem arz ettiği uygulamalarda altın kullanımı tercih edilebilir. Ancak gümüş gibi yumuşak bir malzeme olması ve ergime sıcaklığının düşük olması sebebiyle altının da kaynak oluşturma ve kontak yapışması eğilimi yüksektir. Sertliğini artırmak için altına yapılacak bakır veya gümüş gibi takviyeler bu malzemenin çarpıcı özelliği olan oksidasyon ve korozyon direncini olumsuz etkileyebilir [29]. Sonuç olarak özelliklerin iyileştirilmesi için uygulanan her türlü işlem birbiri ile bağımlı olarak olumlu veya olumsuz yönde gelişim göstermektedir. Bu bağlamda yapılan takviyelerin aşınma performansına toplam etkisinin kriter olarak alınması uygun bir yaklaşım olabilir.

Kontak malzemesi olarak sıklıkla kullanılan metallerin başında Ag, Cu, Ni, W, Mo, Au, Pt, Ir, Pd, Rh ve Ru gelir [30]. Ag, Cu ve Au gibi saf metaller çalışma esnasında kaynak oluşturma eğilimi gösterebilirler. Bu olumsuzluğu gidermek veya en aza indirmek için çoğu zaman bu metalleri içeren Ag-Cd, Ag-Cu, Ag-Pd, Cu-Cr, Cu-Ag-Cd, Au-Ni, Au-Ag-Pt, Pt-Ni, Pt-W, Pt-Ir, Pt-Rh vb. alaşımlar kullanılır. Eğer bu kontaklardan aynı zamanda sertlik, ark dayanımı, yüksek iletkenlik ve ısı iletkenlik gibi özellikler istenirse “sermet” olarak adlandırılan malzemeler kullanılabilir. Sermet; iki veya daha çok bileşenli olup, iletkenliği yüksek olan metallerle yüksek sıcaklığa dayanıklı metal ve/veya metal oksit tozlarından oluşan metal-metal veya metal-seramik kompozitleridir. Örneğin W-Cu kompoziti sermetlere tipik bir örnek olarak verilebilir. Bu tip bir kompozitte tungsten, sertlik, ark dayanımı ve aşınma direnci; bakır ise yüksek elektrik ve ısı iletkenlik sağlar. Ancak bu özellikler takviye oranlarına göre değişir. Örneğin Yang ve arkadaşları [14] W-Cu elektrik kontak malzemesinin içyapı ve özelliklerine WC ve CeO₂ takviyelerinin etkisini inceledikleri bir çalışmada maksimum sertlik ve elektriksel iletkenlik değerlerini ağırlıkça % 1,5 WC ve % 0,5 CeO₂ içeren kompozitlerden elde etmişlerdir. Bunun üzerindeki oranlarda yapılan takviyelerde sertlik ve elektriksel iletkenliğin düştüğü gözlenmiştir. Diğer bir çalışmada ise Güler ve Evin [31] MA yöntemi ile Cu esaslı elektrik kontak malzemelerine % 1-6 arasındaki ağırlık oranlarında üç farklı takviye (ZnO, Al₂O₃ ve Y₂O₃) katarak, kontakların fiziksel özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Elektriksel

iletkenliğin en yüksek seviyede olduğu değerin ağırlıkça % 4 MeO takviyesine karşılık geldiği görülmüş ve bu değerin üzerinde veya altındaki takviye oranlarında elektriksel iletkenlikte azalmalar tespit edilmiştir. Bundan başka W-Ag, Ag-Ni, Mo-Ag, Ag-CdO, Cu-C gibi sermetler de kontak malzemesi olarak kullanılmaktadır [30]. Her ne kadar bazı dezavantajlara sahip olsa da gümüş alaşımları ve kompozitleri yukarıda belirtilen üstün özelliklere sahip olmaları nedeniyle hafif ve orta yük uygulamaları için kullanılan en önemli kontak malzemesi olma özelliğini taşımaktadır. Dolayısıyla yeni kompozit veya alaşımların geliştirilmesi ve kontakların ark-erozyon performanslarının iyileştirilmesinde gümüş malzeme odak noktası haline gelmiştir [32-36].

Gümüş esaslı kontak malzemelerine genellikle MeO veya refrakter metal takviyesi olmak üzere iki tür takviye katılarak farklı uygulamalarda kullanılmak üzere optimum performans gösteren kompozit kontaklar geliştirilmeye çalışılmaktadır. Gümüş-metal oksit malzemeler ile ilgili ilk gelişmeler 1920'li yıllara dayanmakla birlikte bu alanda yaygın olarak kullanılan AgCdO malzemesi ilk defa 1950'li yıllarda ticari olarak üretilmiştir. Schröder [37] 1987 yılında elektrik kontak malzemeleri ile ilgili yapmış olduğu bir çalışmada metal oksitlerin kontakların ark-erozyon performansı üzerindeki etkilerini incelemiş ve çevreye zararlı etkisi [38-42] birçok çalışmada ele alınan AgCdO kompozitinin alternatifi olarak en büyük potansiyelin AgSnO₂ malzemesinde olduğunu ileri sürmüştür. Ayrıca Fındık ve Uzun [43] W ve WC gibi refrakter takviyelerin Ag esaslı kontak malzemelerinin sertliği ve elektriksel iletkenliği gibi mekanik ve fiziksel özellikleri ile mikroyapıları üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve artan tungsten oranıyla sertlik değerlerinin arttığını, elektriksel iletkenlik değerlerinin ise azaldığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte WC katkısının, sertliği W katkısına göre daha fazla artırırken elektriksel iletkenliği daha çok azalttığını gözlemlemişlerdir. Takviye elemanlarının Ag esaslı kompozit kontak malzemelerinin performansına etkisi ile ilgili yapılmış olan diğer çalışmalarda ise odak noktaları takviye boyutu ve takviye oranı olmuştur [16, 19, 32, 33, 44]. Takviye boyutu ile ilgili olarak öne çıkan bir çalışmada Koffler ve arkadaşları [44] AgSnO₂ kompozit kontak malzemesine farklı boyut ve oranlarda katılan In₂O₃ takviyesinin röle kontaklarındaki aşınmaya etkisini incelemişlerdir. Sözü edilen çalışmada düşük oranlardaki ve nispeten büyük boyutlu In₂O₃ takviyeli kontak malzemelerinde kontak ömrünün yaklaşık % 20 oranında azaldığı, ayrıca optimum kaynak oluşum direncinin çok ince dağılımlı malzemelerle elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise, Wang ve arkadaşları [32] Ag esaslı kontak malzemesine 5 µm ve 300 nm'lik iki farklı toz

boyutunda ağırlıkça % 4 oranında TiB_2 takviyesi yaparak, takviye boyutunun söz konusu kontak malzemesinin ark-erozyon davranışına etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda nano boyutlu takviyenin ortalama ark süresini (18,31 ms) kısaltarak ark dalgalanmasını önlediği gözlemlenmiş ve böylelikle daha ince ve homojen TiB_2 dağılımı gösteren kompozitlerin ark-erozyon direncinin arttığı ve malzeme kaybının azaldığı ortaya konulmuştur.

Takviye boyutundan başka takviye oranının da kontak malzemelerinin özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir [14, 31, 33, 44]. Takviye oranının kontak malzemelerinin özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada Wang ve arkadaşları [33] geleneksel $Ag_{12}SnO_2$ kompozit kontak malzemesini referans olarak daha yüksek oranda SnO_2 içeren kompozit kontak malzemelerini MA ve sıcak pres yöntemleriyle üretmişler ve artan takviye oranıyla mekanik ve fiziksel özellikler ile ark-erozyon performansında ortaya çıkan değişimleri gözlemlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda SnO_2 oranının ağırlıkça % 15-30 arasında değiştirilmesiyle mikrosertlik değerlerinde % 51'lik bir artış elde edilmiş ve bu artışa paralel olarak ark-erozyon kayıplarının önemli oranda azaldığı görülmüştür.

1.3. Kontak Malzemelerinin Üretim Yöntemleri

Takviye elemanlarının kontakların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır [45-48]. Yukarıda bahsedilen ve elektrik kontaklarının özellikleri üzerinde etkili olduğu görülen bu takviye malzemelerinin gümüşe katılmasında kullanılan yöntem de oldukça önemlidir. Örneğin Pandey ve arkadaşları [23] üretim yöntemine bağlı olarak mekanik ve fiziksel özelliklerdeki değişimleri inceledikleri bir çalışmada $AgSnO_2$ ve $AgSnO_2-In_2O_3$ kontak malzemelerini iç oksidasyon ve TM yöntemleri kullanarak üretmişlerdir. Bu çalışma sonucunda yüksek sertlik ve tam yoğunluğun elde edilmesi amaçlanıyorsa iç oksidasyonun daha avantajlı olduğu; homojenlik, yüksek elektriksel iletkenlik, üretim hızı ve kimyasal bileşimin geniş bir aralıkta değiştirilebilmesi kriter olarak alınacaksa TM yönteminin daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan TM yöntemiyle üretilen malzemelerde gözenek oranına bağlı olarak elektriksel iletkenlik ve sertlik değerlerinin önemli ölçüde değiştiği bilinmektedir [23, 33, 49-51]. Bu nedenle gözenek oranının mümkün olduğunca azaltılmasına çalışılmalıdır. Örneğin Yang ve arkadaşları [14] W-Cu alaşımına farklı oranlarda WC ve CeO_2 takviyesi yaparak sertlik ve elektriksel iletkenliğin değişimini inceledikleri çalışmada

WC için % 1,5; CeO₂ için ise % 0,5'lik ağırlık oranlarının üzerlerinde sertlik ve elektriksel iletkenlik değerlerinde düşüş gözlemlenmişler ve söz konusu düşüşün gözenek artışından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Diğer bir çalışmada ise nanoyapılı AgC elektrik kontak malzemesi MA yöntemi ile iki farklı şekilde üretilerek fiziksel özellikler ve sinterleme kinetiği üzerindeki değişimler ele alınmıştır [50]. Birinci yöntemde Ag ve C tozlarının aynı ortamda öğütülmesi sonucu grafitin gümüş yüzeyini kaplayarak parçacıklar arası teması engellediği ve yüksek oranda gözenek oluştuğu görülmüştür. İkinci yöntemde ise Ag tozu tek başına öğütüldükten sonra grafitin ilave edilmesiyle sinterleme işlemi üzerinde olumlu gelişmeler tespit edilmiş ve bunun sonucunda sinterleme sonrası yoğunluk ve elektriksel iletkenlik değerlerinde artış gözlenmiştir.

TM yönteminden yüksek oranda verim alınabilmesinin, kompozit toz karışımının doğru şekilde hazırlanması ve homojenliği ile yakından ilişkili olduğu bilinmektedir [52, 53]. Bu nedenle TM yöntemi uygulanmadan önce tozlar turbula mikserde karıştırma veya çok daha gelişmiş bir yöntem olan MA ile preslenmeye hazır hale getirilir. Her iki yöntemde de karışımın homojenliği sağlanmasına karşın MA yönteminde bilyelerin darbe etkisi ile daha küçük boyutlu tozlar elde edildiğinden dolayı MA, turbula mikserde karıştırma işlemine göre daha avantajlı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Ancak MA yönteminde de öğütme işleminden verim alınabilmesi için optimize edilmesi gereken birçok parametre söz konusudur [54-58]. Bu parametrelerin en önemlileri yağlayıcı (PCA) cinsi ve miktarı, öğütme hızı, bilye-toz ağırlık oranı (BPR) ve öğütme süresidir. [59-63]. Örneğin Joshi ve arkadaşları [62] tarafından element halindeki Ag tozunun yüksek enerjili öğütülmesine PCA'nın etkisinin incelendiği bir çalışmada ilk 16 saatlik öğütme süresinde PCA katkılı malzemelerde katkısız olarak öğütülen malzemelere nazaran önemli oranda boyut küçülmesi elde edilmiştir. Bununla birlikte 16 saatten sonra PCA'nın dekompoze olduğu veya etkisinin kaybolduğu gözlenmiş ve 32 saat sonunda tozlar arasında aşırı soğuk kaynak gözlenmesine bağlı olarak pulsu bir morfoloji elde edilmiştir. Başka bir çalışmada ise Bıyık ve Aydın [59] Cu25W kompozit tozunun MA yoluyla sentezlenmesinde katı bir PCA olan stearik asidin toz morfolojisi ve boyut küçülmesine etkisini incelemişler ve ağırlıkça % 2'lik PCA kullanılması durumunda minimum toz boyutunun elde edilebileceğini tespit etmişlerdir. Öğütme hızının Cu25W kompozit tozunun sentezlenmesine etkisi ile ilgili yapılmış olan diğer bir çalışmada ise düşük hızlarda öğütme veriminin olumsuz etkilendiği, optimum değer üzerindeki hızlarda ise son toz boyutlarında minimum değere göre bir miktar artış olduğu belirlenmiştir [61]. Bu durumun

çok yüksek öğütme hızlarında bilyelerin toza yaptığı darbe etkisinin azalmasından kaynaklandığı ileri sürülmüştür.

MA tekniği tozların homojenliğini iyileştirmesinden dolayı presleme işlemi sonrası uygulanan sinterleme verimini de artırmaktadır. Nitekim Da Costa ve arkadaşları [64] tarafından yapılan bir çalışmada söz konusu yöntemin kompozit yapılarda parçacık boyutu ve dağılımını etkileyerek düşük sinterlenebilirlik gösteren bileşimlerin sinterlenmesine olumlu etki yaptığı ortaya konulmuş ve artan öğütme süresi ile takviye dağılımlarında iyileşmeler elde edilmiştir.

1.4. Kontak Malzemelerinin Aşınma Özellikleri

1960 ve 1970'li yıllardan itibaren teknolojik gelişmelere paralel olarak deney düzeneklerinin geliştirilmesi ile kontak malzemelerinin gerçek koşullarda test edilmeleri mümkün hale gelmiştir [65-69]. Bu çalışmalar sonucunda elektrik kontaklarının üretildiği yöntemin kontakların aşınma performansları üzerinde de etkili olduğu ileri sürülmüştür [68, 70-73]. Örneğin Discour ve Muniesa [72] üretim yönteminin AgCdO kontak malzemesinin aşınma performansı üzerindeki etkisini görmek amacıyla sinterleme ve iç oksidasyon tekniklerini karşılaştırmışlar ve sinterlenmiş malzemelerin daha iyi ark-erozyon direnci gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Diğer bir çalışmada ise vakumlu devre kesicilerde kullanılan Cu-Cr esaslı kontak malzemesi fonksiyonel derecelendirilmiş olarak üretilmiş ve bu derecelendirmenin ark sönümlemesi üzerinde olumlu etki yaptığı ve böylelikle söz konusu kontak malzemesinin optimum ark-erozyon davranışı sergilediği gözlemlenmiştir [73].

Kontak malzemelerinin kimyasal bileşiminin ark-erozyon performansına etkisi birçok çalışmada ele alınmış olmakla birlikte, son yıllarda yapılan çalışmalar geleneksel bileşimlerin bazı ikincil katkılarla geliştirilmesine odaklanmıştır [74-78]. Örneğin Juszczyk ve arkadaşları [19] AgZnO kompozit kontak malzemesine farklı oranlarda Ag₂WO₄ ve AgMoO₄ takviyeleri katarak ürettiği oldukları kontakların 10 A'lık akım şiddeti ve 500 V'lık gerilim koşullarında 50.000 çevrim sayısı sonundaki ark-erozyon performanslarını incelemişler ve ağırlıkça % 0,25 oranındaki Ag₂WO₄ katkısı ile AgZnO kompozitinin elektriksel iletkenliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada ayrıca düşük miktarlardaki (% 0,25-0,35) Ag₂WO₄ ve AgMoO₄ katkılarının bile ark-erozyon performansına olumlu etkilerinin olduğu ortaya konulmuştur. Otomotiv rölelerindeki

aşınmaların incelendiği bir çalışmada ise Leung ve Lee [6] AgSnO_2 kompozitine ağırlıkça % 0,5 oranında WO_3 takviyesi katmışlar ve bu takviyenin, aşınma testi süresince kontak direncinin düşük seviyelerde kalmasını sağladığını gözlemlemişlerdir. Ag_{10}ZnO , Ag_{10}CdO ve $\text{Ag}_{7,6}\text{SnO}_2\text{-}2,3\text{In}_2\text{O}_3$ kompozitlerinin karşılaştırılarak oksit kararlılığının, ark-erozyon performansına etkisinin incelendiği başka bir çalışmada Ag_{10}ZnO kompozitinin 40 A'lık akımdaki aşınma esnasında diğer kompozitlere göre daha az sıcaklık artışı gösterdiği ve ark-erozyon direncinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [15]. Benzer şekilde Wang ve arkadaşları [13] AgSnO_2 kontak malzemesini referans malzeme kabul ederek CuO takviyesinin söz konusu malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerine ve ark-erozyon performansına etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça % 1,05 CuO takviyesi ile yoğunluk ve sertlik değerlerinde referans malzemeye göre artış gözlenmiş ve ayrıca CuO takviyesi ile ergimiş damlacık şeklindeki sıçrama kayıpları engellendiği için aşınma performansında da iyileşmeler tespit edilmiştir. Öte yandan Witter ve Chen [78] $\text{AgSnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ kontak malzemesinin aşınma performansına bir yarı metal olan tellür (Te) elementinin etkisini inceledikleri bir çalışmada kaynak oluşumu ve ark-erozyon direncinin esasen MeO yüzdesiyle değiştiğini, Te yüzdesinin ise bu değerlere çok az bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Ağırlıkça % 0,5'in altındaki Te katkısı ile arkın oluşturduğu malzeme transferini azaltmanın mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.

Literatürde kimyasal bileşime bağlı olarak kontakların ark-erozyon performansının değişimi konusunda yapılmış olan tüm bu çalışmaların yanı sıra, elektriksel parametrelerden biri olan yük tipinin de aşınma üzerine etkilerini konu alan bazı çalışmalar bulunmaktadır [6, 16, 79-83]. Örneğin Leung ve Lee [6] bir otomotiv rölesi üzerinde 20 A'lık akım değerinde üç farklı malzemenin (Ag_2Cu , Ag_{20}Ni ve $\text{Ag}_{10}\text{SnO}_2$) değişik yükler altında (lambda, motor ve direnç) ark-erozyon davranışlarını araştırmışlar ve yapılan deneyler sonucunda her malzemenin farklı bir yük tipi ile eşleştiğini gözlemlemişlerdir. Şöyle ki Ag_2Cu alaşımının direnç ve motor yükleri için uygun olacağı, lambda yükü için ise elverişli olmayacağı ortaya konulmuş ve bu durumun, alaşımın belirtilen yük tipleri altında düşük kontak direnci ve homojen aşınma sergilemesinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Diğer taraftan ani akım değerlerinde kaynak oluşumuna karşı önemli ölçüde direnç göstermesinden dolayı AgSnO_2 kompozitinin lambda yüklerindeki kullanım için uygun olacağı belirtilmiştir. Ag_{20}Ni kompozitinin ise Ag_2Cu 'a göre lambda yükü altında kaynak oluşumuna karşı daha üstün özellik sergilediği görülmüştür. Başka bir çalışmada Braumann ve Koffler [16] AgSnO_2 kompozitine farklı takviye malzemeleri (WO_3 , Bi_2O_3

ve In_2O_3) katarak bir röle üzerindeki kontakların lamba, motor ve direnç yükü altındaki ark-erozyon performanslarını incelemişler ve Bi_2O_3 takviyesinin WO_3 takviyesine göre özellikle kaynak oluşum direnci üzerinde daha olumlu etkilerini gözlemlemişlerdir. Ayrıca In_2O_3 takviyesinin özellikle motor yükü altındaki aşınma davranışını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Kontakt malzemelerinin aşınma performanslarını iyileştirmek için çalışma esnasında meydana gelebilecek direnç değişimlerinin veya dalgalanmasının minimize edilmesi gereklidir. Bunun sağlanması sadece bileşimsel düzenlemenin gerektiği anlamına gelmez. Elektriksel parametrelerin de doğru ve amaca uygun olarak belirlenmesi veya seçilmesi gereklidir. Bu konuyla ilgili olarak Leung ve Lee [6] otomotiv rölesinin aşınmasını inceledikleri bir çalışmada AgSnO_2 ve Ag_2ONi kompozitleri için ark süresinin motor yükü altında daha uzun tutulmasıyla kontak direnci dalgalanmasının önüne geçilebileceğini ortaya koymuşlardır. Yüksek gerilimli devre kesiciler üzerinde CuW kontaklarla ilgili yapılmış olan diğer bir çalışmada ise ark süresi ve akım şiddetine vurgu yapılmış ve erozyonun esas olarak bu iki parametreden kaynaklandığına dikkat çekilmiştir [84].

Sonuç olarak üretim yöntemi, kimyasal bileşim, akım şiddeti ve yük tipi gibi parametrelerin kontak malzemelerinin ark-erozyon performansı üzerinde son derece etkili oldukları görülmüştür.

1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

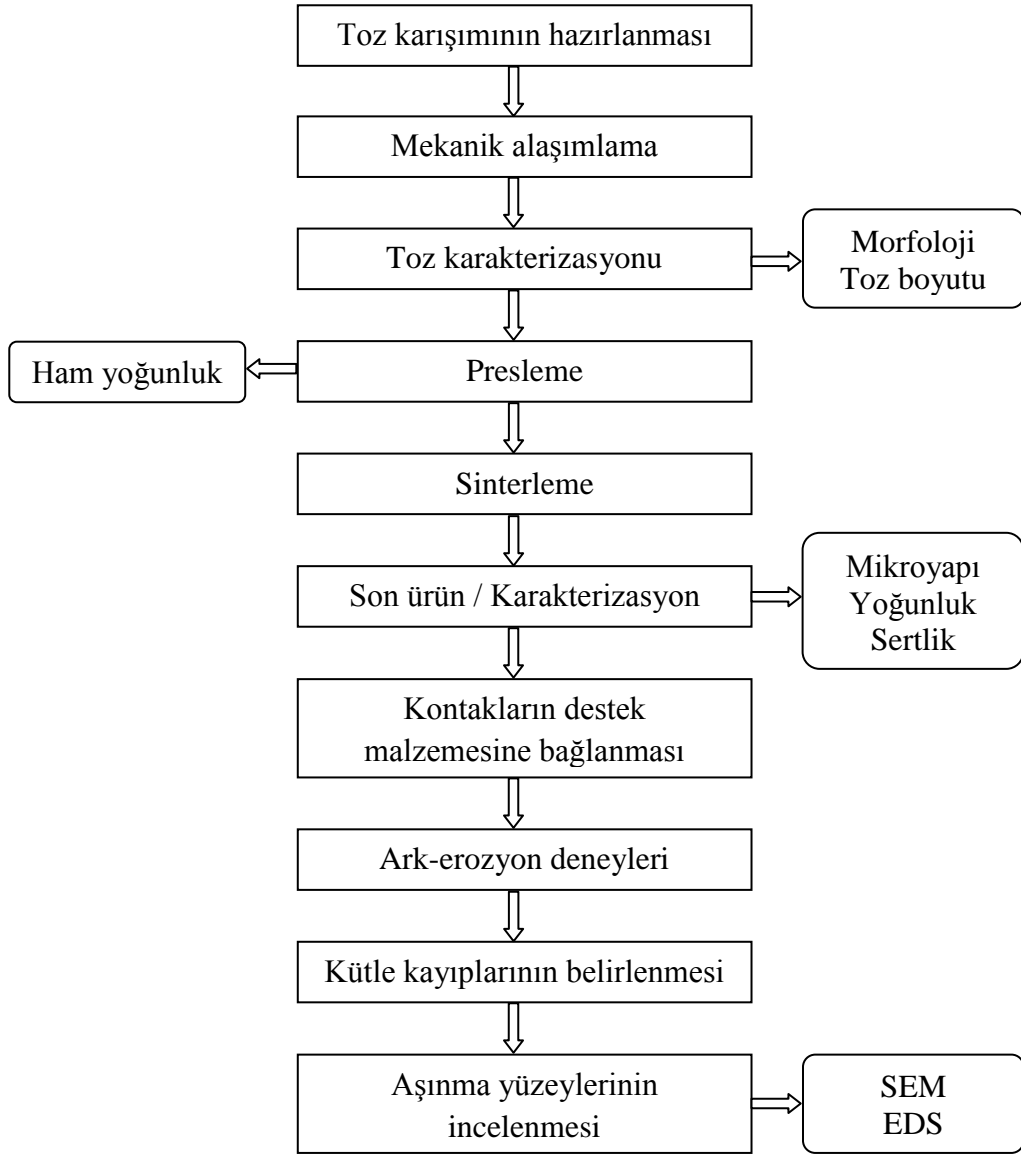
Elektrik kontakları röle ve kontaktörler başta olmak üzere çeşitli elektriksel uygulamaların sorunsuz işleyişinde çok önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle kontak malzemelerinin daha üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması arzu edilir. Kontak malzemelerinin çalışmasına engel teşkil edebilecek durumlar özellikle ark-erozyonu etkisiyle oluşan yüksek sıcaklık altındaki yüzey bozunumları ile yakından ilgilidir. Söz konusu istenmeyen durumlar kimyasal bileşim başta olmak üzere, içyapı düzenlemeleri, homojenlik ve takviyelerin matris içerisinde daha ince dağılımları yoluyla büyük ölçüde giderilebilir ve kontakların servis ömrü güvenlik sınırları içerisinde kalacak şekilde artırılabilir. Gümüş esaslı kontak malzemeleri her ne kadar en yüksek elektriksel ve ısı iletkenliğe ve en düşük geçiş direncine sahip olsa da mekanik özelliklerindeki iyileştirmelere paralel olarak ark-erozyon performansları da belirli bir ölçüde artmaktadır. Bu amaçla MeO ve refrakter takviyelerinin, kontakların ark-erozyon performansına etkileri

üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Öte yandan bu takviyelerin elektriksel iletkenlik ve geçiş direnci üzerine olumsuz etkileri olduğu bilindiği için takviye malzemelerinin oranlarının her uygulama için ayrı ayrı optimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Elektrik kontaklarının kimyasal bileşiminde bir takviye elemanı olarak uzun süre kullanılmış olan CdO malzemesinin kanserojen etkisi tespit edilmiş ve özellikle çevresel düzenlemelere aykırı bir davranış sergilediği için kontak malzemelerinde kullanımında büyük ölçüde kısıtlamaya gidilmiştir. Günümüzde AgCdO kompozitinin yerine tercih edilen kontak malzemelerinin başında AgSnO₂ ve AgZnO gelmektedir.

Kontak malzemeleri ile ilgili yayımlanan ülkemiz adresli sadece üç adet çalışma mevcuttur [31, 43, 74]. Ayrıca Ag₈SnO₂ kompozit kontak malzemesinin endüktif yük altındaki ark-erozyon davranışı hakkında literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. TiO₂ takviyesinin kontak malzemelerinde kullanılabilirliği ile ilgili bir çalışmaya da rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada kimyasal bileşim oranı ve TM parametrelerinin farklı oranlarda TiO₂ katkısı içeren Ag₈SnO₂ kompozitinin endüktif yük altındaki ark-erozyon davranışına etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada TiO₂ takviyesinin % 8 ağırlık oranında SnO₂ içeren Ag esaslı elektrik kontak malzemelerinin ark-erozyon performansına etkisi araştırılmıştır. Öncelikle referans malzemesi olarak TiO₂ takviyesi içermeyen Ag₈SnO₂ kompozit tozu MA yöntemi kullanılarak üretildi. Söz konusu MA deneyi, Cu25W kompozit tozunun sentezlenmesi ile ilgili yapılan optimizasyon çalışmaları neticesinde elde edilen PCA miktarı, öğütme hızı ve BPR gibi MA parametreleri esas alınarak gerçekleştirildi. Referans malzemesinin (Ag₈SnO₂) üretiminde; toz boyutu, şekil değişimleri ve homojenlik gibi faktörler dikkate alınarak optimum öğütme süresi (25 h) belirlendi ve farklı oranlarda (% ağırlıkta 1, 3, 5 ve 7) TiO₂ takviyeli toz karışımları da aynı sürede MA işlemine tabi tutuldu. Öğütme sonrası elde edilen kompozit tozlar geleneksel TM yöntemiyle presleme ve sinterleme işlemlerine tabi tutuldu. MA ve TM yöntemleri kullanılarak üretilen bu üç bileşenli kompozit kontaklar, bakır terminallere gümüş kaynağı yoluyla monte edildi ve söz konusu kontaklar, aşınma performanslarının incelenmesi amacıyla bu çalışma için tasarlanan ve imal edilen deney düzeneğindeki [65] bir kontaktör içine uygun şekilde yerleştirilerek ark-erozyon testlerine tabi tutuldu. Belirli açma/kapama (çevrim) sayıları (5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000, 30.000, 35.000 ve 40.000) sonunda kontakların mekanik ve elektriksel aşınmaya maruz kalan yüzeyleri incelendi ve kontaklar arasında malzeme transferi ile oluşan yüzey bozunumları gözlemlendi. Her çevrim aralığı sonunda sabit ve hareketli kontakların kütleleri ölçülerek kümülatif kütle kayıpları belirlendi ve ark-erozyonu nedeniyle kontak çiftleri arasında meydana gelen malzeme transferleri karşılaştırıldı. İncelenen beş değişik kontak malzemesinde ortaya çıkan yüzey bozunumları ve kütle kayıpları karşılaştırılarak TiO₂ oranının ark-erozyon performansına etkisi belirlendi. Bu çalışmalar sonucunda optimum aşınma performansı sergileyen kontak malzemesi tespit edildi ve bu malzemenin özelliklerini ve performansını iyileştirebilmek için en uygun sinterleme süresi belirlendi. SEM (Zeiss Evo LS 10) ve EDS yöntemleri kullanılarak kompozit tozların, son ürünlerin ve aşınma yüzeylerinin karakterizasyonu gerçekleştirildi. Ayrıca kompozit malzemelerin üretildiği tozların boyut değerleri parçacık boyut analizi cihazı (Mastersizer 2000) kullanılarak belirlendi. Vickers cinsinden mikrosertlik değerleri ise yüzey üzerinde beş farklı noktadan yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlendi. Deneysel çalışmaları ana hatlarıyla gösteren iş akış şeması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deneysel çalışma aşamalarını gösteren iş akış şeması

2.1. Kompozit Toz Üretimi

Elektrik kontak malzemelerinin üretiminde kullanılan Ag, SnO₂ ve TiO₂ tozları; toz boyutu, saflık ve maliyet gibi parametreler göz önüne alınarak ilgili toz üretici firmalardan tedarik edildi. Söz konusu tozlar her bir bileşim için seçilen ağırlık oranlarında ayrı ayrı karıştırılarak MA işlemine hazır hale getirildi.

MA deney parametrelerinin optimizasyonunda kullanılan Cu ve W tozları da yüksek saflık değerlerine sahip olup söz konusu tozlar ilgili toz üretici firmalardan temin edildi.

2.2. Mekanik Alaşımlama Yöntemi ve Üretim Parametreleri

Literatürde MA yöntemi ile ilgili mevcut çalışmalar incelendiğinde; istenilen yapı ve özelliklerde kompozit tozun üretilebilmesi için öncelikle işlem parametrelerinin optimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır [59, 61, 63]. Bu işlem parametreleri arasında öğütücü tipi, öğütme kabı malzemesi, PCA cinsi ve miktarı, öğütme hızı, öğütme süresi, BPR, öğütmenin yapıldığı atmosfer ve öğütme kabının doluluk oranı yer almaktadır. Söz konusu parametrelerin özellikle öğütme süresine bağlı olarak toz morfolojisi ve boyutlarında meydana getirdiği değişimler incelenerek optimum üretim koşulları belirlenmeye çalışılmalıdır. Böylece söz konusu işlem daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmiş olacaktır. Ancak bu işleme tabi tutulacak tozlar kimyasal bileşimlerine bağlı olarak sünek ve/veya gevrek yapıya sahip olduğundan bilyelerin darbe etkisi altında farklı davranış (soğuk kaynak/kırılma) sergileyebilmektedir [54]. Örneğin sünek tozlar genellikle soğuk kaynak oluşturma eğilimi göstermesine karşın gevrek tozlar kırılma eğilimindedirler. Dolayısıyla MA parametrelerinin içyapıya etkisi farklı bileşimler için değişim gösterecektir. Bu bağlamda temin edilen tozların, özellikle de kıymetli metallerin yüksek maliyetini göz önünde bulundurarak seçilen parametreler doğrultusunda öğütme süresine odaklanmak uygun bir yaklaşım olacaktır.

Kimyasal bileşim bütün deneylerde sabit kalmak üzere, artan öğütme süresi ile Cu25W tozunun boyut ve morfolojisinde meydana gelen değişimler; farklı PCA oranlarının, farklı öğütme hızlarının ve farklı BPR değerlerinin fonksiyonu olarak incelendi ve her bir parametre için optimum değerler belirlendi. Bu deneyler sonucunda elde edilen optimum değerler; Ag8SnO₂-TiO₂ kompozitlerinin sentezlenmesinde kullanılmak üzere referans değerler olarak kabul edildi ve bu parametreler kullanılarak optimum öğütme süresinin belirlenmesine odaklanıldı. Bu çalışmada kompozit tozların sentezlenmesi süresince gözlenen toz boyutu, morfoloji ve kirlilik gibi parametrelere göre optimum öğütme süresi 25 saat olarak belirlendi.

2.2.1. Başlangıç Toz Boyutları ve Kimyasal Bileşimleri

Piyasadan tedarik edilen maksimum 45 µm toz boyutuna sahip % 99,99 saflıktaki Ag ile aynı boyutta ve % 99,6 saflıktaki TiO₂ tozları elek analizinden geçirildikten sonra 25 µm'lik elek altında kalan Ag tozu matris, TiO₂ tozu ise ikincil takviye malzemesi olarak

kullanıldı. Burada elek analizinin yapılmasının amacı başlangıç tozları içerisindeki olası boyut farklılıklarını en aza indirerek MA işleminin verimini artırmak, dolayısıyla daha homojen bir içyapı elde etmektir. Elek analizi öncesinde Ag tozundaki parçacıkların boyut dağılımını parçacık boyut analizi cihazı kullanılarak tespit edildi. Birincil takviye elemanı olarak kullanılan ve toz boyutu 10 μm 'nin altında olan % 99,9 saflıktaki SnO_2 tozu ise 25 μm 'nin altında başlangıç toz boyutuna sahip olduğu için bu toza elek analizi yapılmasına gerek duyulmadı. Ag, SnO_2 ve TiO_2 tozlarının morfolojik açıdan incelenmesinde SEM yöntemi kullanıldı. Gümüşe katılan SnO_2 takviyesinin miktarı bütün bileşimlerde ağırlıkça % 8 oranında sabit tutulurken, ikincil takviye olan TiO_2 'in oranı ise %1-7 arasında değiştirildi. SnO_2 oranının % 8 olarak seçilmesinde literatür araştırmaları ve kontak üretici firmaların katalog verileri etkili olmuştur [5, 8].

MA parametrelerinin optimizasyonu için yapılan deneylerde kullanılan Cu tozu maksimum 45 μm başlangıç boyutuna ve % 99 saflık değerine sahipken, W tozu 12 μm ortalama toz boyutu ve % 99,9 saflığındadır. Söz konusu deneylerde Cu matris, W ise takviye elemanı olarak kullanıldı. Element halindeki başlangıç Cu ve W tozları sırasıyla % 75 ve % 25 ağırlık oranlarında karıştırılarak MA için kullanılacak olan toz karışımı hazırlandı. Söz konusu karışım PCA miktarı, öğütme hızı ve BPR gibi parametrelerin kompozit toz morfolojisi ve boyutuna etkisini incelemek amacıyla farklı koşullarda öğütme işlemlerine tabi tutuldu.

2.2.2. Öğütücü Tipi

Öğütücüler kapasite, çalışma hızı, öğütme sıcaklığının kontrolü ve kirliliği azaltabilme gibi parametrelere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bunun dışında toz tipi, öğütülecek toz miktarı ve elde edilmek istenilen son içyapı gibi faktörler birlikte değerlendirilerek uygun öğütücünün seçilmesi gerekir [54]. Örneğin bazı alaşımların üretiminde SPEX salınımlı öğütücüler yaygın olarak kullanılmakta iken fazla miktarlarda toz öğütmek için ise gezegen tip öğütücüler (Fritsch Pulverisette) veya atritörler tercih edilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan kompozit tozlar Şekil 3'te fotoğrafı verilen gezegen hareketli bilyeli öğütücü (Fritsch Pulverisette 6) yardımıyla üretildi. Bu öğütücü tipinde, bilyelerin merkezkaç kuvvet etkisiyle tozlara daha etkili bir şekilde darbe uygulaması ve böylelikle kırılma veriminin artırılmasını sağlayacak şekilde, öğütme kabının

konumlandığı diskin hareketi ile öğütme kabının dönme hareketi birbirine zıt yöndedir. Sözü edilen cihazda öğütme hızı, öğütme/bekleme süreleri ve çevrim sayısı gibi deney parametreleri istenilen değerlerde ayarlanabilmektedir. Bir çevrim 2 dk öğütme ve 1 dk bekleme sürelerinin toplamına karşılık gelecek şekilde toplamda 3 dk olarak seçildi. Öğütme kabının aşırı ısınmasını engellemek amacıyla belirli çevrim sayıları sonunda MA işlemine 30 dk ara verildi.

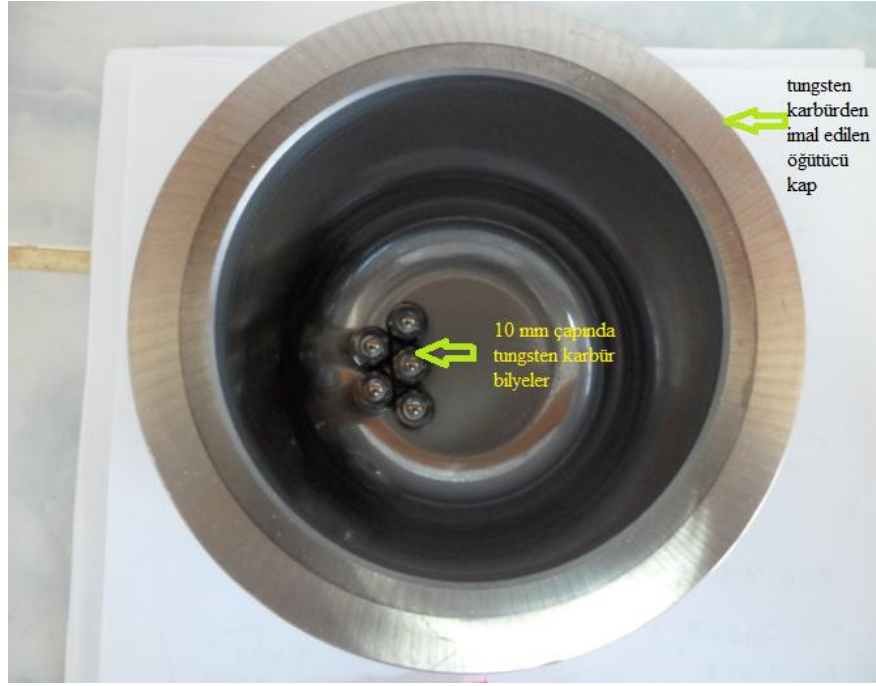


Şekil 3. Gezegen hareketli bilyeli öğütücü

2.2.3. Öğütme Kabının Malzemesi ve Bilyeler

MA işlemi süresince, öğütme ortamının kabın iç duvarlarına yaptığı darbe etkisi nedeniyle kap malzemesinin bir kısmı öğütülen toza karışabilir. Bu durum tozların kirlenmesine veya öğütülmüş tozun kimyasal bileşiminin değişmesine yol açabilir. Bu nedenle öğütme kabının üretilmesinde kullanılan malzemenin cinsi önem taşımaktadır. Ayrıca öğütme kabının malzemesinin öğütülecek tozdan farklı olması durumunda toz, kap malzemesi tarafından kirlenebilir. Diğer taraftan kap malzemesi ile tozun aynı cins malzemedenden olması da tozun kimyasal bileşimini değiştirebilir. Bütün bu faktörler dikkate alındığında öğütme kabı malzemesi olarak genellikle sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş krom çeliği, temper çeliği, paslanmaz çelik, tungsten karbür (WC),

WC-kaplı çelik ve rulman çeliği kullanılmaktadır. Ancak bazı uygulamalarda bakır, titanyum, sinterlenmiş korindon (alüminyum oksit), itriyum ile stabilize edilmiş zirkonya (zirkonyum dioksit) (YSZ), kısmi stabilize edilmiş zirkonya + itriya (itriyum oksit), safir, akik, sert porselen, silisyum nitrür (Si_3N_4) ve Cu-Be gibi malzemeler de tercih edilmektedir [54]. Bu çalışmada, sert malzemelerin öğütülmesine elverişliliği ve yüksek aşınma direncine sahip olması nedeniyle öğütme kabı malzemesi olarak WC tercih edildi (Şekil 4).



Şekil 4. Öğütücü kap ve bilyelerin bir arada görünümü

Tozların öğütülmesinde kullanılan bilyeler değişik uygulamalara yönelik olarak farklı malzemelerden ve geniş boyut aralıklarında üretilir. Burada dikkat edilmesi gereken hususlar öğütülecek malzemenin yapısı ve özellikleridir. Çok sert malzemelerin öğütülmesinde öğütme kabı içerisinde oluşabilecek aşınmaları en aza indirebilmek ve olası demir kirliliğini ortadan kaldırmak için genellikle WC bilyeler kullanılır. Ayrıca bilye malzemesi olarak akik, SiO_2 , sinterlenmiş korindon, Si_3N_4 , zirkonyum oksit (ZrO_2), paslanmaz çelik, temper çeliği ve tungsten karbür de tercih edilebilir [54]. Öğütücü bilyelerin çapları 3 mm'den 40 mm'ye kadar değişebilmektedir. Bu çalışmada öğütülecek toz karışımında yüksek sertliğe sahip MeO içeriğinin bulunmasından ve saflığı olumsuz etkileyen demir kirliliğinin en aza indirilmesi zorunluluğundan dolayı bilye malzemesi

olarak WC tercih edildi (Şekil 4). Kullanılan bilyelerin her biri 10 mm çap ve yaklaşık 8 g kütleyle sahiptir.

2.2.4. Yağlayıcı (PCA) Oranı

Öğütme sırasında aşırı deformasyona maruz kalan sünek yapıdaki toz parçacıkları arasında soğuk kaynak oluşumu gözlenir. Ancak bu durum toz parçacıkları arasında gerçek anlamda alaşımlama sağlanması için yeterli değildir. Toz parçacıklarının soğuk kaynak ve kırılması arasındaki dengenin sağlanması gerekir. Bu amaçla öğütme işleminde PCA (yağlayıcı veya yüzey aktifleştiricisi) kullanılarak aşırı soğuk kaynak etkisi azaltılır ve sistemin denge haline ulaşması kolaylaşır. PCA'lar çoğu kez yüzey aktifleştiricileri olarak rol oynayan katı, sıvı veya gaz halindeki organik bileşiklerdir. Bunlar toz parçacıklarının yüzeyinde absorbe edilirler ve toz parçacıkları arasındaki soğuk kaynağı minimize ederler. Böylece, toz toplanması veya topaklanma (aglomerasyon) önlenmiş olur. Parçacık yüzeylerinde absorbe edilen yüzey aktifleştiricileri soğuk kaynağı engelleyerek katı malzemenin yüzey gerilimini de azaltırlar.

Pratikte PCA'lar yaygın olarak kullanılmakta olup toz karışımının ağırlıkça % 1-5'i civarındaki miktarlarda ilave edilirler. En önemli PCA'lar stearik asit, hekzan, metanol ve etanoldür. Bunlara ek olarak dodekan, borik asit, boraks, alüminyum oksit, etil asetat, polietilen glikol, oksalik asit, alüminyum nitrat gibi bazı egzotik PCA'lar da kullanılmaktadır [54]. Bu bileşiklerin çoğu düşük ergime ve buharlaşma noktasına sahip olup, öğütme sırasındaki sıcaklık artışlarından dolayı o esnada ergir veya buharlaşırlar.

MA verimini etkileyen diğer bir parametre de kullanılan PCA miktarıdır. Şöyle ki yapılan bir çalışmada optimum orandan daha az miktarda PCA kullanılmasıyla öğütme sonrası toz boyutlarında optimum PCA oranındaki toz boyutuna göre bir miktar artış olduğu gözlenmiştir [59]. Öte yandan PCA miktarının artırılması ile birlikte toz boyutunda küçülmeler saptanmıştır. Örneğin, Zhang ve arkadaşları [60] alüminyumun % 1 ağırlık oranındaki stearik asit (PCA) ile 5 saatlik öğütülmesi sonucu toz boyutunun 500 µm civarında olduğunu; % 3 oranında stearik asit ile aynı zaman aralığında öğütülmesi sonucu ise aynı değer 10 µm civarında olduğunu belirlemişlerdir. Stearik asit oranının, Cu25W kompozit tozunun morfolojisi ve toz boyutlarına etkisinin incelendiği diğer bir çalışmada ise optimum PCA oranı ağırlıkça % 2 olarak belirlenmiş olup bu orandan daha yüksek miktarda (% 3) stearik asit kullanılmasıyla son toz boyutlarında minimum toz boyutuna göre bir miktar artış görülmüştür [59].

MA işleminde görülen soğuk kaynak ve kırılma olayları arasındaki dengenin sağlanabilmesi amacıyla Cu25W toz karışımına katı bir PCA türü olan stearik asit 4 farklı ağırlık oranında (0,5, 1, 2 ve 3) eklendi. Ayrıca aynı toz karışımının stearik asit ilavesi yapılmaksızın öğütülmesi de sağlanarak morfoloji ve toz boyutlarında meydana gelen değişimler karşılaştırmalı olarak incelendi. Böylece son toz boyut ve morfolojileri bir arada değerlendirilerek optimum PCA miktarı belirlendi.

Bu bilgilerin ışığında $Ag_8SnO_2-TiO_2$ kompozitlerinin sentezlenmesinde PCA cinsi olarak katı bir PCA olan stearik asit tercih edildi ve miktarı ağırlıkça % 2 olarak seçildi.

2.2.5. Öğütme Hızı

MA işleminin verimini etkileyen önemli bir parametre de öğütme hızıdır. Öğütme hızı çok düşük seçildiğinde soğuk kaynak ve kırılma olaylarının gelişimi yavaş seyretmekte ve dolayısıyla yüksek hızlarla kıyaslandığında aynı parçacık boyutuna inebilmek için çok daha uzun süreli öğütme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan öğütme hızının çok yüksek seçilmesi durumunda ise bilyelerin kabın alt kısmına inerek darbe uygulama hareketi engellenmekte ve öğütme sonrası toz boyutlarında optimum öğütme hızındaki toz boyutlarına nazaran bir miktar artış görülmektedir [61]. Bu ve buna benzer hususlar dikkate alındığında MA işleminde optimum öğütme hızının belirlenmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Öğütme hızının MA işlemi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Cu25W toz karışımı 200, 300 ve 400 d/dk olmak üzere üç farklı öğütme hızında ve farklı sürelerde MA işlemine tabi tutuldu. Her bir öğütme süresi sonunda öğütme hızındaki değişimlere bağlı olarak toz boyut ve morfolojisinde meydana gelen değişimler incelendi. Deneylerde stearik asit oranı ağırlıkça % 2 olarak seçildi. Yapılan deneyler sonucunda optimum öğütme hızı 300 d/dk olarak belirlendi. Bu nedenle $Ag_8SnO_2-TiO_2$ kompozitlerinin sentezlenmesinde de optimize edilen bu değerler kullanıldı ve öğütme süresine odaklanıldı.

2.2.6. Bilye-Toz-Ağırlık Oranı (BPR)

Öğütme hızından başka son toz boyutlarına etki eden diğer bir parametre de bilye-toz-ağırlık oranıdır (BPR). Bu oranın çok düşük seçilmesi tozların kırılması üzerinde olumsuz etki yaratmakta, çok yüksek seçilmesi ise öğütme ortamının sıcaklığının

artmasına neden olmaktadır. Bu durum soğuk kaynak olayını kırılmaya göre daha baskın hale getirerek son toz boyutlarında optimum BPR değerindeki toz boyutlarına göre bir miktar artışa sebebiyet vermektedir [63].

Bilye-toz-oranının MA işlemi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 5:1, 10:1 ve 20:1 olmak üzere üç farklı BPR kullanılarak farklı sürelerde MA deneyleri yapıldı ve her bir öğütme süresi sonunda BPR değerlerine bağlı olarak Cu25W toz karışımının boyut ve morfolojisinde meydana gelen değişimler incelendi. Yapılan deneyler sonucunda optimum BPR değeri 10:1 olarak belirlendiği için Ag8SnO₂-TiO₂ kompozitlerinin sentezlenmesinde de aynı değer kullanıldı.

2.2.7. Öğütme Süresi

Öğütme süresinin yeterli seviyede olup olmadığı; soğuk kaynak ve kırılma olayları arasındaki dengenin ve homojenliğin birlikte değerlendirilmesi ile mümkün olmaktadır [54, 57]. Öte yandan optimum öğütme süresi diğer parametrelerin seçimine bağlı olarak değişim göstermektedir. Bununla birlikte öğütme süresinin gereğinden uzun tutulmasının kirliliğin artmasına sebep olacağı ve özellikle de saflığın önemli olduğu uygulamalarda sorun teşkil edeceğinin göz ardı edilmemesi gerekir. Bu çalışmada optimum öğütme süresi; bütün bu hususlar, özellikle de parçacık boyutu ve homojenlik dikkate alınarak 25 saat olarak belirlendi.

Bu çalışmada incelenen AgSnO₂ esaslı ve TiO₂ takviyeli kompozit kontak malzemelerinin MA yöntemi ile üretilmesinde kullanılan deney parametreleri Tablo 1’de topluca listelenmiştir.

Tablo 1. MA deneyleri için belirlenen parametreler

| | |
|--|---|
| Öğütücü tipi ve modeli | Gezegen hareketli bilyeli öğütücü, Fritsch Pulverisette 6 |
| Öğütücü kap malzemesi | Tungsten karbür (WC) |
| Öğütücü bilye malzemesi ve çapı | WC bilyeler ($\Phi = 10$ mm) |
| PCA cinsi ve miktarı | Stearik asit (% ağı. 2) |
| Öğütme hızı (d/dk) | 300 |
| Öğütme süresi (h) | 0,5; 2; 4; 7; 10; 16; 20; 25 |
| BPR | 10:1 |
| Öğütme atmosferi | Hava |
| Öğütücü kap kapasitesi (ml) | 225 |

2.3. Toz Metalurjisi Yöntemi ve Üretim Parametreleri

Başlangıç tozlarının MA yöntemi kullanılarak optimum koşullar altında öğütülmesi sonucu elde edilen kompozit toz karışımı, Şekil 5'teki fotoğrafta görülen sıkıştırma kalıbına dolduruldu ve uygun presleme ekipmanı kullanılarak sıkıştırma işlemine tabi tutuldu. Böylelikle ham numuneler veya kompaktların üretimi TM yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Ancak ham kompaktlarda tozlar arasındaki bağlar mekanik yapıda olup, nihai ürün elde edilebilmesi amacıyla söz konusu bağların kimyasal yapıya dönüştürülmesi gerektiği için ham kompaktlara sinterleme işlemi uygulanmaktadır [53]. Sinterleme işleminin verimli olabilmesi yani gözenek oranının azaltılarak yoğunluğun artırılması ve ayrıca numunedeki oksitlenmenin minimum seviyeye indirilmesi amaçlarıyla söz konusu işlem genellikle argon gibi koruyucu bir gaz veya vakum ortamında gerçekleştirilir [85, 86]. TM yöntemindeki işlem parametrelerinin ürünlerin yapı ve özellikleri üzerindeki etkileri aşağıda kısaca ele alınmıştır.



Şekil 5. Kompozit tozların preslenmesinde kullanılan kalıbın görünümü

2.3.1. Sıkıştırma Basıncı ve Bekleme Süresi

Üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin istenilen seviyede olabilmesi için içyapılarındaki gözenek oranının mümkün olduğunca düşük olması gerekir. Bu amaçla sıkıştırma basıncı ve bekleme süresi gibi parametrelerin optimize edilmesi önem taşımaktadır. Örneğin Bıyık ve Aydın [87] tarafından yapılan bir çalışmada Ag₈ZnO elektrik kontak malzemesi dört farklı (90, 140, 180 ve 230 MPa) presleme basıncı

kullanılarak sıkıştırma işlemine tabi tutulmuş ve artan presleme basıncıyla ham yoğunluk değerlerinde artış, gözenek oranında ise % 5 seviyesine kadar azalma elde edilmiş ve ayrıca yoğunluktaki artışa paralel olarak mikrosertlik değerlerinde de artış gözlenmiştir. Presleme basıncı, daha önce Ag₈ZnO ile yapılan çalışmada [87] elde edilen veriler dikkate alınarak 350 MPa seçildi.

2.3.2. Sinterleme Atmosferi

Sinterleme işlemi argon, azot, hidrojen gibi koruyucu gazlar veya vakum ortamında yapılabilmektedir. Her ortamın mikroyapı ve dolayısıyla da özellikler üzerindeki etkisi farklı olmaktadır. Örneğin Amaranan ve Manonukul [88] tarafından yapılan bir çalışmada Ag tozundan ham kompaktlar üretilmiş ve söz konusu kompaktlar 900°C'de argon ve vakum olmak üzere iki farklı ortamda sinterlenmişlerdir. Vakum ortamında sinterlenen numunelerin argon ortamında sinterlenen numunelere göre daha yüksek yoğunluğa sahip oldukları tespit edilmiştir. Argon ortamında sinterlenen numunelerin nispeten düşük yoğunluğa sahip olmasının gözenekler içerisine hapsolan gaz ile ilişkili olduğu öne sürülmüştür. Bu bilgilerin ışığında bu çalışmada sinterleme işlemi vakum ortamında yapıldı.

2.3.3. Sinterleme Sıcaklığı ve Süresi

Sinterleme atmosferi seçildikten sonra sinterleme sıcaklığı ve süresi farklı bileşimler için optimize edilmelidir. Örneğin Taliyan ve arkadaşları [39] AgSnO₂ kompozit kontak malzemesine In₂O₃ takviyesi yaparak mekanik ve fiziksel özelliklerin değişimi ve sinterleme rejimini inceledikleri bir çalışmada en yüksek yoğunluk, sertlik ve elektriksel iletkenlik değerlerini 840°C sıcaklıkta ve 2 saatlik sinterleme süresinde elde etmişlerdir.

Bu çalışmada sinterleme sıcaklığı Ag₈SnO₂ malzemesi üzerinde kademeli olarak artırılarak (700, 800 ve 900°C) içyapı, gözenek, fiziksel ve mekanik özelliklere olan etkileri incelendi ve optimum sıcaklık değeri 900°C olarak belirlendi. Sinterleme süresi ise 1 saat olarak seçildi. Bu değerler kullanılarak TiO₂ oranının % 1-7 arasında değiştiği farklı kimyasal bileşimlere sahip kompozit kontaklar üretildi. Optimum ark-erozyon performansı gösteren bileşim tespit edildikten sonra 1-5 saat aralığında değiştirilen sinterleme süresinin

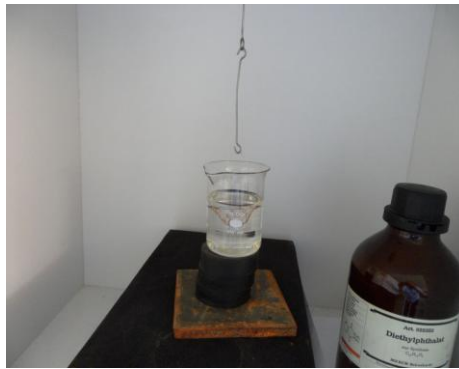
söz konusu bileşime sahip kompozit kontak malzemesinin yapı ve özellikleri üzerindeki etkileri incelendi.

2.4. Üretilen Kompozitlerin Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Sinterleme işlemi sonrası elde edilen kompozitlerin yoğunluk, gözenek oranı ve sertlik gibi bazı fiziksel ve mekanik özellikleri incelendi. Sinterleme sonrası yoğunluğun belirlenmesinde Archimedes yöntemi uygulandı. Söz konusu yöntemde kullanılan ekipmanın genel görünümü Şekil 6’da, detaylı görünümü ise Şekil 7’deki fotoğrafta verilmiştir. Üretilen kompozitlerin Şekil 7’de fotoğrafı verilen dietil fitalat ile dolu küçük bir beherdeki kütleleri hassas terazi kullanılarak 10^{-4} g tartım hassasiyetinde ölçüldü ve sinterleme sonrası yoğunluk değerleri hesaplandı. Ayrıca sinterleme sonrası kontak malzemelerindeki gözenek oranları da belirlendi.



Şekil 6. Archimedes yönteminde kullanılan terazi

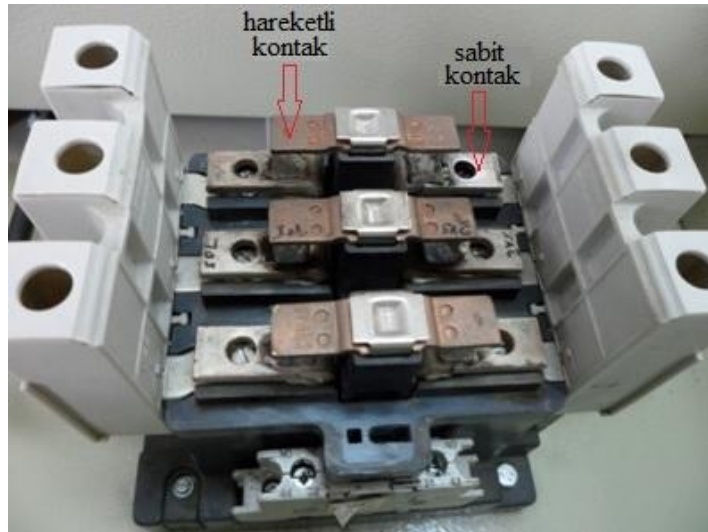


Şekil 7. Archimedes yönteminde kullanılan ekipmanın detaylı görünümü

Kontak malzemelerinin sertlik değerleri bilgisayar kontrollü mikrosertlik ölçüm cihazı (Innovatest 422D) kullanılarak Vickers cinsinden ölçüldü. Söz konusu değerler numune üzerinde yapılan beş ölçümün ortalaması alınarak belirlendi.

2.5. Üretilen Kompozitlerin Ark-Erozyon Performansının İncelenmesi

Kompozit kontak malzemelerinin ark-erozyon performansının incelenmesi için öncelikle bakır terminallere birleştirilmeleri gereklidir. Bu amaçla perçinleme, lehimleme veya gümüş kaynak yöntemlerinden biri kullanılabilir. Burada önemli olan husus, uygulama alanına göre en uygun birleştirme yönteminin seçilmesi yoluyla kontak sisteminin oluşturulmasıdır. Aksi halde kontaklar kendilerine uygulanan kuvvetler altında çabuk deforme olup bütünlüğünü koruyamaz. Kontakların bakır levhalara birleştirilmesi ile ilgili literatürde mevcut olan çalışmalar [89, 90] incelendikten sonra bu çalışmada kompozit kontakların bakır terminallere bağlanmasında en uygun yöntem olarak gümüş kaynak yöntemi seçildi. Söz konusu yöntem kullanılarak sinterlenmiş olan parçalardan biri sabit diğeri ise hareketli kontak olacak şekilde bakır terminallere birleştirildi. Bu işlemin ardından kontak yüzeyleri zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutuldu. Elde edilen kontakların yüksekliği yaklaşık 2,5 mm, çapları ise 6 mm olarak ölçüldü. Şekil 8’de görüldüğü gibi sabit kontaklar kontaktörün alt kısmına, hareketli kontaklar ise üst bölümüne uygun şekilde yerleştirildi.



Şekil 8. Sabit ve hareketli kontakların kontaktör üzerindeki görünümü

Ag₈SnO₂ kompozit kontak malzemesinin ve diğerk TiO₂ takviyeli kontakların aşınma performansları ark-erozyon deney düzeneği kullanılarak incelendi. Söz konusu düzenekte ark-erozyon deneyine tabi tutulan kontaklar belirli çevrim sayılarındaki aşınma sonunda kontaktörden çıkarılarak, kütleleri hassas terazide (KERN ABT 220-5DM) 10⁻⁵ g tartım hassasiyetinde ölçüldü ve böylece kütle kazancı/kaybı kümülatif olarak tespit edildi.

2.5.1. Ark-Erozyon Deney Düzeneği

Bu çalışma için tasarlanıp imal edilen ark-erozyon deney düzeneğini gösteren fotoğraflar Şekil 9 ve 10'da verilmiştir. Deney düzeneği kontaktör, elektronik flaşör, ileri/geri sayıcı, enerji analizörü, döner şalter, transformatörler, devre kesiciler, soğutma sistemi ve çalışma saati göstergesi gibi ana elemanlardan oluşmaktadır. Söz konusu düzenekte kontaklar Şekil 9'da gösterilen kontaktör içerisine yerleştirilmektedir. Deney düzeneğinin kontrol panelinde bulunan döner şalter ve akım aktifleştirme düğmesi aracılığıyla sistemin akımlı veya akımsız çalışması manüel veya otomatik olarak kontrol edilebilmektedir. Akım değiştirici düğmeler sayesinde kullanılacak akımın şiddeti 30 A değerine kadar çıkarılabilmekte ve bu akım değerı enerji analizörü üzerinden anlık olarak görüntülenebilmektedir. Kontakların belirli frekanslarda açılıp kapanmalarını sağlamak için kullanılan elektronik flaşör yardımıyla kontakların dakikadaki açma/kapama (çevrim) sayısı ve çevrim sonrası bekleme süresi kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Kontakların toplam çevrim sayısı ileri/geri sayıcı üzerinden, toplam çalışma süresi ise çalışma saati göstergesinden takip edilmektedir. Deney düzeneğine gerekli akımı sağlamak ve gerçek çalışma koşullarına en yakın sonuçları alabilmek için söz konusu düzenekte endüktif yük kullanılmıştır. Şekil 11'de endüktif yükün oluşmasını sağlayan transformatörler görülmektedir. Transformatörler sistemin güvenliğini sağlamak ve aşırı ısınma oluşmasını önlemek amacıyla devre kesiciler ve soğutma sistemi ile çevrilidir.

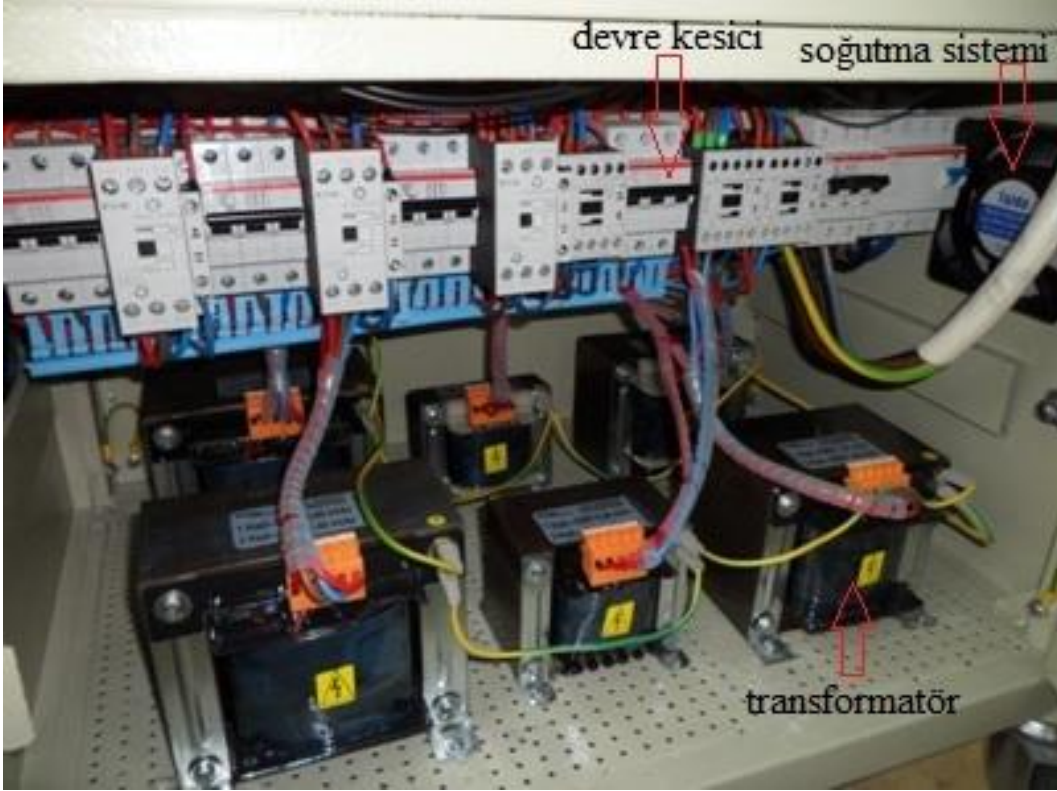
Üretilen kompozit kontakların aşınma performansını incelemeyden önce ark-erozyon deney parametrelerinin seçilmesi gereklidir. Bu amaçla akım değiştirici düğmeler aracılığıyla kademeli olarak 20 A'lık akım değerine kadar çıkılması öngörüldü. Deneyler endüktif yük ve alternatif akım (AC) koşullarında saatte 1.000 çevrim sıklığında gerçekleştirildi. Her çevrim sonrası bekleme süresi 2,6 s olarak ayarlandı.



şekil 9. Kontaktların aşınma performansının incelendiği ark-erozyon deney düzeneği



şekil 10. Ark-erozyon deney düzeneğinin dış görünümü



Şekil 11. Endüktif yüklerin kaynağı olan transformatörler ile devre kesiciler ve soğutma sisteminin görünümü

Üretilen kontakların Tablo 2’de listelenen parametreler doğrultusunda her 5.000 çevrimlik aşınma sonunda kontak yüzeylerinde meydana gelen değişimler incelendi.

Tablo 2. Ark-erozyon deneylerinde kullanılan parametreler

| | |
|----------------------------|---|
| Kontakt malzemesi | Gümüş-kalay dioksit esaslı kompozitler |
| Devre koşulları | AC 220 V, 20 A, Endüktif yük |
| Frekans | 50 Hz |
| Çevrim sayıları | 5.000 10.000 15.000 20.000 25.000 30.000 35.000 40.000 |
| Anahtarlama modu | Alternatif akım (AC) |
| Çevreleyen gaz | Hava |
| Anahtarlama sıklığı | 1.000 çevrim/saat |
| Bekleme süresi | 2,6 s |

2.5.2. Ark-Erozyonuna Maruz Kalan Yüzeylerin İncelenmesi

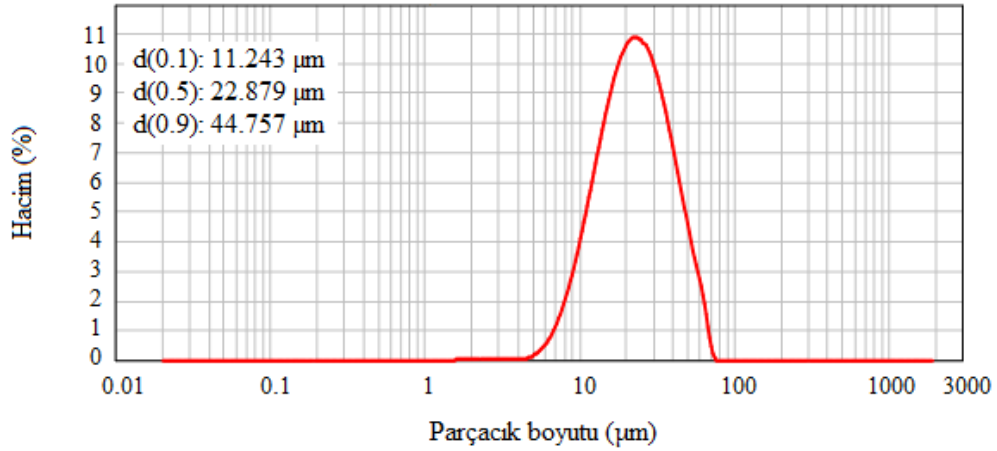
Sabit ve hareketli kontakların her 5.000 çevrime karşılık gelen aşınma yüzeyleri SEM yöntemiyle incelendi. Ayrıca kontak yüzeylerinde aşınma sonrası oluşan elementlerin dağılımını gözlemleyebilmek için taramalı elektron mikroskobuna bağlı EDS ünitesinden de faydalandı. Bu amaçla nokta, çizgi ve haritalama metotları kullanılarak aşınma yüzeyleri detaylı bir şekilde analiz edildi. Böylece ark-erozyonu sonucu kompozit kontakların yüzeylerinde meydana gelen bozunumlar 40.000 çevrim sayısına kadar incelendi. Yapılan deneyler sonucunda her kontak malzemesi çifti için elde edilen kütle kaybı ve yüzey bozunumu değerleri karşılaştırıldı ve TiO_2 oranının ark-erozyon performansına etkisi belirlendi.

3. BULGULAR

3.1. Başlangıç Tozları ve Karakterizasyonu

3.1.1. Toz Morfolojisi

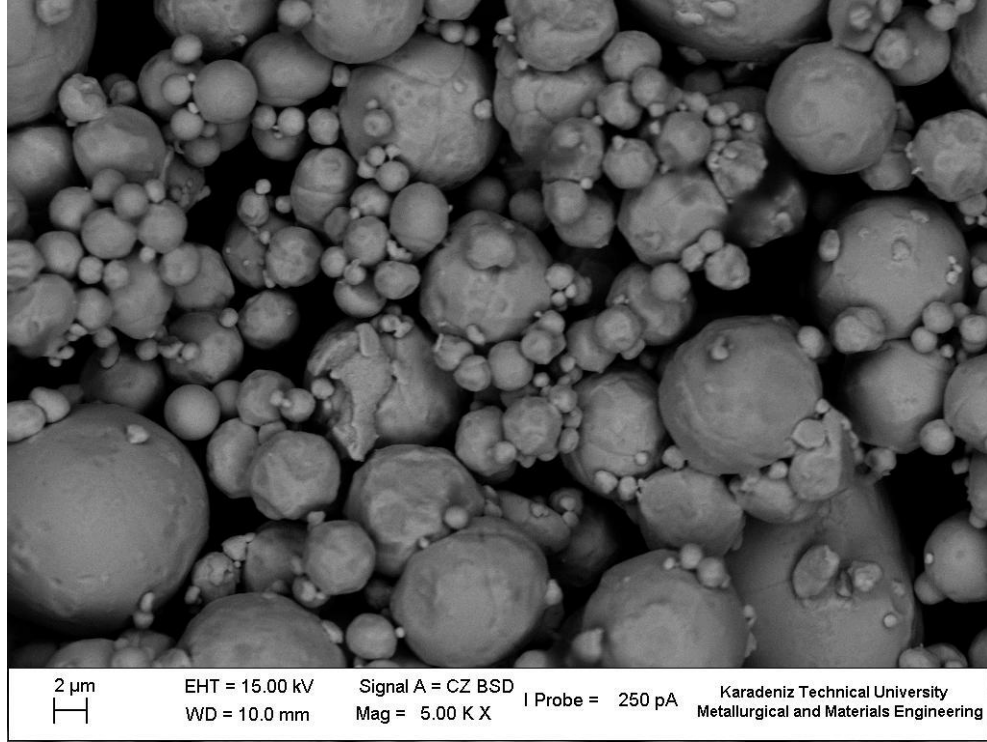
Piyasadan tedarik edilen ve maksimum boyutu 45 μm olan Ag tozunun parçacık boyut analizi sonucu elde edilen toz boyutu dağılımı eğrisi Şekil 12’de verilmiştir. Söz konusu şekil üzerinde d(0.9) değerine bakıldığında maksimum toz boyutunun 44,757 μm olduğu görülmektedir. Bu durum başlangıç toz boyutunun yaklaşık olarak 45 μm olduğunu doğrulamaktadır. Diğer taraftan toz karakterizasyonunda özellikle ortalama toz boyutunu temsil eden d(0.5) değerinin kullanılması tercih edilmektedir. Buna göre başlangıç Ag tozlarının ortalama toz boyutu 22,879 μm değerindedir.



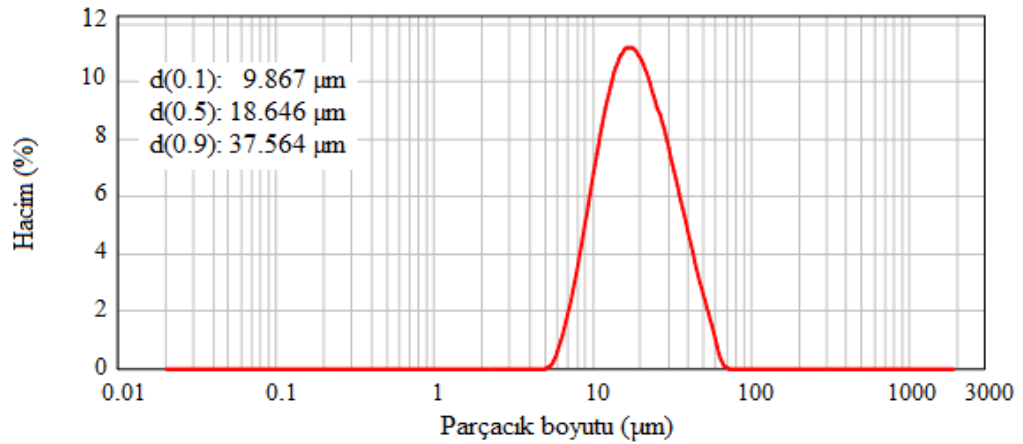
Şekil 12. Başlangıç Ag tozunun parçacık boyut dağılımı

Başlangıç Ag tozunun parçacık boyut dağılımı eğrisinde d(0.9)’luk dilimde yer alan nispeten büyük boyutlu tozların, MA işleminin sağlıklı yapılabilmesine engel teşkil edeceği düşünüldüğünden başlangıç tozlarının yapısındaki olası boyut farklılıklarını ortadan kaldırmak veya en aza indirmek için söz konusu tozlara elek ünitesinde eleme işlemi yapıldı. Bu işlemin aynı zamanda tozların daha homojen karışmasını sağlayarak MA işleminden daha yüksek oranda verim alınmasına katkıda bulunacağı öngörülmüştür.

Elek analizi sonucu elde edilen Ag tozunun morfolojik görünümü ve elenmiş tozların parçacık boyut analizi eğrisi sırasıyla Şekil 13 ve 14'te verilmiştir. Şekil 13'ten 25 μm elek altında kalan ve kompozit toz üretiminde kullanılacak olan Ag tozunun küresel şekle sahip olduğu ve Şekil 14'ten de söz konusu tozun elek analizi sonrası ortalama toz boyutunun 18,646 μm değerine düştüğü görülmektedir.

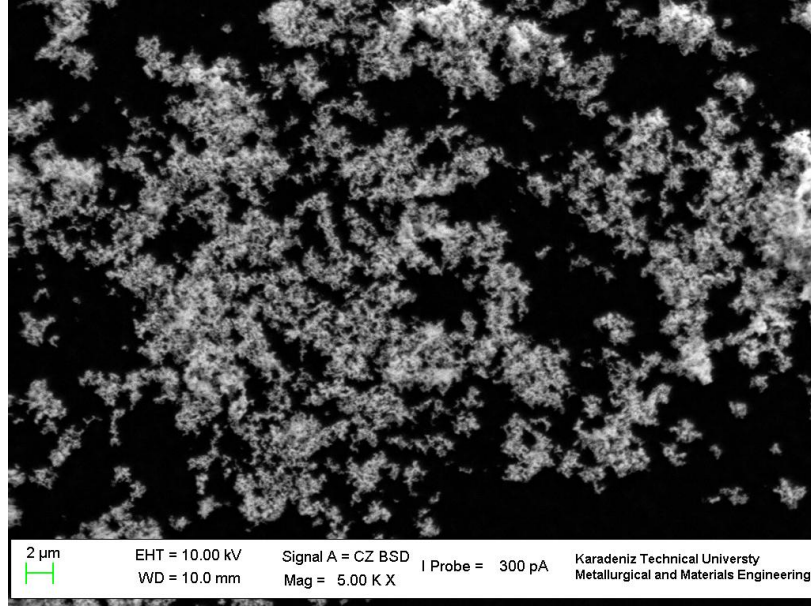


Şekil 13. 25 μm elek altında kalan Ag toz parçacıklarının görünümü



Şekil 14. Elek analizi sonrası Ag tozunun parçacık boyut dağılımı

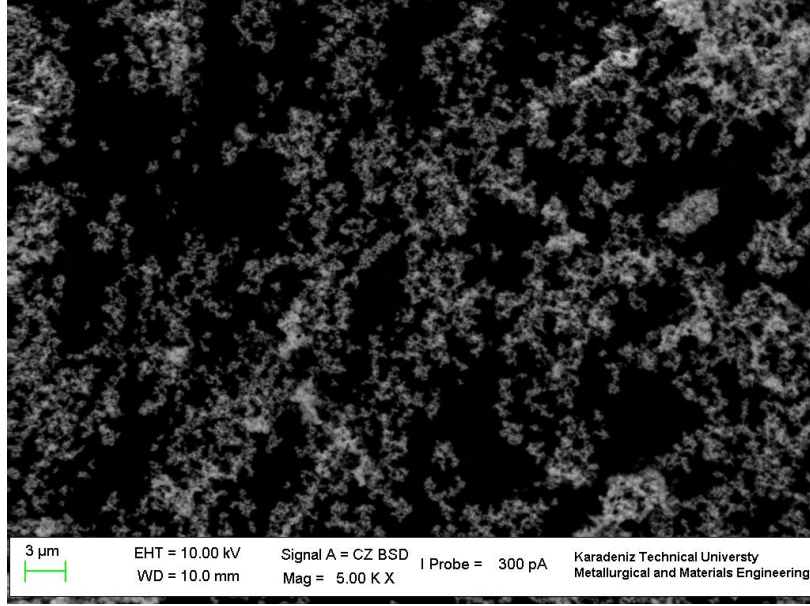
Başlangıç toz boyutu $10\ \mu\text{m}$ 'nin altında olduğu için elek analizi uygulanmayan ve doğrudan birincil MeO takviyesi olarak kullanılan SnO_2 tozunun morfolojik görünümü Şekil 15'te verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi SnO_2 tozu düzensiz bir morfolojiye sahiptir. İkincil takviye malzemesi olarak kullanılacak olan TiO_2 tozu ise maksimum $45\ \mu\text{m}$ başlangıç toz boyutuna sahip olduğu için söz konusu toza elek analizi uygulandı. Elek analizi sonrası toz morfolojisinin SnO_2 tozuna benzer şekilde düzensiz olduğu Şekil 16'daki SEM fotoğrafından görülmektedir. Şekil 15 ve 16'daki görüntüler karşılaştırıldığında TiO_2 tozunun SnO_2 tozuna göre daha düşük boyutta olduğu belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 15. Başlangıç SnO_2 tozunun SEM görüntüsü

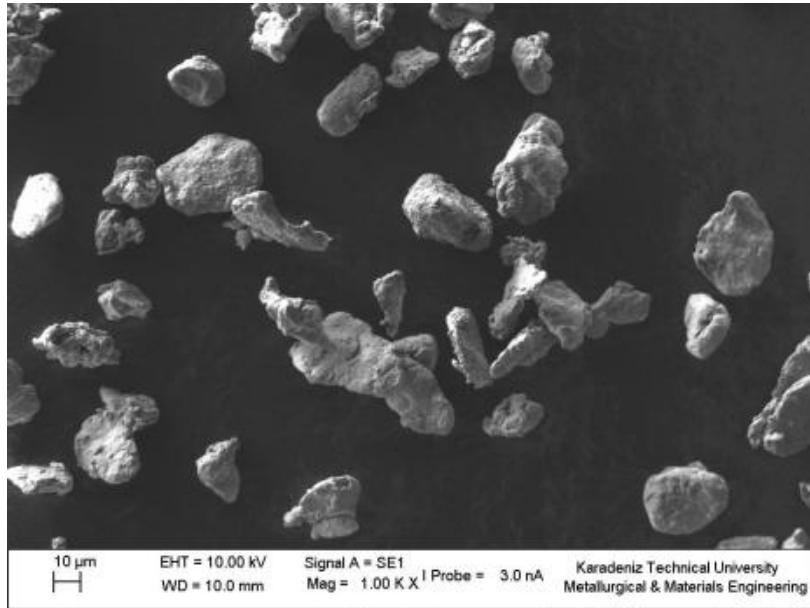
3.1.2. MA Deneylerindeki İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu

Kompozit tozların MA yöntemi ile etkili bir şekilde üretilebilmeleri için MA deneyleri öncesi PCA oranı, öğütme hızı ve BPR gibi bazı parametrelerin amaca uygun olarak seçilmesi önem arz etmektedir. Söz konusu parametreler Cu_{25}W kompozitinin sentezlenmesinde PCA oranı, öğütme hızı ve bilye-toz-ağırlık oranının toz boyutuna ve morfolojisine etkilerinin incelendiği üç farklı çalışmadan elde edilen optimum değerlerden seçildi. Söz konusu parametrelere ilişkin deney sonuçları aşağıda ayrı ayrı ele alınmaktadır.

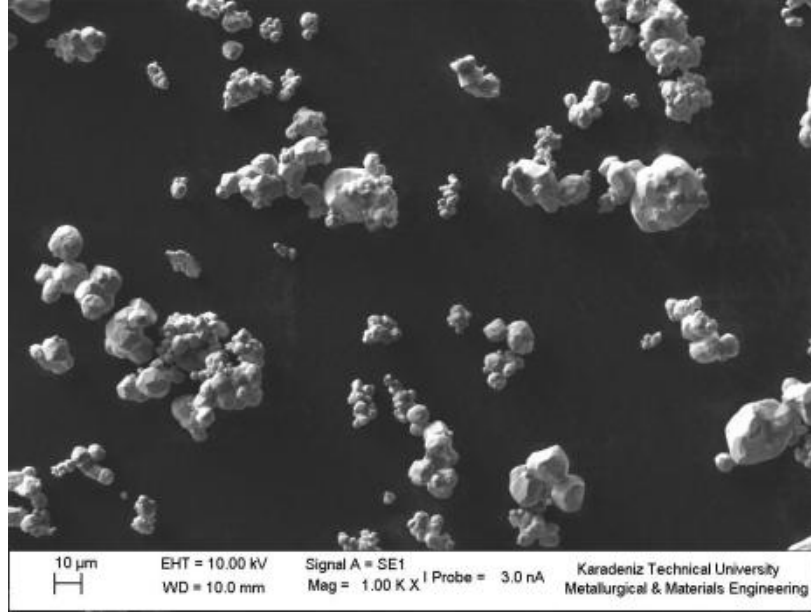


Şekil 16. Başlangıç TiO_2 tozunun SEM görüntüsü

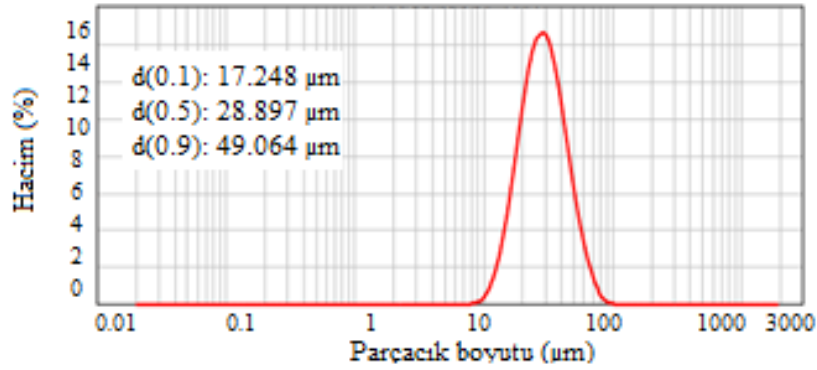
Piyasadan temin edilen Cu ve W tozlarının öğütme öncesi başlangıç morfolojilerini gösteren SEM fotoğrafları ve parçacık boyut analizi sonucu oluşan boyut dağılımını temsil eden eğri sırasıyla Şekil 17, 18 ve 19'da verilmiştir. Söz konusu şekillerden Cu tozunun düzensiz şekilli, W tozunun ise köşeli şekle sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 17. Başlangıç Cu tozunun SEM görüntüsü



Şekil 18. Başlangıç W tozunun SEM görüntüsü



Şekil 19. Başlangıç Cu tozunun parçacık boyut dağılımı

Şekil 19, Cu tozunun yaklaşık olarak 45 μm başlangıç boyutunda olduğunu doğrulamaktadır. Aynı şekilden Cu tozunun ortalama toz boyutunun 28,897 μm olduğu görülmektedir.

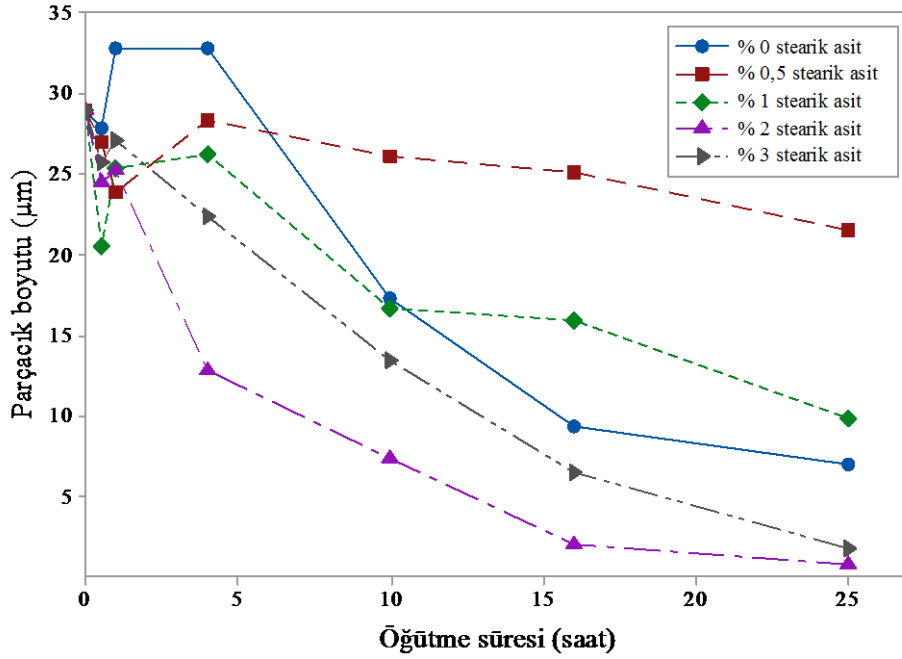
3.1.2.1. PCA Miktarı

Cu₂₅W toz karışımı kullanılarak yapılan MA deneyleri sonucunda her bir PCA miktarı için farklı öğütme sürelerine karşılık gelen parçacık boyut değerleri Tablo 3'te

verilmiştir. Bu tablodaki ortalama toz boyutu değerleri kullanılarak her bir PCA miktarına ve öğütme süresine göre değişim gösteren eğriler ise Şekil 20’de verilmiştir.

Tablo 3. Farklı miktarlarda PCA kullanılarak yapılan MA deneyleri sonucu Cu25W toz karışımında öğütme süresine bağlı olarak değişen ortalama toz boyutu değerleri

| | PCA oranı (% ağı.) | Öğütme süresi (saat) | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,5 | 1 | 4 | 10 | 16 | 25 |
| d_{50} , μm | 0 | 27,771 | 32,743 | 32,760 | 17,225 | 9,366 | 6,964 |
| | 0,5 | 26,911 | 23,869 | 28,296 | 26,096 | 25,130 | 21,462 |
| | 1 | 20,490 | 38,544 | 26,239 | 16,646 | 15,947 | 9,792 |
| | 2 | 24,401 | 25,190 | 12,765 | 7,290 | 1,933 | 0,726 |
| | 3 | 25,679 | 27,038 | 22,286 | 13,394 | 6,463 | 1,775 |
| | | | | | | | |

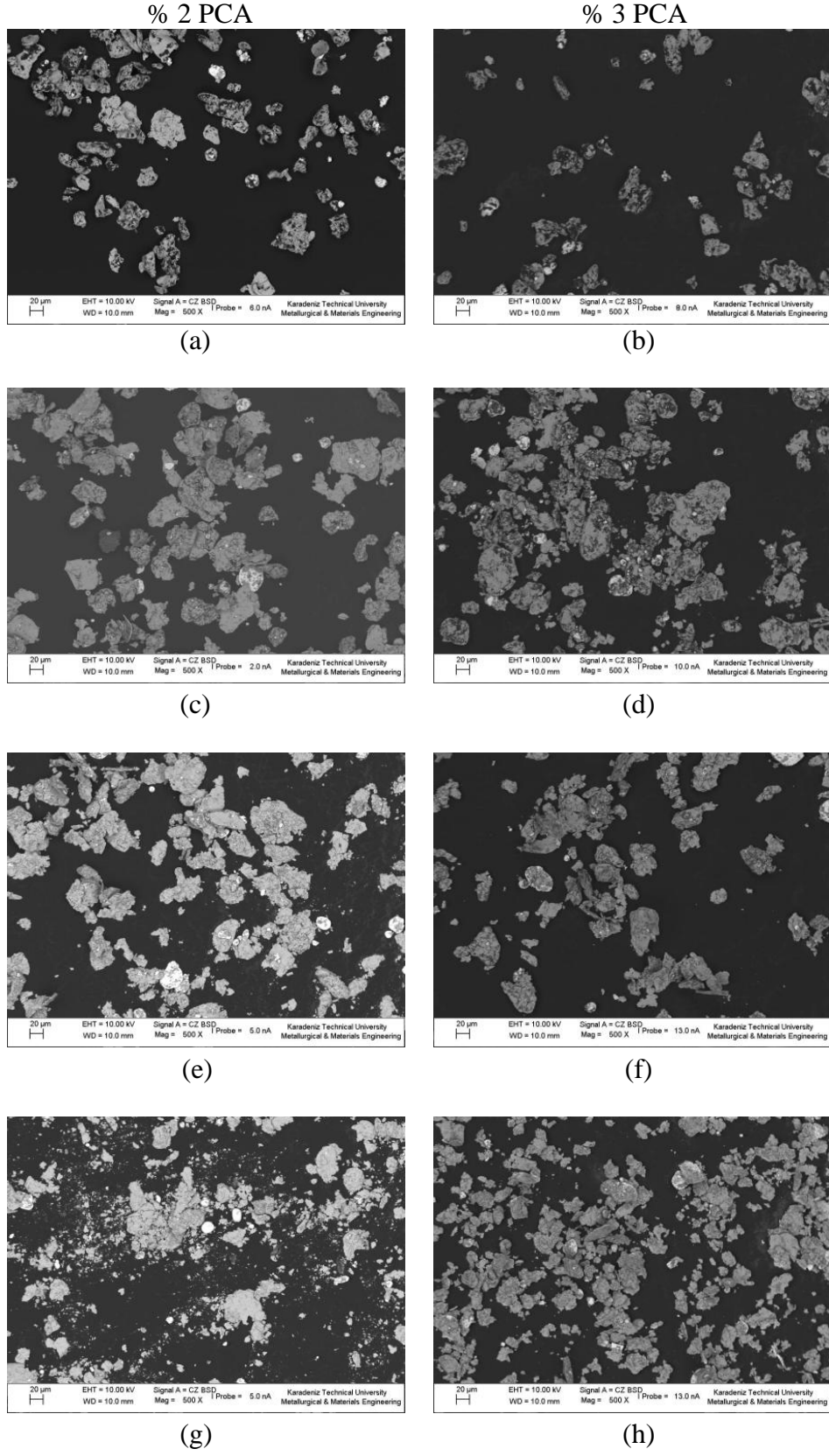


Şekil 20. Cu25W toz boyutunun PCA oranı ve öğütme süresinin fonksiyonu olarak değişimi

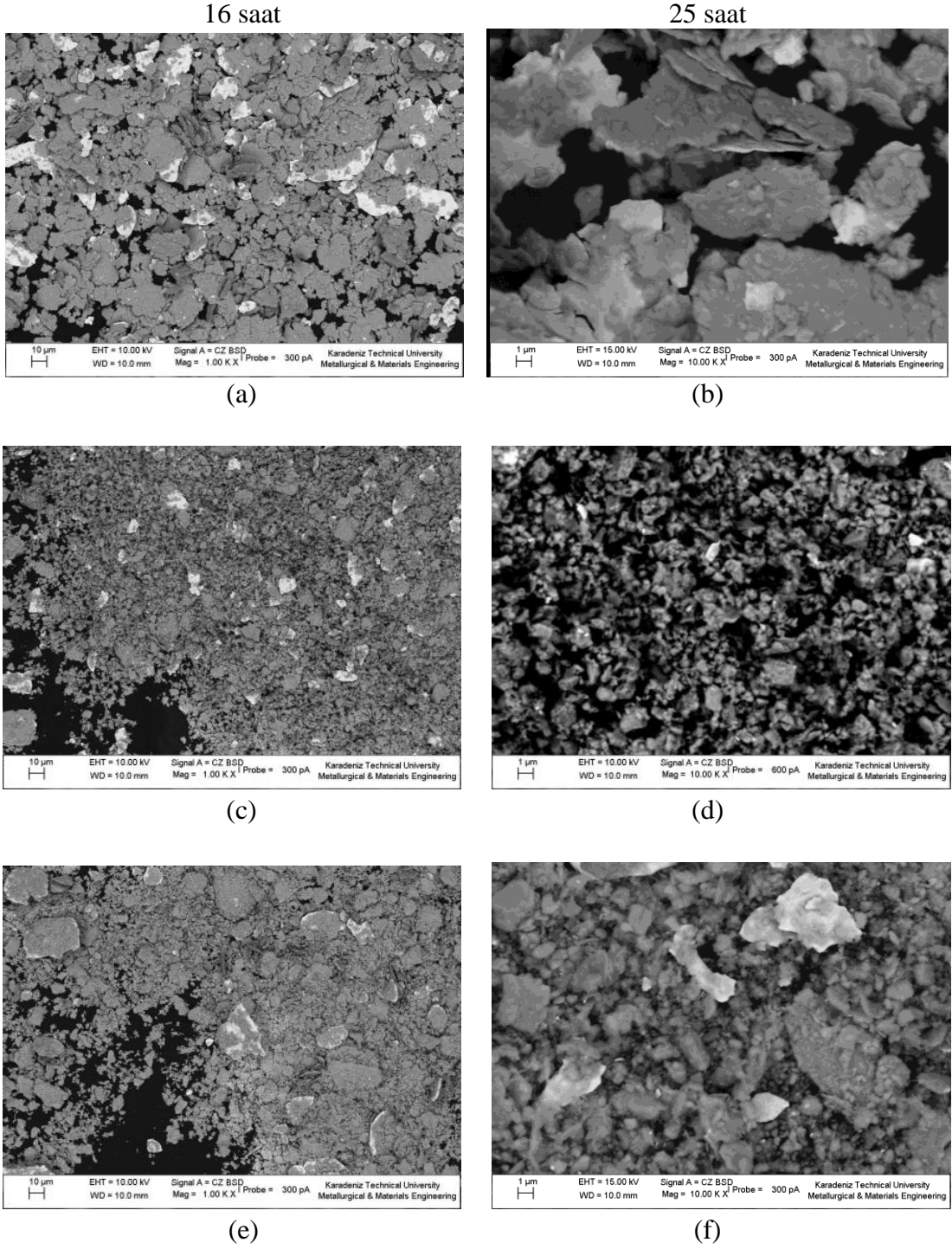
Şekil 20’de mavi ile gösterilen ve stearik asit katkısı içermeyen kompozitin sentezlenmesi esnasında öğütme işleminin ilk 4 saatinde oldukça kararsız bir morfolojik yapının sergilendiği toz boyutu değerlerindeki dalgalanmadan anlaşılmaktadır. Bu dalgalanma mor eğri ile gösterilen ve % 2 stearik asit içeren kompozitte minimum seviyeye inmektedir. Öğütme işleminin 4-10 saat aralığına denk gelen periyotta ise % 0,5 stearik asit katkılı kompozit hariç diğer tüm kompozitlerde azalan parçacık boyutuna bağlı

olarak etkin bir kırılmanın meydana geldiği görülmüştür. Söz konusu süre sonunda % 1 stearik asit içeren kompozit ile stearik asit içermeyen kompozitin benzer boyut aralığında olduğu görülmektedir. % 0,5'lik stearik asit içeren kompozitte katkısız kompozite göre daha yüksek toz boyutu elde edildi. Öte yandan katkı miktarı % 1'in üzerine çıktığında toz boyutlarında katkısız kompozite göre boyut küçülmesi gözlemlendi. 16 saat sonunda toz boyutlarındaki değişimin incelenmesi sonucunda genellikle kısmi kararlı bir morfolojik yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. Öğütme süresinin 16-25 saat aralığında değiştirilmesi sonucu toz boyutlarındaki azalmada yavaşlama olmaktadır. 16 saat sonunda tablodaki ortalama toz boyutu değerlerine bakıldığında minimum toz boyutunun % 2 stearik asit katkılı kompozitten elde edildiği belirlendi. Bu kritik oranın altındaki stearik asit katkıları kullanılarak yapılan MA deneylerinde ise son toz boyutlarında artış görüldü. Benzer şekilde, aşırı miktardaki PCA'nın da MA işleminin verimini etkileyerek son toz boyutlarını optimum duruma göre yükselttiği gözlemlendi. Dolayısıyla optimum PCA miktarı ağırlıkça % 2 olarak belirlendi.

Şekil 21'de % 2 ve % 3 stearik asit katkılı Cu25W toz karışımlarının 0,5, 2, 3 ve 4 saatlik süreyle öğütülmesi sonunda toz morfolojisinde gözlenen değişimler verilmiştir. Bu şekillerden, öğütme işleminin ilk aşamalarında sünek yapıdaki bakır tozlarının bilye-toz-bilye çarpışmaları etkisiyle düzleştiği görülmektedir. Özellikle % 2 PCA içeren toz karışımında kısmi plastik deformasyon etkisine rastlanılmıştır. Ancak % 3 PCA katkılı toz karışımında söz konusu etkinin azaldığı ve toz morfolojisinin daha az değişim gösterdiği gözlemlendi, Şekil 21b. Bu yüzden Şekil 21a'da pulsus şekle sahip parçacıklar oluşurken Şekil 21b'de başlangıçtaki düzensiz morfolojinin bir anlamda korunduğu tespit edildi. Tam pulsus morfolojinin oluşması yaklaşık 2 saatlik öğütme süresini bulmaktadır. Şekil 21e'den görüldüğü gibi, % 2 PCA katkılı numunenin 3 saatlik öğütülmesi sonunda oluşan toz morfolojisinde kırılma izleri belirgin hale geldiği için söz konusu sürenin sözü edilen numune için kritik bir değer oluşturduğu tespit edildi. Oysa % 3 katkılı numunede kırılma izlerinin görülmesi daha uzun öğütme sürelerinde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 21. % 2 ve % 3 PCA katkıları ile öğütülen Cu25W toz karışımının (a-b) 0,5, (c-d) 2, (e-f) 3 ve (g-h) 4 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri



Şekil 22. 16 ve 25 saatlik öğütme süreleri sonunda (a-b) % 1, (c-d) % 2 ve (e-f) % 3 PCA katkısı ile sentezlenen Cu25W kompozitlerinin morfolojik görünüşleri

Şekil 22’de 16 ve 25 saatlik öğütme süreleri sonunda % 1, 2 ve 3 stearik asit katkılı numunelerden elde edilen SEM fotoğrafları verilmiştir. Bu fotoğraflardan stearik asidin boyut küçülmesine etkisinin öğütme işleminin sonlarına doğru daha fark edilebilir

seviyelere ulaştığı görülmektedir. % 1 stearik asit katkılı numuneye ait fotoğrafların incelenmesinden, plastik deformasyon sonucu oluşan düzleşmenin kırılma olayına göre daha baskın olduğu tespit edildi. Bunun neticesinde Şekil 22a ve b'den toz morfolojisindeki pulsu şekle sahip parçacıkların çoğunlukta olduğu gözlemlendi. Diğer taraftan % 2 stearik asit katkılı numunede hem Cu hem de W'in etkin bir boyut küçülmesine maruz kalması sonucu çok daha homojen bir dağılım görüldü ve 16 saat sonunda kısmi eşeksenli bir toz elde edildi. Eşeksenli toza ulaşma ise ancak 25 saat sonunda mümkün olmuştur. % 3 stearik asit katkılı numuneye ait görüntüler incelendiğinde aynı süreler zarfında homojen dağılımın sağlanamadığı ve özellikle tungsten parçacıklarının kırılmasının güçleşmesi nedeniyle morfolojik yapıda kaba parçacıkların olduğu tespit edildi (Şekil 22f).

3.1.2.2. Öğütme Hızı

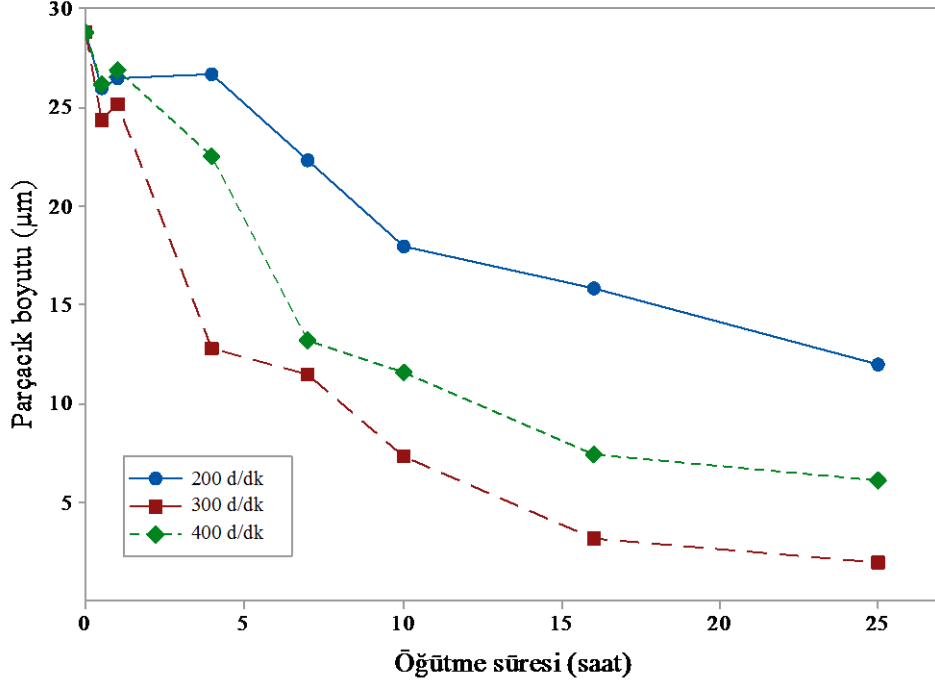
Cu25W toz karışımı kullanılarak yapılan MA deneyleri sonucunda her bir öğütme hızı için farklı öğütme sürelerine karşılık gelen parçacık boyut değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Farklı öğütme hızlarında elde edilen ortalama toz boyutunun öğütme süresine göre değişimini gösteren eğriler Şekil 23'te verilmiştir.

Tablo 4. Farklı öğütme hızlarında yapılan MA deneyleri sonucu Cu25W toz karışımında öğütme süresine bağlı olarak değişen toz boyutu değerleri

| | Öğütme hızı (d/dk) | Öğütme süresi (saat) | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,5 | 2 | 4 | 7 | 10 | 16 | 25 |
| d₅₀, µm | 200 | 26,045 | 27,206 | 26,723 | 22,365 | 18,042 | 12,034 | 10,395 |
| | 300 | 24,401 | 24,789 | 12,765 | 11,502 | 7,290 | 1,933 | 0,726 |
| | 400 | 26,191 | 25,578 | 22,541 | 13,262 | 11,547 | 6,112 | 7,055 |

Şekil 23'te görüldüğü gibi 200 d/dk hızda öğütülen toz karışımını temsil eden mavi eğri, kırılma işleminin diğer hızlarda yapılan öğütme işlemlerine göre oldukça yavaş seyrettiğini ortaya koymaktadır. Şöyle ki ilk 4 saatte oldukça kararsız bir morfolojik yapının oluşması nedeniyle toz boyutlarında artış gözlemlendi. 300 ve 400 d/dk hızlarında öğütülen tozlarda ise bu durumun tersi meydana geldi. 4-16 saatlik öğütme süresi aralığında toz boyutlarında hızlı bir azalma gözlemlendi. 16-25 saat aralığında ise bu eğilim

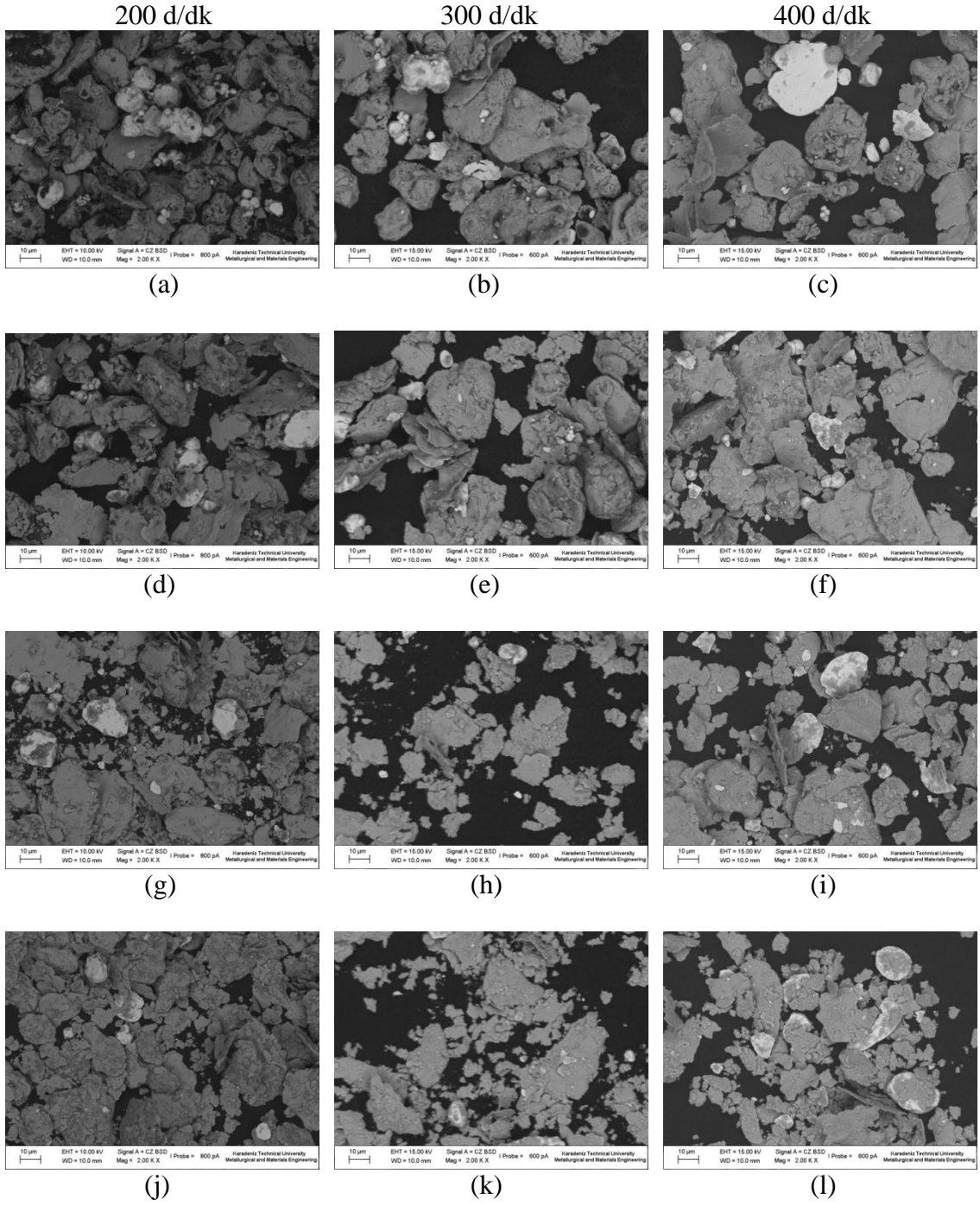
daha yavaş seyretmektedir. Söz konusu eğrilerin 25 saat sonunda ulaştığı ortalama toz boyutu değerleri dikkate alındığında, minimum toz boyutunun, dolayısıyla da optimum öğütme hızının kırmızı ile gösterilen eğriden elde edildiği görülmektedir. Buna göre optimum öğütme hızı 300 d/dk olarak belirlendi.



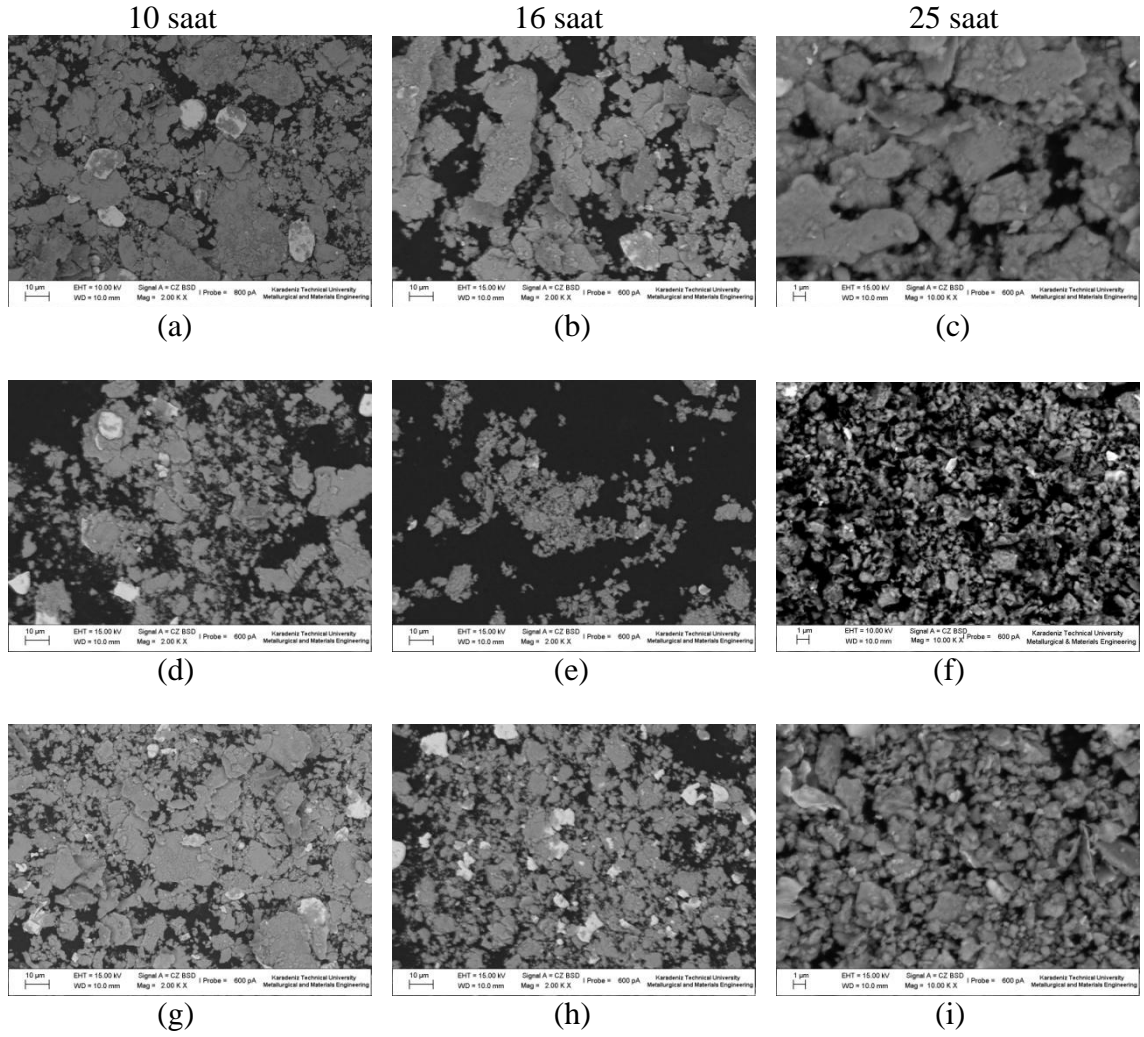
Şekil 23. Cu25W toz boyutunun öğütme hızı ve öğütme süresinin fonksiyonu olarak değişimi

Cu25W toz karışımından üç farklı devir sayısında ve 0,5, 2, 4 ve 7 saatlik öğütme süreleri sonunda elde edilen morfolojik değişimler Şekil 24’de verilmiştir. Bu şekilden 200 d/dk’lık hızla öğütme yapıldığında kırılmanın 7 saate kadar belirgin olmadığı ve MA veriminin çok düşük olduğu ve ayrıca pulsu bir morfolojik yapının ortaya çıktığı görülmektedir. Öte yandan öğütme hızının 300 d/dk’ya çıkartılması ile 4 saat sonunda kırılma izlerinin belirginleştiği gözlemlendi. Ancak devir sayısı 400 d/dk’ya yükseltildiğinde kırılma etkisi 7 saatlik süre sonunda ortaya çıkmaktadır.

Şekil 25’de ise 10, 16 ve 25 saatlik öğütme süreleri sonunda her bir öğütme hızı için Cu25W toz karışımının morfolojisinde ortaya çıkan değişimler verilmiştir.



Şekil 24. 200, 300 ve 400 d/dk'lık farklı öğütme hızlarında öğütme işlemine tabi tutulan Cu25W toz karışımlarının (a-b-c) 0,5, (d-e-f) 2, (g-h-i) 4 ve (j-k-l) 7 saat sonundaki morfolojik görünüşleri



Şekil 25. 10, 16 ve 25 saatlik süreler sonunda (a-b-c) 200, (d-e-f) 300 ve (g-h-i) 400 d/dk'lık farklı öğütme hızlarında öğütme işlemine tabi tutulan Cu25W toz karışımlarının morfolojik görünüşleri

Şekil 25 (a-c)'den görüldüğü gibi 200 d/dk'lık hızla öğütülen tozlarda 25 saatlik süre sonunda bile pulsu parçacıklar morfolojik yapıda kalmıştır. 300 d/dk'da öğütülen tozlarda ise 10 saat sonunda kısmi eşeksenli toz elde edilirken söz konusu morfolojik yapının 400 d/dk'lık hızla elde edilmesi 16 saati bulmaktadır. 25 saat sonunda 300 d/dk hızla öğütülen numunelerde minimum toz boyutuna sahip eşeksenli bir morfolojik yapı görüldüğü için söz konusu öğütme hızı optimum değer olarak tayin edildi. Bu optimum değerden yüksek öğütme hızında 25 saat sonunda ancak kısmi eşeksenli morfolojiye sahip toz elde edilebildi.

Öğütme hızı ve öğütme süresinin bir fonksiyonu olarak Cu25W toz parçacıklarının şeklinde meydana gelen tüm bu değişimler Tablo 5'te topluca verilmiştir.

Tablo 5. Farklı öğütme hızlarında yapılan MA deneyleri sonucu Cu25W toz karışımında öğütme süresine bağlı olarak toz parçacıklarının şeklinde meydana gelen değişimler; D: Düzensiz, P: Pulsu, KE: Kısmi Eşeksenli, E: Eşeksenli

| Parçacık şekli | Öğütme hızı (d/dk) | Öğütme süresi (saat) | | | | | | |
|----------------|--------------------|----------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | | 0,5 | 2 | 4 | 7 | 10 | 16 | 25 |
| | 200 | D | D + P | P | P | P + D | P + D | P + D |
| | 300 | D + P | P | P + D | P + D | P + KE | KE | E |
| | 400 | D + P | P | P | P | P + D | P + KE | KE |

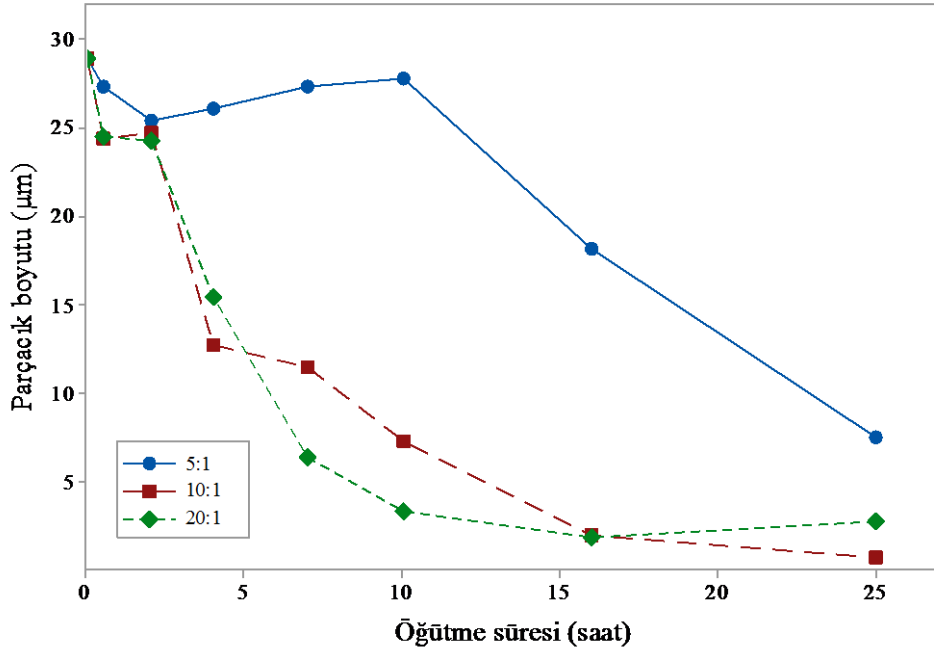
3.1.2.3. Bilye-Toz-Ağırlık Oranı (BPR)

Cu25W toz karışımı kullanılarak yapılan MA deneyleri sonucunda her bir BPR için farklı öğütme sürelerine karşılık gelen parçacık boyut değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablodaki ortalama toz boyutu değerleri kullanılarak elde edilen ve her bir BPR için parçacık boyutunun öğütme süresine göre değişimini gösteren eğriler Şekil 26'da verilmiştir.

Tablo 6. Farklı BPR kullanılarak yapılan MA deneyleri sonucu Cu25W toz karışımında öğütme süresine bağlı olarak değişen toz boyutu değerleri

| d_{50} , μm | BPR | Öğütme süresi (saat) | | | | | | |
|--------------------------|------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | 0,5 | 2 | 4 | 7 | 10 | 16 | 25 |
| | 5:1 | 27,356 | 25,363 | 26,116 | 27,394 | 27,792 | 18,158 | 7,459 |
| | 10:1 | 24,401 | 24,789 | 12,765 | 11,502 | 7,290 | 1,933 | 0,726 |
| | 20:1 | 24,500 | 24,300 | 15,479 | 6,408 | 3,247 | 1,789 | 2,692 |

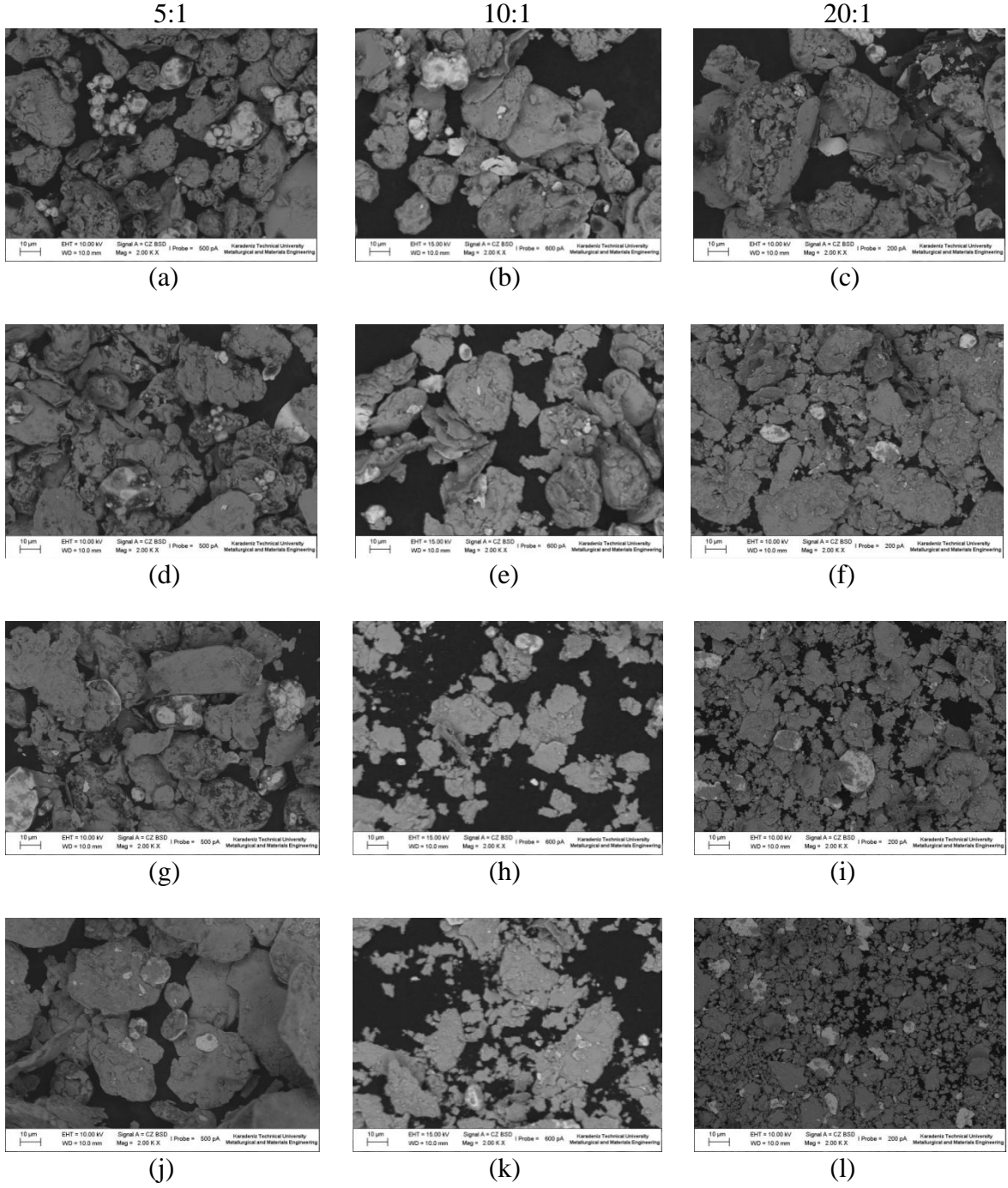
Şekil 26'da görüldüğü ilk 4 saatlik öğütme süresi sonunda BPR oranının toz boyutlarındaki etkisi birbirine benzer eğilimdedir. Ancak 4 saatten sonra özellikle BPR 5:1 olan ve mavi ile gösterilen eğrinin diğer eğrilerden aykırı bir davranış sergilediği görüldü. Şöyle ki söz konusu eğri 10 saate kadar toz boyutlarında artış sergilemektedir. 16 saatlik öğütme süresi sonunda kırmızı ve yeşil ile gösterilen ve sırasıyla BPR 10:1 ve 20:1 olan eğriler bir noktada kesişmektedir. Dolayısıyla 16 saat sonunda söz konusu şartlarda üretilen kompozitlerin yaklaşık olarak aynı toz boyutuna sahip oldukları görüldü. Ancak 16-25 saat aralığında en düşük toz boyutunun BPR 10:1 olan kompozitten elde edildiği söylenebilir. Bu nedenle optimum BPR 10:1 olarak seçildi.



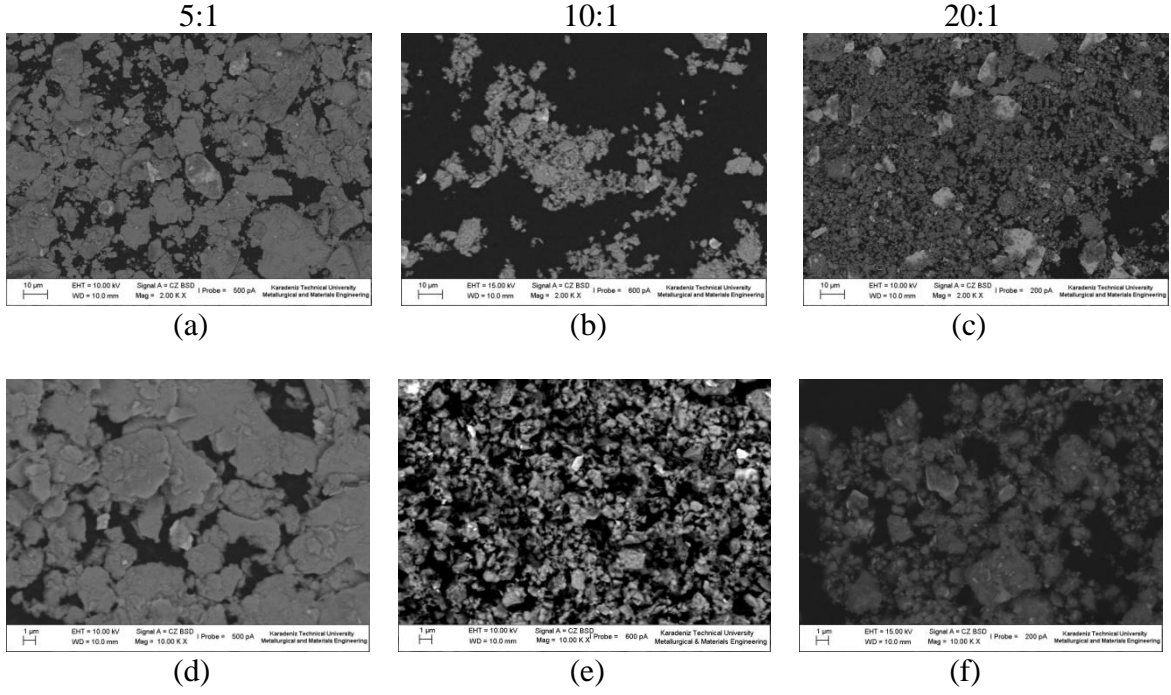
Şekil 26. Cu25W toz boyutunun BPR ve öğütme süresinin fonksiyonu olarak değişimi

Şekil 27’de 5:1, 10:1 ve 20:1’lik üç farklı BPR kullanılarak yapılan öğütme işlemi sonucunda ilk 7 saat için elementel Cu ve W toz karışımının morfolojisinde görülen değişimler verilmiştir. Söz konusu şekillerden belirlenmiş optimum değer olan 10:1’in altındaki BPR kullanılarak yapılan öğütme sonucu morfolojide pulsu şekle sahip parçacıkların hakim olduğu gözlemlendi. 10:1’lik BPR kullanılarak yapılan deneyde ise 7 saat sonunda pulsu şekle sahip parçacıkların kırılmasıyla boyut küçülmesi tespit edildi (Şekil 27k). Söz konusu süre sonunda 20:1’lik BPR ile yapılan deneyde toz parçacıklarının daha kaba bir dağılım sergiledikleri görüldü (Şekil 27l).

5:1, 10:1 ve 20:1’lik üç farklı BPR kullanılarak yapılan 16 ve 25 saatlik öğütme işlemleri sonucunda Cu25W toz karışımından elde edilen SEM fotoğrafları Şekil 28’de verilmiştir. Bu şekildeki fotoğraflardan düşük veya yüksek BPR kullanıldığında toz morfolojilerinin eşeksizli olmadığı görüldü. Buna karşın yüksek BPR kullanılarak yapılan deneylerde düşük BPR kullanılarak yapılan deneylere nazaran daha etkin bir kırılma mekanizması ile önemli oranda boyut küçülmesi sonucunda kısmi eşeksizli morfolojiye sahip tozun oluştuğu gözlemlendi.



Şekil 27. 5:1, 10:1 ve 20:1'lik farklı BPR değerlerinde öğütme işlemine tabi tutulan Cu25W toz karışımlarının (a-b-c) 0,5, (d-e-f) 2, (g-h-i) 4 ve (j-k-l) 7 saat sonundaki morfolojik görünüşleri



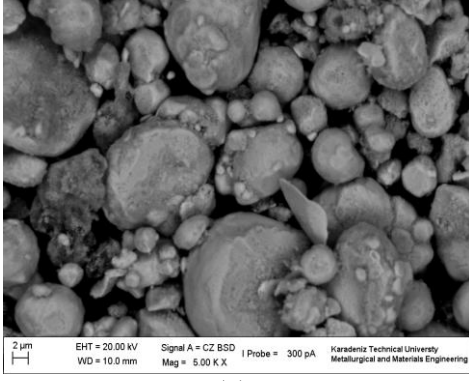
Şekil 28. 5:1, 10:1 ve 20:1’lik farklı BPR değerlerinde öğütme işlemine tabi tutulan Cu25W toz karışımlarının (a-b-c) 16 ve (d-e-f) 25 saat sonundaki morfolojik görünümleri

3.1.3. Öğütme Süresi ile $Ag_8SnO_2-TiO_2$ Kompozit Toz Morfolojisinin Değişimi

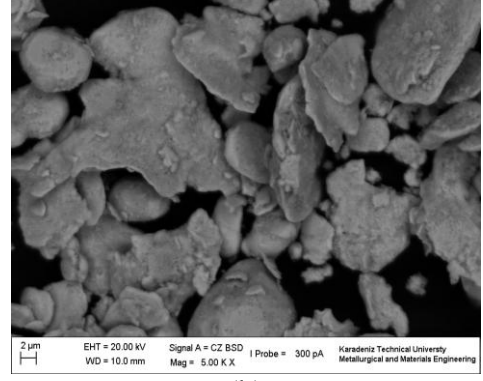
Farklı kimyasal bileşime sahip toz karışımlarından 0,5, 2, 4, 7, 10, 16, 20 ve 25 saatlik öğütme süreleri sonunda elde edilen kompozit tozlar SEM yöntemiyle detaylı bir şekilde incelendi. Ag_8SnO_2 , $Ag_8SnO_2-1TiO_2$, $Ag_8SnO_2-3TiO_2$, $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ ve $Ag_8SnO_2-7TiO_2$ toz karışımlarının farklı sürelerde (0,5-25 saat) öğütülmesi sonucunda elde edilen SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 29, 30, 31, 32 ve 33’te verilmiştir. Bu fotoğraflardan her bir bileşim için öğütme süresi arttıkça toz boyutunun genelde azaldığı görüldü. Ancak öğütmenin başlangıç aşamasına karşılık gelen 2 saatlik öğütme sonucunda oldukça kararsız bir morfolojik yapının elde edildiği gözlemlendi. Ayrıca bu fotoğraflardan toz morfolojisinde etken olan mekanizmalar belirlenmeye çalışıldı. Örneğin Şekil 29’da görüldüğü gibi Ag_8SnO_2 kompozit tozunun sentezlenmesinde ilk yarım saatlik öğütme süresi sonunda toz parçacıklarının başlangıç boyutlarına göre (18,646 μm) daha düşük boyutta (16,324 μm) ve düzensiz şekle sahip olduğu, dolayısıyla bu periyottaki etken mekanizmanın kırılma olduğu görüldü. Ancak 2 saatlik öğütmeden sonra SEM fotoğrafında da görüldüğü gibi soğuk kaynak olayının etkisi sonucu pulsu bir morfolojik yapı elde edildi. 7 saatlik öğütme işleminden sonra kırılmanın etkileri görülmeye başlanmış

ve bu etki sürekli boyut küçülmesiyle birlikte 20 saat sonunda morfolojik yapının kısmi kararlı bir hale gelmesini sağlamıştır. 25 saatlik öğütme süresi sonunda ise toz parçacıkları arasındaki boyut farklılığı minimal seviyeye inmiş ve toz kararlı hale ulaşmıştır. Ancak söz konusu süre sonunda ortalama toz boyutunun $4,831 \mu\text{m}$ seviyesine inmesiyle beraber toz parçacıkları arasında topaklanma eğiliminin arttığı da gözlenmiştir.

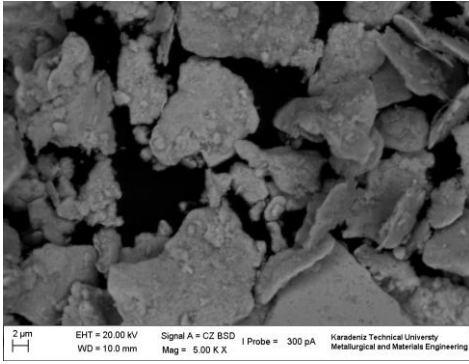
% 1 TiO_2 takviyeli kompozit tozunun sentezlenmesini gösteren Şekil 30'da takviyenin toz parçacıklarına gömülme eğiliminde olduğu görülmektedir. Ancak bu miktarın morfolojik yapı üzerinde fark edilebilir bir değişiklik yapabilecek seviyede olmadığı görüldü. Buna karşın TiO_2 miktarının % 3 seviyesine kadar artmasıyla pulsu şekle sahip parçacıkların kırılması için kritik takviye oranı yakalanmıştır. SEM görüntüleri arasındaki boyutsal farklılıklar bu durumu destekler niteliktedir. Sistem 10 saate kadar kararsız bir morfolojik yapı sergilemesine karşın özellikle 10 saatten sonra pulsu şekle sahip parçacıkların önemli oranda giderildiği gözlemlendi. Dolayısıyla 25 saatlik öğütme süresi sonunda toz boyutu $3,125 \mu\text{m}$ değerine düşmüştür. % 5 TiO_2 takviyeli kompozit tozunun sentezlenmesinde bu boyut düşüşü daha belirgin olup $2,851 \mu\text{m}$ seviyesine inmiştir. % 7 TiO_2 takviyeli kompozit tozunun sentezlenmesi sonucu 20 saate kadar % 5 TiO_2 takviyeli kompozit tozuna göre daha yüksek toz boyutu elde edilmesine rağmen 25 saat sonunda kırılma veriminde gözlenen artışa bağlı olarak ortalama toz boyutu $1,186 \mu\text{m}$ değerine düşmüştür.



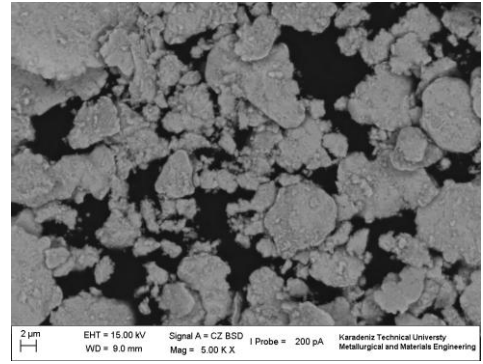
(a)



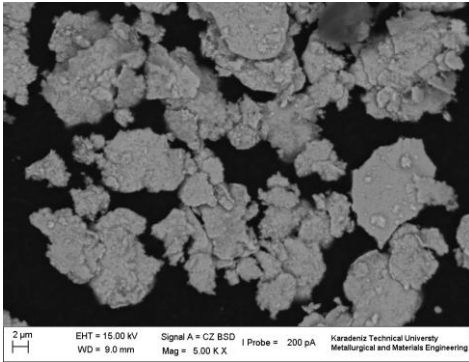
(b)



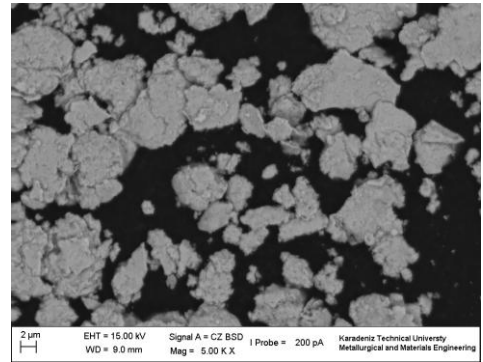
(c)



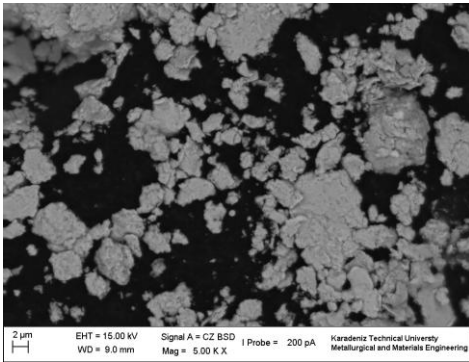
(d)



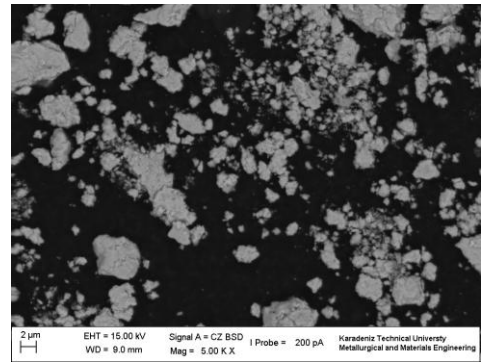
(e)



(f)

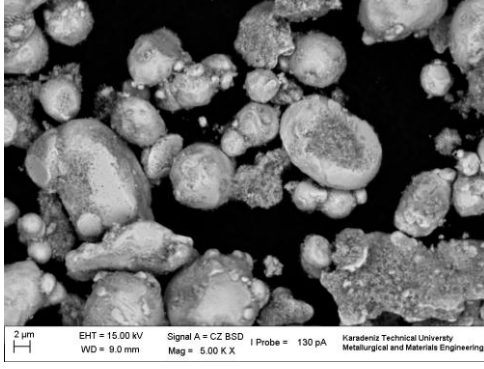


(g)

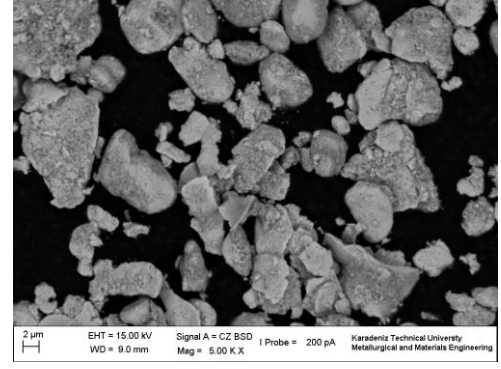


(h)

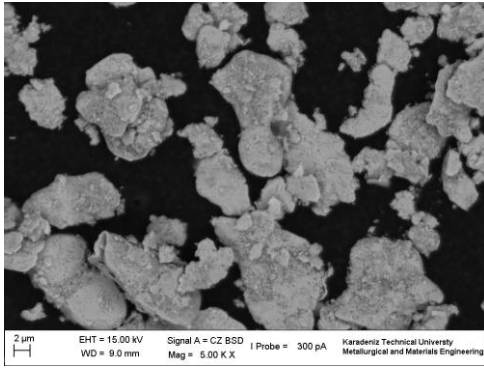
Şekil 29. Sentezlenen Ag_8SnO_2 kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri



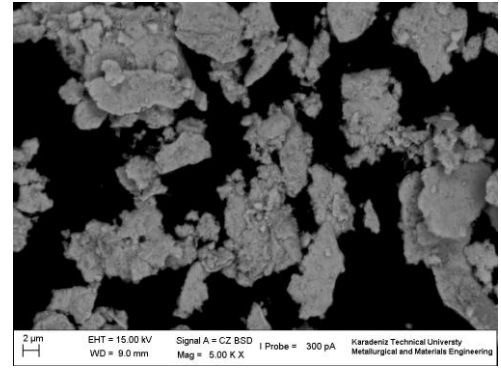
(a)



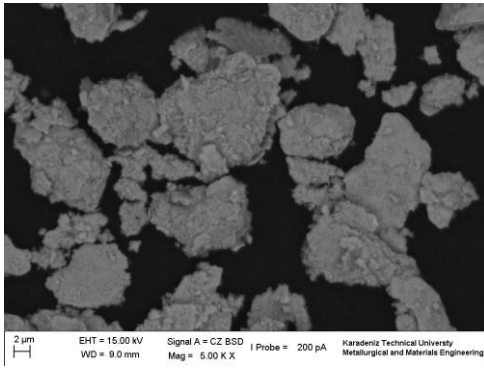
(b)



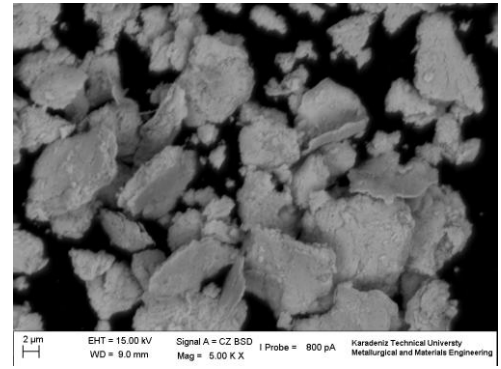
(c)



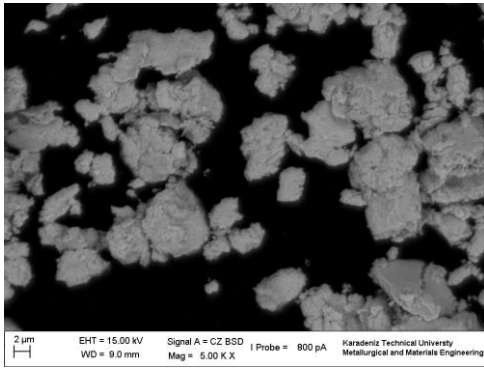
(d)



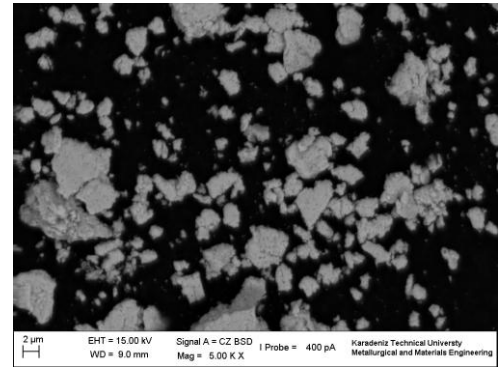
(e)



(f)

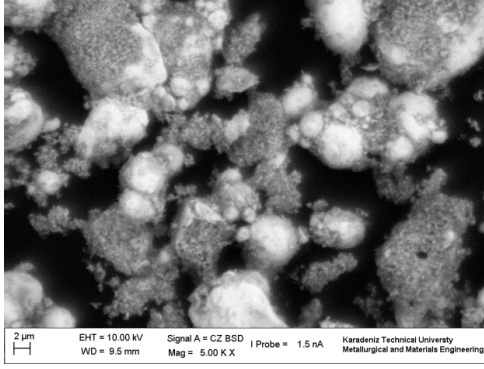


(g)

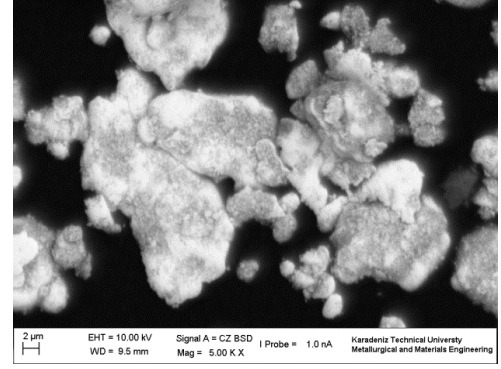


(h)

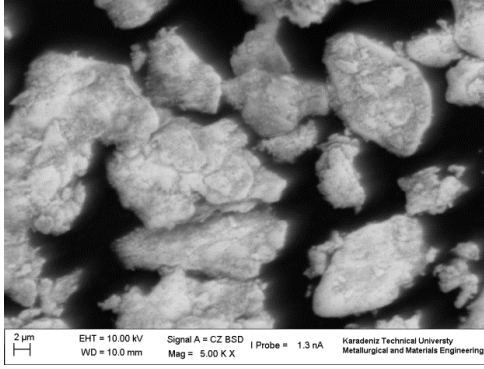
Şekil 30. Sentezlenen %1 TiO₂ takviyeli Ag₈SnO₂ kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri



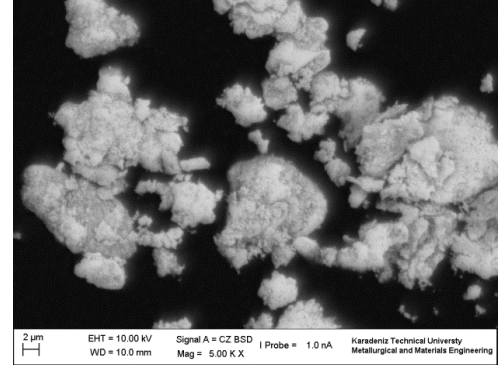
(a)



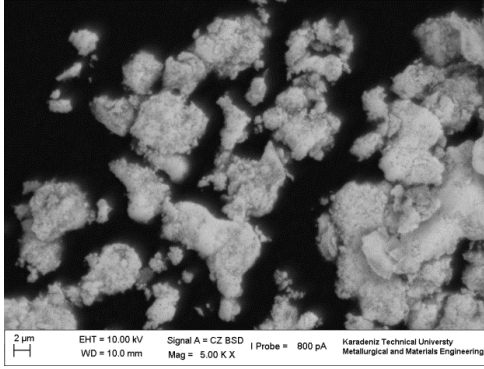
(b)



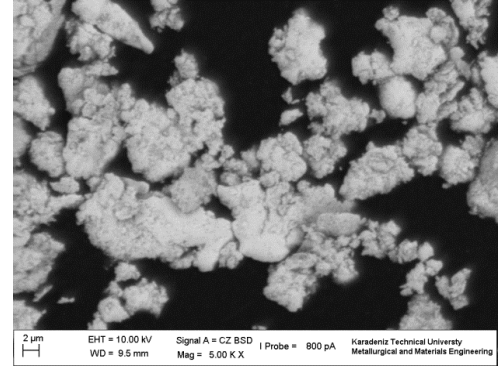
(c)



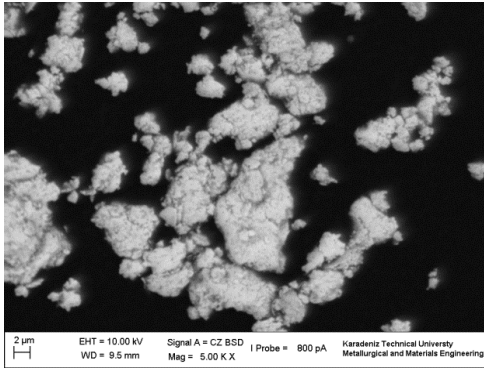
(d)



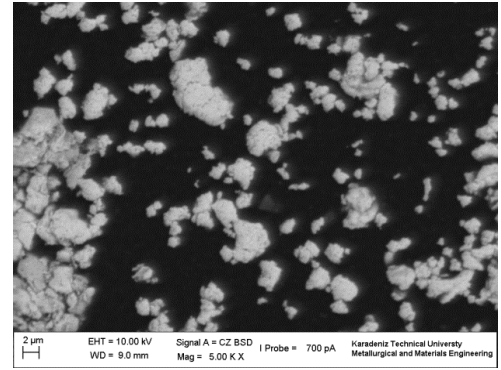
(e)



(f)

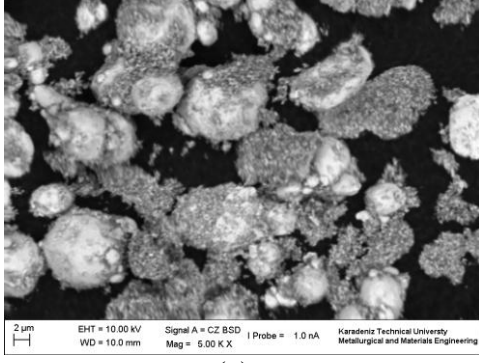


(g)

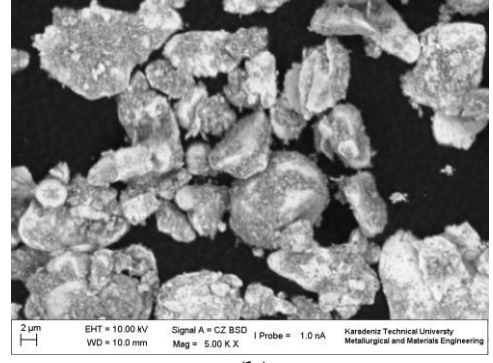


(h)

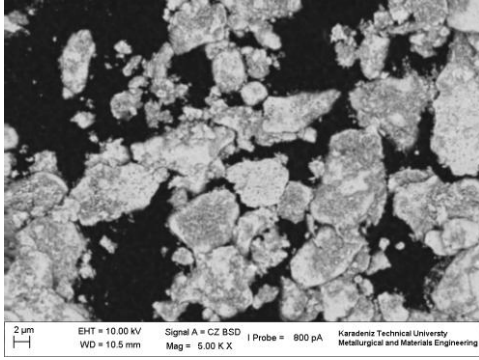
Şekil 31. Sentezlenen %3 TiO₂ takviyeli Ag₈SnO₂ kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri



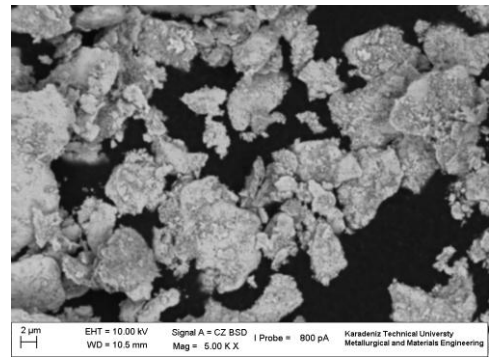
(a)



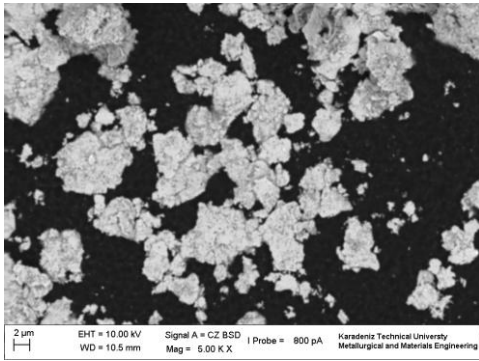
(b)



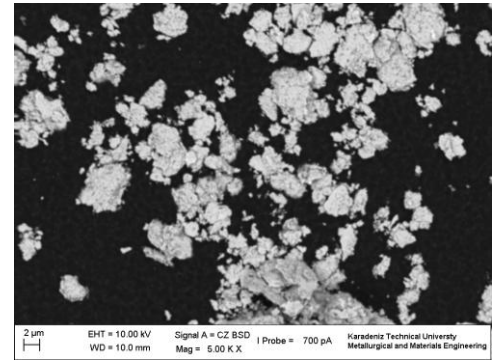
(c)



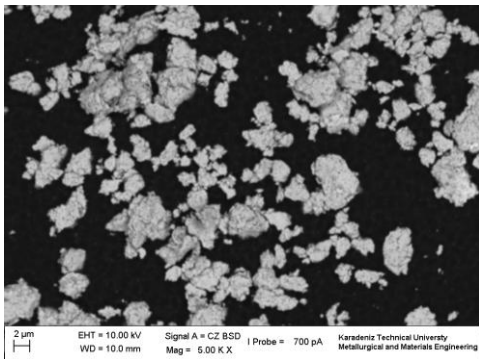
(d)



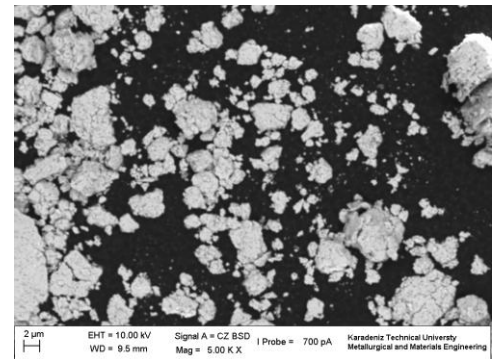
(e)



(f)

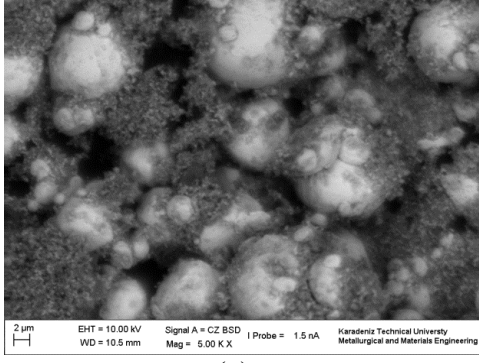


(g)

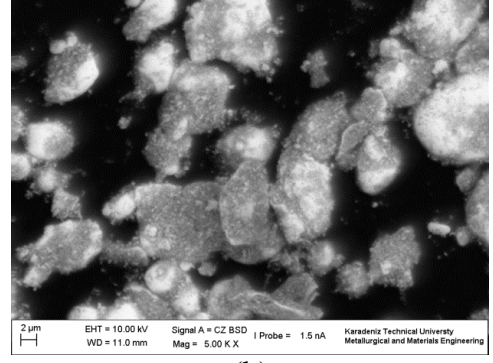


(h)

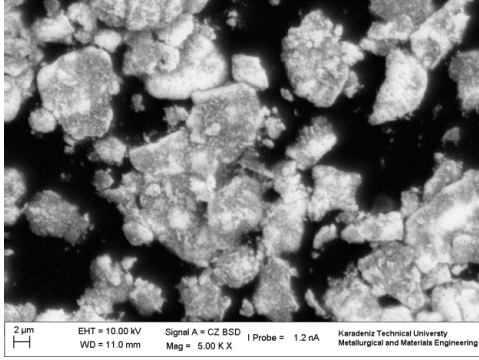
Şekil 32. Sentezlenen %5 TiO_2 takviyeli Ag_8SnO_2 kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri



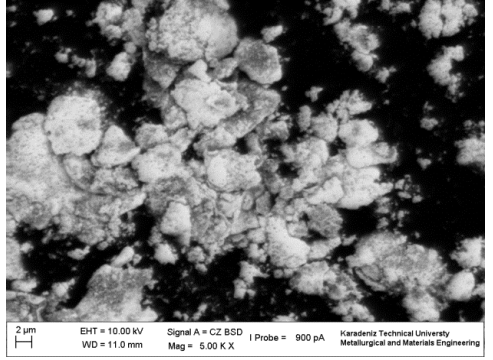
(a)



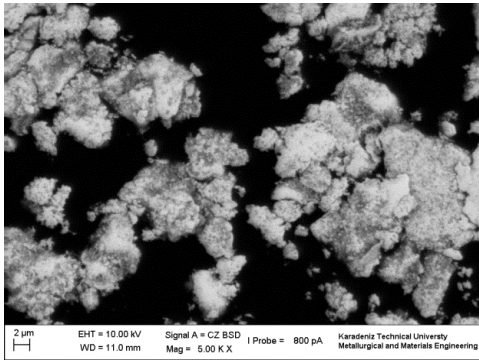
(b)



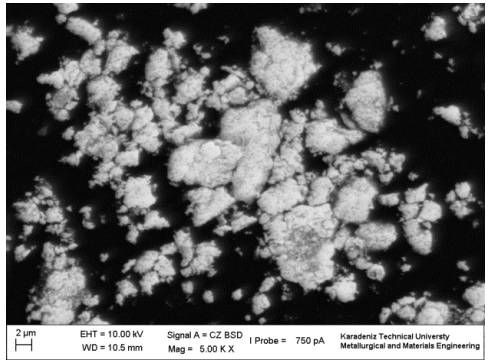
(c)



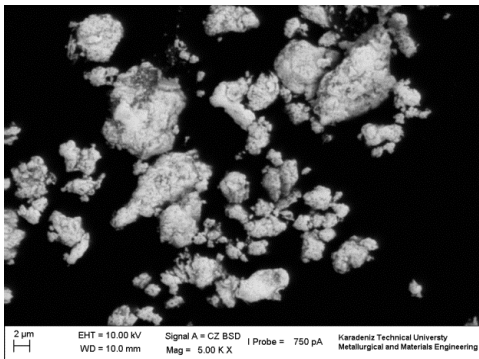
(d)



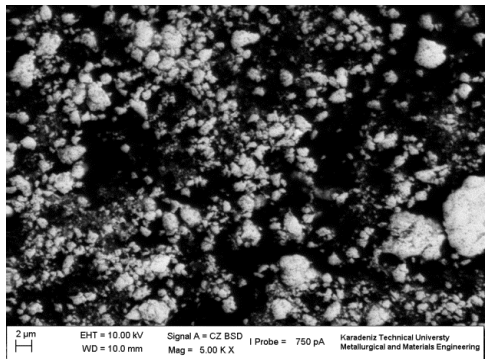
(e)



(f)



(g)

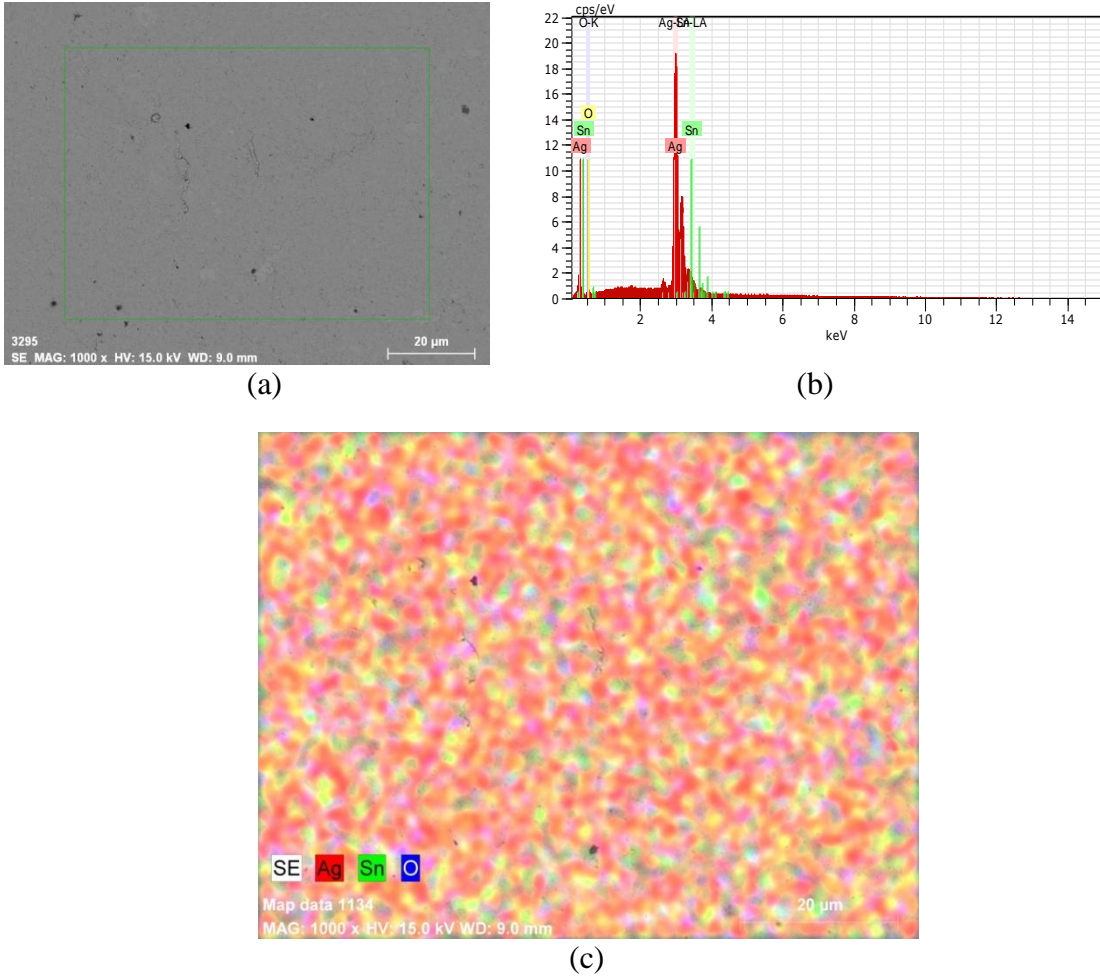


(h)

Şekil 33. Sentezlenen %7 TiO_2 takviyeli Ag_8SnO_2 kompozit tozlarının a) 0,5, b) 2, c) 4, d) 7, e) 10, f) 16, g) 20 ve h) 25 saatlik öğütme sürelerindeki SEM görüntüleri

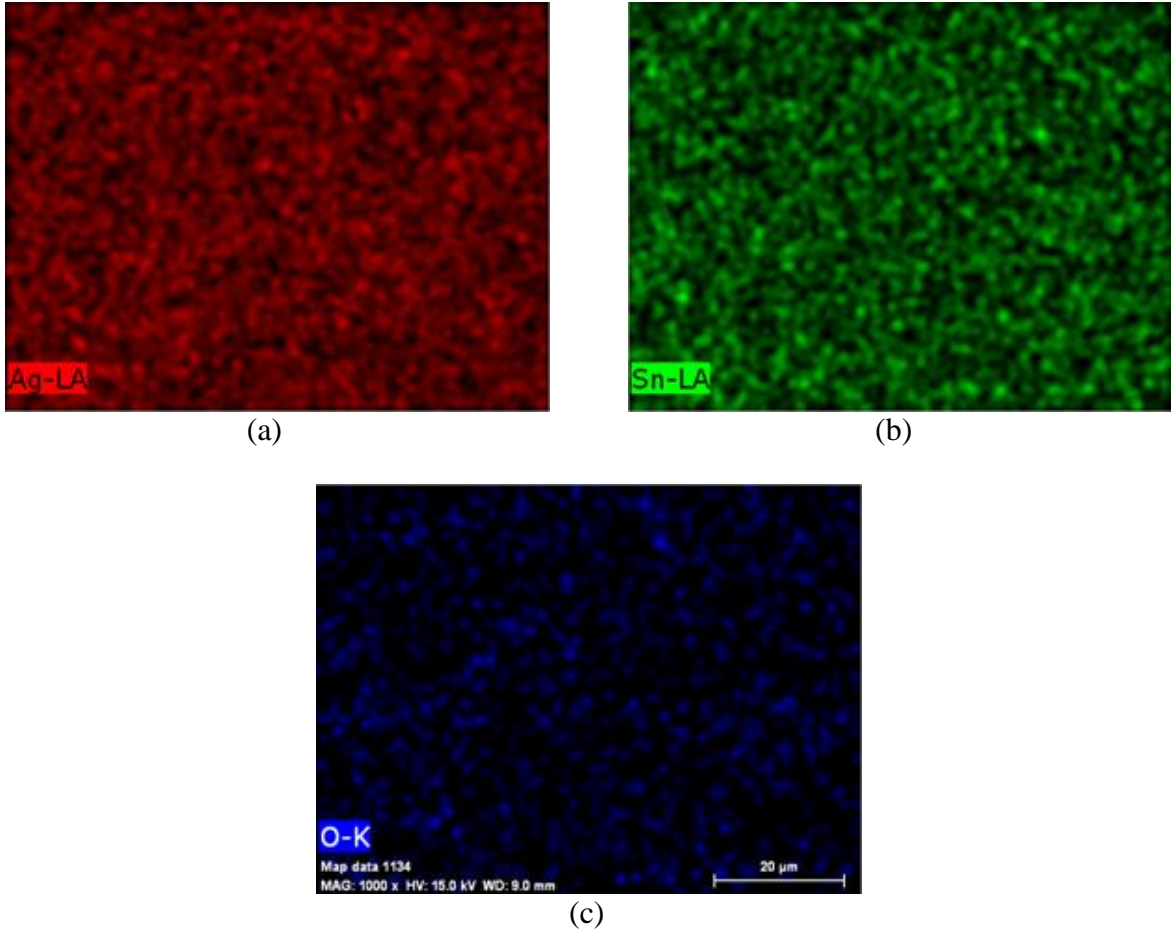
3.1.4. Matris – Takviye Etkileşimi

Matris-takviye etkileşiminin incelenmesi amacıyla farklı bileşimlerdeki başlangıç tozlarının 25 saat öğütülmesi sonucunda elde edilen kompozit tozlar 350 MPa basınçta preslenerek ham kompaktlar üretildi ve bunlar EDS analizine tabi tutuldu. Söz konusu kompaktlardan elde edilen EDS analizi sonuçları Şekil 34 ve 35’de verilmiştir. Elementlerin seçili bölgedeki dağılımını gösteren Şekil 34c’deki fotoğrafta kırmızı, yeşil ve mavi renkler sırasıyla gümüş, kalay ve oksijen elementlerini temsil etmektedir. Şekil 35 ise her bir element dağılımını ayrı ayrı göstermektedir.



Şekil 34. Ag_8SnO_2 ham kompaktının EDS analizi sonucu; a) haritalama yapılan bölgenin geri saçılmış elektron (BSE) modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki dağılımı

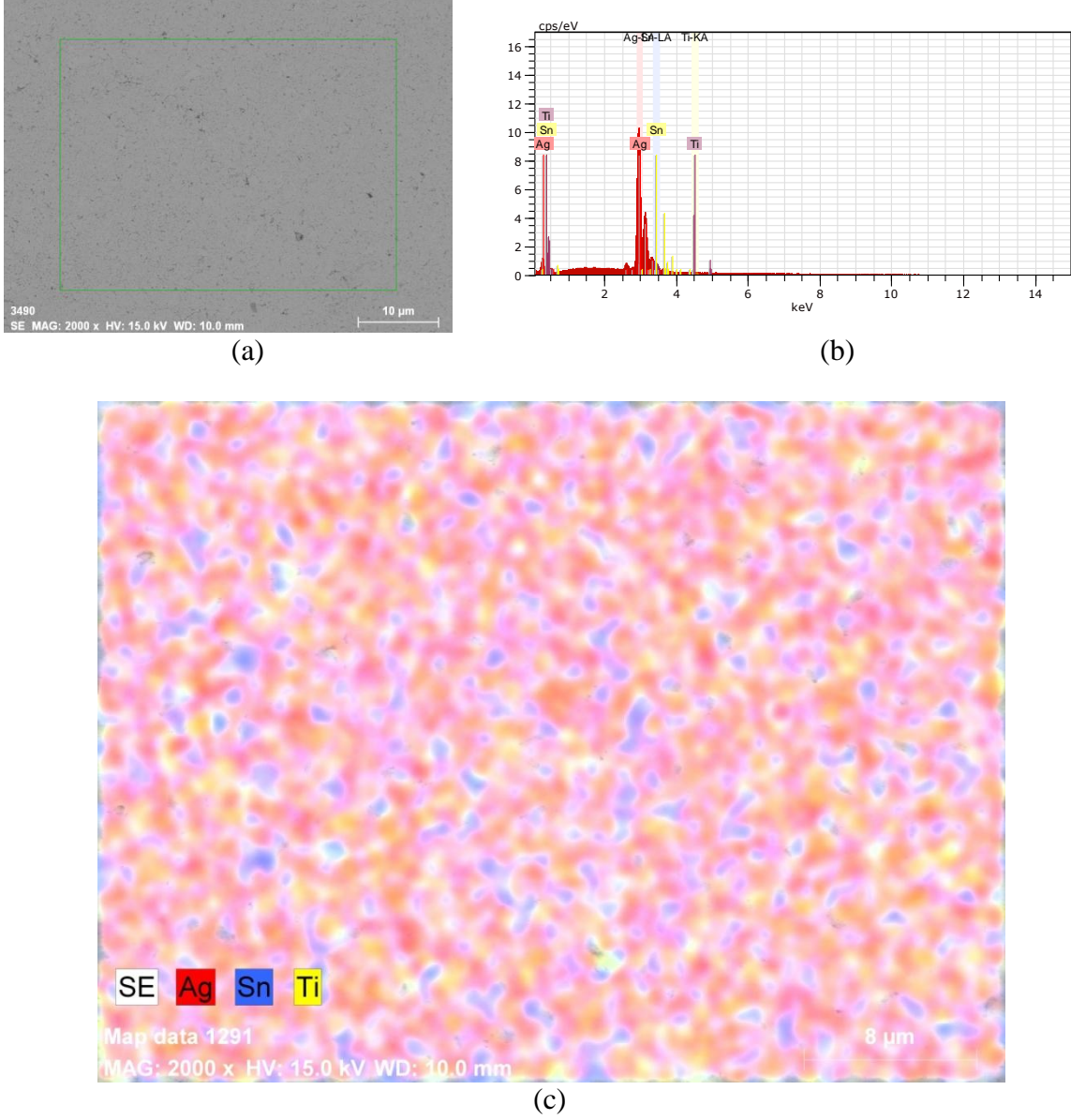
Söz konusu şekiller incelendiğinde 25 saatlik öğütme süresinin, takviye fazının matris içerisinde homojen dağılması için yeterli seviyede olduğu sonucuna varılmaktadır. Dolayısıyla diğer TiO_2 takviyeli toz karışımlarının da aynı sürede öğütülmeleri öngörüldü.



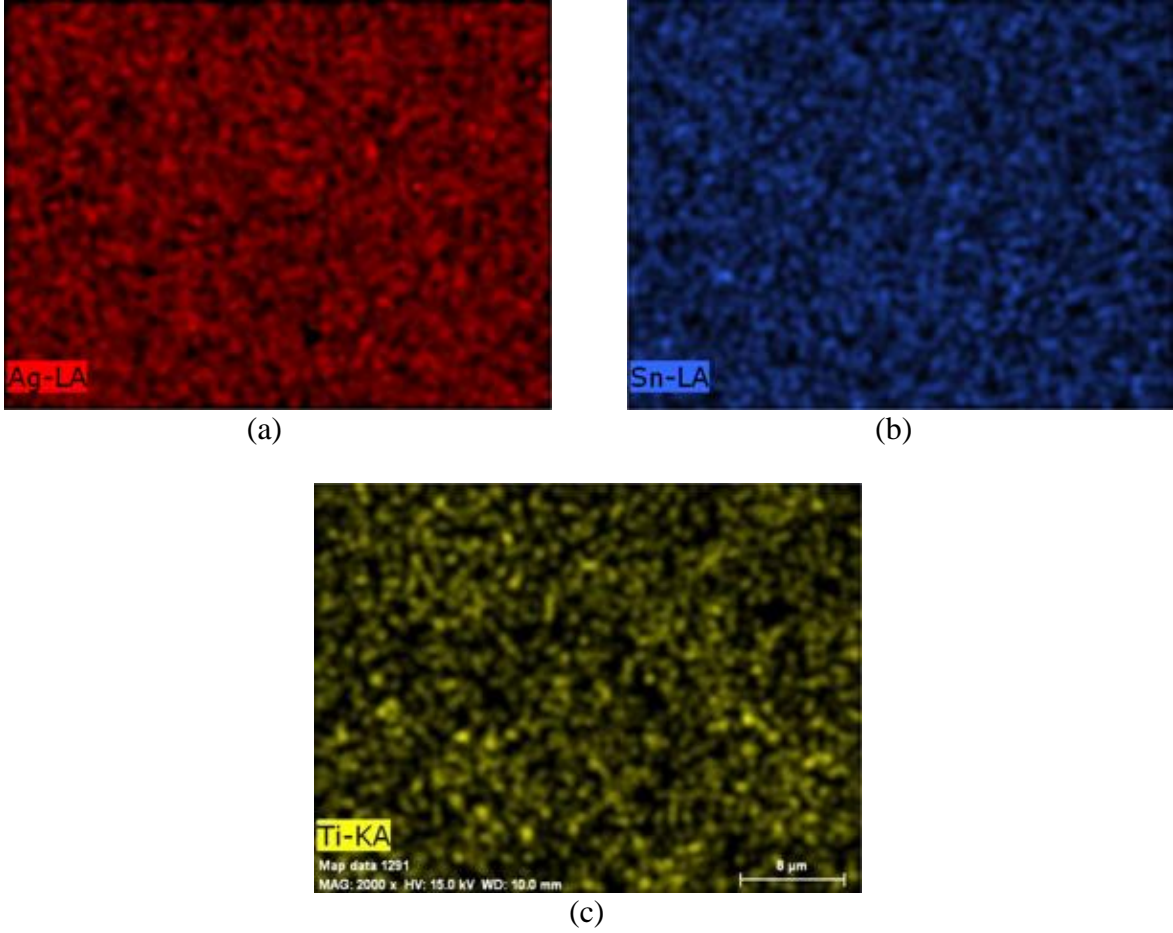
Şekil 35. Ag_8SnO_2 ham kompaktındaki element dağılımlarının ayrı ayrı görünümü;
a) Gümüş, b) Kalay, c) Oksijen

MA yöntemi sonucu elde edilen TiO_2 takviyeli kompozit tozlar da Ag_8SnO_2 ham kompaktı ile aynı koşullar altında preslendi ve bütün TiO_2 takviyeli ham kompaktlara örnek olması açısından % 1 TiO_2 takviyeli numunedeki element dağılımları EDS yöntemi ile belirlendi. Şekil 36'da kırmızı, mavi ve sarı renkleri sırasıyla gümüş, kalay ve titanyum elementlerini temsil etmektedir. Burada tek bir harita üzerindeki element dağılımlarını daha belirgin kılmak amacıyla oksijen dağılımı bilinçli olarak gösterilmedi. Şekil 37'de ise her bir element dağılımı ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 36'deki element haritası

incelendiğinde hem küçük hem de nispeten büyük boyuta sahip TiO_2 ve SnO_2 tozlarının homojen bir dağılım sergiledikleri görüldü.



Şekil 36. % 1 TiO_2 takviyeli malzemenin EDS analizi sonucu; a) haritalama yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki dağılımı



Şekil 37. % 1 TiO₂ takviyeli malzemedeki element dağılımlarının ayrı ayrı görünümü; a) Gümüş, b) Kalay, c) Titanyum

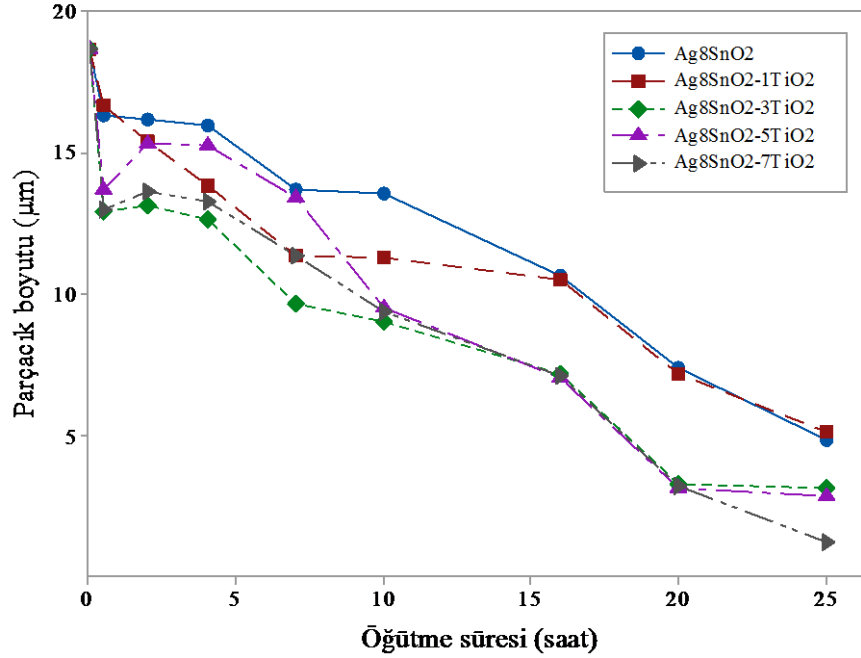
3.1.5. Öğütme Süresi-Toz Boyutu İlişkisi

Kompozit tozların sentezlenmesi süresince artan öğütme süresi ile meydana gelen toz boyutu değişimleri parçacık boyut analiz cihazı ile belirlenerek her bir kompozit toza ait ortalama toz boyutu değerleri Tablo 7’de, bu değerler kullanılarak elde edilen toz boyutu-öğütme süresi eğrileri ise Şekil 38’de verilmiştir. % 1 TiO₂ takviyeli kompozit tozun parçacık boyut değişim eğrisi Ag₈SnO₂ kompozit tozuna oldukça benzer nitelik taşımaktadır. Boyutsal anlamda farklılıklar özellikle % 3 ve üzerindeki takviye oranlarında gözlemlendi. Buna göre % 3 TiO₂ takviyeli kompozitte son toz boyutu 3,125 µm değerine düşmüştür. Söz konusu takviye oranının % 5 ve % 7 seviyelerine çıkartılmasıyla son toz boyutlarında kademeli olarak azalma gözlemlendi ve bunun sonucunda toz boyutları sırasıyla 2,851 µm ve 1,186 µm seviyelerine indi. Bu sonuçların değerlendirilmesinden % 1 TiO₂ takviye oranının kritik bir değer olduğu ve bu değer üzerindeki takviye oranlarıyla

hazırlanan toz karışımlarının öğütülmesi sonucu soğuk kaynak olayının kırılma olayına göre daha pasif duruma geçtiğini, dolayısıyla da tozların kırılma veriminin arttığını söylemek mümkündür.

Tablo 7. Her bir kompozit tozun farklı sürelerdeki öğütülmesi sonucu elde edilen ortalama toz boyutu değerleri

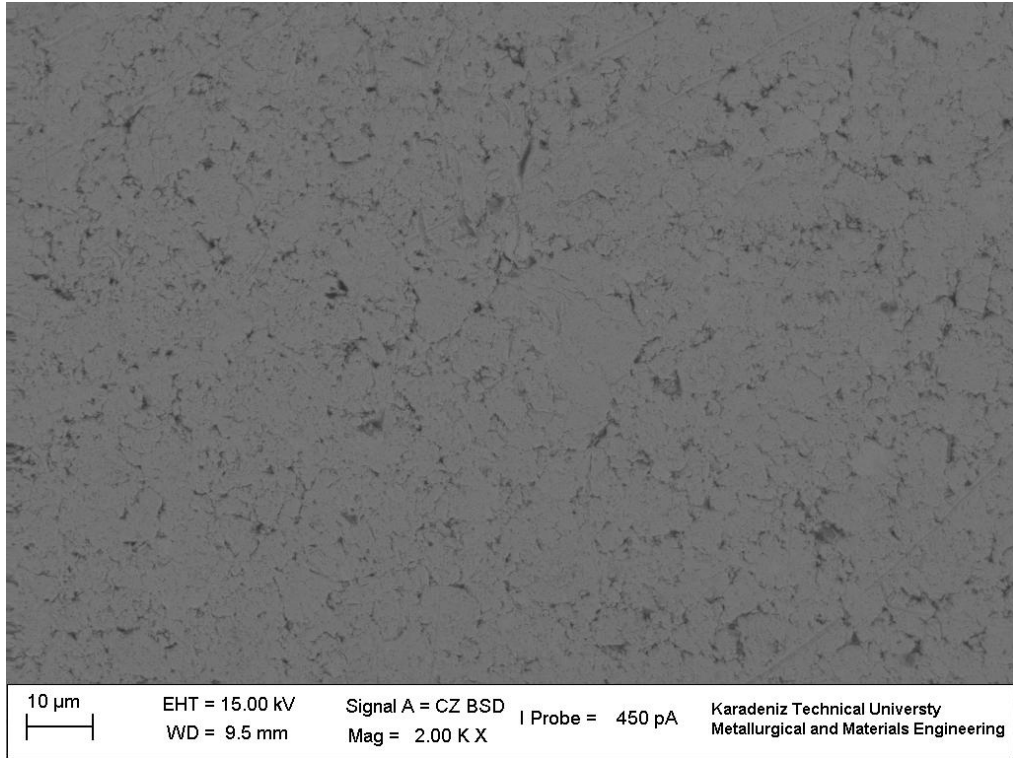
| Öğütme süresi (saat) | Kompozit toz bileşimi ve ortalama toz boyutu değeri (d(0,5), μm) | | | | |
|----------------------|--|--|--|--|--|
| | Ag8SnO ₂ | Ag8SnO ₂ -1TiO ₂ | Ag8SnO ₂ -3TiO ₂ | Ag8SnO ₂ -5TiO ₂ | Ag8SnO ₂ -7TiO ₂ |
| 0 | 18,646 | 18,646 | 18,646 | 18,646 | 18,646 |
| 0,5 | 16,324 | 16,684 | 12,875 | 13,707 | 12,952 |
| 2 | 16,200 | 15,356 | 13,154 | 15,314 | 13,613 |
| 4 | 15,970 | 13,831 | 12,593 | 15,231 | 13,245 |
| 7 | 13,690 | 11,368 | 9,629 | 13,430 | 11,346 |
| 10 | 13,524 | 11,257 | 8,990 | 9,501 | 9,328 |
| 16 | 10,652 | 10,461 | 7,159 | 6,991 | 7,125 |
| 20 | 7,411 | 7,132 | 3,239 | 3,156 | 3,174 |
| 25 | 4,831 | 5,097 | 3,125 | 2,851 | 1,186 |



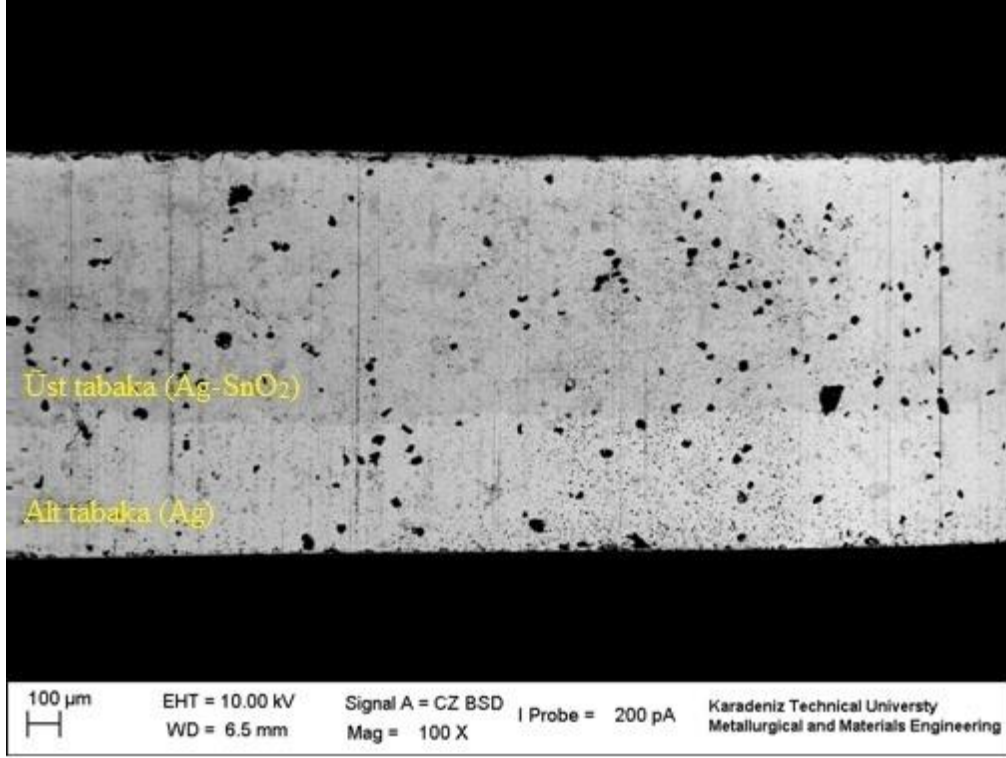
Şekil 38. Kompozit toz boyutunun öğütme süresine göre değişimini gösteren eğriler

3.2. Üretilen Ham Numunelerin ve Kompozitlerin İçyapıları

Presleme sonrası elde edilen Ag_8SnO_2 ham kompaktının SEM görüntüsü Şekil 39'da görülmektedir. Şekil 40'da ise aynı malzemenin yandan görünümü verilmiştir. Bu şekilden kontakların alt tabakasının gümüş, üst tabakasının ise kompozit olacak şekilde iki tabakalı olarak üretildiği görülmektedir. Buradaki amaç bakır yüzeye lehimleme veya gümüş kaynak yapılarak oluşturulacak bağlantının kalitesini olumsuz etkileyebilecek durumları ortadan kaldırmaktır. Aksi takdirde kontak malzemeleri bakır yüzeye sağlam bir biçimde tutturulamazlar ve bunun sonucu olarak yüksek açma/kapama kuvvetleri etkisi altında bütünlüğünü koruyamayabilirler. Söz konusu gümüş alt tabakasının kalınlığı önceki çalışmalardan da bilindiği üzere toplam et kalınlığının yaklaşık 1/3'ü oranında seçilmektedir [91].

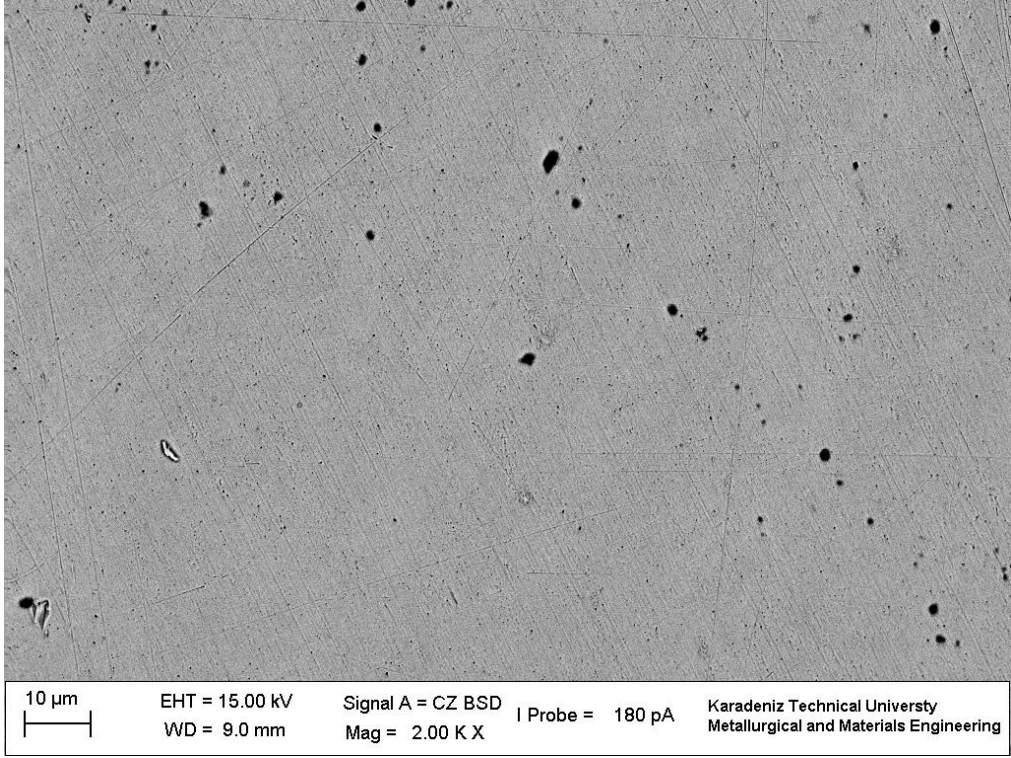


Şekil 39. Ag_8SnO_2 ham kompaktının görünümü

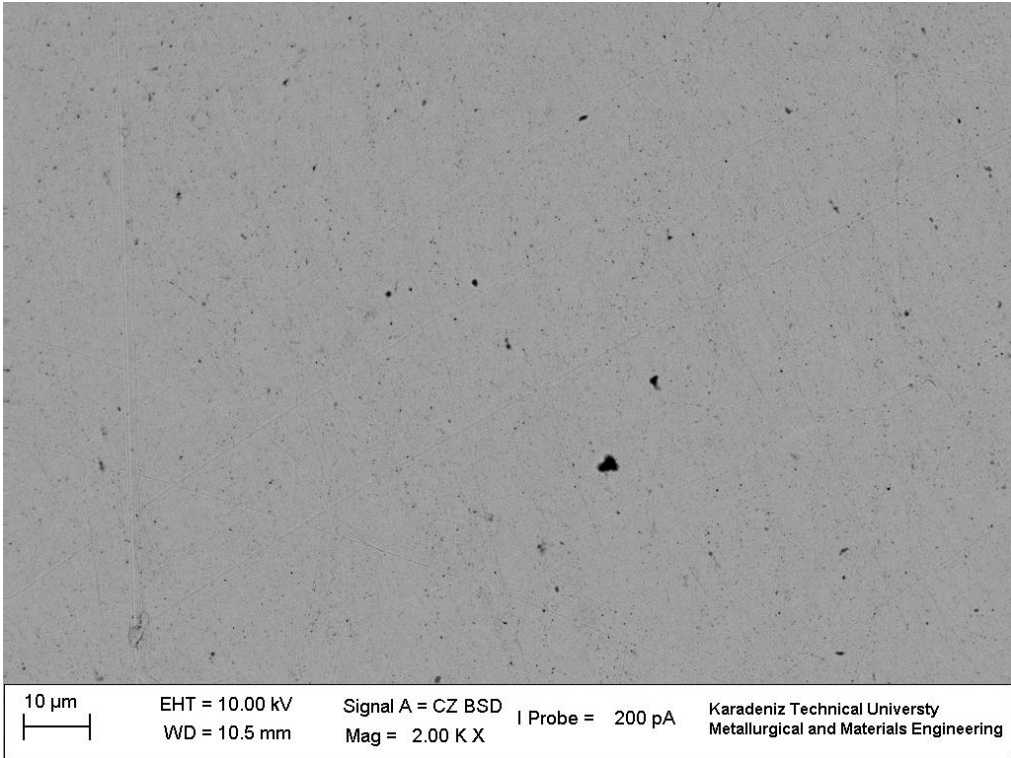


Şekil 40. Ag₈SnO₂ ham kompaktının yandan görünümü

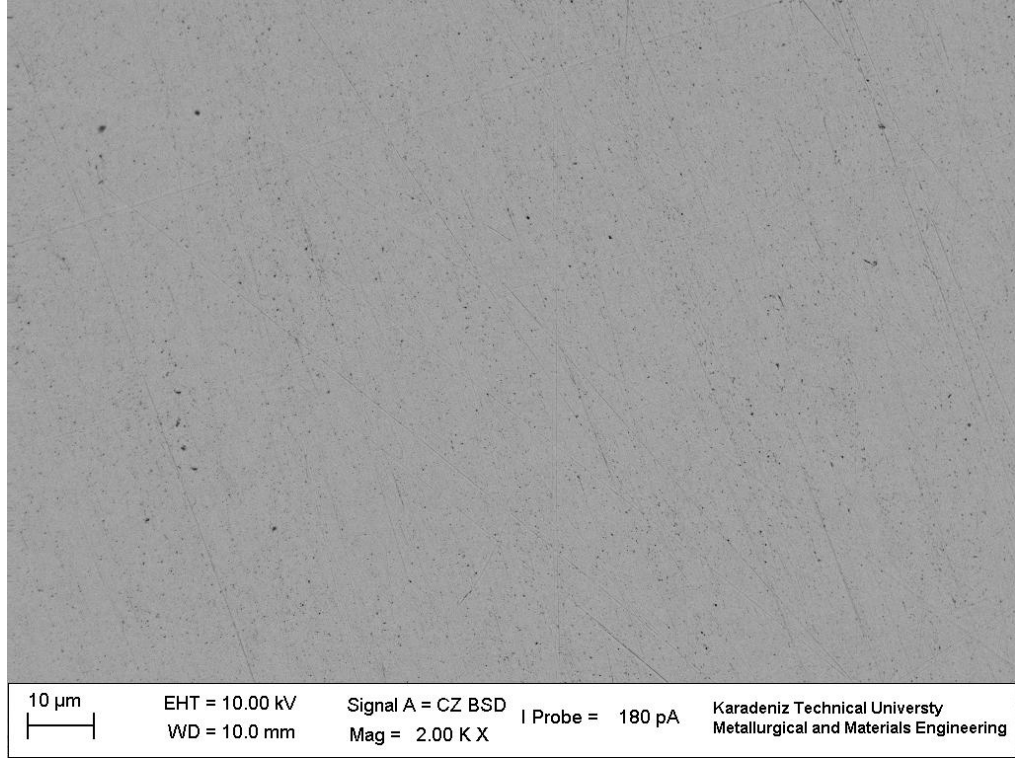
Ham kompaktların vakum ortamında 700, 800 ve 900°C'lik üç farklı sıcaklıkta 1 saat süreyle sinterlenmesi sonucu elde edilen kompozitlere ait SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 41, 42 ve 43'de verilmiştir. Şekil 41'den 700°C sıcaklıkta 1 saat sinterlenerek elde edilen numunede gözenek oranının en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca bu fotoğraflardan artan sinterleme sıcaklığı ile gözenek oranında kademeli bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Nitekim 800°C'de sinterlenen numune orta seviyede gözenek içerirken 900°C'de sinterlenen numunede gözenek oranının minimum seviyede olduğu görülmektedir.



Şekil 41. Ag₈SnO₂ ham kompaktının 700°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı

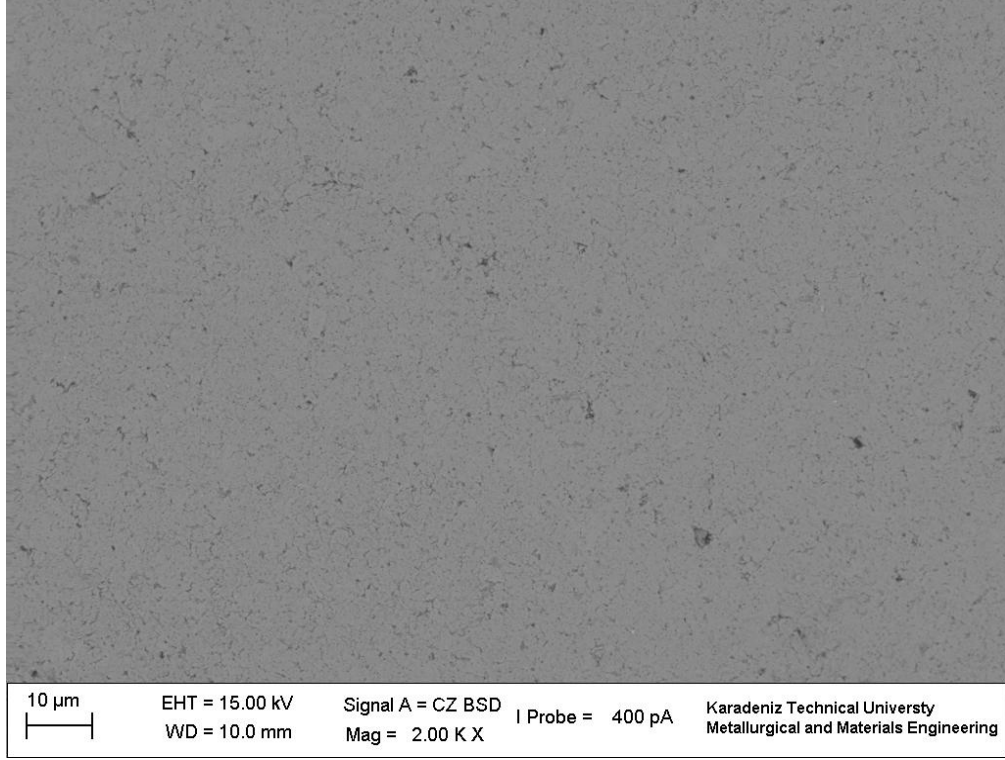


Şekil 42. Ag₈SnO₂ ham kompaktının 800°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı

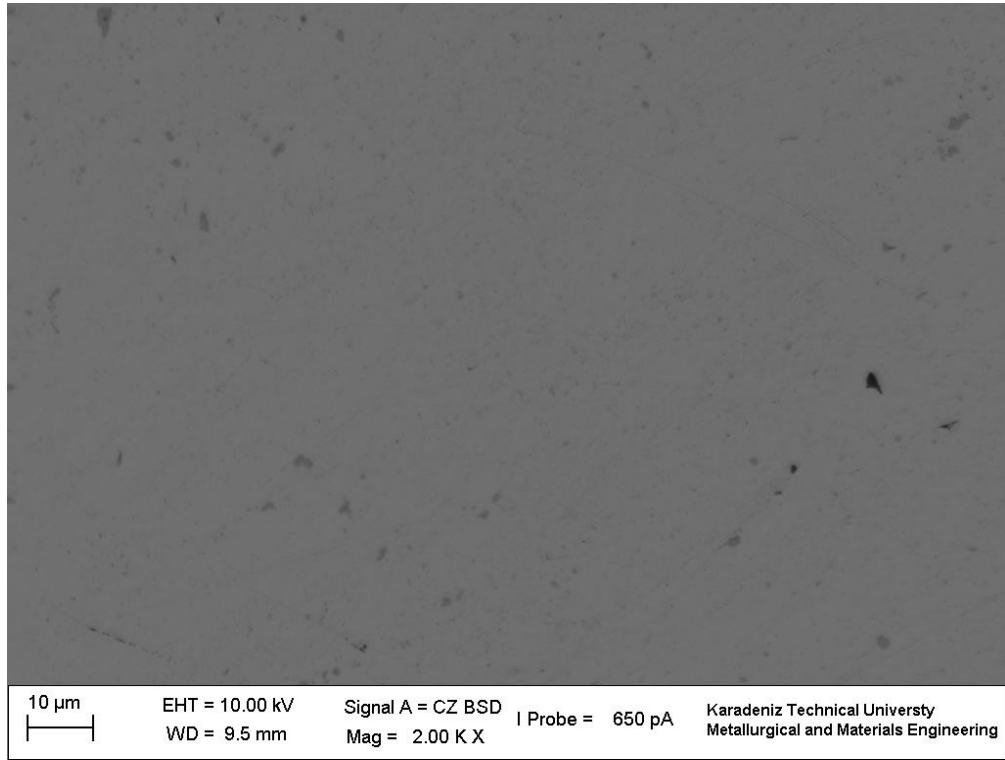


Şekil 43. Ag8SnO₂ ham kompaktının 900°C’de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı

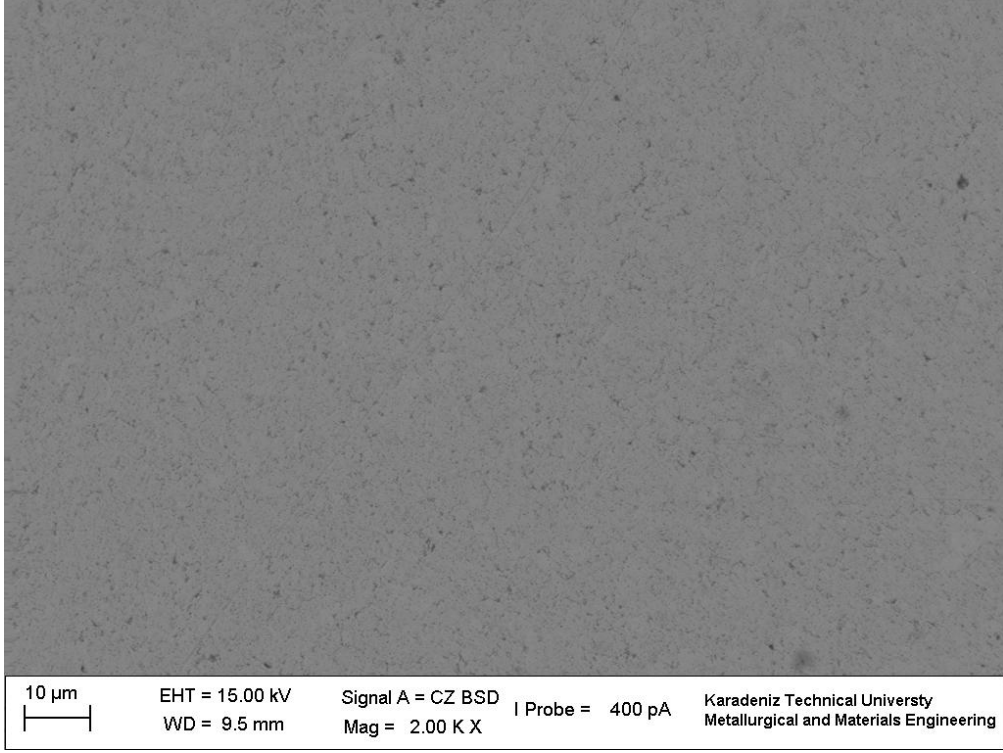
Ag8SnO₂-1TiO₂, Ag8SnO₂-3TiO₂, Ag8SnO₂-5TiO₂ ve Ag8SnO₂-7TiO₂ ham kompaktlarının ve bu ham kompaktların sinterlenmesi ile elde edilen kompozitlerin içyapılarını gösteren SEM fotoğrafları karşılaştırmalı olarak Şekil 44-51’de verilmiştir. Şekil 39 ve 44’ün karşılaştırılmasından ince dağılımlı TiO₂ takviyesinin presleme davranışına olumlu etki yaptığı sonucuna varılabilir. Şekil 43 ve 45’teki SEM fotoğrafları karşılaştırıldığında Ag8SnO₂-1TiO₂ kompozitinin Ag8SnO₂ kompozitine göre daha düşük bir gözenek oranına sahip olduğu görülmektedir. % 3 TiO₂ takviyeli ham kompakt ve kompozitin SEM görüntüleri % 1 TiO₂ takviyeli kompozitin görüntüleri ile karşılaştırıldığında artan TiO₂ oranına bağlı olarak gözenek miktarında artışın gözlemlendiği söylenebilir. Benzer şekilde % 5 ve % 7 TiO₂ takviyeli kompozitlerdeki gözenek miktarı kademeli olarak artış göstermiş ve % 7 TiO₂ takviyeli kompozitlerde en yüksek değerine ulaşmıştır. Bütün kompozitleri kendi içinde sinterleme öncesi ve sonrası durumla değerlendirecek olursak, ham kompaktlardaki nispeten yüksek miktarlardaki gözenekler sinterleme sonrası daha düşük seviyelere inmiştir.



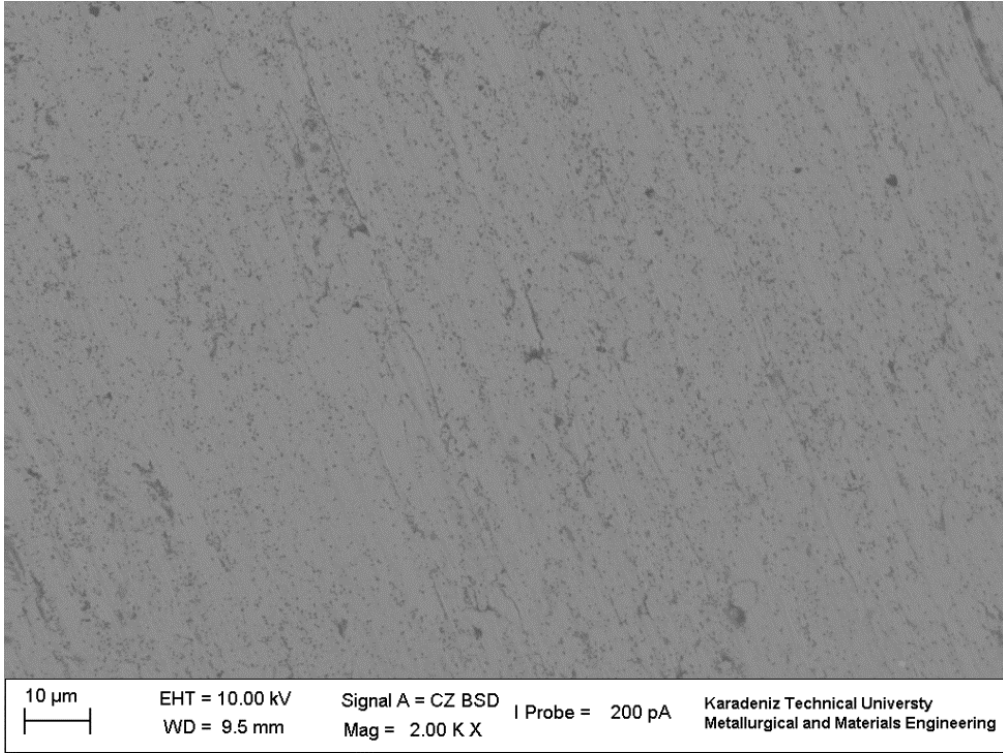
Şekil 44. % 1 TiO₂ takviyeli ham kompaktın görünümü



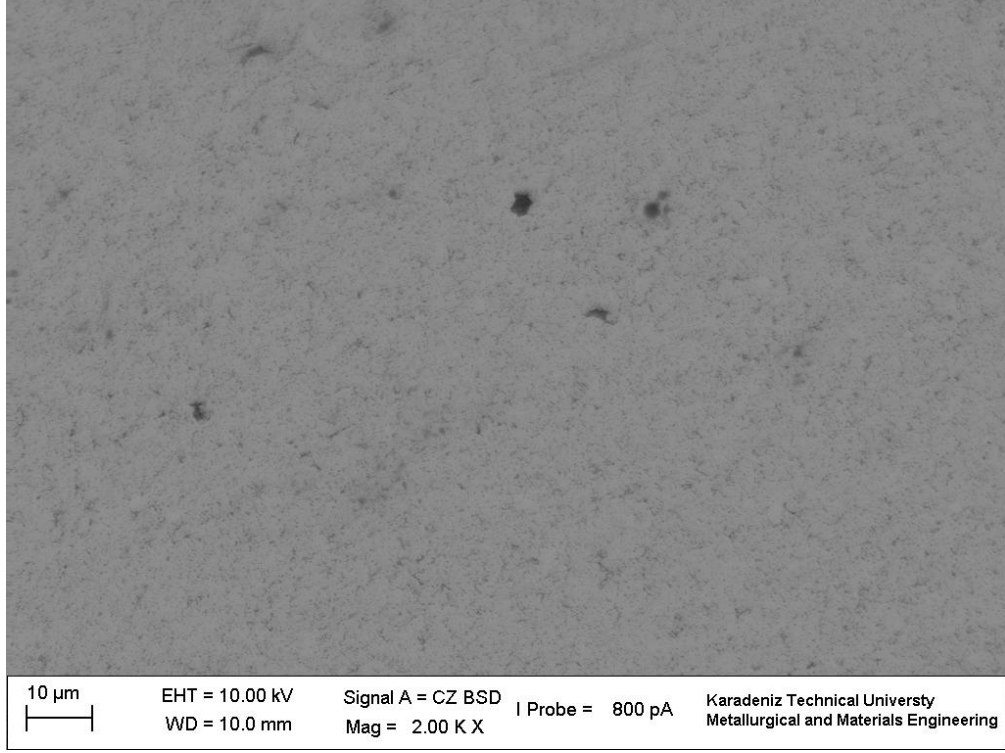
Şekil 45. % 1 TiO₂ takviyeli ham kompaktın 900°C'de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı



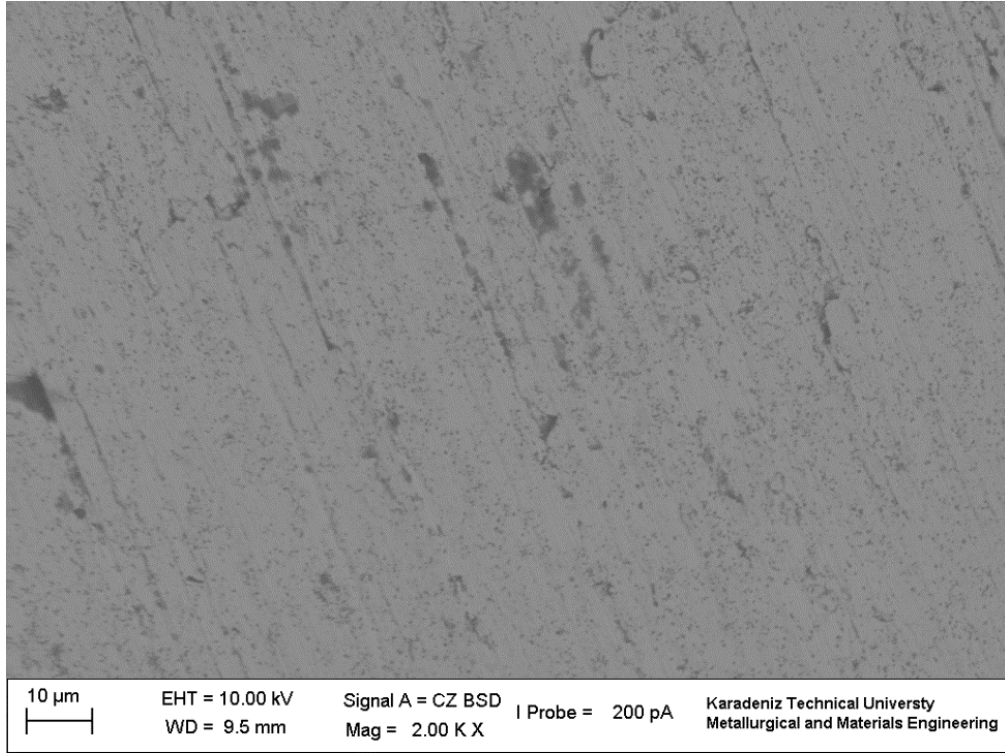
Şekil 46. % 3 TiO₂ takviyeli ham kompaktın görünümü



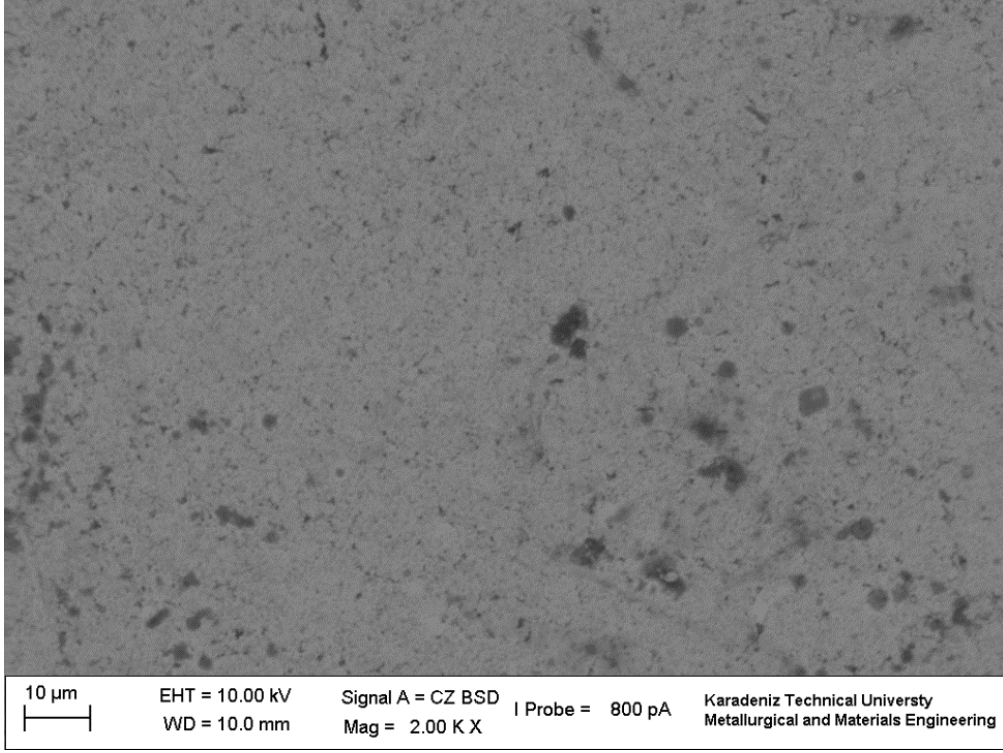
Şekil 47. % 3 TiO₂ takviyeli ham kompaktın 900°C'de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı



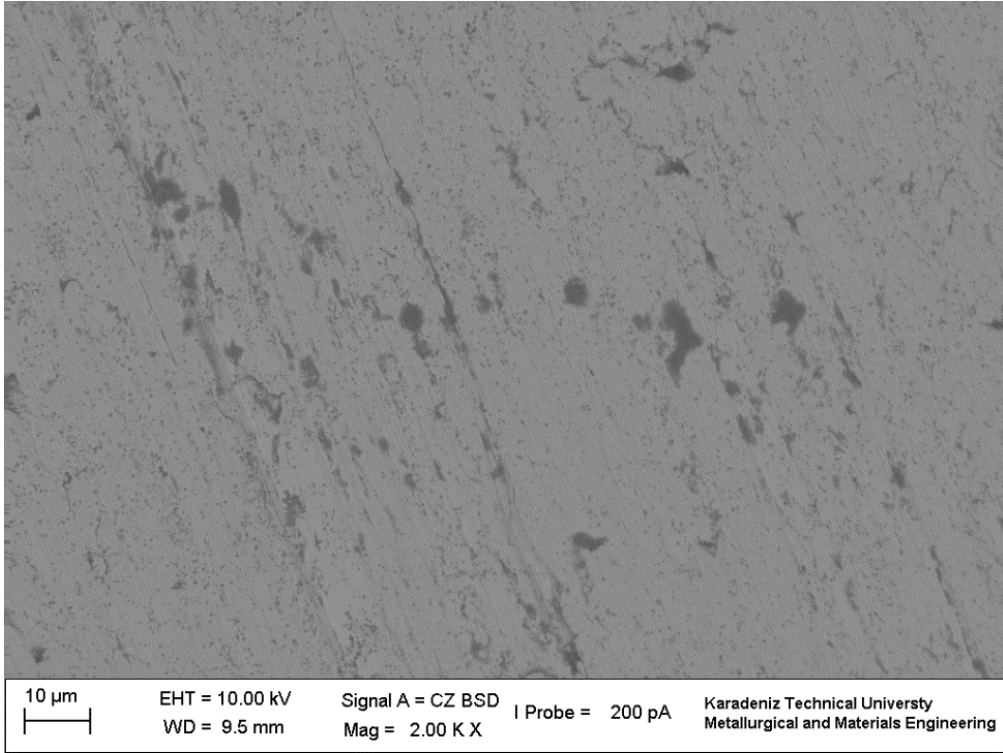
Şekil 48. % 5 TiO₂ takviyeli ham kompaktın görünümü



Şekil 49. % 5 TiO₂ takviyeli ham kompaktın 900°C'de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı



Şekil 50. % 7 TiO₂ takviyeli ham kompaktın görünümü



Şekil 51. % 7 TiO₂ takviyeli ham kompaktın 900°C'de 1 saat sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı

3.3. Üretilen Kompozitlerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Farklı sıcaklıklarda sinterlenerek üretilen Ag₈SnO₂ kompozitinin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 8’de verilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi sinterleme sıcaklığı arttıkça numunelerin sinterleme sonrası yoğunluk ve sertlik değerleri de artmaktadır. Nitekim artan sinterleme sıcaklığıyla yoğunluk değeri 9,76 g/cm³’den 9,92 g/cm³’e, sertlik değeri ise 45 HV’den 78 HV’ye yükselmiştir.

Optimum şartlarda (presleme basıncı: 350 MPa, sinterleme sıcaklığı: 900°C) üretilen farklı kimyasal bileşime sahip Ag₈SnO₂ esaslı her bir kompozite ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 9’da listelenmiştir. Bu tablodan ham kompaktların gözenek oranının sinterleme sonrası önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Ayrıca artan TiO₂ takviyesinin Ag₈SnO₂ esaslı kompozit kontak malzemelerinin sertlik değerlerini ve gözenek oranını artırdığı tespit edilmiştir. Özellikle % 5’lik takviyenin gözenek oranında çok daha belirgin bir artışa sebep olduğu görülmektedir. Buna karşın % 1 ve 3 TiO₂ takviyeli kompozitlerde Ag₈SnO₂ kompozitine göre daha düşük gözenek oranı elde edilmiştir.

Tablo 8. Farklı sıcaklıklarda yapılan sinterleme işlemi sonucu üretilen Ag₈SnO₂ kompozitinin fiziksel ve mekanik özellikleri

| Numune | Sinterleme sıcaklığı (°C) | Teorik yoğunluk (g/cm ³) | Ham yoğunluk (g/cm ³) | Sinterleme öncesi gözenek oranı (%) | Sinterleme sonrası yoğunluk (g/cm ³) | Sinterleme sonrası gözenek oranı (%) | Sertlik (HV 0,1) |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|------------------|
| Ag ₈ SnO ₂ | 700 | 10,08 | 9,74 | 3,37 | 9,76 | 3,17 | 45 |
| Ag ₈ SnO ₂ | 800 | 10,08 | 9,74 | 3,37 | 9,80 | 2,78 | 56 |
| Ag ₈ SnO ₂ | 900 | 10,08 | 9,74 | 3,37 | 9,92 | 1,59 | 78 |

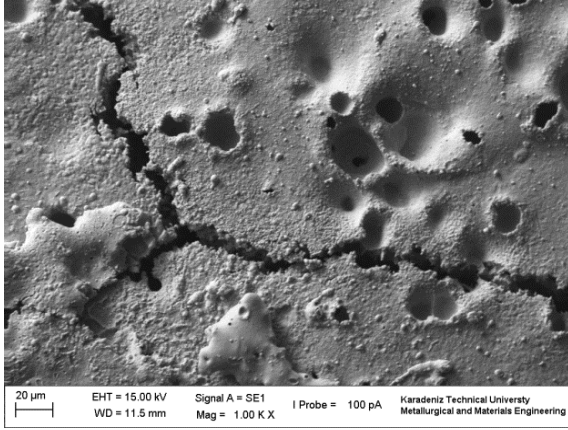
Tablo 9. Farklı kimyasal bileşime sahip Ag₈SnO₂ esaslı kompozit kontak malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

| Numune | Teorik yoğunluk (g/cm ³) | Ham yoğunluk (g/cm ³) | Sinterleme öncesi gözenek oranı (%) | Sinterleme sonrası yoğunluk (g/cm ³) | Sinterleme sonrası gözenek oranı (%) | Sertlik (HV 0,1) |
|---|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|------------------|
| Ag ₈ SnO ₂ | 10,08 | 9,74 | 3,37 | 9,92 | 1,59 | 78 |
| Ag ₈ SnO ₂ -1TiO ₂ | 9,94 | 9,81 | 1,31 | 9,82 | 1,21 | 82 |
| Ag ₈ SnO ₂ -3TiO ₂ | 9,69 | 9,53 | 1,65 | 9,55 | 1,44 | 89 |
| Ag ₈ SnO ₂ -5TiO ₂ | 9,46 | 9,05 | 4,33 | 9,23 | 2,43 | 95 |
| Ag ₈ SnO ₂ -7TiO ₂ | 9,24 | 8,71 | 5,74 | 8,82 | 4,55 | 102 |

3.4. Ark-Erozyon Deneyi Sonucunda Oluşan Aşınma Yüzeyleri

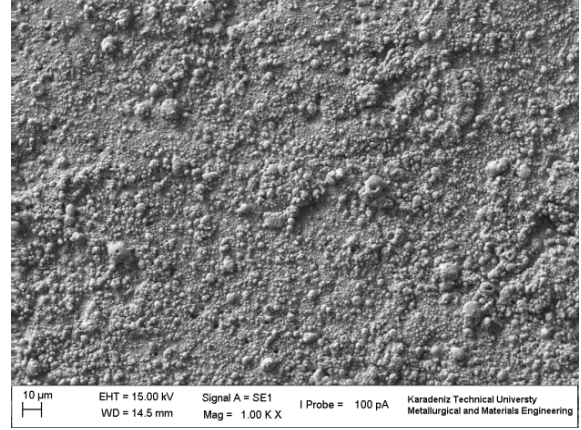
Ag₈SnO₂, Ag₈SnO₂-1TiO₂, Ag₈SnO₂-3TiO₂, Ag₈SnO₂-5TiO₂ ve Ag₈SnO₂-7TiO₂ kompozit kontakların yüzeylerinde her 5.000 çevrimlik ark-erozyon deneyi sonunda meydana gelen değişimleri gösteren SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 52, 53, 54, 55 ve 56'da verilmiştir. İlk 5.000 çevrim sonrası Ag₈SnO₂ kompozitinin sabit kontak yüzeyinde çok sayıda çukurların, mikroçatlakların ve kısmi ergime izlerinin oluştuğu gözlenirken, hareketli kontak yüzeyinde aşınma sonucu oluşan partiküllerin toplandığı tespit edildi. Artan çevrim sayısı söz konusu çukurlar derin kraterlere dönüşürken, partiküllerin toplandığı yüzeyde ergime izleri görüldü. 20.000 çevrim sonrası hareketli kontak yüzeyinde oluşan boşlukların 25.000 çevrimden sonra ergimiş metal ile dolduğu; sabit kontakta ise çukurların daha sığ bir hal aldığı belirlendi. Ark-erozyon deneyinin son çevrimlerinde ise hareketli kontak yüzeylerindeki parçacıkların sabit kontakta kraterlerde biriktiği gözlemlendi. % 1 TiO₂ takviyeli kompozitte ilk 5.000 çevrim sonrası mikroçatlak izlerine rastlanmadı. Sabit kontakta çukurların küçülerek daha geniş bir alana yayıldığı görüldü. Mikroçatlakların özellikle 25.000 çevrim sonrası sabit kontak yüzeyinde arttığı gözlenirken, hareketli kontakta ergimiş metalin ilerleyen çevrim sayısı ile birlikte çatlak yüzeylerini kapladığı tespit edildi. % 3 TiO₂ takviyeli kompozitte ilk 5.000 çevrim sonrası hareketli kontakta ergime ön plana çıkmaktadır. Sabit kontakta 15.000 çevrim sonrası oluşan boşlukların ergimiş metalle dolduğu, hareketli kontakta ise yüzey morfolojisinin söz konusu aralıkta fazla bir değişim göstermediği belirlendi. Her iki kontak yüzeyinde de 30.000 çevrimden sonra yüzey bozunumlarında artış tespit edildi. % 5 TiO₂ takviyeli kompozitte ilk 5.000 çevrim sonrası birbirine benzer nitelikte aşınma yüzeyleri elde edilirken artan çevrim sayısı sabit kontakta kraterlerin, hareketli kontakta ise ergimenin hakim olduğu gözlemlendi. 30.000 çevrime kadar kontaklar arasında meydana gelen malzeme transferleri sonucu söz konusu çevrim sayısından sonra yüzeylerin daha homojen bir ark dağılımı sergilediği tespit edildi. Özellikle hareketli kontaklara nazaran sabit kontaklardaki performans iyileşmesi dikkate değerdir. % 7 TiO₂ takviyeli kompozitte başlangıç aşamalarında yüzeylerin % 5 takviyeli kompozite göre önemli oranda değişim gösterdiği görüldü. Şöyle ki TiO₂ takviyesinin kritik oran olan % 5'in üzerine çıkmasıyla özellikle sabit kontakta kontrolsüz çoğalan ark-etkili bölgelerin oluştuğu tespit edildi. Söz konusu bölgelerin, aşınma performansının olumsuz etkilenmesine neden olduğu görüldü.

Sabit Kontak

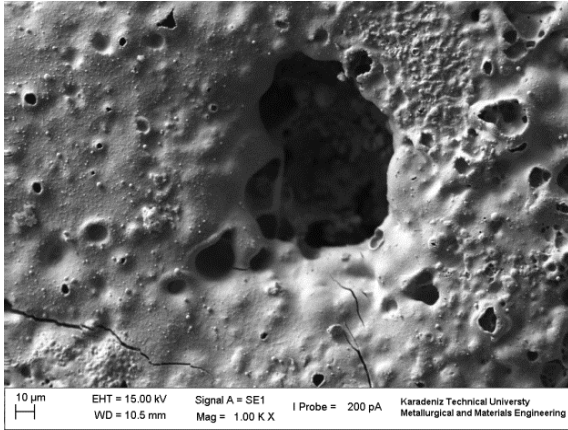


(a)

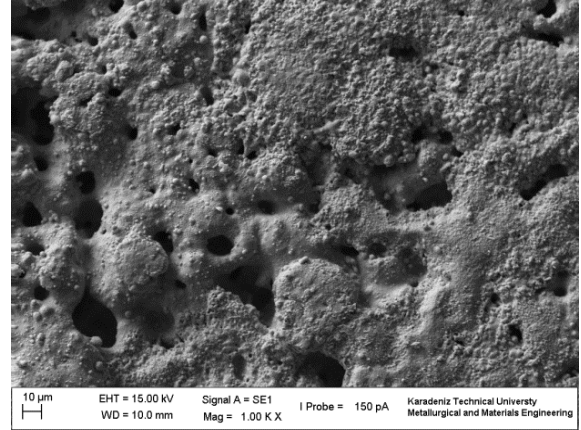
Hareketli Kontak



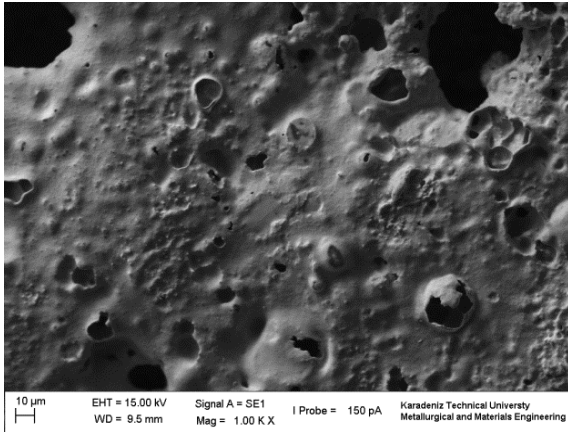
(b)



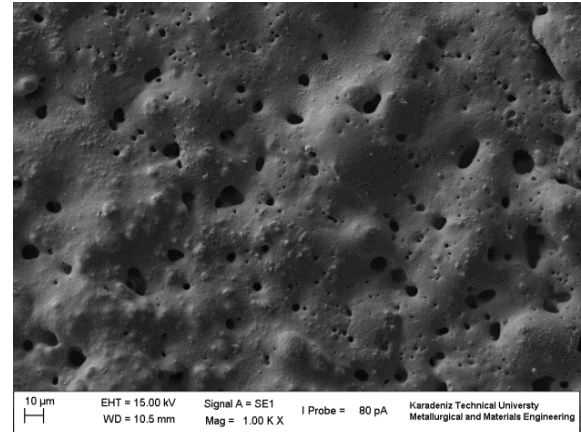
(c)



(d)



(e)

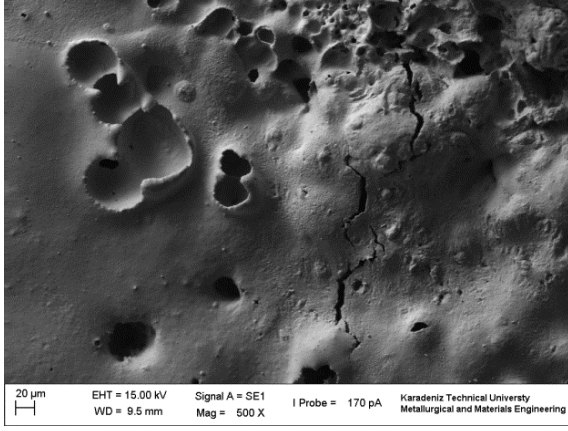


(f)

Şekil 52. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan Ag_8SnO_2 kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim

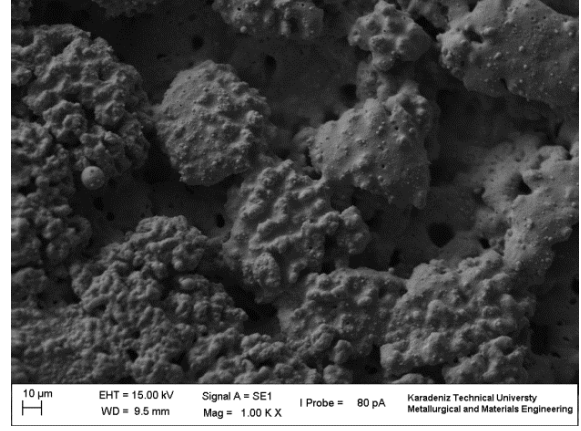
Şekil 52'nin devamı

Sabit Kontak

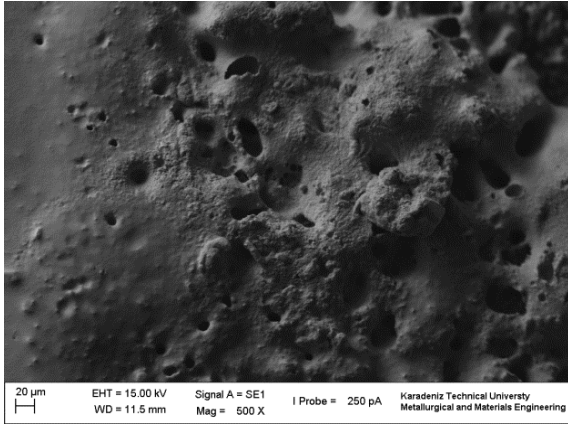


(g)

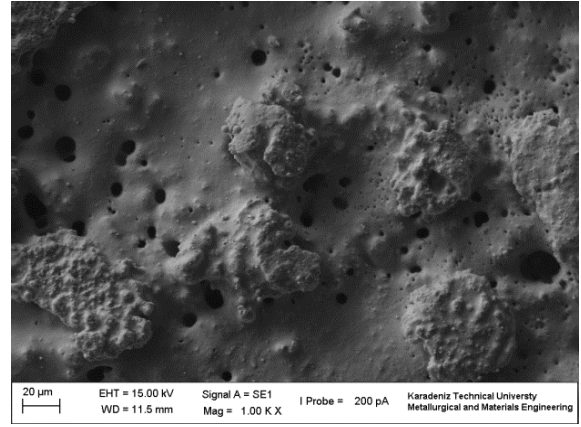
Hareketli Kontak



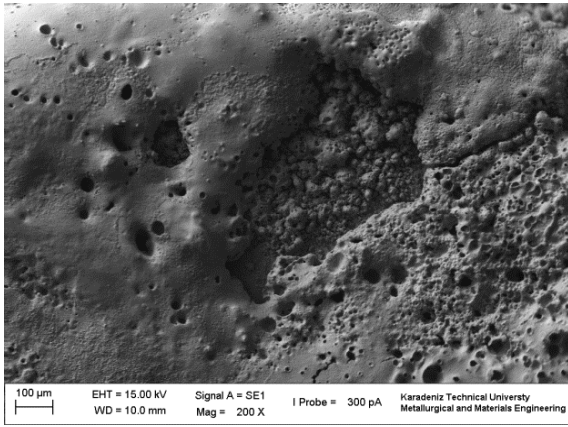
(h)



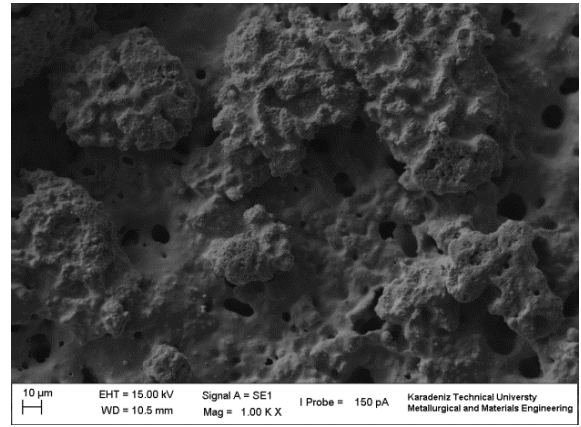
(i)



(j)



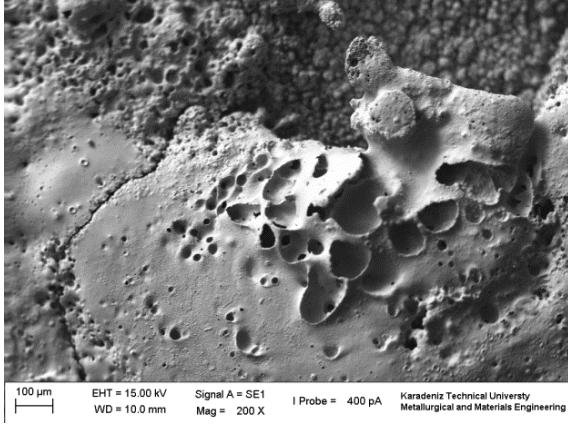
(k)



(l)

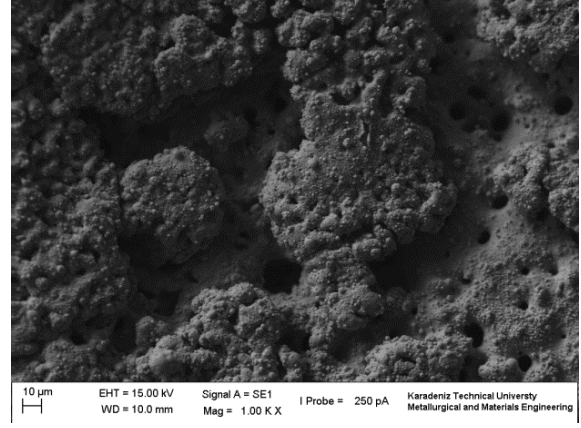
Şekil 52'nin devamı

Sabit Kontak

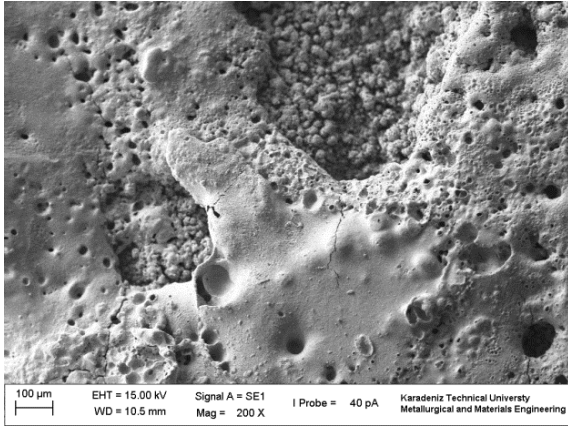


(m)

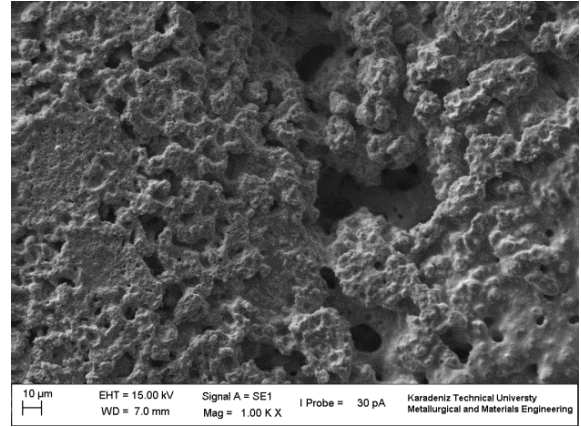
Hareketli Kontak



(n)

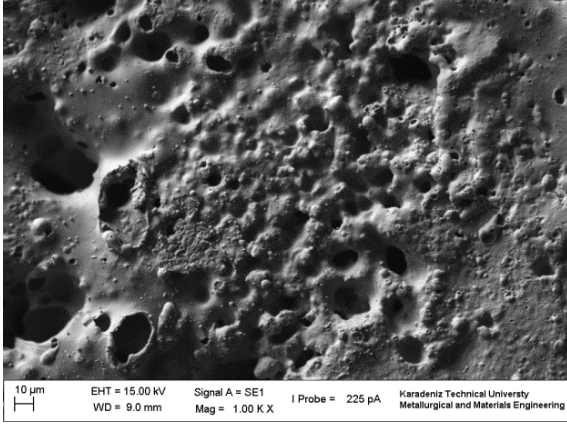


(o)



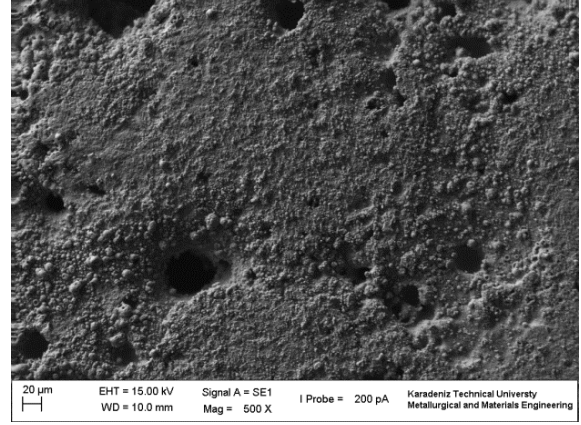
(p)

Sabit Kontak

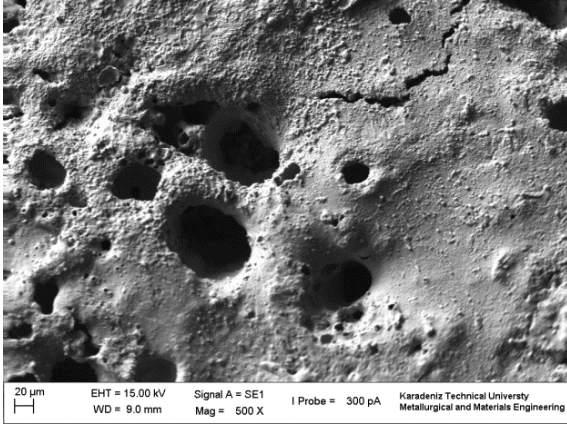


(a)

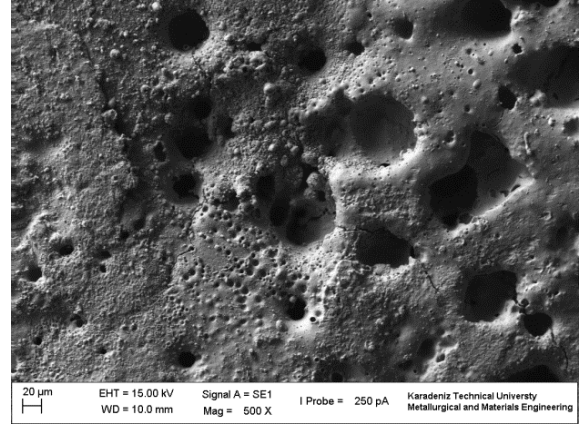
Hareketli Kontak



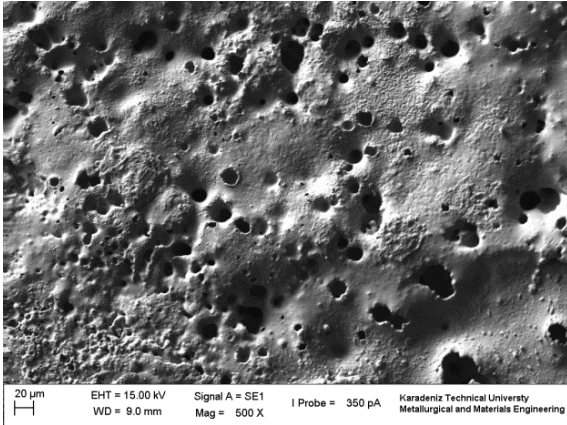
(b)



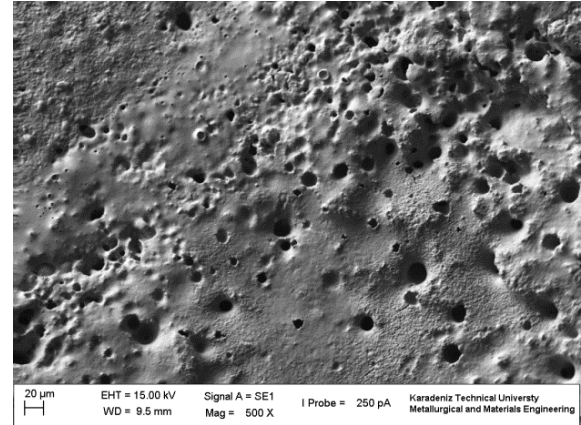
(c)



(d)



(e)

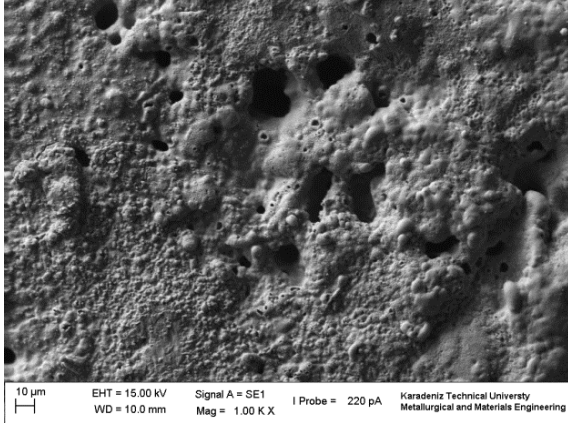


(f)

Şekil 53. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan % 1 TiO₂ takviyeli Ag₈SnO₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim

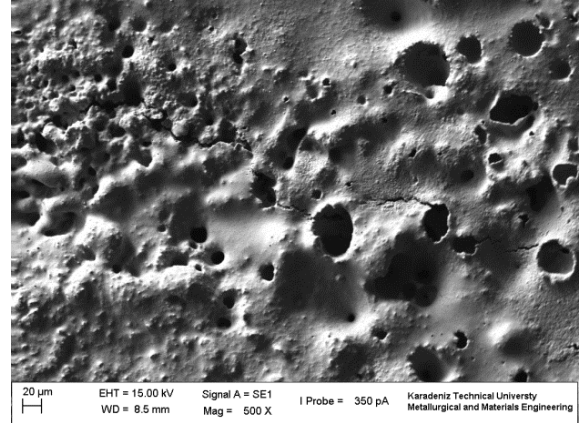
Şekil 53'ün devamı

Sabit Kontak

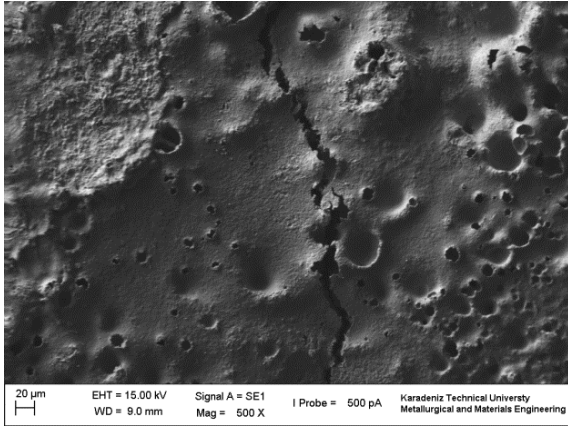


(g)

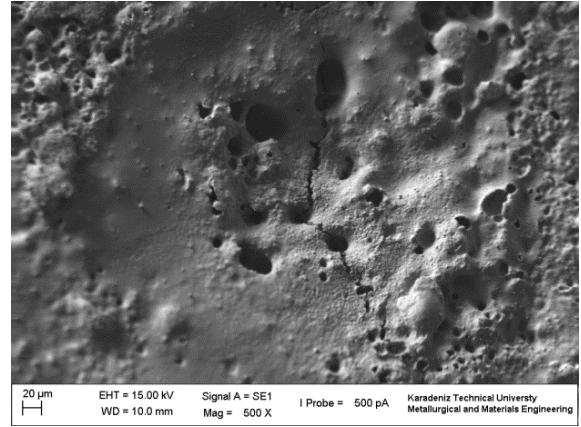
Hareketli Kontak



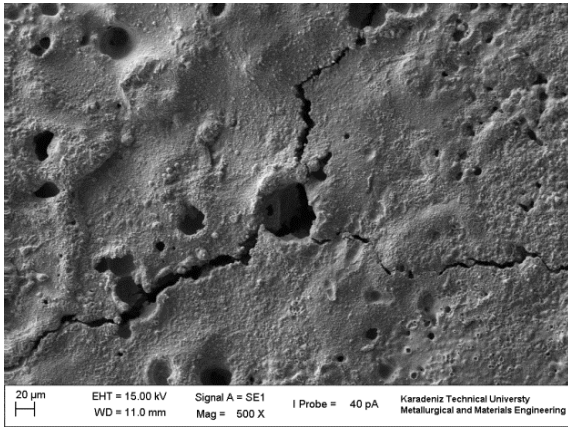
(h)



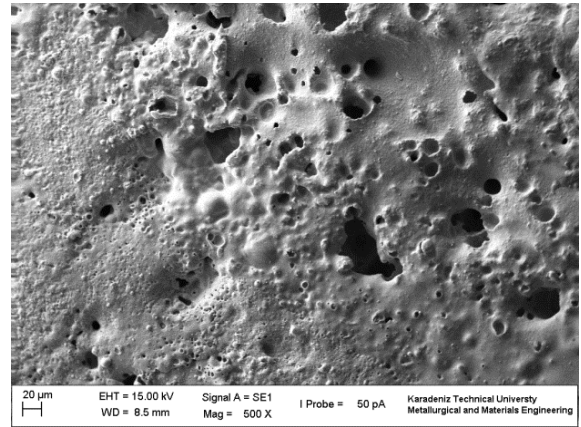
(i)



(j)



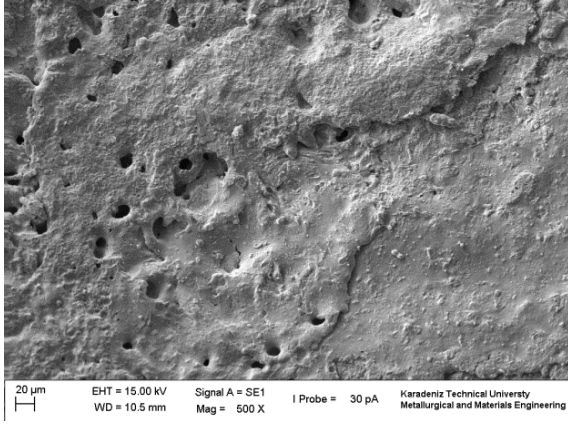
(k)



(l)

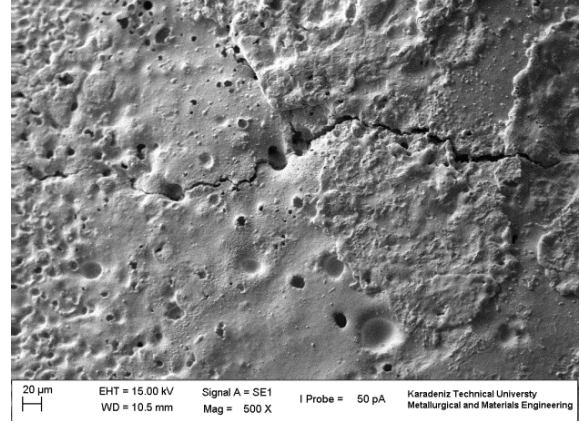
Şekil 53'ün devamı

Sabit Kontak

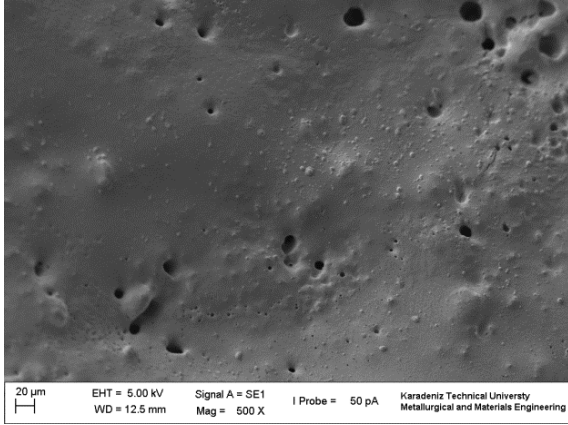


(m)

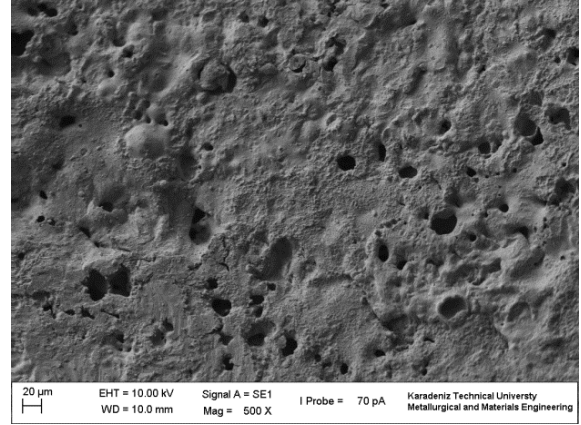
Hareketli Kontak



(n)

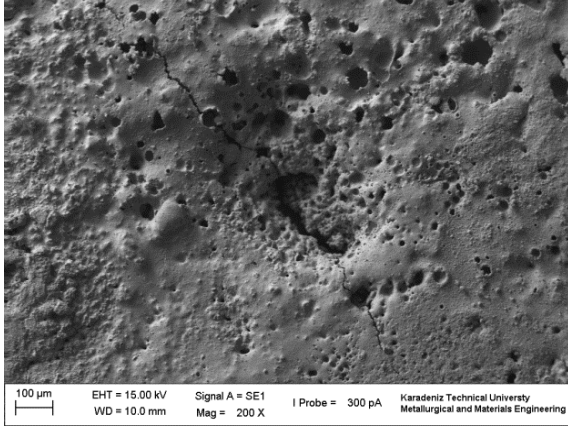


(o)



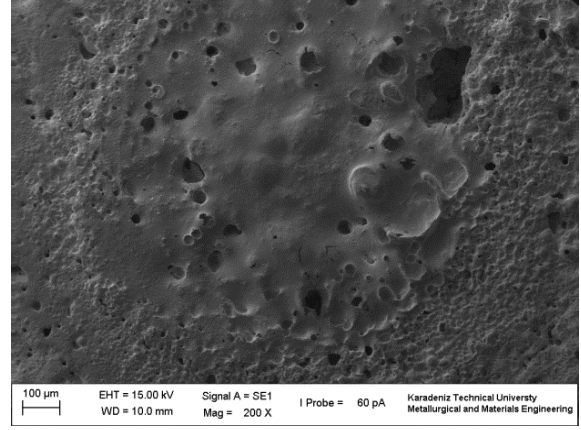
(p)

Sabit Kontak

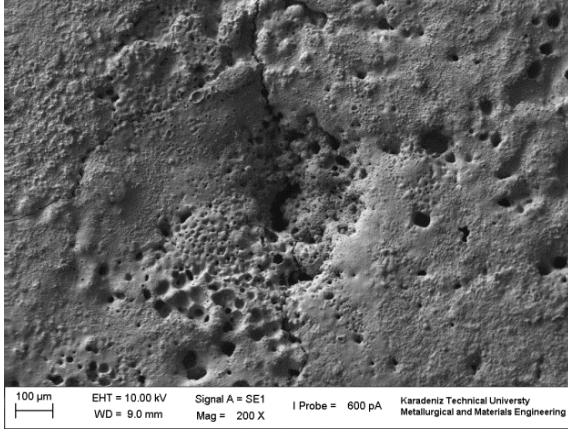


(a)

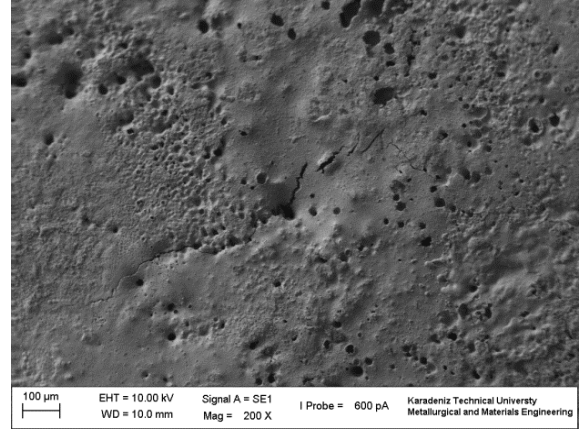
Hareketli Kontak



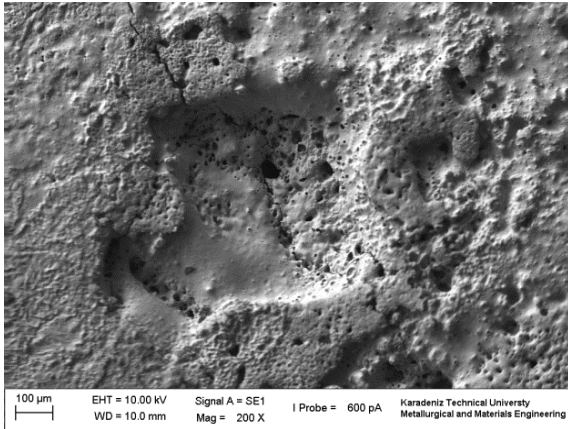
(b)



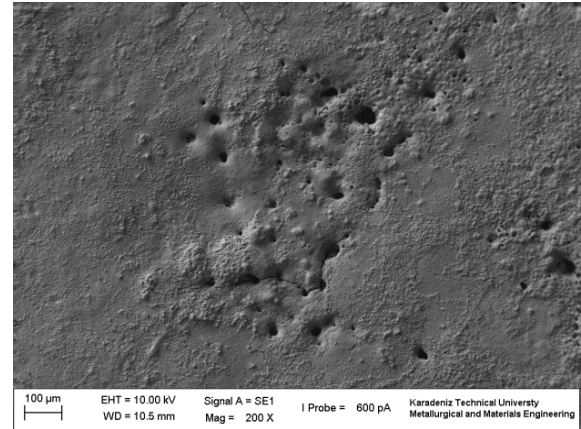
(c)



(d)



(e)

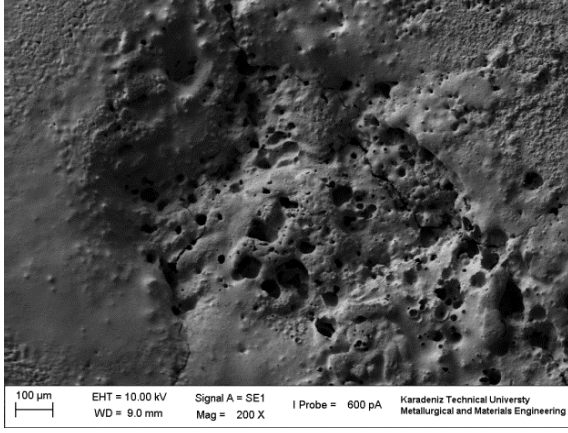


(f)

Şekil 54. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan % 3 TiO₂ takviyeli Ag₈SnO₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim

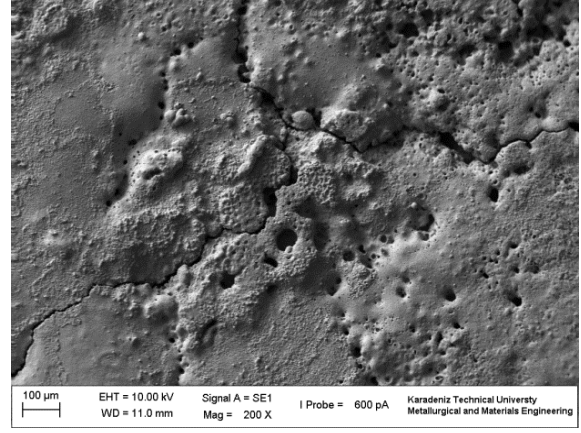
Şekil 54'ün devamı

Sabit Kontak

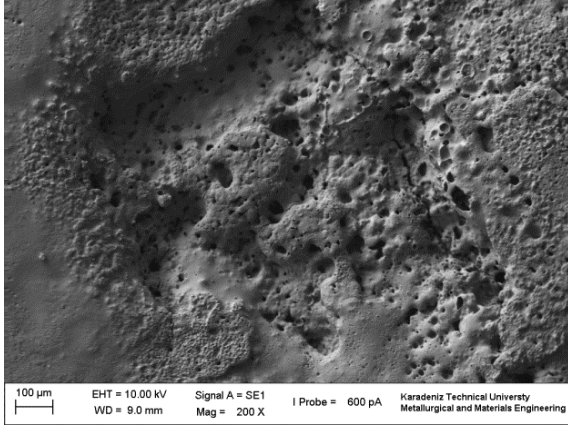


(g)

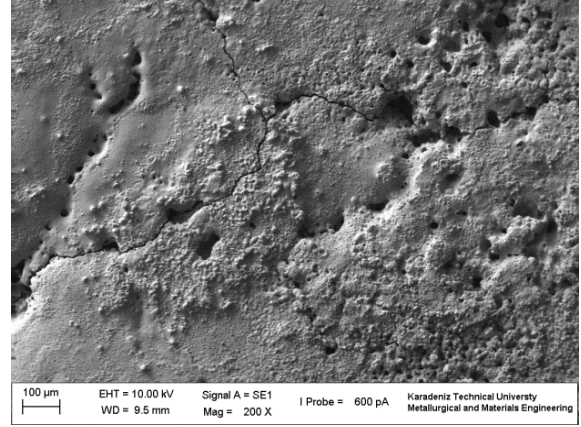
Hareketli Kontak



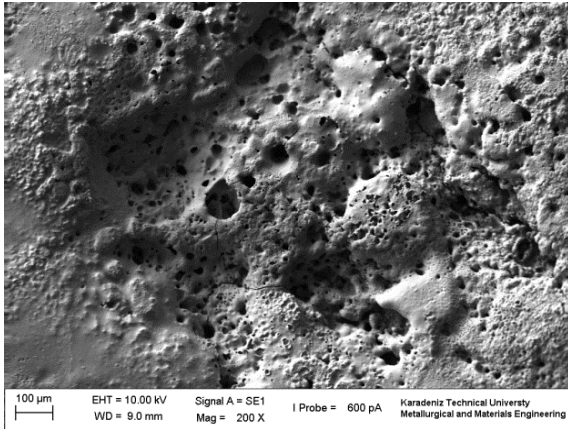
(h)



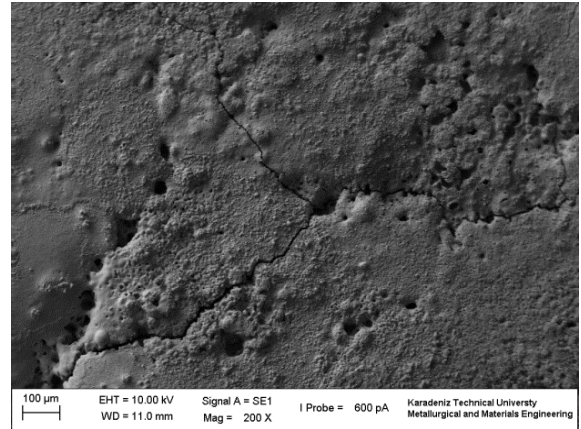
(i)



(j)



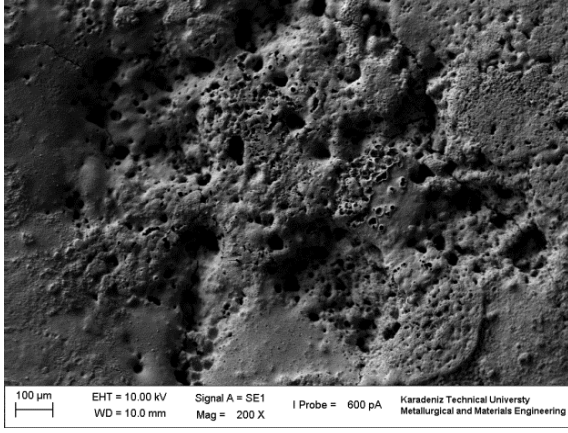
(k)



(l)

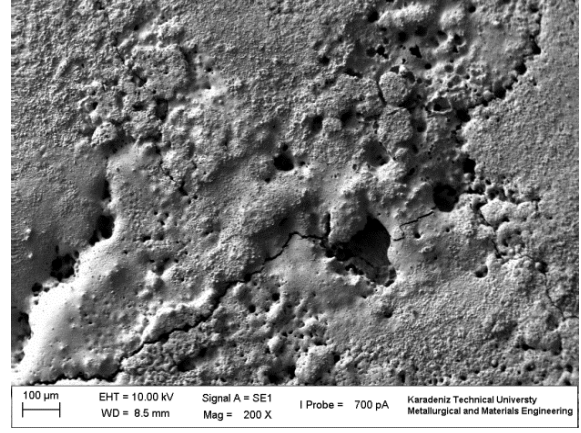
Şekil 54'ün devam

Sabit Kontak

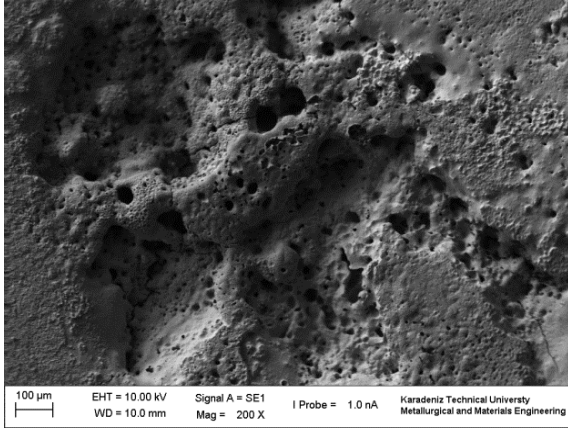


(m)

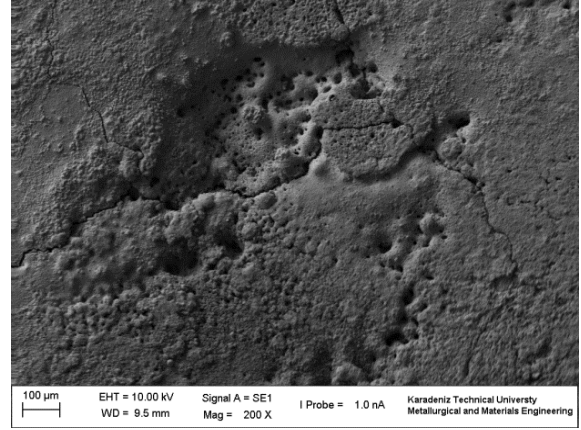
Hareketli Kontak



(n)

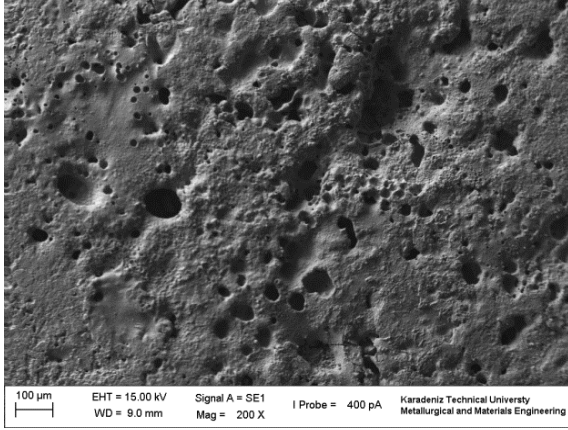


(o)



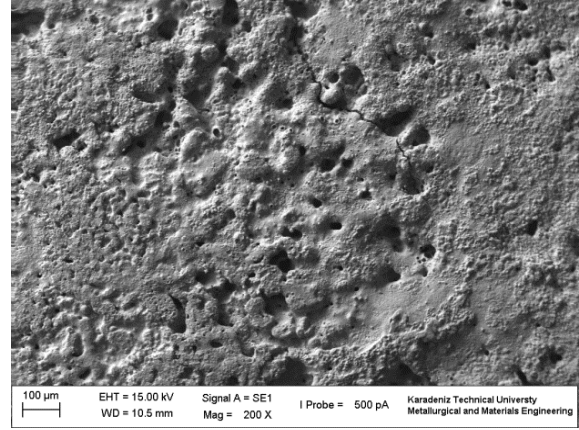
(p)

Sabit Kontak

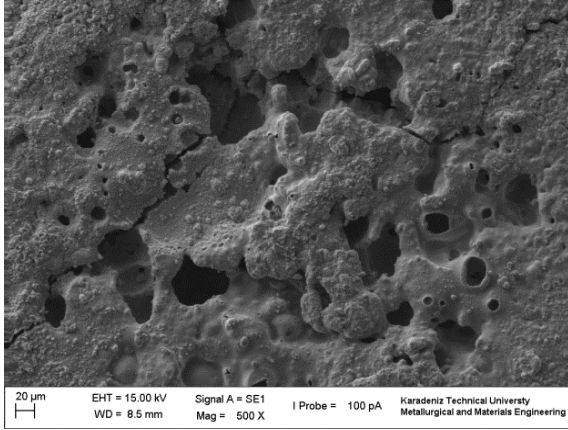


(a)

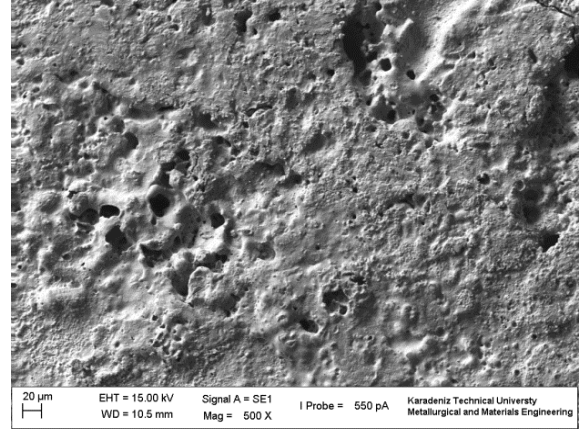
Hareketli Kontak



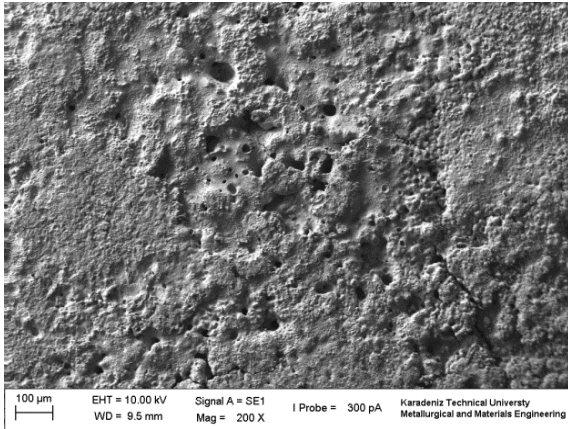
(b)



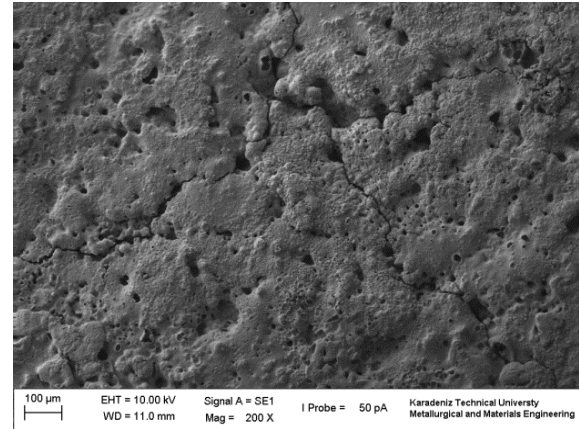
(c)



(d)



(e)

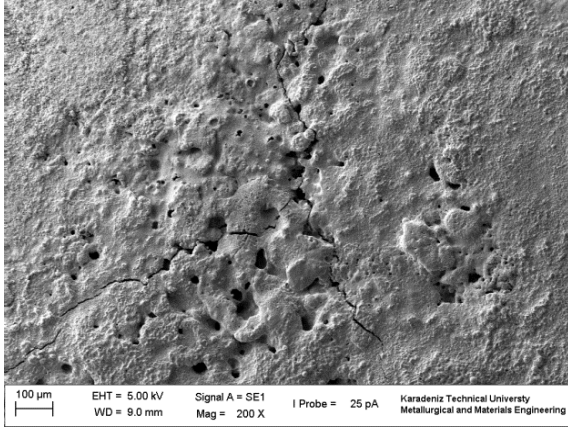


(f)

Şekil 55. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan % 5 TiO₂ takviyeli Ag₈SnO₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim

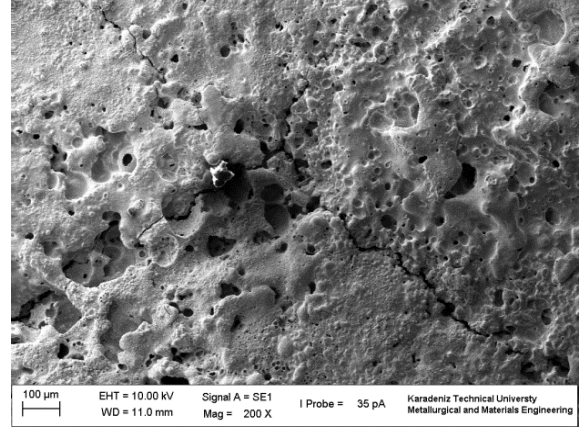
Şekil 55'in devamı

Sabit Kontak

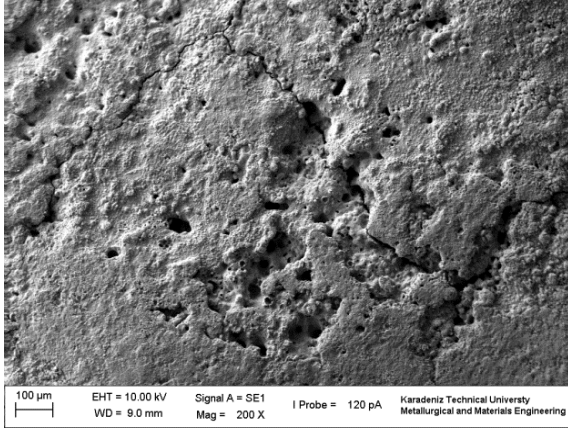


(g)

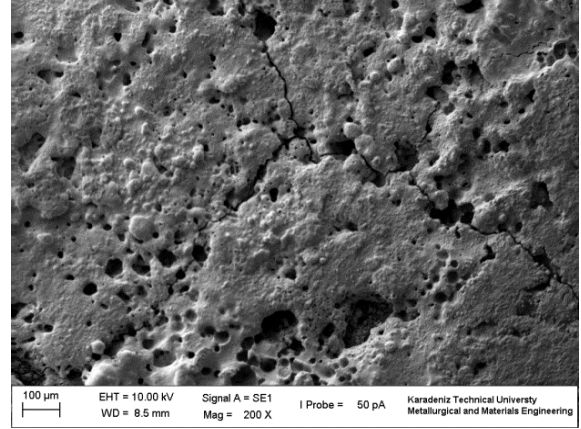
Hareketli Kontak



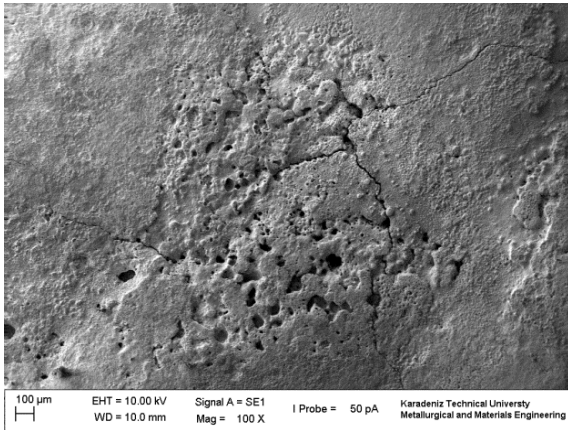
(h)



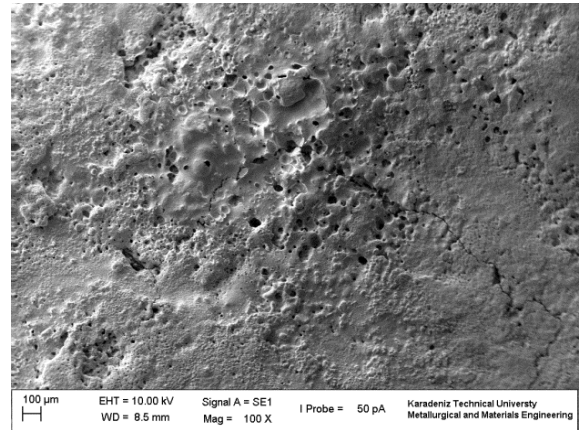
(i)



(j)



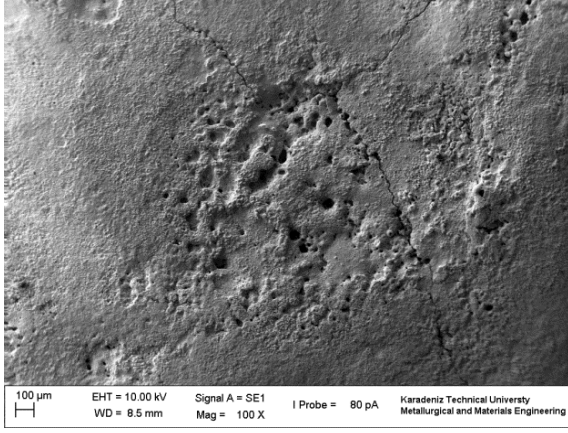
(k)



(l)

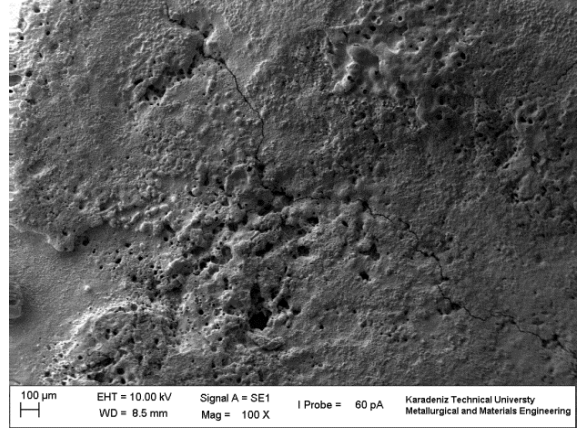
Şekil 55'in devamı

Sabit Kontak

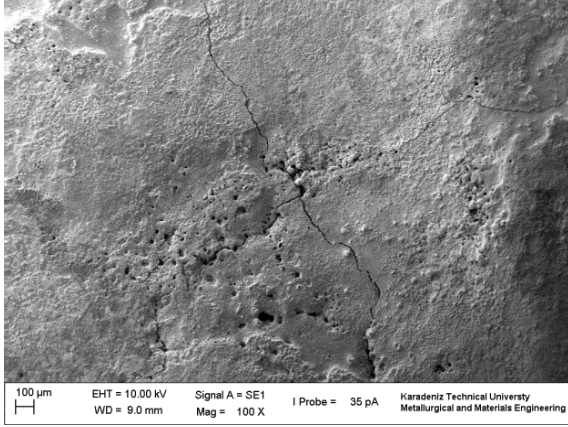


(m)

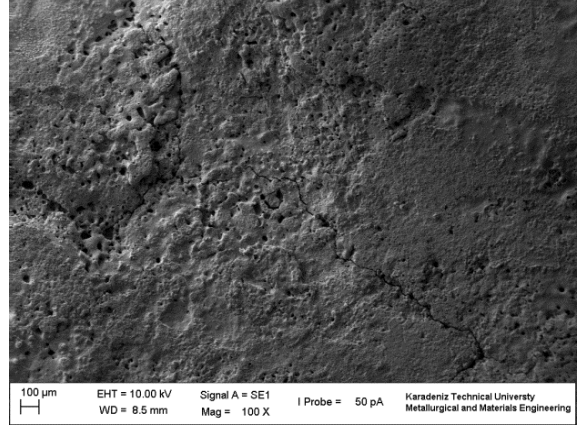
Hareketli Kontak



(n)

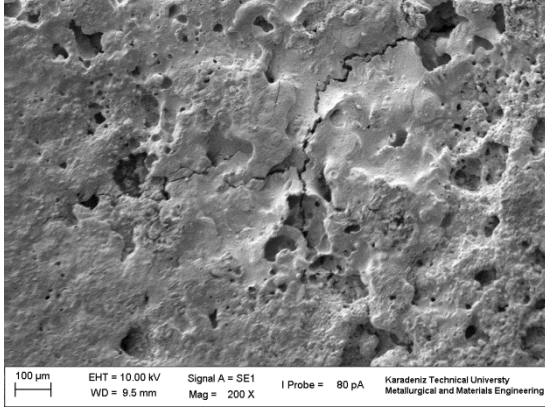


(o)



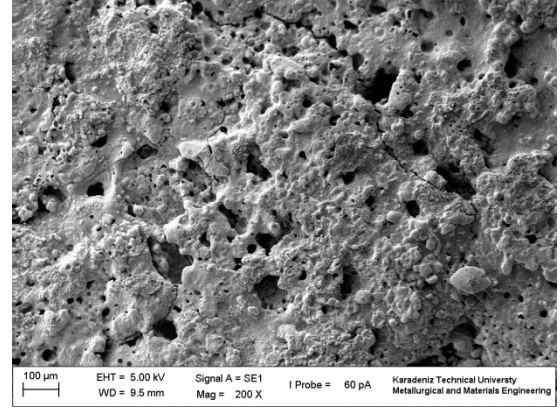
(p)

Sabit Kontakt

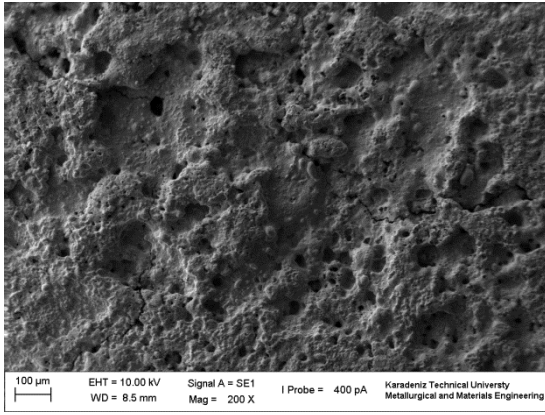


(a)

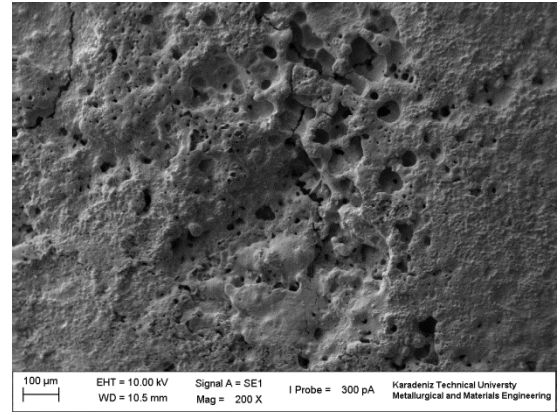
Hareketli Kontakt



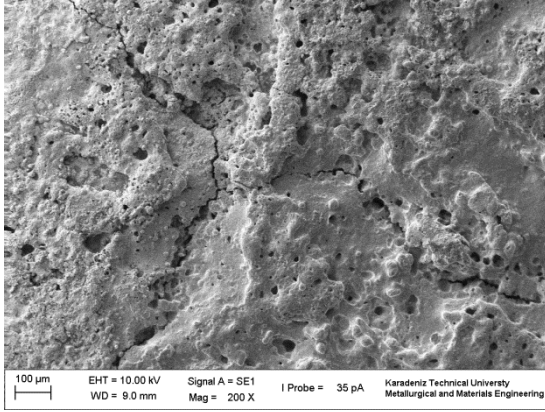
(b)



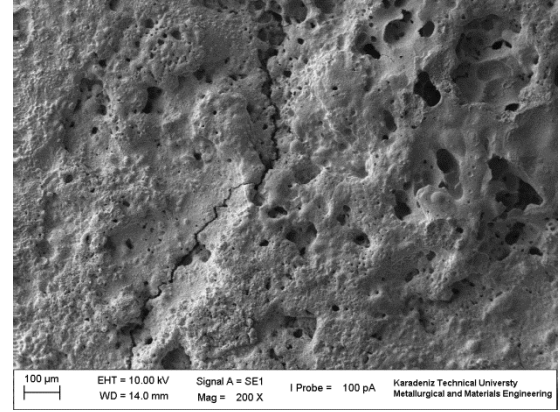
(c)



(d)



(e)

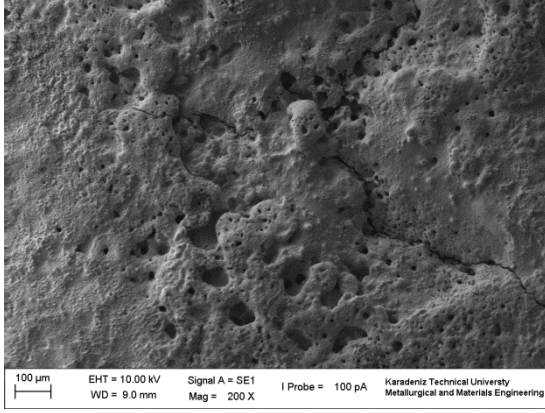


(f)

Şekil 56. 20 A akım şiddetinde ark-erozyon deneyine tabi tutulan % 7 TiO₂ takviyeli Ag₈SnO₂ kompozit kontaklardan elde edilen aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim

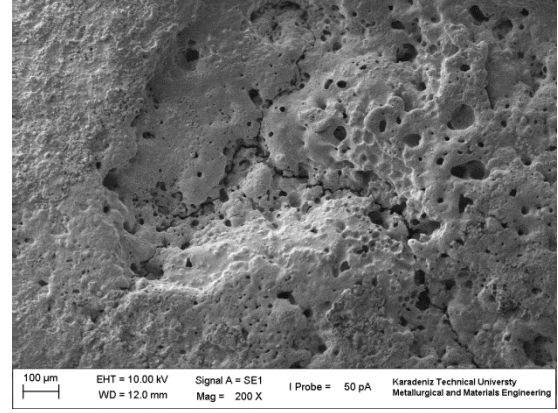
Şekil 56'nın devamı

Sabit Kontak

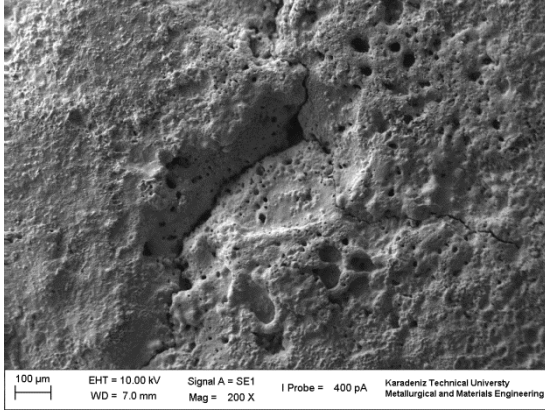


(g)

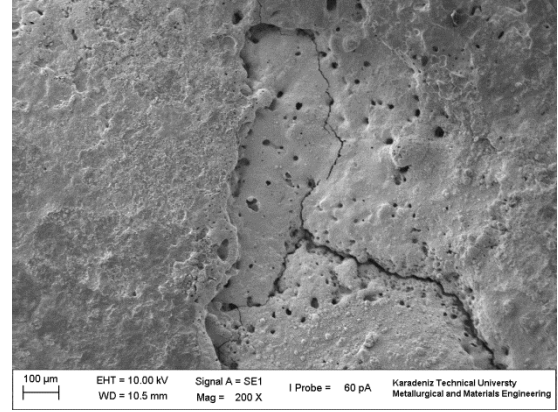
Hareketli Kontak



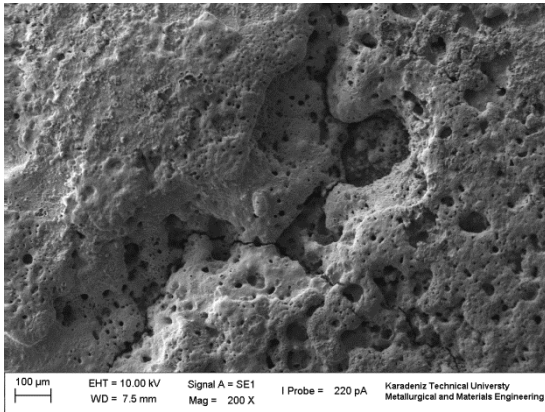
(h)



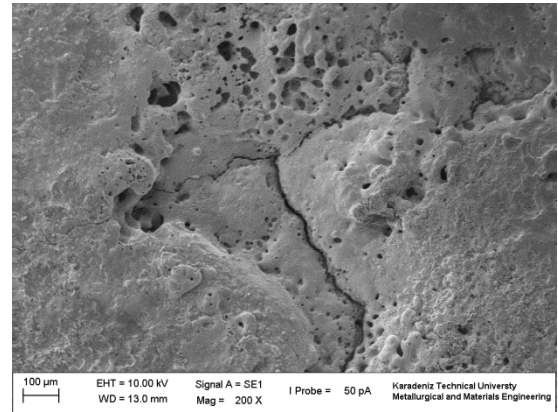
(i)



(j)

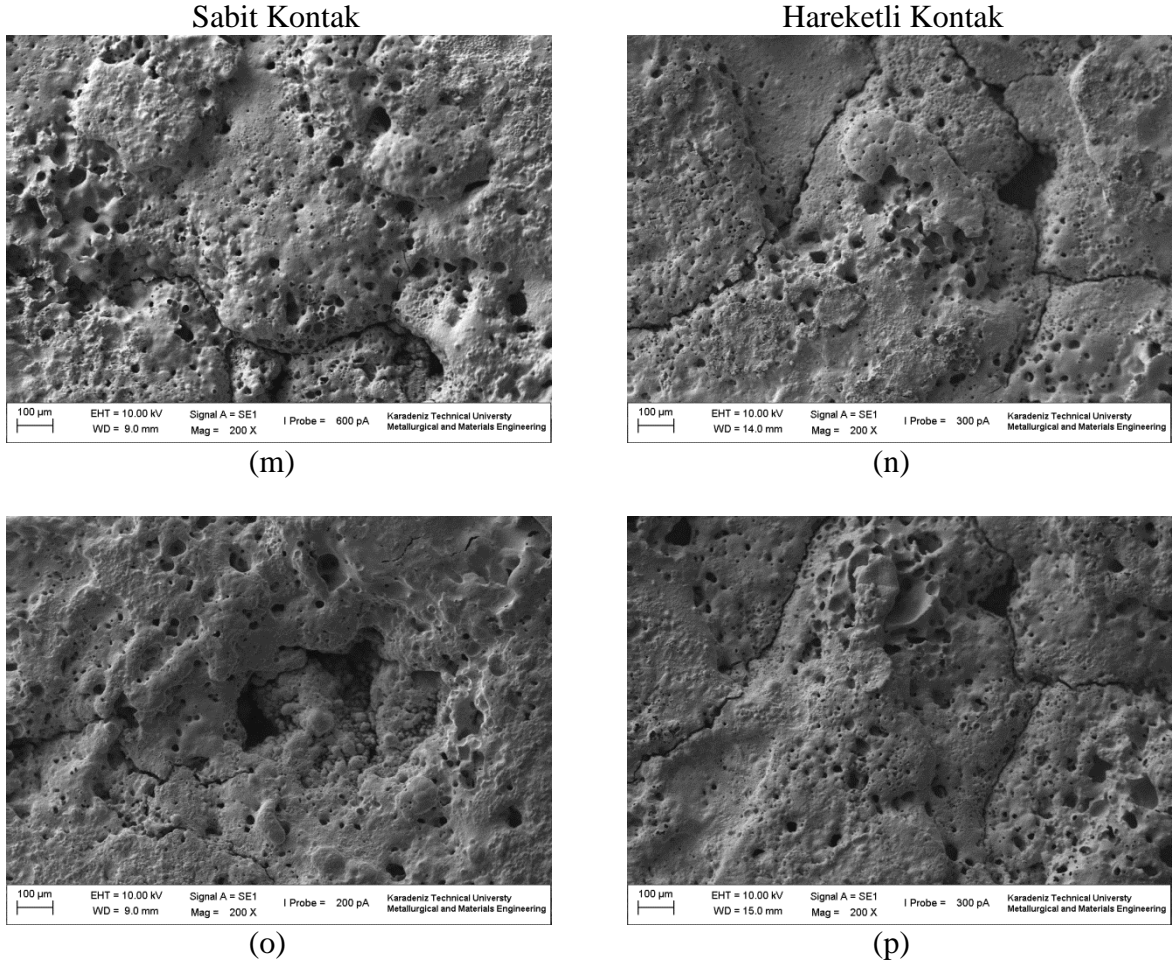


(k)



(l)

Şekil 56'nın devamı



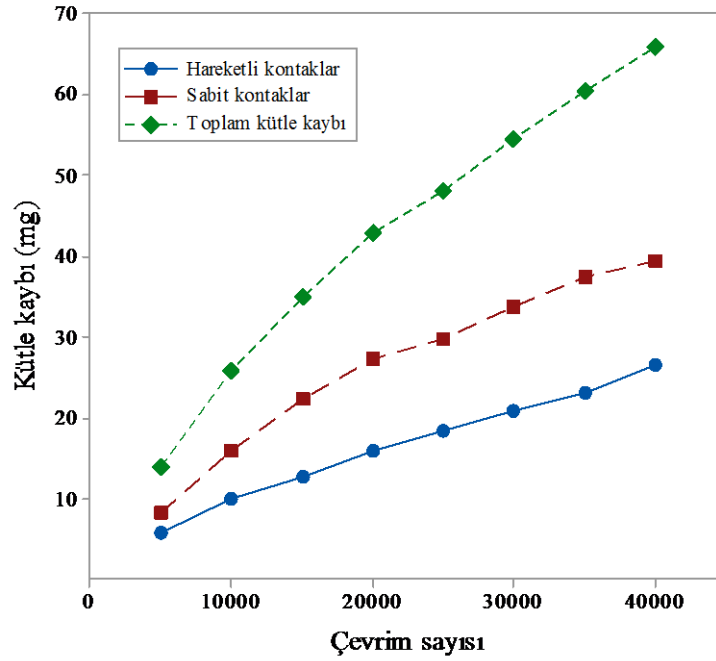
3.5. Ark-Erozyon Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Ark-erozyon deneyleri sonucunda belirli çevrim sayıları için her bir kontak malzemesinde meydana gelen kütle kayıpları sabit ve hareketli kontaklarda ayrı ayrı belirlenmiş ve Tablo 10'da listelenmiştir.

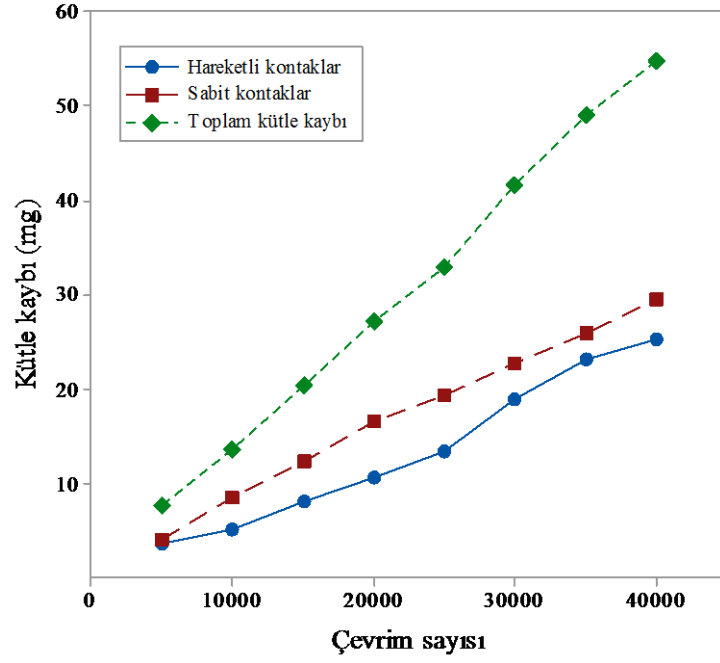
Tablo 10'daki veriler kullanılarak her bir kompozit kontak malzemesinde meydana gelen kayıplar belirlenmiş ve bu kayıpların çevrim sayısına göre değişimlerini gösteren eğriler sabit ve hareketli kontaklar için Şekil 57-61'de ayrı ayrı verilmiştir. Ayrıca TiO_2 oranının ark-erozyon performansına etkisini daha iyi görebilmek amacıyla artan TiO_2 oranına bağlı olarak bütün kompozit çiftlerindeki kütle kayıplarını gösteren eğriler Şekil 62-67'de verilmiştir.

Tablo 10. Farklı kimyasal bileşimlerde üretilen kompozit kontaklarda artan çevrim sayısı ile meydana gelen kütle kayıpları

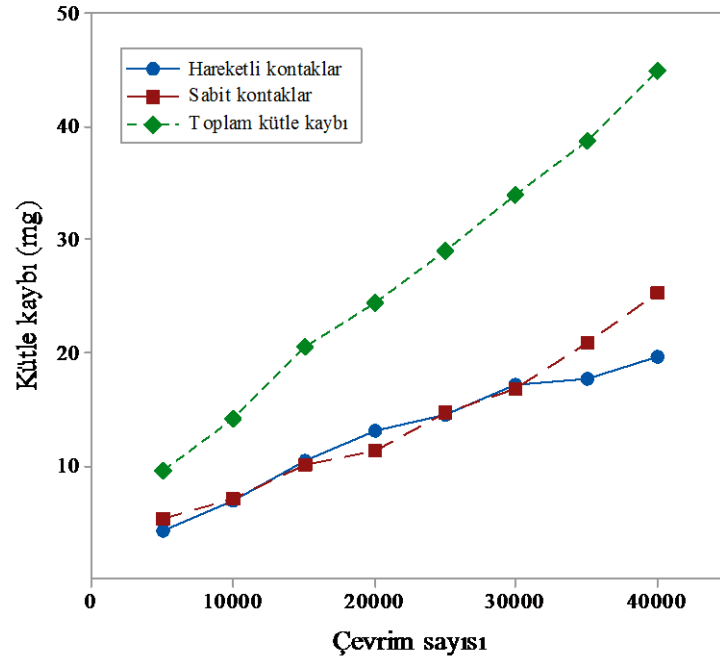
| Kontakt malzemesi | Kontakt cinsi | Çevrim sayısı | | | | | | | |
|--|---------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 5.000 | 10.000 | 15.000 | 20.000 | 25.000 | 30.000 | 35.000 | 40.000 |
| | | Kütle kayıpları (mg) | | | | | | | |
| Ag8SnO ₂ | Sabit | 8,26 | 15,90 | 22,25 | 27,09 | 29,74 | 33,69 | 37,28 | 39,28 |
| | Hareketli | 5,57 | 9,93 | 12,72 | 15,76 | 18,26 | 20,80 | 23,01 | 26,52 |
| | Toplam | 13,83 | 25,83 | 34,97 | 42,85 | 48,00 | 54,49 | 60,29 | 65,80 |
| Ag8SnO ₂ -1TiO ₂ | Sabit | 4,13 | 8,50 | 12,25 | 16,51 | 19,39 | 22,73 | 25,96 | 29,52 |
| | Hareketli | 3,56 | 5,02 | 8,13 | 10,55 | 13,44 | 18,79 | 23,09 | 25,21 |
| | Toplam | 7,69 | 13,52 | 20,38 | 27,06 | 32,83 | 41,52 | 49,05 | 54,73 |
| Ag8SnO ₂ -3TiO ₂ | Sabit | 5,31 | 7,13 | 10,06 | 11,39 | 14,58 | 16,77 | 20,93 | 25,21 |
| | Hareketli | 4,22 | 6,93 | 10,51 | 12,99 | 14,41 | 17,09 | 17,73 | 19,62 |
| | Toplam | 9,53 | 14,06 | 20,57 | 24,38 | 28,99 | 33,86 | 38,66 | 44,83 |
| Ag8SnO ₂ -5TiO ₂ | Sabit | 2,05 | 3,98 | 5,43 | 6,96 | 7,92 | 8,77 | 9,73 | 9,77 |
| | Hareketli | 2,35 | 4,38 | 7,29 | 9,39 | 11,36 | 13,27 | 16,42 | 19,36 |
| | Toplam | 4,4 | 8,36 | 12,72 | 16,35 | 19,28 | 22,04 | 26,15 | 29,13 |
| Ag8SnO ₂ -7TiO ₂ | Sabit | 9,01 | 11,02 | 13,11 | 15,84 | 18,62 | 21,47 | 22,65 | 24,93 |
| | Hareketli | 4,27 | 6,99 | 9,48 | 10,59 | 12,47 | 14,99 | 17,01 | 18,84 |
| | Toplam | 13,28 | 18,01 | 22,59 | 26,43 | 31,09 | 36,46 | 39,66 | 43,77 |



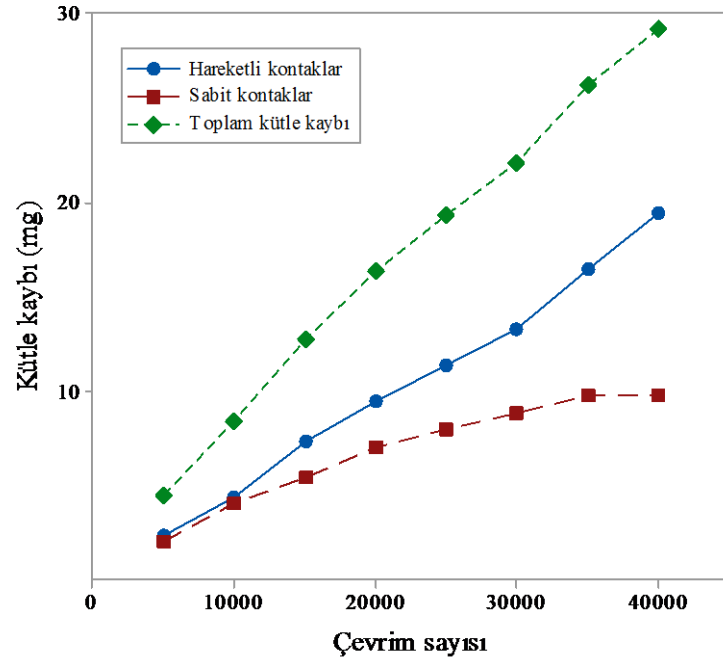
Şekil 57. Ark-erozyon deneyleri sonucunda Ag8SnO₂ kompozit kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları



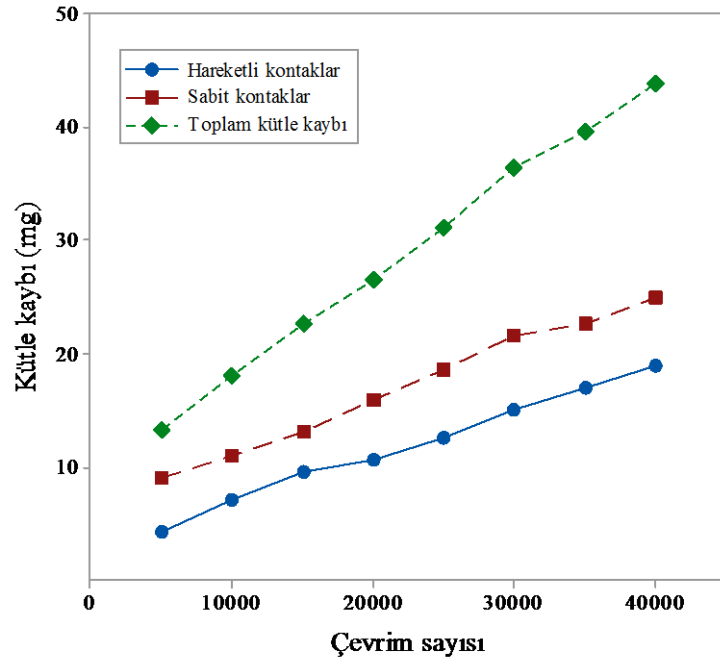
Şekil 58. Ark-erozyon deneyleri sonucunda % 1 TiO_2 takviyeli kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları



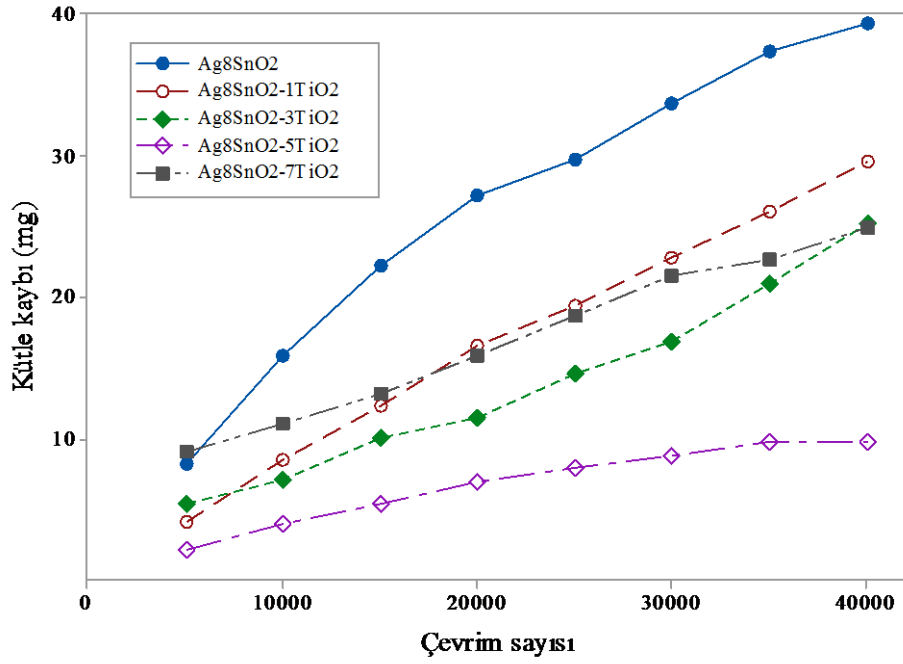
Şekil 59. Ark-erozyon deneyleri sonucunda % 3 TiO_2 takviyeli kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları



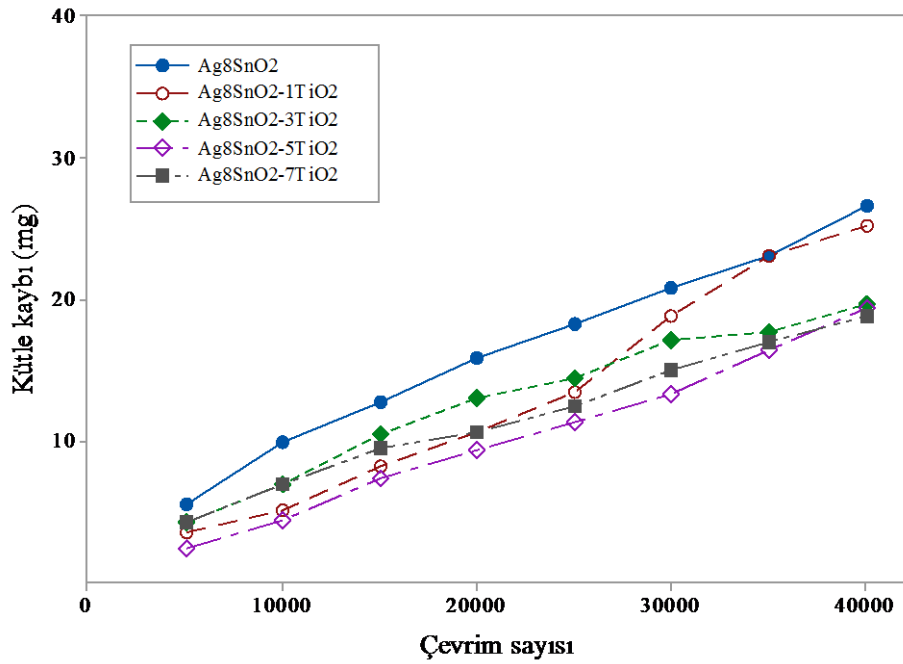
Şekil 60. Ark-erozyon deneyleri sonucunda % 5 TiO_2 takviyeli kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları



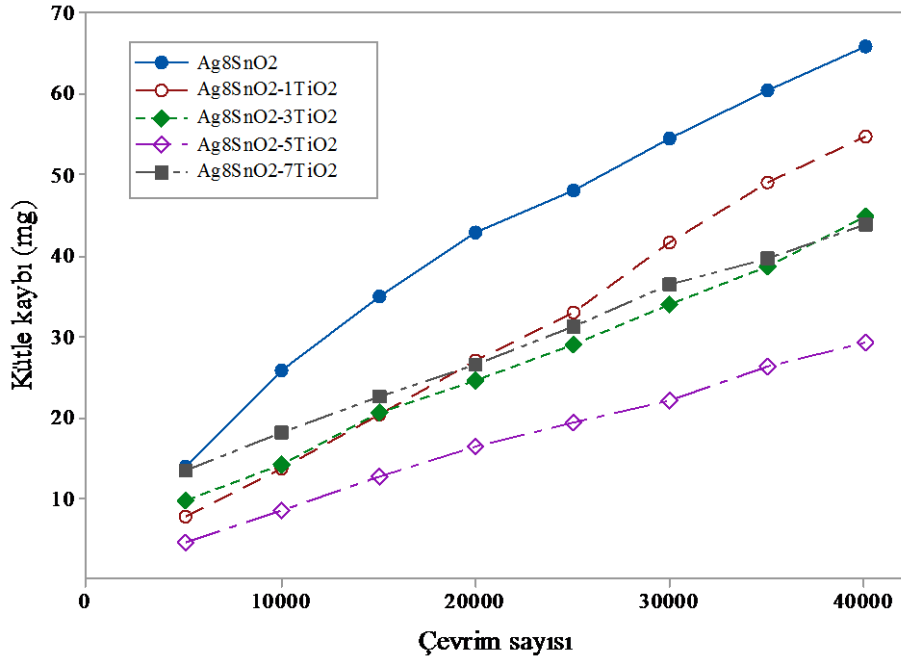
Şekil 61. Ark-erozyon deneyleri sonucunda % 7 TiO_2 takviyeli kontaklarda meydana gelen kütle kayıpları



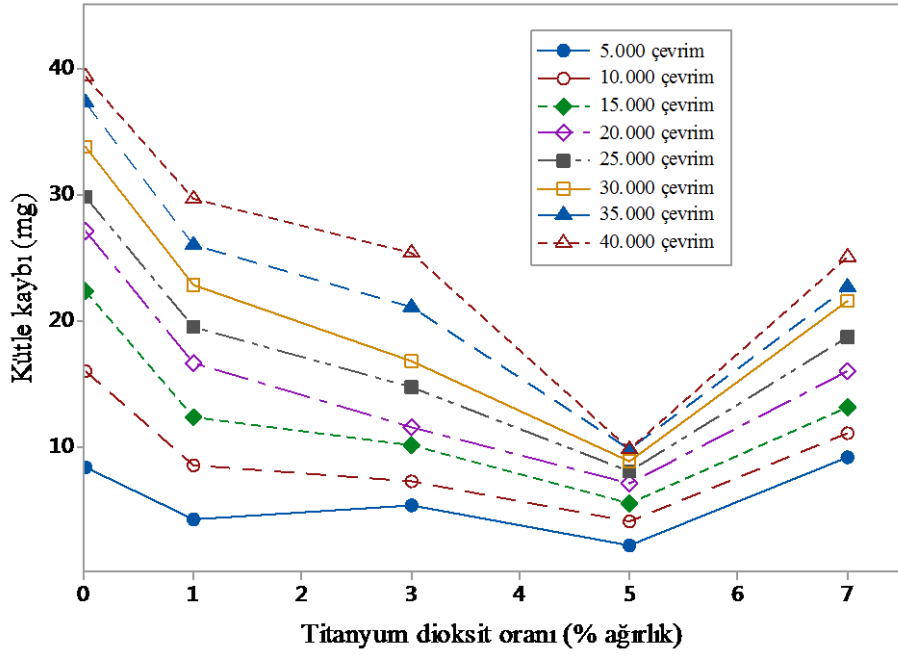
Şekil 62. Ark-erozyon deneyleri sonucunda bütün kompozitlerin sabit kontaklarında meydana gelen kütle kayıpları



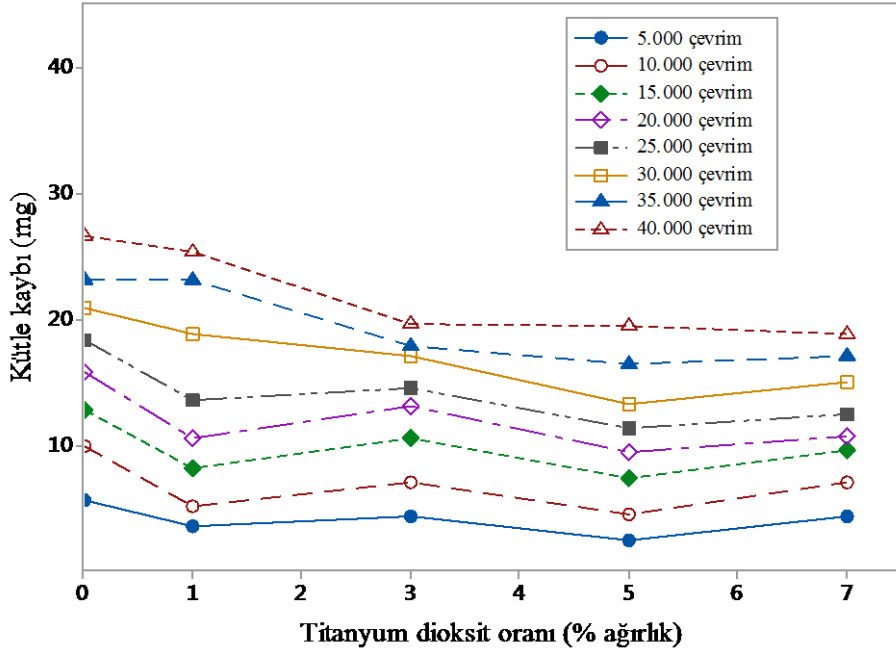
Şekil 63. Ark-erozyon deneyleri sonucunda bütün kompozitlerin hareketli kontaklarında meydana gelen kütle kayıpları



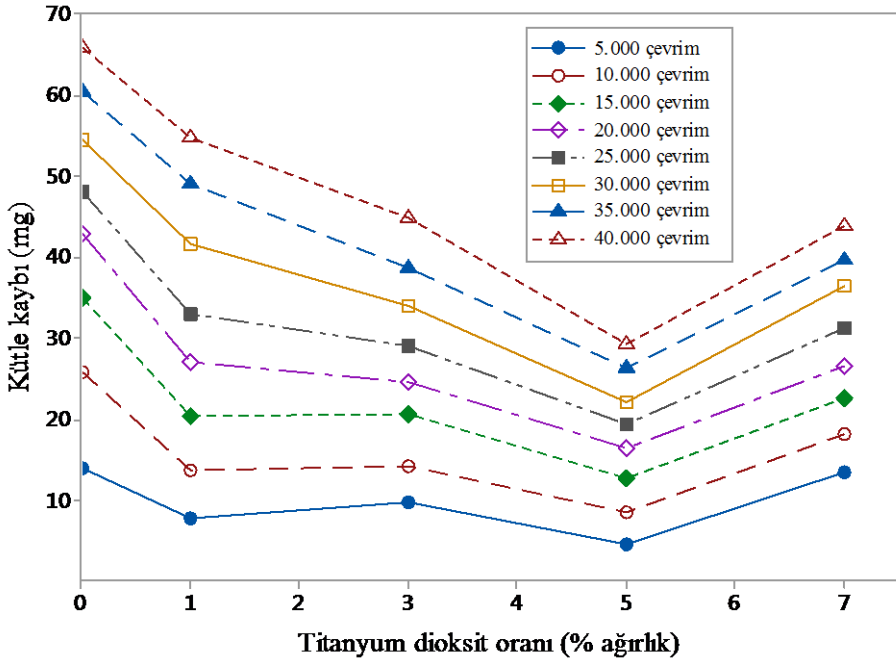
Şekil 64. Ark-erozyon deneyleri sonucunda bütün kompozitlerde meydana gelen toplam kütle kayıpları



Şekil 65. Ark-erozyon deneyleri sonucunda sabit kontaklarda meydana gelen kütle kayıplarının TiO_2 oranı ile değişimi



Şekil 66. Ark-erozyon deneyleri sonucunda hareketli kontaklarda meydana gelen kütle kayıplarının TiO₂ oranı ile değişimi



Şekil 67. Ark-erozyon deneyleri sonucunda bütün kompozitlerde meydana gelen toplam kütle kayıplarının TiO₂ oranı ile değişimi

Kütle kaybının çevrim sayısına göre değişimini gösteren bu grafiklerdeki eğrilerden görüldüğü gibi en yüksek malzeme kaybı TiO_2 takviyesi içermeyen Ag_8SnO_2 kompozitinde ortaya çıkmıştır, Şekil 64. Bununla birlikte söz konusu malzeme kaybının sabit kontaklarda hareketli kontaklara göre genellikle daha yüksek seviyede olduğu görülmektedir (Şekil 62 ve 63). Öte yandan artan TiO_2 takviyesinin Ag_8SnO_2 kompozitinde ortaya çıkan kütle kaybını azalttığı ve yaklaşık % 5 TiO_2 oranında minimum seviyeye indirdiği belirlenmiştir, Şekil 64 ve 67. Bu kritik oranın üzerinde TiO_2 takviyesi yapıldığında kontak malzemelerinin ark-erozyon performansının olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca ark-erozyon deneylerinden elde edilen veriler değerlendirilerek TiO_2 katkısının Ag_8SnO_2 kompozit kontaklardaki kütle kaybına etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şöyle ki % 1'lik TiO_2 katkısının Ag_8SnO_2 kompozitten üretilen hareketli kontaklardan elde edilen kütle kaybına önemli bir etkisi olmazken, sabit kontakların kütle kaybında yaklaşık 10 mg'lık bir azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir, Şekil 65 ve 66. Öte yandan $Ag_8SnO_2-3TiO_2$ kompozitinden üretilen özellikle hareketli kontakların ark-erozyon performansında dikkate değer bir iyileşme görülmektedir, Şekil 63. Nitekim Şekil 59'daki kütle değişim eğrisinden de görüldüğü gibi sabit ve hareketli kontaklardaki kayıplar azalarak birbirine yaklaşan bir eğilim sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kompozitinde kütle kaybının her iki kontak türü için de minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir (Şekil 62 ve 63). Ancak bu değişim kontak türü açısından ele alındığında sabit kontaklardaki kütle kayıplarının hareketli kontaklara göre çok daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir, Şekil 60. Dolayısıyla optimum ark-erozyon performansını sergileyen bileşim $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kompoziti olarak belirlenmiştir. Öte yandan bu kritik seviyenin üzerindeki TiO_2 takviyeleri ark-erozyon performansını kontak türüne de bağlı olarak olumsuz etkilemektedir. Örneğin $Ag_8SnO_2-7TiO_2$ kompozitinde hareketli kontaklardaki kayıp hemen hemen $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kompoziti ile aynı kalmasına karşın sabit kontakların kütle kayıplarında artış tespit edilmiştir (Şekil 65).

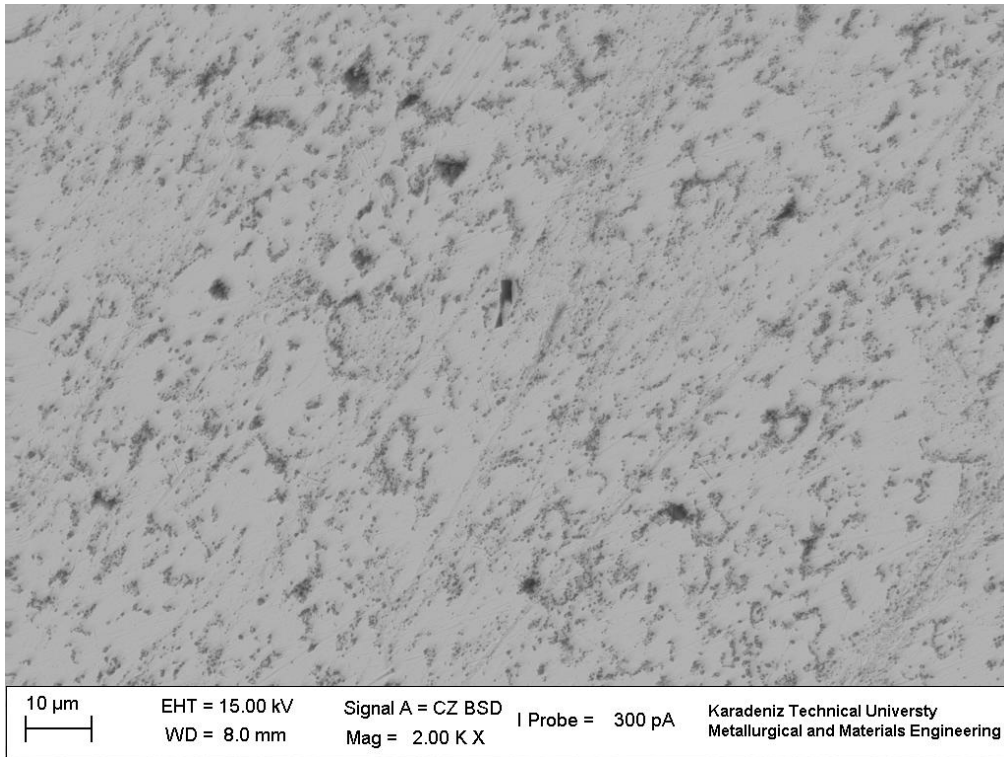
3.6. Optimum Aşınma Performansı Gösteren Kontak Malzemesinin Geliştirilmesi

Yapılan ark-erozyon deneyleri ile bütün kompozit çiftleri yani sabit ve hareketli kontaklar için elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda optimum aşınma

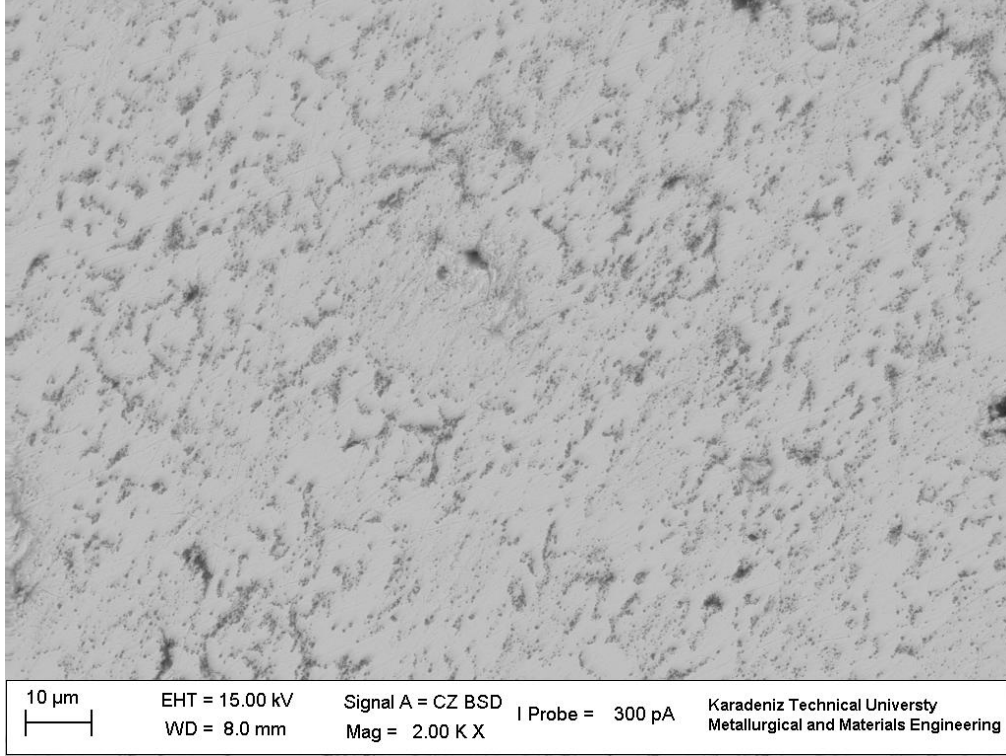
performansını $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ bileşimindeki kontak malzemesinin sergilediği belirlendi. Optimum kimyasal bileşime sahip kompozit kontak malzemesinin performansını daha da yüksek seviyelere çıkarabilmek amacıyla sinterleme süresinin sözü edilen malzemenin mikroyapı, fiziksel ve mekanik özellikleri ile aşınma performansına etkisi detaylı olarak incelendi. Daha önceden 900°C sıcaklığında 1 saat süreyle sinterleme işlemine tabi tutulan $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ ham kompaktının sinterleme kinetiğindeki değişimleri gözlemleyebilmek için söz konusu malzemeye 2-5 saat arasında değişen farklı sürelerde sinterleme işlemi uygulandı.

3.6.1. Sinterleme Süresinin Mikroyapıya Etkileri

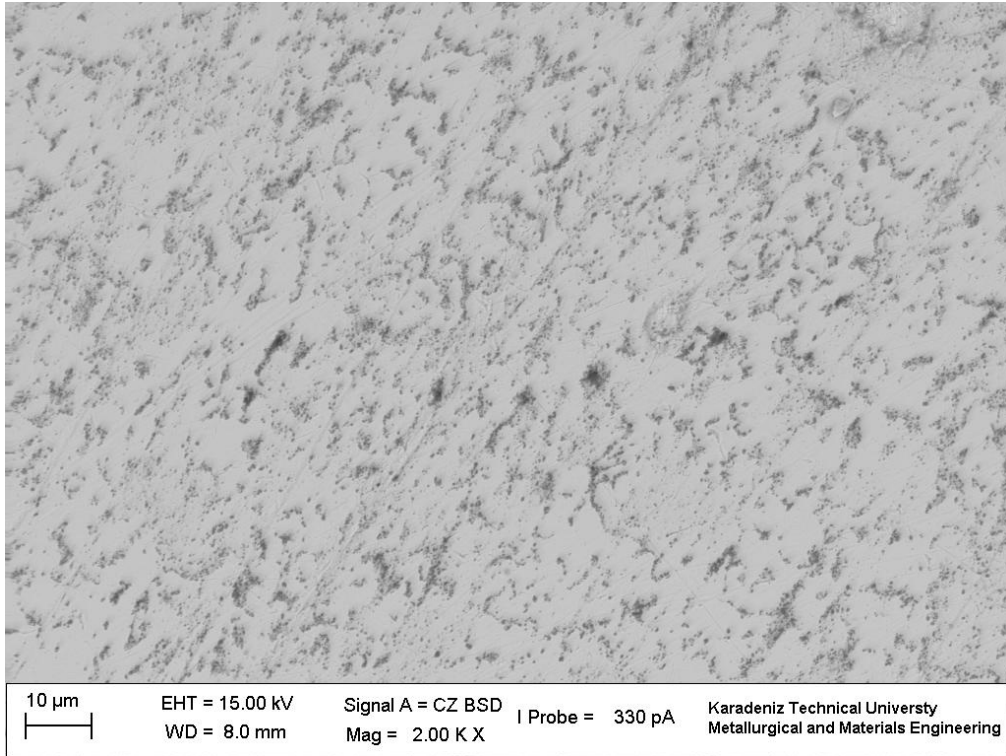
Her bir sinterleme süresi için $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ kompozitlerinden elde edilen içyapıları gösteren SEM fotoğrafları Şekil 68-71'de verilmiştir. Bu şekillerde verilen SEM fotoğraflarından görüldüğü gibi gözenek oranı artan sinterleme süresiyle kademeli olarak azalmakta ve 5 saatlik sinterleme süresi sonunda minimum seviyeye inmektedir. Bu sonuç, yapılan gözenek tayini çalışmalarıyla da desteklenmiştir.



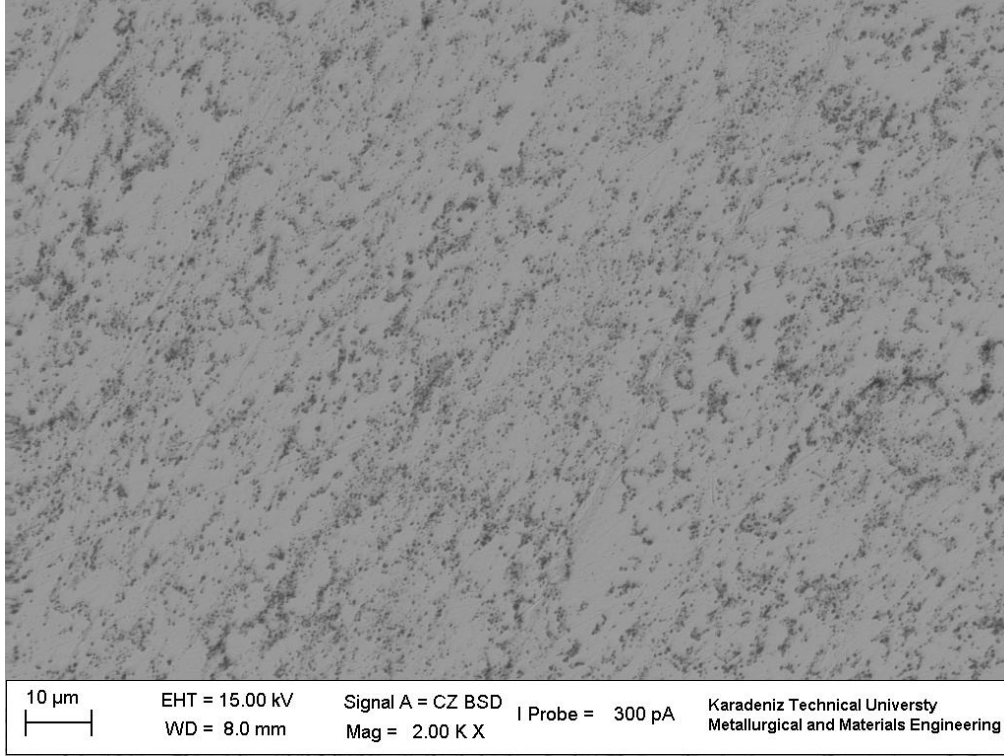
Şekil 68. $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ kompozit kontak malzemesinin 2 saatlik sinterleme sonrası içyapısı



Şekil 69. Ag₈SnO₂-5TiO₂ kompozit kontak malzemesinin 3 saatlik sinterleme sonrası içyapısı



Şekil 70. Ag₈SnO₂-5TiO₂ kompozit kontak malzemesinin 4 saatlik sinterleme sonrası içyapısı



Şekil 71. Ag₈SnO₂-5TiO₂ kompozit kontak malzemesinin 5 saatlik sinterleme sonrası içyapısı

3.6.2. Sinterleme Süresinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Sinterleme süresinin üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini gösteren ölçüm sonuçları Tablo 11’de verilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi Ag₈SnO₂-5TiO₂ kompozitinin yoğunluk değeri artan sinterleme süresiyle kademeli olarak artmaktadır. Nitekim 900°C’lik sabit sinterleme sıcaklığında, 1 saat sinterleme sonucunda 9,23 g/cm³ olan yoğunluk değeri 5 saatlik sinterleme süresi sonunda maksimum yoğunluk değeri olan 9,36 g/cm³’e ulaşmıştır. Ayrıca sinterleme sonrası yoğunluk değerlerinin artmasına bağlı olarak gözenek oranlarında azalmalar kaydedilmiştir. Tablo 11’de verilen ve her bir sinterleme süresine karşılık gelen gözenek oranlarını gösteren değerler, daha önceki SEM fotoğraflarında görülen gözenek azalmasını doğrular niteliktedir. Buna göre 900°C’lik sabit sinterleme sıcaklığında 1 saatlik sinterleme işlemi sonucu % 2,43 olan gözenek oranı sinterleme süresinin arttırılması ile kademeli olarak azalma göstermiş ve 5 saatlik sinterleme süresi sonunda minimum gözenek oranı olan % 1,06’ya düşmüştür. Sinterleme süresinin 2-5 saat aralığında değiştirilmesi sonucu fiziksel özelliklerde elde edilen bu iyileşmelere bağlı olarak söz konusu kompozitin sertlik değerlerinde de artış

tespit edilmiştir. Şöyle ki $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ kompozitinin 1 saatlik sinterleme işlemi sonrası 95 HV olan sertliği 5 saatlik sinterleme işlemi sonrası 100 HV değerine yükselmiştir.

Tablo 11. Sinterleme süresinin $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ kompozitinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi

| Numune | Sinterleme süresi (saat) | Teorik yoğunluk (g/cm^3) | Sinterleme öncesi gözenek oranı (%) | Sinterleme sonrası yoğunluk (g/cm^3) | Sinterleme sonrası gözenek oranı (%) | Sertlik (HV 0,1) |
|---|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------------|------------------|
| $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ | 1 | 9,46 | 4,33 | 9,23 | 2,43 | 95 |
| $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ | 2 | 9,46 | 4,33 | 9,28 | 1,90 | 97 |
| $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ | 3 | 9,46 | 4,33 | 9,30 | 1,69 | 97 |
| $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ | 4 | 9,46 | 4,33 | 9,32 | 1,48 | 98 |
| $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ | 5 | 9,46 | 4,33 | 9,36 | 1,06 | 100 |

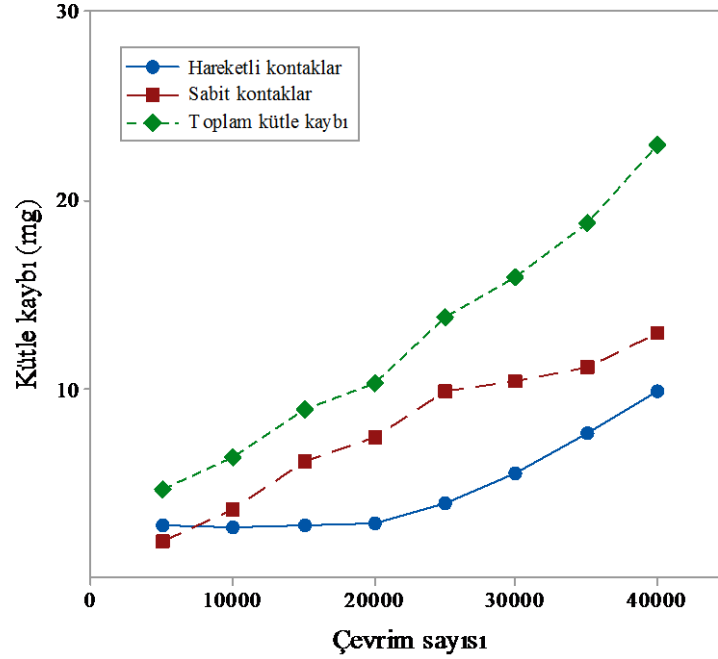
3.6.3. Geliştirilen Malzemenin Ark-Erozyon Deneylelerinden Elde Edilen Veriler

Sinterleme süresinin $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ kompozitinin yapı ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi sonucunda optimum özellikler 5 saatlik sinterleme süresinde elde edildiği için ark-erozyon deneyleri bu şartlarda üretilen kontak malzemesine daha önceki deney parametreleri (20 A akım, saatte 1.000 çevrim) kullanılarak uygulandı. Ark-erozyon deneyleri sonucunda belirli çevrim sayıları için $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ kompozit kontak malzemesinde meydana gelen kütle kayıpları, sabit ve hareketli kontaklar için ayrı ayrı belirlenmiş ve Tablo 12’de listelenmiştir. Tablo 12’deki veriler kullanılarak sözü edilen kontak malzemesinin sabit ve hareketli kontaklarında artan çevrim sayısı ile ortaya çıkan kayıplar, bir başka deyişle çevrim sayısının kütle kaybına etkisini gösteren eğriler belirlenmiş ve Şekil 72’deki grafikte verilmiştir. Bu tablo ve şekilden görüldüğü gibi $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ kompozitinin optimum sinterleme süresinde sinterlenmesi sonucunda özellikle hareketli kontakların performansında olumlu yönde gelişmeler elde edilmiştir. Şöyle ki kütle kayıpları 19,36 mg’dan 9,91 mg değerine düşmüştür. Öte yandan sabit kontaklardaki kütle kayıplarında bir miktar artış gözlenmiş, yani optimizasyon öncesi 9,77 mg olan kütle kayıpları optimizasyon sonrası 12,95 mg değerine yükselmiştir. Ancak

toplam kütle kayıpları dikkate alındığında, sinterleme süresinin söz konusu kompozitin ark-erozyon direncini olumlu etkilediği söylenebilir. Nitekim optimizasyon öncesi 29,13 mg olan kütle kaybı optimizasyon sonrası 22,86 mg değerine düşmüştür.

Tablo 12. Geliştirilen $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kontak malzemesinin sabit ve hareketli kontaklarında artan çevrim sayısı ile meydana gelen kütle kayıpları

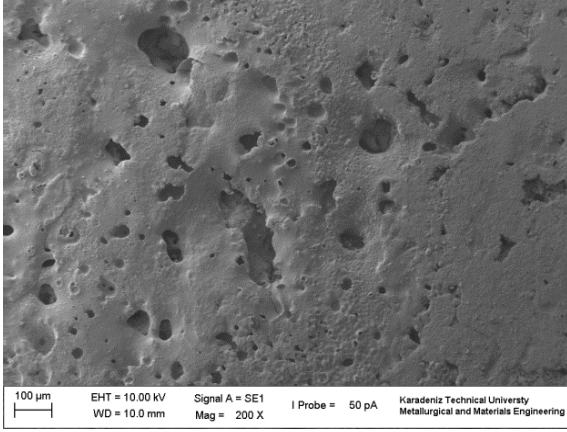
| Kontak malzemesi | Kontak cinsi | Çevrim sayısı | | | | | | | |
|---|--------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 5.000 | 10.000 | 15.000 | 20.000 | 25.000 | 30.000 | 35.000 | 40.000 |
| Ag ₈ SnO ₂ -5TiO ₂ | Sabit | 1,93 | 3,64 | 6,2 | 7,44 | 9,84 | 10,37 | 11,16 | 12,95 |
| | Hareketli | 2,74 | 2,68 | 2,74 | 2,87 | 3,94 | 5,56 | 7,6 | 9,91 |
| | Toplam | 4,67 | 6,32 | 8,94 | 10,31 | 13,78 | 15,93 | 18,76 | 22,86 |



Şekil 72. Optimize edilen % 5 TiO₂ takviyeli kontaklarda ark-erozyonu sonucu meydana gelen kütle kayıpları

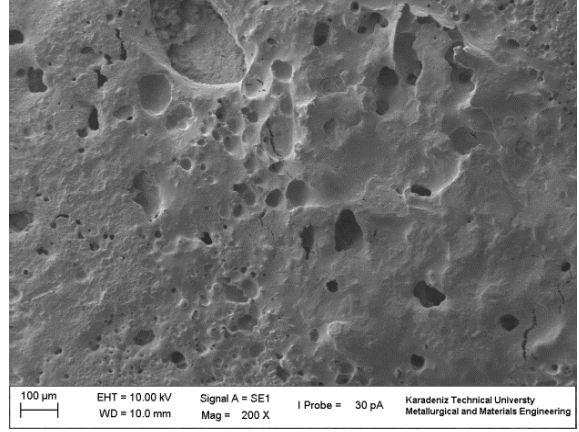
Optimizasyon işlemi sonrası elde edilen kompozit kontaklar kullanılarak yapılan ark-erozyon deneyi sonucunda oluşan aşınma yüzeyleri Şekil 73'te her iki kontak türü için ayrı ayrı verilmiştir. Söz konusu şekildeki SEM fotoğraflarından arkın daha geniş bir alana dağılarak yüzeyde daha az oranda tahribat yarattığı görülmektedir. Ergime izlerinin gözlenmesi 15.000 çevrimi bulmuştur. Kontakların karşılıklı etkileşimi ve malzeme transferi sonucu 30.000 çevrim sonrasında oldukça düzgün yüzeyler elde edildi. Ayrıca mikroçatlak sayısının da önemli oranda azaldığı gözlemlendi.

Sabit Kontak

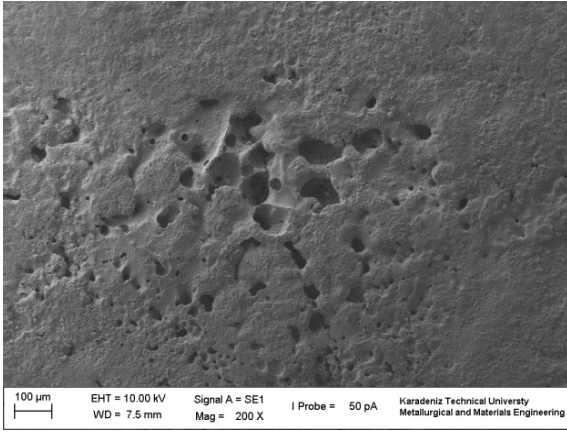


(a)

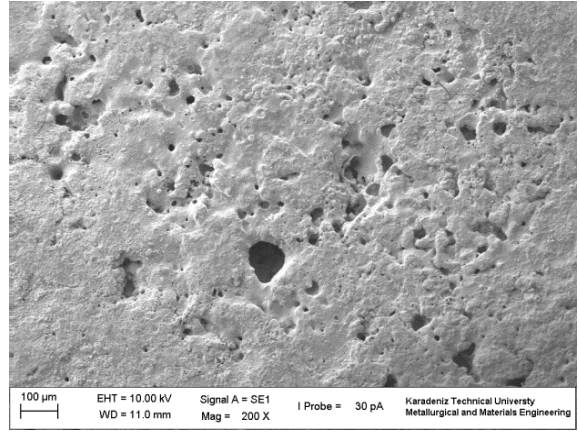
Hareketli Kontak



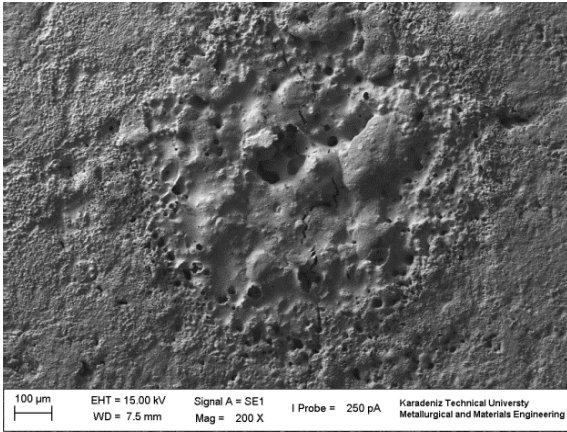
(b)



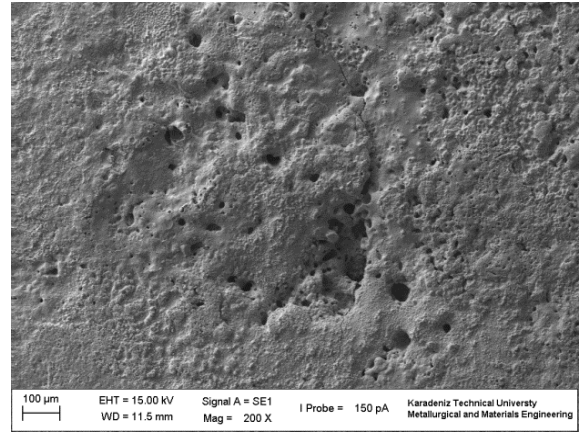
(c)



(d)



(e)

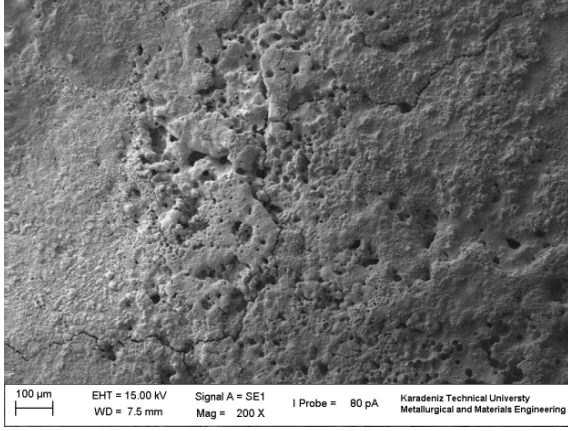


(f)

Şekil 73. Optimize edilen % 5 TiO₂ takviyeli kontakların 20 A akım şiddetindeki ark-erozyonu sonucu oluşan aşınma yüzeyleri: (a, b) 5.000; (c, d) 10.000; (e, f) 15.000; (g, h) 20.000; (i, j) 25.000; (k, l) 30.000; (m, n) 35.000 ve (o, p) 40.000 çevrim

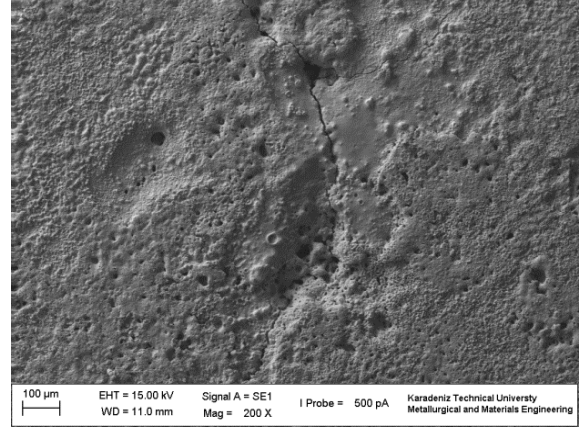
Şekil 73'ün devamı

Sabit Kontak

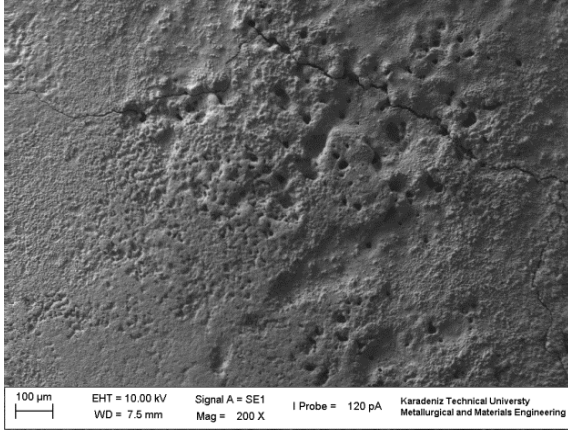


(g)

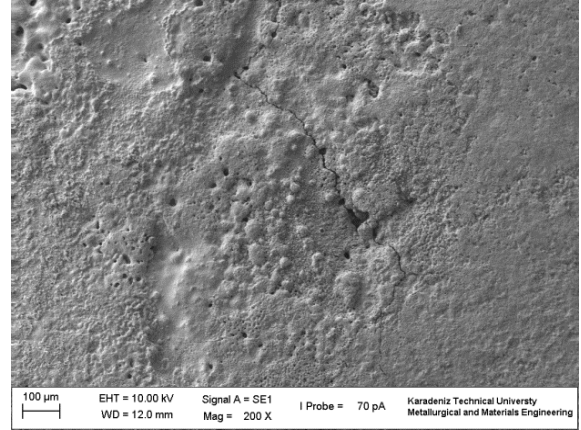
Hareketli Kontak



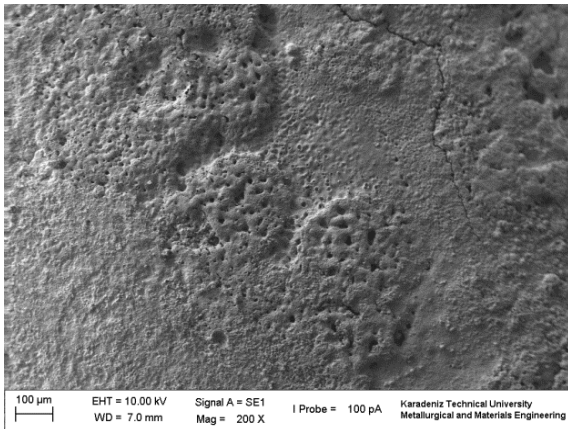
(h)



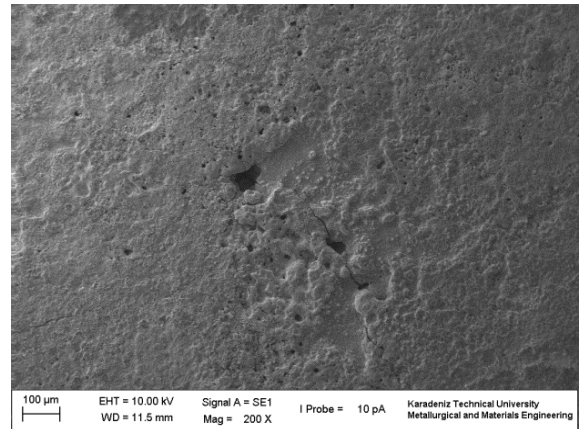
(i)



(j)

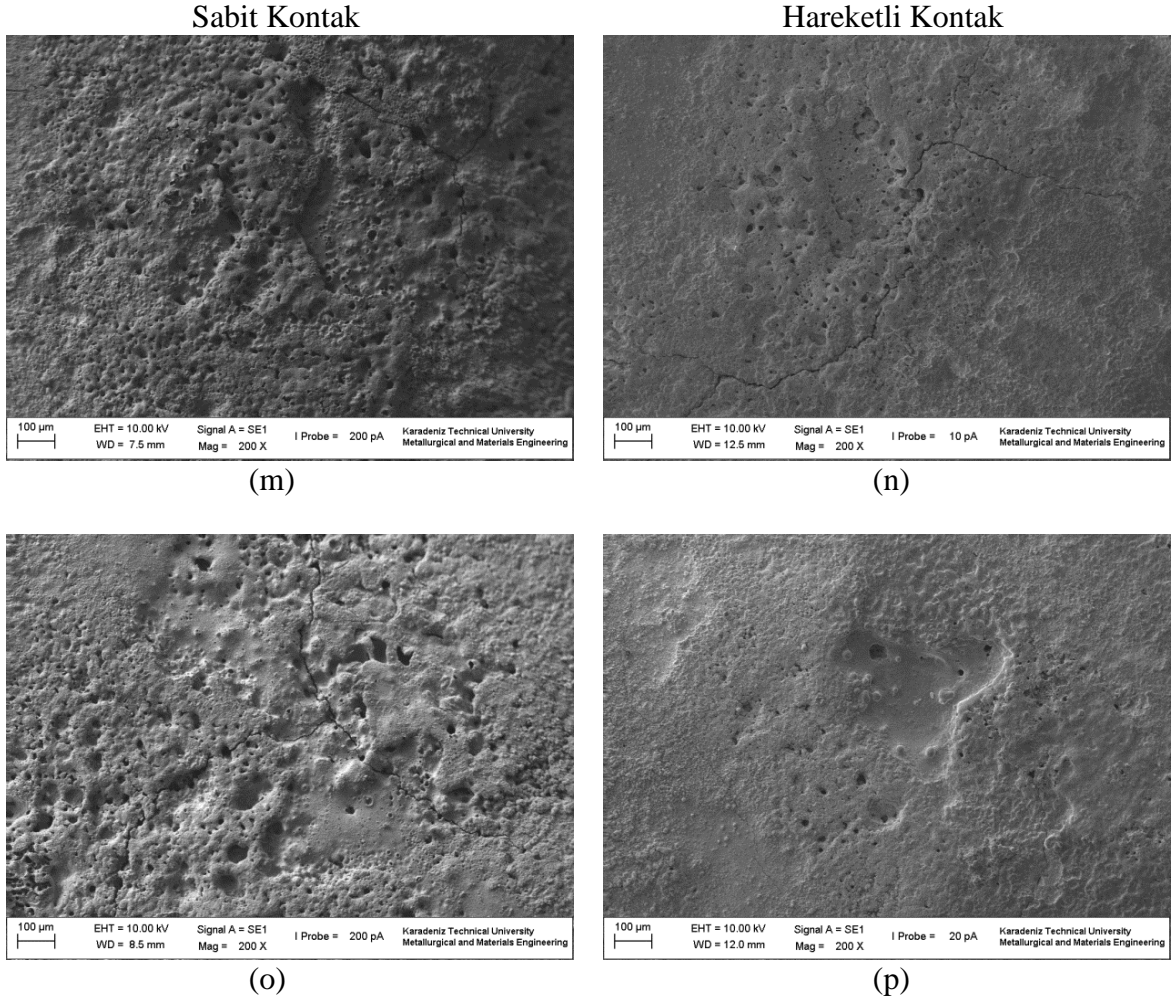


(k)



(l)

Şekil 73'ün devamı



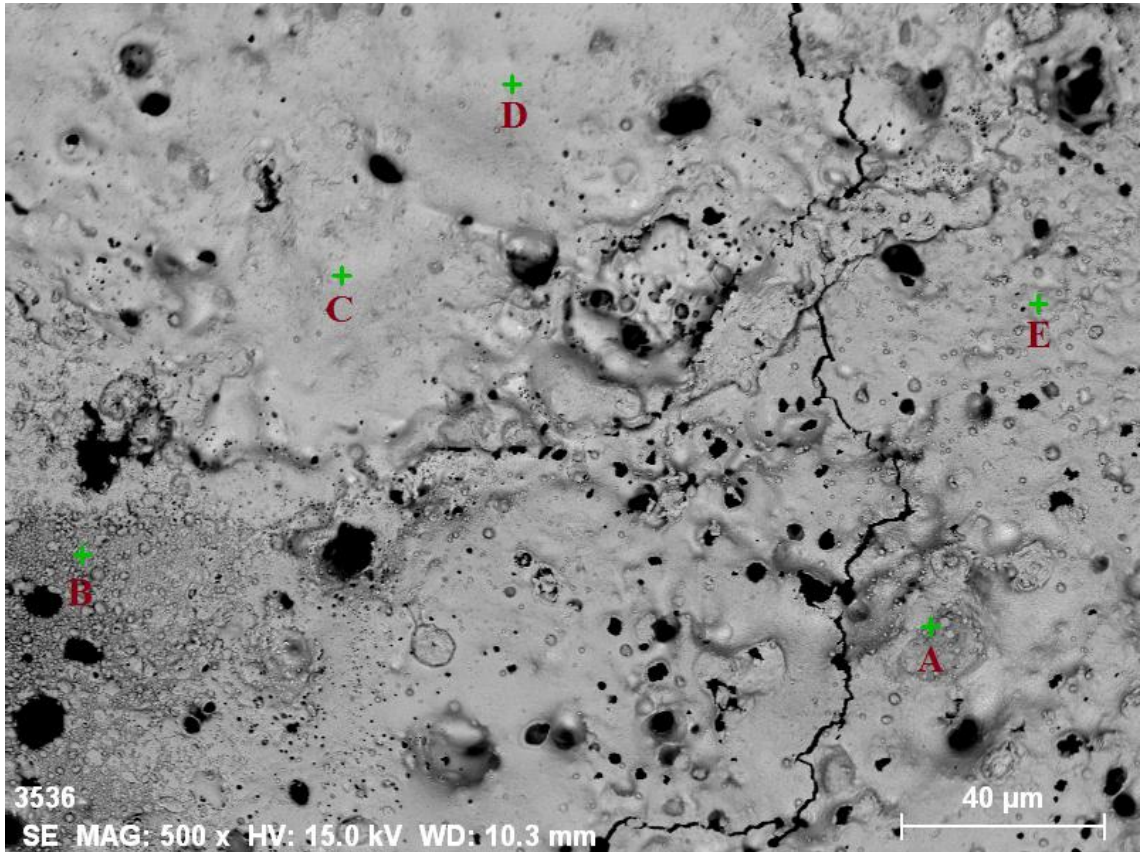
Yüzey bozunumlarının azaldığını gösteren bu SEM fotoğrafları, ölçülen kütle kayıplarındaki optimize edilmemiş duruma göre azalmayı doğrular niteliktedir.

3.7. Ark-Erozyonu Etkisi Altında Kalan Bölgelerin EDS Analizleri

Üretilen kompozit kontak malzemelerinin yüzeylerinde ark-erozyonu deneyleri sonucunda meydana gelen değişimler taramalı elektron mikroskobu ile bütünlük olarak çalışan EDS ünitesi kullanılarak nokta, çizgi ve haritalama analizleriyle üç farklı şekilde incelendi. Söz konusu analizler aşağıda ayrı ayrı ele alınmaktadır.

3.7.1. EDS Nokta Analizleri

% 3, % 5 ve % 7 TiO₂ takviyeli kompozitlerin ark-etkili bölgelerinin nokta analizleri yardımıyla incelendiği görüntüler Şekil 74-76'da; söz konusu kompozitlerin yüzeylerindeki 5 farklı noktadan alınan element yüzdeleri ise Tablo 13-15'te verilmiştir. Şekil 74 ve Tablo 13'ten görüldüğü gibi A, B ve C noktalarının Ag içerikleri yaklaşık olarak aynı olmasına karşın TiO₂ oranlarındaki değişime bağlı olarak en düşük deformasyona C bölgesinde rastlanılmıştır. C bölgesindeki Ti oranının diğer bölgedeki Ti oranlarına göre daha yüksek seviyede (% 1,65) olması bu tespiti destekler niteliktedir. E bölgesinde ise Sn parçacıklarının birikmesi sonucu diğer bölgelere göre daha yüksek oranda (% 5,94) Sn içeriği tespit edilmiştir.

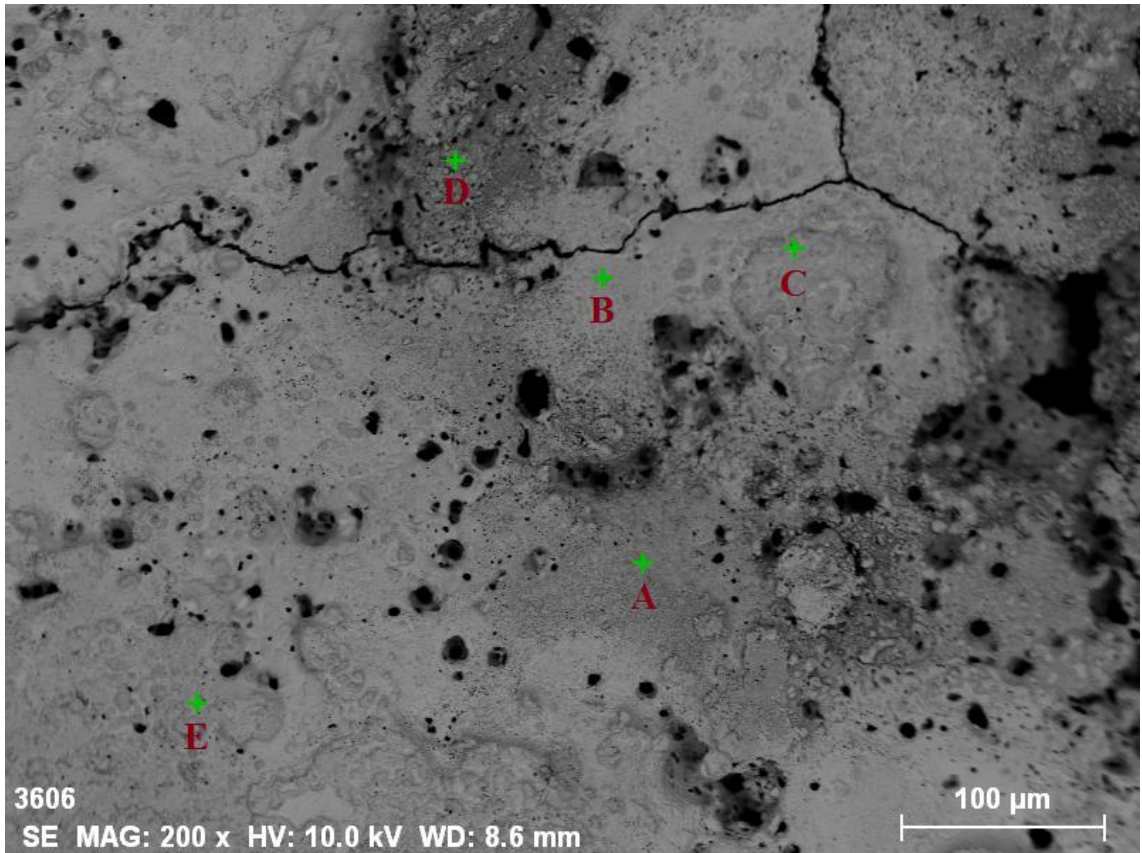


Şekil 74. % 3 TiO₂ takviyeli kompozite ait nokta analiz görüntüsü

Tablo 13. Ark-erozyon deneyi sonunda % 3 TiO₂ takviyeli kompozit kontak yüzeyinden alınan beş farklı noktadaki elementlerin oranı

| Element | Kimyasal bileşim (% ağırlık) | | | | |
|---------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | A Bölgesi | B Bölgesi | C Bölgesi | D Bölgesi | E Bölgesi |
| Ag | 76,45 | 77,16 | 75,89 | 82,91 | 70,66 |
| Sn | 2,22 | 2,86 | 2,90 | 2,30 | 5,94 |
| Ti | 0,93 | 0,73 | 1,65 | 0,66 | 0,89 |
| O | 20,41 | 19,25 | 19,56 | 14,13 | 22,51 |

Şekil 75 ve Tablo 14'ten görüldüğü gibi C ve E noktaları birbirine yakın Ag ve Sn içeriğine sahipken, Ti oranı E bölgesinde daha yoğundur. Bu yüzden C bölgesinde eriyik şeklinde bir yüzey bozunumu görülürken E bölgesinde söz konusu bozunum gözlenmemiştir. Bunun dışında A ve B bölgeleri yaklaşık olarak aynı Sn oranlarına sahipken A bölgesindeki TiO₂ oranının daha düşük olmasına bağlı olarak söz konusu bölgede kısmi ergime gözlemlendi. B bölgesi yeterli oranda MeO takviyeleri içerdiği için bu bölgenin A bölgesine göre daha dirençli bir yapı sergilediğini söylemek mümkündür.

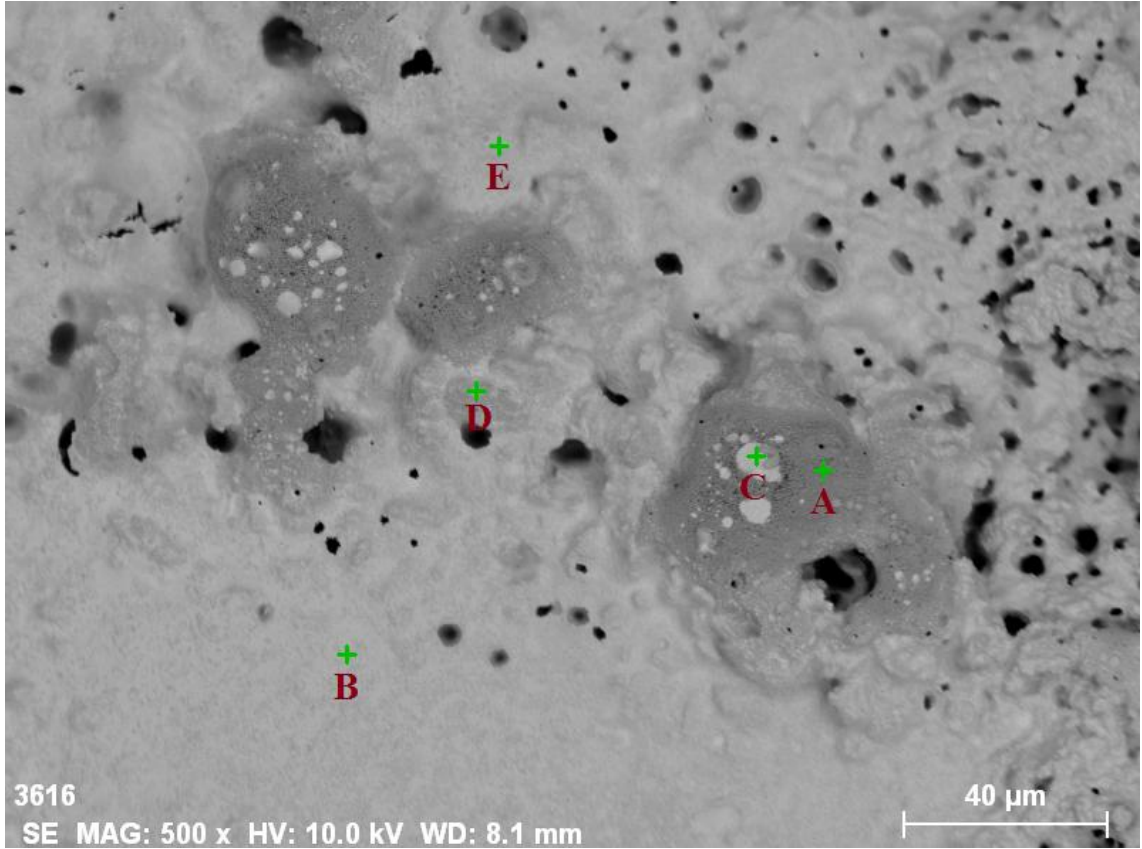


Şekil 75. % 5 TiO₂ takviyeli kompozite ait nokta analiz görüntüsü

Tablo 14. Ark-erozyon deneyi sonunda % 5 TiO₂ takviyeli kompozit kontak yüzeyinden alınan beş farklı noktadaki elementlerin oranı

| Element | Kimyasal bileşim (% ağırlık) | | | | |
|---------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | A Bölgesi | B Bölgesi | C Bölgesi | D Bölgesi | E Bölgesi |
| Ag | 90,08 | 75,32 | 72,85 | 82,68 | 71,06 |
| Sn | 4,52 | 4,69 | 3,41 | 4,99 | 3,46 |
| Ti | 2,76 | 5,95 | 6,15 | 3,07 | 7,10 |
| O | 2,64 | 14,03 | 17,58 | 9,27 | 18,37 |

Şekil 76 ve Tablo 15’te optimum orandan daha yüksek oranda TiO₂ takviyesi içeren kontak malzemelerinin erozyona maruz kalması sonucu kontak yüzeylerinde meydana gelen değişimler ortaya koyulmuştur. Buna göre A bölgesinde tümsek şeklinde ergimeye karşı dirençli bir yapının olduğu gözlemlendi. Tablo 15’ten de görüldüğü gibi söz konusu bölgenin Ag içeriği çok düşük seviyededir (% 7,77). B ve E bölgelerinin akımın tümseklerde yoğunlaşması sebebiyle bozunumdan daha az etkilendiği görüldü.



Şekil 76. % 7 TiO₂ takviyeli kompozite ait nokta analiz görüntüsü

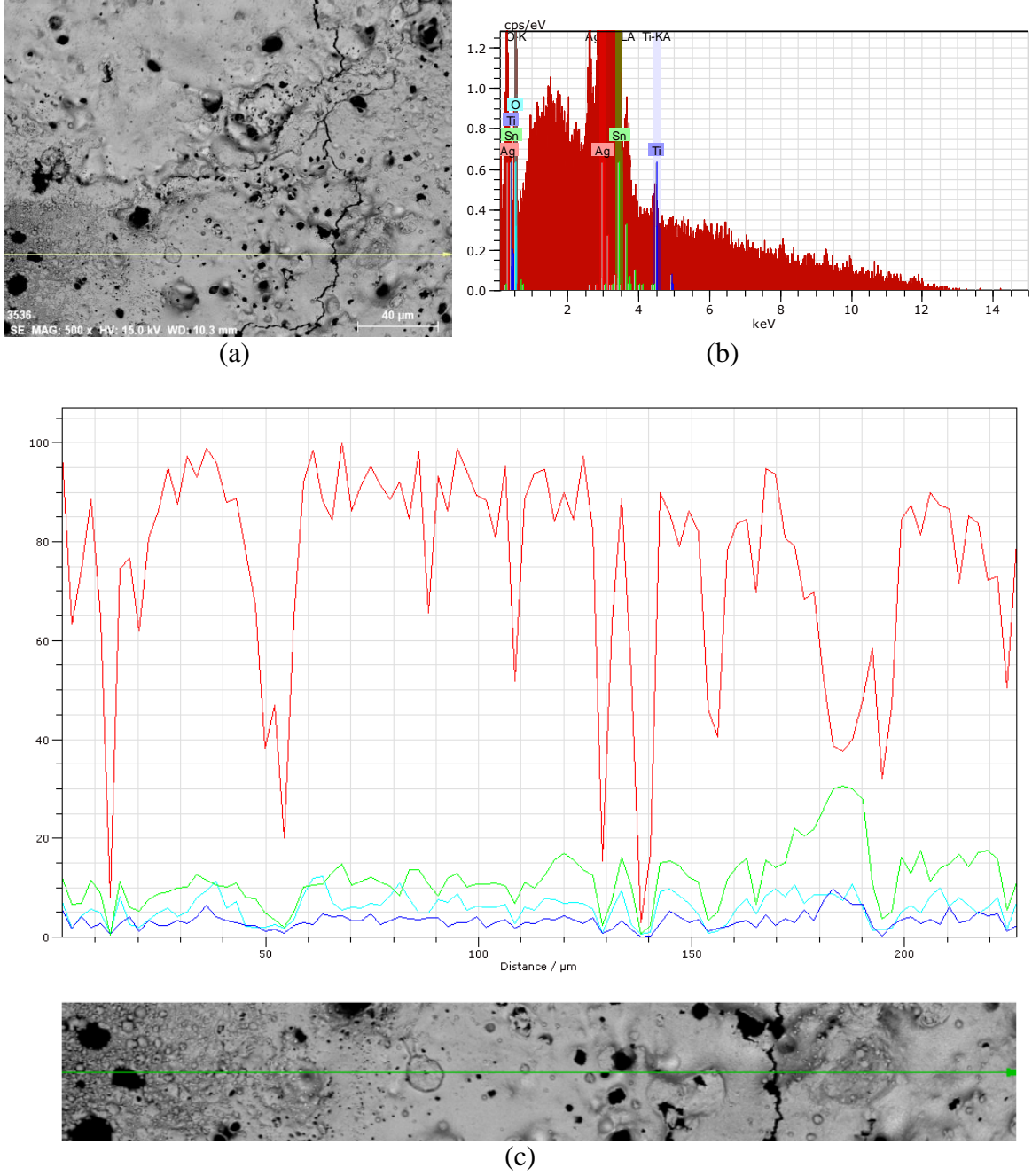
Tablo 15. Ark-erozyon deneyi sonunda % 7 TiO₂ takviyeli kompozit kontak yüzeyinden alınan beş farklı noktadaki elementlerin oranı

| Element | Kimyasal bileşim (% ağırlık) | | | | |
|---------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | A Bölgesi | B Bölgesi | C Bölgesi | D Bölgesi | E Bölgesi |
| Ag | 7,77 | 81,42 | 89,51 | 48,66 | 74,73 |
| Sn | 29,26 | 2,61 | 2,73 | 16,40 | 7,75 |
| Ti | 13,38 | 6,43 | 4,47 | 9,67 | 4,79 |
| O | 49,60 | 9,54 | 3,29 | 25,27 | 12,72 |

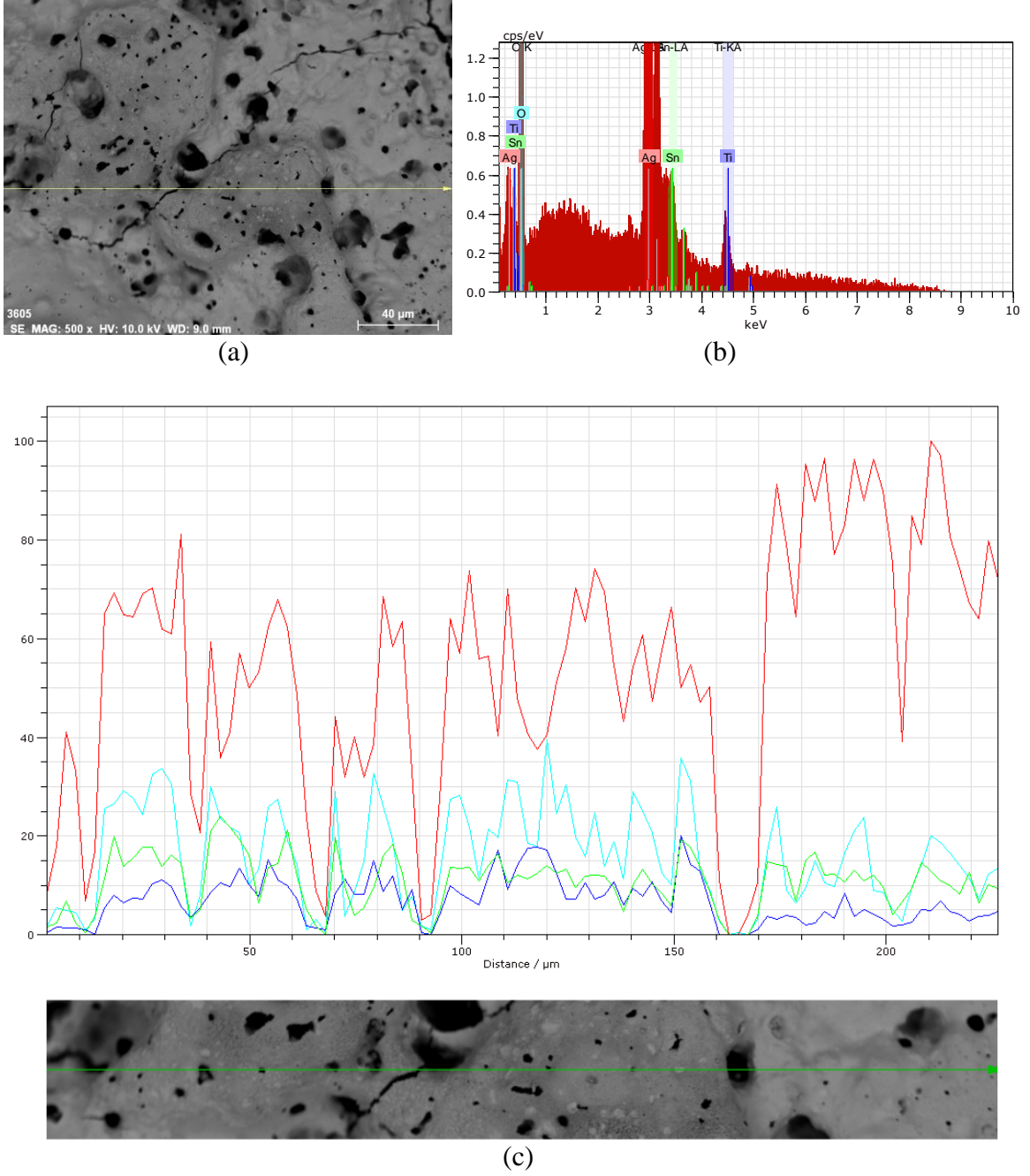
3.7.2. EDS Çizgi Analizleri

Nokta analizlerine ek olarak ark dağılımındaki homojenliğin değerlendirilmesi amacıyla ark-erozyonuna maruz kalan kontak yüzeyleri EDS çizgi analizleri ile detaylı olarak incelendi. Böylece elementlerin yoğunlaştığı bölgeler, piklerdeki değişimle tespit edilebilmektedir. Şekil 77-79'da farklı oranlarda TiO₂ içeren bölgeler üzerinden çizgi analizleri yapılarak sapmaların görüldüğü yerler tespit edildi. Bu analiz sonuçlarında kırmızı, yeşil, mavi ve turkuaz renkler sırasıyla Ag, Sn, Ti ve O elementlerini temsil etmektedir. Şekil 77'de görüldüğü gibi % 3 TiO₂ takviyeli malzemenin seçili bölgesinin sağ tarafına doğru yeşil ile gösterilen Sn pikinin şiddetinde bir artış tespit edildi. Bu yüzden Şekil 77c'den de net olarak görüldüğü gibi SnO₂ ağırlıklı bir bölgenin oluştuğu ortaya çıkmıştır.

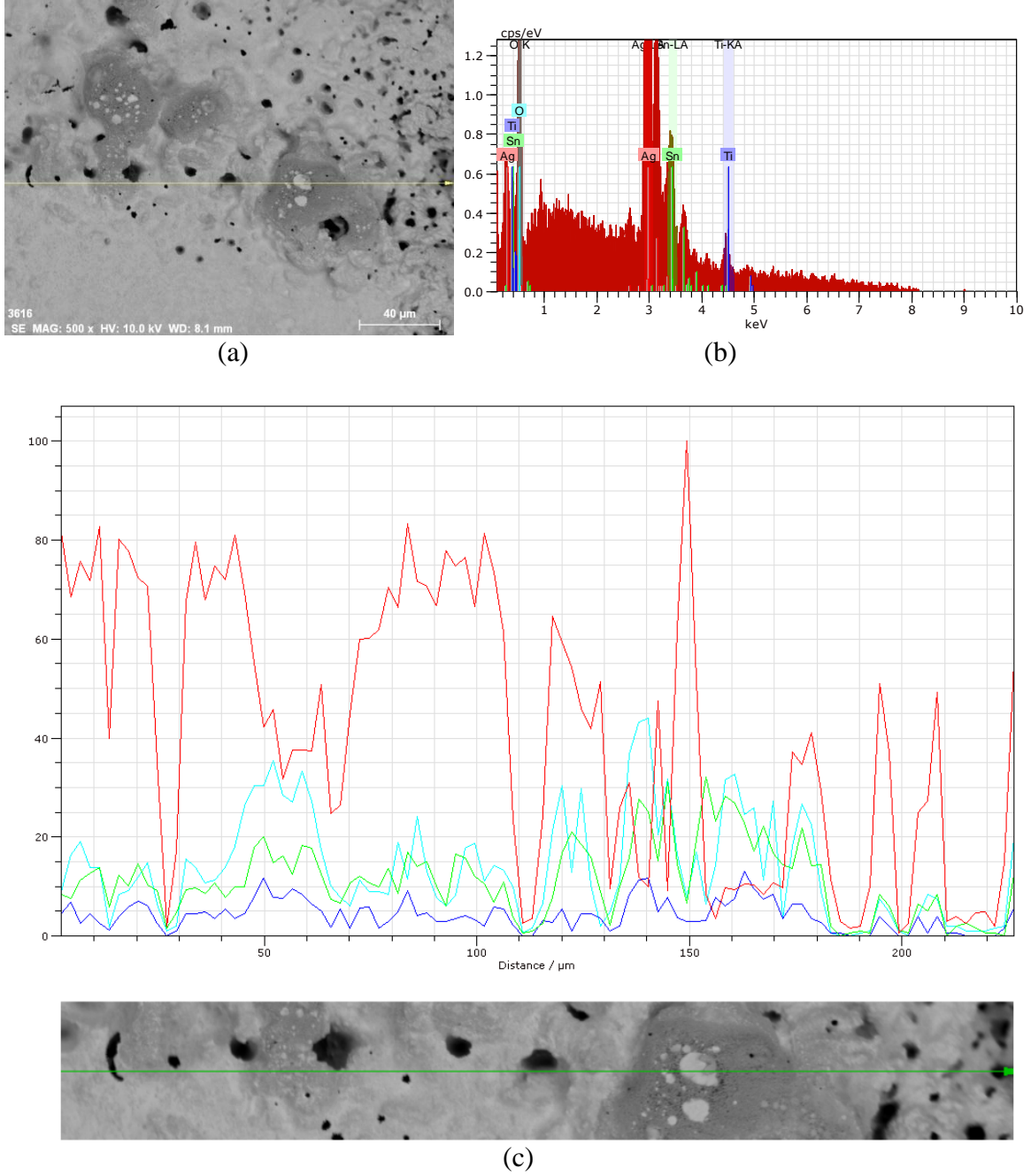
% 7 TiO₂ takviyeli malzemenin sabit ve hareketli kontakları için çizgi analizi sonuçları sırasıyla Şekil 78 ve 79'da verilmiştir. TiO₂ oranının optimum değerden daha yüksek olması durumunda turkuaz renkle gösterilen oksit piklerinin her iki fotoğrafta da Şekil 77'deki oksit pikine göre arttığı belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekil 78'de gösterilen sabit kontak yüzeyinde aşınma sonucu oluşan kraterde mavi pikteki artışa bağlı olarak Ti taneciklerinin biriktiği gözlemlendi. Diğer taraftan Şekil 79'daki hareketli kontak yüzeyindeki tümsek şeklindeki bölgelerin de yüksek oranda SnO₂ içerdiği görüldü.



Şekil 77. % 3 TiO₂ takviyeli malzemenin EDS çizgi analizi sonucu; a) analiz yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki değişimi



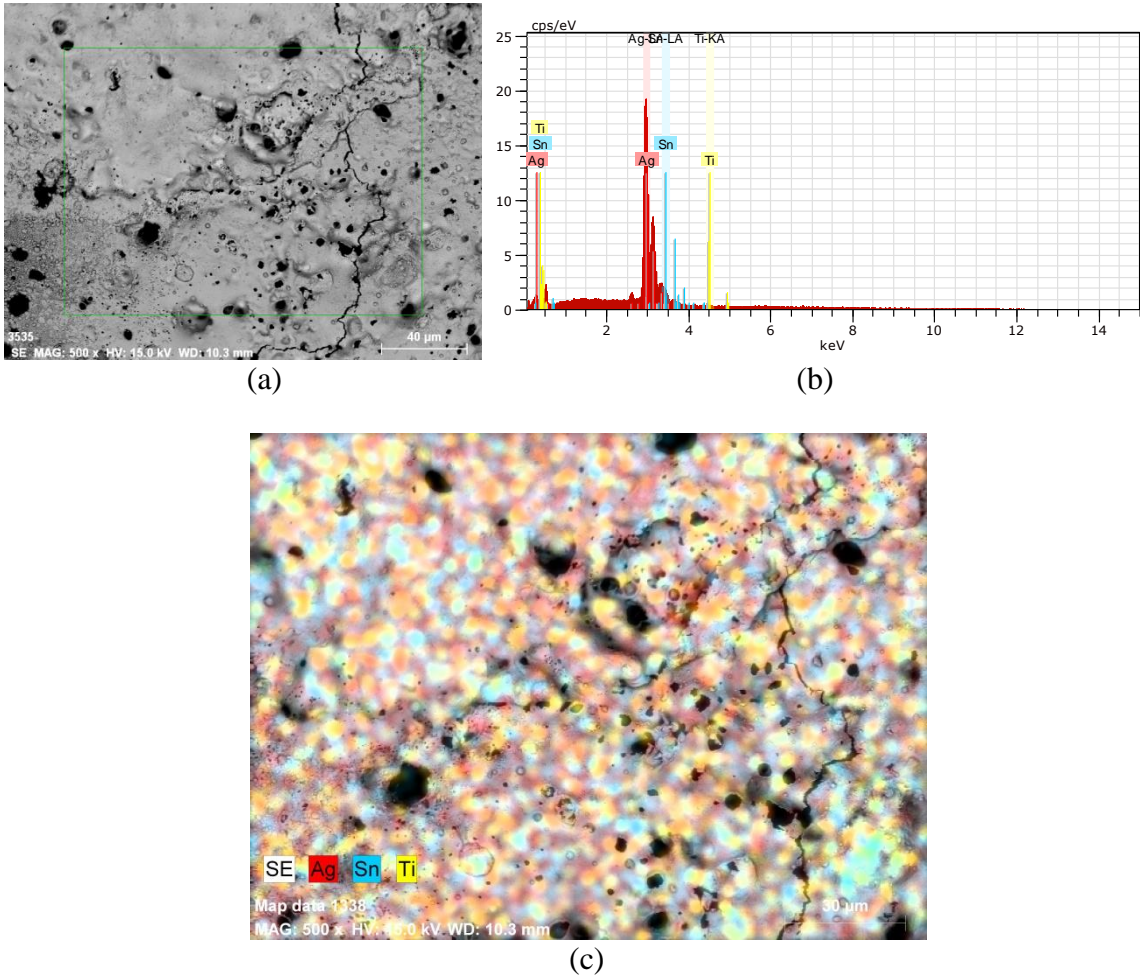
Şekil 78. % 7 TiO_2 takviyeli sabit kontağa ait EDS çizgi analizi sonucu; a) analiz yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki değişimi



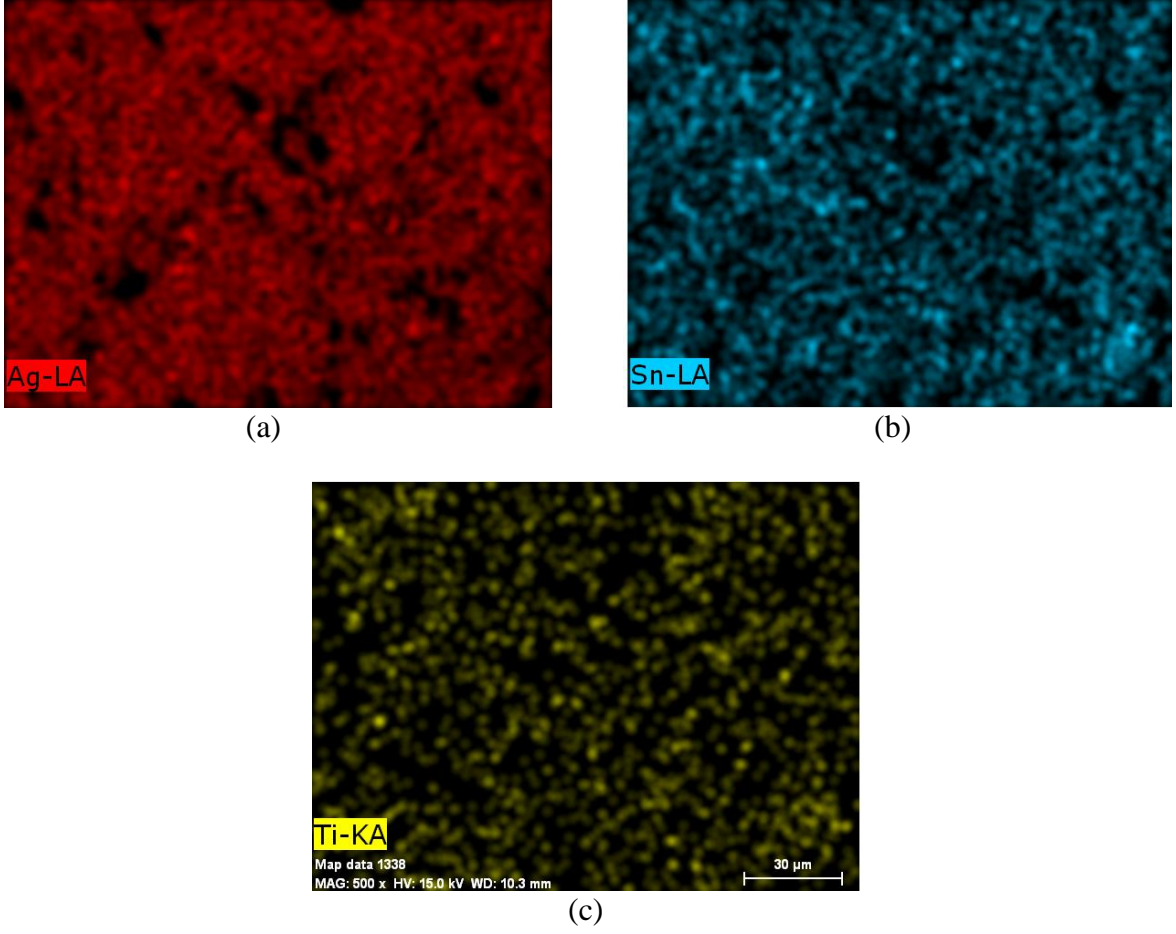
Şekil 79. % 7 TiO_2 takviyeli hareketli kontağa ait EDS çizgi analizi sonucu; a) analiz yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki değişimi

3.7.3. EDS Haritalama Analizleri

Nokta ve çizgi analizlerine ek olarak EDS haritalama yöntemi de kullanılarak aşınma sonucu seçilen bölgedeki elementlerin dağılımları incelendi. % 3 ve % 7 TiO_2 içeren kontak malzemelerine ait EDS haritalama analiz sonuçları sırasıyla Şekil 80 ve 82’de; söz konusu kompozitlerdeki element dağılımlarının ayrı ayrı incelendiği görüntüler ise Şekil 81 ve 83’te verilmiştir. Bu görüntülerde kırmızı, turkuaz ve sarı renler sırasıyla Ag, Sn ve Ti elementlerini temsil etmektedir. Şekil 77’de daha önce gösterilen SnO_2 ağırlıklı bölge, Şekil 80’deki turkuaz ağırlıklı bölgelerle de desteklenmiştir.

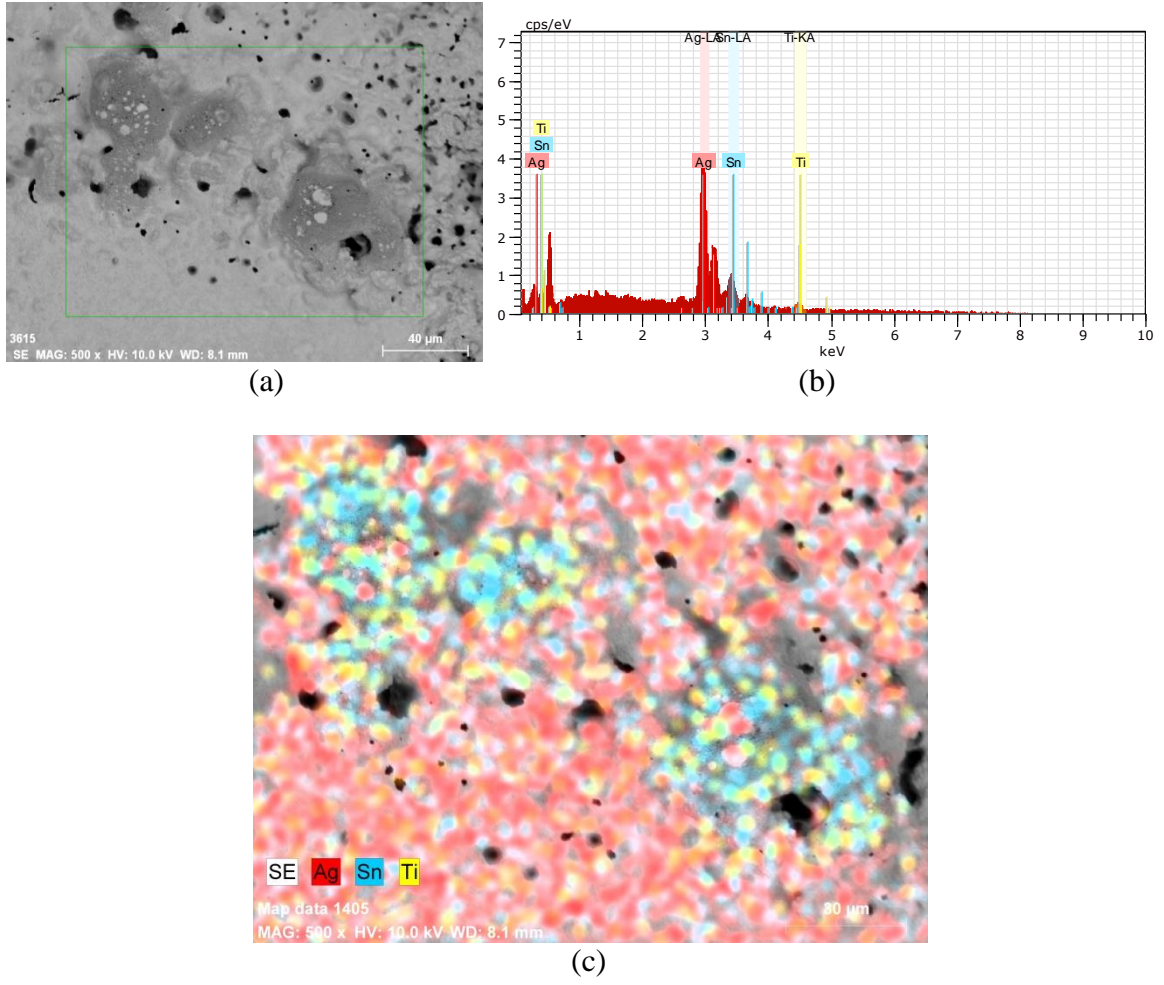


Şekil 80. % 3 TiO_2 takviyeli malzemenin EDS haritalama analizi sonucu; a) haritalama yapılan bölgenin BSE modundaki görünümü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki dağılımı

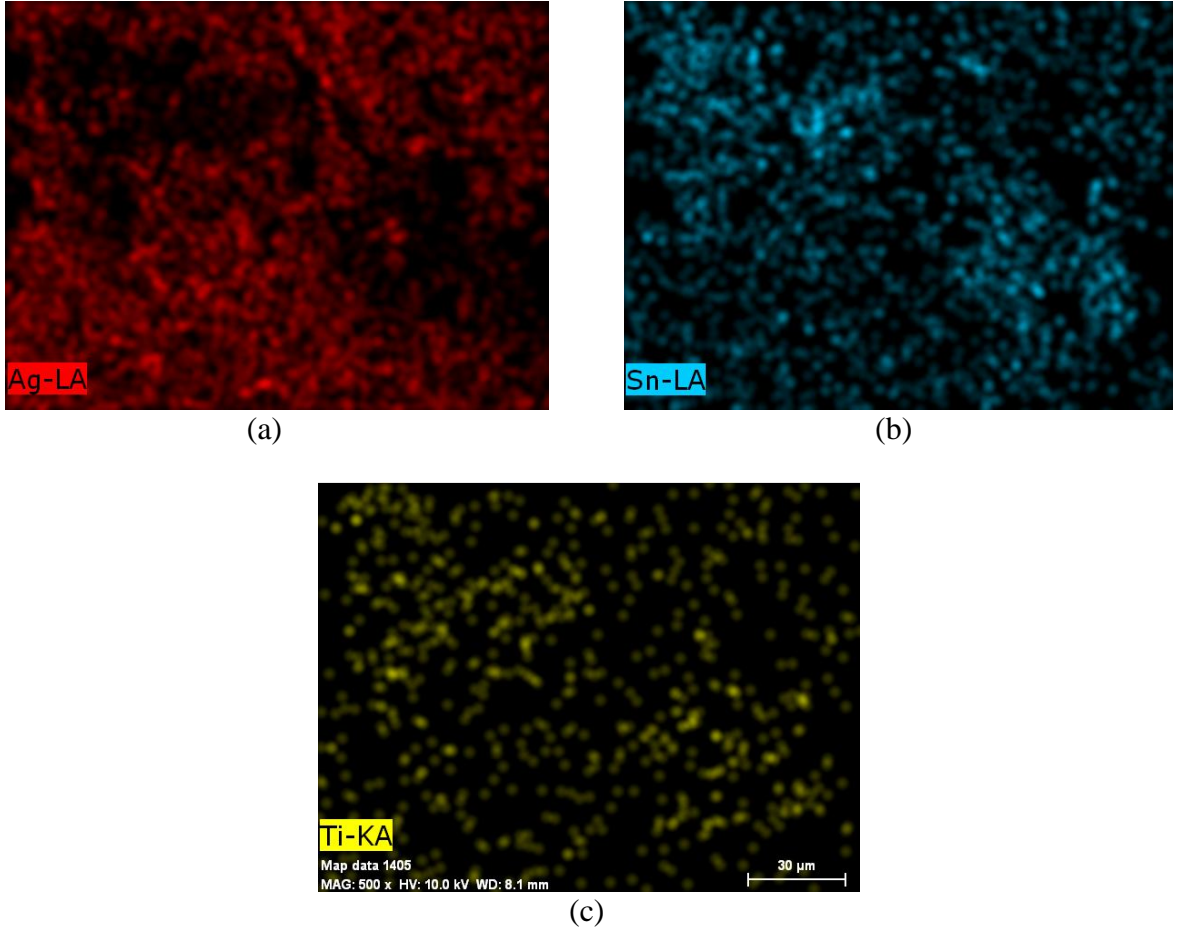


Şekil 81. % 3 TiO₂ takviyeli malzemedeki element dağılımlarının ayrı ayrı görünümü;
a) Gümüş, b) Kalay, c) Titanyum

Şekil 80'de ark-erozyonu sonucu yüzeyde mikroçatlakların ve yüksek oranda gözenegin meydana geldiği görülmektedir. TiO₂ oranının % 7'ye kadar yükselmesiyle kontak erozyonu sonucunda gözeneklerin küçülerek daha geniş bir alana yayıldığı ve mikroçatlak izlerinin de oluşmadığı gözlenmiştir, Şekil 82. Ayrıca bu fotoğraf Sn elementinin özellikle tümseklerde yoğunlaştığını göstermektedir.



Şekil 82. % 7 TiO_2 takviyeli malzemenin EDS haritalama analizi sonucu; a) haritalama yapılan bölgenin BSE modundaki görünümünü, b) söz konusu bölgeye ait spektra, c) elementlerin bölgedeki dağılımı



Şekil 83. % 7 TiO₂ takviyeli malzemedeki element dağılımlarının ayrı ayrı görünümü; a) Gümüş, b) Kalay, c) Titanyum

4. İRDELEME

Bu çalışmada öncelikle MA işlem parametrelerini optimize etmek amacıyla Cu25W kompozit tozu farklı parametreler kullanılarak üretildi. MA deneylerinde kullanılan PCA miktarı, BPR ve öğütme hızı gibi parametrelerin Cu25W toz morfolojisini ve boyutunu önemli ölçüde değiştirdiği görüldü. Buna göre farklı oranlarda PCA kullanılarak yapılan öğütme deneyleri neticesinde % 0,5 ve 1'lik PCA içeren numunelerin son toz boyutlarında katkısız numuneye göre artış gözlemlendi, Şekil 20. Bu durum az miktarlardaki PCA'nın soğuk kaynak olayını kırılma olayına göre daha baskın hale getirmesinden kaynaklanmaktadır [60, 92, 93]. En düşük toz boyutu (0,726 μm) ve kararlı morfolojik yapı (Şekil 22d) % 2'lik PCA içeren toz karışımından elde edildiği için optimum PCA miktarı % 2 olarak belirlendi (Tablo 3). Bu kritik PCA oranından daha yüksek miktarlardaki stearik asit kullanılarak yapılan deneyler sonucunda tozun kısmi kararlı bir morfolojiye (Şekil 22f) sahip olduğu görüldü ve buna bağlı olarak son toz boyutunda (1,775 μm) optimum duruma göre bir miktar artış tespit edildi. Bu durum aşırı miktardaki stearik asit katkısının bilye-toz-bilye çarpışmaları üzerinde olumsuz etki yaparak kırılma verimini düşürdüğünü göstermektedir. Şöyle ki % 2'lik PCA içeren numunede 3 saatlik öğütme sonrasında görülen kırılma izleri (Şekil 21e), % 3'lük PCA kullanılması durumunda 4 saatlik öğütme süresi sonunda gözlemlenmiştir, Şekil 21h. % 1'lik PCA içeren numunenin SEM görüntüsü (Şekil 22b) ve son toz boyutunun (9,792 μm) değerlendirilmesi sonucunda ise pulsu ve düzensiz bir morfolojiye sahip tozun elde edildiği görüldü. Bu durumun plastik deformasyon etkisinin kırılmaya göre daha baskın olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Nitekim literatürde alüminyumun farklı oranlardaki stearik asit kullanılarak öğütülmesi ile ilgili yapılan bir çalışmada [60] benzer bir etki görülmesi sonucu toz boyutlarında küçülmeler elde edilmiştir.

Öğütme hızı ile ilgili olarak yapılan üç farklı öğütme deneyi sonucunda en düşük toz boyutu ve kararlı morfolojik yapı 300 d/dk'lık hızda öğütülen tozdan elde edildiği için optimum öğütme hızı 300 d/dk olarak belirlendi. Optimum öğütme hızından daha düşük hızlarda öğütülen toz karışımlarında bilyelerin darbe etkisinin azalmasına bağlı olarak kırılma veriminin önemli ölçüde azaldığı görüldü. Örneğin 300 d/dk'da 4 saatlik öğütme sonucunda belirgin hale gelen kırılma izleri (Şekil 24h), öğütme hızının 200 d/dk olması durumunda 7 saatte ortaya çıkmıştır, Şekil 24j. Öte yandan öğütme hızının optimum hızdan

daha yüksek seçilmesi durumunda kırılma veriminin az da olsa olumsuz etkilendiği gözlemlendi, Şekil 24l. Bu durum bilyelerin, öğütme kabının alt kısmına inerek toza uyguladığı darbe etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır [54]. Tozların kırılması üzerinde gözlenen tüm bu değişimlere bağlı olarak 25 saat sonunda eşekslenli morfoloji (Şekil 25f) 300 d/dk, kısmi eşekslenli morfoloji (Şekil 25i) ise 400 d/dk'lık hızlarda elde edilirken, aynı süre sonunda 200 d/dk'lık hızda öğütülen tozun pulsusu bir morfolojiye sahip olduğu görüldü, Şekil 25c. Bu gözlemlerin ilgili literatürde [94, 95] verilen bulgularla uyum içerisinde olduğu görüldü.

BPR ile ilgili olarak yapılan üç farklı öğütme deneyi sonucunda en düşük toz boyutu ve kararlı hal durumu 10:1'lik BPR'de elde edildiği için söz konusu değer optimum BPR olarak belirlendi. Bunun üzerindeki BPR değerlerinde artan bilye sayısına bağlı olarak öğütme işleminin son aşamalarında ortam ısısında da artış gözlenmesi sonucu kaynaklaşmanın oluştuğu ve kırılma veriminin olumsuz etkilendiği tespit edildi, Şekil 28c. BPR optimum orandan daha düşük olduğunda ise 10 saate kadar belirgin bir boyut küçülmesine rastlanmadı, Şekil 26. Bu durum bilye sayısının azalmasına bağlı olarak bilyelerin toza uyguladığı darbe enerjisinin düşmesine dayandırılarak açıklanabilir [54]. Şekil 28a'da da görüldüğü gibi 25 h sonunda düzensiz ve pulsusu bir morfoloji elde edilmiştir. Elde edilen bu bulguların da daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görüldü [96, 97].

Belirlenen bu optimum MA parametreleri kullanılarak Ag_8SnO_2 esaslı ve TiO_2 takviyeli kompozit tozlar üretildi. Böylelikle her bir bileşimdeki toz boyutunun artan öğütme süresi ile azaldığı tespit edildi, Şekil 38. Ancak ilk 2 saatlik öğütme süresince toz karışımı soğuk kaynak etkisinde kaldığı için kararsız ve pulsusu bir morfoloji sergilemiş ve bu durum toz boyutlarında az da olsa artmaya neden olmuştur (Tablo 7). Şöyle ki % 1 ve % 7 TiO_2 katkılı numunelerde 2 saatlik öğütme süresi sonunda toz boyutlarında yaklaşık 1 μm 'lik artışlar görüldü. Bu etki, toz kısmi kararlı hale geçinceye kadar devam etmektedir. 4 saatlik öğütme süresinden sonra toz parçacıklarında kırılmalar (Şekil 33c) gözlenmekle beraber 7 saatlik öğütme süresine kadar pulsusu morfoloji engellenememiştir, Şekil 33d. Bu durum söz konusu periyotta soğuk kaynak olayının kırılma olayına göre daha baskın olduğunu göstermektedir. Bu kritik öğütme süresinden sonra kırılma olayı soğuk kaynak olayına göre daha baskın hale geldiği için 20 saatlik öğütme süresi sonunda boyut küçülmesiyle birlikte kısmi kararlı morfolojiye sahip toz elde edilmiştir, Şekil 33g. Tozların kararlı morfolojiye dönüşmesi ise ancak 25 saatlik öğütme süresi sonunda

gerçekleşti (Şekil 33h). Öğütme süresinden başka TiO_2 takviyesinin de boyut küçülmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edildi. Söz konusu küçülme, birim hacimdeki gevrek ve sert yapıya sahip takviye parçacıklarının artması nedeniyle kırıcı bir etkinin ortaya çıkmasına dayandırılarak açıklanabilir [54]. Ayrıca yapıdaki sert parçacık sayısının artmasına bağlı olarak sistemin kararlı hale ulaşmasının hızlandığı da söylenebilir. Ancak % 1 TiO_2 içeren kompozitin toz boyutlarında belirgin bir azalma gözlenmemiştir. Bu durum ikincil takviye parçacıklarının matrise gömüldüğünü, ancak kırılmanın etkin hale gelebilmesi için yeterli takviye miktarının sağlanamadığını göstermektedir. Diğer taraftan % 1'lik TiO_2 takviyesinin boyut küçülmesini 7 saatlik öğütme süresine kadar az da olsa olumlu etkilediği gözlenmiştir, Şekil 38. Ancak bu etki giderek azalmış ve 25 saatlik süre sonunda gömülen tozların kırılma üzerindeki olumsuz etkisine bağlı olarak son toz boyutlarında Ag_8SnO_2 kompozit tozuna göre bir miktar artış gözlenmiştir (Tablo 7). Buradan TiO_2 miktarının kırılmayı soğuk kaynak olayına göre daha baskın hale getirmeye yetecek seviyede olmadığı sonucu çıkarılabilir. Bununla birlikte % 1'in üzerinde TiO_2 içeren bileşimlerin son toz boyutlarında kademeli olarak düşüş tespit edildi. Dolayısıyla minimum toz boyutu % 7 TiO_2 içeren kompozit tozdan elde edilmiştir (1,186 μm). Toz morfolojileri incelendiğinde ise parçacık boyutlarındaki küçülmelerle birlikte topaklanmanın arttığı görülmüştür. Bu durum parçacık boyutundaki azalmaya bağlı olarak hacim başına enerjinin ters orantılı olarak artmasından ileri gelmektedir [53]. Ayrıca topaklanmaya neden olan kılcal kuvvetlerin ağırlıkça % 0,1 gibi oldukça küçük nem oranlarında oluştuğu bilinmektedir [53]. Dolayısıyla toz parçacıklarının dağıtılması işlemi parçacık boyutu küçüldükçe güçleşmektedir [98]. Bunun için toz boyutu ölçülürken ultrasonik çalkalama da yapılarak toz boyut dağılımı en doğru şekilde belirlenmeye çalışıldı. Şekil 26'da verilen her bir bileşime ait toz boyut eğrilerinin değerlendirilmesi sonunda optimum öğütme süresi 25 saat olarak belirlendi.

Çalışmanın ikinci aşamasında optimum MA parametreleri kullanılarak elde edilen kompozit tozlardan farklı kimyasal bileşimlerde ham kompaktlar üretildi. EDS haritalama raporları değerlendirildiğinde takviyelerin Ag matris içerisinde ince ve homojen bir şekilde dağıldığı görüldü (Şekil 34-37). Bu nedenle 25 saatlik öğütme süresinin homojenliğin sağlanması için yeterli olduğu sonucuna varılabilir. Ham kompaktlara ait içyapı görüntüleri incelendiğinde % 1-3 aralığındaki TiO_2 takviyelerinin içyapıdaki gözenek oranını düşürerek tozların preslenmesini olumlu etkilediği görüldü. Öte yandan daha yüksek oranlardaki TiO_2 takviyesi ile birlikte gevrek ve sert yapıdaki toz bileşiminin artması

sonucu gözenek oranlarında artış tespit edildi. Özellikle % 7 TiO₂ takviyeli ham kompaktlarda gözenek oranı % 5,74 seviyelerine kadar çıkmaktadır, Şekil 50. Bu durum gevrek toz bileşiminin önemli oranda artması sonucu preslenmeye karşı gösterilen direncin artmasına dayandırılarak açıklanabilir.

Ham kompaktlardan son ürünlerin elde edilebilmesi için numunelere 700-900°C aralığında 1 saat süre ile sinterleme işlemi uygulandı. Artan sinterleme sıcaklığı ile gözenek oranlarında düşüş, yoğunluk değerlerinde ise artış gözlemlendi. Dolayısıyla bütün bileşimlerin sinterleme koşulları 900°C ve 1 saat olarak belirlendi. TiO₂ oranının artmasıyla içyapıdaki gevrek toz bileşimi arttığından tozların plastik deformasyona karşı göstermiş olduğu direncin de arttığını söylemek mümkündür. Başka bir ifadeyle TiO₂ oranının artmasıyla kompozit sertliğinde artışın bekleneceği öngörülebilir. Dolayısıyla sert tozların preslenmeye karşı vereceği tepki sünek tozlarınkinden farklı olacağından tozların paketlenabilirliği etkilenmiş ve bunun sonucunda da gözenek miktarında artış kaydedilmiştir. Bununla birlikte artan takviye oranına bağlı olarak sertlik değerlerinde önemli bir artış görülmüştür. Şöyle ki sertliği 78 HV olarak ölçülen Ag₈SnO₂ kompozitine % 7 TiO₂ takviyesi yapılması sonucunda sertlik 102 HV değerine yükselmiştir. TiO₂ takviyesinin sertlik üzerindeki olumlu etkisi, seramik partiküllerin Ag matris içerisinde dağılım mukavemetlenmesi etkisi oluşturmasına ve öğütme sonucu matris tane boyutunun küçülmesiyle deformasyon sertleşmesi görülmesine dayandırılarak açıklanabilir [99]. Bununla birlikte TiO₂ takviyesinin, elementlerin içyapıda homojen dağılması üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu da görülmüştür (Şekil 36). Nitekim TiO₂ takviyesi ile mekanik özelliklerde görülen iyileşme bu tespiti doğrular niteliktedir.

Daha önce belirtilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen ark-erozyon deneylerinden elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucu en yüksek oranda kütle kaybı Ag₈SnO₂ kompozitinde görüldü. Sabit ve hareketli kontaklardaki kütle kayıpları karşılaştırıldığında sabit kontaklardaki kütle kaybının genellikle daha fazla olduğu gözlemlendi. Hareketli kantağın sabit kantağa göre daha az ısınması bu farkın oluşmasında etkilidir. Çünkü hareket eden kontak, havadaki hareketi sırasında bir tür zorlanmış taşınım ile nispeten daha hızlı soğumaktadır [66]. Nitekim sözü edilen kompozitin aşınma sonucu ortaya çıkan yüzey morfolojisini gösteren SEM fotoğrafları incelendiğinde sabit kontaklarda çok sayıda derin çukurların (Şekil 52c), hareketli kontaklarda ise malzeme transferi sonucu tümsek şeklinde çıkıntıların (Şekil 52d) oluştuğu gözlemlenmiştir. Artan çevrim sayısı ile sabit kontaklardaki çukurların içine hareketli kontaklardaki parçacıkların

yerleşmesi sonucu sabit kontaklardaki kayıplar zamanla azalmaktadır (Şekil 52k). Yani yer değiştiren parçacıklar hareketli kontaklarda çukurcukların oluşumuna zemin hazırlamıştır, Şekil 52l. Öte yandan TiO_2 oranının kademeli olarak artırılmasıyla birlikte kütle kaybı değerlerinde Ag_8SnO_2 malzemesine göre azalmalar tespit edilmiştir (Tablo 10). Söz konusu kütle kayıpları yaklaşık % 5 TiO_2 oranında minimum seviyeye inmektedir (Şekil 64 ve 67). % 1 oranında TiO_2 içeren numuneye ait hareketli kontaklarda belirgin bir kütle kaybı gözlenmemiş olmasına rağmen, SEM fotoğraflarından da görüldüğü gibi sabit kontaklardaki çukurların Ag_8SnO_2 kompozitine nazaran daha sığ bir hal almasına bağlı olarak sabit kontakların kütle kaybında yaklaşık 10 mg kadar azalma tespit edilmiştir (Şekil 53). Yani ortalama kütle kaybının azaldığı söylenebilir, Tablo 10. $Ag_8SnO_2-3TiO_2$ kompozitinde ise özellikle hareketli kontakların ark-erozyon performansındaki iyileşme dikkate değerdir (Şekil 54). Bundan dolayı Şekil 59'daki kütle değişim eğrisinden de görüldüğü gibi sabit ve hareketli kontaklardaki kayıplar azalarak birbirine yaklaşan bir eğilim sergilemiştir. $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kompozitinde kütle kaybının her iki kontak türü için de minimum seviyede olduğu görülmektedir, Şekil 60. Özellikle, sabit kontaklardaki kütle kayıpları hareketli kontaklara göre çok daha düşük seviyelere gerilemiştir. Dolayısıyla optimum ark-erozyon performansının sergilendiği bileşim $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kompoziti olarak belirlenmiştir, Şekil 64 ve 67. Özellikle 30.000 çevrimden sonraki kontak yüzeyleri incelendiğinde arkın daha homojen dağılması sonucu ark-etkili bölgede ergime izlerinin çok az olduğu görülmektedir (Şekil 55k-p). Bu bulgu, kütle kaybının az olmasını doğrular niteliktedir. Ayrıca bir yarıiletken olması ve yüksek sıcaklıkta iletkenliği fazla etkilememesi özelliğinden dolayı % 5 ağırlık oranına kadar yapılan TiO_2 takviyesinin ark-erozyon performansı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilir. Öte yandan bu kritik seviyenin üzerindeki takviyelerde ark-erozyon performansının olumsuz etkilendiği gözlenmiştir. Örneğin $Ag_8SnO_2-7TiO_2$ kompozitinde hareketli kontaklardaki kayıp hemen hemen $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kompoziti ile aynı kalmasına karşın sabit kontaklardaki kütle kayıplarında önemli bir artış tespit edilmiştir (Tablo 10). Söz konusu kompozite ait SEM görüntüleri sabit kontaklardaki bu kayıpları doğrular niteliktedir (Şekil 56). Bu durum yüksek oranda takviye miktarına bağlı olarak gözenek oranının artması ve söz konusu artışın elektronların hareketini engellemesi sonucu elektriksel iletkenliğin olumsuz etkilenmesine dayandırılarak açıklanabilir [34, 50, 100]. Ayrıca ideal orandan fazla yapılan takviyenin elektriksel iletkenliği düşürmesi sonucu kontaklar arası

geçiş direncinin artması ve artan gözenek oranı ile birlikte ısı iletkenliğin bozulması [101] da diğer sebepler olarak öne çıkmaktadır.

Bütün bileşimler karşılaştırıldığında optimum ark-erozyon performansı $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kompozitinden elde edildiği için söz konusu kompozite, fiziksel ve mekanik özellikleri ile aşınma performansının geliştirilmesi, dolayısıyla servis ömrünün artırılması için 2-5 saat aralığında sinterleme işlemi uygulandı. Elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda artan sinterleme süresiyle gözenek oranlarında azalma, yoğunluk ve sertlik değerlerinde ise artış gözlemlendi. 5 saat sinterlenen numune diğerlerine göre daha üstün özellikler sergilediği için söz konusu numune ark-erozyon deneyine tabi tutuldu. Böylelikle optimum sinterleme süresi kullanılarak üretilen kompozitin ark-erozyon performansı optimizasyon işleminden önceki malzemenin performansı ile karşılaştırıldı. Optimum şartlarda üretilen kompozit çiftinin ark-erozyon deneyi sonucu elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde, özellikle hareketli kontakların yüzeylerindeki bozunumların azaldığı göze çarpmaktadır, Şekil 73. Bunun neticesinde hareketli kontaklardaki kayıplar yaklaşık 10 mg değerine kadar gerilemiştir (Tablo 12). Öte yandan sabit kontaklardaki kayıplarda bir miktar artma gözlenmiştir. Bu durum malzeme transferinin hareketli kontak yönüne doğru ilerlediğini göstermektedir. Optimize edilen $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kompozit kontak malzemesinin optimizasyon öncesi duruma göre kontak erozyonu sonucunda meydana gelen toplam kütle kayıplarında azalma tespit edildiğinden dolayı ark-erozyon performansının iyileştiği sonucuna varılabilir.

Sonuç olarak fiziksel ve mekanik kararlılığı, yarıiletken MeO olarak kolay bulunabilmesi, uygun maliyeti ve çevre dostu bir malzeme olması [102, 103] nedeniyle en önemli ve en çok kullanılan yarıiletkenlerden bir tanesi olan TiO_2 'in, özellikle artan sıcaklıkla birlikte üstün elektriksel iletkenlik davranışı sergilemesi elektrik kontak malzemelerinde kullanımını cazip hale getirmektedir. Ayrıca TiO_2 takviyesinin; Ag matris ve SnO_2 arasındaki yüzey gerilimini değiştirerek ıslatılabilirliği artırdığı [13, 104, 105] ve böylelikle SnO_2 parçacıklarının içyapıdaki kümeleşmesini engelleyerek Ag matris içerisinde daha homojen bir biçimde dağılmasını sağladığı gözlenmiştir (Şekil 36). Ag ve SnO_2 elementlerine göre çok daha yüksek ergime noktasına ($1870^\circ C$) sahip olan TiO_2 takviyesinin kolayca dekompoze olmayarak kontaklar arasındaki aşırı sıcaklık artışını önlediği, ark-erozyon direncini artırdığı ve böylelikle kontakların servis ömrüne olumlu etki yaptığı söylenebilir. Bu bağlamda TiO_2 takviyesi ile kontakların ark sönmeme kapasitesinin yükselmesinin; söz konusu takviyenin gümüş eriyiğinin viskozitesini

artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Başka bir ifadeyle viskozitedeki artış, sıçrama yoluyla oluşan ergimiş gümüş kayıplarını engellemektedir [41, 106-109].

Bu çalışmada kimyasal bileşimi ve üretim parametreleri optimize edilen $\text{Ag}_8\text{SnO}_2\text{-5TiO}_2$ kompozitinde aşınma sonucu meydana gelen kütle kayıpları literatürdeki Ag_8SnO_2 malzemesi ile ilgili yapılan benzer çalışmalarla [13, 33] kıyaslandığında olumlu sonuçların elde edildiği görülmüştür. Nitekim literatürde 10 A'lık akım şiddetinde 10.000 çevrimlik aşınma sonrası 7,8 mg olarak belirlenen [13] kütle kayıpları, daha yüksek akım şiddeti olan 20 A'de test ettiğimiz malzeme ile karşılaştırıldığında söz konusu kayıpların daha düşük olduğu (6,32 mg) tespit edilmiştir. Akım şiddetindeki artışa (10 A - 20 A) bağlı olarak kontaklardaki kütle kayıplarının da artacağı [110] düşünüldüğünde, aradaki farkın önemli bir seviyede olduğu sonucu çıkarılabilir.

5. SONUÇLAR

TiO₂ katkısının Ag₈SnO₂ esaslı kompozit kontak malzemesinin yapı, fiziksel ve mekanik özellikleri ile ark-erozyon performansına etkisinin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

1. Bu çalışma için tasarlanıp imal edilen yeni bir ark-erozyon deney düzeneği kullanılarak elektrik kontak malzemelerinin endüktif yükler altında ve farklı akım değerlerinde aşınma performansı incelenebilmektedir. Böylelikle, söz konusu deney düzeneği yeni kontak malzemelerinin geliştirilmesinde daha etkin olarak kullanılabilir.

2. Artan TiO₂ takviyesi ile toz karışımlarının öğütme sonrası boyutlarında küçülme elde edilmiştir. Şöyle ki TiO₂ takviyesi kompozit kontakların üretildiği toz karışımlarının boyutlarında önemli bir küçülmeye neden olur. Söz konusu boyut küçülmesi % 1'lik TiO₂ takviyesinde pek belirgin olmamakla birlikte % 3'ten sonra belirgin hale gelmektedir. Böylece en düşük kompozit toz boyutu (1,186 µm) Ag₈SnO₂-7TiO₂ toz karışımından elde edilmiştir.

3. Farklı bileşimlerdeki kompozit tozların preslenmesiyle elde edilen ham kompaktlar üzerinde yapılan gözeneklilik analizleri sonucunda % 3'lük TiO₂ takviyesine kadar gözenek miktarının azaldığı, söz konusu oranın üzerinde ise gözenek miktarının arttığı gözlenmiştir.

4. Ag₈SnO₂ ham kompaktının üç farklı sıcaklık değeri (700, 800 ve 900°C) altında 1 saat süreyle sinterlenmesi sonucunda en yüksek yoğunluk, en düşük gözenek oranı ve en yüksek sertlik değeri 900°C'de sinterlenen ham kompaktlardan elde edildiği için optimum sinterleme sıcaklığı 900°C olarak belirlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ile sinterleme sonrası yoğunluk ve sertlik değerlerinde artış, gözenek oranında ise azalma gözlenmiştir.

5. Artan TiO₂ takviyesi ile kompozitlerin sertlik değerleri önemli oranda artar. Buna göre TiO₂ takviyesi içermeyen Ag₈SnO₂ kompoziti 78 HV sertlik değerine sahipken % 7 TiO₂ takviyesi yapılması durumunda söz konusu sertlik değerinin 102 HV değerine yükseldiği görülmüştür.

6. Alternatif akım şartlarında (220 V, 50 Hz, 20 A) yapılan ark-erozyon deneyleri sonucunda en yüksek malzeme kaybı TiO₂ takviyesi içermeyen Ag₈SnO₂ kompozitinden elde edilmiştir.

7. Ağırlıkça % 5 oranına kadar artan TiO_2 takviyesi ile ark-erozyonu sonucunda meydana gelen kütle kayıpları kademeli olarak azalır. Bu kritik oranın üzerindeki TiO_2 takviyesi ark-erozyon performansını olumsuz etkiler ve kütle kayıplarında artmaya neden olur.

8. % 5 TiO_2 takviyeli kompozit dışındaki bütün kompozitlerde sabit kontaklardaki kütle kayıpları hareketli kontaklardaki kütle kayıplarından daha yüksek seviyededir.

9. TiO_2 takviyesinin özellikle sabit kontaklardaki kütle kayıplarının azaltılmasında etkili olduğu görülürken, hareketli kontaklardaki performans iyileşmesi daha az belirgindir.

10. Optimum ark-erozyon performansı sergileyen kontak malzemesi $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ olarak belirlenmiştir. Söz konusu malzemenin sinterleme süresinin 2-5 saat aralığında değiştirilmesiyle fiziksel ve mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler elde edilmiştir.

11. Sinterleme süresinin özellikle hareketli kontakların aşınma performansı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Nitekim 5 saatlik sinterleme ile elde edilen $Ag_8SnO_2-5TiO_2$ kontak malzemesinin ark-erozyon deneyleri sonucunda 1 saat süre ile sinterlenen numuneye göre toplam kütle kayıplarında azalma tespit edilmiştir.

6. ÖNERİLER

1. Matris (Ag) ve takviye malzemelerinin (SnO_2 ve TiO_2) toz boyutunun; kontakların mikroyapı, fiziksel ve mekanik özellikleri ile ark-erozyon performansına etkisi araştırılabilir.

2. Birincil ve ikincil takviye elemanlarının miktarları değiştirilerek farklı uygulamalara yönelik yeni kompozit kontak malzemeleri geliştirilebilir.

3. Farklı türden sinterleme atmosferleri kullanılarak sinterleme kinetiğinin, kontakların mikroyapısına etkisi incelenebilir.

4. Bu çalışmada kullanılan akım şiddetinden daha düşük veya yüksek akım değerleri kullanılarak, akım şiddetinin seçilen malzemenin ark-erozyon performansına etkisi araştırılabilir.

5. Anahtarlama frekansının veya açma/kapama sıklığının, kontakların ark-erozyon performansına etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Slade, P.G., Electrical Contacts: Principles and Applications, CRC Press, Florida, 2014.
2. Braunovic, M., Konchits, V.V. ve Myshkin, N.K., Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology, CRC Press, Florida, 2006.
3. Gurevich, V., Electric Relays: Principles and Applications, CRC Press, Florida, 2005.
4. Schwartz, M., Encyclopedia of Materials, Parts, and Finishes, CRC Press, Florida, 2002.
5. ASM Handbook vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1990.
6. Leung, C.H. ve Lee, A., Electric Contact Materials and Their Erosion in Automotive DC Relays, IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 15,2 (1992) 146-153.
7. Holm, R., Electric Contacts: Theory and Application, Springer, New York, 1981.
8. ASM Handbook vol. 7: Powder Metal Technologies and Applications, ASM International, 1998.
9. Buttermann, W.C. ve Hilliard, H.E., Mineral Commodity Profiles, Silver (Open-File Report), US Geological Survey, 2004.
10. Uzun, H., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Gümüş – Kadmiyum Oksit Esaslı Kontak Malzemesi Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.
11. Güler, Ö., Oksit Takviyeli Bakır Kompozitin Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Üretilmesi ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
12. Erdoğan, M., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri-2, Çeviri, 3.baskı, Nobel Yayın, 2002.
13. Wang, J., Liu, W., Li, D. ve Wang, Y., The Behavior and Effect of CuO in Ag/SnO₂ Materials, Journal of Alloys and Compounds, 588 (2014) 378-383.
14. 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 and Hard Materials, 28,2 (2010) 305-311.

15. Verma, P., Pandey, O.P. ve Verma, A., Influence of Metal Oxides on the Arc Erosion Behavior of Silver Metal Oxides Electrical Contact Materials, Journal of Materials Science and Technology, 20,1 (2004) 49-52.
16. Braumann, P. ve Koffler, A., The Influence of Manufacturing Process, Metal Oxide Content, and Additives on the Switching Behaviour of Ag/SnO₂ in Relays, 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, Eylül 2004, Seattle, Bildiriler Kitabı: 90-97.
17. Jeannot, D., Pinard, J., Ramoni, P. ve Jost, E.M., Physical and Chemical Properties of Metal Oxide Additions to Ag-SnO₂ Contact Materials and Predictions of Electrical Performance, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A, 17,1 (1994) 17-23.
18. Walczuk, E., Borkowski, P., Frydman, K., Wojcik-Grzybek, D., Bucholc, W. ve Hasegawa, M., Migration of Composite Contact Materials Components at High Current Arcing, IEICE Transactions on Electronics, E90C,7 (2007) 1377-1384.
19. Juszczak, B., Kulasa, J., Gubernat, A., Malec, W., Ciura, L., Malara, M., Wierzbicki, L. ve Goebiewska-Kurzawska, J., Influence of Chemical Composition and Production Process Parameters on the Structure and Properties of Silver Based Composites with ZnO, Archives of Metallurgy and Materials, 57,4 (2012) 1063-1073.
20. Joshi, P.B., Rao, V.J., Rehani, B.R. ve Pratap, A., Silver-Zinc Oxide Electrical Contact Materials by Mechanochemical Synthesis Route, Indian Journal of Pure and Applied Physics, 45,1 (2007) 9-15.
21. Schoepf, T. J., Behrens, V., Honig, T. ve Kraus, A., Development of Silver Zinc Oxide for General-Purpose Relays, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 25,4 (2002) 656-662.
22. Ćosović, V., Talijan, N., Živković, D., Minić, D. ve Živković, Z., Comparison of Properties of Silver-Metal Oxide Electrical Contact Materials, Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, 48,1 (2012) 131-141.
23. Pandey, A., Verma, P. ve Pandey, O.P., Comparison of Properties of Silver-Tin Oxide Electrical Contact Materials Through Different Processing Routes, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 15,3 (2008) 236-240.
24. German, R.M., Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing, Metal Powder Industries Federation, 2005.
25. Upadhyaya, G.S., Powder Metallurgy Technology, Cambridge International Science Publishing, 1998.
26. Chang, I. ve Zhao, Y., Advances in Powder Metallurgy: Properties, Processing and Applications, Woodhead Publishing, 2013.

27. Braunovic, M., Reliability of Power Connections, Journal of Zhejiang University: Science A, 8,3 (2007) 343-356.
28. Rudolphi, A.K. ve Jacobson, S., Stationary Loading, Fretting and Sliding of Silver Coated Copper Contacts - Influence of Corrosion Films and Corrosive Atmosphere, Tribology International, 30,3 (1997) 165-175.
29. Graft, W.H. ve Radnik, J.L., Electrical Contact Materials for Space Vehicle Systems, NASA Technical Document, 1962.
30. Allahverdiyev, Z., Elektroteknik Malzemeleri, K.T.Ü., Trabzon, 2000.
31. Evin, E. ve Güler, Ö., The Investigation of Contact Performance of Oxide Reinforced Copper Composite via Mechanical Alloying, Journal of Materials Processing Technology, 209,3 (2009) 1286-1290.
32. 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.
33. Wang, J., Li, D. ve Wang, Y., Microstructure and Properties of Ag-SnO₂ Materials with High SnO₂ Content, Journal of Alloys and Compounds, 582 (2014) 1-5.
34. 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.
35. Ćosović, V., Ćosović, A., Taliĵan, N., Źivković, D., Manasijević, D. ve Minić, D., Improving Dispersion of SnO₂ Nanoparticles in Ag-SnO₂ Electrical Contact Materials Using Template Method, Journal of Alloys and Compounds, 567 (2013) 33-39.
36. Khayati, G.R. 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.
37. Schröder, K.H., Silver Metal-Oxides as Contact Materials, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 10,1 (1987) 127-136.
38. Wu, C.P., Yi, D.Q., Li, J., Xiao, L.R., Wang, B. ve Zheng, F., Investigation on Microstructure and Performance of Ag/ZnO Contact Material, Journal of Alloys and Compounds, 457,1-2 (2008) 565-570.
39. Taliĵan, N., Ćosovic, V., Stajić-Trošić, J., Grujić, A., Źivković, D. ve Romanĵi, E., Microstructure and Properties of Silver Based Cadmium Free Electrical Contact Materials, Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, 43,2 (2007) 171-177.
40. Jacimovic, J., Felberbaum, L., Giannini, E. ve Teyssier, J., Electro-Mechanical Properties of Composite Materials for High-Current Contact Applications, Journal of Physics D-Applied Physics, 47,12 (2014) 1-9.

41. Chen, Y.L., Yang, C.F., Yeh, J.W., Hung, S.S. ve Lee, S.W., A Novel Process for Fabricating Electrical Contact SnO₂/Ag Composites by Reciprocating Extrusion, Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 36A,9 (2005) 2441-2447.
42. Pons, F., Cherkaoui, M., Ilali, I. ve Dominiak, S., Evolution of the AgCdO Contact Material Surface Microstructure with the Number of Arcs, Journal of Electronic Materials, 39,4 (2010) 456-463.
43. Fındık, F. ve Uzun, H., Microstructure, Hardness and Electrical Properties of Silver-Based Refractory Contact Materials, Materials and Design, 24,7 (2003) 489-492.
44. Koffler, A., Braumann, P. ve Kempf, B., The Influence of Manufacturing Process, Metal Oxide Content, and Additives on Switching Behavior of Ag/SnO₂ in DC and AC Relays (2), 23rd International Conference on Electrical Contacts, Ekim 2006, Sendai, Bildiriler Kitabı: 288-293.
45. Roehberg, J., Honig, T., Witulski, N., Finkbeiner, M. ve Behrens, V., Performance of Different Silver/Tin Oxide Contact Materials for Applications in Low Voltage Circuit Breakers, 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Eylül 2009, Vancouver, Bildiriler Kitabı: 187-194.
46. Behrens, V., Honig, T., Kraus, A., Michal, R., Saeger, K., Schmidberger, R. ve Staneff, T., An Advanced Silver/Tin Oxide Contact Material, IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A, 17,1 (1994) 24-31.
47. Lungu, M., Tsakiris, V., Enescu, E., Patroi, D., Marinescu, V., Talpeanu, D., Pavelescu, D., Dumitrescu, G. ve Radulian, A., Development of W-Cu-Ni Electrical Contact Materials with Enhanced Mechanical Properties by Spark Plasma Sintering Process, Acta Physica Polonica A, 125,2 (2014) 327-330.
48. Xiu, S.-x., Yang, R., Xue, J., Wang, J.-x. ve Wang, J.-y., Microstructure and Properties of CuCr Contact Materials with Different Cr Content, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21 (2011) 389-393.
49. Leung, C.H., Bevington, R.C., Wingert, P.C. ve Kim, H.J., Effects of Processing Methods on the Contact Performance Parameters for Silver-Tungsten Composite-Materials, IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 5,1 (1982) 23-31.
50. Rehani, B.R., Joshi, P.B. ve Kaushik, V.K., Nanostructured Silver-Graphite Electrical Contact Materials Processed by Mechanical Milling, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 16,4 (2009) 281-287.
51. Leung, C.H., Wingert, P.C. ve Kim, H.J., Comparison of Reignition Properties of Several Ag/W, Ag/WC, and Ag/Mo Electrical Contact Materials, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 9,1 (1986) 86-91.

52. Chang, I. ve Yuyuan, Z., *Advances in Powder Metallurgy: Properties, Processing and Applications*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2013.
53. Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N., *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Çeviri, Birinci Basım, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: 05, Ankara, 2007.*
54. Suryanarayana, C., *Mechanical Alloying and Milling*, Marcel Dekker Press, New York, 2004.
55. Soni, P.R., *Mechanical Alloying: Fundamentals and Applications*, Cambridge International Science, 1999.
56. Suryanarayana, C., *Mechanical Alloying and Milling*, *Progress in Materials Science*, 46,1-2 (2001) 1-184.
57. Lu, L. ve Lai, M.O., *Mechanical Alloying*, Springer, 1997.
58. Suryanarayana, C., *Non-Equilibrium Processing of Materials*, Pergamon Press, 1999.
59. Bıyık, S. ve Aydın, M., *The Effect of the Amount of Process Control Agent on the Properties of Cu25W Composite Powder*, *International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials (HPSM/OPTI)*, Haziran 2014, Ostend, *Bildiriler Kitabı*: 189-200.
60. Zhang, Y.F., Lu, L. ve Yap, S.M., *Prediction of the Amount of PCA for Mechanical Milling*, *Journal of Materials Processing Technology*, 90 (1999) 260-265.
61. Bıyık, S. ve Aydın, M., *The Effect of Milling Speed on Particle Size and Morphology of Cu25W Composite Powder*, *ACTA Physica Polonica A*, 127,4 (2015) 1255-1260.
62. Joshi, P.B., Marathe, G.R., Pratap, A. ve Kurup, V., *Effect of Addition of Process Control Agent (PCA) on the Nanocrystalline Behavior of Elemental Silver During High Energy Milling*, *Hyperfine Interactions*, 160,1-4 (2005) 173-180.
63. Bıyık, S. ve Aydın, M., *The Effect of Ball-to-Powder Weight Ratio on Particle Size and Morphology of Cu25W Composite Powder*, *7th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Haziran 2014, Ankara, Bildiriler Kitabı*: 13.
64. Da Costa, F.A., Da Silva, A.G.P., Filho, F.A., Gomes, U.U. ve Vieira, F.A., *Synthesis of a Nanocrystalline Composite W-25 wt.%Ag Powder by High Energy Milling*, *Powder Technology*, 188,1 (2008) 30-33.
65. Bıyık, S. ve Aydın, M., *A New Life-Test Equipment Designed for Medium-Duty Electromagnetic Contactors*, *IEEE 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EurosimE)*, Nisan 2014, Ghent, *Bildiriler - CD*, 1-7.

66. 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.
67. Borkowski, P. ve Walczuk, E., Computerized Measurement Stands for Testing Static and Dynamic Electrical Contact Welding, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 44,9 (2011) 1618-1627.
68. McDonnell, D., Comparison of the Switching Behavior of Internally Oxidized and Powder Metallurgical Silver Metal Oxide Contact Materials, Annual Holm Conference on Electrical Contacts, Ekim 1994, Chicago, Bildiriler Kitabı: 253-260.
69. Leung, C. ve Streicher, E., Material Transfer in Dynamic Welding of Ag and Ag/SnO₂ Contact Material, 48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Ekim 2002, Orlando, Bildiriler Kitabı: 21-28.
70. Tsakiris, V., Lungu, M., Enescu, E., Pavelescu, D., Dumitrescu, G., Radulian, A. ve Mocioi, N., Nanostructured W-Cu Electrical Contact Materials Processed by Hot Isostatic Pressing, Acta Physica Polonica A, 125,2 (2014) 348-352.
71. Michal, R. ve Saeger, K.E., Metallurgical Aspects of Silver-Based Contact Materials for Air-Break Switching Devices for Power Engineering, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 12,1 (1989) 71-81.
72. Discour, C. ve Muniesa, J., Erosion Behavior of Several AgCdO Materials-Comparison Between Actual Contactors and a Testing Machine, IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 2,1 (1979) 52-61.
73. Rayudu, S., Kulkarni, S., Andrews, L. ve Nemade, J., Functionally Graded Copper Chromium Based Vacuum Interrupter Contact Tip and its Interruption Ability, 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eylül 2012, Tomsk, Bildiriler Kitabı: 224-227.
74. Bıyık, S., Arslan, F. ve Aydın, M., Arc-Erosion Behavior of Boric Oxide-Reinforced Silver-Based Electrical Contact Materials Produced by Mechanical Alloying, Journal of Electronic Materials, 44,1 (2015) 457-466.
75. Lin, Z., Liu, S., Sun, X., Xie, M., Li, J., Li, X., Chen, Y., Chen, J., Huo, D., Zhang, M., Zhu, Q. ve Liu, M., The Effects of Citric Acid on the Synthesis and Performance of Silver-Tin Oxide Electrical Contact Materials, Journal of Alloys and Compounds, 588 (2014) 30-35.
76. Kang, S. ve Brecher, C., Cracking Mechanisms in Ag-SnO₂ Contact Materials and Their Role in the Erosion Process, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 12,1 (1989) 32-38.
77. Bıyık, S. ve Arslan, F., Investigation of Properties of Silver - Boric Oxide Based Contact Materials Produced by Powder Metallurgy, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ekim 2011, Ankara, Bildiriler Kitabı: 671-678.

78. Witter, G. ve Chen, Z., A Comparison of Silver Tin Indium Oxide Contact Materials Using a New Model Switch That Simulates Operation of an Automotive Relay, 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, Eylül 2004, Seattle, Bildiriler Kitabı: 382-387.
79. Ben Jemaa, N., Morin, L., Jeannot, D. ve Hauner, F., Erosion and Contact Resistance Performance of Materials for Sliding Contacts Under Arcing, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 24,3 (2001) 353-357.
80. Leung, C.H. ve Lee, A., Contact Erosion in Automotive DC Relays, IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 14,1 (1991) 101-108.
81. Morin, L., Ben Jemaa, N., Jeannot, D., Pinard, J. ve Nedelec, L., Contacts Materials Performances Under Break Arc in Automotive Applications, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 23,2 (2000) 367-375.
82. Schoepf, T.J. ve Hauner, F., Effects of Different Loads on the Surface of Silver Metal Oxide Contacts for General-Purpose Relays, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 28,4 (2005) 728-733.
83. Morin, L., Ben Jemaa, N. ve Jeannot, D., Make Arc Erosion and Welding in the Automotive Area, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 23,2 (2000) 240-246.
84. Tepper, J., Seeger, M., Votteler, T., Behrens, V. ve Honig, T., Investigation on Erosion of Cu/W Contacts in High-Voltage Circuit Breakers, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 29,3 (2006) 658-665.
85. German, R., Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles, Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 2014.
86. Fang, Z.Z., Sintering of Advanced Materials: Fundamentals and Processes, Woodhead Publishing, Cambridge, 2010.
87. Bıyık, S. ve Aydın, M., Investigation of the Compaction Behaviour of Ag₈ZnO Composite Produced by Mechanical Alloying, International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, Eylül 2013, İzmir, Bildiriler Kitabı: 145-149.
88. Amaranan, S. ve Manonukul, A., Study of Process Parameters in Conventional Powder Metallurgy of Silver, Journal of Metals, Materials and Minerals, 20,1 (2010) 51-55.
89. Guojian, A. ve Horn, G., Influence of Attachment Quality on the Performance of Arcing Electrical Contacts, 26th International Conference on Electrical Contacts, Mayıs 2012, Beijing, Bildiriler Kitabı: 398-401.
90. Behrens, V., Honig, T., Lutz, O., Schmitt, W., Spath, D. ve Worle, B., Failure of Arcing Contacts in Low Voltage Switching Devices – Examples, Root Causes, Counter Measures, 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Ekim 2010, Charleston, Bildiriler Kitabı: 254-260.

91. URL-1, www.metalor.com. 3 Temmuz 2013.
92. Lu, L. ve Zhang, Y.F., Influence of Process Control Agent on Interdiffusion between Al and Mg During Mechanical Alloying, Journal of Alloys and Compounds, 290,1-2 (1999) 279-283.
93. Lebrun, P., Froyen, L., Munar, B. ve Delaey, L., Fabrication, Structure, and Properties of Mechanically Alloyed Aluminum-Alloys, Scandinavian Journal of Metallurgy, 19,1 (1990) 19-22.
94. El-Eskandarany, M.S., Aoki, K., Sumiyama, K. ve Suzuki, K., Cyclic Phase Transformations of Mechanically Alloyed Co75Ti25 Powders, Acta Materialia, 50,5 (2002) 1113-1123.
95. Gerasimov, K.B., Gusev, A.A., Ivanov, E.Y. ve Boldyrev, V.V., Tribochemical Equilibrium in Mechanical Alloying of Metals, Journal of Materials Science, 26,9 (1991) 2495-2500.
96. Gonzalez, G., Sagarzazu, A., Villalba, R., Ochoa, J. ve D'Onofrio, L., Effect of the Milling Media on the Phases Obtained in Mechanically Alloyed Equiatomic Fe-Co, International Symposium on Metastable, Mechanically Alloyed and Nanocrystalline Materials, Temmuz 2000, Oxford, Bildiriler Kitabı: 355-360.
97. Suryanarayana, C., Chen, G.H. ve Froes, F.H.S., Milling Maps for Phase Identification During Mechanical Alloying, Scripta Metallurgica Et Materialia, 26,11 (1992) 1727-1732.
98. Rehani, B., Joshi, P.B. ve Khanna, P.K., Fabrication of Silver-Graphite Contact Materials Using Silver Nanopowders, Journal of Materials Engineering and Performance, 19,1 (2010) 64-69.
99. Farrokhzad, M.A. ve Khan, T.I., A Study on Hardness of Nickel-Based Cermet Coatings Composed of Alpha-Al₂O₃ and TiO₂ Nanoparticles, Advanced Composite Materials, 24,2 (2015) 141-159.
100. Lungu, M., Gavriliu, S., Enescu, E., Lucaci, M., Tsakiris, V. ve Rimbu, G., Properties Enhancement of an Eco-Friendly Electrical Contact Material by Silver Nanoparticles Addition, Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 43A,12 (2012) 4464-4469.
101. Lee, S.H., Kwon, S.Y. ve Ham, H.J., Thermal Conductivity of Tungsten-Copper Composites, Thermochimica Acta, 542 (2012) 2-5.
102. Wu, J., Cao, J., Han, W.Q., Janotti, A. ve Kim, H.C., Functional Metal Oxide Nanostructures, Springer, New York, 2012.
103. Kumar, C., Nanostructured Oxides, Wiley-VCH, New York, 2009.

104. Wang, J.Z., Wang, Y.P., Yang, Z.M., Wang, W. ve Ding, B.J., Effect of CuO Additive on the Wettability and Interface Behavior of Silver/Tin Oxide, Rare Metal Materials and Engineering, 34,3 (2005) 405-408.
105. Zhu, Y. ve Wang, J., Preparation and Study on Performance for Silver Rare-Earth Alloy Electrical Contact Materials, Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Ekim 2010, Charleston, Bildiriler Kitabı: 163-166.
106. Wang, J., Wang, B., Wen, M., Lu, Y., Luo, Y. ve Li, Z., Study on the Behavior of Silver Rare Earth Oxide Contact Material, Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts, Eylül 2000, Chicago, Bildiriler Kitabı: 231-234.
107. Jeannot, D., Pinard, J., Ramoni, P. ve Jost, E.M., Physical and Chemical Properties of Metal-Oxide Additions to Ag-SnO₂ Contact Materials and Predictions of Electrical Performance, IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A, 17,1 (1994) 17-23.
108. Wang, J.Q., Wang, H.T., Wen, M. ve Zhu, Y.C., Testing Results Analysis of Contact Materials' Electrical Contact Performance, Journal of Zhejiang University-Science A, 8,3 (2007) 459-463.
109. Pons, F., Electrical Contact Material Arc Erosion: Experiments and Modeling Towards The Design of an AgCdO Substitute, Doktora Tezi, Georgia Teknoloji Enstitüsü, Atlanta, 2010.
110. Bıyık, S. ve Aydın, M., Investigation of the Effect of Different Current Loads on the Arc-Erosion Performance of Electrical Contacts Using New Life-Test Equipment, 5th The International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition, Nisan 2015, Muğla, Bildiriler Kitabı: 323.

ÖZGEÇMİŞ

Serkan BIYIK 1983 yılında Trabzon'da doğdu. 2001 yılında Trabzon Yunus Emre Anadolu Lisesi'ni bitirdi. 2001 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Lisans eğitime başladı. 2003-2004 Bahar yarıyılında Erasmus Programı çerçevesinde Belçika'nın Gent Üniversitesinde bir yarıyıl eğitim aldı. 2004 yılında Almanya'nın Lindenberg şehrinde Buhmann-Systeme Firmasında 40 iş günü staj yaptı. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesinden "Makine Mühendisi" unvanı ile mezun oldu. 2005 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Kasım 2007'de KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak atandı. Ağustos 2008'de yüksek lisansını tamamladı. Serkan BIYIK'ın yüksek lisans tezinden uluslararası hakemli dergilerde yayımlanmış bir adet bilimsel makale ve bir adet de uluslararası bildiri olmak üzere toplam iki yayını vardır. 2008 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitime başladı. 2011-2014 yılları arasında bir bilimsel araştırma projesinde araştırmacı olarak görev yaptı. Serkan BIYIK'ın yüksek lisans tezinden başka uluslararası hakemli dergilerde yayımlanmış 1 adet bilimsel makale ve 6 adet bildirisi de bulunmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

Doktora tezi kapsamında uluslararası hakemli dergilerde (SCI-index) yapılan yayınlar:

1. Bıyık, S. ve Aydın, M., The Effect of Milling Speed on Particle Size and Morphology of Cu25W Composite Powder, ACTA Physica Polonica A, 127,4 (2015) 1255-1260.