

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

**BOR TAKVİYELİ BAKIR KOMPOZİTİNİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE  
ÜRETİMİ VE MEKANİK-ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Aytekin ULUTAŞ**

**(07122202)**

**Anabilim Dalı: Metalurji Eğitimi**

**Programı: Malzeme**

**Danışman: Prof. Dr. Hüseyin TURHAN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 20 Haziran 2014**

**TEMMUZ-2014**

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

**BOR TAKVİYELİ BAKIR KOMPOZİTİNİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE  
ÜRETİMİ VE MEKANİK-ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Aytekin ULUTAŞ**

**(07122202)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Haziran 2014**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Temmuz 2014**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin TURHAN (F.Ü)**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Halis ÇELİK (F.Ü)**

**Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ (G.Ü)**

**Doç.Dr. Mustafa TAŞKIN (F.Ü)**

**Yard.Doç.Dr. Hanifi ÇİNİCİ (G.Ü)**

**TEMMUZ-2014**

## ÖNSÖZ

Doktora ve Yüksek Lisans çalışmalarında tez danışmanım olarak bilimsel hayata hazırlığımda büyük pay sahibi Sayın Prof.Dr.Hüseyin Turhan'a teşekkürlerimi sunarak, bu çalışmada emekleri bulunan tüm Fırat Üniversitesi Akademik ve idari personeline teşekkürlerimi birer borç biliyorum.

Tez çalışmalarında büyük ölçüde emeği geçen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü Akademik personeline, özellikle Prof.Dr.Adem Kurt, Prof.Dr.Behcet Gülenç'e verdikleri bilimsel ve manevi destekler için minnet borçluyum. Deneysel çalışmalar ve doktora eğitimim süresince şahsıma verdiği maddi ve manevi desteklerden dolayı değerli hocam Yard.Doç.Dr.Hanifi ÇİNİCİ'ye ayrıcalıklı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Çalışmalarında emeklerini esirgemeyen Yrd.Doç.Dr.Tayfun FINDIK'a ve saydığım değerli akademisyenler dışında burada emeklerini dile getiremediğim Gazi Üniversitesinde görev yapmakta olan akademik personele, çalışmalarımı nihayetlendirmem de emeklerini unutmayacağım değerli dostlarıma teşekkür ediyorum.

Son olarak uzun soluklu bu yolculukta çalışmalarım nedeniyle aksattığım ailevi sorumluluklarımı telafi ederek, en zor zamanlarımda dahi desteğini yanımda bulduğum, motivasyon ve başarı kaynağım değerli eşim Meral ULUTAŞ'a, oğullarım Enes ULUTAŞ ve Ömer Aytürk ULUTAŞ'a gösterdikleri sabır, anlayış ve fedakârlıktan dolayı çok teşekkür ederim.

Aytekin ULUTAŞ

Elazığ-2014

## İÇİNDEKİLER

Sayfa No

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖNSÖZ .....                                                            | II  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                       | III |
| ÖZET .....                                                             | V   |
| SUMMARY .....                                                          | VI  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                 | VII |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                 | IX  |
| SİMGELER LİSTESİ .....                                                 | X   |
| 1. GİRİŞ .....                                                         | 1   |
| 2. KOMPOZİT MALZEMELER.....                                            | 4   |
| 2.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....                                   | 4   |
| 2.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri .....  | 6   |
| 2.2.1. Bakır ve Alaşımları.....                                        | 6   |
| 2.3. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri ..... | 6   |
| 2.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....              | 7   |
| 3. TOZ METALURJİSİ.....                                                | 8   |
| 3.1. Tozların Özellikleri .....                                        | 10  |
| 3.1.1. Kimyasal Özellikler .....                                       | 10  |
| 3.1.2. Fiziksel Özellikler .....                                       | 11  |
| 3.1.3. Parçacık Boyutu.....                                            | 11  |
| 3.1.3. Parçacık Şekli.....                                             | 12  |
| 3.1.4. Teorik ve Görünür Yoğunluk.....                                 | 12  |
| 3.1.5. Tozların Akış Hızı.....                                         | 13  |
| 3.1.6. Tozların Yanıcılık ve Zehirleyici Özelliği.....                 | 14  |
| 3.2. Toz Üretim Yöntemleri .....                                       | 14  |
| 3.2.1. Atomizasyon .....                                               | 15  |
| 3.2.2. Doğrudan İndirgeme .....                                        | 15  |
| 3.2.3. Öğütme .....                                                    | 16  |
| 3.2.4. Elektrokimyasal Yöntemler .....                                 | 16  |
| 3.2.5. Sıvı veya Gazdan Çökeltme .....                                 | 16  |
| 3.3. Toz Metal Parça Üretim Süreci.....                                | 17  |
| 3.3.1. Tozların Karıştırılması .....                                   | 17  |
| 3.3.2. Yağlayıcılar .....                                              | 17  |
| 3.3.3. Metal Tozlarının Sıkıştırılması .....                           | 18  |
| 3.3.4. Kalıpta Şekillendirme .....                                     | 22  |
| 3.3.5. Sıkıştırma Hataları .....                                       | 28  |
| 3.3.6. Sinterleme.....                                                 | 29  |
| 3.3.6.1. Sinterleme Süresi, Sıcaklığı ve Atmosferi.....                | 30  |
| 3.4. T/M Malzemelerinin Mekanik Özellikleri .....                      | 32  |
| 3.4.1. T/M Parçaların Sertlik Özelliği.....                            | 33  |
| 3.4.2. T/M Parçaların Çekme, Yorulma ve Darbe Mukavemetleri .....      | 34  |
| 3.5. Toz Metalurjisi Uygulama Alanları.....                            | 36  |
| 3.5.1. Sert Metaller .....                                             | 37  |
| 3.5.2. Elektrik ve Magnetik Malzemeler.....                            | 38  |
| 3.5.3. Diş Dolguları .....                                             | 40  |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 3.5.4. Elmas Diskler .....                              | 40 |
| 3.5.5. Yatak Malzemeleri .....                          | 41 |
| 3.5.6. Diğer Uygulamalar .....                          | 41 |
| 3.6. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları ..... | 43 |
| 3.6.1. T/M'nin Avantajları;.....                        | 43 |
| 3.6.2. T/M' nin Dezavantajları; .....                   | 43 |
| 3.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....           | 44 |
| 4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....                                | 49 |
| 4.1. Malzeme.....                                       | 49 |
| 4.2. Yöntem.....                                        | 50 |
| 4.2.1. Toz Malzemelerin Hazırlanması .....              | 50 |
| 4.2.2. Presleme.....                                    | 50 |
| 4.2.3. Sinterleme.....                                  | 52 |
| 4.2.4. Yoğunluk Ölçümleri .....                         | 53 |
| 4.2.5. Sertlik Ölçüm Deneyleri.....                     | 53 |
| 4.2.6. Çapraz Kırılma Deneyleri.....                    | 54 |
| 4.2.7. Metalografik Muayene .....                       | 54 |
| 4.2.8. İletkenlik Ölçümleri .....                       | 55 |
| 4.2.9. X Ray Analizleri .....                           | 55 |
| 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....                  | 56 |
| 5.1. Mikroyapı Sonuçları ve Tartışma .....              | 56 |
| 5.2. SEM Sonuçları ve Tartışma.....                     | 61 |
| 5.3. X Ray Sonuçları ve Tartışma .....                  | 72 |
| 5.4. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları ve Tartışma.....          | 82 |
| 5.5. Sertlik Sonuçları ve Tartışma.....                 | 85 |
| 5.6. Çapraz Kırılma Sonuçları ve Tartışma .....         | 87 |
| 5.7. Elektrik İletkenliği Sonuçları ve Tartışma.....    | 88 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....                               | 91 |
| KAYNAKLAR.....                                          | 93 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                           | 99 |

## ÖZET

Bu çalışmada Toz Metalurjisi yöntemi ile Bakır tozları içerisine Ferrobör partikülleri takviye edilerek hazırlanan metal matrisli kompozitin (MMC) iletkenlik ve mekanik özellikleri inceleme altına alınmıştır. Bu amaçla seçilen Ferrobör takviye partikülleri yapı içinde ağırlıkça %1-1,5-2-2,5-3-3,5 oranlarında ilave edilerek hazırlanan numuneler toz metalürjisi yöntemi ile 600 MPa basınç altında preslenmişlerdir. Ardından numuneler 800-850-900 °C sıcaklıklarda sinterlenerek, farklı sinterleme sıcaklıklarının kompozit özelliklerine etkisi incelenmiştir. Sinterleme öncesinde ve sonrasında yoğunluk ölçümleri yapılan MMC numunelerine mekanik ve iletkenlik özelliklerini belirlemek amacı ile bazı deneyler uygulanmıştır. Sertlik, Çapraz kırılma, Yoğunluk, iletkenlik deneylerinin uygulanan numunelerin mekanik ve iletkenlik özellikleri elde edilen ölçüm değerleri ışığında belirlenmiştir.

Numuneler mikroyapı karakterizasyonu ile SEM, EDS ve XRD analizleri sonucunda, farklı sıcaklıklarda uygulanan sinterleme işlemi ile değişik intermetalik bileşiklerin oluştuğu görülmüştür. Sinterleme sıcaklığı artışının numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği, iletkenlik özelliklerini değiştirmediği görülmüştür. Farklı bileşim oranları dikkate alındığında, yapı içerisinde artan takviye partikülü oranına paralel olarak sertlik değerlerinin arttığı, çapraz kırılma mukavemetinin azaldığı ve elektrik iletkenliği değerlerinin %2 Ferrobör takviye partikülü oranına kadar değişmediği bu noktadan sonra yapı içerisinde bir miktar direnç artışı gözlemlendiği kaydedilmiştir.

Malzemelere uygulanan sinterleme sıcaklığı ve farklı takviye partikülü oranları dikkate alındığında, 850 °C sıcaklıkta % 2,5 FeB takviye partikülü oranına sahip numunenin, tüm numuneler içinde en iyi mekanik özellikleri verdiği ve iletkenlik değerlerinin, saf bakıra yakın değerler sergilemesi ile öne çıktığı söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Metal Matrisli Kompozit, Cu, FeB, Mekanik Özellikler, Elektrik İletkenliği

## SUMMARY

### **Production Of Boron Reinforced Copper Composites With Powder Metallurgy And Investigation Of Mechanical-Electrical Properties**

In this study, with the powder metallurgy method, it is studied that metal matrix composite's conductivity and mechanic features with consolidation of copper matrix composite (MMC) with Ferroboron particles. The Ferroboron consolidation particle quantity which is chosen for this aim, should be %1-1,5-2-2,5-3-3,5 rate by weight and prepared samples are pressed by powder metallurgy method. Then sintering to the sample with 800-850-900 °C temperatures, it is studied how different temperatures, effect the composites features. Before and after sintering with the aim of deciding conductivity and mechanic feature, some experiments have been made to measure the density of MMC samples. The mechanic and conductivity features of the samples that Hardness, transverse rupture, density, conductivity experiments are applied on are determined in the light of the measurement values.

As the result of SEM EDS analyses with microstructure characterization and XRD experiments it has been seen that samples host different intermetallic compounds by the use of sintering. It has been seen that the increase of sintering temperature upgrades the mechanic features, but it doesn't change their conductivities. When different composition rates are taken into account, it has been recorded that hardness values increase in parallel with increasing consolidation particle rate in the structure and cross-breaking strength decreases. Electric conductivity value doesn't change till %2 Ferroboron consolidation particle rate after this point, it has been recorded that some resistance rise is seen in the structure.

When the sintering temperature which is applied on material and different consolidation particle rates are taken into account, at 850 C temperature the sample which hosts %2,5 FeB consolidation particle rate shows the best mechanic features and this sample come forward with its conductivity values showing close values to pure copper.

**Keywords:** Powder Metallurgy, Metal Matrix Composites, Cu, FeB, Mechanical Properties, Electrical Conductivity

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                 | Sayfa No |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Şekil 1. Küresel ve pul şeklindeki parçacıklar .....                                                                                                                                                                                                            | 12       |
| Şekil 2. Hall akış aparatı.....                                                                                                                                                                                                                                 | 13       |
| Şekil 3. Toz metal sıkıştırma safhaları görünüşü .....                                                                                                                                                                                                          | 19       |
| Şekil 4. Küresel bronz tozunun kalıpta sıkıştırılması için bilgi.....                                                                                                                                                                                           | 20       |
| Şekil 5. Toz sıkıştırma esnasında işlem sırası .....                                                                                                                                                                                                            | 20       |
| Şekil 6. Kalıp duvarındaki sürtünme kuvvetlerinden doğan uygulanan ve iletilen basınçlar arasındaki fark, sıkıştırma esnasında kuvvetleri dengeler .....                                                                                                        | 22       |
| Şekil 7. Kalıpta sıkıştırma yöntemi şematik gösterimi.....                                                                                                                                                                                                      | 23       |
| Şekil 8. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı.....                                                                                                                                                                                                          | 24       |
| Şekil 9. Çift yönlü sıkıştırma.....                                                                                                                                                                                                                             | 24       |
| Şekil 10. Çift yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı.....                                                                                                                                                                                                        | 25       |
| Şekil 11. Kuru kalıp ile izostatik sıkıştırma .....                                                                                                                                                                                                             | 26       |
| Şekil 12. Yaş kalıp ile izostatik sıkıştırma .....                                                                                                                                                                                                              | 26       |
| Şekil 13. Değişen frekanslarda (genlik $6.3 \times 10$ in) basıncın bakır yoğunluğuna etkisi. ....                                                                                                                                                              | 27       |
| Şekil 14. Geri yaylanma hatası .....                                                                                                                                                                                                                            | 29       |
| Şekil 15. a) Sinterleme başlangıcında temas halinde parçacıklar.....                                                                                                                                                                                            | 31       |
| Şekil 16. Bir nokta teması başlangıcı ile sinterleme esnasındaki parçacıklar arası bağların gelişimi .....                                                                                                                                                      | 31       |
| Şekil 17. Altın ve bakırın sıkıştırma basıncına bağlı sertlik değerinin değişimi .....                                                                                                                                                                          | 33       |
| Şekil 18. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişik basınçlar altında sıkıştırıldıktan sonra sinterlenen kaba bakır tozu numunelerinin sertlik değişimi.....                                                                                                  | 34       |
| Şekil 19. Kalıcı gözenegin mekanik özelliklere etkisi .....                                                                                                                                                                                                     | 35       |
| Şekil 20. Soğuk presleme numune kalıbı .....                                                                                                                                                                                                                    | 51       |
| Şekil 21. Sinterleme de kullanılan tüp fırının şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                                          | 53       |
| Şekil 22. Çapraz kırılma test düzeneği .....                                                                                                                                                                                                                    | 54       |
| Şekil 23. % 100 Cu 850 C sinterleme sıcaklığına sahip numune .....                                                                                                                                                                                              | 57       |
| Şekil 24. Sinterleme sıcaklığına bağlı mikroyapı değişimleri grafiği a) %1 FeB Takviyeli 800-850-900 °C sinterleme b) % 2 FeB takviyeli 800-850-900 °C sinterlenmiş numuneler, c) %3 FeB takviyeli 800-850-900 °C sinterleme sıcaklığına sahip numuneler, ..... | 60       |
| Şekil 25. %1 FeB takviyeli 800 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                                               | 62       |
| Şekil 26. %1 FeB takviyeli 800 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri .....                                                                                                                                                                              | 63       |
| Şekil 27. %1 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                                               | 63       |
| Şekil 28. %1 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizi .....                                                                                                                                                                                 | 64       |
| Şekil 29. %1 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                                               | 64       |
| Şekil 30. %1 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri .....                                                                                                                                                                              | 65       |
| Şekil 31. %1 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                                               | 65       |
| Şekil 32. % 1 FeB takviyeli Şekil 38 de SEM görüntüsü verilen numuneye ait EDS analizleri .....                                                                                                                                                                 | 66       |
| Şekil 33. %2.5 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                                             | 67       |
| Şekil 34. % 2,5 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri .....                                                                                                                                                                           | 68       |
| Şekil 35. %3 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                                               | 69       |
| Şekil 36. %3 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri .....                                                                                                                                                                              | 70       |
| Şekil 37. %3.5 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                                             | 71       |
| Şekil 38. %3.5 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri .....                                                                                                                                                                            | 71       |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 39. %1 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği .....        | 73 |
| Şekil 40. %1,5 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği .....      | 74 |
| Şekil 41. %2 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği .....        | 75 |
| Şekil 42. %2,5 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği .....      | 76 |
| Şekil 43. %3 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği .....        | 77 |
| Şekil 44. %3,5 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği .....      | 78 |
| Şekil 45. Sinterleme sıcaklığına bağlı mikroyapıda meydana gelen oluşumları gösteren XRD Grafiği .....               | 79 |
| Şekil 46. Partikül oranına bağlı younluk değişim grafiği .....                                                       | 83 |
| Şekil 47. Takviye partikülü oranına bağlı sertlik değişimi grafiği .....                                             | 85 |
| Şekil 48. Sinterleme sıcaklığına bağlı sertlik değişim grafiği .....                                                 | 86 |
| Şekil 49. Takviye Partikülü Miktarına Bağlı Çapraz Kırılma Mukavemeti Eğrisi .....                                   | 88 |
| Şekil 50. Sinterleme sıcaklığına bağlı iletkenlik değişimi grafiği .....                                             | 89 |
| Şekil 51. 800 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerin takviye partikülü oranına bağlı iletkenlik değişim grafiği ..... | 89 |
| Şekil 52. 900°C sıcaklıkta sinterlenen numunelerin takviye partikülü oranına bağlı iletkenlik değişim grafiği .....  | 90 |

## TABLOLAR LİSTESİ

|                                                                                              | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Tablo 1. Bazı MMK'lerin mekanik özellikleri.....                                             | 5               |
| Tablo 2. Bazı metal ve alaşımlarının sinterleme sıcaklıkları ve süreleri .....               | 30              |
| Tablo 3. Farklı tane büyüklüğü ve sıcaklıklarda sinterlenmiş bakır tozunun sertlikleri ..... | 34              |
| Tablo 4. Hadde ve T/M Çeliklerin Özelliklerinin Mukayesesi .....                             | 35              |
| Tablo 5. T/M' nin otomotiv sektöründe uygulama alanları .....                                | 37              |
| Tablo 6. Bazı Alman Sert Metallerin Mekanik Özellikleri .....                                | 38              |
| Tablo 7. Elektrik Kontak Malzemelerinin Özellikleri .....                                    | 39              |
| Tablo 8. Çeşitli Metal-Grafit Fırçalarının Özellikleri .....                                 | 39              |
| Tablo 9. T/M Filtrelerin Özellikleri.....                                                    | 42              |
| Tablo 10. Amerikan ASTM Tarafından Kabul Edilen Ferro Bor sınıfları ve kompozisyonları ..... | 49              |
| Tablo 11. Deneysel çalışmada kullanılan numunelere ait Cu-FeB oranları .....                 | 52              |

## SİMGELER LİSTESİ

Ag : Gümüş  
Al : Alüminyum  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Alüminyum Oksit  
AMK : Alüminyum Matrisli Kompozit  
B : Bor  
CO : Karbonmonooksit  
CO<sub>3</sub> : Karbondioksit  
Cu : Bakır  
Fe : Demir  
FeB: Ferrobor  
HV : Vickers Sertlik Degeri  
kW : Kilowatt  
MMK : Metal Matriksli Kompozitler  
Pb : Kurşun  
SEM :Taramalı elektron mikroskobu  
Si : Silisyum  
SiC : Silisyum Karbür  
TM : Toz Metalurjisi  
W : Ağırlık, g  
V : Hacim, cm<sup>3</sup>  
ρ: Yoğunluk, g/cm<sup>3</sup>

## 1. GİRİŞ

Malzeme üretimindeki gelişmeler farklı uygulama alanları için farklı malzemeler geliştirilmesini gerektirmiştir. (Meriç ve diğ., 2005). Yeni malzemelerden olan kompozit malzemeler, yüksek aşınma dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı ve hafiflik gibi önemli özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık ve uzay endüstrileri gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Ticari malzemelerde bir arada bulunmayan üstün özellikler, ancak kompozit malzemelerle sağlanır. Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı guruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemedeki toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir (Bolay, 1998). Kompozit malzemeler kullanılan matris (ana yapı) malzemesine göre, seramik matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler (MMK) olmak üzere üçe ayrılır. MMK'ler, metallerin yüksek süneklik ve tokluk, seramiklerin yüksek sertlik ve dayanım özelliklerini bir arada bulundurdıklarından endüstride geniş bir kullanım alanı bulan malzemelerdir. (Durmuş, 2006)

MMK'lerin üretimlerinde kullanılan yöntemler içinde son yıllarda oldukça büyüyen toz metalurjisi yöntemi, imalat sektöründeki gelişimi açısından oldukça yüksek bir ivme kazanmış durumdadır. Farklı üretim teknolojilerinin imalat sektöründe yerini aldığı bu süreçte toz metalurjisi yöntemi yapılan üretim oranı da yükselmektedir.

Metal üretim sanayisinde daha önce döküm, talaşlı üretim ve dövme gibi tekniklerle üretildiği halde, günümüzde üretimi ekonomik sebeplerle toz metalurjisi tekniğine değiştirilen sayısız parça örneği vermek mümkündür (Kasouf, 1994).

Toz metalurjisi temel olarak metal tozlarının belirli oranlarda karıştırılarak, oda sıcaklığında hassas kalıplarda, istenen teknik değerlere uygun basınçlarda sıkıştırılması (presleme) ve kontrollü atmosferlerde fırınlanmasıyla (sinterleme) parça üretme yöntemidir. (Yıldırım, 1999)

Toz metalurjisi üretim yöntemleri diğer metal şekillendirme yöntemlerinden tamamen farklıdır ve seramik parça üretim teknolojisine benzemektedir. İşlem her iki halde de tozların bir kalıp içinde sıkıştırılmasıyla başlanır. Oluşturulan şekil pişirilerek gerekli mukavemete kavuşturulur (Somunkıran, 1999) Bazı parçalar bu işlemi takiben kalibrasyon (yeniden presleme), yağ veya plastik emdirme, daha düşük ergime noktalı bir metal veya alaşım sızdırma, ısıl işlem veya kaplama işlemlerine tabi tutulabilir. Diğer bir ifadeyle

T/M, elementel tozların, tam ve/veya yarı ön alaşımlanmış tozların bağlayıcılar ve yağlayıcılarla birlikte harmanlanarak uygun sıkıştırma yöntemleri ve sıcaklıklar kullanılarak arzu edilen şekilde üretilmeleri süreçlerini içeren oldukça kapsamlı ve çok disiplinli bir malzeme üretim yöntemidir (Öveçoğlu, 1997).

Toz metalurjisi (T/M) modern bir imalat yöntemidir. Çok küçük partikülleri birbirine bağlayarak parça haline getirme işlemidir. Bu işlem metal tozlarının kendine has yöntemler ile küçük, girintili çıkıntılı, diğer klasik yöntemlerle üretilmesi zor olan iş parçalarının seri olarak üretilmelerine olanak sağlayan toz malzeme teknolojisidir (Benjamin, 1974).

Konvansiyonel üretim tekniklerine bir alternatif olarak geliştirilen toz metalurjisi sağlamış olduğu birçok avantajlar bakımından endüstride yaygın kullanım alanına sahiptir. Üretilirlik, düşük maliyet, yüksek performans sunması gibi birçok etken toz metalurjik seri parça üretimini bir anlamda popüler kılmaktadır (Karagöz vd.2009). Üretilen malzemelerin çeşitli alanlarda güvenli bir şekilde kullanılmaları için, mekanik davranışlarının iyi anlaşılması ve bilinmesi gereklidir (Yılmaz v.d. 2009).

Çoğu metal ve alaşım sisteminde olduğu gibi toz metalurjik malzemelerin de mekanik özelliklerinin geliştirilmesi açısından alaşım dizaynı önemlilik arz etmektedir (Gething 2005). Bu bakımdan çeşitli parçaların tasarımı ve üretimi açısından büyük önem taşımaktadır (Yılmaz v.d. 2009).

Davala'ya (1998) göre malzeme kompozisyonu, sağladığı yoğunlukla, alaşım sisteminin sertleşebilirliğini arttırarak genellikle sistemin mekanik performansını yükselten alaşım elemanlarıyla eşit rol oynar.

Xiong (2007), demir ve bakır esaslı malzemeler mukayese edildiğinde Bakır esaslı malzemelerin daha iyi ısı iletkenlik ve sürtünme direnci gibi özellikleri olduğunu dile getirir.

Saf bakır yüksek elektrik ve ısı iletkenliğe sahip olmasına karşın, çekme, sürünme ve sertlik gibi mekanik özellikleri düşüktür. Bu bakımdan yüksek çekme mukavemetli ve sert bakır esaslı malzeme geliştirilmesi önemlidir. Bakırın mekanik dayanımı matris içerisine homojen olarak dağılmış sert parçacık takviyesi ile veya yaşlandırma ısı işlemi ile artırılabilir (Tjong 1999).

Bu çalışma ile verilen literatür ışığında Bakır matris içine FeB takviye tasarlanan kompozit, toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Hazırlanan kompozite ait numunelerin Mekanik, Elektriksel özellikleri araştırılmış ve üretilen kompozitin metalurjik

karakterizasyonu belirlenmiştir. Literatürde toz metalurjisi alanında bakır esaslı FeB takviyeli bir kompozit üretimine dair herhangi bir bilgiye ulaşılammıştır. Bu çalışma temelde bor takviyesinin Fe-Cu ikili denge diagramları incelendiğinde sinterleme sıcaklığında oluşacak intermetalik bileşikler ve bu bileşiklere bağlı bor atomu morfolojisindeki değişimi ve takibi inceleme maksadıyla yapılmıştır.

## **2. KOMPOZİT MALZEMELER**

Kompozit malzeme, birbirinden biçimleri ve kimyasal bileşimleriyle ayrılmış ve esas olarak birbiri içersinde çözünmeyen, iki veya daha çok mikro veya makro bileşenin karışımı veya birleşimiyle oluşan malzemedir (Smith, 2001). Diğer bir deyişle iki malzeme, orijinal malzemelerde elde edilemeyen özellikleri elde etmek için birleştirildiğinde kompozitler üretilir (Askeland, 1998). Bugün istenilen özellikleri sağlamada ileri teknoloji malzemelerine duyulan ihtiyaç giderek artmakta ve tek bileşenli malzemeler ileri mühendislik uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılamamaktadır. Bu nedenle üstün özelliklere sahip kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır (Varol, 2012).

Kompozit malzemeler değişik kriterler esas alınarak sınıflandırılabilir. Doğal veya yapay olmasına göre doğal kompozitler (kemik, kas, deri, ağaç) ve yapay kompozitler (cam elyaf takviyeli, karbon-karbon, kevlar-epoksi v.b.) olarak sınıflandırılır. Kompozitin ana dokusunu oluşturan matris malzemesine göre yapılan sınıflandırma ise plastik (polimer), metal ve seramik matrisli kompozit malzemeler olarak yapılır. Ancak uygulamada en yaygın olarak kullanılan sınıflandırma kompozite mukavemet kazandıran takviye malzemesine göre yapılır (Varol, 2012).

### **2.1. Metal Matrisli Kompozitler**

Metal matrisli kompozitler ve özellikle de süreksiz (parçacık, kısa fiber, wisker) parçacık takviyeli MMK'in, havacılık ve otomotiv uygulamalarındaki kullanım alanları giderek artmaktadır. Son yıllarda yapısal kompozit alanında alüminyum esaslı süreksiz parçacık takviyeli MMK'lere ait pratik uygulamalar ve araştırmalar üzerinde durulmaktadır. Araştırmaların büyük çoğunluğu bu ileri malzemelerin üretim işlemi ve özelliklerinin tahmini üzerine olmakla birlikte ikincil üretim teknolojileri olan talaşlı işleme, birleştirme, plastik şekil verme üzerine de araştırmaların yapılması gerekmektedir (Zhang, 1999).

**Tablo 1. Bazı MMK'lerin mekanik özellikleri**

| <b>Metal Matrisli Kompozit</b> | <b>Çekme Dayanımı (MPa)</b> | <b>Elastik Modülü (GPa)</b> | <b>Kopma Uzunluğu (%)</b> |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Sürekli Fiberli                |                             |                             |                           |
| Al 2024-T6 (%45 Bor)           | 1458                        | 220                         | 0.810                     |
| Al 6061-T6 (%51 Bor)           | 1417                        | 231                         | 0.735                     |
| Al 6061-T6 (%47 SiC)           | 1462                        | 204                         | 0.89                      |
| Sürekli Fiberli                | 650                         | 127                         | 2.4                       |
| Al 2124-T6 (%20 SiC)           |                             |                             |                           |
| Al 6061-T6 (%20 SiC)           | 480                         | 115                         | 5                         |
| Partikül Takviyeli             |                             |                             |                           |
| Al 2124-F (%20 SiC)            | 552                         | 103                         | 7.0                       |
| Al 6061-F (%20 SiC)            | 496                         | 103                         | 5.5                       |
| Güçlendirilmemiş               |                             |                             |                           |
| Al 2124-F                      | 455                         | 71                          | 9                         |
| Al 6061-F                      | 310                         | 68.9                        | 12                        |

Metal Matrisli Kompozitlerin metallere göre üstün olan özelliklerini şöyle sıralayabiliriz:

- 1-Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, diğer bir deyişle spesifik mukavemet
- 2-Yüksek elastik modülü/yoğunluk oranı, başka bir deyişle spesifik modül
- 3-Daha İyi yorulma Direnci
- 4-Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürtünme oranı gibi daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri
- 5-Düşük termal genleşme katsayısı
- 6-Daha iyi aşınma direnci

Metal Matrisli kompozitlerin dezavantajları olarak ise şu maddeler sayılabilir:

- 1-Sürekli fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda zor ve karmaşık üretim işlemleri (döküm yöntemi hariç)
- 2-Metallere göre sünekliğin belli oranda azalması. Yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizat
- 3-Yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin deneyimsiz oluşu (Varol, 2012)

## **2.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri**

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi seçimi yapılırken daha ziyade hafif metaller kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak Al, Ni, Cu, gibi metallerin alaşımları kullanılmakla birlikte bunlar içinde alüminyum ve alaşımları kullanım yoğunluğu dikkate alındığında, ilk sırada yer almaktadır. Düşük yoğunluğu ve ergime sıcaklığına sahip olmaları nedeniyle seçilen bu alaşımlar, seramik dahil birçok takviye elemanını kolayca ıslatabilmeleridir. Demir, Bakır, Alüminyum saf veya alaşım olarak da metal matrisli kompozitlerde matris elemanı olarak kullanılmaktadır. Yüksek aşınma dayanımı ve düşük sürtünme değerleri için Al-Si alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımları matris alaşımı olarak kullanılabilir. Kompozit malzemeden beklenen özellikleri elde etmek için matris malzemesinin bazı beklentilere cevap verecek nitelikte tasarlanması gerekmektedir. Örnek olarak takviye fiberleri ve parçacıkların ıslatılabilirliği, ara yüzey bağı kalitesi, düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı bir şekilde katılma kabiliyeti gibi faktörler sayılabilir. Bunlara takviye partikülü matris arasında meydana gelmesi istenmeyen kimyasal etkileşim diğer bir deyimle kararlılıkta eklenebilir.

### **2.2.1. Bakır ve Alaşımları**

Metal matrisli kompozit malzemelerde bakır ve alaşımlarının kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Elektrik ve elektronik devre elemanları gibi alanlarda yapılan tasarımlar son zamanlarda göze çarpmaktadır. Bakır matrisin grafit parçacıklar ile takviye edilerek düşük termal genleşme katsayısına sahip iletkenliği iyi olan malzemelerin elde edilebildiği bilinmektedir. Ayrıca katı yağlayıcı olarak grafitin kullanıldığı metal matrisli kompozitlerin, yatak malzemesi olarak kullanımı kurşun kullanımından kaynaklanan zehirleyici etkiyi ortadan kaldırmaktadır.

## **2.3. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri**

MMK malzemelerin üretiminde, temin edilebilmelerindeki kolaylık, matris malzemesi ile uyumluluk, elastiklik modülü, çekme dayanımı, yoğunluk, ergime sıcaklığı, ısı kararlılık, ısı genleşme katsayısı, boyut ve şekil, kimyasal bileşim, kristal yapı gibi özellikler göz önünde tutularak, kimyasal yapılarına göre a) oksitler, b) karbürler, c)

nitürler ve d) diğer (paslanmaz çelik, karbon vs.) olmak üzere dört ana grupta incelenebilecek takviye malzemeleri kullanılmaktadır (Toptan, 2006).

Metal matrisli kompozitlerde ana hedef, düşük yoğunluklu ve yüksek dayanımlı malzemeler elde etmektir.

## **2.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri**

Farklı matris ve takviye malzemelerinin kullanılıyor olması MMK'lerin üretiminde farklı tekniklerin geliştirilmesine sebep olmuştur. Üretim sırasında matrisin sıvı, katı veya buhar fazında olmasına göre MMK'lerin üretim yöntemleri şekilde gösterildiği gibi sınıflandırmak mümkündür. Bu yöntemler:

### **1-Katı-Faz Üretim Yöntemleri**

a) Difüzyonla Bağlama

b) Toz Metalurjisi (TM)

### **2-Sıvı-Faz Üretim Yöntemleri**

3-Buhar-Faz üretim yöntemleridir.

### 3. TOZ METALURJİSİ

Geleneksel yöntemlerle üretilen geleneksel malzemelerden istenilen bütün özelliklerin birlikte kazanılması zor olduğu için, malzeme bilimciler günlük yaşantımızı kolaylaştıracak daha üstün özelliklere sahip ve daha ekonomik malzeme üretme arayışı içerisine girmişlerdir. Belirli bir uygulama için malzemeden beklenen değişik fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler, malzemeyi oluşturan bu özelliklere sahip bileşenler tarafından sağlanır. Bu nedenle gelişmiş malzemelere olan ihtiyaçların artmasına bağlı olarak, metal esaslı tozlar, günümüz koşullarında daha da önem kazanmaktadır (Ozan ve diğ., 2006).

Toz metalurjisi çok küçük parçacıkları birbirine bağlayarak parça haline getirme işlemidir. Daha geniş bir ifadeyle toz metalurjisi toz şeklindeki malzemelerin preslenmesi ve takiben yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile parça imalatını kapsamaktadır. İnce parçacık şeklindeki saf metaller, alaşımlar, karbon, seramik ve polimer malzemeler birbirleriyle karıştırılarak basınç altında şekillendirilebilirler. Daha sonra bu parçalar ana bileşenin (matris malzemesi) ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlenerek parçacıkların temas yüzeyleri arasında kuvvetli bir bağ oluşturulur ve böylece istenilen özellikler elde edilir. Toz metalurjisi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına son derece uygundur. Malzeme kaybı az olmakla birlikte belirli derecede gözenek (porozite) ve geçirgenlik elde edilir (Ekerer, 2007).

Toz metalurjisi, ana imalat yöntemleri olan döküm, plastik şekil verme, kaynak ve talaşlı imalata göre daha farklı bir imalat yöntemidir ve kendine has özellikleri vardır. Bu özellikler, üretimi zor olan alaşımları daha kolay üretme, karmaşık şekilli parçaların imalat kolaylığı, yoğunluk kontrolü ve ekonomiklik gibi özellikleridir. Toz metalurjisi ile üretim, genelde kalite ve maliyet açısından diğer yöntemlerle üretilemeyen parçaların üretiminde uygulama alanı bulur (Babayev ve diğ., 2005).

Hemen hemen tüm T/M parça üreticileri hala temel düşük teknoloji ve düşük yoğunluklu parça imalatını sürdürmektedir. Bu parçalardaki rekabet özellikle deniz aşırı pazarda muazzam boyutta devam etmektedir. Yüksek yoğunluk ve daha karmaşık şekilli parça geometrisi avantajları anahtar teknolojilerle birleşince T/M parça üreticilerinin eli güçlenecektir. Bu teknolojilerden ikisi yüksek sıcaklık sinterlemesi ve yağlayıcı/bağlayıcı madde teknolojisidir. Aslında bu teknolojiler birbirleriyle yakından ilgilidir. İlk

karıştırmadaki segregasyonlar T/M parçaların yüksek sıcaklık sinterleme şartlarını belirlemede başlıca öneme sahiptir (Schaberl v.d. 2002).

Bu yöntem döküm, talaşlı imalat ve plastik şekil verme, kaynak gibi imal usulleri arasında tarihsel olarak neredeyse en eski yöntem olan döküm yöntemi kadar eski; uygulama açısından ise bu yöntemlerden daha yenidir. (Avcı, 1993; Bishop, 1998).

Toz malzemeler içerisinde demir esaslı malzemeler önemli bir yere sahiptirler. Bu malzemelerin çeşitlerini artırmak ve uygulama alanlarını genişletmek için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden en önemlisi, toz metalürjisinde kullanılan malzemelere çeşitli alaşım elementlerinin ilavesi ile malzemelerin alaşımlandırılarak çeşitlilik sağlanmasıdır. Daha karmaşık bileşime ve özelliklere sahip olan parçaların üretimi; toz metalürjisinin presleme, pişirme (sinterleme) ve ısıl işlem operasyonlarından başka ek işlemeler de gerektirir.

Toz metalürjisi (TM), süreksiz takviyeli MMK'lerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Buna göre, matris ve takviye fazı tozları karıştırılarak istenilen şekildeki kalıba dökülür. Daha sonra tozların bağlanması için sıkıştırma kuvveti uygulanır. Tozların bağlanmasını kolaylaştırmak amacıyla, sıkıştırılmış tozlara ergime sıcaklığının altında ancak katı-faz difüzyonunun gerçekteşmesi için yeterli yüksek sıcaklıkta ısıl işlem uygulanır. Diğer bir seğenek, tozların karıştırılmasından sonra doğrudan sıcak pres uygulanmasıdır (HIP). Matris fazı olarak, bakır, nikel, alüminyum, kobalt, titanyum ve molibden alaşımları ile çelik yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Takviye fazı olarak ise SiC, grafit, Ni, Ti ve Mo parçacık veya kısa fiber seklinde kullanılmaktadır. Ergitme ve döküm işlemleri olmadığından diğer üretim yöntemlerine göre daha ucuz bir yöntemdir (Tekmen, 2006).

Toz metalürjisi, bir imalat yöntemi olmanın ötesinde aynı zamanda önemli bir malzeme ve yarı mamul üretim yöntemidir. Mendeleyevin periyodik cetvelinde metal olarak sayabileceğimiz 86 civarında elementten günümüzde yaklaşık 8000 kadar alaşım üretilebilmektedir. Halbuki bu 86 elementten ikili, üçlü, dörtlü, veya çoklu kombinasyonlar ile  $7,7 \times 10^{25}$  tür malzeme üretmek mümkündür. Bu ise düşünce sınırlarını da aşan çok önemli bir imkandır. Bu imkan toz metalürjisi yönteminde mekanik alaşımlama ile kullanılır hale gelmektedir (Avcı, 1993).

### 3.1. Tozların Özellikleri

Toz metal ürünlerin özellikleri toz tanelerinin şekli, boyutu, bileşimi, yağlayıcı tipi, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi çok sayıda faktöre bağlı olarak değişmektedir. Tozlara katılan yağlayıcılar, kalıp içerisindeki toz yüksekliği, sıkıştırma hızı ve gerilme dağılımı tozların sıkıştırılma işlemini önemli ölçüde etkilediğinden, üretilen parçanın özellikleri de bu etkenlere bağlıdır. Tozların sıkıştırılması ile elde edilen ham mukavemet tozların yerleşerek kenetlenmesi plastik deformasyon sonucu meydana gelir. Sıkıştırma sırasında başlangıçta gevşek bir şekilde bulunan tozlar, yeniden yerleşir ve sıkı bir yerleşme elde edilir. Uygulanan basınç daha da artarsa, taneler arasında temas alanı artar ve taneler daha fazla plastik deformasyona uğrarlar. Sonuç olarak ham mukavemet tozlar arasındaki temas alanına bağlı olarak değişir, temas alanı arttıkça mukavemet artar. Bu yöntemle elde edilen ürünlerin yoğunlukları geniş bir aralıkta değişmektedir. Genellikle mekanik özellikler yoğunluğa bağlı olarak, yoğunluk arttıkça, yükselme göstermektedir. Yüksek kapasiteli presler ve izostatik presleme yöntemi kullanılarak dövme ürünlerinin özelliklerine yakın, yüksek yoğunluğa sahip parçalar üretilebilir (Tunay ve diğ., 2002; Yılmaz ve diğ., 2005).

Metal tozlarının birçok özellikleri üretim tekniklerine göre belirlenmektedir. Bu sebeple T/M parçaların kullanım alanlarına göre değişik metotlarla üretilen tozlar kullanılmaktadır. Bazı durumlarda da farklı imal yöntemleriyle hazırlanan tozlar aynı tip bir parçanın imalinde eşdeğer olarak kullanılabilir. Örneğin elektrolitik ve indirgenmiş bakır tozlarının bronz yataklarda kullanılmasında olduğu gibi. Buna benzer istisnalar dışında genelde her uygulamada farklı metotla üretilen belli özellikteki tozlar kullanılır. Metal tozlarının özellikleri kimyasal ve fiziksel olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir (Kurt, 1992).

#### 3.1.1. Kimyasal Özellikler

Kimyasal özelliklerden tozun bileşim ve saflığı anlaşılmaktadır. Genellikle tozların içerisine üretim sırasında kimyasal indirgenme sonucu yabancı parçacıklar karışır. Yeterli indirgenmemiş toz taneciklerinde oksit kalıntılarına rastlanabileceği gibi tane sınırlarında da oksitler görülür. Tozların hava ile teması sonucu bir süre sonra tozlar oksitlenebilir. Tozların preslenmesi sırasında Cr, Zr, Al, Mg, Pb, Sn gibi metallerin kararlı oksitlerinin kalıp ve zımba yüzeylerinde olumsuz etkileri gözlenmiştir.

Tozların kimyasal özelliğinin tespiti için mevcut analiz yöntemleri uygulanabilir. Örneğin tozdaki oksijeni tespit edebilmek için belli ağırlıktaki kurutulmuş tozun yaklaşık bir saat süre ile hidrojen altında 550-1150 °C sıcaklıkta indirgenerek tartılması ile yapılır. (Kurt, 1992).

$$\% O_2 = \frac{A_i - A_s}{A_i} \times 100$$

Ai - As                      Burada;

Ai = İlk ağırlık  
As = Son ağırlık

Bu formül ancak indirgenebilen bileşikler için kullanılır, indirgenemeyen SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, BeO, TiO<sub>2</sub>, vs. gibi dengeli oksitler için başka deneyler yapılır.

Asitle çözünmeyen maddelerin tespiti için de yine belli ağırlıkta alınan toz numune asit içinde kaynatılarak çözünmeyen maddeler filtre edilerek bir fırında 980 °C civarında yakılarak son ağırlığın ilk ağırlığa bölümünün yüzle çarpımı; asitte çözünemeyen maddenin % miktarını verir. MgO, CuO, MnO<sub>2</sub>, vs. HCl asitle çözünemediklerinden, çözücü asit olarak HCl asit kullanıldığında bulunan değere saydığımız oksitler dahil değildir.

### 3.1.2. Fiziksel Özellikler

Tozların fiziksel özelliklerini; parçacık boyutu, parçacık şekli, yapısı, özgül yüzey, görünür yoğunluk ve akış hızı gibi özellikler belirler. Presleme ve sinterleme özellikleri de bu özelliklerle yakından ilgilidir.

### 3.1.3. Parçacık Boyutu

Tane boyutu bilgisi tozları ele alan herkes için gereklidir. Eğer parçacık küresel değil ise tek bir parçacık boyutunu belirlemek kolay bir iş değildir. Tek bir parçacık boyutunu saptamak yoğunlukla parçacığın yaklaşık geometrik yapısının silüetinden yola çıkılarak varsayıma dayanan çap özelliğinden yararlanılır (Kousaka, 1997)

Toz parçacıklarının eleklerle veya diğer metotlarla tespit edilen boyutudur. Tozların tamamının aynı boyutta olduğu söylenemez, ancak ortalama tane boyutundan söz edilebilir. Toz şekli; parçacık şekli karmaşık oldukça parçacık boyutu ölçüm teknikleri de değişir. Şekil 1' de görüldüğü gibi küresel bir toz için bir tek çap ölçmek yeterli iken, pul şeklindeki toz parçacıkların pul kalınlığı ile düzlem yönündeki boyunun da ölçülmesi gerekir.



Şekil 1. Küresel ve pul şeklindeki parçacıklar

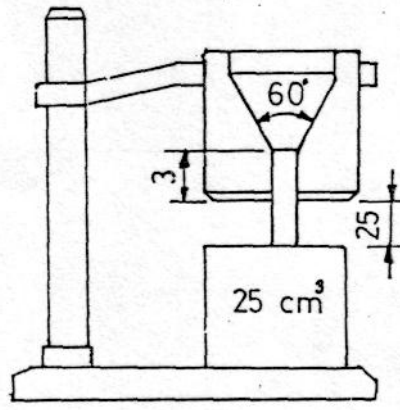
### 3.1.3. Parçacık Şekli

Parçacıkların şekli; tozların akış, görünür yoğunluk sıkıştırılabilirlik, ham mukavemet, gerginlik, sinterlenebilirlik gibi özelliklerini etkileyen önemli bir etkidir. (Kurt, 1992). Toz metal parçalardaki gözenek miktarı, dağılımı, tipi, büyüklüğü ve şekli mekanik özelliklere etki etmektedir. Gözenekliliğin miktarı düştükçe toz metal parçaların mekanik özellikleri iyileşmektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş gözenek miktarı fazla olan makine parçalarının toklukları ve mukavemetleri yeteri değerde olmamaktadır. Bu malzemelerin mukavemetleri dökme demirlerin mukavemeti ile aynı değer mertebesinde olmaktadır. Bu sebeple makine parçası olarak kullanıldıklarında çelikler kadar dayanıklılığa sahip değildirler (Douib ve diğ., 1989; Tunay ve diğ., 2002).

### 3.1.4. Teorik ve Görünür Yoğunluk

Gözeneklilik oranı %18-60 arasında olan toz metal parçalar *düşük yoğunluklu* (çok gözenekli) parçalar olarak tanımlanır. %30-60 gözeneklikteki parçalardan genellikle metalik filtreler üretilir. Saf demir, paslanmaz çelik veya bronz esaslı imal edilebilen bu filtreler, hava, su, yağ veya yakıt devrelerinde kullanılır. %18-50 gözeneklikteki parçalar ise genellikle uygun yağ emdirilerek kendinden yağlamalı yataklar olarak kullanılırlar (Meriç ve diğ., 2005).

Hall akış aparatı ile ölçülen görünür yoğunluk; parçacık şekli, boyutu, yüzey alanı ve parçacıkların düzeni gibi faktörlerle yakından ilgilidir. Hall akış aparatı Şekil 2' de görüldüğü gibidir. Aparatın standart yükseklikteki hunisinden 25 cm hacmindeki kabına toz doldurulur. Toz huniden akarak altındaki kabı doldurur. Kap dolunca toz ağırlığı tartılarak yoğunluk bulunur. Görünür yoğunluk, belirli şartlar altında dökülerek elde edilen tozun yoğunluğudur. Başka bir ifadeyle görünür yoğunluk sıkıştırılmamış tozun ağırlığıdır (Ulutaş, 2004).



**Şekil 2 Hall akış aparatı**

Teorik yoğunluk ise ergitilerek dökülmüş malzemenin yoğunluğudur. Metal tozlarından parça üretimi sırasında, tozlar titreşime maruz kaldıkları için tozlara ait vurgu yoğunluğunun bilinmesinde fayda vardır. Tozların vurgu yoğunluğunun bulunması hacim ölçekli bir kap içinde yapılır. Kaba toz doldurulur ve sonra bu kap herhangi bir titreşimli cihazla titreştirilir veya kaba dışarıdan vurularak tozun kap içinde titreşim sonucu sıkışması sağlanır. Daha sonrada son durumdaki tozun kap içindeki gösterge karşılığı hacmi okunarak toz ağırlığı tartılır. Tartılan toz kütle, okunan hacme bölünerek tozun vurgu yoğunluğu tespit edilir.

Yüksek yoğunluklu parçalarda (az gözenekli) gözenek oranı %10'dan azdır ve dayanımı yüksek olan parçalardır. Dişliler, kavramalar, kamalar, kilit parçaları gibi çok çeşitli makine parçaları bu malzemelerden imal edilebilmektedir (German, 1997).

### **3.1.5. Tozların Akış Hızı**

Toz metal parça üreten firmalarda, üretim sırasında tozların kolay akması önem arz eder. Çünkü üretimin hızlı ve seri olabilmesi için tozların kaplardan kalıplara, dolayısıyla kalıplar içinde kolay akması gerekir. Tozların akış hızı zamanı da kısaltacağından görünür yoğunlukla akış hızı arasında da bir ilişki mevcuttur. Görünür yoğunluğu yüksek tozlar kısa akış süresine sahiptir.

Tozların akış hızı, yine Hall akış aparatından faydalanılarak bulunabilir. Bunun için; 50 gr toz 100 °C bir saat süreyle kurutulduktan sonra Hall akış aparatına doldurulur ve akış süresi zaman olarak tespit edilir. Kütlenin (gr), zamana (sn) bölümü toza ait akış hızını verir. İyi akış özelliğine sahip olmayan tozlar ise şev açısından faydalanılarak

bulunur. Şev açısı; tozun belirli şartlar altında yatay bir yüzey üzerine serbestçe döküldüğünde oluşturduğu yığının taban açısıdır.

### **3.1.6. Tozların Yanıcılık ve Zehirleyici Özelliği**

Her şeyin üzerinde gelen insan sağlığı açısından tozlara ait bu özelliklerin dikkate alınması gerekir. Birçok toz çeşidi düşük denilebilecek sıcaklıkta, bazıları da oda sıcaklığında oksijenle birleşerek ateşlenebilirler. Ateşlenme yönüyle 50 mikronun altındaki parçacıkları zararlı, 1 mikronun altındaki parçacıkların özellikle tehlikeli olduğu söylenebilir. İnsan vücuduna solunum ve sindirim yolu ile alınan tozların vücutta birikmesi neticesi tehlikeli rahatsızlıklar ortaya çıkarmaktadır. Radyoaktiflik gösteren tozlar ise özellikle tehlikelidir. Bu tehlikelere maruz kalmamak için gerekli emniyet tedbirleri alınmalı havalandırma, temizleme, sistemleri mükemmel olmalı, gerek duyuluyorsa emniyet maskeleri ile çalışılmalıdır (Kurt, 1992).

Örneğin berilyumun zehirliliği nedeni ile en uç derecede güvenlik tedbiri almak gerekir. Prosedür ve ekipmanlar metalografik hazırlık sırasında üretilen zararlı toz parçacıklarını hesaba katarak tasarlanmalıdır (Marder ve diğ., 1992). Berilyumun gazı tutulup alınmaz ise çok tehlikeli olur. Berilyum kaybını minimize etmek amacı ile çok az bir oksitleyici atmosfer altında çok dikkatli bir şekilde çalışılmalıdır (Schmidt ve diğ., 1992).

### **3.2. Toz Üretim Yöntemleri**

Hemen hemen bütün malzemeler toz haline getirilebilir, ancak tozları üretmek için seçilen yöntemler malzeme özelliklerine göre değişir. Metal malzeme üretimi açısından, ortalama boyutları birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar parçalanmış partiküller toz olarak tanımlanır. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden dentritik şekle kadar değişmektedir. Üretim yöntemine bağlı olarak tozun yüzey durumu da farklılık göstermektedir. Birçok metal tozu üretim metodu vardır. Bunların içerisinde en çok kullanılanları mekaniksel, kimyasal, elektrolitik ve atomizasyon teknikleridir (Avcı, 1993). Toz üretimi teknikleri: atomizasyon, doğrudan indirgeme, öğütme, elektroliz ve sıvı veya gazdan çökeltme olarak sınıflandırılabilir (Sarıtış, 1994).

### 3.2.1. Atomizasyon

Atomizasyon yaygın olarak kullanılan bir metal tozu üretim yöntemidir. Günümüzde atomizasyon yöntemiyle metal tozu üretimi önemli yere sahiptir. İki akışkan atomizasyonu olarak da adlandırılan su ve gaz atomizasyonu ucuz ve yüksek kapasitede toz üretimi için tercih edilmektedir (Onur ve Arslan, 1996). Bu yöntemin üretim tekniği; bir sıvı metalin pota dibindeki bir delikten akması sırasında, üzerine basınçlı gaz veya sıvı gönderilmesi ile ergimiş metalin çok ince parçalara ayrılarak katılaştırılmasıdır (Kurgan, 2004). Günümüzde üretilen metal tozlarının % 80 'i atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Sıvı metalin su jeti ile parçalanması “suyla atomizasyon” gaz jeti ile parçalanması “gazla atomizasyon” ve merkezkaç kuvvetle parçalanması “santrifüj atomizasyon” olarak bilinir. Bunların içerisinde su atomizasyonu en yaygın olarak kullanılan yöntemdir.

Dünyada üretilen tozların % 80'den fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Diğer üretim tekniklerine göre; şekli, tane büyüklüğü ve dağılımın kontrolü çok kolaydır. Özellikle alaşım tozlarının üretimi için çok uygundur. Çünkü en iyi homojenliği bu yöntem sağlar. Atomizasyon yöntemi ile toz üretmede;

- 1) Su atomizasyonu
- 2) Gaz atomizasyonu
- 3) Döner disk atomizasyonu
- 4) Döner elektrot atomizasyonu gibi değişik teknikler kullanılır (Boz, 1999).

### 3.2.2. Doğrudan İndirgeme

1965 yılına kadar kimyasal indirgeme yöntemi en çok metal tozu üretme yöntemi idi. Demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobaltın oksitlerinden indirgeme yoluyla tozlarının üretilmesi çok bilinen endüstriyel bir yöntemdir. Bu yöntemde toz haline öğütülen oksitler indirgeyici atmosfer altında uygun sıcaklıklara ısıtılarak indirgenirler. En ucuz indirgeyici ortam karbondur, ancak hidrojen de bu amaçla kullanılmaktadır. 1900 yılında İsviçre’de geliştirilen Höganäs metoduna göre; magnetit ( $Fe_3O_4$ ), kok, kireç taşı karışımı 1260 °Cde 68 saat bekletilerek demir tozu üretilmektedir. Elde edilen demir tozları bu sıcaklıkta birbirlerine kaynak oluşturarak kekleşirler. Ancak, soğutulduktan sonra öğütülerek istenilen toz büyüklüğüne kırılmaları kolaydır. Tozlar sünger görünüşünde olduklarından “Sünger Demir” olarak bilinirler (Sarıtaş, 1995).

### 3.2.3. Öğütme

Malzemelerin öğütülmesi, toz metalurjisi sanayisinde önemli ve ekonomik bir metottur. Malzemeler sert ve kırılgan veya yumuşak ve sünek olabilir. Mekanik öğütme, oksit tozlarının üretiminde en çok kullanılan yöntemdir. İndirgenmiş atomize veya elektrolitik tozlar, boyut küçültmesi için öğütülmektedir. Toz metal sanayinde öğütme ile boyut küçültülebilir, şekil değiştirilebilir, katı hal alaşımlama yapılabilir (mekanik alaşımlama) ve çeşitli tozlar karıştırılabilir (Sarıtış, 1996).

Öğütme en çok bilyeli değirmenlerde yapılmaktadır. Öğütülecek malzeme, içinde büyük çaplı sert ve aşınmaya dirençli bilyelerin bulunduğu kaba, önceden iri kırılmış olarak yerleştirilir. Kap dönerek veya titreştirilerek bilyeler harekete geçirilir. Bilyelerin çarpışması sırasında tozların ne hal alacağı parçacığın özelliğine bağlıdır. Yüksek enerjili bir öğütme işlemi olan 1960'larda Benjamin ve arkadaşları tarafından geliştirilen mekanik alaşımlama yöntemiyle, kontrollü mikroyapıya sahip ve ince tane boyutlu tozlardan oluşan kompozit metal tozlarının üretimi yaygın olarak yapılmaktadır (Ünlü ve diğ., 2006).

### 3.2.4. Elektrokimyasal Yöntemler

Bu yöntemlerde metal tozu üretimi, sulu çözeltiden veya sıvı tuz banyosundan metallerin elektroliz yöntemi ile ayrıştırılmasıyla yapılmaktadır. Sulu solüsyonlarının elektrolizi özellikle Cu, Fe, Ni, Co, Zn, S ve Pb tozlarının üretilmesi için uygundur. Bu yöntemle tozlar doğrudan veya elektrotta birikmiş gevrek kütle öğütülmek suretiyle dolaylı olarak elde edilebilir. Prosesi etkileyen ana parametreler; ortamdaki metal iyonlarının konsantrasyonu, elektrotun iletkenliği, sıcaklık, gerilim değeri ve akım yoğunluğu, sıvı banyonun kinetiği ve tane büyümesini engellemeye yönelik olarak çekirdeklenme için parçacık ilavesi sıralanabilir. Bu yöntemle yüksek safiyette gözenekli tozlar, değişik toz boyutlarında imal edilebilmektedir. Çok popüler olmamakla birlikte bakırda olduğu üzere benzer şekilde demir tozları  $\text{FeSO}_4$  ve  $\text{FeCl}_2$  solüsyonlarından üretilmektedir. Elektrolitik yöntemle üretilen tozların sıkıştırılabilirlikleri ve presleme sonrası dayanımları yüksek olmaktadır (Kurt, 2006).

### 3.2.5. Sıvı veya Gazdan Çökeltme

Hidro-metalurji olarak da bilinen bu yöntemde, çökeltme bir sıvı veya tuz çözeltisinden yapılmaktadır. Bu yöntemde, çözeltiden önce bir hidroksit çökeltmekte,

daha sonra bu hidroksit ısıtılarak parçalanmaktadır. Günümüzde bakır, nikel, kobalt tozları hidro-metalurji yöntemiyle üretilir (Ünlü ve ark. 2006). Kimyasal yöntemlerle çökelti fazında elde edilen tozların tipik boyutları 1 µm dolayında olup yüksek derecede safiyete sahiptirler. Bu yöntemle, kobalt, nikel veya demir ile kaplanmış torya (ThO<sub>2</sub>), titanya (TiO<sub>2</sub>) ve volfram karbür (WC) ve süper alaşım malzemeleri üretilir (Boz, 1999).

Gaz bileşiklerin oluşturduğu kimyasal tepkimeler sonucu reaktif metallere ve nano ölçekli partiküllerden tozlar üretilir. Gaz esaslı tepkimelerin en büyük avantajı, tepkime sırasında toz üretiminde ergitmenin ortadan kalkması sonucu potanın kirlenmemesi ve yeniden kullanılabilir olmasıdır. Bu tür üretim sürecine en iyi örnek molibden trioksit'in saf hidrojen ile tepkimeye girerek metalik molibden tozunun üretimidir. Bu yöntemle, vanadyum, niyobyum, volfram, hafniyum, gümüş, nikel ve zirkonyum metallerinin klorürleri, florürleri ve hatta oksitleri işleme sokularak çok küçük tane boyutlarında % 99.6 saflığındadır (Roll, 1984).

### **3.3. Toz Metal Parça Üretim Süreci**

#### **3.3.1. Tozların Karıştırılması**

Tozların karıştırılması çift konili karıştırıcılarda yapılmaktadır. Karıştırma üniform bir toz elde etmek, amacı ile belli sürede; tane boyu ve şekline göre birikimleri önleme amacı ile yapılmaktadır. Karıştırma süresinin uzun tutulması; toz taneciklerinin kırılarak küreselleşmesine neden olabileceğinden sıkıştırma özelliğini azaltacaktır

#### **3.3.2. Yağlayıcılar**

Şekillendirmede meydana gelen enerji kayıplarını gidermek veya azaltmak amacı ile tozlara belli yüzdelerde yağlayıcılar ilave edilmektedir. Tozlara yağlayıcı olarak toz grafit, MoS<sub>2</sub>, çinko stearat, stearik asit, Lityum, stearat, acrawax katılırlar, Yağlayıcılardan stearik asit ve metal stearitler ergime noktası düşük organik bileşiklerdir. Yağlayıcıların yoğunlukları düşük olduğundan ağırlıkça az miktar ilave edildiğinde hacim olarak büyük yer işgal eder. Grafit tozu metal tozlara yağlayıcı olarak %1-1.5 miktarında katılır ve iyi neticeler verir.

Şekillendirme basıncı ve buna bağlı olarak yoğunluk arttıkça sıyırma basıncı da o nispette artar. Sıyırma basıncı denilen şekillendirilmiş parçanın kalıptan çıkarılmasını gerektiren basınç yağlayıcının Özelliğine bağlıdır. Sıyırma basıncını düşük tutan yağlayıcı

iyi bir yağlayıcıdır. Kalıp malzemesinin bileşimi, sertliği ve yüzey özellikleri de sıyırma basıncını olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilir.

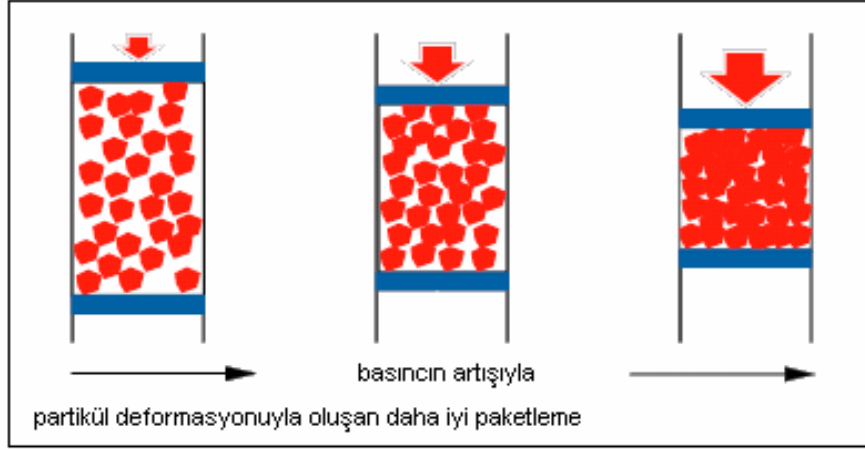
Yağlayıcılar metal tozlarına katıldığında homojen bir karışım temin etmek için yağlayıcı ile tozun yeterli derecede karıştırılması gerekir. Az karıştırma yağlayıcıdan beklenen Özelliği vermediği gibi; fazla karıştırma ile de düşük ergime derecesine sahip yağlayıcının ısınarak yapışkan bir hal almasına yol açılabilir. Bütün bu olumsuzluklar için karıştırma süresi önem arz eder.

Metal tozlara ilave edilen yağlayıcılar yapıştırıcı vazifesi görüp parça mukavemetini artırdığı gibi bazı yağlayıcılarda (ergime derecesi düşük olanlar) sinterleme işlemi sırasında yanarak yapıda gözenekler oluşturabileceğinden sinterleme sonrası mukavemet ve yoğunluk artması gerektiği halde bazı durumlarda azalması sözü edilen yağlayıcının yanmasından oluştuğu kabul edilebilir(Kurt, 1992).

### **3.3.3. Metal Tozlarının Sıkıştırılması**

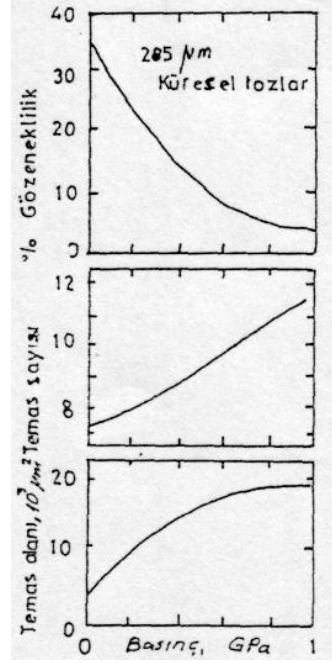
Yağlayıcı ile karıştırılan metal tozları üretilecek parçanın şekline ve ölçüsüne göre hazırlanmış kalıplar içinde preslerle sıkıştırılırlar. Sıkıştırma- metal tozlarına üretimi istenen parçanın şeklini vermek, istenen oranda gözeneklilik sağlamak gibi amaçlar için yapılır. Tozların sıkıştırılın asında kullanılan kalıp ve zimbalar kusursuz olmalıdır. Kalıp ve maça pimi tungsten karbürde alt ve üst zimbalar yüksek kaliteli takım çeliğinden yapılmalıdır.

Şekillendirme sırasında hem toza şekil vermek ve hem de deha yüksek yoğunluk elde etmek için dışardan bir basınç uygulamak gerekir. Şekil 3' de gösterilen toz sıkıştırmanın şematığı sıkıştırma basamaklarını tanımlamak için bir fikir vermektedir. Basınç uygulamada ilk geçişme gevşek tanecik düzeninden daha sıkı bir paketlenme yönündedir. Uygulanan basıncın artmasıyla tanecikler arası nokta teması bozulur. (Kurt, 1992).



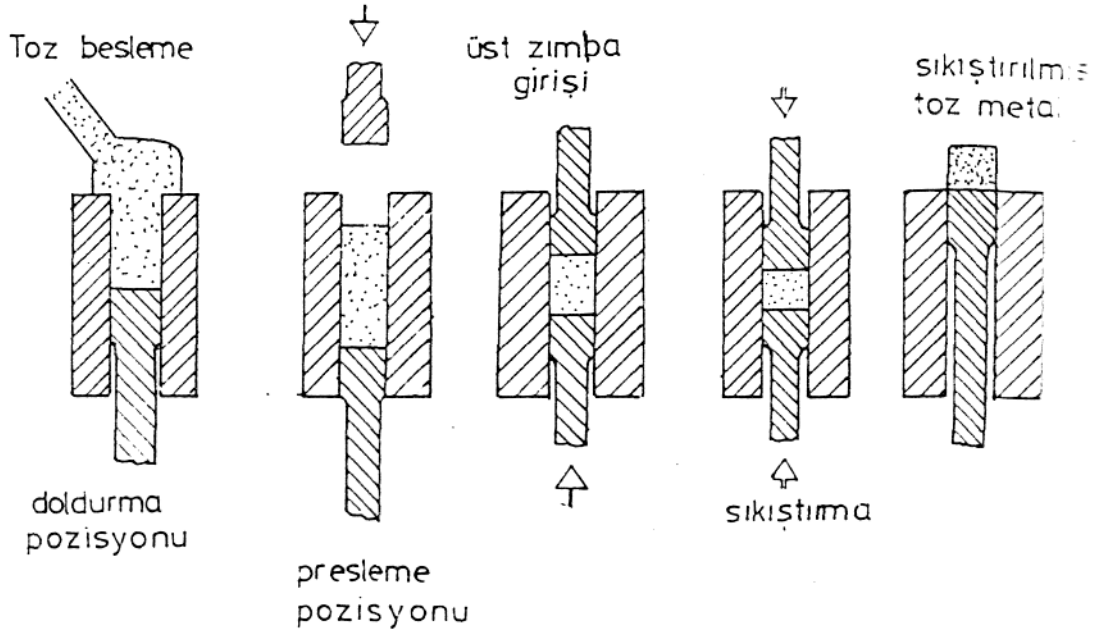
**Şekil 3. Toz metal sıkıştırma safhaları görünüşü**

Başlangıçta toz, yaklaşık olarak görünür yoğunluğa eşit bir yoğunluğa sahiptir. Bu durumda tanecikler arasında boşluklar mevcuttur. Uygulanan basıncın artmasıyla gözeneklilik azalır. Şekil 4’de küresel bronz tozuna ait basınç gözeneklilik ilişkisi ile tanecikler arası temas alanı ile temas sayısı da görülmektedir. Başlangıç olarak temas sayıları; tanecik yeniden düzenlenip koyma meydana gelince büyür. Artan basınçlarda plastik deformasyon sayesinde temas genişlemesi ile yoğunluk artar. Böylece basınç, temaslarda bölgeselleşmiş deformasyona sebep olur. Tanecikler arası mesafe azaldığından yeni temaslara oluşma imkanı çıkar ve gerilme sertleşmesi sağlar. Deformasyon esnasında tanecikler arası temaslarda soğuk kaynak katı içindeki kuvvetin artmasına katkıda bulunur. Preslemeden sonraki mukavemet ham mukavemet olarak adlandırılır. Sıkıştırma basıncı arttıkça plastik deformasyona uğrayan tanecik miktarı artar. Yeterli sıkıştırma basıncında gözeneklilik miktarı azaldığından bütün tanecik sertleştirilmiş (iç gerilme) hale geçer.



**Şekil 4. Küresel bronz tozunun kalıpta sıkıştırılması için bilgi**

En üst şekil, basınçla gözenekliliğin azaldığını, ortadaki yeniden paketlenen tanecik başına ortalama temas sayısını en alttaki de temas alanını gösterir.



**Şekil 5. Toz sıkıştırma esnasında işlem sırası**

Genellikle toz sıkıştırma, Şekil 5'de görülen safhalarda sert kalıp içinde yapılır. Çoğu zaman sıkıştırma, hem üst, hem de alt zımbalar kullanılarak yapılır. Üst zımba, tozu doldurma esnasında geri çekilir toz girişi sırasında alt zımba pozisyonuna dolu pozisyon

denir. Bu önceden belirlenmiş toz miktarının dolmasına müsaade eder. Toz kalıp içinde bir besleme ile titreştirilerek akıtılır. Doldurmadan sonra alt zımba presleme pozisyonuna düşer ve üst zımba kalıp içine gömülür. Her iki zımba arasında toz sıkıştırılır. İstenen basınç uygulandıktan sonra üst zımba kaldırılır ve alt zımba sıkıştırılmış parçayı çıkarmak için yukarı hareket eder. İşlem böylece tekrarlanarak devam eder.

### 3.3.3.1 Sıkıştırma Teorisi

Şekillendirme sırasında kütle hareketi tozların daha yoğun bir hal almasına neden olur. Sıkışma genellikle uygulanan sıkıştırma kuvveti doğrultusunda meydana gelirken sıkışma sırasında birbiri önüne yığılan tozların zorlamasıyla kalıp yanlarına doğru da bir hareket meydana gelir. Düşük yoğunluklu tozlarda tanecikler arası temas azdır. Bu nedenle taneciklerin hareket edeceği hacim fazla olacağından toz kütle hareketi daha kolay olur.

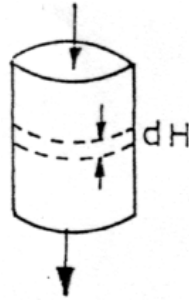
Sıkıştırma sırasında taneciklerin plastik deformasyona uğraması ile şekillendirilen parçadaki gözenek miktarı azalır, yoğunluk artışı görülür. Şekillendirmede değişik basınçlarda preslenen parçaların mikrosertlik miktarlarında artan değerler plastik deformasyondan kaynaklanan sertleşmenin bir sonucudur. Yoğunluktaki bu artış hava ile dolu boşlukların yerini sıkıştırma sonucu metalin almasından ileri gelir. Boşlukların yerini tozların alması da ancak havanın yapıyı terk etmesi ile mümkündür. Artan sıkıştırma basınçlarında havanın bir kısmı yapıyı terk edemeyerek gözenekler arasında hapis olur. Gözenekler arasında hapis edilen hava yüksek sıkıştırma basınçlarında malzemenin iç yapılarında hasara yol açar. Bu nedenle yoğunluk arttıkça mukavemetinde artması gerekirken %86'nın üzerindeki yoğunluklarda çekme mukavemetinin azalmasını Berristord havanın izole gözeneklerde hapsedilmesiyle izah etmiştir

Toz sıkıştırmada, önemli bir problem toz ile kalıp duvarı sürtünmesidir. Bu sürtünme uygulanan basıncın tozun kalıp içindeki derinlik mesafesiyle azalmasına sebep olur. Şekil 6'da çapı D ve yüksekliği H olan silindirik bir katı toz metalin sıkıştırılmasında yüksekliğin ince bir kesitini incelemek elemanın tepedeki P basıncı ile elemanın tabanı içine iletilen Pb basıncının sürtünmeye karşı etki eden dikey kuvvet ile farklılaşacağını gösterir. Kuvvetler dengesi aşağıdaki gibi ifade edilir (Kurt, 1992).

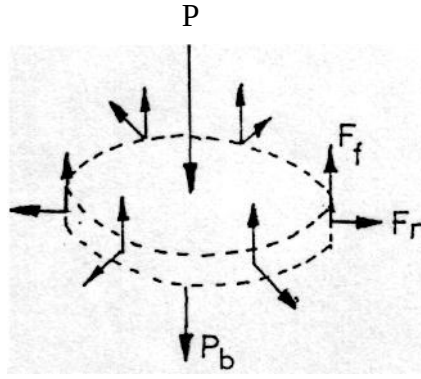
$$\sum F = 0 = A (P - P_b) + U.F_n$$

Burada;  $F_n$ , normal (dikey) kuvvettir,  $U$ , ise toz ve kalıp duvarı arasındaki sürtünme katsayısı ve  $A$ , kesit alanıdır.

Uygulanan basınç



İletilen basınç



**Şekil 6. Kalıp duvarındaki sürtünme kuvvetlerinden doğan uygulanan ve iletilen basınçlar arasındaki fark, sıkıştırma esnasında kuvvetleri dengeler**

#### 3.3.3.2 Sıkıştırma Yöntemleri

Tozların sıkıştırılmasında uygulanan şekillendirme metotları şu şekilde sınıflandırılabilir.

Kalıpta sıkıştırma

İzostatik sıkıştırma

Yüksek enerjili sıkıştırma

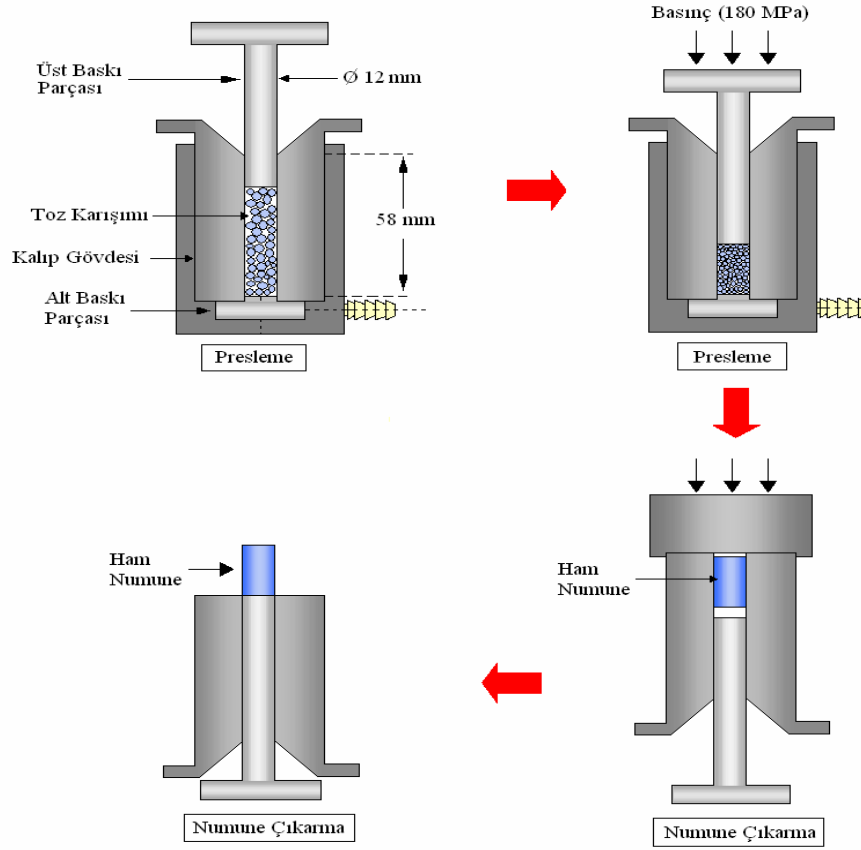
Ekstrüzyonla sıkıştırma

Titreşimle sıkıştırma

#### 3.3.4. Kalıpta Şekillendirme

Kalıpta şekillendirme en çok kullanılan bir şekillendirme metodudur. Bu şekillendirmede basınç olarak 10 MPa (10 tsi) ile 150-200 (tsi) arasında basınç kullanılır. Tespit edilen basınç şekillendirilecek kalıp içindeki toz kütlesinin tek ve çift tarafından dikey doğrultuda uygulanır. Basınç uygulama şekline göre;

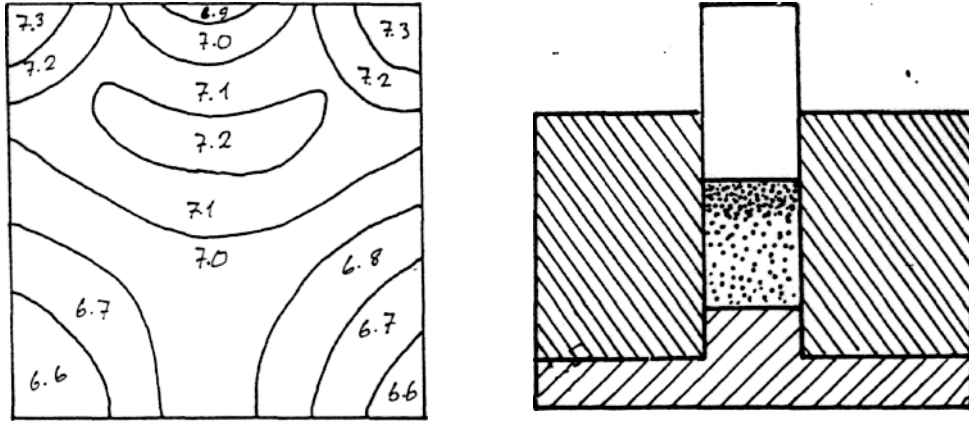
- A. Tek yönlü sıkıştırma
- B. Çift yönlü sıkıştırma diye ikiye ayrılır



**Şekil 7. Kalıpta sıkıştırma yöntemi şematik gösterimi**

#### 3.3.4.1 Tek Yönlü Sıkıştırma

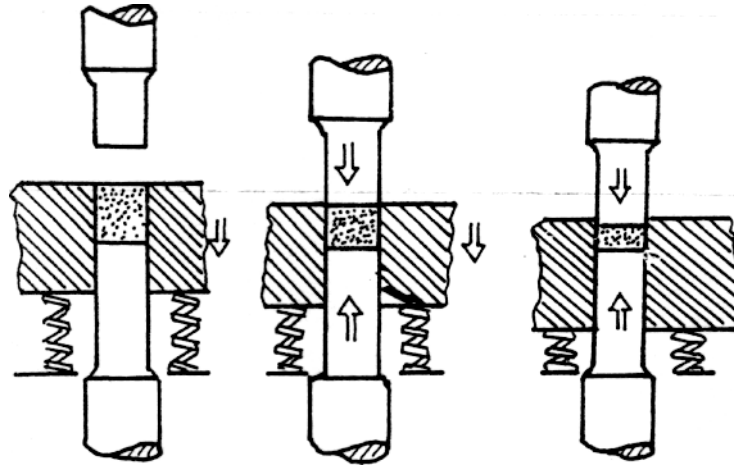
Bu sıkıştırma yönteminde pres tek yönlü kuvvet uygular. Üst zımba kalıp boşluğuna girerek sıkıştırılacak tozu sabit olan alt zımbaya kalıp boşluğunda sıkıştırır. Tek yönlü sıkıştırmada tozlar arası ve tozlarla kalıp yüzeyi arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına neden olur. Uygulanan sıkıştırma kuvveti kalıp boyunca düzenli olarak uygulanmadığında sıkıştırılan parçadaki yoğunluk homojen bir dağılım göstermemektedir. Yoğunluk hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha yoğun, sabit zımbaya doğru giderek azalmaktadır Şekil 8.



Şekil 8. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı

### 3.3.4.2. Çift Yönlü Sıkıştırma

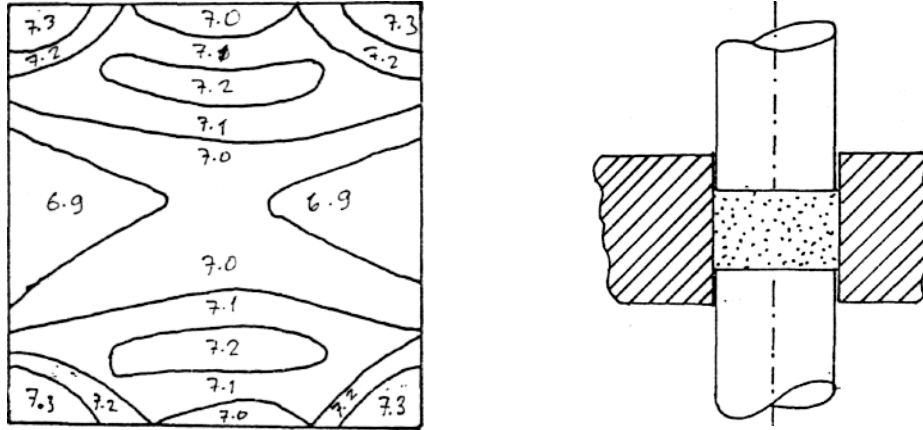
Çift yönlü sıkıştırmada toz alt ve üst zımba tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Alt ve üst zımba tarafından eşit veya farklı basınç uygulanabilir. Çift yönlü sıkıştırma yönteminde üst zımbanın toza uyguladığı basınç sonucu kalıp yüzeyleri ile toz arasındaki sürtünme kuvveti kalıbı destekleyen (yay vb) kuvvetleri geçtiğinde kalıp aşağı hareket ederek sanki alt zımba yukarı hareket ediyormuş görünümü verir. Gerekli basınç uygulanıp sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra iş parçası alt zımbanın yukarı hareketi ile kalıptan çıkarılır. Şekil 9.



Şekil 9. Çift yönlü sıkıştırma

Çift yönlü sıkıştırmada sıkıştırılan parçaların yoğunluk dağılımı, tek yönlü sıkıştırma yöntemi ile elde edilen parçaların yoğunluk dağılımından daha homojendir.

Şekil 10'da çift yönlü sıkıştırma ile preslenmiş toz metalin yoğunluk dağılımı görülmektedir.



**Şekil 10. Çift yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı**

#### **3.3.4.3 İzostatik Sıkıştırma**

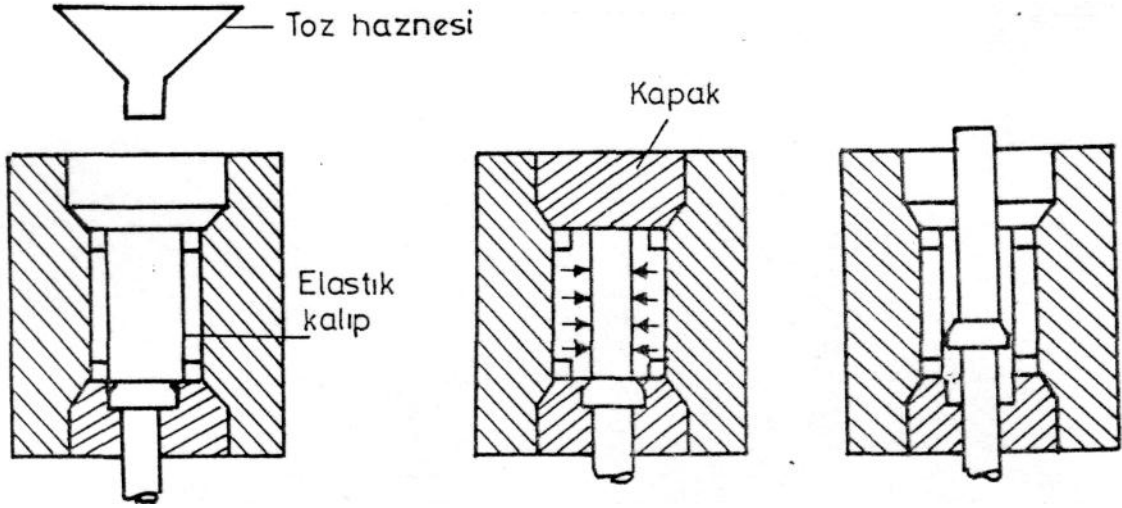
Toz metal parçalarda homojen yoğunluk elde etmek ancak izostatik sıkıştırma ile mümkündür. Boy/çap oranı fazla olan parçalar bu yöntemle sıkıştırılabilirler. Sıkıştırma basıncı bir gaz/ sıvı yardımıyla parçaya her yönden ve eşit olarak uygulanır. Akışkanların bilinen özelliğinden faydalanılarak herhangi bir noktaya uygulanan basınç bütün yönlerde aynı değerde etki yapar. Bundan dolayı sıkıştırılan parçanın yoğunluğu her noktada aynı değerde olur. İzostatik sıkıştırma iki şekilde yapılır.

Kuru kalıp

Yaş kalıp

##### **a) Kuru Kalıp**

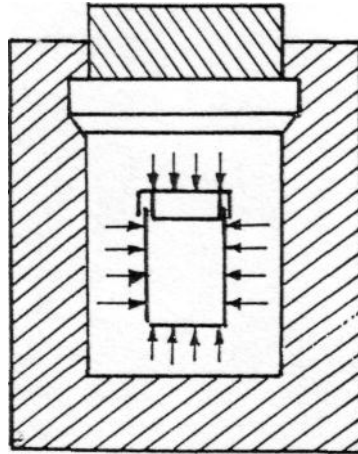
Elastik toz kalıbı değişmez. Bir kalıpla birden çok parça sıkıştırılabilir. Sıkıştırma kalıbı basınç hücresine yerleştirilerek metal tozu kalıba doldurulur. Sonra kalıp kapağı kapatılarak gerekli sıkıştırma basıncı uygulanarak sıkıştırma tamamlanır. Sonra basınç düşürülerek kalıbın kapağı açılır ve parça kalıptan alt zımbanın yukarı hareketi ile çıkarılır.



Şekil 11. Kuru kalıp ile izostatik sıkıştırma

#### b) Yaş Kalıp

Metal tozları kalıp görevi yapan elastik bir kaba doldurularak sıkıca kapatılır. Kalıp basınç hücresinin içine konarak basınç uygulanır. Gerekli basınç uygulandıktan sonra basınç düşürülerek kalıp çıkarılır. Sıkışan toz metal parçanın üzerinden kalıp sıyrılarak çıkarılır. Yaş kalıplamada kalıp bir defa kullanılır, bir daha kullanılmaz.



Şekil 12. Yaş kalıp ile izostatik sıkıştırma

#### 3.3.4.5. Yüksek Enerjili Sıkıştırma (HERF)

Pinomatik, mekanik ve patlayıcı gibi sıkıştırmada basınç uygulama teknikleri geliştirilmiştir. Bu yöntem çok yüksek bir basıncın kısa sürede uygulandığı bir yöntemdir.

Basınç süresi 50  $\mu$ s ile 50 ms arasındadır. Bu kısa basınç süresinde malzemeye 10 -15x10 psi değerinde basınç uygulanır.

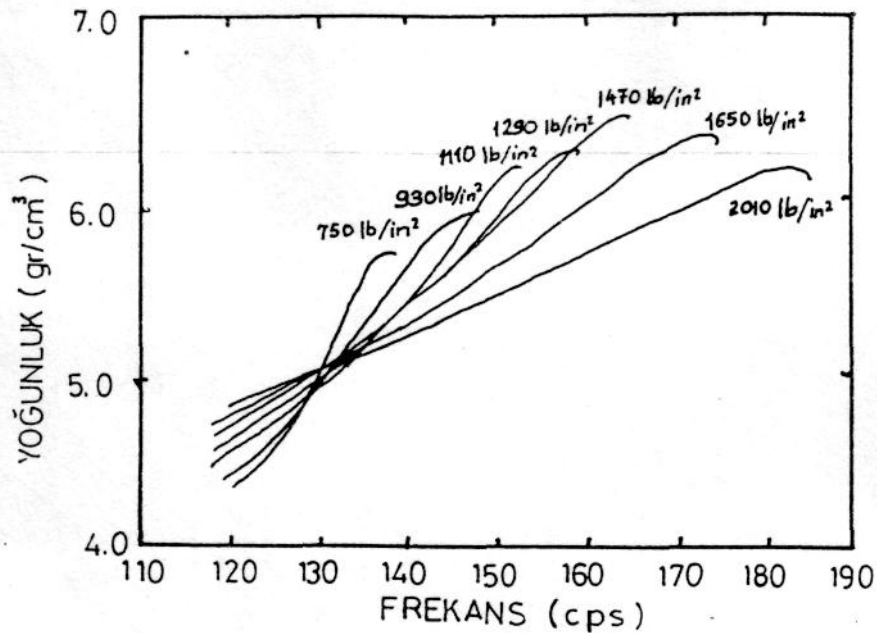
#### 3.3.4.6. Ekstrüzyon Yöntemi ile Sıkıştırma

Metal tozlarının şekillendirilmesinde sınırlı ölçüde kullanılan ekstrüzyon yönteminde tozlar kapalı bir kap içine doldurulduktan sonra kabın içerisindeki havası vakumla alınır. Kab içerisinde tozlar ısıtılarak ekstrüzyon yoluyla parça üretimi gerçekleştirilir. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen parçalarda yüksek yoğunluk elde edilir. Ekstrüzyon öncesi tozlar ısıtılmış ise ayrıca sin ter le meye gerek yoktur. Ekstrüzyon genellikle daha önce izostatik presleme ile yoğunlaştırılmış metal tozlarına uygulanır. Bu yöntem en çok takım çeliklerinin üretiminde kullanılır.

#### 3.3.4.7. Titreşimle Sıkıştırma

Titreşimle sıkıştırma yönteminde sert bir kalıp içerisindeki toza basınç uygulanırken bir yandan da titreştirilir. Bu titreşimler yardımıyla daha az basınçla kalıpta şekillendirmeye eşdeğer bir yoğunluk elde edilir.

Titreşim uygulamada frekans ve genlik Önemli iki değişkendir. Herhangi bir basınca karşılık en uygun bir genlik ve frekans vardır. Şekil 13' de bakır için yoğunluğun basınç ve frekansa göre değişimi görülmektedir .



Şekil 13. Değişen frekanslarda (genlik  $6.3 \times 10$  in) basıncın bakır yoğunluğuna etkisi.

### **3.3.5. Sıkıştırma Hataları**

Sıkıştırılmış toz metal parçaların yapısındaki hatalar parça mukavemetini hata nispetinde azaltır. Sıkıştırma sırasında genellikle iki tür hata ile karşılaşılır. Bunlardan birisi sıkıştırma sırasında parçadaki düzlemsel çatlaklar şeklinde kendini gösteren ve katmanlaşma dediğimiz hata, diğeri parçanın kalıptan çıkarılması sırasında genleşme ile meydana gelen geri yaylanma denilen hatalardır.

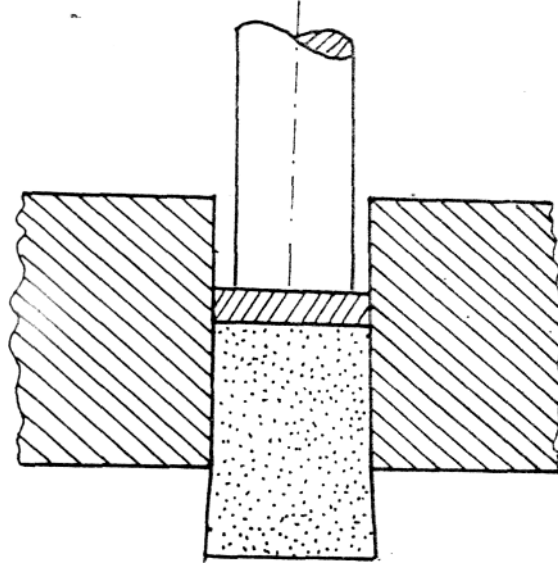
#### **3.3.5.1. Katmanlaşma**

Katmanlaşma parça içerisinde sıkıştırma yönüne dik yatay çatlakların meydana gelmesi şeklinde görülür. Katmanlaşma genellikle şu nedenlerle oluşur. Sıkıştırılan parça içindeki yoğunluk farkından genellikle gözenek miktarının fazla olduğu ve hızlı yoğunluk değişiminin görüldüğü parçanın alt bölgelerinde, Kötü kalıp tasarımından; parça kalıpta iken yük kaldırıldığında kalıptaki elastik genleşmeden dolayı parçanın dışındaki gerilmeler kırılmaya neden olur. Uygulanan sıkıştırma basıncı ile gözeneklerde hapis kalan hava parçada yırtılmalara neden olabilir. Katmanlaşmayı önlemek için yukarıdaki hataların meydana geliş nedenleri giderilmelidir.

#### **3.3.5.2. Geri Yaylanma**

Kalıpta sıkıştırılan parça kalıptan çıkarıldığında parçanın boyutlarında bir miktar artma olur. Boyutlardaki bu artışa geri yaylanma veya elastik genleşme denir. Bu normal bir olay olmakla birlikte boyutlardaki artış miktarı fazla olursa parça içerisinde çatlamlar olacaktır.

Geri yaylanmayı azaltmak için kalıba hafif bir koniklik verilmeli veya iki parçalı kalıp kullanılmalıdır. Böylece kalıp içindeki parçanın genleşmesi yavaş olacağından geri yaylanma azalmış olacaktır. Şekil 14’de kalıptan çıkarma sırasında parçadaki geri yaylanma hatası gösterilmiştir.



**Şekil 14. Geri yaylanma hatası**

### **3.3.6. Sinterleme**

Günümüzde toz metalürjisinin temel problemlerinden biri sinterleme sırasında partiküller arasında fiziksel bağın kalitesinin yükseltilmesidir. Malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi kalitenin iyileştirilmesi ile ilgilidir (Narva ve diğ., 1988)

Sinterleme, dayanımı artırma amacı ile toza veya sıkıştırılmış kütleye esas bileşenin ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta uygulanan ısıl işlemdir. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı genellikle metalin ergime sıcaklığının 2/3 veya 4/5'i alınarak tespit edilirken birden fazla bileşenli (çok bileşenli) sistemlerde ise ergime derecesi düşük olan metalin ergime sıcaklığının üzerinde, ergime sıcaklığı yüksek olan metalin ergime sıcaklığının altında yapılır. Demir grubu metal alaşımları 1000-1300 °C, sert alaşımlar 1400-1600 °C arasında, refrakter metaller (molibden, tantal, wolfram) 2000 °C ile 2900 °C arasında sinterlenirler. Gözenekli bronzlar ve bronz alaşımları 600° - 800 °C arasında sinterlenirler. Sinterleme süresi kullanılan malzemeye göre değişir. Sinterleme süresi ile Sinterleme sıcaklığı arasında ilişki mevcuttur. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme süresi kısalır, Sinterleme süresi uzun tutulduğunda sıcaklığı düşük tutmak gerekir (Kurt, 1992).

Sinterlenmiş parçalar, istenilen mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine sahiptirler. Genel olarak sinterlemeden sonra ilave bir işleme gerek duyulmaz. Üretimde kullanılan hammadde yaklaşık olarak %100 değerlendirilmiş olup, imalat girdileri minimum düzeye indirilir. Daha fazla hassasiyet veya mukavemete gerek duyulduğunda, parçalara daha

sonra ısıtıl işlem ve kalibrasyon işlemleri de uygulanabilir. Toz metalürjisi yöntemi düşük enerji tüketimine ve yüksek üretim hızına sahip olduğu için, zamanla sürekli gelişmekte ve birçok alanda geleneksel metal şekillendirme yöntemlerinin yerini almaktadır (German, 1997).

### 3.3.6.1. Sinterleme Süresi, Sıcaklığı ve Atmosferi.

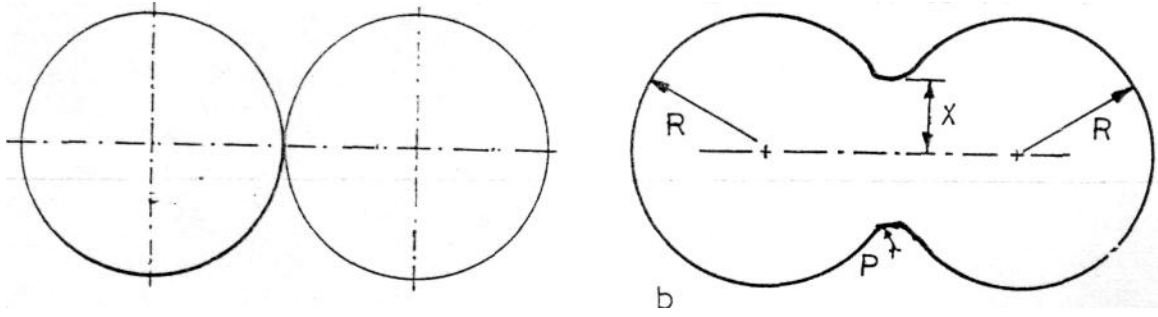
Sinterlemede, üretilecek parçanın özelliklerine göre sinterleme sıcaklığı ve süresinin belirlenmesi gerekir. Parçalardaki düşük yoğunluk ve dayanımın esas nedeni düşük sinterleme sıcaklığı ve süresinin seçilmesidir. Bu sıcaklık ve süre genellikle deneysel olarak saptanır. Sinterleme sıcaklığı tozun (toz bileşeninin) ergime sıcaklığına mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Ancak sinterleme süresi için bir değer vermek zordur. Tablo 2’de bazı metal ve alaşımları için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri verilmektedir.

**Tablo 2. Bazı metal ve alaşımlarının sinterleme sıcaklıkları ve süreleri (Avci, 1993)**

| Toz Malzemesi            | Sinterleme Sıcaklığı (°C) | Sinterleme Süresi (Dakika) |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Bronzlar                 | 760-870                   | 10-20                      |
| Pirinçler                | 843-898                   | 10-45                      |
| Bakır                    | 843-898                   | 12-45                      |
| Çelik, Karbonlu çelikler | 1010-1148                 | 8-45                       |
| Paslanmaz Çelikler       | 1010-1148                 | 30-45                      |
| Tungsten Karbürler       | 1426-1482                 | 20-30                      |
| Ferit                    | 1204-1482                 | 10-600                     |
| Molibden                 | 2054                      | 120                        |
| Tungsten                 | 2343                      | 480                        |
| <b>Tantal</b>            | 2398                      | 480                        |

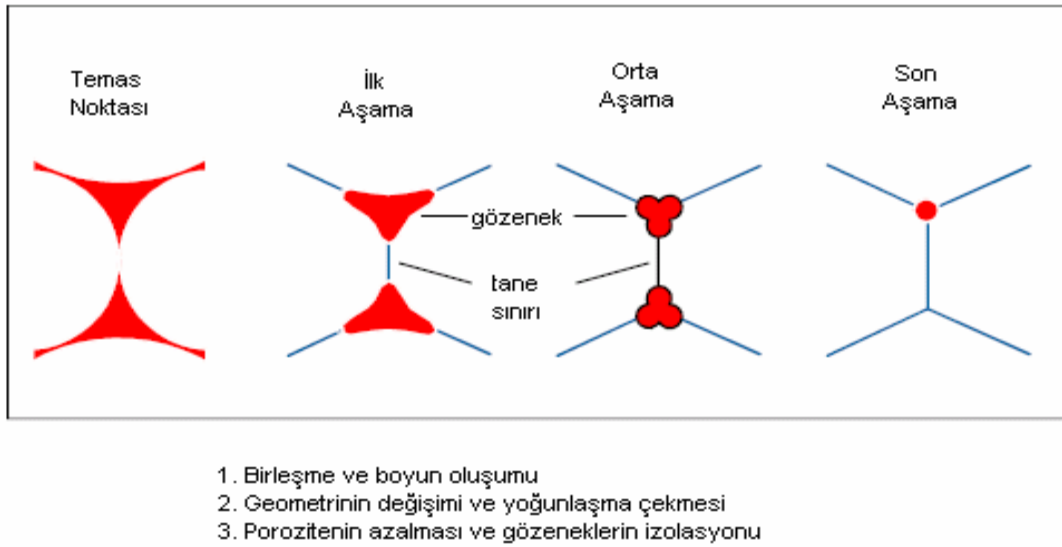
Sinterleme sırasında yüksek sıcaklıklara ulaşıldığından, bu sıcaklıklarda toz malzemenin havadaki bir takım gazlarla reaksiyona girmesi söz konusu olmaktadır. Bu nedenle sinterleme işlemi koruyucu atmosfer altında gerçekleştirilir. Koruyucu atmosfer olarak koruyucu gazlar veya vakum kullanılmaktadır.

İki küresel parça şekil 15 'de görüldüğü gibi temas halinde olduğu kabul edilir. Sinterleme sırasında parçacıklarda önce bir boyun büyümesi ilerleyen sinterleme zamanı ile gözeneklerde büzülme olur. Gözenek kanalları kapanarak gözenekler kapalı gözenek şekline dönüşürler. Gözenek küreselleşirken gözenekler tane sınırları tarafından yerleştirilirler.



**Şekil 15. a) Sinterleme başlangıcında temas halinde parçacıklar  
b) X yarıçapında bir boyun ile iki küresel parçacık sinterleme kesiti.**

Parçacıklar arasında bağ büyürken mikroyapı Şekil 16'da gösterildiği gibi değişir. Sıkıştırılın a m iş tozların sinterlenmesinde oluşan boyundaki boyun yarıçapının, parçacık çapına ( $X/R$ ) oranının 0.3'den az olduğu kısım sinterlemenin ilk aşaması olarak tanımlanır (Kurt, 1992).



**Şekil 16. Bir nokta teması başlangıcı ile sinterleme esnasındaki parçacıklar arası bağların gelişimi**

Orta kademede gözenekler ilk kademeye göre daha düzgün şekillidir ve birbirlerine bağlı silindirik bir yapıya sahiptirler. Orta kademede (sıkıştırma özelliklerinin) yüzey ve tane bağları enerjisinin her ikisini de kapsayan ara yüzey enerjisinden dolayı sıkıştırma özelliklerinin gelişimi görülür. Ara kademeden sonraki oranlarında tane büyümesinin yaygın olması sonucu gözenekler birbirinden ayrılabilir.

Yüksek bir sinterleme oranı elde etmede tane sınırları önemlidir. Bu nedenle tane büyümesi ve gözenek ayrılması istenmeyen bir durumdur. Gözenek yapılarının çekilmesi

ile yaklaşık %8 gözeneklilikte kararlı olmayan silindirler oluşur. Bu noktada silindirik gözenekler yavaş tane büyümesinde etkili olmayan küresel gözenek şekline dönüşür. Birçok durumda da tane sınırlarından ayrılmış gözeneklerin mevcut olduğu mikroyapı oluşur. Tane içerisindeki gözeneklerin ayrışması sertlik artışına neden olur. Gözenekler de ki küresel görünüm, ayrılmış gözenekler sinterlemenin son aşamasının başlangıç göstergesidir. Sinterlemenin son aşamasında hareketler çok yavaştır. Buna sebep katı gözenek ara yüzeyinin giderilmesidir. Gözenekler içindeki hapsedilen gazlar son yoğunlaşma kademesinin miktarını sınırlar.

Genellikle ilk kademe geniş eğim açılı bir mikroyapıya benzer. Boyun büyüme oranları ve büzülme küçük ve tane büyüklüğü toz büyüklüğünden daha azdır. Orta kademedeki gözenekler daha pürüzsüzdür, fakat bu kademedeki hala birbiri arasında tam bağ vardır. Teorik yoğunluk %92 den daha azdır ve tane büyümesi ara kademedeki daha sonradan oluşabilir. Son sinterleme kademesinde gözenekler küreselleşir ve kapanır. Son kademedeki %92' yi geçen teorik yoğunluk ve tane büyümesi görülür.

#### **3.4. T/M Malzemelerinin Mekanik Özellikleri**

T/M malzemelerin mekanik mukavemetleri şekillendirme sonrası uygulanan ısı ile işlemle kazandırılır. Oda sıcaklığında sıkıştırılan T/M parçalarında mekanik bağlar oluşur. Sonradan uygulanan ısı ile işlemle mekanik bağlar kimyasal bağlara dönüştürülerek mekanik özellikler iyileştirilir.

T/M parçaları ile ergitilerek elde edilmiş parçalar arasındaki en önemli fark T/M, parçaların gözenekli yapıya sahip olmalarıdır. Gözeneklilik sinterleme sıcaklığına ve atmosferine, presleme basıncına, tane büyüklüğüne bağlı olarak değiştiğinden T/M parçaların özellikleri ergitilerek elde edilen metallerin özelliklerine göre daha büyük özellikler gösterir.

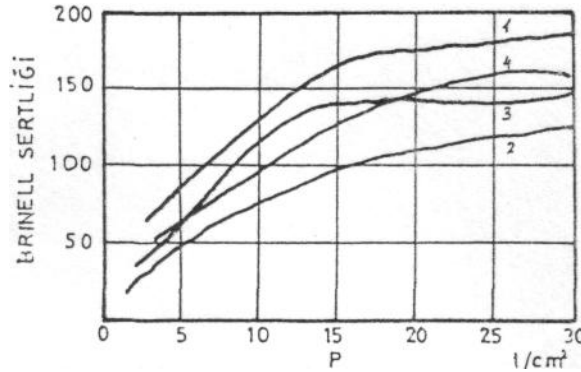
Üretilen malzemelerin çeşitli alanlarda güvenli bir şekilde kullanılmaları için, mekanik davranışlarının iyi anlaşılması ve bilinmesi gereklidir (Yılmaz v.d. 2009).

Çoğu metal ve alaşım sisteminde olduğu gibi toz metalurjik malzemelerin de mekanik özelliklerinin geliştirilmesi açısından alaşım dizaynı önemlilik arz etmektedir (Gething 2005). Bu bakımdan çeşitli parçaların tasarımı ve üretimi açısından büyük önem taşımaktadır (Yılmaz v.d. 2009).

### 3.4.1. T/M Parçaların Sertlik Özelliği

T/M parçalarında sertlik ölçümleri genellikle Brinell Sertlik Ölçme Metodu ile yapılır. Ergime ile elde edilmiş metallerde sertlik ile çekme mukavemeti arasında doğrusal ilişki T/M parçaları için söz konusu değildir. T/M parçaları gözenekli yapıya sahip olmaları nedeniyle sertlik değerinin ölçümünde ölçüm noktasının yerine dikkat etmek gerekir. Eğer ölçüm noktası gözenek üzerinde veya yakınında olursa iz büyük olacağından sertlik değerinde yanlış netice alınır. (Kurt, 1992).

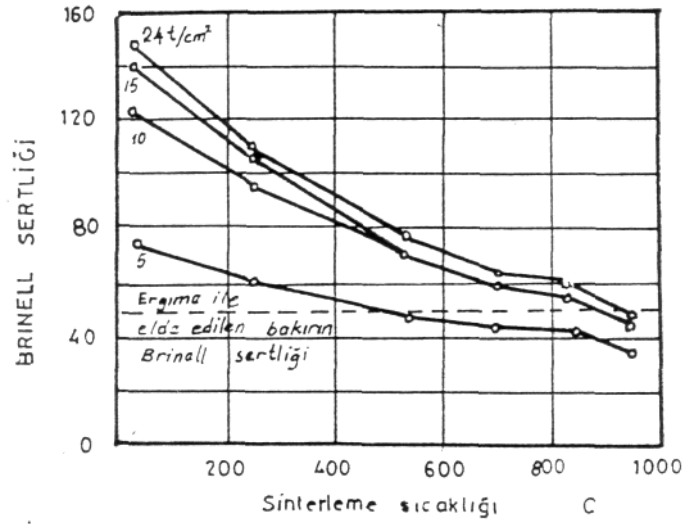
T/M parçaların sertlik değeri parçanın sıkıştırma basıncına göre de değişir. Altın ve bakır tozlarının sıkıştırma basıncıyla sertlik değişimi Şekil 17'de verilmiştir. Ergime ile üretilen bakırın sertliği 40-60 kg/mm olduğu halde, bakır tozlarının T/M yöntemiyle sıkıştırılması ile sertliğin %100 artırılması mümkündür. Sertliğin bu kadar yüksek olması tozun soğuk şekillendirme ile mekanik mukavemetinin çok artması ile izah edilebilir. Şekil 17 'de Goetzel ve Kiefferin bakır ve altının sıkıştırma basıncı ile sertlik değişiminin sonucu verilmiştir.



**Şekil 17. Altın ve bakırın sıkıştırma basıncına bağlı sertlik değerinin değişimi**

Bakır tozlarının değişik basınçlar altında preslenmesiyle elde edilen T/M parçalarının artan sinterleme sıcaklıkları sonucu sertlik değeri Şekil 18'de verilmiştir. Yüksek sinterleme sıcaklığında T/M parçalar, ergitilerek üretilen parçaların sertliğine yakın sertlik değeri gösterirler. Farklı tane boyutlarındaki bakır tozları üzerinde yapılan deney sonuçları Tablo 3' te verilmiştir.

800°C'nin üzerindeki sinterleme sıcaklığında sertlik değerinin düşüşü tane büyümesinden ve yüzey pürüzlülüğü neticesidir. 700 °C'in altındaki sinterleme sıcaklığında sertliğin en az olduğu parçaların kaba tozlardan üretildiği Tablo 3'den anlaşılmaktadır.



**Şekil 18. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişik basınçlar altında sıkıştırıldıktan sonra sinterlenen kaba bakır tozu numunelerinin sertlik değişimi**

**Tablo 3. Farklı tane büyüklüğü ve sıcaklıklarda sinterlenmiş bakır tozunun sertlikleri(Ulutaş, 2006)**

| Tane<br>Büyüklüğü<br>mm | Brinell Sertliği |                         |      |      |      |      |
|-------------------------|------------------|-------------------------|------|------|------|------|
|                         | Sıkıştırma<br>mm | Sinterleme Sıcaklığı °C |      |      |      |      |
|                         |                  | 260                     | 530  | 700  | 840  | 920  |
| 0.08                    | 152.4            | 120.5                   | 78.4 | 64.0 | 50.9 | 43.5 |
| 0.10                    | 141.5            | 104.5                   | 75.4 | 64.6 | 50.7 | 43.3 |
| 0.15                    | 131.6            | 98.2                    | 70.5 | 59.7 | 50.5 | 44.0 |
| 0.30                    | 116.9            | 90.5                    | 65.2 | 56.4 | 50.1 | 45.3 |

Ayrıca Davala'ya (1998) göre malzeme kompozisyonu, sağladığı yoğunlukla, alaşım sisteminin sertleşebilirliğini artırarak genellikle sistemin mekanik performansını yükselten alaşım elemanlarıyla eşit rol oynar.

### 3.4.2. T/M Parçaların Çekme, Yorulma ve Darbe Mukavemetleri

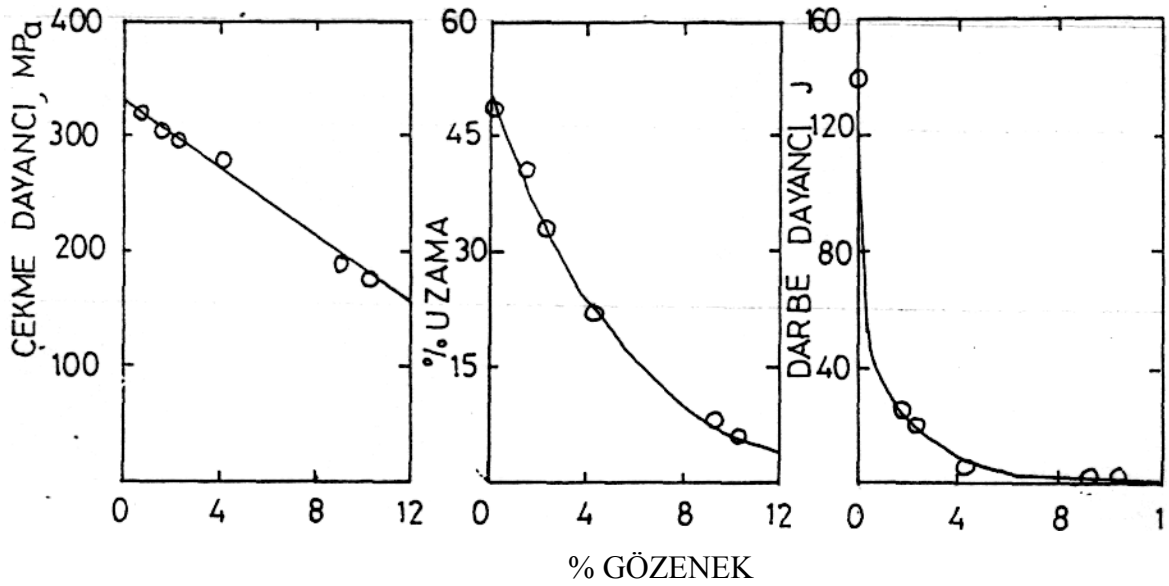
T/M parçalarının gözenekli yapıya sahip olmaları bu parçaların çekme mukavemetini olumsuz yönde etkiler Çekme deneyi sırasında parçada önemli bir uzama olmadan kopma meydana gelir T/M parçalarının çekme mukavemetleri ergitilerek üretilen parçaların çekme mukavemetlerinin ölçülmesi gibi tespit edilir. T/M parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde sıcak dövme yoluyla dökme-dövme malzemelere eşit

bazen de üstün özellikler sağlanır. Tablo 4' de bazı T/M parçaların çekme ve darbe mukavemetleri verilmiştir (Kurt, 1992).

**Tablo 4. Hadde ve T/M Çeliklerin Özelliklerinin Mukayesesi**

| MALZEME     |            | Çekme Dayanımı<br>MPa | Uzama % | Kesit Daralması | Darbe Enerjisi |
|-------------|------------|-----------------------|---------|-----------------|----------------|
| Mn-Mo Hadde | Hadde yönü | 920-980               | 17-19   | 60-62           | 100            |
|             | dik yön    | 910-950               | 5-12    | 6-24            | 10             |
| T/M Ni-Mo   |            | 900-930               | 13-15   | 40-50           | 27             |

T/M parçalarda kalıcı gözenekler mekanik özellikler üzerinde oldukça etkilidir. Çekme mukavemeti ve mıkmatıslık özellikleri kalıcı gözenek etkisi ile oldukça yavaş değişir. Süneklik ise hızlı değişim gösterir. Şekil 19'da kalıcı gözeneğin mekanik özelliklere etkisi görölmektedir.



**Şekil 19. Kalıcı gözeneğin mekanik özelliklere etkisi**

T/M parçaların mekanik özelliklerine kalıcı gözeneklerden başka oksijen miktarında etkisi vardır. Süneklik, darbe mukavemeti darbe tokluğu ve yorulma mukavemeti oksijen miktarı ile önemli oranda değişmektedir. Çatlak genellikle kalıcı gözenekleri ve toz yüzü oksitlerini takip etmektedir (Kurt, 1992).

### 3.5. Toz Metalurjisi Uygulama Alanları

Çağın ekonomik dengeleri enformasyon, yeni malzeme, biyoteknoloji, nükleer, uzay ve havacılık teknolojileri olmak üzere beş teknoloji üzerine kurulmuştur. Yeni veya ileri malzeme teknolojisi, aslında diğer teknolojilerin de temelidir. Çünkü bütün teknolojilerin gelişmesi, yeni üretilen malzemelerin özellikleri ve performansı üzerine kurulmuştur. Diğer teknolojilerle de iç içe olan malzeme teknolojisindeki başlıca atılım, doğal kaynaklarla rekabet eden sentetik malzeme kaynaklarının bulunmuş olmasıdır. Maddenin moleküler yapıda kontrolü sayesinde yeni özellikleri olan malzemeler gündeme gelmektedir. Yeni veya ileri malzeme teknolojisinin de temeli toz metalürjisidir. Çünkü pek çok özelliklere sahip sentetik malzeme üretimi ancak metal tozlarının karışım teknolojisi ile mümkün olmaktadır (Tanberk, 1997).

T/M yöntemi ile üretilen parçaların özellikle 1900'lü yılların başından itibaren kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. T/M yöntemi artık endüstrinin önemli bir kısmında uygulanır olmuştur.

T/M parçaları otomobillerin hareket sistemleri, çamaşır makineleri, güç makineleri, spor malzemeleri, fotokopi makineleri, yol ekipmanları, av malzemeleri, hidrolik sistemler, x ışınlarının korunma sistemleri, petrol ve gaz kuyularının kapama sistemleri ve kaset çalar gibi pek çok yerde kullanılmaktadır. İmalat endüstrisinde kullanılan T/M parçaları büyük ölçüde demir, çelik ve alaşımları, bakır ve bakır esaslı alaşımlar (prinç, tunç ve nikel, gümüş), alüminyum, paslanmaz çelik, nikel ve kalay esaslı tozlardan elde edilen alaşımlardır (Boz, 1999).

Demir ve bakır esaslı malzemeler mukayese edildiğinde Bakır esaslı malzemelerin daha iyi ısı iletkenlik ve sürtünme direnci gibi özellikleri vardır. Bu yüzden uçaklar otomobiller ve taşıyıcı fren sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Xiong 2006)

1990 yılına kadar toz metal kompozitler, elektrik kontakları ve elektrotların üretilmesinde ve bakır, titan ve grafit tozlarından gözenekli yatak ve filtre yapımında kullanılırdı. Demir ve çelik toz metal parçalar 1940 yılının ortalarında otomotiv sektöründe ortaya çıkmıştır. O zamandan beri toz metalürjisi, endüstride önemli ölçüde ekonomik olan bir sektör haline gelmiştir. Gelişmiş mekanik performans, artan mikroyapı kontrolü, düşük malzeme kaybı ve daha düşük üretim maliyeti sebebiyle, modern toz metalürjisi üretim yöntemi geleneksel metal işleme yöntemlerinden daha üstün yere sahiptir. Malzeme ve üretim maliyetlerinin düşürülmesinin yanında karışık şekilli ve diğer yöntemlerle üretilmesi zor olan parçaların üretilmesinde büyük kolaylık sağlayan toz metal tekniği ile

elde edilen parçaların kullanım alanları gittikçe artmaktadır (Varol ve Sarıtaş, 1996). Otomobil motor dişlileri ve kamları demir tozlarından presleme ve sinterlemeyle ekonomik olarak toz metalürjisi ile üretilmektedir. Toz metalürjisi yöntemi ile yüksek üretim hızlarında, istenilen boyutsal ölçülerde ve özelliklerde parçalar ekonomik olarak üretilmektedir. (German, 1997; Bishop, 1998; Çetinkaya ve diğ., 2004; Babayev, 2007).

Dünya çapında üretilen tüm metalik tozlardan imal edilen sinler parçaların pazar paylarından en büyük kısmı. % 86 ile demir-çelik esaslı sinter parçalar almaktadır, ikinci sırada % 11 pazar payı toplamı ile bakır ve bakır esaslı sinter parçalar, üçüncü sırada % 0.6 ile alüminyum takip eder (Öveçoğlu, 1997). T/M' nin otomotiv sektöründe önemli uygulamaları tablo 5' de sunulmuştur.

**Tablo 5. T/M' nin otomotiv sektöründe uygulama alanları**

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

T/M yöntemi ile üretilen parçaların kullanım alanları özellikle 1900'lü yılların başından itibaren gün geçtikçe artmaktadır. T/M yöntemi ile parça üretimi artık endüstride vazgeçilemez bir üretim teknolojisi olarak yerini almış ve daha da sağlamlaştırarak hızlı ilerleyişini sürdürmektedir.

### 3.5.1. Sert Metaller

T/M yöntemi ile üretilen sert metaller değişik uygulama alanlarında kullanılırlar. Bunların %70'i kesici takımlarda, %10-u delici aletlerde, %10' u tel çekme ve haddelerde, %10'u ise aşınmaya dayanıklı takımlarda kullanılır. Sert metaller aşınmaya, ısıya karşı mukavemetli oluşu, yüksek sertlik ve yeterli çekme mukavemetine sahip oluşu nedeniyle

kesici takımlarda başarı ile kullanılırlar. Farklı metallerin değişik şartlarda işlenir olmaları sert metallerde bir çok özelliklere sahip olmasını gerektirir. Bu özellikleri, wolfram karbur-kobalt ve wolfram, karbür- titan, karbür-kobalt alaşımlarında kobalt ve titan karbür miktarı değiştirilerek sağlanır. Titan karbür miktarının artması eğme mukavemetini düşürürken sertliği artırır.

**Tablo 6. Bazı Alman Sert Metallerin Mekanik Özellikleri (Kurt, 1992).**

| Kalite                                   | H1   | G1   | G2    | S1     | S2     | S3     | F1     |
|------------------------------------------|------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Terkip                                   | Wc   | Wc   | Wc    | Wc     | Wc     | Wc     | Wc     |
|                                          |      |      |       | %6 Co  | %9 Co  | %9 Co  | %6 Co  |
| %                                        | %6Co | %6Co | %12Co | %15TiC | %15TiC | %5TiCC | %25TiC |
| Vickers sertliği<br>kg/mm <sup>2</sup>   | 1600 | 1600 | 1400  | 1600   | 1550   | 1500   | 1650   |
| Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>               | 14.7 | 14.7 | 14.0  | 11.1   | 11.2   | 13.3   | 9.9    |
| Eğme<br>kg/mm <sup>2</sup>               | 150  | 165  | 185   | 115    | 135    | 150    | 90     |
| Isı geçirgenliği<br>Cal/cm sn °C         | 0.19 | 0.19 | 0.16  | 0.09   | 0.12   | 0.15   | 0.05   |
| Genleşme<br>katsayısı x 10 <sup>-6</sup> | 5    | 5    | 5.5   | 6      | 6      | 5.5    | -      |
| Elektrik direnci<br>Ωmm <sup>2</sup> /m  | 0.20 | 0.20 | 0.18  | 0.43   | 0.29   | 0.29   | 0.65   |

Sert metaller aşınmaya karşı yüksek dayanım gösterdikleri için delicilerde, maden ve petrol aramalarında başarı ile kullanılmaktadır. Ayrıca tel çekme haddelerinde de elmasın pahalı olması nedeniyle sert alaşımlar kullanılmaktadır.

### 3.5.2. Elektrik ve Magnetik Malzemeler

Bu gruba direnç kaynağı elektrodları, tungsten ve molibden flamanlar, elektrik kontak malzemeleri, metal-grafit fırçalar, süper iletkenler ve çeşitli miknatıslar girer. Çeşitli gümüş alaşımları her tip elektrik kontaklarında kullanılırlar. En çok %Q5 Ag-%15 Ni alaşımları, kullanılır. Çeşitli elektrik kontak malzemelerinin özellikleri Tablo 7’de verilmiştir.

**Tablo 7. Elektrik Kontak Malzemelerinin Özellikleri (Kurt, 1992).**

| Malzeme               | Yoğunluk<br>gr/cm | Sertlik<br>(HV) | Elektrik<br>iletkenliği<br>% IACS |
|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Gümüş                 | 10.5              | 26              | 106                               |
| Gümüş-CdO             | 9.8-10.0          | 58              | 75-82                             |
| Gümüş-grafit          | 8.7-9.7           | 30-40           | 55-86                             |
| Gümüş-molibden        | 10.4              | 170             | 50                                |
| Gümüş- Tungsten       | 12.5-15.6         | 110-120         | 36-61                             |
| Gümüş-Nikel           | 10.0              | 60              | 75                                |
| Gümüş-Tungsten karbür | 12.5-13.2         | 110-200         | 36-57                             |
| Bakır                 | 8.9               | 35              | 100                               |
| Bakır-Tungsten        | 12.8-15.2         | 140-240         | 28-41                             |
| Tungsten              | 19.3              | 290             | 31                                |

Metal olarak bakır veya gümüş kullanılan, metal grafit karışımı fırçalar elektrik motorlarının çok önemli parçalarını teşkil ederler. Tablo 8'de verilen değerlerden anlaşılabacağı gibi bu metal-grafit fırçalardaki metal miktarı %20 ile %99 arasında değişmektedir. Ayrıca tungsten ampul flamanlarının üretim yöntemi de sadece T/M teknikleri ile mümkündür. Flaman ömrünü uzatmak için yapıya toryum oksit ve potasyum tozları katılır. Bu katkı maddeleri tane büyümesini önler.

**Tablo 8. Çeşitli Metal-Grafit Fırçalarının Özellikleri**

| Kodu | Bileşim (%) | Yoğunluk<br>gr / cm <sup>3</sup> | Özgül<br>Direnç<br>m | Max.-Akım<br>Yoğunluğu<br>A / m <sup>2</sup> | Tipik<br>Voltaj | Sclerascop<br>Sertliği |
|------|-------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|-----------------|------------------------|
| 261C | 21Cu-79C    | 2.2                              | 0.024                | 125.600                                      | 72              | 28                     |
| 261D | 35Cu-65C    | 2.5                              | 0.016                | 125.000                                      | 72              | 28                     |
| FQ   | 50Cu-50C    | 2.75                             | 0.006                | 130.000                                      | 36              | 28                     |
| 179P | 65Cu-35C    | 3.5                              | 0.0016               | 190.000                                      | 18              | 20                     |

|      |          |     |         |         |    |    |
|------|----------|-----|---------|---------|----|----|
| 179V | 75Cu-60C | 4.0 | 0.000.8 | 235.000 | 15 | 18 |
| 22A- | 40Ag-60C | 2.7 | 0.008   | 150.000 | 36 | 30 |
| 246  | 65Ag-35C | 3.8 | 0.001   | 190.000 | 18 | 20 |
| 2-S  | 80Ag-20C | 4.6 | 0.0008  | 235.000 | 9  | 23 |
| 1-S  | 93Ag-7C  | 7.0 | 0.0001  | 270.000 | 6  | 10 |

Süper iletkenlik enerji tasarrufu için ideal olarak görüldüğünden son yılların ilgi çeken araştırma konuları içindedir. Nb<sub>3</sub>Sn intermetalik bileşiğinde keşfedilen süper iletkenlikten dolayı bu alanda hızlı bir araştırma sürdürülmektedir.

T/M yöntemi ile üretilen parçalarda son şekle, herhangi bir talaş kaldırma işlemine gerek olmadan ulaşıldığı için birçok alanda olduğu gibi yumuşak manyetik malzemelerin ve daimi mıknatısların üretiminde de büyük ekonomi sağlanır. Kutup parçaları, role göbekleri, bilgisayar yazıcıları gibi yumuşak manyetik malzemeler demir, demir-silikon', demir fosfor ve demir nikel alaşımları tozlarından üretilmektedir.

Genellikle karbonil tozlarından T/M teknikleri ile hazırlanan demir-nikel alaşımlarının manyetik özellikleri aynı oranlarda Ni ihtiva eden ve döküm yöntemi ile üretilen manyetik alaşımların özelliklerinden daha iyi sonuç sağlamıştır (Kurt, 1992).

### 3.5.3. Diş Dolguları

Altın, gümüş, kalay, bakır veya alaşımların tozları cıva ile karıştırılarak dişçilikte diş dolgusu olarak kullanılmaktadır. Hazırlanmaları sırasında plastik olmaları ve çabuk katılaşması nedeniyle bu dolgular en küçük boşluklara dahi girerek herhangi bir boşluk bırakılmadan doldurulur.

### 3.5.4. Elmas Diskler

Elmas, bilindiği gibi mevcut malzemeler arasında en yüksek sertliğe sahip bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı kesici ve delici takımların imalinde önemli bir kullanım alanına sahiptir. Elmas tozları, bazı metal tozlarıyla karıştırılarak bu karışım preslenip, sinterlenerek T/M elmas yapılar elde edilir, imal edilen elmas yapılar; zımpara taşları yapımında, matkap uçlarında, işleme tezgâhlarının kesici çakılarına kullanılır.

### 3.5.5. Yatak Malzemeleri

Kütle üretiminin otomotiv endüstrisine geçmesi büyük tonajlarda demir ve bakır tozlarının ve modern toz metalürjisinin teknolojik birçok avantajının doğmasına neden olmuştur. 1940'lı yılların başlarına kadar otomotiv endüstrisinde kullanılan bakır tozu kendinden yağlamalı yataklar, toz metalürjisinin temel ürünleri olmuştur. Özellikle uzay ve nükleer teknolojinin gelişiyile reaktif ve refrakter metallerin toz metalürjisi yöntemi yaygın hale gelmiştir (Şahin, 2000).

Toz metalürjisinin en önemli uygulama alanlarından birisine yataklar alanında rastlanır. T/M ile üretilmiş çeşitli tipteki yataklar toplam yatak kullanımının önemli bir yerini teşkil eder. T/M ile üretilen yatak tiplerinin en önemlisi olan gözenekli yatakların üretiminde kullanılan metal tozlarının tonajı, herhangi bir başka tipteki sinterlenmiş bileşen için kullanılandan çok daha fazladır. 1961 dünya üretimi günde 10.000.000 dan daha fazla olabildiği halde İngiltere'de yıllık 100.000.000'ün üzerinde gözenekli yatak üretilmiştir (Kurt, 1992).

### 3.5.6. Diğer Uygulamalar

Gün geçtikçe artan uygulama alanları ile endüstride önemli bir yer dolduran T/M parçalarının diğer uygulama alanları arasında, ziraat aletleri, motorlu vasıtaların muhtelif parçaları, kimya endüstrisi, çamaşır makineleri, elektrikli süpürge gibi ev aletleri, hidrolik pompalar, metal filtreler, sürtünme elemanları, Sermetler, takım çelikleri ve makine elemanları bulunmaktadır.

Gözenekli metallerin en geniş uygulama alanını filtreler oluşturur. Toz metal filtreler geniş sıcaklık aralığında çalışmalarının yanı sıra, organik filtrelerin kolay şekil değiştirmeleri ve kağıt filtrelerin zayıf olmalarından dolayı bunlara tercih edilirler. Filtre imalatında tane büyüklüğü 600 µm-1000 µm arası tozlarla, tane şekli küresel tozlar kullanılır. Filtrelerde gözenek miktarı %40-%50 arasında tutulur. Tablo 9'da çeşitli toz metal filtrelerin özellikleri verilmiştir.

Ağır hizmet makinelerinin fren ve debriyaj balatalarında sürtünme elemanları olarak T/M parçalar başarıyla kullanılmaktadır. Sürtünme elemanlarında kullanılan toz metal parçalarda bakır ve kalay ısıyı iletici toz olarak, alümina ve silikon karbür ise sürtünme sağlayan toz olarak kullanılır. T/M sürtünme elemanlarında sürtünme katsayısını

kontrol etmek mümkündür. Kurşun,, çinko ve grafit tozları ilavesiyle sürtünme katsayısı istenen değere ayarlanabilir.

**Tablo 9. T/M Filtrelerin Özellikleri**

| Tipi               | Süzme<br>Büyükluğu<br>mikron | Geçirgenlik<br>Darcy x 10 <sup>-6</sup> | Çekme<br>Mukavemeti<br>MPa | Bükülme<br>Açısı<br>° | Minimum<br>Kalınlık<br>mm |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Bronz              | 3                            | 1.8                                     | 25                         | 50                    | 1.60                      |
|                    | 5                            | 3.0                                     | 24                         | 47                    | 1.60                      |
|                    | 12                           | 15.0                                    | 20                         | 40                    | 2.40                      |
|                    | 25                           | 45.0                                    | 18                         | 35                    | 2.40                      |
|                    | 37                           | 75.0                                    | 16                         | 30                    | 3.00                      |
| Paslanmaz<br>çelik | 10                           | 0.65                                    | 75                         | 180                   | 1.25                      |
|                    | 20                           | 2.40                                    | 60                         | 80                    | 1.25                      |
|                    | 40                           | 6.50                                    | 40                         | 50                    | 2.50                      |
| Paslanmaz          | 10                           | 1.14                                    | 110                        | 180                   | 0.750                     |
| çelik              | 20                           | 7.96                                    | 95                         | 180                   | 0.90                      |
| telörme            | 40                           | 15.30                                   | 80                         | 180                   | 1.00                      |

Sermet, seramik ve metal kelimelerinden türetilen bir isimdir. Seramik tozları bir metal bağlayıcı ile bağlanır. Hacimce %15 ile 85 arasında seramik tozu kullanılır. Seramik taneciklerin büyüklüğü sisteme bağlı olarak değişir. Nükleer yakıt elamanı olan uranyum için 50 µm-100 µm olduğu gibi ince taneli karbür için 1-2 µm da olabilmektedir. Sermetlerde, uranyum oksit, uranyum karbür, zirkonyum-borik, silikon karbür, silikon oksit, alüminyum oksit; titanyum karbür, grafit veya elmas seramik faz olarak kullanılırken, Nikel, kobalt, molibden, krom, tungsten, paslanmaz çelik vb. de metal bağlayıcı faz olarak kullanılır.

Metal tozlarının pul şeklinde tane yapısına sahip olanları metalik boya olarak boya sanayinde kullanılır. Pul şeklindeki metalik tozlar taşıyıcı sıvı yapışkan ile karıştırılıp boyanacak yüzeye püskürtüldüğünde yüzeye paralel olarak yerleşir ve kaplama yapar.

Gıda sanayinde demir tozları gıda zenginleştirici olarak kullanılmaktadır. Demir sülfat, saf demir ve çeşitli demir tozları gıdaya doğrudan eklenir. Amerika'da yılda 500 ton saf demir tozu gıda zenginleştirici olarak kullanılmaktadır (Kurt, 1992).

### **3.6. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları**

T/M üretim tekniği bütün dünya ülkelerinde hızla yayılmaktadır. ABD' de Japonya'da, Avrupa ve Avustralya'da T/M üretiminin sürekli olarak arttığı rapor edilmektedir. Bunun en büyük nedeni, daha ekonomik bir üretim tekniği olması ve diğer tekniklere kıyasla daha az enerji tüketilmesi (Uygur, 1996)

T/M, demir ve demir dışı parçaların üretiminde kullanılan, son derece gelişmiş bir yöntemdir. Elementel veya alaşım tozları karıştırılır ve bir kalıp içerisinde preslenerek sinterlenir veya ısıtılarak partiküller arasında metalürjik bağın oluşması sağlanır. Esası talaşsız metal işleme metodudur. T/M nihai parçada başlangıçtaki ham maddenin % 97' sinden fazlasını kullanmaktadır. Bundan dolayı, T/M bir enerji ve malzeme tasarruf metodudur.

Daha önce döküm, talaşlı üretim, dövme gibi tekniklerle üretildikleri halde ekonomik sebeplerle T/M tekniğine değiştirilen sayısız parça vardır. T/M' nin diğer tekniklerle karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır(Boz, 1999).

#### **3.6.1. T/M'nin Avantajları;**

- a) İşlemeyi (talaş kaldırma) elimine veya minimize eder
- b) Yakın toleranslar ve düzgün yüzeyler elde edilir
- c) Yoğunluk ve ergime noktalarındaki farklılıklardan ötürü başka yollarla imkânsız olan alaşım ve karışımların veya karmaşık parçaların üretimi mümkündür.
- d) Metal olmayan malzemeler, metal asıllı ürünlerin içinde ince ve homojen şekilde dağıtılabilir
- e) Isıl işleme mukavemeti veya aşınma direnci yükseltilebilen malzemeler sağlanabilir (gözeneklere arzu edilen yağlayıcı maddeler emdirilebilir(Boz, 1999).

#### **3.6.2. T/M' nin Dezavantajları;**

- a) İlk yatırım (takımlar, presler ve sinterleme teçhizatı ) oldukça pahalıdır. Seri üretim yapılmazsa aşınma payı değerleri yüksektir.

- b) Metal tozların maliyeti, ingot halinde üretilen malzemelerden daha yüksektir
- c) Toleranslar talaşlı işlemlere göre daha kabadır
- d) Tozların kalıp içinde akışkanlığı sınırlıdır. Dolayısı ile yapılacak parçanın şekli kısıtlayıcı bir faktör olabilir (Boz, 1999).

### 3.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Konvansiyonel üretim tekniklerine bir alternatif olarak geliştirilen toz metalürjisi sağlamış olduğu birçok avantajlar bakımından endüstride yaygın kullanım alanına sahiptir. Üretilirlik, düşük maliyet, yüksek performans sunması gibi birçok etken toz metalürjik seri parça üretimini bir anlamda popüler kılmaktadır (Karagöz vd. 2009).

Kompozit malzemelerde takviye elemanlarının kullanılması, yumuşak yapı içerisinde sert fazlar oluşturmak; hem aşınma ve hem de tokluğu arttırmaktadır. Çöktürme sertleştirilmesi uygulanan bakır matrisli kompozitler, döküm ve toz metalürjisi yöntemi ile üretilmektedir. Toz metalürjisi tozların karıştırılması, paketlenmesi ve sinterlemesi işlemlerinden ibarettir. Geleneksel ergitme ve döküm yönteminde ise, eriyik bakır ve seramik parçacıklar arasında ıslanma özelliğinin yetersiz kalmasından dolayı homojen dağılım sağlanmamakta, ayrıca yoğunluk farkları eriyikte segragasyona sebep olmaktadır (Moustafa, 2002).

Doğru uygulanan bu yüksek sinterleme sıcaklıkları T/M parça üreticileri geleneksel üretim işlemlerine ölçülebilir faydalar sağlayabilirler (Sanderov 1998). Bağlanma türü ayrımları düşürebilir veya engeller ve daha tutarlı bir sinterleme davranışı oluşumu sağlar. Ayrıca sıcak presleme ve bazı oda sıcaklığı yağlayıcı/bağlayıcı sistemleri parça boyunca düşük tane yoğunluğu dağılımının daha kalıcı tane yoğunluk dağılımı ile parça çarpılmasını ve yoğunlaşma sorununu minimize ettiği görülmüştür (John 2002).

Üretilen malzemelerin çeşitli alanlarda güvenli bir şekilde kullanılmaları için, mekanik davranışlarının iyi anlaşılması ve bilinmesi gereklidir (Yılmaz v.d. 2009). Çoğu metal ve alaşım sisteminde olduğu gibi toz metalürjik malzemelerin de mekanik özelliklerinin geliştirilmesi açısından alaşım dizaynı önemlilik arz etmektedir (Gething v.d. 2005). Bu bakımdan çeşitli parçaların tasarımı ve üretimi açısından büyük önem taşımaktadır (Yılmaz v.d. 2009).

Malzeme kompozisyonu, sağladığı yoğunlukla, alaşım sisteminin sertleşebilirliğini arttırarak genellikle sistemin mekanik performansını yükselten alaşım elemanlarıyla eşit rol oynar (Davala v.d. 1998)

Demir ve bakır esaslı malzemeler mukayese edildiğinde Bakır esaslı malzemelerin daha iyi ısı iletkenlik ve sürtünme direnci gibi özellikleri vardır. Bu yüzden uçaklar otomobiller ve taşıyıcı fren sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Xiong v.d. 2007). Saf bakır yüksek elektrik ve ısı iletkenliğe sahip olmasına karşın, çekme, sürünme ve sertlik gibi mekanik özellikleri düşüktür. Bu bakımdan yüksek çekme mukavemetli ve sert bakır esaslı malzeme geliştirilmesi önemlidir. Bakırın mekanik dayanımı matris içerisine homojen olarak dağılmış sert parçacık takviyesi ile veya yaşlandırma ısı ışlemi ile artırılabilir (Tjong 1999).

TM malzemelerin doğal fiziksel özellikleri ilerinde gözeneklerin bulunmasıdır. Gözenekler gerilme birikmesine yol atıklarından çatlaklar için oncu olabilirler. Süneklik gözenek yapısına bağlıdır, ancak darbe ve yorulma gibi dinamik özellikler gözeneğe daha hassastırlar (James 1998). Düşük gözeneklilikten dolayı gözeneklerin mekanik özelliklere etkisi de azalır. Bir malzemede yapı etkisi gerçekten yüksekse, mekanik özelliklere etkisi hakkında gözeneklerle malzeme yapısının arasında ayırım yapmak kolay olmaz (Savitski 1964).

Malzeme zerine uygulanan statik veya dinamik yüklenmeler sonrasında parçada meydana gelen hasarlı (kırık) yüzeylerin gerek makro gerekse de mikro düzeyde incelenmesi parçanın geçmişi, performans derecesi ve hasar oluşum mekanizmasına katkıda bulunan öğelerin belirlenmesi açısından önemlidir. Fraktografik etütler bu yönde yapılan çalışmalardır. Esasta kırılma süreci, çatlak oluşumu (atlak çekirdeklenmesi) ve çatlak büyümesi (atlak gelişmesi) etaplarından oluşur. Bu tür bir etüt için çatlak çekirdeklenme yörelerinin tespiti ve çatlak ilerleme nedenleri bir anlamda proses şartlarının tekrar gözden geçirilmesine kaynak teşkil edecektir (Karagöz vd. 2009).

Babayev ve ark.'ları (2005) %3 bakır içeren demir esaslı toz metal malzemelerin 1150 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dakika sinterleme süresi, koruyucu endotermik gaz atmosferinde ve değişik soğuk presleme basınçlarında elde edilmiş malzemelerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacıların yapmış oldukları incelemeler sonucunda, sürtünme katsayısı ve aşınma kayıplarının soğuk presleme basıncı değerinin, 400 N/mm<sup>2</sup>'dan 700 N/mm<sup>2</sup>'a çıkıldığında düşüğünü tespit etmişlerdir (Babayev vd., 2005).

Gülsoy ve arkadaşları (1999) %3 bakır katkılı demir tozuna karbon ilavesinin etkisini incelemişler ve karbonsuz numunelerde sertlik değeri yaklaşık 30 HRB iken, %1,25 karbon ilaveli numunelerde sertliğin 70 HRB değerine çıktığını bulmuşlardır

Çetinkaya ve arkadaşları (2004) ön alaşımlı demir tozu ve bakır katkılı demir tozu kompaktlarına karbon katkısının sinterleme sonrası özelliklere etkisini araştırmışlardır. %3 bakır ilave edilen demir tozuna ağırlıkça %1'e kadar değişik oranlarda karbon ilave edilerek, karışımlar  $500 \text{ N/mm}^2$  basınç altında çift etkili preste sıkıştırılmışlardır. Çalışmada %3 bakır içeren demir tozundan üretilen numunelerin karbon içeriği arttıkça sertliklerinin de arttığı tespit edilmiştir. Numunelerde artan karbon miktarı ile sertlik değerlerinin artmasının sebebi, ilave edilen karbonun sinterleme sırasında ostenit tanelerine difüzyonu ve soğuma sırasında perlit oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Perlit,  $\text{Fe}_3\text{C} + \alpha$  fazlarından meydana geldiğinden, yapıda bulunan sementit sertlik artışına neden olmuştur. Ayrıca sinterleme sıcaklığı bakırın ergime noktasının üzerinde yapıldığı için, bakırın sıvılaşması sonucu sıvı faz sinterlemesi gerçekleşmiştir. Burada, toz karışımına eklenen bakır, ferritik tane sınırlarında bulunurken, artan karbon miktarı ile sinterleme sonrası soğuma sırasında oluşan perlit içerisine doğru yayılmaktadır (Çetinkaya vd., 2004).

Yılmaz (2005),  $1200^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığı, 30 dakika sinterleme süresinde ve parçalanmış amonyak atmosferinde farklı oranlarda tozlar karıştırılarak toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş kompakt parçaların mekanik özelliklerine presleme basıncı değişiminin etkisini incelemiştir. Araştırmacı incelemelerinde aşağıda sıralanan bulgulara erişmiştir;

- Farklı toz karışım oranlarında ve farklı basınçlarda sıkıştırılan Fe-Cu-C toz metal kompakt malzemelerde presleme basıncı artışına paralel olarak sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değerleri artmakta olup, presleme basıncı arttıkça yoğunluk değerlerindeki artış yavaşlamaktadır. Sinterleme öncesi ve sonrası numunelerin yoğunluk değerleri arasındaki fark oldukça azdır.

- Kompakt malzemenin sertlik değerleri, içerisindeki bakır ve karbon miktarı arttıkça artmaktadır. Üretilen kompakt malzemelerin çekme mukavemet değerleri, presleme basıncının artması ve karışım içerisindeki bakır ve karbon miktarının belirli bir orana kadar yükselmesiyle artmakta ve bakır ve karbon miktarlarının belirli bir değerinden sonra azalmaktadır (Yılmaz, 2005).

Somunkıran ve Çelik (1999) toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Fe esaslı (Ni, Mo ve C ilaveli) toz karışımına Cu (%3, 4, 5, 6 ve 7 oranlarında Cu ilave ederek) katkısıyla üretilen kompaktların  $1120^\circ\text{C}$ 'de parçalanmış amonyak atmosferinde sinterlenmesi sonrası mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Artan bakır miktarı ile birlikte basma

mukavemetinin  $560,8 \text{ N/mm}^2$ 'den  $620,2 \text{ N/mm}^2$ 'ye yükseldiğini saptamışlardır. Ayrıca artan bakır miktarı ile sertlik değerinin  $87,4 \text{ HRB}$ 'den  $92,6 \text{ HRB}$ 'ye yükseldiğini tespit etmişlerdir (Somunkıran ve Çelik, 1999).

Turhan ve arkadaşları (2007), değişik oranlarda Ferromangan ve Ferrobor takviye ettikleri bakır matrisli kompoziti  $600$  ile  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  arasında farklı sıcaklıklarda sinterleyerek toz metalurjisi yöntemi ile üretmişlerdir. Bakır matris yapısı içerisine katılan takviye partikülü artışına bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığını ve sinterleme sıcaklığı artışına bağlı olarak çapraz kırılma dayanımının kısmen arttığını tespit etmişlerdir.

Somunkıran ve Özel (2006), toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Fe esaslı (Ni, Mo ve Cu ilaveli) toz karışımında, farklı sinterlenme sıcaklıklarının, aşınma direncine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada  $600 \text{ N/mm}^2$  basınç altında preslenen numuneler argon gazı atmosferinde  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  ve  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda 30 dakikalık sürelerde sinterlenmiştir. Fe esaslı toz karışımında sinterleme sıcaklığının artmasıyla sertlik değerinde artış ve aşınma miktarında azalma elde etmişlerdir. Yapıda Sıvı fazın oluşması ile ergiyen bakırın taneler arasında sıvı faz oluşturmaması, Cu'ın bağlayıcılık görevi görmesi ve tane içlerine doğru difüzyonu ile taneler arası bağı güçlendirmesiyle, aşındırıcıya karşı malzemeyi daha dayanıklı hale getirmiştir (Somunkıran ve Özel, 2006).

Xiong ve arkadaşları (2006) bakır esaslı uçak fren malzemelerinin üretiminde sinterleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisini incelemiş  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığa kadar artan sinterleme sıcaklığının yoğunluğu arttırdığını ancak aşınma davranışı gibi bazı mekanik özelliklerde değişimler olduğunu dile getirmişlerdir.

Ulutaş (2006) değişik oranlardaki Cu, FeCr ve FeMn alaşımlarının toz metalurjisi yöntemi ile üretimini yaparak  $750 - 800$  ve  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda sinterleme işlemi gerçekleştirmiş ve artan sinterleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada Sinterleme sıcaklığı arttıkça numunelerin dayanımlarının arttığını, tüm Numuneler içinde sinterleme sıcaklığı  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  olan numunelerin en iyi mekanik özelliklere sahip numuneler olduğunu tesbit etmiştir (Ulutaş, 2006)

Turhan ve arkadaşları (2009) bakır matris içerisine Ferromangan ve ferrokrom ilave ederek toz metalurjisi yöntemi ile üretilen kompozitin aşınma davranışı ve mekanik özelliklerini incelemişler ve kopma mukavemeti davranışlarının doğrudan takviye

partikülü tipi ve Metal matrisli Kompozitin sertliği ile doğru orantılı olduğunu dile getirmişlerdir.

Bütün bu araştırmalar, yüksek verimli üretim yöntemleriyle toz malzemeleri elde etmek, yukarıda gösterilen teknolojik yöntemler, tekrar preslemeler ve sinterlemeler, saf metalle emdirme, pahalı alaşım elementleriyle alaşımlama v.b. bir çok üretim için istenen talepleri karşıladığını göstermektedir. Bu amaçla tekniğin gelişimi açısından yeni, yüksek verimliliğe sahip yöntemler bulmak, malzeme bilimi için en önemli problemdir.

Gösterilen Literatür ışığında bu çalışmanın amacı, piyasada kullanılan ticari saf bakırın mekanik ve elektriksel özelliklerini düşük oranlarda takviye edilen bor alaşımları ile metal matrisli kompozit olarak üretimini gerçekleştirmek ve üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini incelemek bunun yanında elektriksel özelliklerindeki değişimi kaydederek bakır ve bor esaslı malzemelerin kullanım alanlarını genişletmek olacaktır.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 4.1. Malzeme

Bu çalışma toz metalürjisi ile üretilmiş FeB ilaveli bakır, alaşımlarının mekanik, elektrik ve mikro yapı özelliklerinin incelenmesi amacı ile yapılmıştır. Çalışmada ticari saflıktaki bakır tozuna %1-1,5-2-2,5-3-3,5 oranlarında FeB tozu karıştırılarak sabit basınç altında preslenmiştir. Numuneler değişik sıcaklıklarda ve sürelerde sinterlenmiştir. Elde edilen numunelerin mekanik, elektriksel özellikleri test edilmiş ve mikro yapıları karakterize edilmiştir.

Toz malzeme olarak aşağıdaki Tablo 4.1’de özellikleri verilen ortalama 35 µm boyutlarında bakır tozu ve ortalama 50 µm boyutlarında FeB tozları kullanılmıştır. Bu tozlar karıştırma, presleme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan bakır tozu Marmara Metal A.Ş. den elde edilmiş olup, ortalama 35 µm çapında ve küresel yapıya sahiptirler. FeB tozları ise Ulusal Bor Enstitüsü tarafından temin edilmiş ve Amerikan ASTM tarafından kabul edilen Ferro Bor sınıfları içinde B2 koduyla isimlendirilen Ferro Bor türevi olduğu bildirilmiştir. Tablo 10’da ilgili Ferro bor sınıflarına ait muhtevalar verilmiştir. Elde Edilen Ferro Bor granül yapıda bulunduğundan, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan toz eleklerinden geçirilerek ortalama 50 µm boyutunda elenen tozlar kullanılmıştır.

**Tablo 10. Amerikan ASTM Tarafından Kabul Edilen Ferro Bor sınıfları ve kompozisyonları (Ağırlık Yüzdesi):**

| SINIF | %B<br>(min.-max.) | %C<br>(maximum<br>) | % Si<br>(maximum) | % Al<br>(maximum) | %Fe<br>(Kalan) |
|-------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| A1    | 12.0-14.0         | 1.5                 | 4.0               | 0.5               |                |
| A2    | 12.0-14.0         | 1.5                 | 4.0               | 8.0               |                |
| B1    | 17.5-19.0         | 1.5                 | 4.0               | 0.5               |                |
| * B2  | 17.5-19.0         | 1.5                 | 4.0               | 8.0               |                |
| C1    | 19.0-24.0         | 1.5                 | 4.0               | 0.5               |                |
| C2    | 19.0-24.0         | 1.5                 | 4.0               | 8.0               |                |

\*Deneyisel çalışmada kullanılan Ferrobör numunesinin sınıfıdır.

Kullanılan tozlar ve blok numunelerin hassas tartı işlemleri Precisa marka 1/100000 hassasiyetindeki terazide yapılmıştır. Karıştırma işlemleri için ise Turbula marka mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırma süresi ortalama olarak her bir numune tozu için 1 saat

olarak tutulmuştur. Numunelerin kalıpta preslenmesi işlemi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan masaüstü hidrolik preste 600 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemleri, atmosfer denetimli tüp fırında gerçekleştirilmiş olup, koruyucu gaz olarak saf argon gazı kullanılmıştır. Blok numunelerin çapraz kırılma testleri TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Instron Marka Series IX Automated Materials Testing System Çekme basma test cihazında yapılmıştır. Sertlik testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Instron Wolpert Diatestor 7551 Ünlversal sertlik ölçme cihazı kullanılmış, Wickers sertlik yöntemi ile numunelerin sertlik değlerleri belirlenmiştir. Metalografik incelemeler için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Jeol Marka JSM-6060LV model SEM cihazı kullanılmış, optik mikroyapı incelemeleri ise yine aynı laboratuardaki Leica marka mikroskopta yapılmıştır.

## **4.2 Yöntem**

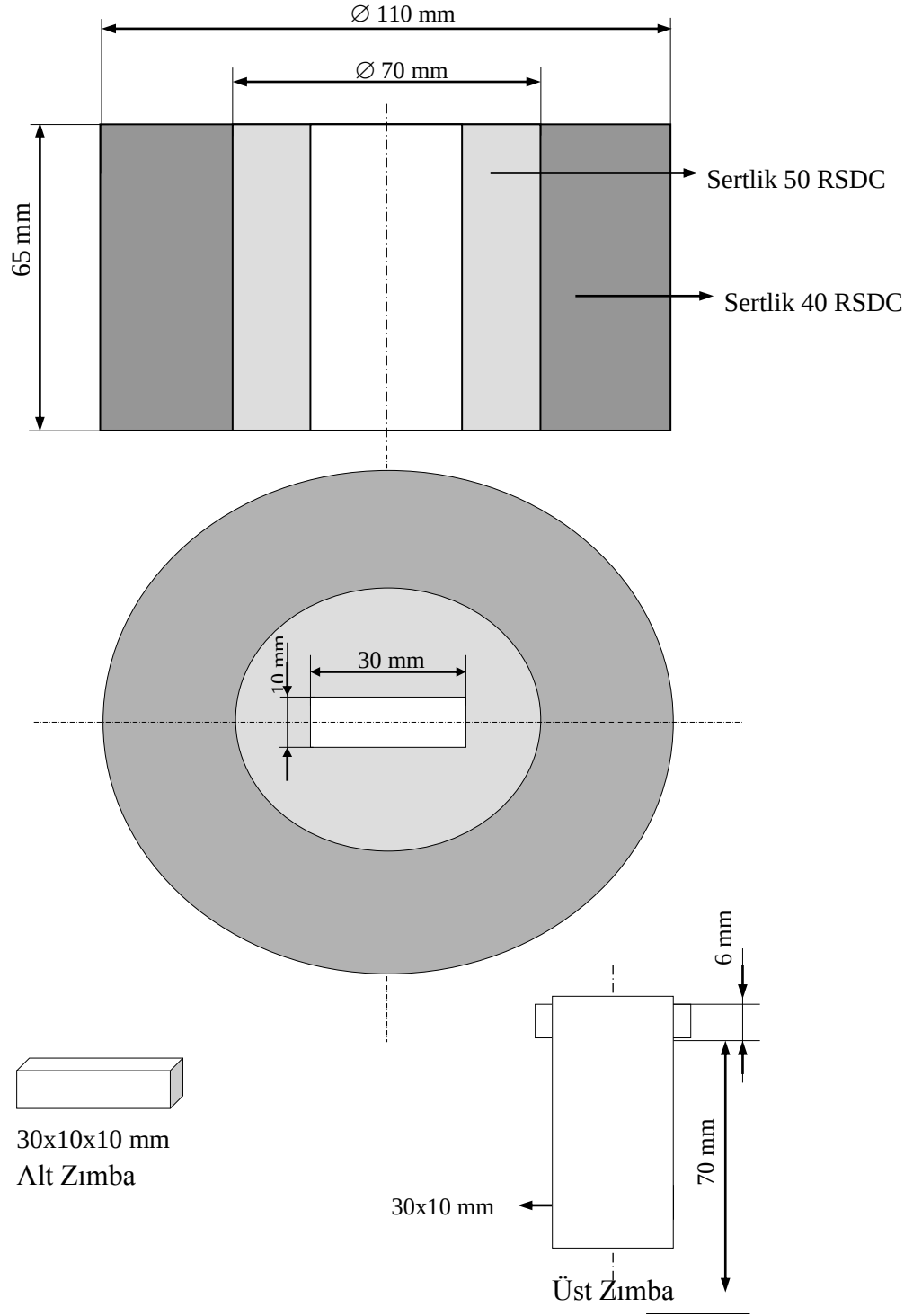
### **4.2.1. Toz Malzemelerin Hazırlanması**

35 µm boyutundaki bakır ve 50 µm boyutundaki FeB tozları homojen bir karışım elde edebilmek için Turbula marka mekanik karıştırıcıda 1 saat süre ile karıştırılmıştır. Her karıştırma işlemi için silindir bir kab içine toplam 300 gr karışım toz kullanılmıştır.

### **4.2.2 Presleme**

Şekil 20’de gösterilen 30×10×10 mm ebatlarındaki metalik kalıp içersine yerleştirilen karışım halindeki tozlar hidrolik pres yardımı ile 15 ton basınç altında tek yönlü soğuk presleme yöntemi ile preslenmiştir.

Presleme işlemi kalıpta tek eksenli olarak, metal toz kalıba döküldükten sonra, üst baskı plakası yardımı ile kapatılmış ve dikey yönde basılmıştır. Kalıp duvarlarının aşınma problemini ve sürtünmeyi azaltmak için kalıp yüzeyleri alkolle sıvılaştırılmış çinko asetat ile yağlanmıştır.



Şekil 20. Soğuk presleme numune kalıbı

**Tablo 11. Deneysel çalışmada kullanılan numunelere ait Cu-FeB oranları**

| Numune Numarası | Cu oranı (%) | FeB Oranı (%) | Sinterleme Sıcaklığı (°C) |
|-----------------|--------------|---------------|---------------------------|
| C01             | 99           | 1             | 800                       |
| C02             | 99           | 1             | 850                       |
| C03             | 99           | 1             | 900                       |
| C04             | 98,5         | 1,5           | 800                       |
| C05             | 98,5         | 1,5           | 850                       |
| C06             | 98,5         | 1,5           | 900                       |
| C07             | 98           | 2             | 800                       |
| C08             | 98           | 2             | 850                       |
| C09             | 98           | 2             | 900                       |
| C10             | 97,5         | 2,5           | 800                       |
| C11             | 97,5         | 2,5           | 850                       |
| C12             | 97,5         | 2,5           | 900                       |
| C13             | 97           | 3             | 800                       |
| C14             | 97           | 3             | 850                       |
| C15             | 97           | 3             | 900                       |
| C16             | 96,5         | 3,5           | 800                       |
| C17             | 96,5         | 3,5           | 850                       |
| C18             | 96,5         | 3,5           | 900                       |
| C19             | 100          | 0             | 800                       |
| C20             | 100          | 0             | 850                       |
| C21             | 100          | 0             | 900                       |

#### 4.2.3 Sinterleme

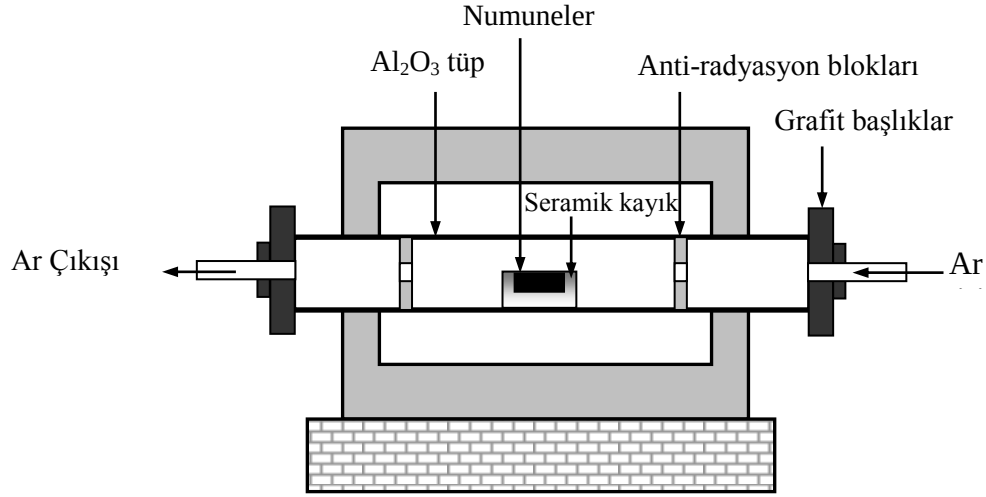
Preslenmiş numunelerde toz parçacıklarının yüksek yüzey enerjilerinin ortadan kaldırılarak parçacıklar arasında tam ve mükemmel bağlar oluşturulması amacı ile sinterleme işlemi yapılmıştır.

Numuneler 800-850-900 °C sıcaklıklarda 1 er saat süre ile sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Böylece değişen sıcaklıkların malzeme davranışlarına olan etkisi de incelenmiştir.

Sinterleme işlemi şekil 21’de şematik olarak gösterilen daire kesitli atmosfer korumalı tüp fırında gerçekleştirilmiştir. Fırına indirgeyici gaz olarak argon gazı verilmiş ve oksijen girişini engellemek amacı ile fırın kapakları sıvı conta ile sıvanmıştır.

Sinterleme işlemi üç farklı sıcaklık aşamasından oluşmaktadır. Bunlar ön sinterleme, sinterleme ve soğuma bölgeleridir. Sinterleme işleminde, çalışılan fırın tipi ve yapısı ile malzeme uyumu dikkate alınarak 1/20 dakika/°C ısıtma hızı seçilmiştir.

Sinterleme bölgesinde sıcaklık olarak 3 farklı (800-850-900 °C) sıcaklık seçilmiş ve her bir sıcaklıkta numuneler 1 saat süre ile sabit tutulmuştur.



Şekil 21. Sinterleme de kullanılan tüp fırının şematik gösterimi

#### 4.2.4 Yoğunluk Ölçümleri

Yoğunluk ölçümü preslenme işlemleri bitmiş numunelerin sinterleme öncesinde ve sonrasında yapılmıştır. Ölçümler için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında bulunan 0,1 hassasiyetindeki Sartorius marka terazi kullanılmıştır. kuru ve sulu ortamda tartılan numunelerin, Arşimet formülü yardımıyla yoğunlukları hesaplanmıştır (Cinici, 2012).

$$\rho = \frac{m(g)}{m(g) - m_s(g)} = (g/cm^3)$$

$\rho$  = Numune yoğunluğu ( $g/cm^3$ ),  
 $m(g)$  = Numunenin havadaki ağırlığı (g),  
 $m_s(g)$  = Numunenin su içerisindeki ağırlığı (g)

#### 4.2.5 Sertlik Ölçüm Deneyleri

Deney numunelerinin yüzey sertlik değerleri, çapraz kırılma deneyi öncesinde dijital ekran sertlik ölçüm cihazında elde edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde Wickers



zımparalanmış daha sonrada parlatma keesinde 3 µm elmas pasta ile parlatılmıştır. Daha sonra hazırlanan numune yüzeyleri % 8 amonyum hidroksit ve % 8’lik bakır klorür ile yaklaşık olarak 20 saniye süreyle dağlanmıştır. Numuneler üzerindeki optik mikroskop alışmaları Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, metalografi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

#### **4.2.8 İletkenlik Ölçümleri**

Elektrik iletkenliği testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü İletkenlik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Elektrik iletkenliği testleri için numunelere oda sıcaklığında farklı gerilim değerleri uygulanarak ortaya çıkan voltaj ve direnç değerleri elde edilmiştir. Artan sinterleme sıcaklığının malzemelerin iletkenlik değerlerinde oluşturduğu değişim miktarı tespit edilmiş ayrıca takviye partikülü oranına bağlı olarak elde edilen iletkenlik değerlerindeki değişim oranları da belirlenmiştir.

#### **4.2.9 X Ray Analizleri**

XRD sistemi; çoğunlukla ağır elementlerden oluşan, katı anorganik ve kristalin maddelerin araştırılmasına uygun bir yöntemdir. Yöntem, süper iletkenler, seramikler, metaller, alaşımlar, katı çözeltiler, heterojen katı karışımlar, koroziif maddeler, elik, kaplama malzemeleri, maden analizleri, toprak analizleri, safsızlık depo edilmiş yarı iletkenler, böbrek ve mesane tasları, bazı adli konularda, bazı boyar maddeler, çimentolar, doğal veya yapay mineraller, herhangi bir malzemenin içerdiği bileşik veya elementlerin tayini, inorganik polimerler, faz diyagramlarının ve faz dönüşümlerinin araştırılması, bazı kristalin veya amorf karmaşık bileşiklerinin incelenmesi gibi birçok konuda yaygın kullanım alanına sahiptir (Durmuş, 2006)

Numunelere ait XRD analizleri Fırat Üniversitesi Mühendilik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan X Ray Difraktometre Cihazında yapılmıştır. Bu yöntem numunelerin yüzeylerine gönderilen x ışınlarının kırınım açıları alınarak numune kompozisyonunda bulunan element ve bileşikleri belirlemektedir.

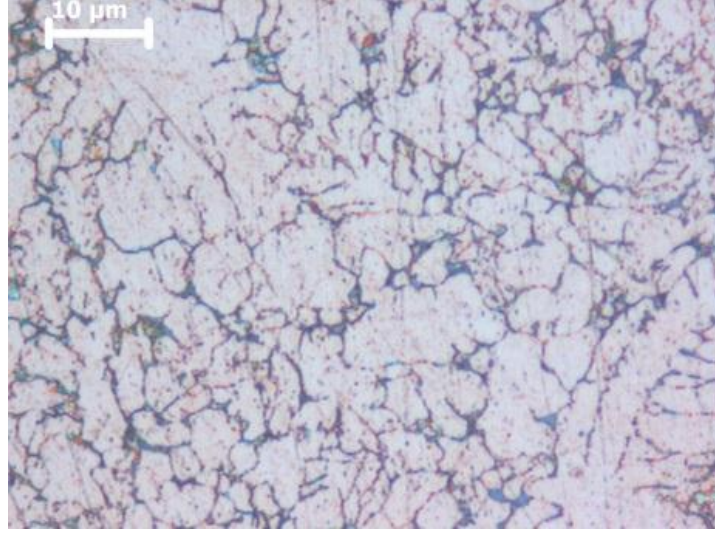
## 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalarda, Cu matris içerisine %1-1.5-2-2.5-3-3.5 oranlarında Ferrobor ilavesi yapılarak mikroyapı, SEM, XRD, yoğunluk, sertlik, çapraz kırılma, elektrik iletkenlik özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sırası ile tartışılmıştır.

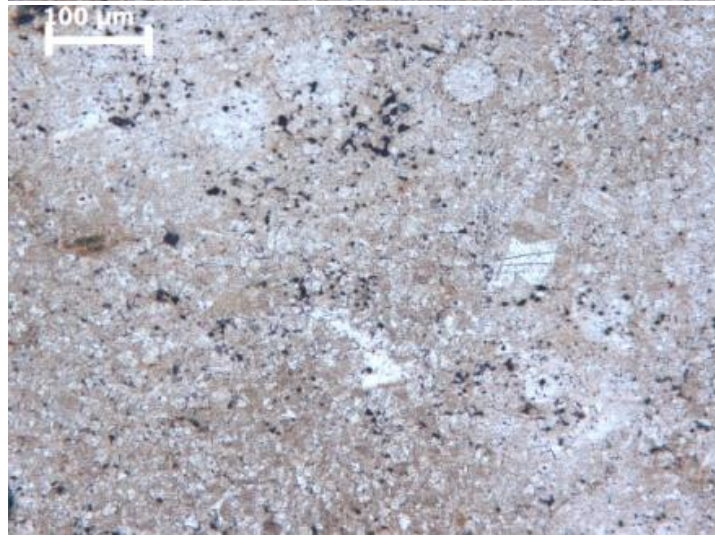
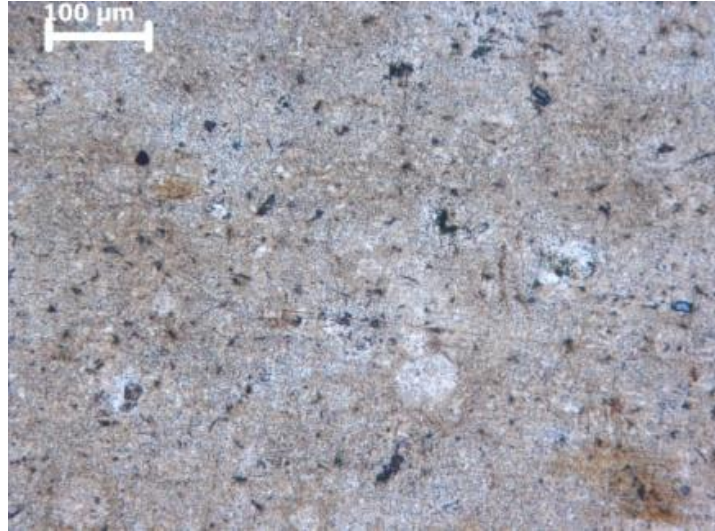
### 5.1. Mikroyapı Sonuçları (Optik) ve Tartışma

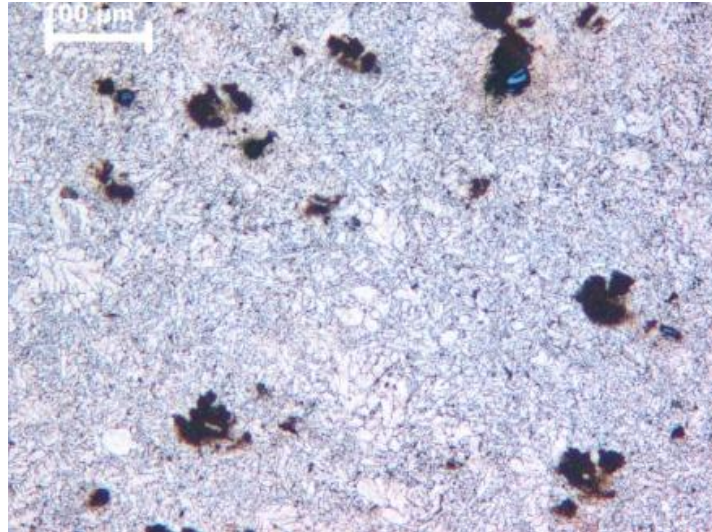
Malzemelerin özellikleri, malzemelere uygulanan işlem ve bu işlem sonucu yapılarında meydana gelen yapısal değişiklik sonucu oluşmaktadır. Malzemelerin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişikliği açıklamak için malzemelerin yapılarındaki değişikliği bilmek gerekmektedir. Bu sebeple içerisine FeB ilave edilmemiş numune (Şekil-23) ile içerisine %1-1.5-2-2.5-3-3.5 oranlarında FeB ilave edilmiş ve 800, 850 ve 900 °C’de sinterlenmiş numunelere ait mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 24’te sırası ile verilmektedir.

Şekil 24 incelendiğinde 800, 850 ve 900°C sıcaklıkta sinterlenen ve %1,2,3 FeB içeren Cu matrisli kompozitin mikroyapı resimleri karşılaştırılmıştır. Mikroyapı resimleri incelendiğinde, 800°C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde, yapı içerisinde oluşan gözeneklerin boyutlarının büyük olduğu ve karmaşık şekilde olduğu görülmüştür. Sinterleme sıcaklığının 850°C’ye çıkarılmasıyla gözenek boyutlarının küçüldüğü ve gözeneklerin toparlanarak eliptik yapı gösterdiği tespit edilmiştir. 900°C sinterleme sıcaklığı ise gözeneklerin daha da küçülmesine ve gözenek şekillerinin küreselleşmesine neden olmuştur. Ayrıca Şekil 24’te verilen mikro yapı resimlerinde, 800, 850 ve 900°C sinterleme sıcaklıklarında Cu içerisine ilave edilen FeB parçacıklarının homojen dağılım sergilediği görülmüştür. Cu içerisine ilave edilen FeB parçacık oranının artması gözeneklilik oranının artmasına neden olmuştur. Artan FeB ilavesinin öngörüldüğü poroziteyi artırmasının nedeninin Cu karışımı içerisinde sıkıştırılabilirliği düşük olan sert takviye partikülü toz miktarının, parçacık boyutu farkının artışıyla birlikte karışımın genelinde de sıkıştırılabilirliği artırması olduğu düşünülmektedir.

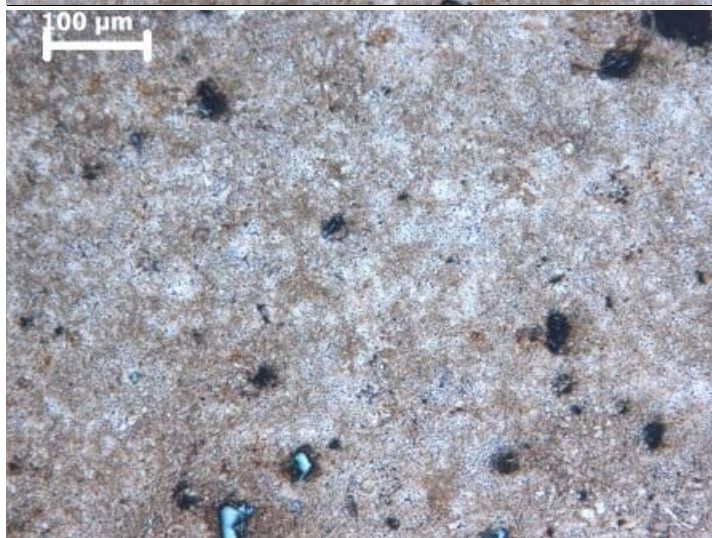
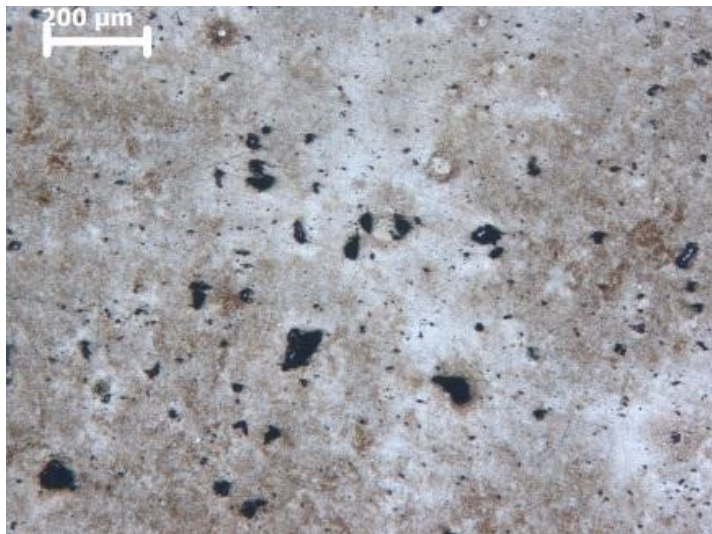


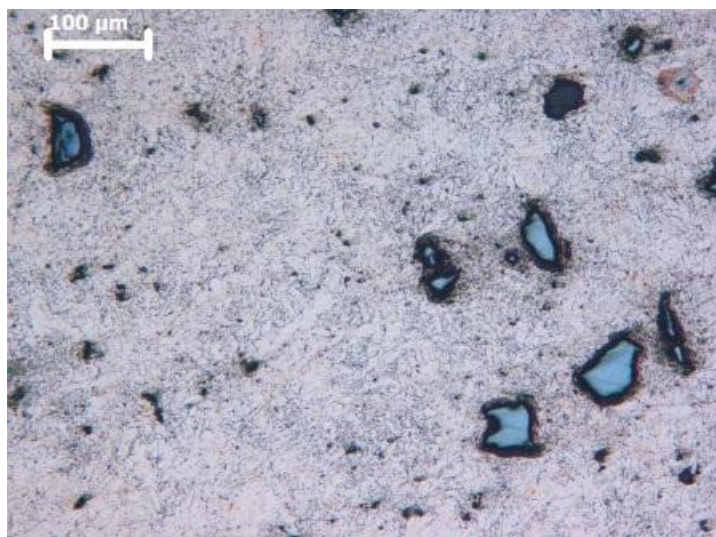
Şekil 23. % 100 Cu 850 C sinterleme sıcaklığına sahip numune



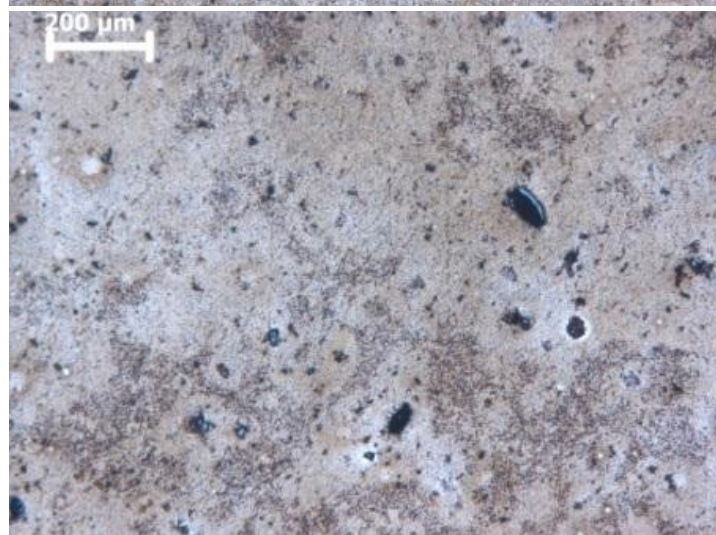
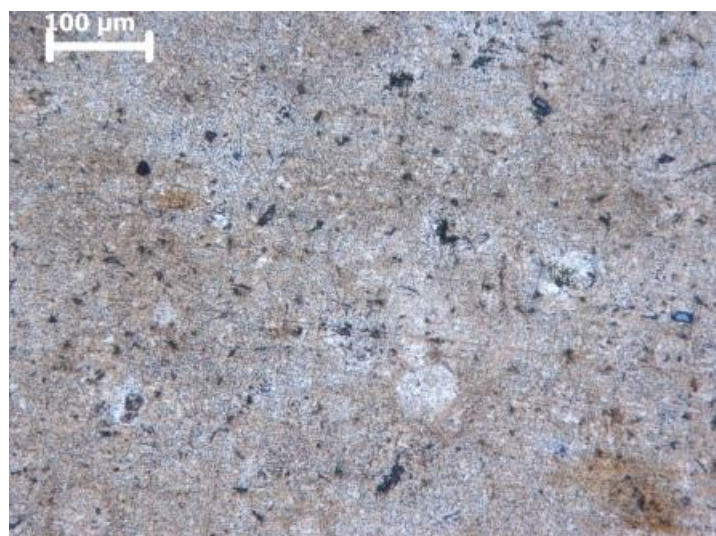


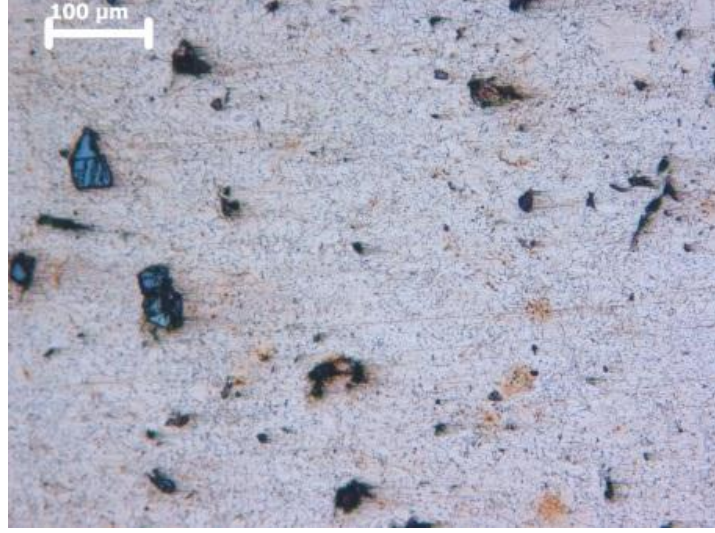
a)





b)





c)

**Şekil 24. Sinterleme sıcaklığına bağlı optik mikroyapı değişimleri grafiği a)%1 FeB Takviyeli 800-850-900 °C sinterleme b)% 2 FeB takviyeli 800-850-900 °C sinterlenmiş numuneler, c) %3 FeB takviyeli 800-850-900 °Csinterleme sıcaklığına sahip numuneler,**

Şekil 24 a,b,c incelendiğinde Cu matris içinde FeB partiküllerinin homojen dağılımı gözlenmiştir. Takviye partikülü miktarının artışına bağlı olarak yapı içinde artan FeB oranı tane sınırlarında da aynı oranda artmaktadır. Bu artış nedeniyle blok numunenin gevrekliği de artmıştır.

Bununla birlikte Artan FeB oranı mikroyapıda da görüldüğü üzere partikül taneciklerinin çevrelerinde çoğalarak bakır içindeki sünekliğin azalmasına neden olmuştur.

Yapılan optik mikroyapı incelemelerinde toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş ticari saflıktaki bakır numunede sinterleme sıcaklığı mikroyapıda fark edilir bir değişikliğe neden olmadığı için sadece 850 °C sinterlenmiş numunenin mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Bu durum Şekil 23'te görülmektedir.

Mikroyapısal karakterizasyon söz konusu olduğunda ilk olarak aynı büyütme oranlarında farklı bileşimlere sahip numunelerin mikroyapıları incelenecek olursa;

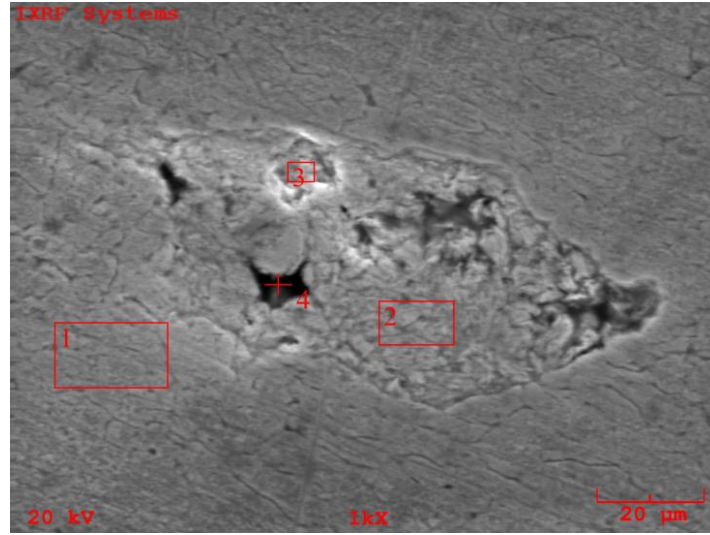
1. a) 800 °C'de sinterlenen numunelerin gözeneklik dağılımının düzenli olduğu ve takviye partikülü çevresinde biraz daha geniş bir dağılım gösterdiği açıkça Şekil 24'te görülmektedir.  
b) 850 °C da sinterlenen numuneler söz konusu olduğunda sinterleme sıcaklığının artışına bağlı olarak gözeneklerin birleştiği ve küreselleşme eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır Şekil 24'te farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin mikroyapı resimleri verilmiştir.

c) Sinterleme sıcaklığının 900 °C olarak seçildiği numuneler incelendiğinde yüksek ısı girdisi etkisi daha net bir biçimde sonuçlar ortaya koymuştur. Optik mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde porozitelerde birleşme ve küreselleşme eğilimi göstermişlerdir. Küreselleşerek birleşen porozitelerin olduğu aynı zamanda takviye partikülü çevresindeki porozite miktarının da azaldığı gözlenmektedir. Artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak poroziteler küreselleşerek birleşme eğilimi göstermektedirler. Aynı zamanda porozite ebatları küçülmekte böylece malzeme içerisinde yoğunluk artışına sebep olmaktadır. Bhattacharyya ve arkadaşları yaptıkları çalışmada da gözenekliliğin daha çok kompozit malzeme içerisinde bulunan takviye parçacıkları etrafında oluşmasından dolayı takviye partikül oranının artışıyla birlikte gözenekliliğinde arttığını tespit etmiştir (Bhattacharyya ve diğerleri 2008).

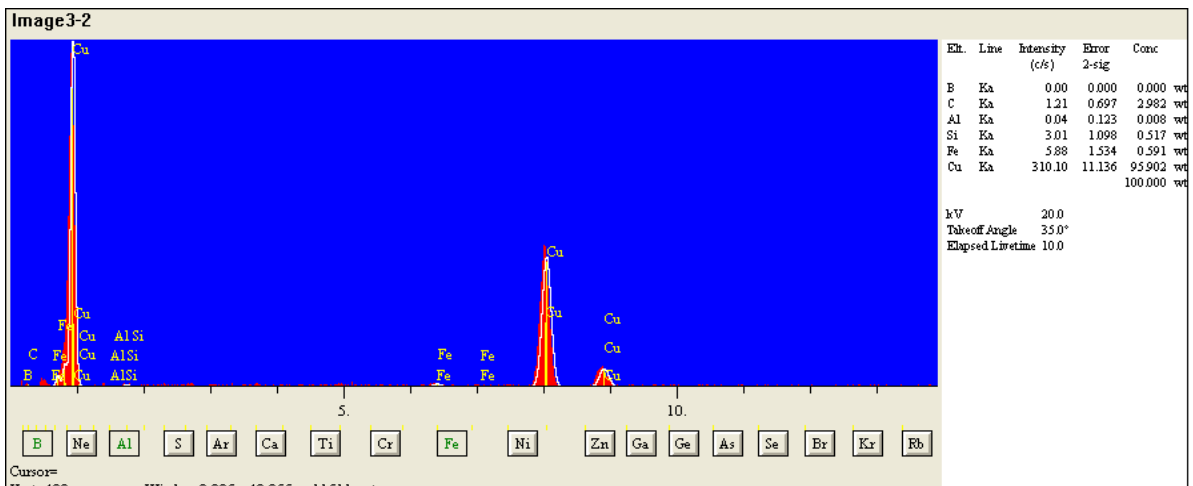
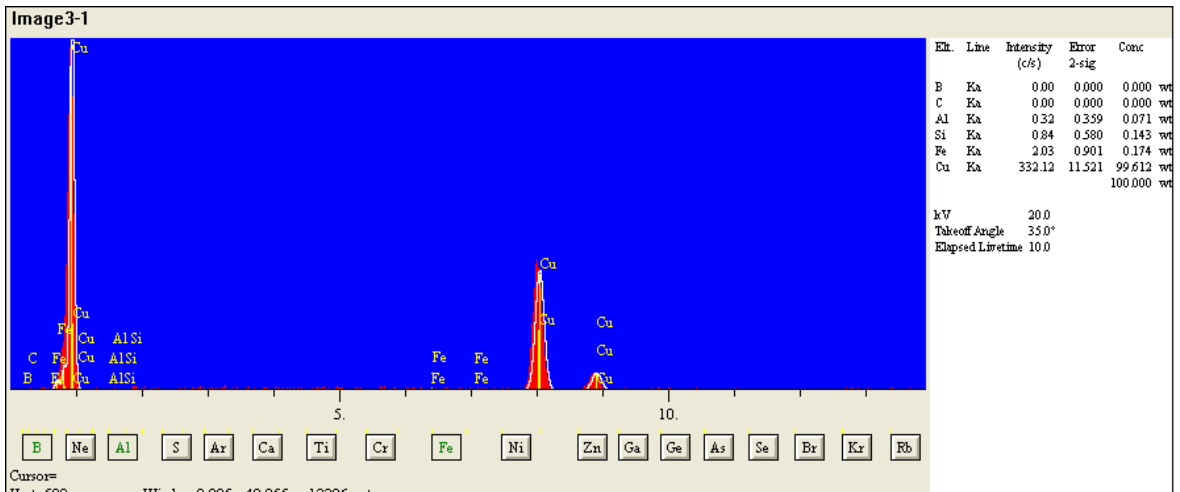
2. Artan takviye partikülü miktarı poroziteleri arttırarak malzemede beklenildiği gibi yoğunluk düşüşü sağlamaktadır. Ancak artan sinterleme sıcaklığı yoğunluk artışına neden olmaktadır. Dolayısı ile takviye partikül oranı-sinterleme sıcaklığı ayarlanarak porozite miktarı ve yoğunluk istenilen duruma göre arttırılabilmekte ve azaltılabilmektedir.
3. Mikroyapılar incelendiğinde sinterleme sıcaklığı artışına bağlı olarak tanelerin büyüdüğü ve büyüyen tanelerin poroziteleri azalttığı görülmüştür. Çünkü sıcaklık artışı partiküllerin difüzyonunu arttırarak büyümelerine porozitelerin birleşerek küçülmelerine neden olmuştur.

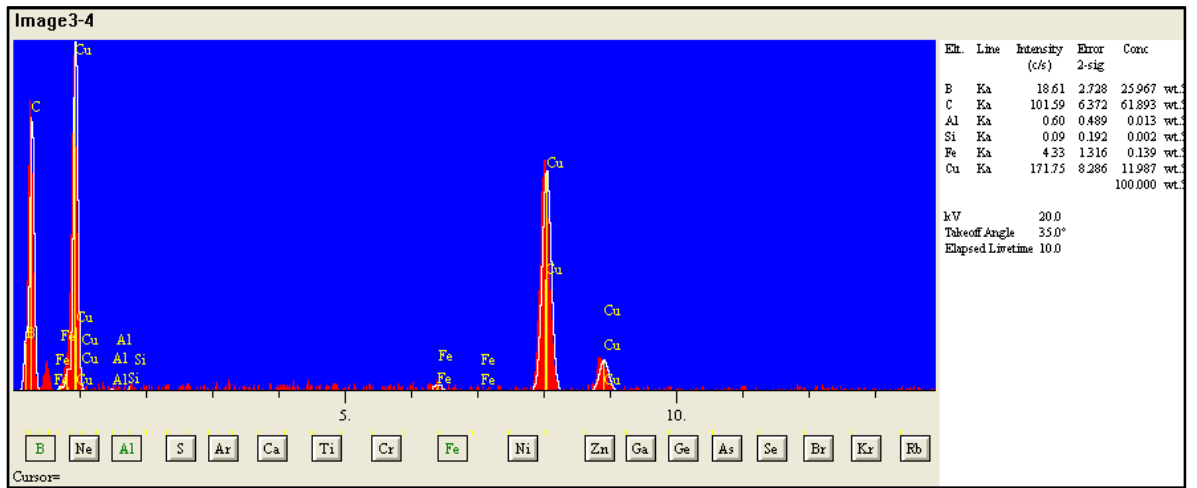
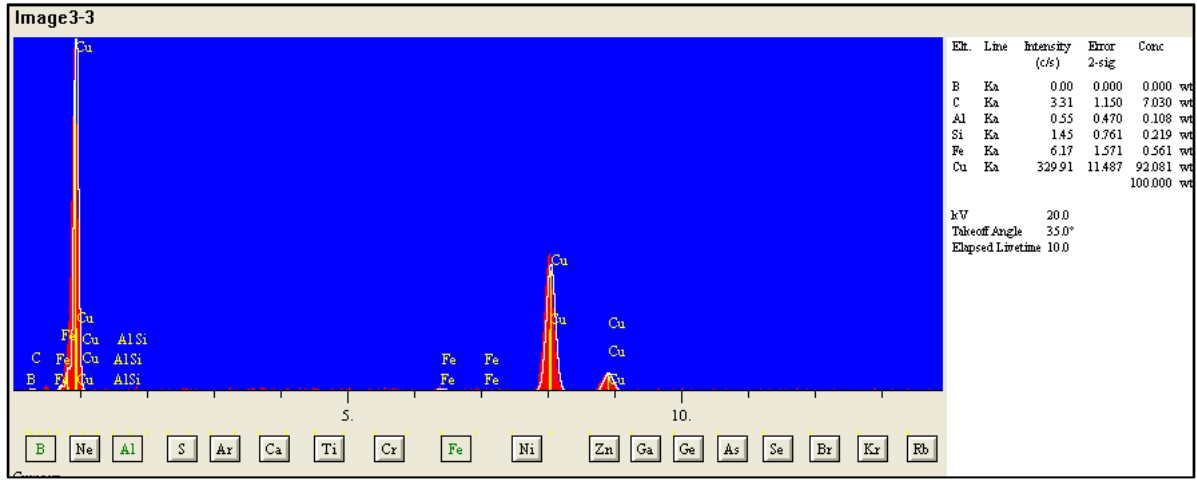
## 5.2 SEM Sonuçları ve Tartışma

Ticari saflıktaki bakır malzeme içerisine ilave edilen FeB takviye elemanlarının sinterleme sonrası dağılım ve yapı içerisindeki morfolojilerini incelemek amacı ile %1 takviye partikül içeren 800, 850 ve 900 °C sinterlenmiş numunelerin SEM görüntüleri incelenmiştir. Ayrıca görüntüler üzerinden EDS analizleri alınmıştır. Bunlara ilaveten artan takviye partikülü oranının yapı içerisindeki etkilerinin de incelemek amacıyla % 2.5-3-3.5 takviye partikül oranlarına sahip numunelerin sadece 850 °C'deki SEM görüntüleri ve EDS analizleri alınmıştır.

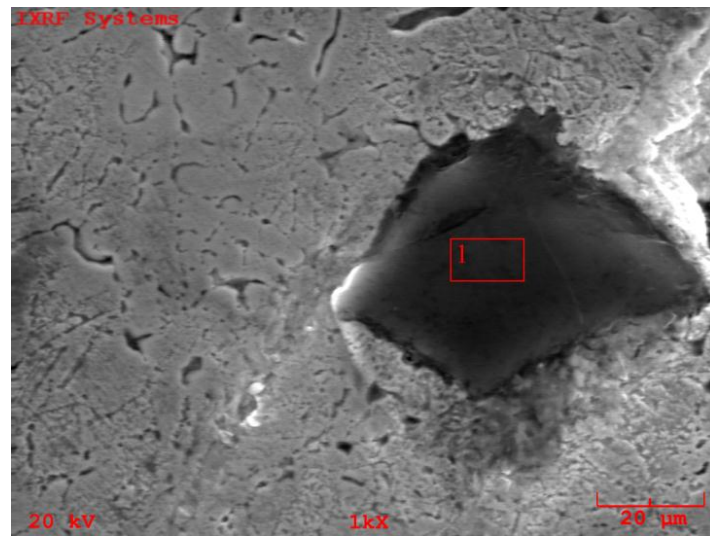


Şekil 25. %1 FeB takviyeli 800 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü

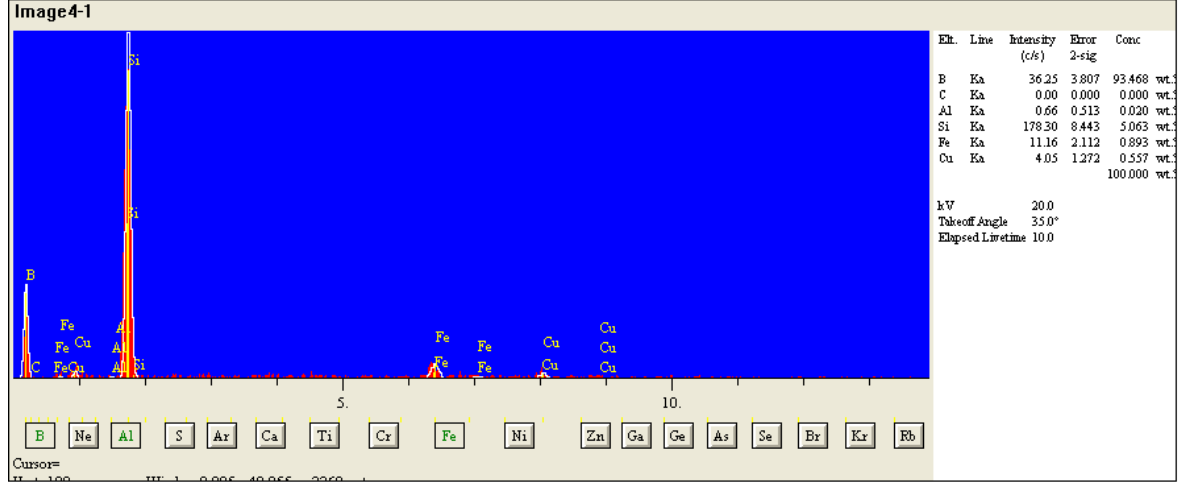




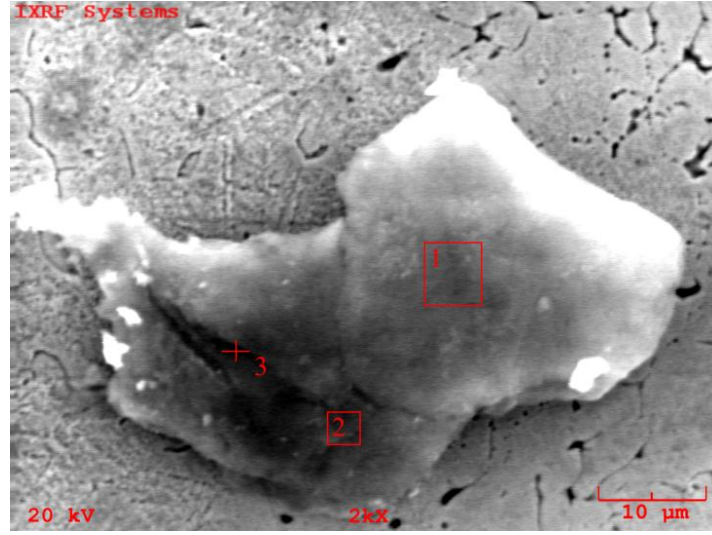
Şekil 26. %1 FeB takviyeli 800 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri



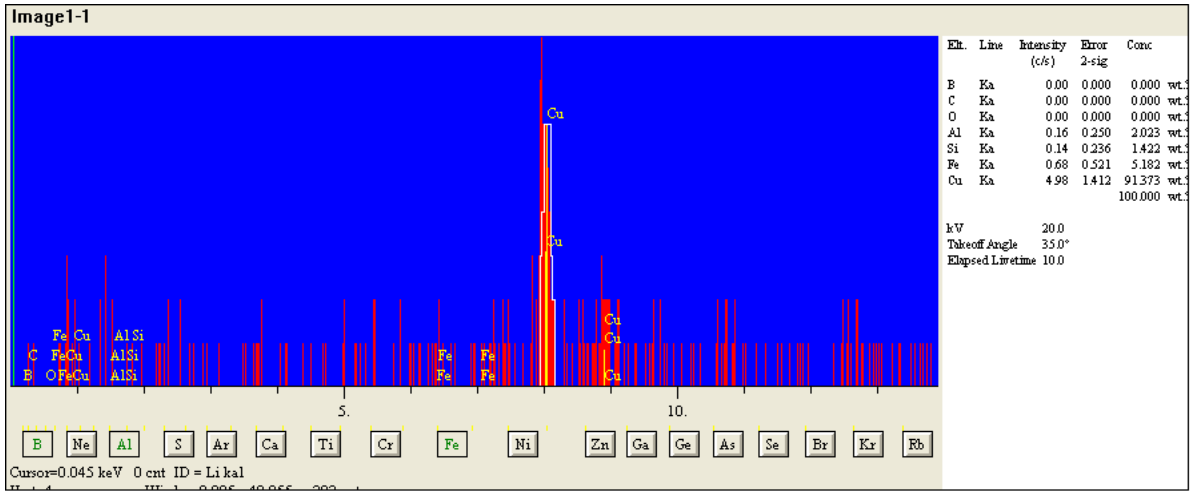
Şekil 27. %1 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü

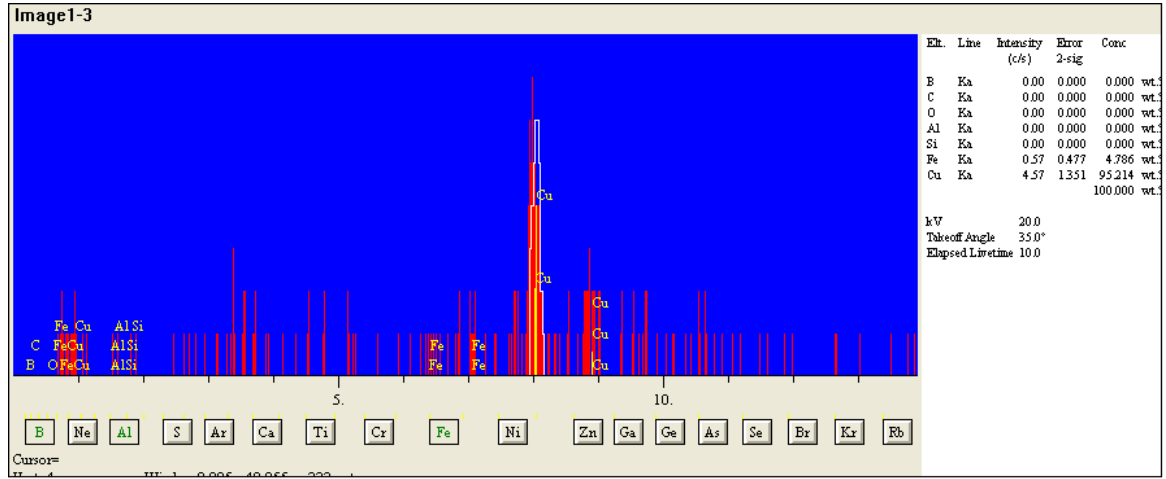
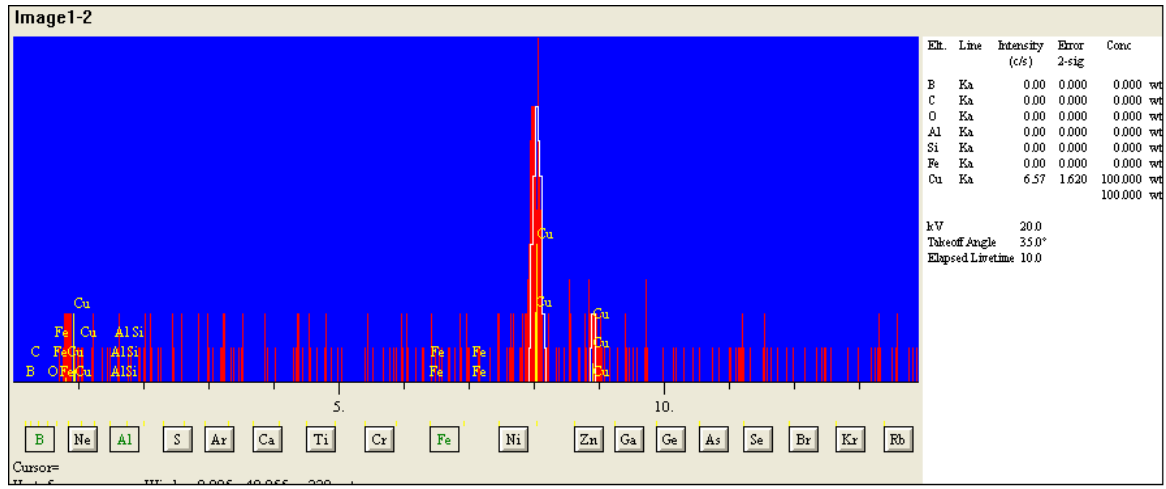


Şekil 28. %1 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizi

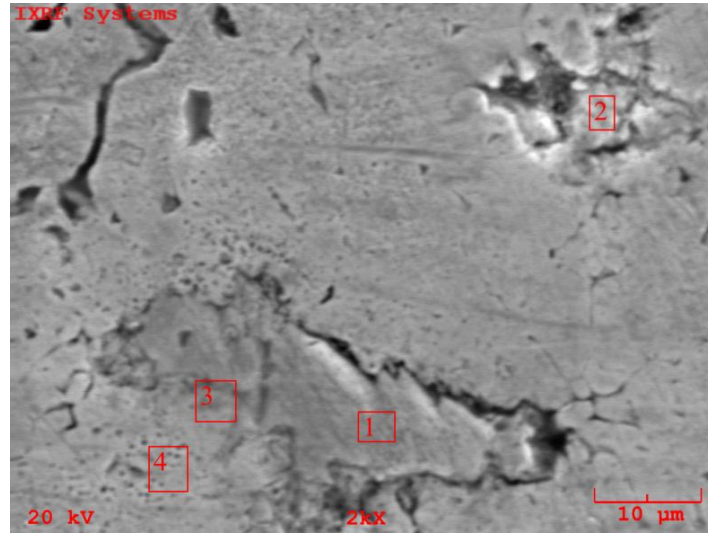


Şekil 29. %1 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü

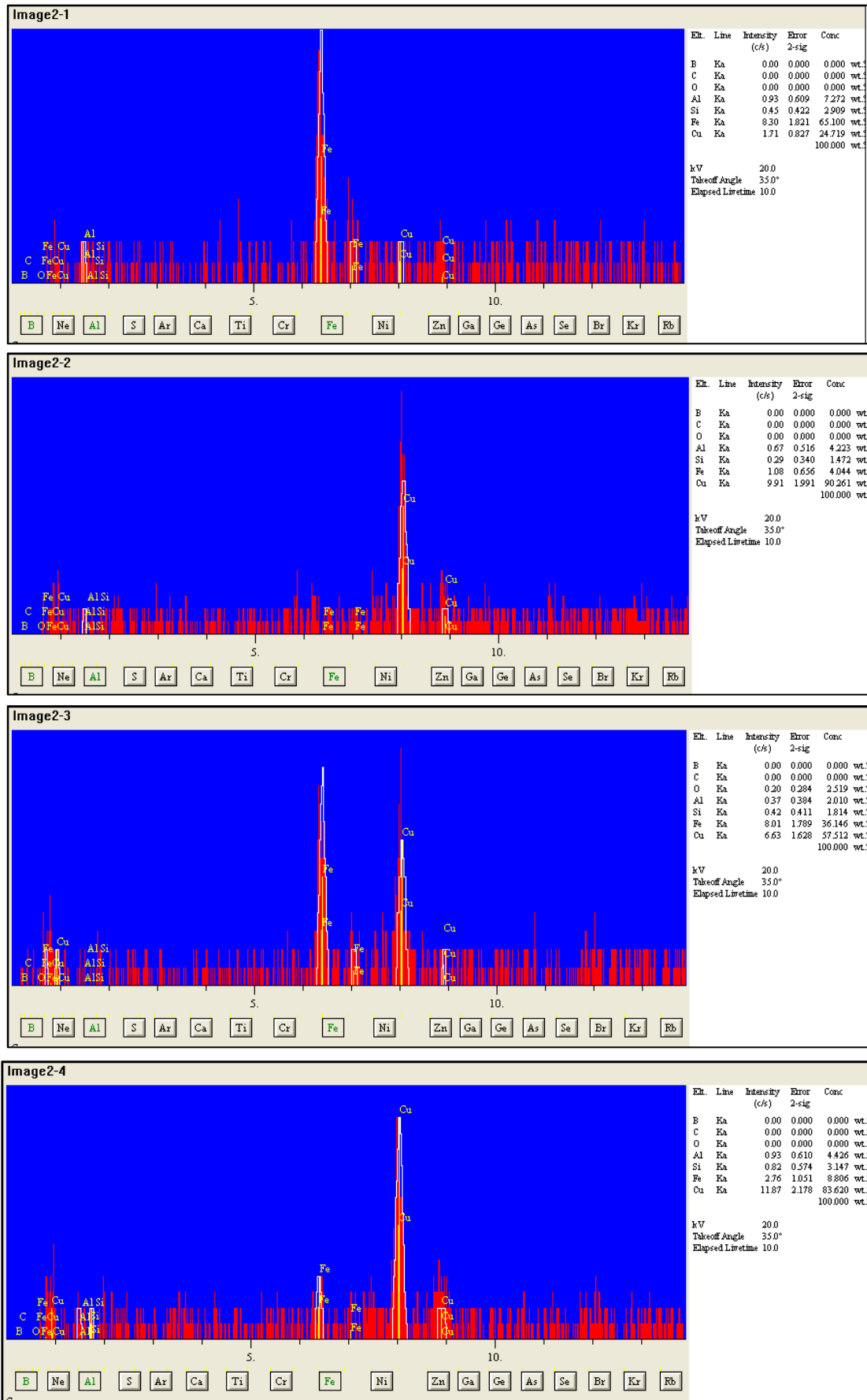




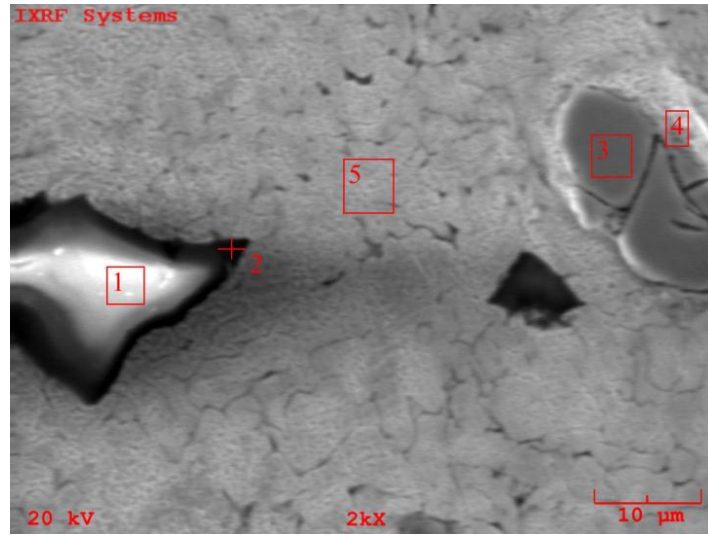
Şekil 30. %1 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri



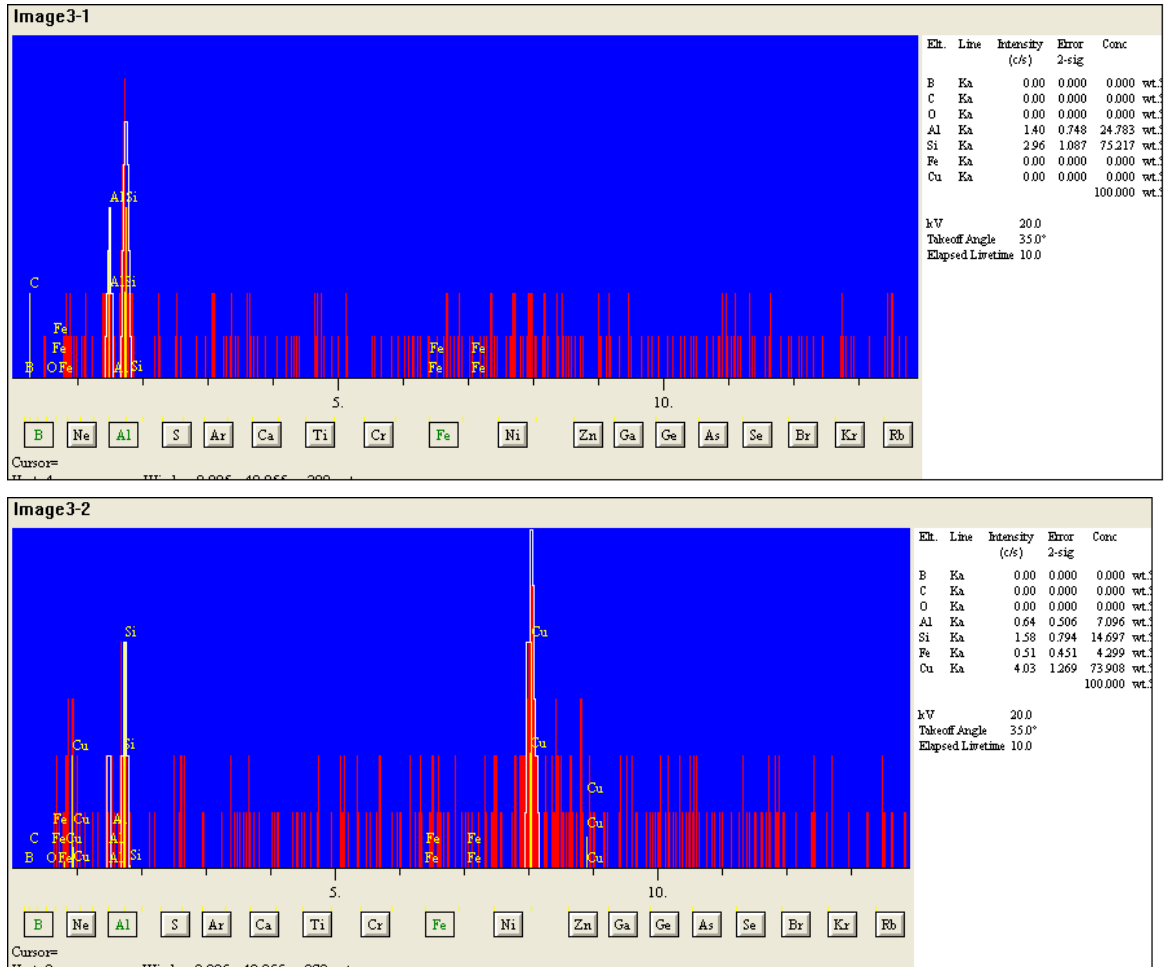
Şekil 31. %1 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü

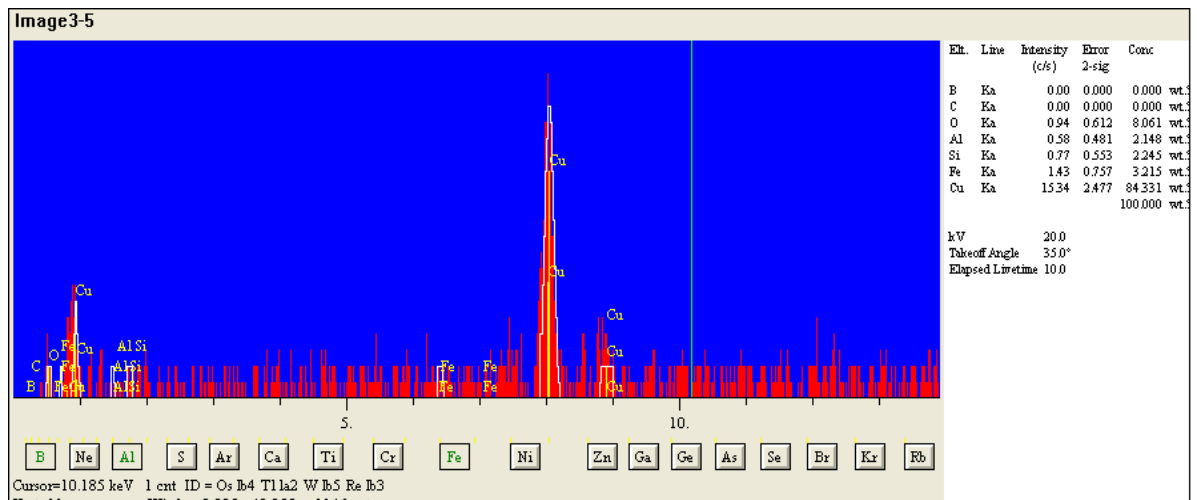
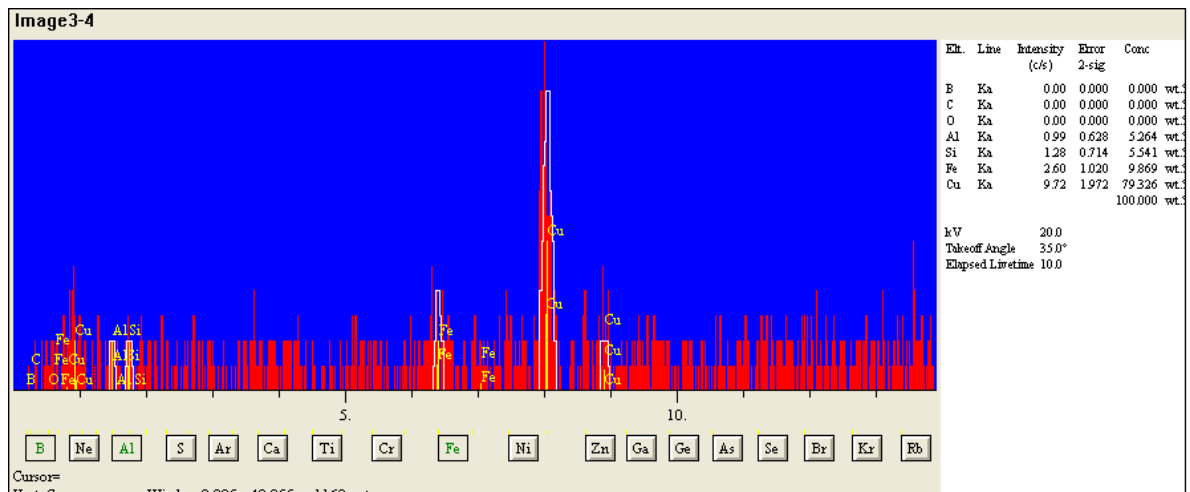
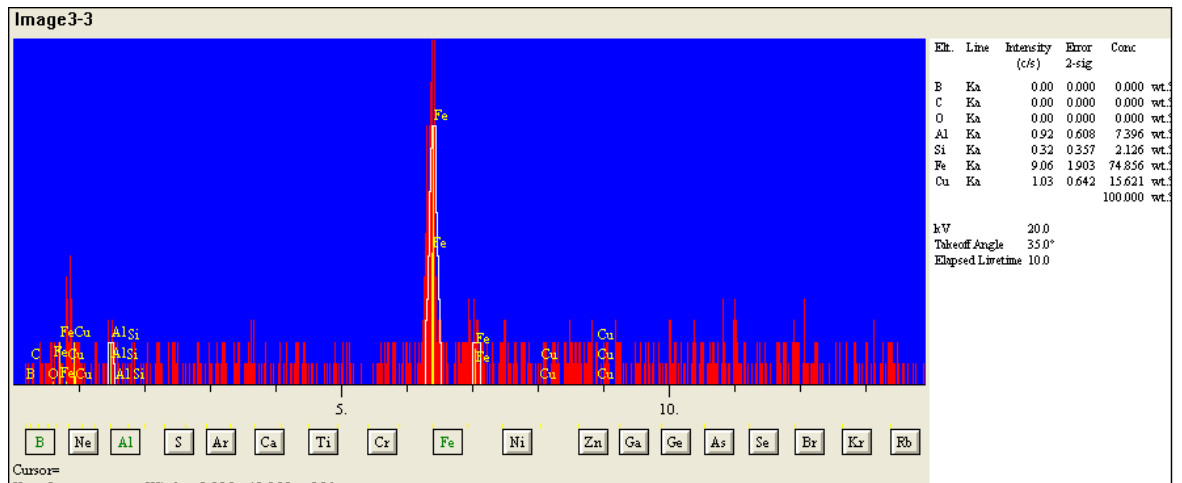


Şekil 32. % 1 FeB takviyeli Şekil 31 de SEM görüntüsü verilen numuneye ait EDS analizleri

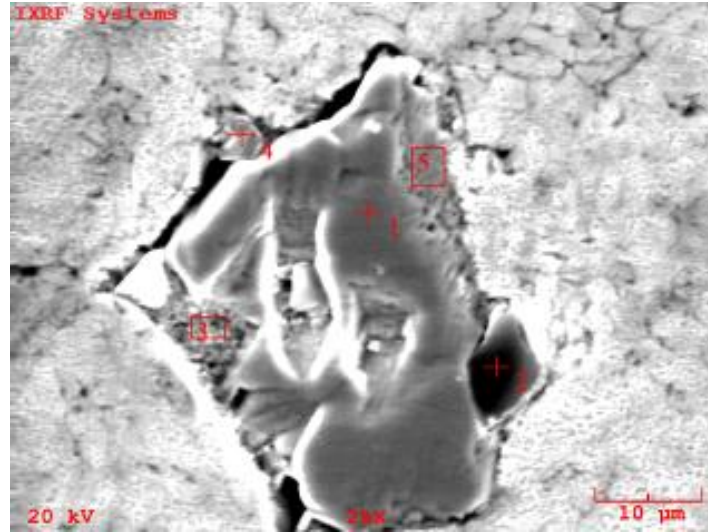


Şekil 33. %2.5 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü

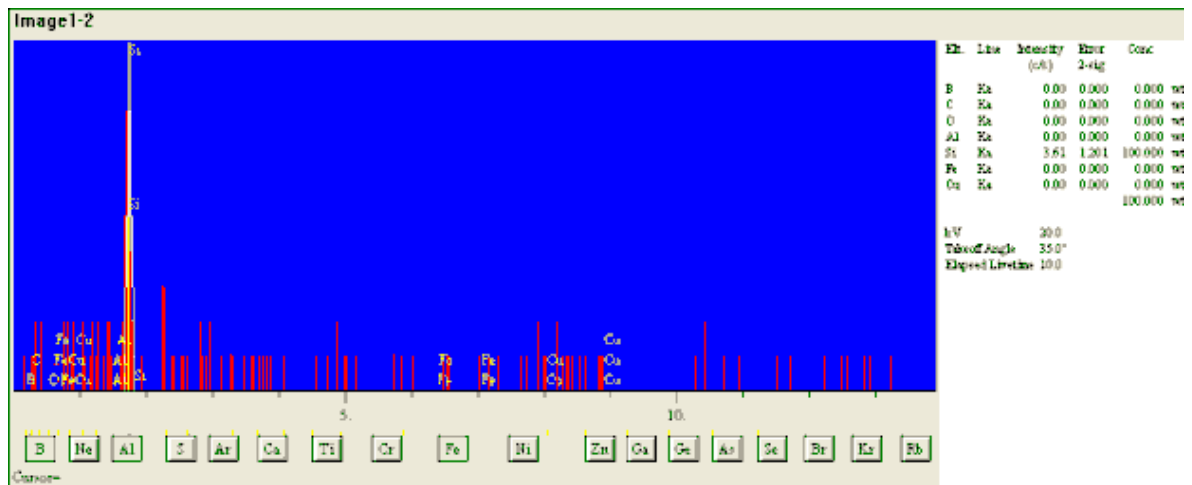
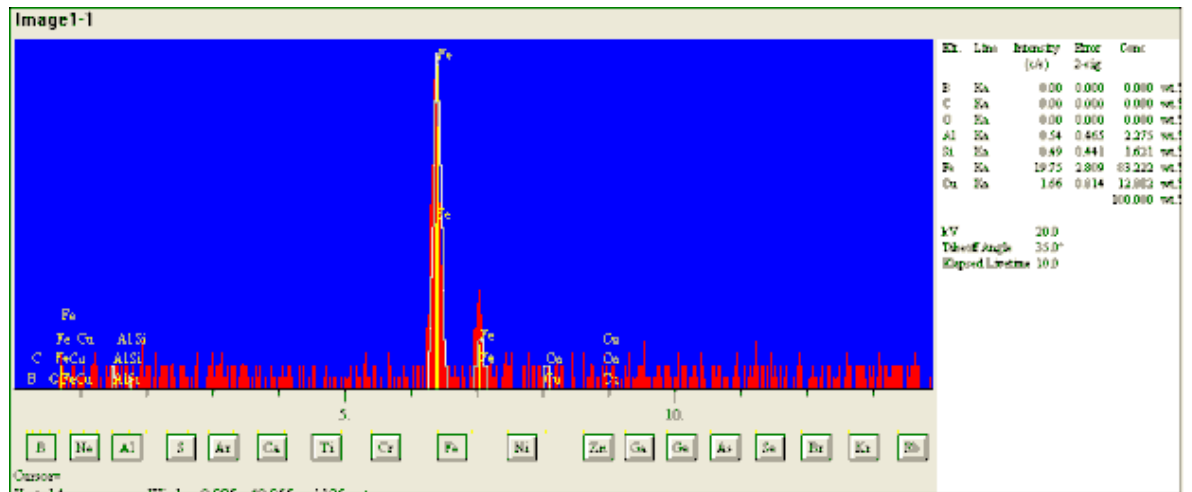


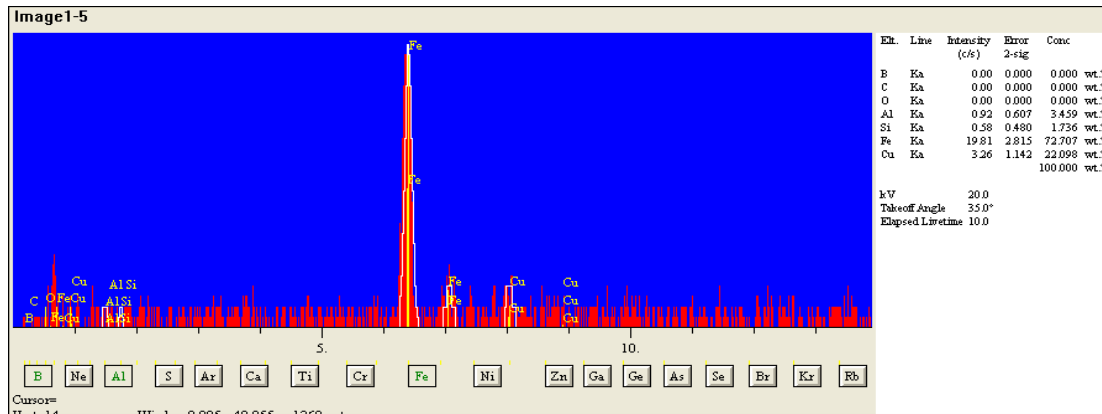
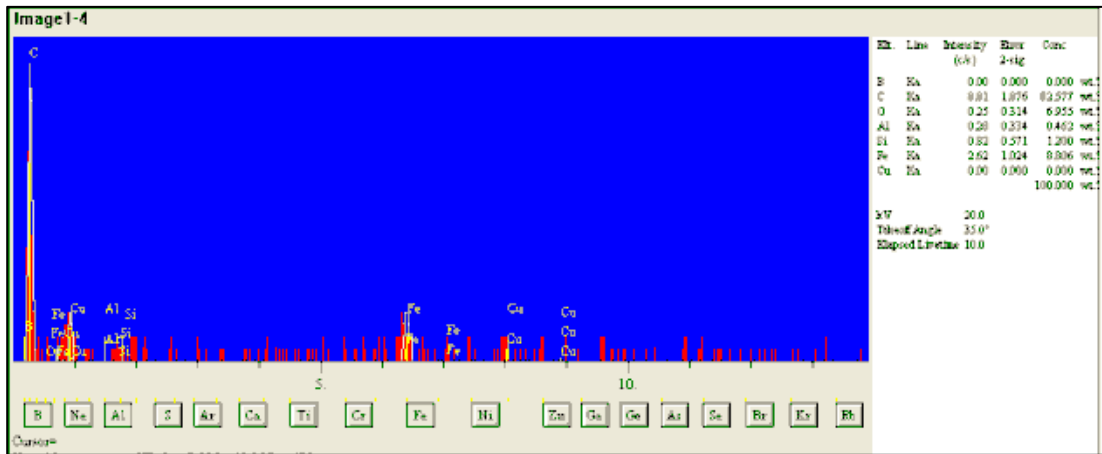
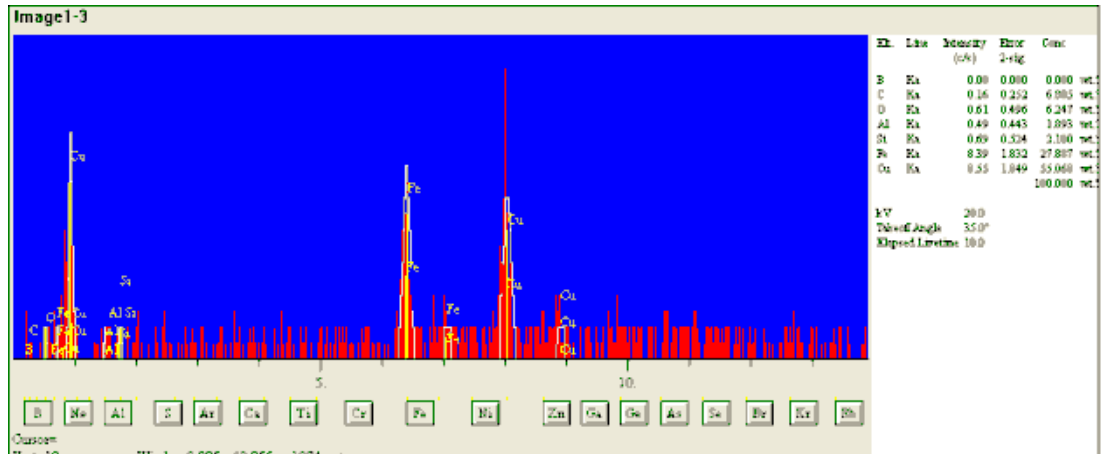


Şekil 34. % 2,5 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri

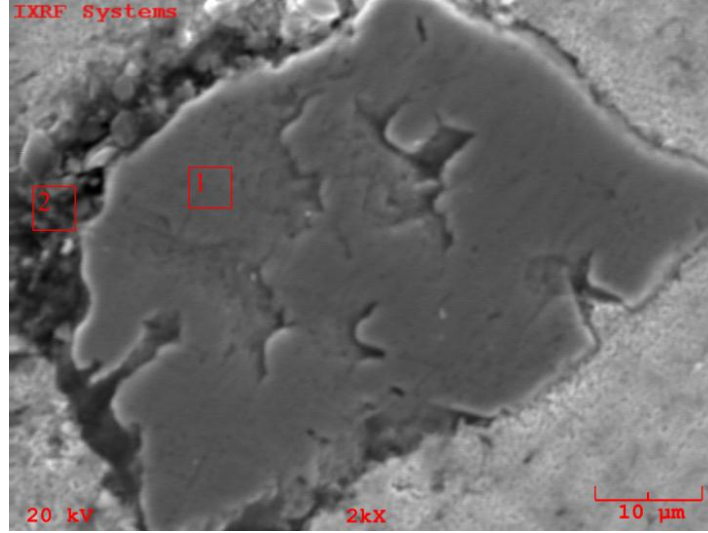


Şekil 35. %3 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü

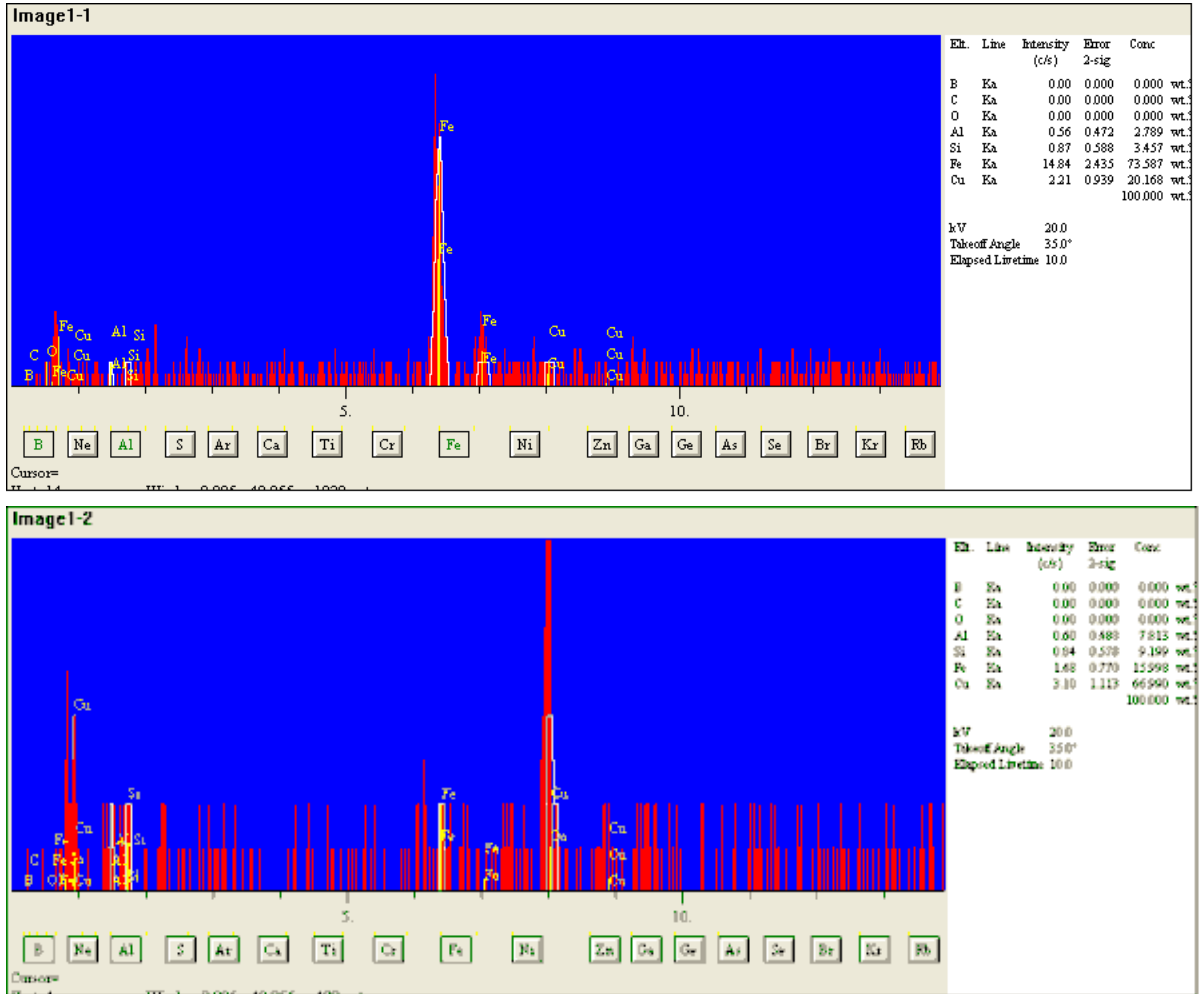




Şekil 36. %3 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri



Şekil 37. %3.5 FeB takviyeli 850 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü



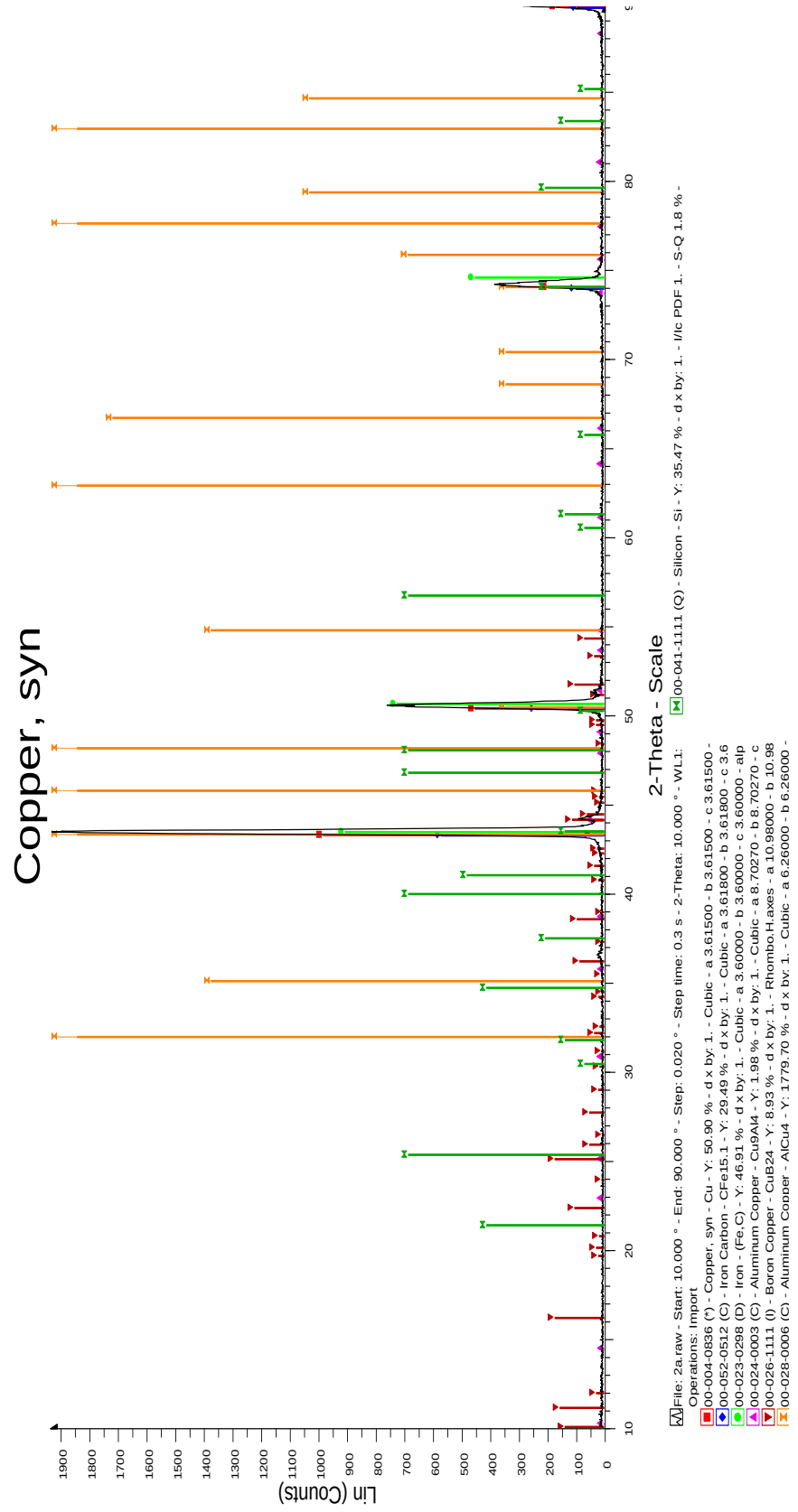
Şekil 38. %3.5 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait EDS analizleri

Farklı oranlardaki FeB takviye edilmiş Cu Matrisi içerisinde bulunan takviye partiküllerinin dağılım ve oluşum yapılarının tespit edilmesi amaçlanan EDS analizleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde şu yargılara ulaşılmıştır.

1. Şekil 25-26-33-34 incelendiğinde, EDS analizleri ile numune içinde mikroyapı resimleri ile elde edilen görüntülerde, tespiti yapılamayan takviye partiküllerinin çeşitleri tespit edilmiştir.
2. Takviye partikül oranları aynı olan numunelerde sinterleme sıcaklığı etkisi ile değişim gösteren matris takviye partikülü arayüzey difüzyonu tespit edilmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı, matris takviye partikülü arası difüzyonu arttırmıştır. Şekil 31-32 incelendiğinde difüzyon ile mikroyapıda meydana gelen konsantrasyon farkları net olarak gözükmemektedir.
3. Takviye partikül yapılarının öğütme ile elde edilen toz partiküllerinden oluştuğu ve şekil yönünden küresel biçimli olmadığı dikkate alındığında, farklı bileşim elemanlarına bağlı takviye partikülü tipleri belirlenmiştir. Şekil 28-30-32-34 incelendiğinde farklı bileşim oranlarında farklı takviye partikülleri görülmektedir.
4. Yapı içinde bulunan alüminyum, sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sıvı faza geçmektedir. Yapı içerisinde oluşan sıvı fazın, ıslatma kabiliyetini bir miktar arttırdığı ve gözenekleri doldurarak daha yüksek yoğunluk elde edilmesini sağladığı görülmüştür. Sıvı fazın miktarı çok düşük oranlarda kalacağından gerçek bir sıvı faz sinterlemesi elde edilemeyeceği kanaatine varılmıştır. Sıvı faz sinterlemesinin getireceği yüksek yoğunluk 900 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde az bir miktar yoğunluk artışı olarak numunelere yansımıştır. Şekil 31 ve şekil 46 birlikte incelendiğinde aynı numuneye ait EDS analizleri ve yoğunluk değişim grafiği bu durumu açıkça göstermektedir.

### 5.3 XRD Sonuçları ve Tartışma

Sinterleme sıcaklığının ve takviye partikülü oranının mikroyapıda oluşan değişimlere etkisini inceleme amacıyla yapılan XRD analizleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 39. %1 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği**

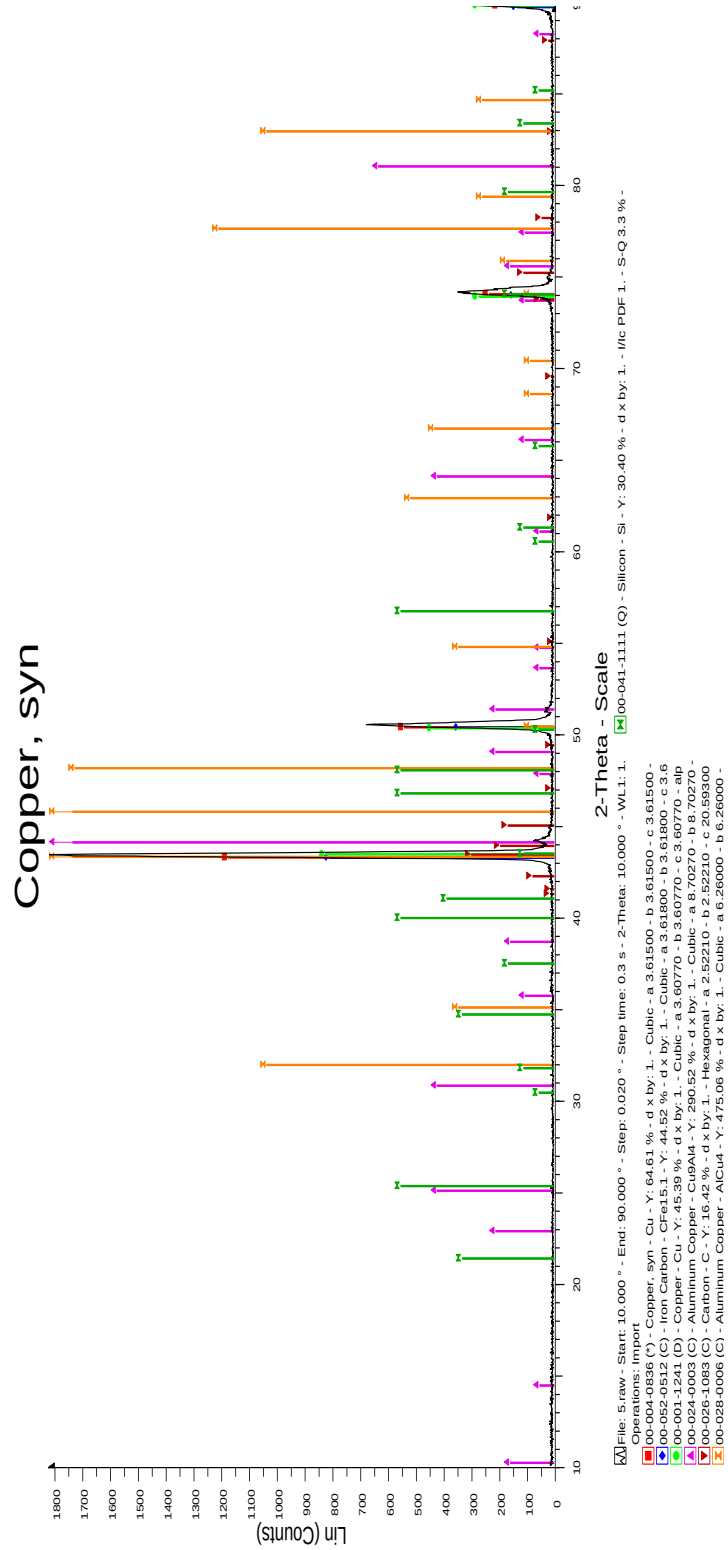
**Copper, syn**

File: 5 raw - Start: 10.000° - End: 90.000° - Step: 0.020° - Step time: 0.3 s - 2-Theta: 10.000° - c: 3.61500 - a: 3.61500 - b: 3.61500 - Cu - Y: 64.61% - d x by: 1 - Cubic - a: 3.61500 - b: 3.61500 - c: 3.61500 - Cu2O - Y: 46.39% - d x by: 1 - Cubic - a: 3.60770 - b: 3.60770 - c: 3.60770 - Al - Y: 290.52% - d x by: 1 - Cubic - a: 3.56520 - b: 3.56520 - c: 3.56520 - Carbon - Y: 16.42% - d x by: 1 - Hexagonal - a: 2.52210 - b: 2.52210 - c: 2.059300

Operations: Import

74

Şekil 40 incelendiğinde artan Ferrobör oranının yapıda artan C atomu miktarına bağlı olarak önceki %1 FeB oranına sahip bileşime nazaran Karbon atomlarını bünyede eritmek yerine hegzagonal kristal yapıda Karbon kristali yapısı oluşturduğu görülmektedir.

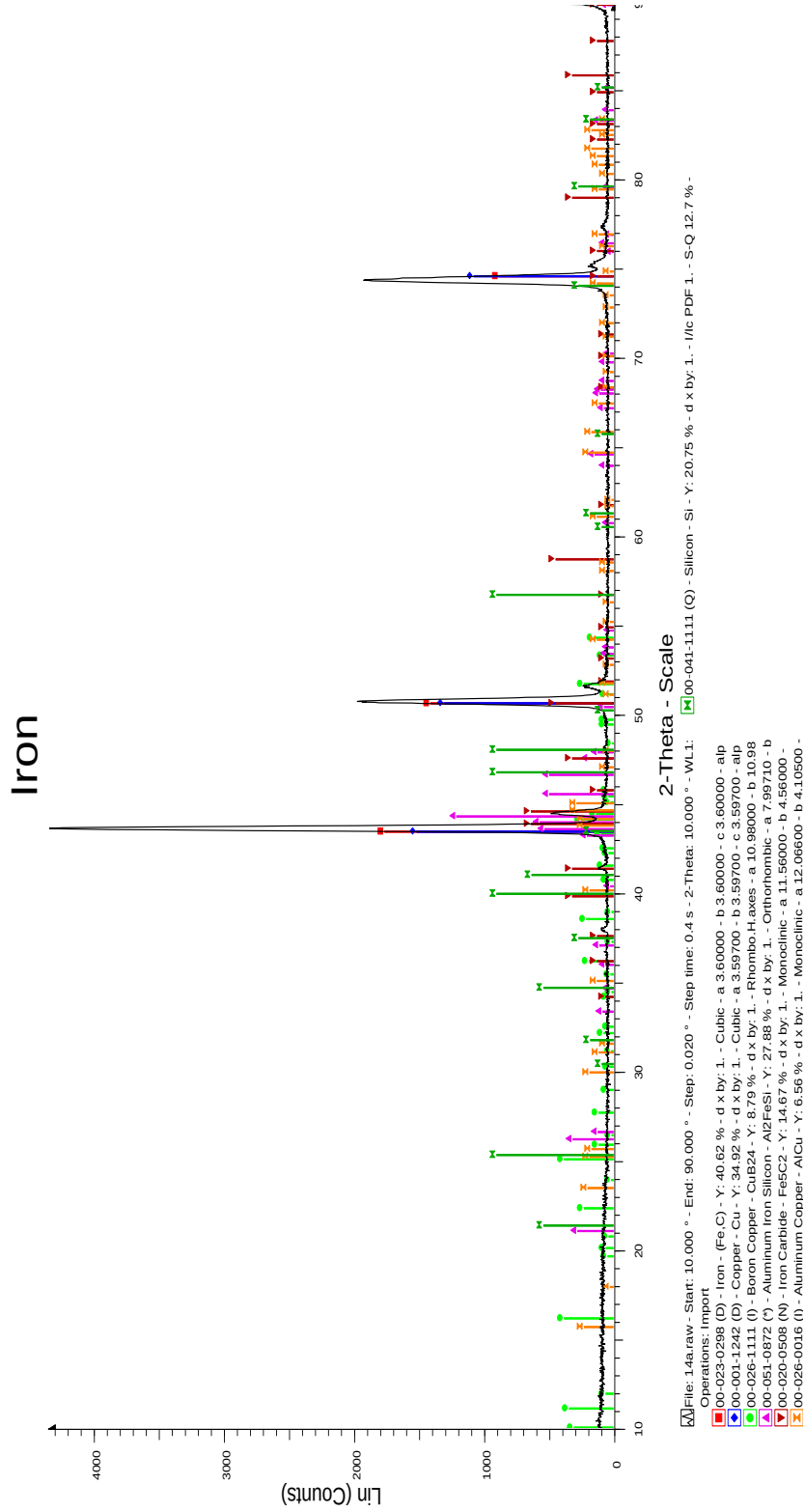


Şekil 41. %2 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği

**Şekil 42. %2,5 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği**

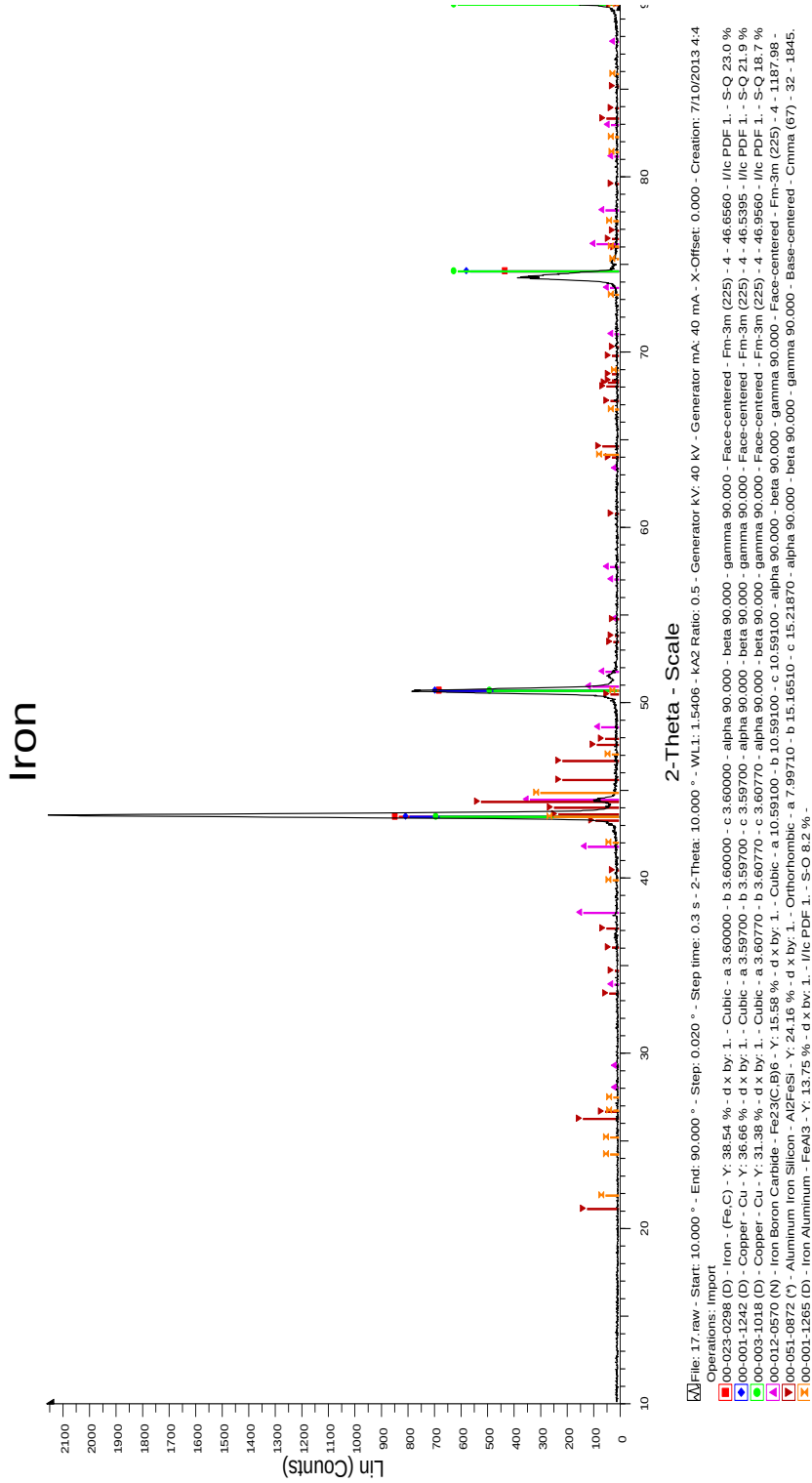


Şekil 42’de verilen % 2,5 FeB takviye partikülü oranına sahip numuneden alınan XRD analizleri incelendiğinde önceki numunelerle aynı içerikle benzer olduğu görülmüştür.



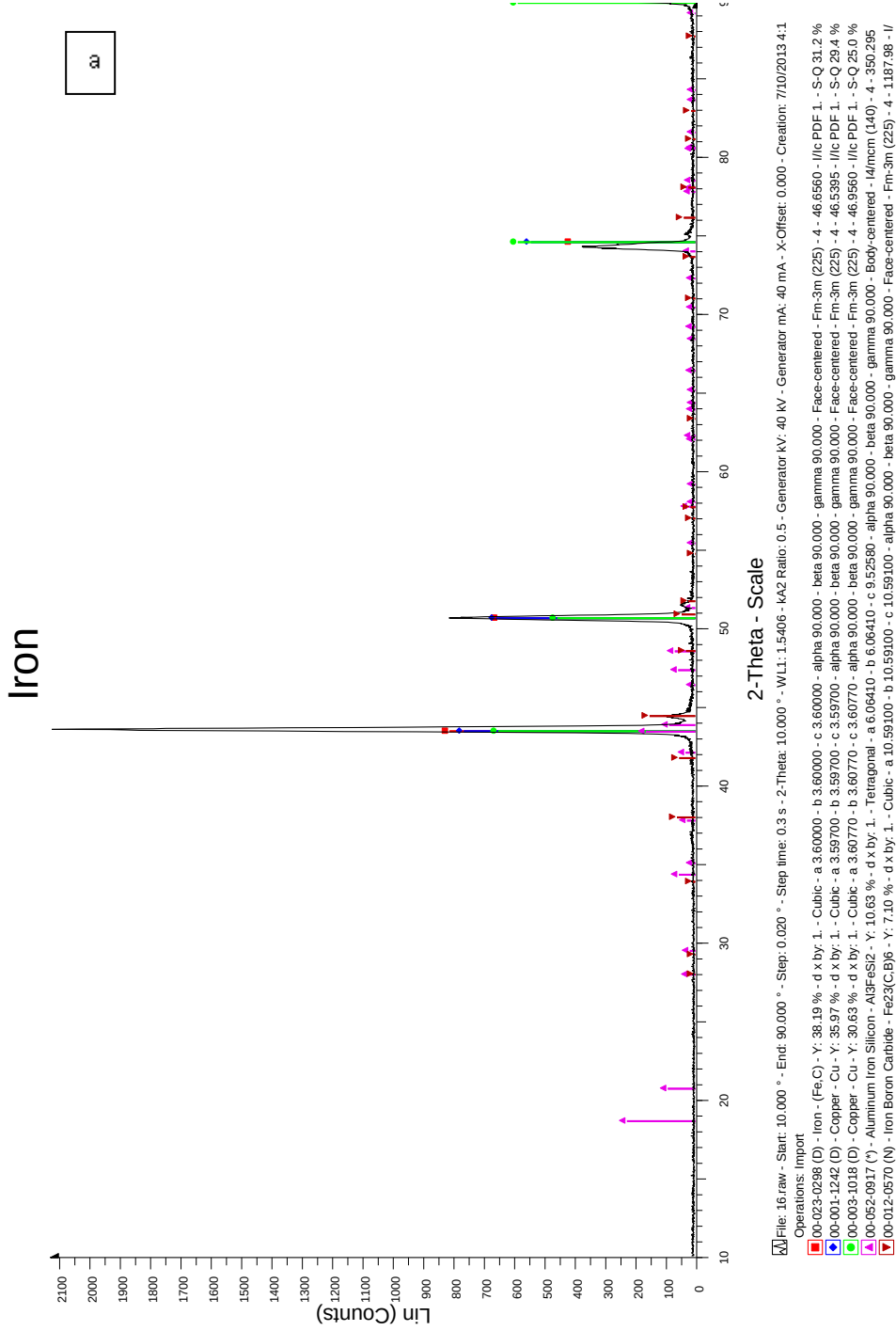
Şekil 43. %3 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği

Şekil 43'teki analizler incelendiğinde kübik kristal yapıda Cu, kübik kristal yapıda Fe ve CuB<sub>24</sub>, Al<sub>2</sub>FeSi, Fe<sub>5</sub>C<sub>2</sub> ve AlCu yapılarının oluştuğu bu kompozisyon oranı ayrıca yapıda oluşan metaller arası bileşiklerin değiştiğini ve farklılaştığını göstermektedir.



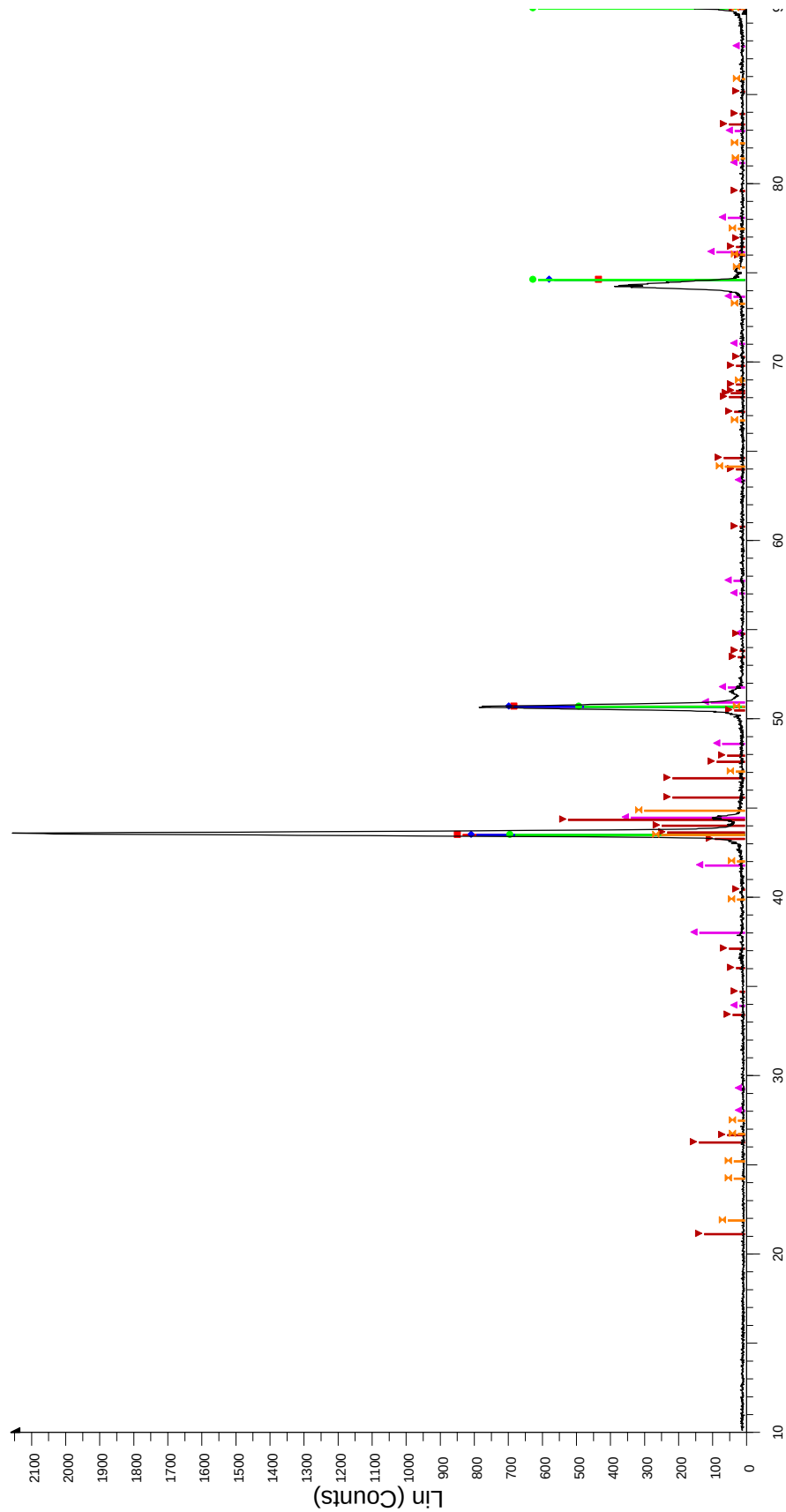
Şekil 44. %3,5 FeB takviye partikülü oranına sahip 850 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneye ait XRD grafiği

Şekil 44 incelendiğinde % 3,5 FeB partikülü takviye edilmiş Bakır matrisli numunelere ait XRD analizleri içerisinde, Kübik kristal yapıda Bakır yine kübik kristal yapıda Demirin bir arada bulunduğu, ayrıca  $\text{Fe}_{23}\text{C}_6\text{B}_6$  metallerarası bileşiklerin ilk defa oluştuğu dikkati çekmiştir.



b

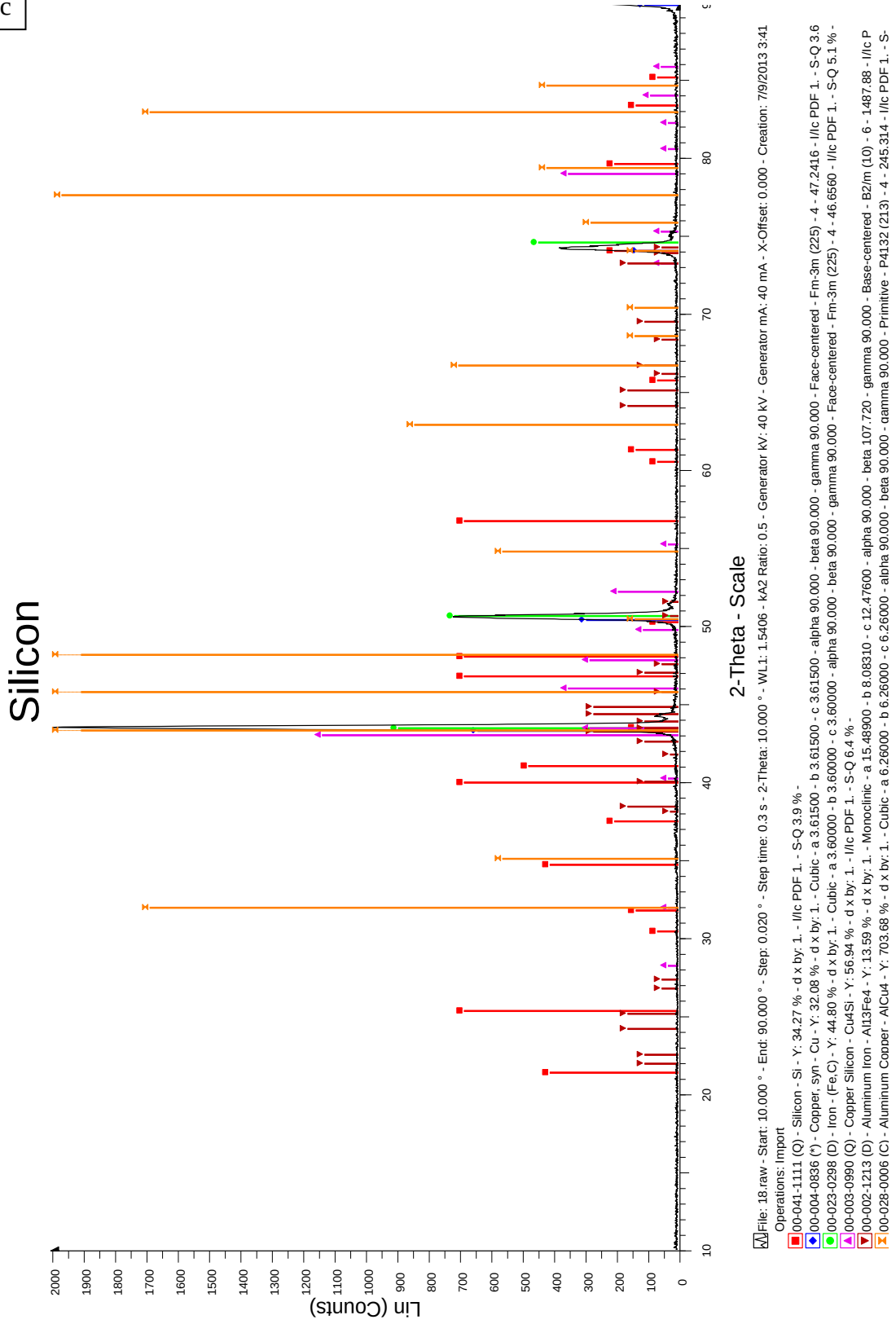
Iron



2-Theta - Scale

File: 17.raw - Start: 10.000 ° - End: 90.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 0.3 s - 2-Theta: 10.000 ° - WL1: 1.5406 - kA2 Ratio: 0.5 - Generator KV: 40 kV - Generator mA: 40 mA - X-Offset: 0.000 - Creation: 7/10/2013 4.4  
Operations: Import  
00-023-0298 (D) - Iron - (Fe.C) - Y: 38.54 % - d x by: 1. - Cubic - a 3.60000 - b 3.60000 - c 3.60000 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - Fm-3m (225) - 4 - 46.6560 - I/Ic PDF 1. - S-Q 23.0 %  
00-001-1242 (D) - Copper - Cu - Y: 36.66 % - d x by: 1. - Cubic - a 3.59700 - b 3.59700 - c 3.59700 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - Fm-3m (225) - 4 - 46.5395 - I/Ic PDF 1. - S-Q 21.9 %  
00-003-1018 (D) - Copper - Cu - Y: 31.38 % - d x by: 1. - Cubic - a 3.60770 - b 3.60770 - c 3.60770 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - Fm-3m (225) - 4 - 46.9560 - I/Ic PDF 1. - S-Q 18.7 %  
00-012-0570 (N) - Iron Boron Carbide - Fe23(C.B)6 - Y: 15.58 % - d x by: 1. - Cubic - a 10.59100 - b 10.59100 - c 10.59100 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - Fm-3m (225) - 4 - 1187.98 -  
00-051-0872 (\*) - Aluminum Iron Silicon - Al2FeSi - Y: 24.16 % - d x by: 1. - Orthorhombic - a 7.99710 - b 15.16510 - c 15.21870 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Base-centered - Cmma (67) - 32 - 1845.  
00-001-1265 (D) - Iron Aluminum - FeAl3 - Y: 13.75 % - d x by: 1. - I/Ic PDF 1. - S-O 8.2 %

c



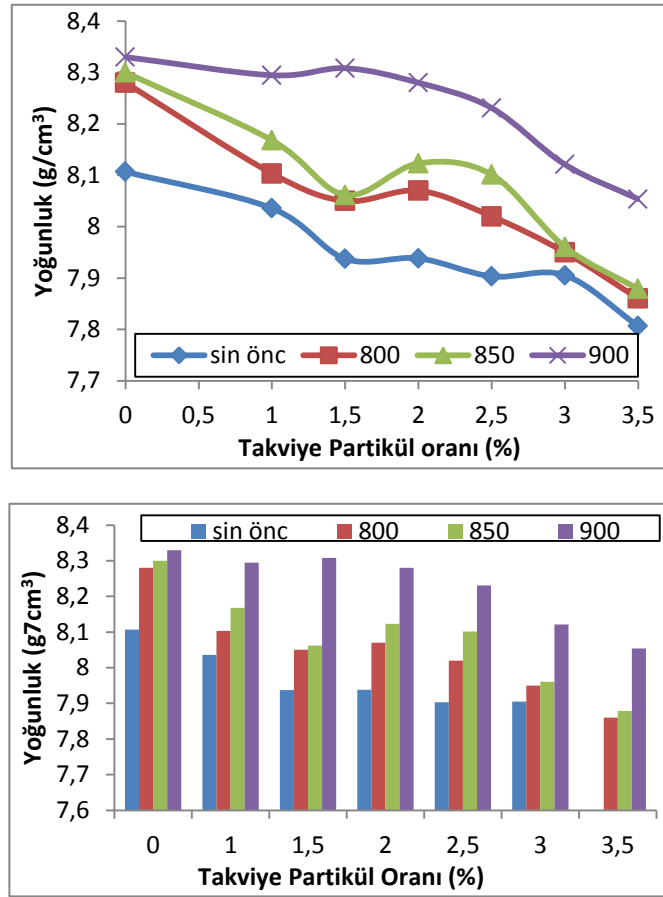
**Şekil 45. Sinterleme sıcaklığına bağlı mikroyapıda meydana gelen oluşumları gösteren XRD Grafiği**  
**(a) 800 °C b)850 °C c)900 °C**

Sinterleme sıcaklığına bağlı aynı kompozisyon oranına sahip elde edilen TM kompozitin X Ray analizleri neticesinde ortaya çıkan sonuçları yukarıdaki şekilde verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde özellikle ortaya çıkan sonuçlar şu şekilde sıralanabilir.

1. Alüminyum kompozisyonlu metaller arası bileşiklerin sinterleme sıcaklığı artışına bağlı olarak bünyede daha fazla miktarda tespit edildiği görülmüştür.
2. 800 ve 850 °C sıcaklıklarda yapıda oluşan Fe esaslı bileşiklerin sinterleme sıcaklığı etkisi ile yerini Cu esaslı bileşiklere bıraktığı, sinterleme sıcaklığı arttıkça Cu atomlarının intermetalik bileşikler oluşturma konusunda daha fazla eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Oluşan bu Cu esaslı bileşiklerin sertlik yapısını etkilediği düşünülmektedir. Yapı içerisinde sertliği arttıran temel mekanizmanın yapı geneline homojen olarak dağılmış olan bakıra göre daha sert yapıdaki FeB toz partikülleri olduğu düşünülürse artan sıcaklıklarda FeB yapısında bulunan Si, Al, Fe ve B elementlerinin sıcaklığa bağlı olarak farklı oluşumlar sergileyeceği açıktır. XRD testlerinde ulaşılan bu intermetalik bileşikler analiz edildiklerinde bu durum net bir şekilde görülmüştür.
3. Silisyumun 800 °C sıcaklıkta  $Al_3FeSi_2$  bileşiği yapısının 850 °C sıcaklıkta  $Al_2FeSi$  olarak görüldüğü 900 °C sıcaklıkta da Silikon ve  $Cu_4Si$  oluşturduğu tespit edilmiştir.
4. Si atomları düşük sıcaklıklarda demir yapısında artan sinterleme sıcaklığı ile silikon yapıda ve bakır ile bileşik oluşturma eğilimi göstererek davranış değişimi gösterdiği görülmüştür.

#### **5.4 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları ve Tartışma**

Bilindiği gibi toz metalürjisi üretim yöntemi ile elde edilen malzemelerdeki özellikleri belirleyen en önemli unsurlardan biri de yoğunluk miktarlarıdır. Çünkü toz metalürjisi ile elde edilen malzemelerin sinterlenmesi sırasında oluşan gözeneklilik yoğunluğu dolayısı ile de mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Yoğunluğu etkileyen en önemli parametrelerden biri de sinterleme sıcaklığıdır. Çünkü sıcaklık artışı ile toz partiküller arasında boyun oluşumu ve toz partiküllerin birbirleri ile difüzyonunu doğrudan etkilemektedir. Yoğunluk ölçümleri yapılan numuneler sinterleme sıcaklığına göre sınıflandırılmıştır. 800 °C sıcaklık altında sinterlenen numunelere ait partikül oranına bağlı yoğunluk değişimi grafiği Şekil 46'da verilmiştir.



Şekil 46. Partikül oranına bağlı yoğunluk değişim grafiği

Sonuçlar incelendiğinde 800 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneler içerisinde yoğunluğun, artan takviye partikülü miktarına bağlı olarak düştüğü tespit edilmiştir. Numuneler içerisinde sinterleme sonrası yoğunluk artışı en yüksek olan numunenin %2 FeB takviye oranına sahip numune olduğu tespit edilmiştir.

850 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde partikül oranına bağlı yoğunluk değişim grafiği incelendiğinde sinterleme sıcaklığının yoğunluk artışında dengeli bir dağılım sağladığı görülmektedir. Bu gruptaki numunelerde takviye partikülü oranının artışıyla yoğunluğun düştüğü şekilde açıkça görülmüştür. Ayrıca partikül oranı artışı sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk farkını azaltmaktadır. Ancak bu durumun sinterleme sıcaklığının 900 °C olarak seçildiği numunelerde farklılık gösterdiği, Yüksek sinterleme sıcaklığı ile numune içindeki FeB takviye partikül miktarını düşürdüğü yoğunluk değerlerini yükselttiği tespit edilmiştir. Şekil 45 incelendiğinde bu durum açık bir şekilde görülmektedir.

900 °C sıcaklıkta sinterlenen numune grupları incelendiğinde, 800 °C ve 850 °C sıcaklıklarda gözlenen takviye partikülü artışına bağlı yoğunluk düşüşünün aksine %2

takviye oranına kadar sinterleme sıcaklığının yoğunluğu arttırdığı görülmektedir. Ayrıca %2 takviye partikülü oranında 900 °C sıcaklığın sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimini arttırdığı görülmüştür. Bu durum Arrhenius denklemi ile açıklanabilir Rahimian vd. (2009), German, (2007).

$$D_V = D_0 \cdot e^{(-Q/RT)}$$

Burada  $D_V$  : Hacim difüzyonu katsayısı

$D_0$  : Malzeme sabiti

$Q$  : Aktivasyon enerjisi

$R$  : Gaz sabiti

$T$  : Mutlak sıcaklık olarak belirlenmiştir. Denklemden  $T$  sıcaklık değerinin artışı eşitliğin diğer yönünü simgeleyen  $D_V$  değerinde arttıracağı görülmektedir.

Ergime sıcaklığına doğru artan sıcaklık, atomların aktivasyon enerjilerini arttıracığından atomların komşu atomlardan koparak yeni alanlara yönelmesi kolaylaşacaktır. Bu nedenle artan sinterleme sıcaklığının Cu partikülleri arasında daha fazla difüzyona sebep olacağı tahmin edilmektedir. Bu durumda gözenekler birleşerek daha düşük enerji seviyesi konumuna geçtikleri sonucu değerlendirilmiştir. Bu durum Xu ve diğ.(2002), Rahimian ve diğ.(2009), Kim (2008) tarafından da elde edilerek vurgulanmıştır.

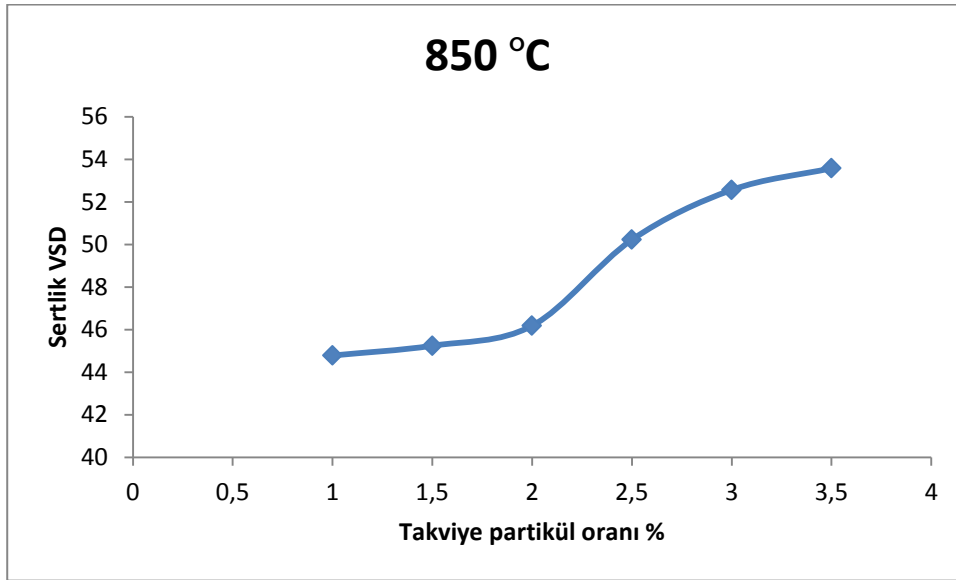
Genel itibari ile bileşimdeki takviye oranı artışına bağlı olarak yoğunluk değerlerindeki düşme eğilimi bu grup numunede de gözlenmiştir.

Buradan ulaşılabilecek sonuçlar şöyle sıralanabilir.

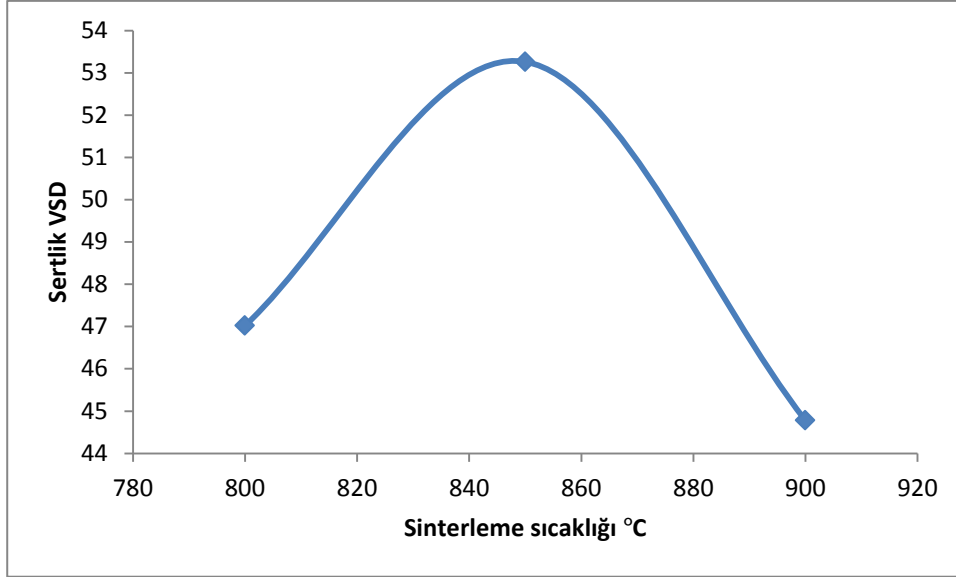
- 1- Cu matris içerisinde takviye partikülü artışı yoğunluk değerlerini düşürmüştür.
- 2- Sinterleme sıcaklıkları dikkate alındığında artan sinterleme sıcaklığının yoğunluğu arttırdığı tespit edilmiştir.
- 3- En yüksek yoğunluk değerleri %2 ile %2,5 FeB oranına sahip numunelerde ve 900 °C sıcaklıkta elde edilmiştir.
- 4- Takviye partikülü oranı artışına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde kaydedilen düşme eğilimi, porozitelerin takviye partikülü çevresinde toplanmalarına bağlı olarak geliştiği düşünülmektedir. Takviye partikülü matris arayüzeyinde kalan poroziteler sinterleme işlemi esnasında yapıdan uzaklaşamadıkları öngörülmektedir. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde porozitelerin takviye partikülleri çevresinde toplandığı açıkça görülmektedir.

## 5.5 Sertlik Sonuçları ve Tartışma

Malzemelerin sertliği mekanik özelliklerini belirleyen en önemli özelliklerden birisidir. Toz metalurji yöntemi ile üretilen MMC malzemelerde sinterleme sıcaklığı ve sinterleme sonrası gözeneklilik sertliği etkilemektedir. Toz metalurjisi ile elde edilen MMC malzemelere ilave edilen takviye partikülleride sertliği ve dolayısı ile mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmada sinterleme sıcaklığının ve FeB partikül ilavesinin sertliğe etisi incelenmiştir. FeB partikül orana bağlı olarak elde edilen sertlik sonuç grafiği Şekil 47 'de, Sinterleme sıcaklığına bağlı sertlik değişim grafiği ise Şekil 48'de verilmektedir.



Şekil 47. Takviye partikülü oranına bağlı sertlik değişimi grafiği



**Şekil 48. % 2 FeB takviye partikül oranına sahip numunenin sinterleme sıcaklığına bağlı sertlik değişim grafiği**

Şekil 47’de verilen 850 °C’de sinterlenen takviye partikül oranına bağlı olarak sertlik değişim grafiği incelendiğinde, % 2 FeB takviye partikülü oranına kadar numune sertlik değerlerinde kayda değer bir değişimin gözlenmediği % 2 nin üzerindeki takviye partikül ilavesinde sertlik oranının önemli oranda arttığı görülmektedir. FeB partikül oranının artması ile sertlik değerinin artması beklenen bir sonuçtur. Bu durumu destekleyen çalışmalar Arık, (2008), Rahimian vd. (2010) tarafından literatürde belirtilmiştir. FeB partiküller sertliklerinin ana matrisden yüksek olmasının yanı sıra bakır matris yapısında da gerilimlere sebep olduğu düşünülmektedir. En yüksek sertlik değerinin %3.5 FeB ilaveli malzemede olduğu görülürken, esas itibarı ile %2 FeB ilave partikülden %3 FeB ilave partikül oranına kadar yüksek bir artışın olduğu, görülmektedir (Şekil 47). Turhan (1998), yaptığı çalışmada, demirin bir miktar matris içinde çözündüğünü ve sertlik değerinde artışa sebep olduğunu ifade etmiştir.

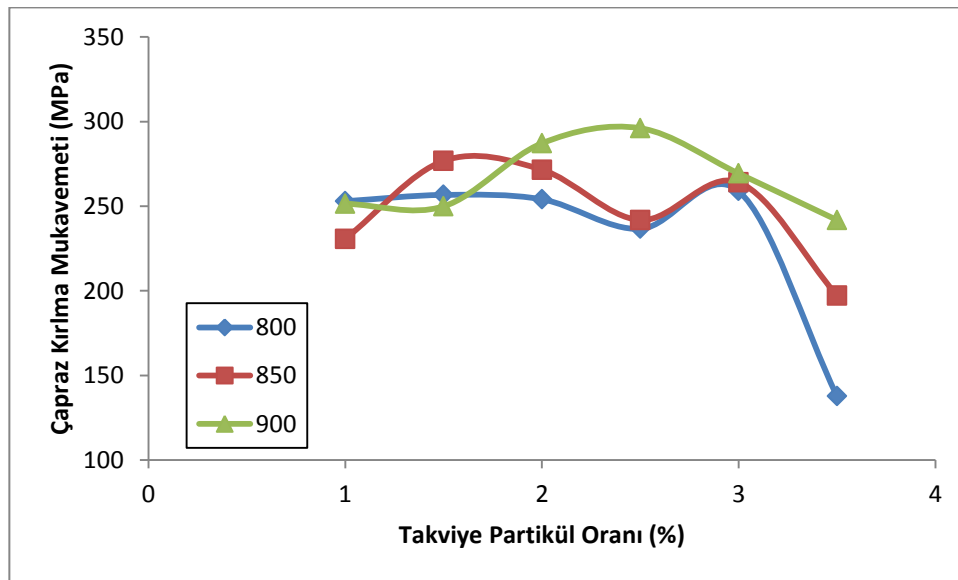
%1 FeB takviyeli MMC malzemelerin 800 °C’de yapılan sinterleme sıcaklığında ortalama sertlik değeri yaklaşık 47 HV, 850 °C’deki yaklaşık ortalama sertlik değeri 53 HV iken 900 °C’daki yaklaşık ortalama sertlik değeri 45 HV olduğu tespit edilmiştir (Şekil 48). 800 °C’den 850 °C’a kadar olan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış olurken, 850 °C’den 900 °C’ye yükselen sinterleme sıcaklığında sertlik değerinde azalma olmuştur. Bunun sebebi olarak, sinterleme sıcaklığı nedeniyle mikroyapıda oluşan intermetalikler gösterilebilir. Takviye partikülü çevresinde bulunan poroziteler ve difüzyon

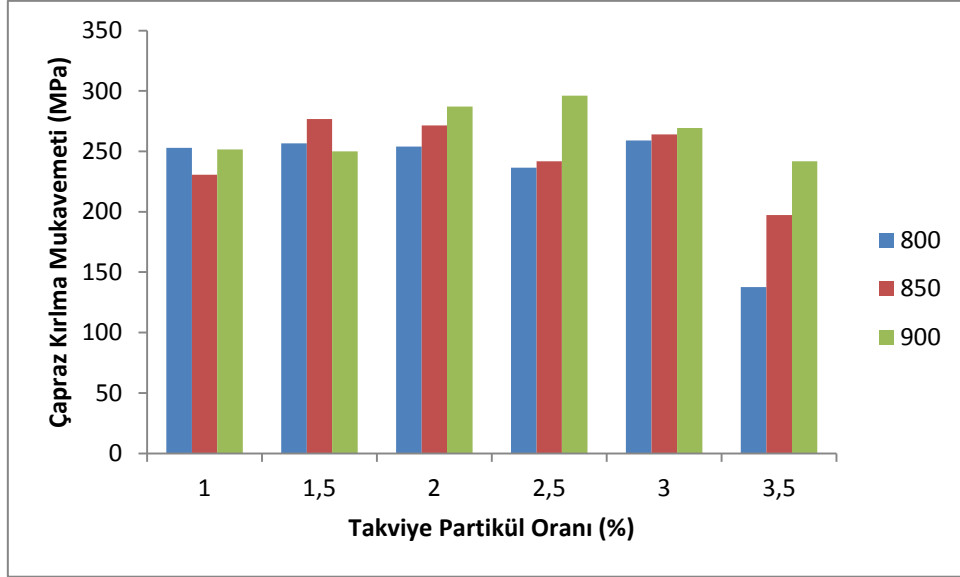
etkisi ile ortaya çıkan yeni intermetalikler ve silisyum tabanlı muhtemel kovalent bağlı bileşiklerin artması sonucu, takviye partikülü ana yapı içinde daha fazla dağılım göstererek sertlik değerinde bir miktar düşme gerçekleşmiştir.

Yapılan XRD analizleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde sinterleme sıcaklığının artışına mukabil yapıda oluşan intermetalik bleşiklerinin de yapı ve konsantrasyon bakımından değiştiği görülmüştür. 900 °C sıcaklıkta sinterlenen numuneler için takviye partikülü davranışına bağlı sertlik değerlerinin değişimi takviye partikülü yapısında meydana gelen değişimlere bağlıdır. XRD analizlerinden elde edilen sonuçlar ve sıcaklığa bağlı yoğunluk değişim grafiği Şekil 45 incelendiğinde bu durum açıkça gözükmemektedir.

## 5.6 Çapraz Kırılma Sonuçları ve Tartışma

Çapraz kırılma deneyi sonucunda numunelerin kırılma enerjileri MPa cinsinden bileşim oranına bağlı olarak şekil 49’da verilmiştir. 800-850-900 °C sıcaklıklarda sinterlenerek sınıflandırılan numunelerin kırılma enerjileri incelendiğinde Yapı içerisinde FeB oranının artışıyla % 2 bileşim oranında maksimum çapraz kırılma dayanımının gözlemlendiği görülmektedir. Ayrıca genel olarak takviye partikül oranının artışı ile dayanımın düştüğü tespit edilmiştir. Gruplandırılan numuneler içerisinde en yüksek çapraz kırılma mukavemeti 900 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde gözlenmiş, bu numuneler içerisinde bileşim oranına bağlı mukavemet değerleri incelendiğinde %2,5 FeB içeren numunelerin en iyi mukavemet değerlerini verdiği tespit edilmiştir.



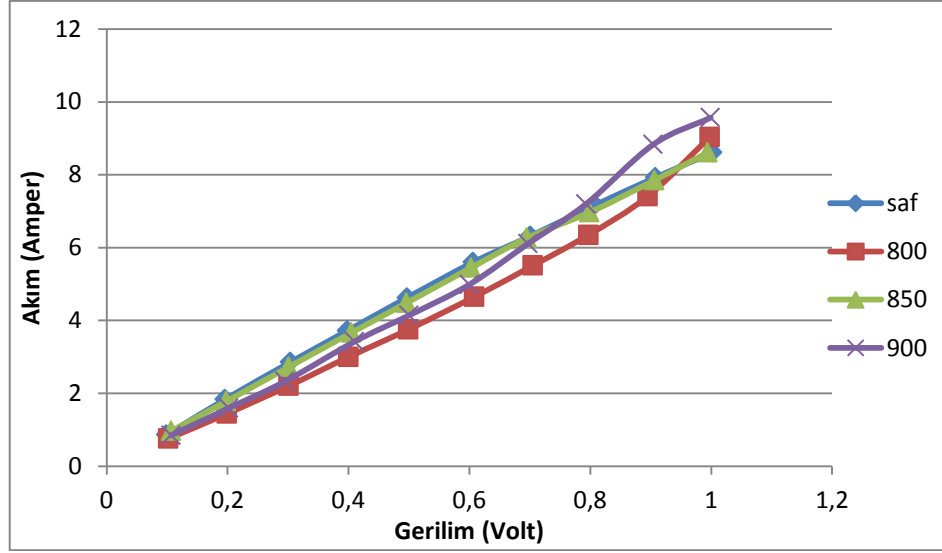


**Şekil 49. Takviye Partikülü Miktarına Bağlı Çapraz Kırılma Mukavemeti Eğrisi**

Genel olarak çapraz kırılma dayanımları incelendiğinde sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık artışıyla birlikte çapraz kırılma dayanımların da arttığı gözlenmiştir. Bu durumu artan sıcaklıkla birlikte toz partiküllerinin yüzey gerilimlerinin düşeceği ve ıslatma kabiliyetinin artacağı ve daha kuvvetli arayüzey bağlarının oluşacağı düşünülmektedir. Bu durumda Çapraz kırılma mukavemeti artışının sebebi, artan sinterleme sıcaklığıyla birlikte toz partikülleri arasında gelişen boyun çapının (X) toz partikül çapına (D) oranı (X/D) nin artışı olarak oluşmuş parçacıklar arası yük transferinin daha rahat gelişmesi olarak düşünülmüştür Xu, (2002). Buna benzer sonuçlara Arık, (2008) de ulaşmıştır.

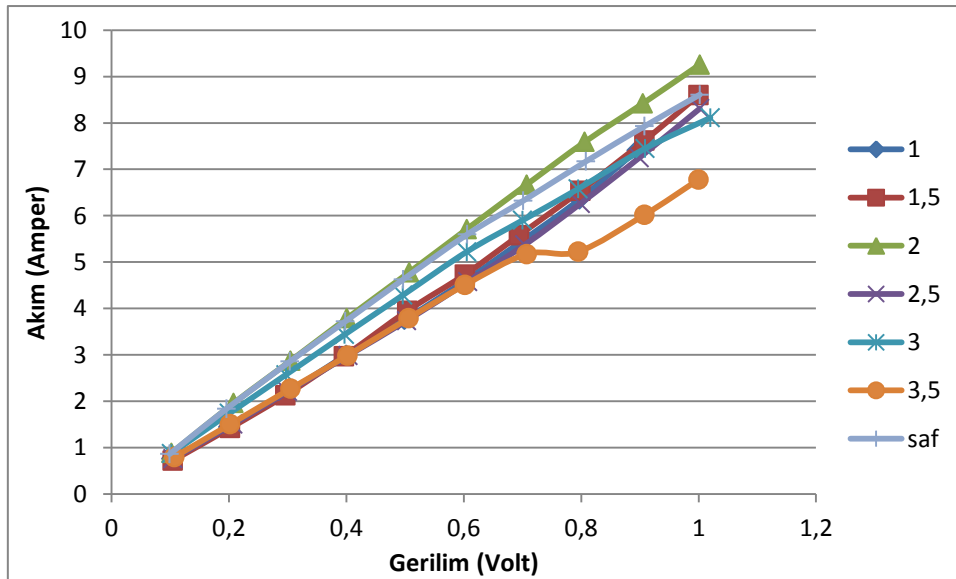
### 5.7. Elektrik İletkenliği Sonuçları ve Tartışma

Bakır malzemelerin en önemli özelliği iletkenliklerinin yüksek olmasıdır. Bakır malzemelerin en önemli kullanım alanı da buna paralel olarak iletkenlik istenen yerlerdir. Bakır malzemeler yoğunluk dayanım ilişkisi dikkate alındığında yoğunluğuna göre dayanımlarının düşük olduğu da bilinen bir konudur. Bakır malzemelerin dayanımını artırmak için matris yapıya katılan alaşımlar genellikle iletkenlik özelliklerini düşürmektedir. Bu çalışmanın en önemli amaçlarından birisi de bakır matris içerisine MMC üretim yöntemi FeB takviye ilavesi ile iletkenlik özelliğini düşürmeden bakır malzemelerin dayanımının arttırılabilirliğini incelemektir.. FeB ilavesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği yönündeki bulgular sertlik ve çapraz kırılma sonuçlarının tartışıldığı bölümlerde anlatılmıştır. Bu bölümde bakır matris içerisine katılan ilave FeB takviyesinin iletkenlik özelliklerine etkisi tartışılacaktır.



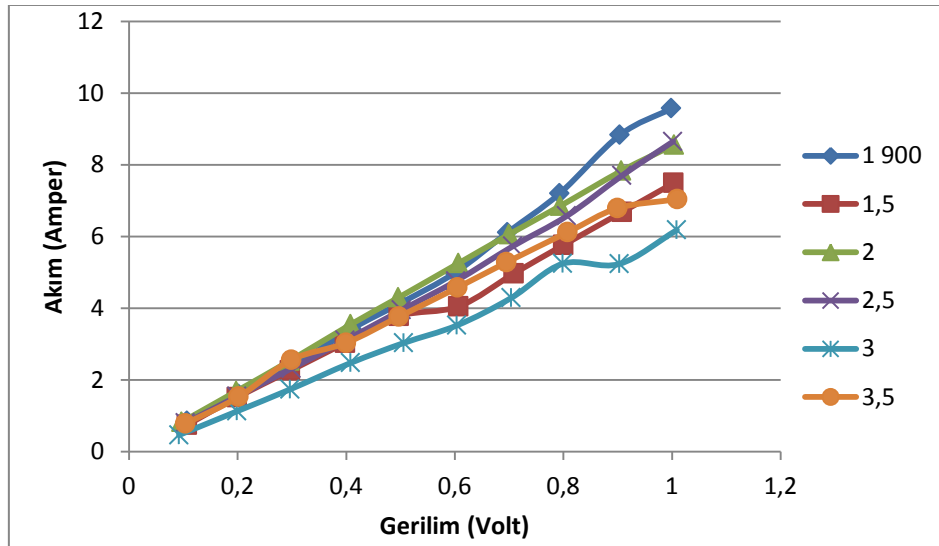
**Şekil 50. %2 FeB takviye partikülü oranına sahip numunenin sinterleme sıcaklığına bağlı iletkenlik değişimi grafiği**

Sinterleme sıcaklığına bağlı elektrik iletkenliği özellikleri incelendiğinde aynı bileşim oranına sahip numuneler için sinterleme sıcaklığı etkisinin artan gerilimlerle değiştiği, sonuçta 900 °C sıcaklıkta sinterlenmiş numune için Şekil 50’de görüleceği üzere, artan gerilim değerleri altında en iyi elektrik iletkenlik değerlerini verdiği görülmektedir. Şekil 51 incelendiğinde değişen gerilmeler altında farklı sinterleme sıcaklığına sahip numunelerin iletkenlik değerlerindeki değişim görülmektedir.



**Şekil 51. 800 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerin takviye partikülü oranına bağlı iletkenlik değişim grafiği**

Takviye partikülü oranlarına göre elektrik iletkenlik değerlerindeki değişimler söz konusu olduğunda Şekil 51 ve 52 ölçüm değerlerinde artan gerilim ifadesi karşısında ölçülen akım değerlerini vermektedir. Bu noktada 800°C ve 900 °C sıcaklıklarda sinterlenen numuneler için net bir fark dile getirmek mümkün değildir. Ancak bileşim oranları dikkate alındığında artan Takviye Partikülü oranına olarak iletkenlik değerlerinin bir miktar düştüğü bu durumun saf bakırın alaşımlandırması durumunda literatürde gözlenen bir durum olduğu görülmüştür. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus takviye partikülü artışına bağlı olarak % 2 FeB oranına sahip numunenin iletkenlik değerleri olarak en iyi sonuçları verdiği ve takviye partikülü bileşim oranının elektrik iletkenliği değerleri üzerinde önemli değişimler göstermediğidir. Artan partikül oranına bağlı olarak daha önce belirtildiği üzere takviye partikülü çevresinde toplanan porozitelerin elektrik iletkenliğine etkileri ve artan porozite oranına bağlı olarak iletkenlik değerlerinin de azalacağı düşününlürse, %2 FeB takviye partikülü oranına sahip numunenin mukavemet değerleri de dikkate alınırsa Cu matrisi içerisinde FeB takviye partiküllerinin, bakırın mukavemet kazanırken iletkenlik değerlerinden ödün verilmeden çalışabileceği bir bileşim oranının elde edilebileceğini göstermektedir.



**Şekil 52. 900 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerin takviye partikülü oranına bağlı iletkenlik değişim grafiği**

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma sonucunda, Saf Bakır tozlarına ilave edilen Ferrobor takviye partikülleri, Bakır esaslı Metal Matrisli Kompozitin elektriksel iletkenlik ve Mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Bu sonuçlar içerisinde özellikle direnç kaynaklarında kullanılan elektrotlar ve gaz altı kaynağında kullanılan kontak memelerin, geliştirilmiş bu malzemelerden elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bakır içerisine katılan Ferrobor takviye partikülü oranı arttıkça numunenin sertlik değerleri artmış, çapraz kırılma değerleri ise % 2,5 takviye partikülü oranına kadar artmıştır.

Deney numuneleri içerisinde elektriksel iletkenlik özellikleri söz konusu olduğunda, Bakır içerisine katılan takviye partikülü artışına bağlı olarak %2 Takviye partikülü oranına kadar numunelerin elektriksel özelliklerinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

Bu durumda tüm numuneler içerisinde 900 °C sıcaklıkta sinterlenen %2 Ferrobor takviye partikülü oranına sahip numune, elektriksel özelliklerinden herhangi bir değişim olmadan en iyi mekanik özellikleri sağlamıştır.

Cu matris içerisinde takviye partikülü artışı yoğunluk değerlerini düşürmüştür.

Sinterleme sıcaklıkları dikkate alındığında artan sinterleme sıcaklığının yoğunluğu arttırdığı tespit edilmiştir.

En iyi yoğunluk değerleri %2 ile %2,5 FeB oranına sahip numunelerde ve 900 °C sıcaklıkta elde edilmiştir.

Takviye partikülü oranı artışına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde kaydedilen düşme eğilimi, porozitelerin takviye partikülü çevresinde toplanmalarına bağlı olarak geliştiği düşünülmektedir. Takviye partikülü matris ara yüzeyinde kalan poroziteler sinterleme işlemi esnasında yapıdan uzaklaşmadıklarından, porozitelerin takviye partikülleri çevresinde toplandığını, mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde açıkça görülmektedir.

FeB oranı arttıkça kırılma enerjisinin düştüğü açıkça görülmektedir. Bu grup içinde FeB oranları %1-1,5-2-2,5-3-3,5 olarak belirlenmiş FeB oranına göre en iyi sonucu %2,5 FeB oranına sahip numune vermiştir.

Kırılma enerjisi, için numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde, 800-850-900°C sıcaklıklarda sintelenmiş numuneler karşılaştırılacak olursa, en yüksek değeri 900 °C derecede sinterlenmiş numune vermektedir.

Sabit sinterleme sıcaklığı altında üretilen numunelerde, takviye partikülü artışı elektrik iletkenliğini düşük gerilimlerde az, yüksek gerilimler altında daha çok etkilemiştir. Bu değişimler sinterleme sıcaklığı etkisi altında incelendiğinde, sinterleme sıcaklığı artışının numunelerin elektrik iletkenlik değerlerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında bundan sonraki süreçte Bakır esaslı kompozit üzerinde Silisyum ilavesi oransal arttırılarak yarı iletken eşik gerilim değeri üzerinde araştırmalar yapılması önerilir.

## KAYNAKLAR

- Askeland, D.R.**, ( 1998.), “The Science and Engineering of Materials”, Çeviri Dr. Erdoğan, M., 1.Cilt, 3.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara,
- Avcı A. U.**, 1993. Toz metalürjisi ders notları. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Babayev, Y.**, 2007. Bir kompresör gövdesi imalatının toz metalurjisi ve difüzyon kaynağı yöntemleri uygulanarak optimizasyonu, *Doktora tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Babayev, Y., Karadeniz, S. ve Memmedov, A.**, 2005. Fe-Cu karışımı toz malzemenin tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *3. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*, 16-17 Eylül, Konya, s. 127-130.
- Bishop, D.P.**, 1998. Diffusion-based microalloying via reaction sintering. Ph.D. Thesis, Dalhousie University.
- Bolay, K., A.**, 1998. “Microstructural Study of Hot Pressed PM Aluminum-Copper and Aluminum-Copper-Siliconcarbide Composites”, M. Sc. Thesis, METU, Ankara.
- Boz Mustafa**, 1999, Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi , Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Çinici Hanifi**, 2012, Toz Metalurjisi Yöntemi İle Al Esaslı Parçacık Takviyeli Sandviç Metalik Köpük Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Çetinkaya, Ş., Cumbul, M. ve Oktay, E.**, 2004. Ön alaşımlı demir tozu ve bakır katkılı demir tozu kompaktlarına karbon ilavesinin sinterleme sonrası özelliklere etkisi. *10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi*, 14-16 Nisan, s. 288-295.
- Çetinkaya, Ş., Oktay, E.**, 2005. Ön alaşımlı demir tozlarına karbon katkısının sinterleme sonrası mekanik özelliklere etkisi. *4. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 18-22 Mayıs, s.1130-1140.
- Davala, A.B., Graham, A.H., Causton, R.J.**, 1998. Application Of High Performance Materials And Processes -Alloy Systems, *International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials*, Nevada USA.
- Douib, N., Mellanby, I.J., Moon, J.R.**, 1989. Fatigue of inhomogeneous low alloy PM steels. *Journal of Powder Metallurgy*, 32(3) 209 - 212. 113

- Durmus Hülya**, 2006. CO2 Lazer kaynağıyla birleştirilmiş Alüminyum matriksli kompozitlerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Doktora tezi*, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Ekerer, F.A.**, 2007, Alumina-SiC Parçacık Destekli T/M Al- Matriksli Kompozitlerin Üretilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Ekşi, A.**, 1996, Metal Tozu Üretim Teknikleri, *Endüstriyel Teknoloji*, cilt.2, sayı 2, Gazi, Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara
- Ersümer, A.**, 1970, Toz Metalurjisi Sert Metal Sinterleme, İstanbul Üniversitesi. İstanbul
- German, R.M.**, 1997. Powder Metallurgy Science. Metal Powder (Second Edition) Industries Fedaration, Princeton NJ, ISBN 1-878954-42-3, p. 241-295.
- German, R.M.**, (2007), **Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara**
- Gething, B. A., Heaney, D. F., Koss, D. A., Mueller, T.J.**, (2005) The effect of nickel on the mechanical behavior of molybdenum P/M steels, *Materials Science and Engineering A* 390, p.19–26.
- Gülsoy, H.Ö., ve Salman, S.**, 1996. Fe-Cu kompaktlarına katılan farklı miktarlardaki grafit ilavelerinin sabit sinter sıcaklığı ve sabit sürelerde, mekanik özelliklere etkisi. 1. *Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, Ankara, 16-17 Eylül, s.559-566.
- James, W.B. McDermott, M.J. and Powell, R.A.**, Powder Metal Technologies and Applications, *ASM Handbook*, Vol. 7, 803-827, 1998.
- Karagöz, S., Yamanoglu, R., Atabek, S.H.**, (2009), Sinter Sertlenmiş Toz Metalurjik Bir Çelikte Hata Karakterizasyonu, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük
- Kasouf, C.F.**, 1994, “Threats To P/M: An Analysis of Competitive Technologies”, *P/M World Congress And Exhib.*, Paris.
- Kim T.W.**, (2008), Determinatin of densification behavior of Al-SiC metal matrix composite during consolidation processes, *Materials Sciences and Engineering*, A.483-484, s.648-651
- Kousaka, Y.**, 1997, Particle Size, Japan Powder Teknoloji Handbook Second Edition Chemical Engineering Department, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka, p.3 Newyork Basel
- Kurgan, N.**, 2004. T/M paslanmaz çelik implantların üretimi ve teknolojik özellikleri üzerine bir araştırma. *Doktora tezi*, C.B.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

- Kurt, Adem**, 1992, Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerinin Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara s. 1-57
- Kurt, Adem**, 1996, Toz Metalden Üretilen Bronz Yatağın Düşük Karbonlu Çeliğe Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmesi, *Doktora tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- Marder, J.M., Batich, R.**, 1992, Beryllium, Metallographing techniques and Microstructures, *ASM Handbook*, 389-391.
- Meriç, C., Atik, E., Türüdü, T.**, 2005. Kaynakla birleştirilmiş demir esaslı toz metal parçaların kaynak bölgesinin incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, ISSN:1304-4141, (4) 1-11, [www.teknolojikarastirmalar.com](http://www.teknolojikarastirmalar.com)
- Moustafa, S.F., Abdel- Hamid, Z., Abd-elhay, A.M.**, 2002, Copper matrix SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulate composites by powder metallurgy technique. *Materials Letters* 53, Pages 244-249
- Narva, V.K., Laşkareva, N.C., Pavlov, S.A., Bataşev, K.V.**, 1988. Poluçenie i svakva poroşkovoy stali şx15 iz strujkovix otxodov. *Poroşkovaya Metallurgiya*, (8) 20-23.
- Onur, A. ve Arslan, F.**, 1996. Yağ atomizasyonu yöntemiyle alüminyum alaşımı ve kalay tozu üretimi. *1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, 16-17 Eylül, Ankara, s.193-206.
- Ozan, S., Çaligülü, U., Taşkin, M., Gür, A. K., Dikbaş, H. ve Çay, V.V.**, 2006. Sıcak Presleme Yöntemiyle İmal Edilmiş SiCp Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Difüzyon Kaynağında Sıcaklığın Birleşme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *11. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 19-21 Nisan, Denizli, s.233-236.
- Öveçoğlu, M.L.** 1997, Toz Metalurjisi Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları Ve Yeni Eğilimler, *9. Uluslararası Metalurji Ve Malzeme Kongresi*, 449-475, İstanbul
- Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., Baharvandi, H.Z.**, (2009), The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, made by powder metallurgy., *Journal of Meterials Processing Teknology*, Vol 209, s.5387-5393.
- Rapport L, Leschinsky V., Lvovsky M, Lapsker I., Volovik Y., Tene R.**, (2002), Load Bearing Capacity Of Bronze, İron-Nickel Powder Composites Containing Fullernce-Like WS<sub>2</sub> Nonoparticles, *Tribology International*, 35., 47-53.
- Roll K.H.**, 1984, “History of Powder Metallurgy” *Metals Handbook* 9th Edition, Vol.7, ASM Metals Park, Ohio.
- Savitskii, A. P., Zhdanova V.N. and Giry a E.N.**, 1964. The effect of sintering temperature on the strength of powder copper subjected to repeated pressing, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1068-1302 , 1573-9066

- Sanderow, H. I.**, 1998, High Temperature Sintering in Ferrous Powder Metallurgy Components, *ASM Handbook*, Vol. 7, 828 - 833, Ohio.
- Sarıtaş, S.**, 1994. Toz metalürjisi. Makina Mühendisleri El Kitabı, Cilt 1, (2.Baskı), 64-83. Ankara: MMO Yayınları.
- Sarıtaş, S.**, 1995. Toz metalürjisi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 36 (421), 41-50.
- Sarıtaş, S.**, 1996. Bir titreşimli öğütücü imalatı ve metal tozlarının öğütmeye bağlı özelliklerinin araştırılması. *1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, 16-17 Eylül, Ankara, s.387-397.
- Schaberl, W.J. Baran, M.C. Marucci, M.L. Posteraro, R.A.** (2002), Economics and benefits of high temperature sintering of high performance alloys, *International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials*, FLORIDA USA, June 16-21
- Schmidt R.F. , Schmidt D.G., Sahoo M.**, (1992) , Copper and Copper Alloys, Nonferrous casting alloys, *ASM Handbook* p(771-785)., Colonial metals Company, Canada
- Smith, W.F.**, 2001. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Çeviri Kınıkoğlu, N.G., 3. Baskı, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2001.
- Somunkıran , İ.**,(1996) Demir Esaslı Molibden, Nikel, Bakır Katgılı Toz Metal Alaşımının Mekanik Özelliklerine Bakır Oranının Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Somunkıran, İ. ve Çelik, H.**, (1999). Demir esaslı molibden, nikel, bakır katkılı toz metal alaşımlarının mekanik özelliklerine bakır oranının etkisi. *2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, 15-17 Eylül, Ankara, s.729-736.
- Somunkıran, İ. ve Özel, S.**, 2006. Fe esaslı toz alaşımında sinterleme sıcaklığının aşınma direncine etkisi. *11. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 19-21 Nisan, Denizli, s.153-157.
- Şahan, E.**, 2002, Toz Metalurjisi İle Üretilen Al Matrisli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli Kompozitin Sürtünme Kaynağının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elazığ
- Şahin,Y.**, 2000. Kompozit Malzemelere Giriş, Ders Notları, s.1-77, Gazi Üniversitesi, ANKARA
- Tanberk, O.**,1997, Toz Metalurjisinde Türkiye'nin Yeri, *9. Uluslar Arası Metalurji Ve Malzeme Kongresi*, 229-247, İstanbul

- Taner Ersan**, 2000. Toz Metalurjisi Üzerine Yeni Çalışmalar, *Mühendis ve Makine*, cilt 41 sayı 483 s.30-32
- Tekmen Ç.**, 2006. Metal Matriksli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Tjong, S.C., Lau, K.C.**, 1999, Tribological behaviour of SiC particle-reinforced copper matrix composites, *Materials Letters* 43, Pages 274-280.
- Toptan, F.**, 2006, Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tunay, R.F., Varol, R. ve Yılmaz, S.S.**, 2002. Borlamanın T/M çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi. 3. *Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 4-8 Eylül, Ankara, s.1221-1228.
- Turhan, H.**, 1998, Düşük katkılı kalay içerikli bronz yatakların aşınma ve yorulma davranışlarının araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Turhan, H., Yıldız, T., Gülenç, B.**, 2007. Toz Metalurjisi ile Üretilen Cu/FeMn<sub>p</sub> ve Cu/FeCr<sub>p</sub> Metal Matrisli Kompozitlerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 19 (4), 569-574,
- Turhan, H., Özel, S.**, 2009. Properties of Cu/Fe-Mn and Cu/Fe-Cr Metal Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy, *Materials Testing: Vol. 51, No. 3*, pp. 141-146.
- Ulutaş, A.**, 2004. Değişik oranlardaki Cu, FeCr ve FeMn alaşımlarının toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Uygur M.E.**, 1996. Toz Metalurjisi Ekonomik Bir Üretim Tekniği, 1. *Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı* , Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ünlü, B.S., Yılmaz, S.S., ve Kurgan, N.**, 2006. Toz metalurjisi ve kullanım alanları. *Makina Tek*, (99).
- Varol, T.**, 2012. AA2024 Matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Varol, R. ve Sarıtaş, S.**, 1996. Bilyalı dövme işleminin demir esaslı T/M parçaların yorulma özellikleri üzerine etkisinin araştırılması. 1. *Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, : MMO ISBN : 200-1. 16-17 Eylül, Ankara, s.407-417.

- Xiong, X. Sheng, H.C. Chen, J. Yao P.P.**, 2007, Effects of sintering pressure and temperature on microstructure and tribological characteristic of Cu-based aircraft brake material, *Trans. Nonferrous Met.* S<sup>o</sup>CC. 17, 669-67.
- Xu, X., Lu, P., German R.M.**, (2002), Densification and strength evolution in solid-state sintering, *Journal of Materials Science*, Vol 37, s.117-126
- Yıldırım S.**, 1999, Fe-Ferrokrom Tozundan Elde Edilen Kompozitin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yılmaz, R. ve Özyürek, D.**, 2009. Toz metalurjisi ile üretilen FE-CU-C esaslı malzemelerin aşınma özellikleri, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük May.13-15
- Yılmaz, S.S., Ünlü. B.S. ve Varol, R.**, 2005. Borlanmış demir esaslı FeCu-Grafit T/M malzemenin aşınma ve mekanik özellikleri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, ISSN:1304-4141, (3) 11-21, [www.teknolojikarastirmalar.com](http://www.teknolojikarastirmalar.com)
- Zhang X.P., Ye L., Mai Y.W., Quan G.F. ve Wei W.**, 1999. Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCp-MMC), *Alseiver, Composites: Part A*, 30, 1415-1421.

## ÖZGEÇMİŞ

Aytekin ULUTAŞ, 1979 yılında Aksaray’da doğdu. İlk öğrenimine Bitlis’in Adilcevaz İlçesi, İbrahim Karaoğlanoğlu İlkokulu’nda başlayarak, Bitlis merkez Gazipaşa İlkokulu’nda bitirdi. Orta ve lise Öğrenimini Bitlis Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 1997 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi bölümünü kazanarak aynı bölümden 2001 yılında mezun oldu. 2003-2006 yılları arasında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalında Yüksek Lisans Öğrenimini tamamladı. 2007 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalında doktora eğitime başladı. Aynı yıl Balıkesir Üniversitesi Edremit Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı kurumda çalışma hayatını sürdüren Aytekin ULUTAŞ, 2014 yılında doktora öğrenimini tamamladı.