

**T.C.**  
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN DİFÜZYON**  
**KAYNAĞINA GÜMÜŞÜN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**ZEHRA ÇAKMAK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZKAN ESKİ**

**HAZİRAN - 2023**

**KASTAMONU**

## TEZ ONAYI

**ZEHRA ÇAKMAK** tarafından hazırlanan “**BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAĞINA GÜMÜŞÜN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **23.06.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

|                   |                                                     |       |
|-------------------|-----------------------------------------------------|-------|
| <b>Danışman</b>   | Dr. Öğr. Üyesi Özkan ESKİ<br>Kastamonu Üniversitesi | ..... |
| <b>Jüri Üyesi</b> | Prof. Dr. Serkan ISLAK<br>Kastamonu Üniversitesi    | ..... |
| <b>Jüri Üyesi</b> | Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA<br>Gazi Üniversitesi       | ..... |

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V.

Doç. Dr. Osman ÇİÇEK

.....

## TAAHHÜTNAME

*Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.*

**Zehra ÇAKMAK**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAĞINA GÜMÜŞÜN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ZEHRA ÇAKMAK

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI  
DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZKAN ESKİ

Bu çalışmada, silisyum karbür takviyeli gümüş ilaveli bakır matrisli kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Kompozit malzemelerin üretimi için bakır tozuna hacimce %5 ve %10 SiC takviye edilmiş, 15 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde bakır matrisli kompozit malzemeler elde edilmiştir. Her bir numunenin 1,5 mm'lik uç kısımlarına %2, %4 ve %6 oranlarında gümüş tozu eklenerek 600 MPa tek eksenli basınç altında soğuk presleme yöntemi ile preslendikten sonra 850 °C'de 120 dakikada sinterlenmiştir. İşlem sonunda gümüş ilaveli kısımlar birbirlerine temas edecek şekilde 850 °C sıcaklık, 2 MPa basınç ve 30, 60 ve 120 dakika bekleme süreleri kullanılarak Argon atmosferi altında difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir.

Kaynaklı birleştirmelerin, arayüzey dayanımının belirlenebilmesi için üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Ayrıca Ag-Cu-SiC kaynaklı birleştirmelerin bağlantı hattı, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde, gümüşün varlığını doğrulamak için EDS analizi yapılmıştır. Kaynaklı numunelere yapılan üç nokta eğme testleri sonucunda, artan gümüş oranı ile birlikte eğilme mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Enine kopma dayanımı değerlerinde en iyi sonuç 120 dakika kaynak süresinde %10 SiC takviyeli %6 Ag ilaveli numune de 156,74 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda ilave edilen gümüşün sertlik değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Kaynak sonrası en yüksek sertlik değeri 120 dakika kaynak yapılmış %10 SiC takviyeli ve hacimce %6 oranında gümüş içeren numunede olduğu belirlenmiştir. Yapıya ilave edilen gümüş oranının artması bağlantı mukavemeti değerlerinde düşük kaynak sürelerinde artan etki göstermiştir. Gümüşün %10 SiC takviye oranındaki etkisinin %5 SiC takviye oranına göre daha etkili bağlantı mukavemeti sağladığı gözlemlenmiştir. En iyi sonuçlar 120 dakika kaynak süresinde kaynak yapılmış %10 SiC takviyeli ve %6 Ag ilaveli numunede elde edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Bakır, Silisyum Karbür, Gümüş, Toz Metalurjisi, Difüzyon Kaynağı.

Haziran 2023, 120 Sayfa

## **ABSTRACT**

### **MSC THESIS**

#### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SILVER ON DIFFUSION WELDING OF COPPER MATRIX COMPOSITE MATERIALS**

**ZEHRA ÇAKMAK**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
SUPERVISOR:ASSIST. PROF.DR. ÖZKAN ESKİ**

In this study, silicon carbide reinforced silver added copper matrix composite materials were produced by powder metallurgy method. For the production of composite materials, copper powder was reinforced with 5% and 10% SiC by volume and copper matrix composite materials with a diameter of 15 mm and a height of 15 mm were obtained. Silver powder was added to the 1.5 mm end parts of each sample at the rates of 2%, 4% and 6% and pressed by cold pressing method under 600 MPa uniaxial pressure and then sintered at 850 °C for 120 minutes. At the end of the process, the silver added parts were joined by diffusion welding method under Argon atmosphere using 850 °C temperature, 2 MPa pressure and waiting times of 30, 60 and 120 minutes.

Three-point bending tests were performed to determine the interfacial strength of the welded joints. In addition, the joint line of Ag-Cu-SiC welded joints were analysed using optical microscope and scanning electron microscope (SEM). EDS analysis was performed to confirm the presence of silver in the analyses. As a result of three-point bending tests performed on the welded specimens, it was determined that the bending strength increased with increasing silver content. The best result in transverse rupture strength values was measured as 156.74 MPa in the sample with 10% SiC reinforcement and 6% Ag addition at 120 minutes welding time. As a result of the hardness measurements, it was determined that the added silver increased the hardness values. The highest hardness value after welding was determined to be in the sample containing 10% SiC reinforced and 6% silver by volume, which was welded for 120 minutes. The increase in the amount of silver added to the structure showed an increasing effect on the joint strength values at low welding times. It was observed that the effect of silver at 10% SiC reinforcement ratio provided more effective joint strength than 5% SiC reinforcement ratio. The best results were obtained in the specimen with 10% SiC reinforcement and 6% Ag addition welded at 120 minutes welding time.

**KEYWORDS:** Copper, Silicon Carbide, Silver, Powder Metallurgy, Diffusion Welding.

June 2023, 120 Page

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca bilgilerini ve desteğini esirgemeyen, eğitimime devam etmekle ilgili beni teşvik eden, şahsıma göstermiş olduğu her türlü ilgi ve destekten ötürü tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özkan ESKİ'ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans ders dönemimde emeklerinden dolayı Prof. Dr. Serkan ISLAK'a, Doç. Dr. Arif UZUN'a, Doç.Dr. Hüseyin Güran ÜNAL'a ve Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA'ya teşekkürlerimi sunarım. Deneylerim sırasında yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Cihan ÖZORAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca maddi ve manevi desteğini bir an olsun esirgemeyen, her tökezlediğimde elimden tutup düşmeme engel olan, benim için her türlü fedakarlığı yapan, tüm stresimi ve üzüntümü benimle paylaşıp beni sakinleştiren, en büyük destekçim olup her an yanımda olan sevgili eşim Hakan ÇAKMAK'a, bana hayatım boyunca gözlerinin içi gülerek gururla bakan canım babam Ahmet DEDELER'e, hayatımda gördüğüm en güçlü kadın olan güzel annem Kadriye DEDELER'e ve biricik kardeşim Tuğba DEDELER'e çok teşekkür ederim.

ZEHRA ÇAKMAK

Kastamonu, 2023

## İÇİNDEKİLER

|                                                                    | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| TEZ ONAYI .....                                                    | ii           |
| TAAHÜTNAME .....                                                   | iii          |
| ÖZET .....                                                         | iv           |
| ABSTRACT .....                                                     | v            |
| TEŞEKKÜR....                                                       | vi           |
| İÇİNDEKİLER....                                                    | vii          |
| ŞEKİLLER DİZİNİ....                                                | ix           |
| TABLolar DİZİNİ ....                                               | xiii         |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ....                                | xiv          |
| 1. GİRİŞ ....                                                      | 1            |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ....                                      | 4            |
| 3. KOMPOZİT MALZEMELER .....                                       | 12           |
| 3.1 Kompozit Malzemeler .....                                      | 12           |
| 3.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları .....          | 13           |
| 3.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....                  | 14           |
| 3.4 Metal Matrisli Kompozitler .....                               | 15           |
| 3.5 MMK Malzemelerin Kullanım Alanları ....                        | 18           |
| 3.6 MMK Malzemelerde Kullanılan Takviye Malzemeleri .....          | 18           |
| 3.6.1 Silisyum Karbür (SiC) ....                                   | 20           |
| 3.6.2 Silisyum Karbürün Özellikleri ....                           | 21           |
| 3.7 MMK Malzemelerin Matris Yapılarına Göre Gruplandırılması ..... | 22           |
| 3.7.1 Bakır Bazlı Alaşımlar .....                                  | 22           |
| 3.7.2 Bakır .....                                                  | 23           |
| 3.7.3 Bakır Üretimi ....                                           | 24           |
| 3.7.4 Bakırın Kullanım Alanları .....                              | 25           |
| 3.7.5 Gümüş Alaşımlar ....                                         | 26           |
| 3.7.6 Gümüş Metalinin Genel Özellikleri ....                       | 27           |
| 3.7.7 Gümüşün Fiziksel Özellikleri ....                            | 27           |
| 3.7.8 Gümüşün Lehim ve Kaynak Özelliği .....                       | 29           |
| 3.8 Toz Metalurjisi .....                                          | 29           |
| 3.8.1 Toz Üretim Yöntemleri .....                                  | 30           |
| 3.8.1.1 Mekanik yöntemler ....                                     | 31           |
| 3.8.1.2 Kimyasal yöntemler ....                                    | 32           |
| 3.8.1.3 Elektroliz yöntemi .....                                   | 32           |
| 3.8.1.4 Atomizasyon yöntemi ....                                   | 33           |
| 3.8.2 Toz Metalurjisi Üretim Aşamaları ....                        | 34           |
| 3.8.2.1 Tozların karıştırılması ....                               | 34           |
| 3.8.2.2 Tozların şekillendirilmesi ....                            | 35           |
| 3.8.2.3 Sinterleme ....                                            | 36           |
| 3.8.3 TM Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları .....            | 37           |
| 4. DİFÜZYON VE DİFÜZYON KAYNAĞI ....                               | 39           |
| 4.1 Difüzyon .....                                                 | 39           |
| 4.2 Difüzyon Kanunları .....                                       | 40           |
| 4.2.1 I. Fick Kanunu .....                                         | 40           |

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.2 II. Fick Kanunu .....                                                 | 41        |
| 4.2.3 Difüzyon Mekanizmaları .....                                          | 42        |
| 4.3 Difüzyon Kaynağı .....                                                  | 44        |
| 4.4 Difüzyon Kaynağının Prensipleri .....                                   | 48        |
| 4.5 Difüzyon Kaynağının Parametreleri .....                                 | 50        |
| 4.5.1 Kaynak Sıcaklığı .....                                                | 51        |
| 4.5.2 Kaynak Basıncı .....                                                  | 51        |
| 4.5.3 Kaynak Süresi .....                                                   | 51        |
| 4.5.4 Yüzey Şartları.....                                                   | 53        |
| 4.5.5 Kaynak Ortamı.....                                                    | 54        |
| 4.5.6 Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları .....    | 54        |
| 4.6 Difüzyon Yardımcıları .....                                             | 55        |
| 4.7 Difüzyon Kaynağının Uygulama Alanları .....                             | 56        |
| 4.8 Difüzyon Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları .....                     | 57        |
| <b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>                                         | <b>59</b> |
| 5.1 Çalışmanın Amacı .....                                                  | 59        |
| 5.2 Hammaddeler ve Kompozit Üretimi.....                                    | 59        |
| 5.3 Toz Karışımların Hazırlanması .....                                     | 60        |
| 5.3.1 Presleme.....                                                         | 61        |
| 5.3.2 Sinterleme.....                                                       | 62        |
| 5.3.3 Yüzey Hazırlama.....                                                  | 63        |
| 5.4 Difüzyon Kaynağı .....                                                  | 64        |
| 5.5 Kaynak Sonrası Yüzey Hazırlama .....                                    | 66        |
| 5.6 Deney Numunelerinin İncelenmesinde Kullanılan Testler ve Cihazlar ..... | 67        |
| 5.6.1 Mikroyapı İncelemeleri (Optik Mikroskop).....                         | 67        |
| 5.6.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS).....                           | 68        |
| 5.6.3 XRD Analizi.....                                                      | 68        |
| 5.6.4 Üç Nokta Eğme Testi.....                                              | 69        |
| 5.6.5 Sertlik Ölçümü.....                                                   | 70        |
| 5.6.6 Yoğunluk Ölçümü.....                                                  | 71        |
| <b>6. SONUÇ VE TARTIŞMA .....</b>                                           | <b>73</b> |
| 6.1 Üretimde Kullanılan Tozların SEM Fotoğrafları .....                     | 73        |
| 6.2 %5 SiC Takviyeli Kompozitler .....                                      | 74        |
| 6.2.1 Optik Mikroskop Görüntü Analizi.....                                  | 74        |
| 6.2.2 SEM Görüntü Analizi.....                                              | 76        |
| 6.2.3 XRD Analizi.....                                                      | 78        |
| 6.2.4 Yoğunluk Analizi.....                                                 | 79        |
| 6.2.5 Üç Nokta Eğme Testi Analizi.....                                      | 82        |
| 6.2.6 Mikrosertlik Analizi.....                                             | 85        |
| 6.3 %10 SiC Takviyeli Kompozitler .....                                     | 88        |
| 6.3.1 Optik Mikroskop Görüntü Analizi.....                                  | 88        |
| 6.3.2 SEM Görüntü Analizi.....                                              | 91        |
| 6.3.3 EDS Analizi.....                                                      | 93        |
| 6.3.4 XRD Analizi.....                                                      | 95        |
| 6.3.5 Yoğunluk Analizi.....                                                 | 96        |
| 6.3.6 Üç Nokta Eğme Testi Analizi.....                                      | 99        |
| 6.3.7 Mikrosertlik Analizi.....                                             | 105       |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>7. SONUÇ</b> .....       | <b>108</b> |
| 7.1 Görüş ve Öneriler ..... | 110        |
| <b>KAYNAKLAR</b> ....       | <b>112</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....       | <b>120</b> |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1 Kompozit malzemeleri oluşturan malzeme grupları.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 13 |
| Şekil 3.2 Yapıda yer alan bileşenlerin şekillerine göre kompozit çeşitleri.....                                                                                                                                                                                                                                   | 15 |
| Şekil 3.3 Matris malzemelerine ait kullanım oranları.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 17 |
| Şekil 3.4 Kullanılmakta olan takviye türlerinin oranı.....                                                                                                                                                                                                                                                        | 19 |
| Şekil 3.5 Bakırın üretim aşamaları.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 24 |
| Şekil 3.6 İlave edilen elementlerin bakır üzerindeki etkileri .....                                                                                                                                                                                                                                               | 25 |
| Şekil 3.7 Sektörlere göre bakır kullanımı dağılımı .....                                                                                                                                                                                                                                                          | 26 |
| Şekil 3.8 Toz metalurjisi yöntemi ile malzeme üretiminin adımları.....                                                                                                                                                                                                                                            | 30 |
| Şekil 3.9 Toz parçacıklarının şekilleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 31 |
| Şekil 3.10 Mekanik öğütme işlemi .....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 32 |
| Şekil 3.11 Elektroliz yöntemi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 33 |
| Şekil 3.12 Düşey gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                                                                                               | 34 |
| Şekil 3.13 Toz metalurjisi üretim şeması.....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 34 |
| Şekil 3.14 Harmanlama ve karışım cihazları a)Tambur, b)Çift koni, c)Vidalı<br>karıştırıcı, d)Bıçaklı karıştırıcı .....                                                                                                                                                                                            | 35 |
| Şekil 3.15 Presleme yöntemi ile TM'deki metal tozların geleneksel yöntemle<br>sıkıştırılması; (1)Kalıptaki boş alanın tozla doldurulması, (2) İlk<br>sıkıştırma, (3) Alt ve üst zımbaların sıkıştırma pozisyonları, (4)<br>Preslenen parçanın çıkarılması .....                                                   | 36 |
| Şekil 3.16 Sinterleme aşamalarındaki gözenek ve tane sınırı değişimleri.....                                                                                                                                                                                                                                      | 37 |
| Şekil 4.1 Serbest enerji ve durum değişimi arasındaki ilişki .....                                                                                                                                                                                                                                                | 39 |
| Şekil 4.2 Kararsız hal difüzyonu için konsantrasyon profili.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 41 |
| Şekil 4.3 Kararsız hal difüzyonunda üç farklı sıcaklıkta oluşan<br>konsantrasyon profili.....                                                                                                                                                                                                                     | 42 |
| Şekil 4.4 Difüzyon mekanizmalarının şematik gösterimi 1) Direkt yer<br>değiştirme, 2)Halka difüzyonu, 3)Boşluk mekanizması, 4)Arayer<br>difüzyonu, 5)Arayerimsi difüzyon, 6)Tırmanmalı difüzyon .....                                                                                                             | 43 |
| Şekil 4.5 Çeşitli katı hal kaynak işlemlerinin süre, deformasyon ve sıcaklık<br>yönünden mukayese edilmesi .....                                                                                                                                                                                                  | 44 |
| Şekil 4.6 Difüzyon kaynak yönteminin şematik gösterimi: a) Oksit tabakası<br>ve ilk nokta teması, b) Plastik deformasyon ve sürünme sonrası<br>daha ince bir oksit tabakası ve geniş boşlukların oluşması, c) Akma<br>sonrası, d) Hacim ve yüzey difüzyonuyla boşlukların doldurulması,<br>e) Bitmiş kaynak ..... | 45 |
| Şekil 4.7 Difüzyon kaynağı makinesinin şematik gösterimi 1) Uygulanan yük<br>(basınç), 2) Argon gazı çıkışı, 3) Isı bobini, 4) Argon gazı girişi, 5)<br>Numune, 6) Sıcaklık ölçer .....                                                                                                                           | 46 |
| Şekil 4.8 Metal yüzeyindeki pürüzlülük ve mevcut kirleticilerin karakteristiği.....                                                                                                                                                                                                                               | 49 |
| Şekil 4.9 Difüzyon kaynağındaki üç aşamanın mekanik modeli .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 49 |
| Şekil 4.10 Sıcaklığın sürünme eğrisine etkisi .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 52 |
| Şekil 4.11 Sıcaklığın birleşme alanı üzerindeki etkisi .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 52 |
| Şekil 4.12 Yüzey kusurları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 53 |
| Şekil 4.13 Yüzey deformasyonu ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı<br>değişim.....                                                                                                                                                                                                                             | 53 |

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.14 Difüzyon kaynaklı birleştirmelerin optik mikroskop görüntüleri<br>a)TiAl-Ti6Al4V, b) gümüş ara bağlayıcı düşük karbonlu çelik-<br>titanyum c) nikel ara bağlayıcı titanyum ve paslanmaz çelik<br>malzeme ..... | 55 |
| Şekil 5.1 Üretilen numunelerinin şematik gösterimi.....                                                                                                                                                                   | 59 |
| Şekil 5.2 Hassas terazi (0,1 mg okunabilirlik) .....                                                                                                                                                                      | 61 |
| Şekil 5.3 Toz karıştırma makinesi (Turbula) .....                                                                                                                                                                         | 61 |
| Şekil 5.4 a) Pres kalıbı, b) 30 ton kapasiteli hidrolik pres .....                                                                                                                                                        | 62 |
| Şekil 5.5 a) Preslenen numunelerin şekli, b) Numunenin boyutları .....                                                                                                                                                    | 62 |
| Şekil 5.6 a) Sinterleme fırını, b) Sinterleme işlemi Sıcaklık-Zaman grafiği .....                                                                                                                                         | 63 |
| Şekil 5.7 Sinterlenmiş numune .....                                                                                                                                                                                       | 63 |
| Şekil 5.8 Zımparalama ve parlatma makinesi .....                                                                                                                                                                          | 64 |
| Şekil 5.9 Difüzyon kaynağı makinesinin şematik gösterimi 1) Uygulanan yük<br>(basınç), 2) Argon gazı çıkışı, 3) Isı bobini, 4) Argon gazı girişi, 5)<br>Numune, 6) Sıcaklık ölçer .....                                   | 64 |
| Şekil 5.10 a) Kaynak çiftinin ölçüleri, b) Kaynak yapılmış numune.....                                                                                                                                                    | 66 |
| Şekil 5.11 Zımparalama makinesi.....                                                                                                                                                                                      | 67 |
| Şekil 5.12 Yüzeyi düzlenmiş numunenin şematik gösterimi .....                                                                                                                                                             | 67 |
| Şekil 5.13 Optik mikroskop .....                                                                                                                                                                                          | 68 |
| Şekil 5.14 Taramalı elektron mikroskobu.....                                                                                                                                                                              | 68 |
| Şekil 5.15 X-ışını difraksiyonu .....                                                                                                                                                                                     | 69 |
| Şekil 5.16 a) Universal mekanik test cihazı, b)Üç nokte eğme test yapılma anı .....                                                                                                                                       | 69 |
| Şekil 5.17 Üç nokta eğilme testi şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                  | 70 |
| Şekil 5.18 Vickers sertlik ölçüm cihazı .....                                                                                                                                                                             | 71 |
| Şekil 5.19 Arşimet prensibiyle yoğunluk ölçümü.....                                                                                                                                                                       | 71 |
| Şekil 6.1 Kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a)<br>gümüş, b) bakır, c)silisyum karbür .....                                                                                                     | 73 |
| Şekil 6.2 %5 SiC takviye oranına sahip sinterlenmiş numunelerin optik<br>mikroskop görüntüsü a) %5SiC-%95Cu, b)%2Ag-%5SiC-%93Cu,<br>c)%4Ag-%5SiC-%91 Cu, d) %6Ag-%5SiC-%89 Cu.....                                        | 74 |
| Şekil 6.3 %5 SiC-%95Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin<br>optik mikroskop görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120 dk .....                                                                                  | 75 |
| Şekil 6.4 %2Ag-5SiC-%93Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme<br>bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120dk.....                                                                                 | 75 |
| Şekil 6.5 %4Ag-5SiC-%91Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme<br>bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120dk.....                                                                                 | 75 |
| Şekil 6.6 %6Ag-5SiC-%89Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme<br>bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120dk.....                                                                                 | 75 |
| Şekil 6.7 %5 SiC-%95Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin<br>SEM görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120 dk .....                                                                                              | 77 |
| Şekil 6.8 %2Ag-5SiC-%93Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme<br>bölgelerinin SEM görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120 dk.....                                                                                            | 77 |
| Şekil 6.9 %4Ag-5SiC-%91Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme<br>bölgelerinin SEM görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120 dk.....                                                                                            | 77 |
| Şekil 6.10 %6Ag-5SiC-%89Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme<br>bölgelerinin SEM görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120 dk.....                                                                                           | 77 |

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.11 %6Ag-5SiC-%89Cu içeren kaynaklı numunelerin XRD analizi.....                                                                                                                                          | 78 |
| Şekil 6.12 %5 SiC takviyeli kompozit malzemelerin enine kopma mukavemeti değerleri.....                                                                                                                          | 83 |
| Şekil 6.13 %2Ag-%5SiC-%93 Cu kaynaklı numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri a)30 dk, b)60 dk, c)120 dk .....                                                                                                   | 83 |
| Şekil 6.14 %5 SiC takviyeli kompozitlerde gümüş ilavesinin gümüş ileve edilmemiş numunelerde kaynak bağlantı mukavemetine etki oranı (%).....                                                                    | 84 |
| Şekil 6.15 %4 Ag-%5 SiC-%91 Cu 120 dk kaynak yapılmış malzemenin mikrosertlik görüntüsü .....                                                                                                                    | 85 |
| Şekil 6.16 %5 SiC takviyeli numunelerin kaynak süresine göre sertlik değeri .....                                                                                                                                | 87 |
| Şekil 6.17 %5 SiC takviye oranındaki kompozit malzemelere gümüş ilave oranının sertlik değerlerine % etkisi .....                                                                                                | 87 |
| Şekil 6.18 %10 SiC takviye oranına sahip sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüsü a) %10SiC-%90Cu, b)%2Ag-%10SiC-%88Cu, c)%4Ag-%10SiC-%86 Cu, d) %6Ag-%10SiC-%84 Cu.....                               | 89 |
| Şekil 6.19 %10 Sic-%90 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a)30dk,b)60 dk,c)120 dk.....                                                                             | 90 |
| Şekil 6.20 %2Ag-%10 Sic-%88 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a)30dk,b)60 dk,c)120 dk.....                                                                        | 90 |
| Şekil 6.21 %4Ag-%10 Sic-%86 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a)30dk,b)60 dk,c)120 dk.....                                                                        | 90 |
| Şekil 6.22 %6Ag-%10 Sic-%84 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a)30dk,b)60 dk,c)120 dk.....                                                                        | 90 |
| Şekil 6.23 %10 Sic-%90 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüleri a)30dk,b)60 dk,c)120 dk.....                                                                                         | 92 |
| Şekil 6.24 %2Ag-%10SiC-%88 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüleri a)30dk, b)60 dk, c)120 dk .....                                                                                  | 92 |
| Şekil 6.25 %4Ag-%10SiC-%86 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüleri a)30dk, b)60 dk, c)120 dk.....                                                                                   | 92 |
| Şekil 6.26 %6Ag-%10SiC-%84 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüleri a)30dk, b)60 dk, c)120 dk.....                                                                                   | 92 |
| Şekil 6.27 %2 Ag-%10 SiC-%88 Cu kompozit malzemesinin EDS element analizi a)%2 Ag-%10 SiC-%88 Cu b) Kompozit malzemedeki C C) Kompozit malzemedeki Si d) Kompozit malzemedeki Ag e) Kompozit malzemedeki Cu..... | 93 |
| Şekil 6.28 %4 Ag-%10 SiC-%86 Cu kompozit malzemesinin EDS element analizi a)%4 Ag-%10 SiC-%86 Cu b) Kompozit malzemedeki C C) Kompozit malzemedeki Si d) Kompozit malzemedeki Ag e) Kompozit malzemedeki Cu..... | 94 |
| Şekil 6.29 %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu kompozit malzemesinin EDS element analizi a)%2 Ag-%10 SiC-%84 Cu b) Kompozit malzemedeki C C) Kompozit malzemedeki Si d) Kompozit malzemedeki Ag e) Kompozit malzemedeki Cu..... | 94 |
| Şekil 6.30 %6Ag-%10SiC-%84 Cu kompozit malzemesinin çizgisel EDS analizi .....                                                                                                                                   | 95 |
| Şekil 6.31 %6Ag-%10SiC-%84 Cu kaynaklı numunenin XRD analizi .....                                                                                                                                               | 96 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 6.32 %10 SiC takviyeli numunelerin enine kopma mukavemeti değerleri .....                                                                | 99  |
| Şekil 6.33 %2Ag-%10SiC-%88 Cu içeren kaynaklı numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri a)30dk, b)60 dk, c)120 dk .....                          | 101 |
| Şekil 6.34 %10 SiC takviyeli kompozitlerde gümüş ilavesinin gümüş ilave edilmemiş numunelerde kaynak bağlantı mukavemetine etki oranı(%) ..... | 101 |
| Şekil 6.35 %0 Gümüş ilaveli %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynaklı numunelerin kaynak süresine göre enine kopma mukavemeti değerleri .....       | 103 |
| Şekil 6.36 %2 Gümüş ilaveli %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynaklı numunelerin kaynak süresine göre enine kopma mukavemeti değerleri .....       | 103 |
| Şekil 6.37 %4 Gümüş ilaveli %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynaklı numunelerin kaynak süresine göre enine kopma mukavemeti değerleri .....       | 104 |
| Şekil 6.38 %6 Gümüş ilaveli %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynaklı numunelerin kaynak süresine göre enine kopma mukavemeti değerleri .....       | 104 |
| Şekil 6.39 %10 SiC takviyeli numunelerin gümüş oranı ve kaynak süresine göre sertlik değerleri .....                                           | 105 |
| Şekil 6.40 %10 SiC takviye oranındaki kompozit malzemelere gümüş ilave oranının sertlik değerlerine % etkisi .....                             | 107 |

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.1 Alaşımların üretiminde kullanılmakta olan yüksek performanslı<br>sahip saf elementlere ait mukavemet ve yoğunluk değerleri. .... | 17 |
| Tablo 3.2 Metal matrisli kompozitlerde kullanılmakta olan bazı takviye<br>malzemeler ve özellikleri .....                                  | 20 |
| Tablo 3.3 Silisyum karbürün(SiC) temel özellikleri .....                                                                                   | 21 |
| Tablo 3.4 Bakırın fiziksel özellikleri. ....                                                                                               | 23 |
| Tablo 3.5 Gümüşün bazı fiziksel özellikleri .....                                                                                          | 28 |
| Tablo 4.1 Difüzyon mekanizmaları ve bu mekanizmaların özellikleri.....                                                                     | 43 |
| Tablo 5.1 Kompozitlerin bileşim oranları ve üretim parametreleri .....                                                                     | 60 |
| Tablo 5.2 Kaynak parametreleri.....                                                                                                        | 65 |
| Tablo 6.1 %5 SiC içeren kompozit malzemelerin kaynak öncesi yoğunlukları. ....                                                             | 79 |
| Tablo 6.2 %5 SiC içeren kompozit malzemelerin kaynak sonrası yoğunlukları .....                                                            | 81 |
| Tablo 6.3 %10 SiC içeren kompozit malzemelerin kaynak öncesi<br>yoğunlukları .....                                                         | 97 |
| Tablo 6.4 %10 SiC içeren kompozit malzemelerin kaynak sonrası<br>yoğunlukları .....                                                        | 98 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|                                     |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|
| <b>Cu</b>                           | : Bakır                  |
| <b>Ag</b>                           | : Gümüş                  |
| <b>SiC</b>                          | : Silisyum Karbür        |
| <b>Al</b>                           | : Alüminyum              |
| <b>HNO<sub>3</sub></b>              | : Nitrik Asit            |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>               | : Su                     |
| <b>L</b>                            | : Parça Uzunluğu         |
| <b>w</b>                            | : Parça Genişliği        |
| <b>h</b>                            | : Parça Yüksekliği       |
| <b>F</b>                            | : Kuvvet                 |
| <b>HV</b>                           | : Vickers Sertlik Birimi |
| <b><math>\rho_{deneysel}</math></b> | : Deneysel Yoğunluk      |
| <b><math>\rho_{teorik}</math></b>   | : Teorik Yoğunluk        |
| <b><math>\rho_b</math></b>          | : Bağlı Yoğunluk         |

### Kısaltmalar

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| <b>MMK</b> | : Metal Matrisli Kompozit            |
| <b>TM</b>  | : Toz Metalurjisi                    |
| <b>SEM</b> | : Taramalı Elektron Mikroskobu       |
| <b>EDS</b> | : Enerji Dağılım Spektrometresi      |
| <b>XRD</b> | : X-ışını Difraksiyon Spektroskopisi |

## 1. GİRİŞ

Modern mühendislik malzemelerinden biri olan metal matrisli kompozitler (MMK) geleneksel metallere kıyasla pek çok avantaja sahiptir. Geleneksel metaller yerine MMK malzemeler kullanılması ile daha fazla aşınma direnci, mukavemet/ağırlık oranı, kırılma tokluğu ve sürünme direnci elde edilebilmektedir (Ozan vd., 2012). Metal matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak en fazla kullanılmakta olan malzemelerin başında alüminyum, bakır ve alaşımları gelmektedir (İbrahim vd., 1991).

Bakır ve alaşımları, yüksek elektriksel-ısıl iletim ve yüksek aşınma dayanımı gibi mükemmel özellikleri sebebiyle birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Cu alaşımları, iyi ısıl ve elektriksel iletkenliğine ek olarak, yüksek korozyon direncine ve iyi bir sünekliğe de sahiptirler. Ayrıca bu kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri de iyidir (Bulut, 2017).

Metal matrisli kompozitlerin bütün bu avantajlarına rağmen, kullanım alanlarını kısıtlayan en büyük engel, bu malzemelerin pres kalıplarda üretilmelerinden dolayı kompleks veya büyük boyutlu üretiminin zor hatta imkansız olmasıdır.

Günümüzde tüm malzemelerde olduğu gibi, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemelerin de birlikte veya farklı malzemeler ile kaynaklanarak kullanılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu sebepten ötürü birçok farklı kaynak yöntemi ve toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen malzemelerin birleştirilmesi konusunda birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalarda doğru şartlar sağlandığında başarılı bulgular elde edildiği görülmüştür. (Kejanlı, 2007; Taşkın vd., 2006)

Kompozit malzemelerin kaynağını; ergitme kaynak yöntemleri ve katı hal kaynak yöntemleri olmak üzere iki grupta yapmak mümkündür. Ergitme kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklarda yüksek viskozite, kontrolsüz katılaşma ve istenmeyen reaksiyonlar gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlar yapılmış olan kaynağa mikro ve makro hatalara neden olmakta ve kaynaklanabilirliği azaltmaktadır. Ayrıca ergitme kaynağında yüksek sıcaklık sebebiyle ana malzemenin özellikleri

değiştüğinden ötürü bu durum, erimiş matris ile takviye malzeme arasında zararlı kimyasal reaksiyonlara sebep olmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar sonucunda, ergitme kaynak yöntemlerinde oluşabilen bu birleştirme problemleri nedeniyle metal matrisli kompozit malzemelerin katı hal birleştirme yöntemleri ile birleştirilmesinin daha avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır. (Salehi, 1990; Taşkın vd., 2005; Taşkın vd., 2008).

Difüzyonla birleştirme bir katı hal kaynak yöntemidir ve birleştirilecek iki eşleşmiş yüzeyin, malzemelerin ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta, malzemelerde makroskopik plastik deformasyona neden olmayan bir basınç altında, malzemeler arasında katı hal difüzyonuyla metalurjik bir bağ oluşana dek malzeme özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyen bir süre boyunca tutulmasıyla gerçekleştirilen bir birleştirme türüdür. Difüzyon kaynağı, malzemelerde istenmeyen mikro ve makro dönüşümlerin sınırlı miktarda olması ve kompozit malzemelerin kaynağında ana malzemenin mukavemet değerlerine daha yakın olunması nedeniyle diğer katı hal kaynak yöntemlerine göre daha avantajlı kabul edilmektedir (Çalığülü ve Taşkın, 2006; Ellis vd., 1994).

Difüzyon kaynağını; basınç, sıcaklık, ve zaman gibi parametreler önemli ölçüde etkilemektedir. Toz metalürjisi yöntemi (TM) ile üretilen malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi, hem malzemelerin orijinal yapısının korunması hem de oluşturulacak malzeme çiftinin difüzyon kaynağı davranışının anlaşılması açısından önemlidir (Pettersson vd., 2002; Taşkın vd., 2006; Ozan vd., 2006). Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan bir diğer alternatif yöntem de ara tabakalı difüzyon kaynağıdır. Bu metod esasen, birleştirilecek ana metallerin yüzeylerini ıslatabilecek ince bir tabakanın arayüzeyde izotermal oluşumuna ve katılaşmasına dayanmaktadır. Bu yöntemle ana metalin mekanik ve mikroyapısal özelliklerine benzer bağlar yapılabilmektedir. Ara yüzeyde bir ara katman veya kaplama kullanmanın amaçları; temiz bir yüzey elde etmek, difüzyonu hızlandırmak, istenmeyen intermetaliklerin oluşumunu en aza indirmek, ana metal difüzyonunu hızlandırmak için geçici bir ötektik eriyik oluşturmak, Kirkendall gözenekliliğini en aza indirmek, kaynak süresini kısaltmak, istenmeyen unsurları gidermek ve oksidasyonu önlemektir (Shirzadi ve Wallach, 1997).

Gümüş, lehim alaşımlarına belirli bir erime derecesi elde etmek, yüksek çekme mukavemeti sağlamak, lehimleme hızını artırmak, lehim bağlantısının deforme olabilirliğini artırmak, lehim olacak bölgenin rengini parçaya uydurmak, yüksek korozyon direnci sağlamak ve lehimleme sonrası temizleme işlemini azaltmak için eklenmektedir (Anık, 1991).

Bu çalışmanın amacı, gümüş elementinin, soğuk preslenmiş ve sinterlenmiş silisyum karbür takviyeli bakır matrisli kompozit malzemelerin difüzyon kaynağı yöntemi ile kaynak yapılabilirliği üzerindeki etkisinin araştırılması, koruyucu argon gazı atmosferi altında, en uygun birleşme şartları kullanılarak yapılması, kaynak bölgesinde oluşan bağlantıların incelenmesi ve bağlantı mukavemetinin daha düşük sıcaklık ve basınç altında daha kısa sürede yapılabilirliğinin araştırılmasıdır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Abukhdair, (2021) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, silisyum karbür (SiC) ile güçlendirilmiş bakır esaslı bir kompozit matrisin difüzyon kaynağını incelemiştir. Yapılan çalışmada numunelerin üretimi için, bakır tozuna hacimce %5, %10 ve %15 oranında SiC ilavesi ile elde edilmiş olan karışım 350 MPa basınç altında tek eksenli olarak soğuk preslemeyle ve sonrasında 45 dakika süreyle 800 °C'de sinterlenmiştir. Elde edilen numuneler 800 °C ve 850 °C sıcaklıkta, 30, 45 ve 60 dakika süreyle argon atmosferinde, 2 MPa basınç altında difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Üretim parametrelerinin etkisinin belirlenmesi amacıyla sertlik, yoğunluk ölçümleri yapılmış, içyapıları taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Kaynak işlemi sonrasında üç noktalı eğme testi uygulanmış ve sonuçlar kaynak edilmemiş numunelerle karşılaştırılmıştır. %10 SiC katkısında 850 °C ve 60 dakika difüzyon kaynağı koşullarında enine kopma dayanımı açısından en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu elde edilen değerler kaynaksız numunenin %90'lık kısmına denk gelmektedir (Abukhdair, 2021).

Atasoy ve Karaman, (2008) yaptıkları çalışmada titanyum ve düşük karbonlu çelik plakaları, çeşitli difüzyon süreleri için çeşitli sıcaklıklarda gümüş bir ara katman kullanarak difüzyon kaynak yoluyla birleştirmişlerdir. Elde edilen bağlantıların mukavemetini belirlemek için çekme-kesme testleri ve sertlik testleri uygulanmıştır. Ek olarak, optik, taramalı elektron mikroskobu incelemeleri ve enerji dağılımlı spektrometri element analizleri, bağlantının arayüzey özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Çalışma, en yüksek arayüzey mukavemetinin 850 °C'de 90 dakika boyunca birleştirilen numuneler için elde edildiğini göstermiştir. Sertlik sonuçlarından en yüksek sertlik değerinin ara tabaka malzemesi için elde edildiği ve ara tabakanın her iki tarafındaki sertlik değerlerinin birleşime olan mesafe arttıkça kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Enerji dağılım spektrometresi analizlerinde ara katmandaki gümüş miktarının sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür. Ayrıca difüzyon süresinin artması da gümüş miktarında bir miktar azalmaya neden olmuştur (Atasoy ve Karaman, 2008).

Balasubramanian, (2015) ara katman olarak gümüş folyo kullanarak AISI 304 paslanmaz çeliğe difüzyonla bağlanan titanyum alaşımı Ti-6Al-4V üzerine çalışma yapmıştır. Proses parametreleri uygun şekilde seçilmiş ve böylece herhangi bir kusur olmadan bağlantı sağlanmıştır. Araştırmayı yapmak için gereken optimum deney sayısına karar vermek için Box-Behnken tasarımı kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri ve bindirme kesme testi, sırasıyla bağlantıların sertliğini ve mukavemetini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Ti ve Fe veya C arasındaki atomik difüzyon ve göçün, ara katman metali olarak saf Ag eklenerek etkili bir şekilde önlendiğini göstermektedir. Mekanik testlerden elde edilen sonuçlar, kesme mukavemeti değerlerinin birleşme süresi ile doğrudan bir ilişkisi olduğunu göstermiştir. Maksimum bindirme kesme mukavemeti 149 MPa ve %18'lik kırılma gerilmesi 60 dakikalık birleştirme süresi ile elde edilen bağlantılar için gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 850 °C'de eşleşen yüzeylerin tam olarak birleşmemesi nedeniyle etkili bir birleşme mümkün olmamıştır (Balasubramanian, 2015).

Çalığülü, (2016) yapmış olduğu çalışmada Ti6Al4V alaşım çiftini Ag ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı metoduyla birleştirmiş ve bununla birlikte kaynak sıcaklığının bağlantı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada difüzyon kaynakları, 5 MPa kaynak basıncı, 60 dk kaynak süresi, 750,850 ve 950 °C'lik sıcaklıklarda ve koruyucu argon gazı atmosferinde yapılmıştır. Kaynak sıcaklığı değişken parametre olarak seçilmiştir. Difüzyon kaynağı sonrası birleşme ara yüzeyinde meydana gelen mikro yapı değişikliklerini optik mikroskop ile incelemiştir. Kaynak ara yüzeyindeki element geçişleri için EDS ve faz yapılarının incelenmesi için XRD analizini kullanmıştır. Bununla birlikte kaynak ara yüzeyindeki sertlik değişimlerini gözlemlemek için numunelere mikrosertlik testi uygulamıştır. Yapılan incelemeler sonucunda tüm kaynaklı numunelerde, bağlantısız bölgelere rastlanmamıştır. Artan süreyle paralel olarak daha iyi bir kaynaklı bağlantının elde edildiği gözlenmiş ve en iyi bağlantı kalitesinin 950 °C sıcaklıkta kaynak yapılan S3 numunesinde olduğunu belirlemiştir (Çalığülü, 2016 ).

Çelebi Efe, (2010) SiC takviyeli Cu matrisli kompozit malzemelerin karakterizasyonu üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada, sementasyon yöntemi ile üretilmiş olan bakır ve

hacimce %1, 2, 3 ve 5 SiC partikülleri içeren kompozitlerin bazı özelliklerini incelemiştir. Kompozitler, 280 MPa tek eksenli basınç altında 700 °C sıcaklıkta iki saat boyunca grafit tozu içine gömülü olarak preslenmiş ve sinterlenmiştir. Kompozitin sinterlenmiş bileşenlerinde baskın olan Cu ve SiC'yi karakterize etmek için SEM, EDS ve XRD teknikleri kullanılmıştır. Mikroyapı çalışmaları bakır partiküllerinin etrafında SiC partiküllerinin varlığını ortaya koymuştur. CuSiC kompozitlerinin Arşimet prensibi ile belirlenen bağıl yoğunlukları, artan takviye bileşenleri ile %98,11'den %90,93'e düşmüştür. Sinterlenmiş kompozitlerin ölçülen sertliği 127-155 HVN arasında değişmiştir. Test malzemelerinin maksimum elektrik iletkenliği %80,17- %57,76 IACS arasında değişmiştir (Çelebi Efe, 2010).

Çelebi vd., (2011) toz metalurjisi işlemiyle silisyum karbür ile güçlendirilmiş bakır matrisli kompozitin bazı özelliklerini %1, 2, 3 ve 5 SiC oranları için araştırmışlardır. Çalışmalarında, kompozit tozları preslemek ve 900-950 °C'de 2 saat boyunca grafit tozunu sinterlemek için 280 MPa'lık tek eksenli bir basınç kullanmışlardır. SEM raporlarına göre, SiC partikülleri Cu tane sınırlarında yer almaktadır. Sinterlenmiş kompozitlerde sertlik 104 ila 108 HBN arasında değişmiştir. Cu-SiC kompozitlerinin bağıl yoğunlukları %96,45 ile %89,61 arasında değişmiştir. Cu-SiC kompozitlerinin iletkenlikleri IACS'de %87,1 ile %55,2 arasında değişmiştir. SiC içeriği arttıkça sertlik artmış, bağıl yoğunluklar ve elektrik iletkenliği azalmıştır. Elektriksel iletkenlik değişimlerinin kontur grafiğini tahmin etme olasılığı test edilmiştir (Çelebi vd., 2011).

Çelik, (1996) yaptığı doktora çalışmasında, koruyucu gaz atmosferi altında difüzyon kaynağı ve uygulamasını incelemiştir. Çalışmada elektrolitik saf bakır ve alüminyum, argon gazı altında difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Deneyler sonrasında kaynaklı numunelerin mikro yapı araştırmaları için, optik mikroskop ve SEM ile incelenerek görüntüleri alınıp, EDS analizleri yapılmıştır. Bununla birlikte kaynak yapılan numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi ve mikro sertlik analizleri yapılmıştır. Çekme testi ve mikro yapı sonuçlarına göre en iyi birleştirmenin; 560°C difüzyon sıcaklığında, 4,5 Mpa difüzyon basıncında ve 60 dakika difüzyon süresinde gerçekleştiği tespit edilmiştir (Çelik, 1996).

Deng vd., (2013), ticari olarak saf titanyumun Ag ara katman kullanılarak 304 paslanmaz çeliğe katı hal difüzyonla bağlanmasını incelemişlerdir. İşlem 825-875 °C'de 8 MPa tek eksenli basınç altında vakumda 20 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal gözlemler, elde edilen bağlantıların Ag ara katmanı, TiAg intermetalik fazı ve Ti-Ag katı çözeltisinden oluştuğunu ortaya koymuştur. Optimize edilmiş 414 MPa'ya kadar bağlanma mukavemeti elde edilmiştir. Çekme testleri sırasında Ag ara katmanı boyunca kırılma gerçekleşmiş ve ara yüzey TiAg fazı bağlanma mukavemeti üzerinde zararlı bir etki göstermemiştir. Kırılma yüzeylerinde, bağlantıların doğası gereği sünek olduğunu gösteren geniş çukurlar gözlenmiştir (Deng vd., 2013).

Ekrami vd., (2019) çalışmasında bakır-gümüş çifti, nikel ve gümüş folyo ara katmanları kullanarak difüzyon bağıyla üretmişlerdir. Elde edilen bulgular, ara yüzeylerin katman genişliğinin artan sıcaklıkla birlikte arttığını göstermiştir. Aynı zamanda, uygun bir birleştirmenin yanı sıra uygun bir ara katmanın kullanılması, difüzyon lehimlemesi ile imal edilen tüm bağlantılar için daha düşük bir sıcaklıkta maksimum kesme mukavemetine sahip bağlantıların üretilmesini mümkün kılmıştır (750 °C'de lehimlenen paslanmaz çelik-Ni-Ag-Cu numunelerine kıyasla) (Ekrami vd., 2019).

Elhemsheri, (2022) doktora tezinde borkarbür-bakır ( $B_4C$ -Cu) kompozit malzemesinin birleştirilebilirliğinde difüzyon kaynağı yöntemini araştırmıştır. Numuneler toz metalurjisi (TM) yöntemiyle üretilmiştir. Cu tozları hacimce %2,5-%5-%7,5 bor karbür ( $B_4C$ ) ile, 45 dakika boyunca bilyeli öğütme makinesinde karıştırılmış, 40 Mpa basınç altında sıcak preslenmiş ve koruyucu argon gazı atmosferinde 800°C'de 4 dakika süreyle sinterlenmiştir. Cu-  $B_4C$  kompozit malzemelerine, 800°C-900°C sıcaklıkta, 90-120-180 dakika boyunca difüzyon kaynağı ile kaynak yapılmıştır. Difüzyon kaynağı esnasında 5-8 MPa tek eksenli basınç uygulanmıştır. Kaynağın difüzyon bağlantı bölgeleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen kaynak bağlantılarına kesme, sertlik, enine kopma dayanımı testleri yapılmıştır. Sonuç olarak; %2,5 ve %5 oranında bor karbür barındıran bakır numunelerde sırasıyla 144 MPa ve 166 MPa değerinde en yüksek dayanım sonuçları elde edilmiştir ( Elhemsheri, 2022).

Li vd., (2009) yılında yaptıkları araştırmada vakum altında difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş AgNi alaşımı ile saf alüminyumun mikro yapı ve dayanımı incelenmiştir. Kaynak işlemi dört farklı sıcaklıkta yapılmıştır. 500, 530, 560, 600 °C sıcaklıklarda, 60 dk ve 2 MPa basınçta, katı hal yönteminde ara tabakasız denemeler yapılmıştır. 600 °C sıcaklıkta ise; geçici sıvı faz yönteminde ara malzemeli denemeler yapılmıştır. Geçici sıvı faz yönteminde numuneler önce 5 MPa basınç altında, 530 °C'ye kadar ısıtılıp, 30 dk tutulmuş; daha sonra 600 °C' ye kadar ısıtılıp, 30 dakikada bu sıcaklıkta difüzyona tabi tutulmuştur. İki metodun, mikro yapıya ve kesme dayanımı değerlerine etkileri araştırılmıştır. Mikro yapı incelemeleri için numunelerin SEM görüntüleri alınarak, XRD analizi yapılmıştır. Katı hal metodunda AgNi alaşımı tarafında  $Ag_2Al$  fazı, geçici sıvı faz metodunda ise; Al ve Ag arasında  $Ag_2Al + Al$  ötektik fazı tespit edilmiştir (Li vd., 2009).

Paidar vd., (2021), Inconel 617 ve AISI 321 paslanmaz çeliğin difüzyon kaynağı, değişken bekletme süresi (30 ve 60 dakika) altında 750 °C sabit lehimleme sıcaklığında 50 µm kalınlığında AMS 4772 Ag ara katman ile gerçekleştirilmiştir. Difüzyon kaynaklı sert lehim bağlantılarının mikroyapısı, taramalı elektron mikroskopu ve enerji dağılım spektroskopisi kullanılarak ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bağlantıların kesme mukavemeti ve kırılma davranışı araştırılmıştır. Ag'nin kılcallık etkisi nedeniyle boşluksuz difüzyon kaynaklı bağlantılar elde edilmiş ve daha yüksek sert kaynak/tutma süresine sahip bağlantıda daha düzgün bir reaksiyon tabakası elde edilmiştir. Uzun sert lehimleme süresi 60 dakika olan bağlantı 322,9 MPa'lık maksimum kesme dayanımına sahiptir ve 30 dakikada işlenen bağlantıya göre %26'lık bir iyileşme göstermiştir. Etkin sert lehimleme/tutma süresinde, AMS4772 Ag ara katmanının kullanımı IN617 ve AISI 321 SS alaşımlarının birleştirilmesinde etkili olmuştur (Paidar vd., 2021).

Serier vd., (2011) yılında yaptıkları araştırmada, gümüş bir ara katman kullanılarak katı hal kaynak yöntemi ile birleştirilen  $Al_2O_3$ (alümina)'nın deneysel analizi incelenmiştir. Numunelerin birleştirilmesi için deneysel parametre olarak 2 MPa-10 MPa arasında difüzyon basıncı, 500 °C-900 °C arasında difüzyon sıcaklığı ve 1-7 saat arasında difüzyon süreleri seçilmiştir. Deney sonrasında mekanik test olarak; numunelerin kaynak dayanımını belirlemek için kesme testi uygulanmıştır. Difüzyon

kaynağı sonrasında, kaynak yapılan bölgede metalin seramik yüzey pürüzlülüğünü birleşme yüzeyinde kaplamasından kaynaklanan mekanik ve morfolojik mekanizma ile güçlü kimyasal bağlardan kaynaklanan adezyon mekanizması olmak üzere iki tip mekanizmanın oluştuğu gözlemlenmiştir (Serier vd., 2011).

Somani vd., (2018) çalışmalarında, çeşitli bileşimlere sahip Cu-SiC kompozitleri oluşturmak için toz metalurjisi tekniğini kullanmışlardır. % 90 Cu-%10 SiC, %85 Cu-%15 SiC, %80 Cu-%20 SiC ve %100 Cu olmak üzere dört farklı hacimsel kombinasyon kullanılmıştır. Tozu karıştırmak için V şeklinde bir karıştırıcı kullanılmıştır. Sabit bir taban elde etmek için, tozu 250 MPa basınçla sıkıştırmak üzere bir hidrolik pres kullanılmıştır. En iyi sonuçlar için sinterleme 950°C'de 60 dakikalık bir bekletme süresiyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bakır bazlı metal matrisli kompozitlerin özellikleri incelenmiştir. Çalışma, bakıra takviye olarak SiC eklenmesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği sonucuna varmıştır. Sinterlenmiş numunelerin yüzey morfolojisini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmış ve metal matrisli kompozitin mikroyapısal analizi, silisyum karbür partiküllerinin metal matris içinde homojen dağılımını ortaya koymuştur (Somani vd., 2018).

Torun ve arkadaşları, (2019) çalışmalarında, Ni75Al25 nikel alüminat ve 316 L östenitik paslanmaz çelik malzemeler, bakır ara katman kullanılarak farklı işlem süreleri için 950 °C'de vakum difüzyon sert lehimleme ile birleştirilmiştir. Kaynak arayüzünün mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Mikroyapının fotoğrafları, lehim arayüzü boyunca sürekli ve iyi bir bağlanma olduğunu göstermiştir. Kaynak işleminden sonra, birleştirmelerin kesme mukavemetini belirlemek için kaynaklı numuneler üzerinde bir kesme testi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, 120 dakikada kaynaklı numune için maksimum kesme mukavemetinin 225 MPa olduğunu göstermiştir. Kaynaklı numunelerin arayüzey ve kırılma yüzeylerinin kimyasal bileşimleri enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile belirlenmiştir. Yapılan analiz sonuçları, ana metaller ile bakır ara katman arasında difüzyon meydana geldiğini göstermiştir (Torun vd., 2019) .

Torun (2018)'un çalışmasında, AZ91 magnezyum alaşımı ve Al 2024 alüminyum alaşımı, 5 MPa basınç ve  $2.10^{-3}$  Pa vakum altında 60, 90 ve 120 dakika boyunca bakır/gümüş ara katman kullanılarak 440 °C'de difüzyon kaynak yöntemiyle kaynaklanmıştır. Kaynaklı numuneler; birleştirme yüzeyine dik olarak kesilmiş, kaynak bölgesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve kaynak bölgesi EDS ile analiz edilmiştir. Numuneler kesme testlerine tabi tutulmuş ve kırılma yüzeyleri karakterize edilmiştir. Kaynak bölgesinin ve birleştirilmiş numunelerin sertliği ölçülmüştür. Difüzyon bölgesinde sertlik değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, boşluksuz sürekli bir difüzyon bölgesi gözlemlenmiştir. SEM-EDS analizinin sonuçları, ara katman malzemeleri ile matris arasında atom difüzyonu olduğunu göstermiştir (Torun, 2018).

Wang vd., (2013) çalışmasında; Mg ve Al, magnetron püskürtme ile hazırlanan bir gümüş ara katman filmi kullanılarak difüzyon kaynak yoluyla birleştirilmiştir. Mg/Al bağlantılarının arayüz mikroyapısı ve mekanik performansı, kırılma Mg-Al bileşiklerinin oluşumunu önleyen gümüş ara tabakanın varlığında büyük ölçüde geliştirilmiştir. Bağlantı arayüzündeki tipik mikroyapı, Mg/Mg<sub>3</sub>Ag/MgAg/Al çok katmanlı bir yapıdır. Birleştirme sıcaklığı ve bekletme süresi, Mg-Al bileşiklerinin oluşumunu önlemek için optimize edilmiştir. Düşük birleştirme sıcaklıklarında (380-420 °C) ve kısa bekletme sürelerinde (15-45 dk), Mg-Ag bileşiklerinin varlığı nedeniyle Mg-Al intermetalik bileşikler ortadan kaldırılmıştır. Mg<sub>3</sub>Ag ve MgAg katmanlarının kalınlıkları artan sıcaklık ve daha uzun bekletme süreleri ile artmıştır. Gümüş ara katmanın eklenmesi, bağlantıların kesme mukavemetini büyük ölçüde artırmıştır. Mg-Al bileşiklerinin yokluğu nedeniyle arayüz bileşiklerinin maksimum mikrosertliği 368 HV'den 125 HV'ye düşmüştür. Eklemlerdeki kırılmalar Mg<sub>3</sub>Ag/MgAg, MgAg/Al sınırları arasında ve iç Mg-Al katmanlarında meydana gelmiştir. Kırılma özellikleri Mg-Al bileşiklerinin mevcut olup olmamasına bağlı olarak farklılık göstermiştir (Wang vd., 2013).

Wang vd., (2012), Magnetron püskürtme ile hazırlanan gümüş ara katmanlı ve gümüş ara katmansız difüzyon bağlı Mg-Al bağlantılarını incelemişlerdir. Gümüş ara katmanların eklenmesi, Mg-Al intermetalik bileşiklerin oluşumunu ortadan kaldırmış ve Mg-Al bağlantılarının bağlanma mukavemetini artırmıştır. Mg/Ag/Al birleşiminin

ara yüzeyinde  $Mg_3Ag$ ,  $MgAg$  ve  $Ag$  bazlı katı çözelti gözlenmiştir.  $Mg_3Ag$  tabakasının maksimum değeri 125 HV olan  $Mg/Ag/Al$  bağlantısındaki arayüzeyin mikrosertlik değeri,  $Mg_2Al_3$  tabakasının maksimum değeri 225 HV olan  $Mg/Al$  bağlantısından çok daha düşüktür.  $Mg/Ag/Al$  eklemindeki kırılma hasarı  $Mg_3Ag$  tabakası ile  $MgAg$  tabakası arasında meydana gelmiştir.  $Mg/Ag/Al$  ekleminin kırılma yüzeylerinde gözlenen taneler arası kırılma ve plastik deformasyon,  $Mg/Al$  birleşiminin kırılma özelliklerinden farklıdır (Wang vd., 2012).

Qiang vd., (2014) iki farklı malzemenin,  $Ti-6Al-4V$  (TC4) ve oksijensiz bakırın düşük sıcaklıkta difüzyonla birleştirilmesini incelemişlerdir. Ara katman olarak 30  $\mu m$  gümüş folyo kullanılmış ve birleştirme çeşitli birleştirme sıcaklıkları ve sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Gümüş ara katman  $Ti-Cu$  bileşiklerinin oluşumunu engellemiş, TC4/ $Ag$  arayüzünde  $AgTi$  ve  $AgTi_2$  oluşmuş ve  $Ag/OFC$  arayüzünde katı bir çözelti oluşmuştur. TC4/ $Ag/OFC$  bağlantısının gerilme mukavemeti önce artmış ve birleşme sıcaklığı veya birleşme süresi ile azalmıştır. 700°C'de 120 dakika boyunca 10 MPa'da birleştirilen bağlantı 161,9 MPa'lık maksimum gerilme mukavemeti göstermiştir. Kırılma morfolojisi, sünek kırılma başlangıcının ve yayılmasının, bağlantının zayıf noktası olan  $Ag/OFC$  arayüzünde gerçekleştiğini göstermiştir (Qiang vd., 2014).

Qiang vd.,(2015),  $Ti-6Al-4V$ 'nin (TC4) oksijensiz bakıra (OFC) düşük sıcaklıkta difüzyonla bağlanmasını, ara katman olarak gümüş folyo kullanılarak gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, ara katmanın kırılma  $Ti-Cu$  bileşiklerinin oluşumunu önleyebileceğini ve TC4/OFC bağlantısının arayüzey mikro yapısını ve birleşme mukavemetini geliştirebileceğini göstermektedir. Ayrıca, gümüş ara katmanın eklenmesi birleşme sıcaklığını büyük ölçüde düşürmektedir. TC4 tarafından OFC tarafına bağlantı bileşimi TC4 tabaka,  $AgTi$  bileşiği,  $Ag$  ara tabaka,  $Ag-Cu$  katı çözeltisi ve OFC tabaka şeklindedir. 10 MPa birleştirme basıncı altında 1 saat boyunca 700 °C'de yapıştırılan eklemin gerilme mukavemeti, literatürde daha önce bildirilenlerden daha yüksek olan 150 MPa'lık mükemmel bir değere sahiptir. Kırılma hatası  $Ag/OFC$  arayüzünde gerçekleşmiş ve kırılma yüzeyinde sünek kırılma gözlemlenmiştir.  $AgTi$  bileşiklerinin sünek özelliklerinin bu bağlantıdaki  $Ag-Cu$  katı çözeltisinden daha üstün olduğu öne sürülmektedir (Qiang vd., 2015).

### **3. KOMPOZİT MALZEMELER**

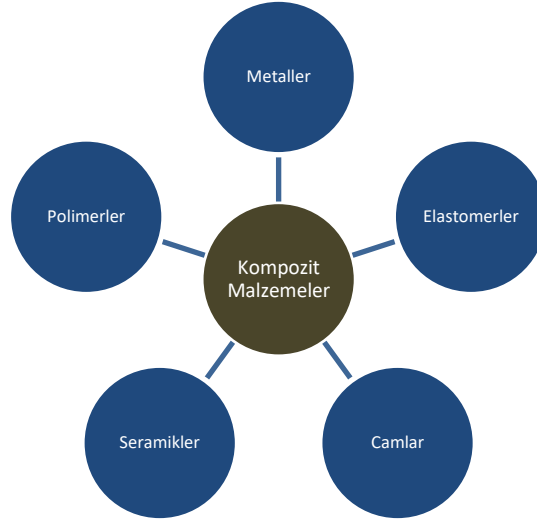
Endüstride yaşanan değişimler nedeniyle geleneksel malzemeler, hızla gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını tek başlarına karşılayamaz hale gelmiştir. Dolayısıyla kompozit malzemelerin üretilmesi ve elde edilen malzemelerin özellikleri üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren artmaya başlamıştır. Başta uzay ve havacılık, savunma sanayi, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde olmak üzere hafif ve mukavemetli malzemelere olan gereksinim, bu çalışmaların arkasındaki en büyük etken olmuştur. Ayrıca yüksek ısı direnç ile boyutsal kararlılık ihtiyacı da kompozit malzemelerin geliştirilmesinde etkili olan önemli faktörlerdendir (Sarıtaş, 1995).

#### **3.1 Kompozit Malzemeler**

Kompozit malzemeler, temelde bir malzemenin özelliklerine sahip fakat kimyasal özellikleri birbirlerinden farklı olan iki ya da ikiden fazla bileşenin bir araya gelmesiyle oluşan yapılardır (Agarwal ve Broutman 1980).

Kompozit malzemelerin üretimi sayesinde, kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenlerin, kendileri ayrı ayrı kullanıldıklarında ulaşılamayan birtakım özellikler elde edilebilmektedir. Böylelikle uygulamanın yapılacağı alan için istenilen özelliklere sahip olan başka bir malzemenin tasarlanması ve üretilmesi mümkün olmaktadır. Kompozit malzemeler, genelde bir ya da birden fazla süreksiz fazın, sürekli bir faz içinde dağıtılmasıyla oluşturulmaktadır. Süreksiz yapı, sürekli yapıdan daha üstün özelliklere sahip olduğundan dolayı genellikle süreksiz yapı takviye malzemesi ve sürekli yapı ise matris olarak adlandırılmaktadır (Agarwal ve Broutman, 1980).

Ana malzemenin (matrisin) işlevi, takviye yapıları bir arada tutmak ve malzemenin biçimsel bütünlüğünün korunmasını sağlamaktır. Takviye malzemesi ise ana malzemenin (matrisin) özelliklerinin geliştirilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Şekil 3.1’de kompozit malzemeleri oluşturan malzeme grupları gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Kompozit malzemeleri oluşturan malzeme grupları (Ahlatçı, 2003)

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, kompozit yapısını oluşturan takviye ve matris malzemelerin özellikleri, takviye ve matris yapıları arasında oluşan bağın özellikleri, hacimsel oranları, takviye malzemesinin kompozit yapıdaki şekli, yapısı ve yönelimi gibi çeşitli değişkenlerden etkilenmektedir. Kompozit bir yapıdaki matris malzemesinin ve takviye fazının birbirinin içerisinde tamamen çözünmemesi gerekmektedir, fakat çok küçük bir miktarda ki çözünme takviye ve matris malzeme arasında güçlü bir bağ oluşmasını pozitif olarak etkileyebilmektedir (Hull ve Clyne, 1996).

### 3.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozitlerin avantajları;

- Düşük yoğunluk,
- İyi ısı kapasite,
- İyi titreşim sönümlenme kapasitesi,
- İyi yorulma direnci,
- Kalıcı renklenme,
- Üstün aşınma direnci,
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği,
- Yüksek mukavemet,
- Yüksek sertlik gibi sınıflandırılmaktadır:

Kompozitlerin dezavantajları ise:

- Sünegliğin düşük olması,
- Tekrar dönüştürülebilirlik eksikliği,
- İşlemenin zorluğu,
- Üretim maliyetinin fazla olması,
- Üretimin zorluğu,
- Yüzey kalitesinin az olması şeklinde sınıflandırılabilir (Kısaöz, 2018).

### 3.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler oluştukları malzemelere ve bu malzemelerin şekillerine göre iki gruba ayrılır. Ana malzemenin (matrisin) yapısına göre bir sınıflandırma yapıldığında üç farklı çeşit ortaya çıkmaktadır.

Bunlar;

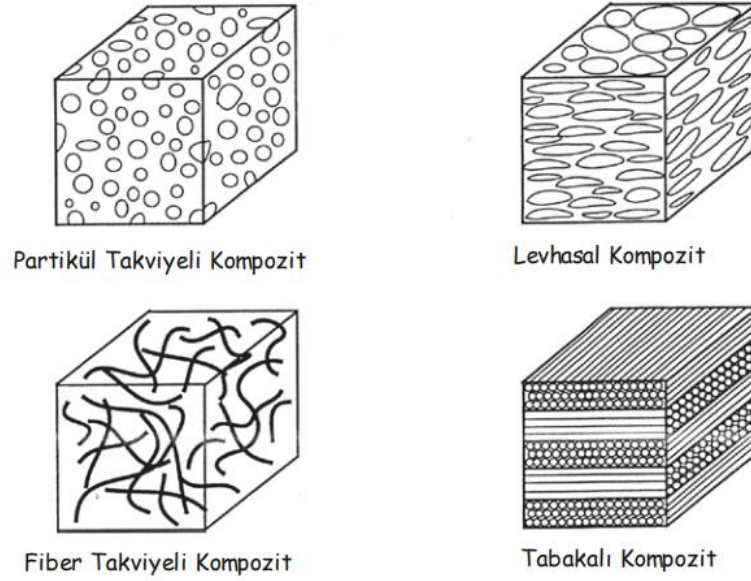
- Metal matrisli kompozit malzemeler
- Plastik matrisli kompozit malzemeler
- Seramik matrisli kompozit malzemelerdir.

Kompozit malzemelerin şekillerine göre bir sınıflandırma yapıldığında ise dört farklı çeşit ortaya çıkmaktadır.

Şekillerine göre kompozit çeşitleri;

- Elyaf takviyeli kompozitler (Fiber),
- Tabakalı kompozitler,
- Levhasal kompozitler,
- Partikül takviyeli kompozitlerdir (Çelebi Efe, 2010).

Şekil 3.2'de görülebileceği gibi, yapıyı oluşturan bileşenlerin şekillerine göre bir sınıflandırma yapıldığında ise dört şekilde sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3.2 Yapıda yer alan bileşenlerin şekillerine göre kompozit çeşitleri (Çelebi Efe, 2010)

### 3.4 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matriksli kompozit (MMK) malzemeler, 1960'ların başlarında, var olan metallerin kullanım sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklık derecelerinde kullanılabilecek olan, metallerden daha üstün mukavemet özelliklerine sahip malzemelere olan gereksinimden dolayı geliştirilmiştir. Bu malzemeler, farklı metal ve metal alaşımların matris malzemesi, seramik ya da organik bir malzemenin ise takviye elemanını oluşturan yapılardır (Kısaöz, 2018).

Metal matrisli kompozit malzemeler, metal bir yapının çeşitli takviye elemanları eklenmesiyle, ileri teknikler (ergitme, vakum şekillendirme, sıcak presleme ve difüzyon kaynağı yöntemi gibi) uygulanarak elde edilirler (Ünal, 2011).

MMK'lar seramik+metal, parçacık, metalik köpük ya da elyaf takviyeli metaller gibi büyük bir malzeme sınıfını oluşturmaktadırlar. Metal matrisli kompozit malzemeler yerlerine kullanıldıkları malzemelere göre önemli avantajlara sahiptir (Mazumdar 2002; Akbulut 1995).

Bu avantajlar;

- Elektriksel ve ısı iletkenliğin yüksekliği,
- İçyapı ve özelliklerin tekrar retilbilirliği,
- Sıcaklık değişimlerine ya da ısı ıoka karşı düşük hassasiyet,
- Darbe dayanımının yüksekliği,
- Yoğunluğun düşük olması,
- Yüksek dayanıklılık ve elastisite modülü,
- Yüzey sertliğinin yüksek olması ve yüzey çatlaklarına karşı hassasiyetin düşük olması gibi sıralanabilmektedir.

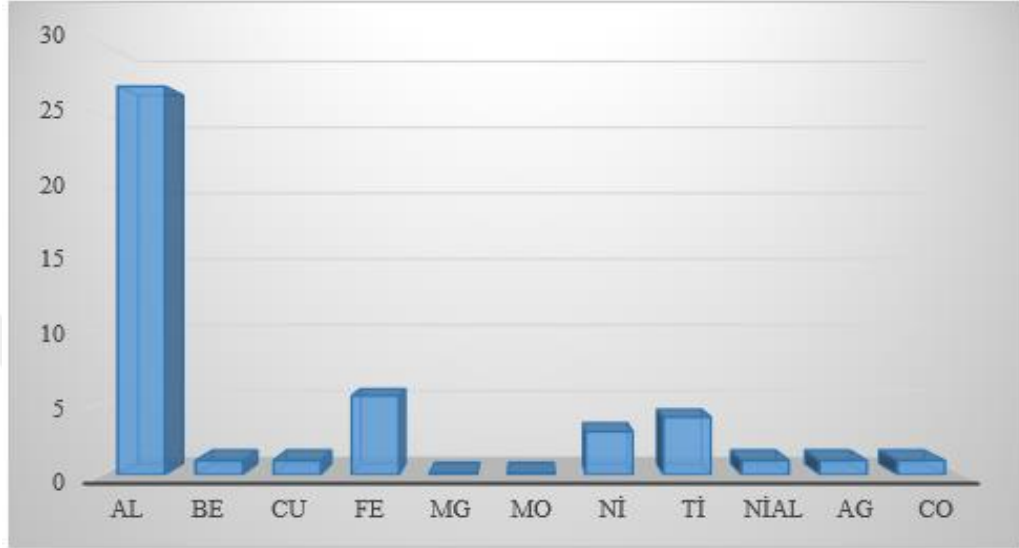
Metal matrisli kompozit yapıların üstün özellikleri ile birlikte farklı kısıtlayıcı durumları da bulunmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin başlıca kısıtlayıcı özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

- Kompozit malzemeler metallere göre daha düşük sünekliğe sahiptir.
- Kompozitlerin retiminde metallere kıyasla daha pahalı üretim sistemlerine ve ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Sürekli elyaf takviyesi söz konusu olduğuunda, kompozitlerin üretiminde genellikle; zor ve karmaşık üretim süreçlerinin kullanılmasını gerektirir.

Kompozit malzemelerde matrizen; korozyon direnci, hafiflik, takviye elemanı ile uyumluluk ve kırılma tokluğu gibi özellikler beklenmektedir. Matris malzeme, yükü takviye elemanına iletirken bu esnada da onları aşınmaya ve korozyona karşı korumaktadır. Matris malzemelerinin; kompozit yapının kesme, basma, akma dayanımı, sürünme, dielektrik ve termomekanik özellikleri üzerinde önemli bir görevi bulunmaktadır (Hull 1992).

MMK malzemeler her takviye çeşidiyle iyi ara yüzey oluşturamadıklarından ötürü üretimleri g ve maliyeti yüksektir. Alüminyum(Al), magnezyum (Mg), nikel (Ni), titanyum (Ti), bakır (Cu), inko (Zn) gibi hafif metaller ve bu metallerin alaşımları metal matrisli kompozit malzemelerin üretim sürecinde çok sık kullanılan matris malzemeleridir ( Köksal 2004; Akın 2006).

Endüstriyel şirketler tarafından MMK üretiminde kullanılan matris malzemelerinin kullanım oranları Şekil 3.3'te sunulmuştur. Tablo 3.1'de ise yüksek performanslı alaşımların üretiminde kullanılan saf elementlerin yoğunluk ve akma dayanımı değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.3 Matris malzemelerine ait kullanım oranları (Kalemtaş, 2014)

Tablo 3.1 Alaşımların üretiminde kullanılmakta olan yüksek performansa sahip saf elementlere ait mukavemet ve yoğunluk değerleri (Kalemtaş, 2014)

| Metal          | Yoğunluk<br>g/cm <sup>3</sup> | Akma<br>Mukavemeti<br>MPa | Spesifik<br>Mukavemet<br>Nm/kg |
|----------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Magnezyum (Mg) | 1,74                          | 69                        | 39,6                           |
| Berilyum (Be)  | 1,85                          | 120                       | 64,9                           |
| Titanyum (Ti)  | 4,51                          | 140                       | 31,0                           |
| Nikel (Ni)     | 8,90                          | 148                       | 16,6                           |
| Bakır (Cu)     | 8,96                          | 69                        | 7,7                            |
| Tungsten (W)   | 19,25                         | 550                       | 28,6                           |
| Molibden(Mo)   | 10,22                         | 345                       | 33,8                           |
| Niobium (Nb)   | 8,57                          | 105                       | 12,3                           |

### 3.5 MMK Malzemelerin Kullanım Alanları

MMK malzemeler havacılık ve uzay endüstrisinde her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır. Silah endüstrisinde, hafifliği ve mukavemeti nedeniyle bazı küçük çaplı havan toplarının yapımında kullanılmaktadır.

Özellikle kompozit malzemeler roket yapımında da etkin bir şekilde kullanılmaktadır. MMK malzemelerin tasarım alternatiflerinin artırılmasıyla, yaygın kullanılmaları ve birçok üstün avantajları sayesinde insanlığa ciddi hizmetlerde bulunabilecektir (Ünal 2011).

### 3.6 MMK Malzemelerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

MMK malzemelerin üretim esnasında kullanılmakta olan takviye malzemeler, yapılarına göre süreksiz ve sürekli olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Karakaş, 2001; Huda ve Hashmi, 1995). Genel olarak, matrise eklenen takviyeler yüksek sıcaklıkla birlikte kompozitin yoğunluğunu değiştirirken, mukavemetini, mekanik özelliklerini ve sertliğini artırabilmektedir. Takviyelerin ana görevi kompozite uygulanan yükü kaldırmaktır.

Takviyeler şekillerine göre aşağıda verilen şekilde beş gruba ayrılmaktadır.

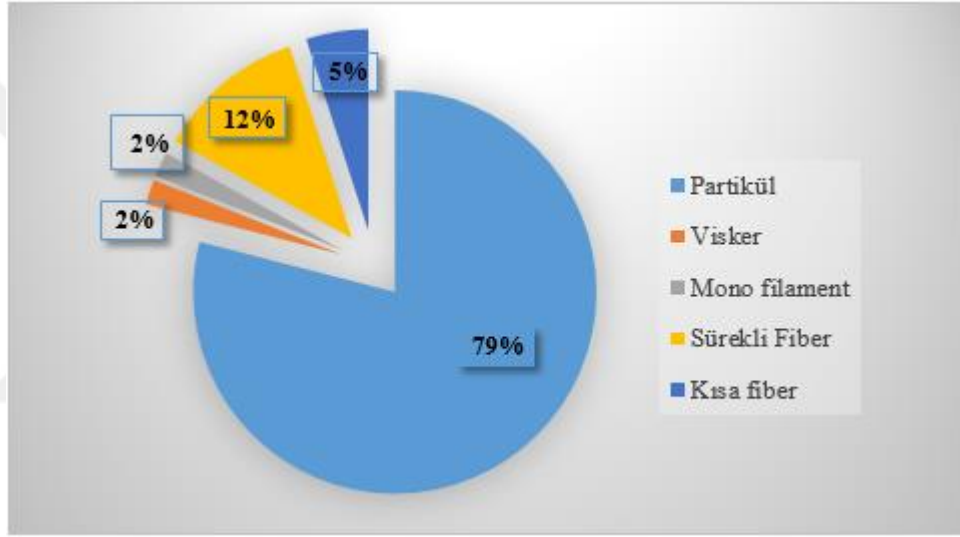
1. Kısa fiberler,
2. Metalik teller,
3. Partiküller,
4. Sürekli fiberler,
5. Viskerler (Karakaş, 2001; Huda ve Hashmi, 1995).

Takviyeler kimyasal yapılarına göre ise dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

1. Karbürler,
2. Oksitler,
3. Nitrürler,
4. Paslanmaz çelik, vs. (Srivatsan vd., 1991).

MMK malzeme üretilmesi için, takviye elemanı olarak visker, fiber ya da partiküllü gibi çeşitli formlardaki malzemeler kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda en sık kullanılmakta olan takviye elemanı yapısı partikül takviyesidir. Bu durumun sebebi, partikül formdaki takviye yapıların üretiminin ve kullanımının fiber formdaki takviyelere göre daha kolay olması ve elde edilen kompozit yapının özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmemesidir (Takei vd., 1991).

Şekil 3.4’de MMK üretiminde kullanılan takviye elemanı türlerinin oranları verilmiştir.



Şekil 3.4 Kullanılmakta olan takviye türlerinin oranı (Kalemtaş, 2014)

Kompozitlerin uygulanacağı alanda istenilen özelliklere uygun olarak visker, fiber ya da partikül formlarda silisyum karbür (SiC), titanyum nitrür (TiN), silisyum nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), bor karbür (B<sub>4</sub>C), titanyum diborür (TiB<sub>2</sub>), bor (B), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), alüminyum nitrür (AlN), tungsten (W), grafit ve molibden (Mo) gibi farklı takviye malzemeleri kullanılmaktadır (Mazumdar 2002; Hull 1992).

Takviyenin kompozit bir malzemedeki rolü temel olarak matrisin mekanik özelliklerinin artırılmasıdır. Kompozitlerde kullanılan farklı partiküllerin / fiberlerin tümü farklı özelliklere sahiptir ve bu nedenle kompozitin özelliklerini farklı şekillerde etkiler.

Takviyelerden beklenen özellikler;

- Yüksek mukavemet,
- İmalat kolaylığı ve düşük maliyet,
- İyi kimyasal kararlılık,
- Düşük yoğunluk ve iyi dağılımdır.

Tablo 3.2’de metal matrisli kompozitlerde kullanılan bazı takviye malzemeler ve bu malzemelerin sahip olduğu özellikler verilmiştir.

Tablo 3.2 Metal matrisli kompozitlerde kullanılmakta olan bazı takviye malzemeler ve özellikleri (Koçer, 2002)

| <b>Takviye Malzeme</b> | <b>Tane Boyutu(<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Takviye Malzeme</b>       | <b>Tane Boyutu(<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|
| Silika                 | 5-53                                         | Magnezya                     | 40                                           |
| Alümina Partiküller    | 3-200                                        | Kum                          | 75-120                                       |
| SiC viskerleri         | 5-10                                         | Boron nitrit parçacıkları    | 46                                           |
| Grafit lameller        | 20-60                                        | Cam parçacıkları             | 100-150                                      |
| Grafit lameller        | 15-100                                       | SiC partikülleri             | 6-120                                        |
| TiC parçacıkları       | 46                                           | Zirkon                       | 40                                           |
| Mika                   | 40-180                                       | Silisyum nitrit parçacıkları | 40                                           |

### 3.6.1 Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür (SiC) en yaygın kullanılmakta olan takviye elemanlarından biridir. 1970'lerden bu yana birden fazla yeni uygulama alanı bulmuştur. Sayısız özelliği sayesinde silisyum karbür, karmaşık mühendislik şekillerinde tungsten karbürün yerine aşınmaya dayanıklı bir alternatif olarak kullanılmaktadır.

Silisyum karbür silisyum nitrürle karşılaştırıldığında, silisyum karbür(SiC) üretmek için kullanılan hammaddeler daha ucuz olduğundan dolayı ortaya çıkan ürünlerin maliyetleri tungsten karbürden daha uygun olduğu için rekabet gücü yüksektir (Tanaka, 1991; Mingü, 2002; Ögünç, 2006).

### 3.6.2 Silisyum Karbürün Özellikleri

Karbür bileşiklerinin bir sınıfı olan silisyum karbürün atom ağırlığı 40,1 g/mol ve yoğunluğu  $3,21 \text{ g/cm}^3$  'tür. Silisyum karbür doğada hazır bir bileşik olarak bulunmamaktadır fakat temel bileşenlerinden olan karbon ve silisyum doğada oldukça fazla miktarda bulunmaktadır.

SiC yüksek sürünme direncine sahip çok sert, aşındırıcı bir malzemedir. İndirgeyici bir atmosferde, aşınmaya ve kimyasal etkileşimlere karşı mükemmel dirence sahiptir (Turan, 2004; Mingü, 2002).

Tablo 3.3'de SiC'ün temel özelliklerine yer verilmiştir. Sahip olduğu özelliklerinden dolayı SiC çok yüksek bir termal şok dayanımına sahiptir (Ögünç, 2006).

Tablo 3.3 Silisyum karbürün (SiC) temel özellikleri (Abukhdair, 2021)

| Silisyum Karbür (SiC) |              |                     |                                           |
|-----------------------|--------------|---------------------|-------------------------------------------|
| Kimyasal Formül       | SiC          | Yoğunluk            | $3,21 \text{ g/cm}^3$                     |
| Moleküler Ağırlık     | 40,11        | Kristal Yapı        | YMK                                       |
| Renk                  | Siyah, Yeşil | Erime Noktası       | $2730 \text{ }^{\circ}\text{C}$           |
| Sıkıştırma Mukavemeti | 3900 MPa     | Termal İletkenlik   | $120 \text{ W/mK}$                        |
| Sertlik               | 29 GPa       | Özısı               | $750 \text{ J/kgK}$                       |
| Young Modülü          | 410 GPa      | Kafes Parametreleri | $a^0 = 0,189$<br>$c^0 = 0,308 \text{ nm}$ |
| Poisson Katsayısı     | 0,14         | Birim Hücre Hacmi   | $1,259$<br>$(10^{-22} \text{ cm}^3)$      |

Seramik yapı grupları içinde SiC;

- Çeliğe kıyasla yüksek ısı iletimi ve yüksek iletkenlik katsayısı,
- Düşük ısı genleşme,
- Korozyon direncinin mükemmel oluşu,
- Sertliğin ve aşınma direncinin yüksek olması,
- Sürtünme katsayısının düşüklüğü,
- Yüksek ısı şok mukavemeti gibi üstün özelliklere sahiptir.

Sahip olduğu bu üstün özellikler sayesinde refrakter, aşındırıcı, seramik ve diğer pek çok yüksek performanslı uygulamalarda, gaz türbinlerinde ve aşınmaya maruz kalan otomotiv parçalarında kullanımı çok önemli hale gelmiştir (Yıldırım ve Arpacı, 2004; Zhang vd., 2004; Çelebi Efe, 2010)

### **3.7 MMK Malzemelerin Matris Yapılarına Göre Gruplandırılması**

Metal matrisli kompozitler, matris malzemelerine bağlı olarak çeşitli kategorilerde sınıflandırılmaktadır. En sık kullanılmakta olan metal matris yapıları; Magnezyum (Mg) matrisli, Titanyum (Ti) matrisli, Bakır (Cu) matrisli ve Alüminyum (Al) matrisli kompozitler olarak sıralanabilir (Abukhdair, 2021).

#### **3.7.1 Bakır Bazlı Alaşımlar**

Bakır atmosfere ve suya karşı korozyona dayanımlı bir element olmasına rağmen, saf bakır ısıtma işlem ve eritme için elverişli olmadığından sanayide çoğunlukla bakır alaşımları kullanılmaktadır. Bakır alaşımlarının özellikleri şu şekildedir;

- Aşınmaya karşı daha çok dayanıklıdırlar,
- Bakır alaşımları ısıtma işlemleriyle daha uygun hale getirilebilirler,
- Bakıra göre yüksek dayanıma sahiptirler,
- Bakıra kıyasla elektrik iletkenlikleri daha düşüktür,
- Döküm yöntemine daha uygundur,
- Soğuk şekillendirmeye mekanik özellikleri artırılabilir (Gürü ve Yalçın, 2002).

### 3.7.2 Bakır

Bakır, insanoğlunun kullandığı en eski metallerden biridir ve önemi esas olarak elektrik ve ısıyı iletme kabiliyetinden ve korozyona karşı direncinden kaynaklanmaktadır. Bakır, elektriği iletme kabiliyeti açısından gümüş elementinden sonra ikinci sırada gelmektedir. Dolayısıyla üretilen bakır metalinin üçte biri elektrik endüstrisinde kullanılmaktadır. Elektrik iletme kapasitesinin yüksek olması nedeniyle elektronikte, iletken tellerde kullanılır. İkinci önemli özelliği olan yüksek ısı iletkenliği nedeniyle ısı eşanjörlerinde, buzdolaplarında veya ısıtıcılarda serpantin olarak kullanılmaktadır(Gürü ve Yalçın, 2002).

Tablo 3.4’de saf bakırın önemli fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.4 Bakırın fiziksel özellikleri (Gürü ve Yalçın, 2002)

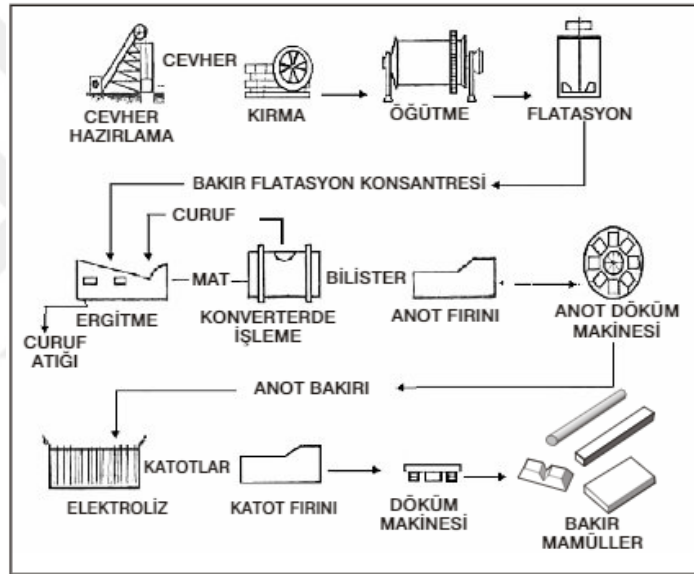
| Bakırın Fiziksel Özellikleri |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| Erime Noktası                | 1083 °C                     |
| Kaynama Noktası              | 2595 °C                     |
| Yoğunluk                     | 8,96 g/cm <sup>3</sup>      |
| Isıl Genleşme Katsayısı      | 16,7x10 <sup>-6</sup> 1/K   |
| Özgül Isı                    | 0,385 kJ/kg.K               |
| Isı İletme Katsayısı         | 386 W/m.K                   |
| Elektriksel Rezistivite      | 1,68 10 <sup>-8</sup> Ohm.m |
| Çekme Gerilmesi              | 219 MPa                     |
| Elastiklik Modülü            | 65 GPa                      |

Bakır korozyona karşı çok dayanıklı bir metaldir. Kuru havada tutulursa, yüzeyinde ince bir bakır oksit tabakası oluşur ve donuk bir renk alır. Bu durumda korozyona dayanıklı bir özellik kazanır, fakat kirli ve nemli bir atmosfere karşı dayanıklı değildir. Bakırın korozyon direnci, kimya ve gıda endüstrisinde, tesis ve makine imalatında korozyona dayanıklı bir malzeme olarak kullanılmasını sağlar.

Ayrıca bakır çok iyi soğuk şekillendirilebilir bir malzemedir. Soğuk işlemle tel, boru, şerit ve levha haline getirilebilmektedir. Oda sıcaklığında bile iyi çekme ve dövme kabiliyetine sahiptir. Bu iyi özelliklerine rağmen, talaşlı imalatla şekillendirilebilirliği zayıftır ve mukavemeti oldukça düşüktür (Gürü ve Yalçın, 2002).

### 3.7.3 Bakır Üretimi

Bakır üretimi çok eski tarihlere dayanır. M.Ö. 6500 yılından itibaren bakır ve kalay alaşımı (bronz) olarak kullanılmaktadır. Genellikle bakır sülfürlü cevherlerden elde edilmektedir. Bakırın üretim aşamalarının şematik hali Şekil 3.5’ de gösterilmiştir.

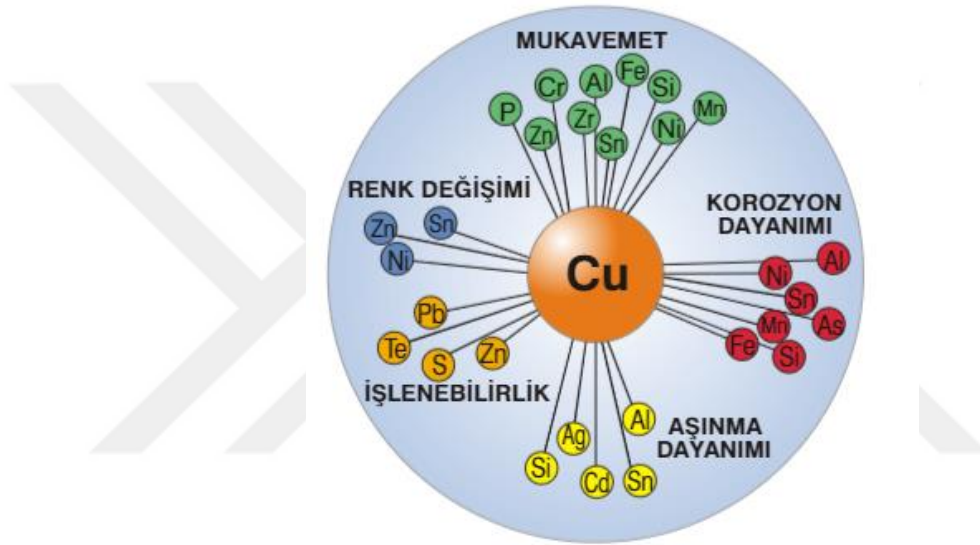


Şekil 3.5 Bakırın üretim aşamaları (Koçak,2006)

Sektörde ham bakır elde edebilmek için sülfürler önce kavrularak oksitlere dönüştürülür. Ardından ham bakır elde etmek için reverber fırınlarında kok ile indirgenirler. Madenlerden elde edilen cevher, safsızlıkların giderilmesi için flotasyon işlemine uğramaktadır. Flotasyon işlemi, yabancı maddelerin flotasyon yoluyla cevherden uzaklaştırılmasını sağlar. Bu işlem bir tür cevher zenginleştirme yöntemidir. Flotasyon işleminin sonunda cevherdeki bakırın yüzdesi ortalama %20-35 kadar zenginleşebilmektedir. Flotasyon işlemi ile üretilmiş olan bakır konsantresi izabe tesisine götürülür ve fırında kavrulma işlemine tabi tutulur. Ardından eritme işlemi için reverber fırınlarına alınır. Bu fırınlar bakır konsantresi, kok kömürü ve cüruf yapıcılar ile doldurulur. Sülfürün bir kısmı  $SO_2$  olarak ortamdan uzaklaşır.

Ortaya çıkan demir oksit ise bakır sülfürü bakır okside dönüştürür. Bakır oksit, karbon ve karbon monoksit tarafından bakıra indirgenir. İşlem sonunda fırından çıkan ve yaklaşık %30 bakır içeren ham bakıra "mat" adı verilir. Mat, yaklaşık %99 bakır içeren blister bakır üretmek için dönüştürücülere beslenir (Gürü ve Yalçın, 2002).

Saf bakıra eklenen çeşitli elementler ile bakır alaşımlarının yapısında bazı avantajlar elde edilebilmektedir. Bakıra ilave edilen alaşım elementlerinin bakır üzerindeki etkileri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

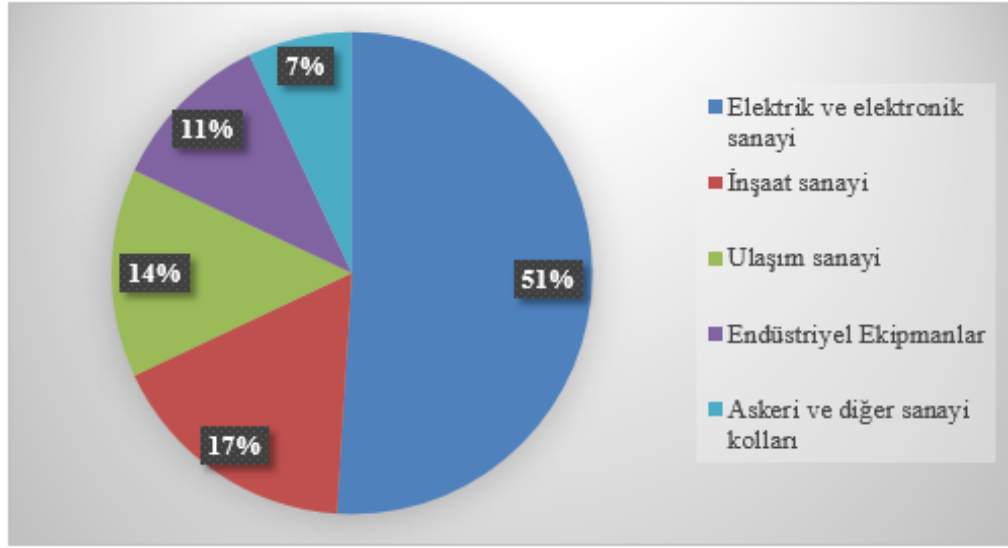


Şekil 3.6 İlave edilen elementlerin bakır üzerindeki etkileri (Koçak, 2006)

#### 3.7.4 Bakırın Kullanım Alanları

Bakırın 1/3'i elektrik endüstrisinde, 1/4'i ise pirinç ve bronz alaşımlarında kullanılmaktadır. Bakır yüksek ısı iletkenliğine sahip olduğundan, elektrik mühendisliği, elektronik, havacılık, motorlar, ev gereçleri, ölçüm aletleri ve inşaat gibi farklı sektörlerde, üretim dallarında kazan, kondansatör, ısı eşanjörü vb. imalatında yaygın olarak ve büyük miktarlarda kullanılmaktadır. (Gürü ve Yalçın, 2002)

Cıvatalar, pimler, vidalar, musluk vanaları, kapı kolları pirinçten yapılmış ürünlerdir. Şekil 3.7 sektörlerle göre bakır kullanım oranlarını da göstermektedir.



Şekil 3.7 Sektörlere göre bakır kullanımı dağılımı (Uraylı, 2018)

Bahsedilen ürünlerin dışında bakır ve alaşımlarının kullanıldığı başlıca ürünler;

- Cep telefonları, bilgisayarlar vs.
- Çatı kaplama
- Düşük ve orta voltajlı güç kabloları,
- Jeneratörler,
- Motor bobinleri,
- Otomobil, uçak, gemi gibi ulaşım sanayisi
- Sıhhi tesisat ürünleri,
- Soğutucu akışkan devrelerinde bakır boru olarak
- Transformatörler,
- Veri transferi sağlamak için tel olarak sıralanabilmektedir (Uraylı, 2018).

### 3.7.5 Gümüş Alaşımlar

Dünyanın yapısının %0,00001'inde bulunan gümüş elementi, sülfür ile kolaylıkla bileşikler oluşturabilmektedir. Yeryüzünde genellikle düşük sıcaklıklarda oluşan minerallerde bulunan gümüş, kurşun, çinko, kalay, antimon, bizmut ve altınla beraber bulunur. Subvolkanikler olarak adlandırılan dünyanın üst bölgelerindeki magmanın soğuması neticesinde oluşan kayalarda bakır ile beraber bulunur. Genellikle düşük sıcaklıktaki cevherlerde bulunan gümüş, yüksek sıcaklıktaki cevherlerde oluşan kobalt ve nikel elementleri ile birlikte de bulunabilmektedir.

Gümüş magmatik kayalarda (ultrabazik ve bazik kayalar, asit kayalar), kireçtaşlarında, kıltaşlarında, toprakta, bitkilerde, tatlı suda ve deniz suyunda  $4 \times 10^{-8}$  mg/lt oranında (AgCl<sub>2</sub> ve AgCl<sub>3</sub> olarak) bulunur. Dünyanın en zengin gümüş yatakları, dalma-batma bölgelerindeki volkanizma sonucunda oluşmuştur. Kuzey ve Güney Amerika'nın batı kıyılarındaki yataklar dünyadaki üretimin yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır (Yaman 2019; Altuner, 2013).

### **3.7.6 Gümüş Metalinin Genel Özellikleri**

Gümüş denince akla ilk süs eşyaları, gümüş takılar ve gümüş sikkeler gelir. Ancak bu bahsedilenler dünyada ki gümüş tüketiminin çok ufak bir kısmını teşkil etmektedir. Gümüş, diğer metallere kıyasla en yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir ve aynı zamanda reflektör olarak da kullanılır. Bu özellikleri nedeniyle, yansıtıcı kullanım için cam kaplama, elektrik iletimi için elektrik anahtarlarında ve birçok kimyasal reaksiyonda katalizör olarak sayısız kullanım alanına sahiptir (Yaman 2019; Gabriela vd. 2012).

Gümüş ayrıca antibakteriyel özelliği sayesinde giysiler üzerinde mantar ve bakteri oluşumunu engellemek için de kullanılmakta olup, son yıllarda kullanımı giderek artmaktadır. Ayrıca, birçok ev aleti üreticisi gümüş elementinin bu özelliğinden yararlanmaktadır. Gümüşün endüstriyel bir metal olarak kullanılmasının önündeki en büyük engellerden biri, gümüşün işlenirken atık haline gelmesidir. Bu şekilde boşa harcanan gümüş geri dönüştürülememektedir. Gümüş; birçok üründe çok küçük miktarlarda kullanıldığından dolayı gümüşün geri dönüştürülmesi çok zor olmaktadır (Yaman 2019; Altuner, 2013).

### **3.7.7 Gümüşün Fiziksel Özellikleri**

Özel gümüşü beyazlığı ve parlaklığı nedeniyle en çok kullanılan bir soy metaldir. Gümüşün, elektrik ve ısı iletkenliği çok yüksektir. Yumuşak olması nedeniyle çok ince tel haline (30 µm çap) getirilebilir. Gümüşün bazı fiziksel özellikleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5 Gümüşün bazı fiziksel özellikleri (Gürü ve Yalçın, 2002)

| <b>Gümüşün Fiziksel Özellikleri</b> |                             |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Erime Noktası                       | 961 °C                      |
| Kaynama Noktası                     | 2212 °C                     |
| Yoğunluk                            | 10,5 g/cm <sup>3</sup>      |
| Isı İletme Katsayısı                | 407 W/m.K                   |
| Elektriksel Rezistivite             | 1,62 10 <sup>-8</sup> Ohm.m |
| Çekme Gerilmesi                     | 276 MPa                     |
| Elastiklik Modülü                   | 71 GPa                      |

Gümüşün korozyon tutumu, büyük ölçüde koruyucu üst tabakanın oluşumuna bağlıdır. Tuz asidi içerisinde korozyon durumu, konsantrasyona, sıcaklığa ve oksijenin varlığına bağlı olarak değişir. Soğuk seyreltik hidroklorik asit ve seyreltik sülfürik asit gümüşü etkilemez. Buna karşılık nitrik asit içerisinde azot oksit oluşturarak ve derişik sülfürik asit içerisinde koruyucu üst tabakanın çözülmesi ile şiddetli aşınma görülmektedir. Gümüşün sertliğini ve aşınma direncini yükseltmek için, %20'ye kadar katılabilen bakır en önemli alaşım elemanı olmaktadır (Gürü ve Yalçın, 2002).

Gümüş doğada serbest metal halinde de bulunur. Ancak esas olarak argentit mineralinin (Ag<sub>2</sub>S) oksidasyonu ile elde edilir. Fakat gümüş üretiminin büyük bir kısmı, bakır, kurşun ve nikelin elde edilmesi ve arıtılması esnasında yan ürün olarak elde edilmesiyle oluşur. Gümüşün çok iyi ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması diğer metaller içerisinde ön plana çıkmasına sebep olmaktadır. Gümüşün en yaygın kullanıldığı yerler, elektronik sanayi ve halojenürler halinde uygulandığı fotoğraf filmi üretimidir. Gümüş ayrıca çeşitli maddelerin üretimlerinde katalizör olarak da kullanılır. Gümüş lehim %10 çinko ve %30 bakır içeren bir alaşımdır. Lehim olarak yüksek erime noktasına (770 °C) ve yüksek mukavemete sahiptir. Yüksek kaliteli mühendislik işlerinde ve kuyumculuk sektöründe kullanılır. Gümüş, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği nedeniyle önemli kullanım alanlarına sahiptir. Bunlardan biri de elektrikli cihazların kontrol düğmelerinde kullanılmasıdır. Gümüşün parlaklığından ve yansıtıcılığından yararlanılan bir diğer kullanım alanı aynaların kaplanmasıdır.

Kaplanacak olan yüzey gümüş nitrat ve amonyum hidroksit karışımına daldırılır. Uygun bir indirgeyici maddenin eklenmesiyle gümüş, cam üzerinde ince bir tabaka halinde biriktirilir (Gürü ve Yalçın, 2002).

### **3.7.8 Gümüşün Lehim ve Kaynak Özelliği**

Gümüş lehim ve kaynak alaşımları, yüksek çekme mukavemeti, süneklik ve termal iletkenliği bir arada bulundurmaktadır. Gümüş-çinko alaşımları, kurşun bazlı alaşımların toksik etkilerinden kaçındıkları ve gümüşün antibakteriyel etkisinden yararlandıkları için ev tesisat kaynaklarında kullanılmaktadır. Buzdolabı üreticileri de soğutma borularındaki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu gerilimlerin gerektirdiği süneklik nedeniyle lehimleme için gümüş alaşımları kullanmaktadır. AB'nin "Sağlığa zararlı maddelerin kısıtlanması" yasası uyarınca, gümüş, kalay ve bakır lehimler, elektronik ekipmanların lehimlenmesinde kullanılan geleneksel Sn-Pb lehimin yerini almaktadır (Akçamlı, 2009).

Yapısında en az %8 gümüş bulunan lehim alaşımları “gümüş lehim” adıyla isimlendirilmektedir. Alaşımdaki gümüş oranının bir üst sınırı bulunmamaktadır. Gümüş, lehim alaşımlarına belirli bir erime noktası elde etmek, yüksek gerilme mukavemeti sağlamak, lehimleme hızını arttırmak, lehim bağlantısının deforme olabilirliğini arttırmak, lehim bağlantısının rengini iş parçasına uydurmak, yüksek korozyon direnci sağlamak ve lehimleme sonrası temizleme işlemini azaltmak için ilave edilmektedir (Anık, 1991).

### **3.8 Toz Metalurjisi**

Toz metalurjisi, çeşitli boyutlara, şekil ve paketlenme özelliklerine sahip olan metal tozlarının dayanıklı, hassas, yüksek verimli parçalara dönüştürüldüğü bir süreçtir. Toz metalurjisi yöntemi, tozların preslenmesini ve ardından sinterleme yoluyla parçacıkların ısı olarak bağlanmasını içermektedir.

TM yönteminin diğer üretim teknolojilerine kıyasla kullanımının hızla artmasına sebep olan başlıca faktörler, üretim parametrelerinin nispeten düşük enerji tüketimi, reaktif malzemelerden yüksek oranda faydalanılması ve düşük işlem maliyetleridir.

Bu özellikleriyle toz metalurjisi, verimlilik, enerji ve hammadde gibi güncel kaygıları ortadan kaldırmaktadır. Sonuç olarak toz metalurjisi yöntemi sürekli gelişmekte ve klasik metal şekillendirme süreçlerinin yerini almaktadır. Toz metalurjisi, ergime sıcaklığı yüksek olan metallerin de kolaylıkla şekillendirilebildiği bir yöntemdir.

Toz metalurjisi yöntemi ile döküm gibi geleneksel üretim yöntemlerinde oluşan oksidasyon, segregasyon, gaz emilimi ve büyük yoğunluk farkından alaşım oluşturmama gibi birden fazla sorun kolayca ortadan kaldırılabilir. Toz metalurjisi, kompozit malzemelerin üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir ve geleneksel malzemelerden farklı ve üstün özelliklere sahip malzemelerin üretilmesini mümkün kılar. Bu avantajların yanı sıra TM ile üretilen parçaların sınırlı boyut ve ağırlıkta olmasının bazı durumlarda dezavantajları da bulunmaktadır (Akın, 2006).

Toz metalurjisi ile parça üretimi Şekil 3.8’de görüldüğü üzere;

- Tozların Üretilmesi,
- Tozların Hazırlanması,
- Şekillendirme,
- Sinterleme, olmak üzere 4 ayrı işlem basamağından oluşmaktadır.

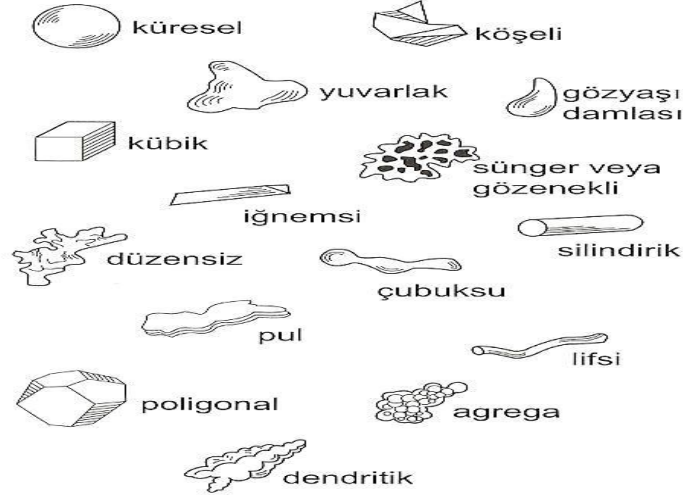


Şekil 3.8 Toz metalurjisi yöntemi ile malzeme üretiminin adımları (Gülan, 2018)

### 3.8.1 Toz Üretim Yöntemleri

Toz metalurjisi yönteminde kullanılmakta olan tozların üretim yöntemleri, bu tozların kalitesini doğrudan etkilemektedir. Kullanılan tozun özellikleri hem presleme ve sinterleme davranışını hem de nihai ürünü doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle çoğu malzeme, özelliklerine uygun bir teknik kullanılarak toz haline dönüştürülmektedir. Toz metalurjisi yönteminde, ortalama büyüklüğü birkaç mikron ile birkaç yüz mikron arasında olan öğütülmüş parçacıklar toz olarak tanımlanır.

Tozların yapıları küresel, silindirik, yuvarlak, agregalı, çubuksu, köşeli, kübik, iğnemsî, sünger veya gözenekli, lifsi, pul, poligonal, dentritik vb. gibi farklı şekillerde karşımıza çıkabilir. Bahsedilen toz parçacıklarının şekilleri Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Toz parçacıklarının şekilleri (URL-1, 2022)

Toz yapılarındaki bu çeşitlilikler toz üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Üretim yöntemine göre değişen bir diğer husus ise tozun yüzey durumudur. Tozun ortalama boyutu, şekli ve yüzey durumu son ürün için önemli olmaktadır (Yirik, 2021).

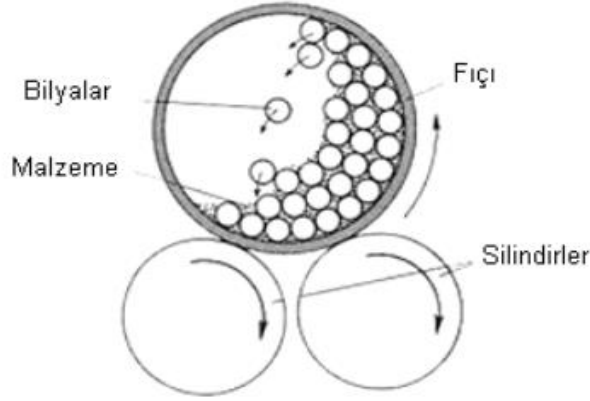
Toz üretim teknikleri ana olarak 4 başlığa ayrılabilir. Bunlar;

- Mekanik yöntemler (Öğütme) ,
- Kimyasal yöntemler,
- Atomizasyon yöntemleri,
- Elektroliz yöntemidir (Sarıtaş, 1995).

### 3.8.1.1 Mekanik yöntemler

Mekanik üretim yöntemi genel olarak fiziksel temas sonucu malzemenin toz formuna dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Bu üretim yöntemi talaşlı üretim, aşındırarak öğütme, kesme ve basma işlemlerinden oluşmaktadır. Bu tozlar ince tozlar halinde öğütülebilmektedir (Doğan, 2022).

Mekanik öğütme işleminin şematik gösterimi Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Mekanik öğütme işlemi (Söyler, 2007)

Aşındırarak öğütme işlemi Şekil 3.10’da gösterildiği gibi, toz haline getirilecek malzemenin sert metal bilyelerin bulunduğu bir hazneye yerleştirilerek döndürülmesi ve bilyelerin öğütülecek malzemeye çarpması sonucu darbe etkileri altında malzemelerin ufalanarak toz haline getirilmesi işlemi olarak tanımlanır. Aşındırarak öğütme işlemi, toz üretim metodlarının içerisindeki en eski ve geleneksel olanıdır (Doğan, 2022).

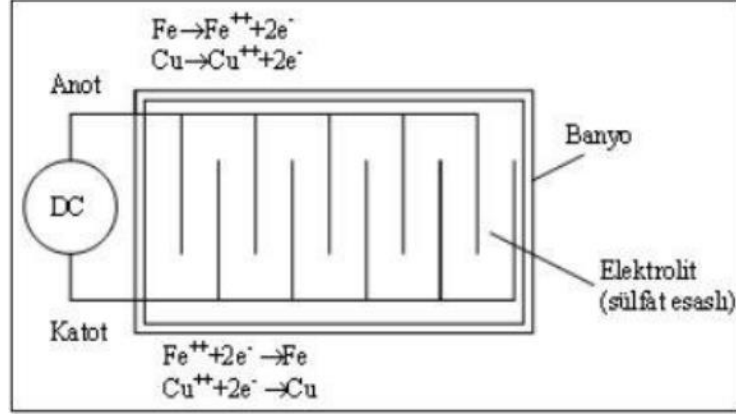
#### 3.8.1.2 Kimyasal yöntemler

Bu yöntemle, seçilen cevher öğütülür, daha sonra kok ile karıştırılıp, karışım indirgemenin gerçekleştiği sürekli bir fırından geçirilir ve kok şeklinde sünger demir elde edilir. Daha sonra sünger demir öğütülür ve elemenden önce metal olmayan malzemelerden ayrıştırılır. Hammaddeler tozların saflığına bağlıdır. Düzensiz sünger formundaki parçacıklar yumuşaktır. Kolaylıkla sıkıştırılabilirler, bu da yüksek ham mukavemetine sahip ürünlerle sonuçlanır (German,1994).

#### 3.8.1.3 Elektroliz yöntemi

Elektroliz; esasında yüksek iletkenliğe sahip olan metal tozlarının elektrolitik sıvı içerisinde, anot çubuğunun üzerinde bulunan ve toz formunda bulunmayan metalin iyonlaşarak katot çubuğu üzerinde birikmesi yöntemidir.

Şekil 3.11’de katot çubuğu üzerinde biriken süngerimsi tortu daha sonra öğütme yöntemiyle toz formunu almaktadır.



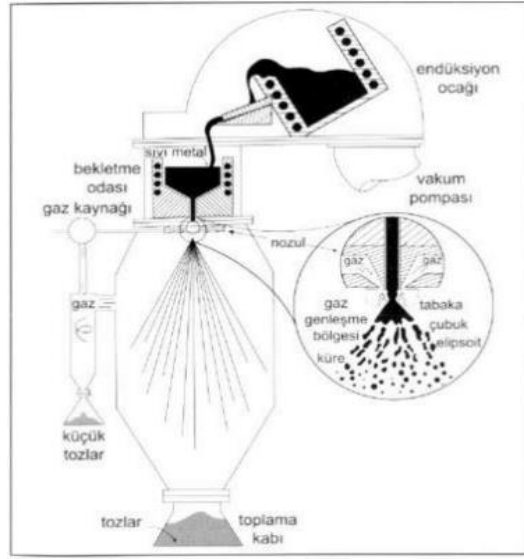
Şekil 3.11 Elektroliz Yöntemi (Şahin, 2022)

Elektrokimyasal yöntem ile üretilmiş olan toz dentritik yapıdadır, şekli düzensizdir ve iç gözenekler içermektedir. Bu yöntem yüksek saflıkta toz üretimi sağlayabilir fakat maliyetinin çok yüksek olması bu yönteme duyulan ilginin azalmasına neden olmaktadır (Yirik, 2021).

#### 3.8.1.4 Atomizasyon yöntemi

Tüm ergimiş metallerin toz üretiminde kullanılabilen bir yöntem olan atomizasyon, Şekil 3.12'de gösterildiği gibi potanın alt kısmındaki delikten akarken sıvı metalin üst kısmına basınç altında sıvı ya da gaz verilerek ergimiş metalin çok küçük parçacıklara ayrılarak katı hale dönüştürülmesi işlemidir. Atomizasyon tekniği ile metal tozu üretimi çok önemli bir alanı oluşturmaktadır. Bu yöntemde, yüksek basınçta gaz ya da su etkisi altında aşırı ve hızlı soğutma ile 100-150 µm'den küçük boyutta tozlar elde edilmektedir (Köksal, 2021).

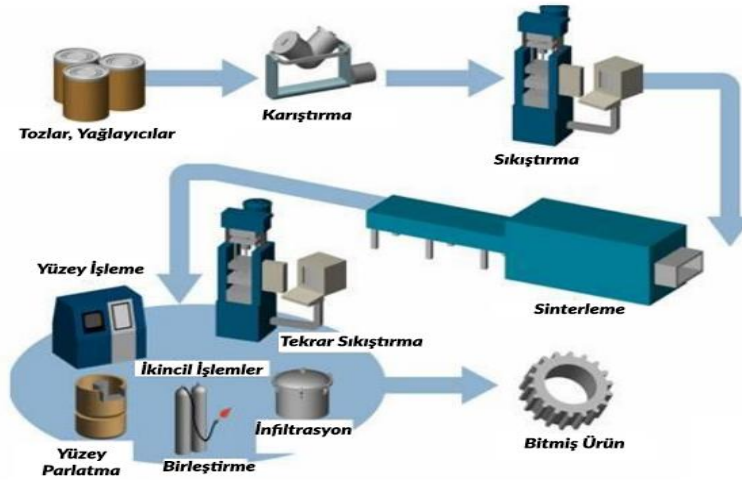
Alaşımlı oluşturan tüm metaller erimiş halde alaşımlandığından, alaşımları toz parçacıkları şeklinde üretmenin yararlı olduğu kanıtlanmıştır. Bu şekilde üretilen, toz partikülleri aynı kimyasal bileşime sahip olmaktadır. Atomizasyon yönteminin avantajlarından biri de alaşım tozlarının eritilmesinde kolaylıkla kullanılabilmesi ve atomizasyonla üretilmiş olan tozların tamamının içerdiği her toz taneciğiyle özdeş olmasıdır (Evcin, 2007).



Şekil 3.12 Düşey gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi (Şahin, 2022)

### 3.8.2 Toz Metalürjisi Üretim Aşamaları

Toz metalürjisi yöntemi ile malzeme üretim aşaması Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Toz metalürjisi üretim şeması (URL-2, 2022)

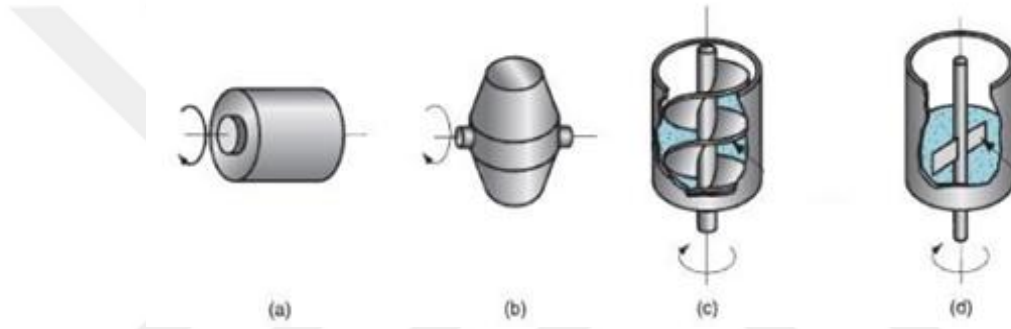
Bu aşamada ana işlem basamakları; karıştırma, sıkıştırma veya presleme ve sinterlemedir. Bu işlem basamaklarından sonra bitmiş ürün elde edilmektedir.

#### 3.8.2.1 Tozların karıştırılması

Toz üretiminden bir sonraki safha karıştırma ve harmanlamadır. Harmanlama işlemi, boyutları farklı fakat kimyasal birleşimi aynı olan tozların karıştırılması işlemidir.

Karıştırma işleminde ise kimyasal bileşimde de farklılıklar bulunmaktadır. Yani hem kimyasal bileşimde hem de boyutta farklılıklar olabilmektedir. Bu adımlar nihai ürünün mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Karıştırılan tozların topaklanması gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu topaklanma sorunu bir karıştırma yöntemi olan "mekanik alaşımlama" ile çözülebilir ancak bu işlem tozun özelliklerini değiştirebilmektedir. Karıştırılacak malzemenin türü, karıştırıcının türü, karıştırma hızı, süresi ve kap boyutu dikkate alınması gereken önemli değişkenlerdir (Ülküseven, 2019).

Toz karıştırma işleminde kullanılan karışım cihazları Şekil 3.14’ de gösterilmiştir.



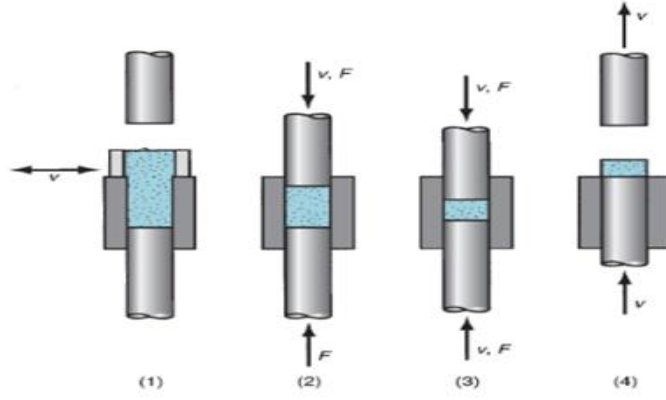
Şekil 3.14 Harmanlama ve karışım cihazları a) Tambur, b) Çift koni, c) Vidalı karıştırıcı, d) Bıçaklı karıştırıcı (Doğan, 2022)

### 3.8.2.2 Tozların şekillendirilmesi

Üretilcek malzemenin cinsine göre uygun sertlik ve aşınma direncine sahip bir kalıp içerisinde belirli bir basınç altında presleme işlemi gerçekleştirilir. Tek yönlü veya çift yönlü pistonlar yardımıyla gerçekleştirilen presleme işleminde, karmaşık şekillerde ki parçaları tek bir işlemde üretme imkanı bulunmaktadır.

Şekil 3. 15’de toz sıkıştırma işleminin adımlarını şematik olarak göstermektedir. Sıkıştırılan parçalar kalıptan çıkarıldıktan sonra mukavemetlerini artırmak için sinterlenmektedir (Akın, 2006).

Bazı presleme çalışmalarında sinterleme, presleme işlemi ile birlikte tozlara ısı uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamalarda hem presleme hem de sinterleme yapıldığından son ürün tek adımda üretilmiş olmaktadır (Boushiha, 2020).



Şekil 3.15 Presleme yöntemi ile TM'deki metal tozların geleneksel yöntemle sıkıştırılması; (1) Kalıpta ki boş alanın tozla doldurulması, (2) İlk sıkıştırma, (3) Alt ve üst zımbaların sıkıştırma pozisyonları, (4) Preslenen parçanın çıkarılması (Doğan, 2022)

### 3.8.2.3 Sinterleme

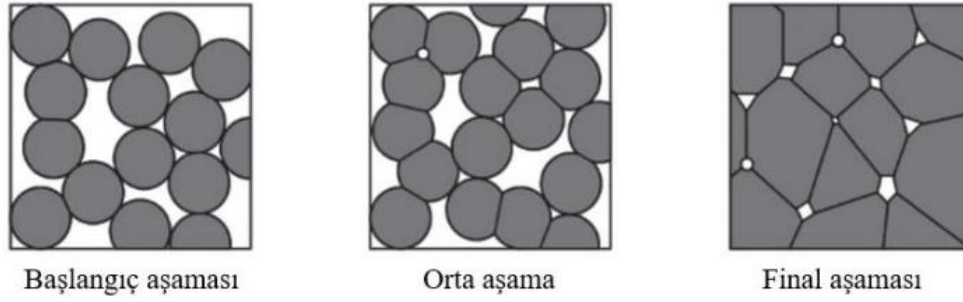
Sinterleme, toz haline getirilmiş metal parçaların birbirine bağlanmasını sağlayan, mukavemette önemli bir artış meydana getiren ve özelliklerin iyileştirilmesi ile sonuçlanan bir çeşit ısıtma sürecidir. Sinterleme işleminin etkili olabilmesi için tozların birbirleriyle çok yakın bir temas halinde olması oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, sinterleme işlemi preslenmiş tozlara uygulanmaktadır (German, 1985).

Sinterleme işleminde sıcaklık en belirleyici parametrelerden biridir. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa sinterleme işlemi, aktif atom ve boşluk çokluğu nedeniyle o kadar çabuk sonuca ulaşır. Yüksek sıcaklığın yanı sıra sinterleme hızı ve süresi, yapılan presleme işleminde uygulanan basınç gibi değişkenler sinterleme adımını etkileyen faktörlerdendir (Beytekin, 2020).

Sinterleme üzerine yapılan çalışmalar doğrultusunda;

- Boyunlaşmanın sonucunda parçacıkların birbiriyle etkileşiminin zamanla arttığı,
- Tane köşelerinin ve temas bölgelerinin yuvarlaklaştığı,
- Gözenek hacminin azaldığı,
- Yoğunlukta bir artış meydana geldiği belirtilmektedir (Beytekin, 2020).

Şekil 3.16' da sinterleme aşamasında ki gözenek ve tane sınırı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Sinterleme aşamalarındaki gözenek ve tane sınırı değişimleri (Çoşkun, 2022)

Sinterleme yöntemi tek bileşenli yapılarda metalin ergime sıcaklığının altında ki bir sıcaklıkta gerçekleştirilirken, çok bileşenli yapılarda çoğu durumda en düşük erime sıcaklığına sahip bileşenin erime sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilir.

Sinterleme işlemi, ana malzemenin ergime sıcaklığının %70-80'i arasında gerçekleşirken, bazı refrakter malzemeler söz konusu olduğunda erime sıcaklığının %90'ına ulaşabilmektedir (Ataş, 2003).

### 3.8.3 TM Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

Toz metalurjisi metodu; talaşlı imalat ve döküm ile şekil verilebilmesi güç olan çeşitli alaşımların ekonomik bir şekilde ve kolaylıkla ürün formuna getirilebilmesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. TM işlemi diğer üretim metotları ile karşılaştırıldığında belirli avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır.

TM'nin avantajları:

- Toz metalurjisi yönteminde; ergime dereceleri ve yoğunluk arasında ki farklılıklarından ötürü diğer imalat yöntemleriyle üretimi mümkün olmayan, kompleks yapıları üretmek mümkün olmaktadır.
- TM yöntemi, malzemenin fazla kullanımını engellemekte ve malzeme kaybının az olmasını sağlamaktadır.
- Bu yöntemle parça üretiminin kolay olmasından ötürü malzeme yönünden en verimli yöntemlerden biri olmaktadır.
- Toz metalurjisi yönteminde seri imalat imkanı sunulmaktadır.

- Toz metalurjisinde, yüzey kalitesinin fazla olmasından ötürü klasik döküm yöntemlerine göre daha az kusurlu parçalar üretilebilmektedir (Solakoğlu, 2021).

Dezavantajları ise;

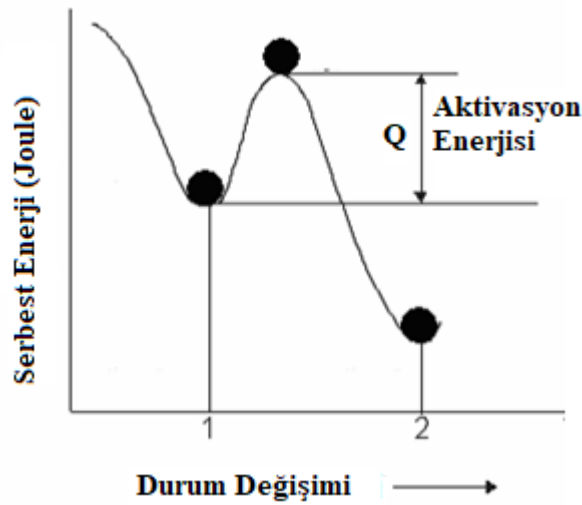
- Kullanılan tozlar homojen bir formda değilse, preslenmiş ürünün deforme olma olasılığı çok yüksektir.
- Toz metalurjisi yönteminde ki üretim hatlarında yaklaşık % 5'lik bir hurda açığa çıkmaktadır.
- Toz metalurjisi ile üretilen ürünlerde, yapıda ki gözeneklilik istenmeyen bir durum olmasına karşın yine de sık sık bu durumla karşılaşılabilir.
- Talaşlı imalata kıyasla tolerans değerleri daha yüksektir.
- Kullanılan metal tozlarının maliyeti çok fazladır ve bazı tozlar zarar verici olabilmektedir (Solakoğlu, 2021).

## 4. DİFÜZYON VE DİFÜZYON KAYNAĞI

### 4.1 Difüzyon

Atomların, moleküllerin ve iyonların sıcaklığa bağlı olarak yer değiştirmesinden kaynaklanan kütle akışına difüzyon denir. Difüzyon, moleküllerin rastgele hareketinin neden olduğu maddenin yayılması, dağılması veya kendiliğinden hareketidir. Atomlar yüksek konsantrasyonlu bir bölgeden daha düşük konsantrasyonlu bir bölgeye göç ederler. Homojen malzemelerde, tamamen aynı parçacıkların yer değiştirmeleri düzensizdir. Kendi kendine difüzyon olarak adlandırılan bu olayda atomların hareketi radyoaktif izotoplar ile tespit edilebilir. Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon olayları (hetero-difüzyon) teknik açıdan daha önemlidir. Her iki difüzyonda da atomların kafes içinde göçünü sağlamak için bir enerji birikimi gereklidir. Gerekli enerji atomdan atoma farklılık gösterir (Fidan, 2006).

Şekil 4.1’de 1 numara ile yarı kararlı durum gösterilmiştir. 2 numara ile gösterilen serbest enerji en alt seviyeye ulaştığında kararlı denge durumuna ulaşmaktadır. Birinci durumdan ikinci duruma geçiş için  $Q$  aktivasyon enerjisi verilir. Malzeme içerisindeki atomların difüzyon hızı, birim zamanda birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayısına denir. Akı “ $J$ ” harfi ile gösterilir (Özsoy, 2023).



Şekil 4.1 Serbest enerji ve durum değişimi arasındaki ilişki (Özsoy, 2023)

Difüzyon olayı en hızlı gazlarda gerçekleşmektedir. Difüzyon sıvılarda ve katılarda daha yavaştır. Katılarda difüzyon, atomların titreşiminden ve etraflarındaki boş alanlara atlamalarından kaynaklanır. Atomlar üzerindeki elektrik ve manyetik kuvvetler gibi farklı kuvvet türlerinin varlığı moleküllerin hareketini etkileyebilir. Difüzyon sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar. Sıcaklık arttıkça moleküllerin hareket alanı artar ve difüzyon için gerekli molekül hareket hızı artar (Fidan, 2006).

## 4.2 Difüzyon Kanunları

### 4.2.1 I. Fick Kanunu

Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon olayları teknik olarak daha önemlidir. I.Fick Yasası ile sabit bir a kesitinden geçen difüzyona uğrayan malzeme miktarı belirlenebilir. Burada bulunan konsantrasyon farklılıkları, parçacıkların belirli bir yönde hareket etmesine neden olur. I.Fick Yasası olarak bilinen matematiksel ifade aşağıdaki gibidir;

$$J_A = -D \cdot \left( \frac{dc}{dx} \right) \quad (4.1)$$

Eğer  $dc/dx$  konsantrasyon gradyanı sıfır değilse, bir difüzyon hızı vardır, eğer  $dc/dx = 0$  (aktivasyon enerjisi) ise, konsantrasyon değişikliği yoktur. Burada  $dc/dx$  konsantrasyon gradyanında x mesafesindeki difüzyon miktarıdır. J akı veya akış hızıdır, yani metal kütlesinin (m), t zamanında bu düzleme dik A yüzeyinden difüzyon yönünde yer değiştirmesidir. D difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ) ve  $dc/dx$  konsantrasyon gradyanıdır ( $m^3/m$ )<sup>-1</sup>. Difüzyon sırasında birçok faktör atomların akışını etkilemektedir.

Akı, malzeme içerisinde konsantrasyon homojen hale gelene kadar devam eder. Konsantrasyon gradyanı da, t birim zamanda bir nokta boyunca difüzyon alanındaki değişiktir. Konsantrasyon gradyanı, malzeme kompozisyonunun uzaklık ile nasıl değiştiğini gösterir.  $dc/dx$  mesafesindeki konsantrasyondaki farktır (Fidan, 2006).

#### 4.2.2 II. Fick Kanunu

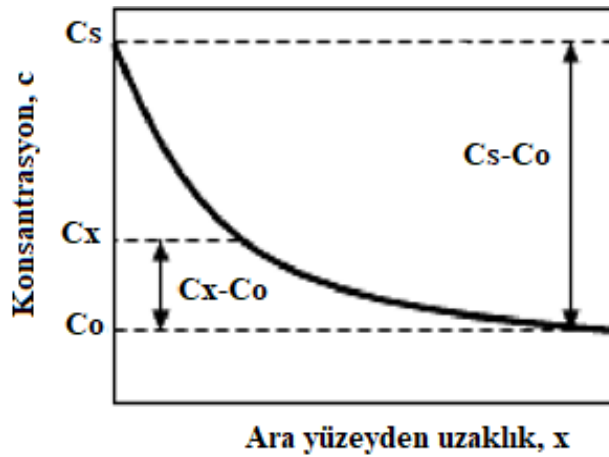
Bir yayınma olayında kararlı bir durum olmadığında, örneğin sabit konsantrasyon farkında kütle akışının tespitinin zor olması ve metallerde difüzyon olaylarının çözümünde I.Fick Kanununun yetersiz kalması durumlarında, difüzyon katsayısının deneysel tespitinde ve bir çok kullanımda II.Fick Kanunundan yararlanılmaktadır. I.Fick Kanununun II.Fick Kanununa dönüştürülmesi için, aralarında  $dx$  kadar mesafe bulunan iki paralel yüzeyle sınırlandırılmış hacim elemanı kullanılmaktadır. Bu durumda konsantrasyon  $x$  ve  $t$ 'ye bağımlı kalacağından, bir çok pratik problemler için şu matematiksel ifade kullanılır;

$$dc/dt = D.(d^2c/dx^2) \quad (4.2)$$

Bu denklemin çözümü bazı sınır değerlerine bağlıdır ve bu da;

$$(C_s - C_x) / (C_s - C_o) = \text{erf} (x / (2\sqrt{Dt})) \quad (4.3)$$

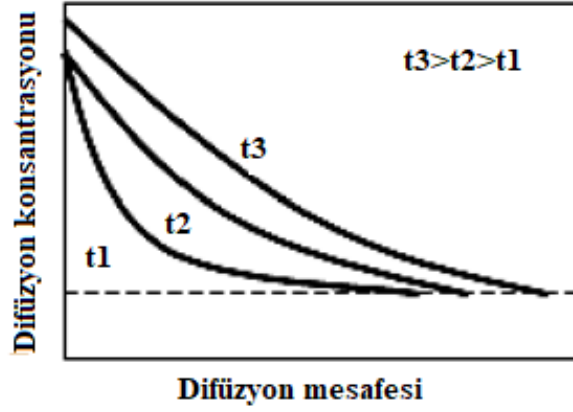
şeklinde ifade edilir. Bu denklemde ;  $C_x$ : yüzeyden ya da ara kesitten  $x$  kadar mesafedeki bir noktanın yoğunluğu,  $C_s$ : yüzeydeki konsantrasyon,  $C_o$ : difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu,  $D$ : ortak difüzyon katsayısı,  $x$ :  $C_x$ 'in ölçüldüğü noktanın yüzeye olan uzaklığı, erf: hata fonksiyonu ve  $t$ : difüzyon süresidir. Bu eşitlikte verilen konsantrasyon parametreleri Şekil 4.2'de konsantrasyon profili olarak görülmektedir.



Şekil 4.2 Kararsız hal difüzyonu için konsantrasyon profili (Fidan, 2006)

Ayrıca difüzyon mesafesinin konsantrasyona bağlı olarak süreyle değişimi de Şekil 4.3'de verilmiştir. Burada sıcaklığın artması ile birlikte birim alanda difüzyon miktarının arttığı görülmektedir.

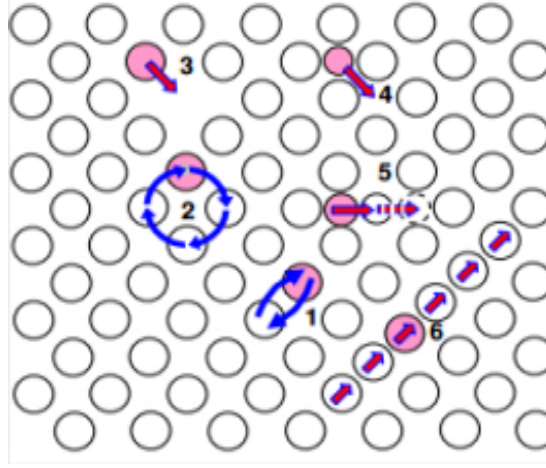
II. Fick yasası, malzeme yüzeyine difüze olan atomların konsantrasyonunun zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanmasını sağlar. Denklemin çözümü, difüzyon katsayısı  $D$  ve difüzyon yapan atomun yüzeydeki  $C_s$  ve malzeme içindeki  $C_o$  konsantrasyonu sabit tutularak elde edilir. Bu yasanın uygulaması,  $D$  sabit kaldığı sürece, farklı koşullar altında aynı konsantrasyon profilinin elde edilebilmesidir. Bu özellik, sıcaklığın belirli bir ısıtma işlemin uygulanması için gereken süre üzerindeki etkisini belirlemeyi mümkün kılar (Fidan, 2006).



Şekil 4.3 Kararsız hal difüzyonunda üç farklı sıcaklıkta oluşan konsantrasyon profili (Fidan, 2006)

#### 4.2.3 Difüzyon Mekanizmaları

Bir malzeme içindeki atomların, enerji verilerek bir konumdan diğerine aktarılmasına atomik difüzyon veya yayılımı denir. Ayrıca difüzyon, atomların sıcaklığa bağlı hareketi veya atomların transfer edilerek malzeme içinde kütle taşınması olarak da tanımlanabilir. Düşük atomik yoğunluklu malzemelerde, düşük erime noktalı malzemelerde, difüzyon yapan atomların küçük boyutlu olması ve düşük yoğunluklu malzemelerde difüzyonun hızlı olduğu durumlarıdır (Ada, 2021). Şekil 4.4'de difüzyon mekanizmalarının şematik gösterimi, Tablo 4.1'de difüzyon mekanizmaları ve özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.4 Difüzyon mekanizmalarının şematik gösterimi 1) Direkt yer değiştirme, 2)Halka difüzyonu, 3) Boşluk mekanizması, 4)Arayer difüzyonu, 5)Arayerimsi Difüzyon, 6)Tırmanmalı difüzyon (Ada, 2021)

Tablo 4.1 Difüzyon mekanizmaları ve bu mekanizmaların özellikleri (Ada 2021)

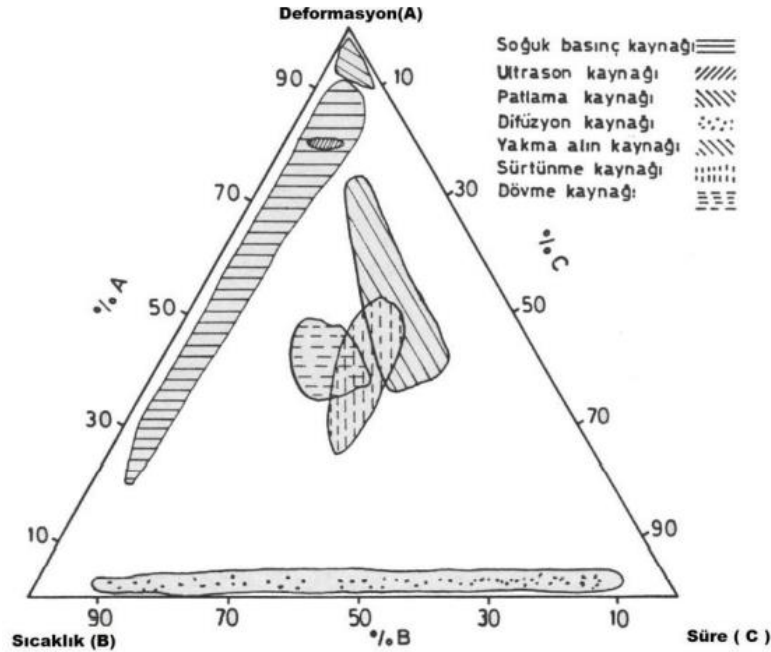
| Difüzyon                                                                                                                                               | Gerekli Enerji                                              | Mekanizmanın bazı                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Direkt yer değiştirme</b>                                                                                                                           | Çok yüksek aktivasyon enerjisi gerektirir.                  | Yüksek atom yoğunluklu sistemlerde meydana gelir ve distorsiyon yüksektir. |
| <b>Halka difüzyonu</b>                                                                                                                                 | Aktivasyon enerjisi direkt yer değiştirmeden daha düşüktür. | Atomlar sürekli olarak birbirinin yerini alırlar.                          |
| <b>Boşluk difüzyonu</b>                                                                                                                                | Yüksek aktivasyon enerjisi gerekmez.                        | Distorsiyon olmadan atomlar hareket ederler.                               |
| <b>Arayer difüzyonu</b>                                                                                                                                | Düşük aktivasyon enerjisine ihtiyaç vardır.                 | Arayer atom boşluklarına küçük atom göçü, distorsiyonsuz difüzyon.         |
| <b>Arayerimsi difüzyon</b>                                                                                                                             | Yüksek aktivasyon enerjisi gerektirir.                      | Yüksek miktarda distorsiyon meydana gelir.                                 |
| <b>Tırmanmalı Difüzyon</b>                                                                                                                             | Yüksek aktivasyon enerjisi gerektirir.                      | Yüksek miktarda distorsiyon meydana gelir.                                 |
| <b>Aktivasyon enerjisi</b> , difüzyon için aşılması gereken enerji değeri olarak tanımlanabilir.<br>Aktivasyon enerjisi düşük ise difüzyon kolay olur. |                                                             |                                                                            |

Difüzyon sırasında, atomlar, moleküller, atom grupları veya elektronlar gibi farklı miktarlardaki elementlerin bir yerden başka bir yere hareket etmesi mümkündür. Ancak, farklı yer değiştirme oranları reaksiyon merkezinin etrafındaki belirli bölgelerde hacimsel değişikliklere neden olabilir.

### 4.3 Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynak işlemi, birleştirilmek için temas ettirilen iki yüzeyin, malzemelerin erime noktasının altında olan bir sıcaklık değerinde, malzemelerde saptanabilir plastik akmaya sebep olmayan bir basınç altında, katı hal difüzyonu ile malzemeler arasında metalurjik bir bağ oluşana dek malzemelerin özelliklerini belirgin ölçüde etkilemeyen bir süre boyunca tutulduğu katı hal kaynak işlemidir. Difüzyon kaynağı işlemi, uzun kaynak süresi, çok düşük deformasyon oranı ve düşük kaynak sıcaklığı nedeniyle ilave basınç ve ısı kullanan diğer kaynak işlemlerinden farklı olmaktadır ( Ada, 2021).

Difüzyon kaynağı yönteminin çeşitli katı hal kaynak yöntemlerinin arasında bulunduğu yer Şekil 4.5’de verilmiştir.

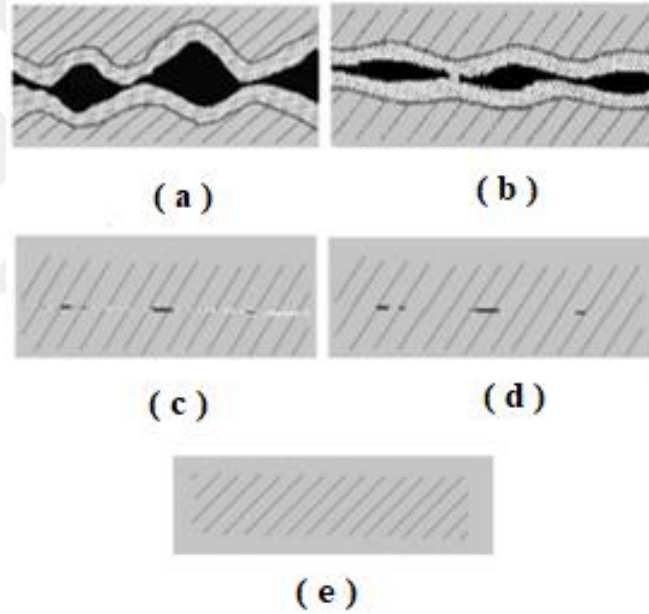


Şekil 4.5 Çeşitli katı hal kaynak işlemlerinin süre, deformasyon ve sıcaklık yönünden mukayese edilmesi (Altuner, 2011)

Difüzyon kaynağı işleminde bağ oluşumu için birleştirilecek yüzeyler birbirine tam olarak temas etmek zorundadır. Bu demektir ki birleşecek olan parçaların yüzeylerindeki mikroskobik çıkıntıların belirli bölgelerinin karşılıklı olarak birbirlerine tam olarak temas etmesi gerekmektedir.

Şekil 4.6’da de gözüktüğü üzere difüzyon kaynağının esasları;

- Deformasyon ve sınır tabakasının oluşması,
- Hacimsel difüzyon ve boşlukların yok olması,
- Tane sınırlarının hareketi ve boşlukların yok olması,
- Yüzeylerin sadece pürüzlü yerlerinde temas etmesidir (Anık, 1991).



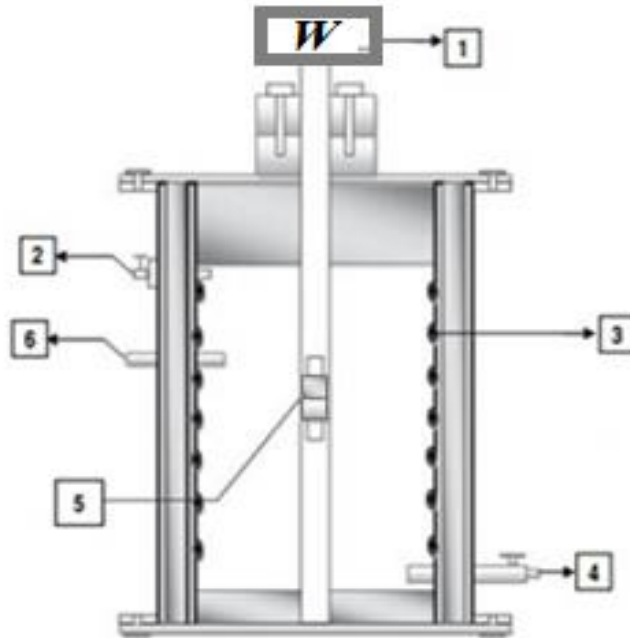
Şekil 4.6 Difüzyon kaynak yönteminin şematik gösterimi: a) Oksit tabakası ve ilk nokta teması; b) Plastik deformasyon ve sürünme sonrası, daha ince bir oksit tabakası ve geniş boşlukların oluşması; c) Akma sonrası; d) Hacim ve yüzey difüzyonuyla boşlukların doldurulması; e) Bitmiş kaynak (Fidan, 2006).

Günümüz endüstrisinde kullanılan malzemelerin çeşitliliğindeki artış, çeşitli özellikler istenilen durumlarda farklı metal bağlantılarına ihtiyaç duyulması ve hepsinden önemlisi son yıllarda ekonomik unsurların giderek önem kazanmasından dolayı, farklı özelliklere sahip olan malzemelerin birleştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur.

Ağırlıklı olarak uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan gelişmiş malzemelerin birleştirilmesi, difüzyon kaynağı da dahil olmak üzere katı hal kaynak teknikleri olarak bilinen yöntemlerle mümkün olmaktadır. Şu anda, birbirine benzemeyen metallerin %40'ı bu yöntemle birleştirilirken, titanyum ve alaşımları bu yöntemle birleştirilen malzemelerin yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır (Ada 2021).

Difüzyon kaynağı, kaynaktan sonra birleşme bölgelerinde kırılgan metaller arası fazların oluşması sebebiyle malzemelerin mukavemetinin azaldığı, birbirine benzemeyen metal ve alaşımlarda tercih edilmektedir. Düşük sıcaklıklarda uygulanabilen, birbirine benzemeyen malzemeleri birleştiren ve geleneksel kaynak yöntemleri ile elde edilemeyen diğer üstünlükleri sunan difüzyon kaynağı yöntemi her geçen gün gelişmekte ve ilerleyen zamanlarda daha geniş uygulama alanı bulabilecek bir birleştirme yöntemi olmaktadır. Malzemelerin difüzyon kaynağı işlemi ile birleştirilmesinde iki farklı teknik mevcuttur. Bu teknikler; katı hal difüzyon kaynak yöntemi ve sıvı hal difüzyon kaynak yöntemleridir.

Difüzyon kaynak cihazının şematik gösterimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Difüzyon Kaynağı Makinesinin Şematik Gösterimi: 1) Uygulanan yük (Basınç), 2) Argon gazı çıkışı, 3) Isı bobini, 4) Argon gazı girişi, 5) Numune, (6) Sıcaklık ölçer, (Ozan vd., 2012)

**Katı faz difüzyon kaynak yöntemi:** Katı hal difüzyon kaynağı işlemi, koruyucu bir atmosfer altında ya da vakum ortamında indüksiyon ve rezistans gibi ısıtma ile birleştirme yöntemidir.

Bu yöntemde kaynak yapılan malzemeler ergimezler ve uygulanan yük düşüktür. Yöntem genellikle ergime sıcaklıkları birbirlerine yakın ve difüzyon için gerekli olan şartları sağlayan malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Bu yöntemde birleştirilecek yüzeylerin hazırlığı çok önemlidir. Çünkü yüzeyi iyi hazırlanan malzemelerde, düşük basınç ile plastik deformasyon daha kolay sağlanabilmekte ve işlem süresi azaltılabilmektedir (Ada, 2021).

**Sıvı faz difüzyon kaynak yöntemi:** Sıvı faz difüzyon kaynak yöntemi difüzyon lehimleme olarak da bilinmektedir. Bu yöntem yalnızca farklı malzeme kombinasyonları için veya farklı malzemeler kullanıldığında uygulanabilmektedir. Sıvı hal difüzyon işleminde, kaynak sıcaklığı ve birleşecek olan ara yüzeylerin uyumu göz önüne alınarak, kaynak sıcaklığı, bu ara tabakanın ergime sıcaklığına bağlı olarak seçilir.

Birleşme, her iki ana malzemenin ergime sıcaklığından daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip, ince ve ara yüzeye dağılmış sıvı tabaka ile sağlanmaktadır. Ergiyiğin düşük sıcaklıklarda katılaşması, birleştirme sıcaklığını ve kaynak süresini azaltmaktadır. Sıvı faz difüzyon kaynak yöntemi, özellikle Al ve alaşımlarını birleştirmek için yüzey oksit filmlerinin kırılmasında, aynı zamanda bakır, çinko ve gümüşün difüzyon kaynağı içinde kullanılmaktadır (Ada, 2021).

Difüzyon kaynağı yönteminde, özellikle birbirine benzemeyen metal ve alaşımların birleştirilmesinde, genellikle bir ara katman kullanılmaktadır. Metal folyo ya da kaplama şeklinde ara katmanların kullanılması, difüzyon kaynağı için gereken sıcaklık, süre ve basıncın azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Ara katmanlar kaynak bölgesindeki heterojenliği en aza indirmekte ve birleşme oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Ara katmanlar folyo, elektrolitik kaplama ve püskürtme şeklinde uygulanabilir.

Ara tabakanın işlevleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Fiziksel özelliklerini (örneğin farklı ısı genleşme hızlarına sahip parçaları) dengeler,
- Kırılgan, sert metaller arasında faz oluşumunu engeller,
- Plastik deformasyon ile yüzey yakınlaşmasını düzeltir,
- Birleşecek olan parçaların hazırlama aşamalarını azaltır,
- Çalışma sıcaklığını ve süresini düşürürler (Ada, 2021).

#### 4.4 Difüzyon Kaynağının Prensipleri

Metal yüzeylerin çeşitli karakteristikleri vardır.

Bunlar;

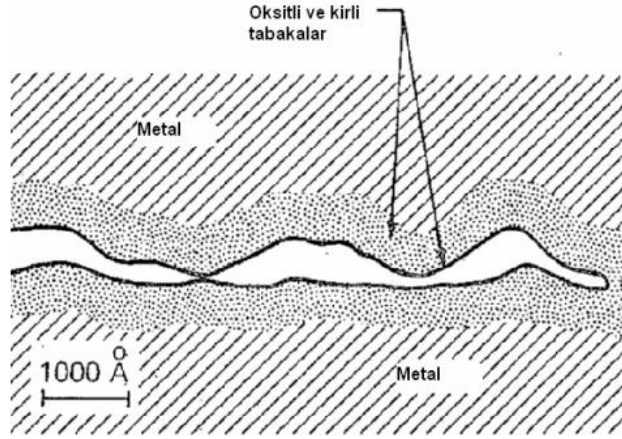
- Absorbe edilmiş gaz, nem veya ikisinin birden olması,
- Oksitlenmiş veya diğer kimyasallar ile tepkimeye girmiş ve bunların yapıştığı yüzeyler,
- Yağ ve pislik gibi rasgele dağılmış katı ya da sıvılar,
- Pürüzlülüktür.

Bu özelliklerinden dolayı uygun bir kaynak yapabilmek için önce iki şartın sağlanması gerekmektedir.

1) Metal-metal teması olabilmesi için mekanik yaklaşma sağlanmalıdır.

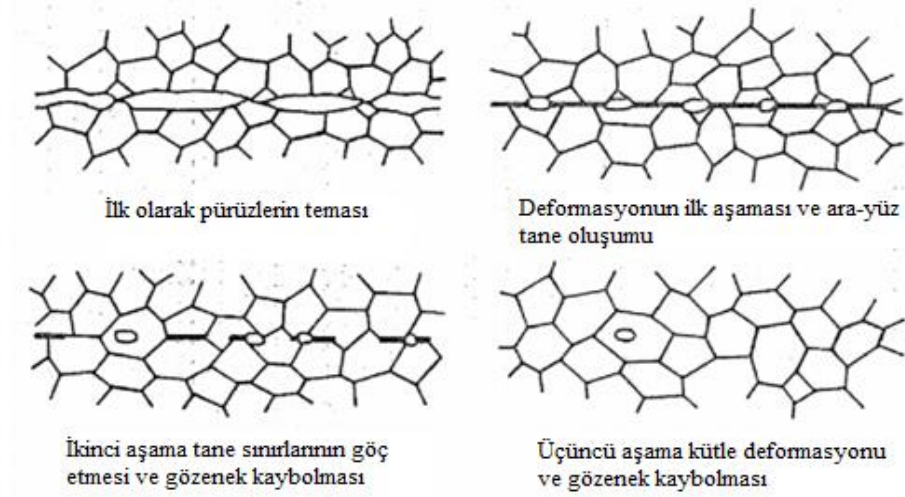
2) İşlemin olmasını engelleyen yüzeyde ki kirleticiler metalik bir birleşmenin oluşabilmesi için temizlenmelidir.

Şekil 4.8’de metal yüzeyindeki pürüzlülük ve mevcut kirleticilerin karakteristiğinin etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Metal yüzeyindeki pürüzlülük ve mevcut kirleticilerin karakteristiği (Kumru, 2007)

Kaynak yardımcıların kullanılmadığı klasik difüzyon kaynağı için üç aşamadan oluşan mekanik model Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Difüzyon kaynağındaki üç aşamanın mekanik modeli (Kumru, 2017)

Kaynağın ilk safhasında yüzey pürüzlülüklerinde akma ve sürünme mekanizmaları ile geniş bir arayüzey alanı üzerinde temas oluşturulur ve bağ genellikle tane sınırlarında meydana gelir. Basıncın etkisi ile yüzey oksit filmi kırılır ve atomların akışı oksitlerin kırılan noktalarından başlar.

Kaynağın ikinci safhasında; difüzyonun etkisi deformasyondan daha önemlidir. Bu safhada tane sınırı difüzyonu sonucu gözenekler ortadan kalkar ve bir kısmı tane içerisinde meydana gelir. Başlangıç durumunda düz olan bağ çizgisi; üçlü noktalarda bir malzemenin diğer malzemeye birkaç mikron nüfuz etmesi sonucu eğrilir.

Birleşme sınırı hareket ettikçe, gözenekler tanelerin içinde kalır ve burada tane sınırıyla temaslarını kaybederler. Difüzyonel süreçler bu tür boşlukları azaltarak ortadan kaldırmaya yardımcı olur.

Kaynağın üçüncü safhasında ise; birleşme tamamlanır. İkinci aşamanın sonunda tane sınırlarından yok edilemeyip tane içine taşınan gözenekler bu safhada hacim difüzyonu ile büyük oranda ortadan kaldırılmaktadır. Ortadan kaldırılamayan gözenek miktarının oranı kaynak sıcaklığı ile orantılır (Ada, 2021).

#### **4.5 Difüzyon Kaynağının Parametreleri**

Difüzyon kaynağı işleminde, temas yüzeyleri basınç altında malzemelerin erime sıcaklığının altındaki sıcaklıklara ısıtılmaktadır. Çeşitli nedenlerden ötürü kaynak işleminin sonucu iyi ya da kötü olabilmektedir. Sıcaklık, zaman, basınç, temas yüzeylerinin pürüzlülüğü ve kaynak sırasında uygulanan atmosfer gibi faktörler birbiriyle ilişkilidir ve malzemenin ve kaynak yapılacak çiftin özelliklerine bağlıdır. Bununla birlikte iki malzemenin tane büyüklüğü, kristal yapısı, atom yarıçapı, yeniden kristalleşme sıcaklıkları, yüzey enerjilerinin fiziksel veya kimyasal olarak aynı ya da farklı olması gibi metalurjik faktörler etken olmaktadır.

Difüzyon kaynağı;

1. Kaynak şartları; kaynak sıcaklığı, kaynak basıncı, basınçta tutma süresi, yüzey şartları, çalışma ortamına,
2. Birleştirecek olan metallerin fiziksel veya kimyasal özellikleri; kristal yapıları, atom yarıçapı, tane boyutları, yüzey enerjileri ve yeniden kristalleşme sıcaklıklarına,
3. Metalurjik özellikleri; farklı yapıda ki metal ya da malzeme çiftinin karşılıklı çözünübilirliği ve metaller arası bileşiklerin nüfuz etmesi gibi unsurların etkisi altındadır (Tolun, 2013).

#### 4.5.1 Kaynak Sıcaklığı

Kaynak sıcaklığı; deformasyonu, oksit çözünürlüğünü, allotropik dönüşümü, yeniden kristalleşmeyi, difüzyonu ve sürecin kısıllığını etkilediği için en önemli değişkendir. Metotta sıcaklık; genel olarak indüksiyon, direnç ya da yüksek frekans teknikleri ile elde edilir. Difüzyon sıcaklığı genellikle solidus çizgisinin altında ya da yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindedir. Benzer tip metaller birleştirilirken, kaynak sıcaklığı malzemenin erime derecesinin 0,5-0,7 katı olacak şekilde alınmaktadır. Birbirine benzemeyen metaller birleştirildiğinde bu sıcaklık biraz daha yüksek olabilir. Sıcaklığa ek olarak, kaynak işlemi esnasındaki ısıtma-soğutma hızları da önemlidir. Literatürde, sıcaklıktaki her 20°C sıcaklık artışı için difüzyon katsayısının veya difüzyon hızının iki katına çıktığı belirtilmektedir. Kaynak sırasında aşırı yüksek sıcaklıklar tane irileşmesine neden olur ve mukavemeti azaltır (Ada, 2021).

#### 4.5.2 Kaynak Basıncı

Difüzyon kaynağı yönteminde, birleşecek olan yüzeyler arasında ilk teması sağlamak ve difüzyon sürecini başlatmak için basınç olması gerekmektedir. Uygulanacak olan basınç, kaynak sıcaklığına, birleşecek malzemelerin mekanik özelliklerine ve gereken şekillendirme derecesine bağlıdır. Uygulamada, malzemenin kaynak sıcaklığındaki akma dayanımı genellikle basıncın üst sınırı olarak alınmaktadır. Sonuç olarak basınç, yüzey pürüzlerinin sürünme oranını ve plastik deformasyonunu artıracak kadar büyük ve parçaların makroskopik deformasyonuna neden olmayacak kadar da küçük olmalıdır. Kaynak basıncı, birleştirilecek parçaların hacimsel plastik deformasyonunu en aza indirmek için akma gerilmesinin önemli ölçüde altında tutulmalıdır (Bilgin, 2007).

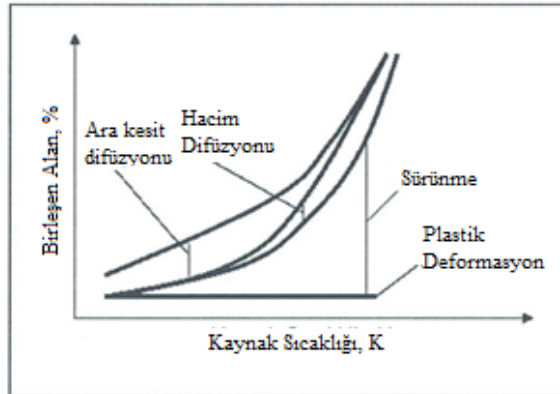
#### 4.5.3 Kaynak Süresi

Difüzyon kaynağı süresi, sıcaklık, basınç ve bağlantı türü, birleştirilecek yüzeylerin temizliği ile bağlantılıdır. Kaynak süresi çoğunlukla karşılıklı kimyasal bağların oluşmasını sağlayacak ve ara yüzeydeki difüzyonu engellemeyecek şekilde seçilmelidir.

Kaynak sıcaklığı ve basıncı artırılarak süre kısaltılabilmektedir. Buna ek olarak, birleşecek olan yüzeylerde kir mevcut ve kaynak sıcaklığı düşükse, kaynağın süresi artmaktadır. Her malzeme veya malzeme çifti için gerekli olan zaman birkaç dakika ve birkaç saat arasında değişebilmektedir. Kaynak yapılacak süre kısa tutulduğunda iyi bir bağlantı elde edilemezken, kaynak süresinin gerekenden fazla tutulması metaller arası bileşiklerin oluşmasına ve tane büyümesine neden olmaktadır. Uzun kaynak süresi sadece kaynak maliyeti açısından bir dezavantaj olmakla kalmaz, aynı zamanda boşluk oluşumu, bileşimdeki değişiklikler ve kırılgan metaller arası bileşiklerin oluşumu gibi bağlantının mekanik özelliklerinin bozulmasına da neden olmaktadır. Sıcaklığın sürünme eğrisi üzerindeki etkisi Şekil 4.10'da ve sıcaklığın bağlantı alanı üzerindeki etkisi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Neticede kaynak işlemi için yeterli olan süre, yüzeylerde karşılıklı olarak temasın sağlandığı, atomların hareketi için yeterli olan ve bu fazda tutularak bağlanmanın sağlanabildiği süredir (Babayev, 2007).



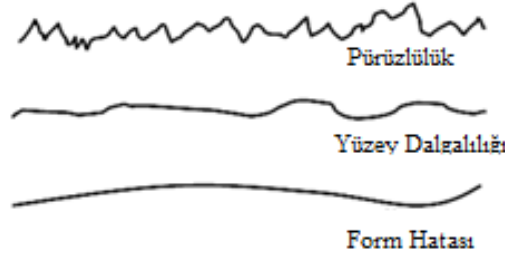
Şekil 4.10 Sıcaklığın sürünme eğrisine etkisi (Tolun, 2013)



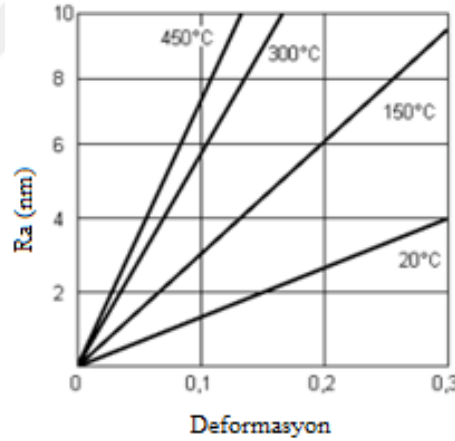
Şekil 4.11 Sıcaklığın birleşme alanı üzerindeki etkisi (Tolun, 2013)

#### 4.5.4 Yüzey Şartları

Difüzyon kaynağı yapılacak olan parçaların yüzeyleri birleştirilmeden önce dikkatlice hazırlanmış olmalıdır. Difüzyon kaynağının kalitesini etkileyen faktörler; yüzey pürüzlülüğü, yüzey filmleri ve yüzey boşluğudur. Yüzey kusurları Şekil 4.12’de ve pürüzlülüğün sıcaklıkla değişimi Şekil 4.13’de gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Yüzey kusurları (Fidan, 2006)



Şekil 4.13 Yüzey deformasyonu ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı değişim (Fidan, 2006)

Yüzey pürüzlülüğü, yüzeyler arasında tam temas oluşması için gereken süreyi etkilemektedir. Ayrıca oksit tabakaları hem birleştirilecek yüzeylerin temasını engeller ve bağ oluşumunu geciktirir hem de ara yüzeydeki tane sınırlarının difüzyonunu önleyerek boşluklara neden olmaktadır. Toz, gres ve yağ da oksit filmleri ile aynı etkiye sahiptirler. Oksit filmlerini gidermek için kimyasal aşındırma ve asitle temizleme yöntemleri kullanılmaktadır. Yüzey hazırlığı temizlikten daha fazlasını içermektedir. Nihai durumun kabul edilebilir pürüzsüzlükte olması, kimyasal olarak oluşan oksitlerin yer değiştirmesini, gazlı-sulu ya da organik yüzey filmlerinin

giderilmesini kapsamaktadır. Esas yüzey hazırlığı çoğunlukla işleme, aşındırma, taşlama ya da parlatma yoluyla gerçekleştirilir. Tamamen hazırlanan bir yüzeyin en temel özelliği düz ve pürüzsüz olmasıdır. Difüzyon kaynağında homojen teması sağlamak için maksimum düzlük ve pürüzsüzlük derecesi gerekmektedir (Fidan, 2006; Ada,2021).

#### **4.5.5 Kaynak Ortamı**

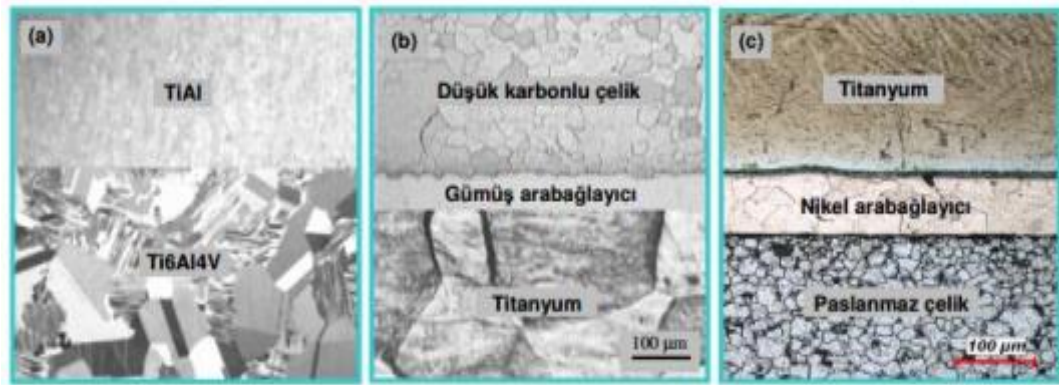
Difüzyon kaynağı işleminde, parçaların ve ara yüzeylerin oksitlenmesini engellemek için kaynağın koruyucu bir atmosferde yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda kaynak; asal gaz atmosferinde veya vakum altında gerçekleştirilir. Kararsız metallerle veya oksijende çok çözünen oksitlerle normal atmosferde başarılı bir birleşim elde edilebilmektedir. Bu koruyucu atmosfer için; argon, helyum ve azot soy gaz olarak kullanılabilir. Soy gazlar atmosferdeki oksijenin etkisini sadece belirli bir ölçüde azalttıklarından, kararlı oksitlere sahip metaller için vakum kullanılabilir. Vakum esnasında, birleştirilecek parçaların ara yüzeyleri oksidasyonun yanı sıra yüzeyde var olan yabancı maddelerin çözünmesinden de korunur. Vakum ortamında yapılan kaynak bağlantıları, vakum miktarı çok fazla olmasa dahi, yeteri kadar saf olmayan inert gazların koruması altında yapılan bağlantılardan daha yüksek mukavemet sağlar (Bilgin, 2007).

#### **4.5.6 Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları**

Difüzyon kaynağını etkileyen pek çok durum bulunmaktadır. Bu durumlar; mikro yapı, tane boyutu ve ek metal (ara katman) kullanımı olarak sınıflandırılabilir. Difüzyon kaynak yöntemi için optimum yapının ince taneli yapı olduğu tespit edilmiştir. Tane boyutu, kaynak sırasında ve kaynaktan sonra bağlantının mukavemeti için büyük ölçüde önem taşımaktadır. Difüzyon kaynağının ilk safhalarında, boşlukların tane sınırını geçme olasılığı daha yüksektir. Bu nedenle, birden fazla tane sınırı boşluk oluşumunu önlemek için hareket eder. Atomlar bu tane sınırlarından boşluğa yayılır ve boşluğu daraltır. Tane boyutu ne kadar küçük ve tane sayısı ne kadar fazla olursa, boşlukların difüzyonla doldurulması o kadar kolay ve arayüzeyde kalma olasılıkları o kadar az olur (Ada, 2021).

#### 4.6 Difüzyon Yardımcıları

Bazı durumlarda, temas yüzeyleri arasında bir ara katman veya difüzyon yardımcısı kullanmak avantajlı olabilmektedir. Difüzyon yardımcısının amacı; yüzeyler arasında yumuşak bir metal tabaka oluşturmaktır. Yumuşak metal tabaka, ilk kaynak aşamasında gerekli olmayan düşük basınçta plastik akışına izin vermektedir. Bağlantı yapıldıktan sonra, ana metal alaşım elementlerinin yumuşak katmana difüzyonu bağlantı boyunca kademeli olarak azalır. Kaynak sıcaklığını düşürmek, kaynak basıncını azaltmak, işlem süresini azaltmak, difüzyon direncini artırmak, istenmeyen unsurları ortadan kaldırmak vb. için bazı uygulamalarda bir arayüz difüzyon yardımcısının kullanılması avantaj sağlamaktadır (Kumru, 2007). Çeşitli ara bağlayıcı ve ara bağlayıcısız malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilmeleri sonucu optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14 Difüzyon kaynaklı birleştirmelerin optik mikroskop görüntüleri a) TiAl-Ti6Al4V, b) gümüş ara bağlayıcı düşük karbonlu çelik-titanyum c) nikel ara bağlayıcı titanyum ve paslanmaz çelik malzeme (Ada, 2021)

Difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilen malzemeler, birbiri ile aynı veya farklı pek çok malzeme difüzyon kaynağı metoduyla birleştirilebilmektedir. Bu metod en çok titanyum-alaşımları, zirkonyum-alaşımları, nikel bazlı alaşımlarda uygulanmaktadır. C, B, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC gibi takviye malzemelerinin kullanıldığı metal matrisli kompozitlerin birleştirilmesinde elverişli bir yöntem olmaktadır. Yapıları birbirine benzemeyen metal ve alaşımlarının, kaynak sonrası bağlantı bölgelerinde kırılğan intermetalik faz oluşup, yeniden ergime ile malzeme gevrekleşip veya mukavemeti azalırsa difüzyon kaynağı yöntemi seçilebilmektedir.

#### 4.7 Difüzyon Kaynağının Uygulama Alanları

Difüzyon kaynağı birçok avantajı olan bir üretim sürecidir. Bu nedenle birçok uygulama alanına sahiptir. Bu alanlar;

- Elektronik endüstrisi,
- Genel mühendislik,
- Uzay ve havacılık endüstrisi,
- Nükleer endüstri,
- Savunma endüstrisi, olarak temel sınıflara ayrılabilir.

Difüzyon kaynağı; genel mühendislik alanında, kaynak çatlama, gevrek metaller arası yapıların oluşması tehlikesinin mevcut olduğu durumlarda kullanılmaktadır.

Difüzyon kaynak yönteminin özel avantaj sunduğu birleştirme çeşitleri şunlardır:

- Difüzyon kaynağı ile aynı anda birleştirilebilen içi boş ve karmaşık şekilli yapılar ve elemanlar,
- Döküm ve dövme parçaların difüzyon kaynağı,
- Yüzey kaplamadır.

Difüzyon kaynak yönteminin yüksek verimliliğine rağmen, yüksek yatırım maliyeti nedeniyle kullanımı yaygın değildir. Havacılık ve uzay endüstrisinde difüzyon kaynağı; daha ucuz, verimli, hafif ve difüzyona daha yatkın parçaların üretilmesini sağlayarak bu endüstrinin gelişmesine yardımcı olmaktadır.

Difüzyon kaynak yönteminin silah endüstrisindeki uygulaması, diğer yöntemler ile daha ekonomik ve bütünleşik olarak üretilmeyen yapı ve elemanların üretilmesidir. Örneğin; hidrojen varlığının sorun yarattığı martenzitik yapıda ki malzemelerin kaynaklı birleştirmelerinde klasik kaynak teknikleri yerine difüzyon kaynak yöntemi uygulanmaktadır. Nükleer alanda ise difüzyon kaynak yöntemi reaktör bileşenlerinin yapımında ve özellikle de yakıt sistemlerinde kullanılmaktadır (Ceyhun vd, 1996; Pakdil, 2001).

#### 4.8 Difüzyon Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Difüzyon kaynağı fazla sayıda avantaja sahiptir. Bu işlemin avantajlarından bazıları aşağıdaki gibidir.

- Ergitme kaynağında ortaya çıkan ön-son tavlama ihtiyacı, deformasyonların oluşması gibi durumlar, difüzyon kaynağında görülmemektedir.
- Metalurjik olarak birbiriyle uyumlu olmayan iki metal veya bir metal ile, metal olmayan bir malzeme bu yöntem ile çok rahat bir şekilde birleştirilebilmektedir.
- Birleşme süresi, yapılacak olan bağlantı bölgesinden bağımsızdır. Bu demektir ki bir defada geniş alanlı veya karmaşık şekilli bağlantıların birleştirilebilmesi mümkün olabilmektedir.
- Kompozit ve seramik malzemelerin, metal malzemeler ve diğer malzemeler ile birleştirilmesinde, en verimli ve en etkili olan yöntem difüzyon kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Farklı malzemelerin kaynağında ara bağlayıcı kullanılarak işlem süreleri kısaltılabilir.
- Difüzyon kaynağında, kaynak işlemi tam otomatik hale getirilerek işlem için kalifiye eleman ihtiyacı diğer yöntemlere göre azaltılabilir.
- Kaynaklı malzemelere hem tahribatlı (çekme, kesme, darbe, sertlik ve eğme) testler, hem de tahribatsız (optik mikroskop, SEM, EDS vb.) testler kolaylıkla uygulanabilir.

Difüzyon kaynak işleminin çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar;

- Difüzyon kaynağı yöntemi, yüksek ekipman maliyeti gerektirir.
- Kaynak esnasında özel araç gereç ve ortama ihtiyaç duyulabilir.
- Kaynak işlemi için koruyucu gaz atmosferi veya vakum ortamı gerekir.
- İyi bir kaynak kalitesi için, kaynak öncesi hassas bir yüzey hazırlama aşamasına gerek vardır.
- Kaynak işlemi yapabilmek için çok uzun kaynak sürelerine ihtiyaç duyulabilmektedir.

- Kaynak parametreleri düzgün seçilmediğinde (özellikle yüksek basınç) birleştirilen malzemelerde yüksek miktarda plastik deformasyon gözlenebilmektedir (Ada, 2021).



## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1 Çalışmanın Amacı

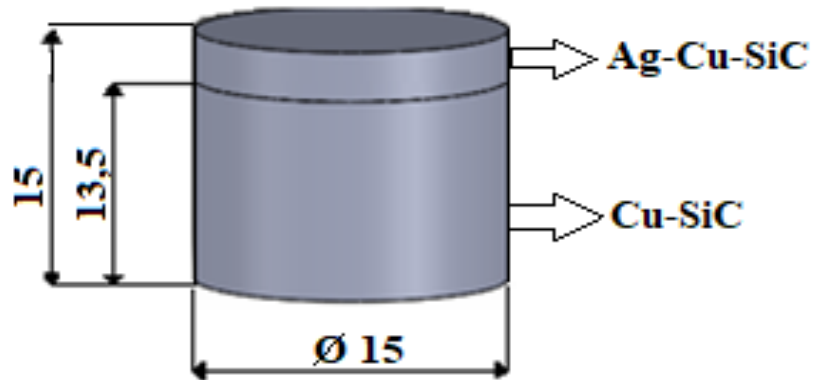
Bu çalışmanın amacı, soğuk preslenmiş ve sinterlenmiş SiC takviyeli Cu matrisli kompozit malzemelerin difüzyon kaynak işleminde Ag elementinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisinin araştırılmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda en uygun birleşme şartlarına belirlenerek, kaynak işlemi sonrasında difüzyon bölgesinde oluşan bağlantılar incelenmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde Ag ilavesi ile daha düşük sıcaklık ve de kaynak işlemlerinin gerçekleştirilebilme durumunu ortaya koymak çalışmanın temel hedefidir.

### 5.2 Hammaddeler ve Kompozit Üretimi

Numune üretiminde matris malzemesi olarak kullanılan bakır tozu Nanokar firmasından temin edilmiş olup %99,9 saflıkta ve ortalama partikül boyutu 45  $\mu\text{m}$ 'dir. SiC tozu %99,9 saflıkta ve 22  $\mu\text{m}$  boyutunda, gümüş tozu ise %99,9 saflıkta ve 28-48 nm boyutlarına sahiptir. Gümüş tozları Nanografi firmasından temin edilmiştir.

Üretilen numune Şekil 5.1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Üretilen numunelerin şematik gösterimi

Cu-SiC ve Ag-Cu-SiC matrisli kompozitlerin bileşim oranları ve üretim parametreleri (Tablo 5.1)'de gösterilmektedir. Cu ve SiC bazlı kompozit tozlar hacimce %95 Cu-%5 SiC, %90 Cu-%10 SiC içermektedir. Cu-Ag-SiC bazlı tozlar ise %2, %4 ve %6 oranlarında gümüşe sahiptir.

Tablo 5.1 Kompozitlerin bileşim oranları ve üretim parametreleri

| No | Karışım Oranları(% Hacim) |     |    |            |     | Sinterleme Parametreleri |           |
|----|---------------------------|-----|----|------------|-----|--------------------------|-----------|
|    | Üst Tabaka                |     |    | Alt Tabaka |     | Sıcaklık (°C)            | Süre (dk) |
|    | Cu                        | SiC | Ag | Cu         | SiC | 850                      | 120       |
| 1  | 95                        | 5   | 0  | 95         | 5   |                          |           |
| 2  | 93                        | 5   | 2  | 95         | 5   |                          |           |
| 3  | 91                        | 5   | 4  | 95         | 5   |                          |           |
| 4  | 89                        | 5   | 6  | 95         | 5   |                          |           |
| 5  | 90                        | 10  | 0  | 90         | 10  |                          |           |
| 6  | 88                        | 10  | 2  | 90         | 10  |                          |           |
| 7  | 86                        | 10  | 4  | 90         | 10  |                          |           |
| 8  | 84                        | 10  | 6  | 90         | 10  |                          |           |

### 5.3 Toz Karışımların Hazırlanması

Belirlenen oranlardaki karışımları elde edebilmek için, Cu, Ag ve SiC tozları Şekil 5.2'de gösterilmiş olan 0,1 mg hassasiyete sahip terazide tartıldıktan sonra karıştırma kaplarına koyulmuştur.

Karıştırma işlemi için plastik bir kavanoza farklı çaplara sahip olan çelik karıştırma bilyeleri ile birlikte koyulmuş olan tozlar Şekil 5.3'de gösterilen toz karıştırma makinesinde(turbula), 20 rpm hız ve 90 dakika süreyle karıştırmaya tabi tutulmuştur.



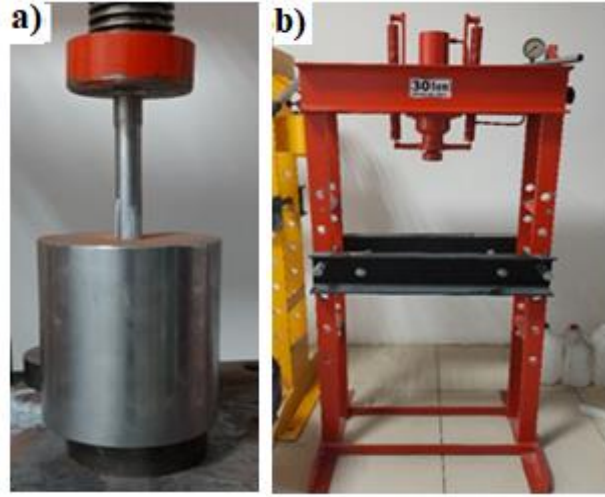
Şekil 5.2 Hassas terazi



Şekil 5.3 Toz karıştırma makinesi (Turbula)

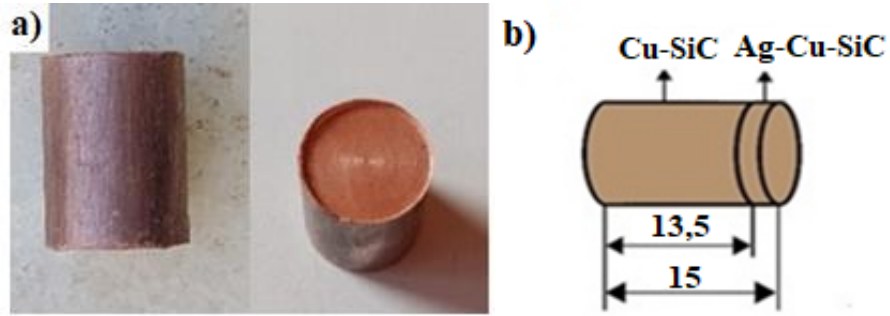
### 5.3.1 Presleme

Presleme işleminde Ø15 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde silindirik numuneler elde etmek için Şekil 5.4-a'da gösterilmiş olan takım çeliğinden yapılmış silindirik kalıp kullanılmıştır. Presleme öncesi tozların kalıba yapışmasını önlemek amacıyla kalıp çinko stearat-alkol karışımı ile yağlanmıştır. Hazırlanan toz karışımı, Şekil 5.4-b'de gösterilen 30 ton kapasiteli hidrolik pres ile 600 MPa basınç altında oda sıcaklığında preslenmiştir.



Şekil 5.4 a) Pres kalıbı b) 30 ton kapasiteli hidrolik pres

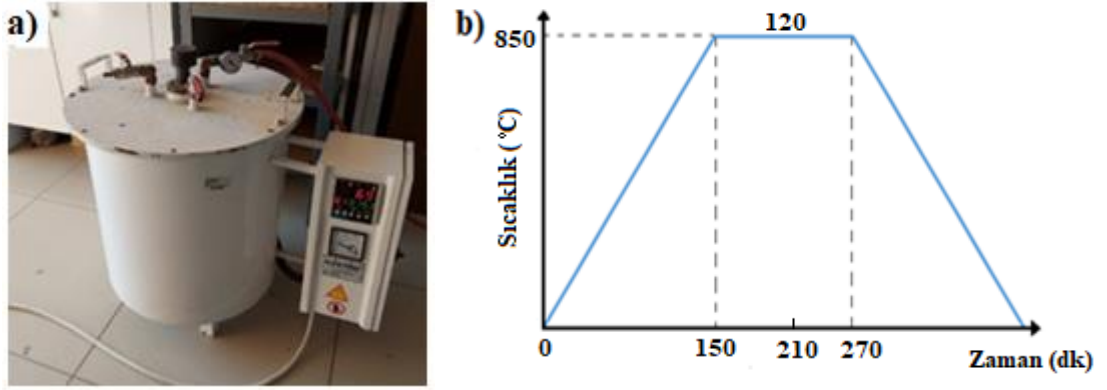
Kaynak bölgesini oluşturacak olan Ag-Cu-SiC karışımı hesaplanan oranlarda kalıba koyulmuş el baskısı ile bir ön sıkıştırma yapılarak düzgün kalınlıkta bir form oluşması sağlandıktan sonra 13,5 mm yüksekliğe sahip bölüm için hesaplanan miktarda Cu-SiC toz karışımı kalıba ilave edilmiş ve presleme işlemi 600 Mpa basınç altında 1 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi sonucunda oluşan numunelerin 1,5 mm'lik kısmı Ag-Cu-SiC karışımına, 13,5 mm'lik kısmı ise Cu-SiC karışımına ait olacak şekilde üretimi sağlanmıştır. Preslenen numunelerin makro görüntüleri ve boyutları ifade eden şematik gösterimi Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 a) Preslenen numunelerin şekli b) Numunenin boyutları

### 5.3.2 Sinterleme

Üretilen kompozit malzeme numuneleri, koruyucu Ar gazı atmosferi altındaki sinterleme fırınında 850 °C sıcaklıkta ve 120 dakika süreyle sinterlenmiştir. Şekil 5.6-a'da sinterleme işlemi sırasında kullanılan cihaz ve Şekil 5.6-b'de sinterleme parametlerini ifade eden sıcaklık-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 5.6 a) Sinterleme fırını, b) Sinterleme Parametreleri

Sinterleme sonrasında numunenin makro fotoğrafı Şekil 5.7’de gösterilmiş olup sinterleme süresi sonrasında numuneler doğal soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 5.7 Sinterlenmiş numune

### 5.3.3 Yüzey Hazırlama

Difüzyon kaynağı işleminde birleştirilecek yüzeylerin düzgün olması, birbiri ile uyumu bağlantı mukavemeti için büyük önem arz etmektedir. Birleşecek kısımların birbirine tamamen temas etmesi ve arada boşluk olmaması için birleşme yüzeyleri düz bir biçimde zımparalanmalı, bununla birlikte yüzey pürüzlülüğü de en aza indirilmelidir. Bu bağlamda, deneyde üst tabaka olarak kullanılan Ag-Cu-SiC kompozit malzemenin yüzeylerine kaynak işleminden hemen önce Şekil 5.8’de gösterilen zımparalama-parlatma makinesinde zımparalama işlemleri yapılmıştır.

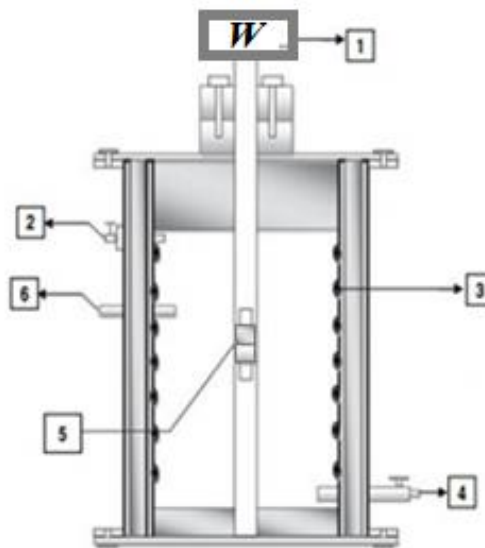


Şekil 5.8 Zımparalama ve parlatma makinesi

Zımparalama işlemi, 220-320-400-600-800-1200 grid SiC su zımparası ile gerçekleştirilmiştir. Yüzey zımparalama işleminden sonra oksitlenmeyi önlemek ve yüzeydeki kalıntıları temizlemek için numuneler alkol ile yıkanmış ve kurutulmuştur.

#### 5.4 Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynak işleminde değişken parametre olarak süre ele alınmıştır. Gümüşün etkisinin belirlenmesi için sabit sıcaklık (850°C) ve sabit basınç (2 Mpa) seçilmiştir. Difüzyon kaynağı yapılan kaynak cihazının şematik gösterimi Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9 Difüzyon kaynağı makinesinin şematik gösterimi: 1) Uygulanan yük(Basınç), 2)Argon gazı çıkışı, 3)Isı bobini, 4)Argon gazı girişi 5)Numune 6)Sıcaklık ölçer

Belirtilen parametrelerin seçimi için daha önce yapılmış olan araştırmalar da kullanılan (Abukhdair, 2021) ve optimum kaynak parametreleri temel alınmıştır. Kaynak ve numune parametreleri Tablo 5.2’de verilmiş olup, sıcaklık 850°C, basınç 2 MPa, süre 30, 60 ve 120 dakika olarak alınmıştır.

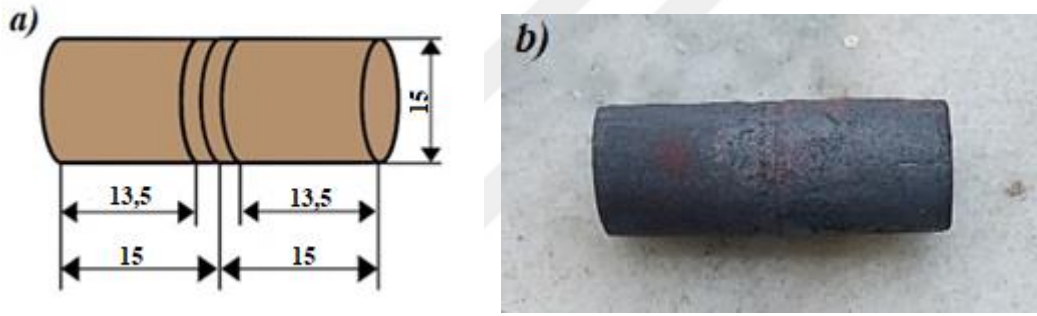
Tablo 5.2 Kaynak parametreleri

| Numune Bilgileri |                 | Kaynak Parametreleri  |                          |                         |
|------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
|                  |                 | Kaynak Süresi<br>(dk) | Kaynak Sıcaklığı<br>(°C) | Kaynak Basıncı<br>(MPa) |
| 1                | %5 SiC-%95 Cu   | 30                    | 850                      | 2                       |
| 2                | %5 SiC-%95 Cu   | 60                    | 850                      | 2                       |
| 3                | %5 SiC-%95 Cu   | 120                   | 850                      | 2                       |
| 4                | %2 Ag-%5 SiC    | 30                    | 850                      | 2                       |
| 5                | %2 Ag-%5 SiC    | 60                    | 850                      | 2                       |
| 6                | %2 Ag-%5 SiC    | 120                   | 850                      | 2                       |
| 7                | %4 Ag-%5 SiC    | 30                    | 850                      | 2                       |
| 8                | %4 Ag-%5 SiC    | 60                    | 850                      | 2                       |
| 9                | %4 Ag-%5 SiC    | 120                   | 850                      | 2                       |
| 10               | %6 Ag-%5 SiC    | 30                    | 850                      | 2                       |
| 11               | %6 Ag-%5 SiC    | 60                    | 850                      | 2                       |
| 12               | %6 Ag-%5 SiC    | 120                   | 850                      | 2                       |
| 13               | %10 SiC- %90 Cu | 30                    | 850                      | 2                       |
| 14               | %10 SiC- %90 Cu | 60                    | 850                      | 2                       |
| 15               | %10 SiC- %90 Cu | 120                   | 850                      | 2                       |
| 16               | %2 Ag-%10 SiC   | 30                    | 850                      | 2                       |
| 17               | %2 Ag-%10 SiC   | 60                    | 850                      | 2                       |
| 18               | %2 Ag-%10 SiC   | 120                   | 850                      | 2                       |
| 19               | %4 Ag-%10 SiC   | 30                    | 850                      | 2                       |
| 20               | %4 Ag-%10 SiC   | 60                    | 850                      | 2                       |
| 21               | %4 Ag-%10 SiC   | 120                   | 850                      | 2                       |
| 22               | %6 Ag-%10 SiC   | 30                    | 850                      | 2                       |
| 23               | %6 Ag-%10 SiC   | 60                    | 850                      | 2                       |
| 24               | %6 Ag-%10 SiC   | 120                   | 850                      | 2                       |

Her ihtimale karşılık kaynaktan hemen önce 1200 meshlik su zımparası ile tekrar zımparalanan numuneler alkol ile temizlenip kurutularak fazla zaman geçirmeden gümüş ekli kısımlar birbirine temas edecek şekilde birleştirilip numunelerin sabit durması için kenarlarından epoksi yapıştırıcı ile sabitlenmiştir.

Sıcaklık; belirlenen deney sıcaklığına (850°C) 150 dakikada ulaşmış ve kaynak makinesi içerisine verilen argon gazının miktarı tüp üzerinde bulunan manometre ile kontrol edilmiştir. Difüzyon kaynağı işlemi boyunca, kaynak atmosferini korumak için argon gazının miktarı 3 l/dk olacak şekilde ayarlanmıştır.

Kaynak çiftinin ölçüleri Şekil 5.10-a ve şematik gösterimi Şekil 5.10-b'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10 a) Kaynak çiftinin ölçüleri, b) Kaynak yapılmış numune

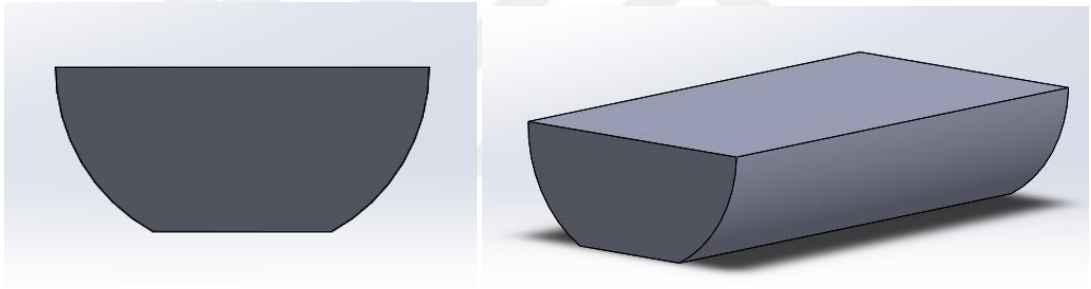
## 5.5 Kaynak Sonrası Yüzey Hazırlama

Kaynak işlemi sonrası metalografik incelemeler için numunelerin iki tarafı da önce talaş kaldırma işlemi ile düzleştirilmiş olup ardından zımparalama makinesinde, sırasıyla 220-320-400-600-800-1200 ve 2000 gridlik 7 farklı su zımparası ile zımparalanmıştır.

Zımparalama işleminden sonra numunelerin yüzeyleri Şekil 5.11'de gösterilmiş olan zımparalama ve parlatma makinesinde 1µm tane boyutuna sahip elmas solüsyon ile parlatılmıştır. Oksitlenmeyi önlemek için numunelerin yüzeyleri yapılan işlemlerden sonra alkol ile yıkanarak temizlenmiş ve kurutulmuştur. Yüzeyleri hazırlanan numunelerin şematik gösterimi Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 Zımparalama ve parlatma makinesi

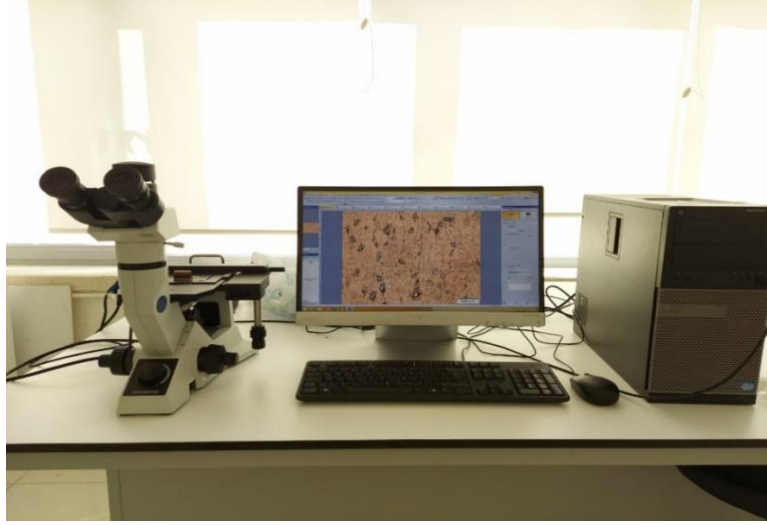


Şekil 5.12 Yüzeyleri düzleştirilmiş numunenin şematik gösterimi

## 5.6 Deney Numunelerinin İncelenmesinde Kullanılan Testler ve Cihazlar

### 5.6.1 Mikroyapı İncelemeleri (Optik Mikroskop)

Optik mikroskop incelemeleri için yüzeyi zımparalanan ve parlatılan numuneler 50 ml  $HNO_3$  + 50 ml  $H_2O$  solüsyonu içinde 2 saniye boyunca dağlanmıştır. Kaynak hattını ve kaynak bölgesini incelemek için, Kastamonu Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan malzeme laboratuvarındaki Şekil 5.13'te gösterilmiş olan Olympus GX41 marka metalurjik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 5.13 Optik mikroskop

### 5.6.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS)

Difüzyon kaynağı sonrasında elde edilen kaynaklı numunelerin hem kaynak hattı (difüzyon bölgesi) hem de kırılma yüzeylerinin görüntü ve element analizleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan FEI marka Quanta FEG 250 model Şekil 5.14'de gösterilmiş olan SEM kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.14 Taramalı elektron mikroskobu

### 5.6.3 XRD Analizi

Difüzyon kaynak işlemi sonrasında kaynak bölgesi; difüzyon bölgesinde oluşan yapılar ve yönelmeler hakkında bilgi edinebilmek amacıyla X ışını difraksiyonu (XRD) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Farklı kaynak parametreleri ile üretilen

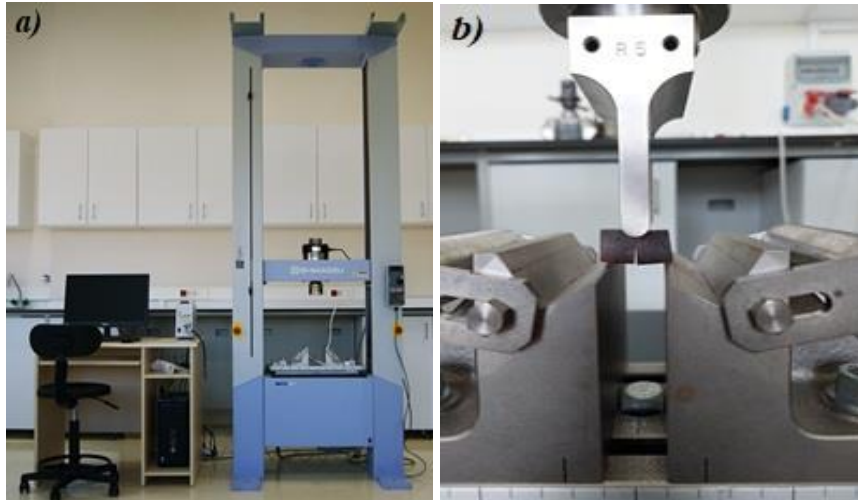
Ag-Cu-SiC kompozit malzemelerinin faz tespiti için Şekil 5.15’de gösterilmiş olan Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan Bruker D8 Advance marka XRD cihazı kullanılarak yapılmıştır.



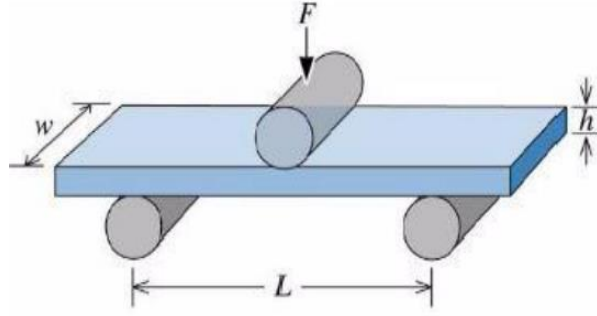
Şekil 5.15 X-ışını difraksiyonu

#### 5.6.4 Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi, Şekil 5.16’da gösterilen Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan SHIMADZU marka 100 kN’luk üniversal test cihazında 1 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testinin şematik gösterimi Şekil 5.17’de verilmiştir. Bu test için; Ø15x30 mm ölçülerinde kaynak yapılmış silindirik parçalar kullanılmıştır.



Şekil 5.16 a) Üniversal mekanik test cihazı b) Üç nokta eğme test yapılma anı



Şekil 5.17 Üç nokta eğilme testi şematik gösterimi

Eğilme mukavemetini belirlemek için;

$$P = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (5.1)$$

denklemini kullanılmıştır.

Bu denklemde;

- P = Eğilme mukavemeti (MPa)
- F = Kopma anında numuneye uygulanan kuvvet (N)
- L = Destek uçları arasındaki mesafe (mm)
- W = Numunenin genişliği (mm)
- h = Numunenin yüksekliği (mm) 'dir.

### 5.6.5 Sertlik Ölçümü

Yüzeyleri düzlenmiş, zımparalanmış ve parlatılmış, kaynak öncesinde ve kaynak sonrasında numunelerin sertlik değerleri, Vickers sertlik (HV2) yöntemiyle 2 kgf yükün, 16 s zaman ile uygulanmasıyla “Shimadzu” marka sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür.

Kaynak öncesi numunelerin gümüş ilaveli kısımlarından (üst tabaka) 5, sadece bakır ve silisyum karbür olan kısımlarından (alt tabaka) 10, kaynaklı numunelerin gümüş ilaveli kısımlarından 8, sadece bakır ve silisyum karbür ilaveli kısımlarından 10 değer

alınmış olup en yüksek ve en düşük değer çıkarıldıktan sonra bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Kullanılan vickers sertlik cihazı Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.18 Vickers sertlik ölçüm cihazı

#### 5.6.6 Yoğunluk Ölçümü

Üretilen kompozit malzemelerin deneysel yoğunlukları, Şekil 5.19’da gösterilen cihazda Arşimet prensibi kullanılarak ölçülmüştür. Üretilmiş olan her kompozit malzemenin deneysel yoğunluğu, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin yoğunluklarına bağlıdır. Gümüşün yoğunluğu  $10,49 \text{ g/cm}^3$  , bakırın yoğunluğu  $8,96 \text{ g/cm}^3$  ve silisyum karbürün yoğunluğu  $3,21 \text{ g/cm}^3$  ‘tür.



Şekil 5.19 Arşimet prensibiyle yoğunluk ölçümü

Üretilen kompozit numunelerin teorik yoğunlukları aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\rho_{teorik} = [(\rho_{Ag}V_{Ag}) + (\rho_{Cu}V_{Cu}) + (\rho_{SiC}V_{SiC})] \quad (5.3)$$

Bu formülde;

$\rho$ = Yoğunluk,

V= Hacimsel oran.

Kompozit malzemelerin bağıl yoğunlukları aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\rho_b = \frac{\rho_{deneysel}}{\rho_{teorik}} \times 100 \quad (5.4)$$

Bu denklemde;

$\rho_b$  = Bağıl yoğunluk (%),

$\rho_{deneysel}$ = Deneysel yoğunluk (gr/cm<sup>3</sup>),

$\rho_{teorik}$  = Teorik yoğunluktur.

Elde edilmiş olan numunelerin porozitesi, aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

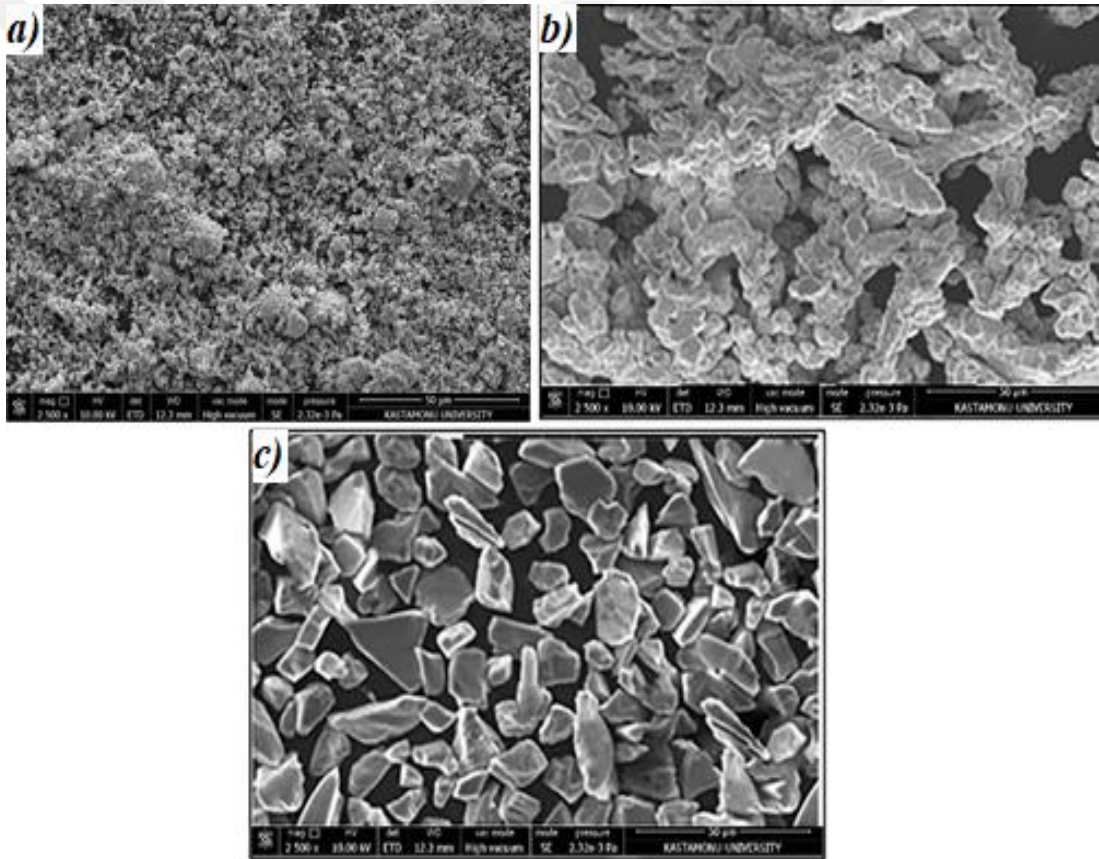
$$\% \text{ Porozite} = 100 - \rho_b \quad (5.5)$$

Bu denklemdeki;  $\rho_b$  % olarak bağıl yoğunluk değerini ifade etmektedir.

## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

### 6.1 Üretimde Kullanılan Tozların SEM Fotoğrafları

Difüzyo kaynak işlemini yapmak için üretilmiş olan numunelerde kullanılan gümüş, bakır ve silisyum karbür tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sırasıyla Şekil 6.1-a, Şekil 6.1-b ve Şekil 6.1-c'de gösterilmiştir. Elde edilen SEM görüntülerinden görülebileceği üzere Ag tozu küresel, Cu tozu dentritik ve SiC tozu ise köşeli toz formuna sahiptir.

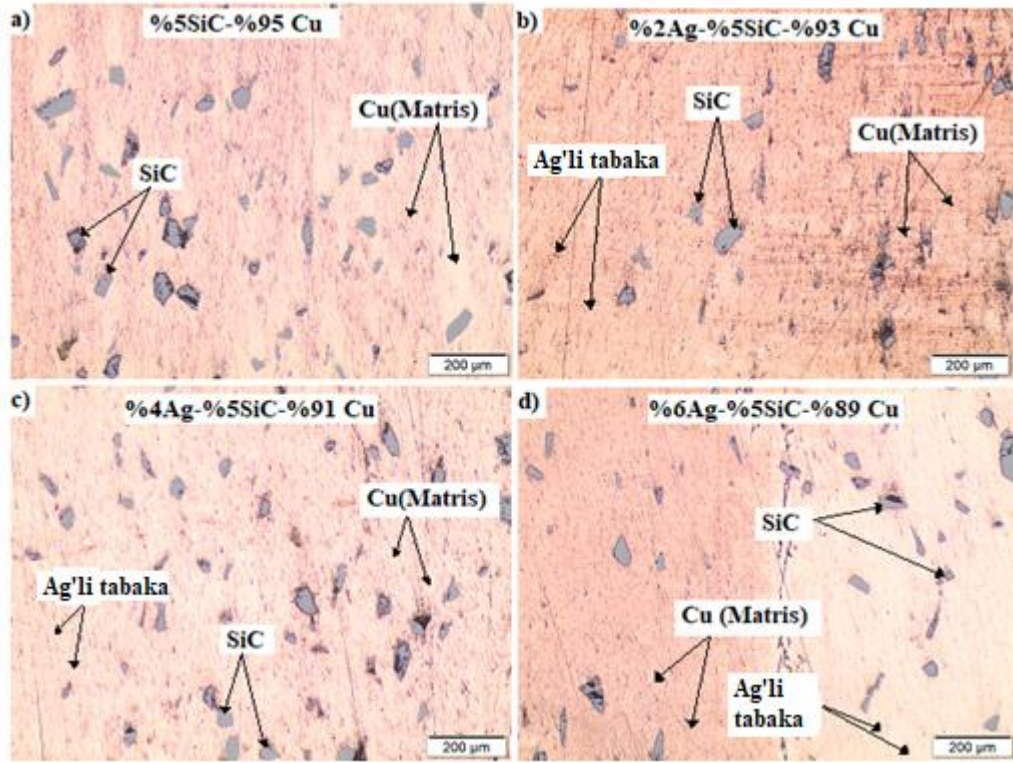


Şekil 6.1 Kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) Gümüş b) Bakır c) Silisyum karbür (x2500)

## 6.2 %5 SiC Takviyeli Kompozitler

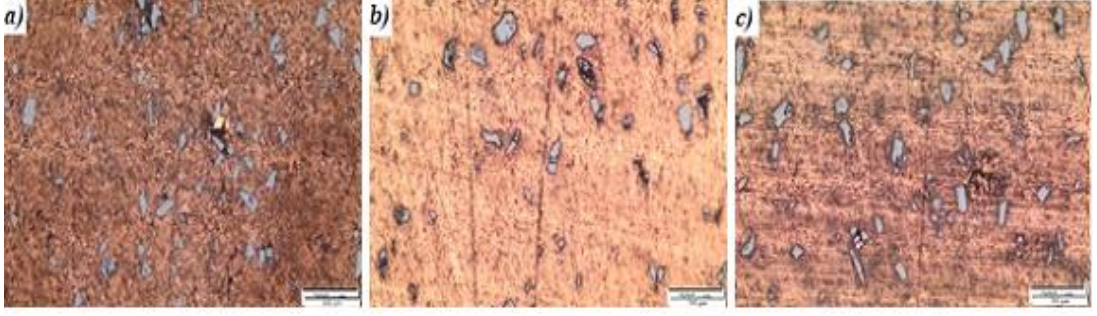
### 6.2.1 Optik Mikroskop Görüntü Analizi

850°C sıcaklıkta, 120 dakika boyunca sinterlenmiş hacimce %5 SiC ve %2, %4 ve %6 Ag içeren Ag-Cu-SiC kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. %5 SiC içeren sinterlenmiş kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.2’de verilmiştir. Elde edilen optik mikroskop görüntülerinden SiC parçacıklarının yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür.

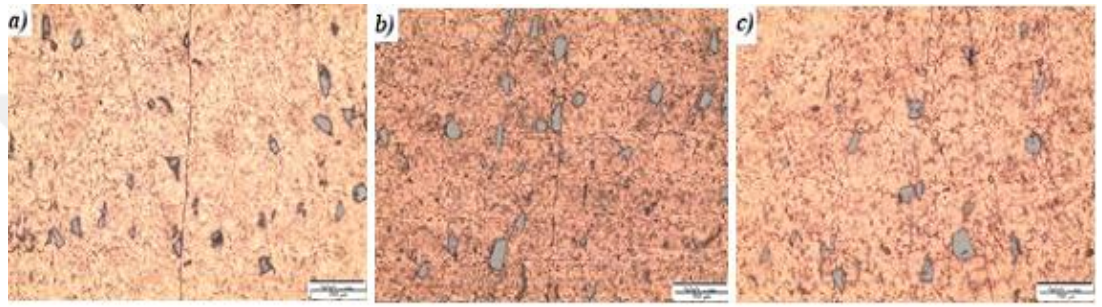


Şekil 6.2 %5 SiC takviye oranına sahip sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüsü  
a) %5 SiC-%95 Cu b) %2 Ag-%5 SiC-%93 Cu c) %4 Ag-%5 SiC-%91 Cu d) %6 Ag-%5 SiC-%89 Cu

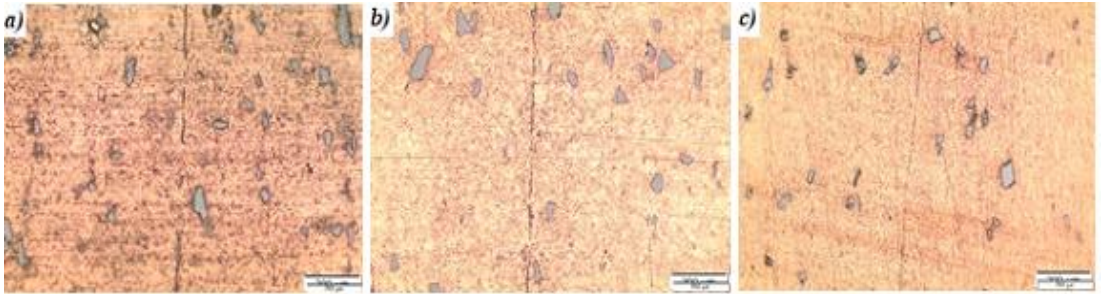
Şekil 6.3 ile Şekil 6.6 arasında ki görüntülerde ise 850°C sıcaklıkta, 2 MPa basınç, 30, 60 ve 120 dakika sürelerde yapılan kaynaklı malzemeden alınan difüzyon bölgesinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Optik mikroskop görüntülerine göre ilave edilen gümüş oranı ve kaynak süresi arttıkça difüzyon çizgisinin görünürlüğü azalmakta ve artan süre ve Ag oranına bağlı olarak yapı tek bir yapı şeklinde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.3 %5 SiC-%95 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a) 30dk, b) 60dk, c) 120 dk



Şekil 6.4 %2 Ag-%5 SiC-%93 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a) 30dk, b) 60dk, c) 120 dk



Şekil 6.5 %4 Ag-%5 SiC-%91 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a) 30dk, b) 60dk, c) 120 dk



Şekil 6.6 %6 Ag-%5 SiC-%89 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri a) 30dk, b) 60dk, c) 120 dk

Kaynak süresinin minimum seçildiği 30 dakikalık kaynak zamanı için %0, %2, %4 ve %6 gümüş ilave edilmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.3-a, Şekil 6.4-a, Şekil 6.5-a ve Şekil 6.6-a'da verilmiştir. Bu görüntülerde bağlantı bölgesi (difüzyon bölgesi) belirgin bir şekilde gözlenmektedir.

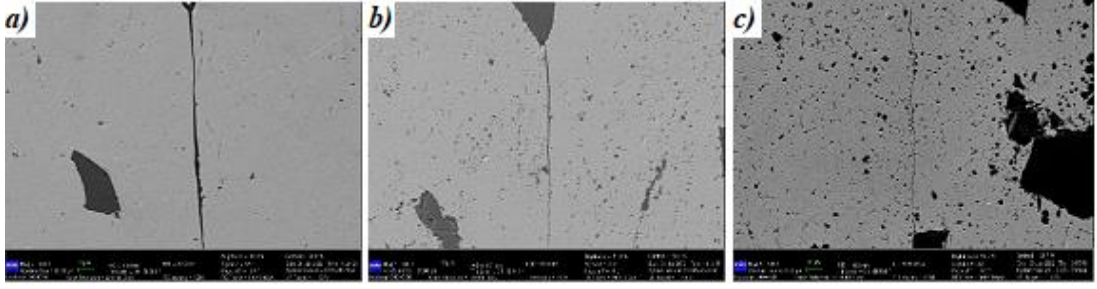
60 dakika kaynak süresinde kaynak yapılmış numunelerin kaynak hattı optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.3-b, Şekil 6.4-b, Şekil 6.5-b ve Şekil 6.6-b'de gösterilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde difüzyon bölgesinde 30 dakikalık kaynak süresine kıyasla belli bir oranda daralma görülmektedir.

En uzun kaynak zamanı olan 120 dakikalık sürede kaynaklanan numunelerin de optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.3-c, Şekil 6.4-c, Şekil 6.5-c ve Şekil 6.6-c'de verilmiştir. Görüntülerde **gümüş oranının artmasıyla birlikte** difüzyon bölgesi çoğunlukla kaybolmuş, tek bir bütün yapı şeklinde düzgün bir görünüm kazanmış ve yer yer difüzyon çizgisi kaybolmuştur.

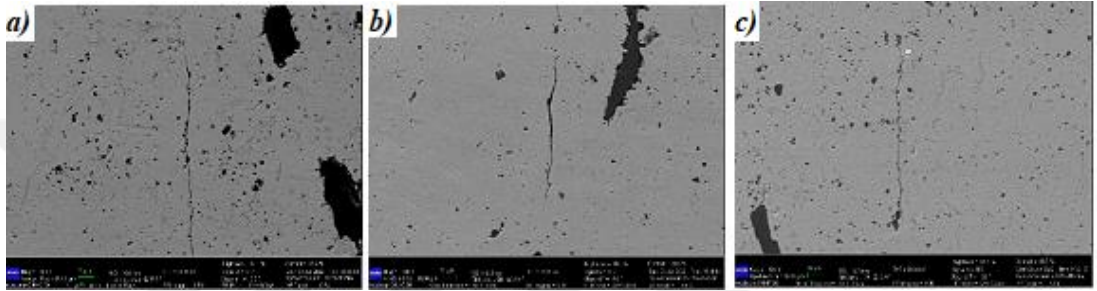
### 6.2.2 SEM Görüntü Analizi

Şekil 6.7 ve Şekil 6.10 arasındaki görüntülerde, %5 SiC takviyeli, %2, %4 ve %6 Ag ilaveli, 850°C sıcaklıkta ve 2 MPa basınçta difüzyon kaynağı ile kaynaklanan numunelerin difüzyon kaynak bölgelerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde bağlantı ara yüzeylerinin kalitesi, bağlantının durumu, takviye oranı, kaynak süresi ve gümüş ilave oranına bağlı olarak incelemeleri yapılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde kaynak parametrelerinin etkisi görülmektedir.

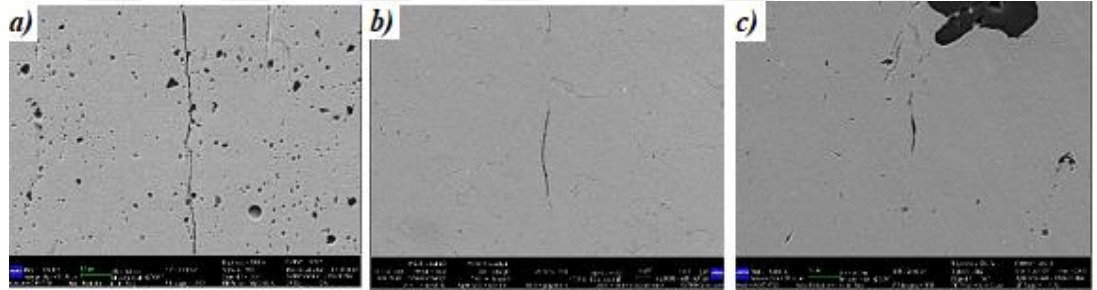
Kaynak süresinin minimum seçildiği 30 dakikalık kaynak zamanı için %0, %2, %4 ve %6 gümüş ilave edilmiş numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sırasıyla Şekil 6.7-a, Şekil 6.8-a, Şekil 6.9-a ve Şekil 6.10-a'da verilmiştir. Bu görüntülerde bağlantı bölgesi (difüzyon bölgesi) belirgin bir şekilde gözlenmektedir.



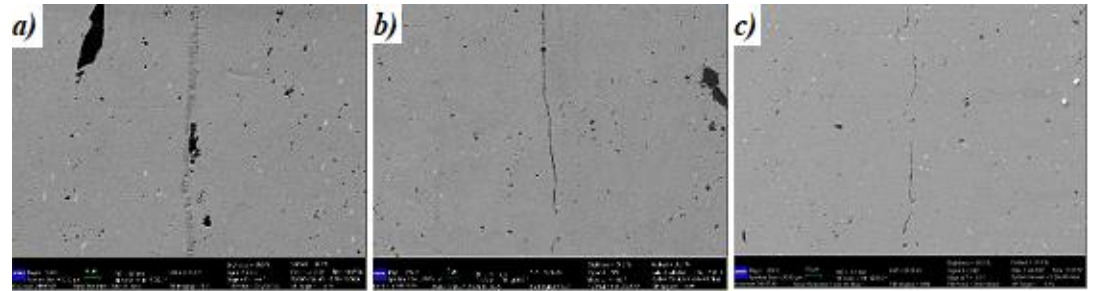
Şekil 6.7 %5 SiC-%95 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüleri a) 30 dk, b) 60dk, c) 120 dk



Şekil 6.8 %2 Ag-%5 SiC-%93 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüleri a) 30 dk, b) 60dk, c) 120 dk



Şekil 6.9 %4 Ag-%5 SiC-%91 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüleri a) 30 dk, b) 60dk, c) 120 dk



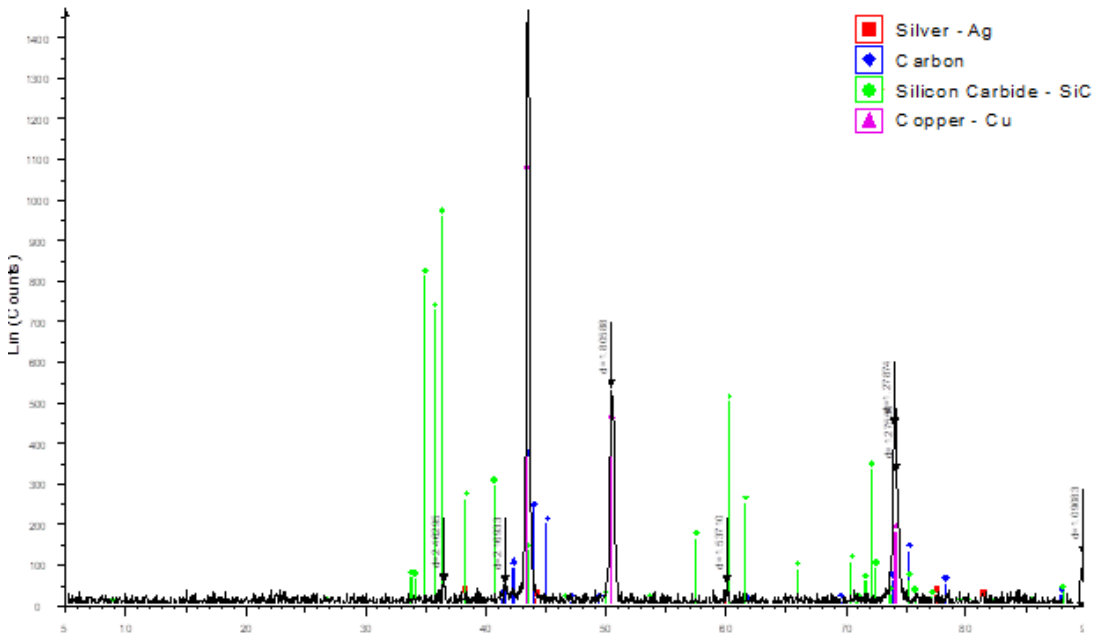
Şekil 6.10 %6 Ag-%5 SiC-%89 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüleri a) 30 dk, b) 60dk, c) 120 dk

60 dakika kaynak süresinde kaynak yapılmış numunelerin kaynak hattı SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.7-b, Şekil 6.8-b, Şekil 6.9-b ve Şekil 6.10-b'de gösterilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde difüzyon bölgesinde 30 dakikalık kaynak süresine kıyasla belli bir oranda daralma görülmektedir.

En uzun kaynak zamanı olan 120 dakikalık sürede kaynaklanan numunelerin SEM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 6.7-c, Şekil 6.8-c, Şekil 6.9-c ve Şekil 6.10-c'de verilmiştir. Görüntülerde Ag oranına bağlı olarak Ag'nin artmasıyla birlikte difüzyon bölgesi çoğunlukla kaybolmuş başka bir deyişle difüzyonun gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Difüzyon bölgesi tek bir bütün yapı şeklinde düzgün bir görünüm kazanmış ve yer yer difüzyon çizgisi kaybolmuştur.

### 6.2.3 XRD Analizi

Kaynak işlemi sonrasında numunelerde XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Hacimce en yüksek Ag içeren %6 Ag-%5 SiC-%89 Cu içeren numunenin XRD grafiği Şekil 6.11'de verilmiştir. Üretilen tozların XRD sonuçları incelendiğinde yeni bir faz oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.11 %6 Ag-%5 SiC-%89 Cu içeren numunenin XRD analizi

XRD analizi sonucunda, Cu ve SiC'in daha güçlü pik noktasına sahip olduğu Ag'nin ise çok daha zayıf pik noktasına sahip olduğu görülmektedir. Alınan numunelerde, SiC miktarına bağlı olarak bakır oksit fazı ve SiC fazlarının bulunmadığı görülmüştür.

Spektrumda Ag, Cu matrisleri ve SiC arasında bir ara yüzey reaksiyonu olmadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Ag-Cu-SiC kompozitlerinde bulunan partiküller arasında etkileşim olmadığı XRD analiz sonuçlarından elde edilmiştir.

#### 6.2.4 Yoğunluk Analizi

Soğuk presleme yöntemi ile üretilmiş olan Cu-SiC ve Ag-Cu-SiC kompozit malzemelerin yoğunlukları sinterleme işlemi ve difüzyon kaynağı sonrasında Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Numunelerin sinterleme işlemi sonrasında (kaynak işlemi öncesinde) teorik yoğunlukları, deneysel yoğunlukları, bağlı yoğunlukları ve gözenek oranları Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 %5 SiC içeren kompozit malzemelerin kaynak öncesi yoğunlukları

| Yoğunluklar                      |                                 |                                  | Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Deneysel Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Bağıl Yoğunluk (%) | Gözeneklilik (%) |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|------------------|
| Ag<br>10,49<br>g/cm <sup>3</sup> | Cu<br>8,96<br>g/cm <sup>3</sup> | SiC<br>3,21<br>g/cm <sup>3</sup> |                                      |                                        |                    |                  |
| Kaynak zamanı                    | Numuneler                       | Bileşim                          |                                      |                                        |                    |                  |
| <b>Kaynak Öncesi</b>             | N01                             | %5 SiC + %95 Cu                  | 8,67                                 | 7,68                                   | 88,63              | 11,37            |
|                                  | N02                             | %2 Ag+ %5 SiC + %93 Cu           | 8,673                                | 7,73                                   | 89,12              | 10,88            |
|                                  | N03                             | %4 Ag+ %5 SiC + %91 Cu           | 8,676                                | 7,77                                   | 89,52              | 10,48            |
|                                  | N04                             | %6 Ag+ %5 SiC + %89 Cu           | 8,679                                | 7,80                                   | 89,82              | 10,18            |

Bakırın yoğunluğu 8,96 g/cm<sup>3</sup>, gümüşün yoğunluğu 10,49 g/cm<sup>3</sup> ve silisyum karbürün yoğunluğu 3,21 g/cm<sup>3</sup>'tür. Gümüşün yoğunluğu bakır ve silisyum karbürün yoğunluğuna kıyasla daha yüksektir. Bu sebeple, kompozit malzemelerde Ag oranı arttıkça yoğunluk artmaktadır. Bağlı yoğunluklar, kaynak yapılmamış numunelerde tüm karışım oranları için %88,63-89,82 arasında değişim göstermektedir (Tablo 6.1).

Cu-SiC ve Ag-Cu-SiC kompozitlerinin difüzyon kaynağı sonrası yoğunluğu, kaynak işleminin süresine bağlı olarak değişim göstermektedir. Kaynak işlemi sonrası numunelerin teorik yoğunlukları, deneysel yoğunlukları, bağlı yoğunlukları ve gözenek oranları Tablo 6.2'de verilmiştir.

Artan Ag oranı ile numunelerin deneysel yoğunluğu artmıştır. En yüksek yoğunluk değeri en yüksek Ag oranı olan %6 oranında Ag içeren malzemelerde gözlenmiştir. 30 dakika süreyle kaynaklanan numunelerde bağlı yoğunluk gümüş ilave edilmemiş numunelerde %88,87 olurken %6 oranında Ag içeren numunelerde %90,21 olarak elde edilmiştir. Bağlı yoğunluklar 60 dakika süreyle kaynak yapılmış numunelerde gümüş ilave edilememiş numune için %89,17 ve %6 oranında Ag içeren numunede %90,49 ve 120 dakikalık kaynak süresinde kaynak yapılmış olan numunelerde ise gümüş ilave edilmemiş olanlar için %89,52 ve %6 Ag içeren numunelerde %90,72 olarak ölçülmüştür.

Teorik hesaplamada gümüş ilaveli kısım ile bakır ve silisyum karbür kısmının yoğunlukları farklı olduğu için ortalama bir değer hesaplanmıştır. Bu ortalama değer de gözeneklilikte  $\pm\%10$ 'luk bir sapmaya sebep olabilir (Tablo 6.2).

Kaynak işlemi için numunelerin üretiminde soğuk presleme yöntemi kullanılmıştır. Şap E., (2020) yılında yaptığı çalışmada Cu ana matris içerisine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında Mo-SiCp tozları ekleyerek toz karışımlar elde etmiştir. Hazırlanan karışımlara 600 MPa basınç uygulayarak soğuk pres yöntemiyle numuneleri oluşturmuştur. Şekillendirilen numuneleri 1 ve 2 saat sinterleme süresi kullanarak sinterleme işlemi uygulamıştır. Üretilen kompozitlerin yoğunluk ölçümleri sonucunda sinterleme süresine bağlı olarak yoğunluğun arttığını tespit etmiştir. Bu tez çalışmasında hesaplanan yoğunluk değerleri literatür ile uyumludur.

Tablo 6.2 %5 SiC içeren kompozit malzemelerin kaynak sonrası yoğunlukları

| Yoğunluklar                      |                                 |                                  | Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Deneysel Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Bağlı Yoğunluk (%) | Gözeneklilik (%) |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|------------------|
| Ag<br>10,49<br>g/cm <sup>3</sup> | Cu<br>8,96<br>g/cm <sup>3</sup> | SiC<br>3,21<br>g/cm <sup>3</sup> |                                      |                                        |                    |                  |
| Kaynak zamanı                    | Nunumeler                       | Bileşim                          |                                      |                                        |                    |                  |
| 30 dk                            | N05                             | %5 SiC + %95 Cu                  | 8,67                                 | 7,70                                   | 88,87              | 11,13            |
|                                  | N06                             | %2 Ag+ %5 SiC + %93 Cu           | 8,673                                | 7,75                                   | 89,31              | 10,69            |
|                                  | N07                             | %4 Ag+ %5 SiC + %91 Cu           | 8,676                                | 7,80                                   | 89,90              | 10,10            |
|                                  | N08                             | %6 Ag+ %5 SiC + %89 Cu           | 8,679                                | 7,83                                   | 90,21              | 9,79             |
| 60 dk                            | N09                             | %5 SiC + %95 Cu                  | 8,67                                 | 7,73                                   | 89,17              | 10,83            |
|                                  | N10                             | %2 Ag+ %5 SiC + %93 Cu           | 8,673                                | 7,77                                   | 89,53              | 10,47            |
|                                  | N11                             | %4 Ag+ %5 SiC + %91 Cu           | 8,676                                | 7,82                                   | 90,18              | 9,82             |
|                                  | N12                             | %6 Ag+ %5 SiC + %89 Cu           | 8,679                                | 7,85                                   | 90,49              | 9,51             |
| 120 dk                           | N13                             | %5 SiC + %95 Cu                  | 8,67                                 | 7,76                                   | 89,52              | 10,48            |
|                                  | N14                             | %2Ag+ %5 SiC + %93 Cu            | 8,673                                | 7,80                                   | 89,91              | 10,09            |
|                                  | N15                             | %4 Ag+ %5 SiC + %91 Cu           | 8,676                                | 7,85                                   | 90,43              | 9,57             |
|                                  | N16                             | %6 Ag+ %5 SiC + %89 Cu           | 8,679                                | 7,87                                   | 90,72              | 9,28             |

### 6.2.5 Üç Nokta Eğme Testi Analizi

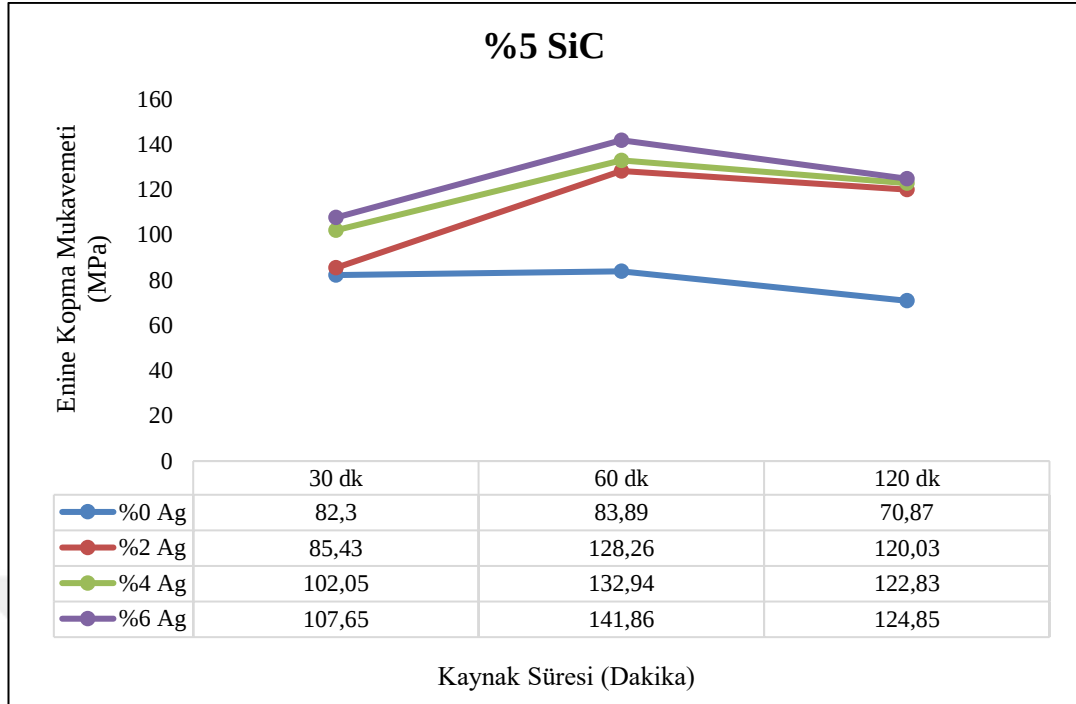
Hacimsel olarak %5 SiC takviyeli ve %2, %4, %6 oranlarında gümüş içeren soğuk presleme yöntemiyle üretilmiş olan Cu-SiC ve Ag-Cu-SiC kompozit malzemelerinin difüzyon kaynak işlemi sonrası enine kopma mukavemeti değerleri ölçülmüştür. Difüzyon kaynağı sonrasında elde edilen numunelerin üç nokta eğme testinde ölçülen enine kopma mukavemeti (TRS-Transverse Rupture Strength) sonuçları (Şekil 6.12)'de gösterilmiştir. Kaynak yapılmamış %5 SiC takviyeli kompozit malzemenin TRS değeri 503 MPa olarak ölçülmüştür.

Şekil 6.12'de görüleceği üzere artan gümüş (Ag) oranına bağlı olarak enine kopma mukavemeti değerlerinde artış meydana gelmiştir.

30 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 82,30 MPa olan TRS değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 85,43 MPa'ya %4 oranında Ag ilavesi ile 102,05 MPa'ya %6 oranında Ag ilavesi ile 107,65 MPa'ya yükselmiştir. 30 dakika kaynak süresi için ortalama %1'lik gümüş artışı TRS değerinde %5,13'lük bir artış meydana getirmiştir.

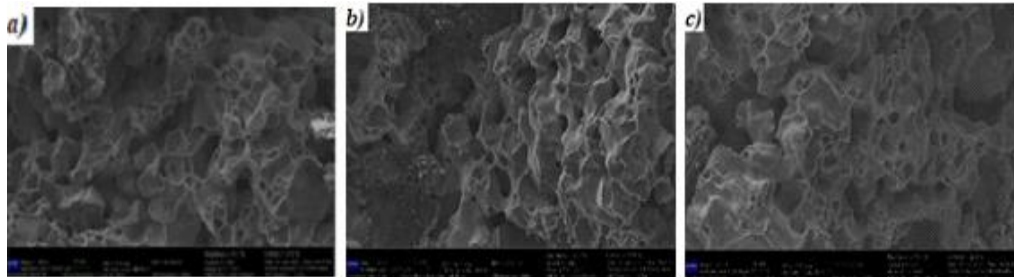
60 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 83,89 MPa olan TRS değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 128,26 MPa'ya %4 oranında Ag ilavesi ile 132,94 MPa'ya %6 oranında Ag ilavesi ile 141,86 MPa'ya yükselmiştir. 60 dakika kaynak süresi için ortalama %1'lik gümüş artışı TRS değerinde %11,51'lik bir artış meydana getirmiştir.

120 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 70,87 MPa olan TRS değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 120,03 MPa'ya %4 oranında Ag ilavesi ile 122,83 MPa'ya %6 oranında Ag ilavesi ile 124,85 MPa'ya yükselmiştir. 120 dakika kaynak süresi için ortalama %1'lik gümüş artışı TRS değerinde %12,69'lık bir artış meydana getirmiştir. En iyi sonuç 141,86 MPa ile %6 Ag-%5 SiC oranında ve 60 dakikalık kaynak zamanında elde edilmiştir.



Şekil 6.12 %5 SiC takviyeli kompozit malzemelerin enine kopma mukavemeti değerleri

Hacimce %2 gümüş ilaveli %5 SiC takviyeli numuneler 30, 60 ve 120 dakika kaynak sürelerinde birleştirildikten sonra üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Üç nokta eğme testinde oluşan kırık yüzeylerin görüntüleri taramalı elektron mikroskobunda alınmıştır. Şekil 6.13’de %2 Ag içeren numunelerin sırasıyla 30, 60 ve 120 dakika kaynak süresi sonunda 3 noktalı eğme deneyi sonrasındaki kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Kırılma yüzeyinin sünek kırılma davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Sünek kırılma çatlağın oluşması ve büyümesinde önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin görüldüğü kırılma türüdür. Çatlak boşlukların oluşması ve birleşmesi ile meydana gelir ve yavaş ilerler. Kırılma yüzeyi mat ve lifli görünümde olmaktadır.



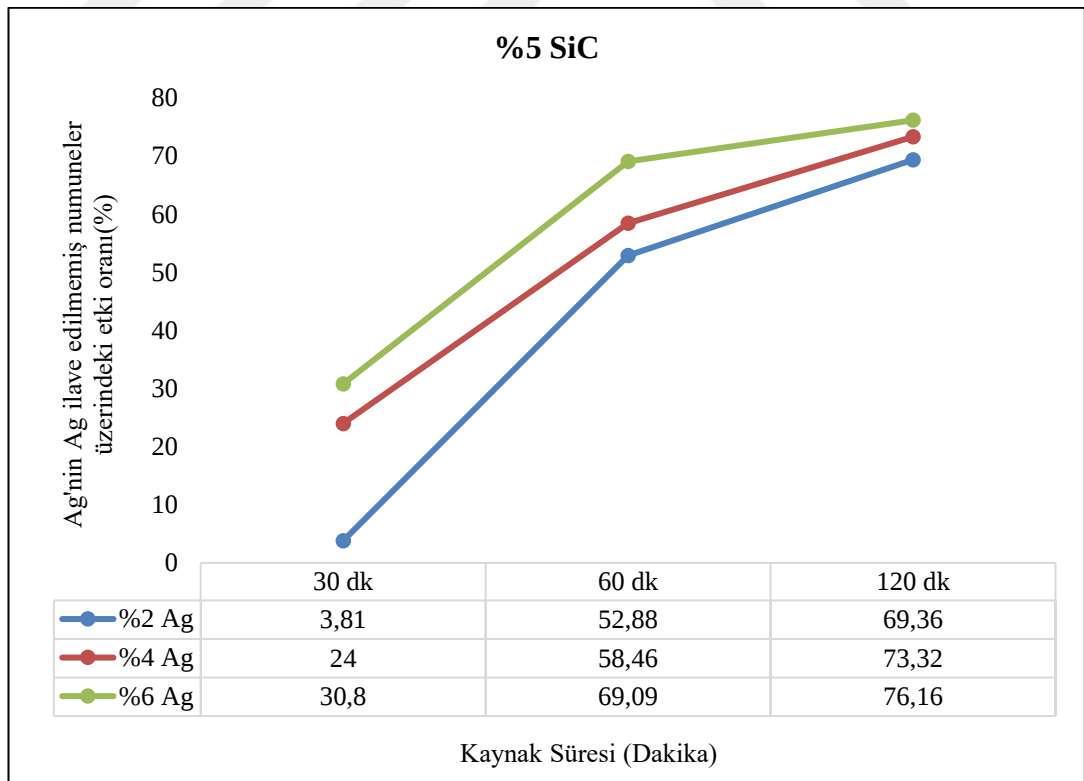
Şekil 6.13 %2 Ag-%5 SiC-%93 Cu kaynaklı numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri  
a) 30dk, b) 60dk, c) 120dk

TRS değerlerinin kompozit malzemeye ilave edilen gümüş oranlarına göre % olarak artış grafiği Şekil 6.14'te gösterilmiştir. İlave edilen gümüş oranındaki artışa bağlı olarak TRS değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. TRS değerlerindeki en yüksek artış oranı 120 dakikada oluşmuştur.

30 dakika kaynak süresinde TRS değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %3,81 ve %4 Ag ilave oranında %24 ve %6 Ag oranında ise %30,8'lik bir artış meydana gelmiştir.

60 dakika kaynak süresinde TRS değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %52,88 ve %4 Ag ilave oranında %58,46 ve %6 Ag oranında ise %69,09'lık bir artış meydana gelmiştir.

120 dakika kaynak süresinde TRS değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %69,36 ve %4 Ag ilave oranında %73,32 ve %6 Ag oranında ise %76,16'lık bir artış meydana gelmiştir.



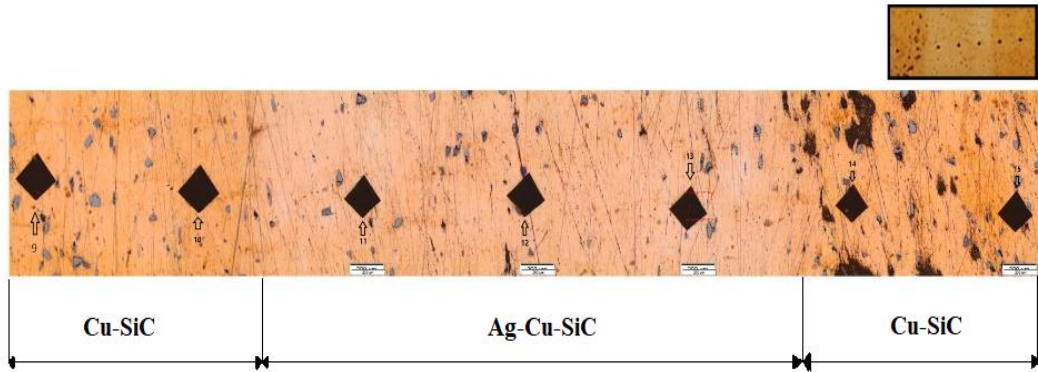
Şekil 6.14 %5 SiC takviyeli kompozitlerde gümüş ilavesinin gümüş ilave edilmemiş numunelerde kaynak bağlantı mukavemetine etki oranı (%)

Kompozit yapıya ilave edilen Ag miktarına bağılı olarak üç nokta eğme testi sonrasında elde edilen enine kopma mukavemeti değerlerinde 30 dakikadan 60 dakikaya kadar olan kaynak süresinde bir artış meydana gelirken 120 dakika kaynak süresinde bir azalış meydana gelmiştir. Qiang vd., 2015 yılında yaptıkları çalışmalarında benzer bir sonuç elde etmişlerdir. Enine kopma mukavemeti değerlerindeki bu azalışın nedenini artan süreyle birlikte bakır atomlarının arayüzey boyunca daha hızlı hareket ederek akı transferinde bir dengesizlik yaratmasına ve bağlantıların kırılma yüzeylerinde boşluklara neden olmasından dolayı olduğunu açıklamışlardır.

#### 6.2.6 Mikrosertlik Analizi

Mikrosertlik ölçümleri ile SiC takviyeli bakır matrisli kompozitler üzerinde SiC ve Ag oranının etkisi incelenmiştir. Bakır matris içine %2, %4 ve %6 oranında gümüş ilavesi ile numunelerin hem sinterleme sonrasında hem de 30, 60 ve 120 dakika olmak üzere üç farklı difüzyon kaynağı süresi sonrasında sertlikleri ölçülmüştür.

Mikrosertlik için hazırlanıp dağlanan kaynak öncesi (sinterlenmiş) numunelerin gümüş ilaveli kısımlarından (üst tabaka) 5, sadece bakır ve silisyum karbür olan kısımlarından (alt tabaka) 10, Şekil 6.15'te bir örneği gösterilmiş olan kaynak yapılmış numunelerin ise gümüş ilaveli kısımlarından 8, bakır ve silisyum karbür ilaveli kısımlarından 10 değer alınmış en yüksek ve en düşük değer çıkarıldıktan sonra bu değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 6.15 %4 Ag-%5 SiC-%91 Cu 120 dk kaynak yapılmış malzemenin mikrosertlik görüntüsü

Cu-SiC ve Ag-Cu-SiC kompozit mazlemelerinin sertlik değerleri Şekil 6.16’da grafik olarak verilmiştir.

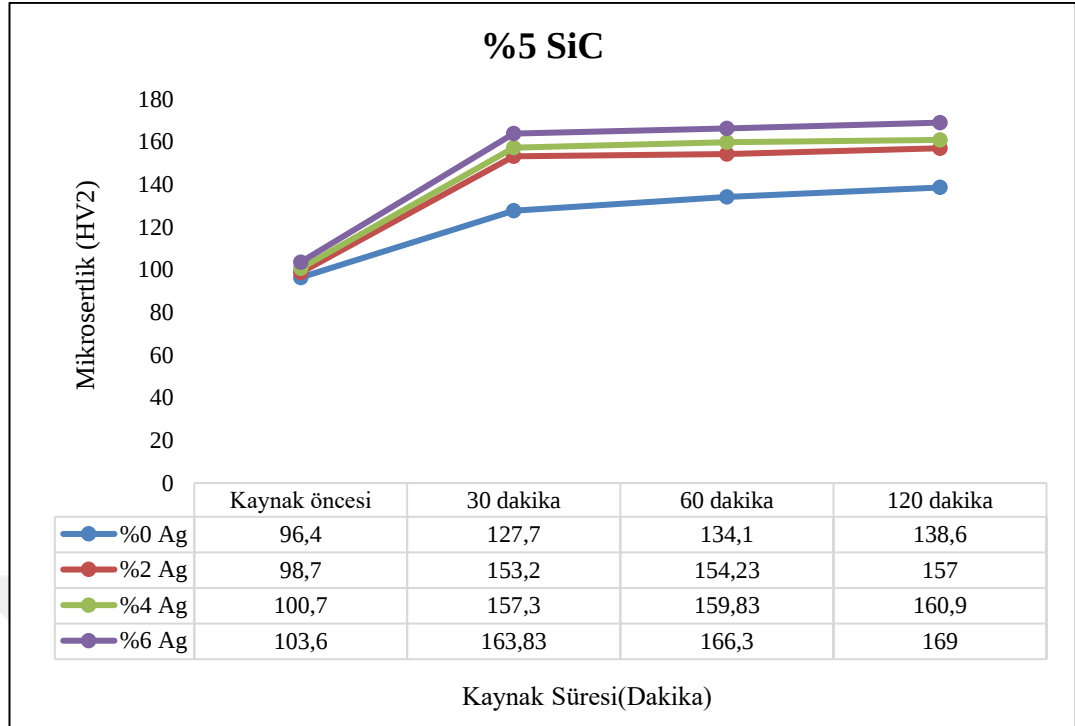
Kaynak öncesinde Cu-SiC olan bölümün mikrosertlik değeri 96,4 HV ve Ag-Cu-SiC olan kısmın en yüksek mikrosertlik değeri 103,6 HV olarak ölçülmüştür. 96,4 HV olan sertlik değeri hacimce %2 Ag ilavesinden sonra 98,7 ve %4 Ag ilavesinden sonra 100,7 ve %6 Ag ilavesi ile 103,6 olmuştur. Artan gümüş miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değeri % 6 oranında gümüş içeren numularda 103,6 HV olarak elde edilmiştir.

30 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 127,7 HV olan sertlik değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 153,2 HV’ ye %4 oranında Ag ilavesi ile 157,3 HV’ye %6 oranında Ag ilavesi ile 163,83 HV’ye yükselmiştir. 30 dakika kaynak süresi için ortalama %1’lik gümüş artışı sertlik değerinde %4,71’lik bir artış meydana getirmiştir.

60 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 134,1 HV olan sertlik değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 154,23 HV’ ye %4 oranında Ag ilavesi ile 159,83 HV’ye %6 oranında Ag ilavesi ile 166,3 HV’ye yükselmiştir. 60 dakika kaynak süresi için ortalama %1’lik gümüş artışı sertlik değerinde %4,00’lik bir artış meydana getirmiştir.

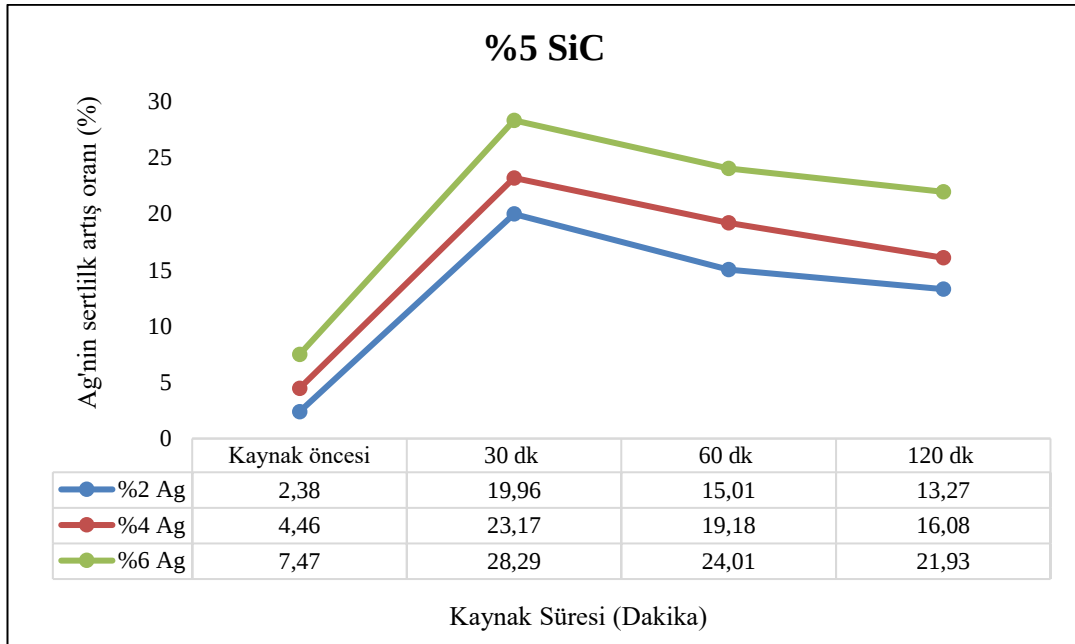
120 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 138,6 olan sertlik değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 157 HV’ye %4 oranında Ag ilavesi ile 160,9 HV’ye %6 oranında Ag ilavesi ile 169 HV’ye yükselmiştir. 120 dakika kaynak süresi için ortalama %1’lik gümüş artışı sertlik değerinde %3,65’lik bir artış meydana getirmiştir.

En yüksek sertlik sonucu 169 HV ile %6 Ag-%5 SiC oranında ve 120 dakikalık kaynak zamanında elde edilmiştir.



Şekil 6.16 %5 SiC takviyeli numunelerin kaynak süresine göre sertlik değerleri

Sertlik değerlerinin kompozit malzemeye ilave edilen gümüş oranlarına göre % olarak artış grafiği Şekil 6.17’de gösterilmiştir. İlave edilen gümüş oranındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinde bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 6.17 %5 SiC takviye oranındaki kompozit malzemelere gümüş ilave oranının sertlik değerlerine % etkisi

Kaynak öncesi kompozit malzemeye ilave edilen %2 gümüş gümüş ilavesi gümüş ilave edilmemiş numuneye göre %2,38 ve %4 gümüş ilavesi %4,46 ve %6 gümüş ilavesi ise %7,47 oranında sertliği arttırmıştır.

30 dakika kaynak süresi sonucunda sertlik değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %19,96 ve %4 Ag ilave oranında %23,17 ve %6 Ag oranında ise %28,29'luk bir artış meydana gelmiştir.

60 dakika kaynak süresi sonucunda sertlik değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %15,01 ve %4 Ag ilave oranında %19,18 ve %6 Ag oranında ise %24,01'lik bir artış meydana gelmiştir.

120 dakika kaynak süresi sonucunda sertlik değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %13,2 ve %4 Ag ilave oranında %16,08 ve %6 Ag oranında ise %21,93'lik bir artış meydana gelmiştir. Sertlik değerlerindeki artış oranı kompozit malzemeye ilave edilen gümüş oranlarına bağlı olarak artış göstermiş olup en yüksek artış oranı 30 dakika kaynak süresinde %6 oranında gümüş ilavesinde meydana gelmiştir.

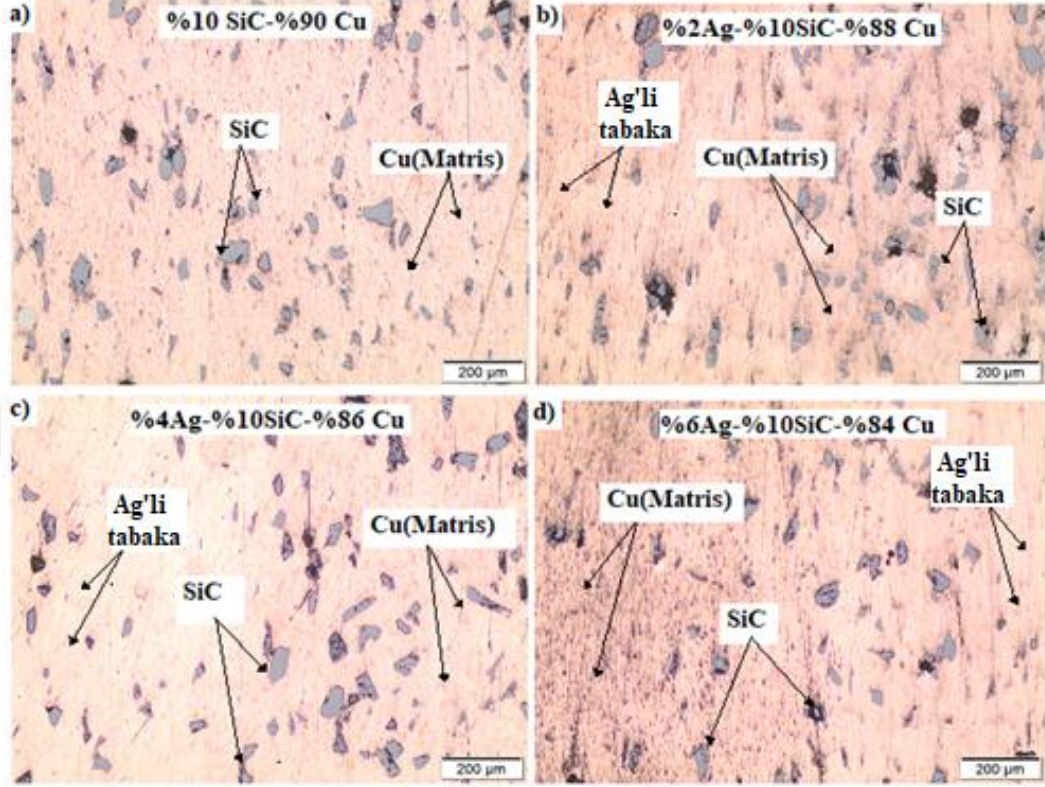
Yapıya eklenen Ag miktarındaki artış kaynak süresindeki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinde yükselişe neden olmuştur. Torun O., (2018) yaptığı çalışmada AZ91 Magnezyum alaşımı ve Al 2024 alüminyum alaşımını gümüş ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirmiştir. Birleştirilen numunelerde kaynak bölgesi ve matrisin sertlikleri ölçülmüştür. Difüzyon bölgesinde sertlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Gümüş ilave edilen yapının sertlik değerlerinde bir artış meydana getirmiştir ve bu durum da literatürle uyumludur.

### **6.3 %10 SiC Takviyeli Kompozitler**

#### **6.3.1 Optik Mikroskop Görüntü Analizi**

Şekil 6.18'de 850°C sıcaklıkta, 120 dakika boyunca sinterlenmiş hacimce %10 SiC içeren Cu-SiC ve hacimce %2, %4 ve %6 Ag içeren Ag-Cu-SiC kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir.

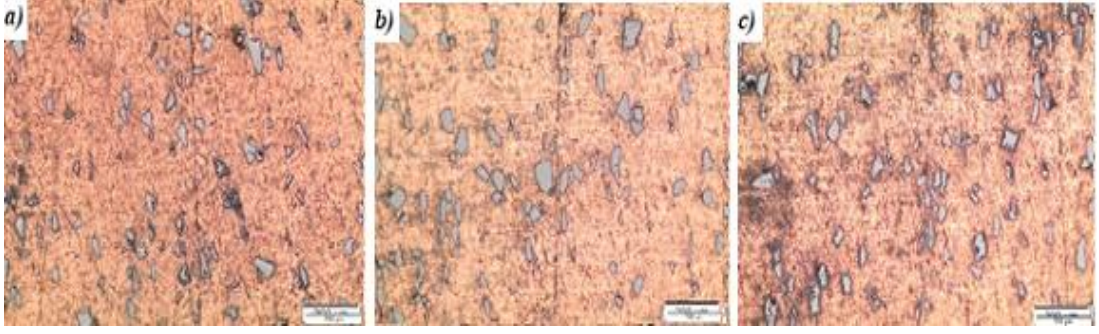
Elde edilen optik mikroskop görüntülerinden SiC parçacıklarının yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür.



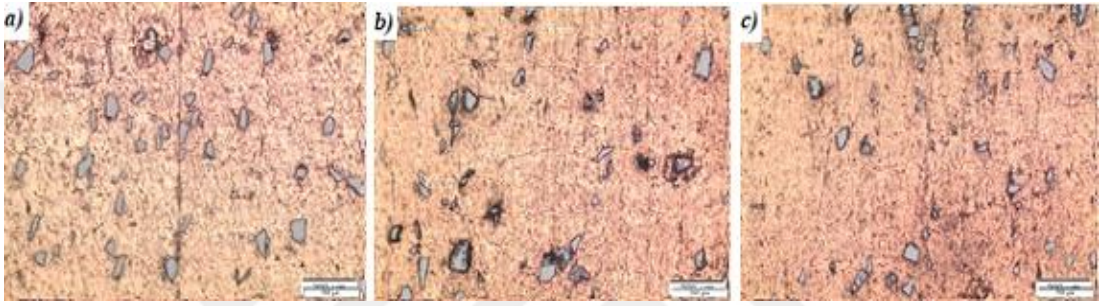
Şekil 6.18 %10 SiC takviye oranına sahip sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüsü a) %10 SiC-%90 Cu b) %2 Ag-%10 SiC-%88 Cu c) %4 Ag-%10 SiC-%86 Cu d) %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu

Şekil 6.19 ile Şekil 6.22 arasında ki görüntülerde 850°C sıcaklık, 2 MPa basınç, 30, 60 ve 120 dakika sürelerde yapılan kaynaklı malzemeden alınan difüzyon bölgesinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Optik mikroskop görüntülerine göre ilave edilen gümüş oranı ve kaynak süresi arttıkça difüzyon çizgisinin görünürlüğü azalmakta ve artan süre ve Ag oranına bağlı olarak yapı tek bir yapı şeklinde ortaya çıkmaktadır.

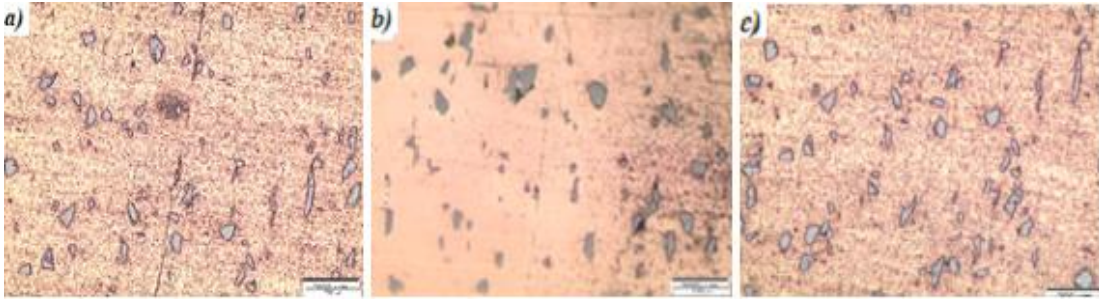
Kaynak süresinin minimum seçildiği 30 dakikalık kaynak zamanı için %0, %2, %4 ve %6 gümüş ilave edilmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.19-a, Şekil 6.20-a, Şekil 6.21-a ve Şekil 6.22-a'da verilmiştir. Bu görüntülerde bağlantı bölgesi (difüzyon bölgesi) belirgin bir şekilde gözlenmektedir.



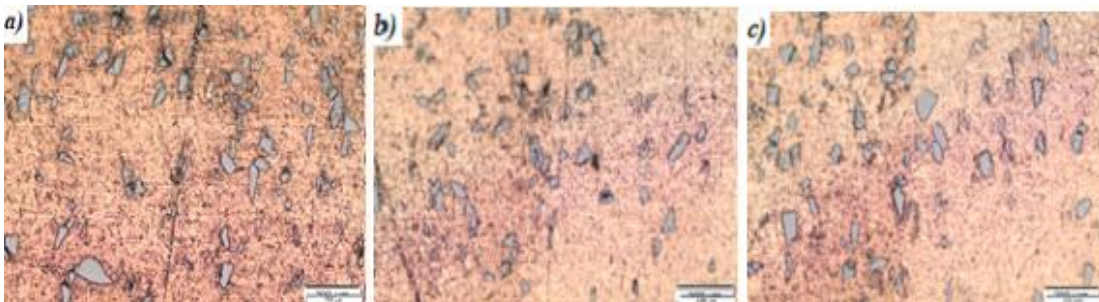
Şekil 6.19 %10 SiC-%90 Cu içeren kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüsü a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk



Şekil 6.20 %2 Ag-%10 SiC-%88 Cu içeren kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüsü a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk



Şekil 6.21 %4 Ag-%10 SiC-%86 Cu içeren kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüsü a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk

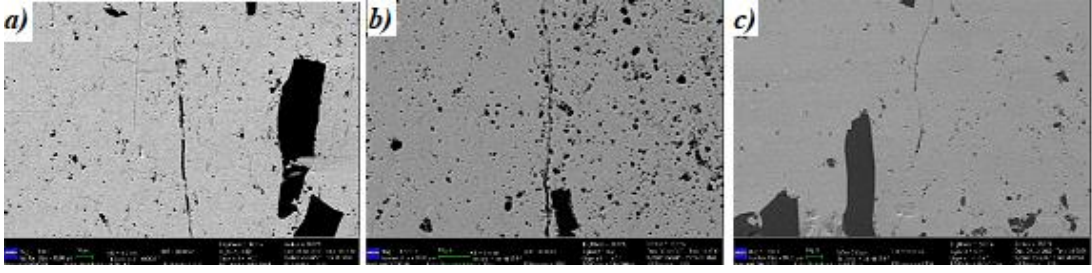


Şekil 6.22 %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu içeren kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüsü a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk

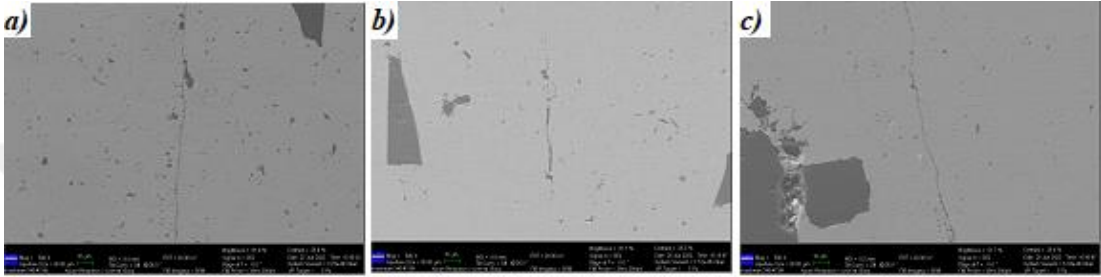
60 dakika kaynak süresinde kaynak yapılmış numunelerin kaynak hattı optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.19-b, Şekil 6.20-b, Şekil 6.21-b ve Şekil 6.22-b 'de gösterilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde difüzyon bölgesinde 30 dakikalık kaynak süresine kıyasla belli bir oranda daralma görülmektedir. En uzun kaynak zamanı olan 120 dakikalık sürede kaynaklanan numunelerin de optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.19-c, Şekil 6.20-c, Şekil 6.21-c ve Şekil 6.22-c'de verilmiştir. Görüntülerde gümüş oranına bağlı olarak **gümüşün artmasıyla birlikte** difüzyon bölgesi çoğunlukla kaybolmuş başka bir deyişle difüzyon gerçekleşmiş, tek bir bütün yapı şeklinde düzgün bir görünüm kazanmış ve yer yer difüzyon çizgisi kaybolmuştur.

### 6.3.2 SEM Görüntü Analizi

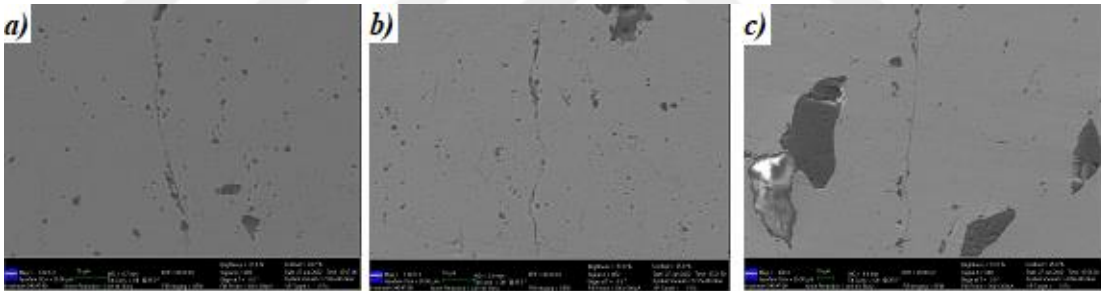
Şekil 6.23 ve Şekil 6.26 arasındaki şekillerde, %10 SiC takviyeli, %2, %4 ve %6 Ag katkılı, 850°C sıcaklıkta ve 2 MPa basınçta difüzyon kaynağı ile kaynaklanan numunelerin difüzyon kaynak bölgelerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde bağlantı ara yüzlerinin kalitesi, bağlantının durumu, takviye oranı, kaynak süresi ve gümüş ilave oranına bağlı olarak incelemeleri yapılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde kaynak parametrelerinin etkisi görülmektedir. Kaynak süresinin minimum seçildiği 30 dakikalık kaynak zamanı için %0, %2, %4 ve %6 gümüş ilave edilmiş numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sırasıyla Şekil 6.23-a, Şekil 6.24-a, Şekil 6.25-a ve Şekil 6.26-a'da verilmiştir. Bu görüntülerde bağlantı bölgesi (difüzyon bölgesi) belirgin bir şekilde gözlenmektedir. 60 dakika kaynak süresinde kaynak yapılmış numunelerin kaynak hattı SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.23-b, Şekil 6.24-b ve Şekil 6.25-b ve Şekil 6.26-b'de gösterilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde difüzyon bölgesinde 30 dakikalık kaynak süresine kıyasla belli bir oranda daralma görülmektedir. En uzun kaynak zamanı olan 120 dakikalık sürede kaynaklanan numunelerin de SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.23-c, Şekil 6.24-c, Şekil 6.25-c ve Şekil 6.26-c'de verilmiştir. Görüntülerde gümüş oranına bağlı olarak gümüşün artmasıyla birlikte difüzyon bölgesi çoğunlukla kaybolmuş, tek bir bütün yapı şeklinde düzgün bir görünüm kazanmış ve yer yer difüzyon çizgisi kaybolmuştur.



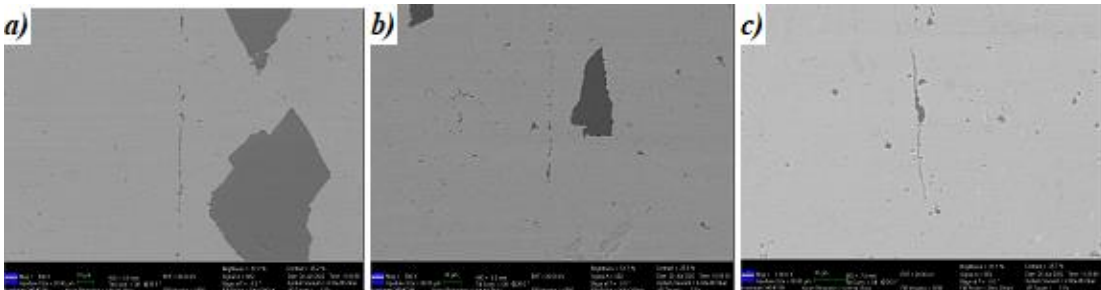
Şekil 6.23 %10 SiC-%90 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüsü a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk



Şekil 6.24 %2Ag-%10 SiC-%88 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüsü a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk



Şekil 6.25 %4Ag-%10 SiC-%86 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüsü a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk

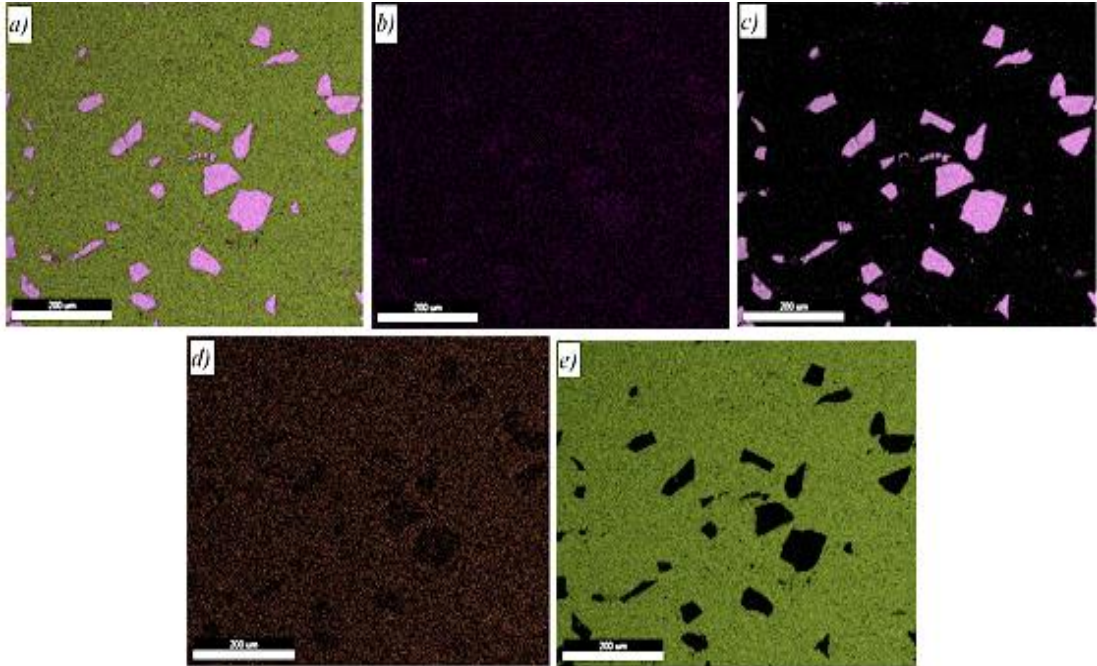


Şekil 6.26 %6Ag-%10 SiC-%84 Cu içeren kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinin SEM görüntüsü a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk

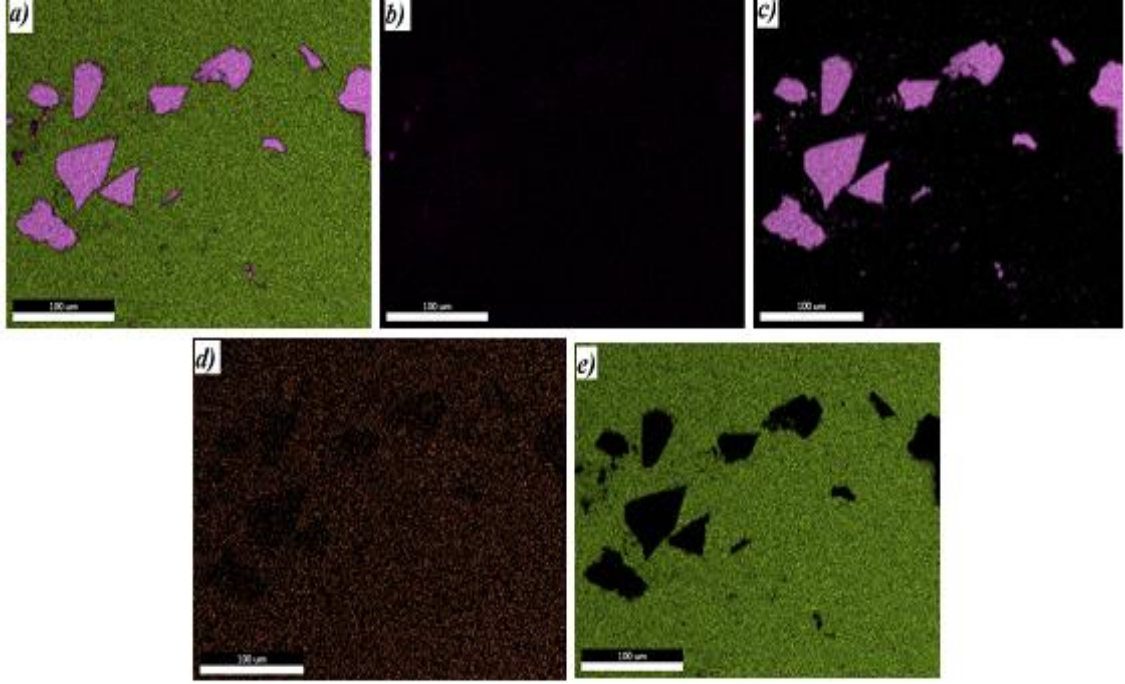
Yapılan mikro yapı incelemeleri sonucunda; farklı kaynak sürelerine bağılı olarak kaynaklanmış numunelerin difüzyon kaynak bölgeleri görülmektedir. Yüzeylerde düzgünlüğün olmaması, kaynak yapılacak yüzeylerin yanlış hizalanması, yüzeylerin tam temas edememesi, yüzeyin pürüzlülüğü ve numuneleri kaynak sistemine koyarken oluşan zaman farkı gibi türlü etkenlerin kaynak parametrelerini etkileyen unsurlar olduğu göz ardı edilmemelidir.

### 6.3.3 EDS Analizi

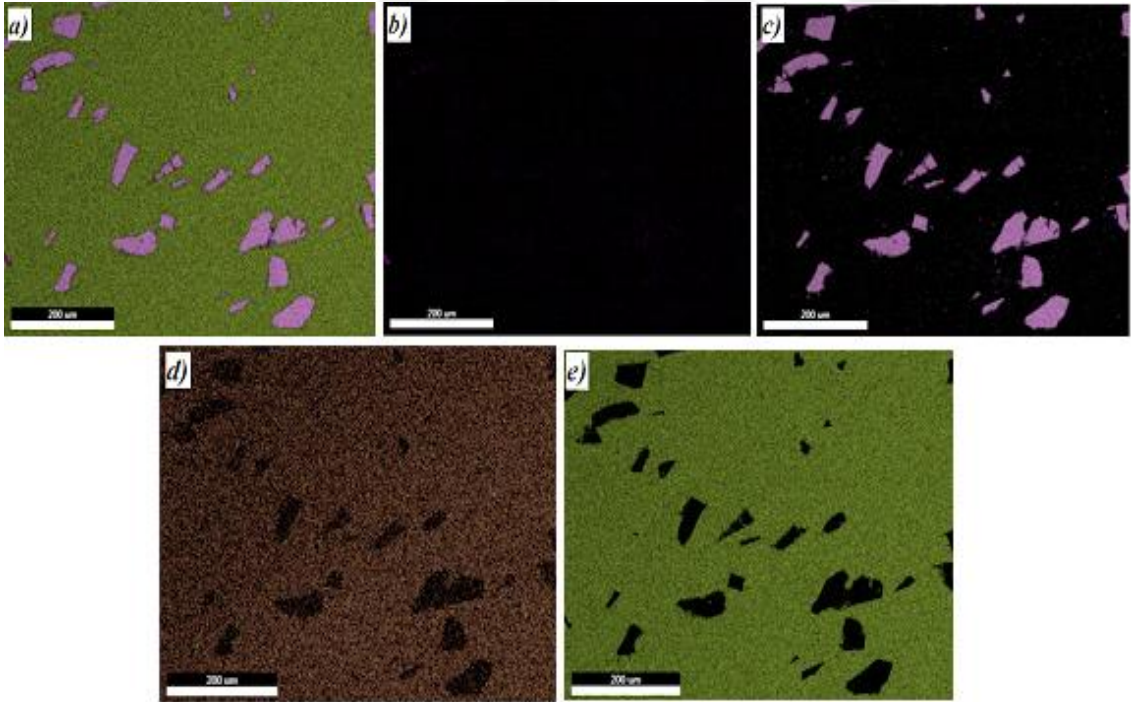
Difüzyon kaynağı yapılan kompozit malzemelerin içeriğinde bulunan elementlerin var olduğunu kanıtlamak için, 850°C sıcaklıkta, 120 dakika süre zarfında 2 MPa basınç uygulamak suretiyle kaynak yapılmıştır. Şekil 6.27'de %2 Ag-%10 SiC-%88 Cu kompozit malzemesinin; Şekil 6.28'de %4 Ag-%10 SiC-%86 Cu kompozit malzemesinin ve Şekil 6.29'da %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu kompozit malzemesinin, elementel haritalaması (mapping) yapılmıştır. Bu haritalama sonucunda Gümüş (Ag), bakır (Cu), silisyum (Si) ve karbon (C) elementleri gösterilmektedir. Verilen haritalara bakarak, kompozit malzemelerde ki elementlerin var olduğunu görebilmek ve yapıya ilave edilen takviye malzemelerin homojen dağıldığı sonucuna ulaşılabilmektedir.



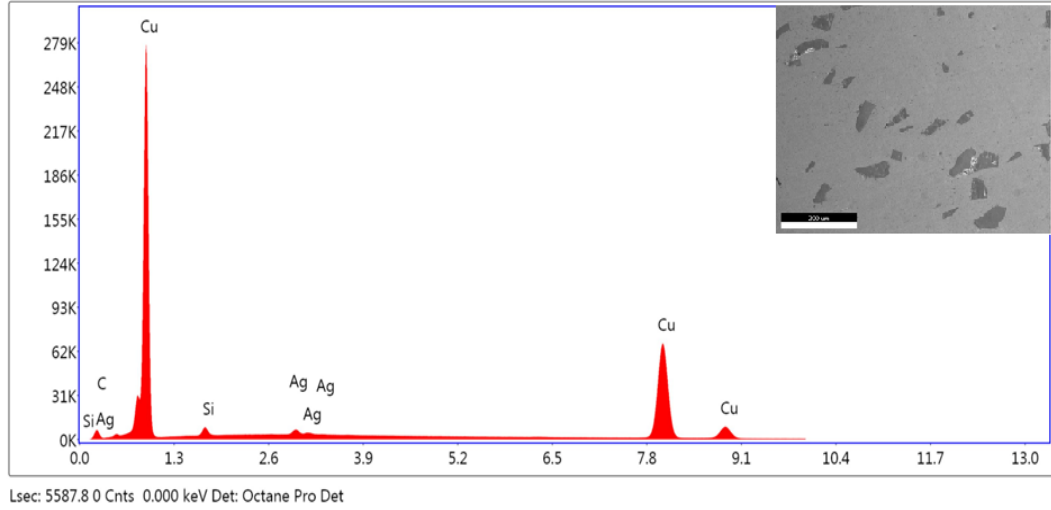
Şekil 6.27 %2 Ag-%10 SiC-%88 Cu Kompozit malzemesinin EDS element analizi a) %2 Ag-%10 SiC-%88 Cu b) Kompozit malzemedeki C c) Kompozit malzemedeki Si d) Kompozit malzemedeki Ag e) Kompozit malzemedeki Cu



Şekil 6.28 %4 Ag-%10 SiC-%86 Cu Kompozit malzemesinin EDS element analizi a) %4 Ag-%10 SiC-%86 Cu b) Kompozit malzemedeki C c) Kompozit malzemedeki Si d) Kompozit malzemedeki Ag e) Kompozit malzemedeki Cu



Şekil 6.29 %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu Kompozit malzemesinin EDS element analizi a) %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu b) Kompozit malzemedeki C c) Kompozit malzemedeki Si d) Kompozit malzemedeki Ag e) Kompozit malzemedeki Cu



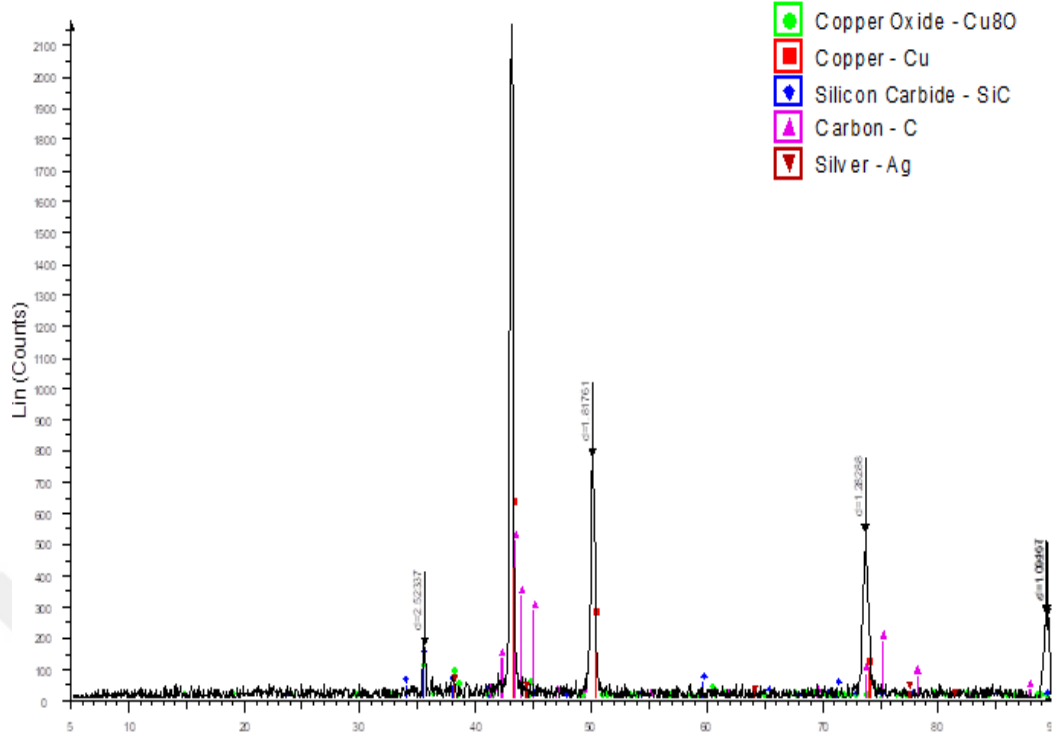
| Element | Weight % | Atomic % | Net Int. | Error % | Kratio | Z    | R    | A    | F    |
|---------|----------|----------|----------|---------|--------|------|------|------|------|
| C K     | 10.24    | 37.37    | 15.4     | 9.56    | 0.02   | 1.31 | 0.84 | 0.18 | 1.00 |
| Si K    | 1.24     | 1.94     | 15.2     | 8.18    | 0.01   | 1.16 | 0.92 | 0.38 | 1.01 |
| Ag L    | 1.37     | 0.56     | 12.1     | 5.46    | 0.01   | 0.87 | 1.13 | 0.94 | 1.05 |
| Cu K    | 87.15    | 60.14    | 396.2    | 1.87    | 0.87   | 0.96 | 1.01 | 1.00 | 1.04 |

Şekil 6.30 %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu Kompozit malzemesinin çizgisel EDS analizi

Kaynak işlemi sonrası %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu kaynaklı numunenin SEM görüntülerinden alınmış olan alan taramalı EDS analiz sonuçları Şekil 6.30'da verilmiştir. EDS analizleri incelendiğinde; matris elementi olan Cu, Ag ile takviye malzemesi elementleri olan Si ve C elementlerinin EDS piklerinde yer aldığı gözlemlenmiştir. EDS incelemelerinde Cu, Ag, Si ve C elementlerine bakılmıştır.

#### 6.3.4 XRD Analizi

Kaynak işlemi sonrasında belirlenen numunelerde XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Hacimce en yüksek Ag içeren %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu içeren numunenin XRD grafiği Şekil 6.31'de verilmiştir. Üretilen tozların XRD sonuçları incelendiğinde yeni bir faz oluşumu gözlemlenmemiştir. XRD analizi sonucunda, Cu ve SiC'in daha güçlü pik noktasına sahip olduğu Ag'nin ise çok daha zayıf pik noktasına sahip olduğu görülmektedir. Alınan numunelerde, çok az bir miktarda bakır oksit fazı gözlenmiştir. Spektrumda Ag, Cu matrisleri ve SiC arasında bir ara yüzey reaksiyonu olmadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Ag-Cu-SiC kompozitlerinde bulunan partiküller arasında etkileşim olmadığı XRD analiz sonuçlarından elde edilmiştir.



Şekil 6.31 %6 Ag-%10 SiC-%84 Cu kaynaklı numunenin XRD analizi

### 6.3.5 Yoğunluk Analizi

Üretilmiş olan Cu-SiC ve Ag-Cu-SiC kompozit malzemelerin yoğunlukları sinterleme işlemi ve difüzyon kaynağı sonrasında Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Numunelerin sinterleme işlemi sonrasında (kaynak işleminden önce) deneysel yoğunlukları, teorik yoğunlukları, bağıl yoğunlukları ve gözenek oranları Tablo 6.3’de verilmiştir.

Bakırın yoğunluğu  $8,96 \text{ g/cm}^3$ , gümüşün yoğunluğu  $10,49 \text{ g/cm}^3$  ve silisyum karbürün yoğunluğu  $3,21 \text{ g/cm}^3$ ’tür. Gümüşün yoğunluğu bakır ve silisyum karbürün yoğunluğuna kıyasla daha yüksektir. Bu sebeple, kompozit malzemelerde Ag oranı arttıkça yoğunluk artmaktadır fakat silisyum karbürün yoğunluğu gümüş ve bakırın yoğunluğuna kıyasla çok düşük olduğu için silisyum karbür oranının artması durumunda yoğunluklarda %5 SiC ilave oranına kıyasla bir miktar azalma meydana gelmektedir. Bağıl yoğunluklar, kaynaklanmayan numunelerde tüm karışım oranları için %86,79-87,88 arasında değişmektedir.

Tablo 6.3 %10 SiC içeren kompozit malzemelerin kaynak öncesi yoğunlukları

| Yoğunluklar                      |                                 |                                  | Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Deneysel Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Bağlı Yoğunluk (%) | Gözeneklilik (%) |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|------------------|
| Ag<br>10,49<br>g/cm <sup>3</sup> | Cu<br>8,96<br>g/cm <sup>3</sup> | SiC<br>3,21<br>g/cm <sup>3</sup> |                                      |                                        |                    |                  |
| Kaynak zamanı                    | Numuneler                       | Bileşim                          |                                      |                                        |                    |                  |
| <b>Kaynak öncesi</b>             | N17                             | %10 SiC +<br>%90 Cu              | 8,39                                 | 7,28                                   | 86,79              | 13,21            |
|                                  | N18                             | %2 Ag+<br>%10 SiC +<br>%88 Cu    | 8,393                                | 7,32                                   | 87,25              | 12,75            |
|                                  | N19                             | %4 Ag+<br>%10 SiC +<br>%86 Cu    | 8,396                                | 7,34                                   | 87,47              | 12,53            |
|                                  | N20                             | %6 Ag+<br>%10 SiC +<br>%84 Cu    | 8,399                                | 7,38                                   | 87,88              | 12,12            |

Tablo 6.4'te Cu-SiC ve Ag-Cu-SiC kompozitlerinin difüzyon kaynağı sonrası yoğunluğu, kaynak işleminin süresine bağlı olarak değişim göstermektedir. Artan Ag oranı ile numunelerin deneysel yoğunluğu artmıştır.

En yüksek yoğunluk değeri en yüksek Ag oranı olan %6 oranında Ag içeren malzemelerde gözlenmiştir.

30 dakika süreyle kaynaklanan numunelerde bağlı yoğunluk gümüş ilave edilmemiş numunelerde %87,00 olurken %6 oranında Ag içeren numunelerde %88,39 olarak elde edilmiştir.

Bağlı yoğunluklar 60 dakika süreyle kaynak yapılmış numunelerde gümüş ilave edilmemiş numune için %87,56 ve %6 oranında Ag içeren numunede %88,91 ve 120 dakikalık kaynak süresinde kaynaklanan numunelerde ise gümüş ilave edilmeyen numuneler için %88,18 ve %6 Ag içeren numunelerde %89,42 olarak ölçülmüştür.

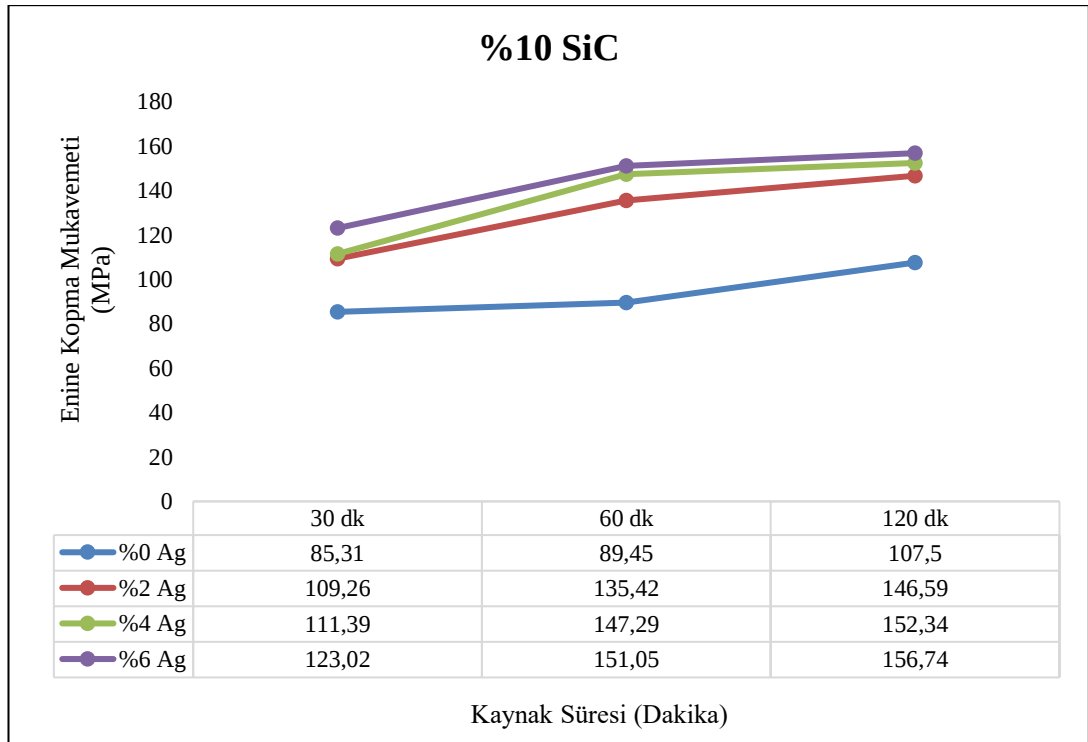
Tablo 6.4 %10 SiC içeren kompozit malzemelerin kaynak sonrası yoğunlukları

| Yoğunluklar                      |                                 |                                  | Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Deneysel Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Bağıl Yoğunluk (%) | Gözeneklilik (%) |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|------------------|
| Ag<br>10,49<br>g/cm <sup>3</sup> | Cu<br>8,96<br>g/cm <sup>3</sup> | SiC<br>3,21<br>g/cm <sup>3</sup> |                                      |                                        |                    |                  |
| Kaynak zamanı                    | Numuneler                       | Bileşim                          |                                      |                                        |                    |                  |
| 30 dk                            | N21                             | %10 SiC + %90 Cu                 | 8,39                                 | 7,30                                   | 87,00              | 13,00            |
|                                  | N22                             | %2 Ag+ %10 SiC + %88 Cu          | 8,393                                | 7,34                                   | 87,49              | 12,51            |
|                                  | N23                             | %4 Ag+ %10 SiC + %86 Cu          | 8,396                                | 7,37                                   | 87,85              | 12,15            |
|                                  | N24                             | %6 Ag+ %10 SiC + %84 Cu          | 8,399                                | 7,42                                   | 88,39              | 11,61            |
| 60 dk                            | N25                             | %10 SiC + %90 Cu                 | 8,39                                 | 7,35                                   | 87,56              | 12,44            |
|                                  | N26                             | %2 Ag+ %10 SiC + %88 Cu          | 8,393                                | 7,37                                   | 87,85              | 12,15            |
|                                  | N27                             | %4 Ag+ %10 SiC + %86 Cu          | 8,396                                | 7,40                                   | 88,20              | 11,80            |
|                                  | N28                             | %6 Ag+ %10 SiC + %84 Cu          | 8,399                                | 7,47                                   | 88,91              | 11,09            |
| 120 dk                           | N29                             | %10 SiC + %90 Cu                 | 8,39                                 | 7,40                                   | 88,18              | 11,82            |
|                                  | N30                             | %2 Ag+ %10 SiC + %88 Cu          | 8,393                                | 7,42                                   | 88,41              | 11,59            |
|                                  | N31                             | %4 Ag+ %10 SiC + %86 Cu          | 8,396                                | 7,47                                   | 88,91              | 11,09            |
|                                  | N32                             | %6 Ag+ %10 SiC + %84 Cu          | 8,399                                | 7,51                                   | 89,42              | 10,58            |

Kaynak işlemi için numunelerin üretiminde soğuk presleme yöntemi kullanılmıştır. Şap E., (2020) yılında yaptığı çalışmada Cu ana matris içerisine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında Mo-SiCp tozları ekleyerek toz karışımlar elde etmiştir. Hazırlanan karışımlara 600 MPa basınç uygulayarak soğuk pres yöntemiyle numuneleri oluşturmuştur. Şekillendirilen numuneleri 1 ve 2 saat sinterleme süresi kullanarak sinterleme işlemi uygulamıştır. Üretilen kompozitlerin yoğunluk ölçümleri sonucunda sinterleme süresine bağlı olarak yoğunluğun arttığını tespit etmiştir.

### 6.3.6 Üç Nokta Eğme Testi Analizi

Hacimsel olarak %10 SiC takviyeli ve %2, %4, %6 oranlarında gümüş içeren soğuk presleme yöntemiyle üretilmiş olan Cu-SiC, Ag-Cu-SiC kompozit malzemelerinin difüzyon kaynak işlemi sonrası enine kopma mukavemeti değerleri ölçülmüştür. Difüzyon kaynağı sonrasında elde edilen numunelerin üç nokta eğme testinde ölçülen enine kopma mukavemeti (TRS-Transverse Rupture Strength) sonuçları Şekil 6.32’de gösterilmiştir. Kaynak yapılmamış %10 SiC takviyeli kompozit malzemenin TRS değeri 507 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.32 %10 SiC takviyeli numunelerin enine kopma mukavemeti değerleri

Şekil 6.32’de görüleceği üzere artan gümüş (Ag) oranına bağlı olarak enine kopma mukavemeti değerlerinde artış meydana gelmiştir.

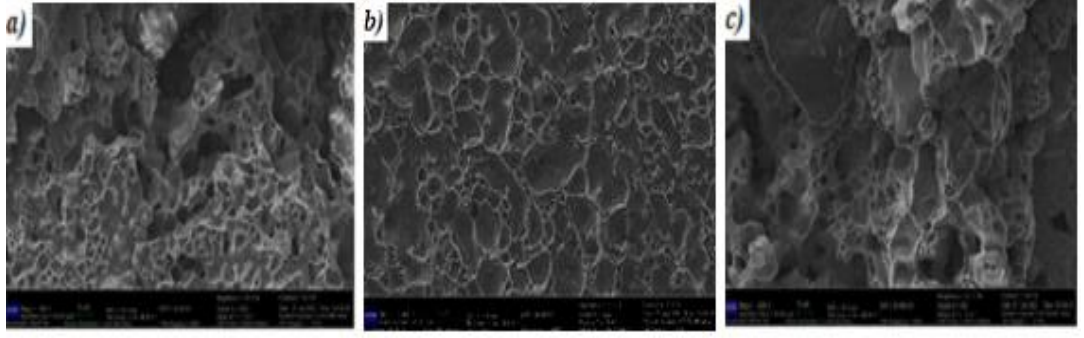
30 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 85,31 MPa olan TRS değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi 109,26 MPa’ya %4 oranında Ag ilavesi ile 111,39 MPa’ya %6 oranında Ag ilavesi ile 123,02 MPa’ya yükselmiştir. 30 dakika kaynak süresi için ortalama %1’lik gümüş artışı TRS değerinde %7,36’lık bir artış meydana getirmiştir.

60 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 89,45 MPa olan TRS değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 135,42 MPa’ya %4 oranında Ag ilavesi ile 147,29 MPa’ya %6 oranında Ag ilavesi ile 151,05 MPa’ya yükselmiştir. 60 dakika kaynak süresi için ortalama %1’lik gümüş artışı TRS değerinde %11,47’lik bir artış meydana getirmiştir.

120 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 107,5 MPa olan TRS değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 146,59 MPa’ya %4 oranında Ag ilavesi ile 152,34 MPa’ya %6 oranında Ag ilavesi ile 156,74 MPa’ya yükselmiştir. 120 dakika kaynak süresi için ortalama %1’lik gümüş artışı TRS değerinde %7,61’lük bir artış meydana getirmiştir. En iyi sonuç 156,74 MPa ile %6 Ag-%5 SiC oranında ve 120 dakikalık kaynak zamanında elde edilmiştir.

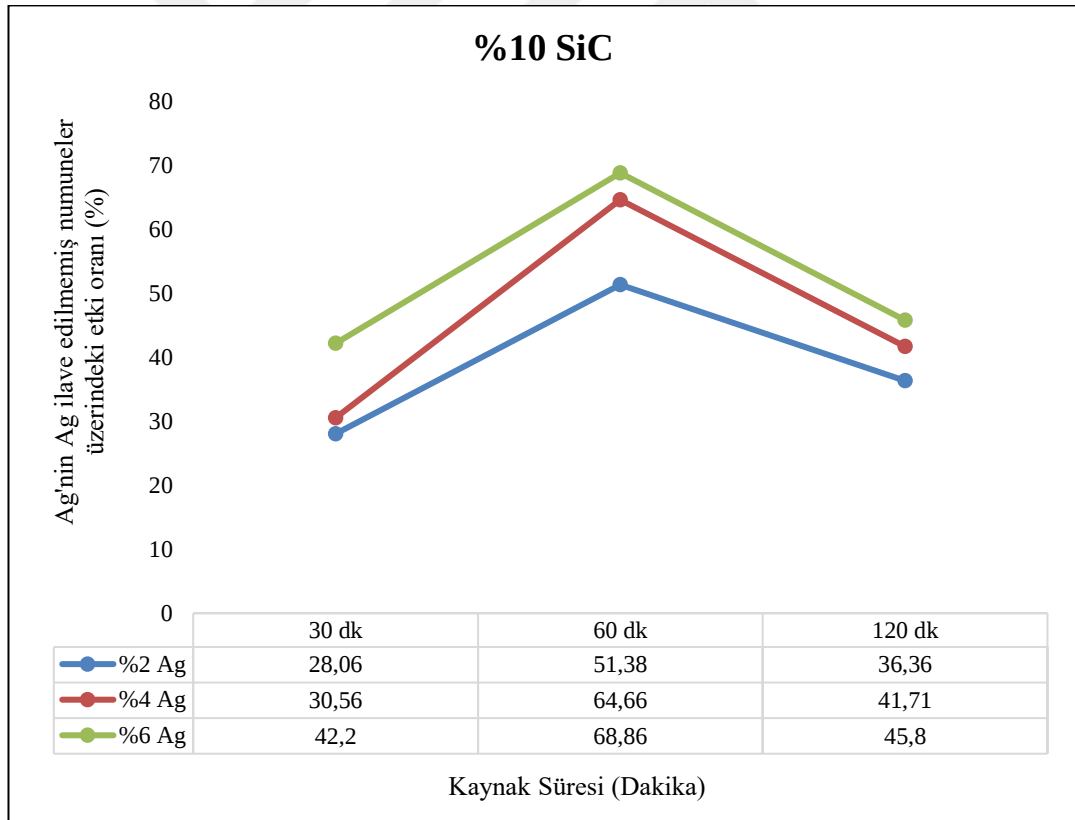
Hacimce %2 gümüş ilaveli %10 SiC takviyeli numuneler 30, 60 ve 120 dakika kaynak sürelerinde birleştirildikten sonra üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Üç nokta eğme testinden sonra oluşan kırık yüzeylerin görüntüleri taramalı elektron mikroskopunda alınmıştır.

Şekil 6.33’te %2 Ag içeren numunelerin sırasıyla 30, 60 ve 120 dakika kaynak süresi sonunda 3 noktalı eğme deneyi sonrasındaki kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Kırılma yüzeyinin sünek kırılma davranışı sergilediği gözlemlenmektedir. Sünek kırılma çatlakların oluşması ve büyümesinde önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin görüldüğü kırılma türüdür. Çatlak boşlukların oluşması ve birleşmesi ile meydana gelir ve yavaş ilerler. Kırılma yüzeyi mat ve lifli görünümde olmaktadır.



Şekil 6.33 %2 Ag-%10 SiC-%88 Cu içeren kaynaklı numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü  
a) 30 dk, b) 60 dk, c) 120 dk

TRS değerlerinin kompozit malzemeye ilave edilen gümüş oranlarına göre % olarak artış grafiği Şekil 6.34'te gösterilmiştir. İlave edilen gümüş oranındaki artışa bağlı olarak TRS değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. TRS değerlerindeki en yüksek artış oranı 60 dakikada oluşmuştur.



Şekil 6.34 %10 SiC takviyeli kompozitlerde gümüş ilavesinin gümüş ilave edilmemiş numunelerde kaynak bağlantı mukavemetine etki oranı (%)

30 dakika kaynak süresinde TRS değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %28,06 ve %4 Ag ilave oranında %30,56 ve %6 Ag oranında ise %42,2'lik bir artış meydana gelmiştir.

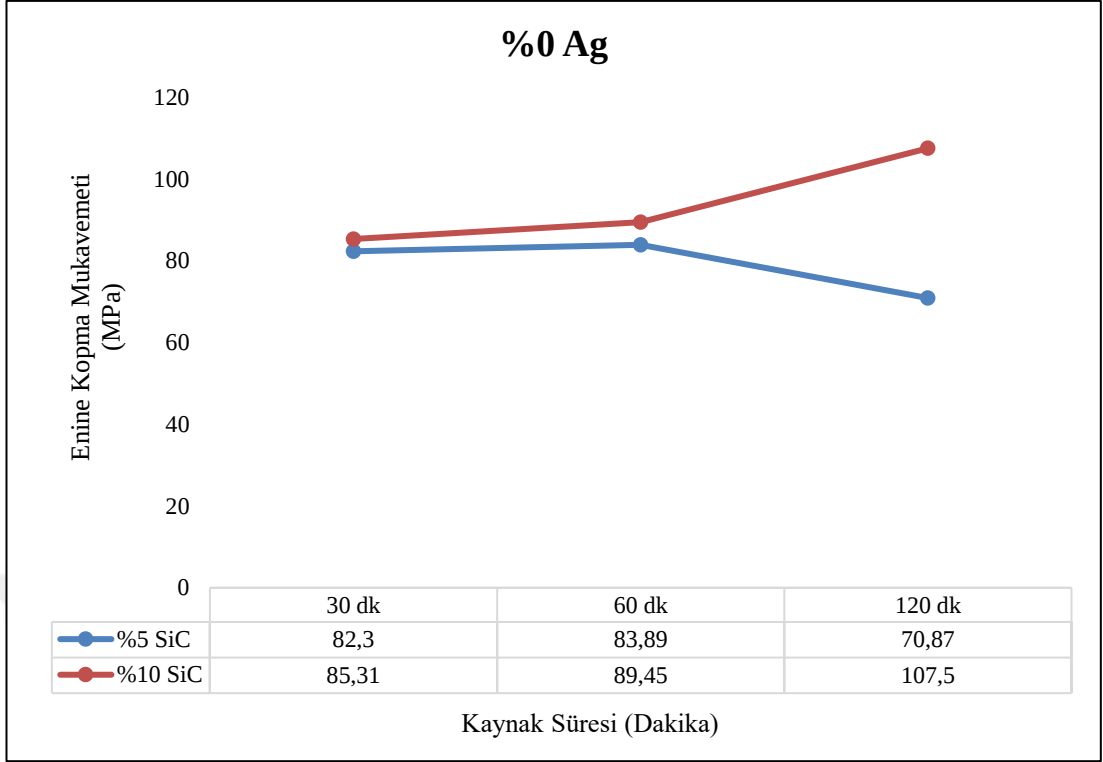
60 dakika kaynak süresinde TRS değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %51,38 ve %4 Ag ilave oranında %64,66 ve %6 Ag oranında ise %68,86'lık bir artış meydana gelmiştir.

120 dakika kaynak süresinde TRS değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %36,36 ve %4 Ag ilave oranında %41,71 ve %6 Ag oranında ise %45,8'lik bir artış meydana gelmiştir.

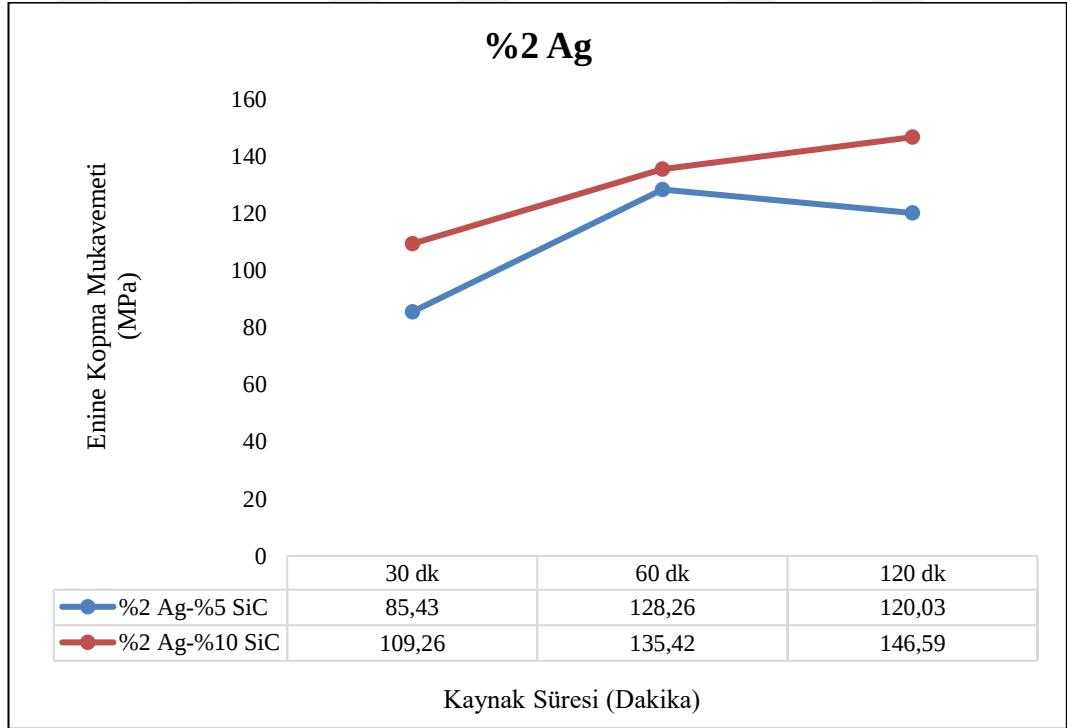
Şekil 6.35 ve Şekil 6.38 arasındaki grafiklerde gümüş oranlarına bağlı olarak %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynak yapılmış olan kompozit malzemelerin enine kopma mukavemeti değerleri karşılaştırılmıştır.

Gümüş ilavesi ile kompozit malzemelerin düşük kaynak sürelerinde TRS (Transverse Rupture Strength) değerlerinde artış meydana gelmiştir. En uzun kaynak süresi olan 120 dakikada ki gümüş ilavesi bağlantı mukavemeti değerlerinde 30 ve 60 dakika da oluşan etki gibi bir etki göstermemiştir. Yapıya eklenen gümüş ilavesi en iyi etkiyi 30 ve 60 dakika da vermiştir. Gümüş oranının artması bağlantı mukavemeti değerlerinde düşük kaynak sürelerinde artan etki göstermektedir. Gümüş ilavesinin %10 SiC oranında %5 SiC oranına göre daha etkili bağlantı mukavemeti sağladığı gözlemlenmektedir.

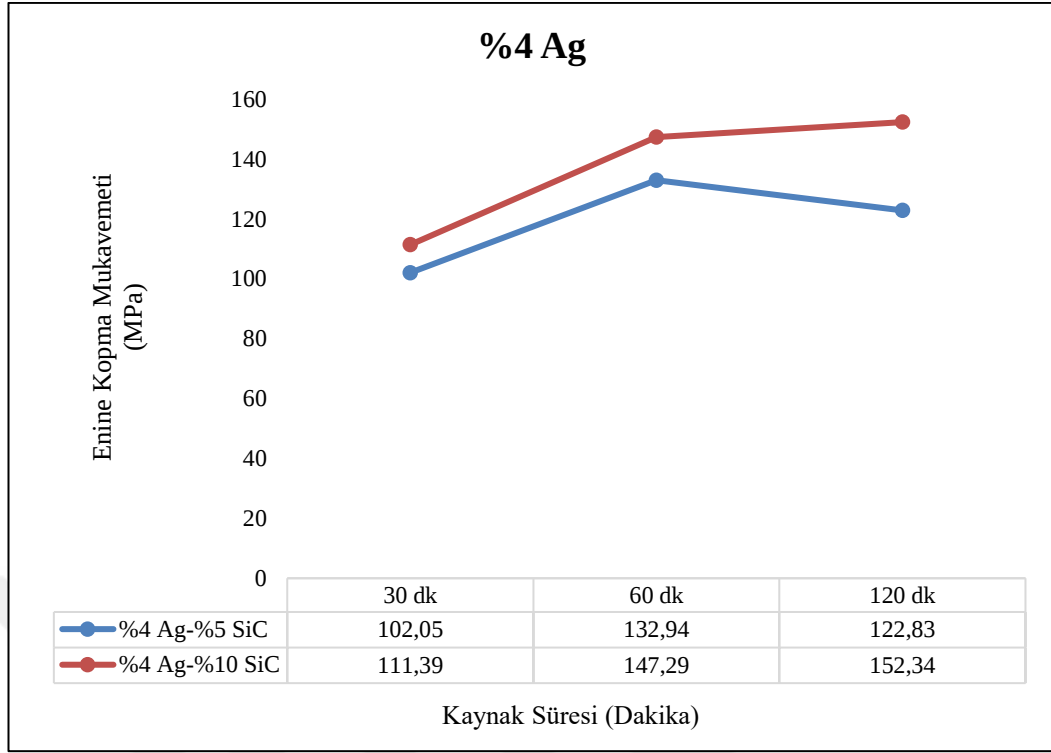
Abukdair O.F.M., (2021) yılında yapmış olduğu tez çalışmasında Cu matris malzemesine hacimce %5, %10 ve %15 SiC takviye ilave edilmiş kompozit malzemelerin difüzyon kaynak kabiliyetini incelemiştir. %10 SiC takviye edilmiş kompozit malzemelerin enine kopma mukavemetlerinin %5 SiC takviyeli kompozit malzemelerin enine kopma mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğu sonucunu bulmuştur. Üç nokta eğme testi sonuçlarından %10 SiC ilave edilmiş kaynaklı numunelerin %5 SiC ilave edilmiş olan numunelerden daha yüksek enine kopma mukavemeti değerleri elde edilmiş olması literatürle uyumludur.



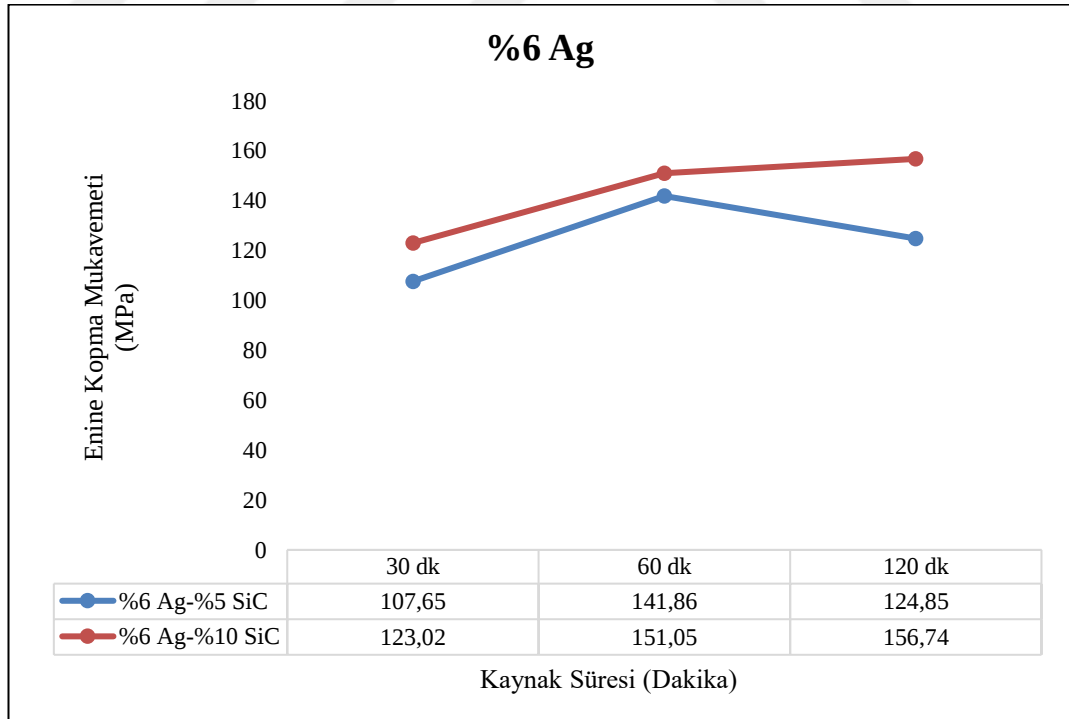
Şekil 6.35 %0 Gümüş ilaveli %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynaklı numunelerin kaynak süresine göre enine kopma mukavemeti değerleri



Şekil 6.36 %2 Gümüş ilaveli %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynaklı numunelerin kaynak süresine göre enine kopma mukavemeti değerleri



Şekil 6.37 %4 Gümüş ilaveli %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynaklı numunelerin kaynak süresine göre enine kopma mukavemeti değerleri



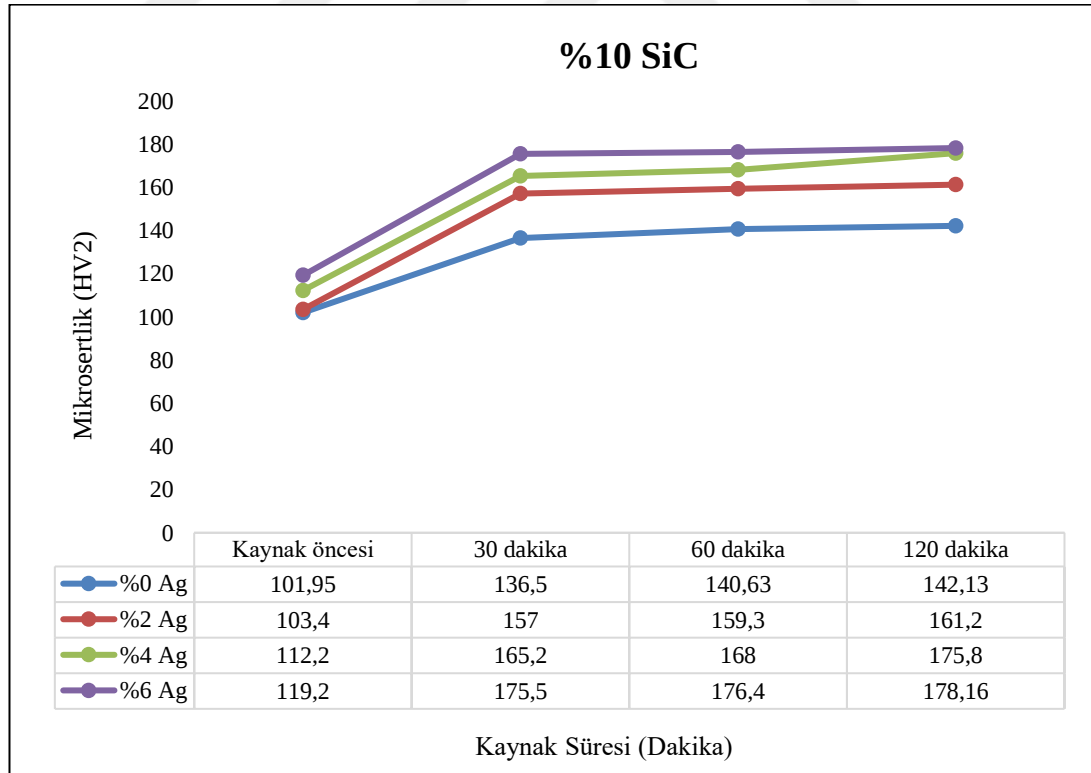
Şekil 6.38 %6 Gümüş ilaveli %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynaklı numunelerin kaynak süresine göre enine kopma mukavemeti değerleri

### 6.3.7 Mikrosertlik Analizi

Mikrosertlik ölçümleri ile SiC takviyeli bakır matrisli kompozitler üzerinde SiC ve Ag oranının etkisi incelenmiştir. Bakır matris içine %10 oranında SiC ve %2, %4 ve %6 oranında Ag ilavesi ile numunelerin sinterleme sonrasında ve 30, 60 ve 120 dakika olmak üzere üç farklı difüzyon kaynağı süresi sonrasında sertlikleri ölçülmüştür.

Mikrosertlik için hazırlanıp dağlanan kaynak öncesi numunelerin gümüş ilaveli kısımlarından (üst tabaka) 5, sadece bakır ve silisyum karbür olan kısımlarından (alt tabaka) 10, kaynaklı numunelerin ise gümüş ilaveli kısımlarından 8, sadece bakır ve silisyum karbür ilaveli kısımlarından 10 değer alınmış en yüksek ve en düşük değerler çıkarıldıktan sonra bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

Cu-SiC ve Ag-Cu-SiC kompozit malzemelerin sertliği Şekil 6.39'da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6.39 %10 SiC takviyeli numunelerin gümüş oranı ve kaynak süresine göre sertlik değerleri

Kaynak öncesinde Cu-SiC olan bölümün mikrosertlik değeri 101,95 HV ve Ag-Cu-SiC olan kısmın en yüksek mikrosertlik değeri 119,2 HV olarak ölçülmüştür. 101,95 HV olan sertlik değeri hacimce %2 Ag ilavesinden sonra 103,4 ve %4 Ag ilavesinden sonra 112,2 ve %6 Ag ilavesi ile 119,2 olmuştur. Artan gümüş miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değeri %6 oranında gümüş içeren numularda 119,2 HV olarak elde edilmiştir.

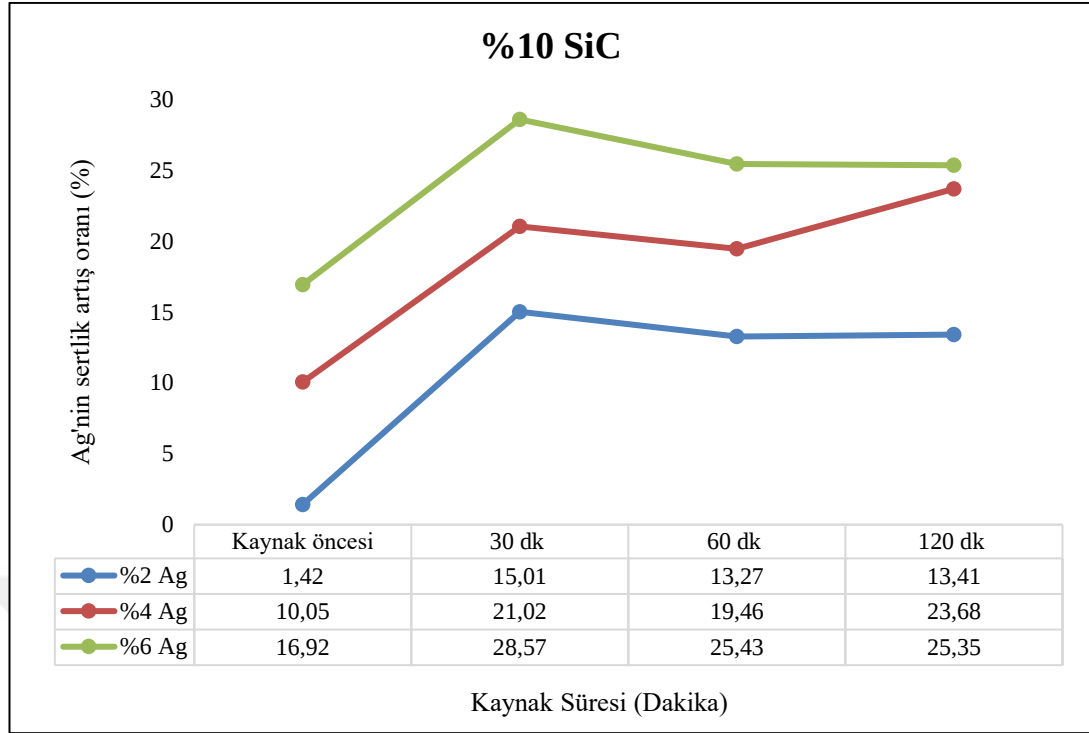
30 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 136,5 HV olan sertlik değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 157 HV' ye %4 oranında Ag ilavesi ile 165,2 HV'ye %6 oranında Ag ilavesi ile 175,5 HV'ye yükselmiştir. 30 dakika kaynak süresi için ortalama %1'lik gümüş artışı sertlik değerinde %4,76'lık bir artış meydana getirmiştir.

60 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 140,63 HV olan sertlik değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 159,3 HV' ye %4 oranında Ag ilavesi ile 168 HV'ye %6 oranında Ag ilavesi ile 176,4 HV'ye yükselmiştir. 60 dakika kaynak süresi için ortalama %1'lik gümüş artışı sertlik değerinde %4,23'lük bir artış meydana getirmiştir.

120 dakika kaynak süresi için gümüş ilave edilmemiş numunelerin 142,13 olan sertlik değeri %2 oranında Ag ilave edilmesi ile 161,2 HV'ye %4 oranında Ag ilavesi ile 175,8 HV'ye %6 oranında Ag ilavesi ile 178,16 HV'ye yükselmiştir. 120 dakika kaynak süresi için ortalama %1'lik gümüş artışı sertlik değerinde %4,22'lik bir artış meydana getirmiştir.

En yüksek sertlik sonucu 178,16 HV ile %6 Ag-%10 SiC oranında ve 120 dakikalık kaynak zamanında elde edilmiştir.

Sertlik değerlerinin kompozit malzemeye ilave edilen gümüş oranlarına göre % olarak artış grafiği Şekil 6.40'da gösterilmiştir. İlave edilen gümüş oranındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinde bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 6.40 %10 SiC takviye oranındaki kompozit malzemelere gümüş ilave oranının sertlik değerlerine % etkisi

Kaynak öncesi kompozit malzemeye ilave edilen %2 gümüş gümüş ilavesi gümüş ilave edilmemiş numuneye göre %1,42 ve %4 gümüş ilavesi %10,05 ve %6 gümüş ilavesi ise %16,92 oranında sertliği arttırmıştır. 30 dakika kaynak süresi sonucunda sertlik değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %15,01 ve %4 Ag ilave oranında %21,02 ve %6 Ag oranında ise %28,57'lik bir artış meydana gelmiştir.

60 dakika kaynak süresi sonucunda sertlik değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %13,27 ve %4 Ag ilave oranında %19,46 ve %6 Ag oranında ise %25,43'lük bir artış meydana gelmiştir.

120 dakika kaynak süresi sonucunda sertlik değerlerinde gümüş ilave edilmemiş numunelere kıyasla %2 Ag ilave edilmesi durumunda %13,41 ve %4 Ag ilave oranında %23,68 ve %6 Ag oranında ise %25,35'lik bir artış meydana gelmiştir. Sertlik değerlerindeki artış oranı kompozit malzemeye ilave edilen gümüş oranlarına bağlı olarak artış göstermiş olup en yüksek artış oranı 30 dakika kaynak süresinde %6 oranında gümüş ilavesinde meydana gelmiştir.

## 7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, toz metalurjisi yöntemi ile hacimce %5 ve %10 SiC, %2, %4 ve %6 Ag içeren bakır matrisli kompozit malzemeler 600 MPa soğuk presleme yöntemi ile preslenerek üretilmiş ve 850 °C sıcaklıkta 120 dakika boyunca sinterlenmiştir. Sinterleme işleminden sonra elde edilen numunelerin yüzeyleri 220, 320, 400, 600, 800, 1200 meshlik SiC su zımparası ile zımparalandıktan sonra elde edilen numunelerin gümüş ilaveli kısımları birbirine değecek şekilde 30, 60 ve 120 dakika olmak üzere üç farklı zamanda difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Difüzyon kaynağı sonrasında kompozit malzemelerin kaynak bağlantısının özelliklerini incelemek için mikroyapı görüntülemesi, sertlik, yoğunluk ve üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Ayrıca kompozit malzemelerdeki elementlerin varlığını doğrulamak için EDS analizi yapılmıştır. Yapılan incelemelerin sonucunda;

- Hacimce %5 ve %10 SiC takviye edilen Cu-SiC ve %2, %4 ve %6 gümüş tozu ilave edilmiş Ag-Cu-SiC kompozit malzemeleri toz metalurjisi yöntemi kullanılarak soğuk presleme ve sonrasında sinterleme işlemi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop görüntülerinden görülebileceği üzere en iyi kaynak ara yüzeyinin %5 ve %10 SiC takviyeli kompozit malzemelerde 60 ve 120 dakika boyunca kaynak yapılan numunelerde gümüş oranına bağlı olarak artış elde edilmiştir. Bu bağlantılarda ara yüzey hatlarının çoğu kaybolmuş ve yer yer tek bir numune izlenimi vermiştir. 30 dakika kaynak süresi numunelerin birleştirilmesi için yetersiz olduğu görülmüştür. Difüzyon bölgesinden alınmış olan SEM incelemesi ve optik mikroskop görüntülerinden, bu çalışmada difüzyon kaynağı için %10 SiC oranının %5 SiC oranına göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Ayrıca kompozit yapıya ilave edilen gümüş oranının da takviye edilen silisyum karbür oranı ile bağlantılı olarak daha iyi sonuç gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş, soğuk preslenmiş ve sinterlenmiş numunelerdeki yoğunluk oranında yapıya ilave edilen silisyum karbür miktarı ile

birlikte bir miktar azaltma meydana gelmiştir. Yoğunluk oranının artan kaynak süresi ve ilave edilen gümüş miktarına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Yoğunluk miktarındaki artış aynı zamanda kompozit yapıdaki gözenekliliğin azaldığının da bir göstergesi olmaktadır. Kompozit yapıda matrisi oluşturan bakır tozunun partikül boyutu 45 µm, silisyum karbür tozunun partikül boyutu 22 µm ve gümüş tozunun partikül boyutu 28-48 nm'dir. İşlem sonunda bakılacak olursa kaynak sonrası %5 SiC takviyeli kompozit malzemelerde yoğunluk %88,87 ile %90,72 arasında değişirken %10 SiC takviyeli kompozit malzemelerde %87,00 ile %89,42 arasında değişim göstermiştir.

- Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen soğuk preslenmiş ve sinterlenmiş hacimce %5 ve %10 SiC takviyeli %2, %4 ve %6 Ag ilaveli kompozit malzemelerde artan SiC ve Ag miktarına bağlı olarak sertlik artmıştır. Kaynak öncesinde en yüksek sertlik değeri %10 SiC takviyeli %6 Ag ilaveli numunede 119,2 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak işleminden sonra da sertlik değerlerindeki değişim kaynak süresi ve Ag ilave oranına bağlı olarak kendi arasında paralellik göstermiştir. Kaynak işlemi sonrasında en yüksek sertlik değeri %10 SiC takviyeli %6 Ag ilaveli 120 dakika kaynak yapılmış numunede 178,16 HV olarak elde edilmiştir.
- Kaynak işleminden önce ve sonra elde edilen kaynaklı numunelerin üç nokta eğme testi yapılmış olup enine kopma dayanımı (TRS) değerleri ölçülmüştür. Kaynak yapılmamış numunelerde elde edilen TRS değerleri %5 SiC takviyeli numunede 503 MPa, %10 SiC içeren numunede 507 Mpa olarak ölçülmüştür. Difüzyon kaynağı işlemi sonrasında ise en yüksek TRS değeri 120 dakika kaynak yapılmış olan %10 SiC takviyeli ve %6 oranında Ag içeren numunede 156,74 MPa olarak ölçülmüştür.
- Kompozit yapıya ilave edilen gümüş oranlarına bağlı olarak %5 SiC ve %10 SiC takviyeli kaynak yapılmış olan kompozit malzemelerin enine kopma mukavemeti değerleri karşılaştırılmıştır. Gümüş oranının artması düşük kaynak sürelerinde TRS (Transverse Rupture Strength) değerlerinde artış meydana getirmiştir. Kaynak süresindeki artış gümüşün enine kopma mukavemeti değeri artışıandaki etkisini azaltmaktadır. Gümüş oranının artması bağlantı mukavemeti değerlerinde

düşük kaynak sürelerinde artan etki göstermektedir. Gümüşün %10 silisyum karbür oranında %5 silisyum karbür oranına göre daha etkili bağlantı mukavemeti sağladığı gözlemlenmektedir.

- Kompozit yapıya ilave edilen gümüş oranının TRS değerlerinde gümüş ilave edilmemiş yapıya oranla gümüş oranına bağlı olarak artış sergilediği gözlemlenmiştir. En yüksek artış oranı %76,16 ile 120 dakika kaynak yapılmış %6 Ag ilave edilen %5 SiC takviyeli kompozit malzemede olduğu görülmektedir.
- %5 SiC takviyeli, 120 dakika kaynak süresinde kaynak yapılan numunelerin TRS değerlerindeki düşüşün sebebi bakırın yumuşaması olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda Qiang vd., (2014)'ün yaptıkları çalışmada da 700 °C'de 30, 60, 90, 120 ve 150 dakika da yapılan difüzyon kaynağının çekme mukavemeti değerlerinde 120 dakikaya kadar artış sergilenirken 150 dakikadaki çekme mukavemeti değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Bu tez çalışmasında kaynak sıcaklığı 850 °C olduğundan dolayı enine kopma mukavemeti değerlerindeki azalış 120 dakikada meydana gelmektedir. TRS değerlerindeki düşüş literatürle uyumludur.
- Silisyum karbür takviyeli bakır matrisli kompozit malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde ve bağlantı mukavemetinin arttırılmasında gümüşün olumlu yönde etkisi olduğu görülmüştür.
- XRD analizleri sonucunda herhangi bir intermetalik faz gözlemlenmemiştir.

## 7.1 Görüş ve Öneriler

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve bilgiler neticesinde aşağıda belirtilen öneriler uygulanabilir;

- Metal matrisli kompozit malzemelerin difüzyon kaynağı yöntemi ile birleşim mukavemetini arttırmak ve kaynak süresini kısaltmak için farklı matris yapılarında gümüşün etkisi araştırılabilir.
- TRS değerlerinde silisyum karbürün etkisi daha detaylı araştırılabilir ve silisyum karbür oranları değiştirilebilir.

- Bakır matrisli kompozit yapıya silisyum karbür yerine bor karbür gibi farklı bir takviye elemanı eklenip bu takviye elemanı üzerinden gümüşün etkisi daha detaylı araştırılabilir.
- Bakır matrisli kompozit malzemelerde farklı kaynak sıcaklıklarında ve farklı kaynak basınçlarında difüzyon kaynağı işlemi denenebilir.
- 120 dakikadan daha uzun kaynak süreleri için kaynak bağlantısının etkisi incelenebilir.
- Yapıdaki gözenekliliği azaltmak için presleme basıncı artırılabilir ya da sıcak presleme yöntemi kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- Abukhdair, O.F.M.,(2021). Soğuk preslenmiş ve sinterlenmiş metal matrisli silisyum karbür takviyeli kompozitlerin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu.
- Ada H., (2021). İleri Kaynak Teknikleri Ders Notları, *Kastamonu Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Kastamonu.
- Agarwal, B.D., Broutman, L.J.,(1980) Analysis and performance of fiber composites, *John Wiley & Sons*, A.B.D.
- Ahlatçı, H.,(2003). Alüminyum Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Akbulut, H., (1995). Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli Kompozit Üretimi ve Mikroyapı Özellik İlişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Akçamlı N., (2009), Germanyumun Gümüşün Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Akın, G., (2006). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Altuner, H.,(2011). Partikül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Difüzyonla Birleştirilmesi, Doktora Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Anık, S., (1991). ‘‘Gümüş Lehimleri’’, ‘‘ Kaynak Tekniği El Kitabı’’, s. 160, İstanbul..
- Atasoy E., Kahraman N., (2008). Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer. *Materials Characterization*. Volume 59, Issue 10, Pages 1481-1490, ISSN 1044-5803.
- Ataş A., (2003). Alaşımlı Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Aydın, K., Kaya, Y., Kahraman, N., Aydın, K., Kaya, Y., & Kahraman, N. (2012). Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper. *Materials and Design*, 37, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.026>
- Aydın, K., Lu, M. H. Ğ., Kaya, Y., & Kahraman, N. (2013). Titanyum Ve Bakır Malzemelerin Difüzyon Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin

Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 0. <https://doi.org/10.17341/gummfd.72464>

- Babayev, Y.,(2007). Bir Kompresör Gövdesi İmalatının Toz Metalurjisi ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Uygulanarak Optimizasyonu, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Balasubramanian M., (2015). Application of Box–Behnken design for fabrication of titanium alloy and 304 stainless steel joints with silver interlayer by diffusion bonding, *Materials & Design*, Volume 77, Pages 161-169, ISSN 0261-3069.
- Beytekin, D.,(2020). Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Al 6061 Matrisli Cüruf Takviyeli Kompozitin Kuru Kayma Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Bartın.
- Bilgin, B.,(2007). Ti-6Al-4V/304L Malzeme Çiftinin Bakır Aratabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Boushıha, K.F.I.,(2020). Toz Metalurjisi Yöntemi İle WC Takviyeli CUNİSİ Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu.
- Bulut, C., (2017), ‘‘Karbon Nanotüp Takviyeli Bakır Matrisli Kompozitlerin Yeni Bir Karıştırma Tekniğı ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu’’ Yüksek Lisans Tezi, s.1, *Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bingöl
- Ceyhun V., Uzkut M. ve Şahin S. (1996). Difüzyon kaynağı ve uygulamaları. *Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu*, 15-17 Mayıs, s. 178-186.
- Çalgılı, U. ve Taşkın, M., (2006). Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretilmiş AlSiMg-SiCp Takviyeli Kompozitlerin Difüzyon Kaynağında Basıncın Birleşme Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, *Metal Makine Dergisi*, Cilt:159, ss:526-530.
- Çalgılı, U.,( 2016). Ti6Al4V alaşımının gümüş aratabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği, *Mühendislik Dergisi*, Cilt: 7, Sayı:3, 577-586.
- Çelebi Efe, G. C., Yener, T., Altınoy, I., Ğpek, M., Zeytin, S., & Bindal, C., (2011). The effect of sintering temperature on some properties of Cu–SiC composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(20), 6036-6042.
- Çelebi Efe, G.F.,(2010). SiC Takviyeli İletken Bakır Kompozitlerin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Çelik, S., (1996)‘‘Koruyucu Gaz Altında Saf Alüminyum ve Bakırın Difüzyon Kaynağı Şartlarının Belirlenmesi’’, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Deng Y., Sheng G., Xu C., (2013). Evaluation of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure

silver interlayer, *Materials & Design*, Volume 46, Pages 84-87, ISSN 0261-3069.

- Doğan, M.,(2022). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen AlxCu Alaşımlarının Mikroyapı, Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş.
- Ekrami, M., Shahbazi Karami, J., Araee, A., Sharifianjazi, F., Sadeghi, E., & Moghanian, A. (2019). Fabrication of copper/stainless steel bimetallic couple, by diffusion bonding using silver and nickel foils as interlayers. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 49(5), 152–162. <https://doi.org/10.1080/24701556.2019.1597885>
- Elhemsheri, M.A.M.,(2022). Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş TM bakır esaslı Kompozit malzemelerin Mikroyapısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu.
- Ellis M.B.D, Gittos M.F., Threadgill P.L., (1994). Joining aluminium based metal matrix composites, *Materials World*; 2, (8), pp:415–417.
- Evcin, A., “Toz Üretim Teknikleri Ders Notları”, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon (2007).
- Fidan, L.,(2006). Saf Alüminyumun ve Saf Bakırın Difüzyon Kaynağında Arafazların Oluşumu ve Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- German, R. M., “Powder Metallurgy Science, Second Edition”, Metal Powder Industries Federation, Princeton. NJ. USA (1994).
- Gülan, F., (2018). Bakır Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bingöl.
- Gürü, M., Yalçın, H.,(2002). ‘‘ Malzeme Bilgisi’’, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Huda, M.D. and Hashmi, M.S.J., (1995). MMCs: Materials, Manufacturing and Mechanical Properties. 37-63, Metal Matrix Composites part I: *Application and Processing*, Hobbs The Printers Ltd., U.K.
- Hull, D., (1992). An Introduction to composite materials, *Cambridge University Press*, İngiltere, 71-79.
- Hull, D., Clyne, T.W., (1996). An introduction to composite materials, 2nd Edition, *Cambridge University Press*, İngiltere.
- Ibrahim, I.A., Mohammed F.A., and Lavernia E.J., (1991). Particulate reinforced metal matrix composites-a review, *Journal of Materials Science*, 26, 1137-1156

- Kalemtaş, A., (2014). “Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış”, *Putech&Composites*, 18-29
- Kara, R., Virdil, H., Çolak, F., ve Taşgetiren, S., (2006), ‘‘ Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilen Fe-Cu Çiftinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi’’, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 45-52, (2006).
- Karakaş, S., (2001). Effect of Magnesium on the Wear Behaviour of High Volume Fraction Alumina Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites, M.Sc. Thesis, *I.T.U Institute of Science and Technology*, İstanbul.
- Kejanlı, H., (2007). Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Ni-TiCu alaşımlarının sıvı faz difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Kısaöz, A.,(2018). Alüminyum Matrisli Titanyumdiborür İn Situ Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Koçak, H., (2006) Bakır alaşımları el kitabı, *yonca ajans- Ofset Matbaacılık*, III. Baskı, Yayın No:6.
- Koçer, T., (2002). Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC Partikül Takviyeli Al-Mg Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Köksal, F. (2004). Al-Cu-SiC Ve Al-Cu-B<sub>4</sub>C Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle İle Üretimi Ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Köksal, Ü.,(2021). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen W-Nb-V İlave Edilen Ni-Mo Çeliğine Sinterleme Süresinin Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük.
- Kumru, E.,(2007). Farklı Malzemelerin Sıcak Basınç Kaynağı İle Birleştirilmesinde İşlem Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Li, J., Han, Z., Xiong, J., Zhang, F. and Li, W.Y., (2009). ‘‘Study On Microstructure And Strength of AgNi Alloy/Pure Al Vacuum Diffusion Bonded Joints’’, *Materials and Design*, 30, 3265-3268.
- M. Paidar, K.S.Ashraff Ali, O.O.Ojo, V. Mohanavel, J. Vairamuthu, M. Ravichandran.(2021). Diffusion brazing of Inconel 617 and 321 stainless steel by using AMS 4772 Ag interlayer. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 61, Pages 383-395, ISSN 1526-6125.
- Mahendiran, G., Balasubramanian, V., & Sethilvelan, T. (2011). Mechanical and metallurgical properties of diffusion bonded AA2024 aluminium alloy and commercial grade copper. *Elixir International Journal*, 38, 4283–4289.

- Mahendran, G., Balasubramanian, V., & Senthilvelan, T.,(2010). Influences of diffusion bonding process parameters on bond characteristics of Mg-Cu dissimilar joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* (English Edition), 20(6), 997–1005. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60248-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60248-X)
- Mazumdar, S.K., (2002) Composites manufacturing: materials, product and process engineering, *CRC Press LLC*, A.B.D.
- Mingü, K., (2002), Alümina Esaslı Dökülebilir Refrakterlerin SiC ve C ilavesi ile geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Muratoğlu, M., O.Yılmaz, and M. Aksoy. 2006. —Investigation on Diffusion Bonding Characteristics of Aluminum Metal Matrix Composites (Al / SiCp) with Pure Aluminum for Different Heat Treatments. *Journal of Materials Processing Technology* 178 (1–3): 211–17.
- Ozan, S., Çalığülü, U., Taşkın, M., Gür, A.K., Dikbaş, H., Çay, V.V., (2006). Sıcak presleme yöntemiyle imal edilmiş SiCp takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin difüzyon kaynağında sıcaklığın birleşme üzerindeki etkisinin incelenmesi, *11. Uluslararası Denizli Malzeme Sempozyumu*, ss:233-236, Denizli.
- Ozan, S., Karaoğlu, S., İpek R., (2012). “Partikül Takviyeli Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozitlerin Difüzyon Kaynak Kabiliyetlerinin İncelenmesi,” *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt 53, sayı 630, s. 45-53
- Öğünç, H., (2006). Sıcak Presleme İle Sinterlenmiş  $\alpha$ -SiC Matriskli B4C Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Özsoy, S., (2023). Toz Metalurjisi yöntemi İle Üretilen Cu10Sn/B4C Kompozitlerin Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu.
- Pakdil, M.,(2001). Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmiş Ti- Alaşımlarının Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya.
- Qiang S., Huiying X., Meijuan L., Guoqiang L., Yiyu W., Chuanbin W., Lianmeng Z. (2015). Low Temperature Diffusion Bonding of Ti-6Al-4V to Oxygen Free Copper with High Bonding Strength Using Pure Ag Interlayer. *Rare Metal Materials and Engineering*, Volume 44, Issue 11, Pages 2607-2611, ISSN 1875-5372.
- Qiang S., Xiang H., Luo G., Wang C., Li M., Zhang L., (2014). Microstructure and mechanical properties of TC4/oxygen-free copper joint with silver interlayer prepared by diffusion bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 596, Pages 45-51, ISSN 0921-5093.
- Salehi, M.T., (1990). Isostatic Diffusion of Some Superplastic Alloys, PhD Thesis, *UMIST*, Manchester, UK.

- Sarıtaş, S., (1995).Engineering metallurgy and materials, Ankara, Türkiye, 5–30.
- Serier, B., Bouiadjra, B. B., Belhouari, M. and Treheux, D.,(2011). ‘‘Experimental Analysis Of The Strength Of Silver-Alumina Junction Elaborated At Solid State Bonding’’, *Materials&Design*, 32(7), 3750-3755.
- Shirzadi, A.A., Wallach, E.R., (1997). Temperature Gradient Transient Liquid Phase Diffusion Bonding: A New Method for Joining Advanced Materials, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2, 3, ss:89–94.
- Solakoğlu, S.,(2021). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Uçucu Kül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük
- Somani, N, Naman S, Aayushi S, Yash K. G, Paras K, & J. A. A. Solomon. (2018). —Fabrication of Cu-SiC Composites Using Powder Metallurgy Technique. *Materials Today: Proceedings* 5 (14): 28136–41.
- Söyler, M.,(2007). Toz Metalurji Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Srivatsan, T.S., Ibrahim, I.A., Mohammed, F.A. and Lavernia E.J., (1991). Processing techniques for particulate-reinforced metal aluminium matrix composites, *Journal of Materials Science*, 26, 5965-5978.
- Suresh Kumar, S., & Ravisankar, B. (2016). Destructive and non-destructive evaluation of copper diffusion bonds. *Journal of Manufacturing Processes*, 23, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.05.012>
- Şahin, B.,(2022). B4C Takviyeli CuAlNi Kompozitinin Karakterizasyon ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük.
- Şap, E.,(2020). Güçlendirilmiş Bakır Esaslı Kompozit Malzemelerin Mikroyapı ve Sertlik Özellikleri, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1): 590-598, 202, Iğdır.
- Takei, T., Hatta, H. ve Taya, M., (1991). “Thermal expansion behaviour of particulate–filled composites 1: Single and multi–reinforcing phases”, *Mat. Sci. Eng. A*, A131, 133- 143.
- Tanaka, H., (1991). Silicon Carbide Ceramics – 1, *Elsevier Applied Science*, New York, 231-238
- Taşkın, M., Çay, V. ve Özdemir, N., (2005). Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 430/Ç1010 Çelik Çiftinin Arayüzey Mikroyapı Değerlendirmesi, *Teknoloji Dergisi*, 8, 1, ss:65-70.

- Taşkın, M., Dikbaş, H. ve Çalığülü, U., (2006). TM Yöntemiyle Üretilmiş Nitinol Alaşımının Difüzyon Kaynağında Sürenin Birleşme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, *Metal Makine Dergisi*, 162, ss:428-431.
- Taşkın, M., Dikbaş, H., Çalığülü, U., Gür, A.K., Ozan, S., Çay, V.V., (2006). TM ile üretilmiş Nitinol alaşımının difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması, *11. Uluslararası Denizli Malzeme Sempozyumu*, ss:767-771, Denizli.
- Taşkın, M., Kejanlı, H., Fırat, E. Hanifi ve Çalığülü, U., (2008). T/M Yöntemiyle Üretilmiş Ni-Ti-Cu Alaşımlarının TLP Difüzyon Kaynağında Ni ve Cu Aratabaka Arasındaki Mikrosertlik Değerlerinin İstatistikî Olarak İncelenmesi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt:20(2), ss:379-388.
- Tolun, F.,(2013). Bakır ve Porselen Malzemelerin Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi ve Analizi, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Torun, O., Çelikyürek, İ. & Baksan, B. (2019). Ni75Al25 alaşımı ve 316 L paslanmaz çeliğin bakır ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı . *El-Cezeri* , 6 (3) , 517-524 .
- Torun, O.,(2019) Bakır/Gümüş Ara Tabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağıyla Birleştirilmiş AZ91 ve Al 2024 Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, *El-Cezeri*, Cilt: 5, No: 2, (467-474)
- Turan, E., (2004). Bor-Karbür-Silisyum karbür kompozitlerinin sıcak presleme ile elde edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Uraylı, Ç.,(2018). Cu-B4C Kompozit Malzemelerdeki Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu.
- URL-1, <http://rahmiunal.net/toz/tozkarakter/tozkarakter.html> (ziyaret tarihi, 04.10.2022)
- URL-2,<https://kar-tes.com.tr/blog/genel-bilgiler/toz-metalurjisi-nedir/>(ziyaret tarihi, 04.10.2022)
- Ülküseven R., (2019). Farklı Karbür Fazı İçeren Partikül Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Ünal O., (2011) Kompozit Malzemeler 6. Bölüm Ders Notları, *Kocaeli Üniversitesi*, Kocaeli
- Wang Y., Luo G., Zhang J., Shen Q., Zhang L., (2013). Microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded Mg–Al joints using silver film as interlayer,

*Materials Science and Engineering: A*, Volume 559, Pages 868-874, ISSN 0921-5093.

- Wanga, H., Rui, Z., Hua, X., Wang, C., (2008). Yong Huangb Laboratory of Material Physics of the Ministry of Education of China Zhengzhou University Henan 450002 PR China *The State Key Laboratory of New Ceramics and Fine Processing Tsinghua University Beijing* 100084 PR China 197: 43-48
- Yaman, S.,(2019). Eti Maden İşletmeleri Atık Barajlardaki Gümüşün Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya.
- Yıldırım, İ., (2003). Alumina ve silisyum karbür'ün mukavemet özellikleri üzerine üretim şartları ve bileşimin etkisi, Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Yıldırım, İ., Arpacı, A.,(2004) Basınçsız Sinterlenmiş SiC' de iç yapının kırılma tokluğuna etkisi, *İTÜ Mühendislik Dergisi*, Cilt 3, Sayı:1, s. 98-104.
- Yılmaz, O., (2001). Effect of welding parameters on diffusion bonding of type 304 stainless steel-copper bimetal. *Materials Science and Technology*, 17(8), 989–994. <https://doi.org/10.1179/026708301101510834>
- Yirik, A.G.,(2021). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen AISI 4340 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Sıcak Deformasyonun ve Soğutma Ortamının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük.
- Zhang, R., Gao, L., Guo, J., (2004). Effect of Cu<sub>2</sub>O on the fabrication of SiCp/Cu nanocomposites using coated particles and conventional sintering, *Composites*, 35, pp. 1301-1305.
- Zhang, X. P., Ye, L., Mai, Y. W., Quan, G. F., & Wei, W. (1999). Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCp-MMC). *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 30(12), 1415-1421.