

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİR / AISI 1040 ÇELİK  
ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAK YÖNTEMİYLE  
BİRLEŞTİRİLMESİ MİKROYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**MUSTAFA ÖZASLAN**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ADİYAMAN, 2019**

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

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİR / AISI 1040 ÇELİK  
ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ  
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**MUSTAFA ÖZASLAN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Bu tez 30/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından  
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Doç. Dr. Tanju TEKER**  
**Danışman**

**Doç. Dr. Turhan KURŞUN**  
**Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi Müslüm ALTUN**  
**Üye**

**Prof. Dr. Refet KARADAĞ**  
**Enstitü Müdürü**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

#### YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİR / AISI1040 ÇELİK ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MUSTAFA ÖZASLAN

Adıyaman Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Tanju TEKER  
Yıl : 2019, Sayfa sayısı: 105  
Jüri : Doç. Dr. Tanju TEKER  
: Doç. Dr. Turhan KURŞUN  
: Dr. Öğr. Üyesi Müslüm ALTUN

Temel olarak, kaynak işlemi, katı hal kaynak tekniği ve ergitmeli kaynak tekniği olarak iki gruba ayrılmaktadır. Ergitmeli kaynak yöntemlerinde kaynak ara yüzeyinde tam olarak bir ergime söz konusuyken, katı hal kaynak tekniğinde ise kısmi bir ergime söz konusudur. Kırılgan ve düşük ergime noktalı metallerin oluşumu, metalurjik uyumsuzluk, erime noktalarındaki büyük fark ve termal uyumsuzluk yüzünden metallerin birleştirilmesinde geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleri bazen uygun değildir. Katı hal birleştirme yöntemlerinden olan sürtünme kaynağı, benzer ve farklı malzemelerin birleştirilmesinde en etkili yöntemlerden biridir. Bu yöntemde malzemelerin birleşmesi işlemi, iki iş parçasının basınç ve nispi hareketinin kombine etkileri, bağlantı ara yüzünün ısıtılması ve malzemenin plastik deformasyonunu yoluyla elde edilir. Otomotiv ve havacılık sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tez üç bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci bölümünde; konu hakkında literatür araştırması verilmiştir. İkinci bölümde deneysel çalışmalar detaylı olarak sunulmuştur. Üçüncü bölümde ise deney sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada; AISI1040 çeliği ile yüksek kromlu beyaz dökme demir, farklı devir sayıları kullanılarak sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynak ara yüzeyinde meydana gelen değişimler; Optik Mikroskop (OM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS), X-Işını Kırınımı (XRD) ve Mikrosertlik analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca kaynaklı bağlantıların mekanik dayanımını belirlemek için çekme testi yapılmıştır. Çekme testi sonrası kırılma yüzey morfolojisi SEM, EDS ve haritalandırma analizleriyle incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek kromlu beyaz dökme demir; AISI 1040; Sürtünme kaynak yöntemi; Mekanik özellikler.

## ABSTRACT

### MSc THESIS

#### THE INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON / AISI1040 STEEL COUPLE WELDED BY FRICTION WELDING METHOD

MUSTAFA ÖZASLAN

Adiyaman University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Metallurgical and Material Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tanju TEKER  
Year : 2019, Number of pages: 105  
Jury : Assoc. Prof. Dr. Tanju TEKER  
: Assoc. Prof. Dr. Turhan KURŞUN  
: Assist. Prof. Dr. Müslüm ALTUN

Basically, welding processes are divided into two groups as solid-state welding and fusion welding. In the fusion welding technique, there is a full melting in the weld interface while there is a partial melting in the solid-state welding technique. The traditional melting welding methods for joining metals are sometimes unsuitable due to the formation of brittle and low melting metals, metallurgical incompatibility, large differences in melting points, and thermal mismatch. Friction welding which is a solid-state joining process is one of the most effective processes for joining similar and dissimilar materials. In this method, the combination of materials is achieved by the combined effects of the pressure and relative movement of the two workpieces, by heating the connection weld interface and by plastic deformation of the material. It is widely used in the automotive and aerospace industrial applications.

The thesis consists of three parts; in the first part, a literature searches on the subject are given. In the second part, experimental studies are presented in detail. In the third part, experimental results are given. In this study; AISI1040 steel and high chromium white cast iron were welded with friction welding method by using different rotational speeds. Structural changes in the weld interface were examined by Optical Microscope (OM), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Distribution Spectrometer (EDS), X-Ray Diffraction (XRD) and microhardness analysis. In addition, tensile tests were performed to determine the mechanical strength of welded joints. Fracture surface morphology was analyzed by SEM, EDS and mapping.

**Key Words:** High-chromium white cast iron; AISI1040; Friction welding process; Mechanical properties.



## **DESTEKLER**

Bu tez çalışması, ADYÜBAP tarafından MÜFYL/2018-0001 numaralı proje ile desteklenmiştir.



## BEYAN

“Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demir / AISI1040 Çelik Çiftinin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı tezimde çalışmaların tamamen akademik kurallara ve etik değerlere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

Mustafa ÖZASLAN

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında ve uygulanmasında geniş bilgi birikimlerinden yararlandığım Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Tanju TEKER'e, projenin gerçekleştirilmesinde maddi destek sağlayan Adıyaman Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar ve Proje Birimi'ne (ADYÜBAP), küçük sanayi sitesinde faaliyet gösteren Ergül Torna Firmasına, Arş. Gör. Eyyüp Murat KARAKURT'a Teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her anında yanımda olan aileme ve en zor zamanlarımda yardımını her zaman hissettiğim, eşim ve canım oğlum Ömer'e teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| ÖZET.....                                                       | I   |
| ABSTRACT.....                                                   | II  |
| DESTEKLER.....                                                  | III |
| BEYAN.....                                                      | IV  |
| TEŞEKKÜR.....                                                   | V   |
| İÇİNDEKİLER .....                                               | VI  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                         | IX  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                            | X   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                    | XII |
| 1. GİRİŞ .....                                                  | 1   |
| 1.1. Kaynağın Tanımı .....                                      | 1   |
| 1.2. Ergitmeli Yöntemler .....                                  | 2   |
| 1.3. Katı Hal Kaynak Yöntemleri.....                            | 2   |
| 1.4. Sürtünme Kaynağı.....                                      | 3   |
| 1.4.1. Sürtünme Kaynak Çeşitleri .....                          | 5   |
| 1.4.1.1. Dairesel Hareketli Sürtünme Kaynağı .....              | 6   |
| 1.4.1.2. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı .....                | 6   |
| 1.4.1.3. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı .....                  | 7   |
| 1.4.1.4. Orbital Sürtünme Kaynağı .....                         | 8   |
| 1.4.2. Sürtünme Kaynak Mekanizması .....                        | 8   |
| 1.4.2.1. Sürtünme Aşaması .....                                 | 8   |
| 1.4.2.2. Yığma Aşaması .....                                    | 9   |
| 1.4.3. Sürtünme Kaynak Parametreleri .....                      | 9   |
| 1.4.3.1. Dönme Hızı (Çevresel Hız).....                         | 10  |
| 1.4.3.2. Yığma Basıncı.....                                     | 10  |
| 1.4.3.3. Sürtünme Süresi .....                                  | 11  |
| 1.4.3.4. Yığma Süresi.....                                      | 11  |
| 1.4.3.5. Sürtünme Basıncı .....                                 | 11  |
| 1.4.4. Sürtünme Kaynağında Isı Üretimi.....                     | 12  |
| 1.4.5. Sürtünme Kaynağı ile Yapılabilen Parça Geometrilere..... | 13  |
| 1.4.6. Benzer ve Farklı Metaller İçin Sürtünme Kaynağı .....    | 15  |
| 1.4.7. Sürtünme Kaynak Sonrası Meydana Gelen Mikroyapı.....     | 15  |
| 1.4.8. Farklı Cins Metallerin Sürtünme Kaynağı .....            | 16  |
| 1.4.8.1. Alüminyum Alaşımları .....                             | 17  |
| 1.4.8.2. Çelik Alaşımları .....                                 | 17  |
| 1.4.8.3. Bakır Alaşımları .....                                 | 18  |
| 1.4.9. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları .....              | 18  |
| 1.4.9.1. Kesme ve Delme Takım Endüstrisi .....                  | 18  |
| 1.4.9.2. Hidrolik Endüstrisi .....                              | 19  |
| 1.4.9.3. Elektronik ve Elektroteknik Endüstrisi .....           | 19  |
| 1.4.9.4. Makine İmalatı ve Hidroelektrik Endüstrisi.....        | 19  |
| 1.4.9.5. Otomotiv Endüstrisi .....                              | 20  |
| 1.4.10. Sürtünme Kaynağının Avantajları.....                    | 21  |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.11. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları .....                                                                                   | 22 |
| 1.5. Karbon Çelikler .....                                                                                                         | 23 |
| 1.5.1. Karbonlu Çeliklerin sınıflandırılması.....                                                                                  | 24 |
| 1.5.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler .....                                                                                             | 24 |
| 1.5.1.2. Orta Karbonlu Çelikler.....                                                                                               | 24 |
| 1.5.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler.....                                                                                             | 24 |
| 1.6. Dökme Demirler .....                                                                                                          | 25 |
| 1.6.1. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.....                                                                                     | 25 |
| 1.6.1.1. Beyaz Dökme Demir.....                                                                                                    | 26 |
| 1.6.1.2. Gri Dökme Demir .....                                                                                                     | 26 |
| 1.6.1.3. Temper Dökme Demir .....                                                                                                  | 27 |
| 1.6.1.4. Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) .....                                                                                 | 27 |
| 1.6.1.5. Yüksek Alaşımlı Dökme Demirler.....                                                                                       | 27 |
| 1.7. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirler .....                                                                                      | 28 |
| 1.7.1. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Özellikleri.....                                                                       | 28 |
| 1.7.1.1. Fiziksel Özellikler .....                                                                                                 | 28 |
| 1.7.1.2. Mekanik Özellikler.....                                                                                                   | 28 |
| 1.7.1.3. Manyetik Özellikler .....                                                                                                 | 29 |
| 1.7.1.4. Mikroyapı.....                                                                                                            | 29 |
| 1.7.1.5. Karbürler .....                                                                                                           | 29 |
| 1.7.1.6. Matris .....                                                                                                              | 31 |
| 1.7.2. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Uygulama Alanları .....                                                                | 32 |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....                                                                                                          | 33 |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                                                                                       | 35 |
| 3.1. Çalışmanın Amacı .....                                                                                                        | 35 |
| 3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....                                                                             | 35 |
| 3.3. Sürtünme Kaynak İşlemi Öncesi Deney Numunelerinin Hazırlanması .....                                                          | 36 |
| 3.4. Sürtünme Kaynak İşlemi .....                                                                                                  | 37 |
| 3.5. Metalografik İncelemeler .....                                                                                                | 38 |
| 3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve Elementel Haritalandırma (Mapping) Analizleri..... | 40 |
| 3.7. Yüzey XRD Analizleri .....                                                                                                    | 41 |
| 3.8. Mikrosertlik Ölçümü Analizi .....                                                                                             | 41 |
| 3.9. Çekme Testi Analizi .....                                                                                                     | 42 |
| 3.10. Kırık Yüzey Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....                                                                  | 44 |
| 4. DENEY SONUÇLARI .....                                                                                                           | 45 |
| 4.1. Deney Numunelerinin Makroyapı Değerlendirmesi .....                                                                           | 45 |
| 4.2. Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Analizleri.....                                                                              | 48 |
| 4.3. EDS Analiz Sonuçları .....                                                                                                    | 62 |
| 4.4. Mikrosertlik Sonuçları.....                                                                                                   | 78 |
| 4.5. XRD Test Sonuçları .....                                                                                                      | 80 |
| 4.6. Çekme Testi Sonuçları .....                                                                                                   | 83 |
| 4.7. Elementel Haritalandırma (Mapping) Analiz Sonuçları .....                                                                     | 84 |
| 4.8. Kırık Yüzey İncelemesi.....                                                                                                   | 91 |
| 4.9. Kırık Yüzey Elementel Haritalandırma Analizi.....                                                                             | 93 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                                                                         | 99 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| KAYNAKLAR .....        | 101 |
| KİŞİSEL BİLGİLER ..... | 105 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 1.1 Malzemelere göre optimum kaynak parametreleri .....                                                      | 12 |
| Çizelge 1.2 Sürtünme kaynaklı malzeme ve malzeme kombinasyonları.....                                                | 21 |
| Çizelge 1.3 Dökme demirlerin sahip olduğu kimyasal kompozisyon aralıkları .....                                      | 26 |
| Çizelge 1.4 Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapılarında bulunması<br>muhtemel karbürlerin sertlikleri..... | 29 |
| Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi .....                                               | 36 |
| Çizelge 3.2 Sürtünme kaynak yöntemiyle yapılan birleştirme işleminin parametreleri<br>.....                          | 38 |
| Çizelge 4.1 Kaynak parametrelerine göre boyca kısalma miktarları .....                                               | 48 |
| Çizelge 4.2 S1 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 63 |
| Çizelge 4.3 S1 no'lu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 64 |
| Çizelge 4.4 S1 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 65 |
| Çizelge 4.5 S1 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 65 |
| Çizelge 4.6 S2 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 66 |
| Çizelge 4.7 S2 no'lu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 67 |
| Çizelge 4.8 S2 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 68 |
| Çizelge 4.9 S2 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 68 |
| Çizelge 4.10 S3 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 69 |
| Çizelge 4.11 S3 no'lu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 70 |
| Çizelge 4.12 S3 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 71 |
| Çizelge 4.13 S3 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 71 |
| Çizelge 4.14 S4 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 72 |
| Çizelge 4.15 S4 nolu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                    | 73 |
| Çizelge 4.16 S4 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 74 |
| Çizelge 4.17 S4 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 74 |
| Çizelge 4.18 S5 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 75 |
| Çizelge 4.19 S5 no'lu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 76 |
| Çizelge 4.20 S5 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 77 |
| Çizelge 4.21 S5 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları.....                                                   | 77 |
| Çizelge 4.22 S1-S5 numunelerinin elementer % ağırlık sonuçları .....                                                 | 78 |
| Çizelge 4.23 S1 numunesinin X-Işını analiz sonuçları .....                                                           | 81 |
| Çizelge 4.24 S3 numunesinin X-Işını analiz sonuçları .....                                                           | 82 |
| Çizelge 4.25 S5 numunesinin X-Işını analiz sonuçları .....                                                           | 82 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 Sürtünme kaynağı mekanizması .....                                                                         | 4  |
| Şekil 1.2 Sürtünme kaynağı için ara yüzey üzerinden ısı üretimi karşılaştırması<br>siyah oklarla gösterilmiştir..... | 6  |
| Şekil 1.3 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı parametre özellikleri.....                                               | 7  |
| Şekil 1.4 Volan tahrikli sürtünme kaynağı parametre özellikleri .....                                                | 7  |
| Şekil 1.5 Sürtünme kaynak yöntemi birleştirilebilecek parça geometrileri .....                                       | 14 |
| Şekil 1.6 Hidrolik Silindir .....                                                                                    | 19 |
| Şekil 1.7 Havacılık ve Uzay Endüstrisi.....                                                                          | 20 |
| Şekil 1.8 Otomotiv Endüstrisi .....                                                                                  | 21 |
| Şekil 1.9 Karbür miktarındaki artış ile sertlik arasındaki ilişki gösteren grafik .....                              | 30 |
| Şekil 1.10 Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom ve karbon oranı arasındaki<br>ilişki.....                       | 30 |
| Şekil 1.11 Yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısındaki .....                                                  | 31 |
| Şekil 3.1 Tornalamada kullanılan bilgisayar kontrollü CNC torna tezgâhı .....                                        | 36 |
| Şekil 3.2 Sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilecek numunelerin şematik<br>görünümü ve ölçüleri.....                | 37 |
| Şekil 3.3 Sürtünme kaynak makinası .....                                                                             | 37 |
| Şekil 3.4 Zımparalama ve parlatma makinesi .....                                                                     | 39 |
| Şekil 3.5 Metalografik incelemeler için hazırlanan numune boyutları .....                                            | 39 |
| Şekil 3.6 Optik mikroskop .....                                                                                      | 40 |
| Şekil 3.7 Deneylerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM).....                                              | 40 |
| Şekil 3.8 XRD cihazı.....                                                                                            | 41 |
| Şekil 3.9 Mikrosertlik analiz noktalarının kaynaklı bağlantı üzerindeki şematik<br>görünümü .....                    | 42 |
| Şekil 3.10 Mikrosertlik test cihazı .....                                                                            | 42 |
| Şekil 3.11 Deneylerde kullanılan çekme-basma test cihazı .....                                                       | 43 |
| Şekil 3.12 ASTM E-8M-04 standartlara uygun çekme test numunesi şematiği .....                                        | 43 |
| Şekil 3.13 Çekme test numuneleri .....                                                                               | 43 |
| Şekil 4.1 Deney numunelerinin makro görüntüsü .....                                                                  | 46 |
| Şekil 4.2 Termomekanik etkileşim altında kalmış bölgelerin görünümü .....                                            | 46 |
| Şekil 4.3 Sürtünme kaynak sonrası kaynaklı numunelerin arayüzey görünümü .....                                       | 47 |
| Şekil 4.4 Deney numunelerinin flanş geometrisi ve boyca kısalma miktarına ait<br>özellikler.....                     | 48 |
| Şekil 4.5 AISI1040 çeliğinin mikroyapı fotoğrafı .....                                                               | 49 |
| Şekil 4.6 YKBDD'nin mikroyapı fotoğrafı .....                                                                        | 50 |
| Şekil 4.7 S1 no'lu numunenin optik resimleri .....                                                                   | 52 |
| Şekil 4.8 S2 no'lu numunenin optik resimleri .....                                                                   | 53 |
| Şekil 4.9 S3 no'lu numunenin optik resimleri .....                                                                   | 54 |
| Şekil 4.10 S4 no'lu numunenin optik resimleri .....                                                                  | 55 |
| Şekil 4.11 S5 no'lu numunenin optik resimleri .....                                                                  | 56 |
| Şekil 4.12 S1 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü.....                                                               | 57 |
| Şekil 4.13 S2 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü.....                                                               | 58 |
| Şekil 4.14 S3 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü.....                                                               | 59 |



|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.15 S4 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü .....                                                                   | 60 |
| Şekil 4.16 S5 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü .....                                                                   | 61 |
| Şekil 4.17 S1 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları .....                                                                  | 65 |
| Şekil 4.18 S2 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları .....                                                                  | 68 |
| Şekil 4.19 S3 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları. ....                                                                  | 71 |
| Şekil 4.20 S4 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları. ....                                                                  | 74 |
| Şekil 4.21 S5 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları .....                                                                  | 77 |
| Şekil 4.22 S1-S5 no'lu kaynaklı bağlantılara ait mikrosertlik sonuçları .....                                             | 80 |
| Şekil 4.23 S1 Numunesinin X-Işını analiz grafiği .....                                                                    | 81 |
| Şekil 4.24 S3 Numunesinin X-Işını analiz grafiği .....                                                                    | 81 |
| Şekil 4.25 S5 Numunesinin X-Işını analiz grafiği .....                                                                    | 82 |
| Şekil 4.26 S1-S5 kaynaklı bağlantılara ait çekme test numunelerinin çekme testi sonrası makro fotoğrafları .....          | 84 |
| Şekil 4.27 S1 numunesinin kaynak metali elementel haritalandırma analiz sonuçları .....                                   | 85 |
| Şekil 4.28 S1 numunesinin AISI1040 tarafı elementel haritalandırma analiz sonuçları .....                                 | 86 |
| Şekil 4.29 S1 numunesinin YKBDD tarafı elementel haritalandırma analiz sonuçları .....                                    | 87 |
| Şekil 4.30 S5 numunesinin kaynak metali elementel haritalandırma analiz sonuçları .....                                   | 88 |
| Şekil 4.31 S5 numunesinin AISI1040 tarafı elementel haritalandırma analiz sonuçları .....                                 | 89 |
| Şekil 4.32 S5 numunesinin YKBDD tarafı elementel haritalandırma analiz sonuçları .....                                    | 90 |
| Şekil 4.33 S1 numunenin AISI1040 tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı .....                                                   | 91 |
| Şekil 4.34 S1 numunenin YKBDD tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı .....                                                      | 91 |
| Şekil 4.35 S3 numunenin AISI1040 tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı .....                                                   | 92 |
| Şekil 4.36 S3 numunenin YKBDD tarafı kırık yüzey incelemesi .....                                                         | 92 |
| Şekil 4.37 S5 numunenin AISI1040 tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı .....                                                   | 93 |
| Şekil 4.38 S5 numunenin YKBDD tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı .....                                                      | 93 |
| Şekil 4.39 S1 numunesinin çekme testi sonrası YKBDD tarafı kırık yüzey elementel haritalandırma analiz sonuçları .....    | 95 |
| Şekil 4.40 S1 numunesinin çekme testi sonrası AISI1040 tarafı kırık yüzey elementel haritalandırma analiz sonuçları ..... | 96 |
| Şekil 4.41 S5 numunesinin çekme testi sonrası YKBDD tarafı kırık yüzey elementel haritalandırma analiz sonuçları .....    | 97 |
| Şekil 4.42 S5 numunesinin çekme testi sonrası AISI1040 tarafı kırık yüzey elementel haritalandırma analiz sonuçları ..... | 98 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|             |                                    |
|-------------|------------------------------------|
| $C_{eş}$    | : Karbon eşdeğeri                  |
| $F$         | : İtme kuvveti                     |
| $HV$        | : Vickers sertlik ölçümü           |
| $mm$        | : Milimetre                        |
| $N$         | : Newton                           |
| $Q$         | : Toplam ısı girdisi               |
| $Q_1$       | : Sürtünme kaynaklı ısı girdisi    |
| $Q_2$       | : Deformasyon kaynaklı ısı girdisi |
| $r$         | : Kaynaklanan parçanın yarıçapı    |
| $t$         | : Zaman                            |
| $^{\circ}C$ | : Santigrat derece                 |
| $\lambda$   | : Dalga boyu                       |
| $\mu$       | : Mikron                           |
| $\mu m$     | : Mikrometre                       |

### Kısaltmalar

|       |                                              |
|-------|----------------------------------------------|
| AISI  | : American Iron and Steel Institute          |
| ASTM  | : American Society for Testing and Materials |
| YKBDD | : Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demir            |
| XRD   | : X-Ray Diffraction                          |
| EDS   | : Energy Dispersive Spectroscopy             |
| SEM   | : Scanning Electron Microscope               |
| ITAB  | : Isının Tesiri Altında Kalan Bölge          |
| OM    | : Optik Mikroskop                            |

## **1. GİRİŞ**

Metallerin insanoğlu için ayrı bir yeri vardır. Bununla beraber ilk metal eldesinin nasıl olduğu günümüzde hala sırrını korumaktadır. Metallerin kullanımı çok eski dönemlere kadar dayanmaktadır (örneğin bronz çağı). Eski çağlarda kullanılan birçok araç gereç metallerin eritilmesi yoluyla üretilmiştir. Bu durum ise arkeolojik bulgulardan anlaşılmaktadır. Metallerin kullanıldıkları çağlara adını vermesi, metallere verilen önemin vurgusunu göstermektedir. Farklı tür metallerin birleştirilmesi durumu çok sonraları ortaya çıkmıştır. Daha sonraları ise karmaşık ve kompleks şekilli parçaların üretimi gerçekleşmiştir. 19. yüzyılın sonlarında, cıvatalama, perçinleme, lehimleme ve kaynaklama gibi farklı birleştirme yöntemleri icat edilmiştir. Bu icatların ortaya çıkışı, endüstriyel devrimin temelini meydana getirir. Günümüzde ise çok daha farklı birleştirme metotları geliştirilmiştir. Burada önemli olan nokta şudur; en optimum malzemeler için en optimum birleştirme tekniğinin seçilmesidir. Çünkü seçilen her yöntemin kendi içerisinde farklı farklı avantajları ve dezavantajları vardır. En başta maliyet olmak üzere mukavemet, korozyon dayanımı ve dış görünüş gibi hususlar, seçilen birleştirme tekniğini değiştirmektedir. Bu sebeple seçilen birleştirme tekniği, malzemeler üzerinde önemli bir paya sahiptir [1].

### **1.1. Kaynağın Tanımı**

Farklı ve/veya aynı metal olan veya olmayan (termoplastik) malzemeleri sıcaklık ve basınç altında birleştirme tekniğine kaynak denir. Kaynak edilecek parçaların birleşme bölgesinde ergime oluşturulup, bazen ilave metal kullanılarak veya kullanılmayarak birleşme gerçekleşir. Bu teknikteki esas parametre sıcaklık ve basınçtır. Bu yönüyle lehimleme yönteminden farklıdır. Çünkü lehimleme yönteminde birleşme daha düşük sıcaklıklarda meydana gelirken, iş parçalarının birleşme bölgesinde ergime meydana gelmez.

Kaynak işlemlerinde farklı enerji kaynakları mevcuttur. Ayrıca, farklı atmosfer ortamlarında (inert gaz ortamı, açık hava, uzay ortamı gibi) kaynak işlemi

yapılabilir. Kaynak işlemi yapılırken oluşabilecek bazı olumsuz durumlar yaşanabilir. Kaynak ışınlarının gözü alması, zehirli gazları soluma, elektrik çarpması örnek olarak söylenebilir. Bu olumsuz durumlara karşı önceden tedbir almak çok önemlidir.

## **1.2. Ergitmeli Yöntemler**

Kaynak işlemi gerçekleşirken, kaynak birleşme noktasında meydana gelen sıcaklık kaynak edilecek parçaların ergime noktasından daha büyük olması nedeniyle bu bölgede tam bir ergime meydana gelir. Bu yöntem ismini buradan alır [2].

Bu yöntem farklı alt gruplara ayrılmaktadır.

- Özlü telle ark kaynağı,
- Plazma kaynağı,
- Elektron ışın kaynağı,
- Elektrik ark kaynağı,
- Toz altı kaynağı,
- Lazer kaynağı,
- Oksi-gaz kaynağı,
- Elektrik direnç kaynağı,
- Gaz altı kaynağı tekniğidir.

## **1.3. Katı Hal Kaynak Yöntemleri**

Bu yöntem, basınç kaynağı olarak ta bilinir. Kaynak ara yüzeyinde basınç yoluyla elde edilen birleşme türüdür. Kaynak ara yüzeyinde kaynak edilecek parçaların ergime noktasından daha düşüktür. Bu yüzden birleşme bölgesinde tam bir ergime meydana gerçekleşmez. Kaynak edilecek parçaların temas bölgelerinin temizliği çok önemlidir. Bu sebeple kir, pas ve oksit tabakaların temizliği dikkatli bir biçimde yapılmalıdır. Ancak bu şekilde sağlam bir metalurjik bağın oluşması elde edilebilir. Bu yüzden kaynak edilecek parçaların temas bölgelerinin temizliği çok önemlidir [3,4].

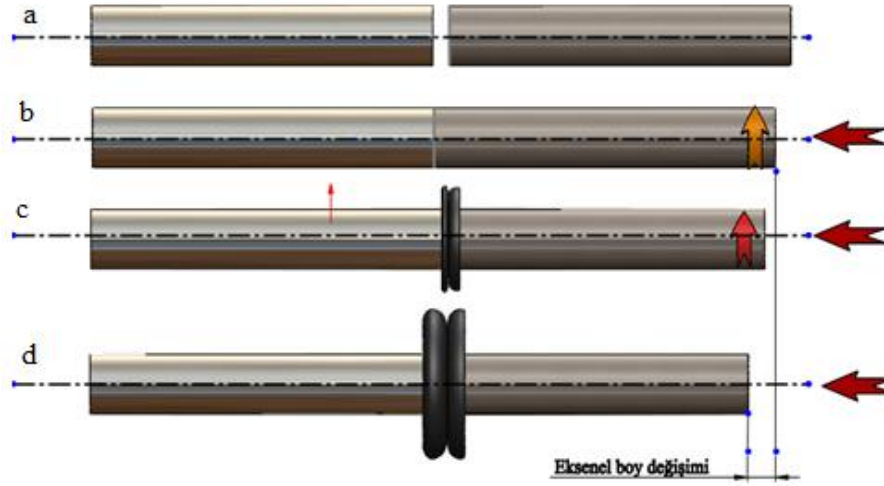
Bu yöntem farklı alt gruplara ayrılmaktadır.

- Sürtünme kaynağı,
- Patlamalı kaynağı,
- Soğuk basınç kaynağı,
- Difüzyon kaynağı,
- Ultrasonik kaynağı,
- Sürtünme karıştırma kaynağı tekniğidir.

#### **1.4. Sürtünme Kaynağı**

Sürtünme kaynak yöntemi, katı hal kaynak tekniklerinden biri olarak bilinir. Bu yöntemin ilk patenti 1890 yılında Bevington tarafından alınmıştır. Bunun yanında 1940'lı yıllarda plastik malzemelerin birleştirme yöntemi için, spin kaynağı da kayıtlara geçmiştir. Bu yöntemin ilerlemesi, Sovyet Rusya döneminde önemli boyutlara ulaşmıştır. 1956'larda ise İngiltere ve ABD tarafından da çalışılmıştır. Bahsi geçen ülkelerin araştırmaları, kaynağın mekanizması, etkileyen parametreleri, oluşan deformasyon türleri gibi özelliklerin üzerinde odaklanır.

Sürtünme kaynağında kaynak edilecek parçaların biri sabit iken, diğeri hareketli olan parça temas ettirildiğinde temas bölgelerinde oluşan ısı ve basınçtan dolayı birleşme meydana gelir. Birleşme bölgesinde plastik deformasyondan dolayı, flanş oluşumu gözlemlenir. Ayrıca, birleşme bölgesinde ince bir film oluşumu meydana gelir. Bununla birlikte bu film oluşumu sonrası bile, tam bir ergime yine de gözlemlenmez. Bu işlem için herhangi bir koruyucu gaz ve ilave metal kullanılmaz. Bu işlemin temel adımları Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1 Sürtünme kaynağının mekanizması

Parçaların birleştirilmesi sırasında tam olarak ergime olayı gerçekleşmediği ve ilave malzeme kullanılmadığı için bu yöntem bir kaynak işleminden daha çok, dövme işlemine benzemektedir. Kaynak ergime havuzu oluşmadığı için malzemede tane büyümesi büyük oranda oluşmaz. Tam tersi ince taneli bir mikroyapı oluşur. Hall-Petch denkleminde de belirtildiği gibi, bu ince taneli mikroyapı, malzeme üzerinde gevrekleşmeye neden olmaz. Hali hazırda esas malzeme dayanımından yüksek bir değere sahip olur. Temas eden yüzeylerin sıcaklıkların meydana getirdiği plastik deformasyonlar sayesinde daha kuvvetli bir yapıya bürünür [20]. Sürtünme sonrası eksenel basıncının etkisiyle dışarı taşması, yığılma fazının bir sonucudur. Bu dışarı taşan malzeme; sürtünme ısısı tarafından mikroyapısında değişiklik olan kısımlar olduğu için dar bir ITAB alanı meydana gelir. Sürtünme kaynağı, belli başlı aşamalardan oluşmaktadır. İlk aşamada; iki parça birbirine değdikten sonra, birleştirilecek parçaların karşılıklı bakan ara yüzlerinde sürtünme olayı gerçekleşmeye başladıktan sonra başlar. Bu aşamada hareketli parçanın açısal hızı (çevresel hız) sabit tutulurken, ayrıca sürtünme sırasında parçalar arasında metalurjik bağın oluşması için sürtünme kuvveti uygulanır. Böylelikle temas eden parçalar arasında madde geçişlerine izin verilerek bağ kurulmasına izin verilir. Bu esnada parçaların temas yüzeyleri arasında lokal birleşmeler meydana gelir ve sürtünme

hareketinin devam etmesinden dolayı kaynak olan parçalar tekrar kopar. Bu lokal birleşmeler ve ayrılmalar sürtünme hareketi devam ettiği sürece devam eder. Bu aşamada, tork değeri maksimum değere ulaşır.

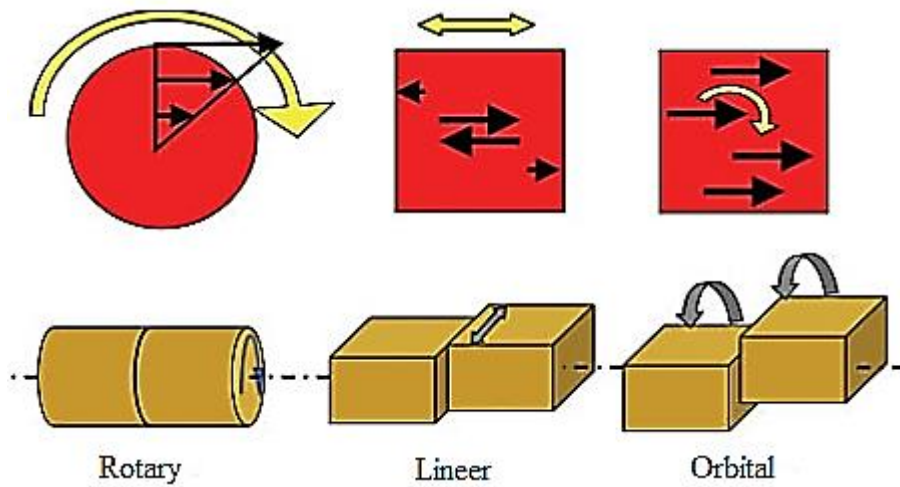
#### 1.4.1. Sürtünme Kaynak Çeşitleri

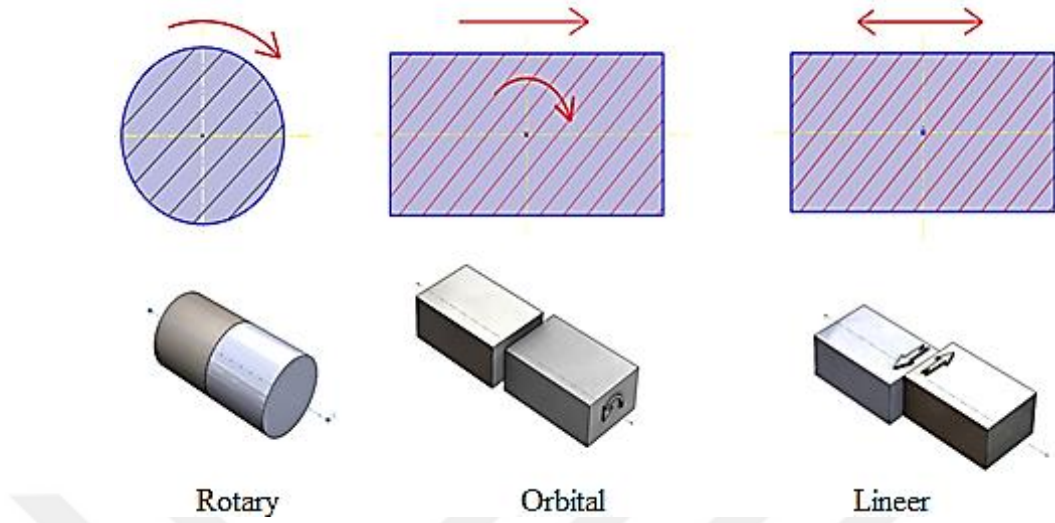
Lineer sürtünme kaynak tekniği, kombine sürtünme kaynak tekniği, sürekli sürtünme kaynak tekniği ve volan tahrikli sürtünme kaynak tekniği, sürtünme kaynağının alt sınıflarıdır (Şekil 1.2) [14-18].

Lineer sürtünme kaynak tekniği; çevresel hız yerine ileri geri lineer hareketler kullanılarak birleşme sağlanır. Makine tasarımı oldukça pahalı ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu işlemin yapılabilmesi için kaynak yapılacak parçaların dairesel simetriye sahip olması gerekmez.

Orbital sürtünme kaynak tekniği; sürekli sürtünme kaynak tekniği ile atelet kaynak tekniğinin kombine edilmiş hali olarak bilinir. Kaynak edilecek parçalar büyük olursa, tercih edilen bir işlemdir.

Rotary tahrikli sürtünme kaynak tekniği; bu kaynak tekniği için belli bir hızla sahip bir volan kullanılır. Bu teknikte gelişmiş olan uçak ve uzay araştırmaları için kullanılan malzeme grupları kaynak edilebilir [17].





Şekil 1.2 Sürtünme kaynağı için ara yüzey üzerinden ısı üretimi karşılaştırması siyah oklarla gösterilmiştir

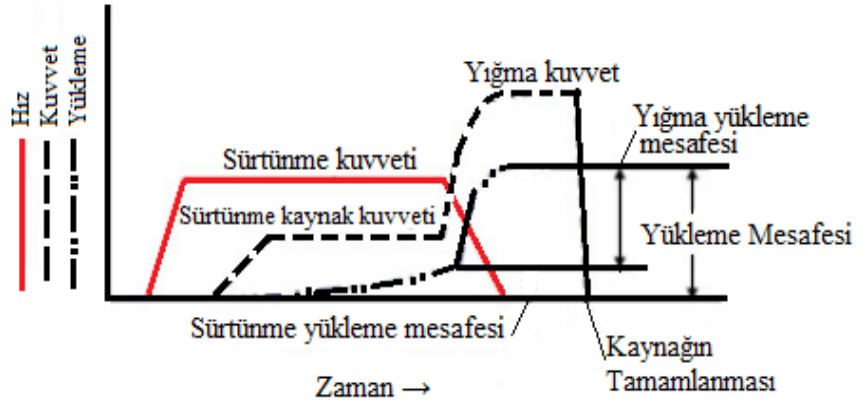
#### 1.4.1.1. Dairesel Hareketli Sürtünme Kaynağı

Makine aksamlarının üretiminde kullanılan bir yöntemdir [16]. Çoğu zaman sürtünme kaynağı denildiğinde akla ilk gelen yöntem, dairesel hareketli sürtünme kaynak tekniği olarak bilinir. Dönme enerjisi dışardan bir volan tarafından sağlanır, hemen ardından frenleme ile sona erer.

#### 1.4.1.2. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Yeni nesil malzeme gruplarının ve süper alaşımların birleştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Arada oluşan metalurjik bağın karakteristiği kullanılan malzeme çiftine göre değişebilmektedir [19]. Sürekli tahrik sürtünme kaynak tekniğinde kaynak parametrelerinin karakteristikleri arasındaki bağlantı Şekil 1.3'de verilmiştir.

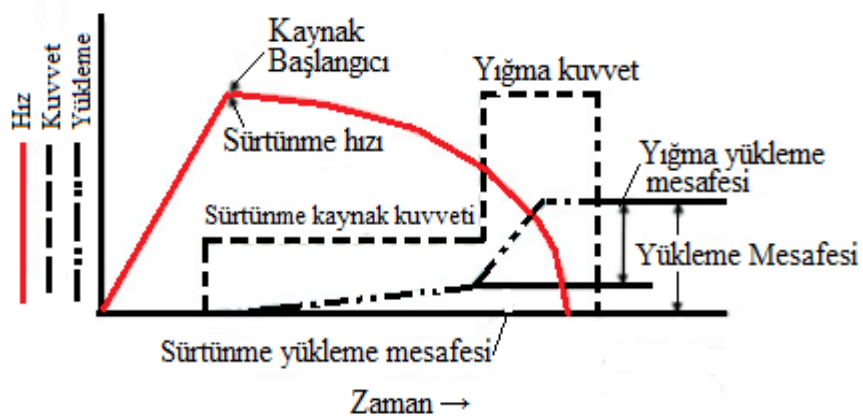




Şekil 1.3 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı parametre özellikleri

#### 1.4.1.3. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Belirli bir dairesel kesite sahip olamayan parçaların birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntem olarak bilinir [20]. Kaynak edilecek parçalardan biri volana bağlanır diğeri döndürülerek yaklaştırılır [15-22]. Burada kullanılan harici enerji kaynağı volan tarafından sağlanır. Sürtünme tarafından kaynak ara yüzeyinde sıcaklık artışı meydana gelir. Volan tarafından sağlanan enerji dönme hareketiyle temas bölgelerinde eşit derecede yayılır [16, 23]. Bu bağlamda döndürme, ara yüzeyde ince bir film tabakası oluşana kadar devam eder. Bu kaynak tekniğinin parametreleriyle arasındaki bağlantıyı gösteren şekil, Şekil 1.4’de verilmiştir.



Şekil 1.4 Volan tahrikli sürtünme kaynağı parametre özellikleri [14,15]

**1.4.1.4. Orbital Sürtünme Kaynağı**

Daha çok dairesel olmayan makine parçalarının birleştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir [14]. Bu kaynak tekniğinin sürekli tahrikli sürtünme kaynağından farklı olarak tam olarak merkez eksen etrafından dönme gerçekleşmez. Pratik olarak sağlam metalurjik bağların oluşması sürtünme enerjisinin farklı şekilde kaynak edilecek parçalara transferi önemlidir. Bu durumun kaynak kalitesi üzerinde önemli bir yere sahiptir. Kaynak bölgesinde ortaya çıkan ısı, ısı tesiri altında bölgenin genişliğini de etkilemektedir. Bu durum kaynak kalitesi üzerinde önemli bir etki yaratır [14, 26].

**1.4.2. Sürtünme Kaynak Mekanizması**

Sürtünme kaynak tekniğinde tam olarak mekanizması hala çözülememiştir. Fakat, sürtünme kaynak mekanizması iki adımda incelenir. Bu adımlar, yığma ve sürtünme olarak bilinir. İlk aşamada sürtünme gerçekleşirken son aşamada yığma basıncı gerçekleşir ve daha sonra soğutulmaya bırakılır.

**1.4.2.1. Sürtünme Aşaması**

Mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştüğü enerji kaynağıdır. Kaynak edilecek parçaların temas bölgeleri bir araya geldiğinde sürtünmeye bağlı olarak birleşme bölgesinde yüksek bir sıcaklık oluşur. Dönme hareketi sonucu oluşan bu sıcaklık yine dönme hareketine bağlı olarak tüm yüzeye üniform bir dağılım gösterir. Bu da arada sağlam bir metalurjik bağın oluşmasını sağlar. Bazen arada oluşan bu metalurjik bağın kuvveti kaynak edilen malzemelerin mukavemet değerinden daha yüksek olabilir.

Sürtünme devam ederken temas bölgelerinde bir tork da oluşur. Bu durum temas bölgelerinin tamamının plastikleştirme noktasına ulaştırana kadar devam eder. Kaynak ara yüzeyinde ince bir fil oluşursa bile yine bu bölgede meydana gelir. Buna bağlı olarak aksenal kısalma meydana gelir [15].

**1.4.2.2. Yığma Aşaması**

Sürtünme aşaması bittikten hemen sonra yığma basıncı uygulanır. Böylelikle kaynak edilecek parçaların eksenel boylarında kısalma meydana gelir. Buna bağlı olarak eksenel kısalma kendini dışarı taşıyan malzeme olarak gösterir. Bir süre yığma işlemi devam eder, böylece kaynak edilecek olan malzeme gruplarının temas bölgelerinde atomsal madde geçişleri sergilenir yüksek sıcaklık sayesinde daha kolay gerçekleşir. Daha sonra yığma işlemi sonlandırılır ve buna bağlı olarak tork azalır.

Benzer olmayan malzeme gruplarının birleştirme mekanizması aynı malzemelerin birleştirilmesinden daha komplikedir. Farklı olan malzeme gruplarında farklı yüzey enerjileri, mekanik özellikler, kristal yapı ve birbiri içerisinde çözünebilme kabiliyetleri de bağlanma mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [43]. Böylesi özellikler, ısı tesiri altında kalan bölgenin genişliği üzerinde de etkisi vardır. Isı tesiri altında kalan bölgenin de karakteristiği de metalurjik bağın kalitesine bağlı olarak değişir.

**1.4.3. Sürtünme Kaynak Parametreleri**

Sürtünme kaynak mekanizmasını etkileyen birçok parametre mevcuttur. Bunlar aşağıda sıralanmıştır;

- Yığma basıncı,
- Sürtünme basıncı,
- Dönme hızı,
- Yığma süresi,
- Sürtünme süresidir.

Bunların dışında parça geometrisi gibi özellikler de sürtünme kaynak mekanizmasını etkileyen parametredir.

**1.4.3.1. Dönme Hızı (Çevresel Hız)**

Dönme hızı kaynak edilecek malzemelerin çaplarına bağlı olarak değişir. Bu parametrenin kaynak kalitesi üzerinde çok önemli bir etkisi vardır. Buna bağlı olarak aşırı yüksek çevresel hız, kaynak malzemelerin temas bölgelerinde çok yüksek sıcaklıklar yaratabilir. Bu durum ise kaynak malzemelerin temas bölgelerinde intermetalik fazların oluşmasına ve farklı faz dönüşümlerine sebebiyet verebilir. Ayrıca seçilen malzeme gruplarının mekanik ve kimyasal özellikleri de dönme hızını etkiler. Bu bağlamda en optimum sürtünme kaynak çevresel hızı seçimi, oluşturulan kaynak bağının karakteristiği için çok önemlidir.

**1.4.3.2. Yığma Basıncı**

Bu parametre sürtünme kaynağında kullanılan malzemelerin eksenel boyca kısılmasını kontrol etmesi açısından önemlidir. Seçilen basınç değeri kaynak edilecek olan malzeme grubunun çeşidine bağlı olarak değişir. Ayrıca basınç değerinin seçilmesi, parçaların geometrisine ve seçilen sürtünme kaynağı çeşidine bağlıdır. Basınç ısı kaybını önlemek için de işe yarar [15].

Seçilen basınç miktarı, kaynak edilecek malzemelerin temas bölgelerindeki oksit tabakasını giderecek şekilde seçilmelidir [45]. Düşük basınç miktarı eksenel kısılmayı sınırlar ve buna bağlı olarak metalurjik bağın kalitesini olumsuz yönde etkiler. Seçilen yüksek basınç miktarı, yüksek derecede eksenel kısılmalara sebep olur.

Özellikle çelikler için yığma basıncının uygulanması sürtünme kaynağı sonrasında bağlantı kalitesini artırır. Kaynak edilecek parçaların sıcak akma sınırına bağlı olarak değişir. Difüzyon mekanizmasını hızlandırmak amacıyla sürtünme periyodu sonrasında malzeme çifti arasında yığma basınç kuvveti uygulanır. Fakat uygulanan yığma basıncı, kaynak edilecek parçaların sıcak dövme mukavemetlerinin üstünde bir değerde olmalıdır. Bununla beraber aşırı yığma basınçlarında, aşırı plastik deformasyon kaçınılmaz olur [21].

**1.4.3.3. Sürtünme Süresi**

Sürtünme süresi, kaynak edilecek olan parçaların çeşidine bağlı olarak değişir. Aşırı fazla uygulanan sürtünme süresi, hem eksenel boyu kısaltır hem de parçaların aşırı deformasyonlarına sebep olmaktadır. Ayrıca parçaların temas bölgelerinin aşırı ısınmasını sağlayarak pratikleştirmesine sebep olur. Bu sebeple aradaki kaynak kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Aynı zamanda bu parametre, termal difüzyonunun oluşmasının da temelini oluşturur. Yine bu parametre iki farklı yöntem ile kontrol edilmektedir. Birinci yöntem, optimum sürtünme kaynağı belirlendikten sonra frenleme ile sistem durdurulur. İkinci yöntem ise belli bir eksenel kısalmaya ulaşıldıktan sonra sistem durdurulur. Sürtünme kaynağı yapılacak olan malzeme gruplarının boyu, eksenel kısaltmaları karşılayacak kapasitede olmalıdır. Ayrıca kaynak edilecek malzeme gruplarının temas bölgelerinin temizliği de kaynak kalitesi açısından önemli bir yere sahiptir.

**1.4.3.4. Yığma Süresi**

Ne kadar yığma aşamasının uygulanacağını belirleyen parametredir. Temel olarak difüzyon mekanizmasını hızlandırmaya yarar. Sürtünme kaynağında oluşan metalurjik bağın kalitesinde önemli bir rol oynar. Aşırı yığma süresinin uygulanması, kaynak edilecek parçaların daha fazla boydan kayıp olmasına sebep olur [21].

**1.4.3.5. Sürtünme Basıncı**

Sürtünme kaynak edilecek parçaların mekanik özellikleri bu parametrenin seçiminde önemli rol oynar. Bu parametrenin değeri, hem kaynak edilecek parçaların temas bölgelerinde bulunan kir, oksit ve benzeri kalıntıları temizlemesi açısından hem de sürtünme sırasında oluşan ısısının temas bölgelerinde homojen dağılması açısından önemlidir. Sürtünme basıncının seçimi, eksenel kısalmanın ve kaynak edilecek parçaların temas bölgelerinde oluşan sıcaklıkların bir fonksiyonu olarak

belirlenir [23]. Ellis ve arkadaşları, sürtünme kaynağı yapılacak olan bazı malzeme grupları için en optimum sürtünme kaynak parametrelerinin neler olabileceğini belirlemeye çalışmışlar (Çizelge 1.1) [32].

Çizelge 1.1 Malzemelere göre optimum kaynak parametreleri [39]

| Malzeme                              | Çap<br>(mm) | Sürtünme<br>Kuvveti<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Yığma<br>Kuvveti<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Sürtünme<br>Süresi<br>(sn) | Yığma<br>Süresi<br>(sn) | Çevresel<br>Hızı<br>(m/sn) |
|--------------------------------------|-------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Alaşımsız ve Düşük Alaşımlı Çelikler | 20          | 20-80                                       | 80-200                                   | 1-100                      | 250                     | 0.5-5                      |
| C 60                                 | 20          | 50-80                                       | 150-250                                  | 3-6                        | 2-3                     | 3.5-6                      |
| 42 CrMo4                             | 20          | 50-80                                       | 150-250                                  | 3-6                        | 2-3                     | 1.5-3                      |
| Yüksek Alaşımlı Çelikler             | 20          | 40-100                                      | 120-400                                  | 3-120                      | 2-10                    | 0.5-5                      |
| X5CrNi18                             | 20          | 60-80                                       | 250-300                                  | 6-10                       | 2-3                     | 1.5-3                      |
| S6-5-3                               | 20          | 60-100                                      | 190-250                                  | 10-15                      | 2-3                     | 1.5-3                      |
| Yüksek Sıcaklık Dayanımlı Alaşımlar  | 20          | 60-180                                      | 180-600                                  | 5-150                      | 2-15                    | 0.5-5                      |
| Nimonic 80                           | 20          | 60-100                                      | 180-600                                  | 5-10                       | 2-3                     | 1.5-3                      |
| Inconel 713°C                        | 20          | 60-100                                      | 400-500                                  | 5-10                       | 2-3                     | 1.5-3                      |
| Hafif ve Ağır Metaller               | 20          | 10-80                                       | 20-250                                   | 1-8                        | 2-5                     | 0.5-4                      |
| E-Cu                                 | 20          | 10                                          | 20-60                                    | 1-6                        | 2-5                     | 4                          |
| TiAl6V4                              | 20          | 20-30                                       | 60-80                                    | 2-8                        | 2-5                     | 1-4                        |
| Al 99.5                              | 20          | 10-30                                       | 30-80                                    | 0.1-4                      | 2-5                     | 2-4                        |
| AlMgSi <sub>0.5</sub>                | 20          | 30-80                                       | 50-150                                   | 0.1-6                      | 2-5                     | 0.5-2                      |
| Pb                                   | 20          | 50-70                                       | 70-100                                   | 2-4                        | 2-5                     | 1.5-2                      |

#### 1.4.4. Sürtünme Kaynağında Isı Üretimi

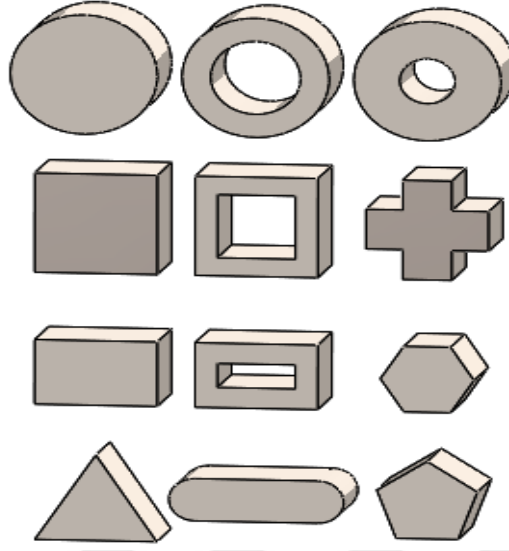
Sürtünme kaynağı işlemi genel olarak, kaynak bölgesinde aşırı sıcaklıktan kaynaklanan malzemelerin plastik deformasyonunu içerir [7]. Sürtünme kaynağı gerçekleşirken malzeme ergime sıcaklığına ulaşmadan yüksek sıcaklıklarda deforme olur. Kaynak sonrası elde edilen mikroyapısal değişiklikler, diğer sıcak işlem gören malzeme gruplarının mikroyapısına benzer olsa da, ani sıcaklık yükselmesi ve hızlı

deformasyon dalgalanmaları mikroyapı üzerinde baskın bir role sahiptir [46]. Bu durum ortaya çıkan mikroyapı yorumlanmasını ve tahmin edilmesini zorlaştırır. Kaynak sırasında elde edilen enerji girdisinin hesaplanmasının zorluğu, bir matematiksel model oluşturmaının önünde önemli bir engeldir [17, 46, 47]. Bu yüzden en doğru modeli belirlemek için kaynak bölgesi ve ısı tesiri altında kalan bölgeleri ayrı ayrı incelemek gerekir.

- Kısmen deforme olmuş bölge; plastik deformasyonun az da olsa bulunduğu bölgedir. Bu bölgede de sıcaklık oldukça yüksektir.
- Aşırı deforme olmuş bölge; plastik deformasyonun kendini yeniden dinamik rekristalizasyon olarak gösterdiği bölgedir. Tamamen plastik deformasyona uğramış bölgedir.
- Deforme olmamış bölge; kaynak edilecek olan malzeme grupların esas mikroyapısını oluşturan bölgedir.

#### **1.4.5. Sürtünme Kaynağı ile Yapılabilen Parça Geometrileri**

Bu yöntemin ilk yıllarında sadece dairesel simetriye sahip olan malzeme grupları için kullanılmış olsa da daha sonraları gelişen mühendislik teknolojisiyle birlikte dönel simetriye sahip olmayan malzeme grupları için de uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntemle içi boş veya dolu boru şekilli malzeme grupları kolaylıkla kaynak edilebilmektedir. 300 mm'ye sahip çaplı içi dolu veya boş malzeme grupları kaynak edilebilir. Fakat içi boş olan boru şekilli dairesel malzeme gruplarında daha düşük seviyelerde yüzey alanı olduğundan dolayı, kaynak sırasında meydana gelen ısı artışı içi dolu olan boru şekilli malzeme gruplarına göre daha homojen olmaktadır. Günümüzde kompleks şekilli malzeme gruplarının da sürtünme kaynağı son model kaynak cihazlarında yapılmaktadır (Şekil 1.5) [40].



Şekil 1.5 Sürtünme kaynak yöntemi birleştirilebilecek parça geometrileri

Farklı şekilli malzeme grupların kaynaklanabilir olması, makine teknolojisi için hayati öneme sahiptir. Kaynağın bu tür tamir özelliği taşıması ekonomide hem tasarruf hem de maliyet açısından önemlidir. Sürtünme kaynağı eritmeli kaynak yöntemlerine nazaran daha düşük sıcaklıklarda yapılması, enerji girdisinin maliyeti eritmeli kaynak yöntemlerine nazaran daha düşüktür. Bu sebeple bu yöntemin sanayide yaygınlaşması hem maliyeti düşürür hem de malzeme sarfının önüne geçer. Sürtünme kaynağı farklı ya da aynı malzeme gruplarının birleştirilmesinde ucuz ve oldukça verimli bir kaynak yöntemidir. Sürtünme kaynağı yapılacak malzeme gruplarının kimyasal veya mekanik özelliklerinin bilinmesi sağlam bir metalurjik bağın oluşmasını sağlamak için yetersizdir. Bunun için sağlam bir metalurjik bağın oluşmasını sağlamak için sürtünme kaynak parametrelerinin çok dikkatli şekilde seçilmesi gerekir. Bu sebeple önceden hazırlık yapılması gerekir. Ayrıca sürtünme kaynağı, diğer kaynak yöntemleriyle birleşmenin sağlanmadığı malzeme grupları için çoğu zaman bir çözüm sunmuştur. Çünkü diğer kaynak yöntemlerinde önemli olan birçok parametre sürtünme kaynağının başarılı bir şekilde uygulanmasında önem taşımaz [41]. Sürtünme kaynağı uygulanabilen malzeme grupları çok geniş bir sınıfı kapsamaktadır.



**1.4.6. Benzer ve Farklı Metaller İçin Sürtünme Kaynağı**

Sürtünme kaynağı seri üretime uygun olduğundan dolayı, birçok makine parçalarının üretiminde de kullanılmaktadır. Bu yöntemin parametrelerinin seçimi genellikle önceden yapılan deneylere ve yayınlanan raporlar doğrultusunda seçilir. Bununla beraber kaynak parametrelerinin seçimi için sürekli bir yöntem gerektirir. Çünkü her kaynak makinası için parametreler değişiklik gösterebilir. Bu durum günümüzde de önemini korumakta olup, bununla ilgili birçok çalışma yapılmaktadır.

**1.4.7. Sürtünme Kaynak Sonrası Meydana Gelen Mikroyapı**

Diğer kaynak tekniklerine benzer olarak sürtünme kaynağı tekniğinde de ısının tesiri altında kalan bölgenin oluşumu gözlemlenmektedir. Bu bölgedeki mikroyapı orijinal mikroyapıdan farklıdır. Çünkü bu bölgeler yüksek sıcaklığa maruz kalıp ardından aşırı soğuma ile soğumaktadır. Bu bölgelerde meydana gelen yüksek sıcaklıklar esas metallerden farklı fazların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Meydana gelen bu fazların cinsi ve özellikleri kaynak metalurjik bağımlı olumlu ya da olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu bölgelerin mukavemet değerlerinin yüksek olması, kaynak kalitesi üzerinde önemli rol oynamaktadır.

Mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşümü sonucu açığa çıkan yüksek ısı, ısının tesiri altında kalan bölgede ve kaynak bölgesinde bazı dönüşümlere sebebiyet verir. Bunun sonucunda örneğin, kaynak edilecek olan parça çelik ise karbon oranı bu bölgede azalır. Bu durumun mevcudiyeti, kaynağın birleşme üzerinde olumsuz bir etki oluşturur. Böylece esas metallerden daha mukavemetsiz ve daha güçsüz bölgeler elde edilmiş olur. Özellikle bu bölgelerin aşırı soğumaya maruz kalması, sert ve kırılgan faza sahip olan martenzit fazının oluşmasına da sebep olabilir. Bu fazın kaynak bölgesinde içeriğinin fazla olması kaynak birleşim noktasını da kırılgan hale getirerek, kaynak sonrası çatlama ve burkulmaya neden olur. Bu da kaynak bölgesinin dayanabildiği yüklerden bile daha düşük yükler altında kırılmasına sebebiyet verir. Fakat bu bahsedilen durumların meydana gelmesi sürtünme kaynağında sınırlıdır. Çünkü sürtünme kaynağında hem sürtünme işleminin kısa

olması hem de buna bağlı olarak ergimenin tam olarak gerçekleşmemesi bu durumların önüne geçmektedir. Bu durumun varlığı diğer kaynak yöntemlerine göre oldukça önemli bir avantajdır [42].

Sürtünme kaynağı sonrasında meydana gelebilecek olan mikroyapı değişimleri maddeler halinde sıralanmıştır.

- Rekristalizasyonun oluşması,
- Tane irileşmesinin oluşması,
- Martenzitik dönüşümler,
- Seramik karakterli yeni fazların oluşması,
- Kaynak bölgesinde karbon içeriğinin azalmasıdır.

Yukarda yazılmakta olan durumlar, kaynak kalitesinin üzerinde olumsuz etkileri vardır. Ayrıca kaynak sonrası elde edilen yekpare parçada homojen olmayan bir mikroyapı dağılımı söz konusu olmaktadır [31]. Sonuç olarak bu bahsedilen durumların meydana gelmesi, kaynağın kalitesini düşürerek, dayanabildiği yüklerde bile kırılmasına sebep olacaktır.

#### **1.4.8. Farklı Cins Metallerin Sürtünme Kaynağı**

Farklı malzeme gruplarının elde edilmesi makine aksamlarının üretilmesi açısından önemlidir. Benzer olan metallerin kaynağı, benzer olmayan metallerin kaynağına nazaran daha zordur. Çünkü kaynak edilecek olan parçaların farklı mikroyapı, farklı kimyasal özellik ve mekanik özelliklere sahip olması, kaynak sırasında homojen bir karışım oluşturmalarını engelleyebilmektedir. Bu durumun mevcudiyeti, ergitmeli kaynaklara nazaran sürtünme kaynağında daha azdır. Zira sürtünme kaynağının kaynak ara yüzeyinde tam bir kaynak havuzu oluşmadığından dolayı sınırlı oranda etki yaratır. Sürtünme kaynağında kaynak süresinin az olması ve tam bir ergime meydana gelmemesi, katılaşma sırasında oluşabilecek hataları minimum seviyeye çekmektedir. Bundan dolayı daha sağlam bir metalurjik bağ elde edilir.

**1.4.8.1. Alüminyum Alaşımları**

Alüminyum demirden sonra kullanılan en yaygın metal türüdür. Gerek otomobil gerekse uçak ve makine sanayisinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Çünkü bu sahada kullanılan malzemeler yüksek mukavemet isteyen yerlerdir. Fakat alüminyumun tek başına kullanıldığı yerler oldukça seyrekler. Bu yüzden Mg, Zn, Cu ve Mn gibi elementlerin karıştırılması sonucu oluşan alaşım şeklinde kullanılır. Sürtünme kaynak işleminde ısı girdisi az olduğu için alüminyumun birleştirilmesinde de kullanılabilir. Birçok çalışma Al ve alaşımlarının sürtünme kaynak sonrası iyi bir kaynak mukavemet özelliğini sergilediğini rapor etmiştir. Sürtünme kaynak yöntemi, alüminyumun farklı metaller ile de kaynağı için uygundur. Farklı çalışmalar, alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynağındaki parametrelerinin etkisini ortaya koymuştur. Buna göre her bir sürtünme kaynak parametresinin etkisi kaynak kabiliyeti üzerinde farklı etkisi mevcuttur. Ayrıca alüminyumun sürtünme kaynağı için, yüzey pürüzlülüğü ve temizliği de kaynak kalitesini etkileyen farklı bir parametre'dir.

**1.4.8.2. Çelik Alaşımları**

Diğer ergitmeli kaynak yöntemleriyle dahi kaynak edilemeyen farklı çelik türleri sürtünme kaynak yöntemiyle başarılı bir şekilde kaynak edilebilmektedir. Sürtünme kaynağı ile düşük ve orta karbonlu çeliklerin kaynağı kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Fakat kaynak sonrası oluşan sert fazların oluşma ihtimalinden dolayı parametreleri sıkı kontrol altında tutulmalıdır. Sürtünme kaynaklı çeliklerin uygulanması sanayide her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Örnek olarak valfler, turbo şarjlar ve transmisyon giriş mili tertibatları sürtünme kaynaklı çeliklerin kullanım alanlarından bazılarıdır. Sürtünme kaynağı birçok kaynak tekniğine göre daha ucuz olduğundan, üretilen parçaların maliyeti açısından tasarruf sağlanmaktadır [60].

**1.4.8.3. Bakır Alaşımları**

Bakır ve alaşımları alüminyumdan bile daha yüksek termal iletkenliği sahip olan malzeme gurubudur. Bu durum sürtünme kaynağında olumsuz bir etkisi vardır. Çünkü yüksek termal iletkenlik, sürtünme kaynak sırasında ısıyı kaynak bölgesinde yoğunlaştırmak oldukça zordur. Özellikle ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynak edilebilmesi için, ön ısıtmaya gerek olmaktadır. Böylece kaynak sırasında daha derin bir nüfuziyet elde edilir. Ayrıca soğuma sırasında da çatlama ve üfleme deliği oluşumu gibi kusurlar kendini göstermektedir. Bu problemleri çözmek için minimum ısı girdisi ile kaynak işlemi gerçekleşmelidir. Bunun için en iyi yöntem sürtünme kaynağı yöntemidir. Çünkü sürtünme kaynağında elde edilen maksimum sıcaklık, bakırın ergime noktası altındadır. Böylece düşük kaynak süresi, daha dar bir ısıdan etkilenmiş bölge elde etmeye neden olur. Bu da yöntemin en önemli avantajları arasında sayılır.

**1.4.9. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları**

Sürtünme kaynağı çevre dostu bir kaynak yöntemidir. Ayrıca endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin günümüzde birçok uygulama alanı mevcuttur. Kaynak süresi kısa olduğundan dolayı seri üretim için de uygundur. Aşağıda farklı alanlarda kullanılan sürtünme kaynak yöntemi uygulamaları verilmiştir. Bu yöntem sayesinde dövme kabiliyeti iyi olan malzeme grupları kolaylıkla birleştirilmektedir.

**1.4.9.1. Kesme ve Delme Takım Endüstrisi**

Delik zımbaları, freze bıçakları ve matkapların uçları gibi makine sanayisinde sıkça kullanılan parçaların üretiminde kullanılmaktadır [40].

**1.4.9.2. Hidrolik Endüstrisi**

Hidrolik silindirler ve hidrolik sanayisinde sıkça kullanılan parçaların üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 1.6 Hidrolik silindir [39]

**1.4.9.3. Elektronik ve Elektroteknik Endüstrisi**

Röntgen cihazı tüpleri için anot milleri, kromatograflar için ayırma sütunları, sürekli lehim uçları, devre kontakları, gaz analizleri için alıcı kameralar gibi elektronik ve elektroteknik endüstrisi sanayisinde sıkça kullanılan parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

**1.4.9.4. Makine İmalatı ve Hidroelektrik Endüstrisi**

Dişli pompa rotorları, hidroelektrik silindirleri, sonsuz vidalı miller, matkap uçları, piston kolları, freze bıçakları, dişli çarklar, krank milleri, delici zımbalar, çelik kalemler, iğneler, valfler, radyal pompalar ve rayların kaynatılması gibi makine sanayisinde sıkça kullanılan parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

**1.4.9.5. Havacılık ve Uzay Endüstrisi**

Miller, itme jetleri, borular, flanşlar, yanma odaları ve bağlantı parçaları gibi havacılık ve uzay endüstrisi sanayisinde sıkça kullanılan parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

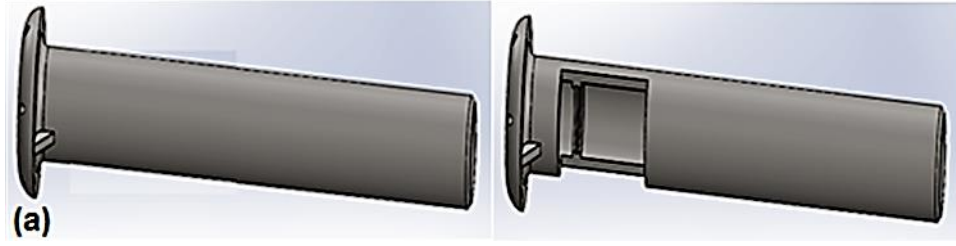


Şekil 1.7 Havacılık ve uzay endüstrisi

- a-) Ticari helikopter rotor gövdesi-2024 Alüminyum alaşımı,  
b-) Roket yakıt sisteminde kullanılan geçiş bağlantıları,  
c-) MK 48 ateşleyici montajı (AISI304 Paslanmaz/6061-T6 Alüminyum) [39]

#### 1.4.9.5. Otomotiv Endüstrisi

Dışli-mil parçaları, aks milleri, sübaplar, çatal-mil bağlantıları, gibi otomotiv sanayisinde sıkça kullanılan parçaların üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 1.8 Otomotiv endüstrisi

a-) Gövde montajı [39]

Çizelge 1.2’de bazı malzeme grupları için sürtünme kaynak tekniğine uygunluğu verilmiştir.

Çizelge 1.2 Sürtünme kaynaklı malzeme ve malzeme kombinasyonları [40]

| Sürtünme Kaynaklı Malzeme ve Malzeme Kombinasyonları | Tungsten-Bakır Toz Metalurji | Tungsten Toz Metalurjisi | Titanyum ve Alaşımları | Çelik Kesilebilir | Çelik Toz Metalurjisi | Dökme Çelik | Yüksek Alaşımli Çelik (Östenitik) | Yüksek Alaşımli Çelik (Ferritik) | Düşük Alaşımli Çelik |
|------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Düşük Alaşımli Çelik                                 |                              | X                        | X                      | X                 | X                     | X           | X                                 | X                                | X                    |
| Yüksek Alaşımli Çelik                                |                              |                          | X                      | X                 | X                     | X           | X                                 |                                  |                      |
| Yüksek Alaşımli Çelik                                |                              | X                        | X                      | X                 | X                     | X           | X                                 |                                  |                      |
| Dökme Çelik                                          |                              |                          |                        | X                 | X                     | X           |                                   |                                  |                      |
| Çelik Toz Metalurjisi                                |                              |                          |                        | X                 | X                     |             |                                   |                                  |                      |
| Titanyum ve Alaşımları                               |                              |                          | X                      |                   |                       |             |                                   |                                  |                      |
| Tungsten Toz Metalurjisi                             | X                            | X                        |                        |                   |                       |             |                                   |                                  |                      |
| Tungsten-Bakır Toz Metalurji                         | X                            |                          |                        |                   |                       |             |                                   |                                  |                      |

#### 1.4.10. Sürtünme Kaynağının Avantajları

Bu yöntemin diğer kaynak tekniklerine göre birçok avantajları mevcuttur. Sürtünme kaynağı için verilen bazı avantajlar aşağıda sıralanmıştır [43, 44, 45].

- Küçük kesitli parçaların birleştirme işlemi sürtünme kaynak yöntemiyle başarılı bir şekilde elde edilebilir.
- Kaynak sonrası flanş temizliği dışında başka bir temizlik gerektirmez. Bu yüzden kaynak sonrası temizliği kolaydır.
- Kaynak sonrası elde edilen metalurjik bağın kalitesi yüksektir.
- Tek eksenli birleşme sağlanır.
- Kaynak edilecek parçalar bir eksenli olarak birleştirilir.
- Bu yöntem koruyucu gaz ve ilave metal istemez.
- Çok yüksek sıcaklıklara çıkılmadığından dolayı tane kabalaşması diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha az miktarda gerçekleşir. Böylece daha ince bir mikroyapı elde edilmiş olur.
- Seri üretim için uygun bir yöntemdir.
- Diğer kaynak tekniklerine göre sürtünme kaynak yönteminde çarpılma ve distorsiyon minimum seviyelerde gerçekleşmektedir.
- Çoğu zaman kaynaklı bölgenin mukavemet değerleri esas metallerden daha yüksek çıkmaktadır.
- Sürtünme kaynak sonrası diğer kaynak metodlarına göre daha dar bir ısıdan etkilenmiş bölge elde edilir.
- Bu yöntem farklı malzeme grupları için de kullanılabilir.
- İşlem için önceden herhangi bir hazırlık yapmak gerekmez (zorunlu bir durum yoksa).
- Sürtünme kaynak sırasında tam ergime oluşmadığından dolayı, soğuma sırasında çatlak, boşluk ve hata payı minimum seviyelerde oluşmaktadır.

#### **1.4.11. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları**

Bu yöntemin diğer kaynak yöntemlerine göre bazı eksiklikleri de mevcuttur. Bu eksiklikler aşağıda sıralı şekilde verilmiştir.

- Sistemin kurulum maliyeti, diğer kaynak yöntemlerine göre yüksektir.



- Kaynak edilecek parçaların geometrisi bazen kaynağın başarılı bir şekilde uygulanması önünde bir engel teşkil edebilmektedir.
- Bu yöntem ile kaynak edilecek parçaların mukavemet değerleri, yığılma basıncına dayanabilir olması gerekir.
- Sürtünme kaynağında temas bölgelerin temizliği, başarılı bir şekilde kaynağın tamamlanması için çok aşırı önem taşır.
- Büyük kesitli parçaların kaynağında kaynak ara yüzeyinde oluşan sıcaklık tüm yüzeye homojen olarak dağılamamaktadır.
- Kaynak edilecek parçaların yüzey kalitesi kaynak için çok büyük bir önem taşımaktadır.

### **1.5. Karbon Çelikler**

Çelik; içerisinde %2'ye kadar karbon ve diğer elementlerden de eser miktarda içeren demir-karbon alaşımına denir. Dünya üzerinde en çok kullanılan alaşım olarak ta bilinir. Yapısında bulundurduğu karbon içeriğine göre çeliğin mukavemet, kimyasal ve elektriksel özelliği değişir. Yapısındaki karbon içeriği arttığı zaman sertlik, akma mukavemeti ve çekme dayanımında bir artış meydana gelirken, süneklik ve tokluk gibi özelliklerde bir azalma gözlemlenir. Ayrıca plastik şekil değiştirme yeteneği de yapısındaki karbon muhtevasına göre değişir.

Çelik için hayati öneme sahip olan alaşım elementi olan karbon, çeliğin kaynak edilebilirliği üzerine de büyük etkisi vardır. Buna bağlı olarak yapısında az miktarda karbon içeren çelikler daha kolay kaynak edilebilirken, yapısında yüksek oranda karbon içeren çelikler, daha zor kaynak edilebilmektedir. Buna göre yapısında muhteva ettiği karbon oranına göre üç farklı karbon çeliği sınıfı mevcuttur. Bunlar aşağıda sıralanmış olup, ayrıca incelenmiştir [46].

- Düşük karbonlu çelik,
- Orta karbonlu çelik,
- Yüksek karbonlu çeliktir.

**1.5.1. Karbonlu Çeliklerin sınıflandırılması****1.5.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler**

Yapısında en fazla %0.2'ye kadar karbon içeren çelik gruplarıdır. Yapı içerisinde az miktarda karbon bulunduğu için plastik şekil değiştirme yetenekleri üstündür. Bu nedenden dolayı yumuşak çelik olarak ta adlandırılabilirler. Karbonlu çelikler içerisinde üretim payı en fazla olan çelik grubudur. Özellikle inşaat ve otomotiv sanayisinde sıklıkla kullanılabilirler. Yapı içerisindeki karbon miktarı düşük olduğundan dolayı, sertleşebilme kabiliyetleri düşüktür. Fakat son gelen mühendislik uygulamalarıyla birlikte yüzey modifikasyon işlemleriyle yüzeyleri sertleştirilebilir.

**1.5.1.2. Orta Karbonlu Çelikler**

%0.2-0.6 arası karbon içeriğine sahip olan çelik gruplarıdır. Düşük karbonlu çeliklere nazaran mekanik özellikleri orta derecededir. Isıl işlemlerle sertleşebilme yeteneklerine sahiptir. Makine ve imalat sektöründe sıklıkla kullanılır. Orta derecede karbon ihtiva ettiği için plastik şekil değiştirme yetenekleri, düşük karbonlu çeliklere nazaran daha düşük seviyelerdedir. Kaynak edilebilirliği ise düşük karbonlu çeliklere göre iyi, yüksek karbonlu çeliklere göre kötüdür. Çünkü kaynak sonrası, martenzit dönüşümlere meyilli olduklarından çatlak ve burkulmalara sebep olabilir. Bu yüzden bu tür çeliklerin kaynağını yaparken dikkatli olunmalıdır. İçerdiği yüksek karbon oranlarından dolayı, ancak özel kaynak yöntemleri kullanarak kaynak edilebilmektedir.

**1.5.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler**

Yapısında en az %0.6'ya kadar karbon içeren çelik gruplarıdır. Sertliği en yüksek olan karbonlu çelik grubudur. Yüksek sertlik değerlerine sahip olduğundan dolayı çizilmeye ve aşınmaya dirençlidir. Sert olduklarından dolayı plastik şekil değiştirme yetenekleri zayıftır. Kesici uç ve aşınmaya karşı dayanıklılık isteyen

servis sahalarında kullanılabilir. İçerdiği karbon oranı yüksek olduğu için martenzitik dönüşümlere uygundur. Buna bağlı olarak sertlik değerleri çok yüksektir [46].

### **1.6. Dökme Demirler**

Demir-karbon denge diyagramına göre yapısı içerisinde %2'den daha fazla karbon içeren demir bazlı alaşımlardır. Genel olarak üretim yöntemleri döküm ile gerçekleştiğinden bu adı almıştır. Ayrıca yapı içerisinde %1-3 Si içerirler. Yine bu yapıya bazı özellikler kazandırmak için diğer alaşım elementleri ilave edilir. Ayrıca kimyasal kompozisyon, uygulanan ısıtma işlemleri ve katılma hızı da bu yapının tüm özelliklerini etkileyebilmektedir. Düşük maliyetleri çok yönlü özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Son gelişen teknolojik gelişmeler ile birlikte, yeni malzemelerin üretimi artması sonucu malzeme seçiminin rekabeti artmıştır. Fakat tüm bunlara rağmen dökme demirlerin mühendislik uygulamalarında kullanım alanları hala geniştir [47].

#### **1.6.1. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması**

Dökme demirlerin temel olarak dökme demir mikroyapılarındaki karbonun dağılımına göre sınıflandırılması yapılır. Soğuma hızı ve yapılan ısıtma işlemleri mikroyapı üzerinde çok büyük etkiler oluşturmalarından dolayı aynı kimyasal kompozisyona sahip olan dökme demirlerin mikroyapıları farklı olabilmektedir. Kimyasal kompozisyon, uygulanan ısıtma işlemi ve katılma hızına bağlı olarak aşağıdaki alt sınıflara ayrılmaktadır:

- Beyaz dökme demir,
- Gri dökme demir,
- Temper dökme demir,
- Küresel grafitli dökme demir,
- Yüksek alaşımlı dökme demir'dir.

Tipik olarak alaşımlandırılmamış dökme demirlerin kimyasal kompozisyon aralıkları Çizelge 1.3’de verilmiştir [47].

Çizelge 1.3 Dökme demirlerin sahip olduğu kimyasal kompozisyon aralıkları [47]

| Element         | Gri Dökme Demir | Beyaz Dökme Demir | Temper Dökme Demir | Küresel Grafitli Dökme Demir |
|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| <b>Karbon</b>   | 2.5-4           | 1.3-3.6           | 2-2.6              | 3-4                          |
| <b>Silisyum</b> | 1-3             | 0.5-1.9           | 1.10-1.6           | 1.8-2.8                      |
| <b>Mangan</b>   | 0.25-1          | 0.25-8            | 0.2-1              | 0.1-1                        |
| <b>Kükürt</b>   | 0.02-0.25       | 0.06-0.20         | 0.04-0.18          | 0.03 (max.)                  |
| <b>Fosfor</b>   | 0.05-1          | 0.06-0.18         | 0.18 (max.)        | 0.1 (max.)                   |

#### 1.6.1.1. Beyaz Dökme Demir

Çizelge 1.3’de verilen beyaz dökme demir aralığında kimyasal kompozisyona sahip olan dökme demir grubunda bulunmaktadır. Soğuma hızı yüksektir. Yapı içerisindeki karbonlar demir ile birleşerek sert ve kırılgan olan karbür veya sementit fazlarını oluştururlar. Bu nedenle beyaz dökme demir sert ve kırılgan bir yapıya sahiptir. Kırıldıklarında kırık yüzeyi, beyazımsı bir renk aldığından dolayı beyaz dökme demir adını almıştır. Çekme dayanımları, basma dayanımlarından çok düşüktür. Sert bir yapıya sahip olduğu için aşınmaya karşı dirençlidir [47].

#### 1.6.1.2. Gri Dökme Demir

Çizelge 1.3’de verilen gri dökme demir aralığında kimyasal kompozisyona sahip olan dökme demir grubunda bulunmaktadır. Katılma hızı yeterli seviyede olduğunda yapı içerisindeki karbonlar grafit lamelleri olarak çökelir. Gri dökme demirin yapısındaki silisyum miktarından dolayı, sıvı halde akışkanlığı çok yüksektir. Bu yüzden karmaşık şekilli parçaların üretiminde kullanılabilir. Ayrıca işlenebilme kabiliyetleri diğer dökme demirlere nazaran daha yüksektir. Kırıldıklarında kırık yüzeyi, gri bir renk aldığından dolayı gri dökme demir adını almıştır [47].

**1.6.1.3. Temper Dökme Demir**

Çizelge 1.3’de verilen temper dökme demir aralığında kimyasal kompozisyona sahip olan dökme demir grubunda bulunmaktadır. Yapıdaki karbonlar grafit nodülleri biçiminde çöker. Kimyasal kompozisyon açısından beyaz dökme demir gibi dökülür. Fakat döküm sonrası temperleme olarak adlandırılan tavlama işleminde grafitler çekirdeklenir ve nodüller (yumrular) oluşturmak üzere beyaz dökme demir sementitinden büyür. Bu tür dökme demirlerin tüm özellikleri ısı işlem (tavlama) sayesinde değiştirilebilir. Bu yüzden çok geniş aralıklarda mekanik özelliklere sahip temper dökme demir elde edilebilir. Beyaz dökme demirdeki gibi soğuma hızı çok yüksek olduğu için, döküm sırasındaki malzeme kalınlığı sınırlıdır [47].

**1.6.1.4. Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD)**

Çizelge 1.3’de verilen temper dökme demir aralığında kimyasal kompozisyona sahip olan dökme demir grubunda bulunmaktadır. Bu yapıdaki karbonlar grafit küreleri şeklinde çökmektedirler. Grafitlerin küresel olarak çökmesi için yapıya ergiyik durumdayken, az miktarda magnezyum ilavesi yapılır. Kimyasal kompozisyon açısından gri dökme demire benzemektedir. Fakat kükürt ve fosfor oranı küresel dökme demirde daha azdır. Grafitlerin küresel olarak çökmesi, bu tür dökme demirlerin akma dayanımını artırmaktadır. Temper dökme demirin aksine ince ve kalın kesitli büyük bir aralıkla dökülebilirler [47].

**1.6.1.5. Yüksek Alaşımli Dökme Demirler**

Bu grup dökme demirler, yüksek alaşımli beyaz dökme demirler, yüksek oranda alaşımlandırılmış gri dökme demirleri ve küresel grafitli dökme demirleri içerir. Alaşımli dökme demirler ayrı olarak gruplandırılır. Çünkü bu tür dökme demirlerin korozyon ve aşınma dirençleri geleneksel olarak üretilen diğer dökme

demirlerden oldukça farklıdır. Kimyasal kompozisyonun, bu tür dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır [47].

### **1.7. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirler**

Adından da anlaşılacağı üzere yapısında yüksek oranda krom elementi içeren beyaz dökme demirler; çeşitli mineral delme, tesviye, işleme millerinde, çamur pompalarında, tuğla kalıplarında ve sert kayaların işlenmesi için gerekli donanımlarda kullanılabilmektedir [48].

#### **1.7.1. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Özellikleri**

##### **1.7.1.1. Fiziksel Özellikler**

Karbonun yoğunluğu, demirin yoğunluğundan düşük olduğundan dolayı, yapı içerisindeki karbon miktarının artması yoğunluğu düşürmektedir. Fakat yapıda kalıntı östenit artarsa, yoğunluk da artar. Yüksek kromlu beyaz dökme demir'in yoğunluğu  $7.5-7.8 \text{ g/cm}^3$  arasında değişir. Isıl genleşme katsayıları  $20-425 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığı için  $13.5-18 \text{ } 1/^\circ\text{C}$  aralığındadır. Ayrıca elektrik direnci  $0.5 \text{ } \mu\text{Wm}$  iken, ısı iletkenlikleri ise  $22 \text{ W/mK}$  civarındadır [37].

##### **1.7.1.2. Mekanik Özellikler**

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin en belirgin özelliği sertlik üzerinedir. Sert ve kırılğan olan bu tür malzemelerin çekme testlerinde boyca uzaması ihmal denilecek kadar azdır. Bu yüzden genellikle gevrek kırılmaya uğrarlar. Ayrıca bu tür dökme demirlerden çekme testi numunesi hazırlamak oldukça pahalı ve zahmetlidir. Yapı sert ve kırılğan olduğundan çatlak ilerlemesine müsait bir yapı vardır. Fakat bu tür dökme demirlerin testlerinden çıkan sonuçlar ile servis sahasındaki gerçek koşullarda ortaya çıkan sonuçlar arasında farklılıklar bulunmaktadır. Mikroyapı ve termal ortamdaki malzemenin birçok özellikleri hala teferruatlı olarak bilinmemektedir [48].

**1.7.1.3. Manyetik Özellikler**

Nitelikli malzeme yapımı için geliştirilen beyaz dökme demirlerden yapılan dökümler, kalıpta soğumaya bırakıldığında östenitik bir yapıya sahip olduğu için, manyetik değildirler. Soğuma sırasında yapının martenzit veya perlit gibi farklı fazlara dönüşümü malzeme içerisinde gerilimlere neden olacağı için, bu durum avantaj olarak kabul edilebilir. Ayrıca yapı martenzit ise manyetiktir. Yapı içerisindeki martenzit miktarı azaldıkça manyetik özelliği de azalma eğilimindedir [37].

**1.7.1.4. Mikroyapı**

Yüksek kromlu beyaz dökme demir’ler üstün aşınma direncine sahiptir. Buna sebep olarak yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı gösterilebilir. Aşınma olayı; aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeylerinden parça koparılması olayıdır. Bu etki malzemede tıpkı bir kesme veya çizilme olarak hissedilir. Burada esas prensip, aşındırıcı partikülün metalden daha sert olması gerekir. Partikül metalden yumuşaksa; işlem, korozyon veya oksidasyona benzer ve sadece çok az miktarda aşınma meydana gelir [48].

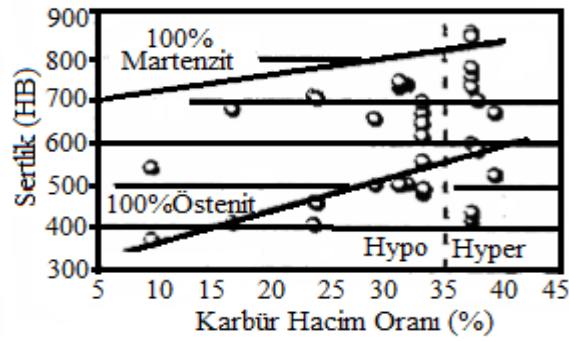
**1.7.1.5. Karbürler**

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde mikroyapı içerisindeki karbürler, mikroyapısında sementit içeren dökme demirlerden daha serttir ve daha gevrektr. Bu durum, aşınma direncini artırırken, plastik şekil değiştirme yeteneğini azaltır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapısında iki çeşit karbür bulunmaktadır. Bunlar; ikincil karbürler ve süreksiz ötektik karbürlerdir. Çizelge 1.5’de yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapılarında bulunması muhtemel karbürlerin sertlikleri gösterilmiştir [50].

Çizelge 1.4 Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapılarında bulunması muhtemel karbürlerin sertlikleri [50]

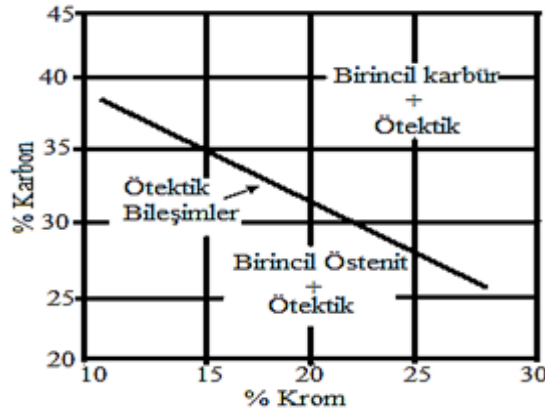
| Karbür Tipi | Sertlik (HV) |
|-------------|--------------|
| $M_3C$      | 840-1100     |
| $M_7C_3$    | 1200-1800    |
| $M_2C$      | 1500         |

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapılarındaki karbürlerin hacimce oranı, %40 civarındadır. Geri kalan kısım matris olarak adlandırılır. Karbürlerin sertlikleri çok yüksek olduğundan dolayı, mikroyapıdaki karbür oranı arttıkça, sertlik te artmaktadır [51]. Şekil 1.9’da karbür miktarındaki artış ile sertlik arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Karbür miktarındaki artış ile sertlik arasındaki ilişki gösteren grafik [52]

Mikroyapıdaki karbon ve krom oranı, yapı içerisine ilave edilen karbon ve krom elementlerinin artmasıyla artmaktadır (Şekil 1.10) [53].



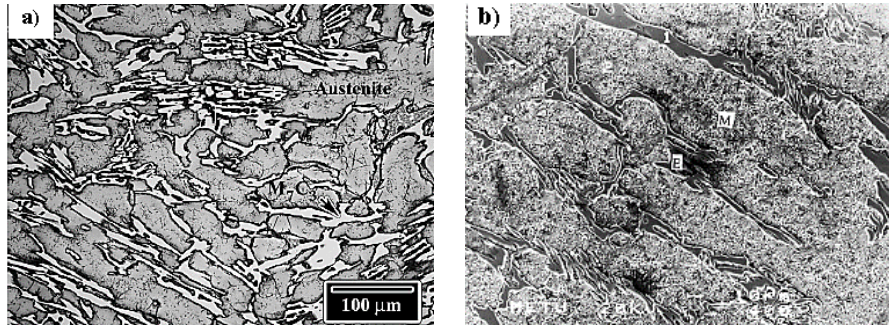
Şekil 1.10 Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom ve karbon oranı arasındaki ilişki [53]



Yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısındaki birincil karbürler sert ve kırılgandır. Bu yüzden aşınma olayı karşısında mikroyapıdan kırılarak ayrılırlar. Temel uygulamalar için ötektik karbon içeriği, izin verilebilen maksimum oranda olmalıdır. Buna göre ötektik karbon içeriği; %15 krom ilave edilen mikroyapıda %3.6-%20 krom ilave edilen mikroyapıda %3.2 ve %25 krom ilave edilen mikroyapıda %3 civarındadır. Diğer alaşım elementler de bu miktarlar üzerinde etkili olabilmektedir. Özellikle mikroyapıdaki silisyum içeriği, ötektik karbon içeriğini azaltır [53].

#### 1.7.1.6. Matris

Yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşınma direnci ve tokluk, mikroyapının bir fonksiyonudur. Eğer uygun karbürler ve uygun matris bir araya geldiğinde ancak bu özellikler istenilen seviyede çıkar. Bunun için en uygun matris, ikincil karbürlerde sertleştirilmiş yüksek karbonlu sert martenzit'tir. Başka bir seçenek ise, ısıt işlemlerle sertleştirilebilen kararsız östenit'tir. Şekil 1.11'de martenzit ve östenit matrisli yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapı fotoğrafları gösterilmiştir [54, 55].



Şekil 1.11 Yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısındaki a) Östenit, b) Martenzit matrisleri [54, 55]

Karbon ilavesi ile mikroyapıda martenzitin aşınma direnci artar. Genel olarak karbürlerin martenzitik matris içerisindeki homojen dağılımı, aşınma direncini olumlu yönde etkiler. Fakat temperleme işlemi; mikroyapıdaki matris fazında karbürlerin dağılımını azalttığı için aşınma direncini düşürmektedir. Yüksek kromlu

beyaz dökme demirlerde karbürler matris içerisinde homojen olarak dağılmışlardır. Matris fazı, karbürlerden daha yumuşak olduğu için, aşınma sırasında matris fazının aşınması daha kolay olurken, bu durumda karbürler de matristen koparak ayrılırlar [55].

### **1.7.2. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Uygulama Alanları**

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin üstün aşınma direnci sayesinde, aşınmaya maruz kalan makine parçalarında sıkça kullanılmaktadır. Bunların en bilinen örnekleri ise darbe çubukları ve darbeli kırıcıların dövücü bloklarıdır. Ayrıca bazı çekiçler, çeşitli şahmerdanlar ve küçük çeneli kırıcılar için aşındırma plakalar diğer uygulama alanları arasına girer. Çok yüksek aşınma etkileri altında en iyi sonucu martenzitik yüksek kromlu beyaz dökme demirler vermiştir [48].

Çimento değirmenlerinde astar olarak başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, cevher öğütmek için değirmenlerde de kullanılabilir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirler, östenitik Mn çeliklerinin veya su verilip temperlenmiş az alaşımlı çeliklerin yerine birçok alanda kullanılmaktadır. Aşınmaya ve darbeye dirençli pompa üretiminde yüksek kromlu beyaz dökme demirler artan ölçülerde kullanılmaktadır [48].

Birçok alanda yüksek kromlu beyaz dökme demirler; diğer az alaşımlı beyaz dökme demirlere göre hem daha yüksek tokluk ve aşınma direncine sahip olmaları hem de daha iyi işlenebilmeleri kullanım alanını genişletmiştir [48].

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Paventhian R. ve diğ., (2010), yaptığı çalışmalarda östenitik paslanmaz çelik ile orta karbonlu çelik çiftinin belirli sürtünme kaynak prosesi parametreleri ile birleştirilen çelik çiftlerine yapılan yorulma testleri sonucunda, yorulma ömürlerinin orta karbonlu çeliğe göre %30 östenitik paslanmaz çeliğe göre ise %40 daha düşük olduğu saptanmıştır. Buna sebep olarak ise kaynak ara yüzeyinde tane sınırlarına çökelen krom karbürlerin neden olduğu anlaşılmıştır [49].

Arivazhagan N., ve diğ., (2012), yaptığı çalışmalarda AISI4140 ile AISI304 çelik çiftinin sürtünme kaynak işlemi ile birleştirildikten sonra, farklı sıcaklıklarda korozyon testine tabii tutulmuşlardır. Kaynak ara yüzeyi, difüzyonuna ve intermetalik bileşik oluşumuna bağlı olarak esas metallerden daha fazla bozunmaya yatkın olduğu bulunmuştur. Ayrıca, sürtünme kaynak parametrelerinin bu kimyasal bozunma süreci içerisinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir [50].

Muralimohan C.H., ve diğ., (2014), titanyum ile 304L çelik çiftinin arasına nikel ara tabaka yerleştirilerek başarılı bir sürtünme kaynak işlemi gerçekleştirmiştir. Buna göre; artan sürtünme basıncına bağlı olarak nikel ara tabakasının kalınlığında bir azalma gözlemlenmiştir. En optimum sürtünme süresi 6 sn olarak belirlenmiştir. Daha fazla sürelerdeki sürtünme süreleri kaynak ara yüzeyinde kalın intermetalik bileşenlerin oluşumuna neden olduğundan dolayı, bağlanma mukavemetini düşürmektedir. Çekme testlerinde, ara yüzeylerinde oluşan sert intermetalik fazlardan dolayı gevrek kırılma gözlemlenmiştir [51].

Madhusudhan R.G. ve diğ., (2012), maraging çeliği ile düşük karbonlu çelik çiftlerine, hem nikel ara tabakasız hem de nikel ara tabakalı sürtünme kaynak işlemi yapılmıştır. Buna göre; nikel ara tabaka kullanılmadan yapılan sürtünme kaynak işleminde kaynaklı çiftin çekme mukavemeti, çentik darbe direnci ve düşük darbe direnci esas metallere göre daha düşük çıkmışken, nikel ara tabakalı kaynaklı numunelerde böyle bir durum ortaya çıkmamıştır. Bu da göstermektedir ki; nikel ara tabakanın malzeme çiftleri arasında difüzyon bariyer oluşturarak karbon ve mangan gibi kolay difuze olan atomların göçüne izin vermeyerek kırılgan ve sert fazların

oluşumunu engellediğinden başarılı bir kaynaklı çözüm yöntemi olarak ortaya çıkmıştır [52].

Çelik S.ve diğ., (2008), yaptığı çalışmalarda düşük alaşımlı paslanmaz çelik AISI 4140 ile orta karbonlu çelik olan AISI 1050 çelik çiftinin belirli sürtünme kaynak prosesi parametreleri ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Buna göre; sürtünme kaynağı parametrelerinden olan sürtünme basıncı ve devir sayısının, birleştirilen kaynaklı parçaların gerilmeleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmış olup, yapılan çekme testlerinde, en yüksek değer, AISI 1050 çeliğinin çekme mukavemetinden %6 daha fazla çıktığı belirlenmiştir. Sürtünme basıncının çok fazla olduğu durumlarda ise kaynak ara yüzeyinden çok fazla transfer olan viskoz madde hacminden dolayı, çekme mukavemetlerinde bir düşüş gözlemlenmiştir [53].

Damodaram R. ve diğ., (2013), yaptığı çalışmalarda nikel demir ana fazlı süper alaşım olan 718 alaşımı sürtünme kaynak prosesi parametreleri ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Kaynak bölgesinde ölçülen sıcaklığın en yüksek olduğu saptanmıştır (1100 °C) buna göre aşırı soğumaya bağlı olarak yine kaynak ara yüzeyinde ince ve dinamik yeniden kristalleşen tanelerin olduğu gözlemlenmiştir [54].

Suresh D. ve diğ., (2015), yaptığı çalışmalarda AA6061 alüminyum alaşımı ile AISI 4340 çelik çiftinde gümüş ara tabaka kullanılarak başarılı bir sürtünme kaynak işlemi gerçekleştirmiştir. Alüminyum ara tabaka Fe-Al ve Al-Ag bazlı yumuşak bileşenlerin ( $Ag_3Fe_2$ ,  $Ag_2Al$  ve  $Ag_3Al$ ) kaynak ara yüzeyinde oluşumuna izin vermiştir. Böylece çekme testlerinde daha iyi sonuçlar gözlemlenmiştir [55].

Kumar R. ve diğ., (2015), yaptığı çalışmalarda Ti6Al4V titanyum alaşımı ile AISI 304L paslanmaz çelik çiftinin arasına farklı kalınlıkta bakır ara tabaka yerleştirilerek yapılan sürtünme kaynağındaki bakır ara tabaka, ara yüzeyde bir astar görevi görerek, çatlak ve boşluk oluşumu ve martenzit oluşumunu engellemiş ara yüzeyin kalitesinde önemli bir rol oynamıştır. Ayrıca bakır ara tabakanın kalınlığının azalmasına bağlı olarak, mekanik ve metalurjik karakterizasyon testlerinde daha iyi sonuçlar vermiştir. Bakır ara tabakanın her iki malzeme çiftine de difüze olduğu, EDS sonuçlarından anlaşılmıştır [56].

### **3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

#### **3.1. Çalışmanın Amacı**

Sürtünme kaynak yöntemi; ziraat makineleri, kesme takımları, uçak ve uzay sanayi parçaları, otomotiv endüstrisi ve diğer özel uygulamalarda kullanılabilmektedir. Bu yöntemle, ergitme kaynağıyla kaynak edilemeyen ya da kaynak edilebilirliği güç olan farklı ya da aynı cins malzeme çiftleri tam ergime oluşmadan ve basınç sayesinde başarılı bir şekilde birleştirilebilmektedir.

Metallerin sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi konusu, araştırmacılar için büyük bir önem kazanmıştır. Bu alanda yapılan literatür taramasında bilimsel çalışmalar, sürtünme kaynağına ait farklı parametrelerin değiştirilmesi ile yapılan kaynakların metalurjik yapısının incelenmesi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun yanı sıra sürtünme kaynağının, çevre dostu ve ekonomik oluşu ile birlikte geleneksel yöntemlerle kaynak edilmesi pek zor olan farklı ya da aynı tür malzemelerin bile kaynak edilebilir olması dikkatleri kısa zaman içinde bu yöntem üzerine çekmeyi başardığı için bu çalışmada ticari amaçlı kullanılan AISI1040 çeliği ile literatür’de kaynağının yapılmasının mümkün olmadığı söylenen yüksek kromlu beyaz dökme demir’in kaynağının farklı devir sayıları kullanılarak birleştirilmesi sağlanmış olup sonrasında, gerekli karakterizasyon testleri yapılarak en uygun sürtünme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

#### **3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri**

Bu çalışmada; METARGE döküm fabrikası tarafından üretimi gerçekleştirilen 75 mm boya ve 12 mm çapa sahip silindir şekilli yüksek kromlu beyaz dökme demir ile AISI1040 çelik çifti, sürtünme kaynağı için kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi (% ağı.)

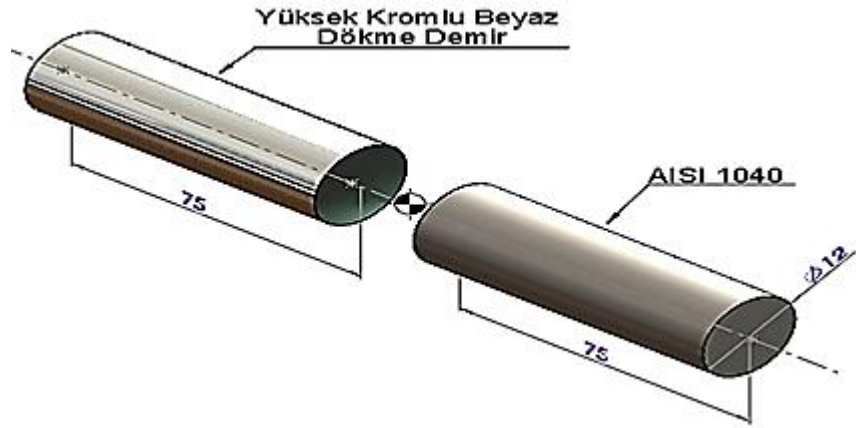
| Malzeme   | Fe    | C    | Si   | Mn  | P    | S    | Cr   | Ni  | Mo  | Cu   | Ti   | Nb   | W   |
|-----------|-------|------|------|-----|------|------|------|-----|-----|------|------|------|-----|
| YKBDD     | 62.43 | 3.2  | 1.16 | 2.3 | 0.01 | 0.02 | 27.4 | 0.5 | 2.3 | 0.23 | 0.02 | 0.03 | 0.4 |
| AISI 1040 | 98.53 | 0.41 | 0.2  | 0.8 | 0.02 | 0.04 | -    | -   | -   | -    | -    | -    | -   |

### 3.3. Sürtünme Kaynak İşlemi Öncesi Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri 75 mm uzunlukta hazırlandı ve kaynak edilerek birleştirilecek yüzeyler bilgisayar kontrollü CNC torna tezgâhında, uç radyüsü 0.3 olan kesici takım ile yüzey pürüzlülüğü 0.1 olacak şekilde işlendi. Tornalamada kullanılan bilgisayar kontrollü CNC torna tezgahı Şekil 3.1’de verilmiştir. Ardından ince temizlik için aseton banyosunda temizlenerek kurutuldu. Kaynak öncesi deneyde kullanılan malzemelerin şematik görüntüleri ve ölçüleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



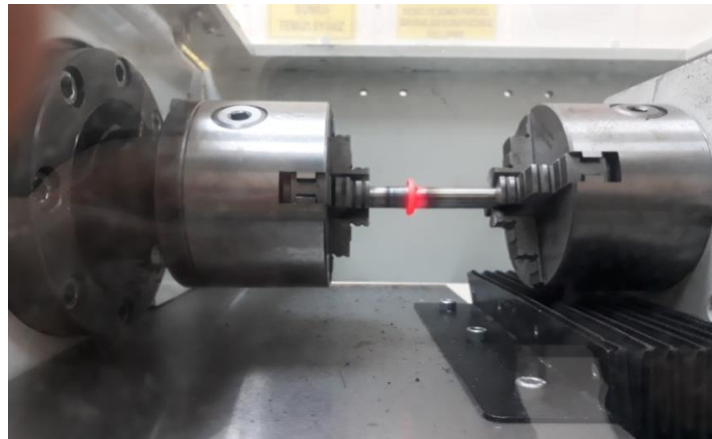
Şekil 3.1 Tornalamada kullanılan bilgisayar kontrollü CNC torna tezgâhı



Şekil 3.2 Sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilecek numunelerin şematik görünümü ve ölçüleri

#### 3.4. Sürtünme Kaynak İşlemi

Sürtünme kaynak işlemi; Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvar'ında bulunan sürekli tahrikli sürtünme kaynak cihazı kullanılarak oda koşullarında gerçekleştirilmiş olup, farklı devir sayılarının sürtünme kaynak işlemi üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan sürtünme kaynak makinasının görüntüsü Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Sürtünme kaynağı deneylerinde kullanılan parametreler ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Sürtünme kaynak makinası

Çizelge 3.2 Sürtünme kaynak yöntemiyle yapılan birleştirme işleminin parametreleri

| Numune No | Devir Sayısı (dev/dk) | Sürtünme Süresi (sn) | Sürtünme Basıncı (MPa) | Yığma Basıncı (MPa) | Yığma Süresi (sn) |
|-----------|-----------------------|----------------------|------------------------|---------------------|-------------------|
| S1        | 1600                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                |
| S2        | 1700                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                |
| S3        | 1800                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                |
| S4        | 1900                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                |
| S5        | 2000                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                |

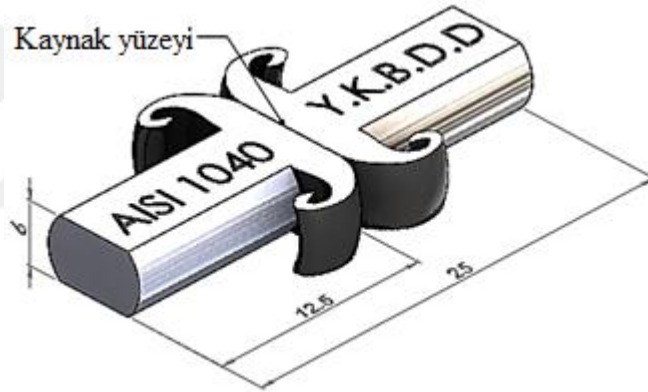
### 3.5. Metalografik İncelemeler

Sürtünme kaynağı yapılan numunelerin kaynak ara yüzeyleri; Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvar'ında bulunan Şekil 3.4'de verilen metkon marka zımparalama ve parlatma cihazında sırasıyla 80-1200 mesh'lik zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Metalografik incelemeler için hazırlanan numune boyutları Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Daha sonra 1-3 µm tane boyutuna sahip elmas pasta ile parlatma işlemine tabii tutuldu. Bu işlemin ardından numuneler, etil alkol (etanol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) banyosu içerisinde 6 dakika kadar temizleme işlemine tabi tutulup ve kurutucu yardımıyla kurutuldular. Sürtünme kaynak sonrası numunelerde meydana gelen fazları belirgin hale getirmek için; AISI 1040 çelik tarafı Nital (%2 HNO<sub>3</sub> +%98 Etanol) çözeltisi kullanılarak, yüksek kromlu beyaz dökme demir tarafı ise Vilella çözeltisi (1 gr. Pikrik asit, 5 ml. HCl ve 100 ml. Etil alkol) ile daldırma yöntemiyle 15-20 sn. süreyle dağlama işlemine tabii tutuldu.



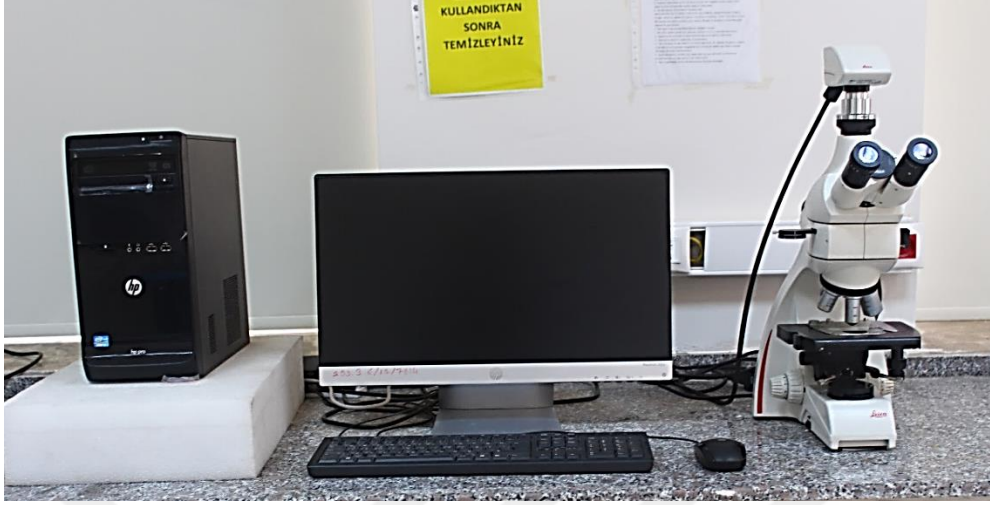


Şekil 3.4 Zımparalama ve parlatma makinesi



Şekil 3.5 Metalografik incelemeler için hazırlanan numune boyutları

Daha sonra numunelerin mikroyapı fotoğrafları; Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği Laboratuvar'ında bulunan, Şekil 3.6'daki fotoğrafı verilen LEICA DM750 marka optik mikroskopta çekilmiştir.



Şekil 3.6 Optik mikroskop

### 3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve Elementel Haritalandırma (Mapping) Analizleri

Sürtünme kaynak işlemi sonrası kaynak ara yüzeyinde meydana gelen fazların dağılımını görmek amacıyla Adıyaman Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvar'ında bulunan ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve buna bağlı enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ve elementel haritalandırma (mapping) analiz cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.7)



Şekil 3.7 Deneylerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM)

**3.7. Yüzey XRD Analizleri**

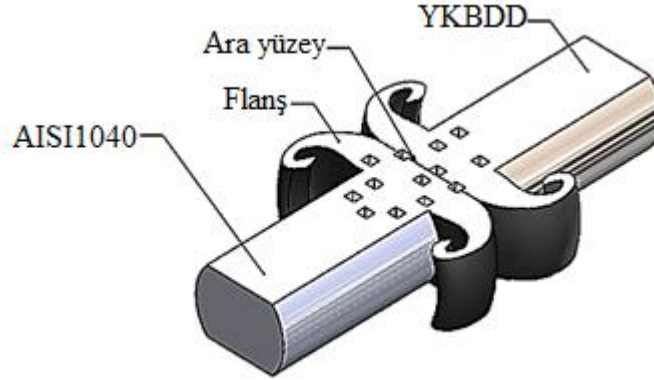
Sürtünme kaynak işleminden sonra ısı tesiri altında kalmış bölgede meydana gelen faz ve bileşikleri belirlemek için Malatya, İnönü Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvar'ında (İBTAM) bulunan Bruker marka XRD cihazı (X-ray diffractometer RadB-DMAX II, Cu K $\alpha$  radyasyonu,  $\lambda=1,5418$  Å dalga boyu) (Şekil 3.8) ile testler yapıldı.



Şekil 3.8 XRD cihazı

**3.8. Mikrosertlik Ölçümü Analizi**

Sürtünme kaynak işlemi sonrası kaynak ara yüzeyinde meydana gelen sertlik değişimlerini belirlemek için numuneler her iki tarafından talaşlı imalat yöntemi işlenerek istenilen ölçüye getirildi. Mikrosertlik analiz noktalarının kaynaklı bağlantı üzerindeki şematik görünümü Şekil 3.9'da verilmiştir. Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği'nde bulunan QNESS Q10 marka mikrosertlik cihazı (Şekil 3.10) kullanıldı. Mikrosertlik ölçümleri 100 gr yük altında 5 sn süreyle 0.5 mm aralıklarda Vickers (HV) skalasında gerçekleştirildi.



Şekil 3.9 Mikrosertlik analiz noktalarının kaynaklı bağlantı üzerindeki şematik görünümü



Şekil 3.10 Mikrosertlik test cihazı

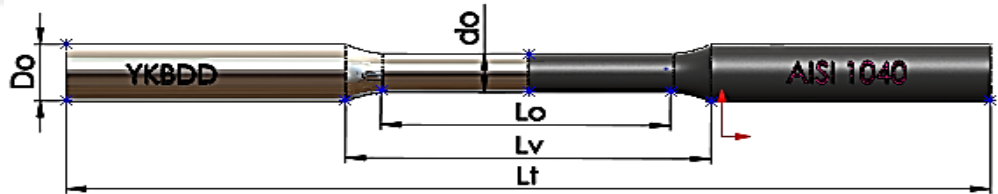
### 3.9. Çekme Testi Analizi

Sürtünme kaynak işlemi sonrası kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla; Adıyaman Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvar'ında bulunan Universal marka STS 2011 model çekme ve basma cihazı (Şekil 3.11) kullanılmıştır. Çekme test numuneleri, ASTM E-8M-04 standartlarına uygun olacak şekilde bilgisayar kontrollü CNC torna tezgâhında hazırlanmıştır (Şekil 3.12). Standartlara uygun olarak hazırlanan çekme test numuneleri Şekil 3.13'de

verilmiştir. Çekme testi sonrası numunelerin gerilmeleri ve çekme mukavemet değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.11 Deneylerde kullanılan çekme-basma test cihazı



Şekil 3.12 ASTM E-8M-04 standartlara uygun çekme test numunesi şematığı



Şekil 3.13 Çekme test numuneleri

**3.10. Kırık Yüzey Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi**

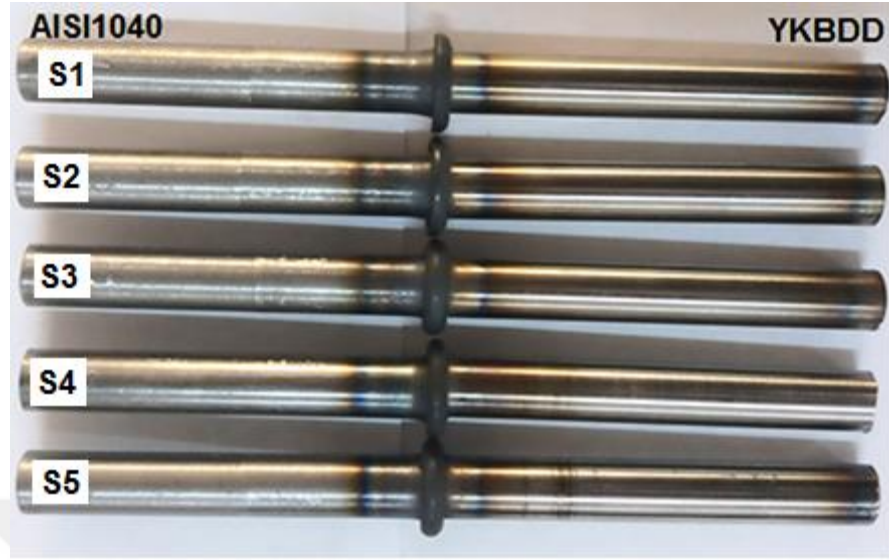
Sürtünme kaynak işlemi sonrası kaynak ara yüzeyinde meydana gelen kaynaklı bağlantıların çekme testinden sonra kırık yüzey morfolojisini analiz etmek amacıyla; Adıyaman Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvar'ında bulunan ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve buna bağlı enerji dağılım spektroskopisi (EDS) yüzey analiz cihazı kullanılmıştır.



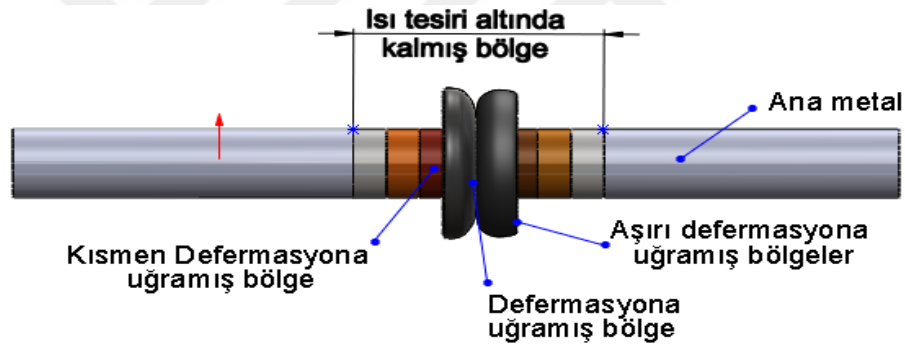
**4. DENEY SONUÇLARI****4.1. Deney Numunelerinin Makroyapı Değerlendirmesi**

Farklı devir sayıları (1600, 1700, 1800, 1900 ve 2000 dev/dak.), sürtünme basıncı (80 MPa), yığma basıncı (150 MPa), sürtünme süresi (12 sn) kullanılarak kaynak edilen S1, S2, S3, S4 ve S5 no'lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası yüzey makro fotoğrafları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Kaynaklı numunelere ait makroyapılar incelendiğinde, sürtünme kaynak işlemi sonrası aşırı soğuma hızıyla ilişkili olarak gözeneksiz ve çatlaksız kaynaklı bağlantıların elde edildiği aşikâr olup, kaynak işlemlerinin başarılı bir şekilde görüldüğü gözlemlenmektedir. Termo-mekanik olarak ısı tarafından etkilenmiş bölgenin görüntüsü Şekil 4.2'de görülmektedir. Kaynaklı numunelerin hepsinde YKBDD tarafında nispeten AISI 1040 tarafına göre daha dar bir termo-mekanik olarak ısı tesiri altında kalan bölge vardır. Sürtünme kaynağı sırasında, sürtünmeden kaynaklı oluşan ısı artışı, kaynak ara yüzeyden başlayarak esas metallere doğru ilerlemeye başlar. Fakat YKBDD tarafı, AISI1040 tarafına nazaran daha düşük termal iletim katsayısına sahip olduğundan dolayı, YKBDD tarafında meydana gelen ısı artışı, birim zamanda daha az yayılır. Bu nedenle, AISI1040 tarafındaki termo-mekanik olarak ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliği daha fazla olur. Sonuç olarak, bu durumun varlığı farklı cins metallerin farklı ısı iletim katsayılarına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.





Şekil 4.1 Deney numulerinin makro görüntüsü

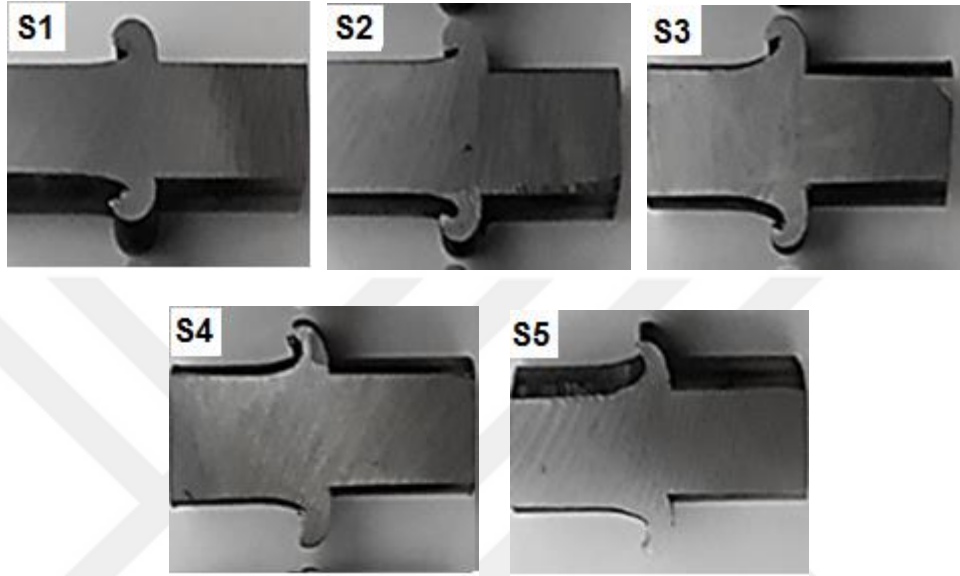


Şekil 4.2 Termomekanik etkileşim altında kalmış bölgelerin görünümü

Farklı devir sayıları (1600, 17000, 1800, 1900 ve 2000 dev/dak.), sürtünme basıncı (80 MPa), yığma basıncı (150 MPa), sürtünme süresi (12 sn) kullanılarak kaynak edilen S1-S5 no'lu kaynaklı numunelerin arayüzey makro yapıları görünümü Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Kaynak parametrelerine göre boyca kısalma miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu kaynaklı numunelerin kaynak bölgesine ait ara yüzeyleri analiz edildiğinde, genel olarak benzer bir görüntü sergilemesine rağmen, artan devir sayısı ile ilişkili olarak oluşan flanşların miktarlarında önemli farklılıklar tespit edilmiştir. Ayrıca kaynaklı numunelerin tümünde oluşan flanşların literatür'de belirtildiği gibi çanak şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Kaynak ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışı, kaynak metallerini daha fazla viskoz haline getirerek

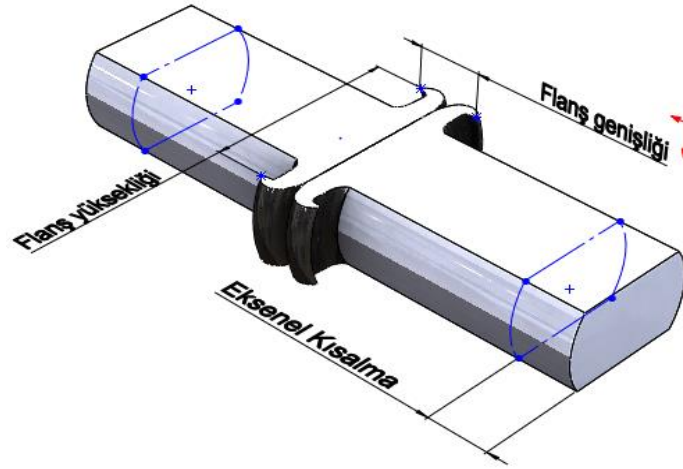


ve aksel basıncının etkisi ile flanş oluşumlarına sebebiyet vermiştir. Oluşan flanşların miktarı ve profili, sürtünme kaynağı ile birleştirilen kaynak metallerinin mekanik ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişir.



Şekil 4.3 Sürtünme kaynak sonrası kaynaklı numunelerin arayüzey görünümü

S1-S5 no'lu kaynaklı bağlantılar için meydana gelen boydaki kısalmalar; 3, 4, 4.5, 5, 6 mm olarak sırasıyla ölçülmüştür (Şekil 4.4). Maksimum boyca kısalma S5 no'lu kaynaklı numunede meydana gelmişken, minimum boyca kısalma ise S1 no'lu kaynaklı bağlantıda meydana gelmiştir. Artan devir sayılarıyla orantılı olarak artan boyca kısalma miktarları, dışarı taşan malzeme miktarları (flanş) ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, kaynaklı numunelerde meydana gelen boyca kısalmaların derecesini, sürtünme kaynağı sırasındaki sürtünme ve yığma aşamalarında ortaya çıkan enerji ve ısı girdisindeki artışlar ile ilgilidir [34]. Kaynaklı numunelerde artan devir sayısı ile birlikte artan ısı girdisi, diğer numunelere için de lineer olarak artmaktadır. Boyca kısalmalar genellikle AISI1040 çeliği tarafında gözlemlenmiştir. Buna sebep olarak, içerdiği karbon elementinden kaynaklı plastik şekil değiştirme yeteneğinin fazla olması gösterilebilir. Ayrıca, YKBDD tarafında sert metal krom karbürleri ve martenzit fazları, YKBDD'nin şekil değişimine müsaade etmemektedir.



Şekil 4.4 Deney numunelerinin flanş geometrisi ve boyca kısılma miktarına ait özellikler

Çizelge 4.1 Kaynak parametrelerine göre boyca kısılma miktarları

| Numune No | Devir Sayısı (dev/dk) | Sürtünme Süresi (sn) | Sürtünme Basıncı (MPa) | Yığma Basıncı (MPa) | Yığma Süresi (sn) | Boyca Kısılma (mm) |
|-----------|-----------------------|----------------------|------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| S1        | 1600                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                | 3                  |
| S2        | 1700                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                | 4                  |
| S3        | 1800                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                | 4.5                |
| S4        | 1900                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                | 5                  |
| S5        | 2000                  | 12                   | 80                     | 150                 | 12                | 6                  |

#### 4.2. Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Analizleri

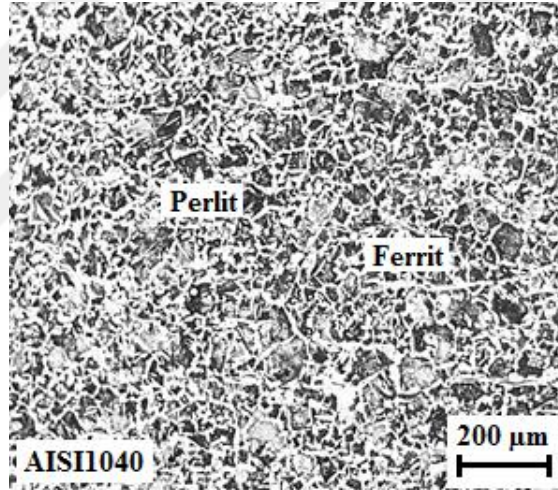
Kaynak öncesi AISI1040 çeliğine ait orijinal mikroyapının optik fotoğrafı Şekil 4.5’de verilmiştir. AISI1040 çeliğinin orijinal mikroyapısında ferrit ve perlit fazları hemen hemen eşit olarak dağılmış halde bulunmaktadır (siyah bölgeler= Perlit; beyaz bölgeler= Ferrit). Ayrıca bu taneler, eş yönlenmeye sahiptir. AISI1040 çeliğinin karbon eşdeğerliliği, Uluslararası Kaynak Enstitüsü’nün IX no’lu Kaynak Komisyonunun belirlediği formüle göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Ceş = \% C + \% Mn / 6 + \% Si / 24 + \% Ni / 40 + \% Cr / 5 + \% Mo / 4$$

Formülde AISI1040 çelik malzeme için değerler yerine konulursa;

$$Ceş (AISI1040) = 0.41 + 0.8/6 + 0.2/24 = 0.55 \text{ bulunur.}$$

$Ceş > 0.45$  olduğundan dolayı, AISI1040 çeliğinin kaynak sırasında sertleşme ve çatlama eğiliminde olduğunu gösterir. Buna sebep olarak ise kaynak sonrası oluşan sert ve kırılgan martenzit fazından kaynaklandığı düşünülmektedir [57]. Genel olarak bu durumun varlığı ergitmeli kaynak yöntemlerinde mevcuttur. Ancak, sürtünme kaynağı işleminde kaynak süresi çok kısa ve tam ergimenin meydana gelmemesinden dolayı bu durum bu kaynak yönteminde görülmemektedir.



Şekil 4.5 AISI 1040 çeliğinin mikroyapı fotoğrafı

Kaynak öncesi YKBDD ait orijinal mikroyapının optik fotoğrafı Şekil 4.6'da verilmiştir. YKBDD için malzeme kompozisyonuna bağlı karbon eşdeğer formülü aşağıda belirtilmiştir.

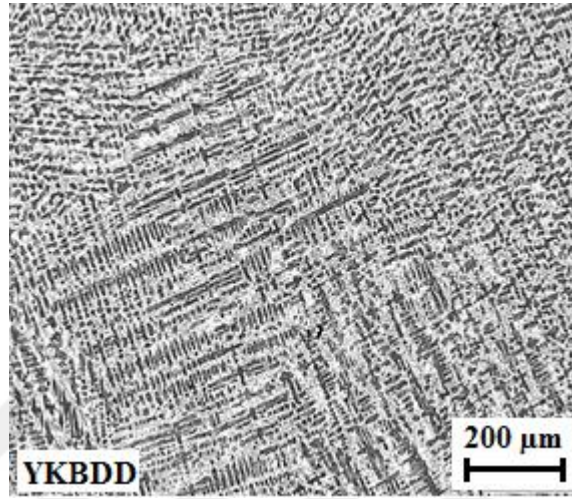
$$Ceş = \%C + (\%Si + \%P) / 3$$

Formülde YKBDD için değerler yerine konulursa;

$$Ceş = 3.2 + (1.16 + 0.01) / 3$$

$$Ceş = 3.59$$

Ceş < 4.3 olduğundan dolayı, YKBDD'nin hipoötektik bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Hipoötektik bir dökme demirde meydana gelen katılaşma östenit dendritlerinin kristalleşmesiyle başlar. Grafit oluşumuna izin vermez [57].

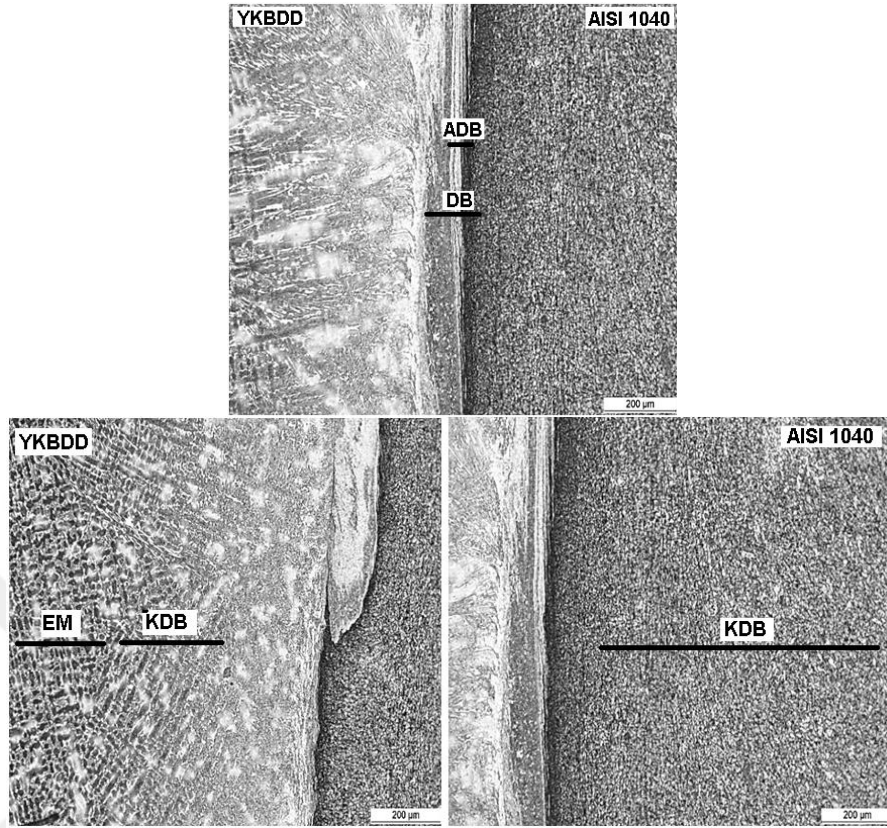


Şekil 4.6 YKBDD'nin mikroyapı fotoğrafı

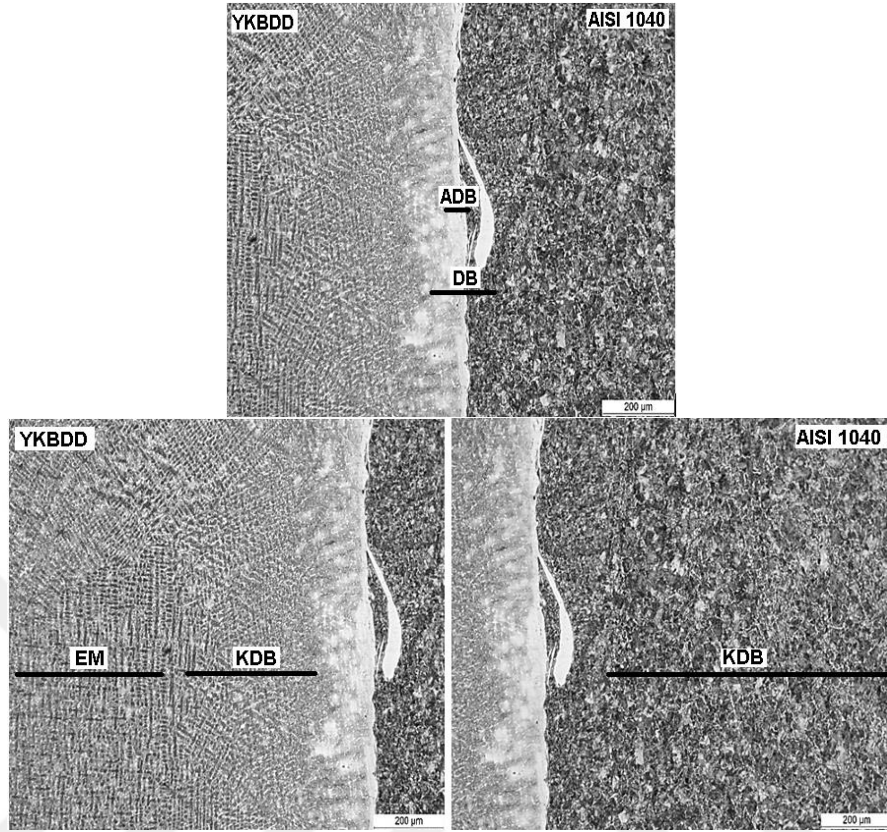
YKBDD ile AISI1040 çelik çiftinin farklı devir sayısı (1600, 1700, 1800, 1900 ve 2000 dev/dk), sürtünme süresi (12 sn), sürtünme basıncı (80 MPa), yığma basıncı (150 MPa) ve yığma süresi (12 sn) kullanılarak kaynak edilen S1, S2, S3, S4 ve S5 no'lu kaynaklı numunelere ait kaynak sonrası ara yüzey optik fotoğrafları Şekil 4.7-Şekil 4.11'de, SEM fotoğrafları Şekil 4.12-Şekil 4.16'da ve EDS analizleri Şekil 4.17-Şekil 4.21'de verilmiştir. Sürtünme kaynak sonrası tüm kaynaklı numunler için literatürde de belirtildiği gibi dört farklı bölgenin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bölgeler sırasıyla, aşırı deforme olmuş bölge (ADB), deforme olmuş bölge (DB), kısmen deforme olmuş bölge (KDB) ve esas metal (EM)'dir [50]. Meydana gelen bu farklı karakterlere sahip bu bölgelerin genişliği sürtünme kaynak parametrelerine bağlı olarak değişmektedir [58]. Kaynaklı numunelerin tamamında kaynak bölgesinde çatlak ve bağlantısız bölgelerin olmadığı tespit edilmiştir. Bunun yanında belirgin deformasyon yönlenmelerinin varlığı da aşikârdır. 1600 ve 1700 dev/dak'lık devir hızında birleştirilen S1 ve S2 no'lu kaynaklı numunelerin kaynak sonrası birleşme ara kesitinden alınan mikroyapı SEM mikrografı Şekil 4.12 ve 4.13'de verilmiştir. Bu kaynaklı numuneler; S3, S4, ve S5 no'lu kaynaklı numunelere

nazaran daha az devir sayısına sahip olduğundan dolayı, difüzyon için yeterli sürenin olmaması ve düşük ısı girdisi sebeplerinden dolayı iç bölgelerinde bağlantısız noktaların olduğu düşünülmektedir. Yine S1 ve S2 no'lu kaynaklı numuneler için aşırı deforme olmuş bölge (ADB) ve bu hemen bu bölgenin yanında yer alan deforme olmuş bölge (DB) arasında mikroyapı açısından çok fazla bir fark gözlemlenememiştir. 1800 ve 1900 dev/dak'lık devir hızlarında birleştirilen S3 ve S4 no'lu kaynaklı numunelerin kaynak sonrası birleşme ara kesitinden alınan mikroyapı SEM fotoğrafları incelendiğinde, aşırı deforme olmuş bölgenin (ADB) genişliği, S1 ve S2 no'lu kaynaklı bağlantılara nazaran daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma sebep olarak ise artan devir sayısı ile beraber kaynak ara yüzeyine nüfuz eden artan ısı girdisi gösterilebilir. Çünkü artan ısı girdisi, kaynak ara yüzeyinde daha fazla malzemeyi viskoz hale getirerek, dışarı taşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, kısmen deforme olmuş bölge'deki (KDB) tanelerin, deforme olmamış bölge'deki (EM) tanelere nazaran daha küçük olduğu belirlenmiştir. 2000 dev/dak ile en yüksek devir sayısına sahip S5 no'lu kaynaklı numunede ise aşırı deforme olmuş bölge'nin (ADB) genişliği, S1 ve S4 no'lu kaynaklı numunelere nazaran daha da artmış olduğu gözlemlenmiştir. Bu kaynaklı numune için, maksimum ısı girdisi en fazla kaynak ara yüzey sıcaklığına sebep olduğundan dolayı, aşırı soğumaya maruz kalan numunenin S5 no'lu kaynaklı bağlantı olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak bu kaynaklı bağlantıda aşırı deformasyona uğramış bölgenin (ADB) tane boyutu azalmıştır.

Tüm kaynaklı numuneler için, yüksek sürtünme süresi ve artan devir sayısına bağlı olarak, kaynaklı bağlantılarda meydana gelen sıcaklık artışı, kaynak ara yüzeylerinin sıcaklıklarını artırmaktadır. Bu sıcaklık artışları, kaynak ara yüzeydeki ekstrüzyon derecesini artırır. Buna bağlı olarak termomekanik etki aşırı dövülmüş ve yönelmiş tanelerden oluşan bir yapıyı ortaya çıkarır.

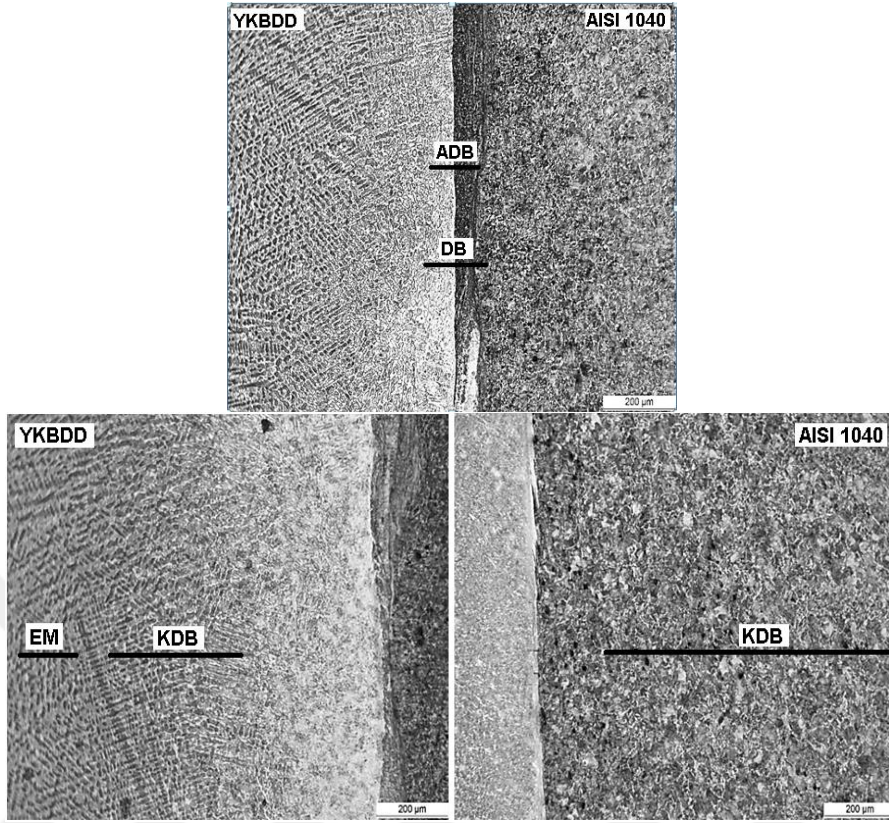


Şekil 4.7 S1 no'lu numunenin optik resimleri



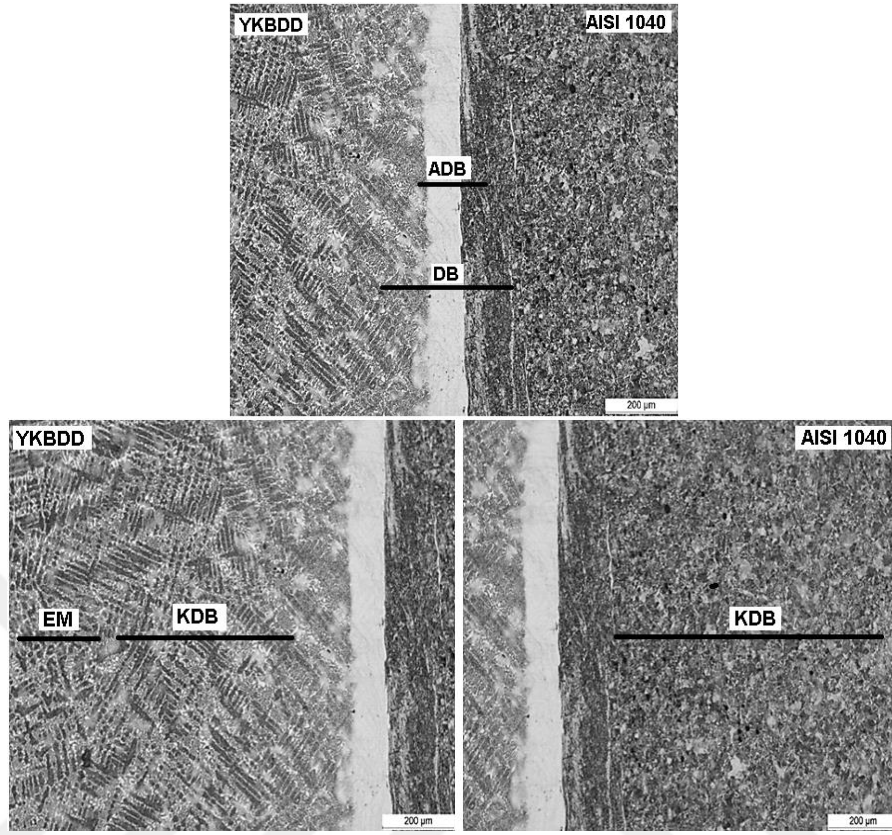
Şekil 4.8 S2 no'lu numunenin optik resimleri



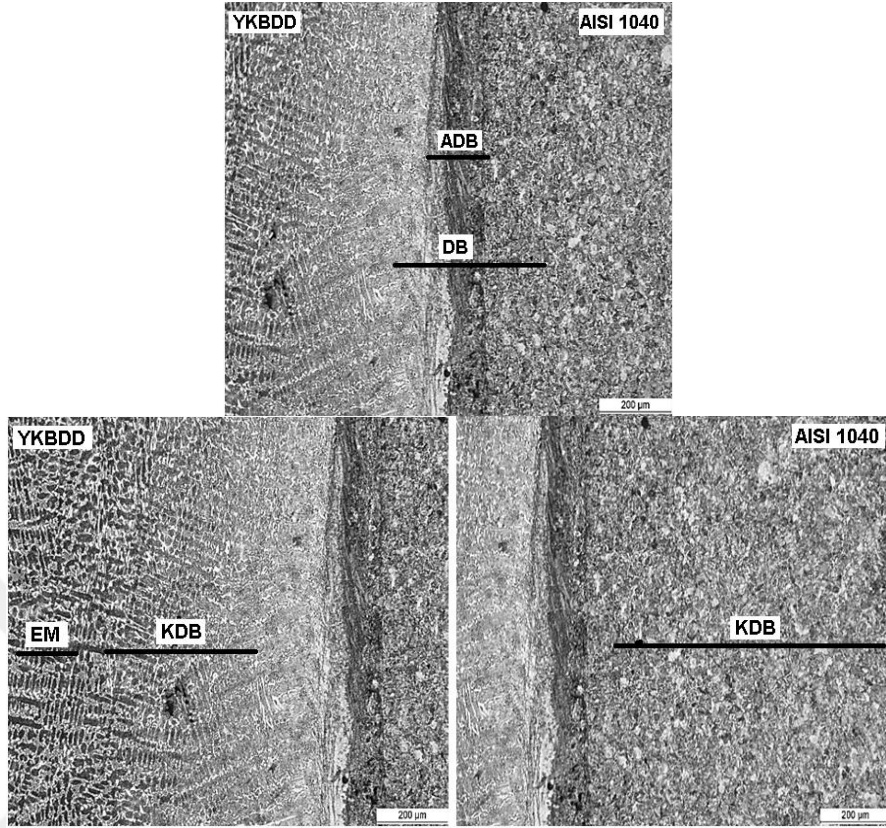


Şekil 4.9 S3 no'lu numunenin optik resimleri

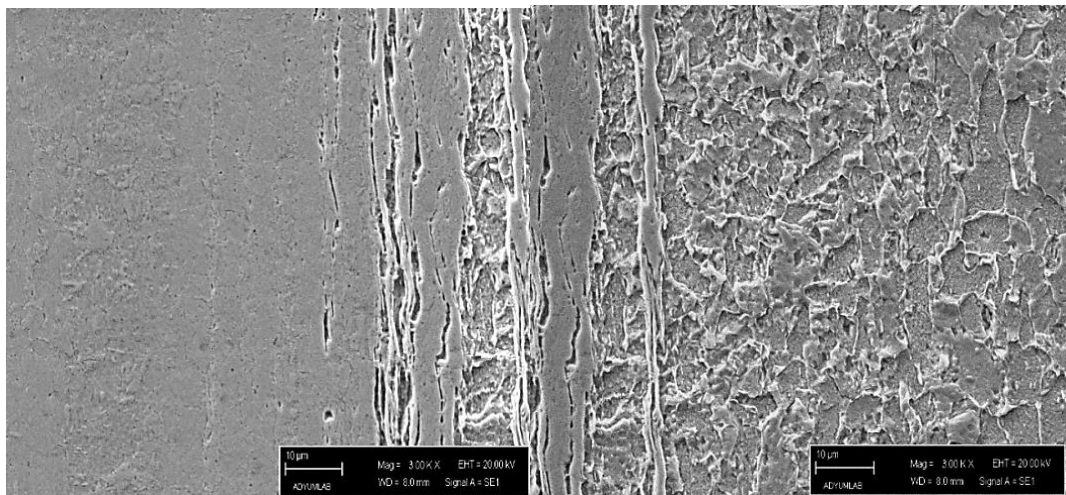
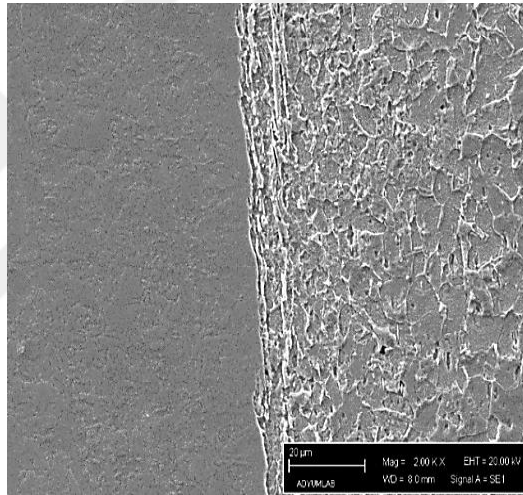
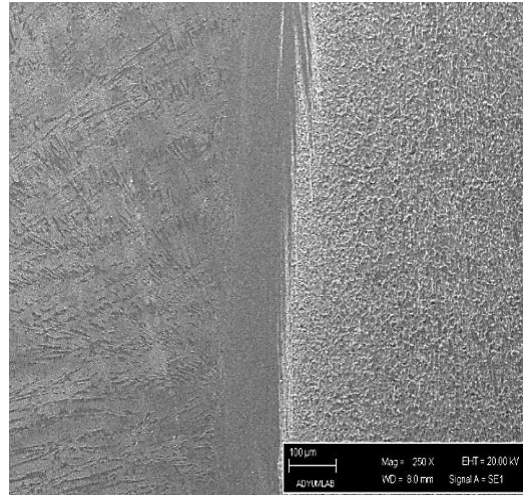




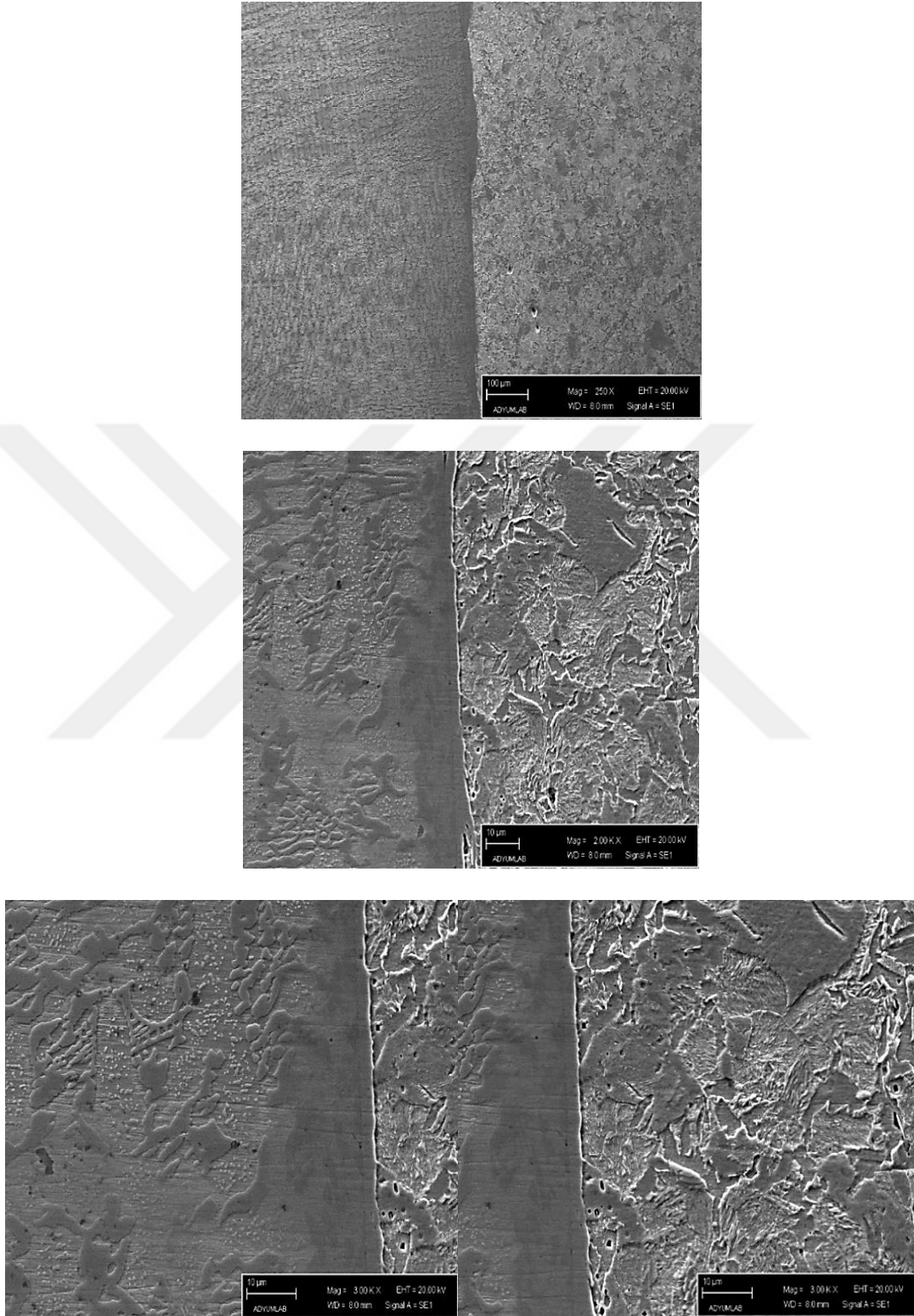
Şekil 4.10 S4 no'lu numunenin optik resimleri



Şekil 4.11 S5 no'lu numunenin optik resimleri

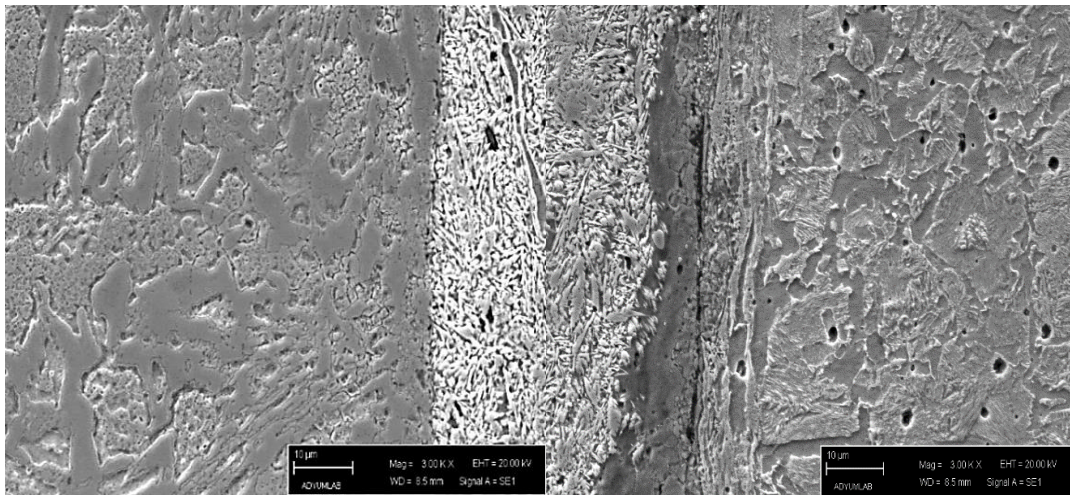
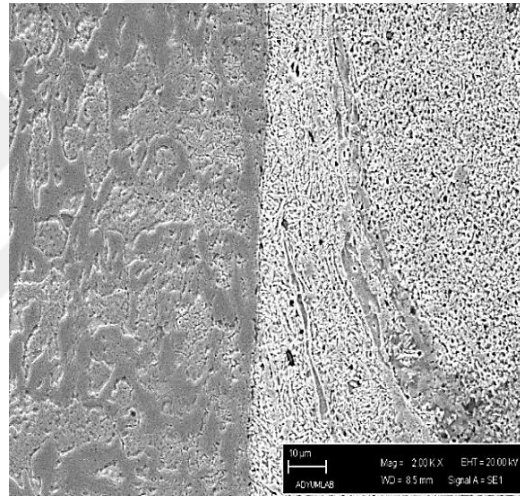
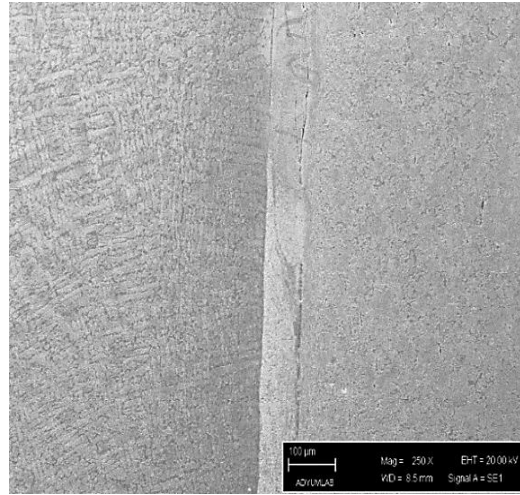


Şekil 4.12 S1 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü

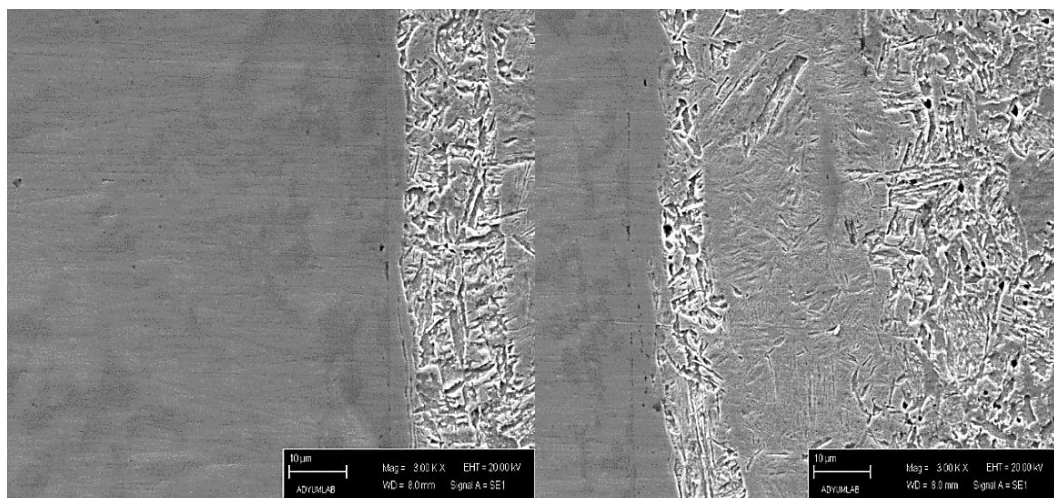
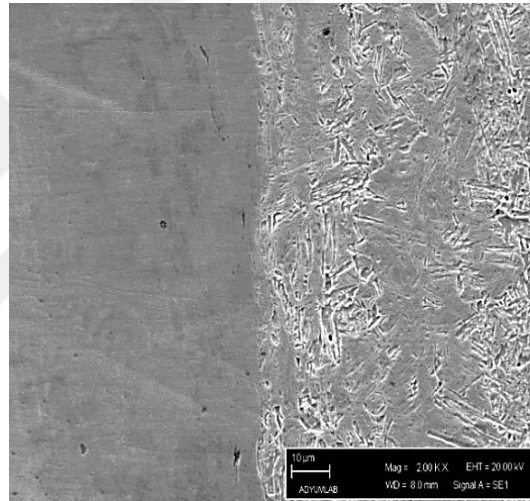
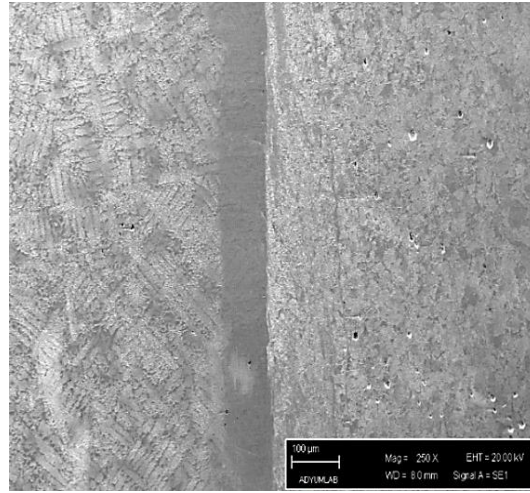


Şekil 4.13 S2 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü



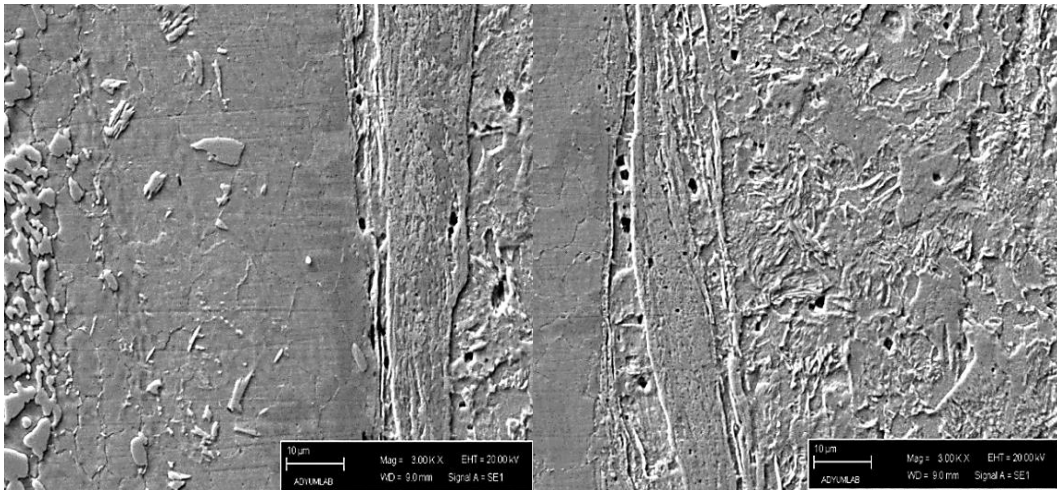
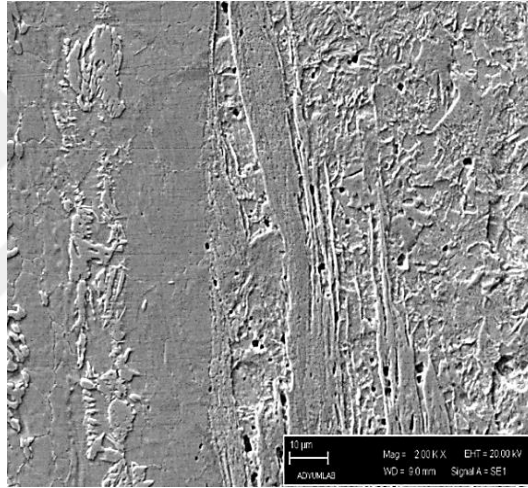
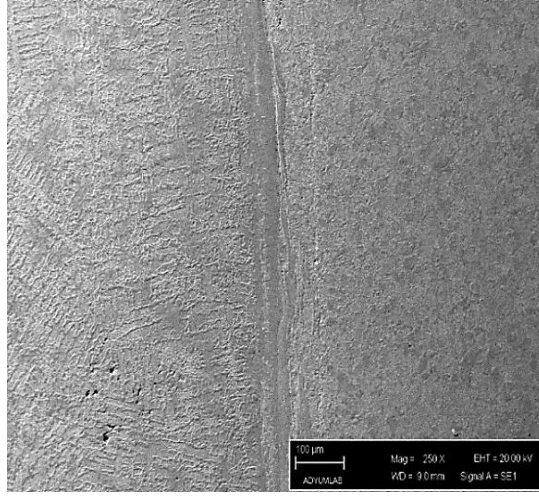


Şekil 4.14 S3 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü



Şekil 4.15 S4 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü



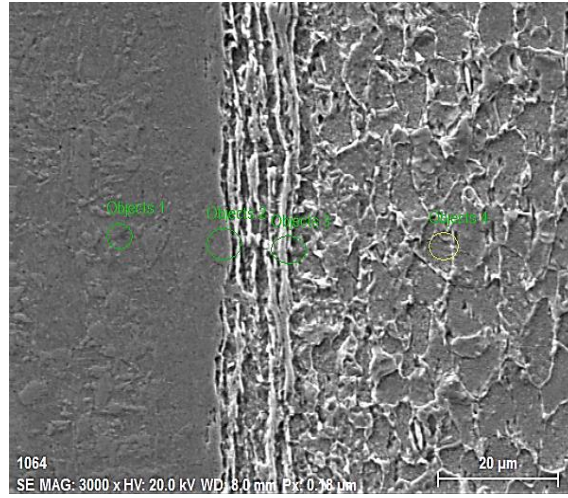


Şekil 4.16 S5 no'lu numunenin genel SEM görüntüsü

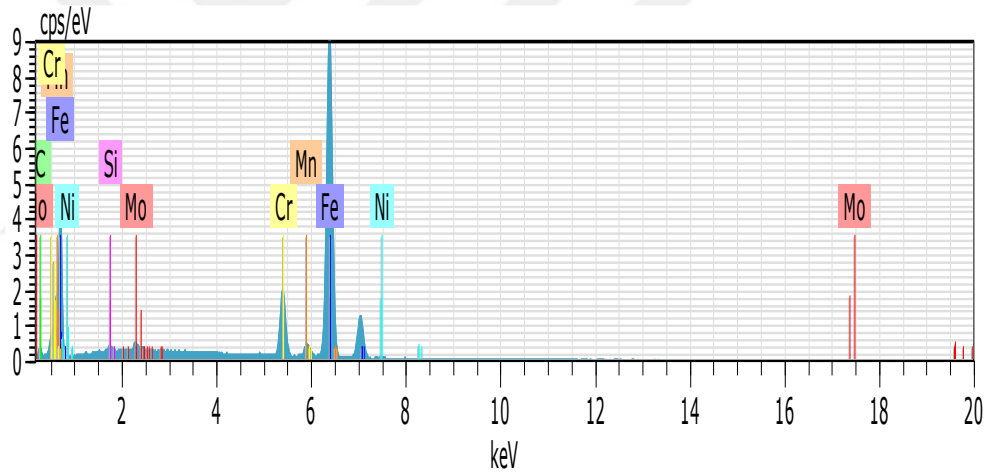
**4.3. EDS Analiz Sonuçları**

S1-S5 no'lu kaynaklı bağlantılara ait EDS sonuçları Şekil 4.17-18 ve Çizelge 4.2-21'de verilmiştir. S1-S5 numunelerinin elementer % ağırlık sonuçları ise Çizelge 4.22'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, sürtünme ısısından kaynaklanan ara yüzeylerdeki sıcaklık artışı; artan devir sayısından dolayı S1, S2 ve S3 no'lu kaynaklı bağlantılara göre S4 ve S5 numunelerinde daha fazla olmaktadır. Sıcaklık, difüzyon için bir itici güç olduğundan dolayı difüzyonun daha fazla ve daha kolay olması beklenmektedir. Çünkü yüksek sürtünme süresi ve devir sayısının artışına bağlı olarak, artan ısı girdisi ve kaynak bölgesindeki sıcaklığının artış göstermesi difüzyonu artırmaktadır. Bu durum, birim zamanda ulaşılan sıcaklık derecesinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu durumu EDS analizleri de doğrulamaktadır. Buna göre EDS sonuçlarından Cr, C, Mn, Mo, Si ve Ni gibi elementlerinin difüzyonunun yüksek devirli birleştirmelerde önceki kaynaklı bağlantılara göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Analiz sonuçlarından; artan devir sayısına bağlı olarak 30 µm' lik mesafede YKBDD den AISI1040 karbonlu çelik malzemeye doğru krom ve nikel elementi geçişi olmuştur. Aynı mesafede AISI1040 çelikten YKBDD tarafına doğru karbon elementi difüzyonunda bir miktar artış meydana geldiği görülmektedir. Sürtünme ısısından kaynaklanan ara yüzeylerdeki sıcaklık artışı AISI1040 ve YKBDD arasındaki malzeme difüzyonunu kolaylaştırmıştır. Fakat esas metale doğru gidildikçe element difüzyonunun azaldığı ve malzemelerin kendi içyapılarında bulunan orijinal elementel yüzdelere yaklaşıldığı tespit edilmiştir.



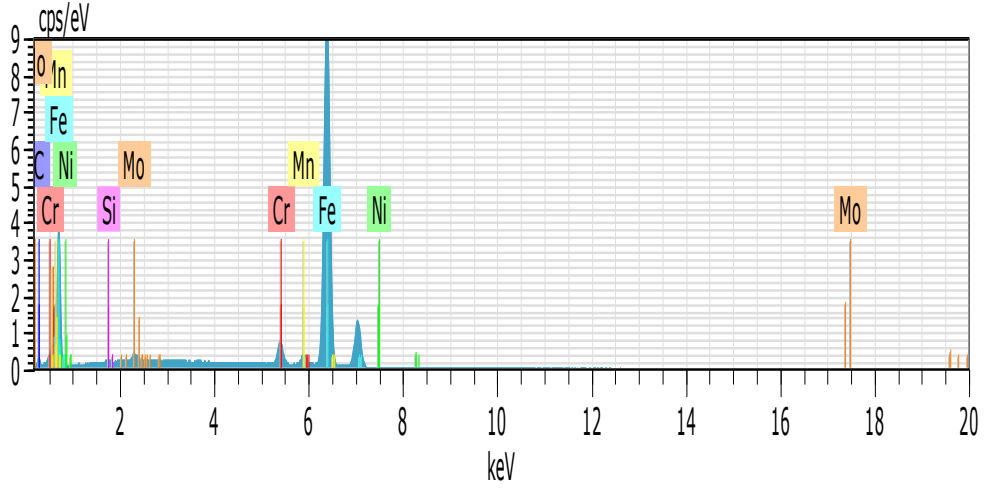


Şekil 4.17 S1 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları



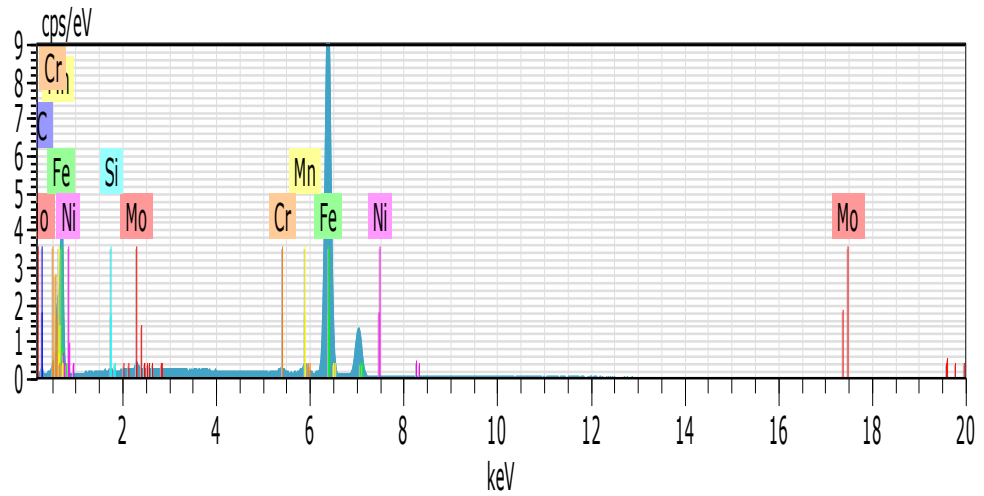
Çizelge 4.2 S1 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 75.58       | 82.85        | 67.41          | 2.04            |
| Cr    | 24 | K-series | 8.06        | 8.83         | 7.72           | 0.25            |
| C     | 6  | K-series | 5.60        | 6.14         | 23.22          | 1.17            |
| Mo    | 42 | L-series | 1.14        | 1.25         | 0.59           | 0.08            |
| Si    | 14 | K-series | 0.35        | 0.39         | 0.63           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.26        | 0.28         | 0.23           | 0.04            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.24        | 0.26         | 0.20           | 0.04            |
| Total |    |          | 91.22       | 100.00       | 100.00         |                 |



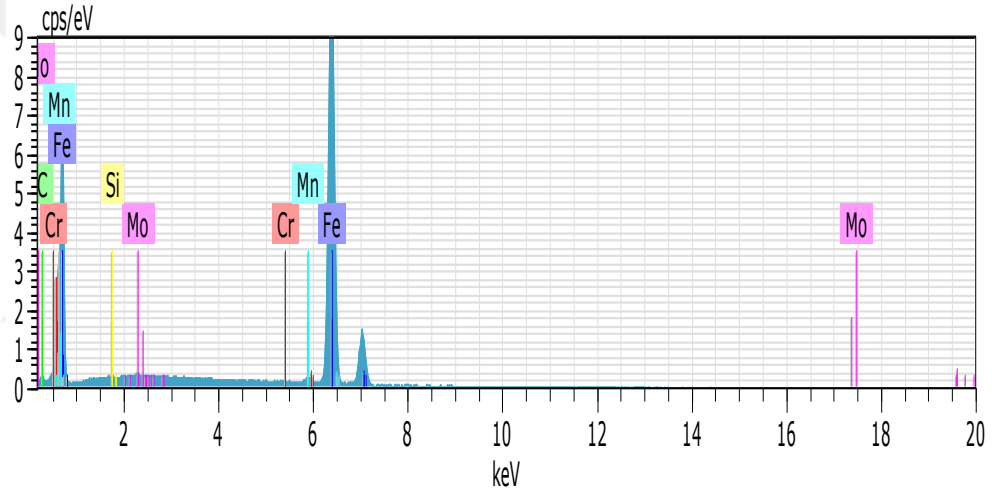
Çizelge 4.3 S1 no'lu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 85.89       | 89.73        | 75.96          | 2.32            |
| Cr    | 24 | K-series | 2.76        | 2.88         | 2.62           | 0.11            |
| C     | 6  | K-series | 4.79        | 5.00         | 19.68          | 1.05            |
| Mo    | 42 | L-series | 1.35        | 1.42         | 0.70           | 0.09            |
| Si    | 14 | K-series | 0.24        | 0.25         | 0.42           | 0.04            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.68        | 0.71         | 0.61           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.02        | 0.02         | 0.02           | 0.03            |
| Total |    |          | 95.73       | 100.00       | 100.00         |                 |



Çizelge 4.4 S1 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 89.34       | 92.77        | 79.30          | 2.41            |
| Cr    | 24 | K-series | 0.68        | 0.71         | 0.65           | 0.05            |
| C     | 6  | K-series | 4.54        | 4.71         | 18.74          | 1.02            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.86        | 0.89         | 0.44           | 0.07            |
| Si    | 14 | K-series | 0.09        | 0.10         | 0.17           | 0.03            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.74        | 0.77         | 0.67           | 0.06            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.04        | 0.04         | 0.04           | 0.03            |
| Total |    |          | 96.30       | 100.00       | 100.00         |                 |

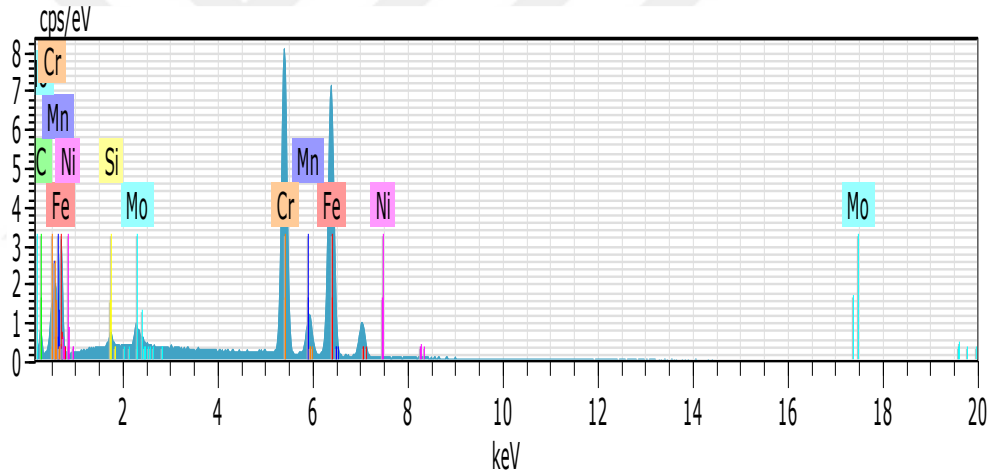


Çizelge 4.5 S1 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 90.02       | 93.61        | 79.25          | 2.43            |
| Cr    | 24 | K-series | 0.14        | 0.15         | 0.13           | 0.03            |
| C     | 6  | K-series | 4.78        | 4.97         | 19.56          | 1.08            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.27        | 0.28         | 0.14           | 0.04            |
| Si    | 14 | K-series | 0.08        | 0.08         | 0.13           | 0.03            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.88        | 0.91         | 0.79           | 0.06            |
| Total |    |          | 96.16       | 100.00       | 100.00         |                 |

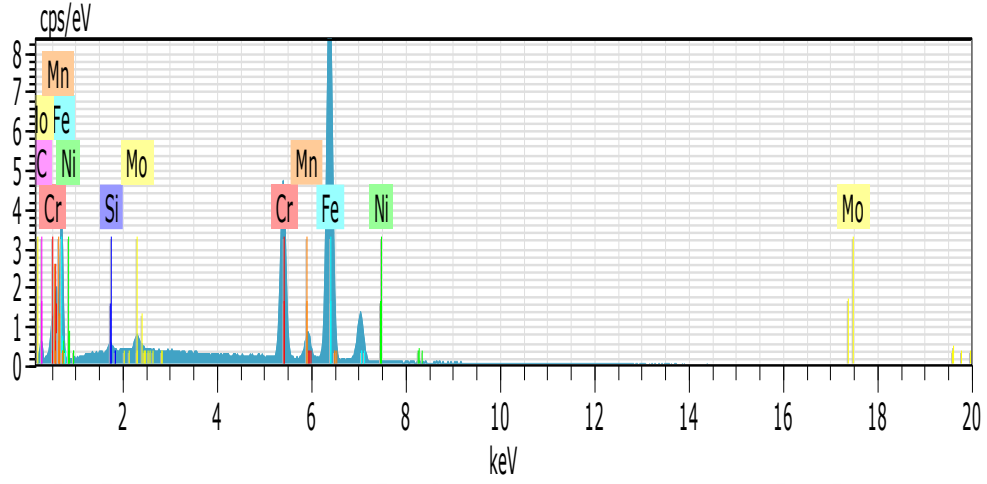


Şekil 4.18 S2 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları



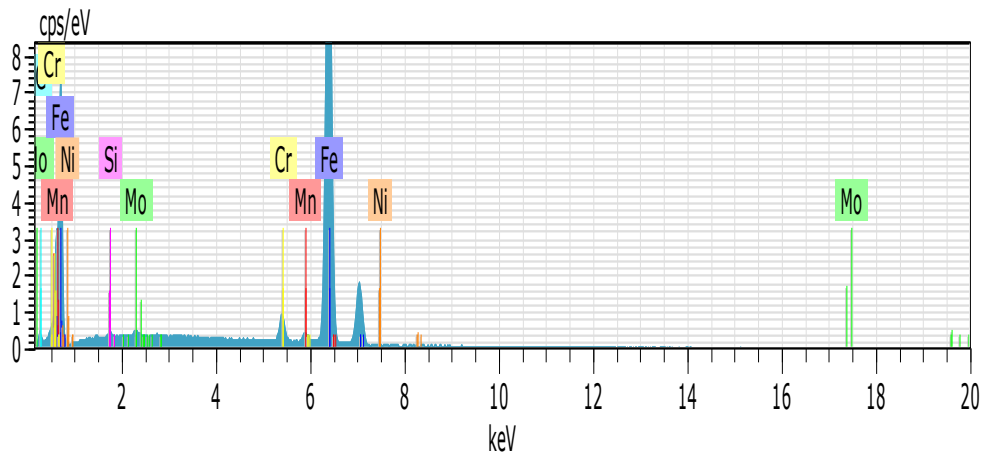
Çizelge 4.6 S2 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 45.92       | 53.03        | 39.71          | 1.26            |
| Cr    | 24 | K-series | 29.58       | 34.14        | 27.48          | 0.83            |
| C     | 6  | K-series | 7.48        | 8.64         | 30.08          | 1.41            |
| Mo    | 42 | L-series | 2.27        | 2.62         | 1.14           | 0.12            |
| Si    | 14 | K-series | 0.52        | 0.60         | 0.89           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.51        | 0.59         | 0.45           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.32        | 0.37         | 0.26           | 0.05            |
| Total |    |          | 96.16       | 100.00       | 100.00         |                 |



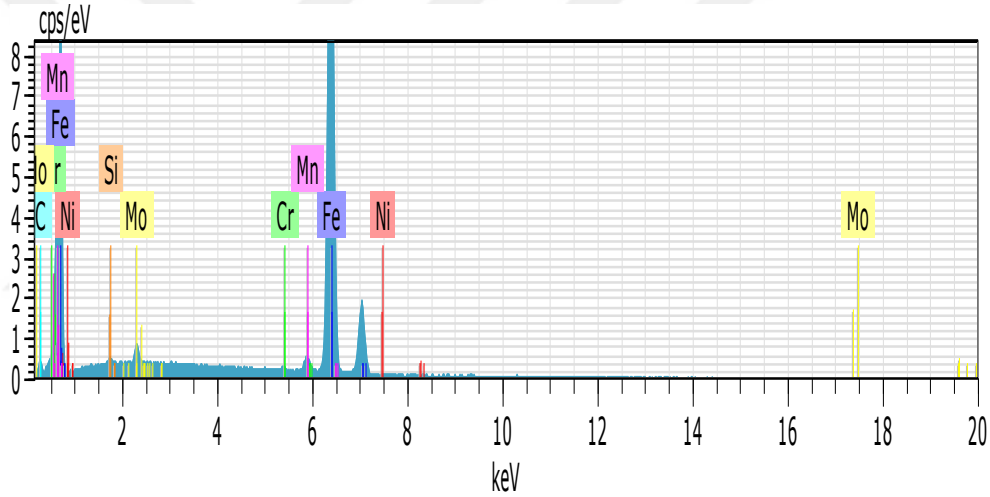
Çizelge 4.7 S2 no'lu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn.<br>[wt.%] | norm.<br>[at.%] | Atom. C<br>[at.%] | (1 Sigma)<br>[wt.] |
|-------|----|----------|----------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Fe    | 26 | K-series | 63.40          | 71.57           | 55.94             | 1.72               |
| Cr    | 24 | K-series | 15.81          | 17.84           | 14.98             | 0.46               |
| C     | 6  | K-series | 6.54           | 7.38            | 26.82             | 1.29               |
| Mo    | 42 | L-series | 1.58           | 1.78            | 0.81              | 0.09               |
| Si    | 14 | K-series | 0.39           | 0.44            | 0.68              | 0.05               |
| Mn    | 25 | K-series | 0.67           | 0.75            | 0.60              | 0.05               |
| Ni    | 28 | K-series | 0.22           | 0.24            | 0.18              | 0.04               |
| Total |    |          | 88.59          | 100.00          | 100.00            |                    |



Çizelge 4.8 S2 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 87.41       | 90.93        | 76.16          | 2.36            |
| Cr    | 24 | K-series | 2.28        | 2.37         | 2.14           | 0.10            |
| C     | 6  | K-series | 5.01        | 5.21         | 20.30          | 1.10            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.32        | 0.33         | 0.16           | 0.05            |
| Si    | 14 | K-series | 0.31        | 0.33         | 0.54           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.75        | 0.78         | 0.66           | 0.06            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.05        | 0.05         | 0.04           | 0.03            |
| Total |    |          | 96.13       | 100.00       | 100.00         |                 |

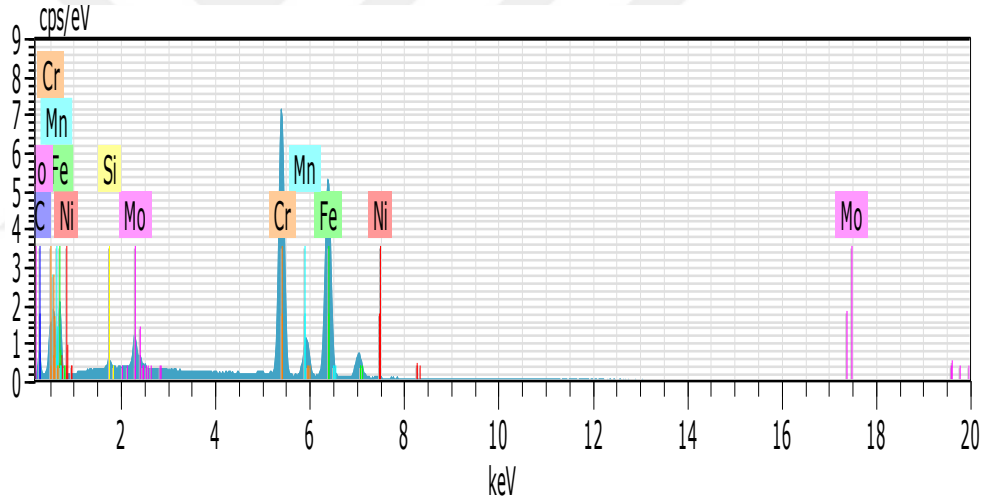


Çizelge 4.9 S2 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 87.21       | 91.56        | 77.19          | 2.35            |
| Cr    | 24 | K-series | 0.29        | 0.30         | 0.27           | 0.04            |
| C     | 6  | K-series | 4.95        | 5.20         | 20.38          | 1.11            |
| Mo    | 42 | L-series | 1.55        | 1.62         | 0.80           | 0.09            |
| Si    | 14 | K-series | 0.27        | 0.28         | 0.47           | 0.04            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.96        | 1.01         | 0.87           | 0.06            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.02        | 0.02         | 0.02           | 0.03            |
| Total |    |          | 95.25       | 100.00       | 100.00         |                 |

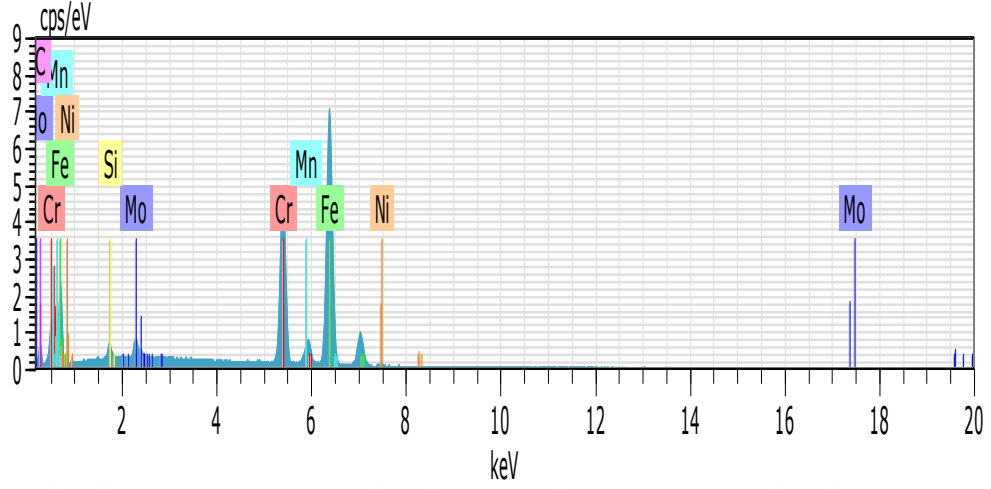


Şekil 4.19 S3 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları.



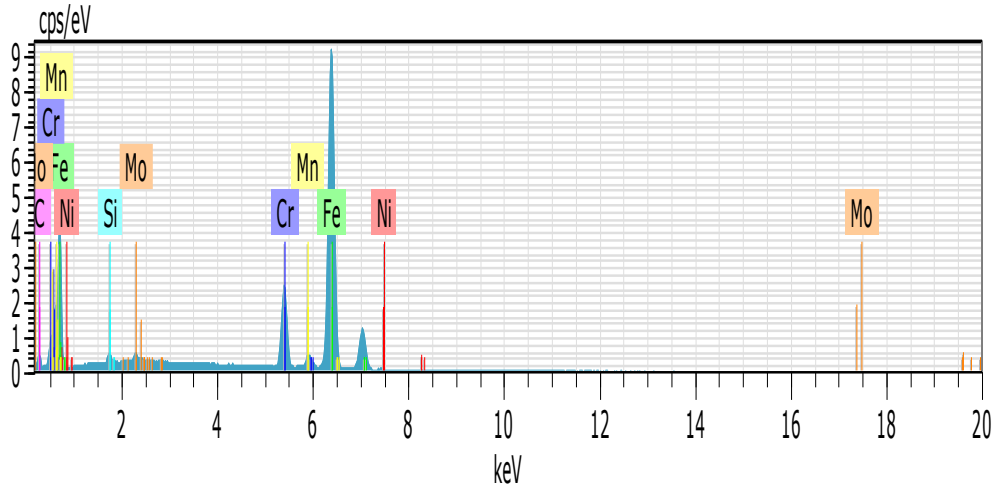
Çizelge 4.10 S3 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 40.35       | 47.78        | 34.72          | 1.11            |
| Cr    | 24 | K-series | 30.70       | 36.35        | 28.37          | 0.86            |
| C     | 6  | K-series | 8.40        | 9.95         | 33.60          | 1.53            |
| Mo    | 42 | L-series | 3.61        | 4.27         | 1.81           | 0.17            |
| Si    | 14 | K-series | 0.35        | 0.42         | 0.61           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.82        | 0.97         | 0.71           | 0.06            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.22        | 0.26         | 0.18           | 0.04            |
| Total |    |          | 84.44       | 100.00       | 100.00         |                 |



Çizelge 4.11 S3 no'lu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları

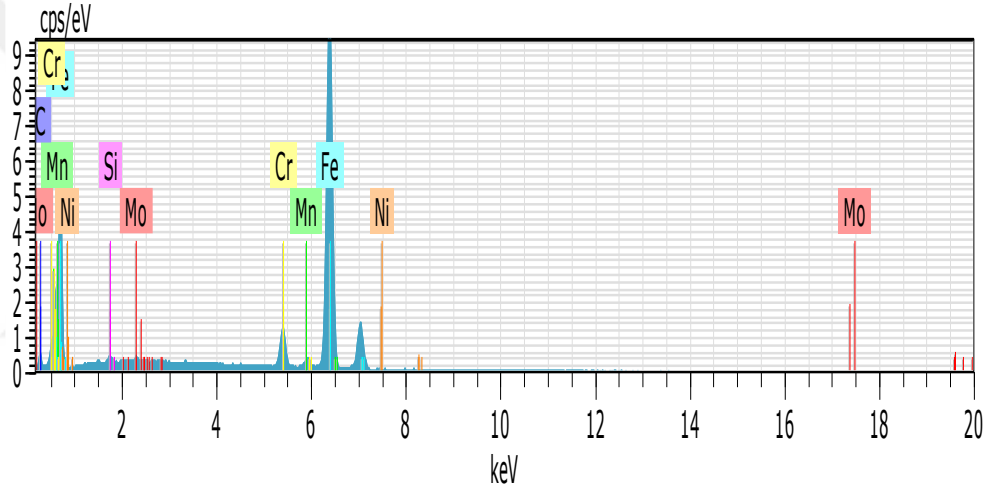
| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 54.21       | 62.02        | 45.15          | 1.48            |
| Cr    | 24 | K-series | 20.91       | 23.92        | 18.70          | 0.60            |
| C     | 6  | K-series | 8.58        | 9.82         | 33.23          | 1.57            |
| Mo    | 42 | L-series | 2.37        | 2.71         | 1.15           | 0.12            |
| Si    | 14 | K-series | 0.81        | 0.93         | 1.34           | 0.07            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.25        | 0.28         | 0.21           | 0.04            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.28        | 0.32         | 0.22           | 0.05            |
| Total |    |          | 87.40       | 100.00       | 100.00         |                 |





Çizelge 4.12 S3 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 72.99       | 79.25        | 60.83          | 1.98            |
| Cr    | 24 | K-series | 9.57        | 10.40        | 8.57           | 0.29            |
| C     | 6  | K-series | 7.43        | 8.06         | 28.78          | 1.43            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.93        | 1.01         | 0.45           | 0.07            |
| Si    | 14 | K-series | 0.47        | 0.51         | 0.77           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.55        | 0.59         | 0.46           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.17        | 0.18         | 0.13           | 0.04            |
| Total |    |          | 92.10       | 100.00       | 100.00         |                 |

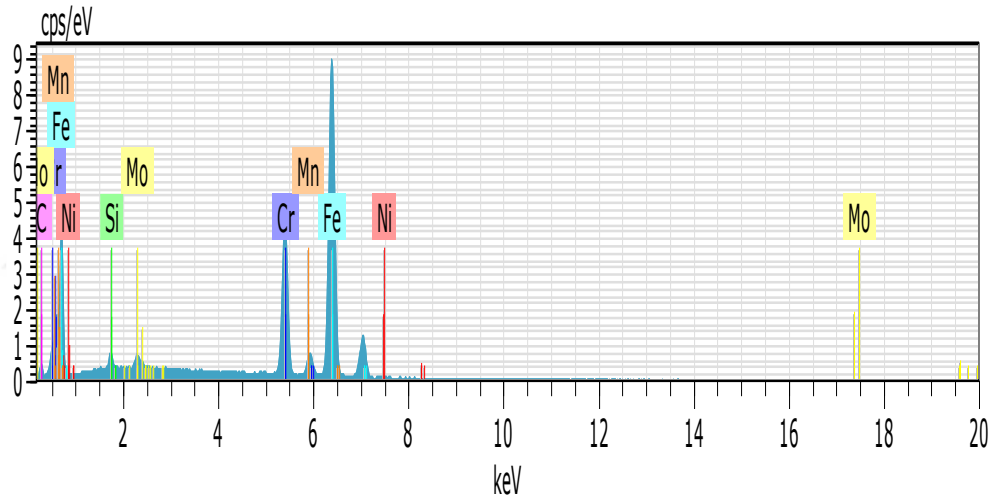


Çizelge 4.13 S3 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at. %] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|---------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 78.95       | 86.04         | 67.14          | 2.13            |
| Cr    | 24 | K-series | 4.39        | 4.79          | 4.01           | 0.15            |
| C     | 6  | K-series | 6.94        | 7.56          | 27.43          | 1.38            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.43        | 0.47          | 0.21           | 0.05            |
| Si    | 14 | K-series | 0.35        | 0.39          | 0.60           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.61        | 0.66          | 0.53           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.09        | 0.09          | 0.07           | 0.04            |
| Total |    |          | 91.77       | 100.00        | 100.00         |                 |

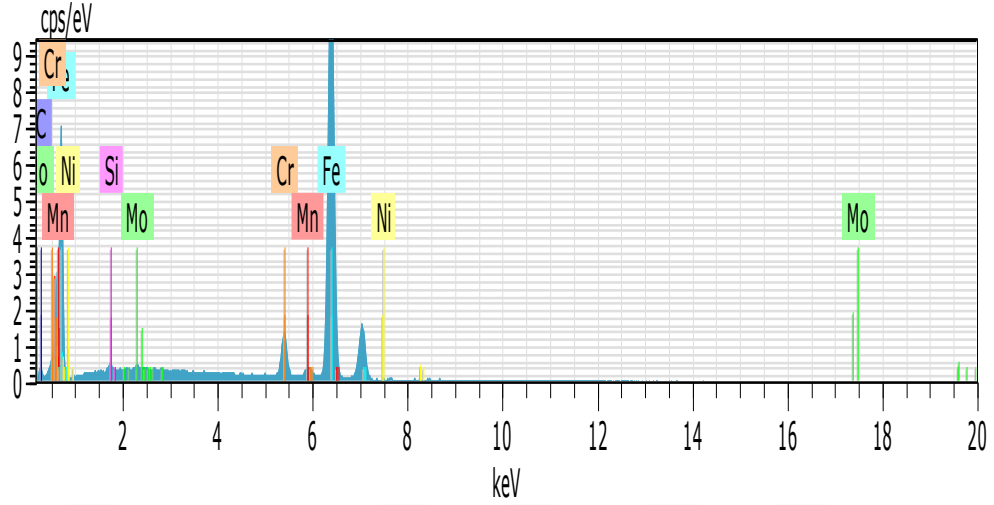


Şekil 4.20 S4 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları.



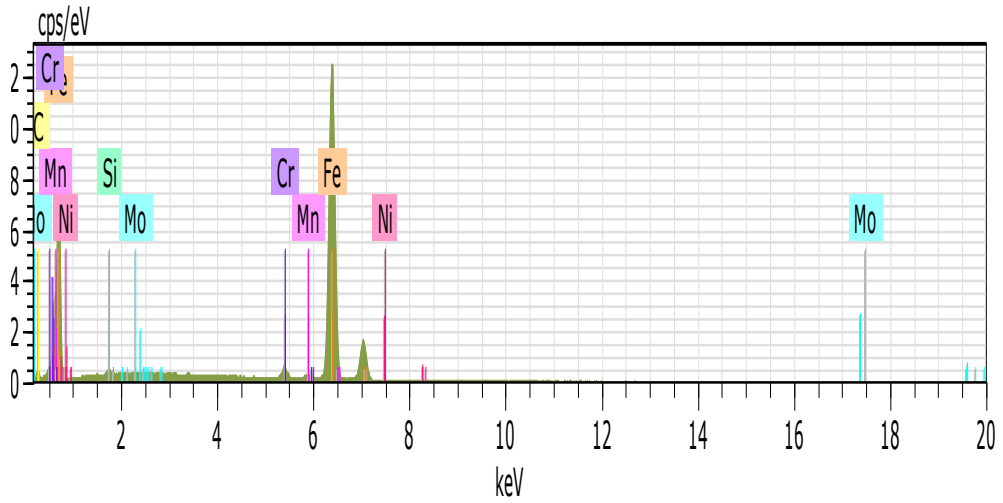
Çizelge 4.14 S4 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 62.56       | 70.90        | 57.70          | 1.70            |
| Cr    | 24 | K-series | 17.19       | 19.48        | 17.03          | 0.50            |
| C     | 6  | K-series | 5.14        | 5.83         | 22.06          | 1.09            |
| Mo    | 42 | L-series | 1.53        | 1.73         | 0.82           | 0.09            |
| Si    | 14 | K-series | 0.79        | 0.89         | 1.45           | 0.07            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.58        | 0.66         | 0.55           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.44        | 0.50         | 0.39           | 0.05            |
| Total |    |          | 88.24       | 100.00       | 100.00         |                 |



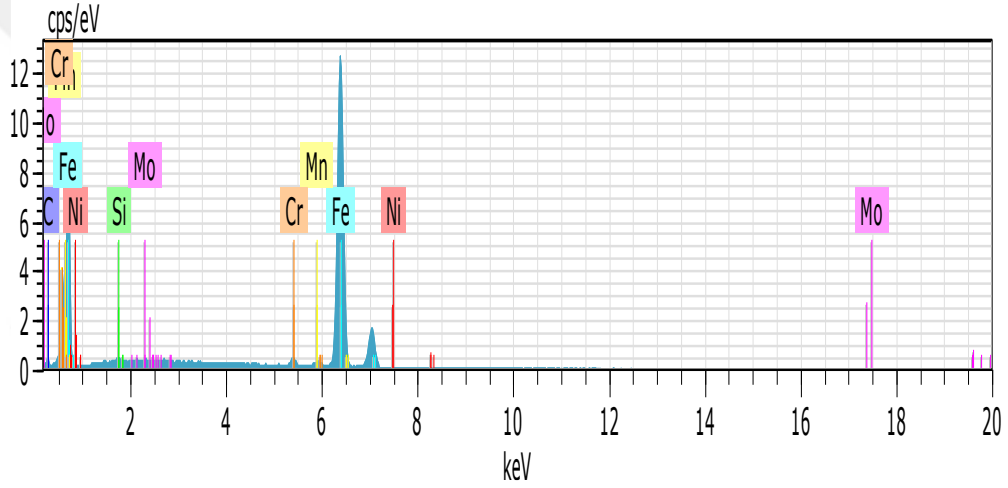
Çizelge 4.15 S4 nolu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 82.53       | 88.40        | 74.15          | 2.23            |
| Cr    | 24 | K-series | 4.32        | 4.63         | 4.17           | 0.15            |
| C     | 6  | K-series | 4.80        | 5.14         | 20.05          | 1.07            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.60        | 0.64         | 0.31           | 0.06            |
| Si    | 14 | K-series | 0.36        | 0.38         | 0.63           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.67        | 0.71         | 0.61           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.09        | 0.10         | 0.08           | 0.04            |
| Total |    |          | 93.36       | 100.00       | 100.00         |                 |



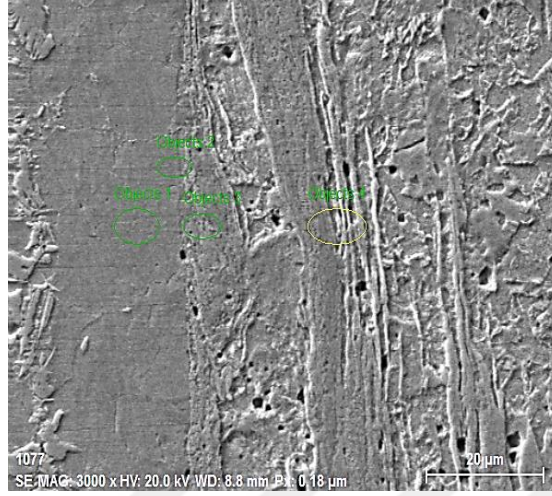
Çizelge 4.16 S4 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 88.31       | 91.34        | 75.01          | 2.38            |
| Cr    | 24 | K-series | 1.52        | 1.57         | 1.39           | 0.08            |
| C     | 6  | K-series | 5.67        | 5.86         | 22.37          | 1.22            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.12        | 0.12         | 0.06           | 0.04            |
| Si    | 14 | K-series | 0.31        | 0.32         | 0.52           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.72        | 0.74         | 0.62           | 0.06            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.04        | 0.04         | 0.03           | 0.03            |
| Total |    |          | 96.68       | 100.00       | 100.00         |                 |

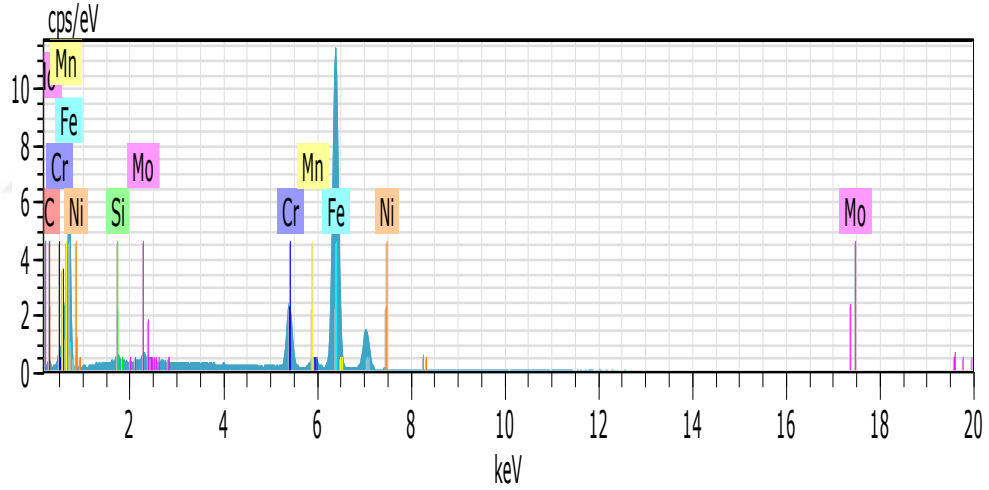


Çizelge 4.17 S4 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 86.40       | 92.23        | 76.58          | 2.33            |
| Cr    | 24 | K-series | 0.98        | 1.04         | 0.93           | 0.06            |
| C     | 6  | K-series | 5.17        | 5.52         | 21.31          | 1.14            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.15        | 0.16         | 0.08           | 0.04            |
| Si    | 14 | K-series | 0.25        | 0.27         | 0.44           | 0.04            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.70        | 0.74         | 0.63           | 0.06            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.04        | 0.04         | 0.03           | 0.03            |
| Total |    |          | 93.68       | 100.00       | 100.00         |                 |

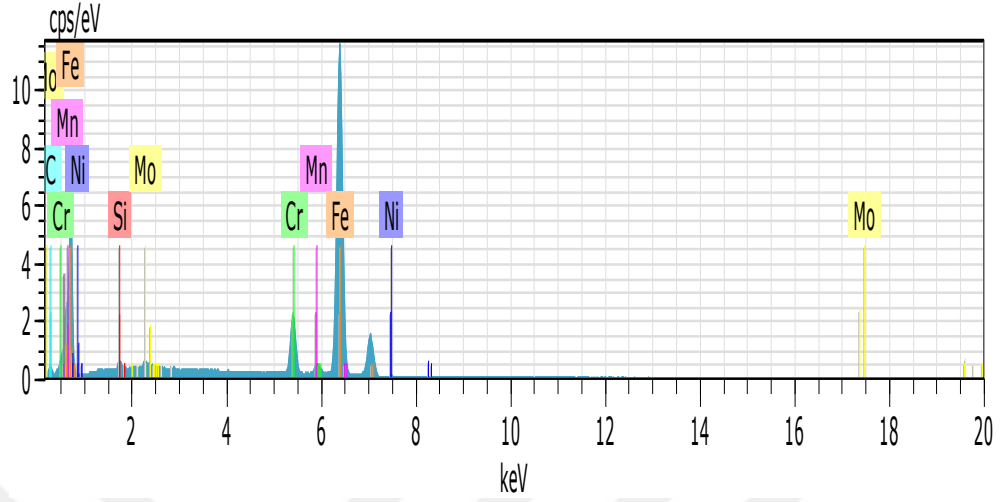


Şekil 4.21 S5 no'lu numunenin EDS analiz sonuçları



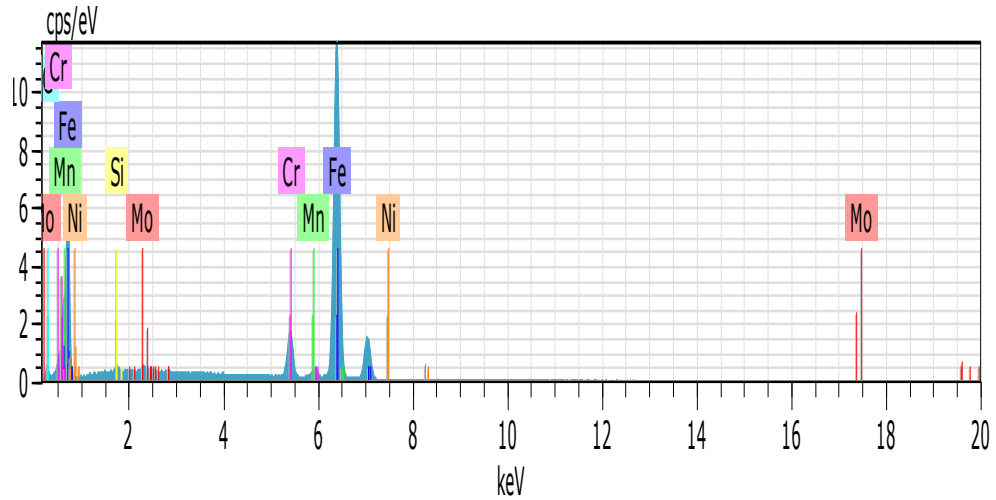
Çizelge 4.18 S5 no'lu numunenin 1. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 75.03       | 82.95        | 68.61          | 2.03            |
| Cr    | 24 | K-series | 8.06        | 8.91         | 7.92           | 0.25            |
| C     | 6  | K-series | 5.04        | 5.57         | 21.41          | 1.09            |
| Mo    | 42 | L-series | 1.16        | 1.28         | 0.62           | 0.08            |
| Si    | 14 | K-series | 0.42        | 0.47         | 0.77           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.59        | 0.66         | 0.55           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.15        | 0.16         | 0.13           | 0.04            |
| Total |    |          | 90.45       | 100.00       | 100.00         |                 |



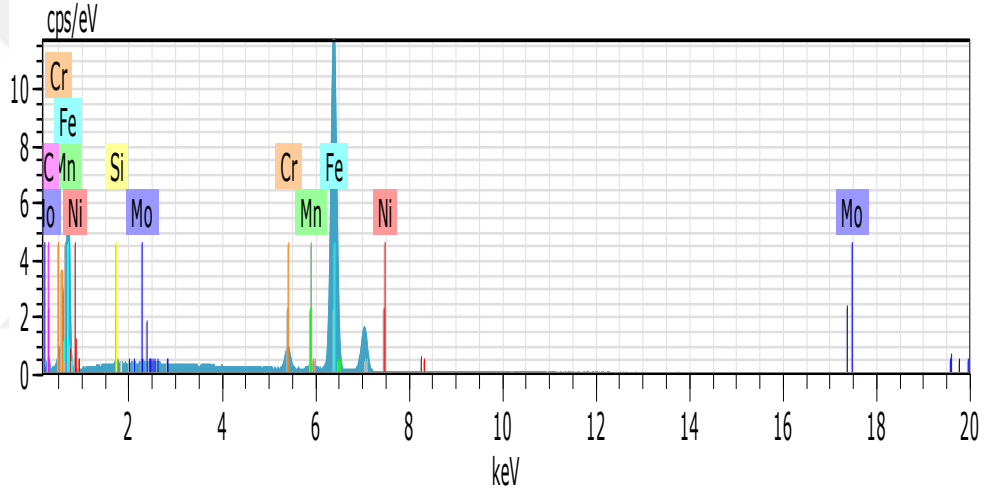
Çizelge 4.19 S5 no'lu numunenin 2. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 76.55       | 84.09        | 68.76          | 2.07            |
| Cr    | 24 | K-series | 6.97        | 7.65         | 6.72           | 0.22            |
| C     | 6  | K-series | 5.43        | 5.97         | 22.69          | 1.15            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.98        | 1.08         | 0.51           | 0.07            |
| Si    | 14 | K-series | 0.37        | 0.41         | 0.66           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.56        | 0.61         | 0.51           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.17        | 0.18         | 0.14           | 0.04            |
| Total |    |          | 91.03       | 100.00       | 100.00         |                 |



Çizelge 4.20 S5 no'lu numunenin 3. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 79.71       | 85.20        | 68.16          | 2.15            |
| Cr    | 24 | K-series | 5.65        | 6.04         | 5.19           | 0.19            |
| C     | 6  | K-series | 6.29        | 6.73         | 25.02          | 1.29            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.77        | 0.82         | 0.38           | 0.06            |
| Si    | 14 | K-series | 0.33        | 0.35         | 0.56           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.61        | 0.66         | 0.53           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.19        | 0.20         | 0.15           | 0.04            |
| Total |    |          | 93.56       | 100.00       | 100.00         |                 |



Çizelge 4.21 S5 no'lu numunenin 4. Bölge EDS analiz sonuçları

| El    | AN | Series   | Unn. [wt.%] | norm. [at.%] | Atom. C [at.%] | (1 Sigma) [wt.] |
|-------|----|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| Fe    | 26 | K-series | 83.48       | 88.54        | 70.05          | 2.25            |
| Cr    | 24 | K-series | 2.69        | 2.85         | 2.42           | 0.11            |
| C     | 6  | K-series | 6.72        | 7.12         | 26.20          | 1.36            |
| Mo    | 42 | L-series | 0.35        | 0.37         | 0.17           | 0.05            |
| Si    | 14 | K-series | 0.32        | 0.34         | 0.53           | 0.05            |
| Mn    | 25 | K-series | 0.62        | 0.65         | 0.53           | 0.05            |
| Ni    | 28 | K-series | 0.11        | 0.12         | 0.09           | 0.04            |
| Total |    |          | 94.28       | 100.00       | 100.00         |                 |

Çizelge 4.22 S1-S5 numunelerinin elementer % ağırlık sonuçları

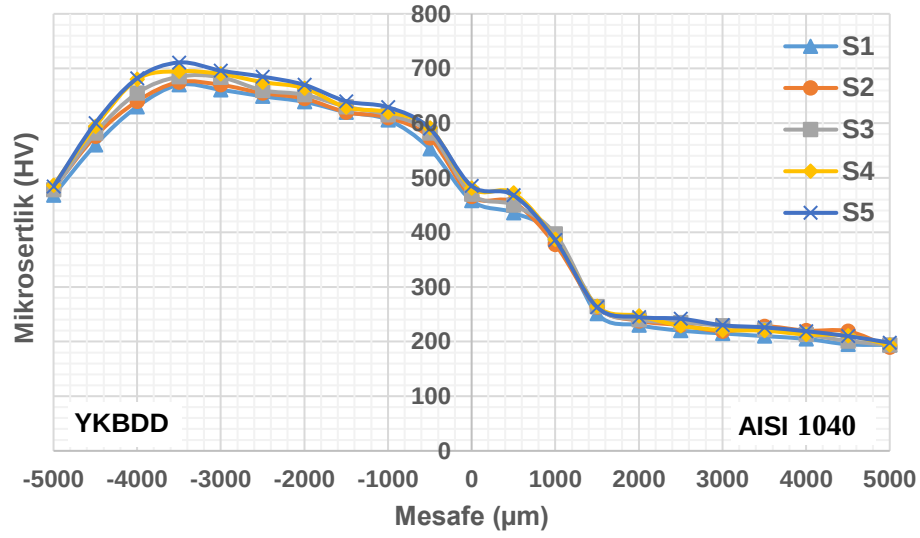
| Numune No | Analiz Bölgeleri | Elementer (% Ağı.) |       |       |      |      |      |      |
|-----------|------------------|--------------------|-------|-------|------|------|------|------|
|           |                  | Fe                 | Cr    | C     | Mo   | Si   | Mn   | Ni   |
| S1        | 1. Bölge         | 67.41              | 7.72  | 23.22 | 0.59 | 0.63 | 0.23 | 0.20 |
|           | 2. Bölge         | 75.96              | 2.62  | 19.68 | 0.70 | 0.42 | 0.61 | 0.02 |
|           | 3. Bölge         | 79.30              | 0.65  | 18.74 | 0.44 | 0.17 | 0.67 | 0.04 |
|           | 4. Bölge         | 79.25              | 0.13  | 19.56 | 0.14 | 0.13 | 0.79 | 0.02 |
| S2        | 1. Bölge         | 39.71              | 27.48 | 30.08 | 1.14 | 0.89 | 0.45 | 0.26 |
|           | 2. Bölge         | 55.94              | 14.98 | 26.82 | 0.81 | 0.68 | 0.60 | 0.18 |
|           | 3. Bölge         | 76.16              | 2.14  | 20.30 | 0.16 | 0.54 | 0.66 | 0.03 |
|           | 4. Bölge         | 77.19              | 0.27  | 20.38 | 0.80 | 0.47 | 0.87 | 0.03 |
| S3        | 1. Bölge         | 34.72              | 28.37 | 33.60 | 1.81 | 0.61 | 0.71 | 0.18 |
|           | 2. Bölge         | 45.15              | 18.70 | 33.23 | 1.15 | 1.34 | 0.21 | 0.22 |
|           | 3. Bölge         | 60.83              | 8.57  | 28.78 | 0.45 | 0.77 | 0.46 | 0.13 |
|           | 4. Bölge         | 67.14              | 4.01  | 27.43 | 0.21 | 0.60 | 0.53 | 0.04 |
| S4        | 1. Bölge         | 57.70              | 17.03 | 22.06 | 0.82 | 1.45 | 0.55 | 0.39 |
|           | 2. Bölge         | 74.15              | 4.63  | 20.05 | 0.31 | 0.63 | 0.61 | 0.04 |
|           | 3. Bölge         | 75.01              | 1.39  | 22.37 | 0.06 | 0.52 | 0.62 | 0.03 |
|           | 4. Bölge         | 76.58              | 0.93  | 21.31 | 0.08 | 0.44 | 0.63 | 0.03 |
| S5        | 1. Bölge         | 68.61              | 7.92  | 21.41 | 0.62 | 0.77 | 0.55 | 0.13 |
|           | 2. Bölge         | 68.76              | 6.72  | 22.69 | 0.51 | 0.66 | 0.51 | 0.14 |
|           | 3. Bölge         | 68.16              | 5.19  | 25.02 | 0.38 | 0.56 | 0.53 | 0.15 |
|           | 4. Bölge         | 70.05              | 26.20 | 2.42  | 0.17 | 0.53 | 0.53 | 0.09 |

#### 4.4. Mikrosertlik Sonuçları

Yüksek kromlu beyaz dökme demir ile AISI 1040 çelik çiftinin farklı devir sayısı (1600, 1700, 1800, 1900 ve 2000 dev/dk), sürtünme süresi (12 sn), sürtünme basıncı (80 MPa), yığma basıncı (150 MPa) ve yığma süresi (12 sn) kullanılarak kaynak edilen S1, S2, S3, S4 ve S5 no'lu kaynaklı numunelere ait mikrosertlik sonuçları Şekil 4.22'de verilmiştir. Kaynaklı numunelerin mikrosertlik-mesafe eğrilerine bakıldığında, tüm numunelerin benzer bir eğilim profiline sahip olduğu anlaşılmaktadır. Buna bağlı olarak en yüksek sertlik değerlerinin kaynak ara yüzeylerinde elde edilmişken, ana metale doğru ilerledikçe sertlik değerlerinin, sıcaklığa bağlı tavlama etkisinden dolayı bir miktar azaldığı daha sonra ana metallerin sertlik değerlerine erişildiği görülmektedir. S1-S5 no'lu kaynaklı



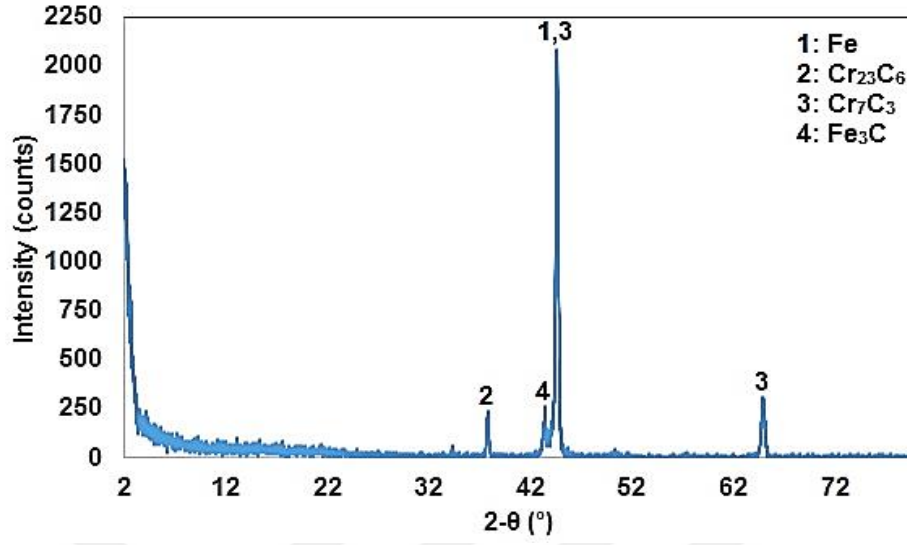
numuneler için ölçülen en yüksek sertlik değerleri sırasıyla; 661, 675, 685, 690 ve 700 HV olarak ölçülmüştür. Buna bağlı olarak devir sayılarındaki artışla ilişkili olarak birleşme bölgelerinin sağ ve sol kısımlarında tane küçülmesi meydana gelmiştir. Bu durum mikrosertlik değerlerinde bir artışa sebep olmuştur. Literatür’de de belirtildiği gibi mikrosertlik dağılım profilinde dört farklı sertlik dağılımı elde edilmiştir. Bu bölgeler aşırı deforme olmuş bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB) ve kısmen deformasyona uğramış bölge (KDB) olarak adlandırılmaktadır. Mikrosertliği ölçen vickers ucu kaynak ara bölgesinden uzaklaştıkça esas metallerin orijinal sertlik değerlerine ulaşır. Artan devir sayısı ile artan ısı girdisi kaynak ara yüzeyinde AISI1040 çeliğini viskoz hale getirerek dışarı taşmasını daha kolay hale getirmektedir. Bu durum AISI1040 çeliğinde termo-mekanik bölgelerin genişliği üzerinde negatif bir etki yaratır. Yüksek sıcaklık artışlarını hemen takibinde aşırı soğuma meydana gelmektedir. Kaynak ara yüzeyinde ve termo-mekanik bölgelerde meydana gelen aşırı soğumanın etkisi ile yüksek mikrosertlik değerlerinin eldesine neden olmuştur. AISI1040 çeliği tarafında aşırı soğuma, martenzit oranını artırarak perlit ve ferrit oranını azaltır. Martenzit fazının oranı arttıkça, sertlik de hızla artar. Farklı işlem parametreleri kullanılarak birleştirilen sürtünme kaynaklı numuneler üzerinde, ana malzeme ve kaynak bölgesinin mikrosertlik ölçümleri sonucunda bütün numuneler için kaynak bölgesindeki mikrosertlik değerlerinin ana malzemeye oranla değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.22 S1-S5 no'lu kaynaklı bağlantılara ait mikrosertlik sonuçları

#### 4.5. XRD Test Sonuçları

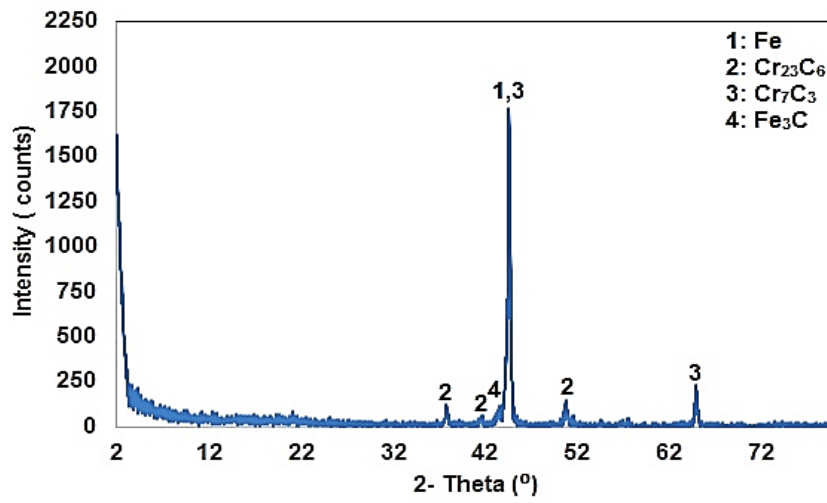
S1, S3 ve S5 no'lu kaynaklı numunelerde sürtünme kaynak sonrası, mikroyapıda oluşan fazları belirlemek için XRD analizleri yapılmıştır. Yapılan X-Işını analiz grafikleri Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25' de görülmektedir. X-Işını analiz sonuçlarına göre tespit edilen fazlar, 2-Theta açıları, yoğunlukları Çizelge 4.23, 4.24 ve 4.25'de verilmiştir. Buna göre, her üç kaynaklı numunelerde Fe,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$  gibi faz ve bileşikler tespit edilmiştir. Meydana gelen bu metal karbürler seramik karakterli oldukları için sert ve kırılgan bir yapıya sahiptir. Bu durumun, malzemede gevrekliğe sebebiyet verdiği bilinmektedir. Buna göre; S1= 1600 dev/dk, S3= 1800 dev/dk ve S5= 2000 dev/dak.'da gerçekleştirilen kaynaklı numunelerde, devir sayısını artışına bağlı olarak oluşan bu faz veya bileşiklerin şiddetlerinde farklılıklar mevcuttur.



Şekil 4.23 S1 Numunesinin X-Işını analiz grafiği

Çizelge 4.23 S1 numunesinin X-Işını analiz sonuçları

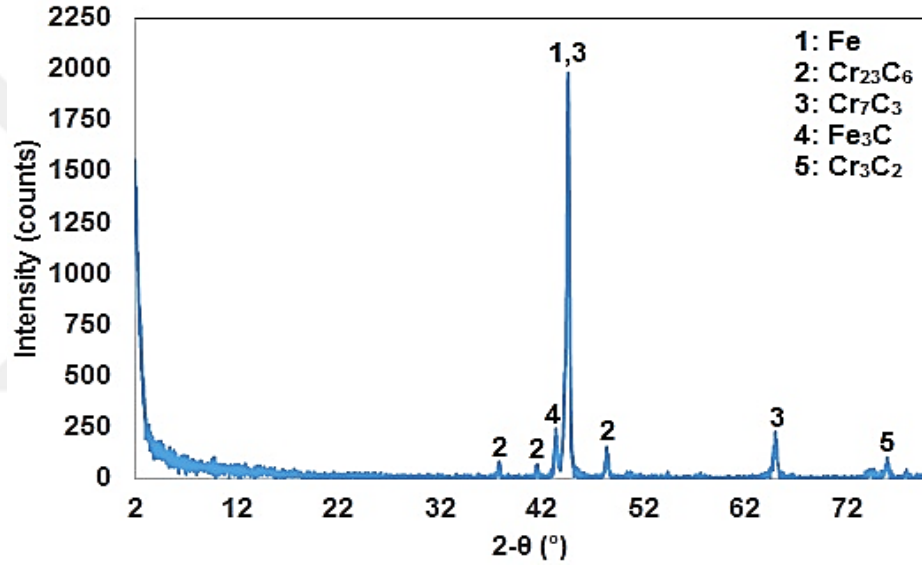
| X-Ray Değerleri |        |                              |                                   |
|-----------------|--------|------------------------------|-----------------------------------|
| 2 Theta (°)     | D (Å°) | Yoğunluk (I/I <sub>1</sub> ) | Faz                               |
| 37.840          | 2.3756 | 205                          | Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>   |
| 43.441          | 2.0814 | 232                          | Fe <sub>3</sub> C <sub>3</sub>    |
| 44.660          | 2.0274 | 2044                         | Fe-Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> |
| 64.980          | 1.4340 | 297                          | Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>    |



Şekil 4.24 S3 Numunesinin X-Işını analiz grafiği

Çizelge 4.24 S3 numunesinin X-Işını analiz sonuçları

| X-Ray Değerleri |        |                              |                                    |
|-----------------|--------|------------------------------|------------------------------------|
| 2 Theta (°)     | D (Å°) | Yoğunluk (I/I <sub>1</sub> ) | Faz                                |
| 37.779          | 2.3793 | 103                          | Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>    |
| 41.677          | 2.1653 | 46                           | Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>    |
| 43.581          | 2.0750 | 5.4                          | Fe <sub>3</sub> C <sub>3</sub>     |
| 44.620          | 2.0291 | 1716                         | Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> |
| 50.757          | 1.7972 | 140                          | Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>    |
| 64.922          | 1.4351 | 221                          | Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>     |



Şekil 4.25 S5 Numunesinin X-Işını analiz grafiği

Çizelge 4.25 S5 numunesinin X-Işını analiz sonuçları

| X-Ray Değerleri |        |                              |                                    |
|-----------------|--------|------------------------------|------------------------------------|
| 2 Theta (°)     | D (Å°) | Yoğunluk (I/I <sub>1</sub> ) | Faz                                |
| 37.938          | 2.3697 | 77                           | Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>    |
| 41.656          | 2.1664 | 61                           | Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>    |
| 43.498          | 2.0788 | 223                          | Fe <sub>3</sub> C <sub>3</sub>     |
| 44.680          | 2.0265 | 1985                         | Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> |
| 48.499          | 1.8755 | 135                          | Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>    |
| 65.097          | 1.4317 | 197                          | Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>     |
| 76.137          | 1.2492 | 81                           | Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>     |

**4.6. Çekme Testi Sonuçları**

YKBDD ile AISI1040 çelik çiftinin devir sayısı (1600, 1700, 1800, 1900 ve 2000 dev/dk), sürtünme süresi (12 sn), sürtünme basıncı (80 MPa), yığma basıncı (150 MPa) ve yığma süresi (12 sn) kullanılarak kaynak edilen S1-S5 no'lu kaynaklı numunelere ait çekme test numunelerinin çekme testi sonrası makro fotoğrafları Şekil 4.26'de gösterilmiştir. Yapılan çekme testi sonrası, tüm kaynaklı numunelerde kopmalar kaynak bölgesinde meydana gelmiştir. Buna göre çekme test sonuçlarına göre  $S1= 138.2$ ,  $S2=255.2$ ,  $S3= 272.7$ ,  $S4=283.3$  ve  $S5= 343.1$  MPa olarak çekme dayanım değerleri elde edilmiştir. Buna göre en yüksek çekme dayanımı S5 no'lu kaynaklı numunede kaydedilmişken, en düşük çekme dayanımı ise S1 no'lu kaynaklı numunede ölçülmüştür. Buna göre elde edilen çekme dayanımları kendi aralarında incelendiğinde, artan devir sayısı ile ilişkili olarak ara yüzeyde düzensiz yapıların azaldığı ve sürtünme esnasında malzemenin akışkanlığının artması, ısınan malzemenin dışarı atılmasının sağlanması, ITAB'ın daralmasına ve bunun sonucunda da maksimum çekme değerinin artmasına yol açmaktadır. Sürtünme kaynağı sırasında meydana gelen sıcaklık artışı, AISI1040 tarafında ani soğumanın etkisi ile martenzit fazının oluşumuna sebebiyet vermektedir. Buna bağlı olarak, kaynaklı numunelerin kaynak ara yüzeyinde elde edilen yüksek sertlik artışı; AISI1040 tarafında martenzitik dönüşüm sayesinde olurken, YKBDD tarafında ise metal karbür (krom-karbür, demir-karbür) çökmesinden dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir. Meydana gelen martenzit fazının varlığı ve YKBDD tarafında oluşan krom-karbür çökelmelerinin kaynak ara yüzeyinde kırılma eğilimi sebepleri bilinmemektedir [36]. Ayrıca, sürtünme kaynağı ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda çekme testi sonrası yapılan boyutsal ölçüm analizlerinde; belirgin bir uzama değerleri tespit edilememiştir.

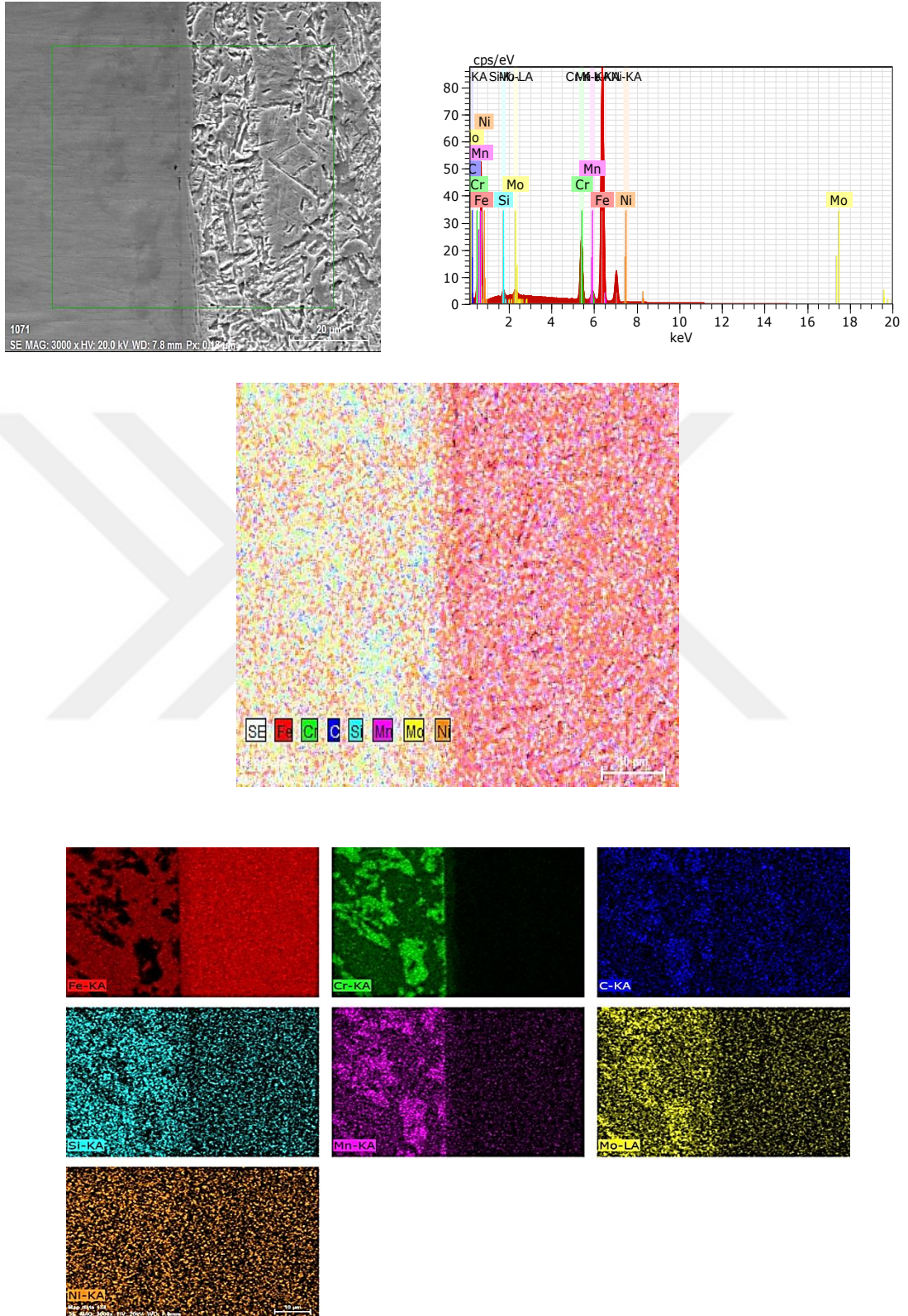


Şekil 4.26 S1-S5 kaynaklı bağlantılara ait çekme test numunelerinin çekme testi sonrası makro fotoğrafları

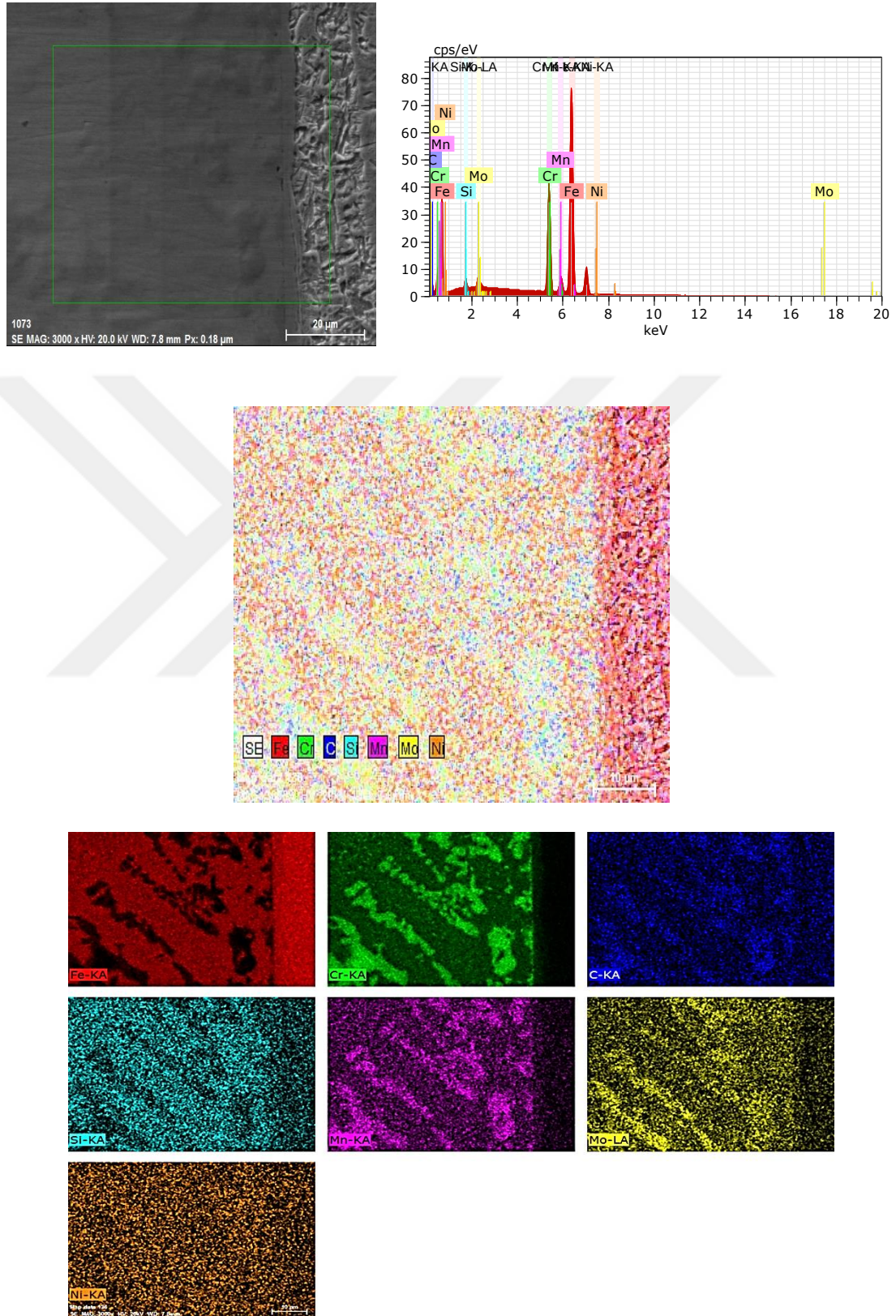
#### 4.7. Elementel Haritalandırma (Mapping) Analiz Sonuçları

S1 ve S5 no'lu kaynaklı numunelerin sürtünme kaynak sonrası ara yüzeylerinin kaynak metali, AISI1040 tarafı ve YKBDD tarafının elementel haritalandırma analizleri Şekil 4.27-4.32'de verilmiştir. Elementel haritalandırma yöntemi sayesinde kaynaklı numunelerin hangi bölgelerinde hangi elementlerin nasıl dağıldığı gözlemlenebilir. AISI1040 tarafı ve YKBDD tarafında yapılan elementel haritalandırma analizleri incelendiğinde, AISI1040 tarafı için, demir elementinin ana faz olarak mikroyapıya hakim olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanında YKBDD tarafında alaşım elementi olarak bulunan Cr, C, Mo, Si, Ni, Mn ve W gibi elementlerin AISI 1040 tarafına difüze olduğu belirlenmiştir. YKBDD tarafı için ise, hâkim olan Fe ve Cr elementlerinden başka diğer; C, Mo, Si, Ni, Mn ve W gibi alaşım elementlerinin kaynak bölgesine yakın yerlerindeki dağılımları yer yer farklılık göstermektedir.



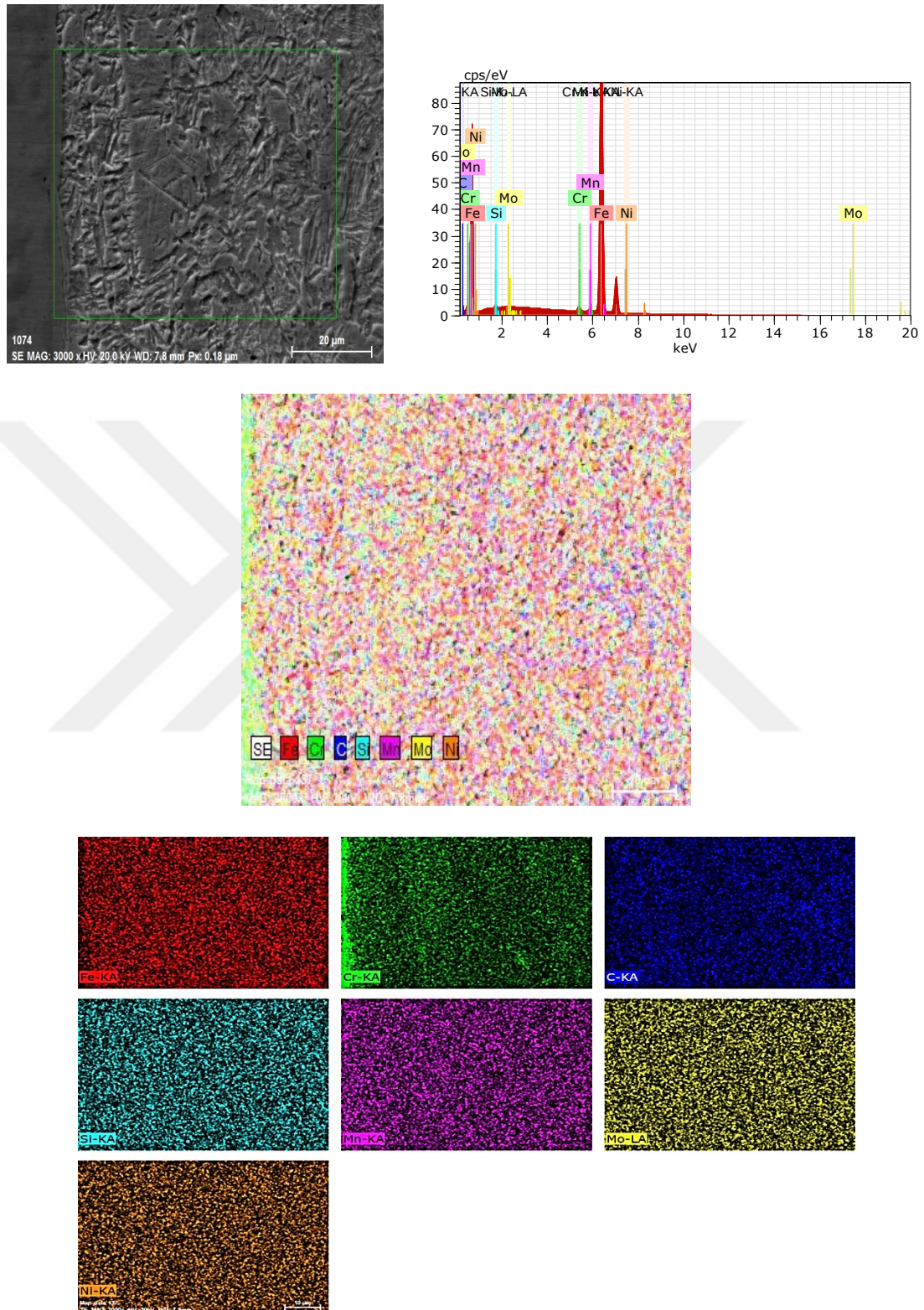


Şekil 4.27 S1 numunesinin kaynak metali elementel haritalandırma analiz sonuçları

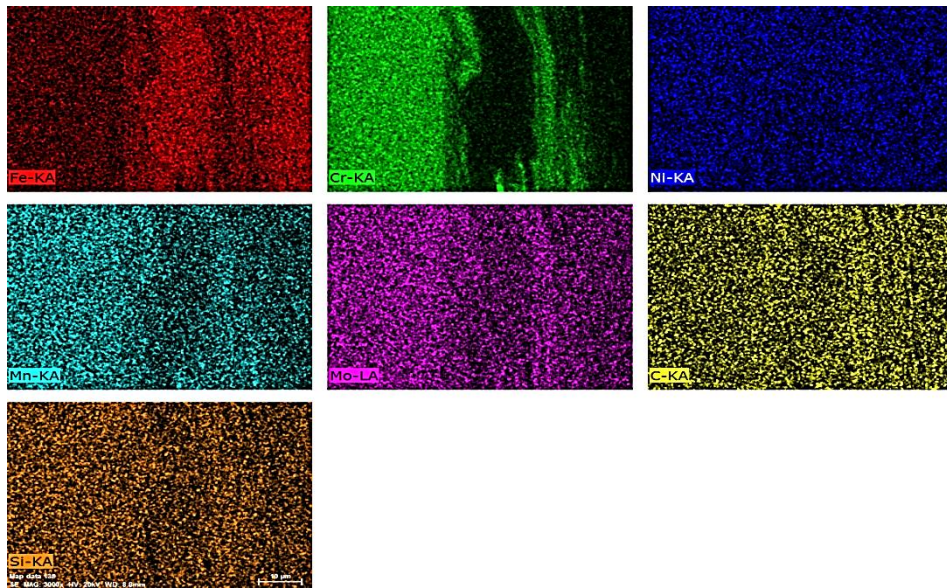
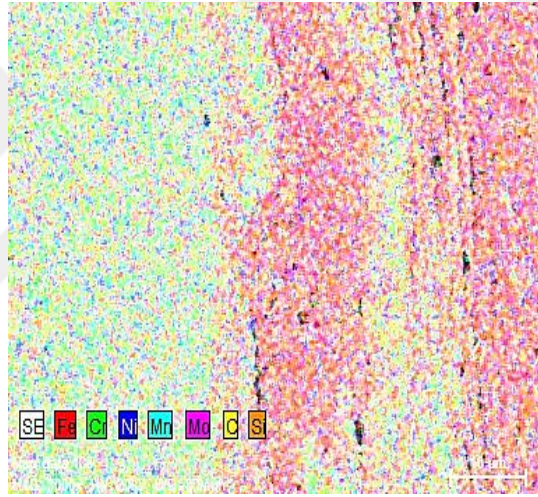
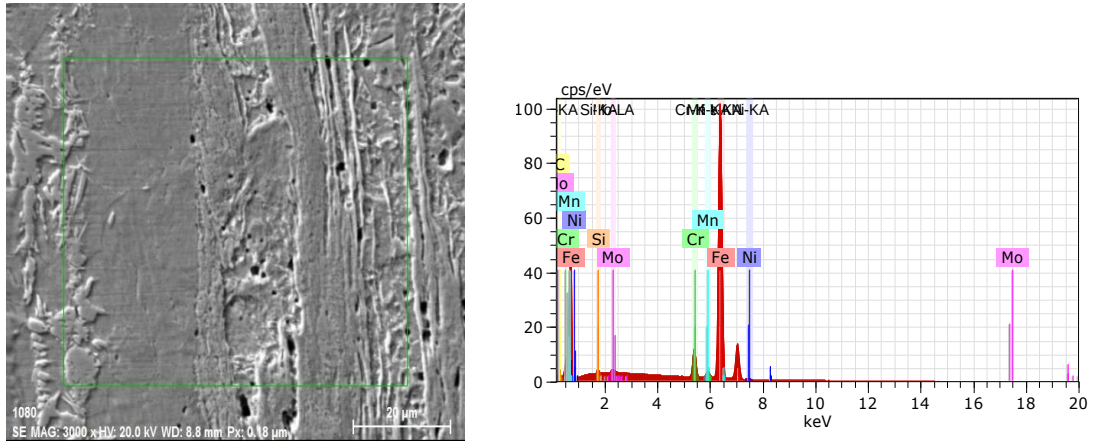


Şekil 4.28 S1 numunesinin AISI1040 tarafı elementel haritalandırma analiz sonuçları



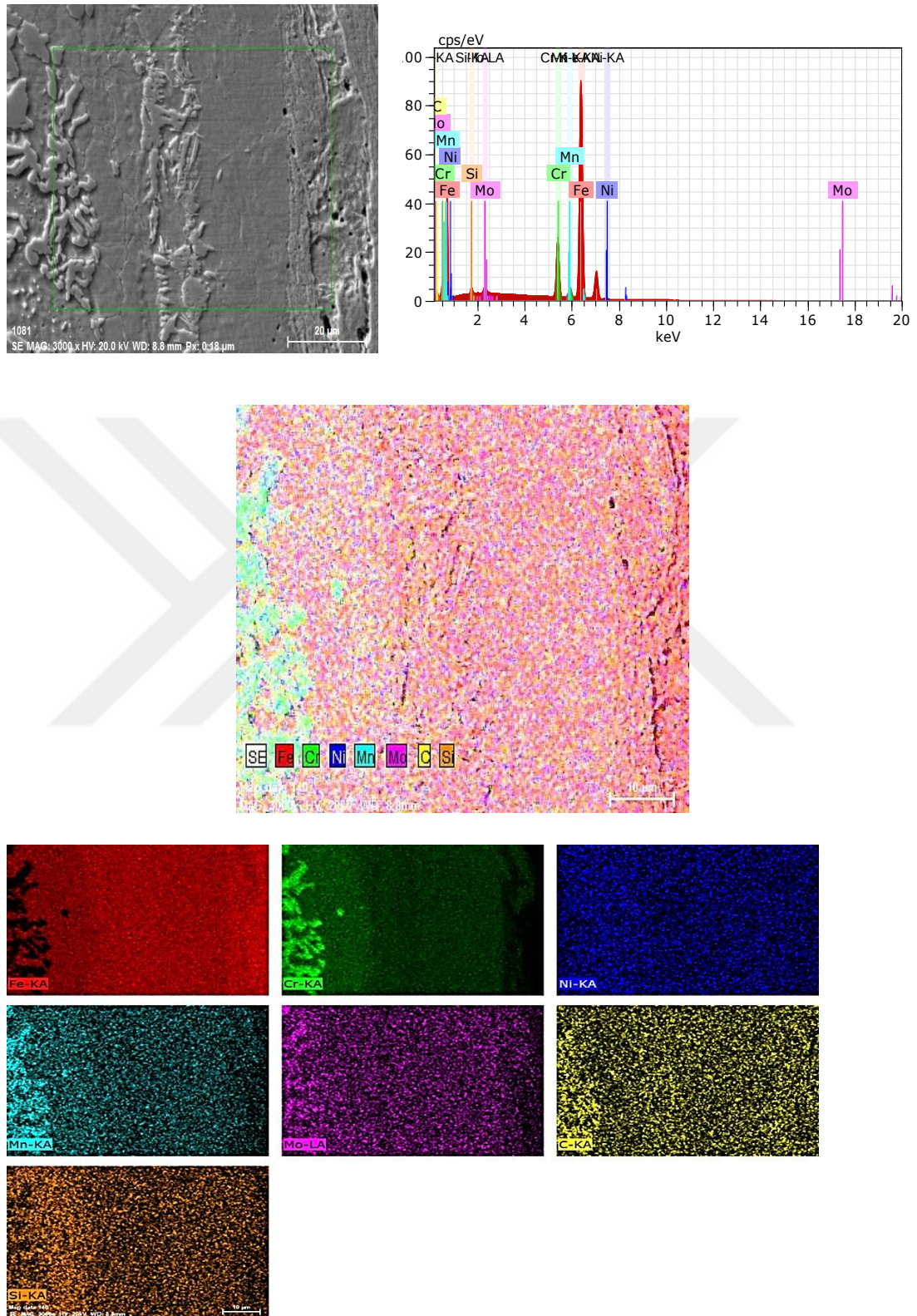


Şekil 4.29 S1 numunesinin YKBDD tarafı elementel haritalandırma analiz sonuçları

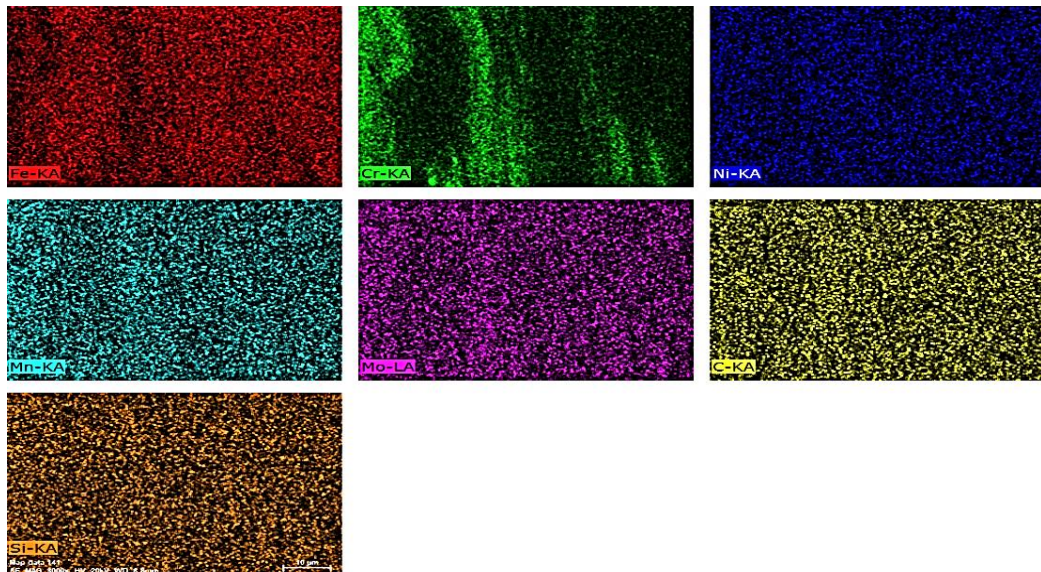
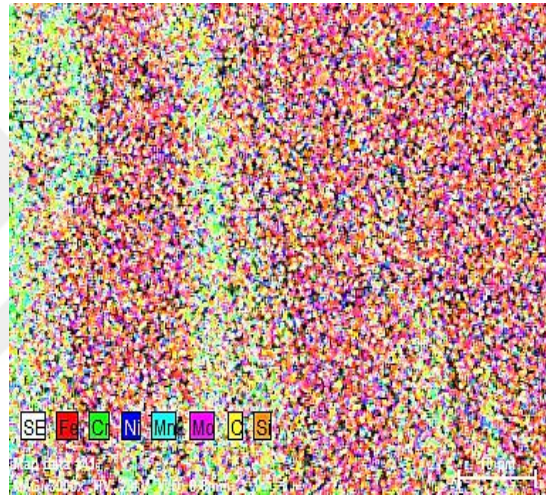
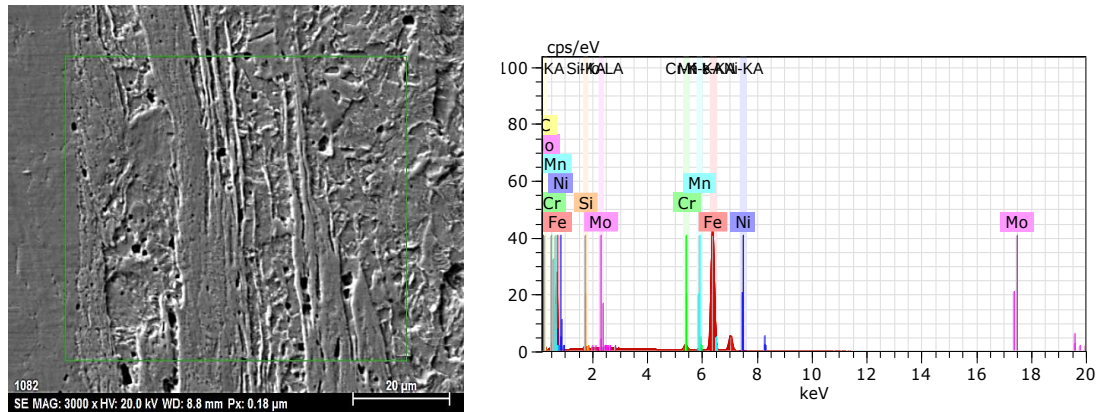


Şekil 4.30 S5 numunesinin kaynak metali elementel haritalandırma analiz sonuçları





Şekil 4.31 S5 numunesinin AISI1040 tarafı elementel haritalandırma analiz sonuçları

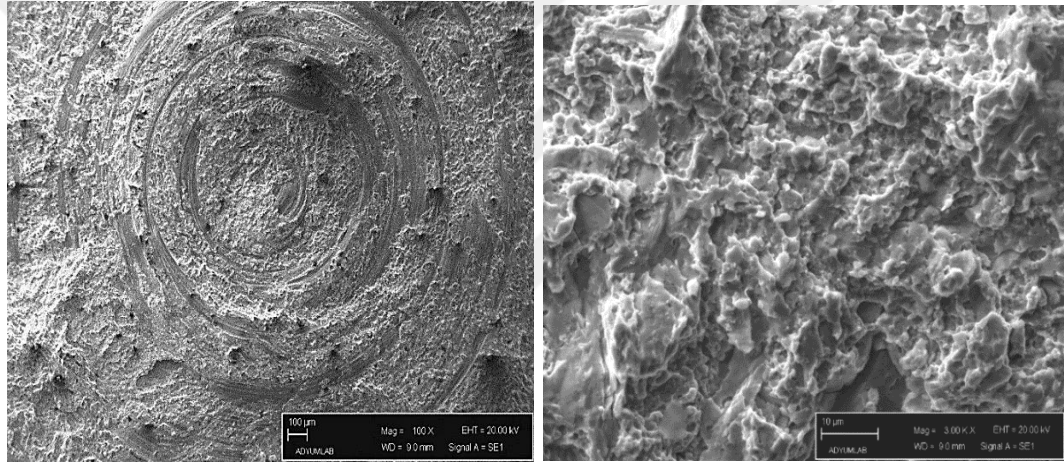


Şekil 4.32 S5 numunesinin YKBDD tarafı elementel haritalandırma analiz sonuçları

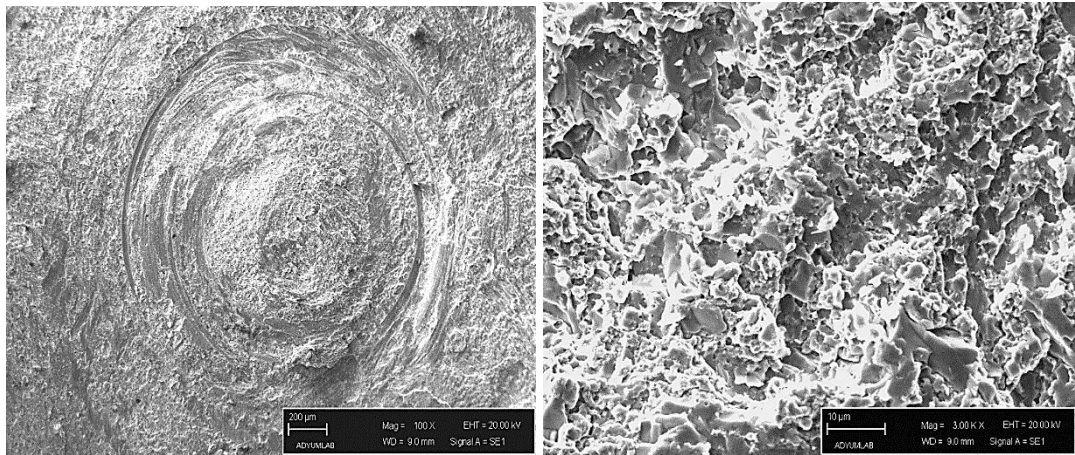


#### 4.8. Kırık Yüzey İncelemesi

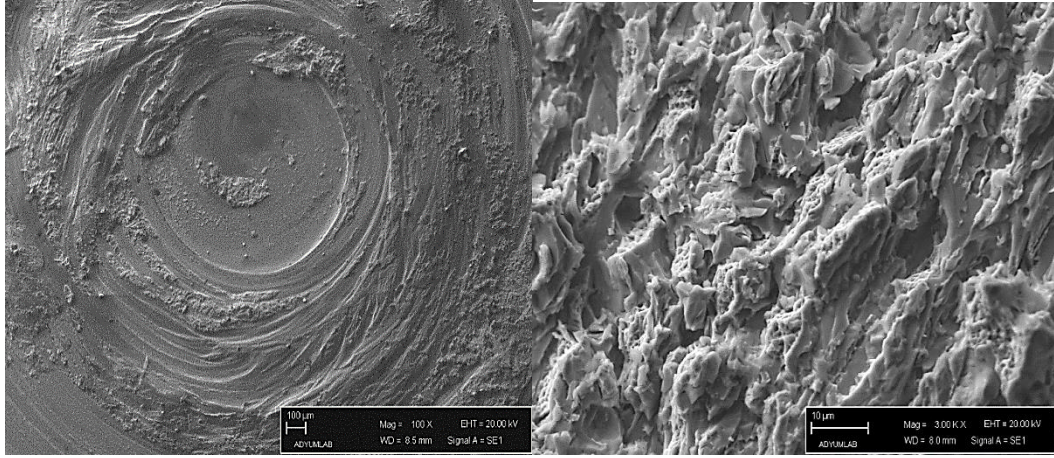
S1, S3 ve S5 no'lu kaynaklı bağlantıların çekme testi sonrası kırık yüzey SEM analizleri Şekil 4.33-4.38'de verilmiştir. Buna göre kırık yüzey SEM fotoğrafları analiz edildiğinde, tüm kaynaklı numunelerin çekme sonrası kırılma davranışlarının benzer olduğu anlaşılmaktadır. Kaynaklı bağlantıların genellikle kaynak ara yüzeylerinden koptuğu gözlemlenmiştir. Kaynaklı bağlantıların merkez bölgelerinin sürtünme kaynağıyla iyice birbirine karıştığı söylenebilir. Fakat kenar bölgeler ise gevrek klivaj kırılmaya yakın morfoloji sergilemektedir.



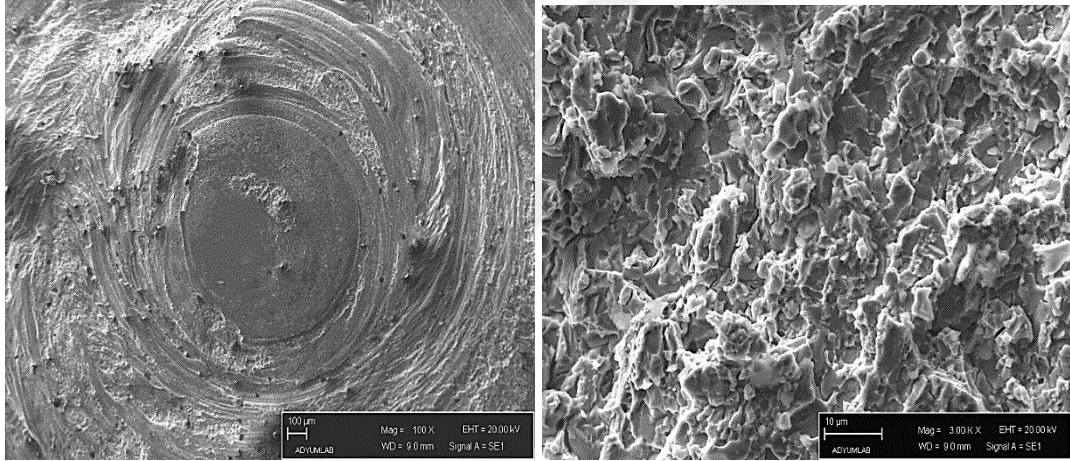
Şekil 4.33 S1 numunenin AISI1040 tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı



Şekil 4.34 S1 numunenin YKBDD tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı

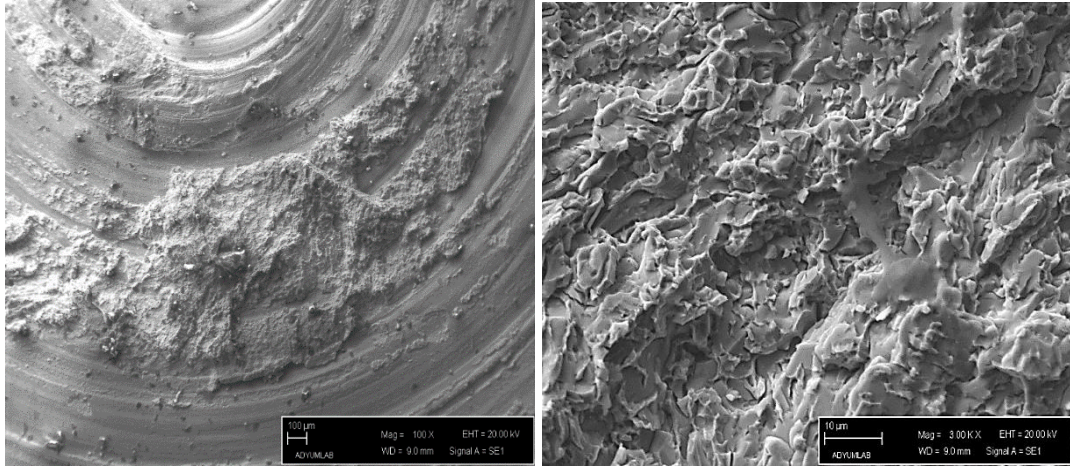


Şekil 4.35 S3 numunenin AISI1040 tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı

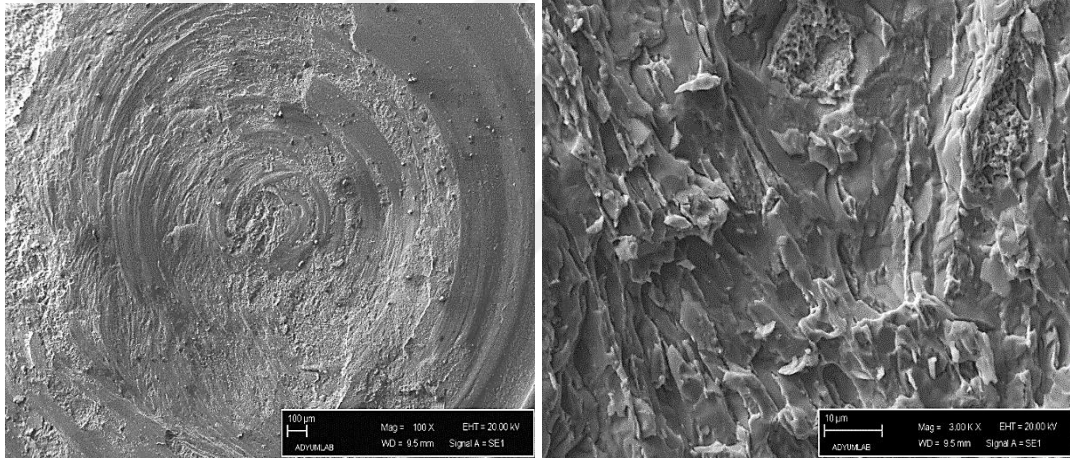


Şekil 4.36 S3 numunenin YKBDD tarafı kırık yüzey incelemesi





Şekil 4.37 S5 numunenin AISI1040 tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı



Şekil 4.38 S5 numunenin YKBDD tarafı kırık yüzey SEM fotoğrafı

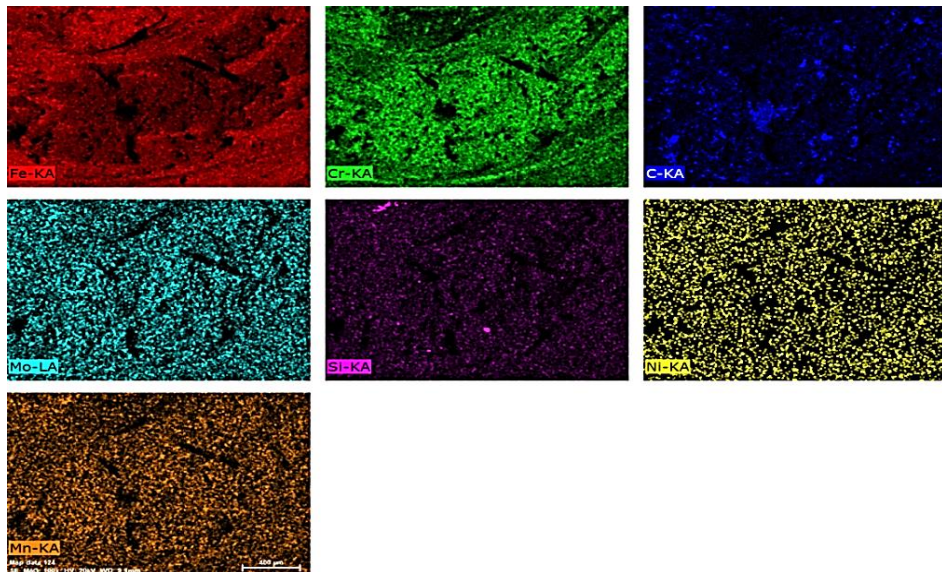
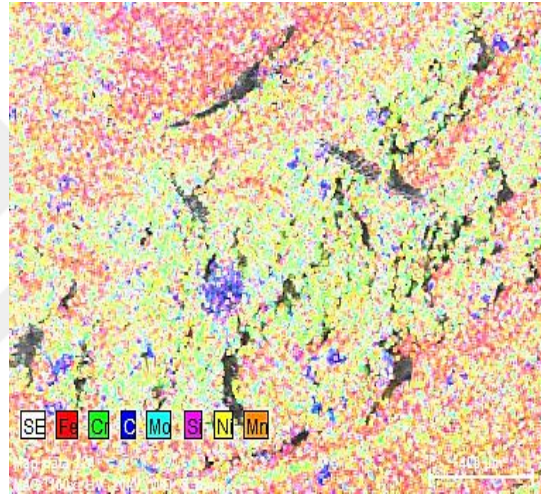
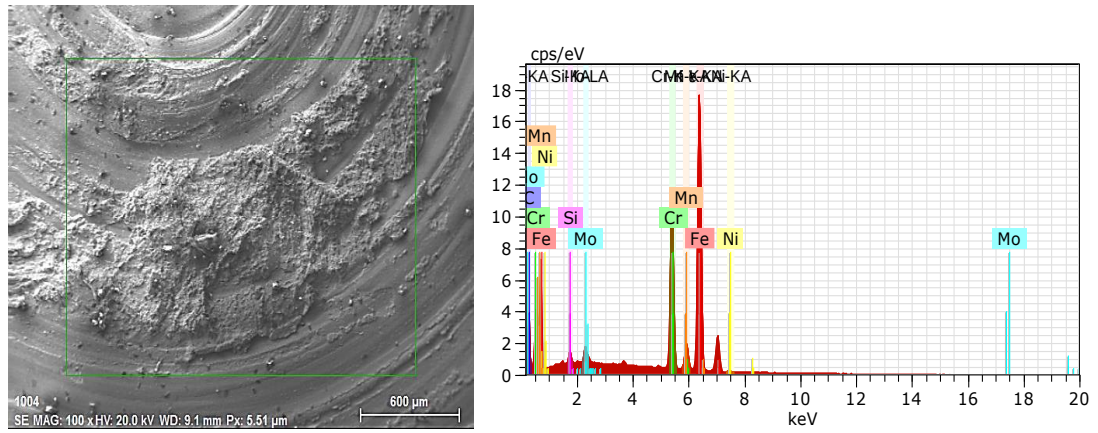
#### 4.9. Kırık Yüzey Elementel Haritalandırma Analizi

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme testi sonrası kırık yüzey elementel haritalandırma analiz fotoğrafları ve grafikleri Şekil 4.39-4.42’de verilmiştir. AISI1040 tarafından alınan elementel haritalandırma analizleri incelendiğinde, AISI1040 çeliği tarafındaki matris fazı olarak bulunan demir’in elementel haritalandırma analizlerinde de yine yoğun bir şekilde ana element olarak belirlenmiştir. Bunun yanında YKBDD tarafında alaşım elementi olarak bulunan Cr, C, Mo, Si, Ni, Mn ve W gibi elementlerin AISI 1040 tarafına difüze olduğu belirlenmiştir. YKBDD tarafı için hâkim olan Fe ve Cr elementlerinden başka diğer;

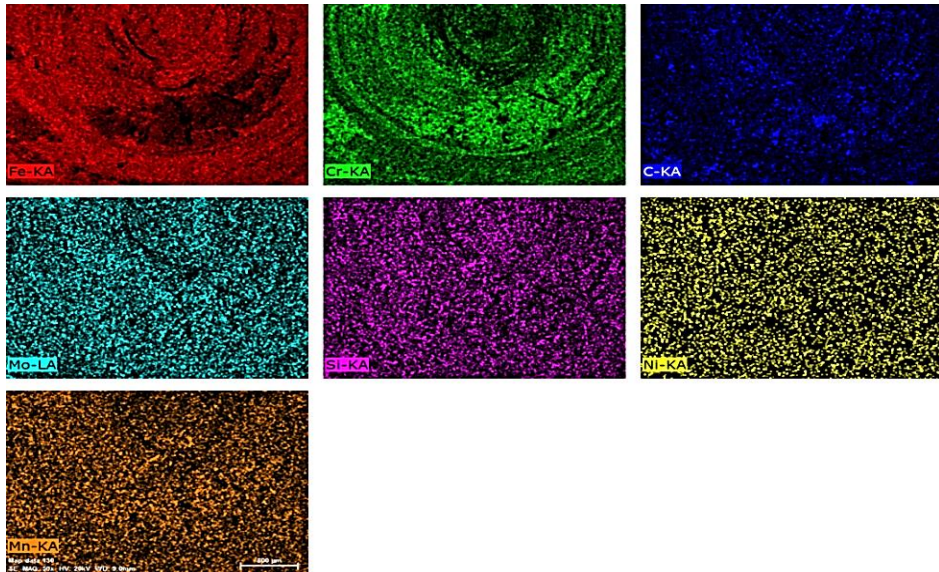
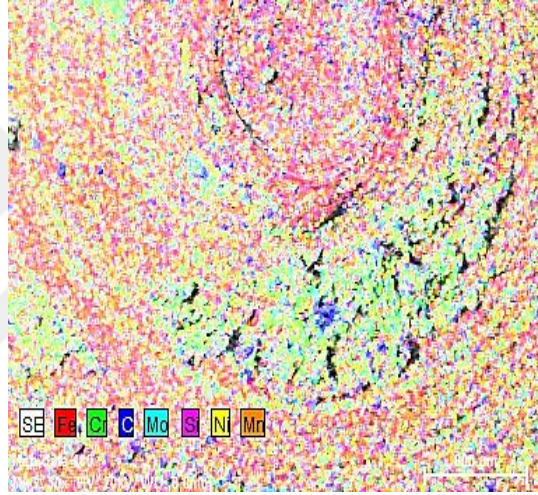
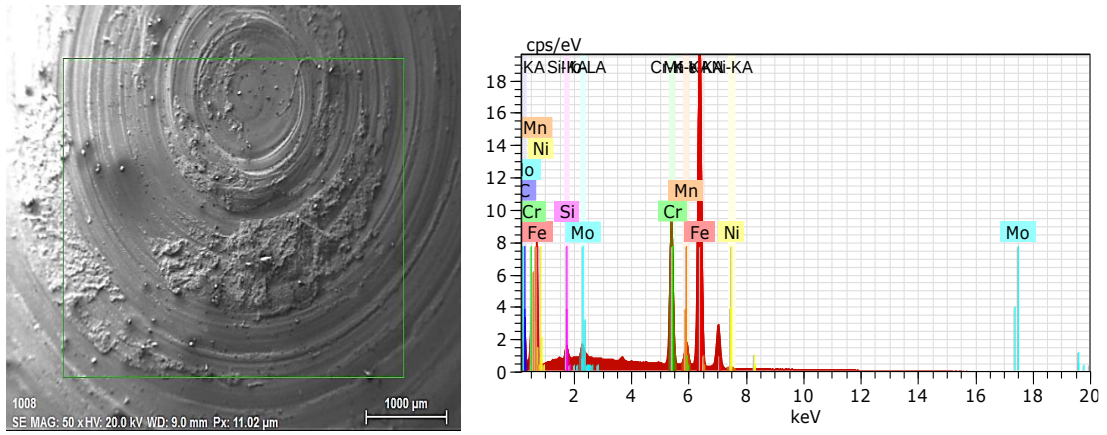
C, Mo, Si, Ni, Mn ve W gibi alaşım elementlerinin kaynak bölgesine yakın yerlerindeki dağılımları yer yer farklılık göstermektedir.





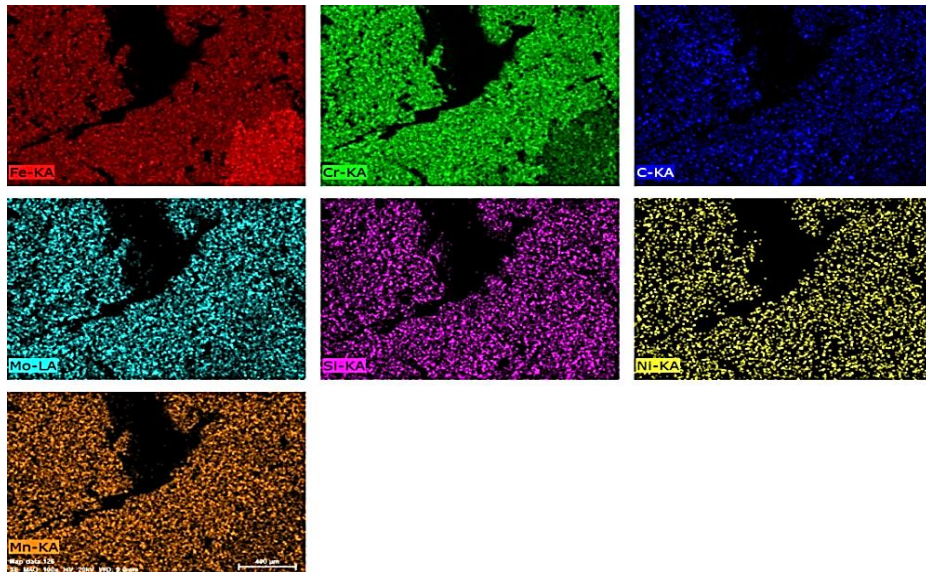
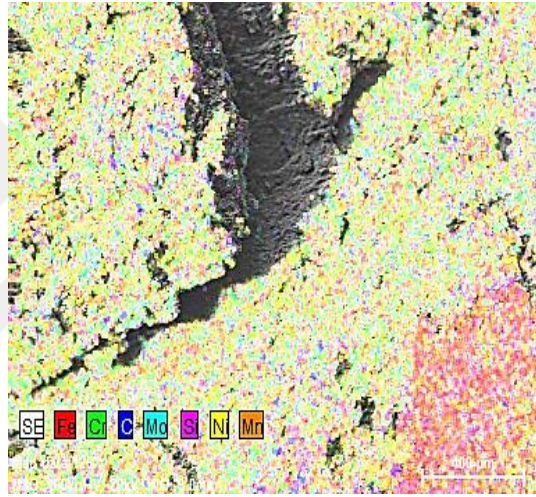
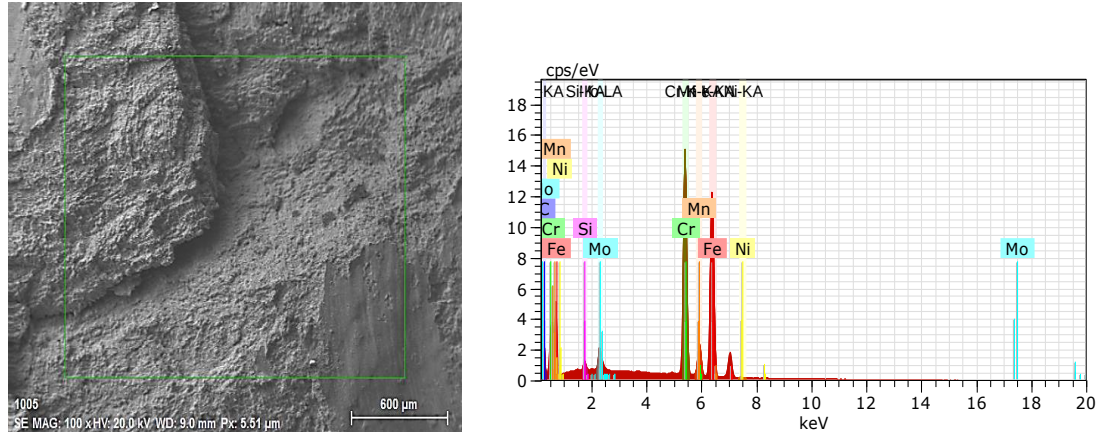


Şekil 4.39 S1 numunesinin çekme testi sonrası YKBDD tarafı kırık yüzey elementel haritalandırma analiz sonuçları

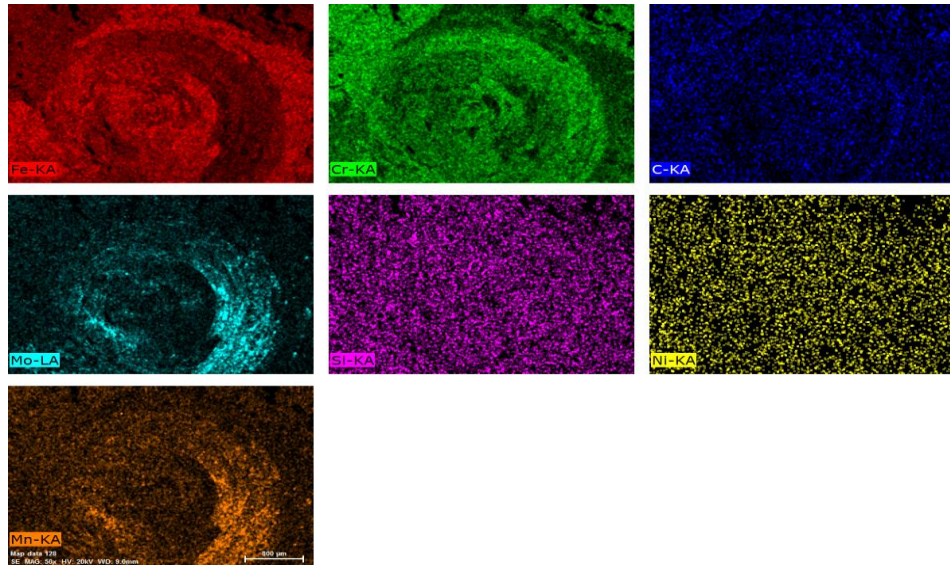
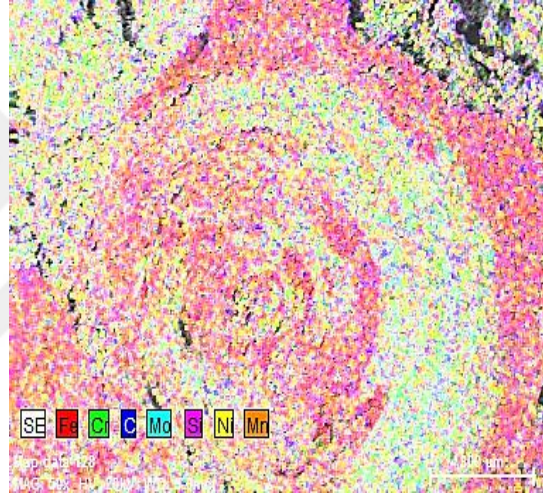
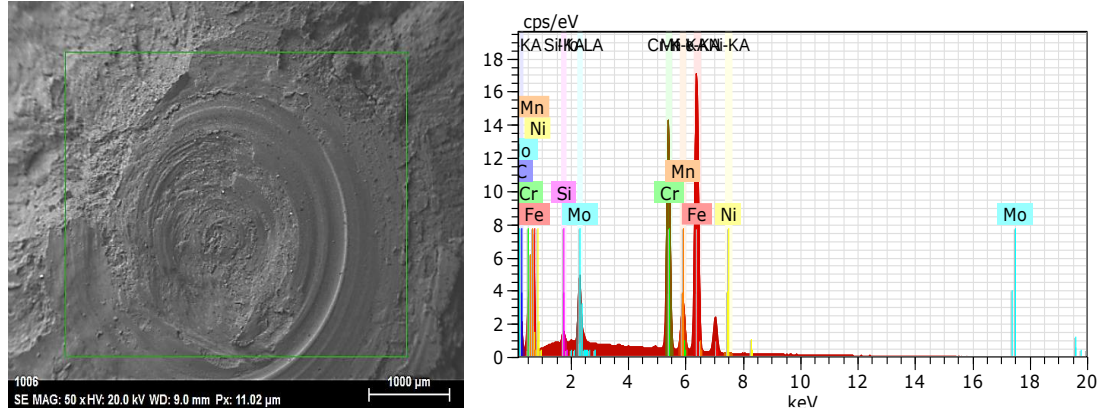


Şekil 4.40 S1 numunesinin çekme testi sonrası AISI1040 tarafı kırık yüzey elementel haritalandırma analiz sonuçları





Şekil 4.41 S5 numunesinin çekme testi sonrası YKBDD tarafı kırık yüzey elementel haritalandırma analiz sonuçları



Şekil 4.42 S5 numunesinin çekme testi sonrası AISI1040 tarafı kırık yüzey elementel haritalandırma analiz sonuçları

**5. SONUÇ VE ÖNERİLER**

Bu deneysel çalışmada; YKBDD ile AISI1040 çelik çifti farklı devir sayıları kullanılarak sürtünme kaynak yöntemiyle başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Artan devir sayısının kaynak ara yüzeyinde meydana getirdiği mikroyapısal değişim ve mekanik özellikler üzerine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

1. Kaynaklı numunelere ait makroyapılar incelendiğinde, sürtünme kaynak işlemi sonrası gözeneksiz ve çatlaksız kaynaklı bağlantıların elde edildiği aşikâr olup, kaynak işlemlerinin başarılı bir şekilde yapıldığı gözlemlenmektedir.
2. Artan devir sayısına bağlı olarak, oluşan flanşların miktarlarında önemli farklılıklar tespit edilmiştir. Kaynaklı numunelerin tümünde oluşan flanşların literatür’de belirtildiği gibi çanak şeklinde olduğu tespit edilmiştir.
3. Maksimum boyca kısalma S5 no’lu kaynaklı numunede meydana gelmişken, minimum boyca kısalma ise S1 no’lu kaynaklı numunede meydana gelmiştir. Kaynaklı numunelerde meydana gelen boyca kısaltmaların derecesi, sürtünme kaynağı sırasındaki sürtünme ve yığılma aşamalarında ortaya çıkan enerji ve ısı girdisindeki artışlar ile ilgilidir.
4. Kaynaklı numunelerin mikrosertlik-mesafe eğrilerine bakıldığında, tüm kaynaklı numunelerin benzer bir eğilim profiline sahip olduğu anlaşılmaktadır. Buna bağlı olarak en yüksek sertlik değerleri kaynak ara yüzeylerinde elde edilmişken, ana metale doğru ilerledikçe sertlik değerlerinin, sıcaklığa bağlı tavlama etkisinden dolayı bir miktar azaldığı daha sonra ana metallerin sertlik değerlerine erişildiği görülmektedir.
5. Sürtünme kaynak sonrası tüm kaynaklı numunler için literatür’de de belirtildiği gibi dört farklı bölgenin oluştuğu tespit edilmiştir.
6. Artan çevresel hız ile ilişkili olarak difüzyon hızı artmış olup, aşırı deforme olmuş bölgelerin genişliği artmıştır. Kısmen deforme olmuş bölgelerdeki tane küçülmesi ve oluşan plastik deformasyon miktarlarındaki değişim de artan çevresel hız ile orantılı olarak değişmektedir.

7. Kaynaklı bağlantıların EDS analizleri incelendiğinde; YKBDD tarafından AISI1040 çeliğine doğru Cr, C, M, Si, Mn ve W elementlerinin geçişi, mekanik karışıma bağlı plastik deformasyon ve difüzyonla gerçekleşmiştir.
8. EDS sonuçlarından anlaşılmaktadır ki, tüm kaynaklı numuneler için Cr, C, Mn, Mo, Si ve Ni gibi elementlerin difüzyonunun, artan devir sayısı ile orantılı olarak daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
9. XRD analiz sonuçlarına göre;  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , Fe,  $\text{Fe}_3\text{C}$  gibi fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yüksek sürtünme süresi ve artan devir sayısına bağlı olarak bu fazların şiddetlerinde değişiklik meydana gelmiştir.
10. AISI1040 tarafındaki matris fazı olarak bulunan demir elementel haritalandırma analizlerinde de yine yoğun bir şekilde ana element olarak tespit edilmiştir. Ayrıca YKBDD tarafında alaşım elementi olarak bulunan Cr, C, Mo, Si, Ni, Mn ve W gibi elementlerin AISI1040 tarafına difüze olduğu anlaşılmaktadır. YKBDD tarafından alınan elementel haritalandırma analizlerinde hâkim olan Fe ve Cr elementlerinden başka diğer; C, Mo, Si, Ni, Mn ve W gibi alaşım elementlerinin kaynak bölgesine yakın yerlerdeki dağılımları yer yer farklılık göstermektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] B.S. Yılbaş, A.Z. Şahin, N. Kahraman ve A.Z. Al-Garni, “Friction welding of St–Al and Al–Cu materials”, *Journal Materials Processing Technology*, vol. 49, pp. 431–443, 1995.
- [2] C.Y. Kang, T.H. North ve D.D. Perovic, “Microstructural features of friction welded MA 956 superalloy material”, *Metallic Material Transactions*, vol. 12, pp. 4019–4029, 1996.
- [3] S. Anık, *Kaynak tekniği el kitabı*. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, 1991.
- [4] J. Norrish, J. *Welding processes and technologies*, London: Woodhead publishing limited, 2006.
- [5] W.B. Lee, Y.M. Yeon, D.U. Kim ve S.B. Jung, “Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of aluminium alloy 5052-A36 steel joint”, *Material Science and Technology*, vol. 19, pp. 773–778, 2003.
- [6] T.C. Nguyen ve D.C. Weckman, “A thermal and microstructure evolution model of direct-drive friction welding of plain carbon steel”, *Metallic Material Transactions*, vol. 37, pp. 275–292, 2006.
- [7] Q.Z. Zhang, L.W. Zhang, W.W. Liu, X.G. Zhang, W.H. Zhu ve S. Qu, “3D rigid viscoplastic FE modelling of continuous drive friction welding process”, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, pp. 737–743, 2006.
- [8] H. Ateş, M. Türker ve A. Kurt, “Effect of friction pressure on the properties of friction welded MA956 iron-based superalloy”, *Materials and Design*, vol. 28, pp. 948–953, 2007.
- [9] P. Sathiya, S. Aravindan ve A.N. Haq, “Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 31, pp. 1076–1082, 2007.
- [10] K. Faes, W. Vermeersch, P.D. Baets, R. Denys ve E. Donckt, “Influence of forge pressure on properties of friction welded pipelines using intermediate ring”, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, pp. 445–451, 2008.
- [11] M. Maalekian, E. Kozeschnik, H.P. Brantner ve H. Cerjak, “Finite element modeling of orbital friction welding of eutectoid steel bars”, *Metallic Materials Transactions*, vol. 39, pp. 844–852, 2008.
- [12] P. Sathiya, S. Aravindan ve A.N. Haq, “Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints”, *Materials and Design*, vol. 29, pp. 1099–1109, 2008.
- [13] M. Maalekian, E. Kozeschnik, H.P. Brantner ve H. Cerjak, “Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars”, *Acta Materialia*, vol. 56, pp. 2843–2855, 2008.
- [14] M. Maalekian, “Friction welding critical assessment of literature”, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, pp. 738–759, 2007.
- [15] R.L. O’Brien, *Welding handbook*. Miami: American Welding Society, 1991.
- [16] E.D. Nicholas, “Friction processing Technologies”, *Welding in the World*, vol. 47, pp. 2–9, 2003.



- [17] M. Brantner, “Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars”, *Acta Materialia*, vol. 56, pp. 12–22, 2008.
- [18] L. D’Alvise, E. Massoni ve S.J. Walløe, “Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 125, pp. 387–391, 2002.
- [19] M.G. Reddy, S. Rao ve T. Mohandas, “Role of electroplated interlayer in continuous drive friction welding of AA6061 to AISI304 dissimilar metals”, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, pp. 619–628, 2008.
- [20] H.Y. Li, Z.W. Huang, S. Bray, G. Baxter ve P. Bowen, “High temperature fatigue of friction welded joints in dissimilar nickel based superalloys”, *Materials Science and Technology*, vol. 156, pp. 1408–1418, 2007.
- [21] M. Yılmaz, “Farklı takım çeliklerinin sürtünme kaynağında kaynak bölgesinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 1993.
- [22] K.S. Mortensen, C.G. Jensen, L.C. Conrad ve F. Losee, “Mechanical properties and microstructures of inertia friction welded 416 stainless steel”, *Welding Research Supplement*, vol. 31, pp. 268–273, 2001.
- [23] M. Şahin, “Characterization of properties in plastically deformed austenitic-stainless steels joined by friction welding”, *Materials and Design*, vol. 30, pp. 135–144, 2009.
- [24] M. Şahin, “Joining of stainless steel and copper materials with friction welding”, *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 61, pp. 319–324, 2009.
- [25] M. Şahin, “Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI304) joined by friction welding”, *Materials and Design*, vol. 28, pp. 2244–2250, 2007.
- [26] R.E. Craine ve A. Francis, “Frictional heat generated in the early stages of an orbital friction welding process”, *Wear*, vol. 114, pp. 355–365, 1987.
- [27] T. Sawai, K. Ogawa, H. Yamaguchi, H. Ochi, Y. Yamamoto, ve Y. Suga, “Evaluation of joint strength of friction welded carbon steel by heat input”, *Welding International*, vol. 16, pp. 432–441, 2002.
- [28] M. Mahoney, C. Rhodes, J. Flintoff, W. Bingel ve R. Spurling, “Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum”, *Metallic Material Transactions*, vol. 29, pp. 1955–1964, 1998.
- [29] J.Q. Su, T.W. Nelson, R. Mishra ve M. Mahoney, “Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium”, *Acta Materialia*, vol. 51, pp. 713–729, 2003.
- [30] H. Schmidt, J. Hattel ve J. Wert, “An analytical model for the heat generation in friction stir welding”, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 12, pp. 143–152, 2004.
- [31] N. Katı, “Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI4340 / AISI420 çelik çiftinin burulma davranışının incelenmesi”, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, 2014.
- [32] P. Staron, M. Koçak ve S. Williams, “Residual stresses in friction stir welded Al sheets”, *Applied Physics A*, vol. 74, pp. 1161–1162, 2002.
- [33] T.U. Seidel ve A.P. Reynolds, “Two-dimensional friction stir welding process model based on fluid mechanic”, *Science and Technology of Welding Joining*, vol. 8, pp. 175–183, 2003.

- [34] Y. Güngör, *Malzeme bilgisi*. İstanbul: Beta Basım Yayım, 2001.
- [35] P.L. Threadgill, “Terminology in friction stir welding”, *Science and Technology of Welding Joining*, vol. 12, pp. 357–360, 2007.
- [36] M. Erdoğan, *The science and engineering of materials*. Ankara: Nobel yayınevi, 2002.
- [37] E. Kerkut, “Ötektik üstü yüksek kromlu beyaz dökme demirin içyapı, aşınma ve darbe direnci özelliklerine TiBAL’in etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, 2008.
- [38] İ. Kırık, “Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI1040/AISI304L çelik çiftinin elektrokimyasal korozyon davranışının araştırılması”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2012.
- [39] A. Orhan, “Al Matrisli parçacık takviyeli kompozitlerin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, 2003.
- [40] D. Çelik, “Alüminyum ve bakır çubukların sürtünme kaynağı üzerine bir araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, 1997.
- [41] S. Anık, *Kaynak tekniğinde schaeffler diyagramının kullanılması*. Ankara: Oerlikon Yayınları, 1970.
- [42] C. Meriç, N.S. Köksal, M.T. Erdoğan, A. Okur, “Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak bölgesinin incelenmesi”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 4, pp. 135–144, 2008.
- [43] M. Şahin, “Transmisyon çeliği ile martenzitik paslanmaz çeliğin sürtünme kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, 2001.
- [44] S. Jamaludin, Y. Keat ve Z. Ahmad, “The effect of varying process parameters on the microhardness and microstructure of Cu–steel and Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> friction joint”, *Journal Teknologi*, vol. 41, pp. 85–95, 2004.
- [45] R.L. O’Brien, *Jefferson’s welding encyclopedia*. NewYork: American welding society, 1997.
- [46] M. Şahin, “Simulation of friction welding using a developed computer program”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153, pp. 1011–1018, 2004.
- [47] “Çelik Türleri”, Etna Çelik, <http://etnacelik.com.tr/karbonlu-celikler.com>. [Erişim Tarihi: 06.10.2015].
- [48] M. Erdoğan, *Mühendislik alaşımları yapı ve özellikleri*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 2000.
- [49] R. Paventhan ve P. Lakshminarayanan, “Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joint”, *Materials and Design*, vol. 32, pp. 1888–1894, 2011.
- [50] N. Arivazhagan, K. Senthilkumaran, S. Narayanan, K. Devendranath Ramkumar, S. Surendra ve S. Prakash, “Hot corrosion behavior of friction welded AISI4140 and AISI 304 in K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–60% NaCl mixture”, *Journal of Material Science Technolgy*, vol 28, pp. 895–904, 2012.
- [51] C.H. Muralimohan, V. Muthupandi ve K. Sivaprasad, “Properties of friction welding titanium stainless steel joints with a nickel interlayer”, *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 1120–1129, 2014.

- [52] R.G. Madhusudhan, “Role of nickel as an interlayer in dissimilar metal friction welding of maraging steel to low alloy steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 66–77, 2012.
- [53] S. Çelik ve İ. Ersözlü, “Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI4140 and AISI1050 steels”, *Materials and Design*, vol. 30, pp. 970–976, 2008.
- [54] R. Damodaram, S. Raman ve P.K. Rao, “Microstructure and mechanical properties of friction welded alloy 718”, *Materials Science & Engineering*, vol. 560, pp. 781–786, 2013.
- [55] D. Suresh, G. Meshram ve R. Madhusudhan, “Friction welding of AA6061 to AISI4340 using silver interlayer”, *Defence Technology*, vol. 11, pp. 292–298, 2015.
- [56] R. Kumar ve M. Alasubramanian, “Experimental investigation of Ti6Al4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer”, *Defence Technology*, vol. 11, pp. 65–75, 2015.
- [57] J.C Lippold ve D.J. Kotecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. New Jersey: John Wiley, 2005.
- [58] N. Özdemir, F. Sarsılmaz ve A. Hasçalık, “Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI304L to 4340 steel”, *Materials and Design*, vol. 28, pp. 301–307, 2007.
- [59] G.M. Reddy ve K. S. Rao, “Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 45, pp. 875–888, 2009.
- [60] T. Teker, “Evaluation of the metallurgical and mechanical properties of friction-welded joints of dissimilar metal combinations AISI2205/Cu”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 66, pp. 303–310, 2013.

**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Mustafa ÖZARSLAN  
Doğum Yeri : Malatya  
Doğum Tarihi : 03.06.1976  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : mustafa\_44@yahoo.com

**Eğitim Durumu**

| Derece        | Alan                              | Üniversite                         | Mezuniyet Yılı |
|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------|
| Yüksek Lisans | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | Adıyaman Üniversitesi              | 2019           |
| Lisans        | Makine Eğitimi                    | Fırat Üniversitesi (T.E.F)         | 2001           |
| Lise          | Makine Bölümü                     | Şehit Kemal ÖZALPER End. Mes. Lis. | 1988           |