



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAYNAKLI TWIP ÇELİKLERİNDE MİKROYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLER ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ARAŞTIRILMASI**

**Mümin TUTAR**

Prof. Dr. Ali BAYRAM  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2017

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Mümin TUTAR tarafından hazırlanan “*Kaynaklı TWIP Çeliklerinde Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkilerin Araştırılması*” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

- Başkan:** Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü
- Üye:** Prof. Dr. Agah UĞUZ  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü
- Üye:** Prof. Dr. Cemalettin YAMAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi,  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- Üye:** Doç. Dr. Sare ÇELİK  
Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü
- Üye:** Yrd. Doç. Dr. Erol SOLMAZ  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,  
Otomotiv Mühendisliği Bölümü

İmza  


İmza  


İmza  


İmza  


İmza  


**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali BAYRAM**

**Enstitü Müdürü**

9.. / 8 / 2017



**UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

**beyan ederim.**

03 / 07 / 2017

**Mümin TUTAR**

## ÖZET

Doktora Tezi

### KAYNAKLI TWIP ÇELİKLERİNDE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ARAŞTIRILMASI

**Mümin TUTAR**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

Son zamanlarda otomotiv sektörü için iki temel amaç; hafifletme ve yolcu/sürücü güvenliğinin artırılmasıdır. Bu taleplerin karşılanması için, yüksek dayanımlı ve üretim yöntemlerine uygun malzemeler üzerindeki çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. TWIP çelikleri, üstün dayanım ve süneklik özellikleri ile son dönemde çalışmaların hızla arttığı ultra yüksek dayanımlı çelikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bugün için pahalı olan TWIP çeliklerinin ilerleyen yıllarda otomotiv sektöründe kullanım alanı bulacağı düşünülmektedir. Elektrik direnç nokta kaynağının da otomobil üretiminde en çok kullanılan üretim yöntemi olduğu dikkate alındığında, TWIP çeliklerinin kaynak edilebilirliği önemli hale gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında, literatürde önemli bir eksik olarak görülen ve otomotiv firmalarının merak ve talep ettiği bir konu olan TWIP çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Otomotiv sanayinde sacların, önce şekillendirme görmesinden dolayı farklı deformasyon oranlarında haddelenen TWIP saclarının elektrik direnç nokta kaynağındaki kaynak parametreleri optimize edilmiş ve tekil parametrelerin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** TWIP çelikleri, mekanik ikizlenme, elektrik direnç nokta kaynağı, mekanik özellikler, mikroyapı

**2017, xviii+203 sayfa**



## **ABSTRACT**

PhD Thesis

### **THE INVESTIGATION OF THE RELATIONS BETWEEN MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED TWIP STEELS**

**Mümin TUTAR**

Uludag University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

Recently, two primary objectives of the automotive industry are weight reduction and improvement of passenger safety. To fulfil these requirements, efforts about high strength materials with suitability for production methods are continuing intensely. TWIP steels, with extreme strength and ductility, is a steel group which number studies are increasing about. However, TWIP steels are expensive today, it is expected that TWIP steels will be used in the automotive industry within the next years. So, weldability of TWIP steels, considering that mostly used joining method in automobile production as resistance spot welding, is getting more important.

In this thesis, as an important lack of knowledge in the literature and as a subject that automotive industry needs to know, welding of TWIP steel using RSW is investigated. RSW parameters of cold rolled TWIP steels were optimized and effects of individual parameters on microstructural and mechanical properties were evaluated.

**Key words:** TWIP steels, mechanical twinning, resistance spot welding, mechanical properties, microstructure

**2017, xviii+203 pages**

## TEŞEKKÜR

Hem lisansüstü öğrenim hayatımın hem de akademik camiadaki iş hayatımın başından beri bilgi ve tecrübesiyle yol gösterici ve yardımcı olan değerli hocam, danışmanım Prof. Dr. Ali BAYRAM'a şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. Agah UĞUZ ve Yrd. Doç. Dr. Erol SOLMAZ'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tezimin temelini oluşturan TÜBİTAK projesinde, gece gündüz demeden beraber çalıştığımız proje yürütücüsü hocam Doç. Dr. Hakan AYDIN'a ve proje bursiyeri olarak destek veren arkadaşım Arş. Gör. Oğuz TUNÇEL'e teşekkür ederim.

Aynı bölümde görev yaptığımız, çalışmalarında ve akademik hayatımı şekillendirmemde etkileri olan Doç. Dr. Ali DURMUŞ'a, Öğr. Gör. Dr. Kurtuluş YİĞİT'e ve Arş. Gör. Celalettin YÜCE'ye teşekkür ederim.

Firmasının kapılarını akademik çalışmalar için her zaman açan, hayat felsefemde etkisi olan arkadaşım, uygulamalı mühendislik ve girişimcilik örneği Recep TUNÇ'a teşekkür ederim.

TWIP çeliklerinin teminini sağlayan Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş.'ye, kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesindeki desteklerinden dolayı Ermetal A.Ş.'ye ve özellikle kaynak üretim şefi Erkan ÇİNKÖ'ya, kaynak teknikeri Mustafa SARGIN'a ve kaynak mühendisi Ceyhun ADIYAMAN'a teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmamı hem 2211/C Öncelikli Alanlara Yönelik Burs Programı kapsamında bursiyer olarak hem de 213M597 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK kurumuna şükranlarımı sunarım.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, varlıklarını her an yanında hissettiğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, yukarıda saydığım tüm isimlerden sonra hayatıma giren, ancak, hayatımdaki etkisi tamamından fazla olan, oğlum Atahan'a armağan ediyorum.

03 / 07 / 2017

**Mümin TUTAR**

## İÇİNDEKİLER

|                                                        | Sayfa                                   |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| İÇ KAPAK.....                                          | i                                       |
| TEZ ONAYI.....                                         | <b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b> |
| ÖZET.....                                              | i                                       |
| ABSTRACT.....                                          | ii                                      |
| TEŞEKKÜR.....                                          | iii                                     |
| İÇİNDEKİLER .....                                      | iv                                      |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                   | vi                                      |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                   | vii                                     |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                | xvii                                    |
| 1. GİRİŞ .....                                         | 1                                       |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ .....                               | 4                                       |
| 2.1. TWIP Çelikleri .....                              | 4                                       |
| 2.2. İstif Hata Enerjisi ve Deformasyon Modu .....     | 6                                       |
| 2.3. Alaşım Elementleri.....                           | 7                                       |
| 2.4. Mekanik Özellikleri .....                         | 9                                       |
| 2.4.1. Tane yapısının etkisi .....                     | 9                                       |
| 2.4.2. Deformasyon sıcaklığının ve hızının etkisi..... | 11                                      |
| 2.4.3. Yorulma davranışı.....                          | 15                                      |
| 2.4.4. Gecikmeli kırılma.....                          | 17                                      |
| 2.5. TWIP Çeliğinin Kaynağı.....                       | 20                                      |
| 2.6. Tezin Amacı, Katkısı ve Yenilikleri .....         | 27                                      |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM.....                             | 30                                      |
| 3.1. Materyal .....                                    | 30                                      |
| 3.2. Deney Tasarımı ve Parametre Optimizasyonu.....    | 30                                      |
| 3.3. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı.....                | 32                                      |
| 3.4. Isı Girdisi İndeksi.....                          | 34                                      |
| 3.5. Optik Mikroskop Çalışmaları.....                  | 35                                      |
| 3.6. SEM Analizleri.....                               | 35                                      |
| 3.7. Mikro Sertlik Ölçümleri.....                      | 36                                      |
| 3.8. Çekme Testleri .....                              | 36                                      |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 3.9. Çekirdek Çapı ve Çökme Değerlerinin Ölçümü .....        | 37  |
| 4. BULGULAR .....                                            | 38  |
| 4.1. Farklı Deformasyon Oranlarındaki Temel Malzemeler ..... | 38  |
| 4.1.1. Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri .....           | 38  |
| 4.1.2. Çekme testleri.....                                   | 56  |
| 4.1.3. Kırılma yüzeylerinin analizi.....                     | 57  |
| 4.2. Deformasyonsuz A Grubu Numuneler.....                   | 61  |
| 4.3. Deformasyonsuz B Grubu Numuneler.....                   | 64  |
| 4.3.1. Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri .....           | 66  |
| 4.3.2. Mikro sertlik ölçümleri .....                         | 88  |
| 4.3.3. Çekme testleri.....                                   | 90  |
| 4.3.4. Kırılma yüzeylerinin analizi.....                     | 93  |
| 4.4. %15 Deformasyonlu A Grubu Numuneler .....               | 100 |
| 4.5. %15 Deformasyonlu B Grubu Numuneler.....                | 104 |
| 4.5.1. Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri .....           | 105 |
| 4.5.2. Mikro sertlik ölçümleri .....                         | 130 |
| 4.5.3. Çekme testleri.....                                   | 132 |
| 4.5.4. Kırılma yüzeylerinin analizi.....                     | 136 |
| 4.6. %30 Deformasyonlu A Grubu Numuneler .....               | 144 |
| 4.7. %30 Deformasyonlu B Grubu Numuneler.....                | 147 |
| 4.7.1. Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri .....           | 149 |
| 4.7.2. Mikro sertlik ölçümleri .....                         | 174 |
| 4.7.3. Çekme testleri.....                                   | 175 |
| 4.7.4. Kırılma yüzeylerinin analizi.....                     | 179 |
| 5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....                                   | 187 |
| KAYNAKLAR .....                                              | 193 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                               | 201 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

|   |                        |
|---|------------------------|
| F | Elektrot Kuvveti (N)   |
| I | Elektrik Akımı (A)     |
| Q | Isı Enerjisi (Joule)   |
| R | Elektrik Direnci (Ohm) |
| t | Zaman (s)              |

### Kısaltmalar

### Açıklama

|           |                                                                               |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|
| EB        | Erime Bölgesi                                                                 |
| EBSD      | Electron Backscatter Diffraction - Geri-yansıyan Elektron Difraksiyon Analizi |
| EDS (EDX) | Energy Dispersive X-ray Spectrometry – Enerji Dağılımı Spektrometresi         |
| İGİ       | Isı Girdisi İndeksi                                                           |
| ITAB      | Isı Tesiri Altındaki Bölge                                                    |
| MFDC      | Medium-Frequency Direct Current – Orta Frekans Doğru Akım                     |
| SEM       | Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron Mikroskobu                   |
| SFE       | Stacking Fault Energy – İstif Hata Enerjisi                                   |
| S/N       | Signal to Noise Ratio – Sinyal-Gürültü Oranı                                  |
| SS        | Standart Sapma                                                                |
| TM        | Temel Malzeme                                                                 |
| TWIP      | Twinning Induced Plasticity – İkizlenme ile plastisite                        |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1.</b> Şekil 2.1. Otomotiv sanayinde kullanılan bazı çelik gruplarının çekme dayanımı – kopma uzaması arasındaki ilişki (Hilditch ve ark. 2015).....                                                                                                                                                                                                                 | 5  |
| <b>Şekil 2.2.</b> Fe-Mn sistemlerinde Mn oranının SFE'ye etkisi (Hamada 2007) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 7  |
| <b>Şekil 2.3.</b> TWIP çelikleri ile ilgili yayınlanan makalelerinin yıllara göre dağılımı.....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 28 |
| <b>Şekil 2.4.</b> Örnek bir otomobilde nokta kaynağı yapılan yerler (Rossillon 2007) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 28 |
| <b>Şekil 3.1.</b> Araştırma uzayı.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 31 |
| <b>Şekil 3.2.</b> Çalışmada kullanılan MFDC elektrik direnç nokta kaynak makinesi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 32 |
| <b>Şekil 3.3.</b> Kaynak parametrelerinin zamana bağlı değişimi (şematik) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 33 |
| <b>Şekil 3.4.</b> Kaynak fikstürü .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 33 |
| <b>Şekil 3.5.</b> Çekme test numunesi (ASTM E8/E8M 2009).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 36 |
| <b>Şekil 3.6.</b> Kaynaklı çekme-kayma test numunesi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 37 |
| <b>Şekil 4.1.</b> Deformasyonsuz TWIP sacına ait optik mikroskop görüntüleri (x1000): a) Hadde yönüne dik, b) Hadde yönüne paralel, c) Sac yüzeyi .....                                                                                                                                                                                                                         | 39 |
| <b>Şekil 4.2.</b> Deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM görüntüleri: a) Sac yüzeyinden alınan numune, b) Sac yüzeyinden alınan numune, c) Kesitten alınan numune, d) Kesitten alınan numune.....                                                                                                                                                                                   | 40 |
| <b>Şekil 4.3.</b> %15 deformasyonlu TWIP sacına ait optik mikroskop görüntüleri (x1000): a) Kesitten alınan numune, b) Sac yüzeyinden alınan numune.....                                                                                                                                                                                                                        | 41 |
| <b>Şekil 4.4.</b> %15 deformasyonlu TWIP sacına ait SEM görüntüleri: a) Sac yüzeyinden alınan numune, b) Kesitten alınan numune, c) Kesitten alınan numune.....                                                                                                                                                                                                                 | 41 |
| <b>Şekil 4.5.</b> %30 deformasyonlu TWIP sacına ait optik mikroskop görüntüleri (x1000): a) Kesitten alınan numune, b) Sac yüzeyinden alınan numune.....                                                                                                                                                                                                                        | 42 |
| <b>Şekil 4.6.</b> %30 deformasyonlu TWIP sacına ait SEM görüntüleri a) Kesitten alınan numune, b) Kesitten alınan numune .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 42 |
| <b>Şekil 4.7.</b> Deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması ..... | 47 |

**Şekil 4.7.** Deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam).....48

**Şekil 4.7.** Deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam).....49

**Şekil 4.8.** %15 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması .....50

**Şekil 4.8.** %15 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam).....51

**Şekil 4.8.** Şekil 4.8. %15 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam).....52

**Şekil 4.9.** %30 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması .....53

**Şekil 4.9.** %30 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam).....54

**Şekil 4.9.** %30 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam).....55

|                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.10.</b> Farklı deformasyon oranlarına sahip TWIP çeliğinin çekme eğrileri .....                                                                                                                                                                                                   | 56 |
| <b>Şekil 4.11.</b> Çekme deneyi sonrası deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (a'dan c'ye doğru artan büyütme) .....                                                                                                                                                 | 58 |
| <b>Şekil 4.12.</b> Çekme deneyi sonrası %15 deformasyonlu TWIP sacına ait SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (a'dan c'ye doğru artan büyütme).....                                                                                                                                               | 59 |
| <b>Şekil 4.13.</b> Çekme deneyi sonrası %30 deformasyonlu TWIP sacına ait SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (a'dan c'ye doğru artan büyütme).....                                                                                                                                               | 60 |
| <b>Şekil 4.14.</b> Deformasyonsuz A grubu ön deneme numunelerinden bazılarında ait görüntüler: a) 2000N, 4kA, 100ms – çekirdek var, b) 2000N, 3kA, 50ms – çekirdek yok, c) 1000N, 4kA, 100ms – çekirdek yok, d) 1500N, 4kA, 100ms – çekirdek yok, e) 3000N, 10kA, 500ms – çekirdek var ..... | 61 |
| <b>Şekil 4.15.</b> Kaynak parametrelerinin etki seviyeleri (Deformasyonsuz A Grubu) .....                                                                                                                                                                                                    | 63 |
| <b>Şekil 4.16.</b> Deformasyonsuz B grubu deney numuneleri (a) Kaynak akımı b) Kaynak zamanı c) Elektrot kuvveti .....                                                                                                                                                                       | 65 |
| <b>Şekil 4.17.</b> Deformasyonsuz kaynaklı TWIP çeliklerinin tipik makro yapısı ve mikro yapıları (Numune K3A5Z3). (Geçiş bölgesi haricindeki tüm mikro-yapı büyütme x500; Geçiş bölgesi büyütme x100).....                                                                                  | 67 |
| <b>Şekil 4.18.</b> Erime bölgesindeki mikro yapılar (Numune K3A5Z3). (İTİTAB: İnce taneli ısı tesiri altındaki bölge; KTİTAB: Kaba taneli ısı tesiri altındaki bölge; KDEB: Kaba dendritik erime bölgesi; İDEB: İnce dendritik erime bölgesi) Büyütme x200 .....                             | 67 |
| <b>Şekil 4.19.</b> Erime bölgesindeki dendritler ve dendrit kolları arasındaki mikro gözenekler (Numune K3A5Z3) a) x500 büyütme, b) x1000 büyütme.....                                                                                                                                       | 68 |
| <b>Şekil 4.20.</b> Erime bölgesindeki hatalar a) dendritler arası büzülme esaslı makro gözenekler (x1000), b) sıçratma boşluğu (x100), c) yüzey çatlağı (x200) (Numune K2) .....                                                                                                             | 68 |
| <b>Şekil 4.21.</b> Kaynak akımının makro yapıya etkisi: a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA, e) 12 kA (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                                        | 70 |
| <b>Şekil 4.22.</b> Kaynak zamanının makro yapıya etkisi: a) 200 ms, b) 250 ms, c) 300 ms, d) 350 ms, e) 400 ms (Deformasyonsuz B grubu).....                                                                                                                                                 | 71 |
| <b>Şekil 4.23.</b> Elektrot kuvvetinin makro yapıya etkisi: a) 2,6 kN, b) 2,8 kN, c) 3 kN, d) 3,2 kN, e) 3,4 kN (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                               | 72 |
| <b>Şekil 4.24.</b> Kaynak akımının İTAB oluşumuna etkisi: a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA, e) 12 kA (Büyütmeler x100) (Deformasyonsuz B grubu).....                                                                                                                                     | 74 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.25.</b> Kaynak zamanının ITAB oluşumuna etkisi: a) 200 ms, b) 250 ms, c) 300 ms, d) 350 ms, e) 400 ms (Büyütmeler x100) (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                              | 75 |
| <b>Şekil 4.26.</b> Elektrot kuvvetinin ITAB oluşumuna etkisi: a) 2,6 kN, b) 2,8 kN, c) 3 kN, d) 3,2 kN, e) 3,4 kN (Büyütmeler x100) (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                             | 76 |
| <b>Şekil 4.27.</b> ITAB genişliğinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                                   | 77 |
| <b>Şekil 4.28.</b> ITAB genişliğinin ısı girdisi ile değişimi (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                                                                                                   | 77 |
| <b>Şekil 4.29.</b> ITAB mikro yapısının ısı girdisi ile değişimi (Optik Görüntüler) a) $IG\dot{I}=9600$ (Z1), b) $IG\dot{I}=14400$ (K3A5Z3), c) $IG\dot{I}=15429$ (K2), d) $IG\dot{I}=19200$ (Z5) (Büyütmeler x1000) (Deformasyonsuz B grubu).....                                                             | 78 |
| <b>Şekil 4.30.</b> ITAB mikro yapısının ısı girdisi ile değişimi (SEM görüntüleri) a) $IG\dot{I}=6400$ (A1) (x2000), b) $IG\dot{I}=9600$ (Z1) (x3010), c) $IG\dot{I}=14400$ (K3A5Z3) (x3250), d) $IG\dot{I}=19200$ (Z5) (x3410) (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                 | 79 |
| <b>Şekil 4.31.</b> A1 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=6400$ ) ITAB mikro yapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı .....             | 81 |
| <b>Şekil 4.31.</b> A1 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=6400$ ) ITAB mikro yapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam).....      | 82 |
| <b>Şekil 4.32.</b> K3A5Z3 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=14400$ ) ITAB mikro yapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı .....        | 83 |
| <b>Şekil 4.32.</b> K3A5Z3 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=14400$ ) ITAB mikro yapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)..... | 84 |
| <b>Şekil 4.33.</b> EB mikro yapısının ısı girdisi ile değişimi (Optik görüntüleri): a) $IG\dot{I}=6400$ (A1); b) $IG\dot{I}=9600$ (Z1); c) $IG\dot{I}=12000$ (Z2); d) $IG\dot{I}=14400$ (K3A5Z3); e) $IG\dot{I}=16800$ (Z4); f) $IG\dot{I}=19200$ (Z5) (Büyütmeler x50) .....                                  | 85 |
| <b>Şekil 4.34.</b> Çekirdek çapının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                                    | 86 |
| <b>Şekil 4.35.</b> Çekirdek çapının ısı girdisi ile değişimi (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                                                                                                    | 87 |

|                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.36.</b> Çökme miktarının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                              | 88  |
| <b>Şekil 4.37.</b> Kaynak bölgesi sertlik değerlerinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti. (İDEB: İnce Dendritik Erime Bölgesi; KDEB: Kaba Dendritik Erime Bölgesi) (Deformasyonsuz B grubu) ..... | 89  |
| <b>Şekil 4.38.</b> Deformasyonsuz B grubu kaynaklı numunelerin çekme eğrileri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti .....                                                                                                               | 91  |
| <b>Şekil 4.39.</b> Çekme-kayma kuvvetinin kaynak parametreleri ile değişimi: a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu).....                                                                                        | 92  |
| <b>Şekil 4.40.</b> Çekme-kayma kuvvetinin çekirdek çapı ile değişimi (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                                                                      | 93  |
| <b>Şekil 4.41.</b> Çekme-kayma testi uygulanmış kaynaklı numuneler a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                                 | 94  |
| <b>Şekil 4.42.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (A4 numunesi).....                                                                                                                                                                                     | 95  |
| <b>Şekil 4.43.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (K3A5Z3 numunesi).....                                                                                                                                                                                 | 96  |
| <b>Şekil 4.44.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (K5 numunesi).....                                                                                                                                                                                     | 98  |
| <b>Şekil 4.45.</b> ITAB tane sınırlarının ergimesi: a) K2 numunesi; b) K5 numunesi .....                                                                                                                                                                 | 99  |
| <b>Şekil 4.46.</b> K5 kodlu numuneye ait kırılma yüzeyi üzerinden gerçekleştirilen SEM-EDS analizi: a) Dendrit kolları üzerinden, b) Dendrit kolları arasından .....                                                                                     | 99  |
| <b>Şekil 4.47.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (Z5 numunesi) .....                                                                                                                                                                                    | 100 |
| <b>Şekil 4.48.</b> %15 deformasyonlu TWIP saclarında ön deneme kaynak numunesi örneği (Kaynak parametreleri: Kaynak Akımı: 3 kA; Elektrot kuvveti: 1500 N; Kaynak zamanı: 100 ms).....                                                                   | 101 |
| <b>Şekil 4.49.</b> Kaynak parametrelerinin etki seviyeleri (%15 deformasyonlu A grubu)...                                                                                                                                                                | 102 |
| <b>Şekil 4.50.</b> %15 deformasyonlu B grubu kaynaklı deney numuneleri örnekleri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti .....                                                                                                            | 105 |
| <b>Şekil 4.51.</b> %15 deformasyonlu kaynaklı TWIP çeliklerinin tipik makro yapısı ve mikro yapıları (Numune 15K3A4Z3). (Büyütmeler: TM x500; ITAB x1000; Erime Bölgesi x50; Geçiş Bölgesi x100) .....                                                   | 106 |
| <b>Şekil 4.52.</b> Kaynak akımının makro yapıya etkisi: a) 6 kA, b) 7 kA, c) 8 kA, d) 9 kA, e) 10 kA (%15 deformasyonlu B grubu).....                                                                                                                    | 108 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.53.</b> Kaynak zamanının makro yapıya etkisi: a) 150 ms, b) 200 ms, c) 250 ms, d) 300 ms, e) 350 ms (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                                                                            | 109 |
| <b>Şekil 4.54.</b> Elektrot kuvvetinin makro yapıya etkisi: a) 1,75 kN, b) 2,0 kN, c) 2,25 kN, d) 2,5 kN, e) 2,75 kN (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                                                                      | 110 |
| <b>Şekil 4.55.</b> Kaynak akımının ITAB oluşumuna etkisi: a) 6 kA, b) 7 kA, c) 8 kA, d) 9 kA, e) 10 kA (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                                                                  | 112 |
| <b>Şekil 4.56.</b> Kaynak zamanının ITAB oluşumuna etkisi: a) 150 ms, b) 200 ms, c) 250 ms, d) 300 ms, e) 350 ms (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                                                        | 113 |
| <b>Şekil 4.57.</b> Elektrot kuvvetinin ITAB oluşumuna etkisi: a) 1,75 kN, b) 2,0 kN, c) 2,25 kN, d) 2,5 kN, e) 2,75 kN (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu) (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                      | 114 |
| <b>Şekil 4.58.</b> ITAB genişliğinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                                                             | 115 |
| <b>Şekil 4.59.</b> ITAB genişliğinin ısı girdisi ile değişimi: a) Kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot kuvvetini içeren grafik; b) Kaynak akımı ve kaynak zamanını içeren grafik (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                       | 115 |
| <b>Şekil 4.60.</b> ITAB mikro yapısının kaynak akımı ile değişimi (Optik Görüntüler): a) 6 kA, b) 7 kA, c) 8 kA, d) 9 kA, e) 10 kA (Büyütmeler x1000) (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                                     | 116 |
| <b>Şekil 4.61.</b> ITAB mikro yapısının kaynak zamanı ile değişimi (Optik Görüntüler): a) 150 ms, b) 200 ms, c) 250 ms, d) 300 ms, e) 350 ms (Büyütmeler x1000) (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                           | 117 |
| <b>Şekil 4.62.</b> ITAB mikro yapısının elektrot kuvveti ile değişimi (Optik Görüntüler): a) 1,75 kN, b) 2,0 kN, c) 2,25 kN, d) 2,5 kN, e) 2,75 kN (Büyütmeler x1000) (%15 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                                     | 118 |
| <b>Şekil 4.63.</b> 15A1 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=4000$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı .....         | 120 |
| <b>Şekil 4.63.</b> 15A1 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=4000$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam) ..... | 121 |

- Şekil 4.64.** 15A5 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=11111$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı ..... 122
- Şekil 4.64.** 15A5 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=11111$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)..... 123
- Şekil 4.65.** ITAB mikro yapısının kaynak parametreleri ile değişimi (SEM görüntüleri) a)  $IG\dot{I}=4000$  (15A1), b)  $IG\dot{I}=9000$  (15K3A4Z3), c)  $IG\dot{I}=5400$  (15Z1), d)  $IG\dot{I}=12600$  (15Z5)..... 124
- Şekil 4.66.** EB mikro yapısının kaynak akımı ile değişimi (Optik görüntüleri): a) 6 kA, b) 7 kA, c) 8 kA, d) 9 kA, e) 10 kA (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu) . 125
- Şekil 4.67.** EB mikro yapısının kaynak zamanı ile değişimi (Optik görüntüleri): a) 150 ms, b) 200 ms, c) 250 ms, d) 300 ms, e) 350 ms (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu) ..... 126
- Şekil 4.68.** EB mikro yapısının elektrot kuvveti ile değişimi (Optik görüntüleri): a) 1,75 kN, b) 2,0 kN, c) 2,25 kN, d) 2,5 kN, e) 2,75 kN (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu) ..... 127
- Şekil 4.69.** Çekirdek çapının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)..... 128
- Şekil 4.70.** Çekirdek çapının ısı girdisi ile değişimi (%15 deformasyonlu B grubu) ... 129
- Şekil 4.71.** Çökme miktarının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)..... 130
- Şekil 4.72.** Mikro sertlik değerlerinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu) ..... 131
- Şekil 4.73.** %15 deformasyonlu B grubu kaynaklı numunelerin çekme eğrileri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti ..... 133
- Şekil 4.74.** Çekme–kayma kuvvetinin kaynak parametreleri ile değişimi: a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu) ..... 135
- Şekil 4.75.** Çekme–kayma kuvvetinin çekirdek çapı ile değişimi (%15 deformasyonlu B grubu)..... 135
- Şekil 4.76.** Çekme-kayma testi uygulanmış kaynaklı numuneler a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)..... 136

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.77.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15A1 numunesi).....                                                                                                                              | 137 |
| <b>Şekil 4.78.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15A2 numunesi).....                                                                                                                              | 138 |
| <b>Şekil 4.79.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15A3 numunesi).....                                                                                                                              | 139 |
| <b>Şekil 4.80.</b> 15A3 kodlu numune kırılma yüzeyi üzerinden gerçekleştirilen SEM-EDS analizi: a) Dendrit kolları üzerinden; b) Dendrit kolları arasından .....                                    | 140 |
| <b>Şekil 4.81.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15K3A4Z3 numunesi).....                                                                                                                          | 141 |
| <b>Şekil 4.82.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15A5 numunesi).....                                                                                                                              | 142 |
| <b>Şekil 4.83.</b> %30 deformasyonlu TWIP saclarında ön deneme kaynak numunesi örneği (kaynak akımı: 2,5 kA; elektrot kuvveti: 500 N; Kaynak zamanı: 100 ms.) .....                                 | 144 |
| <b>Şekil 4.84.</b> Kaynak parametrelerinin etki seviyeleri (%30 deformasyonlu A grubu)...                                                                                                           | 146 |
| <b>Şekil 4.85.</b> %30 deformasyonlu B grubu kaynaklı deney numuneleri örnekleri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti .....                                                       | 149 |
| <b>Şekil 4.86.</b> %30 deformasyonlu kaynaklı TWIP çeliklerinin tipik makro yapısı ve mikro yapıları (Numune 30A5). (Büyütmeler: TM x500; ITAB x1000; Erime Bölgesi x50; Geçiş Bölgesi x100). ..... | 150 |
| <b>Şekil 4.87.</b> Kaynak akımının makro yapıya etkisi a) 5,5 kA, b) 6,5 kA, c) 7,5 kA, d) 8,5 kA, e) 9,5 kA (%30 deformasyonlu B grubu).....                                                       | 151 |
| <b>Şekil 4.88.</b> Kaynak zamanının makro yapıya etkisi: a) 50 ms, b) 100 ms, c) 150 ms, d) 200 ms, e) 250 ms (%30 deformasyonlu B grubu) .....                                                     | 152 |
| <b>Şekil 4.89.</b> Elektrot kuvvetinin makro yapıya etkisi: a) 1 kN, b) 1,25 kN, c) 1,5 kN, d) 1,75 kN, e) 2 kN (%30 deformasyonlu B grubu).....                                                    | 153 |
| <b>Şekil 4.90.</b> Kaynak akımının ITAB oluşumuna etkisi: a) 5,5 kA, b) 6,5 kA, c) 7,5 kA, d) 8,5 kA, e) 9,5 kA) (Büyütmeler x100) (%30 deformasyonlu B grubu) .....                                | 155 |
| <b>Şekil 4.91.</b> Kaynak zamanının ITAB oluşumuna etkisi: a) 50 ms, b) 100 ms, c) 150 ms, d) 200 ms, e) 250 ms (Büyütmeler x100) (%30 deformasyonlu B grubu).....                                  | 156 |
| <b>Şekil 4.92.</b> Elektrot kuvvetinin ITAB oluşumuna etkisi: a) 1 kN, b) 1,25 kN, c) 1,5 kN, d) 1,75 kN, e) 2 kN (Büyütmeler x100) (%30 deformasyonlu B grubu) .....                               | 157 |
| <b>Şekil 4.93.</b> ITAB genişliğinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu).....                                      | 158 |
| <b>Şekil 4.94.</b> ITAB genişliğinin ısı girdisi ile değişimi (%30 deformasyonlu B grubu) .                                                                                                         | 158 |

- Şekil 4.95.** ITAB mikro yapısının kaynak akımı ile değişimi (Optik Görüntüler) a) 5,5 kA, b) 6,5 kA, c) 7,5 kA, d) 8,5 kA, e) 9,5 kA (Büyütmeler x1000) (%30 deformasyonlu B grubu) ..... 159
- Şekil 4.96.** ITAB mikro yapısının kaynak zamanı ile değişimi (Optik Görüntüler) a) 50 ms, b) 100 ms, c) 150 ms, d) 200 ms, e) 250 ms (Büyütmeler x1000) (%30 deformasyonlu B grubu) ..... 160
- Şekil 4.97.** ITAB mikro yapısının elektrot kuvveti ile değişimi (Optik Görüntüler) a) 1 kN, b) 1,25 kN, c) 1,5 kN, d) 1,75 kN, e) 2 kN (Büyütmeler x1000) (%30 deformasyonlu B grubu) ..... 161
- Şekil 4.98.** ITAB mikro yapısının kaynak parametreleri ile değişimi (SEM görüntüleri) a) TM (küçük büyütme), b) TM (büyük büyütme), c)  $IG\dot{I}=7225$  (30K1), d)  $IG\dot{I}=3613$  (30K5) (%30 deformasyonlu B grubu) ..... 163
- Şekil 4.99.** 30A1 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=2017$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı ..... 165
- Şekil 4.99.** 30A1 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=2017$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)..... 166
- Şekil 4.100.** 30A5 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=6017$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı ..... 167
- Şekil 4.100.** 30A5 kodlu numunenin ( $IG\dot{I}=6017$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)..... 168
- Şekil 4.101.** EB mikro yapısının kaynak akımı ile değişimi (Optik görüntüleri) a) 5,5 kA, b) 6,5 kA, c) 7,5 kA, d) 8,5 kA, e) 9,5 kA (Büyütmeler x50) (%30 deformasyonlu B grubu) ..... 169
- Şekil 4.102.** EB mikro yapısının kaynak zamanı ile değişimi (Optik görüntüleri): a) 50 ms, b) 100 ms, c) 150 ms, d) 200 ms, e) 250 ms (Büyütmeler x50) (%30 deformasyonlu B grubu) ..... 170
- Şekil 4.103.** EB mikro yapısının elektrot kuvveti ile değişimi (Optik görüntüleri) a) 1 kN, b) 1,25 kN, c) 1,5 kN, d) 1,75 kN, e) 2 kN (Büyütmeler x50) (%30 deformasyonlu B grubu)..... 171

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.104.</b> Çekirdek çapının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu).....                           | 172 |
| <b>Şekil 4.105.</b> Çekirdek çapının ısı girdisi ile değişimi (%30 deformasyonlu B grubu) .                                                                                              | 173 |
| <b>Şekil 4.106.</b> Çökme miktarının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu).....                           | 174 |
| <b>Şekil 4.107.</b> Kaynak bölgesi mikro sertlik değerlerinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu) ..... | 175 |
| <b>Şekil 4.108.</b> %30 deformasyonlu B grubu kaynaklı numunelerin çekme eğrileri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti .....                                           | 177 |
| <b>Şekil 4.109.</b> Çekme-kayma kuvvetinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu) .....                     | 178 |
| <b>Şekil 4.110.</b> Çekme-kayma kuvvetinin çekirdek çapı ile değişimi (%30 deformasyonlu B grubu) .....                                                                                  | 179 |
| <b>Şekil 4.111.</b> Çekme-kayma testi uygulanmış kaynaklı numuneler a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu).....                              | 181 |
| <b>Şekil 4.112.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30A1 numunesi).....                                                                                                                  | 182 |
| <b>Şekil 4.113.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30A2 numunesi).....                                                                                                                  | 183 |
| <b>Şekil 4.114.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30A3 numunesi).....                                                                                                                  | 184 |
| <b>Şekil 4.115.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30K3A4Z2 numunesi).....                                                                                                              | 185 |
| <b>Şekil 4.116.</b> SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30A5 numunesi).....                                                                                                                  | 186 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Çizelge 2.1.</b> Alaşım elementlerinin etkisi (Chen ve ark. 2013).....                                                                                         | 7     |
| <b>Çizelge 3.1.</b> Çalışmada kullanılan TWIP çeliğinin kimyasal kompozisyonu (%Ağ.)....                                                                          | 30    |
| <b>Çizelge 4.1.</b> Farklı deformasyon oranlarına sahip TWIP çeliğinin çekme değerleri.....                                                                       | 56    |
| <b>Çizelge 4.2.</b> Deformasyonsuz A grubu numunelerin Taguchi tablosu, çekme-kayma kuvvetleri, standart sapma değerleri ve hesaplanan S/N oranları .....         | 62    |
| <b>Çizelge 4.3.</b> Kaynak parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri (Deformasyonsuz A Grubu) .....                                                         | 62    |
| <b>Çizelge 4.4.</b> Kaynak parametrelerinin ortalamalara etki seviyeleri (Deformasyonsuz A Grubu) .....                                                           | 63    |
| <b>Çizelge 4.5.</b> Kaynak parametrelerinin optimum değerleri için yapılan tahminler (Deformasyonsuz A Grubu).....                                                | 64    |
| <b>Çizelge 4.6.</b> Deformasyonsuz A grubu numuneler için oluşturulan ANOVA tablosu...                                                                            | 64    |
| <b>Çizelge 4.7.</b> Deformasyonsuz B grubu deney numuneleri için belirlenen kaynak parametreleri .....                                                            | 65    |
| <b>Çizelge 4.8.</b> Çekme-kayma test sonuçları (Deformasyonsuz B grubu) .....                                                                                     | 90    |
| <b>Çizelge 4.9.</b> %15 deformasyonlu A grubu numunelerin Taguchi tablosu, çekme-kayma kuvvetleri ve hesaplanan S/N oranları .....                                | 101   |
| <b>Çizelge 4.10.</b> Kaynak parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri (%15 deformasyonlu A grubu) .....                                                     | 102   |
| <b>Çizelge 4.11.</b> Kaynak parametrelerinin ortalamalara etki seviyeleri (%15 deformasyonlu A grubu) .....                                                       | 102   |
| <b>Çizelge 4.12.</b> Kaynak parametrelerinin optimum değerleri için yapılan tahminler (%15 deformasyonlu A grubu) .....                                           | 103   |
| <b>Çizelge 4.13.</b> %15 deformasyonlu A grubu numuneler için oluşturulan ANOVA tablosu .....                                                                     | 103   |
| <b>Çizelge 4.14.</b> %15 deformasyonlu B grubu deney numuneleri için belirlenen kaynak parametreleri .....                                                        | 104   |
| <b>Çizelge 4.15.</b> Çekme-kayma test sonuçları (BÇ: Buton çekirdek; KBÇ/KA: Kısmi buton çekirdek/Kısmi ara yüzey; A: Ara yüzey) (%15 deformasyonlu B grubu)..... | 132   |



|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Çizelge 4.16.</b> %30 deformasyonlu A grubu numunelerin Taguchi tablosu, çekme-kayma kuvvetleri ve hesaplanan S/N oranları .....                               | 145 |
| <b>Çizelge 4.17.</b> Kaynak parametrelerinin S/N oranlarına etki (%30 deformasyonlu A grubu) .....                                                                | 145 |
| <b>Çizelge 4.18.</b> Kaynak parametrelerinin ortalamalara etki seviyeleri (%30 deformasyonlu A grubu) .....                                                       | 146 |
| <b>Çizelge 4.19.</b> Kaynak parametrelerinin optimum değerleri için yapılan tahminler (%30 deformasyonlu A grubu) .....                                           | 147 |
| <b>Çizelge 4.20.</b> %30 deformasyonlu A grubu numuneler için oluşturulan ANOVA tablosu .....                                                                     | 147 |
| <b>Çizelge 4.21.</b> %30 Deformasyonlu B grubu deney numuneleri için belirlenen kaynak parametreleri .....                                                        | 148 |
| <b>Çizelge 4.22.</b> Çekme-kayma test sonuçları (BÇ: Buton çekirdek, KBÇ/KA: Kısmi buton çekirdek/Kısmi ara yüzey, A: Ara yüzey) (%30 deformasyonlu B grubu)..... | 176 |

## 1. GİRİŞ

Araçların yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmada, araçların hafifletilmesi çalışmaları öne çıkan araştırma alanları arasında yer almaktadır. Taşıt üzerindeki parçaların daha hafif malzemelerden üretilmesi, taşıtın boyutunun küçültülmesi, parçaların optimizasyon teknikleri ile yeniden tasarlanıp yeni üretim teknikleri ile üretilmesi gibi farklı metotlar kullanılarak hafifletme sağlanabilmektedir. Diğer taraftan, otomotiv sektöründeki en önemli konulardan biri olan araç güvenliğinin artırılması çalışmaları, yüksek mukavemetli sacların kullanımını teşvik etmektedir. Olmazsa olmaz diğer faktörler de (maliyet, üretim yöntemlerine uygunluk gibi) kolay şekillendirilebilir, üretim yöntemlerine uygun ve daha ucuz sac kullanımını bir zorunluluk haline dönmüştür. Otomobillerde kullanılan metalik malzemelerin önemli bir kısmını çelik saclar oluşturmaktadır. Bu sebeple, çelik saclarla ilgili yapılacak en küçük bir iyileştirmenin bile, yukarıda bahsi geçen özellikler üzerindeki etkisinin büyük olacağı açıktır.

Günümüzde geniş bir dayanım aralığında pek çok sac kalitesini bulmak mümkündür. Rekabet şartları, müşteri talepleri ve uluslararası regülasyonlar sebebiyle yüksek mukavemetli çeliklerin otomotiv sektöründeki kullanımı giderek artmaktadır. Ancak, genel bir kural olarak, sac dayanımının artması ile sacın şekillendirilebilirlik kabiliyeti önemli ölçüde azalmaktadır. Otomotiv sanayinde kullanılan saclar için de geçerli olan bu kural, ultra geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler grubunda yer bulunan TWIP (TWinning Induced Plasticity) çelikleri ile ortadan kaldırılabilir. TWIP çeliği otomotiv sektörü için gelecek vaat eden, üzerinde yeterince bilgi birikimi ve veri tabanı oluşturulmamış bir çelik grubu olarak dikkat çekmektedir.

TWIP sacları yüksek dayanımı ile yük taşıma, enerji sönmeme, maliyet azaltma ve hafifletme alanlarında ön plana çıkarken; aynı zamanda yüksek şekillendirilebilirlik kabiliyeti ile karmaşık geometrili parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır. TWIP çelikleri genel olarak %17–24 Mangan, %0,5–0,7 Karbon, %1,8–3,5 Alüminyum ve %1,8–4 oranında Silisyum içerirler. Böylece, nispeten yumuşak (şekillendirilebilir) ostenit fazı TWIP saclarında oda sıcaklığında da stabil olabilmektedir. Bu çelikler, istif hata enerjisinin etkisiyle baskın deformasyon modu olarak ikizlenme gösterirler.

Deformasyon esnasında oluşan bu ikizler, tane sınırları gibi etki göstererek dislokasyonlara engel teşkil eder ve yüksek pekleşme üssü, yüksek dayanım ve süneklik sergileyen bir deformasyon davranışı meydana getirirler. Deformasyon miktarı arttıkça ikiz sınırı miktarı ve beraberinde dayanım da artar.

Bilindiği gibi malzemelerin şekillendirilebilirlik özelliklerinin yanı sıra birleştirme yöntemlerine de uygun olması, söz konusu malzemenin pratik anlamda kullanılabilirliği açısından vazgeçilmez bir unsurdur. Sacların plastik şekillendirilmesi sonrasında ürüne dönüşüm aşamasındaki üretim yöntemlerinin başında “kaynak” gelir. Otomotiv sektörü dikkate alındığında ise her araçta 3000-6000 arasında bulunan elektrik direnç nokta kaynağı önem açısından kaynak yöntemleri arasında ilk sırada bulunmaktadır. Otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılan IF (Interstitial-Free steel (Arayer Atomu İçermeyen çelik)), HSLA (High Strength Low Alloy steel (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli çelik)) ve DP (Dual Phase steel (Çift Fazlı çelik)) gibi sacların elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi üzerine bugüne kadar birçok detaylı çalışma yapılmış ve bu sacların nokta kaynağı ile ilgili hemen hemen tüm hususlar aydınlığa kavuşturulmuştur. Ancak, nokta kaynağının yeni nesil TWIP çeliklerine uygulanması ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bu sebeple, TWIP saclarının otomotiv sanayisine adaptasyon sürecini hızlandırmak için bu sacların nokta kaynağı ile ilgili temel hususları aydınlığa kavuşturacak çalışmaların yapılması gerekir.

Günümüzde kullanılan tüm kaynak yöntemlerinde, uygulanan kaynak yöntemine bağlı olarak, kaynak bölgesi ve çevresinde istenmeyen mekanik özellik değişimleri meydana gelmektedir. Kaynak kalitesinin istenen seviyede olabilmesi, ancak, uygun kaynak parametrelerinin seçimiyle mümkün olmaktadır. Farklı oranlarda deformasyona uğratılmış halde kullanılacak olan TWIP çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesinde optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi TWIP çeliğinin yukarıda bahsedilen özelliklerinden yararlanılabilmesi ve geleceği açısından son derece önemlidir.

Bu tez çalışması genel olarak TWIP çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi üzerine kurulmuştur. İncelencek kaynak parametreleri olarak, elektrik direnç nokta kaynağında en etkili parametreler olan kaynak akımı, kaynak süresi ve

elektrot kuvveti seçilmiştir. Tez kapsamında, öncelikle, deformasyon oranına bağlı olarak TWIP saclarında elektrik direnç nokta kaynağı parametreleri Taguchi yöntemiyle optimize edilmiştir. Sonrasında, tekil kaynak parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Çalışmada, kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde, çekme testleri ve mikro sertlik ölçümleri kullanılmıştır. Ayrıca, kaynaklı numunelerin çekme testleri sonucundaki kırılma yüzeyleri de Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM - Scanning Electron Microscopy)) incelenmiştir. Kaynak bölgesi mikroyapı karakterizasyonun da ise optik mikroskop, SEM, EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) ve EBSD (Electron Backscatter Diffraction) teknikleri kullanılmıştır.



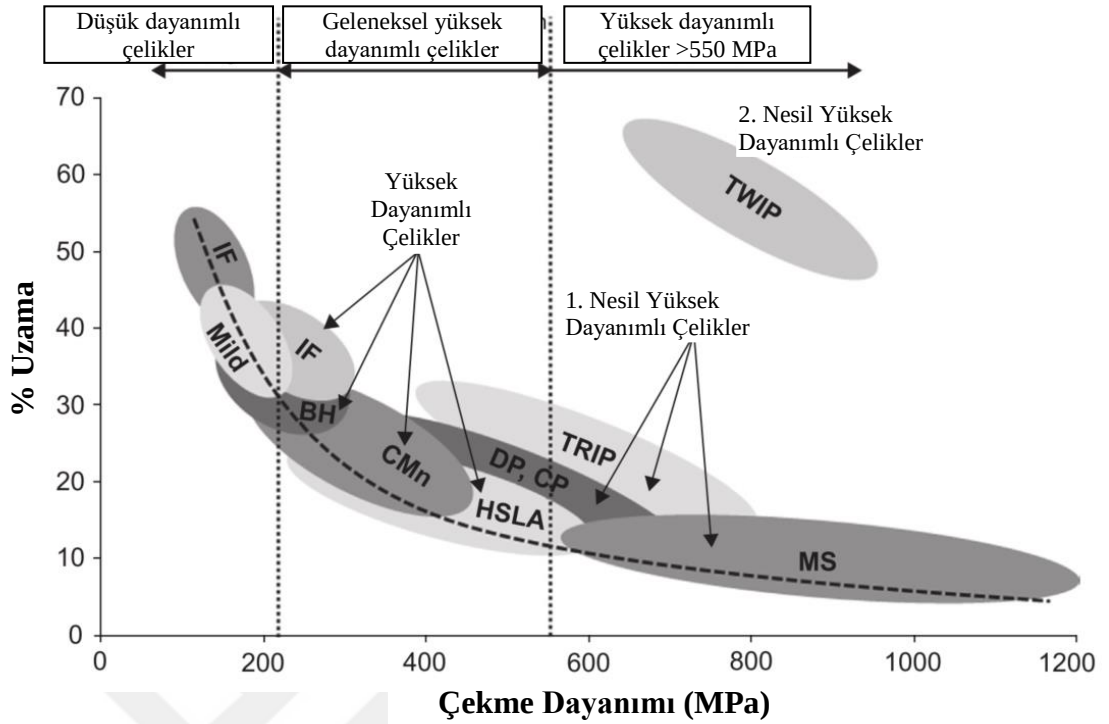
## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, tez kapsamında araştırılan konuyla ilişkili olarak literatürde yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Öncelikle TWIP çeliğinin genel özellikleri yapılmış çalışmalarla desteklenerek açıklanmış, ardından TWIP çeliğinin kaynağı ile yapılmış ve literatürde ulaşılabilen tüm çalışmalar özetlenmiş ve son kısımda bu tezin katkısı ve önemi vurgulanmıştır.

### 2.1. TWIP Çelikleri

Günümüzde üzerinde çalışılan TWIP çeliklerinin temeli, 1888 yılında Sir Robert Hadfield keşfettiği yüksek manganlı ostenitik çeliğe dayanmaktadır (Hadfield 1888). Fe-Mn alaşımlarıyla ilgili, 1972 yılında Schuman, 1977 yılında Remy ve Pineau ve 1993 yılında Kim ve ark. tarafından yapılan çalışmalar çok dikkat çekememiştir. Ancak, Grässel ve ark. (1997, 2000) ve Frommeyer ve ark. (2003) yaptıkları çalışmalarla yüksek manganlı TWIP çelikleri üzerine dikkat çekmeyi başarmışlardır. Şu anda ise, sunduğu dayanım ile sünekliğin mükemmel kombinasyonu sayesinde TWIP çelikleri, otomotiv endüstrisi için gelecek vadeden malzemelerden birisi haline gelmiştir (Bouaziz ve ark. 2011, Chen ve ark. 2013, Cornette ve ark. 2005).

Hem araçların hafifletilmesi ile yakıt sarfiyatının ve sera gazı salınımının azaltılması hem de daha güvenli araçların üretilebilmesi, otomotiv malzemelerindeki yeniliklere sıkı bir şekilde bağlıdır. Bu amaçlar doğrultusunda, malzemenin hem yüksek dayanımlı olması hem de sünekliğinin fazla olması gerekmektedir. Yüksek dayanım, araçların hafifletilmesi konusunda önem arz ederken, yüksek süneklik karmaşık parçaların üretilmesine imkân tanımaktadır. Dayanım ve sünekliğin ortak sonucu olarak da deformasyon esnasında absorbe edilen enerjinin (tokluk) artışıyla da araç güvenliği artmaktadır. Otomotiv sanayinde kullanılan bazı çeliklerin çekme dayanımı – kopma uzaması ilişkisi Şekil 2.1’de verilmiştir.



**Şekil 2.1.** Otomotiv sanayinde kullanılan bazı çelik gruplarının çekme dayanımı – kopma uzaması arasındaki ilişki (Hilditch ve ark. 2015)

Genel olarak malzemelerin süneklik ve dayanım değerleri ters orantılı davranış gösterir. Süneklik artışı sağlayan işlemler dayanımın düşüşü yönünde etki gösterir. TWIP çeliği ise bu iki özelliği mükemmel bir şekilde birleştirmektedir. TWIP çeliklerinin şekillendirilebilirliği derin çekilebilir çelikler kadar iyi dayanımı ise iki kat fazladır. Benzer şekilde, dayanımı sertleştirilmiş çelikler kadar iyiye şekillendirilebilirliği onlardan on kat daha iyidir. Dayanım olarak DP ve TRIP çeliklerini benzer değerlere sahip olsa da süneklik açısından bu çeliklerden çok üstündür (Cornette ve ark. 2005, Hilditch ve ark. 2015, Hongning 2011).

TWIP çeliklerinin en önemli özelliği deformasyon modudur. TWIP çelikleri klasik dislokasyon kaymasının yanında tane içindeki ikizlenmeyle deformasyona uğrar. Tane sınırları gibi, oluşan ikiz sınırlarının da dislokasyonlara engel oluşturmasıyla yüksek pekleşme özelliği gösterir. Diğer bir ifadeyle yüksek pekleşme üssü ( $n$ ) değerlerine sahiptir (Hongning 2011).

Bugüne kadar, 3 temel tip yüksek manganlı TWIP alaşımı (Fe-Mn-C, Fe-Mn-C-Al ve Fe-Mn-Si-Al) üzerine oldukça geniş araştırmalar yapılmıştır. Bunların içinde, Al ilavesinin

çeliğin yoğunluğunu düşürmesinden dolayı (Al miktarına bağlı olarak 6,8-7,3 g/cm<sup>3</sup>), Fe-Mn-C-Al ve Fe-Mn-Si-Al alaşımları otomotiv endüstrisi için yüksek önem arz etmektedir (Chen ve ark. 2013).

## 2.2. İstif Hata Enerjisi ve Deformasyon Modu

İstif hata enerjisi (Stacking Fault Energy – SFE) dayanım-süneklik ilişkisini, deformasyon modunu, mikro yapıyı ve faz dönüşümlerini etkileyen sıcaklık ve kompozisyona bağlı çok önemli bir fiziksel özelliktir.

Dislokasyon kayması, ikizlenme ve martenzitik faz dönüşümü yüksek manganlı çeliklerin sergileyebileceği üç farklı deformasyon modudur. Çeliğin mükemmel mekanik özelliklere sahip olması, deformasyonu esnasında bu mekanizmaların bir arada ve/veya birbirini engelleyici bir şekilde meydana gelmesinin sonucudur. TWIP çeliklerindeki baskın deformasyon modu ikizlenmedir (Chen ve ark. 2013, Hongning 2011).

TWIP etkisinin gözlenmesi için gerekli olan istif hata enerjisi üzerine farklı görüşler vardır. Allain ve ark. (2004), SFE'nin 18 mJ/m<sup>2</sup>'nin altındaki değerlerinde martenzitik dönüşümün gözlemlendiğini, 12-35 mJ/m<sup>2</sup> arasındaki değerlerinde ikizlenmenin gerçekleştiğini rapor etmişlerdir (Neu 2013). Frommeyer ve ark. (2003), 25 mJ/m<sup>2</sup>'nin üzerinde stabil ostenit fazında ikizlenmenin, 16 mJ/m<sup>2</sup>'nin altında martenzitik faz dönüşümünün olduğunu bildirmişlerdir. Jin ve Lee (2009), 25 mJ/m<sup>2</sup>'lik SFE değerinin ikizlenme için gerekli olduğunu bildirmişlerdir. De Cooman ve ark. (2011) ise, üzerinde oldukça fazla çalışma olan 18Mn-0,6C1,5Al TWIP çeliğinin SFE değerini 30±10 mJ/m<sup>2</sup> olarak ölçmüşlerdir. Chen ve ark. (2013)' yaptıkları derlemede TWIP özelliği gösteren tamamen ostenitik mikro yapının 20-30 mJ/m<sup>2</sup> arasındaki SFE değerlerinde olması gerektiğini bildirmişlerdir.

SFE değerleri söz konusu aralığın üzerinde ise baskın deformasyon modu dislokasyon kayması olur. TWIP çeliklerinde de deformasyonun başlarında (yaklaşık %5'e kadar, SFE, tane büyüklüğü ve sıcaklıkla değişebilir) yine dislokasyon kaymaları etkindir. Sonrasında, ikiz yoğunluğu belirli bir doygunluğa ulaştıktan sonra (ortalama serbest dislokasyon yolunun azalmasıyla), artan deformasyon oranlarında dislokasyon/ikiz etkileşimi ile yüksek süneklik değerleri elde edilir (Hongning 2011, Mcgrath 2012, Neu 2013). Ayrıca, TWIP çeliklerinin çekme testlerinde, dinamik şekil değiştirme yaşanması

ve bölgesel olarak Portevin-LeChatelier deformasyon bantlarının oluşmasından kaynaklı tırtıklı gerilme-şekil değiştirme eğrilerine sıkça rastlanır (Kim ve ark. 2009).

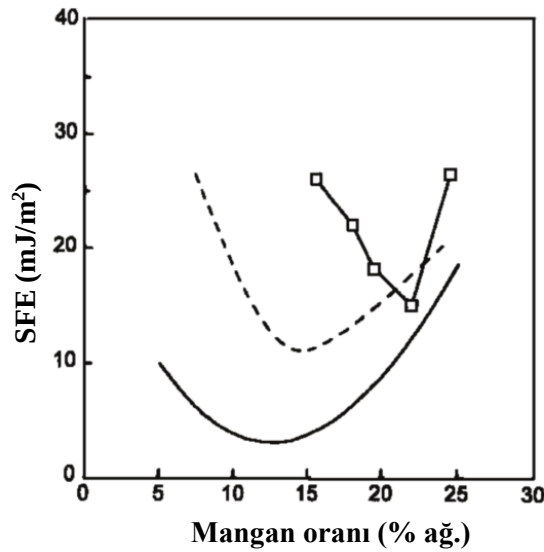
### 2.3. Alaşım Elementleri

Yüksek Manganlı çelikler tek fazlı ostenitik ya da büyük oranda ostenit içeren çok fazlı yapıda olabilirler. Çizelge 2.1’de önemli alaşım elementlerinin etkileri gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Alaşım elementlerinin etkisi (Chen ve ark. 2013)

| Etki                           | C | Mn | Si | B | Ti | N | Al |
|--------------------------------|---|----|----|---|----|---|----|
| $\gamma$ stabilleştirme        | √ | √  |    |   |    | √ | √  |
| Katı eriyik mukavemetlendirme  | √ |    | √  |   |    | √ | √  |
| $\epsilon$ -martenzit inceltme |   |    | √  |   |    |   | √  |
| Sıcak süneklik artırma         |   |    |    | √ | √  |   |    |

En önemli alaşım elementi olarak ve tamamıyla ostenitik mikro yapının elde edilmesi için Mn kullanılır. Genel olarak Mn ilavesi sünekliği artırırken mukavemeti düşürür. Mangan’ın bir diğer önemli özelliği ise istif hata enerjisini kontrol etmesidir. Mangan oranının Fe-Mn alaşım sistemlerinde SFE’ye etkisi 3 farklı kaynak verilerine göre Şekil 2.2’de verilmiştir. Bu üç deneysel çalışma göstermektedir ki; Mn, SFE’yi belirli bir orana kadar düşürmektedir. Artan Mn oranı TRIP etkisini bastırıp TWIP etkisini teşvik etmektedir (Güven 2012, Atef Saad Hamada 2007, Hongning 2011).



**Şekil 2.2.** Fe-Mn sistemlerinde Mn oranının SFE’ye etkisi (Hamada 2007)



Mn oranının %15'in altında olması  $\alpha'$ -martenzit oluşumunu teşvik ederken, %30-32'nin üzerinde olması gevrek  $\beta$ -Mn fazını oluşturur. Bu yüzden, genellikle %15-30 arasında bulunur. Yine yüksek oranlarda bulunması dönüşüm sıcaklıklarını ciddi derecede düşürür ve ostenit içindeki C çözünürlüğünü artırır (Chen ve ark. 2013, Curtze ve Kuokkala 2010, Mcgrath 2012).

TWIP çelikleri için bir diğer önemli alaşım elementi karbondur. Karbon ilavesi katı eriyik oluşturduğu için mukavemette ve sertlikte artış sağlarken süneklik ve kaynak edilebilirliği düşürür. Alaşım sistemine bağlı olarak TWIP çeliklerinde karbon oranı, %0,05'ten başlayıp %1'e kadar bulunabilir. Ostenit stabilize edicidir ve SFE'yi arttırarak  $\varepsilon$ -martenzit dönüşümünü bastırır. Ostenit fazı içerisinde çözünürlüğü oldukça yüksektir. Fakat  $M_3C$  karbürlerinin oluşumunu teşvik eder (Chen ve ark. 2013, Atef Saad Hamada 2007, Hongning 2011, Peng ve ark. 2014, Xiong ve ark. 2015). Ghasri-Khouzani ve McDermid (2015), Fe-22Mn-0,6C çeliğini dekarbürizasyona uğratarak benzer tane boyutlarında %0, 0,2, 0,4 ve 0,6 C olmak üzere 4 farklı alaşım elde etmişler ve bunların üzerine yaptıkları çalışmalarda, 0,6 karbonlu alaşımın mekanik ikizler gösterdiğini, 0,4 karbonlu alaşımın hem mekanik ikiz hem de  $\varepsilon$ -martenzit dönüşümü gösterdiğini, diğer alaşımların ise sadece  $\varepsilon$ -martenzit dönüşümü gösterdiğini bildirmişlerdir.

Alüminyumun düşük yoğunluğu çeliğin yoğunluğunu düşürme yönünde etki eder. İlave miktarıyla doğru orantılı bir şekilde SFE'yi arttırarak  $\varepsilon$ -martenzit dönüşümünü bastırır. Düşük sıcaklıklardaki tokluğu artırır. Artan Al ilavesi sünek-gevrek geçiş sıcaklığını ortadan kaldırır. Ancak katılaşma esnasında tane sınırlarında oluşturduğu  $Fe_2Al_5$  gibi düşük ergime sıcaklığına (1170 C°) sahip intermetalik fazlar ile döküm yapısını zayıflatan bir etkisi vardır. Bu yüzden Al miktarı düşük seviyelerde tutulmalıdır. Diğer önemli etkileri olarak katı eriyik mukavemetlenmesi sağlaması ve korozyon direncini arttırması sayılabilir. Ayrıca Al içeren TWIP çelikleri dinamik şekil değiştirme yaşlanmasına karşı daha duyarsızdır (Chen ve ark. 2013, De Cooman ve ark. 2012, Güven 2012, Mcgrath 2012, Neu 2013). Dieudonné ve ark. (2014), Fe-Mn-C çeliklerinde Al ve Cu ilavesinin SFE'yi arttırıp tane sınırlarındaki gerilme konsantrasyonunu azaltarak hidrojen gevrekliğini azaltma yönünde etki ettiğini belirtmişlerdir. Benzer bir çalışmada alüminyumun hidrojen gevrekliğini azalttığı tekrar edilmiştir (Do Kyeong Han ve ark.

2014). Ayrıca alüminyum ilavesi şekil değiştirme hızına duyarlılığı ve kesit daralmasını arttırmaktadır (J. E. Jin ve Lee 2012).

Silisyum, katı eriyik mukavemetlenmesi etkisinin yanında  $\varepsilon$ -martenzit plakalarını incelterek kırılma direncini artırır. Alüminyuma zıt bir şekilde YMK faz miktarını azaltır ve  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  dönüşümünü teşvik eder (Chen ve ark. 2013, Atef Saad Hamada 2007). Li ve ark. (2015), 25Mn-3Al ile 25Mn-3Si-3Al çeliklerini karşılaştırdıkları çalışmada, Silisyum ilavesi ile akma ve çekme mukavemetlerinin ve sertliğin arttığını bildirmişlerdir.

Bunların dışında TWIP çeliklerinde Cr, N, Ti, Nb gibi elementler de bulunabilmektedir. Bu elementlerin arasında Cr korozyon direncini ve SFE'yi artırır.

Literatürde nadir toprak elementlerinin de etkisi incelenmiş ve TWIP çeliklerinde akma ve çekme mukavemetlerini ile kopma uzamasını arttırdığı bildirilmiştir (Zhao ve ark. 2014).

Mikro alaşım elementlerinin (Nb, V ve Ti) TWIP çeliğinin yüksek sıcaklıkta (900-1100 C°) deformasyon davranışına etkisini inceleyen Reyes-Calderón ve ark. (2013), alaşımlamanın taneleri küçülttüğünü ve maksimum gerilme değerini bir miktar arttırdığını bildirmişlerdir.

## **2.4. Mekanik Özellikleri**

TWIP çeliklerinin mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar; alaşımlandırmanın yanında tane boyutunun, deformasyon sıcaklığının ve deformasyon hızının etkisi gibi alanlarda da yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu başlık altında, TWIP çeliğinin mekanik özelliklerini etkileyen temel etmenler özetlenmiştir.

### **2.4.1. Tane yapısının etkisi**

Malzemenin kimyasal yapısını değiştirmeden mekanik özellikleri etkileyen en temel parametrenin tane boyutu olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, tane boyutunun mekanik özelliklere etkileri üzerine yapılan çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Ueji ve ark. (2008), çalışmalarında 1,8, 7,2 ve 49,6  $\mu\text{m}$ 'lik ortalama tane boyutunun ikizlenme davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. 1,8  $\mu\text{m}$ 'lik ortalama tane boyutunun en yüksek mukavemeti ve nispeten iyi bir süneklik gösterdiğini belirtmişlerdir. Süneklik

düşüşünün çok fazla olmamasını, ikizlenmenin yanında, düşük SFE değerinden dolayı dinamik toparlanmanın bastırılmasına bağlamışlardır.

Yoo ve ark. (2009), Fe-28Mn-9Al-0,8C çeliğinde 5, 8 ve 38  $\mu\text{m}$ 'lik ortalama tane büyüklüğü ile yaptıkları çalışmada, küçük tane boyutunun pekleşme üssünü değiştirmedigini, ancak, mukavemeti arttırıp sünekliği düşürdüğünü bildirmişleridir. Büyük tane boyutunun ise pekleşme üssünü arttırdığını vurgulamışlardır.

Dini ve ark. (2010), Fe-31Mn-3Al-3Si çeliğinde 2,1 ile 72,6  $\mu\text{m}$  arasında değişen ortalama tane boyutunun çekme deformasyon davranışı üzerine etkisini araştırdıkları çalışmada deformasyon davranışının Hall-Petch bağıntısı ile açıklanabildiğini belirtmişlerdir. Hollomon analizinde  $\ln \sigma - \ln \epsilon$  grafiğinin lineer olmadığını, bunun yerine Crussard-Jaoul analizinin kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca, TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu - Transmission Electron Microscope) incelemelerinde mekanik ikizlerin oluşabilmesi için dislokasyon yığılmalarının gerekli olduğunu ve taneler büyüdükçe gerekli olan kritik şekil değiştirme değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Çekme esnasında, mekanik ikizlerin şekil değişimi ile arttığını ve bunun da dinamik Hall-Petch etkisi ile anlık pekleşme üssünü arttırdığını ve dolayısıyla boyun vermenin geciktirilerek uniform şekil değişiminin iyileştiğini bildirmişlerdir.

Gutierrez-Urrutia ve Raabe (2012), Fe-22Mn-0,6C çeliğinde iki farklı ortalama tane büyüklüğünün (3 ve 50  $\mu\text{m}$ ) mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmış ve deformasyonun başlarında gelişen dislokasyon yapısının ikizler için çekirdek oluşturduğunu, sonuç olarak da tane boyutunun pekleşme üzerine büyük etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

Yuan ve ark. (2014), Fe-25Mn-3Cr-3Al-0,3C-0,01N çeliğinde 2,2 ile 28,7  $\mu\text{m}$  arasındaki tane boyutlarının mekanik özelliklere etkilerini araştırdığı çalışmada, tane boyutu artışının akma ve çekme mukavemetlerini azalttığını ve kopma uzamasını arttırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca, tane boyutu büyüdükçe ikiz oluşumunun kolaylaştığını bildirmişlerdir.

Zan ve ark. (2015), Fe-22Mn-0,6C TWIP çeliğinde, 4 ile 45  $\mu\text{m}$  arasında değişen tane boyutlarının hidrojen gevrekliğine etkisini incelediği çalışmada, tane boyutu artışının

hidrojen gevrekliğine karşı duyarlılığı da arttırdığını bildirmişlerdir. Bunun sebebini, daha düşük deformasyon oranlarında oluşan mekanik ikizlerin yüksek gerilme konsantrasyonu oluşturduğunu, bu bölgelerin de hidrojen segregasyonunu teşvik ettiği şeklinde açıklamışlardır.

Rahman ve ark. (2015), Fe-15Mn-2Al-2Si-0,7C çeliğinin 0,7 ile 84  $\mu\text{m}$  arasında değişen tane boyutlarını incelediği çalışmada, Hall-Petch bağıntısının geçerli olduğunu ve küçük tanelerin pekleşme davranışını iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca tane boyutu küçüldükçe ikiz çekirdeklenmesi için gerekli gerilimin arttığını ve ikiz oluşumunun zorlaştığını belirtmişlerdir.

K. Wang ve ark. (2016) ise Fe-30Mn-3Al-3Si çeliğinde tane morfolojisinin etkisini incelemişler, bu bağlamda eş eksenli, uzamış ve eş eksenli/uzamış karışık tane morfolojilerini karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, eş eksenli tanelerin uzamış tanelere göre daha yüksek mukavemet gösterdiğini, ancak, daha kötü bir plastisiteye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, eş eksen morfolojisinin sabit bir pekleşme üsteli olduğunu, diğer morfolojilerin ise deformasyonla artan pekleşme üsteli olduğunu bildirmişlerdir.

#### **2.4.2. Deformasyon sıcaklığının ve hızının etkisi**

TWIP çelikleri için baskın deformasyon modu mekanik ikizlenmedir. Bu deformasyon modu temel olarak, TWIP çeliklerinin sahip olduğu nispeten düşük SFE değerleriyle direkt bağlantılıdır. SFE değerini etkileyen faktörlerin alaşım elementleri ve sıcaklık olduğu göz önüne alındığında sıcaklığın, deformasyon modu üzerinden mekanik özellikleri etkileyeceği açıktır. Deformasyon sıcaklığının etkisine benzer şekilde, deformasyon hızına bağlı olarak dayanım, uzama ve deformasyon mekanizmaları değişim gösterir. Bu konulardaki çalışmalar çoğunlukla SFE değerindeki değişiminin etkileri üzerine yapılmıştır.

Allain ve ark. (2004), Fe-22Mn- 0,6C alaşımının -196 C°, 20 C° ve 400 C° sıcaklıklarda yaptıkları deneyler ve bu sıcaklıklar için yaptıkları SFE hesaplamaları ile SFE değerinin 18  $\text{mJ/mol}^{-1}$ 'den düşük olduğu zaman  $\epsilon$ -martenzit dönüşümünün gözlemlendiğini, 12 ile 35  $\text{mJ/m}^2$  değerleri arasında ise mekanik ikizlerin yer aldığını bildirmişlerdir. Bu SFE değerleriyle ilintili olarak, 400 C° sıcaklığında düşük pekleşme üssünün %32 uzamada

boyun vermeye yol açtığını, deformasyonun sadece dislokasyon kaymalarıyla meydana gelip ikizlenme ya da  $\epsilon$ -martenzit dönüşümünün gözlenmediğini belirtmişlerdir. Oda sıcaklığında mekanik ikizlenme ve dislokasyon kaymalarıyla oluşan dinamik Hall-Petch etkisi ile yüksek pekleşme üssü elde edildiğini, bunun da, uzamayı büyük oranda arttırdığını bildirmişlerdir.  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığında ise dislokasyon kaymalarını ve  $\epsilon$ -martenzit plakaları tespit etmişlerdir.  $\epsilon$ -martenzit dönüşümünün yüksek pekleşme üssü sağladığını ancak düşük uzama getirdiği açıklamasında bulunmuşlardır.

Wang ve ark. 2009 yılında yayınladıkları çalışmada, Allain ve ark. (2004)'ın yaklaşımıyla Fe-25Mn-3Al-3Si alaşımını 25, 100, 200 ve  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarında test etmişler ve SFE hesaplamaları yapmışlardır.  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda ve  $21\text{ mJ/m}^2 \leq \text{SFE} \leq 34\text{ mJ/m}^2$  arasındaki SFE değerlerinde baskın deformasyon modunun mekanik ikizlenme olduğunu.  $\text{SFE} \geq 76\text{ mJ/m}^2$  ve  $T \geq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda dislokasyon kaymalarının baskın hale geldiğini bildirmişlerdir. Genel olarak, sıcaklığın SFE değerini arttırdığını ve deformasyon mekanizmasını etkilediğini vurgulamışlardır. Düşük sıcaklıklarda mekanik ikizlerin etkisiyle yüksek pekleşme üssü, mukavemet ve uzama değerleri elde etmişlerdir (Chen ve ark. 2013).

Yoo ve ark. (2009), Fe-28Mn-9Al-0,8C alaşımı ile yaptıkları çalışmada, -istisnai bir durum olarak-  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki sonuçlara göre mukavemet değerinin düşmesine rağmen uzama değerinin değişmediğini ve tırtıklı akma gözlendiğini raporlamışlardır. Bunun dışındaki ( $150$  ve  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklıklarda ise mukavemet ve uzama değerleri düşmüştür. Bu karakteristik davranışı,  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de dislokasyonlarla ara yer atomlarının (bu çalışmada C atomları) etkileşiminin yer alan atomlarıyla etkileşiminden daha fazla olduğuna bağlamışlardır.

Qin ve ark. 2011 yılında yayınladıkları çalışmada, Fe-23Mn-2Al-0,2C alaşımı kullanarak geniş bir sıcaklık aralığında ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) SFE hesaplamaları ve mikroyapı incelemeleri yapmışlardır. Çekme testlerinde, mukavemet ve uzamanın sıcaklıkla beraber önce düştüğünü ardından artarak bir tepe değerine ulaştığını sonra tekrar düştüğünü tespit etmişlerdir. Bu tepe değeri yine  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de meydana gelmiştir. Sıcaklığın artışıyla SFE değerinin de arttığını, dolayısıyla, deformasyon modunun ikizlenmeden dislokasyon kaymalarına doğru kaydığını bildirmişlerdir (Chen ve ark. 2013).

Jung ve De Cooman (2013), Fe-18Mn-0,6C çeliğine %1,5 ve %2,5 Al ilavesinin sıcaklığa bağlı çekme özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak; akma mukavemetinin sıcaklıkla düştüğünü, Al ilavesinin katı eriyik mukavemetlenmesi sağladığını ve SFE'yi arttırdığı için pekleşmeyi kötüleştirdiğini, yüksek sıcaklıkların ikizlenmeyi bastırarak pekleşmeyi kötüleştirdiğini belirtmişlerdir.

Liu ve ark. (2015), Fe-22Mn-0,6C alaşımı için dislokasyon ve ikizlenme teorilerini temel alarak geliştirdikleri model ile farklı sıcaklıklardaki pekleşme davranışları üzerine teorik ve deneysel olarak yaptıkları çalışmada, hacimsel ikizlenme oranının sıcaklıkla beraber düştüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca, oda sıcaklığı ile 400 C° aralığında kopma uzamasının ve pekleşme üssünün azaldığını belirtmişlerdir.

Shterner ve ark. (2016), Fe-18Mn-0,6C-1Al alaşımının oda sıcaklığı ile 400 C° arasında pekleşme davranışının nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Sıcaklık yükseldikçe çekme testindeki mekanik özelliklerin kademeli olarak kötüleştiğini bildirmişlerdir. Oda sıcaklığında pekleşmenin dört farklı kademedan (dinamik toparlanma, dislokasyon ayrışması, istif hatası oluşumu, mekanik ikizlenme ve dinamik şekil değişimi yaşanması) oluştuğunu, mekanik ikizlenmenin pekleşme davranışına sınırlı oranda etkisi olduğunu ve sıcaklık arttıkça bu etkinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Wu ve ark. 2012 yılında yayınladıkları çalışmada, Fe-18,1Mn-3,15Si-3,12Al-0,03C alaşımı üzerinde deformasyon hızının etkisini  $1,67 \times 10^{-4} - 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  aralığında araştırmışlardır. Sonuçlar, düşük deformasyon hızlarında ( $1,67 \times 10^{-4} - 1,67 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) artan deformasyon hızıyla beraber mukavemetin ve uzamanın azaldığını, yüksek deformasyon hızlarında ( $1,67 \times 10^{-1} - 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) ise mukavemet ve uzamanın arttığını göstermiştir (Chen ve ark. 2013).

Xu ve ark. (2013), Fe-23,70Mn-0,001C-2,74Al-2,30Si alaşımını  $0,001-400 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızlarında test etmişlerdir. Çekme mukavemetinin, sanki-statik ve düşük deformasyon hızlarında düştüğünü,  $0,01 \text{ s}^{-1}$ 'den daha yüksek hızlarda ise artış gösterdiğini ve bu artışın  $100 \text{ s}^{-1}$ 'den yüksek değerlerde önemli derecede fazla olduğunu belirtmişlerdir. Akma mukavemetinin ise,  $0,01 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar sabit kalıp,  $100 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar artış gösterdiğini,  $200 \text{ s}^{-1}$ 'den daha yüksek değerlerde ciddi bir düşüş gösterdiğini bildirmişlerdir. Düşük deformasyon hızlarında deformasyon hızı duyarlılığının negatif,

yüksek hızlarda ise pozitif olduğunu vurgulamışlardır. Uniform ve kopma uzamalarının  $1 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar düşüş gösterdiği,  $1 \text{ s}^{-1}$ 'den  $100 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar arttığını bildirmişlerdir. Daha yüksek hızlarda uniform uzama azalma göstermiş, kopma uzaması ise  $100 \text{ s}^{-1}$ 'den  $200 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar düşerken daha yüksek hızlarda artış göstermiştir.

Qin ve ark. 2012 yılında yayınladıkları çalışmada, Fe-23Mn-2Al-0,2C alaışımının  $2,97 \times 10^{-4} - 1,49 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  aralığında testlerini yapmış ve akma mukavemetinin deformasyon hızından etkilenmediğini, çekme mukavemetinin bir miktar düşüş gösterdiğini, uzama değerlerinin ise büyük oranda düştüğünü bildirmişlerdir (Chen ve ark. 2013).

Rahman ve ark. (2014), Fe-15Mn-2Al-2Si-0,7C alaşımı üzerinde  $10^{-3}$  ile  $1934 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızlarında yaptıkları çalışmada, akma mukavemetinin  $950 \text{ s}^{-1}$ 'de kadar artış gösterdiğini, daha yüksek deformasyon hızlarında ise fazla bir değişim olmadığını ve kopma uzamasının deformasyon hızından çok etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Yang ve ark. (2014), Fe-22Mn-0,6C ve Fe-22Mn-0,6C-1,5Al çelikleri ile  $10^{-4}$  ile  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  arasındaki deformasyon hızlarında yaptıkları deneylerde, her iki çelikte de artan deformasyon hızının hem çekme mukavemetini hem de üniform uzama bölgesini düşürdüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca, Al ilavesinin deformasyon hızı duyarlılığını iyileştirdiğini vurgulamışlardır.

Bintu ve ark. (2015), Fe-18Mn-0,6C-0,22Si-1,5Al alaşımı ile  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızlarının deformasyon davranışına etkisini incelemişlerdir. İkizlenme hızının deformasyon hızına büyük oranda bağlı olduğunu ve daha küçük deformasyon hızlarında ikiz yoğunluğunun arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca, deformasyon hızı duyarlılığının küçük deformasyon oranlarında pozitif olduğunu ve deformasyon hızı arttıkça negatif değerler aldığını, ancak bu durumun (pekleşme üssünün büyük olmasından dolayı) kararsızlık meydana getirmediğini belirtmişlerdir.

Liang ve ark. (2015), Fe-18Mn-0,6C-1,5Al-0,8Si alaşımı ile  $5,7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  ve  $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  deformasyon oranlarında yaptıkları çalışmada, deformasyon hızının artışıyla dislokasyonların ve mekanik ikizlenmenin bastırıldığını, akma mukavemetinin arttığını ve çekme mukavemetinin düştüğünü bildirmişlerdir.

### 2.4.3. Yorulma davranışı

Tekrarlı yükleme şartlarında malzemenin absorbe edebileceği enerji miktarının azalması yorulma davranışının önemini vurgulamak için yeterlidir. Mikroyapı ile yakından ilişkili olan yorulma davranışı çeşitli yöntemlerle (ön deformasyon oluşturulması, tane inceltme gibi) iyileştirilmeye çalışılmaktadır. TWIP çeliklerinin yorulma davranışı konusunda literatürde bulunan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Niendorf ve ark. (2009), Fe-22,36Mn-0,52C TWIP alaşımının ön deformasyona bağlı düşük çevrimli yorulma performansını araştırmışlardır. Bu çalışmada; %10 ve %20 ön deformasyon oranı,  $6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızı, tam değişken yükleme ve  $2,3 \times 10^{-3}$ 'ten  $8 \times 10^{-3}$ 'e kadar gerinim genliği kullanılmıştır. Ön deformasyonsuz numunede çevrimli yükleme ile ikizlerin büyüdüğünü ve dislokasyonların azaldığını, ancak yeni ikizlerin oluşmadığını bildirmişlerdir. Ön deformasyonlu numunede ise yeni ikiz oluşumlarının gözlemlendiğini, bunun da ikiz/dislokasyon etkileşimi ile yorulma ömrünü arttırdığını belirtmişlerdir.

A.S. Hamada ve Karjalainen (2010), Fe-22Mn-0,6C TWIP çeliğini yüksek çevrimli yorulma davranışını, ortalama gerilmeyi sıfır alarak eğmeli yorulma testleriyle incelemişlerdir. Uyguladıkları deformasyon/ısıtma işlem sonucu tane boyutunu  $32 \mu\text{m}$ 'den  $1,8 \mu\text{m}$ 'ye düşürmüşler ve tane boyutunun da etkisi incelemişlerdir. Tane inceltme ile kopma uzamasının %96'dan %62'ye azaldığını, akma ve çekme mukavemetlerinin ise sırasıyla 316 MPa'dan 500 MPa'ya ve 866 MPa'dan 1110 MPa'ya arttığını bildirmişlerdir.  $4 \times 10^6$  çevrimdeki yorulma mukavemetinin tane inceltme ile 400 MPa'dan 560 MPa'ya yükseldiğini, yorulma/çekme mukavemeti oranının ise 0,46'dan 0,50'ye yükseldiğini belirtmişlerdir. Her iki tane boyutunda da kayma bantlarının yoğunlaşması ile yorulma hasarının gerçekleştiğini, ne martenzitik dönüşümün ne de mekanik ikizlerin oluşmadığını vurgulamışlardır.

Guo ve ark. (2013), Fe-22Mn-0,6C TWIP çeliği ile, 0,002 ile 0,01 gerinim genliği aralığında ve  $6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  sabit deformasyon hızında düşük çevrimli çekme-basma yorulma testleri yapmışlardır. Tavlanmış alaşımın tüm gerinim genliklerinde yorulma ömrünün ilk %10'unda hızlı bir pekleşme gösterdiğini bildirmişlerdir. Çevrimsel gerilme değerlerinin gerinim genliğine bağlı olduğunu ve düşük gerinim genliklerinde (0,002) başlangıçta



çevrimsel pekleşmenin gözleendiğini, ardından, kırılmaya kadar uzun bir süre doyunluk sergilediğini tespit etmişlerdir. Orta derecedeki gerinim genliklerinde (0,002-0,006) başlangıçtaki pekleşmenin ardından yumuşama ve kırılmaya kadar doyunluk gözlemişlerdir. Yüksek gerinim genliklerinde (0,008 ve üzeri) ise, çok hızlı bir pekleşmenin ardından uzun bir süre yumuşama ve belirgin olmayan bir doyunluk tespit etmişlerdir. Çevrimli yüklemelerde kayma bantlarının oluştuğunu ve artan gerinim genliklerinde kayma bantlarının yoğunluğunun arttığını belirtmişlerdir. Düşük gerinim genliklerinde ikiz oluşumun gözlenmediğini ancak, gerinim genliğinin artışı ile artan gerilmelerin ikiz oluşumu için kritik gerilme değerin üzerine çıktığını ve ikiz oluşumunun gerçekleştiğini bildirmişlerdir.

B. Wang ve ark. (2015), Fe-30Mn-0,9C alaşımında ön deformasyonun yüksek çevrimli yorulma ömrüne etkisini incelemişlerdir. Temel malzemenin akma ve çekme mukavemetleri, sırasıyla 350 ve 960 MPa olarak verilmiştir. Ön deformasyon oranının %10, 20, 30, 40, 50 ve 60 olarak belirlendiği çalışmada akma mukavemetlerinin, sırasıyla 550, 650, 740, 800, 860 ve 900 MPa ölçüldüğünü belirtmişlerdir. %60 ön deformasyon ile kırılma çevrim sayısı  $8 \times 10^4$ 'ten  $10^7$ ' ulaşmıştır. Ön deformasyon oranı ile kırılma çevrim sayısı (logaritmik skalada) arasında lineer bir ilişki tespit etmişlerdir. Yorulma mukavemetinde meydana gelen bu artışı ise ön deformasyonun oluşturduğu mekanik ikizlerle ilişkilendirmişlerdir.

X. Wang ve ark. (2015), Fe-18,46Mn-0,87C-0,31Si-0,2Cr çeliğinin ortama gerilmeyi sıfır gerilme genliklerini ise 250, 300, 350 ve 400 MPa olarak yüksek çevrimli çekme-basma yorulma testlerini yapmışlardır. 10 Hz ile yaptıkları deneylerde gerinim genliklerinin sırasıyla 0,14, 0,19, 0,28, 0,64 olduğunu belirtmişlerdir. Alınan gerilme değerlerinin akma mukavemeti altında olmasından dolayı az miktarda ikiz gözlemişler, oluşan ikizlerin lokal gerilme konsantrasyonlarından ve tane sınırlarında dislokasyon yığılmalarından meydana geldiğini vurgulamışlardır. Çekme ve akma mukavemetini sırasıyla 1049 ve 381 MPa olarak verdikleri malzemede  $2 \times 10^6$  çevrime denk gelen yorulma mukavemetini 300 MPa olarak bulmuşlardır. Ayrıca literatür değerlerini kullanarak yaptıkları karşılaştırmada, kullanılan TWIP çeliğinin diğer ostenitik çelik türlerine (304L ve 316) göre yorulma performansının daha kötü olduğunu vurgulamışlardır.

Ma ve ark. (2015) ise Al ilavesinin yorulma çatlağı ilerlemesine etkisini incelemiştir. Fe–22Mn–0Al–0,6C ve Fe–22Mn–3Al–0,6C alaşımlarının değerlendirildiği çalışmada üç nokta eğme numuneleri kullanmışlardır. Al ilavesinin çatlak ilerlemesini olumsuz etkilediğini ve yorulma eşiğini düşürdüğünü bildirmişlerdir.

Roa ve ark. (2015), Fe–17,8Mn–0,72C–1,9Al Mn içeren TWIP çeliği ile yaptıkları,  $1,2 \times 10^6$  çevrimin yorulma sınırı olarak belirlendiği çalışmada gerilme oranını 0,1 ve maksimum gerilmeyi (çekme mukavemetinin yaklaşık %40'ı olarak) 550 MPa olarak almışlardır. Çekme ve akma mukavemetlerinin, sırasıyla, 1500 ve 441 MPa olarak verildiği malzemede  $1,2 \times 10^6$  çevrimdeki yorulma mukavemetinin  $579 \pm 50$  MPa olarak tespit edildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, dislokasyon yoğunluğunun ikiz oluşumu ve büyümesinde etken faktör olduğunu vurgulamışlardır.

Song ve ark. (2016), farklı deformasyon oranlarında (%25, 30 ve 45) haddelenmiş Fe–17Mn–0,8C alaşımında, 0,1 gerilme oranı kullanarak yüksek çevrimli yorulma testleri yapmışlardır.  $2 \times 10^6$  çevrimin yorulma sınırı olarak belirlendiği çalışmada, deformasyon oranının artışıyla beraber yorulma mukavemeti/çekme mukavemeti oranının azaldığını bildirmişlerdir. Isıl işlem uyguladıkları %45 deformasyonlu çelikte en yüksek yorulma mukavemetini elde etmişlerdir. Ayrıca, çatlak başlangıcının tane sınırlarında ya da ikiz sınırlarında oluştuğunu belirtmişlerdir.

Shao ve ark. (2016), farklı Mn oranlarının Fe–xMn–0,6C ( $x = 18, 22, 26, 30$ ) alaşımındaki düşük çevrimli yorulma davranışına etkilerini incelemiştir. Testleri gerinim kontrollü çekme-basma cihazında, toplam gerinim genliğini ( $\Delta\epsilon/2$ ) %0,3 - %4 aralığında ve  $10^{-2} s^{-1}$  deformasyon hızıyla yapmışlardır. Mn artışının çevrimli gerilme doygunluğunu iyileştirdiğini, ancak, yorulma ömrünü azalttığını bildirmişlerdir. Ayrıca Mn oranı arttıkça plastik deformasyon yeteneğinin azaldığını ve çatlak ilerleyişinin zayıfladığını belirtmişlerdir. Gerinim genliğinin ise yorulma ömrünü azalttığını, başlangıçtaki pekleşmeye ise etki etmediğini belirtmişlerdir.

#### **2.4.4. Gecikmeli kırılma**

TWIP çeliğiyle ilgili raporlanan bir diğer davranış da deformasyona uğratılmış malzemenin belirli bir bekleme süresi sonrasında kırılmalar göstermesidir. Genel olarak; deformasyonun oluşturduğu kalıntı gerilmeler ve hidrojen gevrekliğinden oluşan

gecikmeli kırılma ile ilgili literatürdeki çalışmalar, tespitler ve çözüm önerileri aşağıda özetlenmiştir.

Chin ve ark. (2011), Fe-22Mn-0,6C ile Fe-18Mn-0,6C-1,2Al alaşımlarının “cup forming” testlerini yapmış ve kırılma mekanizmalarını incelemişlerdir. İstif hata enerjileri 20 ve 30 mJ/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmış ve deneyler sonrasında her iki malzemede de martenzitik dönüşüm gözlenmeyip tamamen ostenitik içyapı teyit edilmiştir. Al ilaveli çelikte çoğu tanede ikiz gözlenirken, Al ilavesiz çelikte bazı tanelerde ancak daha yoğun ikiz oluşumu tespit edilmiştir. Deformasyon sonrasında 7 gün havada bekletilen numunelerden Al ilavesiz olanda yan yüzeyde yatay kırılma gözlenirken Al ilaveli çelikte kırılma gözlenmemiştir. Bu durum, Al ilavesiz çelikteki yoğun ama homojen dağılım göstermeyen ikiz oluşumu ile üç eksenli gerilme oluşumunun gerilme konsantrasyonunu arttırması şeklinde açıklanmıştır.

Chun ve ark. (2012), gecikmeli kırılmaya yol açan hidrojen gevrekliğini azaltmak için Al ilavesini önermişler ve Fe-16Mn-0,6C-xAl (x=0, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, ve 3,5) çeliğini %50 deformasyona uğrattıktan sonra %3 NaCl ve %0,3 NH<sub>4</sub>SCN sulu çözeltisinde 72 saatten 144 saate kadar hidrojen emdirerek düşük deformasyon hızında (0,005 mm/dak) testler yapmışlardır. Yaptıkları SFE hesaplamasında Al artışının (%0’dan %3,5’a kadar) SFEyi 11,9 mJ/m<sup>2</sup>’den 40,9 mJ/m<sup>2</sup>’ye çıkardığını, ancak, kalıntı gerilme ölçümlerinde Al artışının (%0’dan %3,5’a kadar) 458 MPa’dan 213 MPa’ya gerilediğini bildirmişlerdir. Sonuç olarak, Al artışıyla kalıntı gerilmelerin ve hidrojenin yayımlanabileceği bölgelerin azalmasının hidrojen gevrekliği direncini arttırdığını vurgulamışlardır.

Park ve ark. (2012), Fe-18Mn-0,6C-xAl (x=0, 1 ve 2) alaşımında Al ilavesinin hidrojen gevrekliğine etkisini incelemişlerdir. Chin ve ark. (2011)’ın yöntemiyle 48 saat hidrojen şarjı yaptıktan sonra düşük deformasyon hızında çekme testleri (0,1 mm/dak) yapmışlardır. Al ilaveli numunelerde oluşan  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakasının hidrojen emilimini azaltarak kırılma modunun sünekten gevreğe geçişini geciktirdiğini ve hidrojen şarjı sonrasında çekme mukavemeti ve uzama değerleri açısından daha üstün olmasını sağladığını bildirmişlerdir. Benzer sonuçlar, Fe-18Mn-0,6C ve Fe-18Mn-0,6C-1,5Al alaşımlarını karşılaştıran D.K. Han ve ark. (2015) tarafından da elde edilmiştir.

Ronevich ve ark. (2012), Fe-18Mn-0,6C alaşımında hidrojen gevrekliğini araştırmak için As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilave edilmiş H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektrolit kullanarak 6 saate kadar katodik şarj yapmışlar, ancak yaptıkları testler sonucunda hidrojen gevrekliği tespit edememişler ve daha uzun şarj sürelerinde deneme yapılmasını önermişlerdir.

Hong ve ark. (2013), Fe-22Mn-0,6C, Fe-18Mn-0,6C ve Fe-18Mn-0,6C-2Al alaşımlarında “cup forming” testleri yaparak taneler arası M<sub>3</sub>C çökeltilerinin gecikmeli kırılmaya etkisini araştırmışlardır. Deformasyon sonrasında açık havada bekletilmiş, Fe-22Mn-0,6C ve Fe-18Mn-0,6C alaşımlarının, sırasıyla, 7 gün ve 1 yıl sonra kırıldığını, Fe-18Mn-0,6C-2Al alaşımının ise kırılma göstermediğini bildirmişlerdir. Ayrıca, deformasyon sonrasında gecikmeli kırılmayı hızlandırmak için numuneleri kaynar su içerisinde beklettiklerinde ise, sırasıyla, 5,5 saat, 15 saat ve 169 saat sonunda kırılma gözlemlemişlerdir. Kırılma yüzeyini incelediklerinde Al ilavesiz alaşımlarda taneler arası kırılmaya sebep olan nano boyutta M<sub>3</sub>C çökeltiler tespit etmişler, Al ilavesiyle bu çökeltilerin bastırıldığını bildirmişlerdir.

Dieudonné ve ark. (2014), Fe-18Mn-0,6C alaşımına %1,7 bakır ilavesinin, %1,5 Al ilavesinin (iki farklı fosfor oranı ile %0,037 ve %0,005 P) korozyon kinetiği açısından hidrojen gevrekliğine etkisini araştırmışlar. Bakır ilavesinin korozyon hızını etkilemediğini, ancak, oksit tabakası oluşumu ile hidrojen emilimini azalttığını bildirmişlerdir. Düşük fosfor oranı ile Al ilavesinin ise pasifleşme ile korozyonu yavaşlatıp hidrojen emilimini azaltırken, yüksek fosfor oranının korozyon hızıyla beraber hidrojen emilimini arttırdığını ve hidrojen gevrekliğini teşvik ettiğini belirtmişlerdir.

Kwon ve ark. (2015), Fe-17Mn-0,8C alaşımında %0, 1 ve 2 bakır ilavesinin hidrojen gevrekliğine etkisini araştırmışlardır. SFE değerlerini, sırasıyla, 21,0, 23,6 ve 24,2 mJ/m<sup>2</sup> olarak hesaplamışlardır. Hidrojen şarjı sonrasında düşük deformasyon hızında ( $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) ekme deneyleri yapmışlar ve bakır ilavesinin SFE’yi arttırmasından dolayı pekleşme davranışını kötüleştirdiğini, hidrojen gevrekliği mekanizmasını değiştirmediğini, ancak, yavaşlattığını bildirmişlerdir.

Zan ve ark. (2015), Fe-22Mn-0,6C TWIP alaşımında 4m ile 45 m arasında değişen tane boyutunun hidrojen gevrekliği üzerine etkisini düşük deformasyon hızında ( $2,5 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$ ) yaptıkları çekme testleriyle incelemişlerdir. Hidrojen şarjının elektrokimyasal

olarak 24 saat ile 166 saat arasında değişen sürelerde yapıldığı çalışmada, tüm numunelerde mukavemet ve uzama değerlerinin düşmesine rağmen tane inceltmenin hidrojen gevrekliğini önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir. Büyük tane boyutunun daha erken ikiz oluşumu meydana getirmesinden ve tane sınırı alanı başına düşen hidrojen konsantrasyonunu arttırmasından dolayı hidrojen gevrekliğini tetiklediğini vurgulamışlardır.

## 2.5. TWIP Çeliğinin Kaynağı

Bu bölümde; kronolojik sıra takip edilerek TWIP çeliğinin kaynağı üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Mujica ve ark. (2010), kendi ürettikleri Fe-22Mn-0,6C TWIP çeliğini ve ticari TRIP çeliğini lazer kaynağı kullanarak alın kaynağı ile birleştirmiş ve birleştirilen numunelerin mikroyapı karakterizasyonunu, mekanik testlerini, XRD ile faz analizi ve kalıntı gerilme analizlerini yapmıştır. TWIP çeliğindeki yüksek Mn ve C içeriğinin kaynak bölgesinde segregasyon meydana getirdiğini bildirmişlerdir. Yine TWIP çeliğinde, üretimden kaynaklı iri tanelerin olmasından dolayı ısı etkisi altında kalan bölge gözlememişlerdir. Ancak yaptıkları kalıntı gerilme analizinde, her iki tarafta da 4 mm genişliğinde ısı etkisi altında kalan bölge olduğunu rapor etmişlerdir. TRIP çeliğinin ısı etkisi altında kalan bölgesinde ise en yüksek sertliği elde etmiş ve bunun söz konusu bölgedeki martenzitik dönüşümün sonu olduğunu belirtmişlerdir. Kaynak bölgesinde de martenzitik dönüşümlerin gözlendiğini vurgulamışlardır. Çekme testlerinde kırılmaların TRIP temel malzeme tarafından ya da kaynak bölgesinden gerçekleştiğini, bunun sebebi olarak da bu bölgelerdeki martenzitik içyapıların olduğunu not etmişlerdir.

Mújica ve ark. (2012), TWIP çeliklerinin kaynağı isimli çalışmasında, kaynak bölgesindeki Mn buharlaşması, seyrelme ve segregasyon konularına odaklanmıştır. Mangan'ın temel ostenit yapıcı element olmasından ve istif hata enerjisine olan etkisinden dolayı Mn oranındaki değişimin önemine vurgu yapılmış ve Mn oranının %25'ten %20'ye gerilemesinin istif hata enerjisinde 5-10 mJ/m<sup>2</sup>'lik bir düşüşe sebep olacağı ve bunun da ikizlenme etkisini değiştireceği belirtilmiştir. TWIP çeliğinin benzer olmayan çeliklerle (TRIP gibi) kaynağında ya da ek metal kullanılan yöntemlerde ise alaşım elementleri farkının doğuracağı difüzyon ile seyrelmenin meydana gelebileceği,

bunun da martenzitik dönüşümü tetikleyerek kırılmaların sorumlusu olabileceği vurgulanmıştır. TWIP çeliklerindeki ostenitik katılaşmada mikrosegregasyonun meydana geldiği ve –Karbon’ un Mangan’ a olan afinitesinin Demir’den fazla olmasından dolayı Karbon-Mangan’ca zengin bölgelerin oluştuğu, bunların da yine, bazı bölgelerde martenzitik dönüşümü tetiklediği vurgulanmıştır. Ayrıca, galvanize çeliklerde Çinko buharlaşmasından kaynaklı boşlukların kaynak hatası olarak gözlenebileceği belirtilmiştir.

Saha ve ark. (2012), Fe-18Mn-0,6C-1,5Al çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilebilirliğini araştırmış ve mikro yapı analizleri yapmışlardır. Ayaklı orta frekans doğru akım nokta kaynak makinesi kullanmış, denemelerinde ISO 18278-2 standardına göre sabit elektrot kuvveti (4,5 kN) ve sabit kaynak zamanı ile kaynak akımı değişiminin etkisini incelemişlerdir. Alaşım elementlerinin fazla olmasından dolayı, diğer AHSS türlerine göre sıçratma (expulsion) olayının daha önce gerçekleştiğini not etmişlerdir. Çalışmalarında, çapraz çekme testi ve mikro sertlik ölçümleri ile mekanik özellikleri tespit etmeye çalışmışlardır. Düşük karbon oranından ve iri taneli yapısından dolayı, kaynak bölgesi sertliğinin temel malzemeden düşük olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, kısmen ergiyen bölgedeki çatlamların, porozitenin ve çekme boşluklarının en çok rastlanan kaynak hataları olduğunu belirtmişlerdir.

Yu ve ark. (2012), 1 GPa seviyesinde çekme mukavemetine sahip TWIP ve DP çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesini, çekme-kayma testi, mikro sertlik ölçümü ve mikroyapı analizleri ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Zengin alaşım elementleri sonucu meydana gelen ergiyik sıçramasından dolayı uygun kaynak parametreleri aralığının TWIP çelikleri için daha dar olduğunu belirttikleri çalışmada, DP çeliğinin kaynak bölgesindeki martenzitik dönüşüm sonucu yüksek sertlik değerlerinin elde edildiğini, buna karşın TWIP çeliğinin farklı kaynak bölgelerinde sertlik değerlerinin yaklaşık aynı kaldığını belirtmişlerdir. Eşit kaynak bölgesi genişliği elde edildiği durumda DP çeliğinin yaklaşık 1,6 kat daha fazla yük taşıyabildiğini ortaya koymuşlardır. Kaynak akımını, gerilimini ve kaynak esnasındaki dinamik direnci ölçerek yaptıkları ısı girdisi hesabıyla, TWIP çeliğinin çok daha düşük ısı girdilerinde ergiyik sıçratması meydana getirdiğini bulmuşlardır.

Matteis ve ark. (2013), 1,4 mm kalınlığındaki Fe-18,3Mn-0,65C-1,5Al sacının kaynaklı, kaynaklı ve ön deformasyonlu kaynaklı durumlarında yorulma davranışını inceledikleri çalışmada, gerilme oranını sıfır, yorulma mukavemetini  $10^6$  çevrim için almışlardır. Lazer ve elektrik direnç nokta kaynağı kullandıkları çalışmada, lazer kaynağını 2,2'den 2,7'ye kadar ilerleme hızı ve 2,4'ten 2,8 kW'a kadar kaynak gücüyle, elektrik direnç nokta kaynağını ise, 3mm radyüslü elektrotla, 3,5 kN elektrot kuvveti. 7 kA kaynak akımı ve 260 ms kaynak süresiyle yapmışlardır. Kopma uzaması, akma ve çekme mukavemetlerini sırasıyla %47, 465 MPa ve 960 MPa olarak ölçmüşlerdir. Temel malzemenin, lazer kaynaklı ve elektrik direnç nokta kaynaklı numunelerin yorulma mukavemetlerini sırasıyla 410 MPa, 400 MPa ve 210 MPa olarak bulmuşlardır. Ön deformasyon sonrasında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunede ise bu değer 150 MPa olarak verilmiştir. Kaynak sonrasında da TWIP çeliğinin tek fazlı olmasından dolayı yorulma mukavemetinin çentik etkisi ile değiştiğini, elektrik direnç nokta kaynağında elde edilen düşük yorulma mukavemeti değerlerinin ise oluşan çekme boşluklarının çentik etkisinin büyük olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Holovenko ve ark. (2013), Fe-18Mn-0,6C içeren TWIP ve geleneksel DP çeliklerinin ayrı ayrı kaynaklarını karşılaştırmıştır. Hem elektrik direnç nokta kaynağının, hem de lazer kaynağının kullanıldığı çalışmada; metalografik inceleme, çekme ve yorulma testleri yapılmıştır. DP çeliğinin elektrik direnç kaynağında, kaynak bölgesinin temel malzemeden yaklaşık 150 HV yüksek olduğu makro hata içermeyen birleştirmenin elde edildiği bildirilmiştir. TWIP çeliğinin elektrik direnç kaynağında ise mikro ve makro seviyede çekme boşluklarının ve porozitenin bulunduğu ve sertlik dağılımında (<40 HV) neredeyse değişiklik olmadığı rapor edilmiştir. Her iki çeliğinde yaklaşık 1 GPa çekme mukavemetinin bulunmasına karşın, akma mukavemetleri farkından dolayı yorulma testlerinde DP çeliği daha yüksek yorulma mukavemeti göstermiştir. Bir milyon çevrimdeki yorulma mukavemetleri DP ve TWIP çeliği için sırasıyla 570 MPa ve 410 MPa olarak verilmiştir. Elektrik direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde ise bu değer yine bir milyon çevrimde DP ve TWIP çeliği için sırasıyla 190 MPa ve 210 MPa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, lazer kaynağı ile birleştirilmiş TWIP çeliğinin yorulma mukavemetinde (kaynaklı haline göre) belirgin bir düşüş gözlenmemiştir.

Spena ve ark. (2013), %22,4 Mn ve %0,51C içeren TWIP çeliğini geleneksel DP çeliği ve Mn-B sıcak şekillendirme çeliği ile MAG yöntemi ve 307L ek metali kullanarak alın altına birleştirmiş metalografik ve mekanik testlerle elde edilen birleştirmeleri incelemişlerdir. Yapılan mikro sertlik taramalarında en yüksek sertlik farkının DP ve Mn-B çeliklerinin ısı etkisi altında kalan bölgesinde bulunduğunu, Mn-B çeliğinin temel malzeme sertliğinin ve bahsedilen sertlik farkının daha yüksek değerler gösterdiğini bildirmişlerdir. TWIP çeliği tarafında ise sertlik değişiminin çok daha küçük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Çekme deneylerinde Mn-B ile birleştirmelerde daha yüksek çekme mukavemetleri elde edilmiştir. TWIP/DP birleştirmelerinde kırılmalar kaynak bölgesi ve DP çeliğinin ısı etkisi altındaki bölgeden gerçekleşirken TWIP tarafından hiç kırılma meydana gelmemiştir. TWIP/Mn-B birleştirmelerinde ise hem kaynak bölgesinde hem de her iki çeliğin ısı etkisi altında kalan bölgelerinde kırılmalar gözlenmiştir.

Saha ve ark. (2013), 2012’de kullandıkları çelikle yaptıkları bir diğer çalışmada elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kırılma karakteristiklerini incelemişlerdir. Yine ISO standardına uygun olarak akım parametresini değiştirerek çekme-kayma ve çapraz çekme testleri yapmışlardır. Çapraz çekme testlerinde hasarın, sırasıyla, her iki sacda da gerilim yığılması, çentik ucunda çatlak oluşumu, çatlağın kaynak sınırı boyunca ilerlemesi ve sac kalınlığı boyunca sünek kayma kırılması şeklinde gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Çekme-kayma testlerinde ise, kaynak bölgesi genişliğinden bağımsız olarak, daima sünek ara yüzey modunda kırılma olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca yaptıkları ileri metalografik incelemelerde, kaynak bölgesinde herhangi bir faz dönüşümüne rastlanmayıp tamamen ostenitik bir içyapı olduğunu ve dendritler arası C ve Mn kosegreasyonunun gözlemlendiğini vurgulamışlardır.

Saha ve Park (2013), diğer çalışmalarıyla ilişkili olarak sundukları bildiride, kaynak parametrelerinin optimizasyonunu yapmışlardır. ISO standardı yerine çift puls kullanarak kaynak bölgesi genişliğini %15 arttırdıklarını, kaynak akımı tipinin (alternatif akım AC, orta frekans doğru akım MFDC) ve puls sayısının kırılma bölgesini değiştirmediğini bildirmişlerdir. Çapraz çekme testi kullandıkları çalışmada sundukları sonuçlar diğer çalışmalarıyla benzerlik göstermektedir.



Saha ve ark. (2014), önceki çalışmalarının devamında ısı etkisi altındaki bölgede tane sınırlarındaki ergimenin oluşturduğu çatlakları incelemiş ve bu çatlakların kısmen ergiyen bölgeden başlayıp ısı etkisi altındaki bölge üzerinden temel malzemeye ulaştığını bildirmişlerdir. Ergimiş bu bölgelerin Mn ve C ötektikleri olduğunu ve söz konusu çatlakların ısı girdisinin artması ile artış gösterdiğinin belirtmişlerdir. Isı girdisine bağlı olarak çatlak boyutlarının değiştiğini, 4,5 mm genişliğinde bir minimum kaynak genişliğinden sonra çatlakların gözlenmeye başladığını ve 5 mm üzerindeki kaynak genişliklerinde ise tamamen gelişmiş çatlakların gözlendiğini vurgulamışlardır. Ancak, söz konusu çatlakların ne çekme-kayma kuvvetine ne de çapraz çekme kuvvetine belirgin bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

Yu ve ark. (2014), 2012'deki çalışmalarının devamı niteliğinde yaptıkları çalışmada, kaynak sinyallerini analiz etmişler ve orta frekans doğru akım elektrik direnç nokta kaynağında sabit akım ve sabit güç kullanımının etkilerini incelemişlerdir. Sabit güç kontrolünde sabit akım kontrolüne göre kaynak edilebilir parametre aralığının daha geniş olduğu belirtilmiştir. Sabit güç kontrolünde kaynak başlangıcındaki aşırı ısı girdisinin sınırlı kalmasının ergimiş metal sıçramasını azalttığı tespit edilmiştir.

Ma ve ark. (2014), Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP çeliğinin temel malzeme olarak kullanıldığı çalışmada, lazer ve gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) kullanmışlardır. Lazer kaynağında neredeyse tespit edilemeyecek kadar küçük bir ısı etkisi altında kalan bölge oluştuğunu, GTAW'da ise –sayısal değer vermeden- çok daha geniş bir ısı etkisi altında kalan bölge tespit ettiklerini bildirmişlerdir. Tersine, lazer kaynağında ergime çizgisinin kolaylıkla görülebildiğini, GTAW da ise belirgin bir ergime çizgisi olmadığını belirtmişlerdir. XRD analizlerinde her iki kaynak yönteminde de herhangi bir faz değişimi gözlememişlerdir. Yaptıkları EDS incelemelerinde, lazer kaynağında Mangan buharlaşmasından dolayı Mn oranının %24,26'dan % 17,18'e düştüğünü, GTAW'da ise bu oranda herhangi ciddi bir değişim olmadığını not etmişlerdir. TWIP kaynağı konusundaki diğer çalışmaların aksine en yüksek sertliğin kaynak bölgesinde, en düşük sertliğin de temel malzemede olduğunu bildirmişlerdir. Çekme testlerinde, sırasıyla temel malzeme, lazer kaynağı ve GTAW için 606, 560 ve 430 MPa çekme mukavemeti; yine aynı sırayla %95, %67 ve %48 uzama ölçmüşlerdir. Kırılmaların lazer kaynağında her

zaman temel malzemede ve sünek karakterde olduğunu, GTAW’da ise kaynak bölgesinde ve yarı klevaj karakterde olduğunu bildirmişlerdir.

Spena ve ark. (2015), 2013’teki çalışmalarıyla aynı temel malzemeyi kullanarak yaptıkları bir diğer çalışmada elektrik direnç kaynağındaki parametrelerin (elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı) etkilerini incelemişlerdir. Taguchi yöntemi ve L9 ortogonal dizini kullanarak tasarladıkları çekme-kayma deneylerinde, en etkin parametrenin kaynak akımı olduğunu ve bunu sırasıyla elektrot kuvveti ve kaynak zamanının takip ettiği sonucuna varmışlardır. Mikro yapıda herhangi bir dönüşüm gözlemediklerini bildirmişler ve tüm numunelerde en yüksek sertliğin kaynak bölgesinde olduğunu bunun sebebinin de Mn buharlaşması olduğunu belirtmişlerdir. Kaynak akımının artışıyla çekme-kayma kuvvetinin aynı zamanda da ergimiş metal sıçramasının kaynak mukavemetini azalttığını not etmişlerdir. Temel kırılma modunu ara yüzey kırılması olarak tespit etmişler tanımladıkları kaynak nokta boyutu ile çekme-kayma kuvvetinin lineerliğini vurgulamışlardır. Ergimiş metal sıçramasının ve çökmenin buton tipi kırılmayı tetiklediğini bildirmişlerdir.

Wang ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada, Fe-18.8Mn-0,6C çeliğini lazer kaynağıyla birleştirmiş ve XRD, SEM ve TEM ile kaynak bölgesini detaylı olarak incelemişlerdir. Temel malzemenin çekme mukavemetini ve kopma uzamasını sırasıyla 1200 MPa ve %55 olarak ölçmüş, kaynak bölgesinde ise bu değerlerin 1000 MPa’a ve ve %24,8’e gerilediğini bildirmişlerdir. Kaynak bölgesinin mikro sertliğinin temel malzemeden 40-60 HV düşük ve 230-250 HV arasında olduğunu raporlamışlardır. V şeklinde sertlik dağılımı gösteren kaynaklı numunelerde sertlik düşüşünün temel malzemeden ısı etkisi altındaki bölgeye geçişte başladığını (HAZ) ve söz konusu sertlik düşüşünün kaynak bölgesinde oluşan %100 ostenitik kaba dendritlerden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Ayrıca, kaynak bölgesinde yaptıkları ileri analizlerde ötektik (Fe, Mn)<sub>3</sub>C fazlarına ve dendritler arasında bazı inkluzyonlara rastlamışlardır. Farklı birim şekil değiştirmelerde yaptıkları mikro yapı çalışmalarıyla, düşük şekil değiştirmelerde baskın deformasyon mekanizmasının dislokasyon kaymaları olduğunu, daha yüksek şekil değiştirmelerde ise mekanik ikizlerin etkin olduğunu bildirmişlerdir.

Razmpoosh ve ark. (2015), elektrik direnç nokta kaynağı ile 1 mm kalınlığındaki Fe-31Mn-3Al-3Si çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağını yapmış, oluşan kaynak mikro yapılarını incelemiş, mikro sertlik ölçümleri yapmış ve kaynak parametrelerine göre çekme-kayma testleri sonucu kopma kuvvetlerini karşılaştırmıştır. Bu çalışmada da, ergimiş metal sıçraması olayının optimum kaynak parametrelerini daha düşük değerlere ötelediği vurgulanmıştır. Elektrot kuvvetinin sabit olduğu belirtilen, ancak değeri verilmeyen çalışmada, 2,5 kA kaynak akımı ve 25 çevrim kaynak süresinde kırılma öncesi bölgesel deformasyon gösteren hatasız birleştirmeler elde edilmiştir. Kaynak sonrası içyapı dendritik ergime bölgesi ve ısı etkisi altında kalan iri taneli bölge olarak ikiye ayrılmış, mikro sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlikler sırasıyla, ergime bölgesi, temel malzeme ve ısı etkisi altında kalan alanda elde edilmiştir. Isı girdisinin artması ile ergimiş metal sıçramasının ve mikro yapıda hata olasılığının (çekme boşlukları ve dendritler arası mikro boşluklar) arttığını dolayısıyla da çekme-kayma kuvvetinin düştüğünü vurgulamışlardır. Ayrıca, tutma süresinin de hata olasılığını bir miktar düşürdüğü belirtilmiştir.

Rossini ve ark. (2015) TWIP, DP, TRIP ve sıcak şekillendirme çeliklerinin lazer kaynağı ile benzer olmayan alın kaynağını araştırmışlardır. Çalışmalarında, çekme testleri, metalografik incelemeler ve mikro sertlik ölçümleri yapmışlardır. TWIP çeliğinin diğer üç farklı çelik gurubuyla birbirine kaynakları gerçekleştirilmiş, ancak, Mn segregasyonundan dolayı çok düşük mekanik özellikler ve uzama değerleri elde edildiği ve ek kaynak metali kullanmadan diğer geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeklerle kaynağı tavsiye edilmemiştir. Kaynaklı TWIP çelikleriyle yapılan birleştirmelerde, kırılmanın kaynak bölgesinde gerçekleştiğinin ve bunun sebebinin dendritler arasındaki Mn segregasyonu olabileceğini vurgulamışlardır.

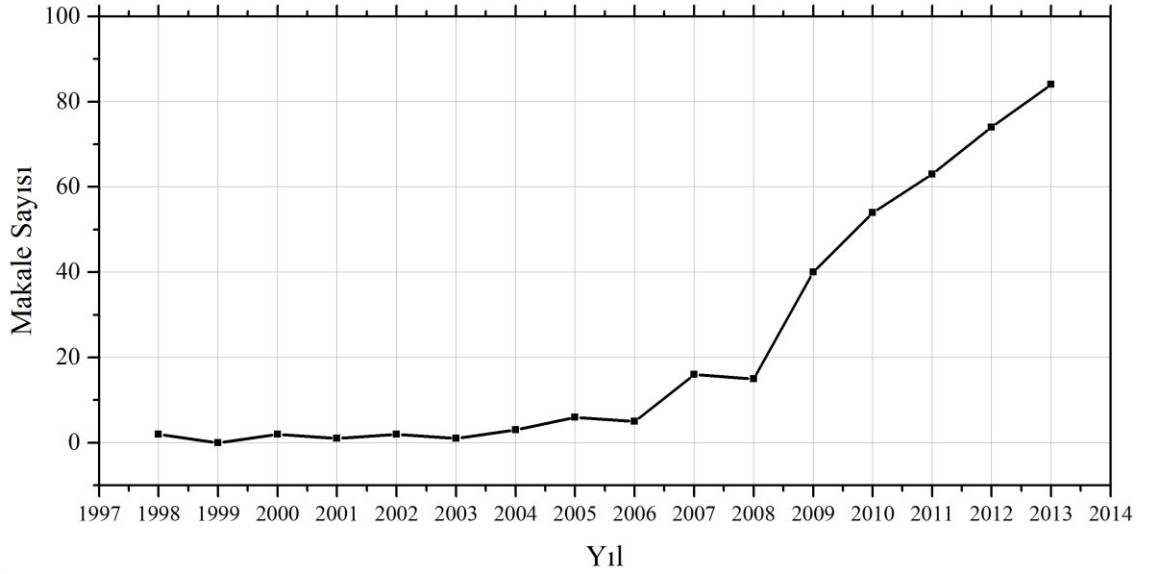
Wei ve ark. (2015), elektrik direnç nokta kaynağı ile 1 GPa civarında çekme mukavemeti olan DP, TRIP ve TWIP çeliklerinin farklı birleşimlerinin üç katlı kaynağını incelemişlerdir. Farklı ısı iletkenlikleri, ergime noktaları ve yüzeydeki elektrik dirençleri nedeniyle TRIP/DP/TWIP, TWIP/TRIP/DP ve TRIP/TWIP/DP birleşimlerinin asimetrik kaynak bölgesi oluşturduğunu bildirmişleridir. Ergimiş metal sıçraması olayının sırasıyla DP/DP/DP (7,2 kA), TRIP/DP/TWIP (6,6kA), TWIP/TRIP/DP (6,4 kA), TRIP/TWIP/DP (6,2 kA), TRIP/ TRIP/TRIP (6,2 kA), TWIP/TRIP/DP (5,8 kA) ve TWIP/TWIP/TWIP

(5,2 kA) birleşimlerinde ve akımlarında meydana geldiğini belirtmişlerdir. En iyi kaynağını TRIP/TWIP/DP birleşiminde elde etmişlerdir. Ayrıca kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin sadece kaynak genişliğine bağlı olmadığını, bunun yanında kaynak bölgesinin kimyasal özelliklerine de bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

Spena ve ark. (2016), TWIP ile Q&P çeliklerinin benzer olmayan elektrik direnç nokta kaynağında kaynak parametrelerinin (elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı) mikro yapıya, çekme-kayma kuvvetine ve kırılma davranışına etkilerini araştırmışlardır. TWIP çeliğinin daha düşük ısı iletkenliğe ve daha düşük ergime sıcaklığına sahip olmasından dolayı asimetrik bir kaynak bölgesi elde edildiğini, kaynak akımının çekme-kayma kuvvetini arttırdığını ve uygun olmayan elektrot kuvvetinin ergimiş metal sıçramasını tetiklediğini bildirmişlerdir. Kaynak akımının artışı ile birlikte kırılma modunun arayüz kırılmasından çekirdek veren buton tipe kaydığını belirtmişlerdir. Kırılmalar TWIP tarafında çekirdeklenmiş, ancak TWIP çeliğinin şekil değiştirme sertleşmesi yeteneğinden dolayı, ayrılma Q&P tarafında gerçekleşmiştir.

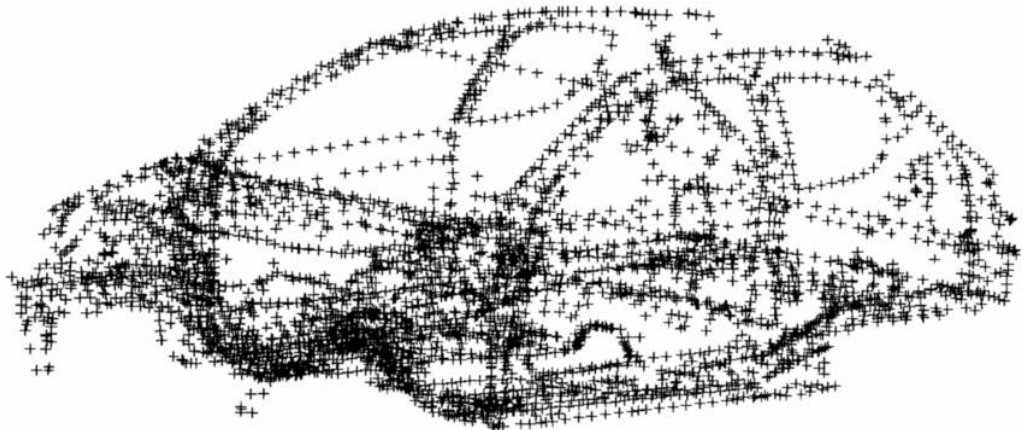
## **2.6. Tezin Amacı, Katkısı ve Yenilikleri**

TWIP çeliklerini, üzerinde yapılan çalışmaları fazlasıyla hak eden sıra dışı özelliklere sahip bir çelik grubu olarak tanımlamak yanlış olmaz. Tez konusunun önemi, Kaynak Araştırması bölümü boyunca açık bir şekilde vurgulanmıştır. Diğer taraftan, tezin belirlendiği 2013 yılı dahil olmak üzere, TWIP çelikleri ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı Şekil 2.3'te verilmiştir (Söz konusu grafik Scopus ile, başlık/özet/anahtar kelimeler bölümlerinin en az birinde "TWIP Steel" kelimelerini içeren, malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında, tüm dünya dillerinde yapılmış dergi makaleleri kısıtlamaları kullanılarak oluşturulmuştur.). 2013 yılına kadar toplamda 368 adet dergi makalesinin yayınlandığı süreçte, konuyla ilgili yapılan çalışmaların gösterdiği artış dikkate değerdir. Bu sayı, 2016 yılı Ekim ayı itibarıyla 632'ye ulaşmıştır. Bu arama kriterlerine "weld" kelimesi eklendiğinde (Diğer parametreler aynı tutulup "TWIP steel" ve "weld" kelimeleri ile aramada) ise 2013 yılına kadar olan çalışmaların sadece 8 tane olduğu görülmektedir. 2016 yılı Ekim ayı itibarıyla ise bu sayı 27'ye yükselmiştir. Bu veriler, tez konusunun akademik olarak da ne kadar değerli ve önemli olduğunu göstermektedir.



**Şekil 2.3.** TWIP çelikleri ile ilgili yayınlanan makalelerinin yıllara göre dağılımı

Bir otomobilin üretiminde, belki de en çok kullanılan üretim yöntemi kaynak yöntemidir. Özellikle elektrik direnç nokta kaynağı, günümüzde otomobil üretimi sürecinde vazgeçilmezdir. Öyle ki, bir otomobilde, 3000 ila 6000 arasında nokta kaynağı bulunmaktadır. Şekil 2.4'te örnek bir otomobilde nokta kaynaklarının bulunduğu yerler görülmektedir (Rossillon 2007, Zhou ve Cai 2014). Bu sebeple, otomotiv sektöründe kullanılan sacların elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilebilirliği, söz konusu sacın üretim süreçlerine dahil olabilmesi için hayati önem arz eder.



**Şekil 2.4.** Örnek bir otomobilde nokta kaynağı yapılan yerler (Rossillon 2007)

Otomotiv sektörünün hafifletme, güvenliğin artırılması gibi amaçlarla talep ettiği özellikleri karşılayabilecek TWIP çeliklerinin de kaynak edilebilirliği ve elektrik direnç nokta kaynağı konusu henüz tam açıklığa kavuşturulmamış yönleri olan bir çalışma konusudur. TWIP çeliğinin kaynağı ile ilgili yapılmış hemen hemen tüm çalışmaların özetlendiği bir önceki başlıktan da görülebileceği üzere, bu tez kapsamı kadar geniş, detaylı ve tüm kaynak parametrelerinin etkilerinin ortaya konulduğu bir literatür hala oluşmamıştır.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışması esnasında kullanılan malzeme, yöntemler ve araçlar tanıtılmıştır.

#### 3.1. Materyal

Başlangıç malzemesi olarak 1,3 mm kalınlığındaki TWIP sacları kullanılmıştır. 1,3 mm kalınlığındaki TWIP sacı deformasyonsuz olarak tanımlanmıştır. Kullanılan çelik sacın kimyasal kompozisyonu da Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Çalışmada kullanılan TWIP çeliğinin kimyasal kompozisyonu (%Ağ.)

| Malzeme | Fe         | C    | Mn   | Si   | Al   | Cr    | Ti  |
|---------|------------|------|------|------|------|-------|-----|
| TWIP    | Geri Kalan | 0,28 | 15,6 | 1,06 | 1,89 | 0,564 | 0,1 |

Ayrıca, başlangıç malzemesi olan 1,3 mm kalınlığındaki TWIP sacları, TÜBİTAK MAM’da bulunan laboratuvar tipi HILLE marka haddeleme tezgahı kullanılarak %15 ( $\sim 1,1 \pm 0,2$  mm kalınlık) ve %30 ( $\sim 0,9 \pm 0,2$  mm kalınlık) oranlarında soğuk deformasyona uğratılmıştır.

#### 3.2. Deney Tasarımı ve Parametre Optimizasyonu

Tez kapsamında, elektrik direnç nokta kaynak prosesindeki en etkin kaynak parametrelerinin (elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı) optimizasyonu ve bu parametrelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkilerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu iki farklı amacı gerçekleştirebilmek için çok sayıda deney gerektirecek olan tam faktöriyel deney tasarımı yerine, en az sayıda deney ile çalışmayı gerçekleştirebilmek için Taguchi yöntemi<sup>1</sup> de içeren bir deney tasarımı ortaya konulmuştur.

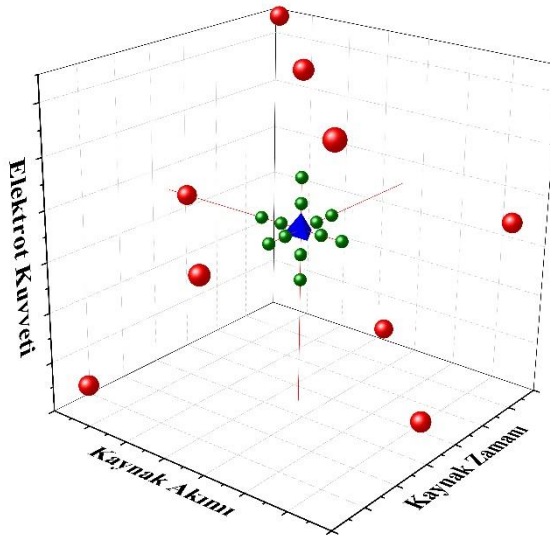
Öncelikle, Taguchi yöntemi ile çekme-kayma kuvvetlerine göre kaynak parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Taguchi yöntemi, optimizasyon için uygun bir araç olmasına karşın, parametrelerin tekil etkilerinin incelenmesine izin vermemektedir.

<sup>1</sup>Taguchi yönteminin detayları, bu tez kapsamında amaç olarak görülmemiş ve verilmeyecek olup, bu konu okuyucuya bırakılmıştır.

Şekil 3.1’de araştırma uzayı ve bu uzay içerisinde incelenen noktalar gösterilmiştir. Bu şekilde, kırmızı/büyük toplar Taguchi yönteminin kullandığı ortogonal dizinlerle (orthogonal arrays) belirlenen noktaları, ortadaki prizma ise optimum olduğu varsayılan noktayı simgelemektedir. Bu noktalar araştırma uzayını optimize etmek için yeterli olmakla beraber, şekilden de görüldüğü üzere tekil parametrelerin değişimi ile ilgili bir çalışmaya uygun olmamaktadır. Diğer bir ifadeyle, bu yöntem iki parametrenin sabit kalıp üçüncü parametrenin değiştirilmesi durumunda mekanik ve metalografik özelliklere olan etkisini görmeye imkan vermez.

Bu sebeple, tekil parametrelerin etkilerini incelemek için, iki parametrenin sabit tutulup üçüncü parametrenin değiştirildiği ve bunun her parametre için uygulandığı bir tasarım yapılmıştır. Şekil 3.1’deki optimum nokta etrafında dağılan yeşil/küçük toplar bu noktaları simgelemektedir.

Bu şekilde hem parametrelerin optimizasyonunu yapan hem de tekil parametrelerin etkilerinin incelenmesine izin veren bir deney tasarımı kullanılmıştır.



**Şekil 3.1.** Araştırma uzayı

Yukarıda detayları verilen deney tasarım yöntemi doğrultusunda, her bir deformasyon oranı için iki adım oluşturulmuştur. Bunlardan birincisi (A grubu) Taguchi yöntemi ile



optimizasyon, ikincisi (B grubu) ise optimum kaynak parametreleri esas alınarak oluşturulmuş deney tasarımıdır.

Taguchi yöntemi ile A grubu numunelerini oluşturmak için 3 parametre 3 seviye içeren L9 ortogonal dizini kullanılmıştır. Parametreler; elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanıdır. Seviyelerin alt ve üst sınırlarını belirlemek içinse ön çalışmalar yapılmıştır. Bu ön çalışmalar kapsamında yapılan kaynaklarda; alt sınırlarda, mekanik koparma (soyma testi) ile çekirdek oluşumunun gözlenmesi, üst sınırlarda ise, maksimum %35'lik çökme ya da sıçramanın (expulsion) yoğunluğu kriter olarak alınmıştır.

### 3.3. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı

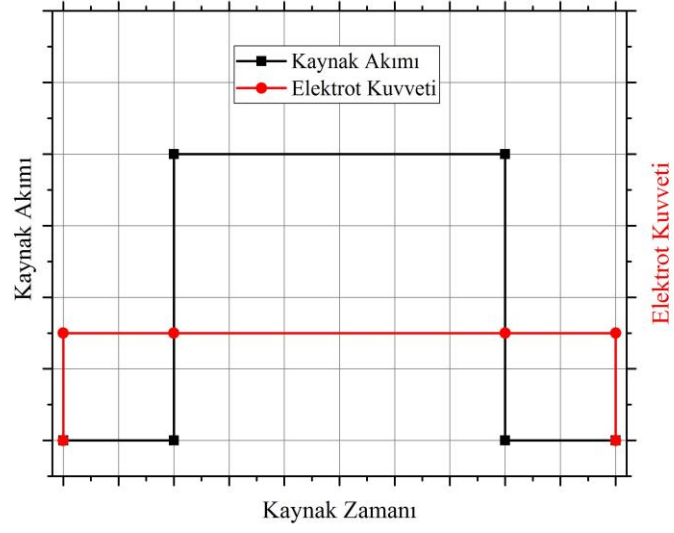
Tüm kaynaklı birleştirme işlemleri ABB marka kaynak robotuna bağlı MFDC (Medium-Frequency Direct Current – Orta Frekans Doğru Akım) elektrik direnç nokta kaynak makinesiyle yapılmıştır (Şekil 3.2). Kaynak elektrotu olarak 6 mm çaplı bakır alaşımı elektrotlar kullanılmış ve elektrot aşınmasına bağlı olarak deney sonuçlarının etkilenmemesi için her 20 kaynakta bir elektrotlar yenisiyle değiştirilmiş ya da elektrot geometrisine özel kesici takım ile talaşlı işleme tabi tutulmuştur.



**Şekil 3.2.** Çalışmada kullanılan MFDC elektrik direnç nokta kaynak makinesi

Kaynak esnasında kaynak parametrelerinin değişimi Şekil 3.3'te şematik olarak verilmiştir. Tüm kaynaklarda sıkma zamanı ve kaynak sonu tutma zamanı 40 ms olarak

sabit tutulmuştur. Kaynak parametrelerinin kontrolü kaynak robotuna bağlı BOS6000 programı ve robot kontrol modülüyle gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.3.** Kaynak parametrelerinin zamana bağlı değişimi (şematik)

Numunelerin kaynak esnasında sabitlenmesi için numune ölçülerine uygun bir fiksör imal edilmiş ve kaynak işlemlerinde kullanılmıştır (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4.** Kaynak fiksörü

### 3.4. Isı Girdisi İndeksi

Elektrik direnç nokta kaynağında, kaynak bölgesi mikro yapılarının şekillenmesinde ve buna bağlı olarak da kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirleyen temel unsurlardan biri kaynak esnasındaki ısı girdisidir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri üzerinde etkin olabilecek bazı önem arz eden parametrelerin (ITAB genişliği, çekirdek çapı gibi) ısı girdisine bağlı olarak değişimlerini ortaya koymak gerekir. Bu sebeple, elektrik direnç nokta kaynağı için ısı girdisi tanımlanmalıdır. Esas itibarıyla, elektrik direnç nokta kaynağı esnasındaki ısı girdisi (Q) Joule Kanunu ile aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$Q=I^2Rt$$

I: Kaynak Akımı; R: Elektrik Direnci; t: Kaynak Zamanı.

Kaynak akımı ve kaynak zamanı, doğrudan proses parametreleridir. Elektrik direnci ise birçok faktörden etkilenir. Bu faktörler; en başta malzemeye ve sac kalınlığına bağlı olan elektrik direnci, elektrot-sac ve sac-sac ara yüzeylerindeki elektrik direnci, sac ve elektrot ucunun yüzey koşulları, elektrot uç çapı ve geometrisi vs. gibi sıralanabilir. Çalışmada kullanılan kaynak elektrotunun ve malzemenin aynı olduğu, malzeme yüzey temizliğinin aynı şekilde yapıldığı dikkate alındığında, kaynak parametreleri içinde elektrot kuvveti elektrik direncini belirleyici rol oynar. Elektrot-sac ve sac-sac yüzeylerinin temas alanı dikkate alındığında, elektrot kuvvetindeki artış elektrik direncini düşürecek ve bu şekilde ısı girdisini azaltacaktır. Dolayısıyla elektrot kuvveti ile elektrik direnci arasında ters orantı söz konusudur. Bu bilgiler ışığında, elektrik direnç nokta kaynağı esnasındaki ısı girdisi, Isı Girdisi İndeksi (IGİ) olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Pouranvari 2011):

$$IGİ=I^2 t/F$$

I: Kaynak Akımı; t: Kaynak Zamanı; F: Elektrot Kuvveti.

Esasen, elektrik direnci, kütle direnci ve temas direnci olarak iki alt başlığa bölünür ve kaynak esnasında dinamik direnç değişimi söz konusu olur. Kaynağın başlarında, elektrot kuvvetinin artışı ile azalan temas direnci toplam direnç üzerinde n durumdadır. Ergime başladığı andan itibaren ise, katı ve sıvı metalin dirençleri farkı kütle direncinin ön plana

ıkmasına yol açar. Elektrot kuvveti bu noktada, ilk ergimenin başlaması ve kaynak havuzunun ilerlemesi üzerinde de etki sahibi olan bir parametredir. Tüm bu etkilerin tam olarak ortaya konulması, detaylı çalışmalar gerektirmekte olup tez kapsamına alınmamıştır. Genel olarak, elektrot kuvvetinin toplam direnci ters orantılı olarak değiştirdiği ve bu etkinin lineer olmadığı bilinmektedir. Dolayısıyla, burada yapılan IGI tanımlamaması kendi içinde bir takım eksiklikler barındırır da, ısı girdisine bağlı yapılan yorumlarda kolaylık sağlamaktadır (Zhou ve Cai 2014).

### **3.5. Optik Mikroskop alışmaları**

Kaynak işlemlerinden sonra, kaynaklı numuneler, makro ve mikro yapı incelemeleri ile ITAB (ısı tesiri altındaki bölge) lmleri için kaynak merkezi boyunca kesiti alınacak şekilde Struers Labotom-3 marka metalografik numune kesme cihazı ile kesilmiştir. Sonrasında, Metkon ECOPRESS 100 marka numune kalıplama cihazı ile enine kaynak kesitleri kalıplanarak, Metkon FORCIPOL 2V metalografik taşlama ve parlatma cihazı ile 0,25  $\mu\text{m}$ 'ye kadar elmas solüsyon ile parlatma işlemleri yapılmıştır. Kaynak makro ve mikro yapısını ortaya çıkarmak için sırasıyla %3 Nital dağlayıcısı ve  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  solüsyonu (100 ml  $\text{H}_2\text{O}$  içinde 10 g  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) ayrı ayrı 2 adımda uygulanmıştır (renkli dağlama yöntemi). Optik mikroskop görüntüleri polarize ışık altında Clemex görüntü analiz sistemine sahip Nikon Eclipse MA100 ters metal mikroskobu ile alınmıştır.

Makro yapı görüntüleri, 50X büyütme kullanılarak yeterli sayıda alınan görüntülerin görüntü analiz programlarında bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur.

### **3.6. SEM Analizleri**

Mikro yapı görüntülemelerinde, optik mikroskop incelemelerine ek olarak 20 kV ZEISS EVO® 40 XVP tip taramalı elektron mikroskobundan da (SEM) yararlanılmıştır. Ayrıca, ekme-kayma testleri sonrasında kırılma yüzeylerinin analizleri de aynı mikroskop ile yapılmıştır.

### 3.7. Mikro Sertlik Ölçümleri

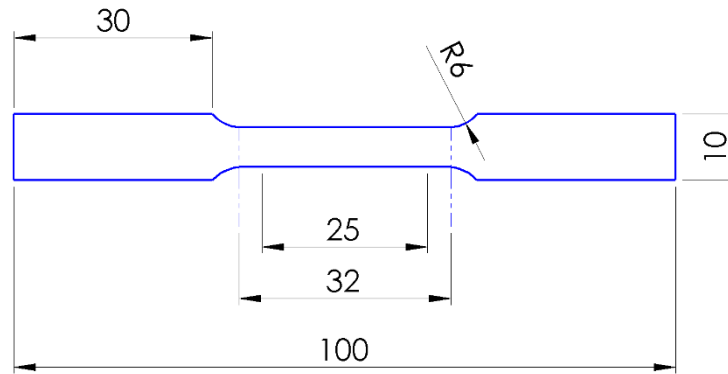
Optik mikroskop incelemelerinden sonra Metkon Duroline–M mikro sertlik cihazı ile Vickers metoduna göre mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri, önce tüm kesiti çapraz şekilde tarama şeklinde yapılmış, ancak, dendritik kaynak bölgesindeki mikro hatalardan dolayı yoruma uygun sonuçlar alınamamıştır. Bu nedenle, farklı bölgelerin (iri taneli ITAB, dendritik kaynak merkezi ve temel malzeme) ayrı ayrı mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Temel malzeme ve ITAB ölçümlerinde 200g, dendritik bölgelerde ise (dendrit kolları arasındaki boşluklar, mikro çekme boşlukları gibi mikro hataların ölçümdeki hatalara yol açması nedeniyle) 500g yük kullanılmıştır.

### 3.8. Çekme Testleri

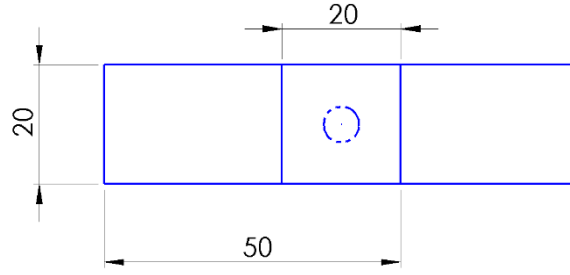
Çekme testleri, Celtron marka yük hücresi ve MF (Mess- & Feinwerktechnik) marka otomatik ekstansometre ile donatılmış UTEST-7014 marka universal çekme-basma test cihazı ile yapılmıştır.

Çekme testlerinde 25 mm ölçüm aralığı kullanılmış olup, A grubu numunelerde bu ölçümler değerlendirmeye alınmamıştır.

Farklı deformasyon oranlarındaki temel malzemeler, ASTM E8/E8M standartlarına uygun olarak CNC freze tezgahında işlenmiş ve çekme deneylerinde bu numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.5.). Kaynaklı çekme-kayma test numuneleri ise 50mmX20mm ölçülerinde kesilmiş ve Şekil 3.6’da görüldüğü gibi 20mm üst üste binecek şekilde kaynak edilmiştir.



Şekil 3.5. Çekme test numunesi (ASTM E8/E8M 2009)



**Şekil 3.6.** Kaynaklı çekme-kayma test numunesi

### 3.9. Çekirdek Çapı ve Çökme Değerlerinin Ölçümü

Kaynaklı numunelerin mukavemet değerleri çekirdek çapı (erime bölgesi boyutu) ve çökme değerleri ile yakından ilişkilidir. Çekirdek çapı kaynak esnasındaki ısı girdisiyle ergiyen ara yüzeyin genişliği olarak ifade edilir. Çökme ise kaynak sonrasında elektrotların temas bölgesindeki incelmanın yüzde olarak ifadesidir. Çekme testi ile koparılmış numuneler üzerinden Mitutoyo marka dijital kumpas kullanılarak ve her bir parametre seti için en az 5 numuneden çekirdek çapı ölçümü alınmıştır.

Çökme değerlerinin ölçümü ise, Mitutoyo marka dijital mikrometre kullanılarak yapılmış ve her bir parametre seti için en az 5 numuneden ölçüm alınmıştır.

#### **4. BULGULAR**

Bu bölümde, ilk önce, deformasyon oranının temel malzeme özelliklerine etkisi irdelenmiştir. Daha sonra, sırasıyla, her bir deformasyon oranı için Taguchi metodu ile kaynak parametrelerinin optimizasyonu yapılmış ve tekil kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere ve mikro yapılara etkileri analiz edilmiştir.

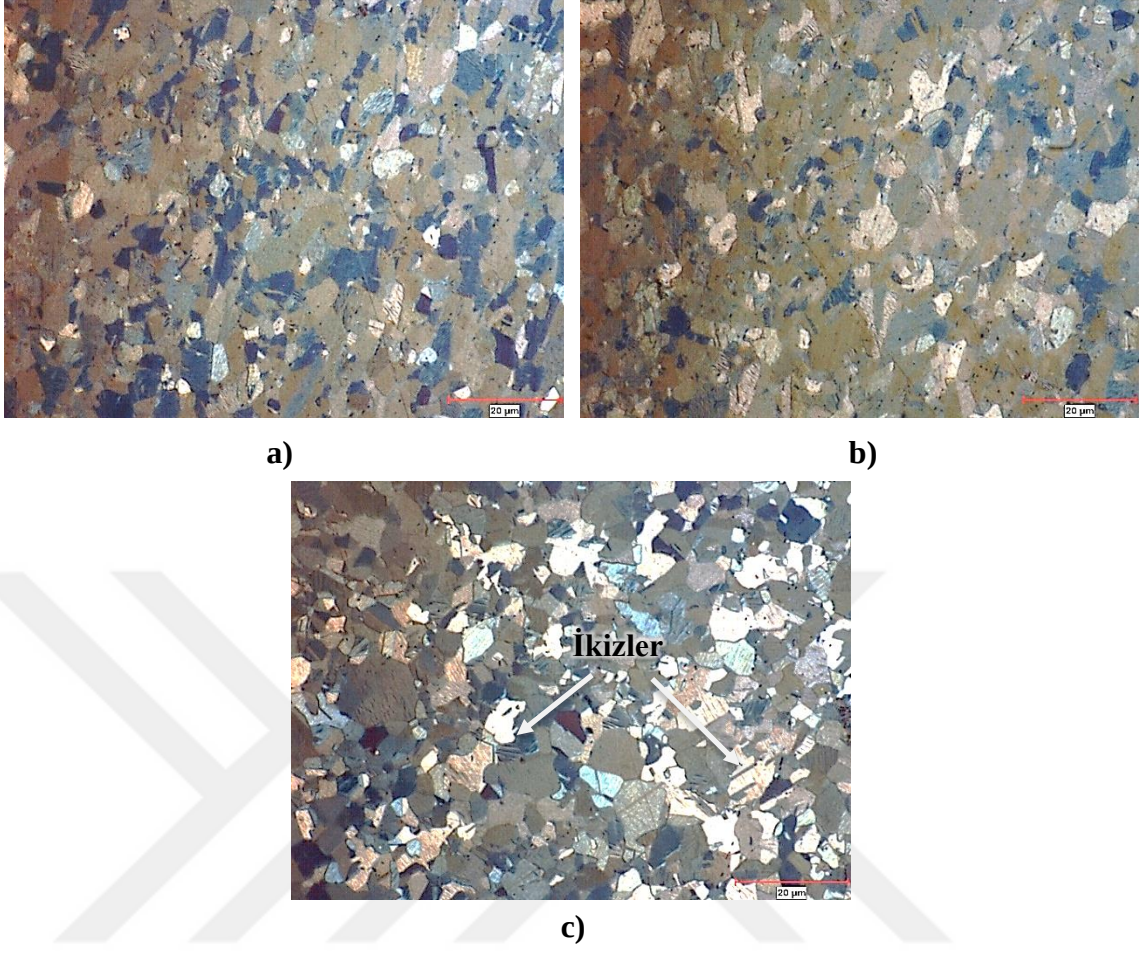
##### **4.1. Farklı Deformasyon Oranlarındaki Temel Malzemeler**

Bu başlık altında farklı deformasyon oranlarındaki kaynaksız temel malzemelerin mekanik özellikleri, mikro yapıları değerlendirilmiş ve kırılma yüzeylerinin analizi yapılmıştır.

##### **4.1.1. Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri**

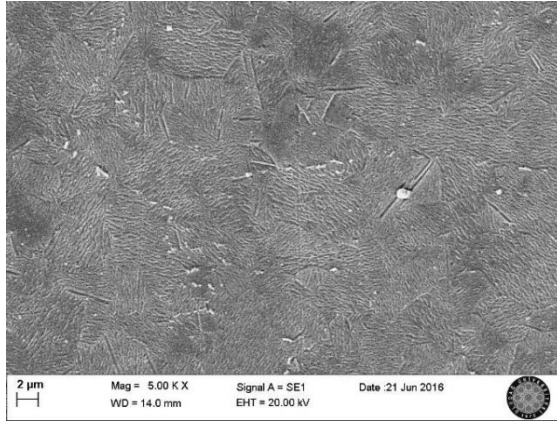
Farklı deformasyon oranlarına sahip TWIP saclarının (temel malzemelerin) içyapıları optik mikroskop, SEM görüntüleri ve SEM-EBSD analizleri sırasıyla Şekil 4.1-4.9 arasında verilmiştir. Temel malzemeler, TWIP çeliğinin kimyasal içeriği gereği ince taneli ostenitik yapıya sahiptir. Deformasyonsuz TWIP sacının optik ve SEM görüntülerinden mukavemet artışı sağlayan mekanik ikiz oluşumları net olarak görülmektedir (Şekil 4.1 ve 4.2). Ayrıca, TWIP sacının üretiminden kaynaklanan hadde doğrultusunda yönlenmiş bantlı bir yapının da varlığı söz konusudur (Şekil 4.2c). %15 deformasyon uygulanan TWIP sacında ise özellikle kesitten alınan numunelerde hadde doğrultusunda oluşmuş belirgin katmanlı bantlı yapı ve uzamış taneler görülmektedir (Şekil 4.3a ve Şekil 4.4b). Ayrıca, bu numunelerde deformasyonla birlikte ikizler de artmıştır (Şekil 4.3 ve 4.4). Deformasyon oranının %30'a çıkarılmasıyla hadde doğrultusundaki tanelerin daha da uzadığı görülmektedir (Şekil 4.5a). Ek olarak, hadde doğrultusundaki belirgin katmanlı yapının varlığını koruduğunu ve deformasyon ikizlerinin arttığını görülmektedir (Şekil 4.5 ve 4.6). Özellikle, Şekil 4.6 b'de taneler içerisindeki yoğun ikiz oluşumları net olarak görülmektedir.



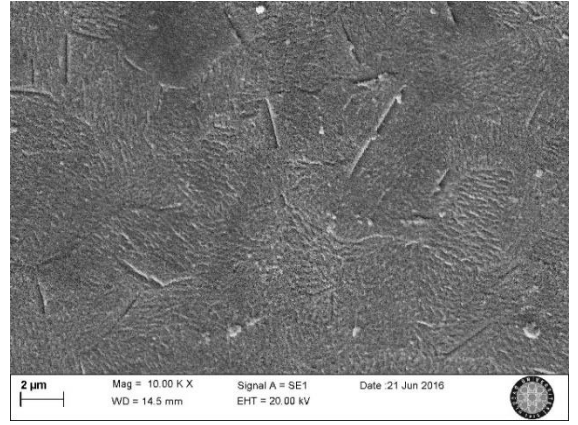


**Şekil 4.1.** Deformasyonsuz TWIP sacına ait optik mikroskop görüntüleri (x1000): a) Hadde yönüne dik, b) Hadde yönüne paralel, c) Sac yüzeyi

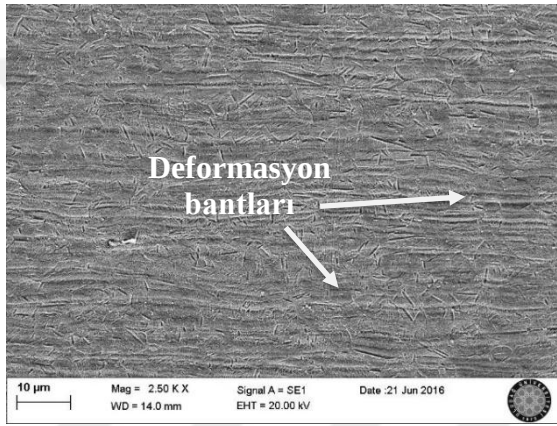




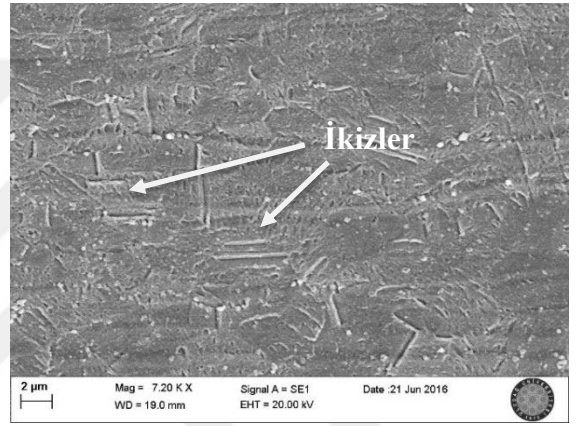
a)



b)

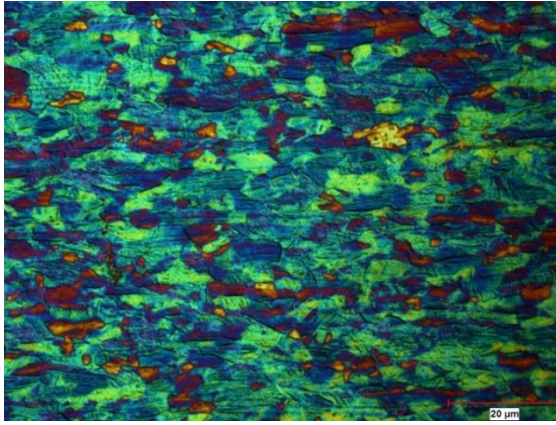


c)

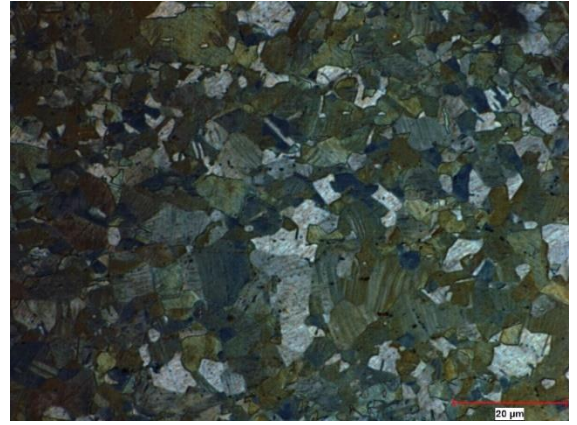


d)

**Şekil 4.2.** Deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM görüntüleri: a) Sac yüzeyinden alınan numune, b) Sac yüzeyinden alınan numune, c) Kesitten alınan numune, d) Kesitten alınan numune

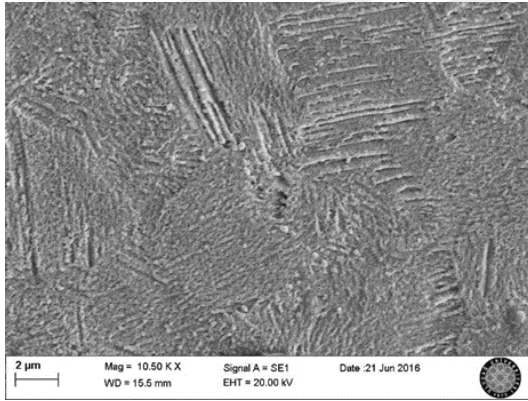


a)

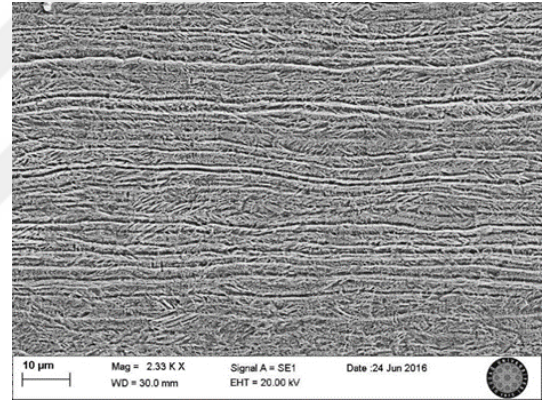


b)

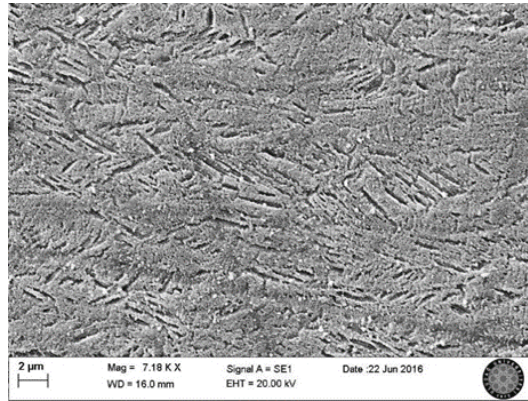
**Şekil 4.3.** %15 deformasyonlu TWIP sacına ait optik mikroskop görüntüleri (x1000): a) Kesitten alınan numune, b) Sac yüzeyinden alınan numune



a)



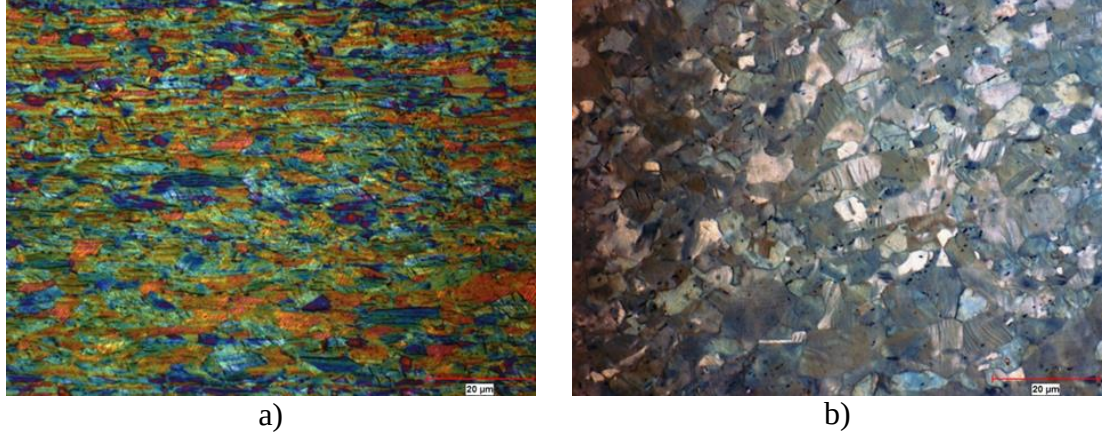
b)



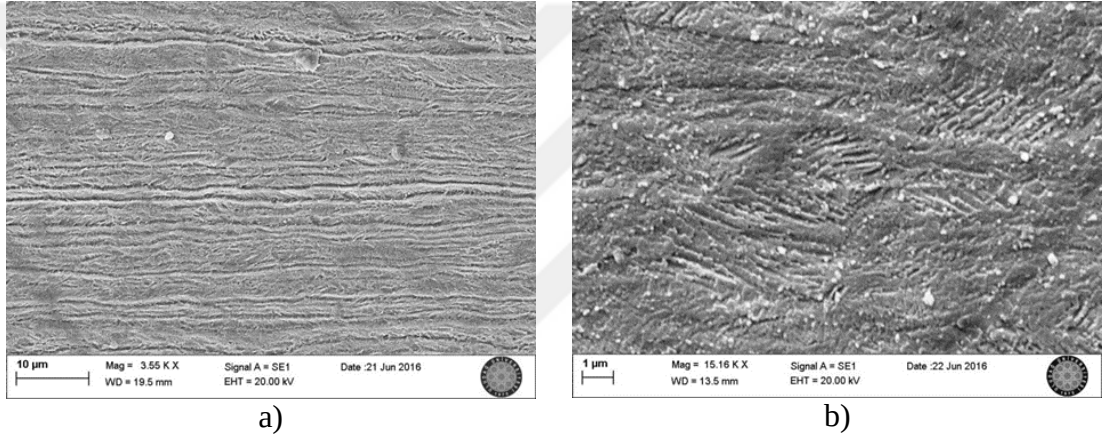
c)

**Şekil 4.4.** %15 deformasyonlu TWIP sacına ait SEM görüntüleri: a) Sac yüzeyinden alınan numune, b) Kesitten alınan numune, c) Kesitten alınan numune





**Şekil 4.5.** %30 deformasyonlu TWIP sacına ait optik mikroskop görüntüleri (x1000): a) Kesitten alınan numune, b) Sac yüzeyinden alınan numune



**Şekil 4.6.** %30 deformasyonlu TWIP sacına ait SEM görüntüleri a) Kesitten alınan numune, b) Kesitten alınan numune

SEM-EBSD haritalamadan tane yapısı incelendiğinde, deformasyon artışı ile beklendiği üzere mikro yapıdaki tanelerde deformasyon yönünde uzamalar meydana gelmiştir (Şekil 4.7-4.9). Ancak, mikro yapıdaki bazı tanelerin içlerinde kısmi olarak mekanik ikizler gözlenmiş olsa da, tüm ikizlerin tespiti en küçük ölçüm adımı olan 50 nm (step size) kullanıldığında bile mümkün olmamıştır. Bu da, ilgili numunelerdeki mekanik ikiz kalınlıklarının 50 nm'nin altında olduğu göstermektedir. TWIP çelikleri üzerine yapılan birçok EBSD çalışmasında da mekanik ikizlerin 50 nm'nin altında olduğundan dolayı haritalanamadığı belirtilmiştir (Hwang ve ark. 2015, Niendorf ve ark. 2010, Yang ve ark. 2015).

Diğer taraftan, SEM-EBSD analizlerinden ters kutup figürlerden (IPF) alınan verilerden (tekstur veya yönlenmeden) yararlanılarak da numunelerdeki mekanik ikizler ile ilgili bilgi edinilebilir (Gutierrez-Urrutia ve ark. 2010, Gutierrez-Urrutia ve Raabe 2011).

Bilindiği üzere, soğuk deformasyona uğratılmış TWIP çeliklerinin içyapısında deformasyon yoğunluğuna bağlı olarak dislokasyon ve mekanik ikiz yoğunluğu artacaktır. Tane içerisindeki bu dislokasyon ve ikiz oluşumları (substructure (altyapılar)) kristalografik yönlenmeye sıkı bir şekilde bağlıdır. Gutierrez-Urrutia ve Raabe (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek deformasyon oranlarında, deformasyonun seviyesine bağlı olarak teksturun (dokunun)  $\langle 001 \rangle$ - $\langle 111 \rangle$  yönlenmesinde keskinleşeceği ifade edilmiştir. SEM-EBSD haritalamasından elde edilen görüntülerde deformasyon oranı artışı ile mikro yapıdaki teksturun  $\langle 001 \rangle$ - $\langle 111 \rangle$  doğrultularında keskinleştiği net olarak görülmektedir (Şekil 4.7-4.9).

Ayrıca, Gutierrez-Urrutia ve ark. (2010) ve Gutierrez-Urrutia ve Raabe (2011) yaptıkları çalışmalarında, taneler için üç tip deformasyon oluşumu (altyapısı) tanımlamışlardır. Tip 1,  $\langle 001 \rangle$ //Uzama Eksen (UE) doğrultularına yakın bir şekilde yönlenmiş tanelere karşılık gelerek gelişmiş dislokasyon hücre yapısı ve düşük mekanik ikizlenme aktivitesi sergiler. SEM-EBSD analizlerinden elde edilen görüntülerde deformasyon oranı artışı ile mikro yapıdaki  $\langle 001 \rangle$  doğrultusuna yakın yönlenmiş (kırmızı veya kırmızıya yakın renk) tane sayısının arttığı net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.7-4.9). Bu taneler, deformasyon artışına bağlı olarak dislokasyon yoğunluğu artmış taneler olarak değerlendirilebilir.

Tip 2 taneleri,  $\langle 001 \rangle$ //UE ve  $\langle 111 \rangle$ //UE kristalografik doğrultuları arasında yönlenmişlerdir ve bu taneler ikizlenme için en yüksek Schmid faktörüne sahip primer ikizlenme sistemi boyunca lamelli ikiz yapısını içerir. Bu bağlamda, Şekil 4.7-4.9'daki numunelerinin içyapısındaki  $\langle 001 \rangle$  ve  $\langle 111 \rangle$  doğrultuları arasında yönlenmiş (pembe veya pembe yakın renk) tanelerin primer ikizlenme sistemine ait ikizleri içerdiğini söylenebilir.

Tip 3 taneleri ise,  $\langle 111 \rangle$ //UE kristalografik doğrultularına yakın yönlenmişlerdir ve önemli bir şekilde mekanik ikizlenmeyi ve dislokasyon aktivitesini sergiler. Diğer taraftan,  $\Sigma 3$  (Sigma 3) CSL ( $60^\circ \langle 111 \rangle$ ) tane sınırlarının ikizlenme sınırlarına işaret ettiği

de bilinmektedir ( $\Sigma 3$  tane sınırı yönlenme farkı açısının  $60^\circ$ 'sine karşılık gelir) (Gutierrez-Urrutia ve ark. 2010, Gutierrez-Urrutia ve Raabe 2011, Haase ve ark. 2013, Kumar ve ark. 2007, Saleh ve ark. 2013, Yuan ve ark. 2015). Buna istinaden, Şekil 4.8-4.9'da SEM-EBSD haritalamasından elde edilen görüntülerde  $\langle 111 \rangle$  doğrultusunda yönlenmiş (mavi veya maviye yakın renk) tanelerinin deformasyon ikizlerini yoğun bir şekilde içermeleri kuvvetle muhtemeldir. Şekil 4.8a-4.9a'daki görüntülerden, deformasyon artışı ile  $\langle 111 \rangle$  doğrultusunda yönlenmiş tane sayısının da arttığını söylemek mümkündür. Ancak, Şekil 4.7a'daki deformasyonsuz numunenin içyapısındaki  $\langle 111 \rangle$  doğrultusunda yönlenmiş (mavi veya maviye yakın renk) tanelerin toparlanan (kendine gelen) veya yeniden kristalleşmiş tanelere işaret ettiğini vurgulamak gerekir. Çünkü yüksek açılı tane sınırlarının ( $60^\circ < 111 \rangle$ ) toparlanan (kendine gelen) ve yeniden kristalleşen taneler içinde yüksek değerler verdiği bilinmektedir (yönelim farkı açısı dağılımında  $\sim 60^\circ$ 'de pik vermesi) (Kumar ve ark. 2007, Saleh ve ark. 2013).

Diğer taraftan, SEM-EBSD analizlerinden numunelerin yönelim farkı açısı dağılımları, çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımları ve Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımları (Kernel Average Misorientation (KAM)) da değerlendirilerek mikro yapıdaki tanelerin içerdiği deformasyon ve ikiz yoğunluğu hakkında bilgi edinilebilir. Bilindiği gibi, deformasyonsuz numunelerin yönelim farkı açısı dağılımları yüksek açılı tane sınırlarına karşılık gelen  $15-60^\circ$  arasındadır (Yuan ve ark. 2015). Daha önce de belirtildiği üzere,  $\Sigma 3$  CSL ( $60^\circ < 111 \rangle$ ) tane sınırları ikizlenme sınırlarına da işaret edebilmektedir. Diğer taraftan, deformasyon oranı arttıkça da düşük açılı tane sınırları artar (Haase ve ark. 2013, Yuan ve ark. 2015). Yani, düşük açılı tane sınırı miktarının yüksek olması, deformasyona sahip mikro yapı oluştuğu anlamına gelir. Buna ilaveten, yüksek açılı tane sınırları ( $60^\circ < 111 \rangle$ ) toparlanan (kendine gelme) ve yeniden kristalleşen taneler içinde yönelim farkı açısı dağılımında da pik vermektedir. Bu bilgiler ışığında, TWIP çeliklerinde, deformasyon artışı ile uzamış tanelerden dolayı düşük açılı tane sınırlarının, mekanik ikizlerden dolayı yüksek açılı tane sınırlarının ise artması beklenmelidir. Şekil 4.7'ye bakıldığında, deformasyonsuz numunenin yönelim farkı açısı dağılımında düşük açılı tane sınırları ( $\theta \sim 5-10^\circ$ ) oranının düşük olması önemli oranda deforme edilmemiş olduğuna, yüksek açılı tane sınırları oranının ( $\theta \sim 60^\circ$ ) ve çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımlarında da  $\Sigma 3$  CSL ( $60^\circ < 111 \rangle$ ) ve  $\Sigma 9$  CSL ( $38,9^\circ < 101 \rangle$ ) tane sınırlarının yüksek olması toparlanan (kendine gelme) ve yeniden

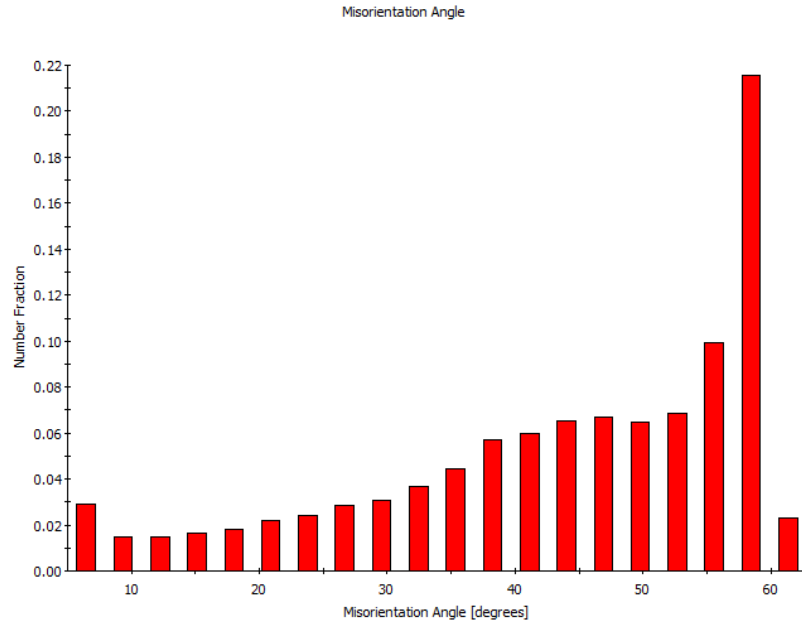
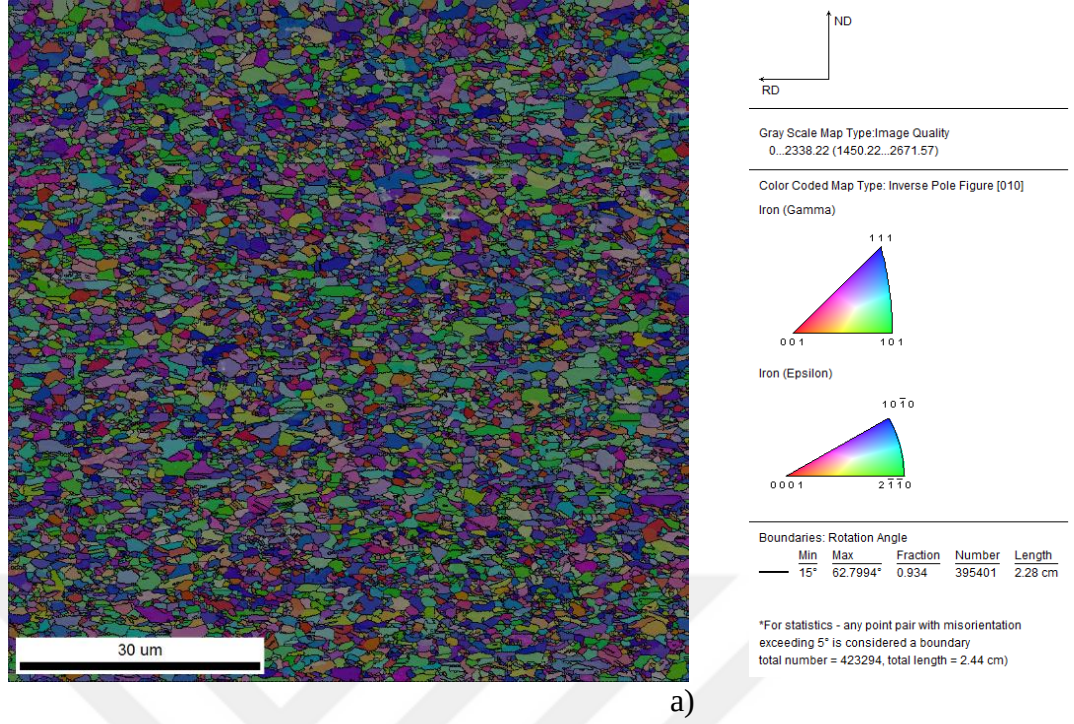
kristalleşen tanelere işaret etmektedir. Şekil 4.7c’de çok daha küçük açılı tane sınırlarını gösteren Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımlarına bakıldığında ise, özellikle  $1,5^\circ$ ’nin de altındaki yüksek oran (%88,41) düşük açılı tane sınırlarına sahip yeniden kristalleşme tanelerine işaret etmektedir (Saleh ve ark. 2013). Nitekim, bu numunenin SEM-EBSD ve KAM haritalamasındaki görüntülerinde mikro yapısında yeniden kristalleşme taneleri net olarak görülebilmektedir (Şekil 4.7a ve e). Ayrıca, SEM-EBSD ve KAM haritalamasında deformasyonsuz numunede bir miktar deforme edilmiş tanelerin (uzamış taneler) de varlığını belirtmek gerekir (Şekil 4.7a ve e).

%15 deformasyona tabi tutulmuş numunenin yönelim farkı açısı dağılımına bakıldığında, beklenildiği gibi, düşük açılı tane sınırları ( $\theta \sim 5-10^\circ$ ) oranı deformasyonsuz numuneye göre önemli oranda artmıştır (Şekil 4.8b). Bu numunede yüksek açılı tane sınırları oranı da ( $\theta \sim 60^\circ$ ) deformasyon ikizlerinden kaynaklı pik vermiştir (Şekil 4.8b). Bu oranın oluşmasında yeniden kristalleşme tanelerinin etkisinin oldukça düşük olacağı aşîkârdır. Esas etkinin mekanik ikizlerden kaynaklanma olasılığı ise çok daha yüksektir. Nitekim, çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımlarında da  $\Sigma 3$  CSL ( $60^\circ < 111 >$ ) tane sınırlarının yüksek oranda olması, mekanik ikizlerin işareti olarak kabul edilmektedir (Şekil 4.8c). Diğer taraftan, %15 deformasyon oranına sahip numunenin Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımlarına bakıldığında,  $1,5^\circ$ ’nin altındaki düşük açılı tane sınırlarına sahip yeniden kristalleşme tanelerinin oranının (%53,17) deformasyonsuz numuneye göre düştüğü görülmektedir (Şekil 4.8d). %15 deformasyon oranına sahip numunenin SEM-EBSD ve KAM haritalamasında da deforme olmuş taneler net olarak görülebilmektedir (Şekil 4.8a ve e).

%30 deformasyon oranına sahip numunede ise uzamış taneler SEM-EBSD ve KAM haritalamasında net olarak görünmesine rağmen, yönelim farkı açısı dağılımında düşük açılı tane sınırları ( $\theta \sim 5-10^\circ$ ) oranı düşük değerlerde kalmıştır (4.9a ve b). Bunun nedeni analizdeki post-process tane sınırı açî tanımlamasındaki bir problemten kaynaklanma olasılığı yüksektir. Nitekim, %30 deformasyon oranına sahip numunenin SEM-EBSD ve KAM haritalamasında da deforme olmuş taneler net olarak görülebilmemesinin yanında, bu numunenin yönelim farkı açısı dağılımında yüksek açılı tane sınırları oranının ( $\theta \sim 60^\circ$ ) ve çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımlarında da  $\Sigma 3$  CSL ( $60^\circ < 111 >$ ) tane sınırlarının %15 deformasyonlu numuneden de yüksek oranda olması yüksek olması bu

tanelerin daha yüksek oranda mekanik ikizler içerdiğinin kanıtı olarak gösterilebilir (Şekil 4.8, Şekil 4.9). Diğer taraftan, bu numunenin Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımları da, %15 deformasyonlu numunedeki gibi  $1,5^\circ$ 'nin altındaki düşük açılı tane sınırlarına sahip yeniden kristalleşme taneleri oranının (%57,28) yine deformasyonsuz numuneye göre düşük değerdedir (Şekil 4.9d).

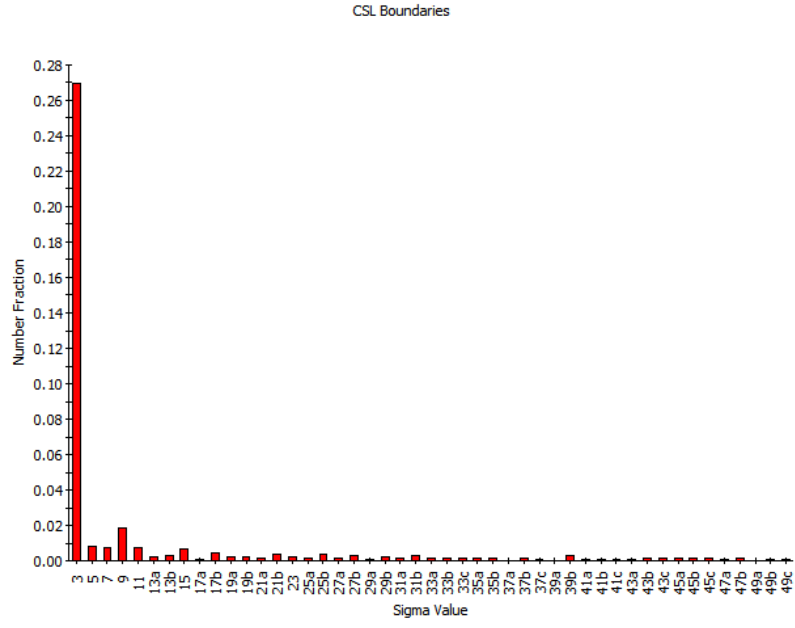




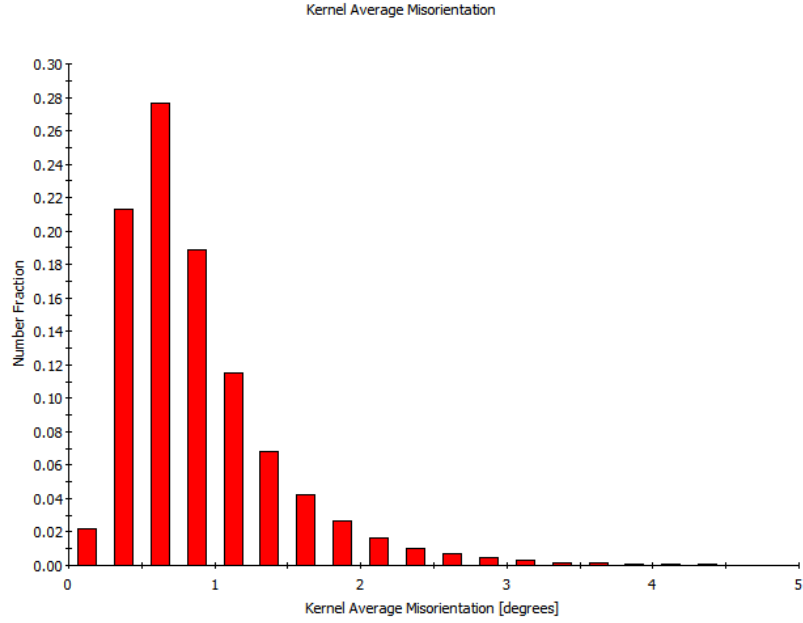
b)

**Şekil 4.7.** Deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması



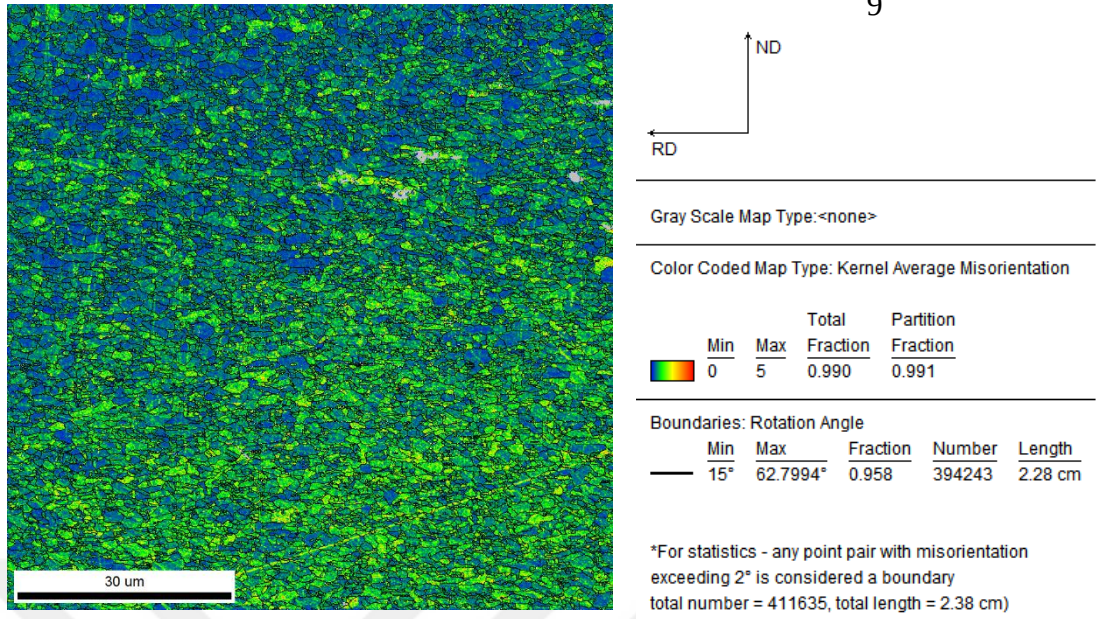


c)



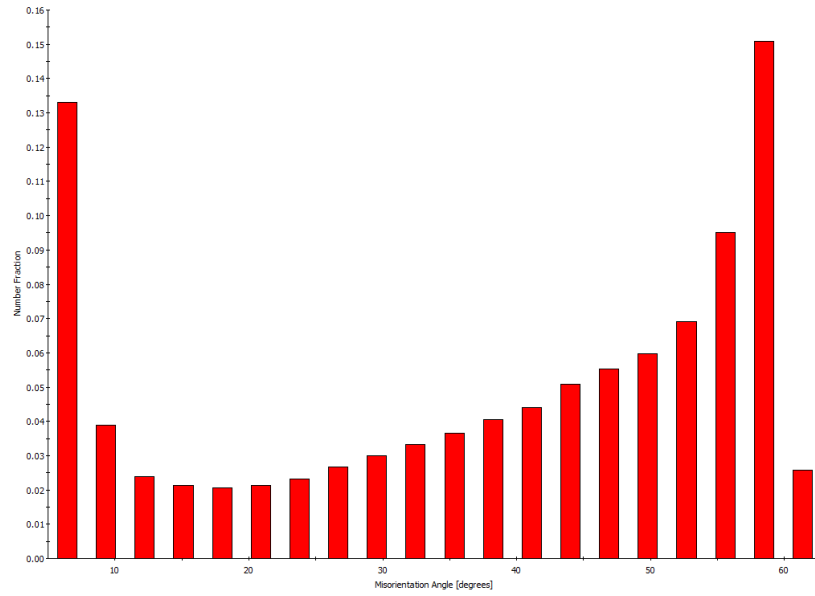
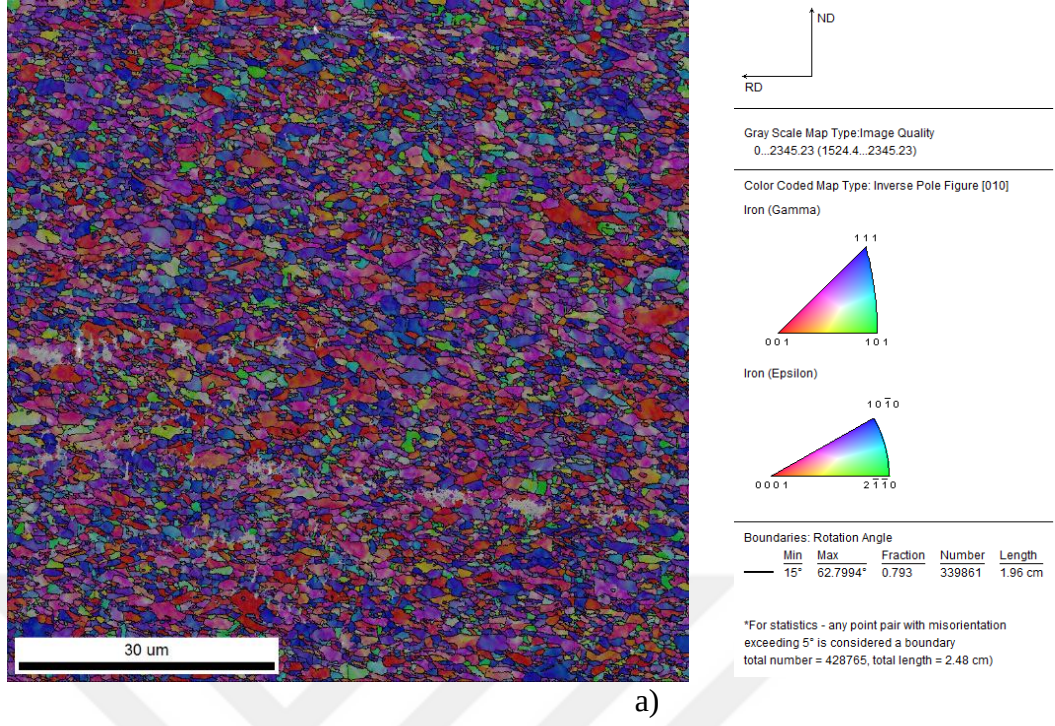
d)

**Şekil 4.7.** Deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam)

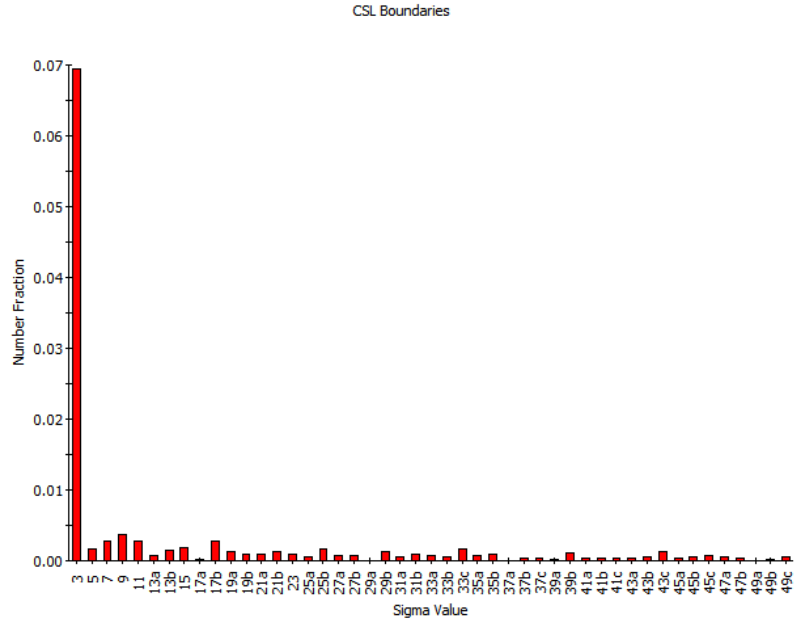


e)

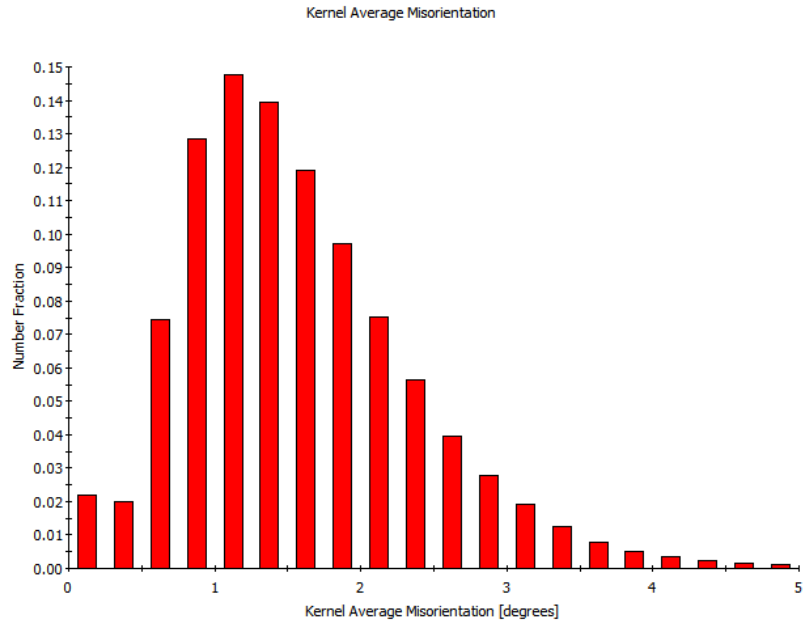
**Şekil 4.7.** Deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam)



**Şekil 4.8.** %15 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması

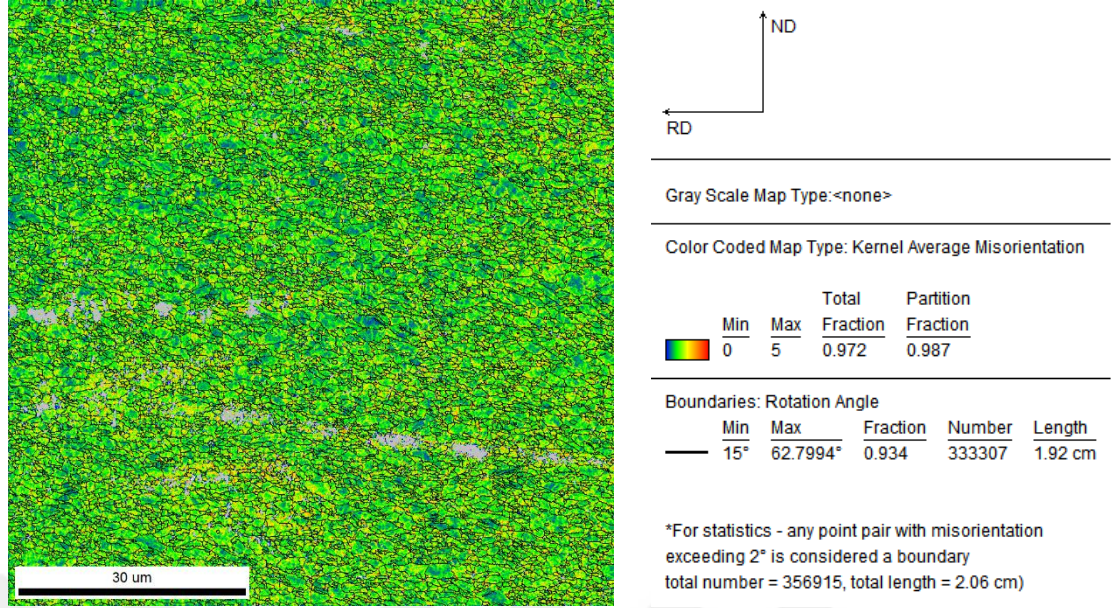


c)



d)

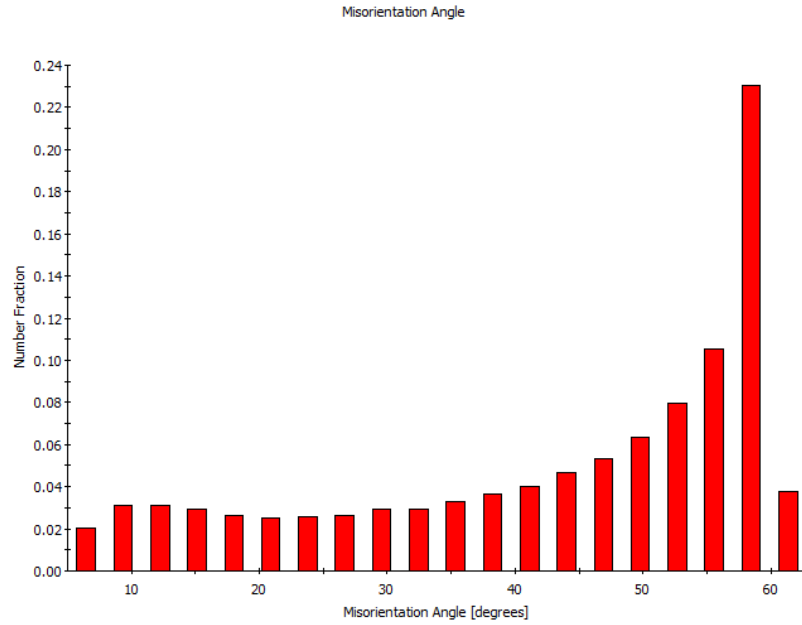
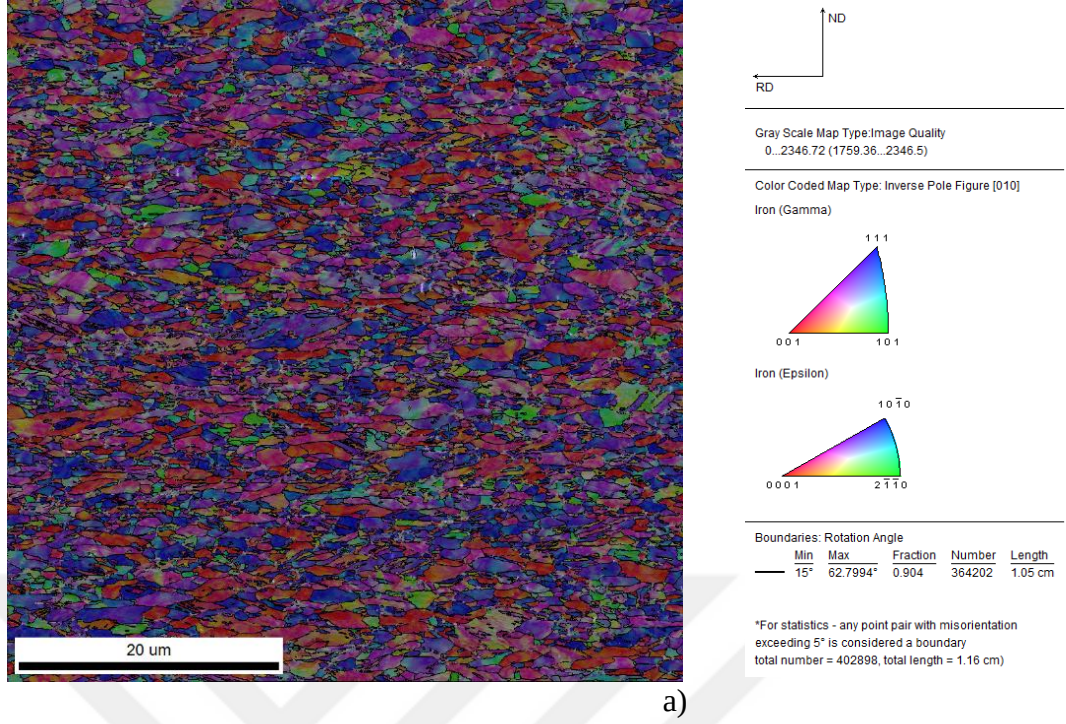
**Şekil 4.8.** %15 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam)



e)

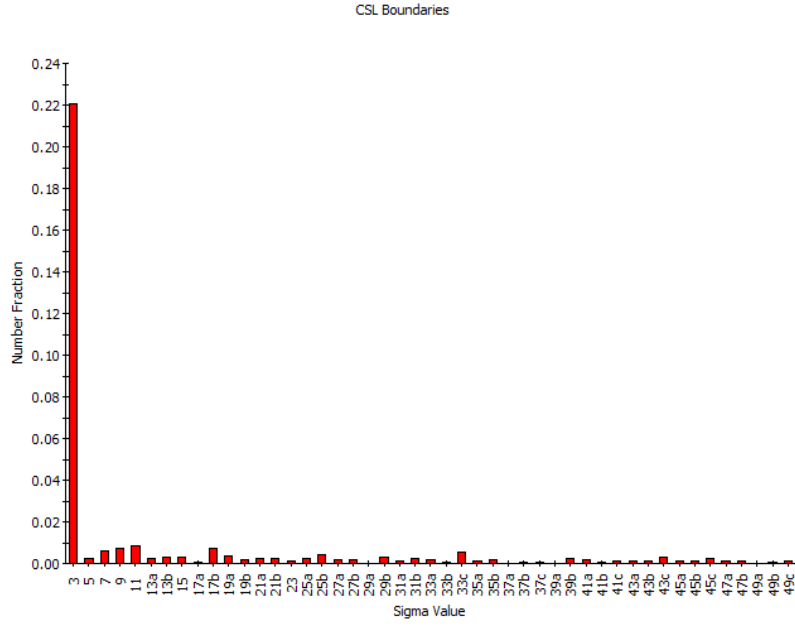
**Şekil 4.8.** Şekil 4.8. %15 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam)



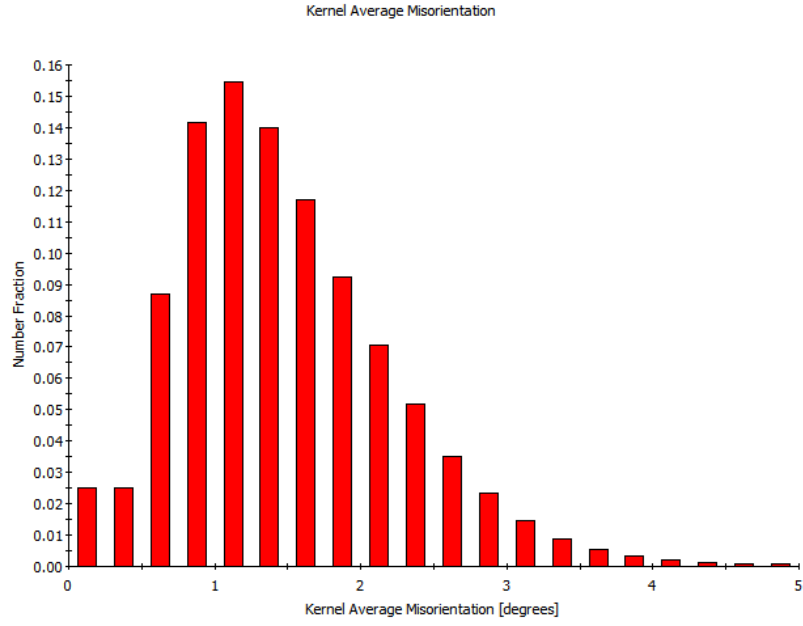


b)

**Şekil 4.9.** %30 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması

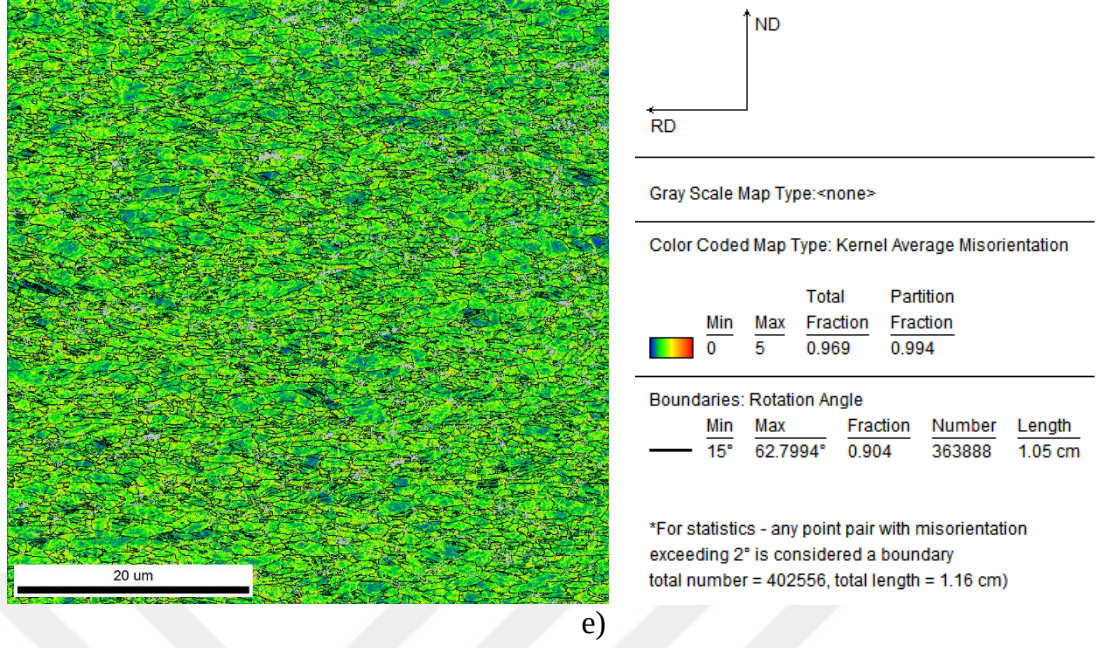


c)



d)

**Şekil 4.9.** %30 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam)

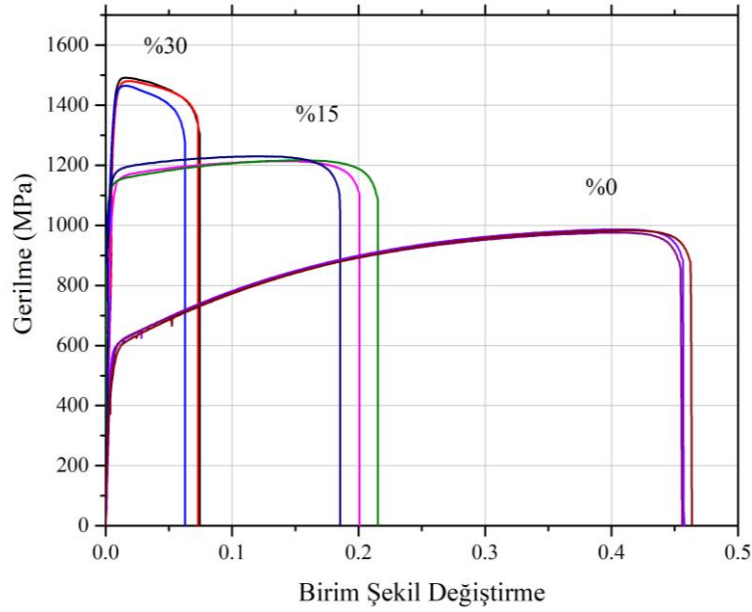


**Şekil 4.9.** %30 Deformasyonlu TWIP sacına ait SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı, d) Kernel ortalama yönelim farkı açısı dağılımı (Kernel Average Misorientation (KAM)), e) KAM haritalaması (devam)



#### 4.1.2. Çekme testleri

Farklı deformasyon oranlarına sahip TWIP sacının çekme deneyi sonucundaki çekme eğrileri Şekil 4.10'da, çekme değerleri ise Çizelge 4.1'de verilmiştir. Soğuk deforme edilen numunelerde ikizlenme sonucu meydana gelen mukavemet artışı bu eğrilerden ve değerlerden net olarak görülmektedir. %30'luk deformasyon artışı ile meydana gelen mukavemet artışı %50'ye yaklaşmıştır. Buna karşın, uzama değerinde de önemli bir düşüş meydana gelmiştir.



**Şekil 4.10.** Farklı deformasyon oranlarına sahip TWIP çeliğinin çekme eğrileri

**Çizelge 4.1.** Farklı deformasyon oranlarına sahip TWIP çeliğinin çekme değerleri

| Deformasyon Oranı (%) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Uzama (%) |
|-----------------------|------------------------|-----------|
| 0                     | 982                    | 46        |
| 15                    | 1220                   | 20        |
| 30                    | 1478                   | 7         |

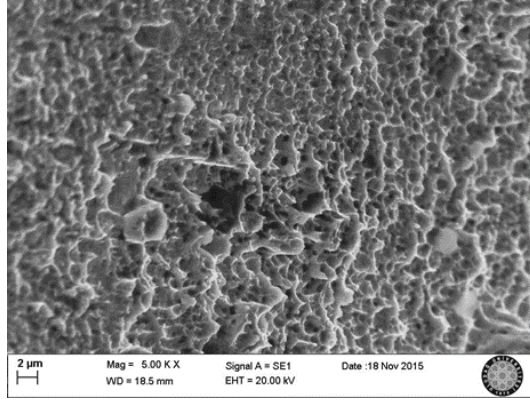
#### 4.1.3. Kırılma yüzeylerinin analizi

Çekme testleri sonrasında numunelerin kırılma yüzeylerinin analizi yapılmış ve alınan SEM görüntüleri Şekil 4.11-13'te verilmiştir.

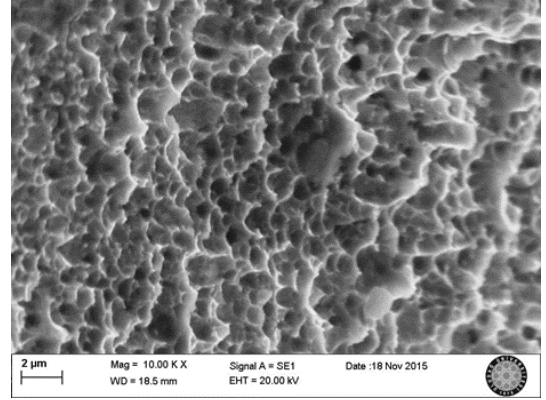
Deformasyonsuz TWIP çeliğinin kırılma yüzeyi incelendiğinde, çekme yönünde uzamış ve oldukça derin mikro-çukurcuklar (dimples) içeren tipik bir sünek kırılma görülmektedir (Şekil 4.11). Mikro-çukurcuk boyutlarının mevcut TWIP çeliğinin tane boyutunun da çok altında olmasından dolayı kırılmaların taneler arası meydana gelmediğini göstermektedir. Mikro-çukurcukların çok küçük boyutları, çekme testi esnasında mikro-çukurcuk çekirdeklenmesinin daha ziyade ikiz tane sınırları ve olası inklüzyonlar etrafında başladığına işaret etmektedir.

%15 deforme edilmiş TWIP sacının kırılma yüzeyinde ise, deformasyonsuz numuneye göre nispeten bir gevrekleşme söz konusudur (Şekil 4.12). Bu numunedeki kırılma da, sünek bir kırılma olarak tanımlanabilir. Ancak, derin mikro-çukurcukların yanı sıra sığ mikro çukurcuklarda söz konusudur. Ayrıca, bu numunede genel itibariyle ikiz sınırlarının tetiklemiş olduğu kırılmalar gözleniyor olsa da, tane sınırlarının da kırılmayı etkilediğini gösteren bazı bulgularda görüntülerde mevcuttur.

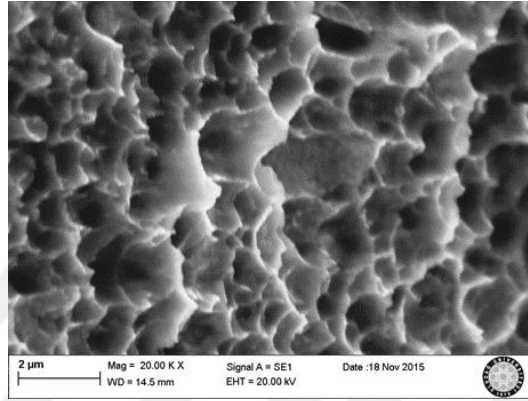
%30 deforme edilmiş TWIP sacının kırılma yüzeyinde de, deformasyonsuz TWIP çeliği kadar olmasa da kırılmanın tamamıyla sünek tarzda gerçekleştiği açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.13). Mikro-çukurcuk derinliklerinin nispeten sığ ve boyutlarının da küçük olması, bu çeliğin çekme testindeki uzamasının düşük olmasını açıklamaktadır. Mikro-çukurcuk boyutlarının çok küçük olması, çekme testi esnasında ikiz sınırlarında oluşan çatlak uçlarında çok daha küçük gerinim bölgesi ve gerilme yığılması oluşturur. Bu da, çatlak önünde küçük bir plastik bölgeye ve oldukça düşük uzama miktarına işaret eder. Esas itibariyle, bu numunede mikro-çukurcuk boyutunun önemli ölçüde düşmesi deformasyon ikizlerinin miktarındaki artışa bağlanabilir. Artan ikiz yoğunluğu mikro-çukurcuk çekirdeklenme sayısının da artışına yol açmaktadır.



a)

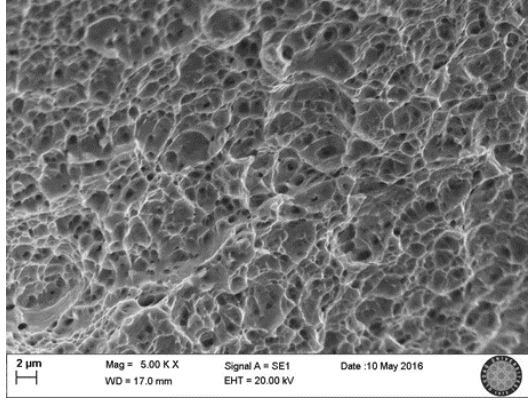


b)

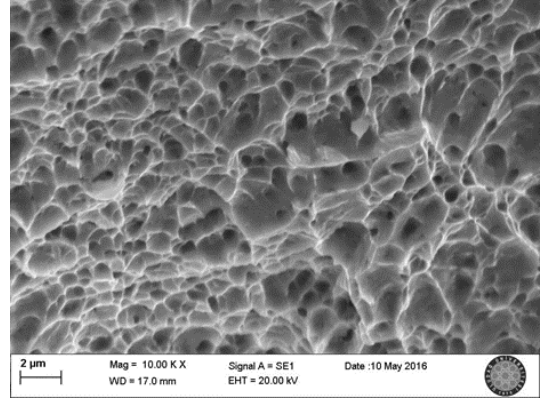


c)

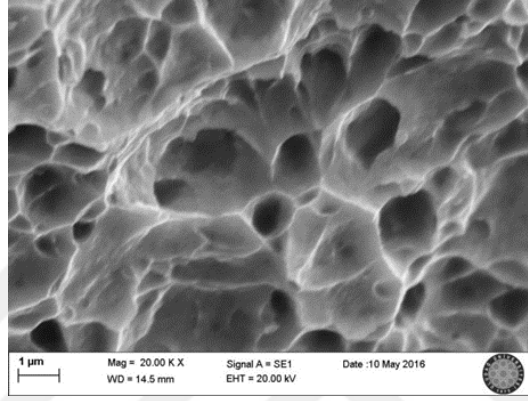
**Şekil 4.11.** Çekme deneyi sonrası deformasyonsuz TWIP sacına ait SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (a'dan c'ye doğru artan büyütme)de)



a)

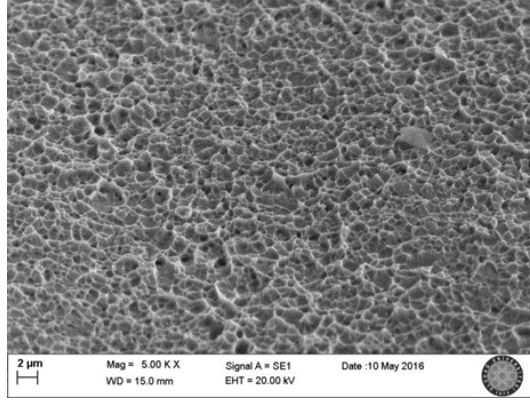


b)

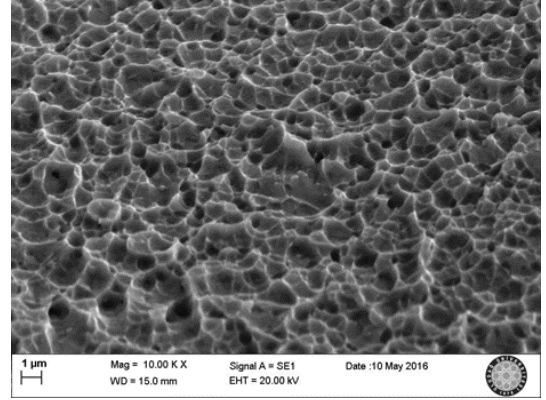


c)

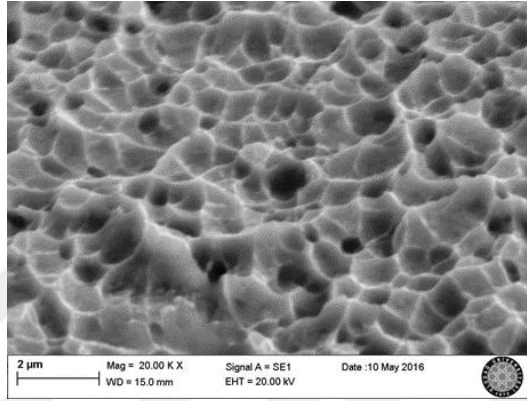
**Şekil 4.12.** Çekme deneyi sonrası %15 deformasyonlu TWIP sacına ait SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (a'dan c'ye doğru artan büyütmelelerde)



a)



b)

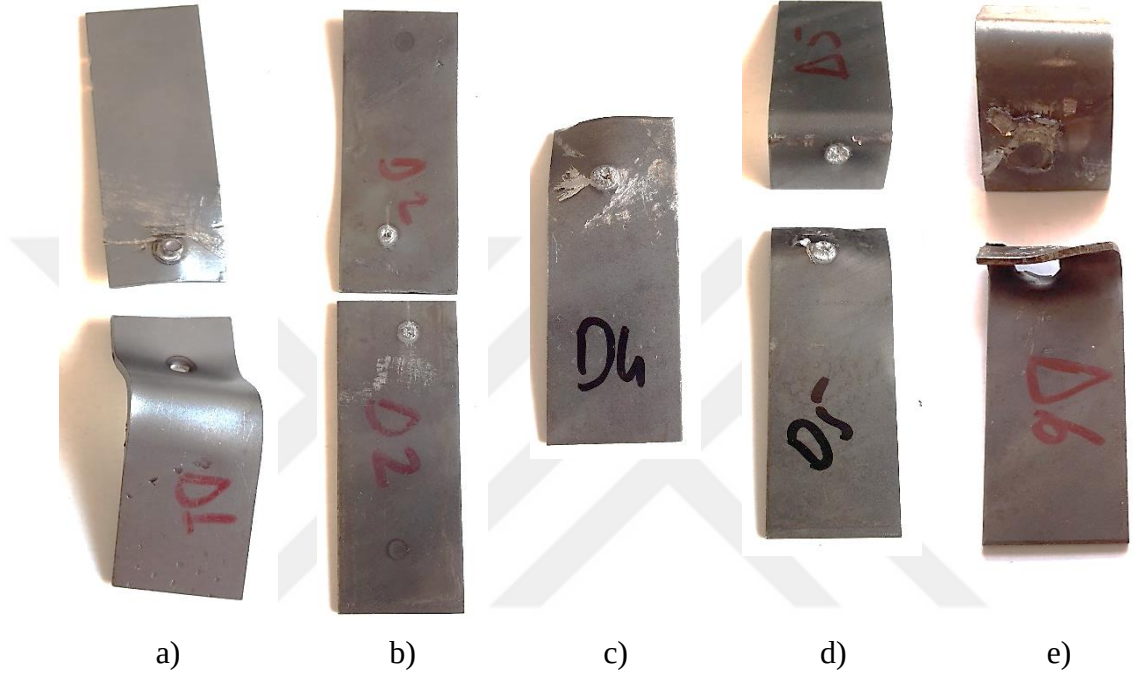


c)

**Şekil 4.13.** Çekme deneyi sonrası %30 deformasyonlu TWIP sacına ait SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (a'dan c'ye doğru artan büyütmelerde)

#### 4.2. Deformasyonsuz A Grubu Numuneler

Tez kapsamında kaynak parametrelerinin optimizasyonu için kullanılan Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılması için, kaynak parametrelerinin alt ve üst sınırlarını belirlemek adına ön denemeler yapılmıştır. Ön denemelerde üretilen kaynaklı numunelerden bazıları Şekil 4.14'te kaynak parametreleriyle birlikte verilmiştir.



**Şekil 4.14.** Deformasyonsuz A grubu ön deneme numunelerinden bazılarına ait görüntüler: a) 2000N, 4kA, 100ms – çekirdek var, b) 2000N, 3kA, 50ms – çekirdek yok, c) 1000N, 4kA, 100ms – çekirdek yok, d) 1500N, 4kA, 100ms – çekirdek yok, e) 3000N, 10kA, 500ms – çekirdek var

Ön denemeler sonucu kaynak parametrelerinin belirlenen alt ve üst sınırları sırasıyla, elektrot kuvveti için 2000N-3000N, kaynak akımı için 4kA-12kA ve kaynak zamanı için 100ms-500ms'dir. Bu değerler kullanılarak oluşturulan Taguchi L9 ortogonal dizini ve bu numunelerin çekme-kayma test sonuçları ile “en büyük en iyi” kriteriyle hesaplanan S/N oranları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Deformasyonsuz A grubu numunelerin Taguchi tablosu, çekme-kayma kuvvetleri, standart sapma değerleri ve hesaplanan S/N oranları

| Deney no | Elektrot kuvveti (N) | Akım (kA) | Zaman (ms) | Çekme-kayma kuvveti (kN) | SS   | S/N Oranı |
|----------|----------------------|-----------|------------|--------------------------|------|-----------|
| 1        | 2000                 | 4         | 100        | 5,62                     | 0,25 | 14,99     |
| 2        | 2000                 | 8         | 300        | 11,65                    | 0,56 | 21,33     |
| 3        | 2000                 | 12        | 500        | 10,61                    | 0,95 | 20,52     |
| 4        | 2500                 | 4         | 300        | 7,68                     | 0,05 | 17,71     |
| 5        | 2500                 | 8         | 500        | 12,30                    | 0,16 | 21,80     |
| 6        | 2500                 | 12        | 100        | 11,75                    | 0,05 | 21,40     |
| 7        | 3000                 | 4         | 500        | 8,53                     | 0,03 | 18,62     |
| 8        | 3000                 | 8         | 100        | 10,55                    | 0,25 | 20,46     |
| 9        | 3000                 | 12        | 300        | 13,72                    | 0,17 | 22,75     |

Kaynak parametrelerinin S/N oranları ve ortalama değerlere etkileri, sırasıyla, Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilmiş ve optimum değerler belirtilmiştir. Ayrıca, bu etki seviyeleri Şekil 4.15'te grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 4.15'te de görüldüğü üzere, kaynak parametrelerinin hem S/N oranlarına hem de ortalamalara etkileri benzer karakterler sergilemektedir.

**Çizelge 4.3.** Kaynak parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri (Deformasyonsuz A Grubu)

| Seviye | Elektrot kuvveti | Kaynak akımı | Kaynak zamanı |
|--------|------------------|--------------|---------------|
| 1      | 18,94            | 17,11        | 18,95         |
| 2      | 20,30            | 21,19        | 20,60*        |
| 3      | 20,61*           | 21,56*       | 20,31         |
| Delta  | 1,66             | 4,45         | 1,64          |
| Rank   | 2                | 1            | 3             |

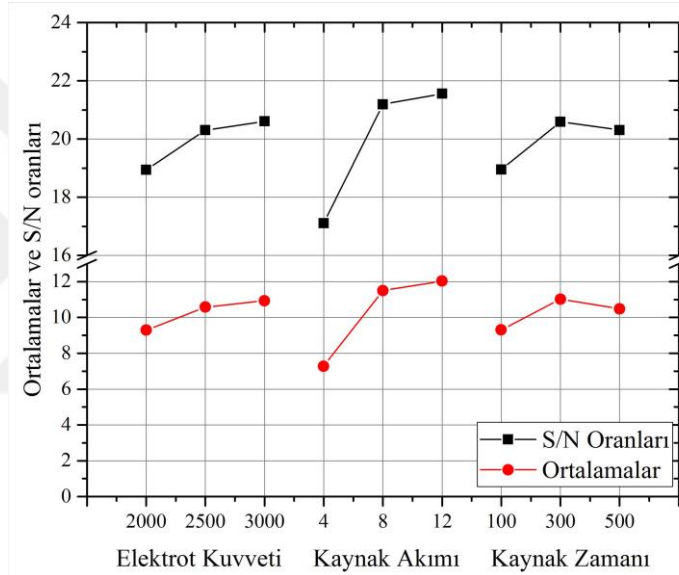
\*Optimum seviye



**Çizelge 4.4.** Kaynak parametrelerinin ortalamalara etki seviyeleri (Deformasyonsuz A Grubu)

| Seviye | Elektrot kuvveti | Kaynak akımı | Kaynak zamanı |
|--------|------------------|--------------|---------------|
| 1      | 9,293            | 7,276        | 9,306         |
| 2      | 10,578           | 11,498       | 11,019*       |
| 3      | 10,932*          | 12,030*      | 10,479        |
| Delta  | 1,639            | 4,754        | 1,713         |
| Rank   | 3                | 1            | 2             |

\*Optimum seviye



**Şekil 4.15.** Kaynak parametrelerinin etki seviyeleri (Deformasyonsuz A Grubu)

Çekme-kayma kuvvetini etkileyen en önemli kaynak parametresi kaynak akımı olarak belirlenmiştir. Hem S/N oranlarını hem de ortalamaları en büyük yapan seviyeler, 3-3-2 (Elektrot kuvveti: 300 N; Kaynak akımı: 12 kA; Kaynak zamanı: 300 ms) olarak belirlenmiştir. Bu parametre seviyeleri mevcut deney tasarımında 9 nolu deneye denk düşmektedir. Bu yüzden, doğrulama deneyine gerek kalmamıştır. Taguchi metodunun güvenilirliğini görmek adına optimum parametre seviyeleri için yapılan tahminler ve tahmin hataları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bu çizelgeden, Taguchi metodu kullanılarak ortalama çekme-kayma kuvvetinin %2,02 S/N oranının %0,47 hatayla tahmin edilebildiği görülmektedir. Tahmin hatalarının bu kadar küçük değerlerde olması da Taguchi metodunun yapılan optimizasyon için uygun bir metot olduğunu göstermektedir.



**Çizelge 4.5.** Kaynak parametrelerinin optimum değerleri için yapılan tahminler (Deformasyonsuz A Grubu)

|                   | Ortalama (kN) | S/N oranı      |
|-------------------|---------------|----------------|
| DeneySEL          | 13,72         | 22,75          |
| Tahmin            | 13.45         | 22,86 (13,90*) |
| Tahmin hatası (%) | 2,02          | 0,47 (1,3*)    |

\*ortalamaya dönüştürülmüş S/N oranı ve hatası

Tekil kaynak parametrelerinin çekme-kayma kuvveti üzerindeki etkisini tespit etmek için ANOVA çalışması yapılmış ve oluşturulan ANOVA tablosu Çizelge 4.6’da verilmiştir. Çizelgeden en etkin parametrenin %78,73’lik katkı oranıyla kaynak akımı olduğu görülmektedir. Bu veri Taguchi tablolarıyla da uyum göstermektedir. Diğer iki parametrenin (kaynak zamanı ve elektrot kuvveti) etkileri kaynak akımından çok düşük olmakla beraber birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

**Çizelge 4.6.** Deformasyonsuz A grubu numuneler için oluşturulan ANOVA tablosu

|                  | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS  | F     | %Katkı |
|------------------|----|--------|--------|---------|-------|--------|
| Elektrot kuvveti | 2  | 4,461  | 4,461  | 2,2307  | 2,31  | 8,63   |
| Kaynak akımı     | 2  | 40,715 | 40,715 | 20,3576 | 21,04 | 78,73  |
| Kaynak zamanı    | 2  | 4,604  | 4,604  | 2,3019  | 2,38  | 8,90   |
| Kalan hata       | 2  | 1,935  | 1,935  | 0,9676  |       | 3,74   |
| Toplam           | 8  | 51,716 |        |         |       | 100,00 |

### 4.3. Deformasyonsuz B Grubu Numuneler

Bu bölüm içerisinde, Taguchi yöntemiyle elde edilen optimum kaynak parametrelerinin bulunduğu bölgede her bir kaynak parametresinin mikro yapıya ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Kaynak parametrelerinin tekil etkilerini görebilmek için optimum kaynak parametresi referans alınarak, kaynak parametrelerinden ikisi sabit tutulmuş ve üçüncü parametre daha dar bir aralıkta değiştirilmiştir. Çalışmanın bu kısmında kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Kaynak akımının 12 kA’dan daha yüksek değerlerinde önemli düzeyde sayılabilecek sıçratma (expulsion) gözlemlendiğinden dolayı, deformasyonsuz B grubu numunelerinde maksimum kaynak akımı 12 kA olarak alınmıştır. Belirlenen kaynak parametreleri ile üretilmiş kaynaklı numune örnekleri de Şekil 4.16’da verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Deformasyonsuz B grubu deney numuneleri için belirlenen kaynak parametreleri

| Numune kodu | Elektrot kuvveti (N) | Kaynak akımı (kA) | Kaynak zamanı (ms) | İGİ   |
|-------------|----------------------|-------------------|--------------------|-------|
| Z1          | 3000                 | 12                | 200                | 9600  |
| Z2          | 3000                 | 12                | 250                | 12000 |
| K3A5Z3      | 3000                 | 12                | 300                | 14400 |
| Z4          | 3000                 | 12                | 350                | 16800 |
| Z5          | 3000                 | 12                | 400                | 19200 |
| A1          | 3000                 | 8                 | 300                | 6400  |
| A2          | 3000                 | 9                 | 300                | 8100  |
| A3          | 3000                 | 10                | 300                | 10000 |
| A4          | 3000                 | 11                | 300                | 12100 |
| K3A5Z3      | 3000                 | 12                | 300                | 14400 |
| K1          | 2600                 | 12                | 300                | 16615 |
| K2          | 2800                 | 12                | 300                | 15429 |
| K3A5Z3      | 3000                 | 12                | 300                | 14400 |
| K4          | 3200                 | 12                | 300                | 13500 |
| K5          | 3400                 | 12                | 300                | 12706 |



a)



b)



c)

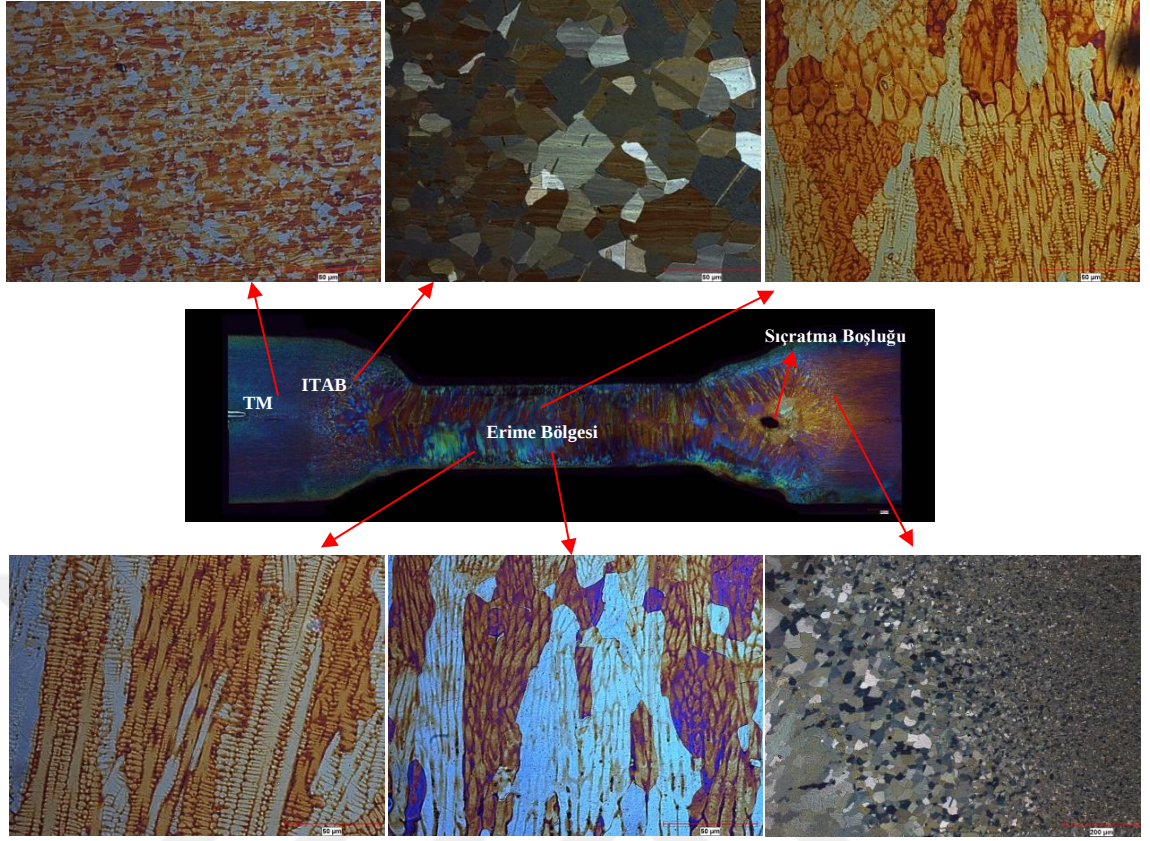
**Şekil 4.16.** Deformasyonsuz B grubu deney numuneleri (a) Kaynak akımı b) Kaynak zamanı c) Elektrot kuvveti

#### 4.3.1. Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri

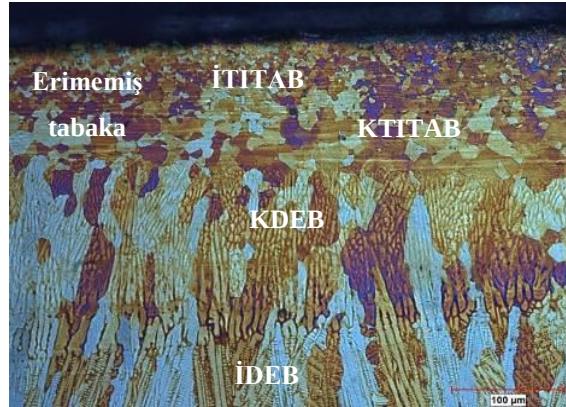
Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmiş deformasyonsuz TWIP çeliklerinin kaynak kesitleri 3 ana mikro yapısal bölgeden meydana gelmektedir: Temel malzeme (TM), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), ve erime bölgesi (EB) (Şekil 4.17).

Daha önceki bölümde belirtildiği gibi TWIP sacının TM mikro yapısı, genel itibariyle haddeleme doğrultusunda yönlenmiş bantları ve mekanik ikizleri içeren ince taneli ostenitlerden ibarettir. Kaynak işlemi, kaynak bölgesinde herhangi bir faz dönüşümüne yol açmamıştır. Ancak, kaynak işlemi esnasında farklı bölgelerde farklı sıcaklıkların ortaya çıkmasına bağlı olarak ostenit taneleri farklı morfolojilere sahip olmuştur. Erime bölgesi genel itibariyle tipik kaba kolonsal (erime sınırından merkeze doğru) dendritik döküm mikro yapısına sahip olmuştur.

Kaynak işlemi esnasında ısıya maruz kalan ITAB'daki ostenit tanelerinin boyutu temel malzeme tane boyutundan oldukça büyüktür. ITAB mikro yapısında mekanik ikizlerin tümü ortadan kalkmış ve bu bölgedeki ısıya maruz kalma ile tavlama ikizleri meydana gelmiştir. Ayrıca, kaynak esnasındaki tepe sıcaklığının artışına bağlı olarak ITAB tane boyutunun erime bölgesine yaklaştıkça arttığı net olarak görülmektedir. Bu yüzden ITAB'ı, ince taneli ITAB ve kaba taneli ITAB olarak ikiye ayırmak mümkündür. Benzer şekilde, erime bölgesi de ince dendritik erime bölgesi (İDEB) ve kaba dendritik erime bölgesi (KDEB) olarak ayrılabilir (Şekil 4.18).



**Şekil 4.17.** Deformasyonsuz kaynaklı TWIP çeliklerinin tipik makro yapısı ve mikro yapıları (Numune K3A5Z3). (Geçiş bölgesi haricindeki tüm mikro-yapı büyütmeleri x500; Geçiş bölgesi büyütmesi x100)

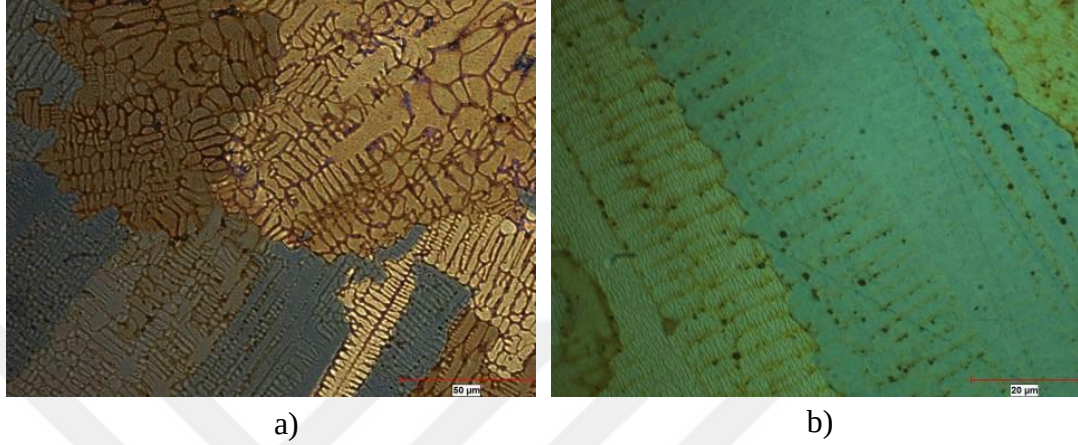


**Şekil 4.18.** Erime bölgesindeki mikro yapılar (Numune K3A5Z3). (İTITAB: İnce taneli ısı tesiri altındaki bölge; KTITAB: Kaba taneli ısı tesiri altındaki bölge; KDEB: Kaba dendritik erime bölgesi; İDEB: İnce dendritik erime bölgesi) Büyütme x200

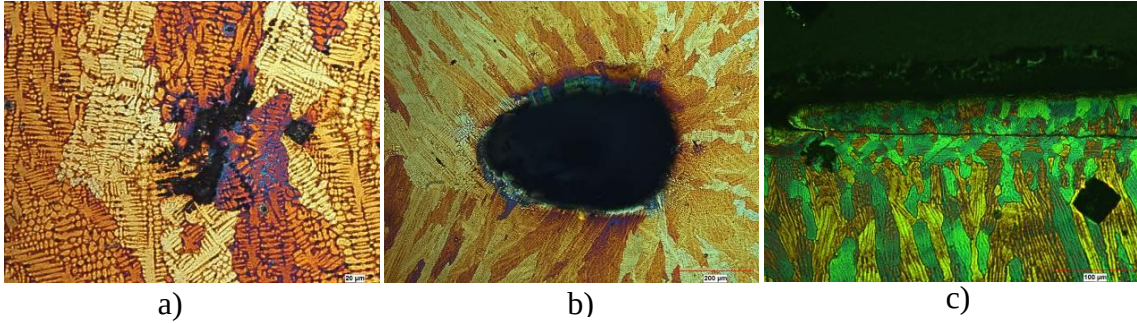
Kaynaklı numunelerin erime bölgelerinde çeşitli kaynak hataları göze çarpmaktadır. Bunlar genel olarak; erime bölgesindeki dendritler ve dendrit kolları arasında oluşan mikro gözenekler, büzülme boşlukları, makro sıratma boşlukları ve yüzey çatlakları



şeklinde sıralanabilir. Daha yüksek büyütmelelerde ise, erime bölgesindeki hemen hemen tüm kaynaklı numunelerde gözlenen mikro gözenekler, büzülme boşlukları ve tüm kaynaklı numunelerde görülmeyen (neredeyse gözle görülebilir ölçüde büyük) sıçratma boşlukları ve yüzey çatlağı Şekil 4.17, 4.19 ve 4.20’de gösterilmiştir.



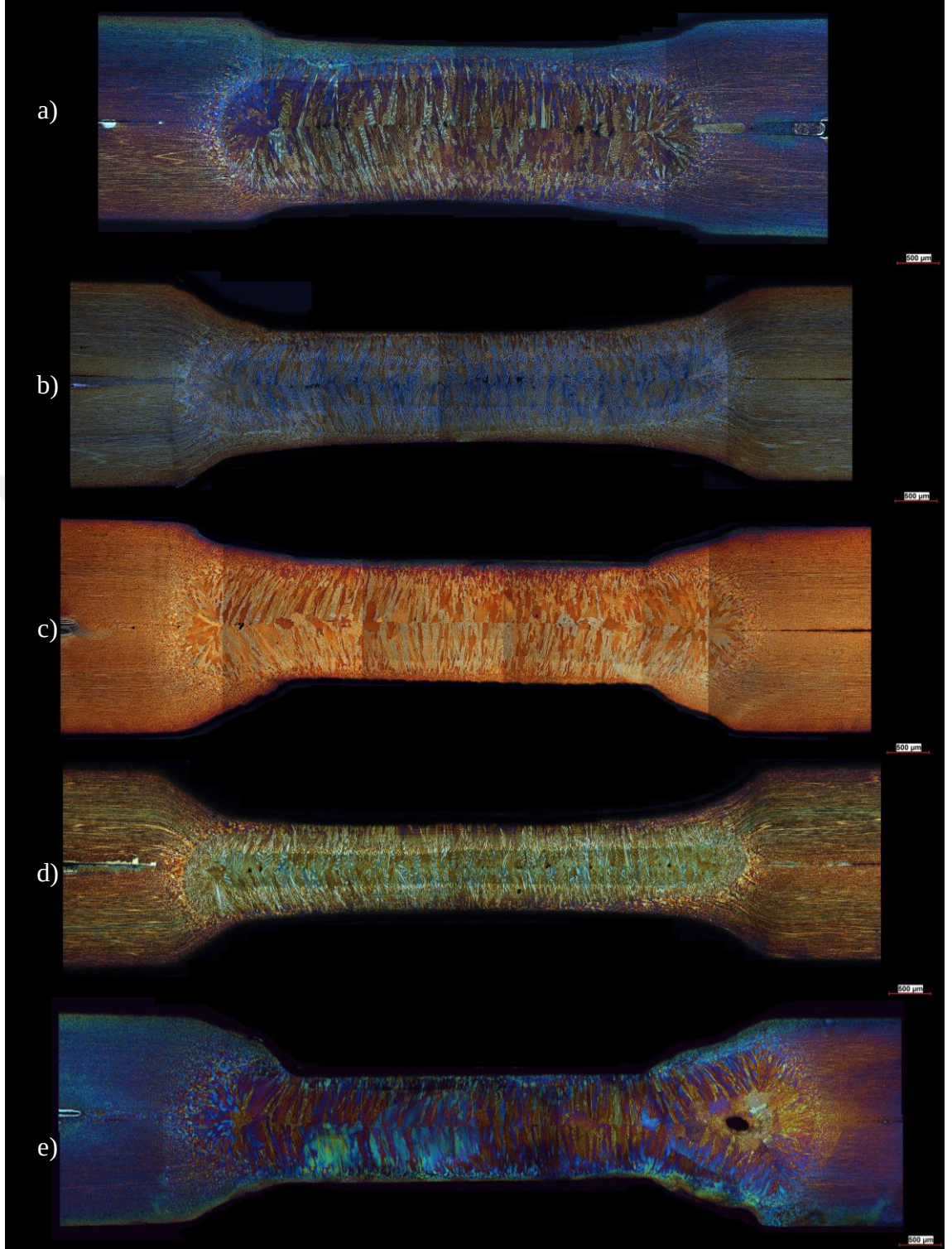
**Şekil 4.19.** Erime bölgesindeki dendritler ve dendrit kolları arasındaki mikro gözenekler (Numune K3A5Z3) a) x500 büyütme, b) x1000 büyütme



**Şekil 4.20.** Erime bölgesindeki hatalar a) dendritler arası büzülme esaslı makro gözenekler (x1000), b) sıçratma boşluğu (x100), c) yüzey çatlağı (x200) (Numune K2)

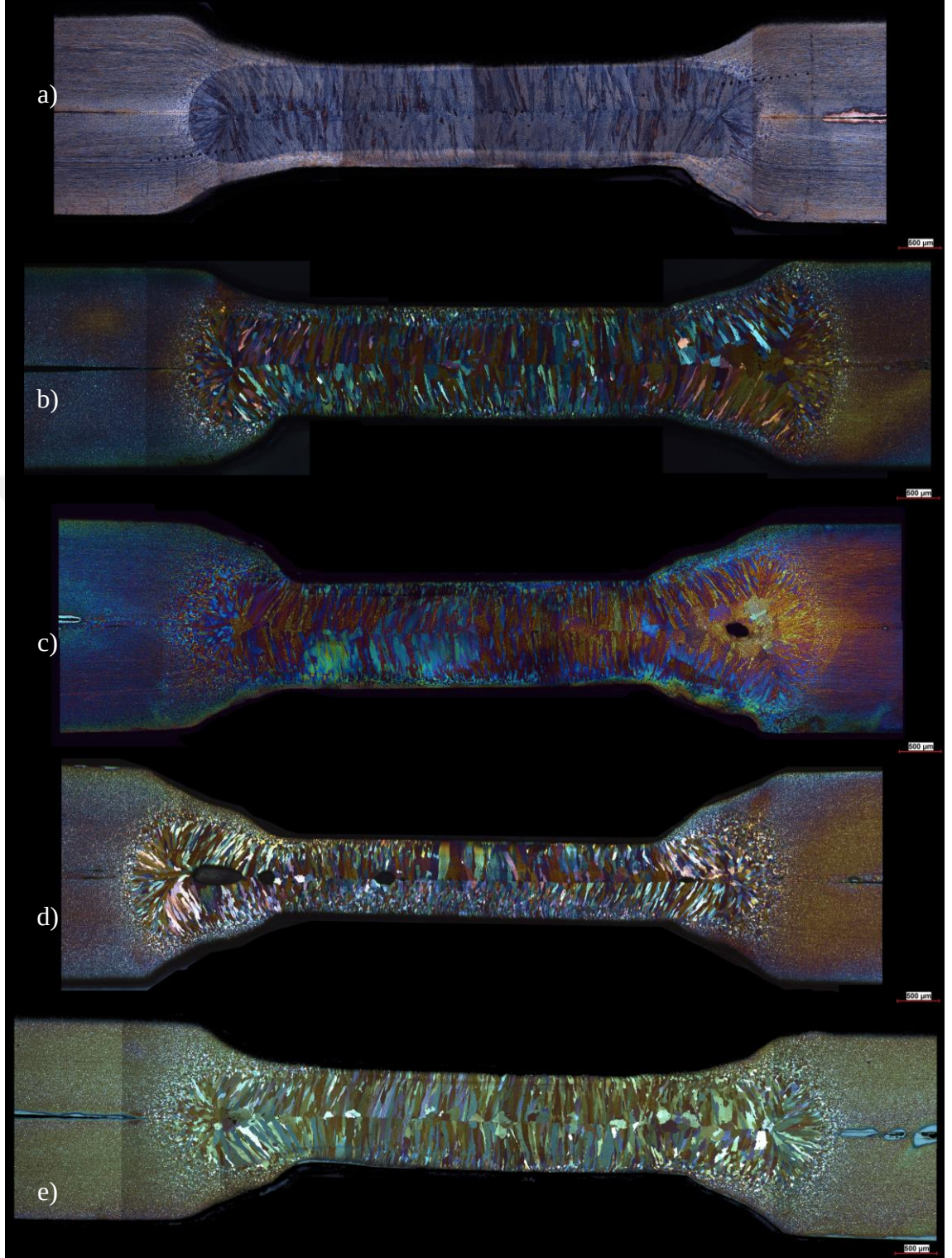
Kaynak parametrelerinin kaynaklı numunelerin makro yapılarına etkileri Şekil 4.21-4.23’te gösterilmiştir. Kaynak parametrelerine bağlı olarak numunelerin makro yapılarında özellikle çökme miktarı ve makro kaynak hatası olan sıçratma boşluğu dikkat çekicidir. İleriki kısımlarda çökme miktarı sayısal verilerle analiz edilecektir. Sıçratma boşluklarına bakıldığında, yüksek kaynak akımında yüksek ısı girdisi ile meydana gelen aşırı sıçratmadan dolayı belirgin bir (erime bölgesinde malzeme kaybı ile oluşan) sıçratma boşluğu oluşmuştur (Şekil 4.21). Kaynak zamanı da benzer bir etkiye sahiptir

(Şekil 4.22). Artan kaynak zamanı ile ısı girdisi artışına bağlı olarak sıçratma boşluğu hata olasılığı da artmaktadır. Diğer taraftan, yüksek ısı girdisine sebep olan düşük elektrot kuvvetleri de bu makro kaynak hatasının oluşumunda rol oynamıştır (Şekil 4.23). Aynı zamanda, düşük elektrot kuvvetlerinin yeterli sıkımayı sağlayamamasından dolayı da hem erime bölgesinde sıçratma boşluğu oluşumu kolaylaşmış hem de yüzey bölgeler de çatlama ve sıçratma hataları meydana gelmiştir. Sonuç olarak; daha yüksek ısı girdisinde ve uygun olmayan elektrot kuvvetlerinde, erime bölgesindeki aşırı sıçratmadan dolayı bu makro hata oluşumunun meydana gelme olasılığı artmıştır. Ayrıca, erime bölgesinin üst ve alt kısımlarındaki erimeyen tabaka kalınlığı artan kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot kuvveti ile azalmıştır (Şekil 4.21-4.23). Diğer bir deyişle, daha yüksek kaynak akımlarında, daha yüksek kaynak zamanında ve daha yüksek elektrot kuvvetlerinde erime nüfuziyeti artmıştır.



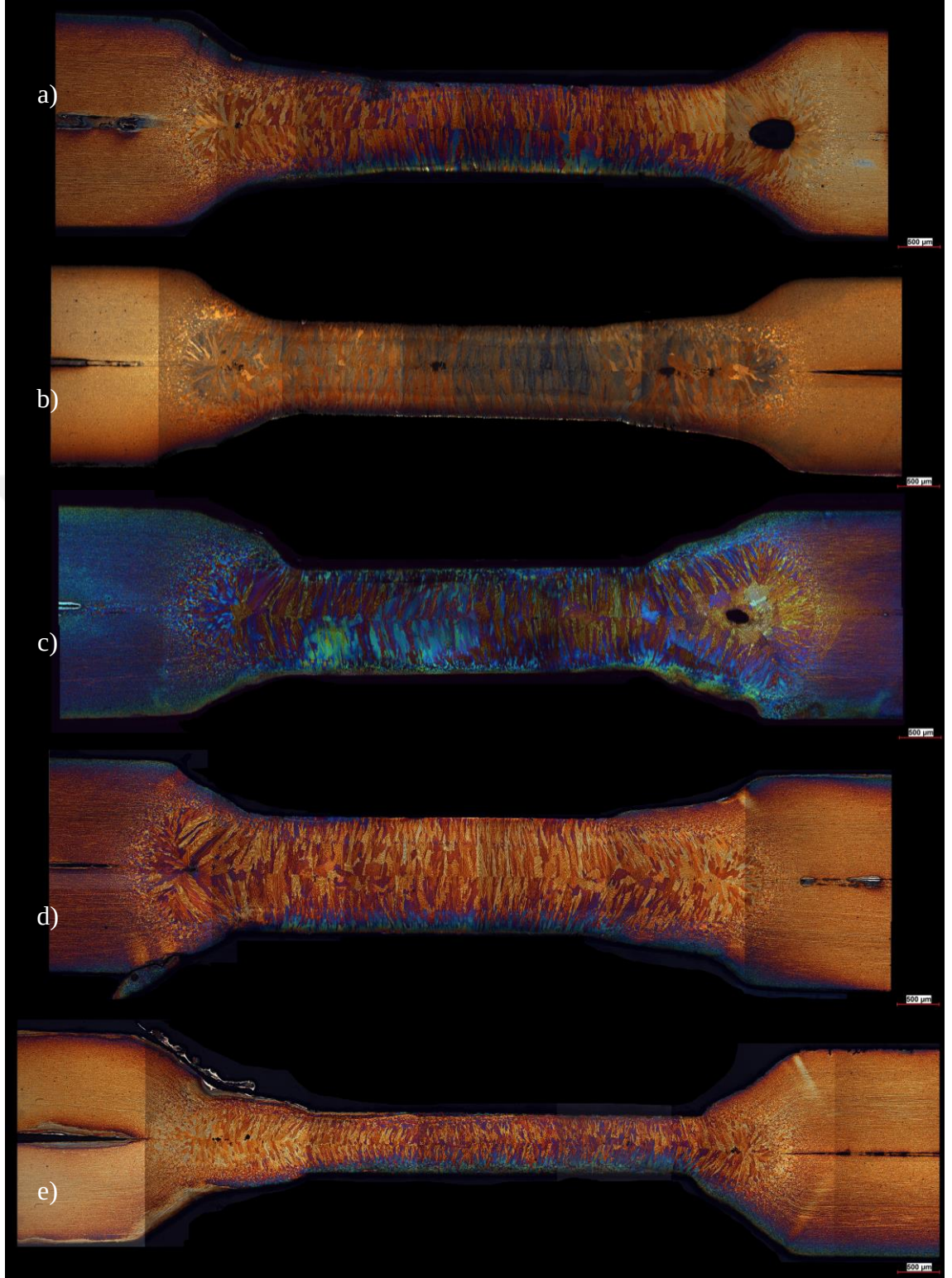
**Şekil 4.21.** Kaynak akımının makro yapıya etkisi: a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA, e) 12 kA (Deformasyonsuz B grubu)





**Şekil 4.22.** Kaynak zamanının makro yapıya etkisi: a) 200 ms, b) 250 ms, c) 300 ms, d) 350 ms, e) 400 ms (Deformasyonsuz B grubu)





**Şekil 4.23.** Elektrot kuvvetinin makro yapıya etkisi: a) 2,6 kN, b) 2,8 kN, c) 3 kN, d) 3,2 kN, e) 3,4 kN (Deformasyonsuz B grubu)

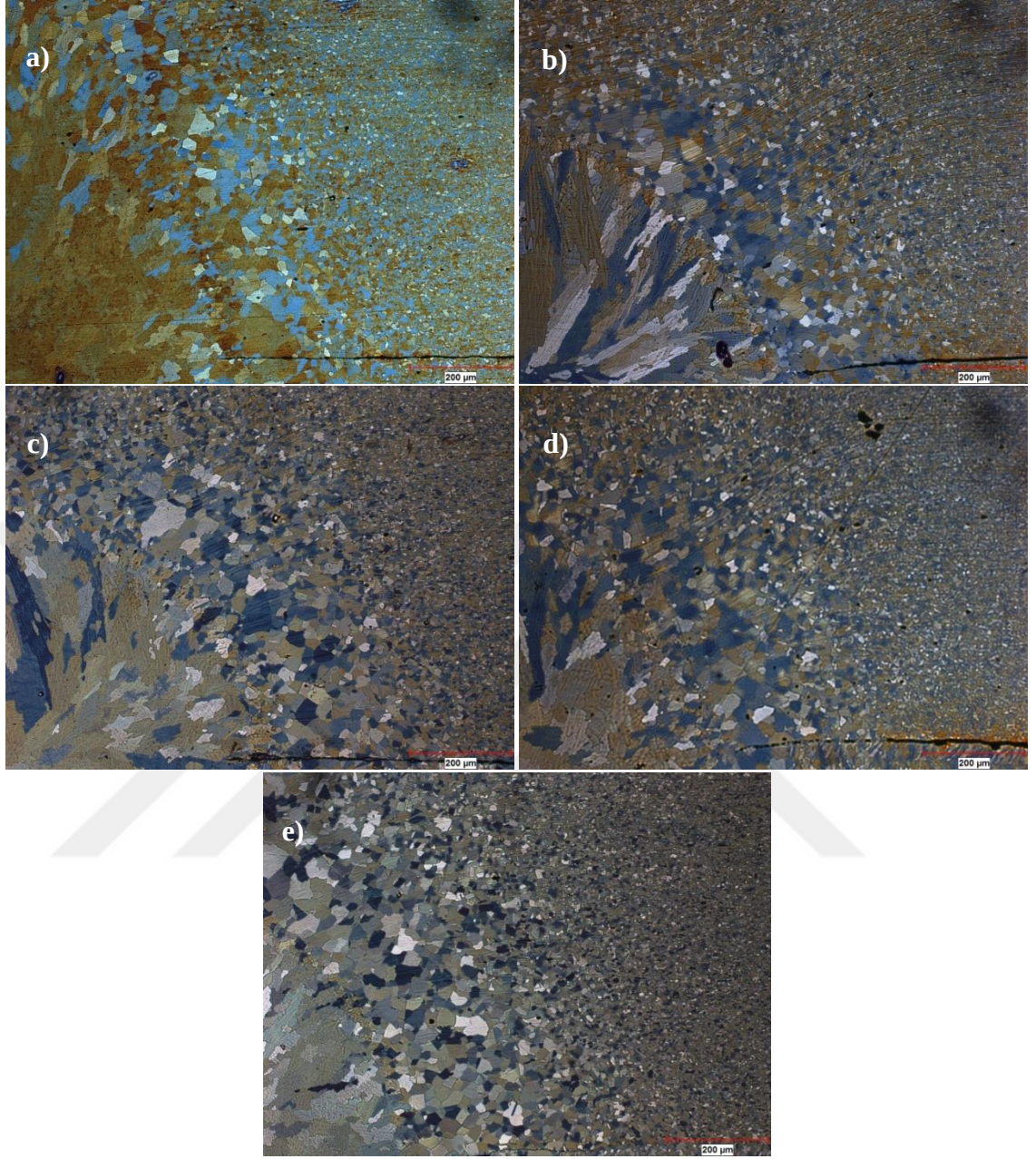
Kaynak parametrelerinin ITAB oluşumuna etkileri Şekil 4.24-4.26'da verilmiştir. Optik mikroskop incelemelerinde ITAB genişlikleri de ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.27'de verilmiştir.

Şekil 4.27'de a ve b'den görüleceği üzere ITAB genişliğinin kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile ısı girdisi artışına bağlı olarak artmıştır. ITAB genişliği ve kaynak akımı veya kaynak zamanı arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,80'nin üzerindedir.

Elektrot kuvveti ve ITAB genişliği arasında belirgin bir korelasyon elde edilememesine rağmen, düşük elektrot kuvvetlerinde ısı girdisinin daha fazla olmasına bağlı olarak genel itibariyle ITAB genişliğinin daha fazla olduğu söylenebilir (4.27c). Elektrot kuvveti ve ITAB genişliği arasında belirgin bir korelasyon elde edilememesinin, bu parametrenin kaynak havuzu oluşumu ve ilerleyişine de etki ediyor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

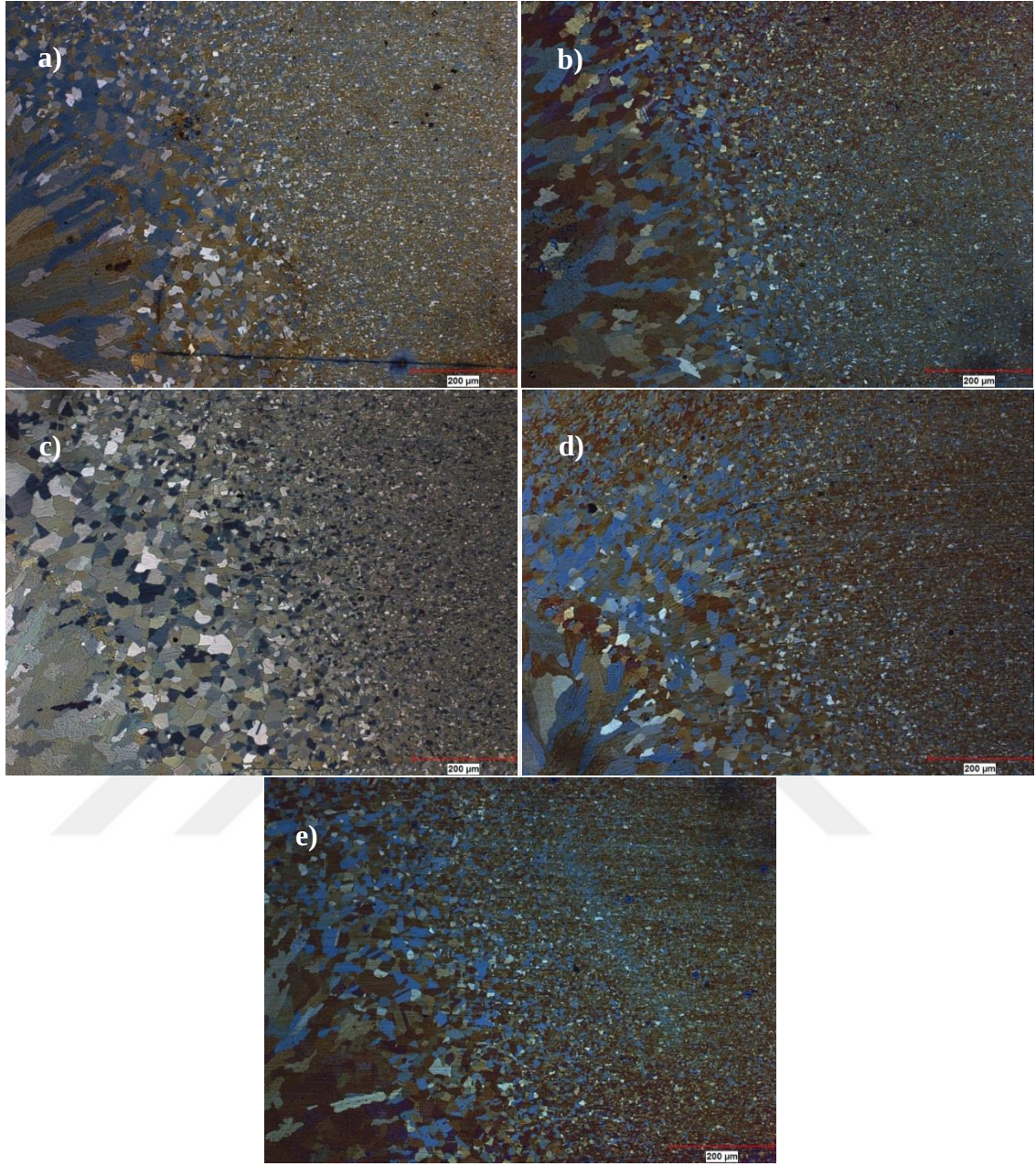
Isı girdisine bağlı olarak ITAB genişliği değişimi de Şekil 4.28'de verilmiştir. Isı girdisi artışı ile ITAB genişliği genel itibariyle artmaktadır. Ancak, ITAB genişliği ve ısı girdisi arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,64 civarında kalmıştır. Bu değer düşük olmasının, özellikle elektrot kuvvetinden kaynaklı ısı girdisinin tam olarak tanımlanmamasıyla ilgili olduğu açıktır.





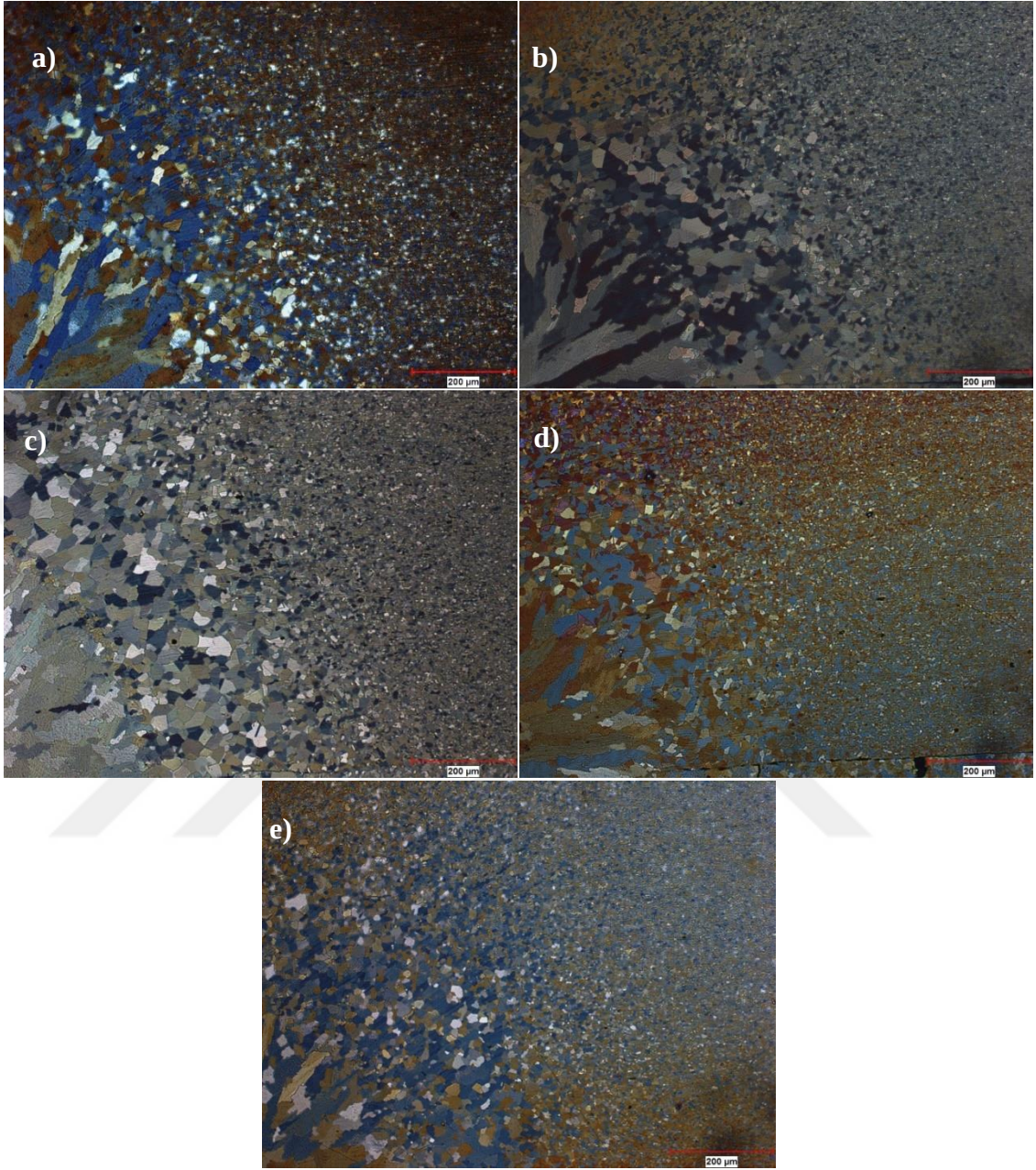
**Şekil 4.24.** Kaynak akımının ITAB oluşumuna etkisi: a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA, e) 12 kA (Büyütmeler x100) (Deformasyonsuz B grubu)



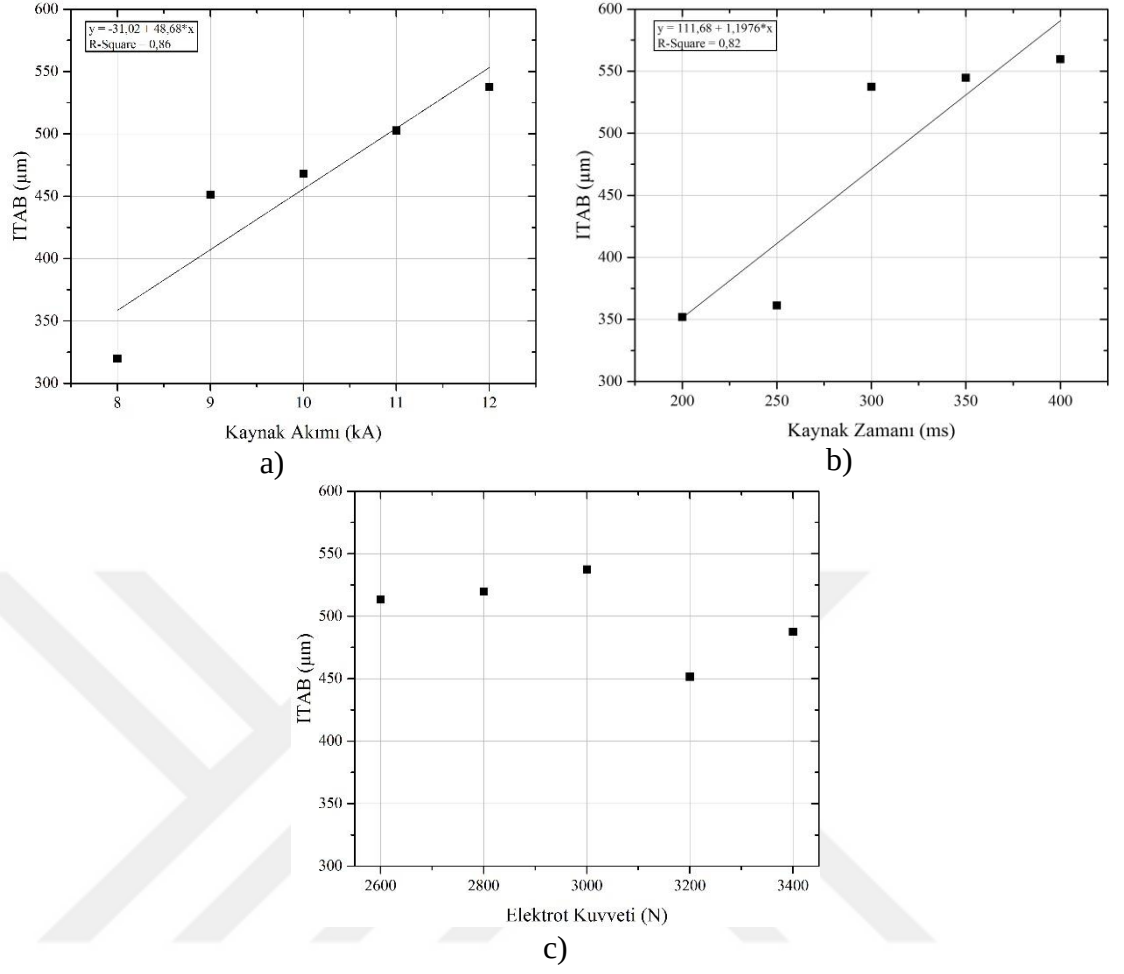


**Şekil 4.25.** Kaynak zamanının ITAB oluşumuna etkisi: a) 200 ms, b) 250 ms, c) 300 ms, d) 350 ms, e) 400 ms (Büyütmeler x100) (Deformasyonsuz B grubu)

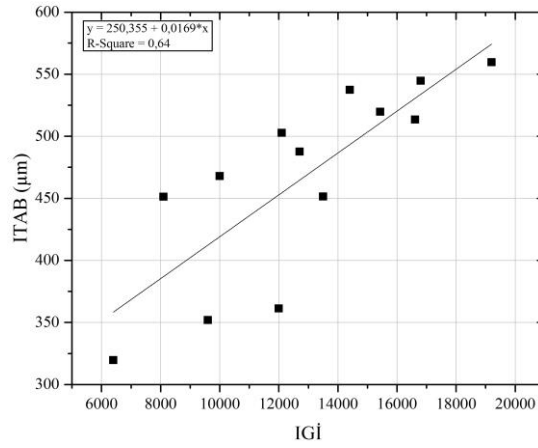




**Şekil 4.26.** Elektrot kuvvetinin ITAB oluşumuna etkisi: a) 2,6 kN, b) 2,8 kN, c) 3 kN, d) 3,2 kN, e) 3,4 kN (Büyütmeler x100) (Deformasyonsuz B grubu)

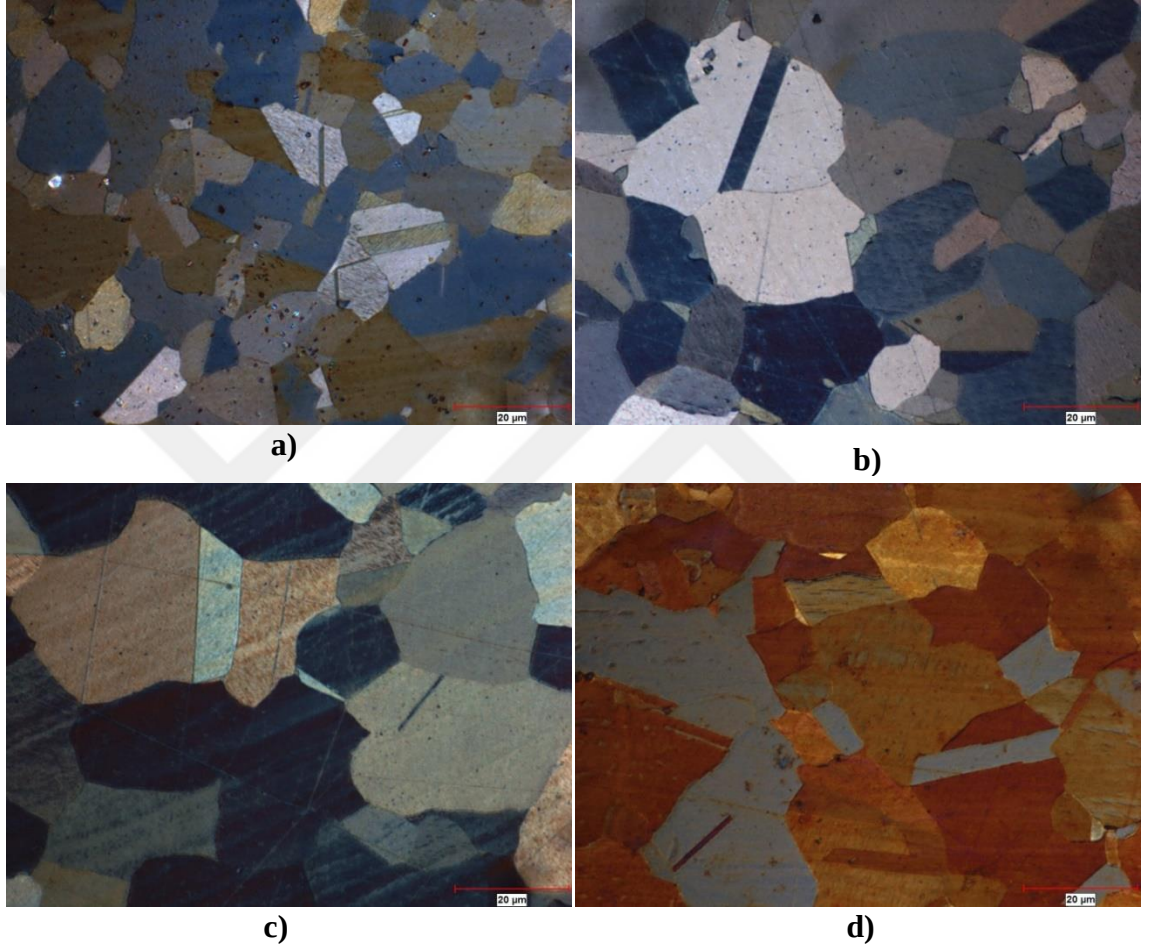


**Şekil 4.27.** ITAB genişliğinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu)



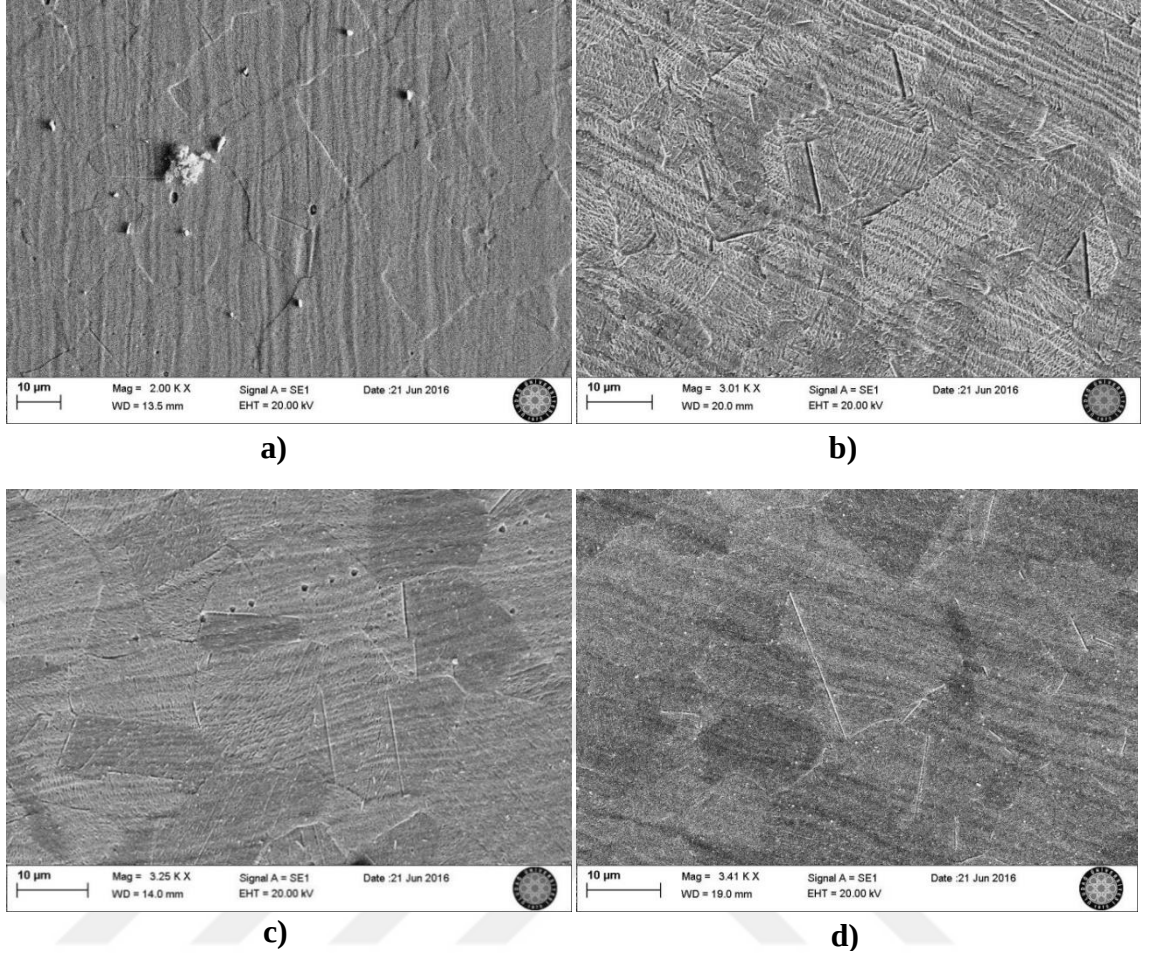
**Şekil 4.28.** ITAB genişliğinin ısı girdisi ile değişimi (Deformasyonsuz B grubu)

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş deformasyonsuz TWIP çeliklerinde ITAB mikro yapılarına bakıldığında, ısı girdisi artışıyla genel itibariyle tanelerin nispeten irileştiği ve tavlama ikizlerinin de kalınlıklarının nispeten arttığı söylenebilir (Şekil 4.29,4.30). Ancak, görüntülerden tavlama ikizlerinin sayısı ile ilgili net bir veri elde edilememiştir.



**Şekil 4.29.** ITAB mikro yapısının ısı girdisi ile değişimi (Optik Görüntüler) a) IGİ=9600 (Z1), b) IGİ=14400 (K3A5Z3), c) IGİ=15429 (K2), d) IGİ=19200 (Z5) (Büyütmeler x1000) (Deformasyonsuz B grubu)





**Şekil 4.30.** ITAB mikro yapısının ısı girdisi ile değişimi (SEM görüntüleri) a) IGİ=6400 (A1) (x2000), b) IGİ=9600 (Z1) (x3010), c) IGİ=14400 (K3A5Z3) (x3250), d) IGİ=19200 (Z5) (x3410) (Deformasyonsuz B grubu)

Şekil 4.31 ve 4.32'deki SEM-EBSD haritalamasından da ısı girdisi artışına bağlı olarak ITAB genişliği artışı, ITAB'daki tane irileşmesi ve tavlama ikiz kalınlıklarının arttığı daha net olarak görülebilmektedir. Ayrıca, ITAB'ın TM yönünde tavlama ikizlerini de içeren yeniden kristalleşme taneleri de görülebilmektedir.

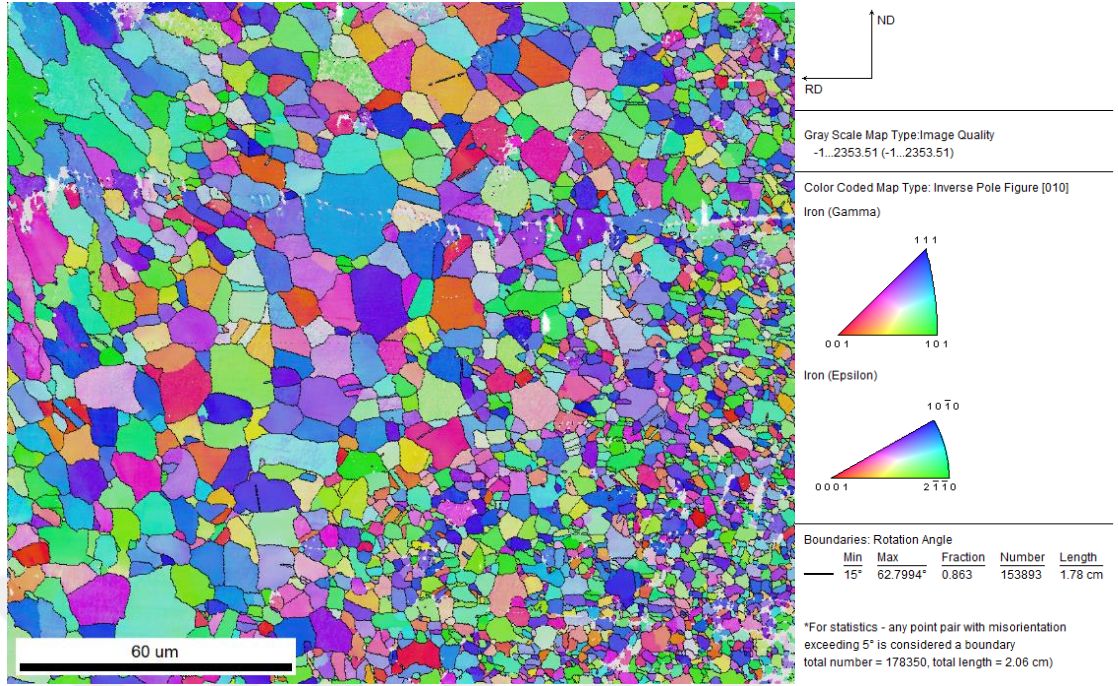
Numunelerin yönelim farkı açısı dağılımlarında, düşük açılı tane sınırları ( $\theta < 5^\circ$ ) oranının TM'ye göre daha yüksek olması düşük açılı tane sınırlarına sahip toparlanma (kendine gelen) ve yeniden kristalleşme tanelerinden kaynaklanmıştır (Şekil 4.31b ve Şekil 4.32b). Bunun tamamen ısı girdisi ile alakalı olduğu açıktır. Ayrıca, numunelerin yönelim farkı açısı dağılımlarında yüksek açılı tane sınırları ( $60^\circ < 111^\circ$ ) oranı ve çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımlarında  $\Sigma 3$  CSL tane sınırları oranının TM'ye göre düşük



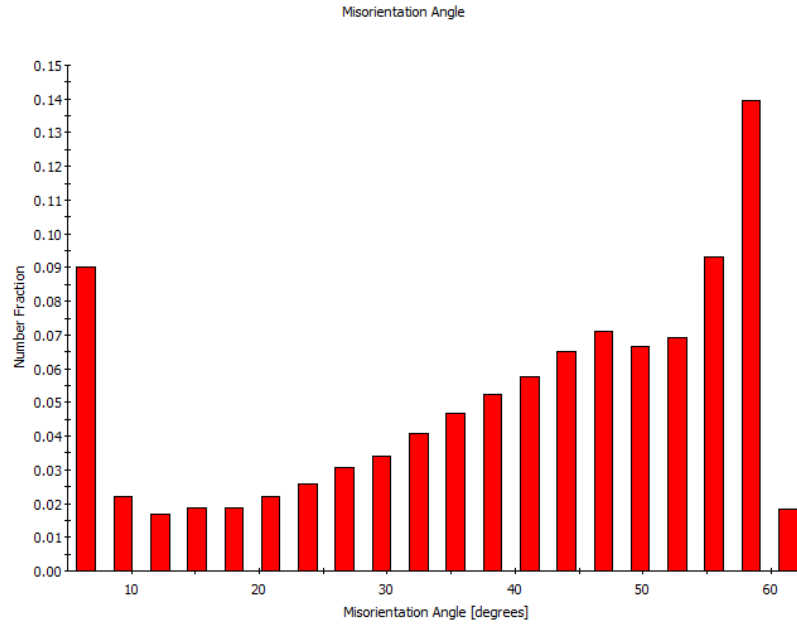
olması, TM'ye göre yüksek açılı yeniden kristalleşme tanelerinin azaldığının göstergesidir. Bu hususta,  $\Sigma 3$  CSL tane sınırlarının daha ziyade tavlama ikizleri ilgili olma olasılıkları çok daha yüksek bir olasılıktır.

Yüksek ısı girdisine sahip K3A5Z3 numunesinde  $\Sigma 3$  CSL tane sınırları oranı %21,07 iken, düşük ısı girdisine sahip A1 numunesinde bu oran %19,40'a düşmüştür.  $60^\circ < 111 \rangle$  yüksek açılı tane sınırlarına karşılık gelen  $\Sigma 3$  CSL tane sınırları da tavlama ikiz sınırları ısı girdisi artışı ile artmıştır (Şekil 4.31 ve 4.32). Bu oran içerisinde yüksek açılı tane sınırlarına sahip yeniden kristalleşme tanelerinin olduğunu da unutmamak gerekir.

Ancak, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de SEM-EBSD haritalamalarında da görüldüğü gibi daha fazla yeniden kristalleşme tanesi içeren daha düşük ısı girdisine sahip A1 kodlu numunede daha fazla miktarda yüksek açılı tane sınırlarına sahip yeniden kristalleşme tanesi olma olasılığı daha yüksektir. Buna istinaden de, daha yüksek ısı girdisine sahip K3A5Z3 kodlu numunesinin belirtilen değerlerden daha yüksek miktarda tavlama ikiz sınırlarına sahip olacağı açıktır. Bunun da, tavlama ikizlerinin yoğunluğunun artmasından ziyade ısı girdisi artışıyla ITAB'daki tane irileşmesine istinaden tavlama ikiz boylarının artması ilgili olduğu sonucu çıkarılabilir. Nitekim, SEM-EBSD haritalamasından da görüldüğü gibi ısı girdisi artışına bağlı olarak tavlama ikiz yoğunluğunun artmasına ilişkin net bir şey söylemek mümkün değildir (Şekil 4.31a ve 4.32a).

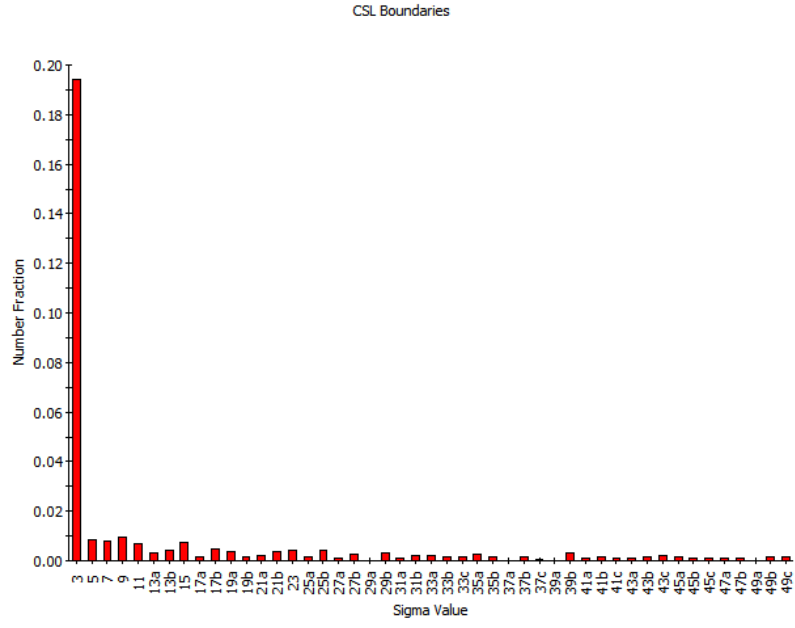


a)



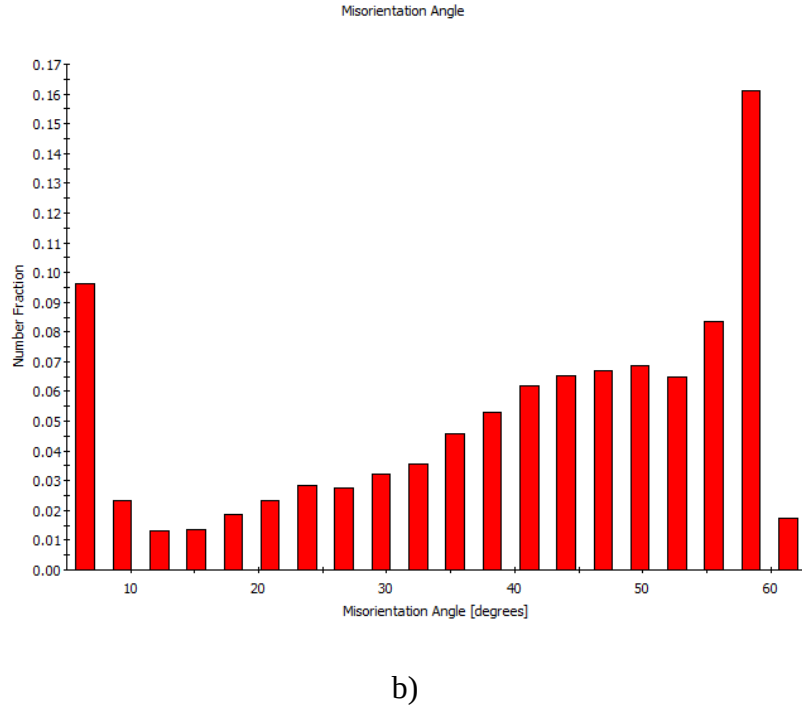
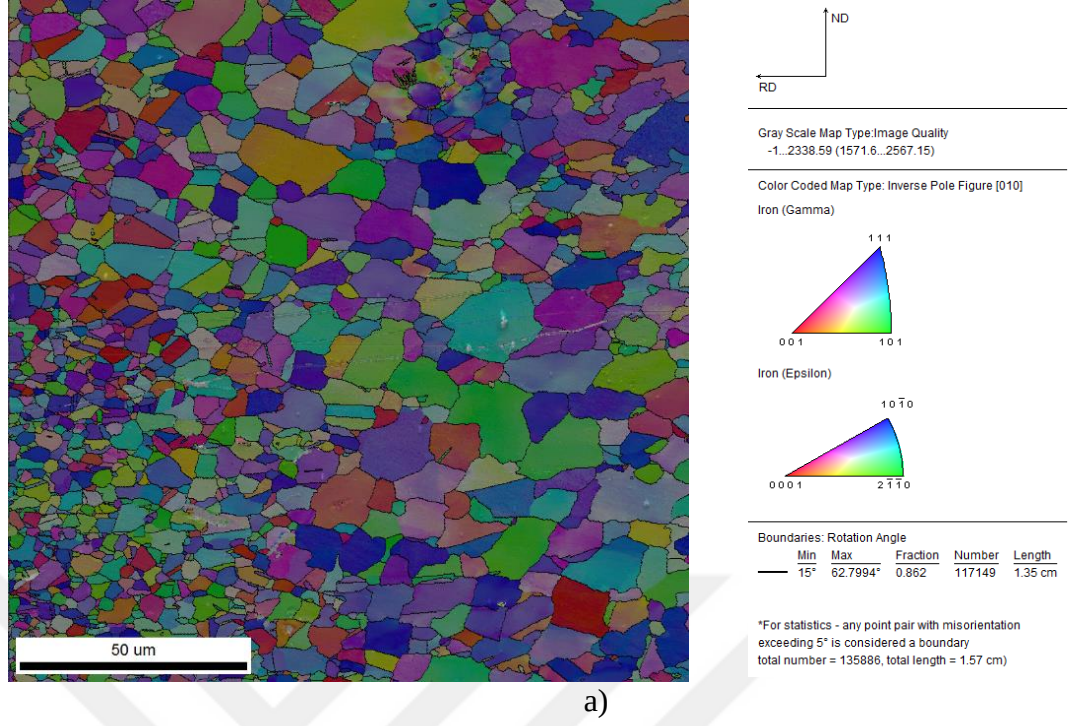
b)

**Şekil 4.31.** A1 kodlu numunenin ( $IGI=6400$ ) ITAB mikro yapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı

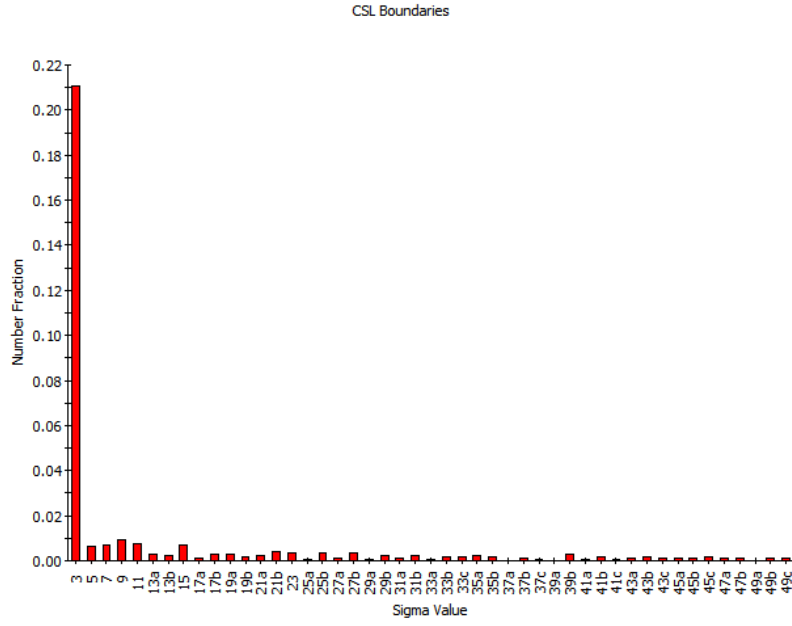


c)

**Şekil 4.31.** A1 kodlu numunenin (IGİ=6400) ITAB mikro yapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)



**Şekil 4.32.** K3A5Z3 kodlu numunenin ( $IGI=14400$ ) ITAB mikro yapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı

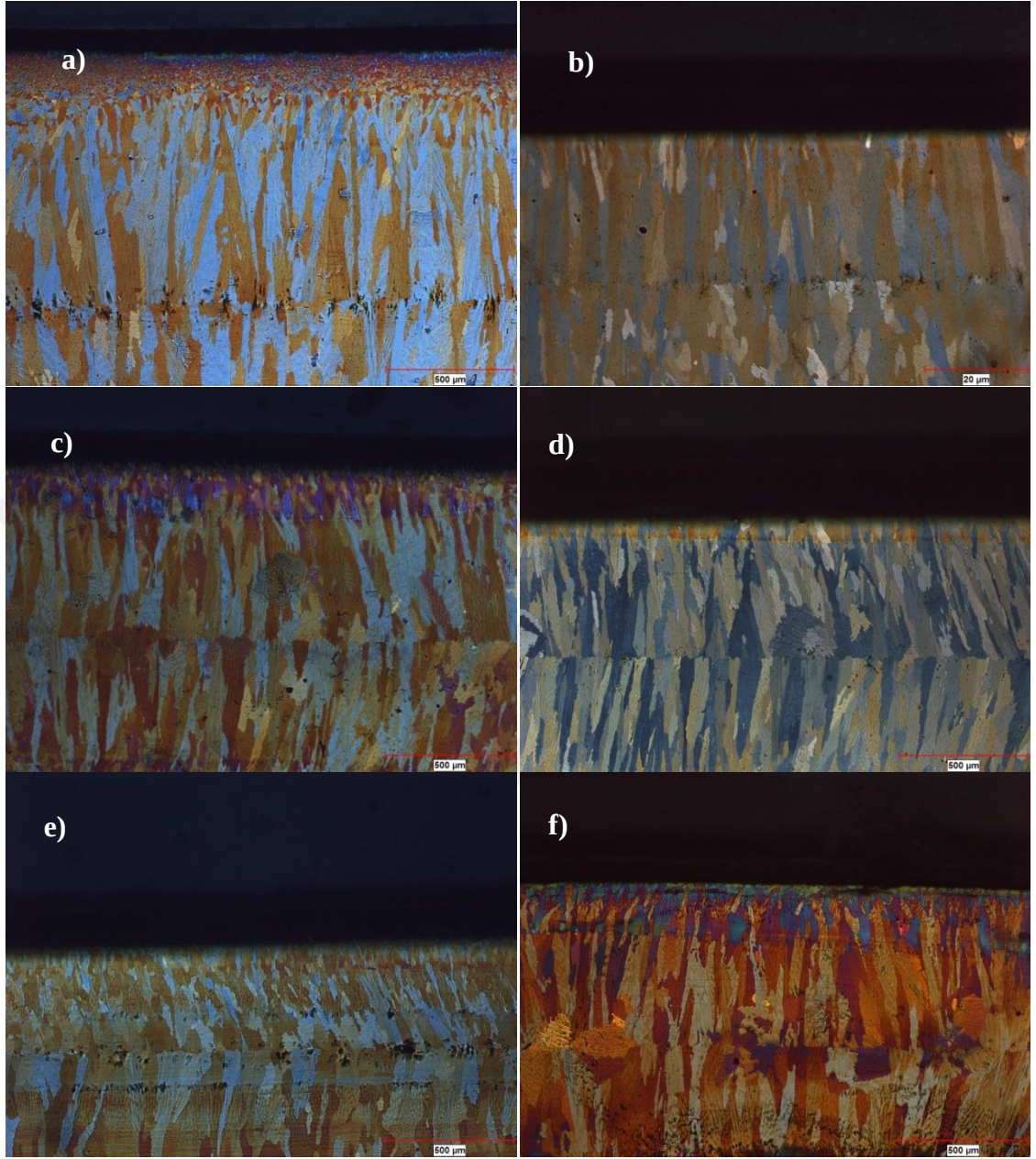


c)

**Şekil 4.32.** K3A5Z3 kodlu numunenin (IGİ=14400) ITAB mikro yapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)

EB mikro yapılarında ise, ısı girdisi artışıyla kaynak merkezi civarında eş eksenli dendritik yapıların ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 4.33). Bu durum, daha yüksek ısı girdisinin daha düşük soğuma hızına sebep olmasıyla ilişkilendirilebilir (kaynak merkezi civarında yüksek ısı girdisinden dolayı ısının daha yavaş çekilmesinden dolayı).



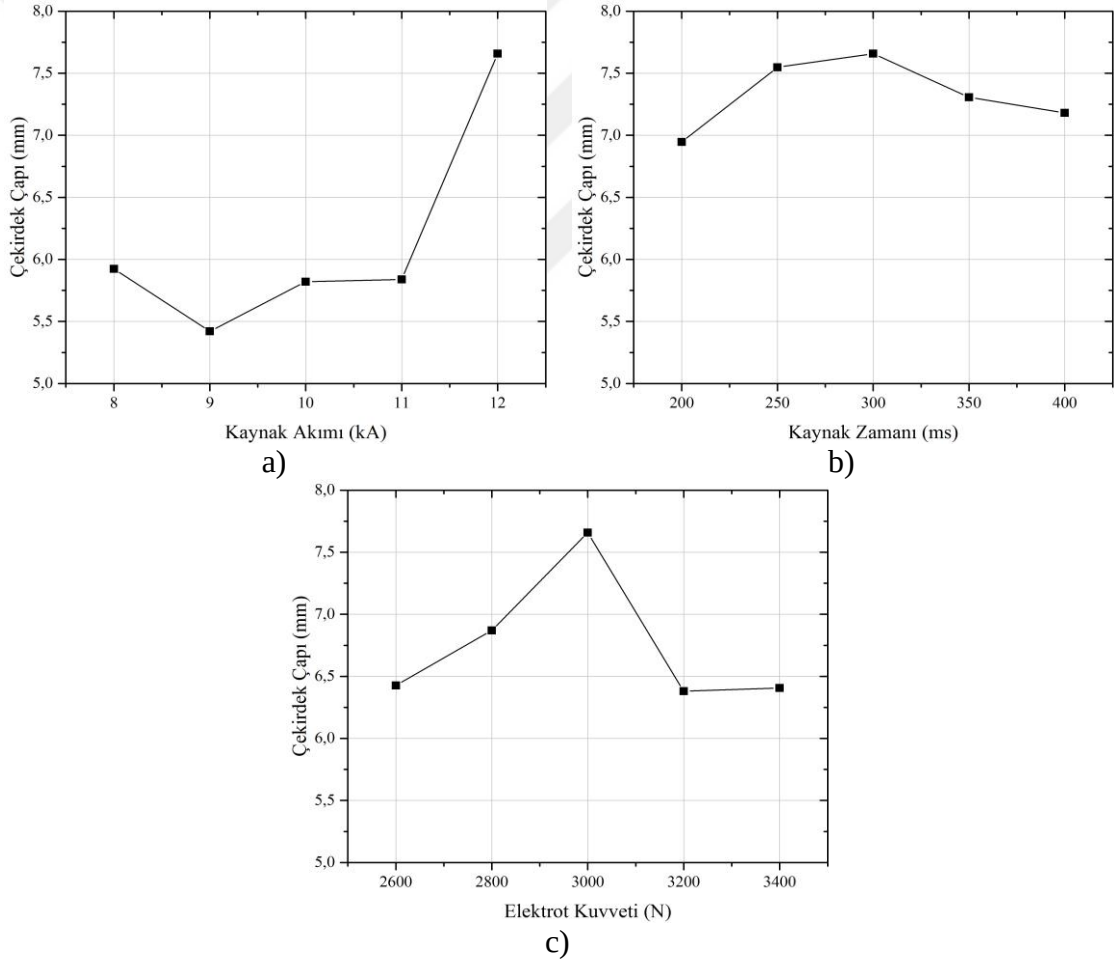


**Şekil 4.33.** EB mikro yapısının ısı girdisi ile değişimi (Optik görüntüleri): a) IGİ=6400 (A1); b) IGİ=9600 (Z1); c) IGİ=12000 (Z2); d) IGİ=14400 (K3A5Z3); e) IGİ=16800 (Z4); f) IGİ=19200 (Z5) (Büyütmeler x50)

Çekirdek çapı, mekanik özellikler üzerinde son derece etkili parametrelerden biridir. Kaynak parametreleri ile çekirdek çapı arasındaki ilişki Şekil 4.34'te verilmiştir. 11 kA'lık kaynak akımına kadar, çekirdek çapı nispeten dar bir aralıkta değişmektedir. Maksimum çekirdek çapı değeri artan ısı girdisine bağlı olarak maksimum kaynak akımında elde edilmiştir.

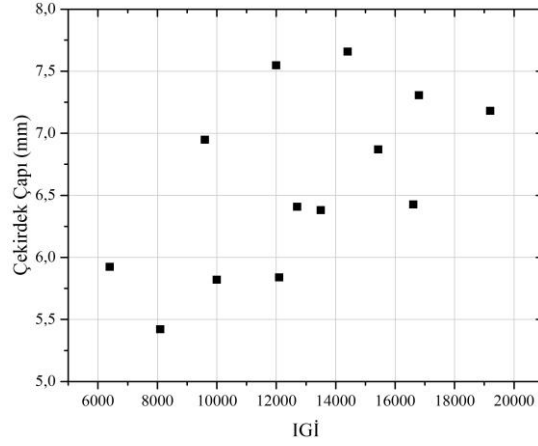
Kaynak zamanının çekirdek çapı üzerindeki etkisine bakıldığında, 300 ms kaynak zamanına kadar çekirdek çapı değeri artan kaynak zamanı ile ısı girdisi artışına bağlı olarak artmıştır. Ancak, sonrasında, artan kaynak zamanı ile daha da artan ısı girdisine bağlı olarak aşırı sıçratmadan dolayı çekirdek çapı değeri azalmıştır.

Diğer taraftan, 3 kN'luk elektrot kuvvetine kadar çekirdek çapı değeri artan elektrot kuvveti ile artmıştır. Bu artış, elektrot kuvvetindeki artış ile ısı girdisi düşüşüne bağlı olarak sıçratmanın azalmasına bağlanabilir. Sonrasında ise, daha da artan elektrot kuvveti ile daha da düşük ısı girdisine bağlı olarak çekirdek çapı değeri azalmıştır. Isı girdisi ile çekirdek çapı arasındaki ilişki de Şekil 4.35'te verilmiştir. Genel itibariyle, ısı girdisi artışı ile çekirdek çapı artma eğilimindedir.



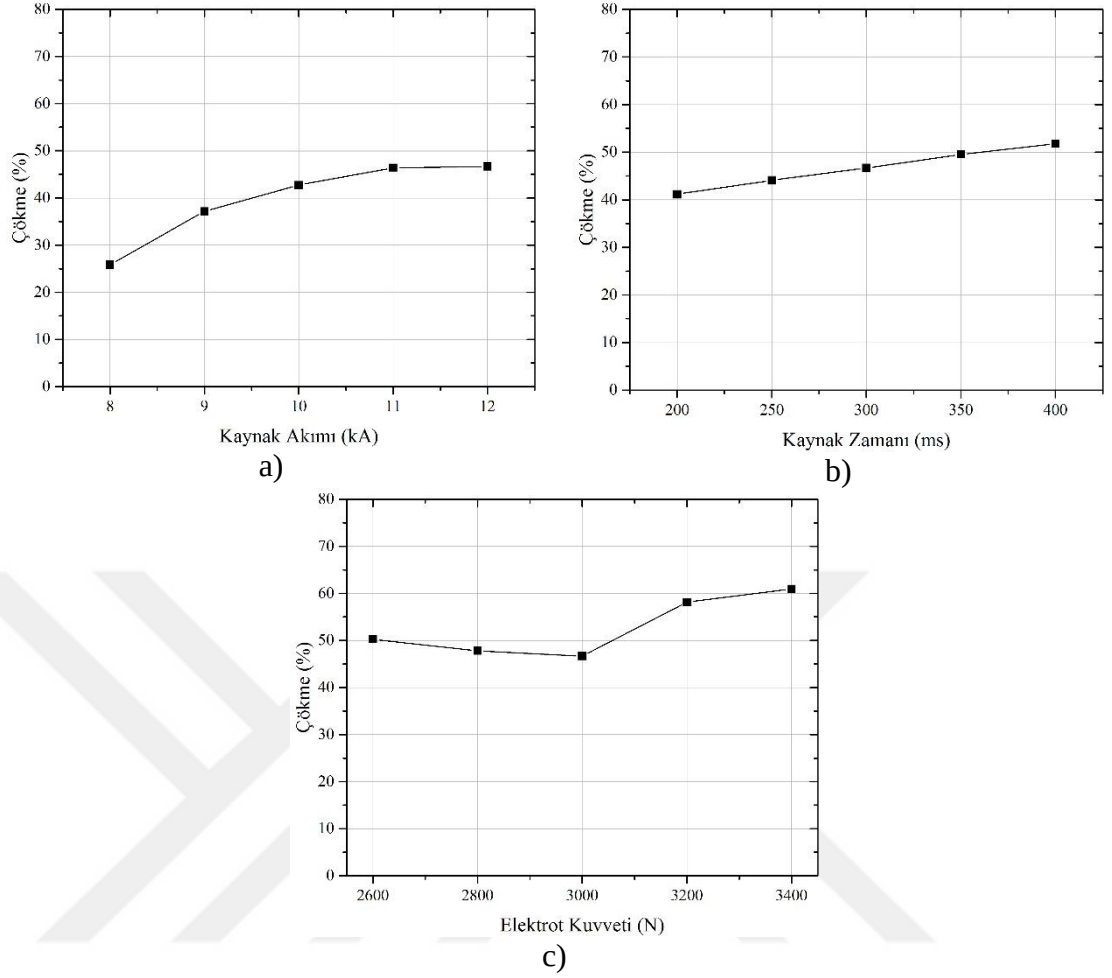
**Şekil 4.34.** Çekirdek çapının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu)





**Şekil 4.35.** Çekirdek çapının ısı girdisi ile değişimi (Deformasyonsuz B grubu)

Kaynak parametreleri ve çökme miktarı arasındaki ilişki ise Şekil 4.36’da verilmiştir. Kaynaklı numunelerin çökme miktarı, artan kaynak akımı ve kaynak zamanına bağlı olarak artmıştır. Bu artış, daha yüksek ısı girdisiyle artmış olan sıçratma ile ilgilidir. Özellikle, çökme miktarındaki artış kaynak zamanına bağlı olarak lineer şekilde gerçekleşmiştir. Diğer taraftan, elektrot kuvvetinin 3 kN değerine kadar, artan elektrot kuvveti ile azalan ısı girdisine bağlı olarak çökme miktarı azalmıştır. Sonrasında, artan elektrot kuvveti ile daha yüksek sıkma kuvvetinden dolayı çökme miktarı artmıştır.

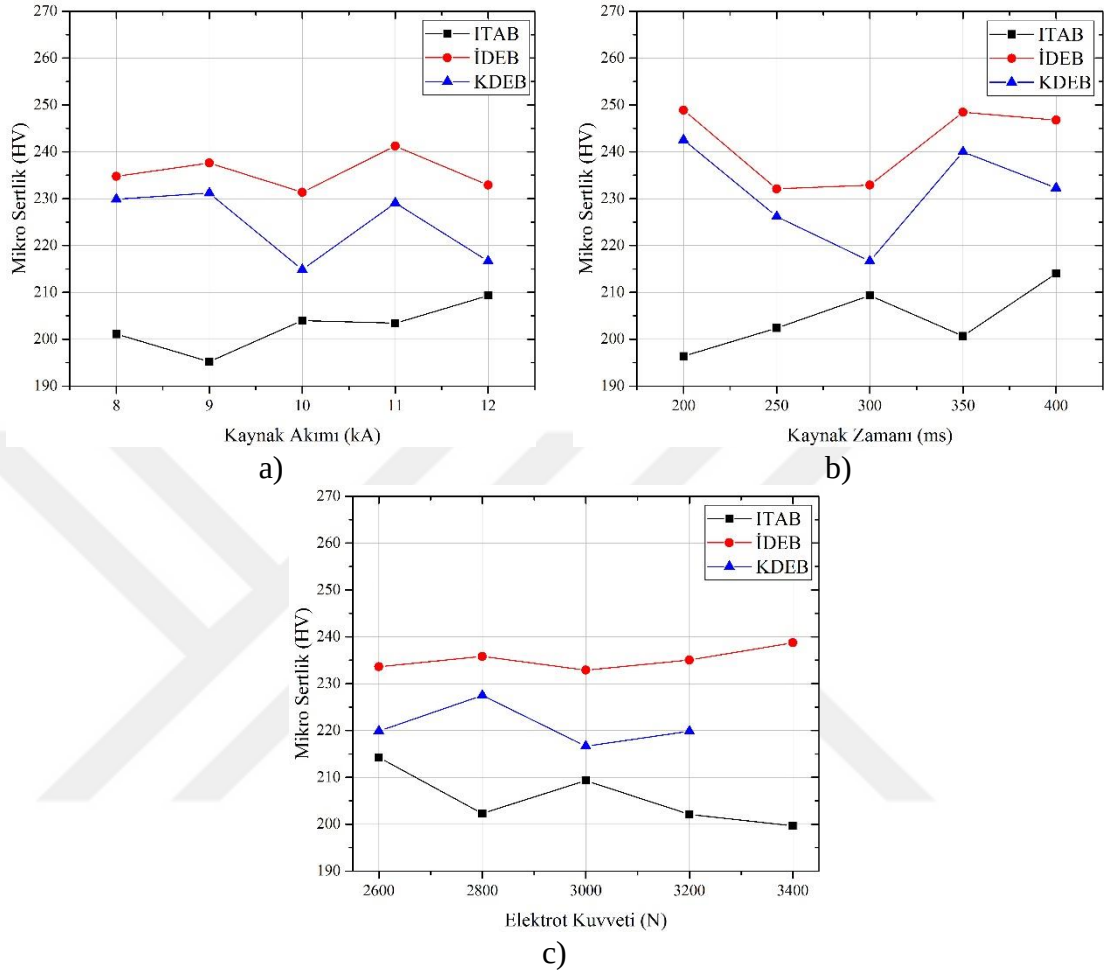


**Şekil 4.36.** Çökme miktarının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu)

#### 4.3.2. Mikro sertlik ölçümleri

Çalışmada kullanılan deformasyonsuz TWIP çeliklerinin temel malzeme mikro sertlik değeri ortalama olarak 260 HV<sub>0.2</sub> bulunmuştur. Sertlik ölçümleri sonucunda, genel olarak kaynak bölgesi sertlik değerleri temel malzeme sertlik değerinden daha düşük kalmıştır (Şekil 4.37). En düşük sertlik değerleri tüm numunelerde ITAB’da gözlenmiştir. ITAB sertliği, kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile bir miktar artmaktadır. Diğer taraftan, elektrot kuvveti artışı ile ITAB sertliği düşmektedir. ITAB’daki bu sertlik artışının, ısı girdisi artışıyla ilgili olduğu açıktır. Ancak, bu sertlik artışı mekanik özellikler açısından önemli bir artış olarak görülmemelidir. İDEB sertliği KDEB sertliğinden her zaman daha yüksek değerlerdedir. Ayrıca, en yüksek elektrot kuvvetinde KDEB gözlenmediğinden sertlik ölçümü yapılmamıştır. Bu bölgenin gözlenmemesinin sebebi olarak, yüksek

elektrot kuvvetinde çökme miktarının artışı gösterilebilir. Erime bölgesi sertliği ile kaynak parametreleri arasında herhangi bir ilişki elde edilememiştir.



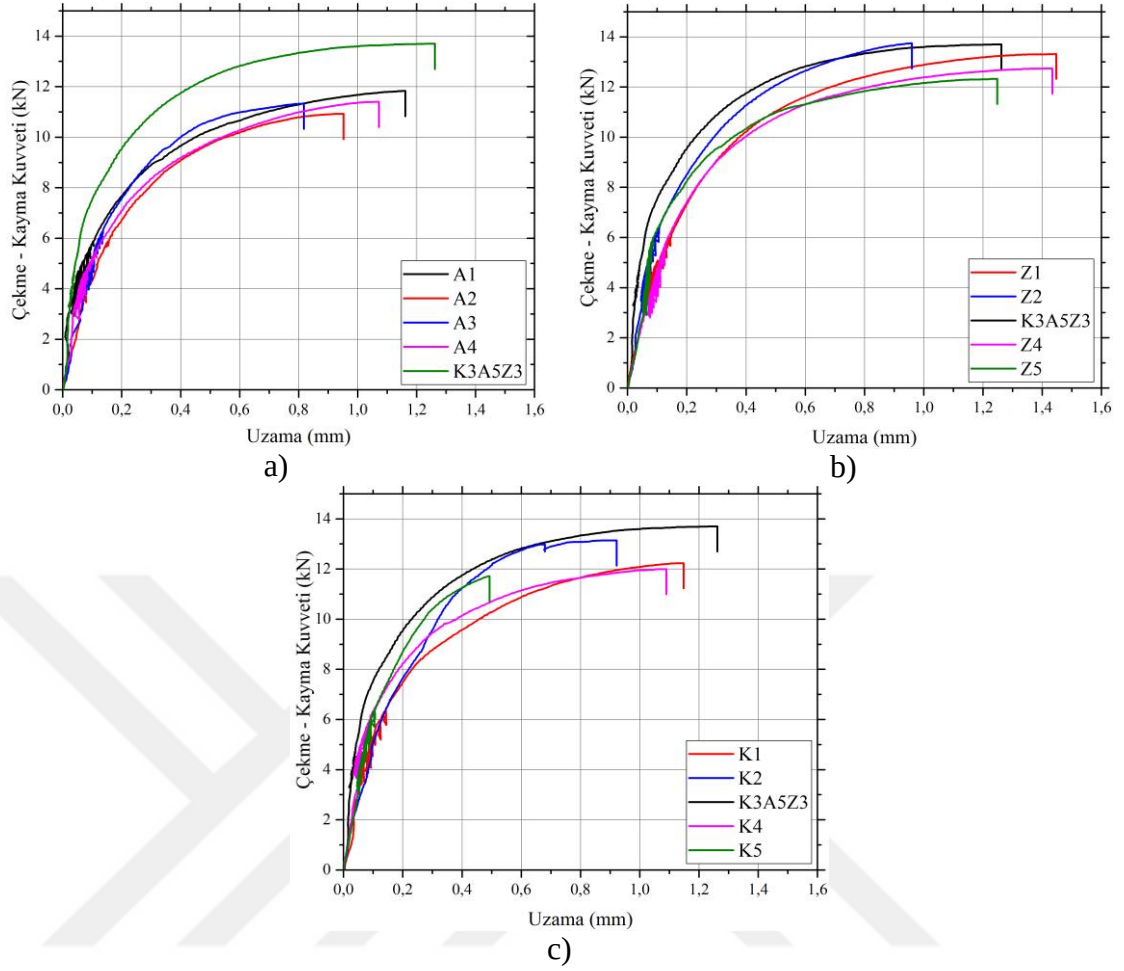
**Şekil 4.37.** Kaynak bölgesi sertlik değerlerinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti. (İDEB: İnce Dendritik Erime Bölgesi; KDEB: Kaba Dendritik Erime Bölgesi) (Deformasyonsuz B grubu)

#### 4.3.3. Çekme testleri

Kaynaklı numunelerin çekme testlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8’de verilmiştir. Ayrıca, kaynaklı numunelerin çekme eğrileri de Şekil 4.38’de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Çekme-kayma test sonuçları (Deformasyonsuz B grubu)

| Numune Kodu | Elektrot Kuvveti (N) | Kaynak Akımı (kA) | Kaynak Zamanı (ms) | İGİ   | Çekme-kayma kuvveti [kN] | SS   |
|-------------|----------------------|-------------------|--------------------|-------|--------------------------|------|
| Z1          | 3000                 | 12                | 200                | 9600  | 13,18                    | 0,46 |
| Z2          | 3000                 | 12                | 250                | 12000 | 13,74                    | 0,24 |
| K3A5Z3      | 3000                 | 12                | 300                | 14400 | 13,72                    | 0,17 |
| Z4          | 3000                 | 12                | 350                | 16800 | 12,87                    | 0,37 |
| Z5          | 3000                 | 12                | 400                | 19200 | 12,12                    | 0,63 |
| K1          | 2600                 | 12                | 300                | 16615 | 12,29                    | 0,24 |
| K2          | 2800                 | 12                | 300                | 15429 | 13,17                    | 0,04 |
| K3A5Z3      | 3000                 | 12                | 300                | 14400 | 13,72                    | 0,17 |
| K4          | 3200                 | 12                | 300                | 13500 | 12,02                    | 0,40 |
| K5          | 3400                 | 12                | 300                | 12706 | 12,00                    | 0,47 |
| A1          | 3000                 | 8                 | 300                | 6400  | 11,83                    | 0,17 |
| A2          | 3000                 | 9                 | 300                | 8100  | 11,14                    | 0,40 |
| A3          | 3000                 | 10                | 300                | 10000 | 11,45                    | 0,59 |
| A4          | 3000                 | 11                | 300                | 12100 | 11,13                    | 0,50 |
| K3A5Z3      | 3000                 | 12                | 300                | 14400 | 13,72                    | 0,17 |



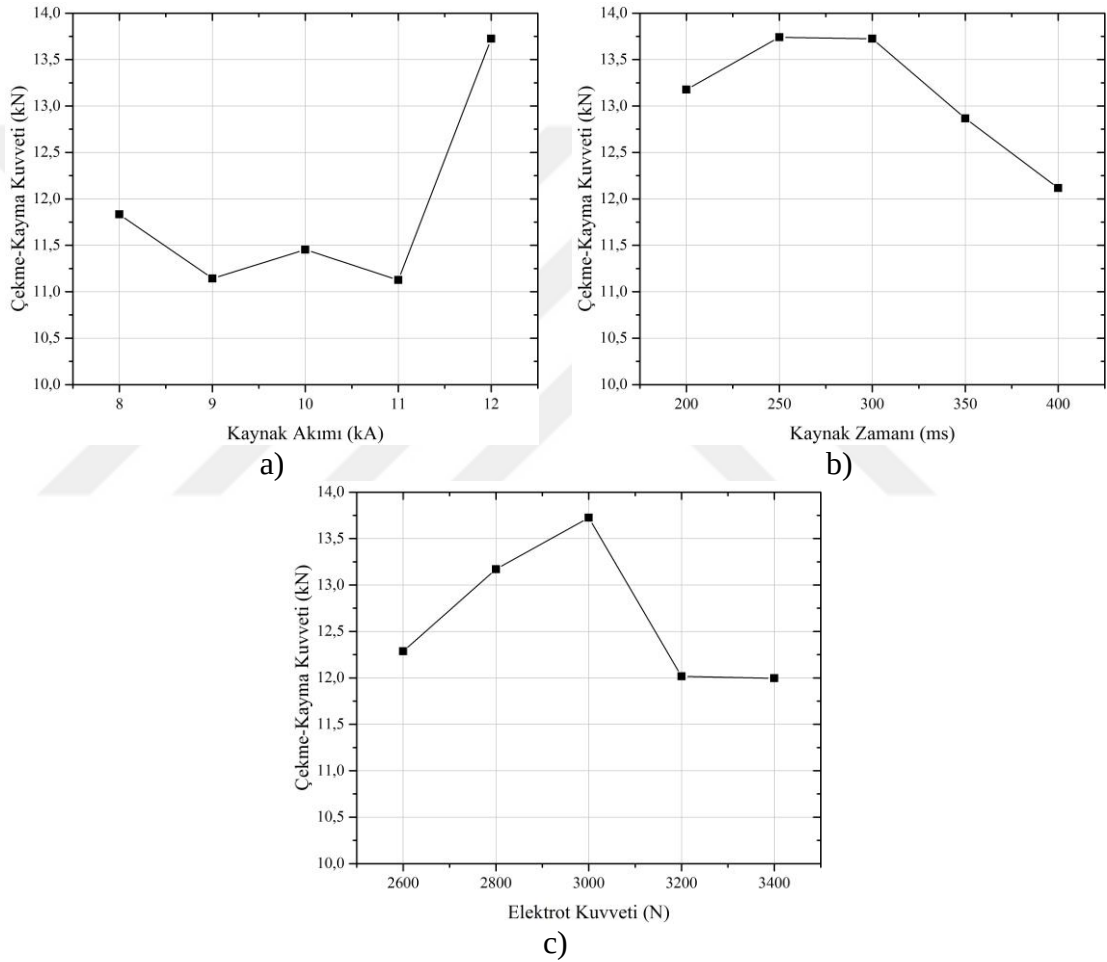
**Şekil 4.38.** Deformasyonsuz B grubu kaynaklı numunelerin çekme eğrileri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti

Kaynak parametrelerinin kaynaklı numunelerin çekme-kayma kuvvetine etkisi Şekil 4.39’da verilmiştir. Kaynak akımı 11 kA’ya kadar arttırıldığında, çekme-kayma kuvveti dar bir aralıkta değişmektedir (11,13-11,83 kN) (Şekil 4.39a). Maksimum çekme-kayma kuvveti 13,72 kN ile 12 kA’lık kaynak akımında elde edilmiştir. Çekme-kayma kuvvetindeki bu artış, çekirdek çapının artışı ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, söz konusu numunede makro sıçratma hatası olmasına rağmen oldukça yüksek kaynak mukavemetine sahip olmuştur. Buradan, sıçratma hatasının oluştuğu yer itibariyle (yüklemenin etkin olmadığı bölge) kaynak mukavemetine önemli bir etkisinin bulunmadığı yorumu yapılabilir.

Çekme-kayma kuvveti kaynak zamanı ile başlangıçta artmış ve 250-300 ms’de maksimum değerine ulaşmıştır (Şekil 4.39b). 300-400 ms kaynak zamanı aralığında ise, kaynak zamanı artışı ile çekme-kayma kuvveti azalmıştır. Bu azalışın sebebi olarak,

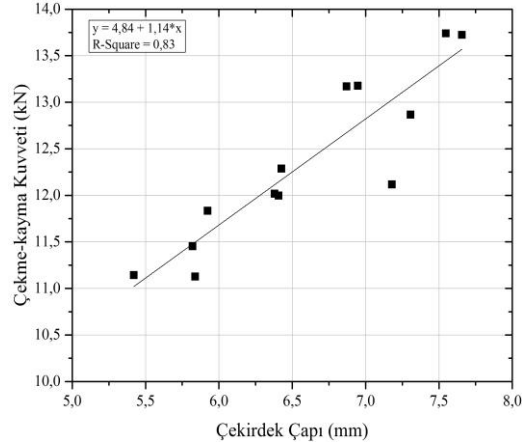
kaynak zamanının artışı ile çekirdek çapının azalışı ve çökme miktarının artması gösterilebilir.

Elektrot kuvveti 3 kN değerine kadar arttırıldığında kaynaklı numunelerin çekme-kayma kuvveti elektrot kuvveti artışı ile hemen hemen lineer bir şekilde artmaktadır (Şekil 4.39c). Sonrasında, çekme-kayma kuvveti elektrot kuvveti artışı ile azalmaktadır. Bu artış ve azalışın da, esas itibariyle çekirdek çapı ve çökme miktarı değerleri ile paralellik içerisinde olduğunu vurgulamak gerekir.



**Şekil 4.39.** Çekme-kayma kuvvetinin kaynak parametreleri ile değişimi: a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu)

Kaynaklı numunelerin çekme-kayma kuvvetleri ile çekirdek çapları arasındaki ilişkiye bakıldığında, lineere yakın bir ilişki tespit edilmiştir (Şekil 4.40). Kaynaklı numunelerde, daha yüksek çekirdek çapı ile daha yüksek değerlerde çekme-kayma kuvveti elde edilmiştir.



**Şekil 4.40.** Çekme-kayma kuvvetinin çekirdek çapı ile değişimi (Deformasyonsuz B grubu)

#### 4.3.4. Kırılma yüzeylerinin analizi

Çekme testlerine tabi tutulan bazı numunelerin kırılma makro fotoğrafları Şekil 4.41’de verilmiştir. Tüm numunelerdeki kırılmalar yüksek çekme-kayma kuvveti ile sonuçlanan çekirdek veren tipte (button pull-out failure mode) olmuştur. Bu da, kırılmaların esas itibariyle nispeten daha düşük sertlik değerlerine sahip ITAB boyunca gerçekleştiğini göstermektedir.

Kaynaklı deformasyonsuz TWIP çeliklerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.42-4.44 ve 4.47’de sıralanmıştır.





a)

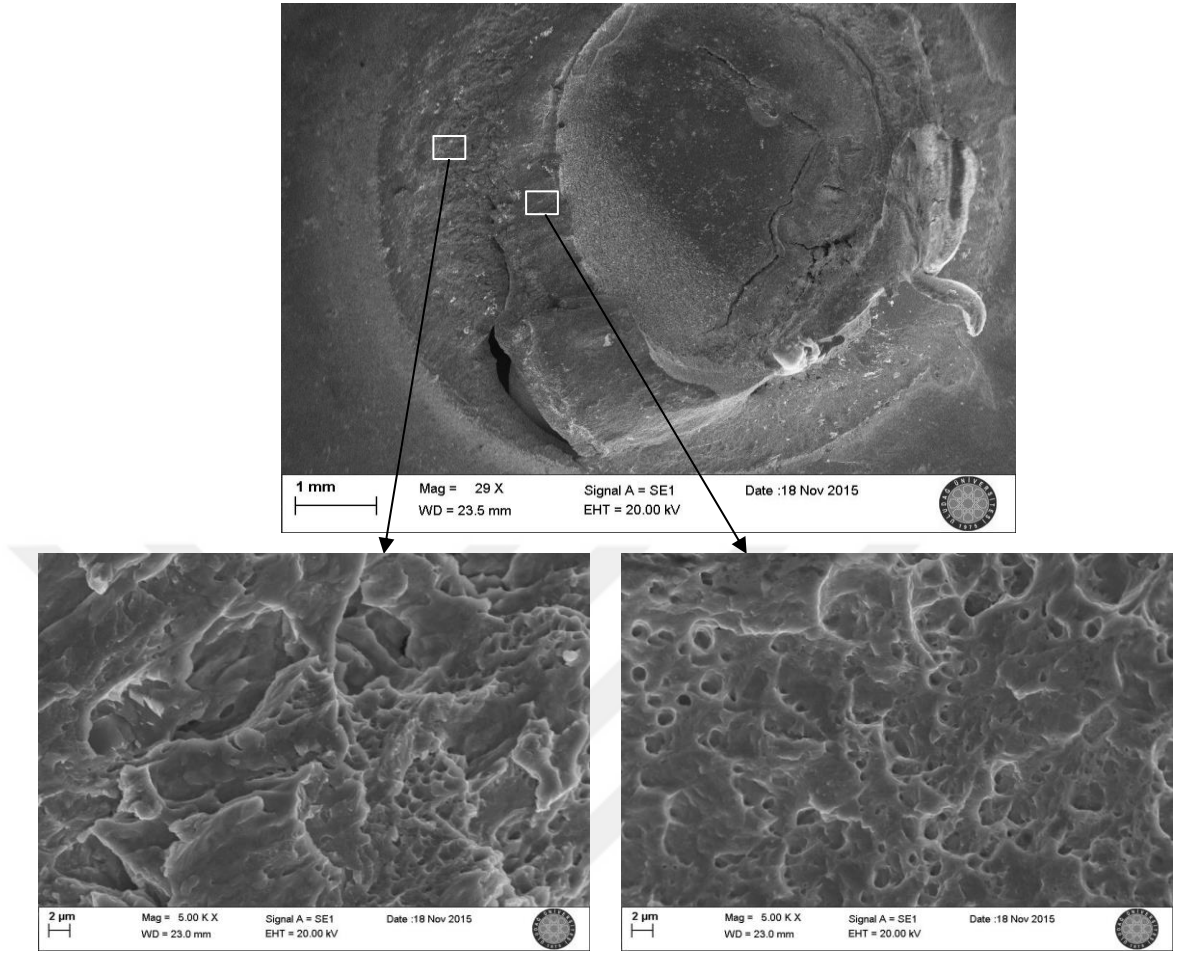


b)



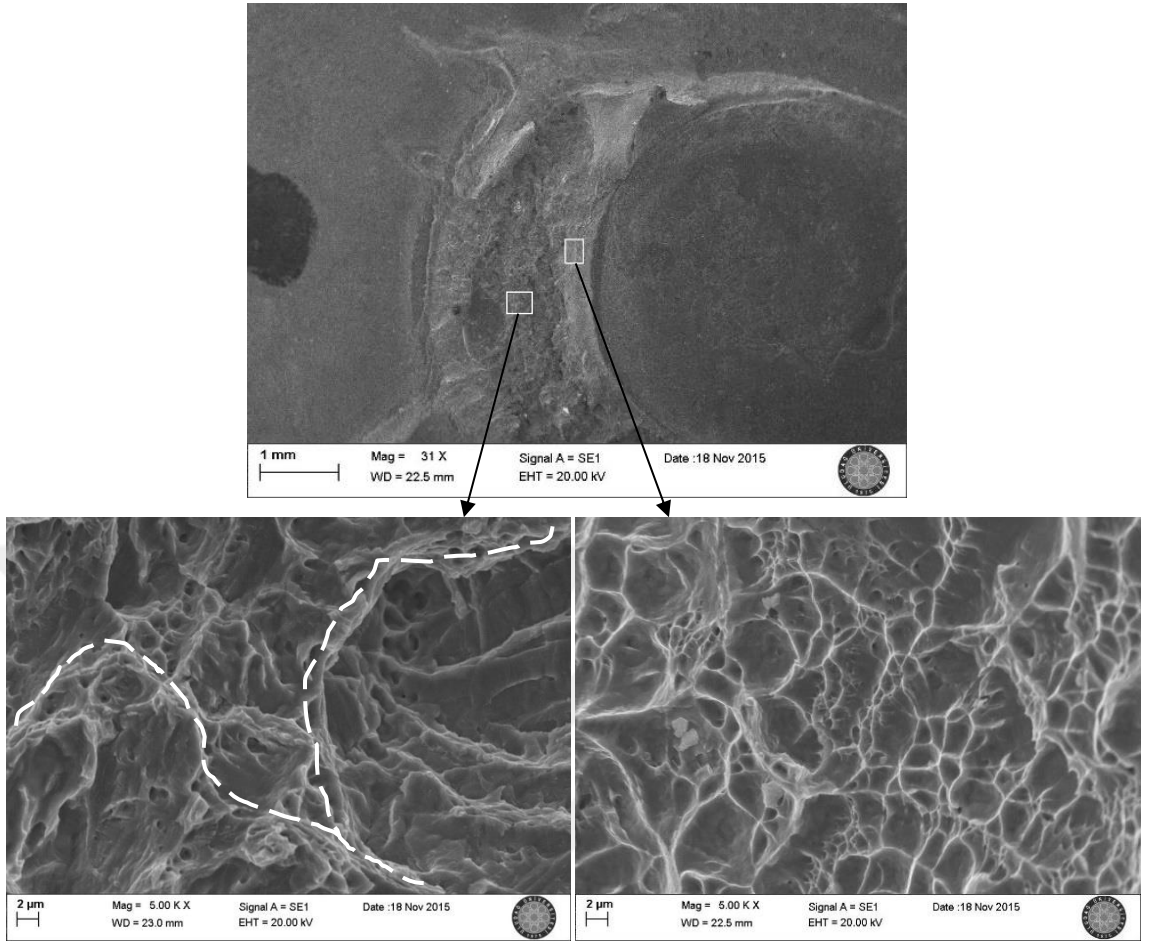
c)

**Şekil 4.41.** Çekme-kayma testi uygulanmış kaynaklı numuneler a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (Deformasyonsuz B grubu)



**Şekil 4.42.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (A4 numunesi)

Nispeten düşük çekme-kayma kuvveti veren A4 numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntülerinden, kaynak merkezine yakın ve kaynak kenarı (muhtemel ITAB civarı) kırılmaları ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Şekil 4.42). Merkez dışındaki ITAB civarında, kısmen sünek tarzda kırılma işaretlerini de içeren gevrek tarzda bir kırılmanın ön planda olduğu bir kırılma yüzeyi gözlenmektedir. Tane içi katmanlı kırılmaların da oldukça gevrek tarzda olduğunu vurgulamak gerekir. Diğer taraftan, kaynak merkezine yakın (çekirdek üzerinde) bölgedeki kırılma yüzeyi, ITAB civarındaki kırılma yüzeyine nazaran daha fazla sünek kırılma karakteristikleri (sığ mikro-çukurcuk oluşumları) içerse de nispeten gevrek tarzda bir kırılma yüzeyi olarak nitelendirilebilir.



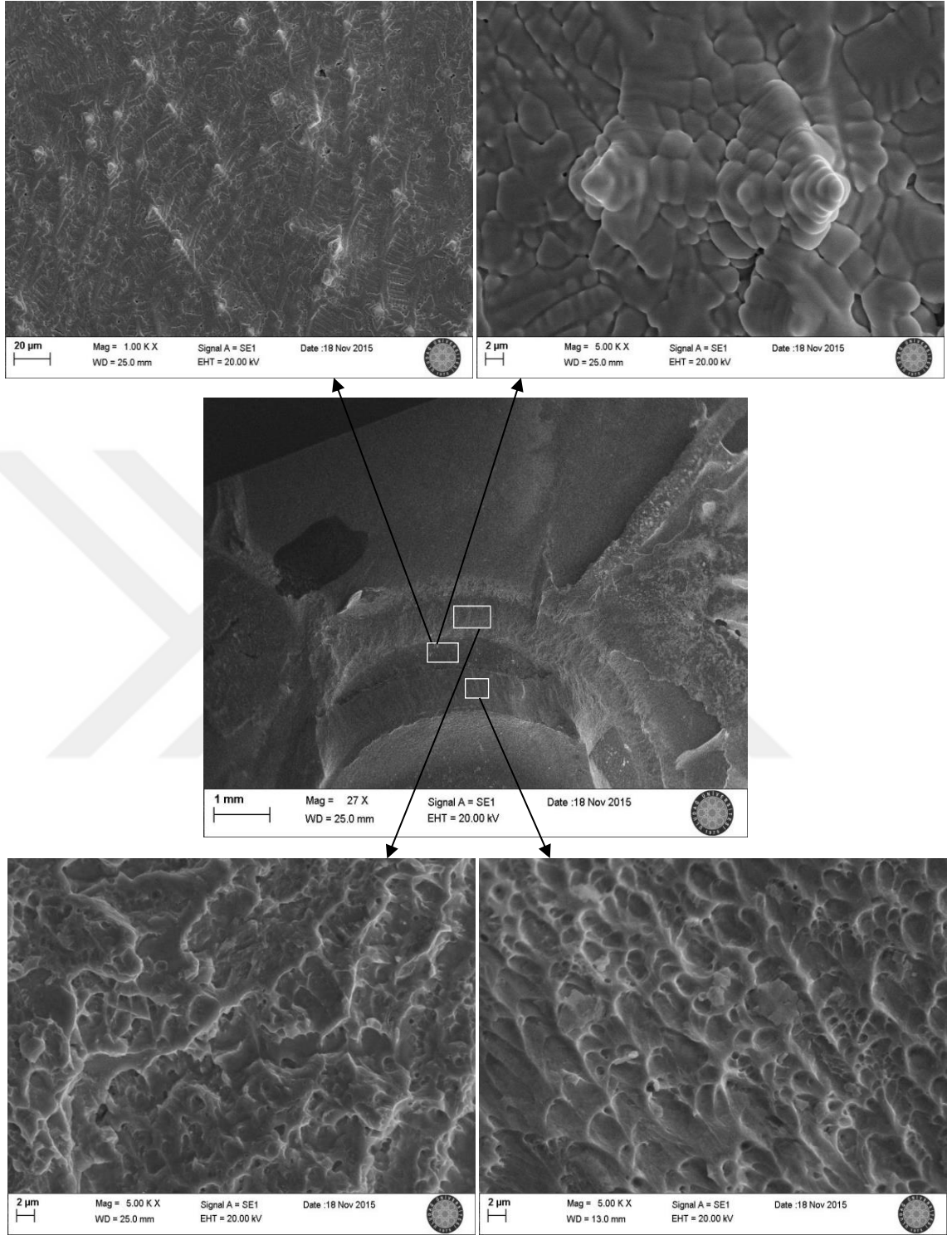
**Şekil 4.43.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (K3A5Z3 numunesi)

En yüksek çekme-kayma kuvvetine sahip K3A5Z3 numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntülerinden, kaynak merkezine yakın ve kaynak kenarı (muhtemel ITAB civarı) kırılmaları Şekil 4.43’de ayrı ayrı değerlendirilmiştir. ITAB civarındaki kırılma yüzeyinde gevrek tarzda kırılmalara sınırlı alanlarda sünek davranış eşlik etmiştir. Ayrıca, kaynak kenarı kırılma yüzeyinde kesik çizgilerle tane sınırları belirlenmiş aşırı tane irileşmesi de bu bölgenin ITAB olduğunun belirgin bir işaretidir. Diğer taraftan, kaynak merkezine daha yakın bölgedeki (çekirdek üzerinde) kırılmada esas itibarıyla gevrek klevaj kırılma ön plana çıksa da çok az miktardaki sığ çukurcuk oluşumu ile sünek kırılma karakteristikleri de göze çarpmaktadır.

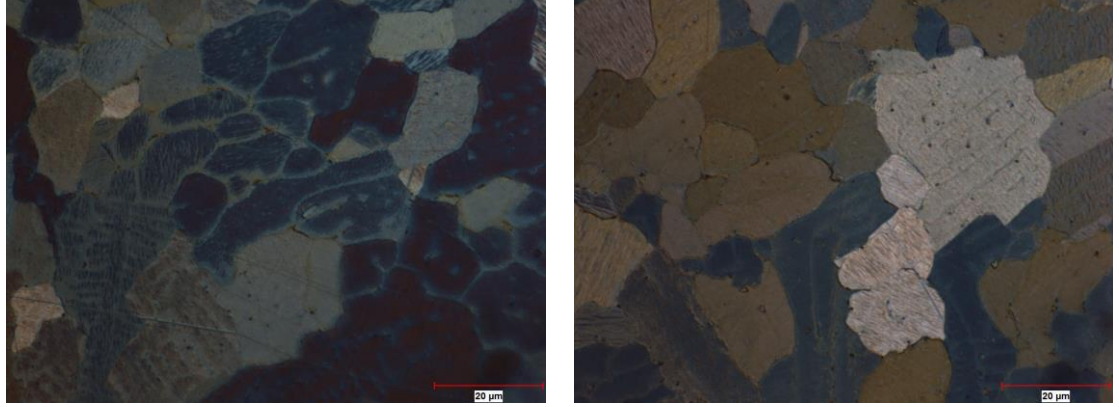
Orta değerlerde çekme-kayma kuvveti gösteren K5 numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntülerine bakıldığında, kaynak merkezi civarındaki (çekirdek üzerinde) kırılmalarda nispeten sığ çukurcuklardan ibaret sünek kırılma ön planda iken, kaynak merkezi dışında

ITAB civarında beklenildiği üzere gevrek kırılmanın daha ön plana çıktığı söylenebilir (Şekil 4.44). Ayrıca, K5 numunesi kırılma yüzeyinde kaynak merkezindeki dendritik yapı da net olarak gözlenmiştir. Kaynak merkezinin bu bölgesindeki kırılmalar gevrek tarzda doğrudan dendritik sınırlarda ayrılmalar şeklinde gerçekleşmiştir. Bu tür dendritik morfolojideki kırılmalar, dendritik bölgedeki mikro çekme boşluklarına bağlanabilir.

K2 ve K5 kodlu numunelerin EB ve ITAB arasındaki geçiş bölgesindeki tanelerin sınırlarında meydana gelen sıvılaşma izleri Şekil 4.45’de net olarak görülmektedir. Ayrıca, bu numunenin kırılma yüzeyindeki dendritik yapısı üzerinde gerçekleştirilen SEM-EDS analizlerinde, Mn oranının dendrit kolları arasında (son katılan noktalar) %17,73 iken dendrit kollarında ise %14,59 değerinde olduğu görülmüştür (Şekil 4.46). Diğer taraftan, ağırlıkça Al oranı dendrit kolları arasında %1,38 iken dendrit kollarında ise %2,10 değerindedir. Temel malzeme içerisindeki ağırlıkça Mn oranı %15,60 ve ağırlıkça Al oranı %1,89 değerindedir. Bu bağlamda, temel malzeme ile karşılaştırıldığında, Mn dendrit kolları arasında, Al dendrit kollarında zenginleşirken, diğer taraftan Mn dendrit kollarında, Al dendrit kolları arasında fakirleşmiştir. ITAB’da herhangi bir erime meydana gelmediği için ITAB’daki kimyasal kompozisyonun temel malzemeye eşdeğer olduğunu düşünülebilir. Buna dayanarak, ITAB tane yapısının tamamıyla ostenit yapısından oluştuğunu söylemek mümkündür.



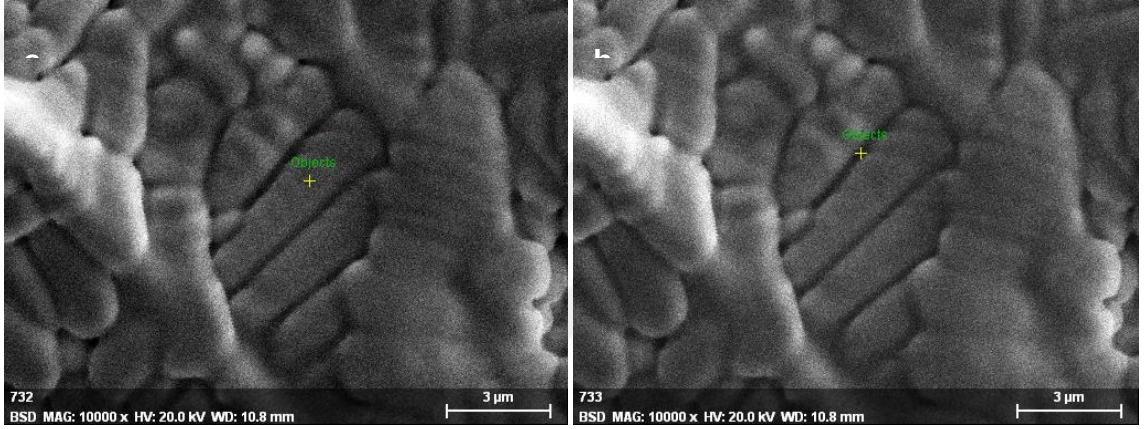
**Şekil 4.44.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (K5 numunesi)



a)

b)

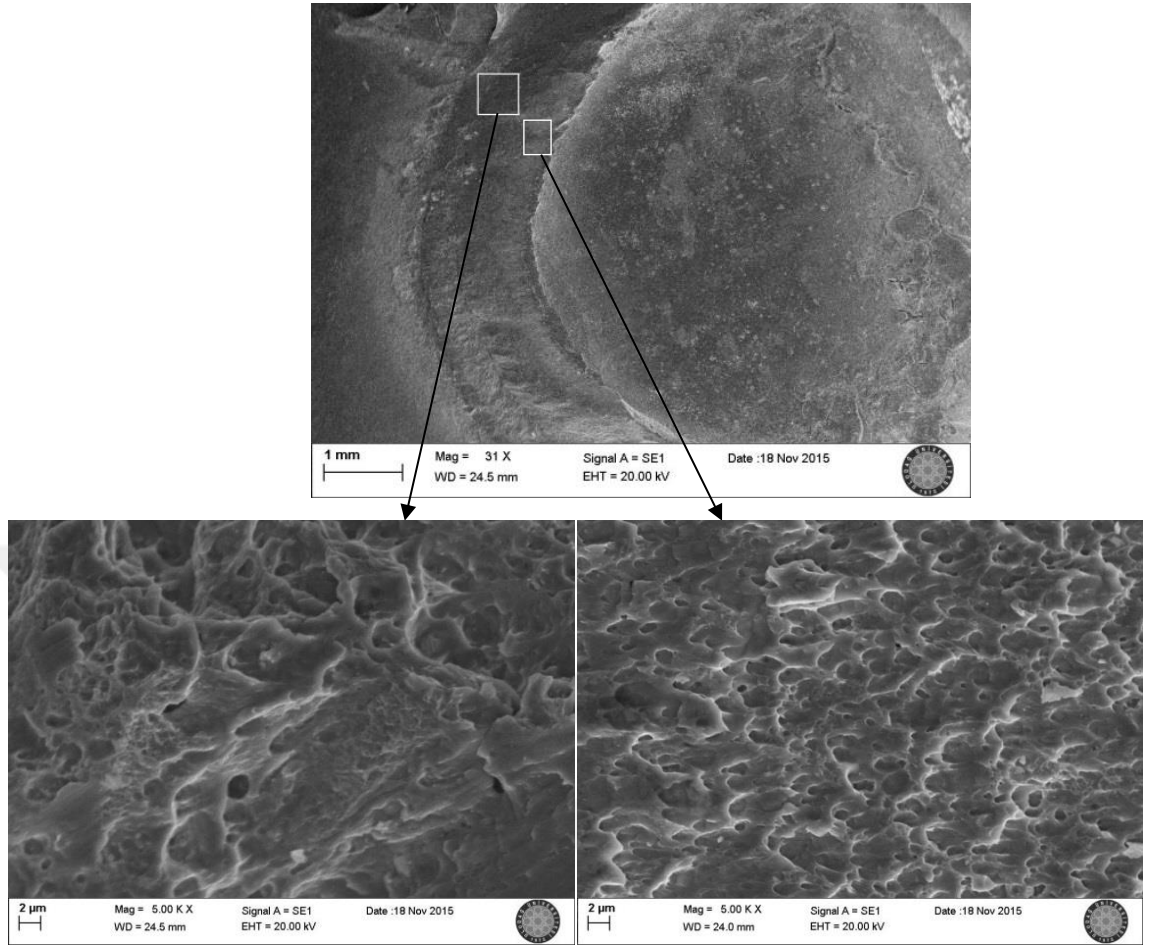
**Şekil 4.45.** ITAB tane sınırlarının ergimesi: a) K2 numunesi; b) K5 numunesi



**Şekil 4.46.** K5 kodlu numuneye ait kırılma yüzeyi üzerinden gerçekleştirilen SEM-EDS analizi: a) Dendrit kolları üzerinden, b) Dendrit kolları arasından

Düşük mukavemete sahip numunelerden Z5 numunesinin de kırılma yüzeyi SEM görüntülerine bakıldığında, K5 numunesindeki benzer detaylar elde edilmiştir. Ancak, kaynak merkezi civarındaki kırılmaların nispeten de olsa daha gevrek olduğu söylenebilir (Şekil 4.47).





**Şekil 4.47.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (Z5 numunesi)

#### **4.4. %15 Deformasyonlu A Grubu Numuneler**

Tez kapsamında kaynak parametrelerinin optimizasyonu için kullanılan Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılması için, kaynak parametrelerinin alt ve üst sınırlarını belirlemek adına ön denemeler yapılmıştır. Alt sınırları belirlemede, soyma testi sonucu en küçük çekirdeğin gözlenmesi, üst sınırlarda ise çökme değerlerinin en fazla %35 olması kriter olarak belirlenmiştir. Ön denemelerde üretilen ve kaynak parametrelerinin alt sınırlarını belirleyen örnek numune Şekil 4.48’de kaynak parametreleriyle birlikte verilmiştir. Kaynak parametreleri için belirlenen değerlerin deformasyonsuz gruba göre daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Burada temel neden, deformasyon sonucu azalan sac kalınlığıdır. Tüm kaynaklarda, sıkma zamanı, kaynak sonu tutma zamanı gibi diğer tüm kaynak parametreleri deformasyonsuz kaynaklı numunelerinin üretimi ile aynı değerlerde tutulmuştur.





**Şekil 4.48.** %15 deformasyonlu TWIP saclarında ön deneme kaynak numunesi örneği (Kaynak parametreleri: Kaynak Akımı: 3 kA; Elektrot kuvveti: 1500 N; Kaynak zamanı: 100 ms)

Ön denemelerle kaynak parametrelerinin aralıklarını belirleme çalışmalarında alt ve üst sınırlar olarak sırasıyla, kaynak akımı için 3kA-9kA, elektrot kuvveti için 1500N-3000N ve kaynak zamanı için 100ms-400ms değerleri belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak oluşturulan Taguchi L9 ortogonal dizini ve bu numunelerin çekme-kayma test sonuçları ile “en büyük en iyi” kriteriyle hesaplanan S/N oranları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** %15 deformasyonlu A grubu numunelerin Taguchi tablosu, çekme-kayma kuvvetleri ve hesaplanan S/N oranları

| Deney no | Elektrot kuvveti (N) | Akım (kA) | Zaman (ms) | Çekme-kayma kuvveti (kN) | SS   | S/N Oranı |
|----------|----------------------|-----------|------------|--------------------------|------|-----------|
| 1        | 1500                 | 3         | 100        | 4,18                     | 0,02 | 12,42     |
| 2        | 1500                 | 6         | 250        | 9,71                     | 0,34 | 19,74     |
| 3        | 1500                 | 9         | 400        | 10,54                    | 0,23 | 20,46     |
| 4        | 2250                 | 3         | 250        | 4,77                     | 0,28 | 13,57     |
| 5        | 2250                 | 6         | 400        | 10,23                    | 0,58 | 20,20     |
| 6        | 2250                 | 9         | 100        | 10,61                    | 0,68 | 20,51     |
| 7        | 3000                 | 3         | 400        | 3,96                     | 0,13 | 11,96     |
| 8        | 3000                 | 6         | 100        | 8,56                     | 0,00 | 18,65     |
| 9        | 3000                 | 9         | 250        | 11,61                    | 0,62 | 21,30     |

Kaynak parametrelerinin S/N oranları ve ortalama değerlere etkileri, sırasıyla, Çizelge 4.10 ve 4.11’de verilmiş ve optimum değerler belirtilmiştir. Ayrıca, bu etki seviyeleri Şekil 4.49’da grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 4.49’da da görüldüğü üzere, kaynak parametrelerinin hem S/N oranlarına hem de ortalamalara etki karakterleri mükemmel bir korelasyon sergilemektedir.

**Çizelge 4.10.** Kaynak parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri (%15 deformasyonlu A grubu)

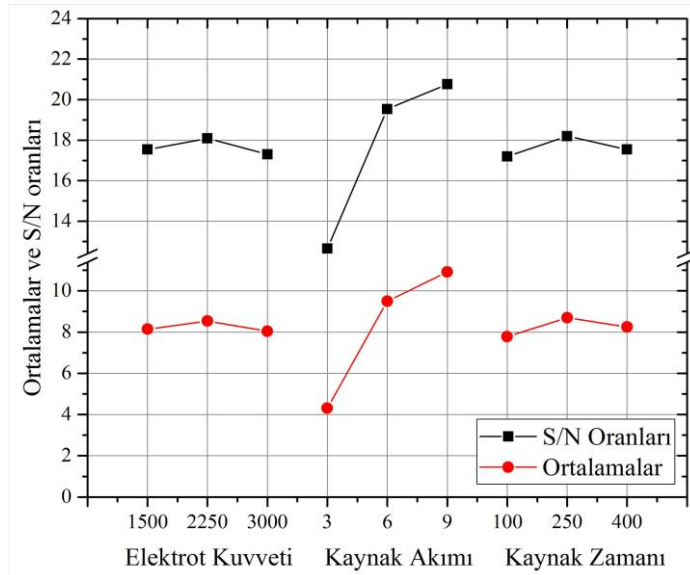
| Seviye | Elektrot kuvveti | Kaynak akımı | Kaynak zamanı |
|--------|------------------|--------------|---------------|
| 1      | 17,54            | 12,65        | 17,19         |
| 2      | 18,09*           | 19,53        | 18,20*        |
| 3      | 17,30            | 20,76*       | 17,54         |
| Delta  | 0,79             | 8,11         | 1,01          |
| Rank   | 3                | 1            | 2             |

\*Optimum seviye

**Çizelge 4.11.** Kaynak parametrelerinin ortalamalara etki seviyeleri (%15 deformasyonlu A grubu)

| Seviye | Elektrot kuvveti | Kaynak akımı | Kaynak zamanı |
|--------|------------------|--------------|---------------|
| 1      | 8,143            | 4,304        | 7,782         |
| 2      | 8,537*           | 9,499        | 8,697*        |
| 3      | 8,046            | 10,922*      | 8,246         |
| Delta  | 0,491            | 6,619        | 0,914         |
| Rank   | 3                | 1            | 2             |

\*Optimum seviye



**Şekil 4.49.** Kaynak parametrelerinin etki seviyeleri (%15 deformasyonlu A grubu)

Her iki etki tablosunda da etki sıralamasının büyükten küçüğe sırasıyla kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot kuvveti şeklinde olduğu belirlenmiştir. S/N oranlarını en

büyük yapan parametre seviyeleri 2-3-2 (elektrot kuvveti: 2250 N; kaynak akımı: 9 kA; kaynak zamanı: 250 ms) olarak belirlenmiştir. Bu parametre setinin mevcut deney tasarımında bulunmamasından dolayı doğrulama deneyi gerekli olmuş ve belirlenen optimum parametre setiyle yapılan deneylerin sonucu ile yapılan tahmin hataları Çizelge 4.12’de verilmiştir. Özellikle, S/N oranı kullanıldığındaki tahmin değerindeki hata payı oldukça düşük değerde kaldığı görülmektedir (%0,10).

**Çizelge 4.12.** Kaynak parametrelerinin optimum değerleri için yapılan tahminler (%15 deformasyonlu A grubu)

|                   | Ortalama (kN) | S/N oranı |
|-------------------|---------------|-----------|
| Deneysel          | 12,24         |           |
| Tahmin            | 11,67         | 12,25*    |
| Tahmin hatası (%) | 4,64          | 0,10*     |

\*ortalamaya dönüştürülmüş S/N oranı ve hatası

Tekil kaynak parametrelerinin çekme-kayma kuvveti üzerindeki etkisini tespit etmek için ANOVA çalışması yapılmış ve oluşturulan ANOVA tablosu Çizelge 4.13’te verilmiştir. Çizelgeden en etkin parametrenin %96,65’lik katkı oranıyla kaynak akımı olduğu görülmektedir. Bu veri Taguchi tablolarıyla da uyum göstermektedir. Diğer iki parametrenin (kaynak zamanı ve elektrot kuvveti) etkileri oldukça düşük değerlerde kalmıştır. Bunun sebebi; kaynak parametreleri için belirlenen sınır değerlerinde, kaynak akımının diğer parametrelere göre (oransal olarak) daha büyük bir aralıkta dağılması ve çekme-kayma kuvvetini etkileyen en önemli faktörün ısı girdisi olduğu düşünüldüğünde (ısı girdisi akımın karesiyle orantılıdır) akımın ısı girdisine etkisinin daha büyük olması ile açıklanabilir.

**Çizelge 4.13.** %15 deformasyonlu A grubu numuneler için oluşturulan ANOVA tablosu

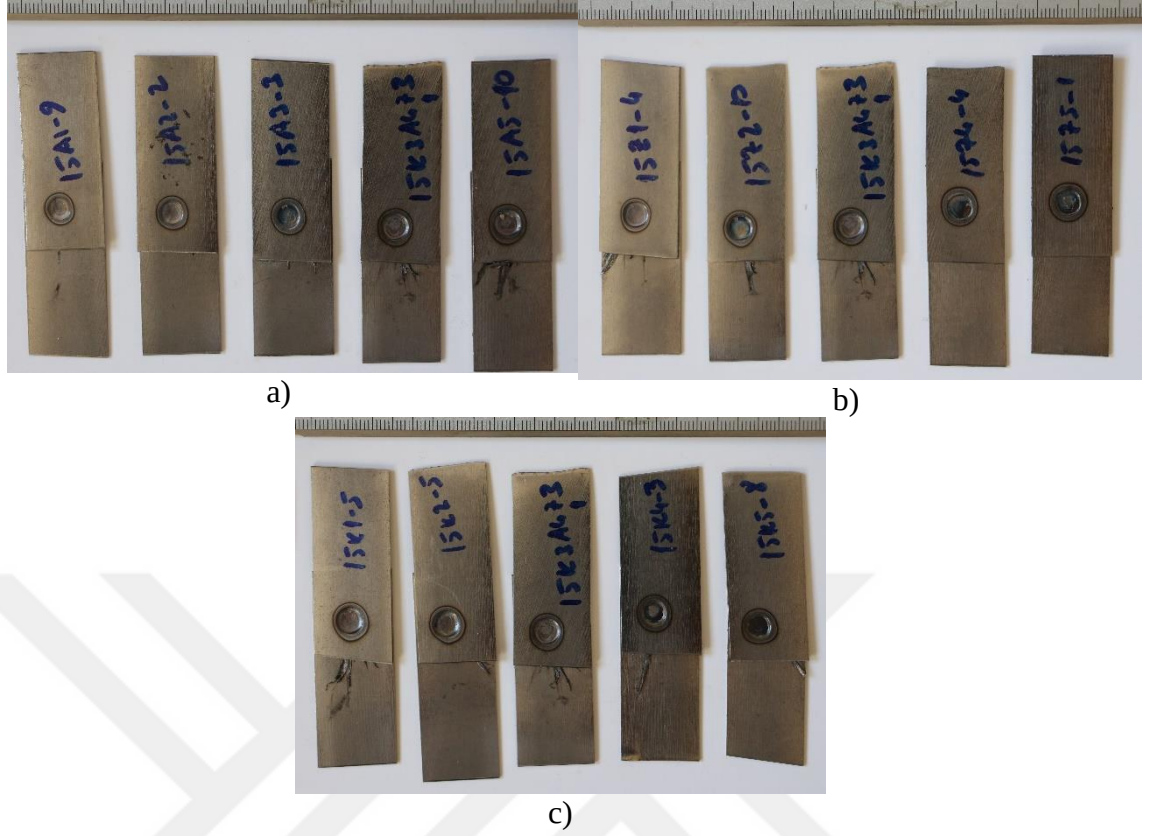
|                  | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS  | F     | %Katkı |
|------------------|----|---------|---------|---------|-------|--------|
| Elektrot kuvveti | 2  | 0,4058  | 0,4058  | 0,2029  | 0,47  | 0,54   |
| Kaynak akımı     | 2  | 72,8249 | 72,8249 | 36,4124 | 83,97 | 96,65  |
| Kaynak zamanı    | 2  | 1,2544  | 1,2544  | 0,6272  | 1,45  | 1,66   |
| Kalan hata       | 2  | 0,8673  | 0,8673  | 0,4336  |       | 1,15   |
| Toplam           | 8  | 75,3523 |         |         |       | 100,00 |

#### 4.5. %15 Deformasyonlu B Grubu Numuneler

%15 Deformasyon oranına sahip A grubu deney numuneleri ile Taguchi yönteminden elde edilen optimum kaynak parametreleri temel alınarak, her bir parametrenin etkisini görebilmek için kaynak parametrelerinden ikisi sabit tutulup üçüncü parametre değiştirilmiştir. Çalışmanın bu kısmında kullanılacak kaynak parametreleri Çizelge 4.14'teki gibi oluşturulmuştur. Kaynak akımının 10 kA'den daha yüksek değerlerinde önemli düzeyde sıçratma (expulsion) gözlenmiş ve çökme miktarı (indentation depth) yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu sebeple, maksimum kaynak akımı olarak 10 kA değeri alınmıştır. Çizelge 4.14'teki kaynak parametreleri ile üretilmiş kaynaklı numune örnekleri de Şekil 4.50'de verilmiştir.

**Çizelge 4.14.** %15 deformasyonlu B grubu deney numuneleri için belirlenen kaynak parametreleri

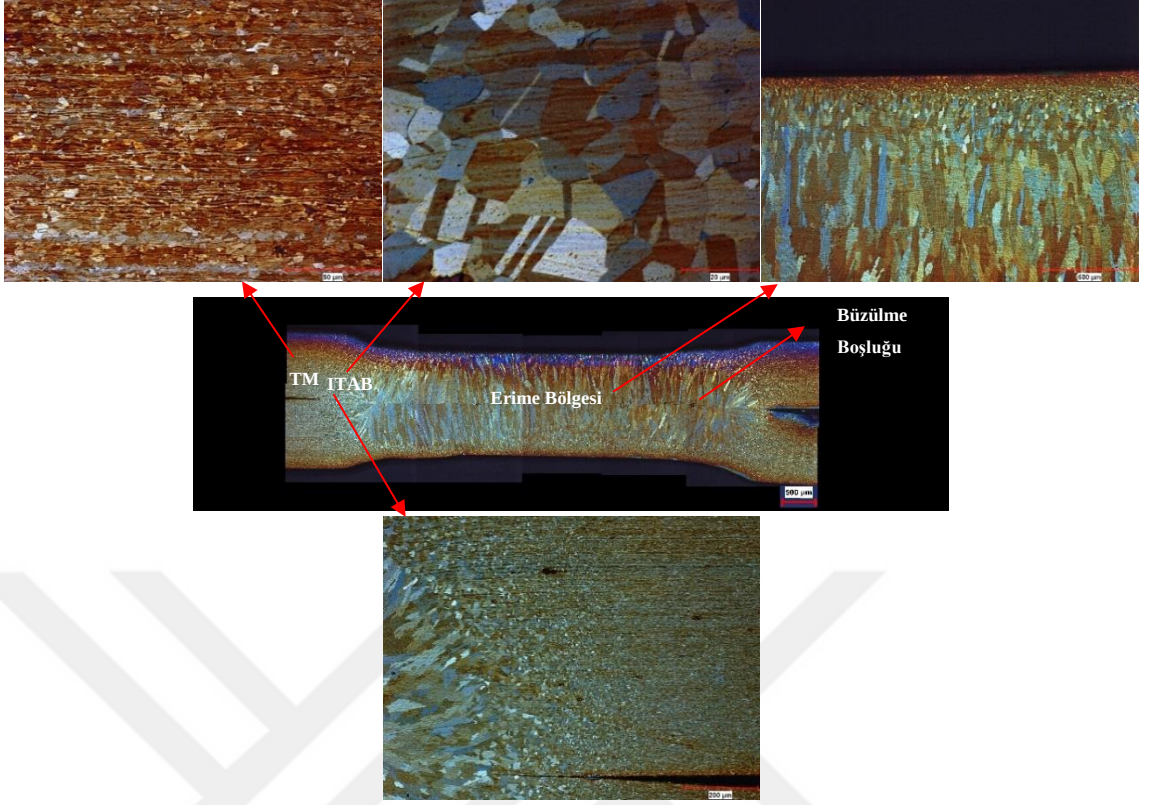
| Numune Kodu | Kaynak Akımı<br>(kA) | Kaynak Zamanı<br>(ms) | Elektrot Kuvveti<br>(N) | İGİ   |
|-------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------|
| 15Z1        | 9                    | 150                   | 2250                    | 5400  |
| 15Z2        | 9                    | 200                   | 2250                    | 7200  |
| 15K3A4Z3    | 9                    | 250                   | 2250                    | 9000  |
| 15Z4        | 9                    | 300                   | 2250                    | 10800 |
| 15Z5        | 9                    | 350                   | 2250                    | 12600 |
| 15K1        | 9                    | 250                   | 1750                    | 11571 |
| 15K2        | 9                    | 250                   | 2000                    | 10125 |
| 15K3A4Z3    | 9                    | 250                   | 2250                    | 9000  |
| 15K4        | 9                    | 250                   | 2500                    | 8100  |
| 15K5        | 9                    | 250                   | 2750                    | 7364  |
| 15A1        | 6                    | 250                   | 2250                    | 4000  |
| 15A2        | 7                    | 250                   | 2250                    | 5444  |
| 15A3        | 8                    | 250                   | 2250                    | 7111  |
| 15K3A4Z3    | 9                    | 250                   | 2250                    | 9000  |
| 15A5        | 10                   | 250                   | 2250                    | 11111 |



**Şekil 4.50.** %15 deformasyonlu B grubu kaynaklı deney numuneleri örnekleri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti

#### 4.5.1. Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri

Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmiş %15 deformasyon oranına sahip TWIP çeliklerinin kaynak kesitleri, deformasyonsuz TWIP çeliklerinde olduğu gibi TM, ITAB ve EB olmak üzere 3 ana mikro yapısal bölgeden meydana gelmiştir (Şekil 4.51). Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi %15 soğuk deformasyon uygulanmış TWIP sacının TM mikro yapısı, genel itibarıyla haddeleme doğrultusunda yönelmiş katmanlı bantları ve daha yoğun mekanik ikizleri içeren ince taneli ostenitlerden ibarettir. Kaynak işlemi ile kaynak bölgesinin farklı bölgelerinde farklı sıcaklıkların ortaya çıkmasına bağlı olarak ostenit taneleri farklı morfolojilere sahip olmuştur. Erime bölgesi genel itibarıyla tipik kaba kolonsal dendritik döküm mikro yapısına sahiptir. Kaynak işlemi esnasında ısı ile çevrime maruz kalan ITAB'da ise yine ostenit tanelerinin boyutu temel malzeme tane boyutundan oldukça büyüktür. Ayrıca, ITAB'da kaynak esnasındaki ısı çevrime bağlı olarak iri tavlama ikizleri meydana gelmiştir.



**Şekil 4.51.** %15 deformasyonlu kaynaklı TWIP çeliklerinin tipik makro yapısı ve mikro yapıları (Numune 15K3A4Z3). (Büyütmeler: TM x500; ITAB x1000; Erime Bölgesi x50; Geçiş Bölgesi x100)

Kaynak parametrelerinin makro yapıya etkileri Şekil 4.52-4.54 arasında verilmiştir. Tüm şekiller bir arada değerlendirildiğinde, kaynak esnasında bazı numunelerde sıçratma gözlenmiş olmasına rağmen, deformasyonsuz halde kaynak edilen numunelerin aksine bu kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntülerinde EB’de meydana gelen sıçratma esaslı belirgin makro boyuttaki boşluk hatalarına rastlanmamıştır. Numunelerin bazılarında gözlenen nispeten iri sayılabilecek kaynak boşluklarını deformasyonsuz TWIP saclarının kaynağında yüksek ısı girdisine bağlı aşırı sıçratma esaslı sıçratma boşluğuna bağlamak doğru olmayacaktır (Şekil 4.52 b ve c, Şekil 4.54 b ve d). Bu bağlamda da, hemen hemen tüm numunelerde gözlenen EB’deki bu irili, ufaklı kaynak hatalarını katılma esnasında oluşan büzülme boşlukları olarak nitelemek daha doğru olacaktır. Öyle ki, deformasyonsuz kaynaklı numunelere göre nispeten daha düşük ısı girdisine sahip bu numunelerin EB’deki soğuma hızlarının da daha yüksek olduğu düşünüldüğünde, bu numunelerde katılma esnasında büzülme boşluklarının oluşması daha yüksek ihtimaldir. Şekil 4.52-4.54’e izafeten, genel itibariyle artan ısı girdisi ile

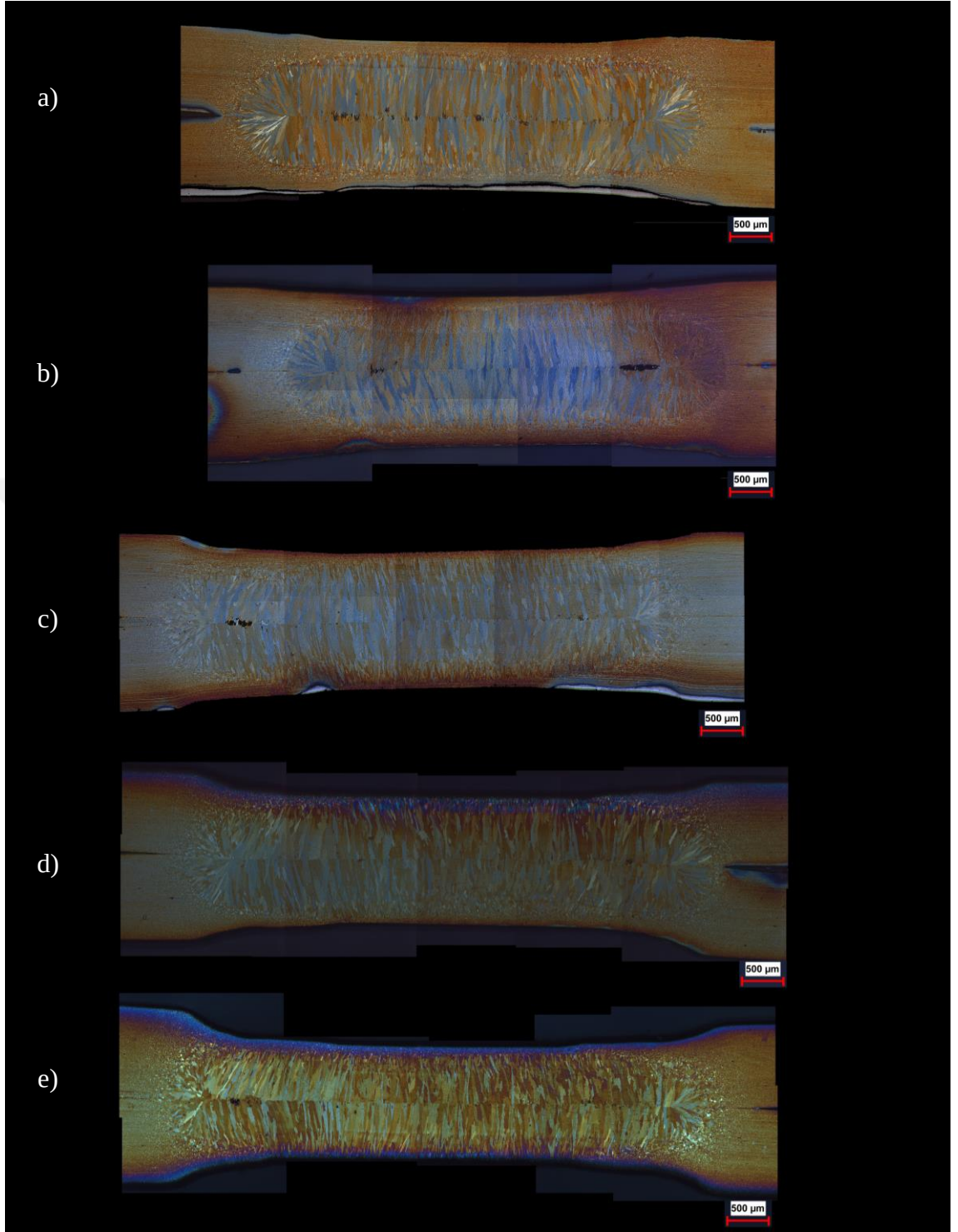


büzölme boşluklarının azalma eğiliminde olduğu da söylenebilir. Bunun da sebebi olarak, daha yüksek ısı girdisine bağlı olarak daha düşük soğuma hızı gösterilebilir.

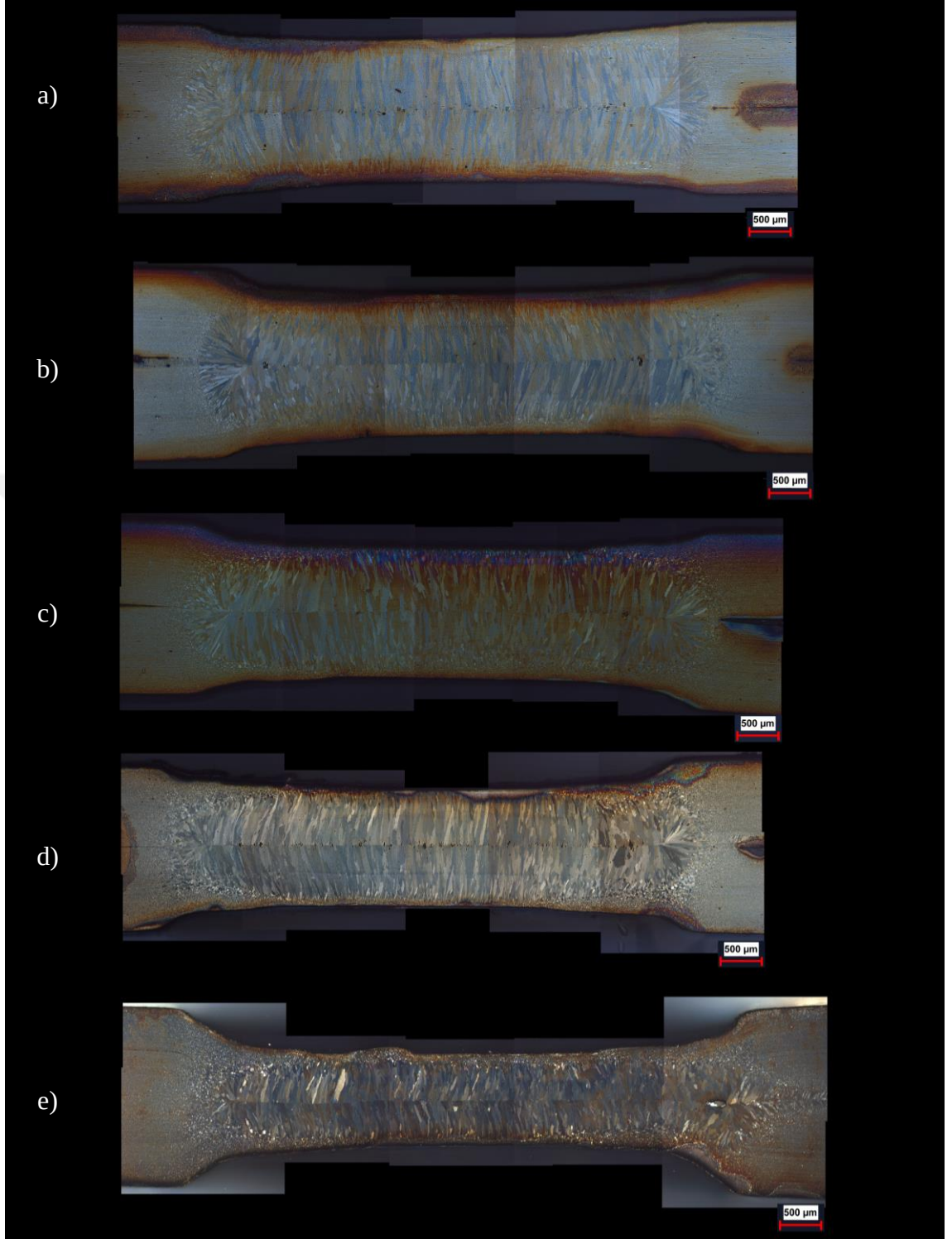
Özellikle kaynak akımı ve kaynak zamanı artışıyla birlikte ısı girdisi artışıyla çökme miktarında da bir artış meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.52 ve 4.53). Tüm kaynak parametrelerine bağlı olarak çökme miktarındaki değişimlerin grafiksel değerlendirmeleri de ileride detaylı olarak verilmiştir.



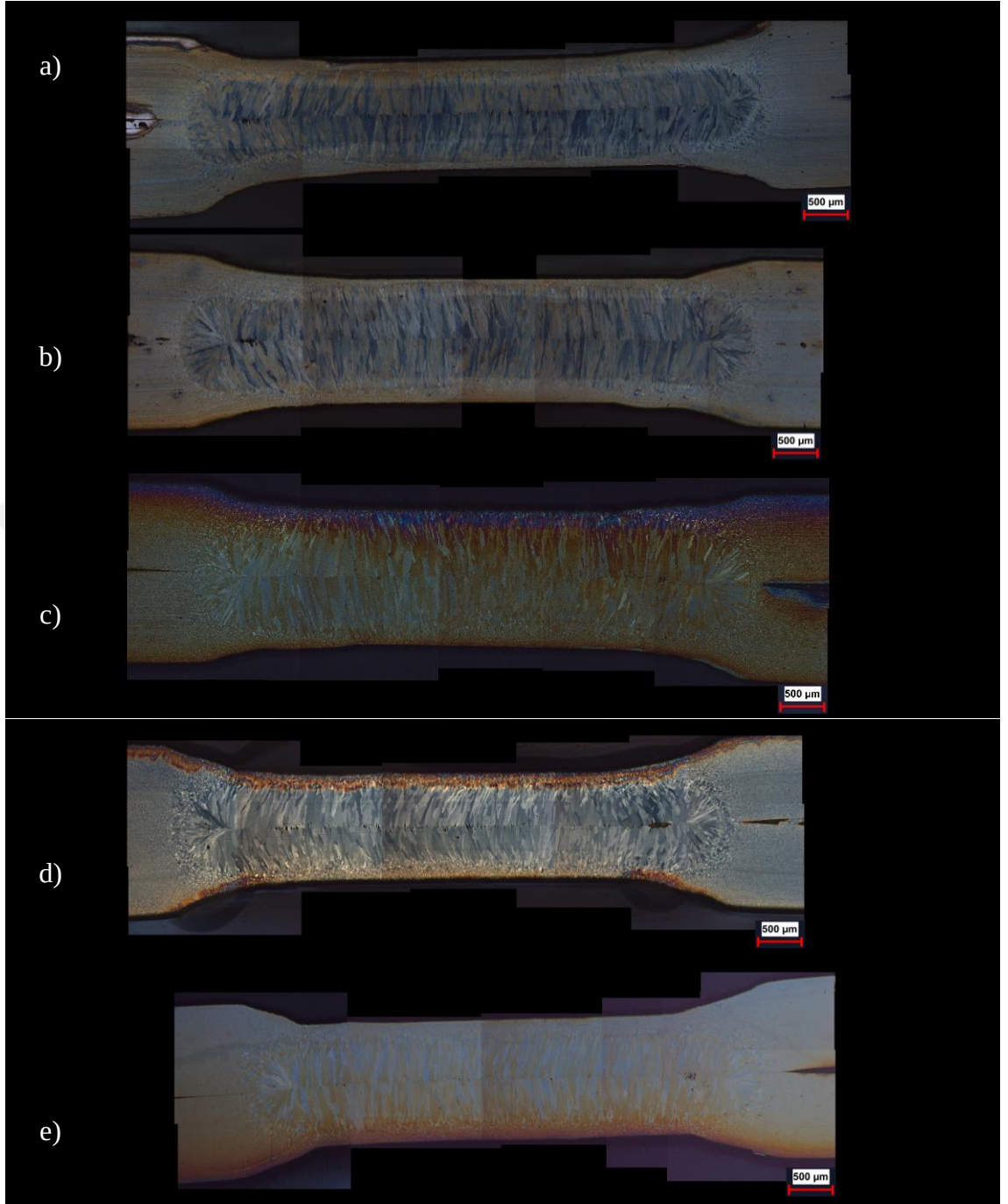




**Şekil 4.52.** Kaynak akımının makro yapıya etkisi: a) 6 kA, b) 7 kA, c) 8 kA, d) 9 kA, e) 10 kA (%15 deformasyonlu B grubu)



**Şekil 4.53.** Kaynak zamanının makro yapıya etkisi: a) 150 ms, b) 200 ms, c) 250 ms, d) 300 ms, e) 350 ms (%15 deformasyonlu B grubu)



**Şekil 4.54.** Elektrot kuvvetinin makro yapıya etkisi: a) 1,75 kN, b) 2,0 kN, c) 2,25 kN, d) 2,5 kN, e) 2,75 kN (%15 deformasyonlu B grubu)

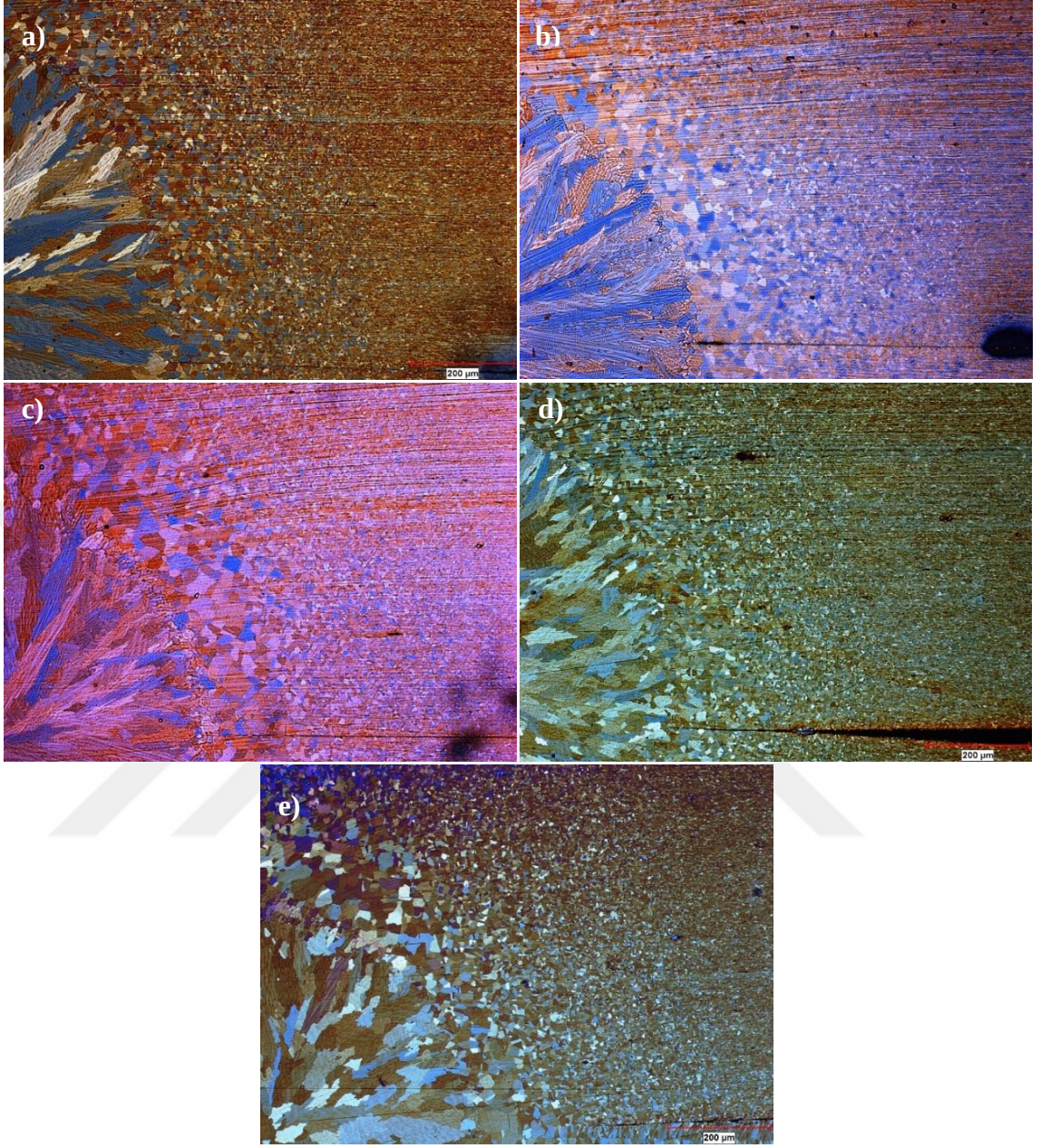
Kaynak parametrelerinin ITAB oluşumuna etkileri Şekil 4.55-4.57 arasında verilmiştir. Optik mikroskop çalışmalarında ölçülen ITAB genişlikleri ile kaynak parametreleri arasındaki ilişki de Şekil 4.58’de görülmektedir. Şekil 4.58 a ve b’den görüleceği üzere, ITAB genişliği kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile artmıştır. ITAB genişliği ve kaynak akımı arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,91 iken, ITAB genişliği ve

kaynak zamanı arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) yaklaşık olarak 0,97'dir. Bu değerler, deformasyonsuz kaynak edilen numunelerinkine nazaran daha yüksektir.

1,75 kN ile 2,25 kN değerleri arasında artan elektrot kuvveti ile ITAB genişliği artmış sonrasında ise artan elektrot kuvveti değeri ile ITAB genişliği azalmıştır. Deformasyonsuz B grubu numunelerdekine benzer şekilde, burada da elektrot kuvveti ve ITAB genişliği arasında belirgin bir korelasyon elde edilememiştir. Elektrot kuvveti ve ITAB genişliği arasında belirgin bir korelasyon elde edilememesinin sebebi daha önceki bölümde açıklanmıştır.

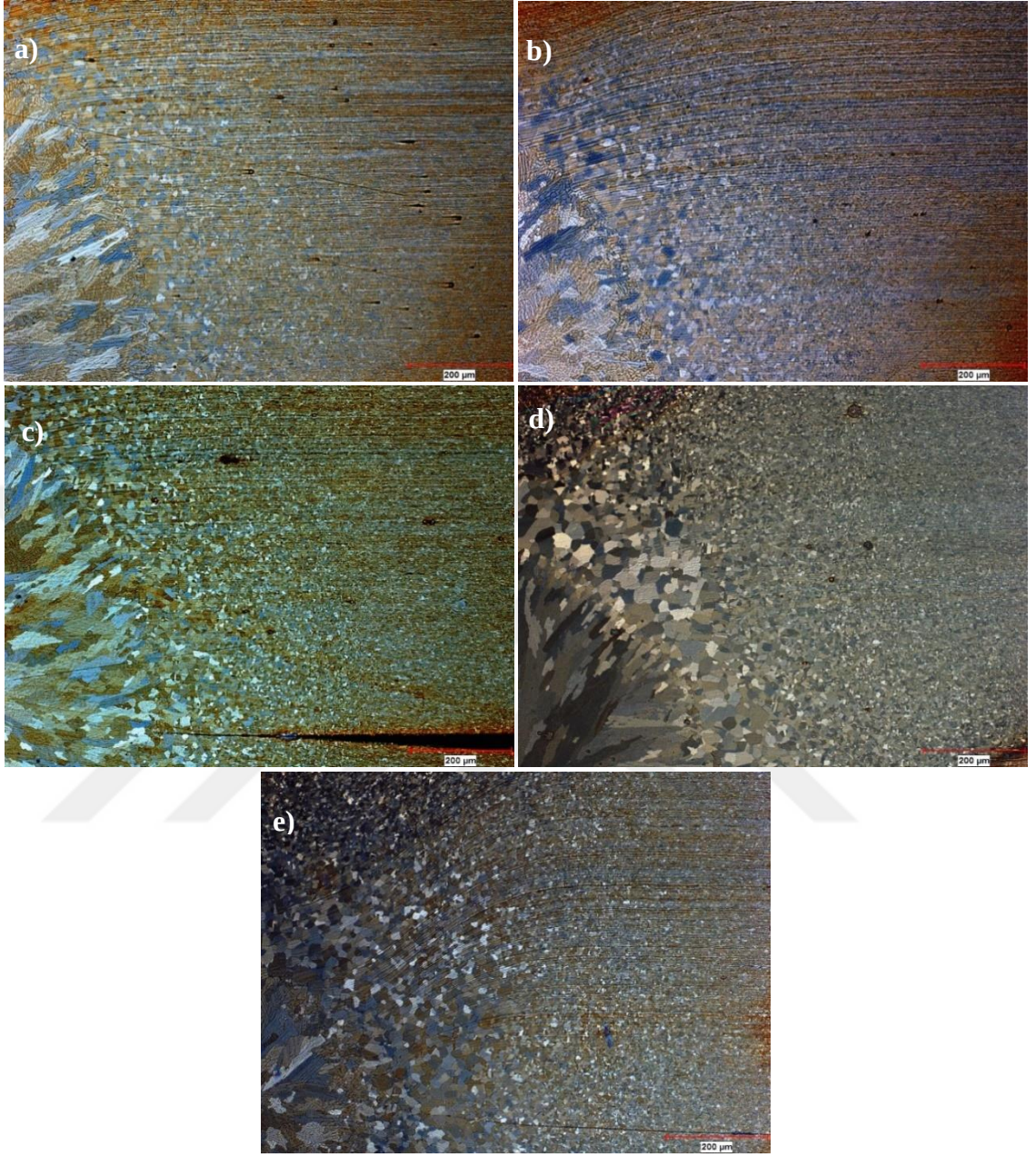
Isı girdisine bağlı olarak ITAB genişliği değişimi de Şekil 4.59'da verilmiştir. Isı girdisi artışı ile ITAB genişliği genel itibariyle artmaktadır. Ancak, ITAB genişliği ve ısı girdisi arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,53 civarında kalmıştır (Şekil 4.59 a). Nispeten düşük olan bu lineer korelasyon değerinin sebebi elektrot kuvveti ile ilişkili olduğu açıktır. Elektrot kuvveti değerleri grafik dışında bırakıldığında, ITAB genişliği ve ısı girdisi arasındaki lineer korelasyon katsayısının ( $R^2$ ) 0,90'a yaklaştığı görülmüştür (Şekil 4.59 b). Bunun da, ısı girdisinin elektrot kuvveti esas alındığında tam olarak tanımlanmamasıyla alakalı olduğu açıktır.





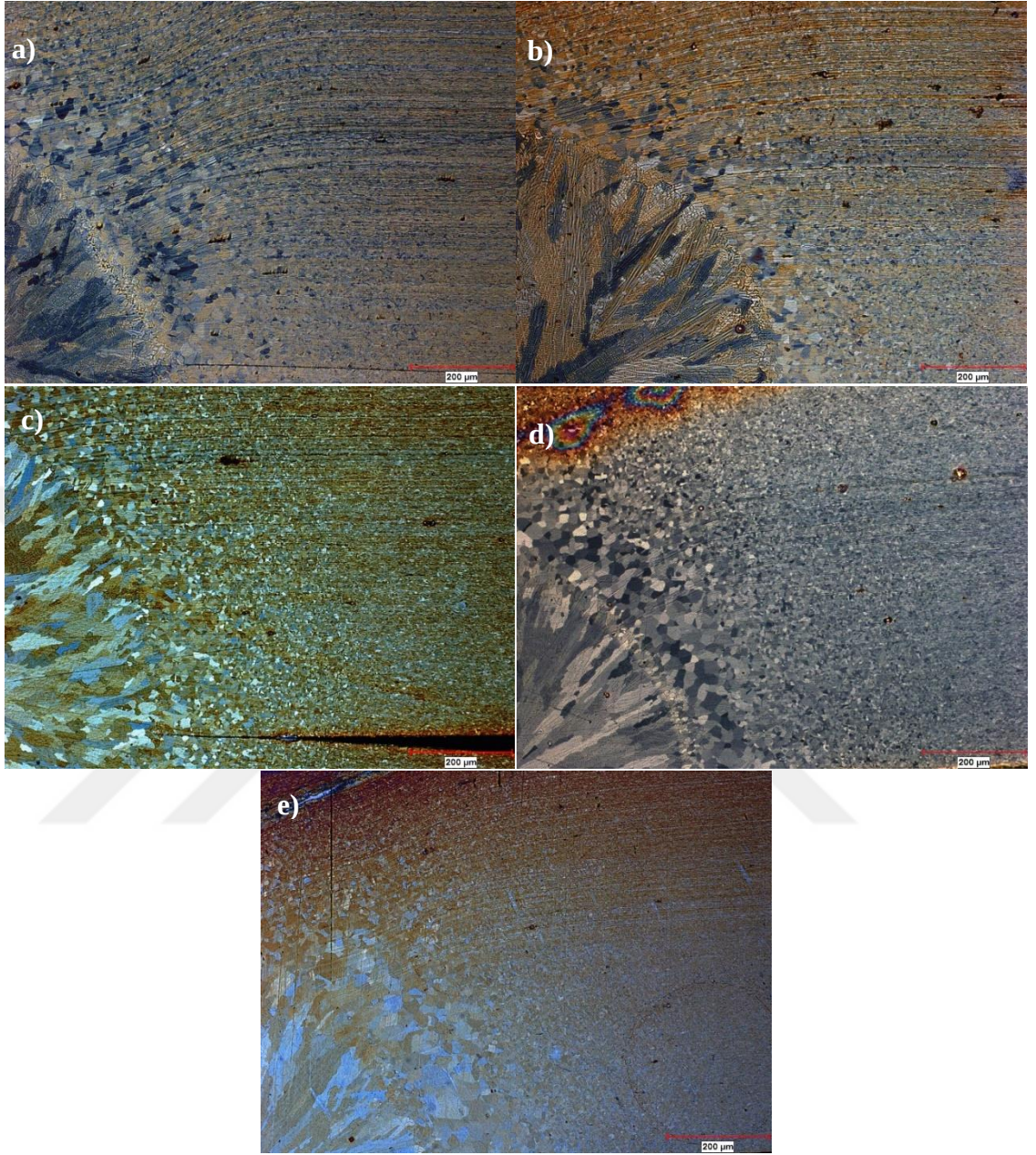
**Şekil 4.55.** Kaynak akımının ITAB oluşumuna etkisi: a) 6 kA, b) 7 kA, c) 8 kA, d) 9 kA, e) 10 kA (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu)





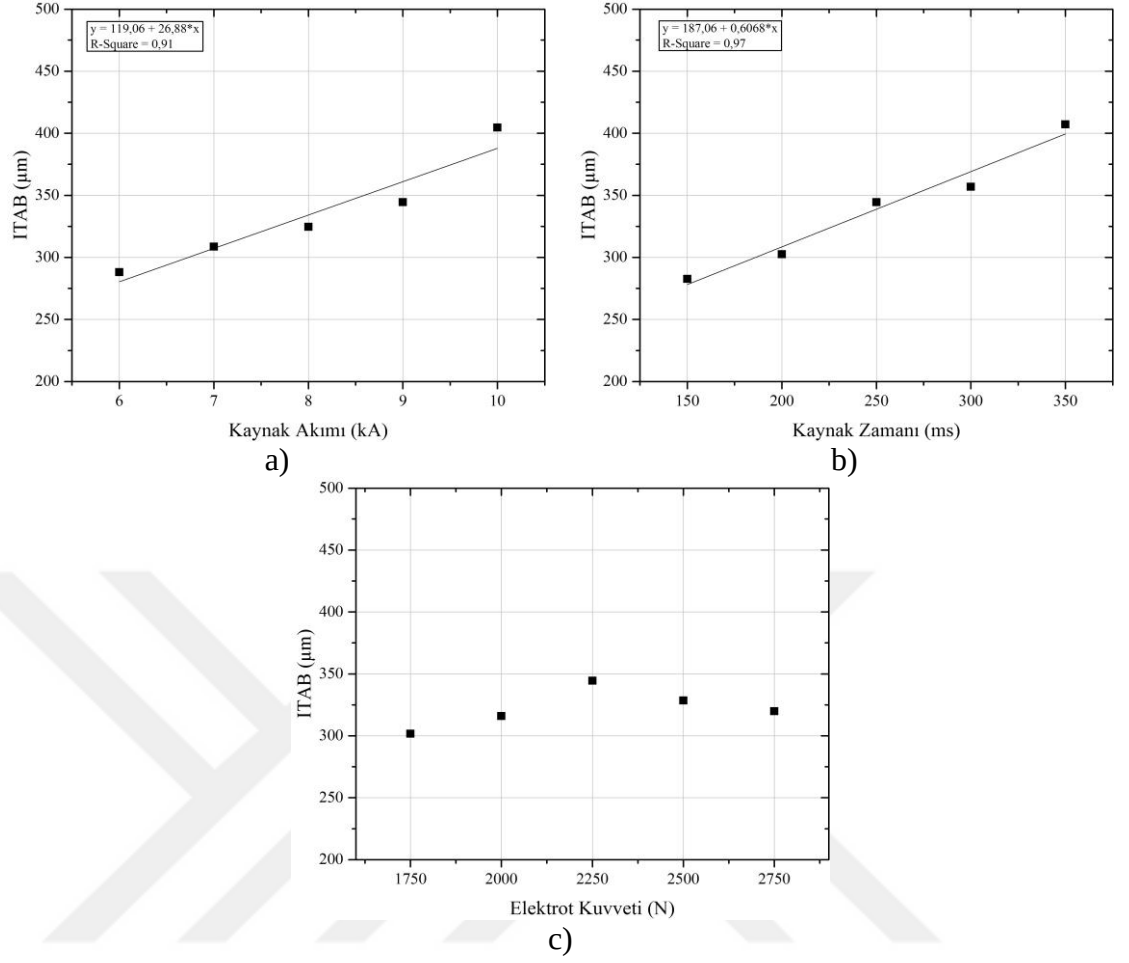
**Şekil 4.56.** Kaynak zamanının ITAB oluşumuna etkisi: a) 150 ms, b) 200 ms, c) 250 ms, d) 300 ms, e) 350 ms (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu)



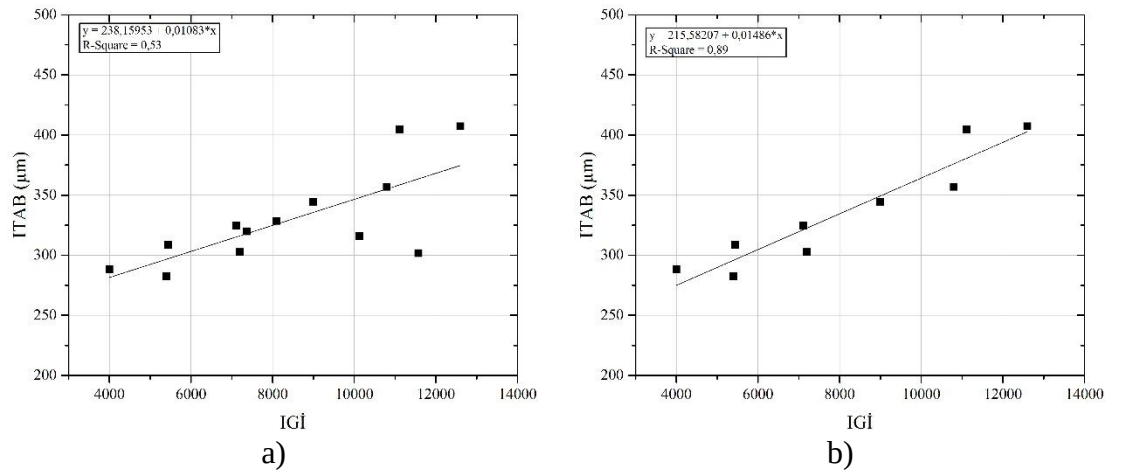


**Şekil 4.57.** Elektrot kuvvetinin ITAB oluşumuna etkisi: a) 1,75 kN, b) 2,0 kN, c) 2,25 kN, d) 2,5 kN, e) 2,75 kN (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu) (%15 deformasyonlu B grubu)



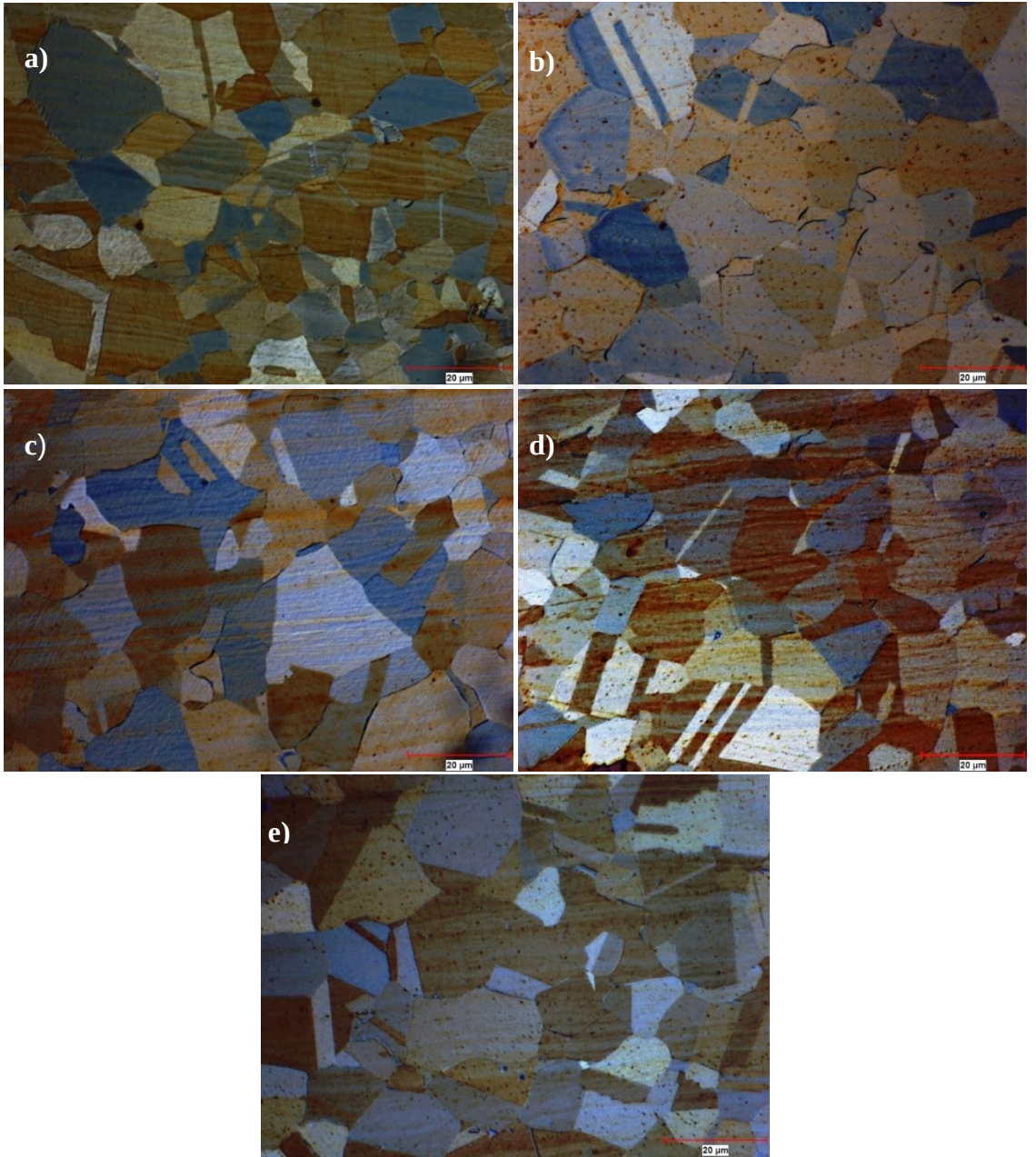


**Şekil 4.58.** ITAB genişliğinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)



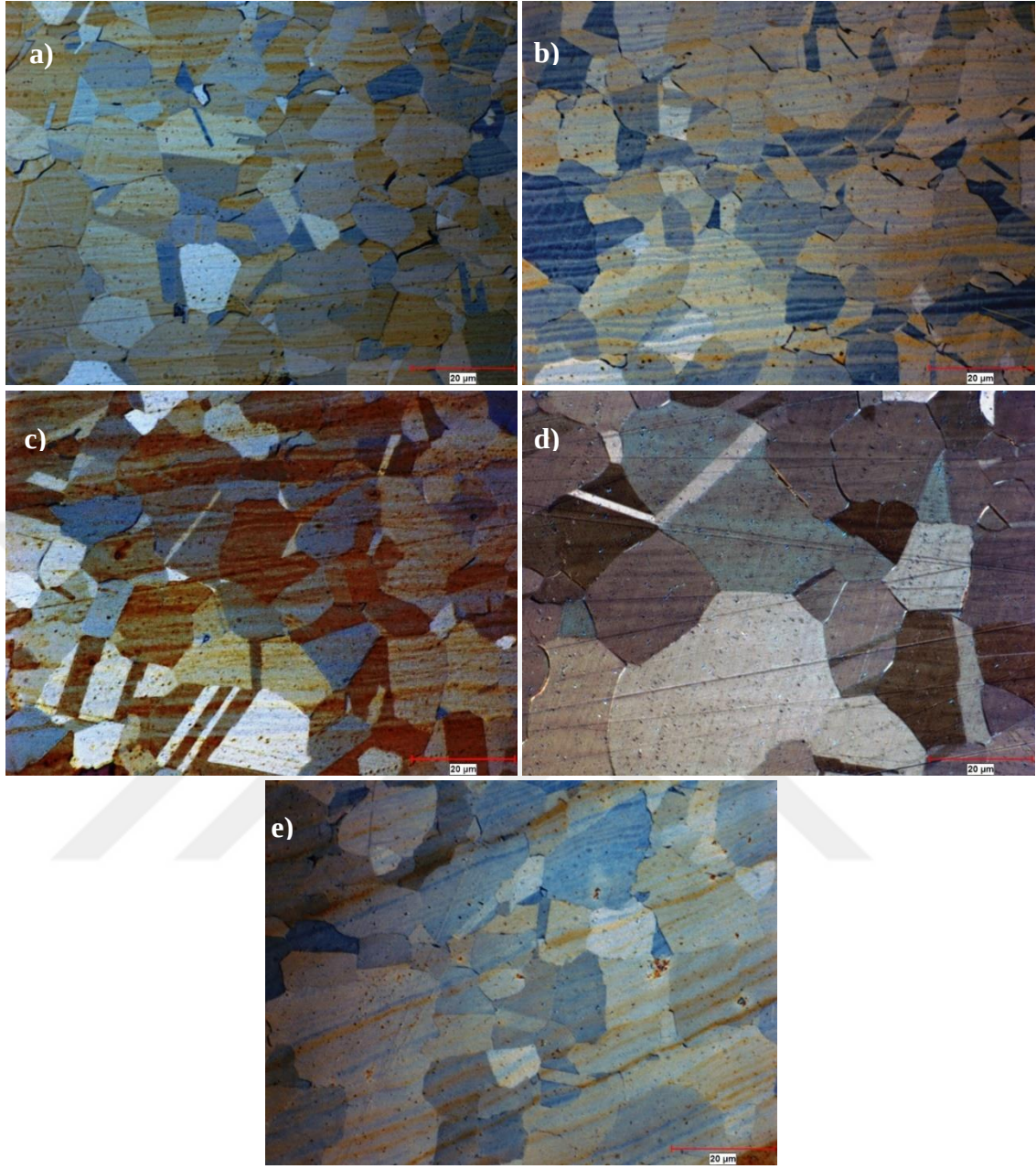
**Şekil 4.59.** ITAB genişliğinin ısı girdisi ile değişimi: a) Kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot kuvvetini içeren grafik; b) Kaynak akımı ve kaynak zamanını içeren grafik (%15 deformasyonlu B grubu)

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş %15 deformasyon oranına sahip TWIP çeliklerinde ITAB mikro yapılarına bakıldığında, kaynak akımının artışı ile genel itibariyle tanelerin irileştiği, tavlama ikizlerinin kalınlıklarının nispeten arttığı söylenebilir (Şekil 4.55 ve 4.60). ITAB'daki tane irileşmesi kaynak zamanı artışı ile daha belirgin olarak görülmektedir (Şekil 4.56 ve 4.61). Ancak, elde edilen görüntülerden elektrot kuvvetinin ITAB mikro yapısı üzerinde belirgin bir etkisini vurgulamak mümkün olmamıştır (Şekil 4.57 ve 4.62).

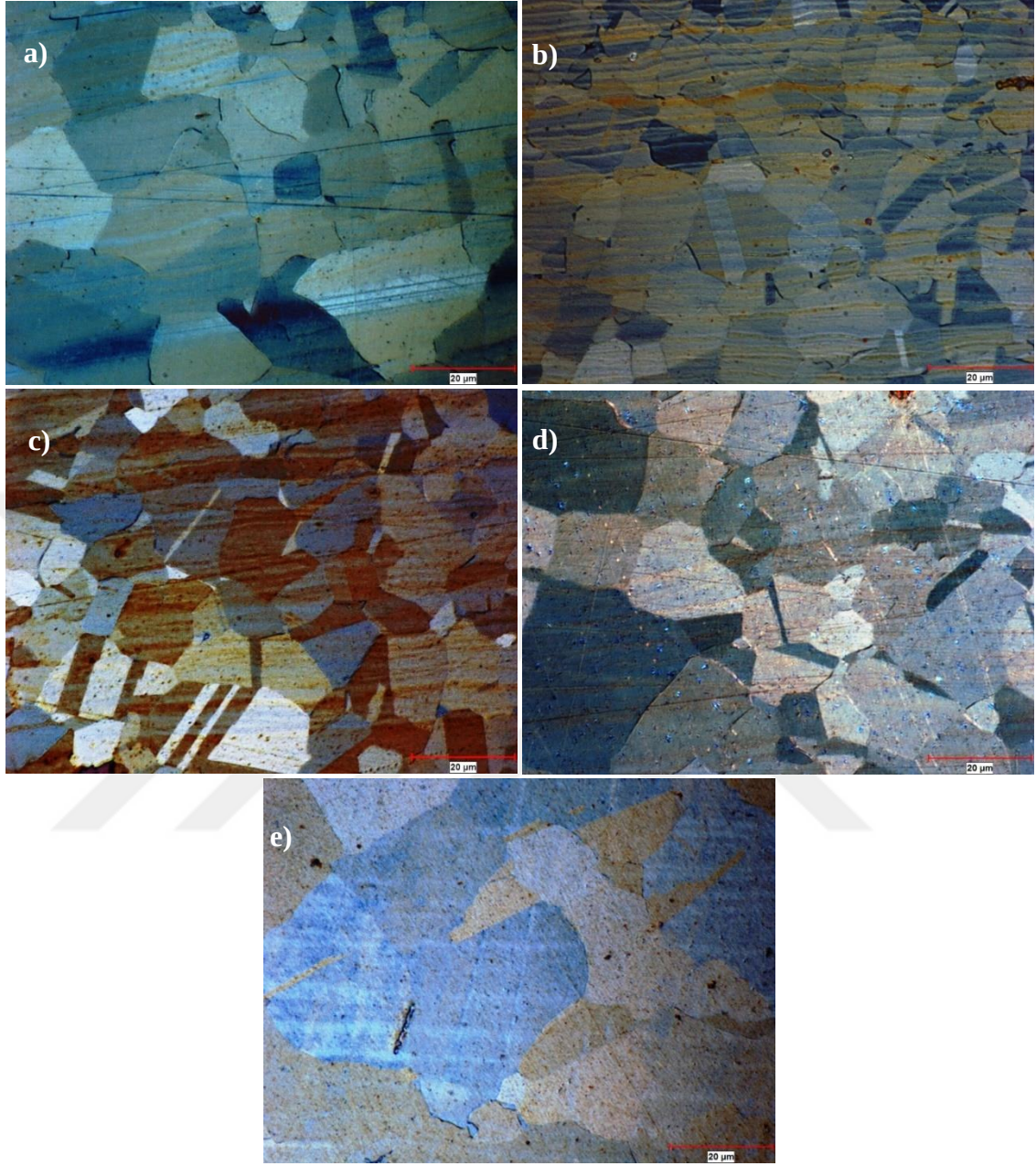


**Şekil 4.60.** ITAB mikro yapısının kaynak akımı ile değişimi (Optik Görüntüler): a) 6 kA, b) 7 kA, c) 8 kA, d) 9 kA, e) 10 kA (Büyütmeler x1000) (%15 deformasyonlu B grubu)





**Şekil 4.61.** ITAB mikro yapısının kaynak zamanı ile değişimi (Optik Görüntüler): a) 150 ms, b) 200 ms, c) 250 ms, d) 300 ms, e) 350 ms (Büyütmeler x1000) (%15 deformasyonlu B grubu)



**Şekil 4.62.** ITAB mikro yapısının elektrot kuvveti ile değişimi (Optik Görüntüler): a) 1,75 kN, b) 2,0 kN, c) 2,25 kN, d) 2,5 kN, e) 2,75 kN (Büyütmeler x1000) (%15 deformasyonlu B grubu)

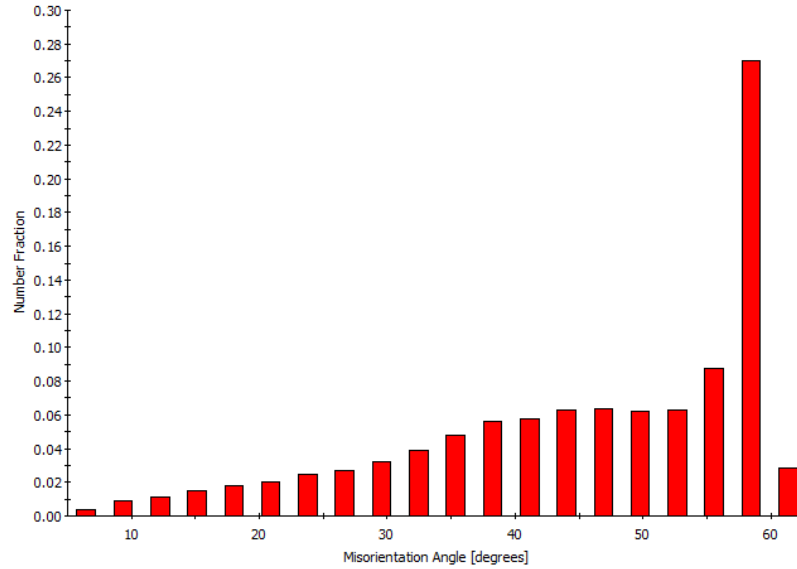
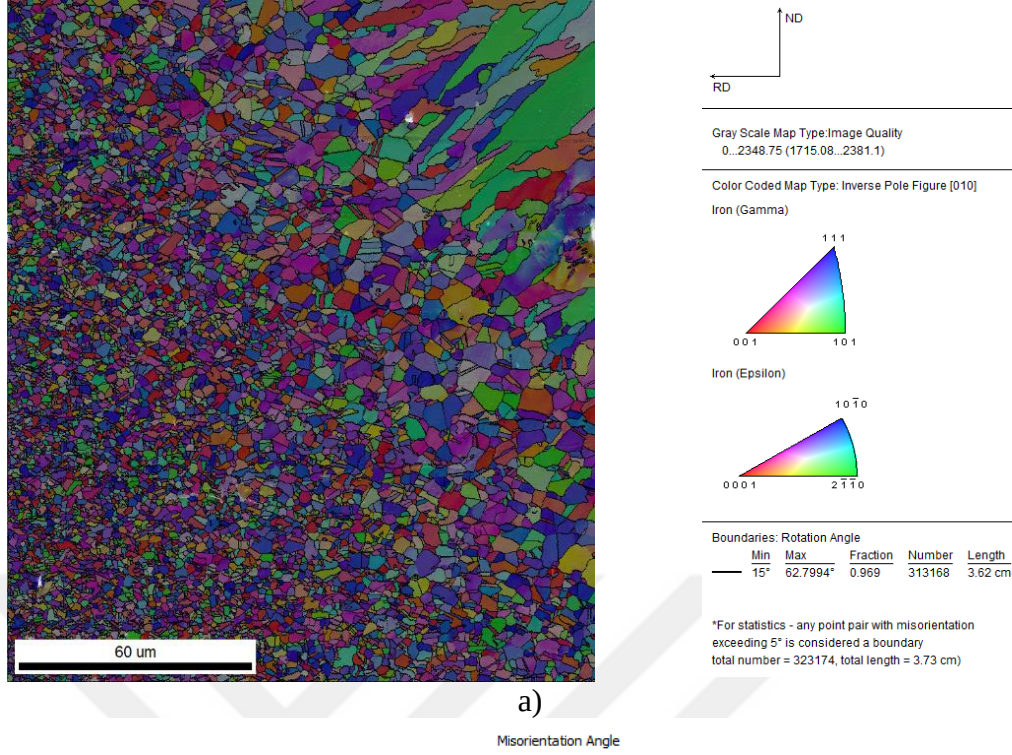
Şekil 4.63 ve 4.64'deki SEM-EBSD haritalamasından da ısı girdisi artışına bağlı olarak ITAB genişliği artışı, ITAB'daki tane irileşmesi ve tavlama ikiz kalınlıklarının arttığı görülebilmektedir. Ayrıca, ITAB'ın TM yönünde tavlama ikizlerini de içeren yeniden kristalleşme taneleri de net bir şekilde görülebilmektedir. SEM-EBSD haritalamalarından ve yönelim farkı açısı dağılımlarından ITAB civarında deformasyon etkisinin ortadan



kalktığı açıktır. Numunelerin, düşük açılı tane sınırları ( $\theta \sim 5^\circ$ ) oranının TM'ye göre çok daha düşük olması bu bölgede deformasyon etkisinin ortadan kalktığını gösterir niteliktedir (Şekil 4.63b ve Şekil 4.64b). Deformasyonsuz numunelerdeki gibi ITAB'da düşük açılı tane sınırlarına sahip toparlanan (kendine gelen) ve yeniden kristalleşme taneleri kendini gösterememiştir. Numunelerin yönelim farkı açısı dağılımlarında yüksek açılı tane sınırları ( $60^\circ < 111^\circ$ ) oranı ve çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımlarında  $\Sigma 3$  CSL tane sınırları oranının %15 TM'ye göre oldukça yüksek olması yüksek açılı yeniden kristalleşme tanelerinden ve tavlama ikizlerinden ileri gelmektedir. Her iki numunede de  $\Sigma 3$  CSL tane sınırları oranı %30'unda üzerindedir. Bu da, kaynak parametrelerine bağlı olarak daha düşük ısı girdisine rağmen kaynak öncesi uygulanan deformasyonun tavlama ikizlerini ve/veya yüksek açılı yeniden kristalleşme tanelerini arttırdığına işaret etmektedir.

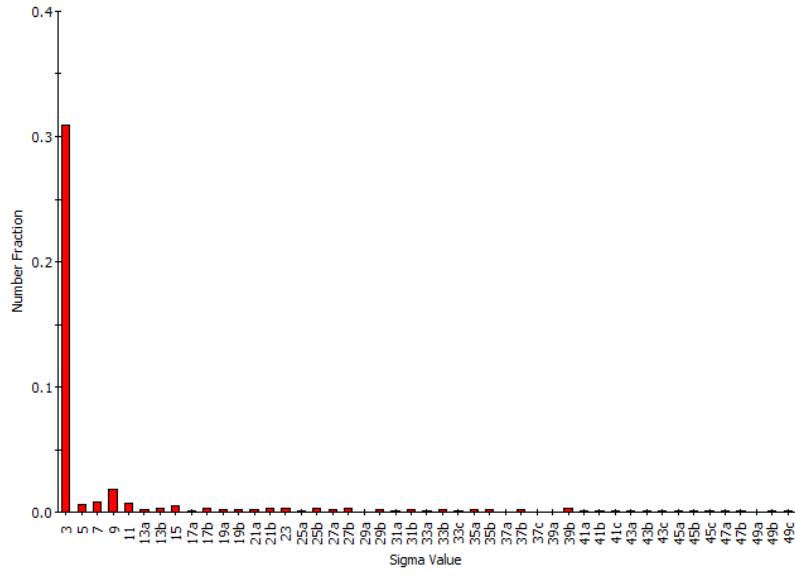
Daha fazla yeniden kristalleşme tanesi içeren daha düşük ısı girdisine sahip 15A1 kodlu numunede daha fazla miktarda yüksek açılı tane sınırlarına sahip yeniden kristalleşme tanesi olma olasılığı daha yüksektir. Buna istinaden de, daha yüksek ısı girdisine sahip 15A5 kodlu numunenin belirtilen değerlerden daha yüksek miktarda tavlama ikiz sınırlarına sahip olacağı düşünülebilir. Deformasyonsuz numunelerdeki gibi, ısı girdisi artışıyla ITAB'daki tane irileşmesine istinaden tavlama ikiz boylarının attığı sonucuna da ulaşılabilir. Yine, SEM-EBSD analizlerinden bu numunelerde de ısı girdisi artışına bağlı olarak tavlama ikizleri yoğunlukları ile ilgili net bir değerlendirme yapmak mümkün değildir.

Şekil 4.65'teki SEM görüntüleri, özellikle kaynak zamanının ısı girdisini arttırmasına bağlı olarak tane büyüklüğünün artmasıyla tavlama ikizlerinin miktarının azaldığını göstermektedir. Bu bağlamda, tane büyüklüğüne bağlı olarak da tavlama ikizlerinin boylarının da ısı girdisi artışıyla arttığı söylenebilir.



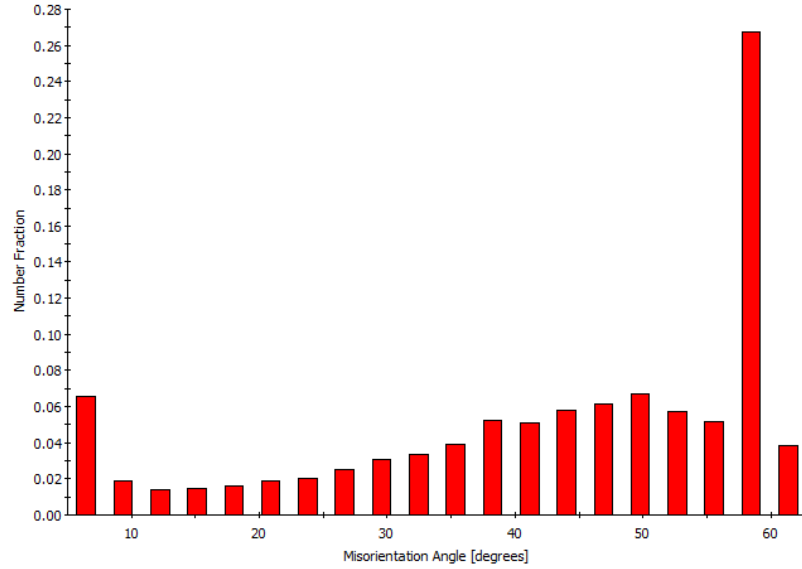
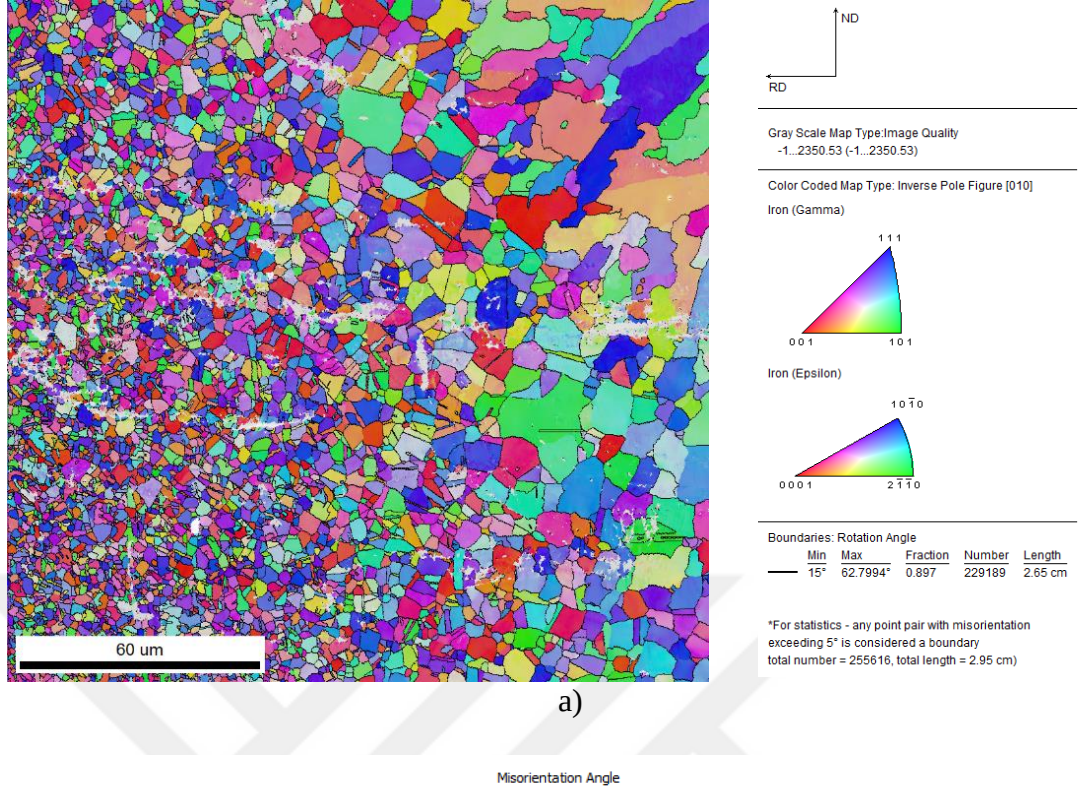
**Şekil 4.63.** 15A1 kodlu numunenin (IGİ=4000) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı



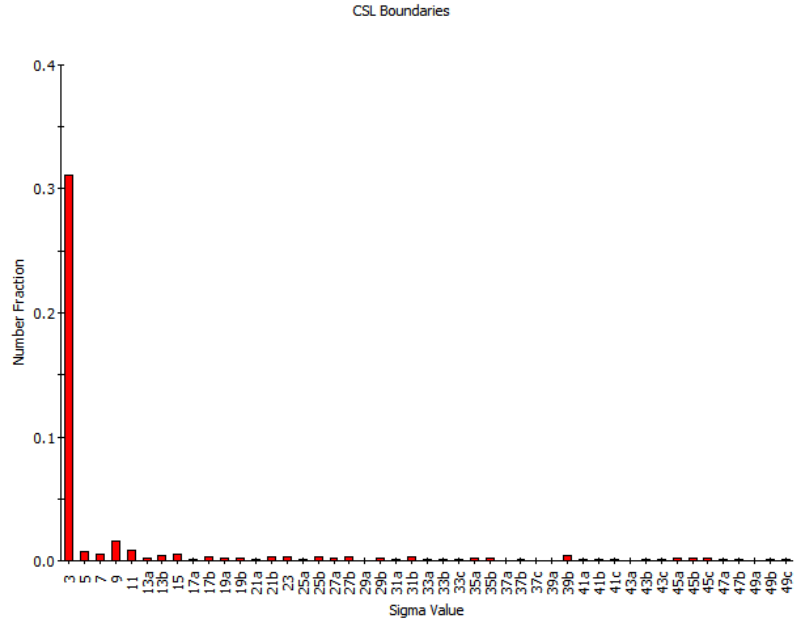


c)

**Şekil 4.63.** 15A1 kodlu numunenin ( $IGI=4000$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)

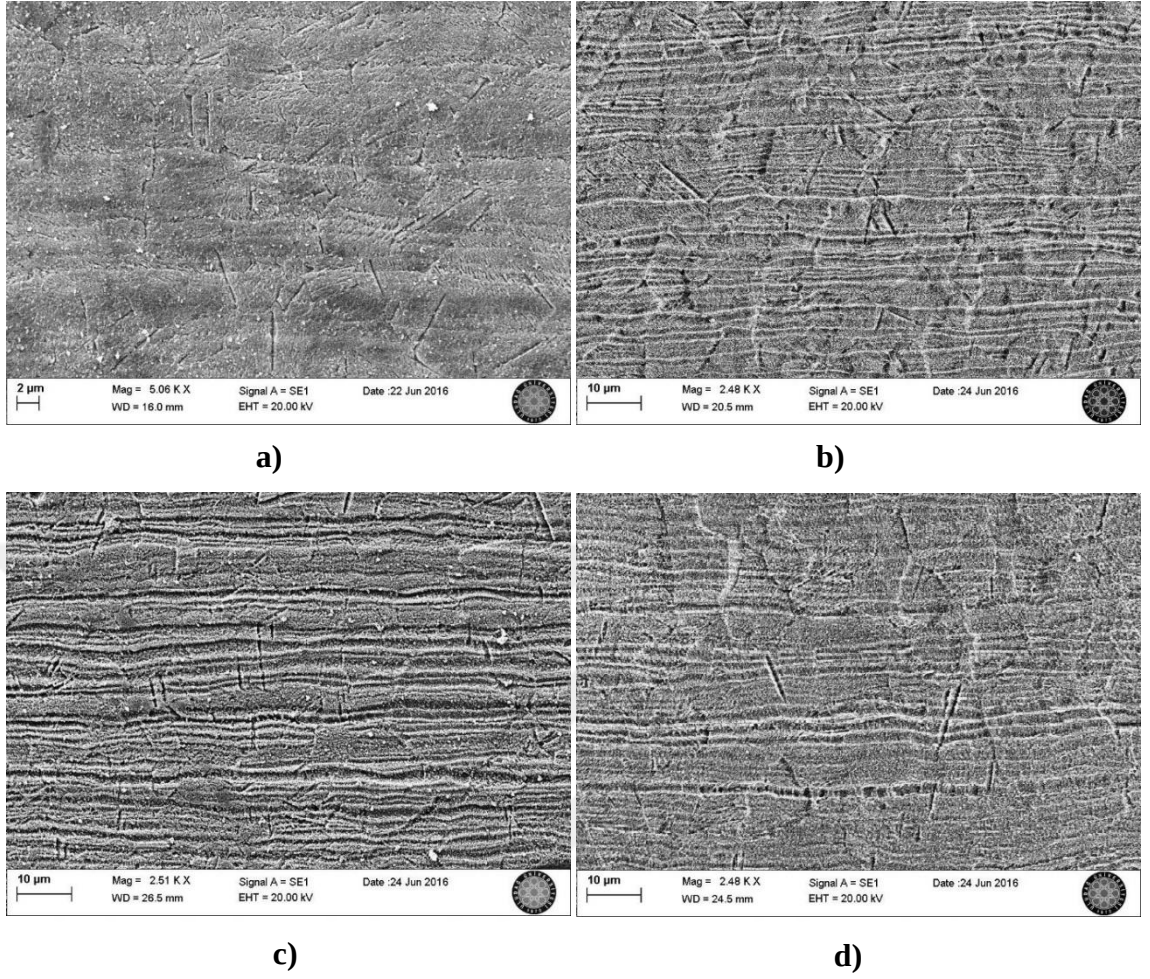


**Şekil 4.64.** 15A5 kodlu numunenin (IGİ=11111) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı



c)

**Şekil 4.64.** 15A5 kodlu numunenin ( $IGI=11111$ ) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)

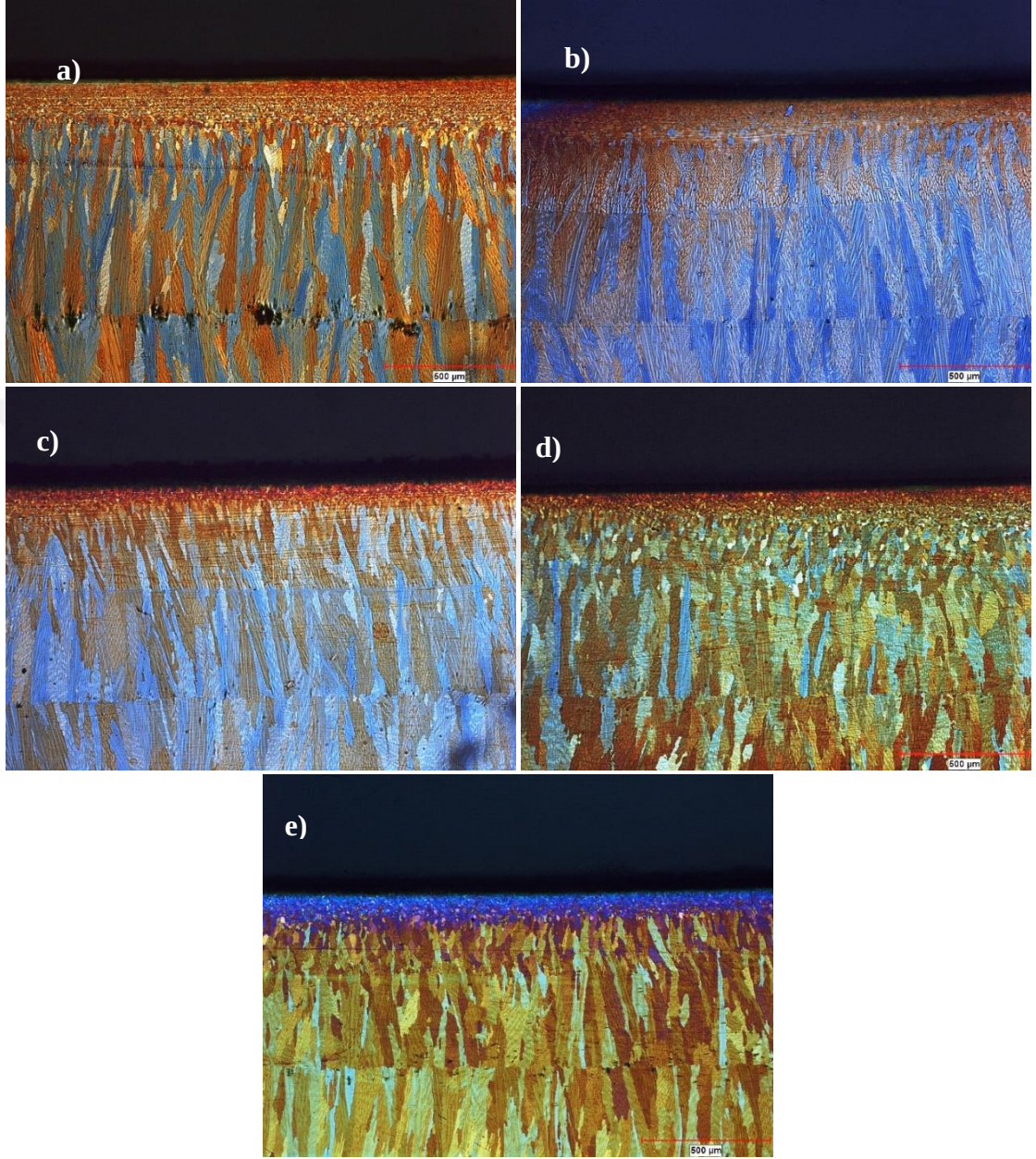


**Şekil 4.65.** ITAB mikro yapısının kaynak parametreleri ile değişimi (SEM görüntüleri)  
a)  $IGI=4000$  (15A1), b)  $IGI=9000$  (15K3A4Z3), c)  $IGI=5400$  (15Z1), d)  $IGI=12600$  (15Z5)

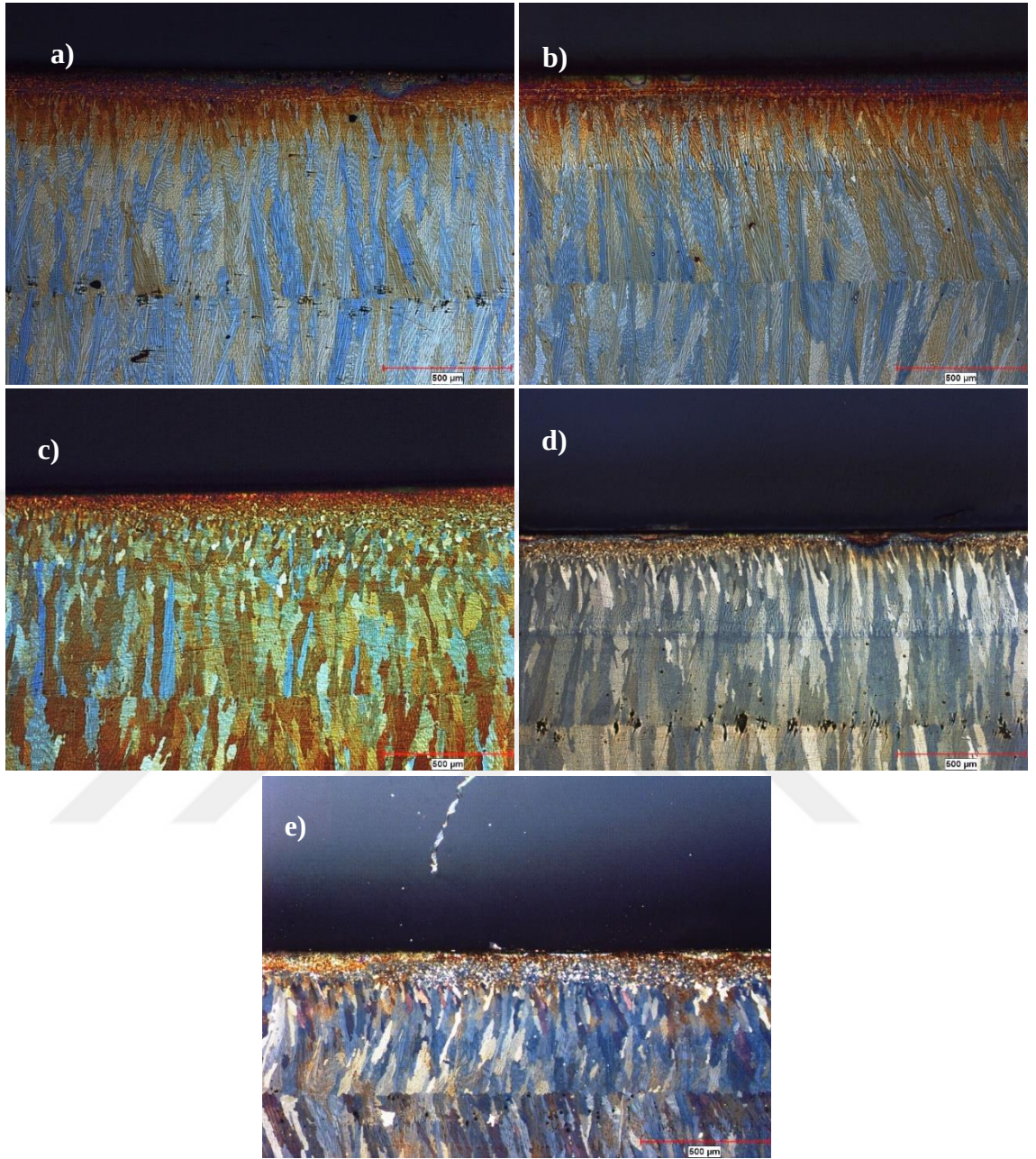
EB mikro yapılarına bakıldığında, kaynak akımı artışına bağlı olarak ısı girdisi artışıyla ince kolonsal daha kaba hale geldiği ve kaynak merkezi civarında da nispeten eş eksenli dendritik yapıların ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 4.66). Bu durum, daha yüksek ısı girdisinin daha yavaş soğuma hızına sebep olmasıyla ilişkilendirilebilir (kaynak merkezi civarında yüksek ısı girdisinden dolayı ısının daha yavaş ve tüm yönlerde eşit hızda çekilmesi). Ayrıca, daha önce de vurgulandığı üzere düşük ısı girdisine sahip numunede büzülme boşlukları dikkat çekmektedir (Şekil 4.66a). EB mikro yapısındaki benzer sonuçlar kaynak zamanı ve elektrot kuvveti değişimi ile de gözlenmiştir (Şekil 4.67 ve 4.68). Kendi grubu içerisinde en yüksek ısı girdisine sahip 15K1 numunesinde gözlemlenen büzülme boşlukları ise elektrot kuvvetinin yetersiz sıkmasından dolayı



toplam dirençteki stabiliteyi sağlayamadığından kaynaklamış olma olasılığı yüksektir (Şekil 4.68a).

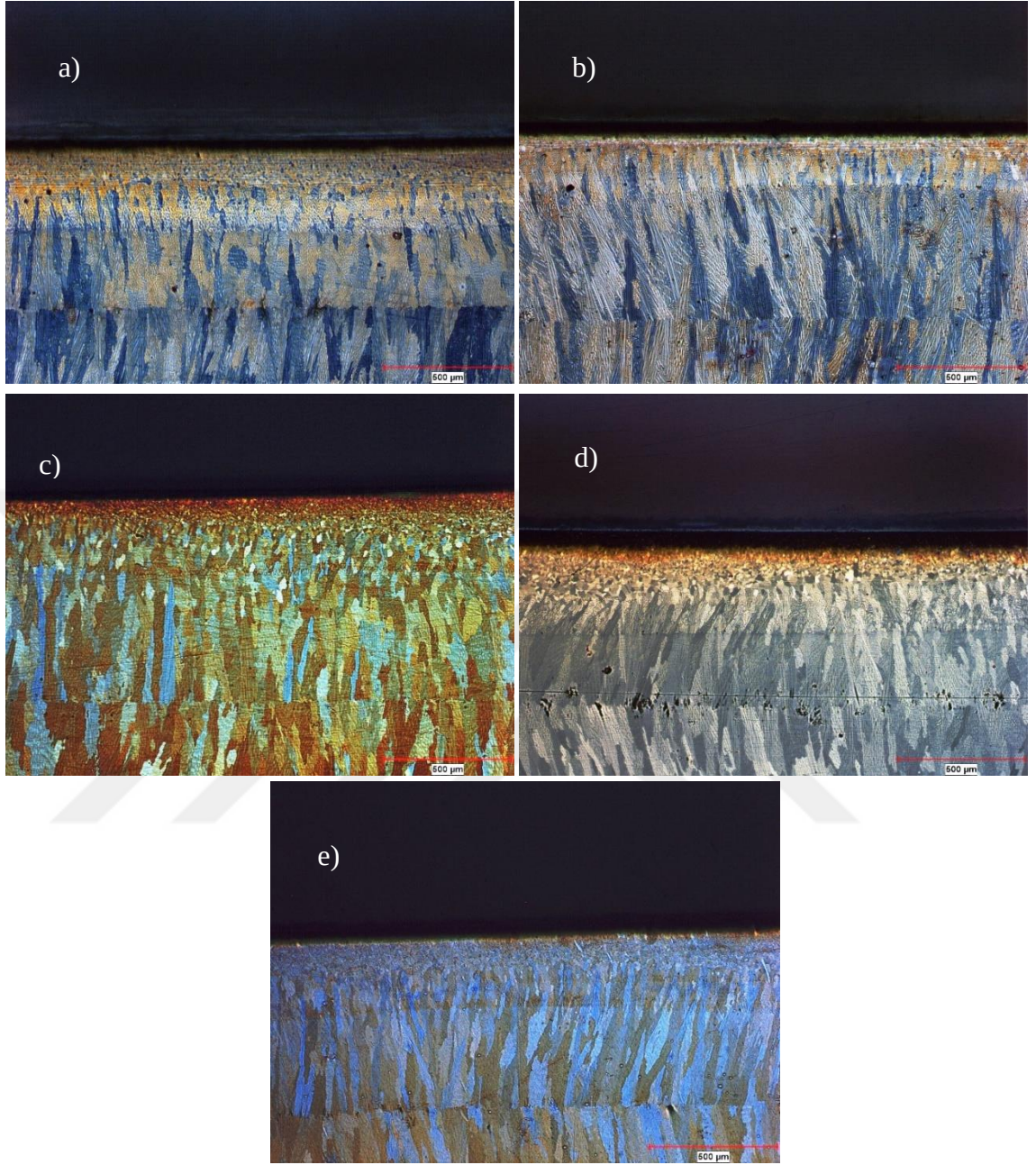


**Şekil 4.66.** EB mikro yapısının kaynak akımı ile değişimi (Optik görüntüleri): a) 6 kA, b) 7 kA, c) 8 kA, d) 9 kA, e) 10 kA (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu)



**Şekil 4.67.** EB mikro yapısının kaynak zamanı ile değişimi (Optik görüntüleri): a) 150 ms, b) 200 ms, c) 250 ms, d) 300 ms, e) 350 ms (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu)



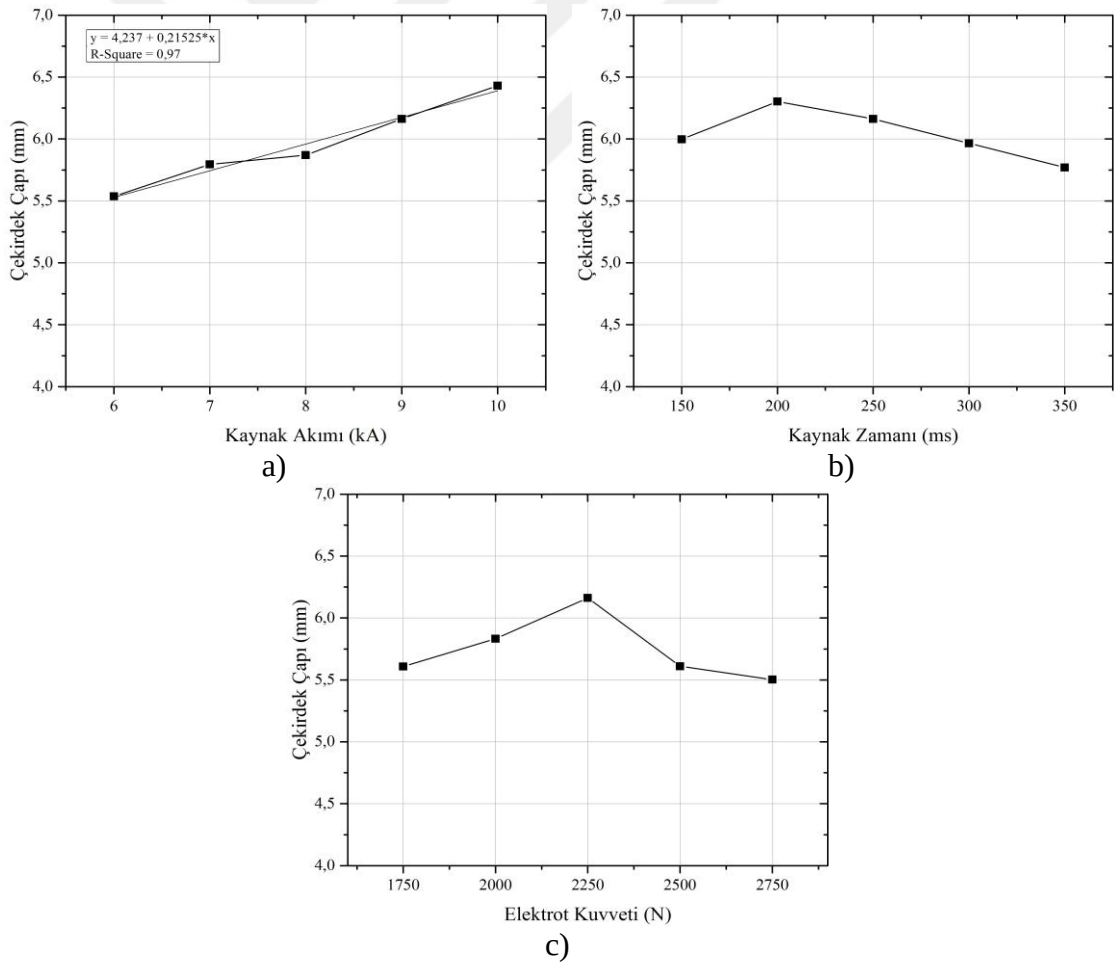


**Şekil 4.68.** EB mikro yapısının elektrot kuvveti ile değişimi (Optik görüntüleri): a) 1,75 kN, b) 2,0 kN, c) 2,25 kN, d) 2,5 kN, e) 2,75 kN (Büyütmeler x100) (%15 deformasyonlu B grubu)

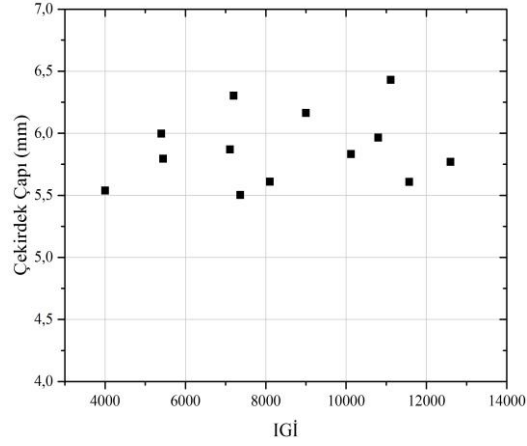
Kaynak parametreleri ile çekirdek çapı arasındaki ilişki Şekil 4.69’da verilmiştir. Genel olarak bu numunelerden elde edilen çekirdek çapları deformasyonsuz kaynaklı numunelerden daha düşük değerlerdedir. Bu da, tamamen bu grup kaynaklı numunelere uygulanan daha düşük ısı girdisi ile ilişkilidir. Kaynak akımı artışı ile ısı girdisi artışına bağlı olarak çekirdek çapı hemen hemen lineer şekilde artmaktadır (Şekil 4.69a)

Maksimum çekirdek çapı değeri artan ısı girdisine bağlı olarak maksimum kaynak akımında elde edilmiştir. 200 ms kaynak zamanında maksimum değerini gören çekirdek çapı değeri sonrasında artan kaynak zamanı ile neredeyse lineer bir şekilde azalmıştır (Şekil 4.69b). 2,25 kN'luk elektrot kuvvetine kadar çekirdek çapı değeri artan elektrot kuvveti ile artmıştır (Şekil 4.69c). Sonrasında ise, daha da artan elektrot kuvveti ile çekirdek çapı değeri azalmıştır. Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş %15 deformasyon oranına sahip TWIP çeliklerinde kaynak zamanı-çekirdek çapı ve elektrot kuvveti-çekirdek çapı arasındaki ilişki, deformasyonsuz kaynaklı numunelerdekine eğrilerin gidişatı açısından benzer karakter sergilemektedir.

Isı girdisi ile çekirdek çapı arasındaki ilişki Şekil 4.70'de verilmiştir. Genel itibariyle, deformasyonsuz gruptaki numunelerde olduğu gibi burada da ısı girdisi artışı ile çekirdek çapı (EB boyutu) artma eğilimindedir.

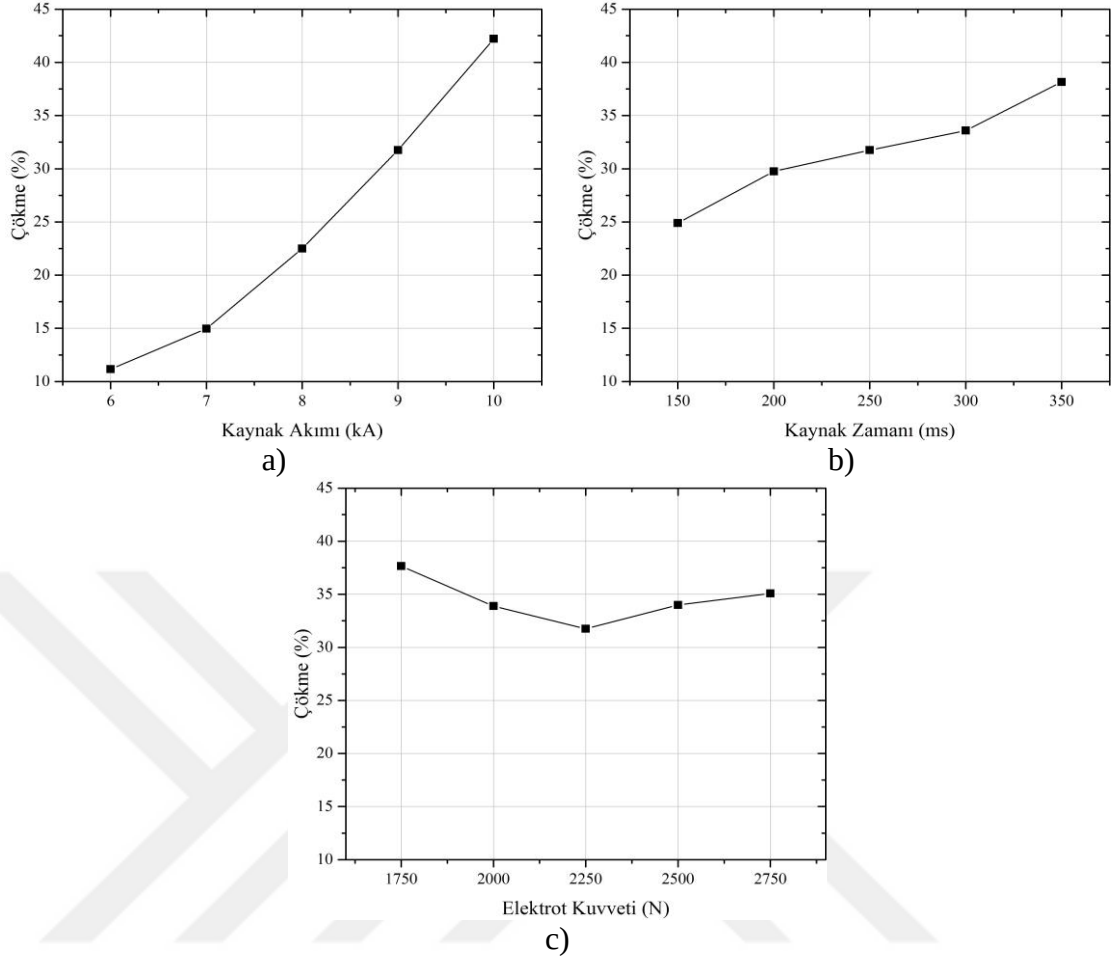


**Şekil 4.69.** Çekirdek çapının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)



**Şekil 4.70.** Çekirdek çapının ısı girdisi ile değişimi (%15 deformasyonlu B grubu)

Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilen saclarda daha öncede vurgulandığı üzere çökme miktarı hem mukavemete etkisi hem de estetik açıdan önem taşımaktadır. Bu bağlamda, kaynak parametreleri ve çökme miktarı arasındaki ilişki Şekil 4.71’de verilmiştir. Kaynaklı numunelerin çökme miktarı artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile sürekli bir artış içerisindedir. Diğer taraftan, 2.25 kN’a kadar artan elektrot kuvveti ile azalan ısı girdisine bağlı olarak çökme miktarı azalmıştır. Sonrasında, artan elektrot kuvvetinin daha yüksek sıkıştırma etkisiyle çökme miktarı bir miktar artmıştır.



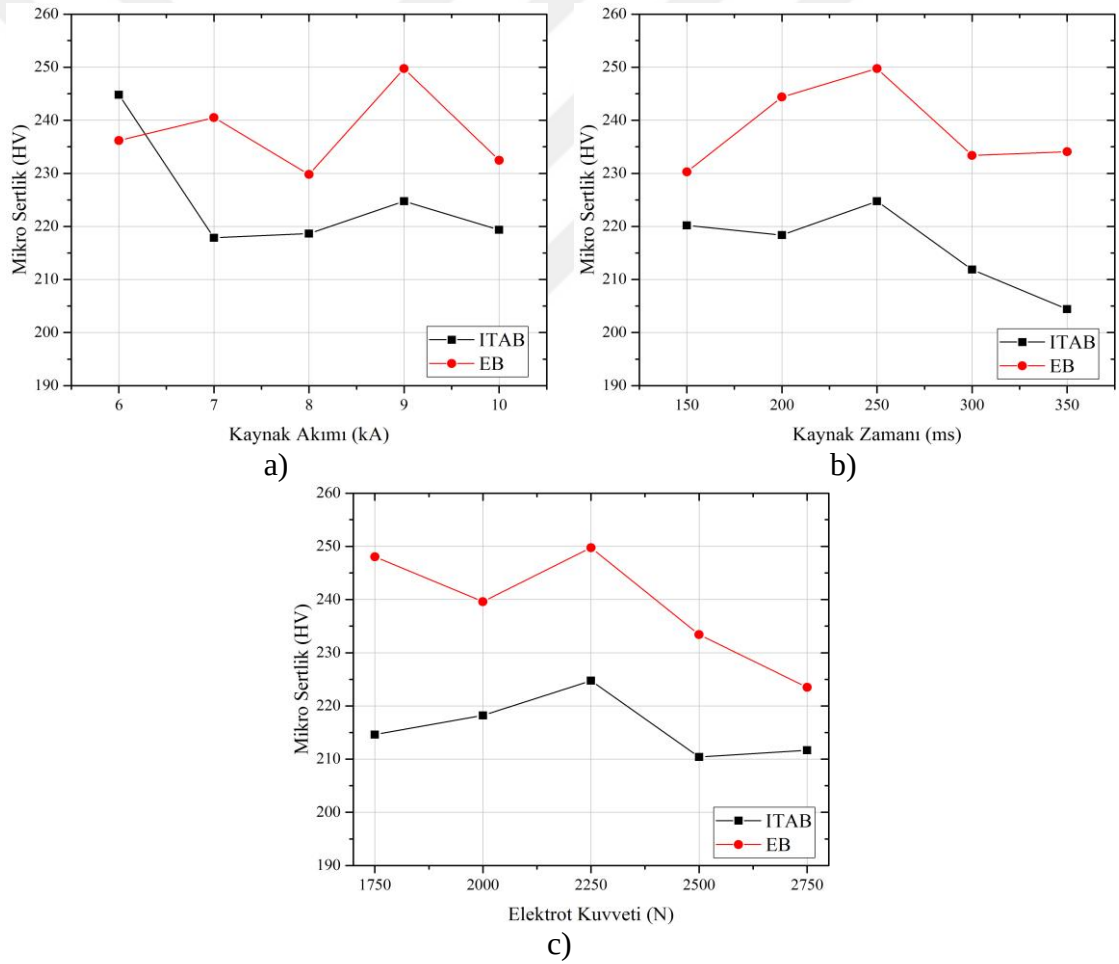
**Şekil 4.71.** Çökme miktarının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)

#### 4.5.2. Mikro sertlik ölçümleri

%15 deformasyonlu TWIP çeliğinin ortalama mikro sertlik değeri 363,02 HV<sub>0.2</sub> olarak elde edilmiştir. Kaynak bölgesi sertlik değerleri temel malzemeye göre çok daha düşük değerlerde kalmıştır (Şekil 4.72). En düşük sertlik değerleri hemen hemen tüm numunelerde ITAB'da gözlenmiştir. ITAB bölgesi sertlik değerleri ile kaynak parametreleri arasında belirgin bir korelasyon dikkati çekmemektedir. Ayrıca, farklı kaynak parametreleri ile kaynak edilmiş numunelerin ITAB sertlikleri arasındaki farklılık oldukça düşük olduğu söylenebilir. Ancak, özellikle en yüksek ısı girdisine sahip olan 15Z5 kodlu numunenin ITAB sertliği nispeten daha düşük değerlerdedir. Bunun da, tane irileşmesi ile ilişkili olması kuvvetle muhtemeldir.

Erime bölgesi sertliği ile kaynak parametreleri arasında da herhangi bir belirgin ilişkinin varlığı göze çarpmamaktadır. Ancak, erime bölgesinde daha yüksek elektrot kuvvetlerinde (daha düşük ısı girdisi) nispeten daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Bunun da, özellikle daha düşük ısı girdisinin sebep olduğu mikro büzülme boşluklarından kaynaklanması olasıdır.

Ayrıca, elde edilen sertlik değerleri ile deformasyonsuz kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi sertlik değerleri karşılaştırıldığında herhangi belirgin bir farklılık göze çarpmamaktadır. Bu durum, kaynak bölgesindeki faz dönüşümünün olmaması ve tüm mekanik ikizlerin ortadan kalkmasıyla ilişkili olduğu açıktır.



**Şekil 4.72.** Mikro sertlik değerlerinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)

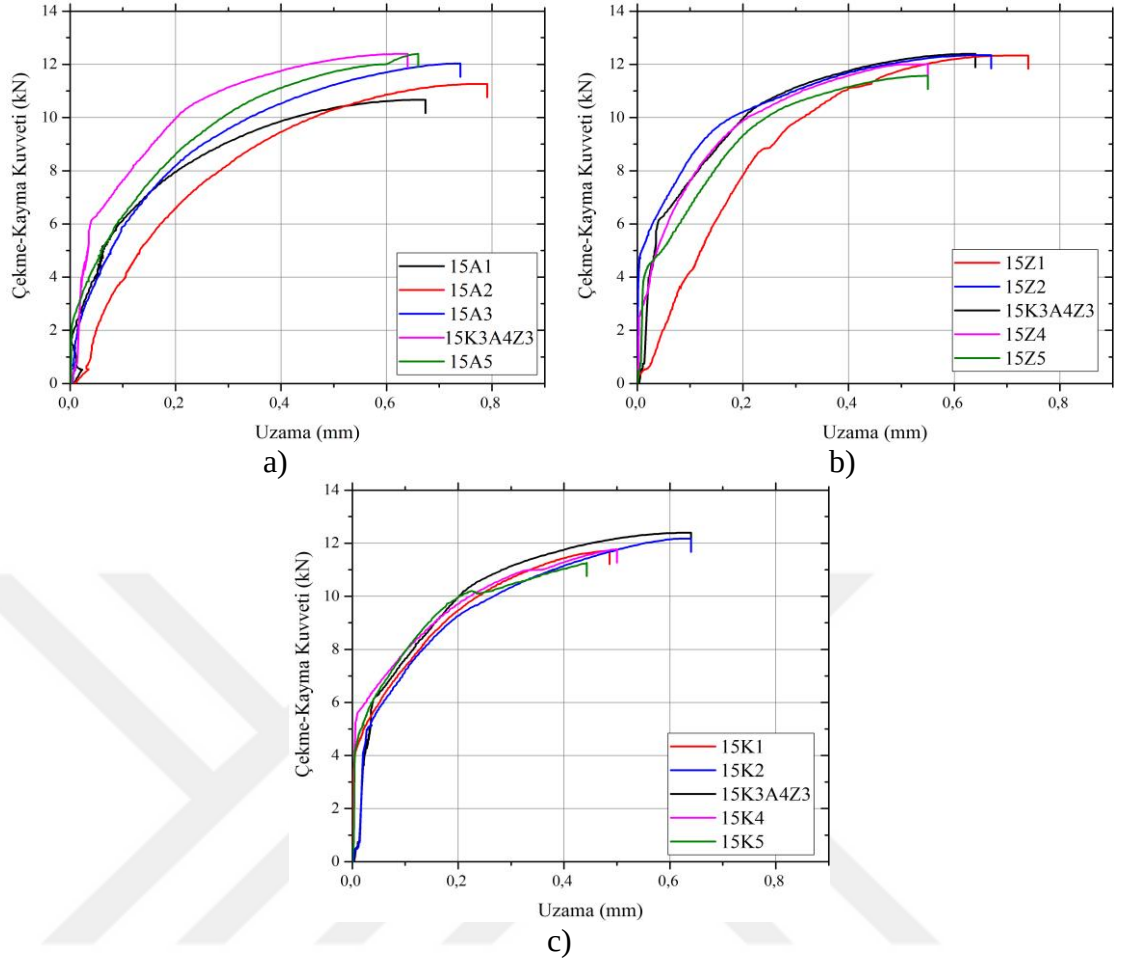
#### 4.5.3. Çekme testleri

Kaynaklı numunelerin çekme testlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.15 ve kaynaklı numunelerin çekme eğrileri Şekil 4.73'te verilmiştir.

**Çizelge 4.15.** Çekme-kayma test sonuçları (BÇ: Buton çekirdek; KBÇ/KA: Kısmi buton çekirdek/Kısmi ara yüzey; A: Ara yüzey) (%15 deformasyonlu B grubu)

| Numune Kodu | Kaynak Akımı (kA) | Kaynak Zamanı (ms) | Elektrot Kuvveti (N) | IGİ   | Çekme-kayma kuvveti [kN] | SS   | Kırılma Modu |
|-------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------|--------------------------|------|--------------|
| 15Z1        | 9                 | 150                | 2250                 | 5400  | 12,22                    | 0,40 | BÇ           |
| 15Z2        | 9                 | 200                | 2250                 | 7200  | 12,35                    | 0,19 | BÇ           |
| 15K3A4Z3    | 9                 | 250                | 2250                 | 9000  | 12,24                    | 0,32 | BÇ           |
| 15Z4        | 9                 | 300                | 2250                 | 10800 | 12,17                    | 0,18 | BÇ           |
| 15Z5        | 9                 | 350                | 2250                 | 12600 | 11,89                    | 0,28 | BÇ           |
| 15K1        | 9                 | 250                | 1750                 | 11571 | 11,72                    | 0,13 | KBÇ/KA       |
| 15K2        | 9                 | 250                | 2000                 | 10125 | 12,13                    | 0,28 | KBÇ/KA       |
| 15K3A4Z3    | 9                 | 250                | 2250                 | 9000  | 12,24                    | 0,32 | BÇ           |
| 15K4        | 9                 | 250                | 2500                 | 8100  | 11,81                    | 0,04 | BÇ           |
| 15K5        | 9                 | 250                | 2750                 | 7364  | 11,51                    | 0,39 | BÇ           |
| 15A1        | 6                 | 250                | 2250                 | 4000  | 10,49                    | 0,38 | A            |
| 15A2        | 7                 | 250                | 2250                 | 5444  | 11,18                    | 0,75 | A            |
| 15A3        | 8                 | 250                | 2250                 | 7111  | 11,91                    | 0,17 | KBÇ/KA       |
| 15K3A4Z3    | 9                 | 250                | 2250                 | 9000  | 12,24                    | 0,32 | BÇ           |
| 15A5        | 10                | 250                | 2250                 | 11111 | 12,38                    | 0,32 | BÇ           |





**Şekil 4.73.** %15 deformasyonlu B grubu kaynaklı numunelerin çekme eğrileri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti

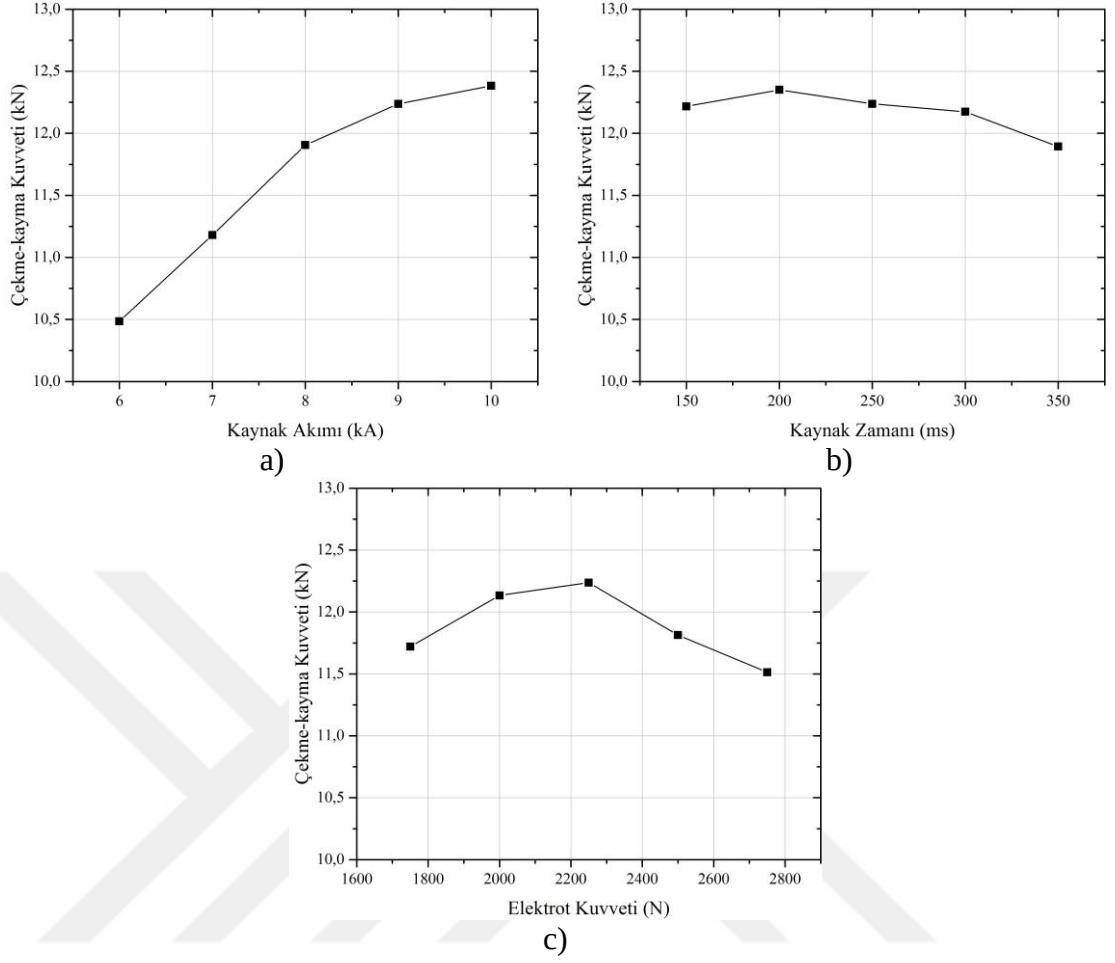
Kaynak parametrelerinin kaynaklı numunelerin çekme-kayma kuvvetine etkisi Şekil 4.74'te verilmiştir. Kaynak akımı artışı ile çekme-kayma kuvveti azalarak artan bir karakter sergilemiştir. Bu artış çekirdek çapındaki artış ile doğrudan ilişkilidir. Ancak, daha yüksek kaynak akımlarında çekme-kayma kuvvetinin artışı azalma ise çökme miktarındaki artış ile ilişkilendirilebilir. Kaynak akımı 6 kA'den 10 kA'ye arttırılmasıyla çekme-kayma kuvveti %18 artmıştır ve maksimum çekme-kayma kuvveti 12,38 kN ile 10 kA'lık kaynak akımında elde edilmiştir.

Kaynak zamanının etkisine bakıldığında, kaynak zamanının çekme-kayma kuvveti üzerindeki etkisi daha sınırlı kalmıştır. Öyle ki, kaynak zamanının 150-350 ms arasındaki değişimine karşın çekme-kayma kuvvetindeki değişim dar bir aralıkta (11,89-12,35 kN) kalmıştır (yaklaşık %4'lük değişim). Ancak, daha yüksek kaynak zamanlarında nispeten daha düşük çekme-kayma kuvvetleri elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, artan kaynak

zamanı ile çekme-kayma kuvveti azalmaya başlamıştır. Bu azalışın sebebi olarak da, kaynak zamanının artışının girdisini arttırmasıyla çökme miktarının artması ve çekirdek çapının azalması gösterilebilir. Çekme-kayma kuvveti 200 ms’de 12,35 kN ile maksimum değerine ulaşmıştır.

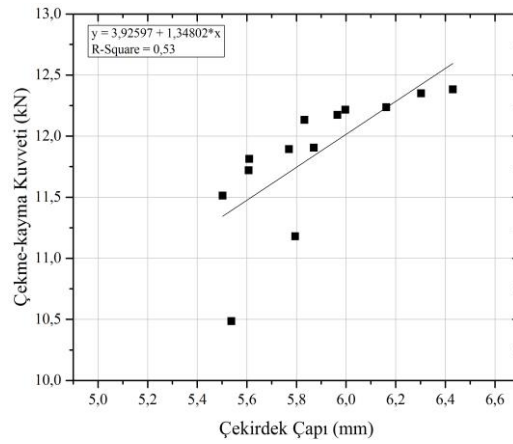
Elektrot kuvveti 2,25 kN değerine kadar arttırıldığında kaynaklı numunelerin çekme-kayma kuvveti artmaktadır. Sonrasında, çekme-kayma kuvveti elektrot kuvveti artışı ile azalmaktadır. Bu artış ve azalış, çekirdek çapı ve çökme miktarı ile tam uyum içerisindedir (Şekil 4.69 ve 4.71). Elektrot kuvvetinin 1,75-2,75 kN arasındaki değişimine karşın çekme-kayma kuvvetindeki değişim maksimum %6,3 olmuştur.

Bu veriler deformasyonsuz B grubu numunelerle karşılaştırıldığında, kaynak zamanı ve elektrot kuvvetinin çekme-kayma kuvvetleri üzerindeki etkileri nispeten benzerlik içermektedir. Ancak, bu grup numuneler içerisinde kaynak akımının çekme-kayma kuvveti üzerindeki etkisi çok belirgindir.



**Şekil 4.74.** Çekme–kayma kuvvetinin kaynak parametreleri ile değişimi: a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)

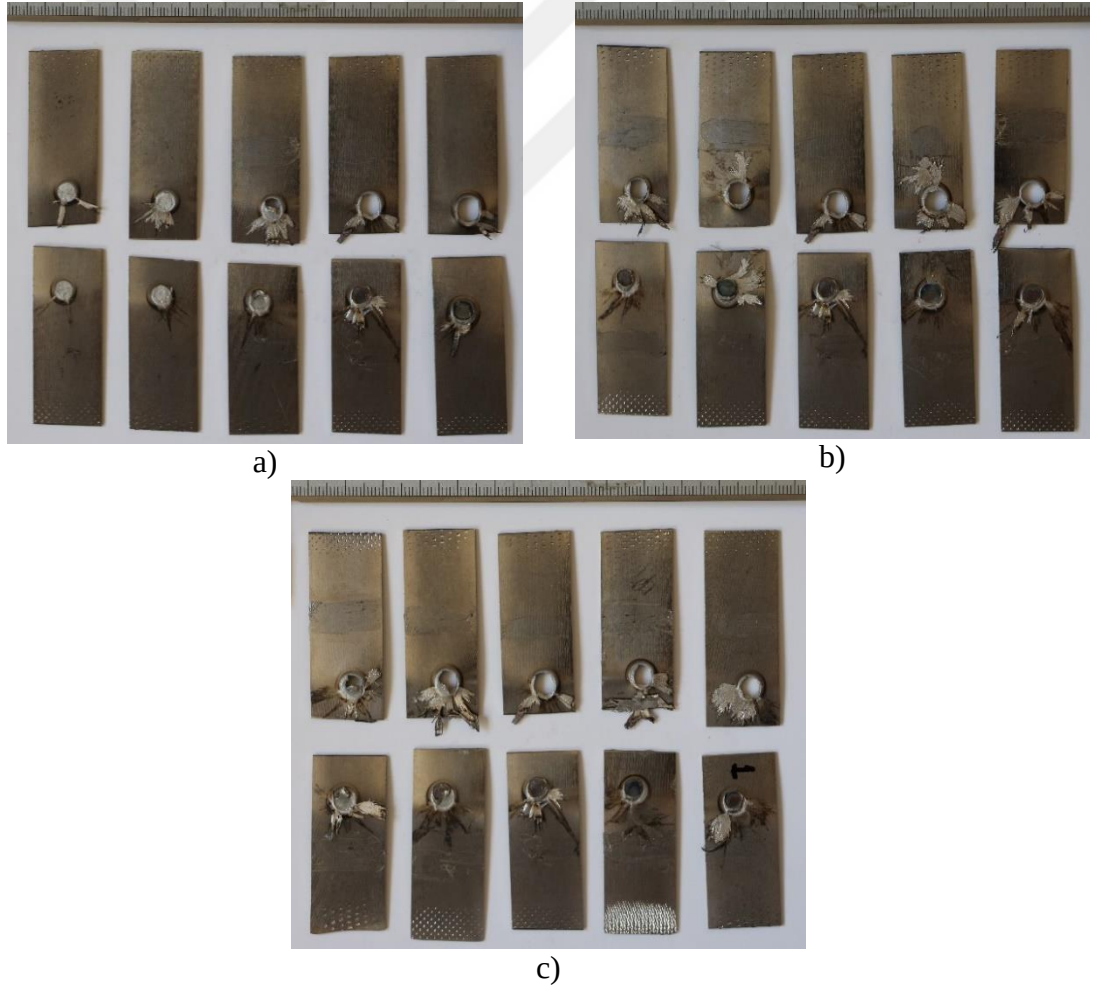
Çekme-kayma kuvvetleri ile çekirdek çapları arasındaki ilişkiye bakıldığında ise, genel eğilim artan çekirdek çapı ile çekme-kayma kuvvetinin arttığı yönündedir (Şekil 4.75).



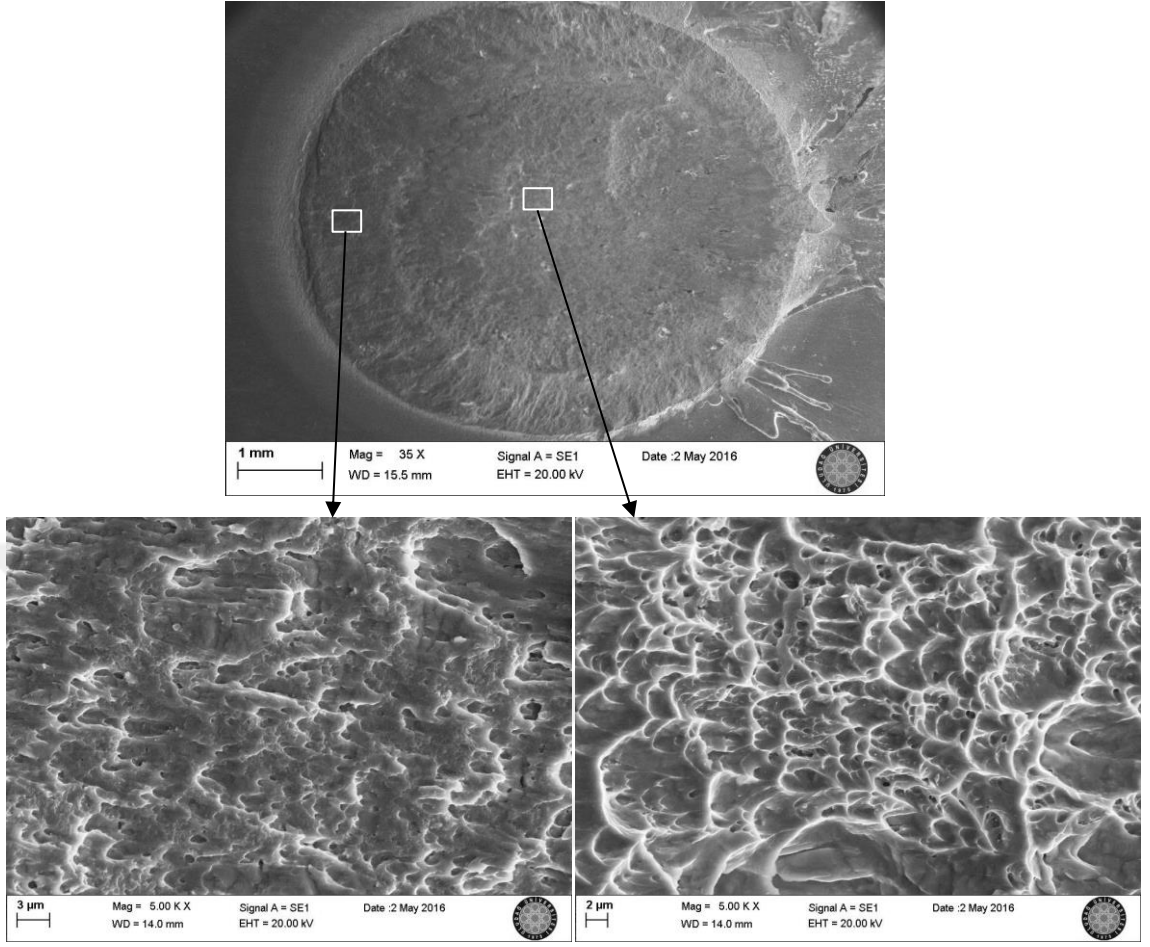
**Şekil 4.75.** Çekme–kayma kuvvetinin çekirdek çapı ile değişimi (%15 deformasyonlu B grubu)

#### 4.5.4. Kırılma yüzeylerinin analizi

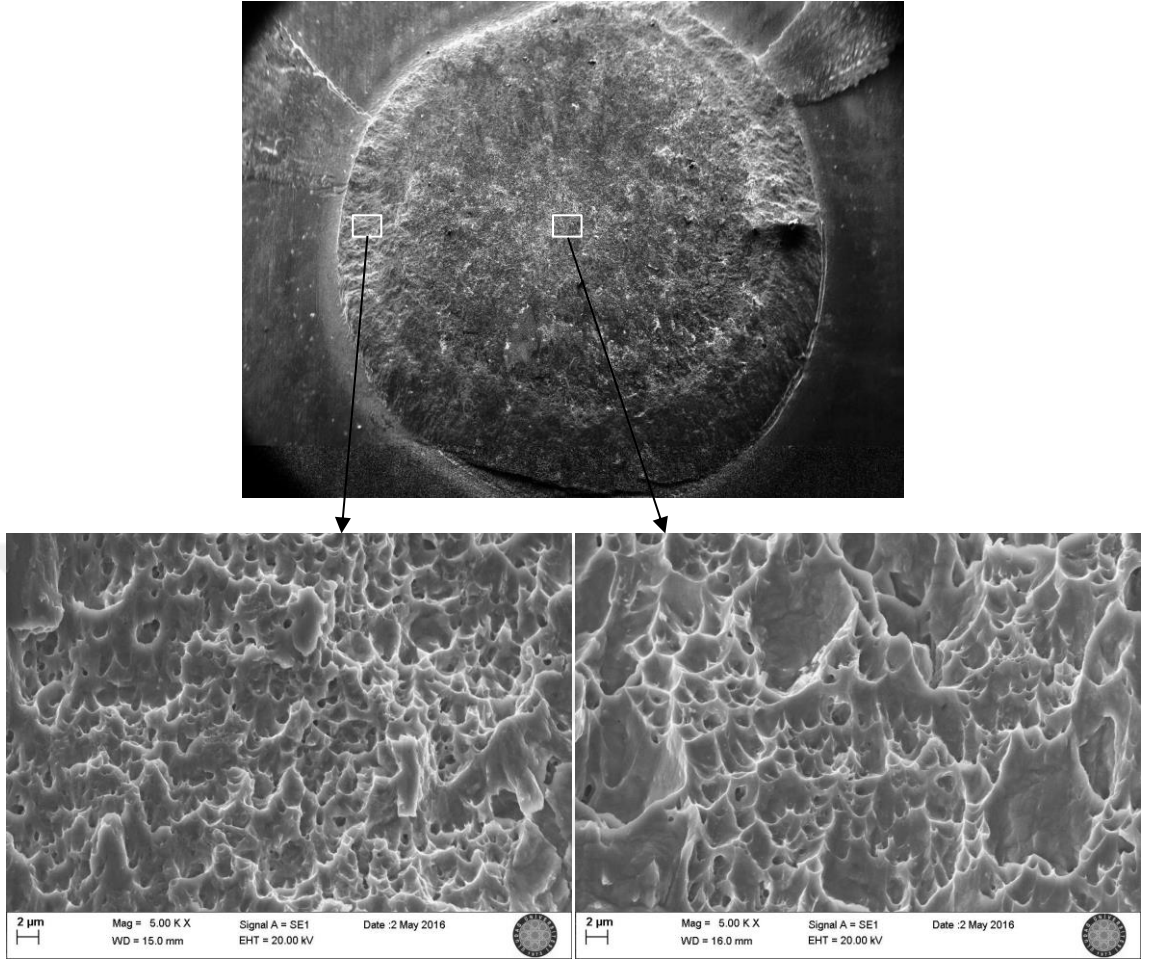
Kırılma yüzeylerinin analizi kısmında; tüm kırılma tiplerini içeren, en düşük ve en yüksek çekme-kaynak kuvveti de içeren kaynak akımı grubundaki numunelere yer verilmiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde, düşük kaynak akımları (6 ve 7 kA değerlerinde) ile üretilen numunelerdeki kırılmalar düşük çekme-kayma kuvvetine sahip ara yüzey (interfacial) kırılması şeklinde gerçekleşmiştir. Kaynak akımı değeri 8 kA'e yükseldiğinde ise kırılma kısmi buton çekirdek/kısmi ara yüzey kırılması şeklinde gerçekleşmiş olup kaynaklı numunenin çekme-kayma kuvveti artmıştır. Bu numuneler haricindeki diğer tüm numunelerdeki kırılmalar nispeten daha yüksek çekme-kayma kuvvetine sahip, çekirdek veren tipte (button pull-out failure mode) olmuştur. Çekme-kayma testi ile koparılan numunelerin görüntüleri Şekil 4.76'da, kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.77-4.79 ve Şekil 4.81 ve 4.82'de verilmiştir.



**Şekil 4.76.** Çekme-kayma testi uygulanmış kaynaklı numuneler a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%15 deformasyonlu B grubu)

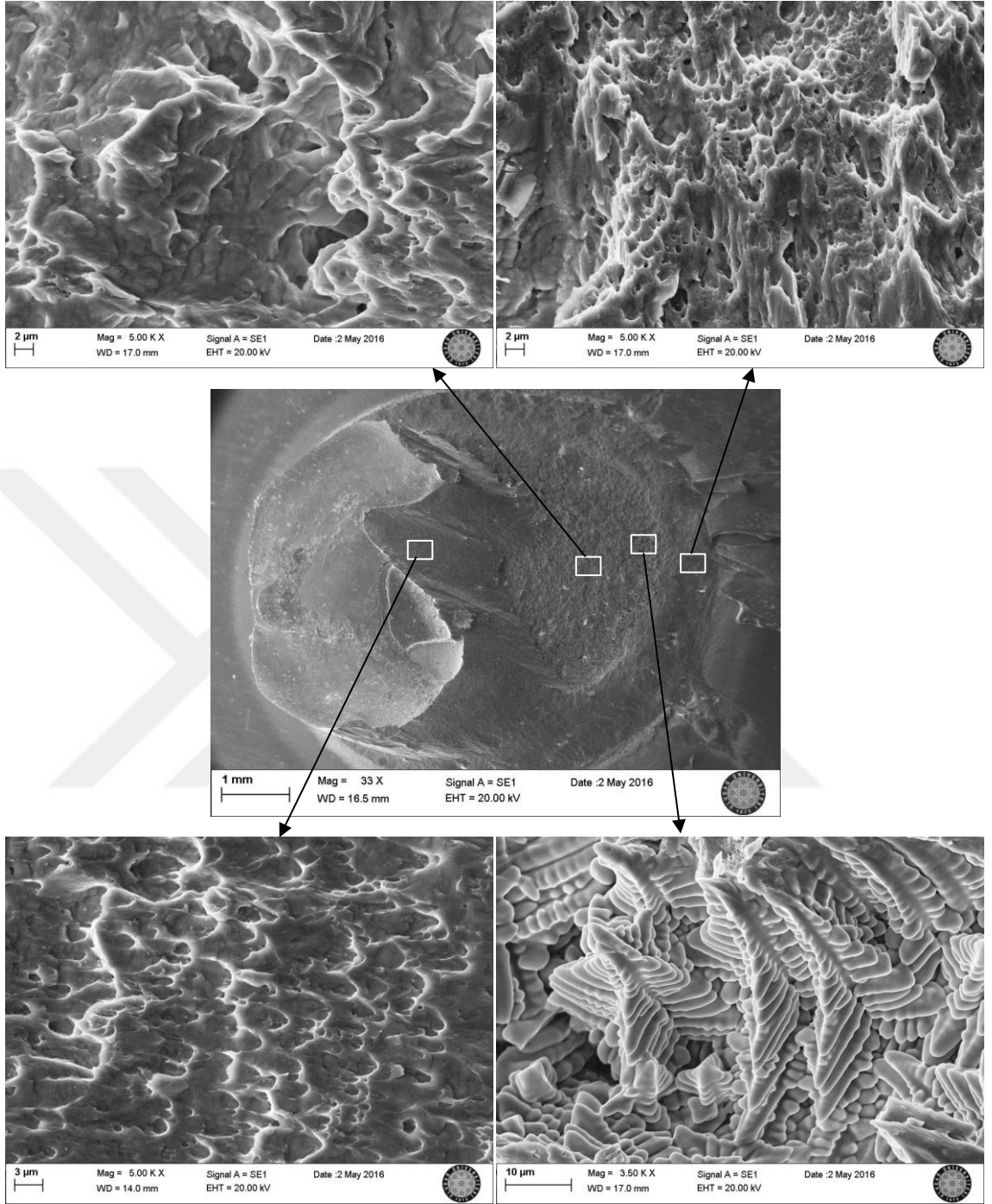


**Şekil 4.77.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15A1 numunesi)

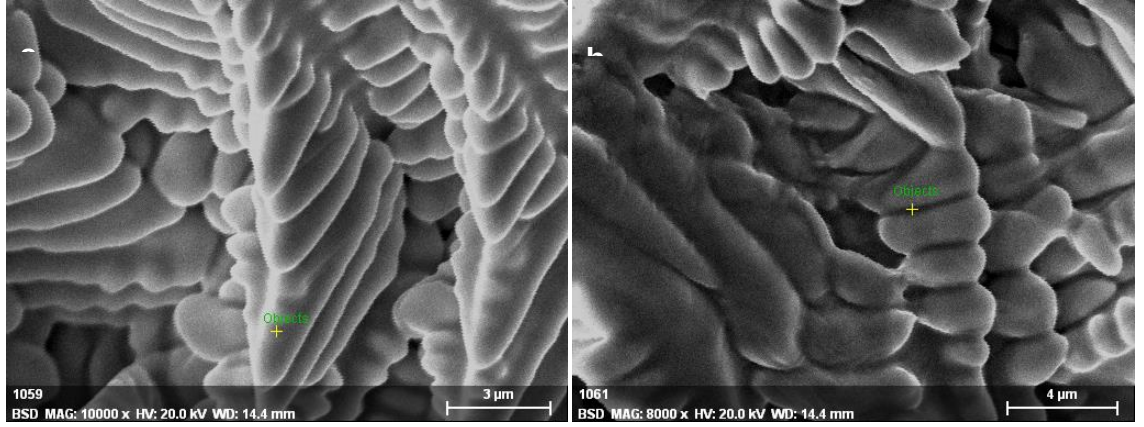


**Şekil 4.78.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15A2 numunesi)

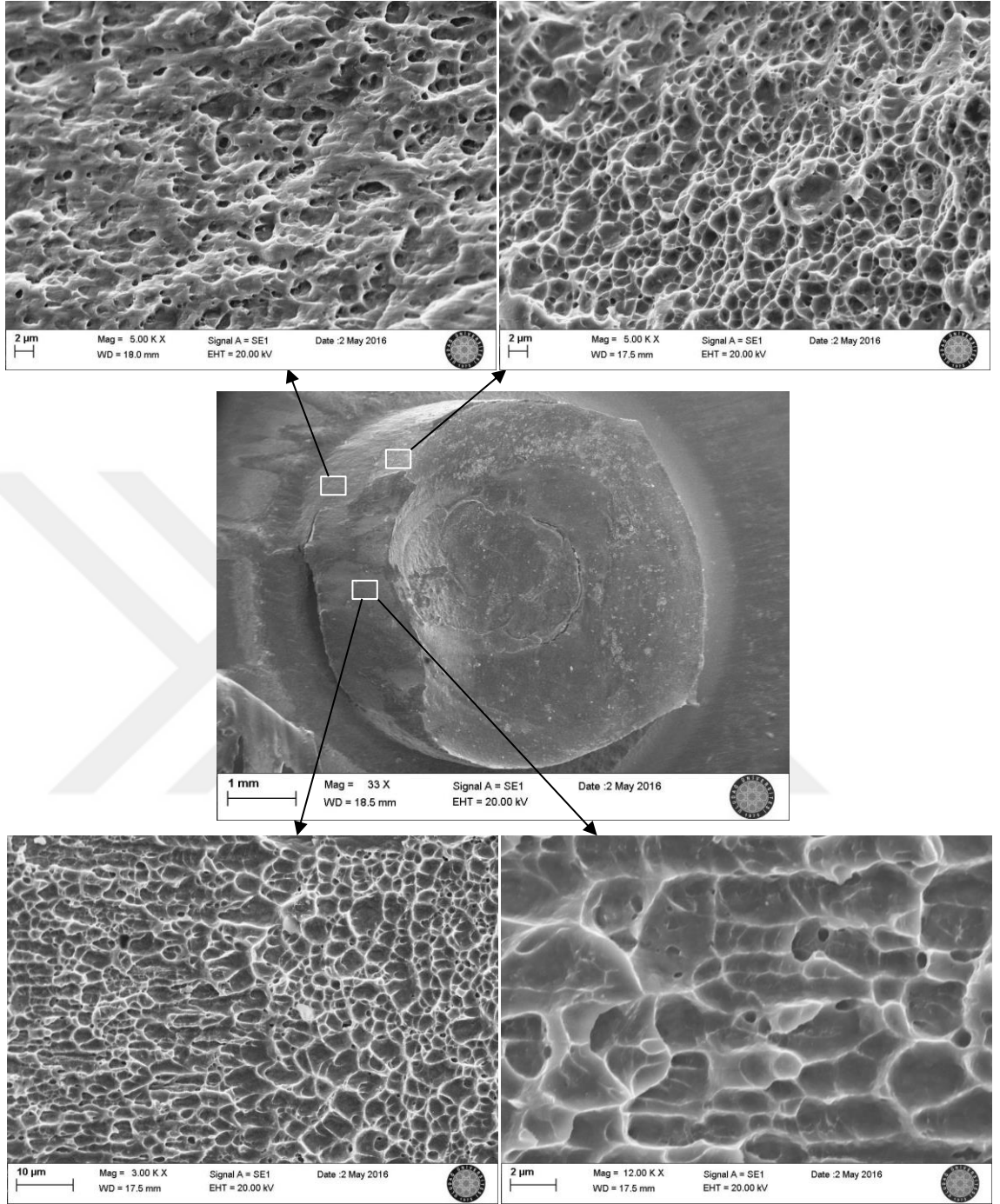




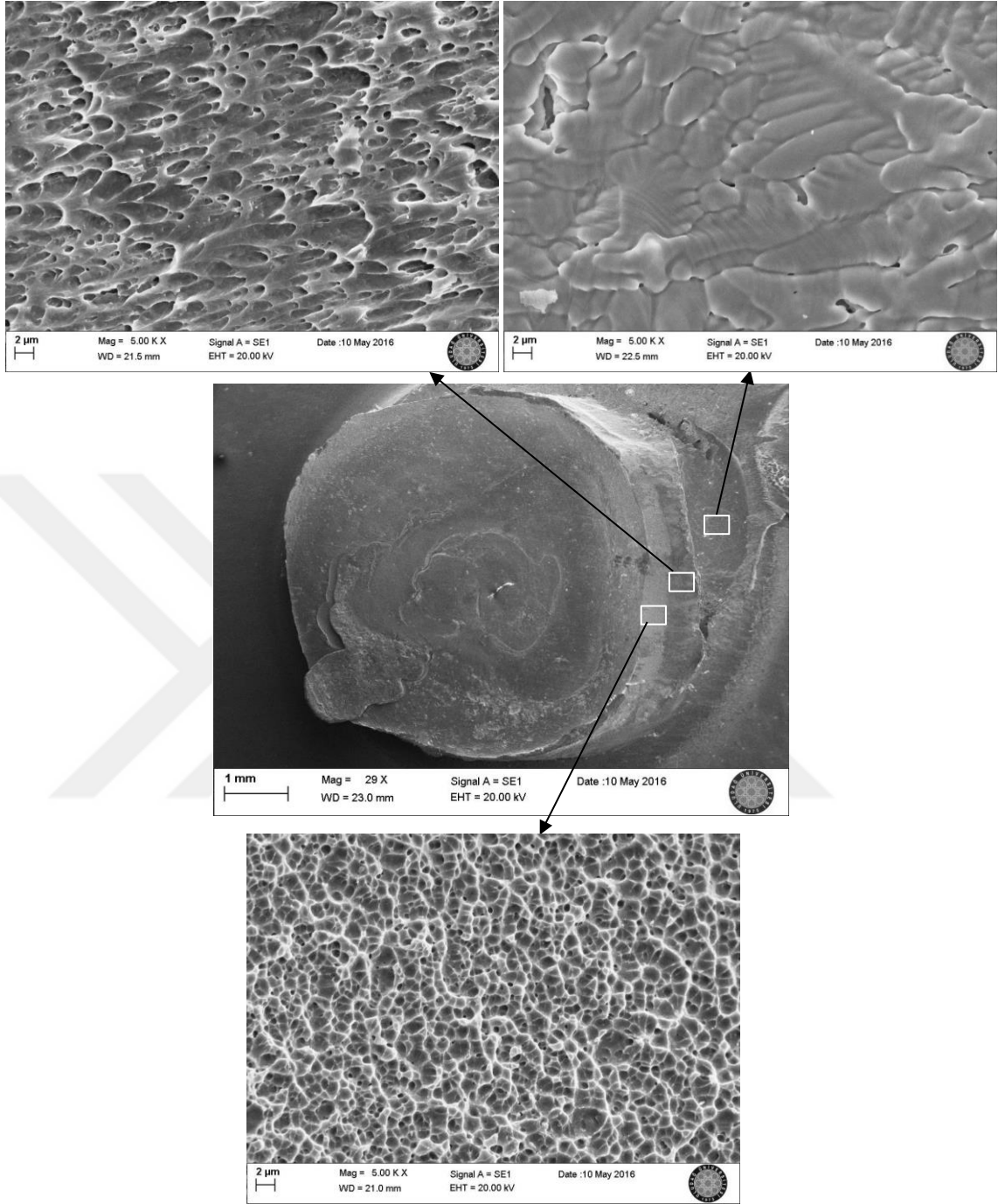
Şekil 4.79. SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15A3 numunesi)



**Şekil 4.80.** 15A3 kodlu numune kırılma yüzeyi üzerinden gerçekleştirilen SEM-EDS analizi: a) Dendrit kolları üzerinden; b) Dendrit kolları arasından



**Şekil 4.81.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15K3A4Z3 numunesi)



**Şekil 4.82.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (15A5 numunesi)

En düşük çekme-kayma kuvveti gösteren 15A1 numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntülerinden, kırılmanın ara yüzey tipinde bir kırılma şeklinde gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.77). Kırılma yüzeyinin kaynak merkezi civarı ve kaynak kenarı kırılmaları ayrı ayrı değerlendirildiğinde, merkez dışındaki bölgede, kısmen sünek tarzda kırılma işaretlerini de (oldukça sık mikro-çukurcuklar) içeren gevrek tarzda bir

kırılmanın ön planda olduğu bir kırılma yüzeyi gözlenmektedir. Kaynak merkezi civarındaki kırılma ise, kaynak kenarındaki kırılma yüzeyine nazaran daha fazla sünek kırılma karakteristiklerini içermektedir.

15A2 numunesinde de kırılma ara yüzey tipinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.78). Kırılma yüzeyi görüntüleri incelendiğinde, 15A2 numunesinin kırılma yüzeyinin 15A1 numunesine nazaran daha fazla sünek kırılma işaretleri içerdiğini söylemek mümkündür. Ara yüzey kırılmasında, kaynak kenarında daha gevrek tarzdaki kırılmalar çekme-kayma kuvvetinin daha düşük çıkmasına yol açmıştır.

Kaynak akımı daha yüksek olan ve daha çekme-kayma kuvvetine sahip 15A3 numunesindeki kırılma ise kısmi ara yüzey şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.79). Bu numunenin ara yüzey kırılma bölgesindeki kırılma karakteristikleri incelendiğinde, merkez dışındaki kırılma yüzeyi sünek kırılma karakteristiklerini de içeren gevrek kırılmanın etkin olduğu gevrek-sünek karışık kırılma tarzındadır. Ayrıca, ara yüzey kırılma bölgesinde dendritik yapıları ortaya koyan katılma çatlaklarından kaynaklanan doğrudan ayrılmalarda söz konusu olmuştur. Bu numunenin kırılma yüzeyindeki dendritik yapısı üzerinde gerçekleştirilen SEM-EDS analizlerinde, Mn ağırlıkça oranı dendrit kolları arasında %17,19 iken dendrit kollarında ise %14,06 değerinde olduğu görülmüştür (Şekil 4.80). Diğer taraftan, ağırlıkça Al oranı dendrit kolları arasında %0,95 iken dendrit kollarında ise %3,15 değerindedir. Temel malzeme içerisindeki ağırlıkça Mn oranı %15,60 ve ağırlıkça Al oranı %1,89 değerindedir. Temel malzeme kompozisyonu ile karşılaştırıldığında, Mn dendrit kolları arasında, Al dendrit kollarında zenginleşirken, diğer taraftan Mn dendrit kollarında, Al dendrit kolları arasında fakirleşmiştir. Elde edilen bu değerlerin, deformasyonsuz kaynak edilen numunelerde elde edilen değerler ile paralellik göstermektedir.

Buton tipi çekirdek veren nispeten yüksek çekme-kayma kuvvetine sahip 15K3A4Z3 ve 15A5 numunelerinin kırılma yüzeyleri de Şekil 4.81 ve Şekil 4.82’de verilmiştir. 15K3A4Z3 numunesinin çekirdek üzerindeki kırılma karakteristikleri incelendiğinde, iki farklı bölge dikkat çekicidir: gevrek-sünek tarzda kırılma bölgesi ve trans-granüler gevrek klevaj kırılmanın ön plana çıktığı kırılma bölgesi. 15A5 numunesinin çekirdek üzerindeki kırılma karakteristikleri de 15K3A4Z3 numunesi ile benzerlik taşımaktadır. Ancak,

gevrek-sünek tarzdaki kırılma bölgesinde daha sünek tarzda kırılmalar ve gevrek kırılma bölgesinde daha etkin trans- granüler kırılma dikkat çekmektedir. Ayrıca, bu numunede dendritik yapıyı ortaya çıkaran, doğrudan ayrılma da söz konusudur.

#### 4.6. %30 Deformasyonlu A Grubu Numuneler

Kaynak parametrelerinin optimizasyonu için kullanılan Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılması için, kaynak parametrelerinin alt ve üst sınırlarını belirlemek adına ön denemeler yapılmıştır. Alt sınırları belirlemede, soyma testi sonucu en küçük çekirdeğin gözlenmesi, üst sınırlarda ise çökme değerlerinin en fazla %35 olması kriter olarak belirlenmiştir. Ön denemelerde üretilen ve kaynak parametrelerinin alt sınırlarını belirleyen örnek numune Şekil 4.83'te kaynak parametreleriyle birlikte verilmiştir. Kaynak parametreleri için belirlenen değerlerin diğer iki deformasyon grubuna göre daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Burada temel neden, deformasyon sonucu azalan sac kalınlığıdır. Tüm kaynaklarda, sıkma zamanı, kaynak sonu tutma zamanı gibi diğer tüm kaynak parametreleri deformasyonsuz kaynaklı numunelerinin üretimi ile aynı değerlerde tutulmuştur.



**Şekil 4.83.** %30 deformasyonlu TWIP saclarında ön deneme kaynak numunesi örneği (kaynak akımı: 2,5 kA; elektrot kuvveti: 500 N; Kaynak zamanı: 100 ms.)

Ön denemelerle kaynak parametrelerinin aralıklarını belirleme çalışmalarında alt ve üst sınırlar olarak sırasıyla, kaynak akımı için 2,5kA-8,5kA, elektrot kuvveti için 500N-2500N ve kaynak zamanı için 100ms-400ms değerleri belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak oluşturulan Taguchi L9 ortogonal dizini ve bu numunelerin çekme-kayma test sonuçları ile “en büyük en iyi” kriteriyle hesaplanan S/N oranları Çizelge 4.16’da verilmiştir.



**Çizelge 4.16.** %30 deformasyonlu A grubu numunelerin Taguchi tablosu, çekme-kayma kuvvetleri ve hesaplanan S/N oranları

| Deney no | Elektrot kuvveti (N) | Akım (kA) | Zaman (ms) | Çekme-kayma kuvveti (kN) | SS   | S/N Oranı |
|----------|----------------------|-----------|------------|--------------------------|------|-----------|
| 1        | 500                  | 2,5       | 100        | 3,72                     | 0,16 | 11,41     |
| 2        | 500                  | 5,5       | 250        | 8,86                     | 0,13 | 18,95     |
| 3        | 500                  | 8,5       | 400        | 8,18                     | 0,28 | 18,25     |
| 4        | 1500                 | 2,5       | 250        | 3,61                     | 0,04 | 11,16     |
| 5        | 1500                 | 5,5       | 400        | 9,16                     | 0,13 | 19,24     |
| 6        | 1500                 | 8,5       | 100        | 10,13                    | 0,28 | 20,11     |
| 7        | 2500                 | 2,5       | 400        | 2,32                     | 0,05 | 7,33      |
| 8        | 2500                 | 5,5       | 100        | 8,46                     | 0,29 | 18,54     |
| 9        | 2500                 | 8,5       | 250        | 9,16                     | 0,13 | 19,24     |

Kaynak parametrelerinin S/N oranları ve ortalama değerlere etkileri, sırasıyla, Çizelge 4.17 ve 4.18’de verilmiş ve optimum değerler belirtilmiştir. Ayrıca, bu etki seviyeleri Şekil 4.84’te grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 4.84’te de görüldüğü üzere, kaynak parametrelerinin hem S/N oranlarına hem de ortalamalara etki karakterleri mükemmel bir uyum sergilemektedir.

**Çizelge 4.17.** Kaynak parametrelerinin S/N oranlarına etki (%30 deformasyonlu A grubu)

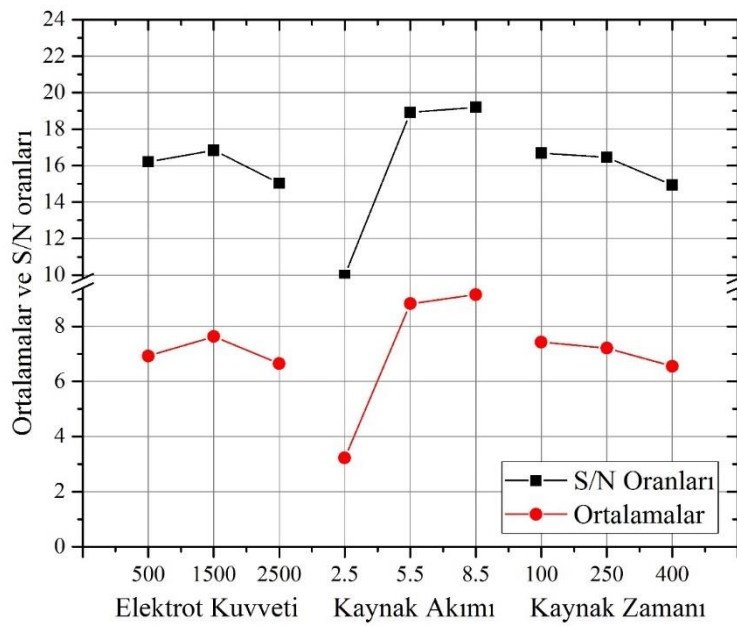
| Seviye | Elektrot kuvveti | Kaynak akımı | Kaynak zamanı |
|--------|------------------|--------------|---------------|
| 1      | 16,204           | 9,965        | 16,689*       |
| 2      | 16,836*          | 18,910       | 16,448        |
| 3      | 15,036           | 19,201*      | 14,939        |
| Delta  | 1,8              | 9,235        | 1,751         |
| Rank   | 2                | 1            | 3             |

\*Optimum seviye

**Çizelge 4.18.** Kaynak parametrelerinin ortalamalara etki seviyeleri (%30 deformasyonlu A grubu)

| Seviye | Elektrot kuvveti | Kaynak akımı | Kaynak zamanı |
|--------|------------------|--------------|---------------|
| 1      | 6,919            | 3,219        | 7,436*        |
| 2      | 7,634*           | 8,825        | 7,211         |
| 3      | 6,647            | 9,156        | 6,553         |
| Delta  | 0,988            | 5,937*       | 0,882         |
| Rank   | 2                | 1            | 3             |

\*Optimum seviye



**Şekil 4.84.** Kaynak parametrelerinin etki seviyeleri (%30 deformasyonlu A grubu)

Her iki etki tablosunda da etki sıralamasının büyükten küçüğe sırasıyla kaynak akımı, elektrot kuvveti ve kaynak zamanı şeklinde olduğu belirlenmiştir. S/N oranlarını en büyük yapan parametre seviyeleri 2-3-1 (elektrot kuvveti: 1500 N; kaynak akımı: 8,5 kA; kaynak zamanı: 100 ms) olarak belirlenmiştir. Bu parametre setinin mevcut deney tasarımında bulunmamasından dolayı doğrulama deneyi gerekli olmuş ve belirlenen optimum parametre setiyle yapılan deneylerin sonucu ile yapılan tahmin hataları Çizelge 4.19’da verilmiştir. Tahmin hatalarının oldukça küçük değerlerde bulunmasıyla birlikte, özellikle, tahmin için ortalamalar kullanıldığında tahmin değerindeki hata payı oldukça düşük değerde kalmıştır (%0,38).

**Çizelge 4.19.** Kaynak parametrelerinin optimum değerleri için yapılan tahminler (%30 deformasyonlu A grubu)

|                   | Ortalama (kN) | S/N oranı      |
|-------------------|---------------|----------------|
| Deneysel          | 10,13         | 20,11          |
| Tahmin            | 10,09         | 20,68 (10,81*) |
| Tahmin hatası (%) | 0,38          | 2,80 (6,69*)   |

\*ortalamaya dönüştürülmüş S/N oranı ve hatası

Tekil kaynak parametrelerinin çekme-kayma kuvveti üzerindeki etkisini tespit etmek için ANOVA çalışması yapılmış ve oluşturulan ANOVA tablosu Çizelge 4.20’de verilmiştir. Çizelgeden en etkin parametrenin %95,21’lik katkı oranıyla kaynak akımı olduğu görülmektedir. Bu veri Taguchi tablolarıyla da uyum göstermektedir. Diğer iki parametrenin (kaynak zamanı ve elektrot kuvveti) etkileri oldukça düşük değerlerde kalmıştır. Bunun sebebi; önceki A grubu numunelerde olduğu gibi, kaynak parametreleri için belirlenen sınır değerlerde, kaynak akımının diğer parametrelere göre daha büyük bir aralıkta dağılması ve çekme-kayma kuvvetini etkileyen en önemli faktörün ısı girdisi olduğu düşünüldüğünde (ısı girdisi akımın karesiyle orantılıdır) akımın ısı girdisine etkisinin daha büyük olması ile açıklanabilir.

**Çizelge 4.20.** %30 deformasyonlu A grubu numuneler için oluşturulan ANOVA tablosu

|                  | DF | Seq SS  | Adj SS | Adj MS  | F      | %Katkı |
|------------------|----|---------|--------|---------|--------|--------|
| Elektrot kuvveti | 2  | 1,561   | 1,561  | 0,7805  | 2,89   | 2,23   |
| Kaynak akımı     | 2  | 66,775  | 66,775 | 33,3875 | 123,55 | 95,21  |
| Kaynak zamanı    | 2  | 1,2614  | 1,2614 | 0,6307  | 2,33   | 1,80   |
| Kalan hata       | 2  | 0,5405  | 0,5405 | 0,2702  |        | 0,77   |
| Toplam           | 8  | 70,1379 |        |         |        | 100,00 |

#### 4.7. %30 Deformasyonlu B Grubu Numuneler

Optimum kaynak parametrelerinin bulunduğu bölgede her bir parametrenin etkisini görebilmek için kaynak parametrelerinden ikisi sabit tutulup üçüncü parametre değiştirilmiştir. Çalışmanın bu kısmında kullanılan kaynak parametreleri de Çizelge 4.21’de, üretilmiş kaynaklı numune örnekleri Şekil 4.85’te verilmiştir.

**Çizelge 4.21.** %30 Deformasyonlu B grubu deney numuneleri için belirlenen kaynak parametreleri

| Numune Kodu | Kaynak Akımı (kA) | Kaynak Zamanı (ms) | Elektrot Kuvveti (N) | İGİ   |
|-------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------|
| 30Z1        | 8,5               | 50                 | 1500                 | 2408  |
| 30K3A4Z2    | 8,5               | 100                | 1500                 | 4817  |
| 30Z3        | 8,5               | 150                | 1500                 | 7225  |
| 30Z4        | 8,5               | 200                | 1500                 | 9633  |
| 30Z5        | 8,5               | 250                | 1500                 | 12042 |
| 30K1        | 8,5               | 100                | 1000                 | 7225  |
| 30K2        | 8,5               | 100                | 1250                 | 5780  |
| 30K3A4Z2    | 8,5               | 100                | 1500                 | 4817  |
| 30K4        | 8,5               | 100                | 1750                 | 4129  |
| 30K5        | 8,5               | 100                | 2000                 | 3613  |
| 30A1        | 5,5               | 100                | 1500                 | 2017  |
| 30A2        | 6,5               | 100                | 1500                 | 2817  |
| 30A3        | 7,5               | 100                | 1500                 | 3750  |
| 30K3A4Z2    | 8,5               | 100                | 1500                 | 4817  |
| 30A5        | 9,5               | 100                | 1500                 | 6017  |



a)



b)



c)

**Şekil 4.85.** %30 deformasyonlu B grubu kaynaklı deney numuneleri örnekleri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti

#### 4.7.1. Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri

Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmiş %30 deformasyon oranına sahip TWIP çeliklerinin kaynak kesiti Şekil 4.86'da verilmiştir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, erime bölgesi genel itibariyle yönlenmiş tipik kaba kolonsal dendritik döküm mikro yapısına sahip iken kaynak işlemi esnasında ısı çevrime maruz kalan ITAB'da ise tavlama ikizleri de içeren oldukça iri taneler gözlenmektedir.

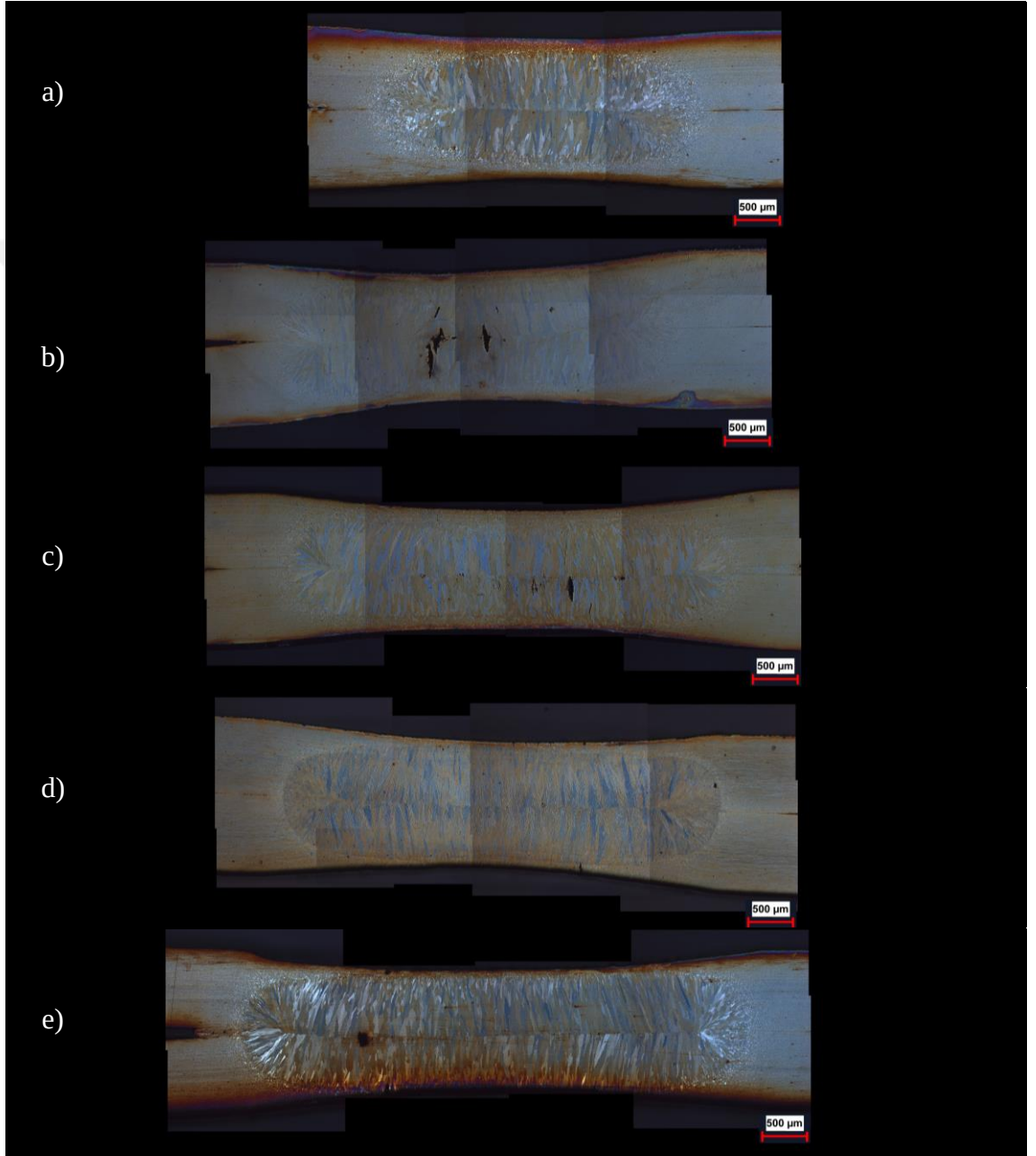


**Şekil 4.86.** %30 deformasyonlu kaynaklı TWIP çeliklerinin tipik makro yapısı ve mikro yapıları (Numune 30A5). (Büyütmeler: TM x500; ITAB x1000; Erime Bölgesi x50; Geçiş Bölgesi x100).

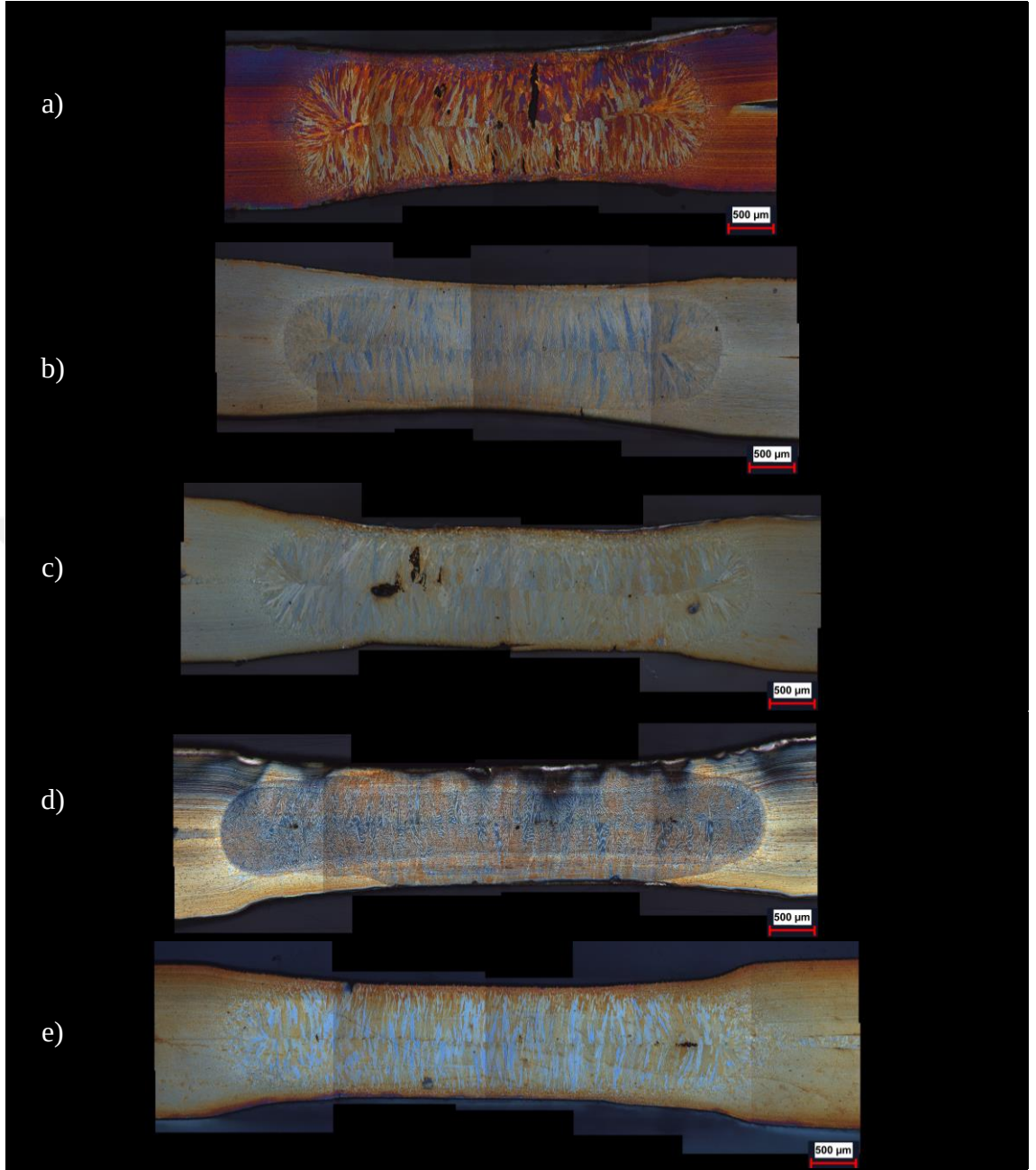
Kaynak parametrelerinin kaynaklı numunelerin makro yapılarına etkileri Şekil 4.87-4.89 arasında verilmiştir. Bu numunelerde de, %15 deformasyonlu numunelerdeki gibi EB’de makro boyuttaki sıçratma kaynak hatası gözlenmemiştir. Nitekim bu grup numunelerdeki ısı girdisi de nispeten daha düşük değerlerdedir. Özellikle bu grup numunelerde büzülme esaslı dikine türden kaynak boşluğu hatası dikkat çekicidir (Şekil 4.98 b ve c, Şekil 4.88 a ve c, Şekil 4.89 b). Bu tip kaynak hatasının kaynak parametreleriyle olan ilişkisinde net bir korelasyon gözlenmemiştir. Ancak, bu tip kaynak hatasının ortaya çıkması, daha düşük ısı girdisiyle ve %30 deforme edilmiş sacın daha ince olmasından kaynaklı daha hızlı soğumasına bağlanabilir. Öyle ki, bu sebebe bağlı olarak meydana gelen büzülme boşlukları daha ziyade dikine yöndedir. Diğer taraftan, çok düşük olan elektrot kuvvetinde elektrotlar-sac yüzeyleri ve iki ayrı sac yüzeyi arasında yeterli sıkmanın gerçekleşmemesi ile elektrik direnci çok yüksek değerlere çıkmış ve bu suretle erime bölgesinde yanmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.89 a). Genel olarak bakıldığında, ısı



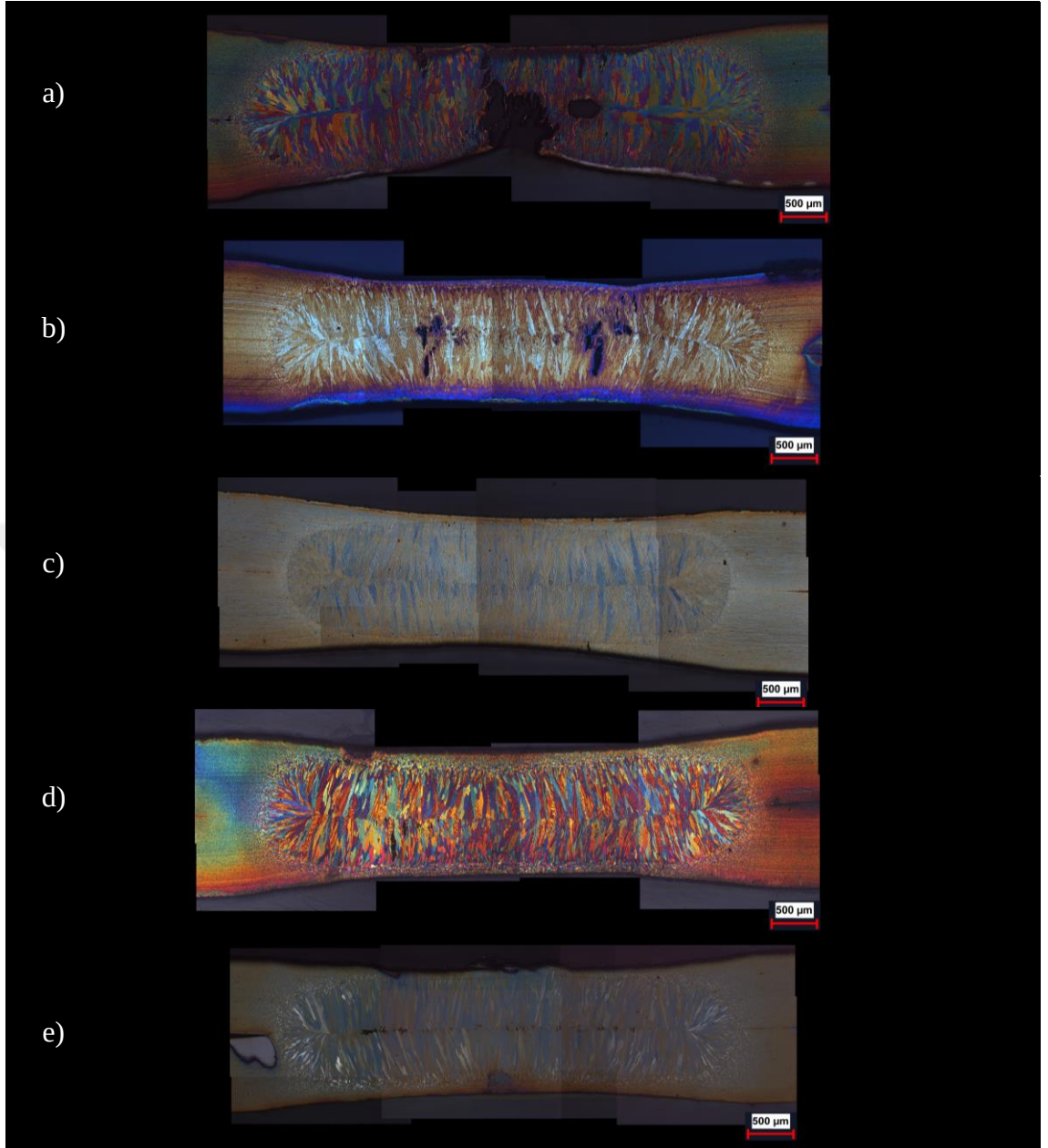
girdisi artışı ile çekirdek çapı ve çökme miktarı artmıştır. %0 ve %15 deformasyonlu numunelerle karşılaştırıldığında, bu grup numunelerdeki daha düşük ısı girdisine bağlı olarak, nispeten daha düşük çekirdek çapı ve çökme değerleri gözlenmiştir. Tüm kaynak parametrelerine bağlı olarak çekirdek çapı ve çökme miktarındaki değişimlerin grafiksel değerlendirmeleri de ileride detaylı olarak verilecektir.



**Şekil 4.87.** Kaynak akımının makro yapıya etkisi a) 5,5 kA, b) 6,5 kA, c) 7,5 kA, d) 8,5 kA, e) 9,5 kA (%30 deformasyonlu B grubu)



**Şekil 4.88.** Kaynak zamanının makro yapıya etkisi: a) 50 ms, b) 100 ms, c) 150 ms, d) 200 ms, e) 250 ms (%30 deformasyonlu B grubu)



**Şekil 4.89.** Elektrot kuvvetinin makro yapıya etkisi: a) 1 kN, b) 1,25 kN, c) 1,5 kN, d) 1,75 kN, e) 2 kN (%30 deformasyonlu B grubu)

Kaynak parametrelerinin ITAB oluşumuna etkileri Şekil 4.90-4.92 arasında verilmiştir. Optik mikroskop çalışmalarında ölçülen ITAB genişlikleri ile kaynak parametreleri arasındaki ilişki de Şekil 4.93 görülmektedir. Diğer taraftan, ısı girdisine bağlı olarak ITAB genişliği değişimi Şekil 4.94, kaynak parametrelerinin ITAB mikro yapılarına etkileri de Şekil 4.95-4.97 arasında verilmiştir.

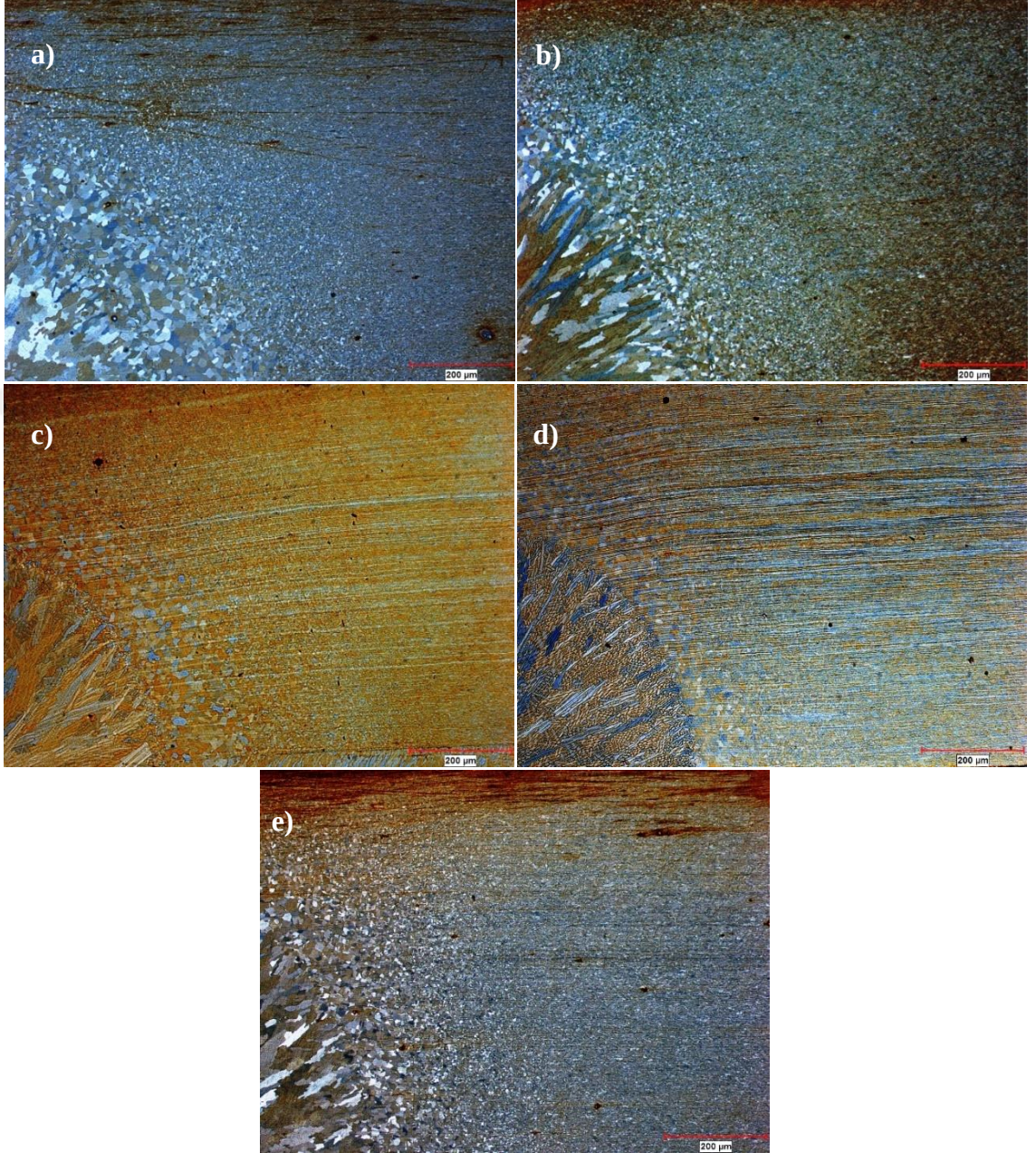
Şekil 4.93 a ve b’den görüleceği üzere ITAB genişliğinin kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile ısı girdisi artışına bağlı olarak arttığı görülmektedir. ITAB genişliği ve kaynak akımı arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,62 iken, ITAB genişliği ve kaynak zamanı arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,97’inin de üzerindedir. ITAB genişliği ve kaynak akımı arasındaki nispeten düşük olan korelasyon katsayısı 30A1 numunesinden kaynaklandığı açıktır: En düşük ısı girdisine rağmen ITAB genişliğinin nispeten yüksek oluşu ve ITAB’daki tanelerin nispeten iri olması beklenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmıştır (Şekil 4.90 a, Şekil 4.93 a ve 4.95 a).

Bu beklenmeyen durum şu şekilde açıklanabilir: Şekil 4.87’deki makro görüntülere bakıldığında, 30A1 numunesinin makro görüntüsünde ergimenin diğer parametre kombinasyonlarına oranla çok daha küçük bir bölgede gerçekleştiği, dolayısıyla ITAB hacminin/kütlesinin de buna bağlı olarak çok küçük olduğu görülmektedir. ITAB genişliğinin artmasına ve tane irileşmesine yol açan unsurun esas olarak söz konusu bölgenin ulaştığı maksimum sıcaklık ile ilişkili olduğu açıktır. Isı girdisinin sıcaklıkta meydana getirdiği değişikliğin “ $Q=mc\Delta T$ ” formülüyle ilişkili ve “c” ısı sığasının sabit olduğu düşünüldüğünde; 30A1 numunesindeki ITAB hacminin/kütlesinin çok düşük olmasının bu bölgelerde daha yüksek sıcaklıkların elde edilmesine yol açtığı düşünülmektedir. Bu yüksek sıcaklık etkisi de, 30A1 numunesinde hem daha geniş hem de daha iri tanelerin bulunduğu bir ITAB bölgesinin elde edilmesine sebep olmuştur. Diğer taraftan, 1 kN ile 1,75 kN değerleri arasında artan elektrot kuvveti ile ITAB genişliği artmış sonrasında ise artan elektrot kuvveti değeri ile ITAB genişliği azalmıştır (Şekil 4.93 c).

Burada da, diğer grup numunelerdeki gibi elektrot kuvveti ve ITAB genişliği arasında belirgin bir korelasyon elde edilememiştir. Elektrot kuvveti ile ITAB genişliği arasındaki ilişkide, yüksek ısı girdisi sağlayan düşük elektrot kuvvetlerinde, daha küçük ITAB genişliği elde edilmesi dikkat çekicidir. Özellikle, bu numuneler içerisinde en yüksek ısı girdisine sahip olan 30K1 numunesinde en küçük ITAB genişliği elde edilmiştir. Bunun sebebinin ilgili numunede meydana gelen sıra dışı kaynak kusurları ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.89 a). Uygun olmayan elektrot kuvvetlerinden (düşük değerler) dolayı kaynak bölgesinde meydana gelen bu sıra dışı kusurların (kaynak bölgesinde yanma, büzülme boşluğu, çatlak gibi) ısı girdisinin ITAB bölgesinde ulaşılan maksimum

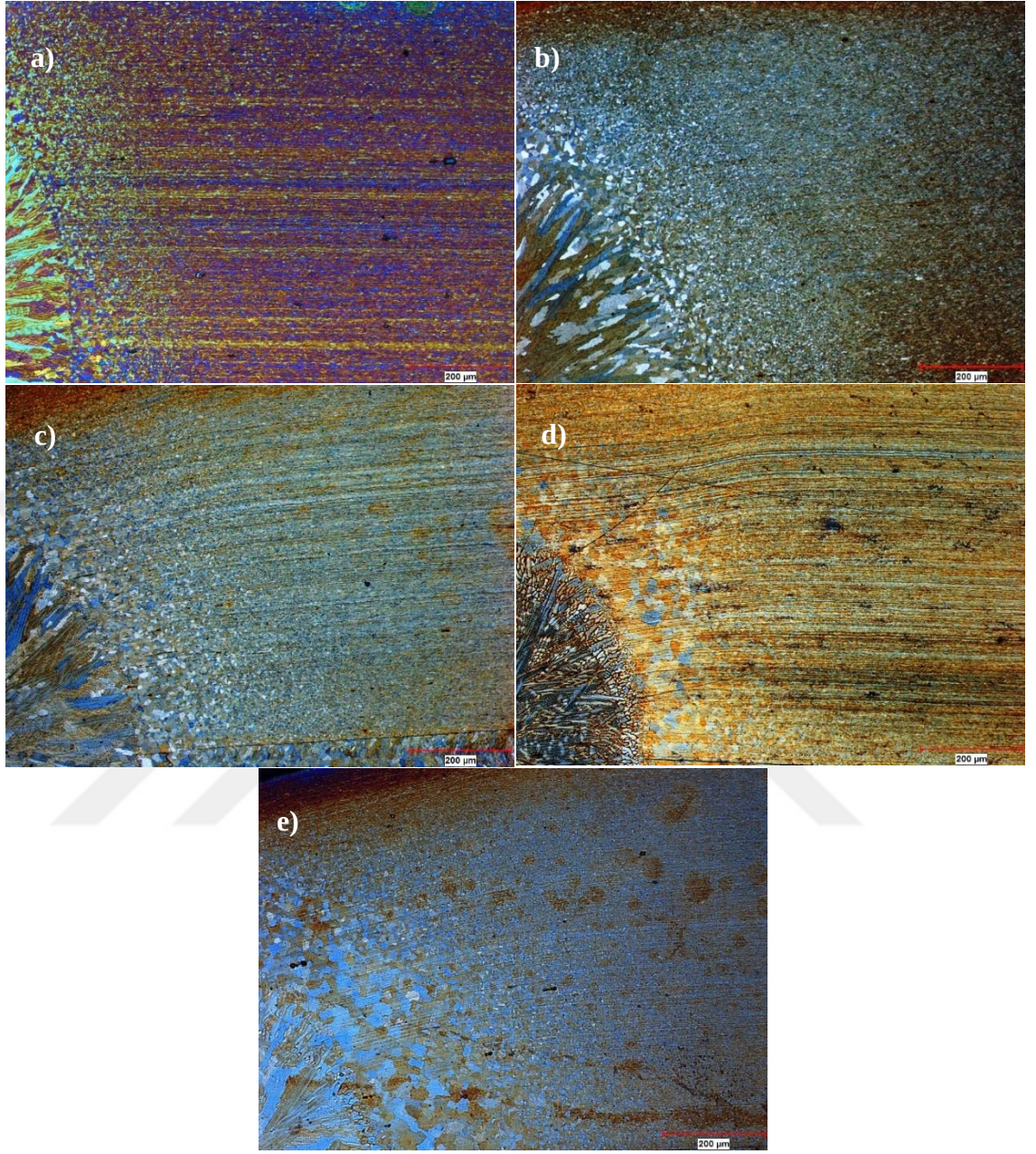


sıcaklığı düşüreceği öngörülebilir. Bu etki de, 30K1 ve 30K2 numunelerinde kendisini göstermiş ve beklenenin aksine düşük ITAB genişlikleri edilmesine yol açmıştır.



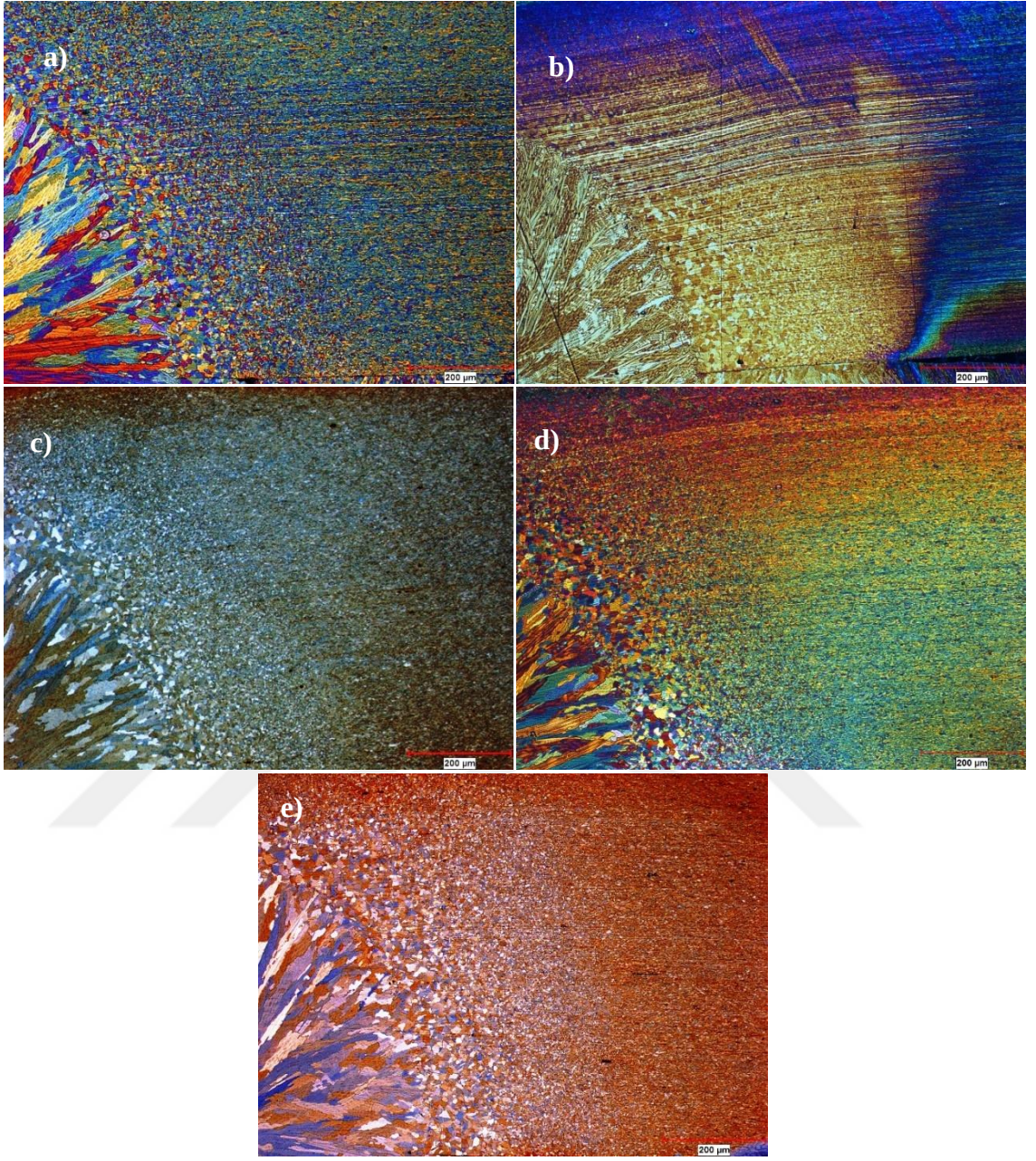
**Şekil 4.90.** Kaynak akımının ITAB oluşumuna etkisi: a) 5,5 kA, b) 6,5 kA, c) 7,5 kA, d) 8,5 kA, e) 9,5 kA) (Büyütmeler x100) (%30 deformasyonlu B grubu)



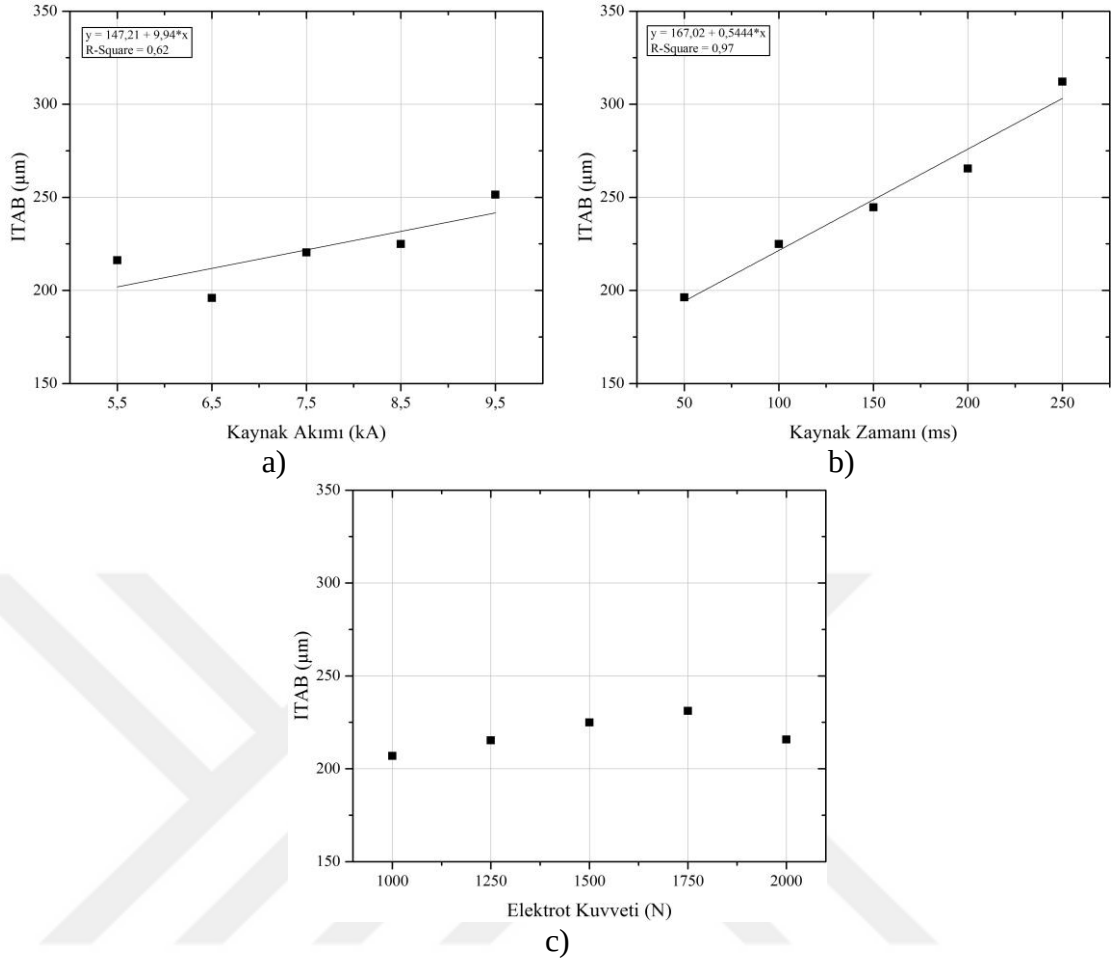


**Şekil 4.91.** Kaynak zamanının ITAB oluşumuna etkisi: a) 50 ms, b) 100 ms, c) 150 ms, d) 200 ms, e) 250 ms (Büyütmeler x100) (%30 deformasyonlu B grubu)

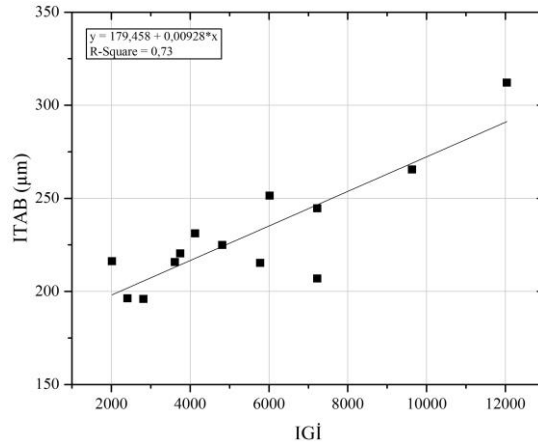




**Şekil 4.92.** Elektrot kuvvetinin ITAB oluşumuna etkisi: a) 1 kN, b) 1,25 kN, c) 1,5 kN, d) 1,75 kN, e) 2 kN (Büyütmeler x100) (%30 deformasyonlu B grubu)

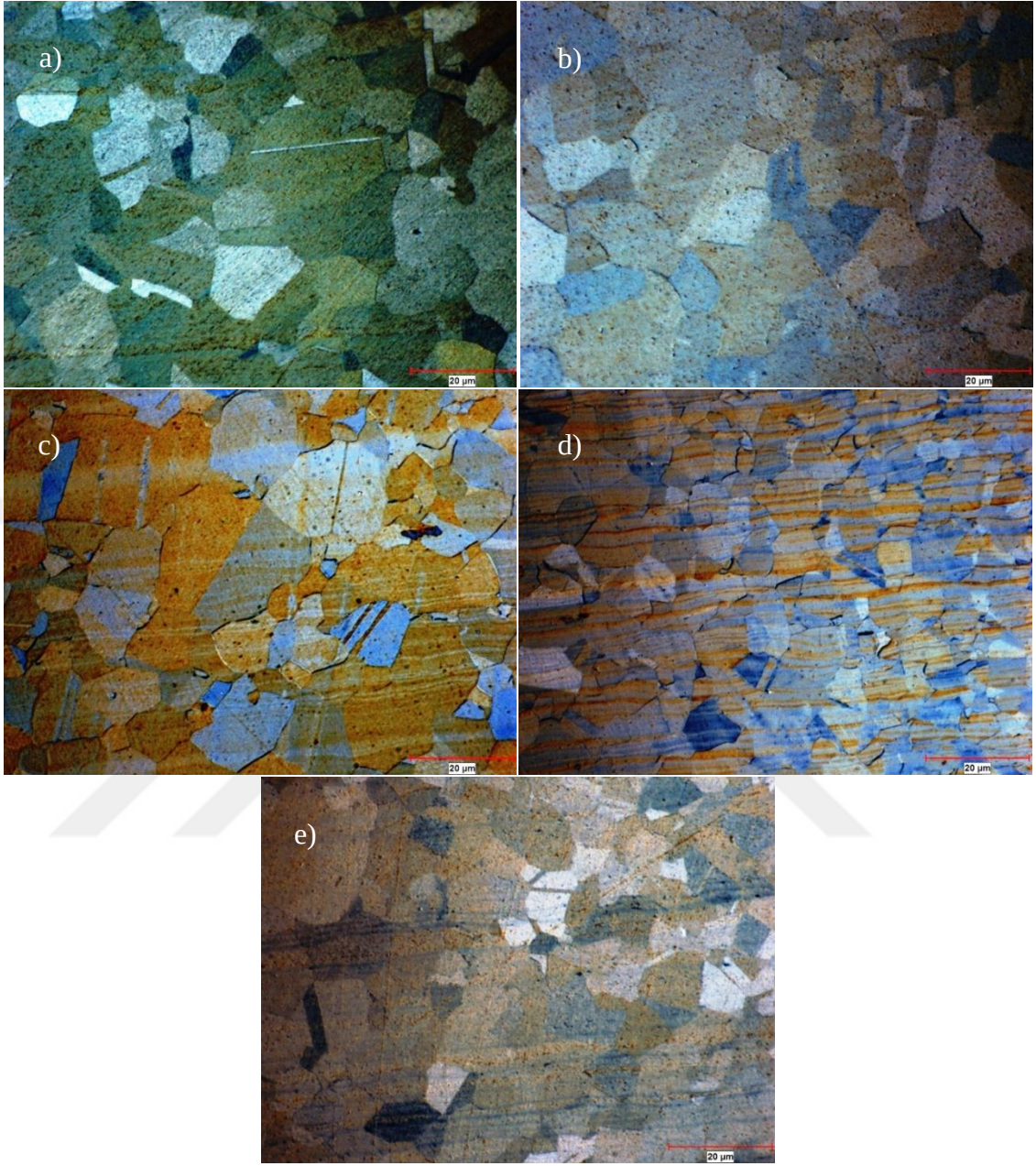


**Şekil 4.93.** ITAB genişliğinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu)



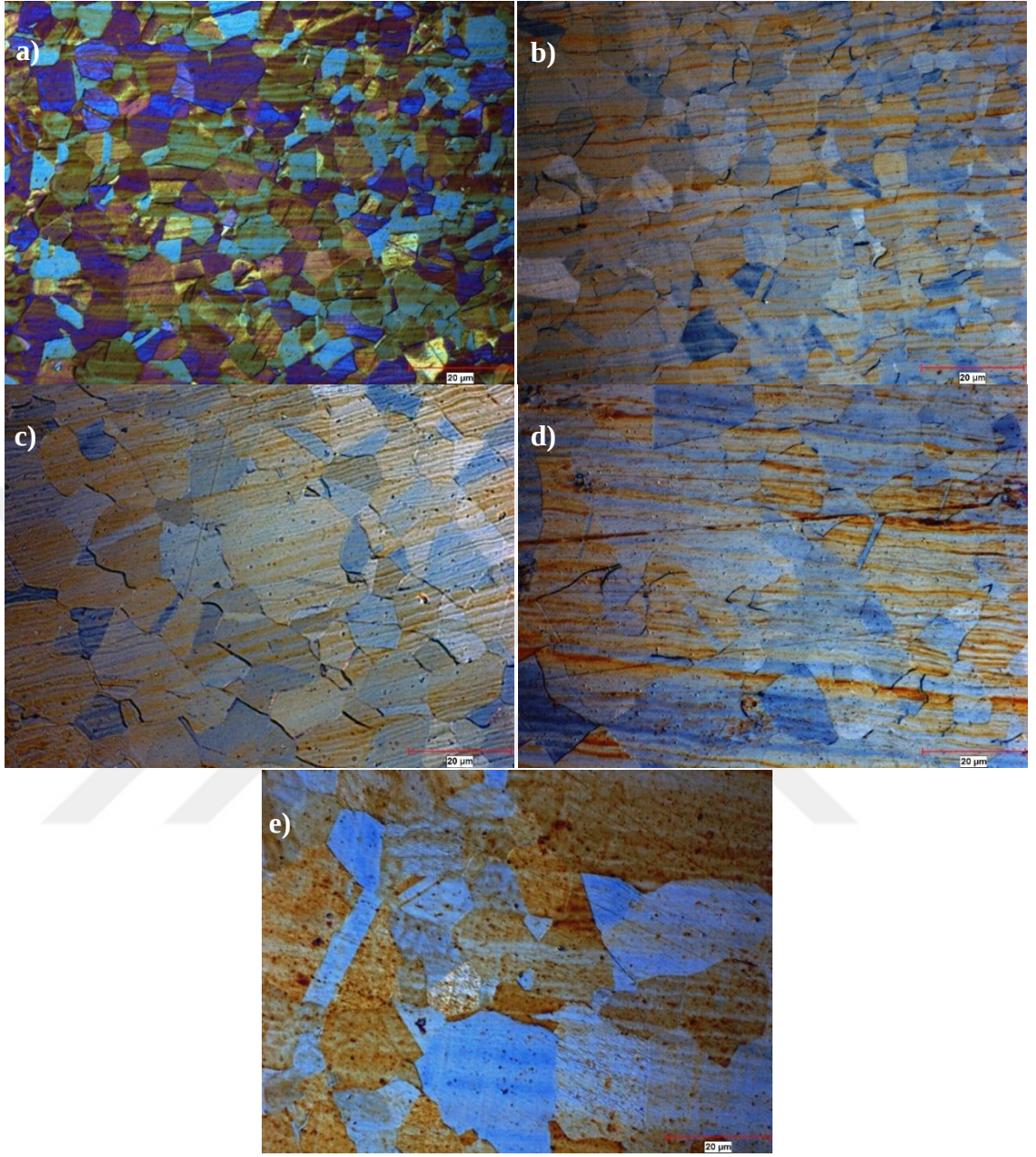
**Şekil 4.94.** ITAB genişliğinin ısı girdisi ile değişimi (%30 deformasyonlu B grubu)





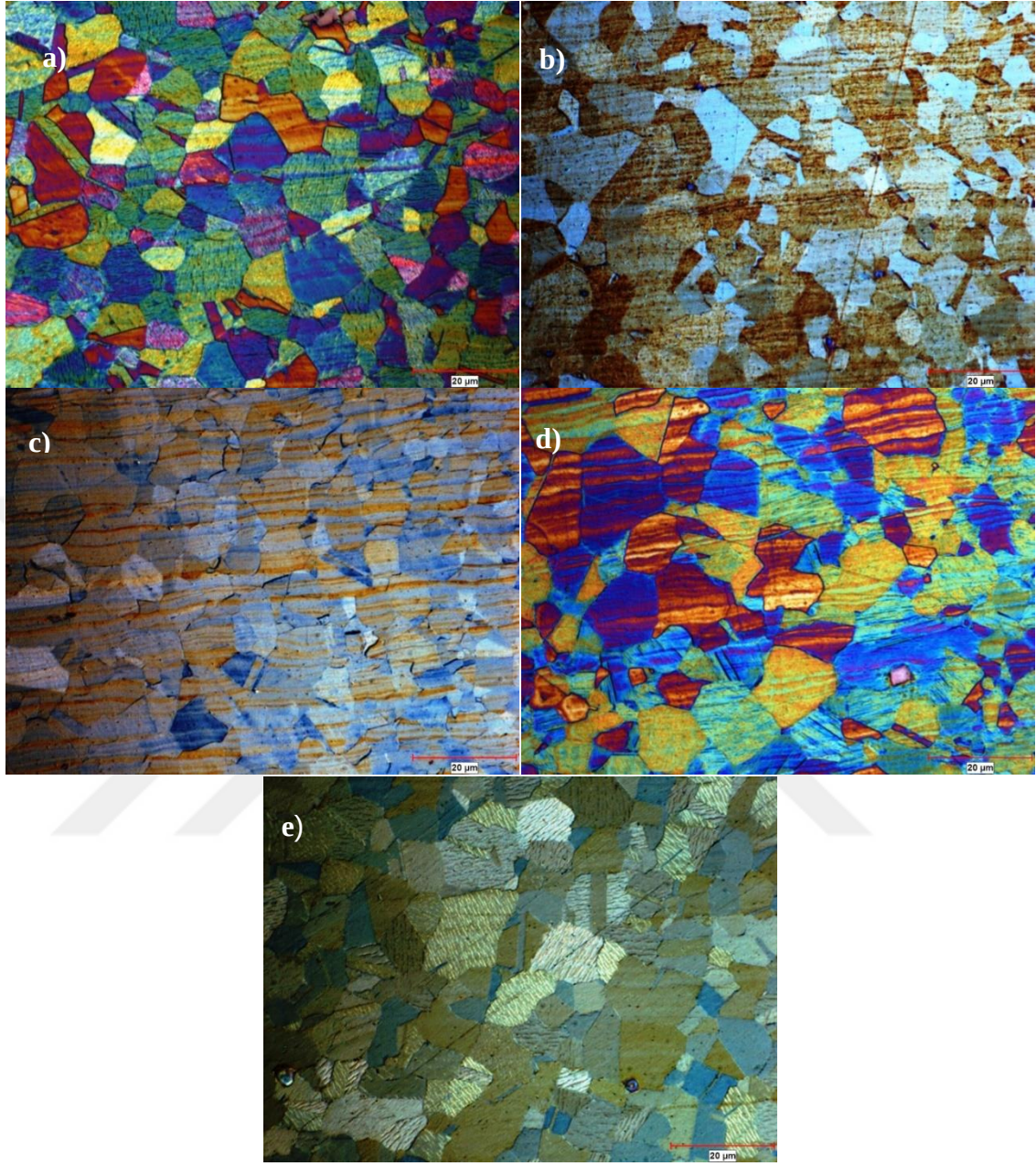
**Şekil 4.95.** ITAB mikro yapısının kaynak akımı ile değişimi (Optik Görüntüler) a) 5,5 kA, b) 6,5 kA, c) 7,5 kA, d) 8,5 kA, e) 9,5 kA (Büyütmeler x1000) (%30 deformasyonlu B grubu)





**Şekil 4.96.** ITAB mikro yapısının kaynak zamanı ile değişimi (Optik Görüntüler) a) 50 ms, b) 100 ms, c) 150 ms, d) 200 ms, e) 250 ms (Büyütmeler x1000) (%30 deformasyonlu B grubu)





**Şekil 4.97.** ITAB mikro yapısının elektrot kuvveti ile değişimi (Optik Görüntüler) a) 1 kN, b) 1,25 kN, c) 1,5 kN, d) 1,75 kN, e) 2 kN (Büyütmeler x1000) (%30 deformasyonlu B grubu)

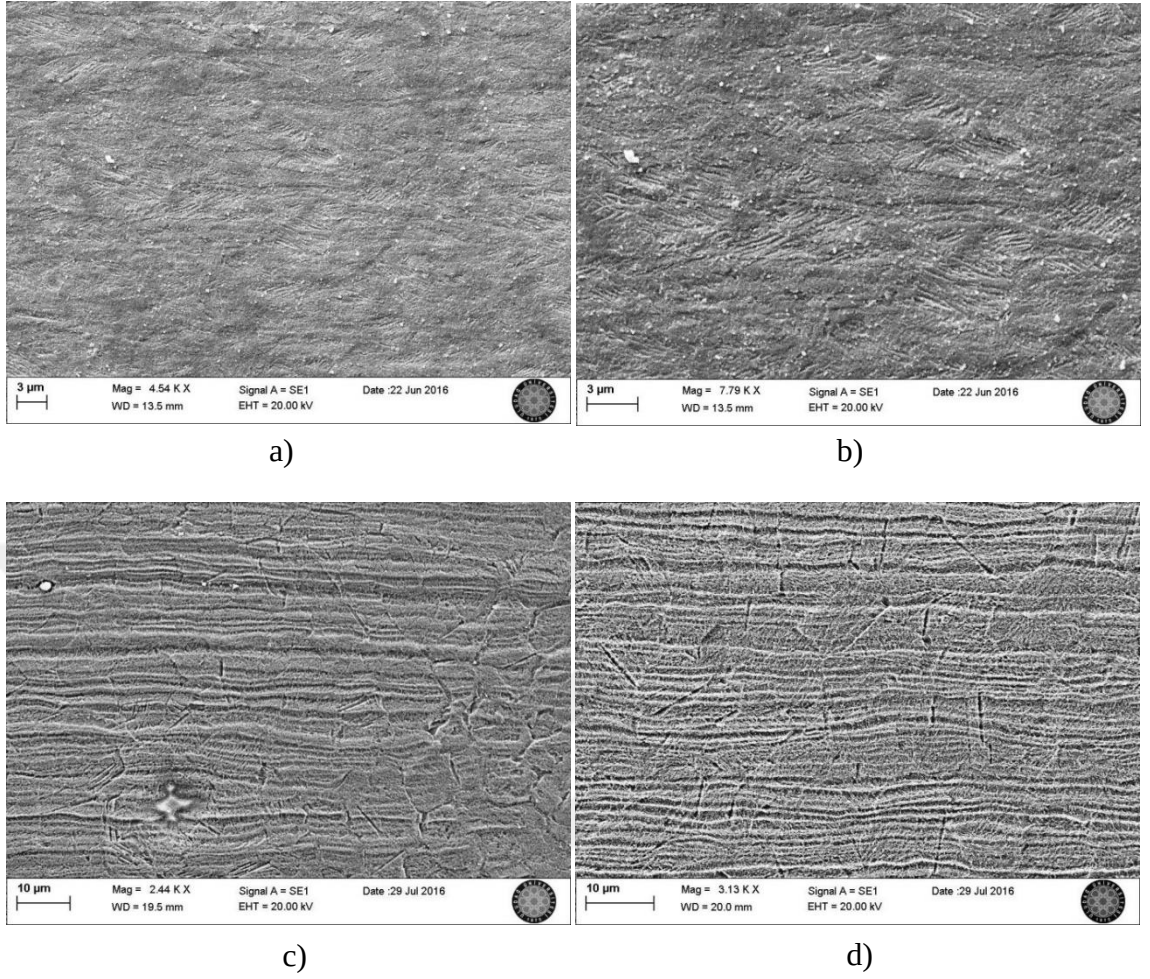
Ayrıca, kaynak akımı ve elektrot kuvveti değişimi, kaynak zamanı değişimi ile karşılaştırıldığında, nispeten daha düşük ısı girdisi aralığına karşılık gelmiştir (Çizelge 4.21). Kaynak akımı değişiminde minimum IGİ değeri 2000 (30A1 numunesi) civarında iken maksimum IGİ 6000 (30A5 numunesi) civarındadır, elektrot kuvveti değişiminde ise minimum IGİ değeri 3600 (30K5 numunesi) civarında iken maksimum IGİ 7200



(30K1 numunesi) civarındadır. Diğer taraftan, kaynak akımı değişiminde minimum IGI değeri 2400 (30Z1 numunesi) civarında iken maksimum IGI değeri 12000 (30Z5 numunesi) civarındadır. Bu bağlamda, kaynak akımı ve elektrot kuvveti değişiminde ITAB genişliği daha dar bir aralıkta (kabaca 200-250  $\mu\text{m}$ ) değişirken, kaynak zamanı değişiminde ITAB genişliği daha geniş bir aralıkta (kabaca 200-300  $\mu\text{m}$ ) değişmiş ve ısı girdisi etkisi daha net olarak ortaya konulmuştur (Şekil 4.93). Ayrıca, bu etki, tane irileşmesinde ve ikiz genişliklerinde kendini göstermiştir (Şekil 4.96).

Isı girdisine bağlı olarak ITAB genişliği değişimi Şekil 4.94'te verilmiştir. Bu veriler deformasyonsuz ve %15 deformasyonlu B grubu numuneler ile karşılaştırıldığında, daha düşük ısı girdisine bağlı olarak daha küçük ITAB genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 4.94'te görüleceği üzere, ısı girdisi artışı ile ITAB genişliği net olarak artmaktadır. Isı girdisi ve ITAB genişliği arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,73'ün üzerindedir. Bu korelasyon değeri, elektrot kuvveti değerleri grafik dışında bırakıldığında ITAB genişliği ve ısı girdisi arasındaki lineer korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,91'in üzerine çıkmıştır.

Şekil 4.98'de verilen SEM görüntülerinde TM mikro yapısındaki deformasyon ikizleri görülmektedir. Kaynak esnasında ısı etkiye maruz kalan ITAB'da ise TM'deki bu deformasyon ikizlerinin tamamen kaybolup yerini tavlama ikizlerine bıraktığı Şekil 4.98'deki SEM görüntülerine dayanarak net olarak söylenebilir. Daha önce de vurgulandığı üzere yüksek ısı girdisine sahip K1 numunesinde sıra dışı kaynak hatalarının sebep olduğu ısı kaybı nedeniyle tanelerin nispeten küçük kaldığı bu görüntülerden de teyit edilebilir (Şekil 4.97, 4.98 c ve d).



**Şekil 4.98.** ITAB mikro yapısının kaynak parametreleri ile değişimi (SEM görüntüleri) a) TM (küçük büyütme), b) TM (büyük büyütme), c) IGI=7225 (30K1), d) IGI=3613 (30K5) (%30 deformasyonlu B grubu)

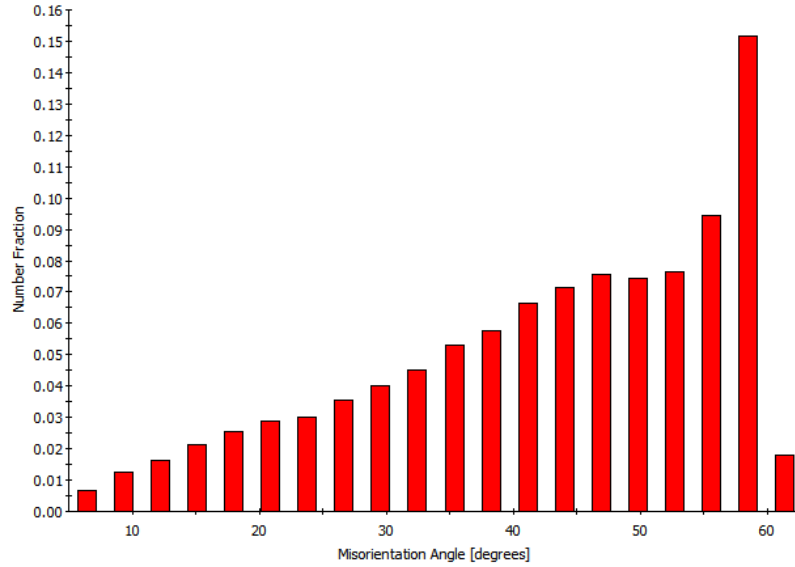
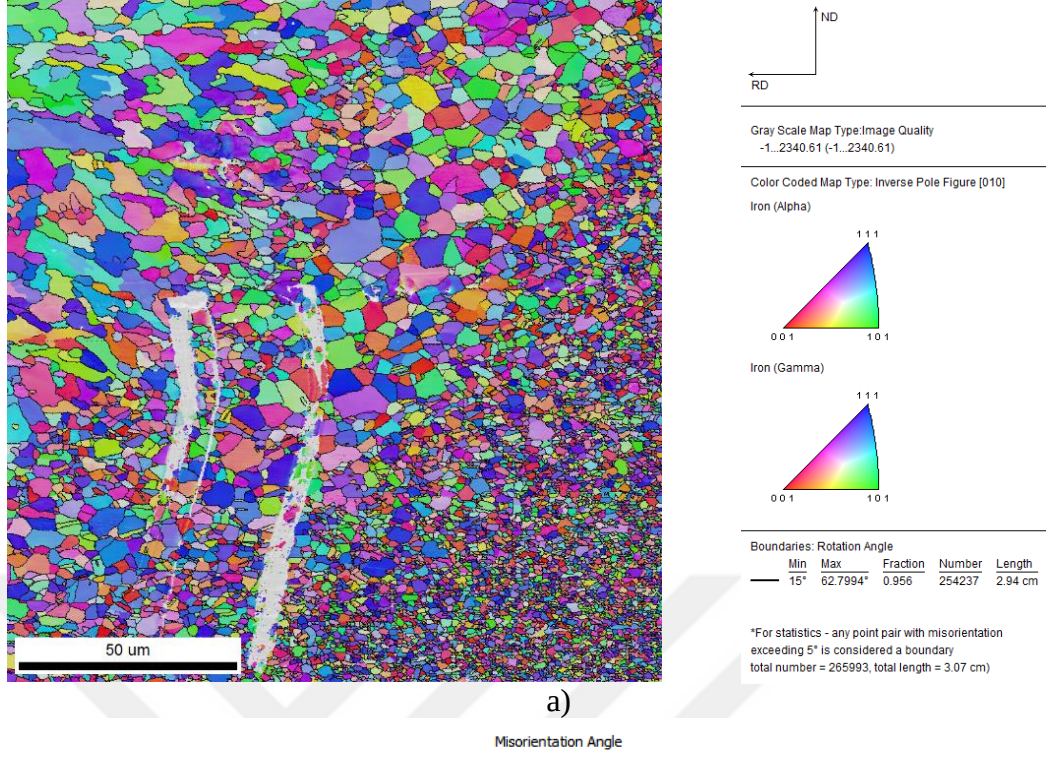
Şekil 4.99 ve 4.100’de SEM-EBSD haritalamasından elde edilen görüntülerde, hesaplanan düşük ısı girdisine (IGİ değerine istinaden) sahip 30A1 kodlu numunenin ITAB genişliğinin ve ITAB’daki tane irileşmesinin hesaplanan yüksek ısı girdisine sahip 30A5 kodlu numuneninkinden de daha fazla olduğu görülebilmektedir. Bu hususun daha önce detaylı bir biçimde belirtildiği gibi, 30A1 numunesinde diğer numunelere nazaran ergimenin çok daha küçük bir bölgede (ITAB hacminin/kütlesinin çok küçük olmasından) gerçekleşmesinden dolayı ITAB bölgesinde diğer numunelere nazaran daha yüksek sıcaklıkların elde edilmesine yol açtığı değerlendirilmiştir. Buna istinaden daha yüksek ısı girdisine sahip olduğu düşünülen 30A1 numunesinde, ikiz kalınlıklarında daha fazla olduğu söylenebilir (Şekil 4.99 a ve Şekil 4.100 a). Bu grup numunelerde kaynak parametrelerine bağlı olarak ısı girdisi çok daha düşük olduğu için

ITAB'daki tane büyüklükleri deformasyonsuz ve %15 deformasyonlu numunelerinkine göre daha küçüktür.

ITAB'ın TM yönündeki tavlama ikizlerini de içeren yeniden kristalleşme taneleri de Şekil 4.99a ve Şekil 4.100a'da görülebilmektedir. ITAB civarında deformasyon etkisinin ortadan kalktığı SEM-EBSD haritalamalarından elde edilen görüntüler ve yönelim farkı açısı dağılımlarından düşük açılı tane sınırları ( $\theta \sim 5^\circ$ ) oranının çok düşük olması bu bölgede deformasyon etkisinin tamamen ortadan kalktığını gösterir niteliktedir (Şekil 4.99b ve Şekil 4.100b). Bu bağlamda, %15 deformasyon oranına sahip numunelerdeki gibi, ITAB'da düşük açılı tane sınırlarına sahip toparlanan (kendine gelen) ve yeniden kristalleşme taneleri kendini gösterememiştir.

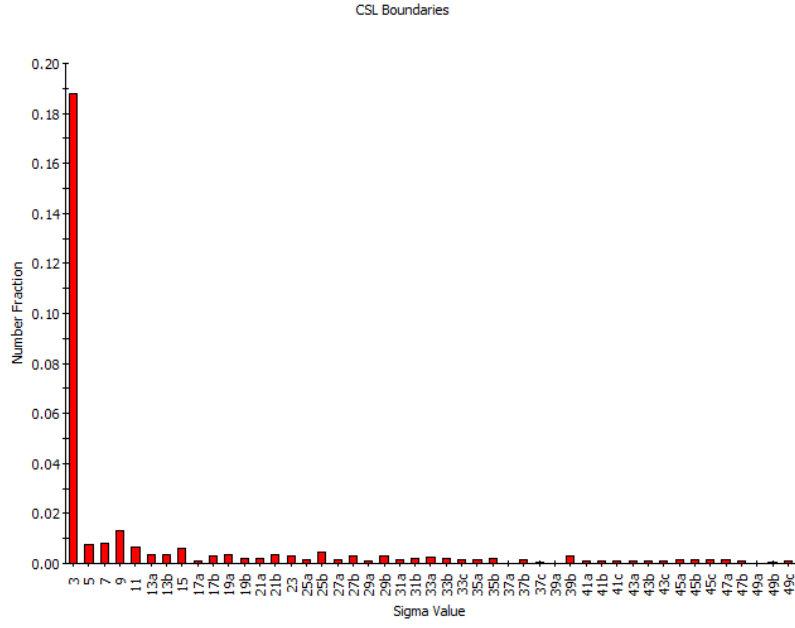
Numunelerin yönelim farkı açısı dağılımlarında yüksek açılı tane sınırları ( $60^\circ < 111^\circ$ ) oranı ve çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımlarında  $\Sigma 3$  CSL tane sınırları oranının yüksek olması yüksek açılı yeniden kristalleşme tanelerinden ve özellikle de tavlama ikizlerinden kaynaklanmaktadır. Daha yüksek ısı girdisine sahip olduğunu değerlendirilen 30A1 numunesinde  $\Sigma 3$  CSL tane sınırları oranı %18,80 iken 30A5 numunesinde bu değer %25,29'dur (Şekil 4.99b ve Şekil 4.100b). SEM-EBSD haritalarından 30A5 numunesinde daha fazla yeniden kristalleşme tanesinin analiz içerisinde yer alması bu numunede  $\Sigma 3$  CSL tane sınırları oranının daha yüksek olmasında etkin faktör olarak değerlendirilebilir. Daha fazla yüksek açılı yeniden kristalleşme taneleri.

Genel itibariyle, deformasyonsuz numunelerin ITAB bölgeleri ile karşılaştırıldığında %30 deformasyonlu numuneler içinde kaynak parametrelerine bağlı olarak daha düşük ısı girdisi ile tavlama ikizleri ve/veya yüksek açılı yeniden kristalleşme taneleri artmıştır. Diğer taraftan, %15 deformasyonlu numunelerin ITAB bölgeleri ile karşılaştırıldığında ise %30 deformasyonlu numunelerde daha düşük oranda tavlama ikizleri ve/veya yüksek açılı yeniden kristalleşme taneleri söz konusu olmuştur.



b)

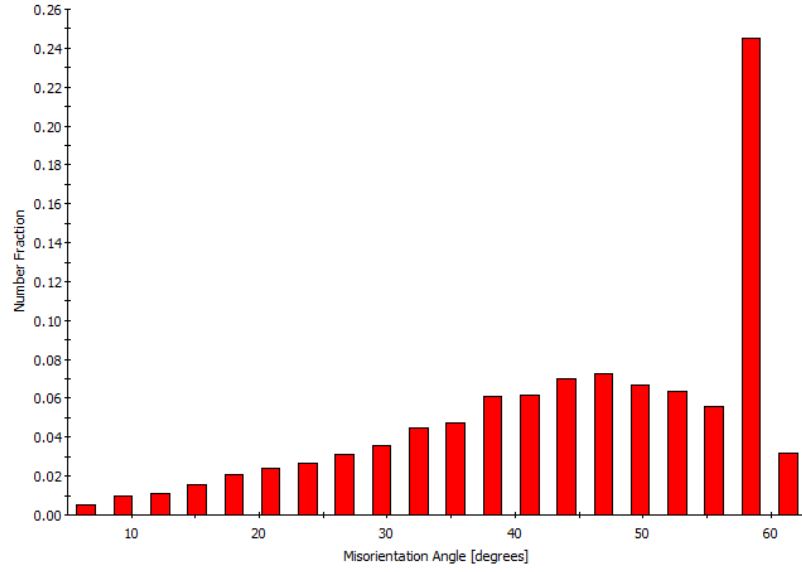
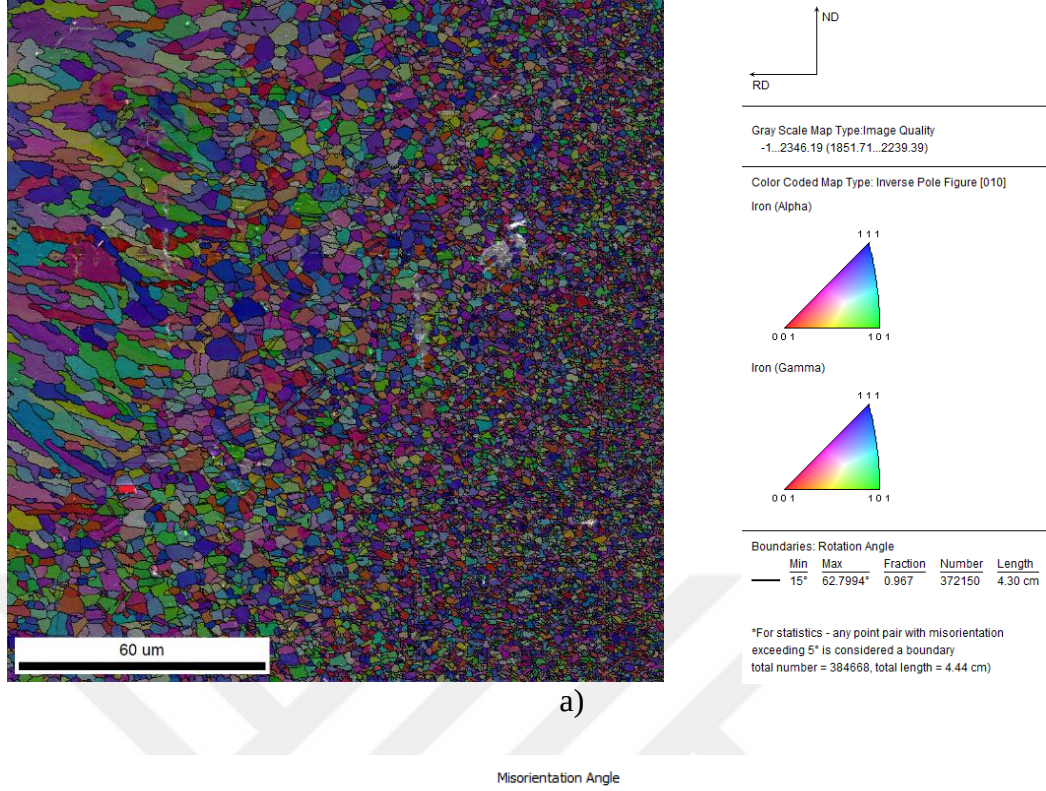
**Şekil 4.99.** 30A1 kodlu numunenin (IGİ=2017) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı



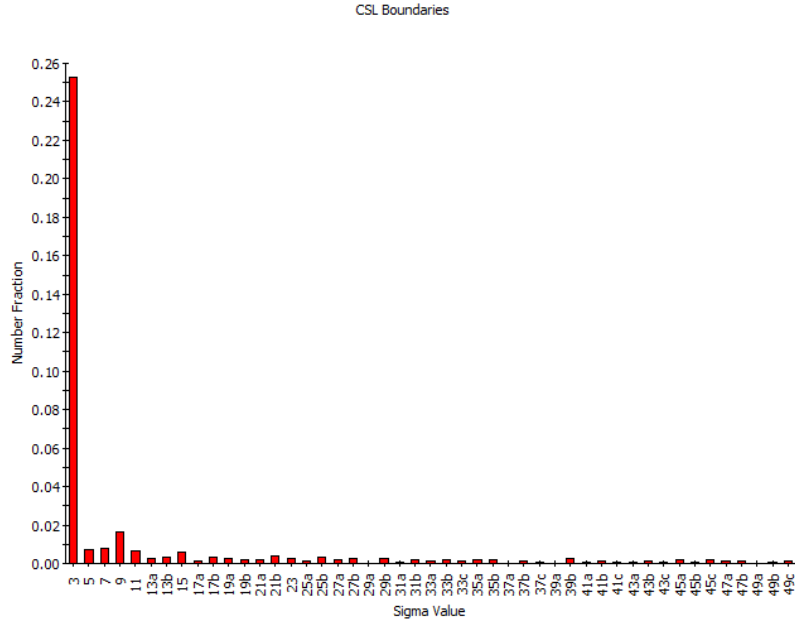
c)

**Şekil 4.99.** 30A1 kodlu numunenin (IGİ=2017) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)





**Şekil 4.100.** 30A5 kodlu numunenin (IGİ=6017) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı



c)

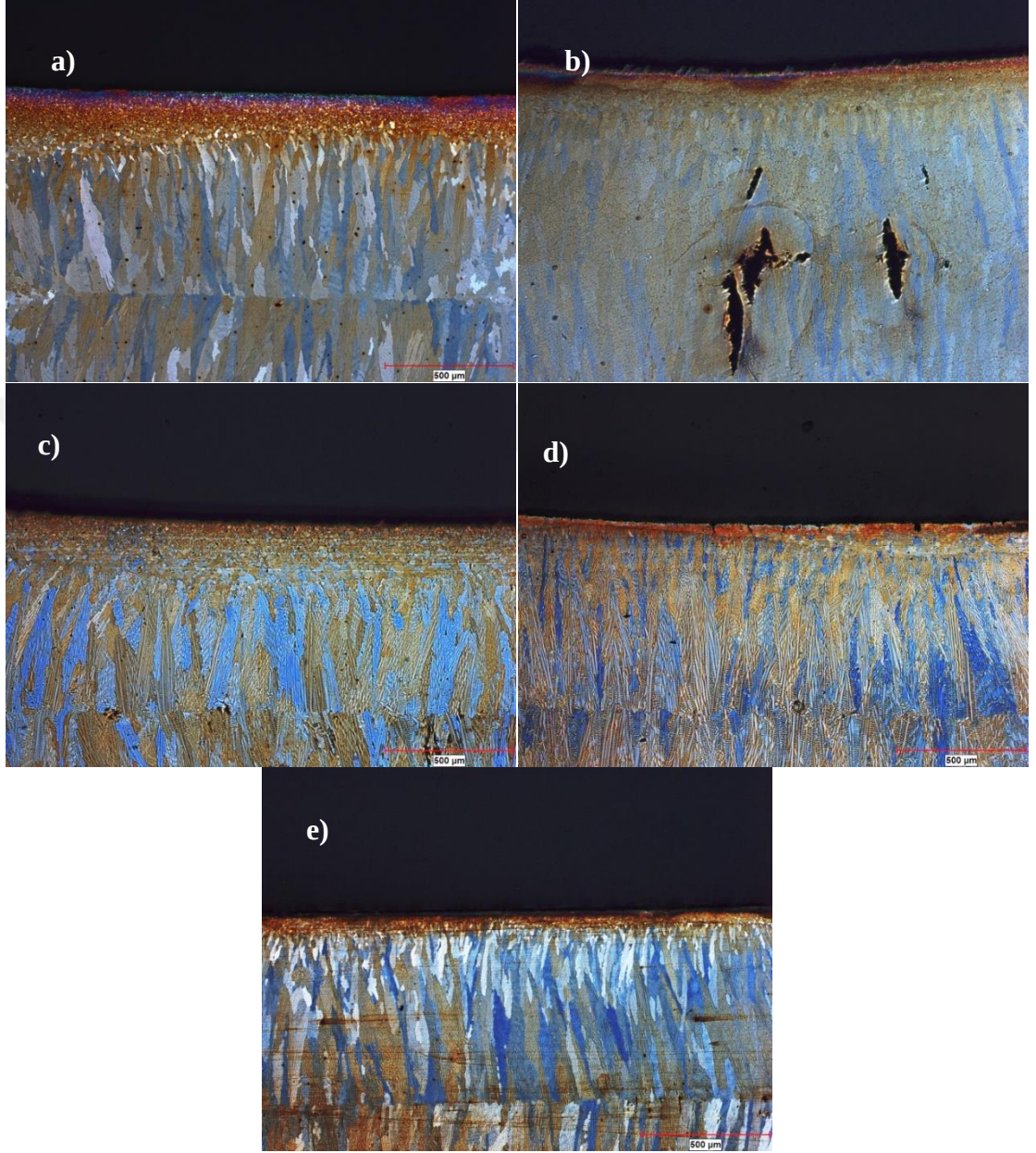
**Şekil 4.100.** 30A5 kodlu numunenin (IGİ=6017) ITAB mikroyapısının SEM-EBSD analizleri: a) Desen kaliteli ters-kutup figürleri haritalaması (IPF with IQ maps), b) Yönelim farkı açısı dağılımı (Misorientation angle), c) Çakışık yer kafesleri (CSL) tipi sınırların dağılımı (devam)

Kaynak akımının EB mikro yapısı etkisine bakıldığında, en düşük ısı girdisine sahip 30A1 numunesinin kaynak merkezi civarında nispeten eş eksenli dendritik yapıların ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 4.101a). Bu da, 30A1 numunesinin EB hacminin/kütlesinin çok daha küçük olmasıyla sıcaklığın (izafî ısı girdisinin) daha yüksek olmasıyla ilgilidir.

Şekil 4.101'deki diğer mikro yapılara bakıldığında ise dendritik yapıların nispeten düşük ısı girdisi sebebiyle daha ziyade kolonsal şekilde yönlendikleri gözlenmektedir. Belirgin kaynak hatalarına sahip numunelerde özellikle kaynak hataları çevrelerinde ısının daha yavaş çekilmesiyle nispeten eş eksenli dendritik yapılar ortaya çıkmıştır (Şekil 4.102).

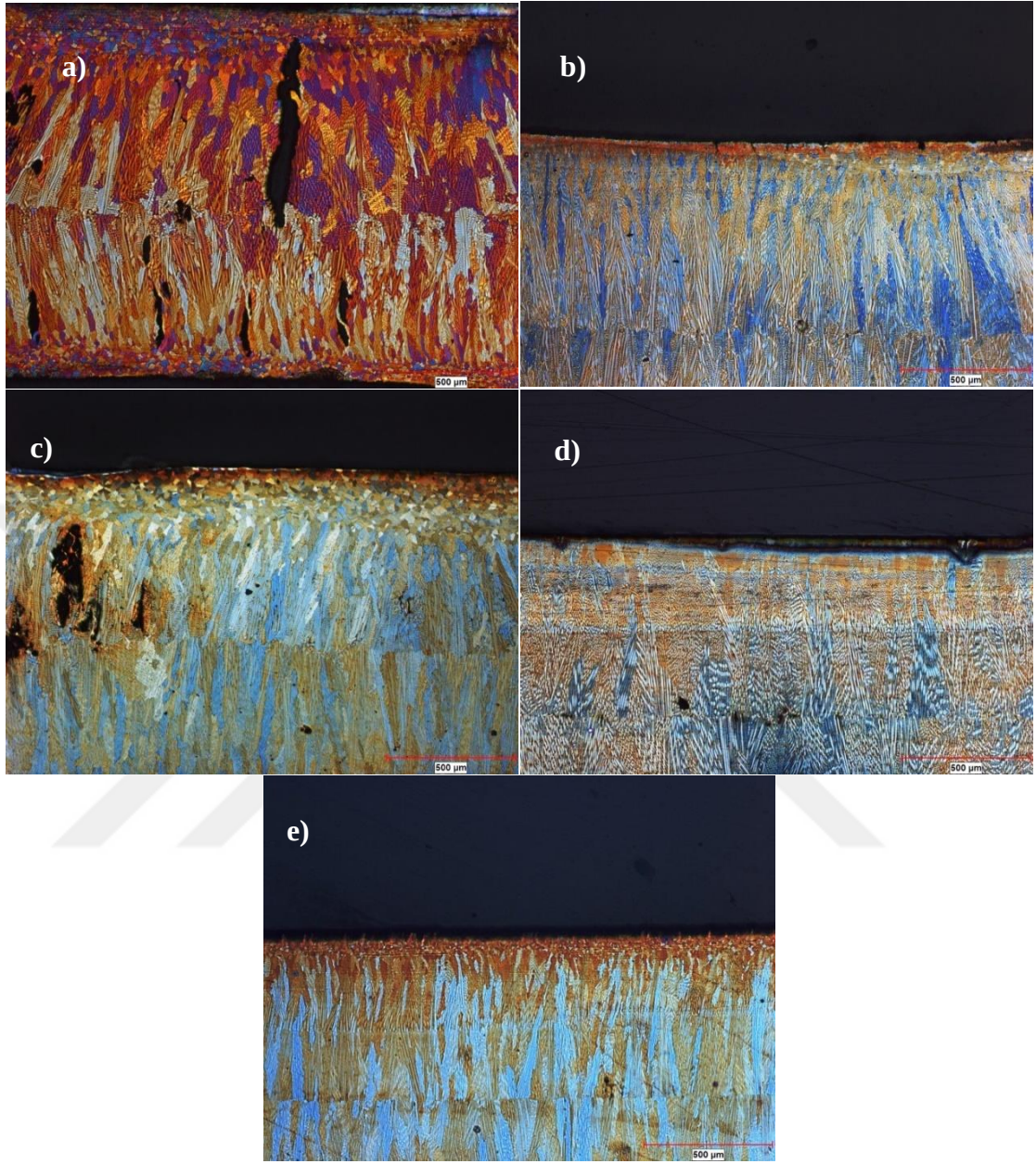
Diğer numunelerde ise yine nispeten düşük ısı girdisine izafeten kolonsal dendritik yapılar ortaya çıkmıştır. Öteki taraftan Şekil 4.103'te yüksek ısı girdisine sahip olan 30K1 ve 30K2 numunelerinde ciddi kaynak hatalarının ortaya çıktığı görülmektedir. Diğer numunelerde ise yine düşük ısı girdisine bağlı kolonsal dendritik yapıların varlığı tespit edilmiştir. Şekil 4.101-4.103'e göre, düşük akımlarda, düşük kaynak zamanlarında ve

düşük elektrot kuvvetlerinde EB’de ciddi boyuttaki kaynak hataları ile karşılaşma olasılığı artmaktadır.

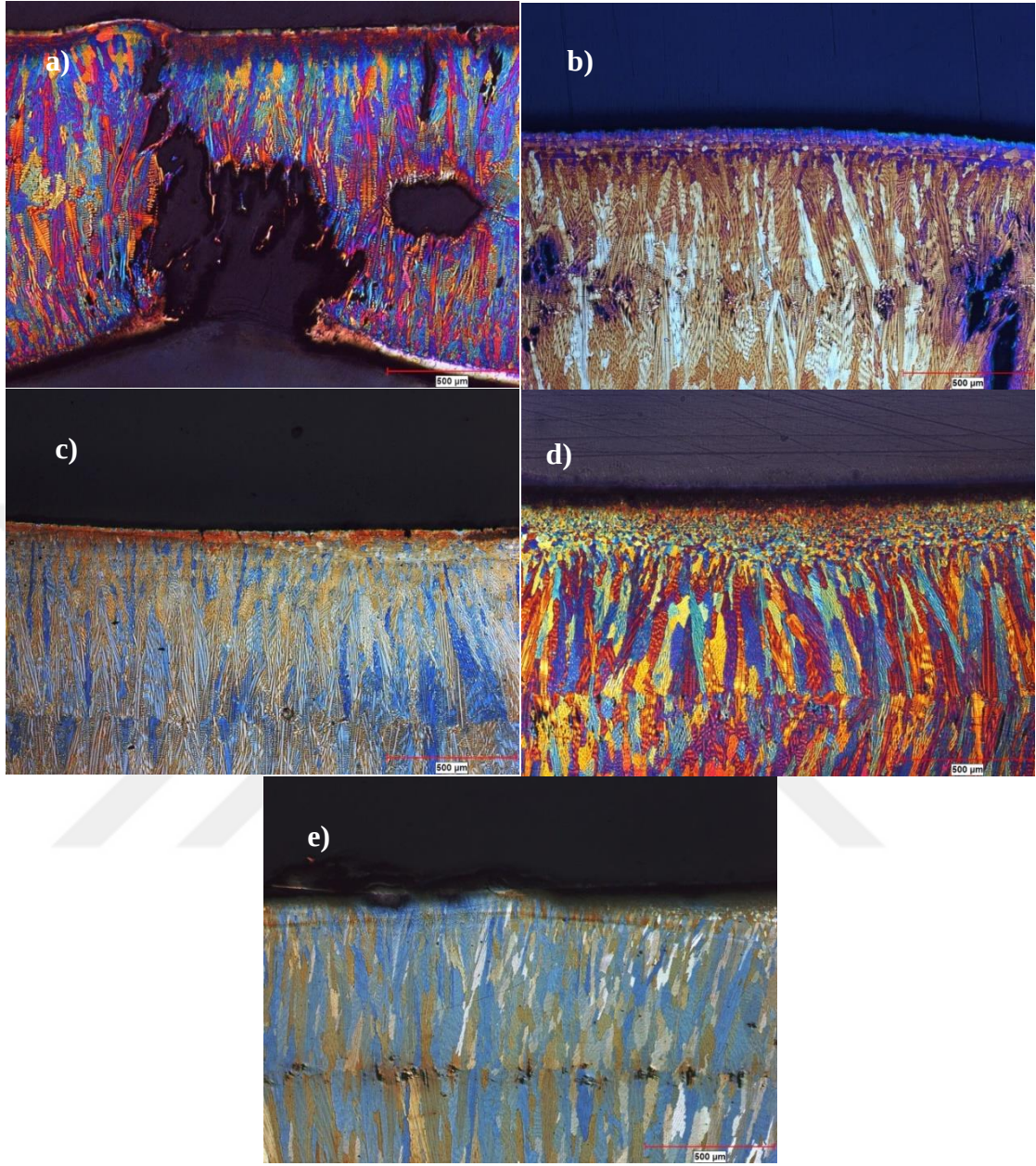


**Şekil 4.101.** EB mikro yapısının kaynak akımı ile değişimi (Optik görüntüleri) a) 5,5 kA, b) 6,5 kA, c) 7,5 kA, d) 8,5 kA, e) 9,5 kA (Büyütmeler x50) (%30 deformasyonlu B grubu)





**Şekil 4.102.** EB mikro yapısının kaynak zamanı ile değişimi (Optik görüntüleri): a) 50 ms, b) 100 ms, c) 150 ms, d) 200 ms, e) 250 ms (Büyütmeler x50) (%30 deformasyonlu B grubu)



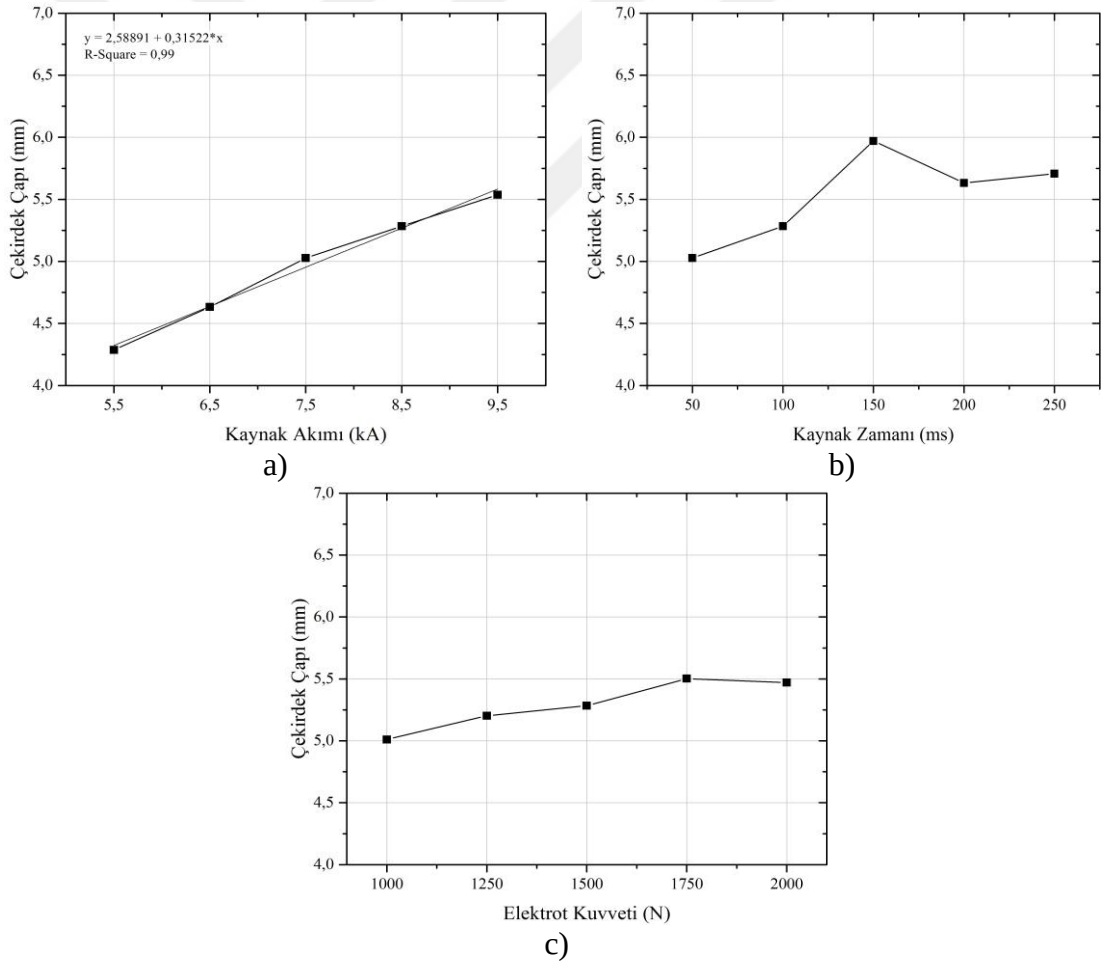
**Şekil 4.103.** EB mikro yapısının elektrot kuvveti ile değişimi (Optik görüntüleri a) 1 kN, b) 1,25 kN, c) 1,5 kN, d) 1,75 kN, e) 2 kN (Büyütmeler x50) (%30 deformasyonlu B grubu)

Kaynak parametreleri ile çekirdek çapı arasındaki ilişki Şekil 4.104'te verilmiştir. Genel itibariyle bu grup kaynaklı numuneler daha düşük ısı girdisi ile kaynak edilmiş olduklarından, çekirdek çapları diğer B grubu kaynaklı numunelerinden daha düşük değerlerdedir. Kaynak akımı artışı çekirdek çapı hemen hemen lineer şekilde artmaktadır. Kaynak akımı 5,5 kA'den 9,5 kA çıkarıldığında çekirdek çapı kabaca %30 civarında artmıştır.

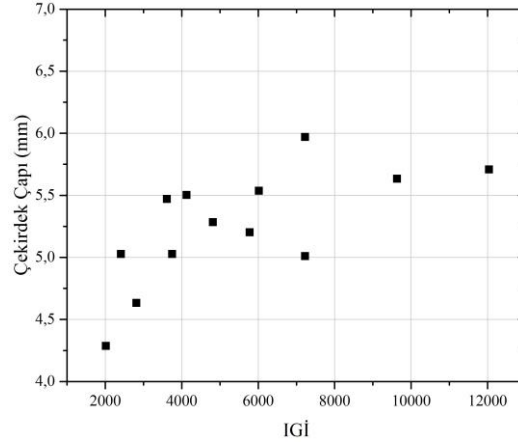


150 ms kaynak zamanına kadar çekirdek çapı değeri artan kaynak zamanı ile artmıştır. Ancak, sonrasında artan kaynak zamanı ile çekirdek çapı bir miktar azalmıştır. Farklı B gruplarındaki kaynaklı numunelerin kaynak zamanı ile çekirdek çapları arasındaki ilişki benzerlik arz etmektedir (aynı karaktere sahip eğri).

Elektrot kuvveti artışı ile çekirdek çapı dar bir aralıkta artış göstermiştir. Elektrot kuvveti ve çekirdek çapı arasındaki ilişki, ısı girdisi açısından irdelendiğinde oldukça ilginçtir. Yüksek ısı girdisi ile daha küçük çekirdek çapı olduğu gözlenmiştir. Burada yine, elektrot kuvveti ile ısı girdisinin iyi tanımlanamaması ve özellikle düşük elektrot kuvveti değerlerinde EB’de yanma gibi kaynak hatalarını oluşturması bu sonucun ortaya çıkmasında etkili olmuştur. Genel itibarıyla ısı girdisi artışıyla çekirdek çapının artma eğiliminde olduğu söylenebilir (Şekil 4.116).

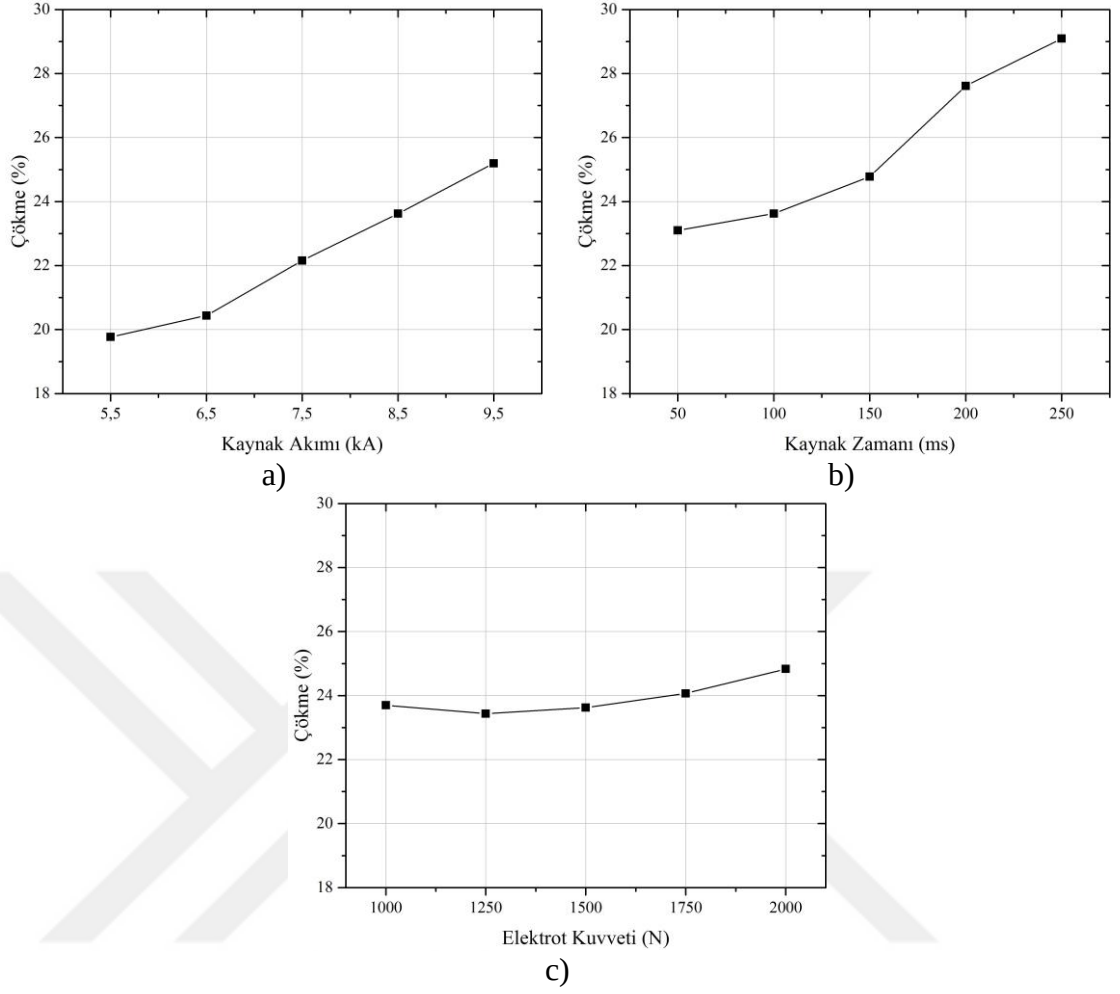


**Şekil 4.104.** Çekirdek çapının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu)



**Şekil 4.105.** Çekirdek çapının ısı girdisi ile değişimi (%30 deformasyonlu B grubu)

Kaynak parametreleri ve çökme miktarı arasındaki ilişki Şekil 4.106’da verilmiştir. Kaynaklı numunelerin çökme miktarı artan kaynak akımı ve kaynak zamanına bağlı olarak sürekli bir artış içerisinde. Elektrot kuvvetinin çökme miktarı üzerindeki etkisi ise genel itibariyle sınırlı kalmıştır. Ancak, artan elektrot kuvveti ile daha yüksek sıkıştırma kuvvetine bağlı olarak çökme miktarında nispi bir artıştan bahsedilebilir. Bu grup kaynaklı numunelerde, diğer B gurubu numuneler göre daha düşük ısı girdisine sahip kaynak parametrelerinin ve daha düşük elektrot kuvveti değerlerinin kullanılması çökme miktarlarının nispeten düşük değerlerde kalmasını sağlamıştır.

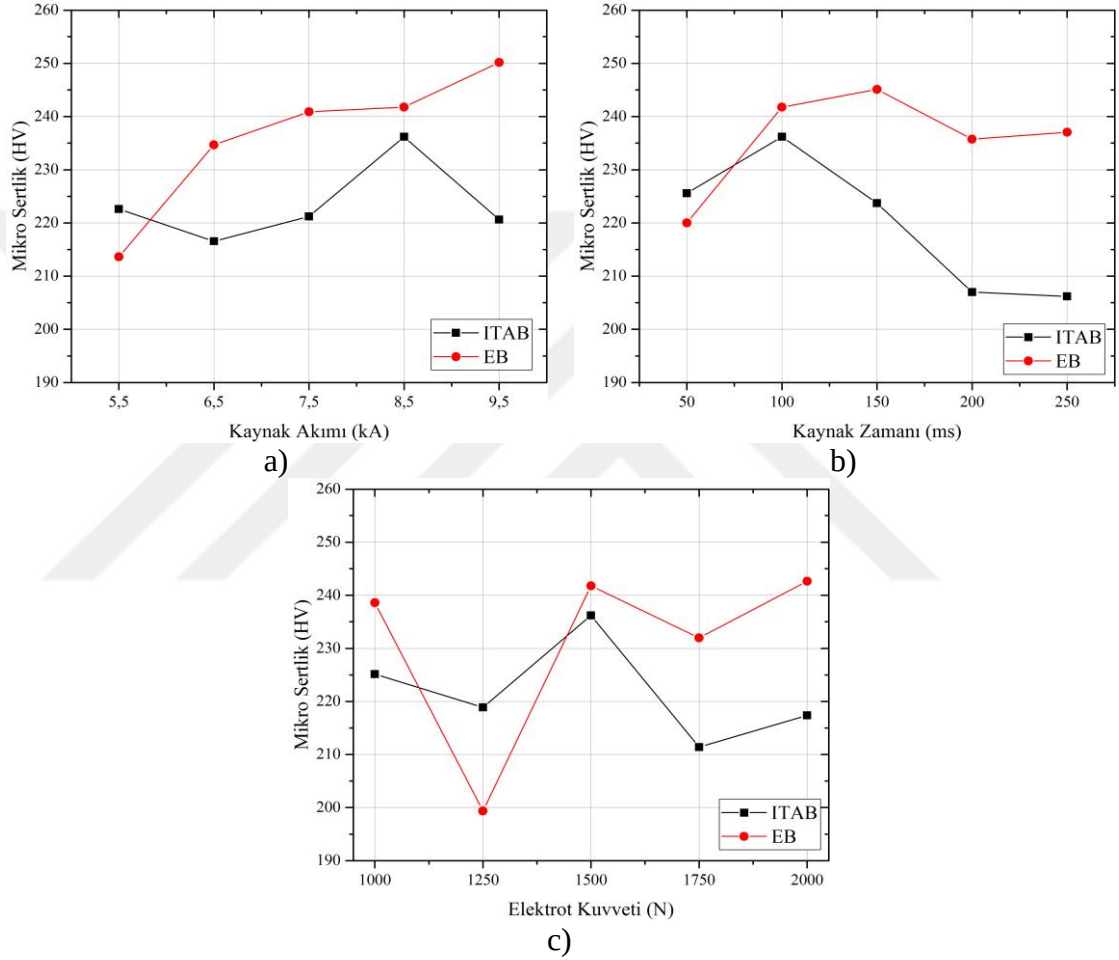


**Şekil 4.106.** Çökme miktarının kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu)

#### 4.7.2. Mikro sertlik ölçümleri

%30 deformasyon oranına sahip TWIP çeliklerinin temel malzeme mikro sertlik değeri 420,57 HV<sub>0,2</sub>'dir (Standart sapma: 20,06). %30 deformasyon ile TWIP çeliğinin sertliği yaklaşık %62 oranında artmıştır. Kaynak bölgesi sertlik değerleri temel malzemeye göre çok daha düşük değerlerde kalmıştır (Şekil 4.107). Kaynak bölgesindeki sertlik değerleri %50'nin üzerinde düşüş sergilemiştir. Genel itibariyle, en düşük sertlik değerleri ITAB'da gözlenmiştir. EB'deki sertlik değerlerinin kaynak akımı artışı ile artması ve ITAB'daki sertlik değerlerinin kaynak zamanı artışı ile düşmesi dışında kaynak bölgesi sertlik değerleri ile kaynak parametreleri arasında belirgin bir korelasyon elde edilememiştir.

Bu grup numunelerin kaynak bölgesi sertlik değerleri ile diğer B grubu kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi sertlik değerleri arasında belirgin bir fark göze çarpmamaktadır. TWIP saclarında başlangıç temel malzeme sertlik değeri ne olursa olsun kaynak bölgesi sertlik değerleri belli bir aralıkta kalmaktadır. Bu da, kaynak bölgesinde herhangi bir faz dönüşümünün meydana gelmemesiyle ve mekanik ikizlerin kaynak ısıyla çevrimi ile tamamen ortadan kalkması ile açıklanabilir.



**Şekil 4.107.** Kaynak bölgesi mikro sertlik değerlerinin kaynak parametreleri ile değişimi  
a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu)

#### 4.7.3. Çekme testleri

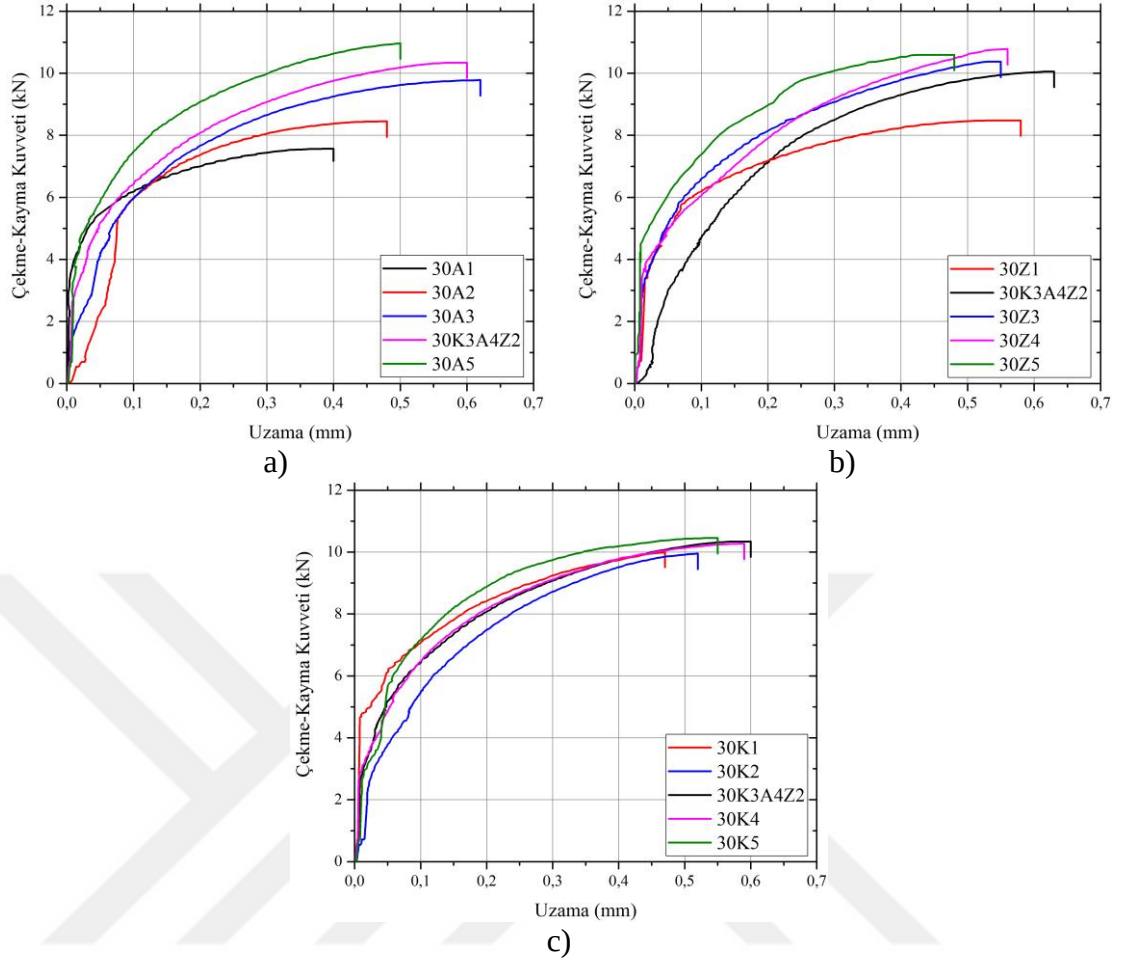
Kaynaklı numunelerin çekme testlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.22’de verilmiştir. Ayrıca, kaynaklı numunelerin çekme eğrileri de Şekil 4.108’de görülebilir. Nispeten düşük kaynak akımlarında ve kaynak zamanlarındaki kırılma modlarına bakıldığında, düşük kaynak mukavemeti sergileyen numunelerin (10 kN çekme-kayma

kuvveti altında) kırılma modları ara yüzey veya kısmi buton çekirdek/kısmi ara yüzey tipinde gerçekleşmiştir.

**Çizelge 4.22.** Çekme-kayma test sonuçları (BÇ: Buton çekirdek, KBÇ/KA: Kısmi buton çekirdek/Kısmi ara yüzey, A: Ara yüzey) (%30 deformasyonlu B grubu)

| Numune Kodu | Kaynak Akımı (kA) | Kaynak Zamanı (ms) | Elektrot Kuvveti (N) | IGİ   | Çekme-kayma kuvveti [kN] | SS   | Kırılma Modu |
|-------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------|--------------------------|------|--------------|
| 30Z1        | 8,5               | 50                 | 1500                 | 2408  | 8,52                     | 0,19 | A            |
| 30K3A4Z2    | 8,5               | 100                | 1500                 | 4817  | 10,13                    | 0,28 | BÇ           |
| 30Z3        | 8,5               | 150                | 1500                 | 7225  | 10,83                    | 0,40 | BÇ           |
| 30Z4        | 8,5               | 200                | 1500                 | 9633  | 10,75                    | 0,63 | BÇ           |
| 30Z5        | 8,5               | 250                | 1500                 | 12042 | 10,65                    | 0,51 | BÇ           |
| 30K1        | 8,5               | 100                | 1000                 | 7225  | 10,01                    | 0,25 | BÇ           |
| 30K2        | 8,5               | 100                | 1250                 | 5780  | 10,04                    | 0,37 | BÇ           |
| 30K3A4Z2    | 8,5               | 100                | 1500                 | 4817  | 10,13                    | 0,28 | BÇ           |
| 30K4        | 8,5               | 100                | 1750                 | 4129  | 10,33                    | 0,29 | BÇ           |
| 30K5        | 8,5               | 100                | 2000                 | 3613  | 10,41                    | 0,27 | BÇ           |
| 30A1        | 5,5               | 100                | 1500                 | 2017  | 7,56                     | 0,12 | A            |
| 30A2        | 6,5               | 100                | 1500                 | 2817  | 8,65                     | 0,14 | A            |
| 30A3        | 7,5               | 100                | 1500                 | 3750  | 9,41                     | 0,31 | BÇ           |
| 30K3A4Z2    | 8,5               | 100                | 1500                 | 4817  | 10,13                    | 0,28 | BÇ           |
| 30A5        | 9,5               | 100                | 1500                 | 6017  | 10,67                    | 0,40 | BÇ           |



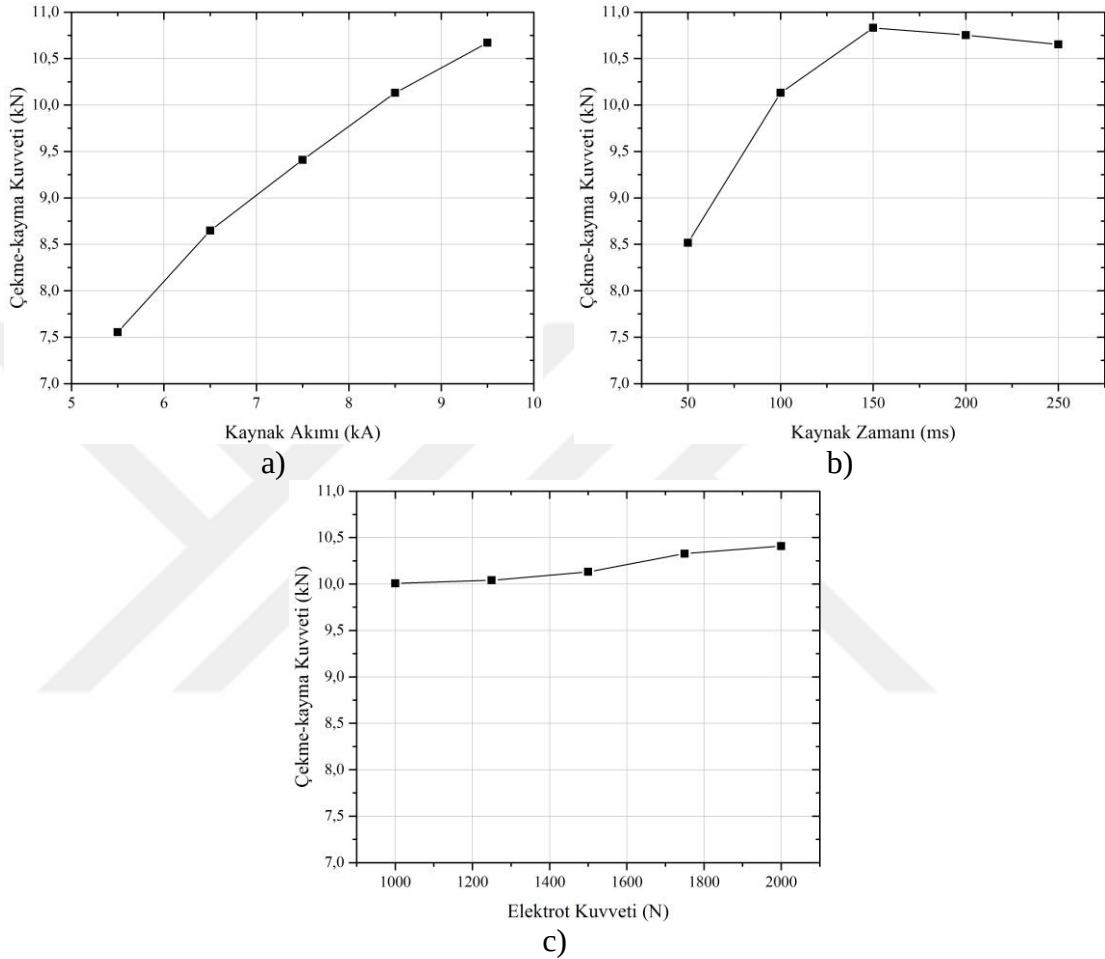


**Şekil 4.108.** %30 deformasyonlu B grubu kaynaklı numunelerin çekme eğrileri a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti

Kaynak parametrelerinin kaynaklı numunelerin çekme-kayma kuvvetine etkisi şekil 4.109’da verilmiştir. Kaynak akımı artışı ile çekme-kayma kuvveti sürekli bir artış içerisinde. Bu artış, kaynaklı numunelerin çekirdek çapları ile tam bir uyum içerisinde. Maksimum çekme-kayma kuvveti 10,67 kN ile 9,5 kA’lık kaynak akımında elde edilmiştir. Kaynak akımı 5,5 kA’dan 9,5 kA’e arttırıldığında, çekme-kayma kuvveti %40’ın üzerinde bir artış sergilemiştir.

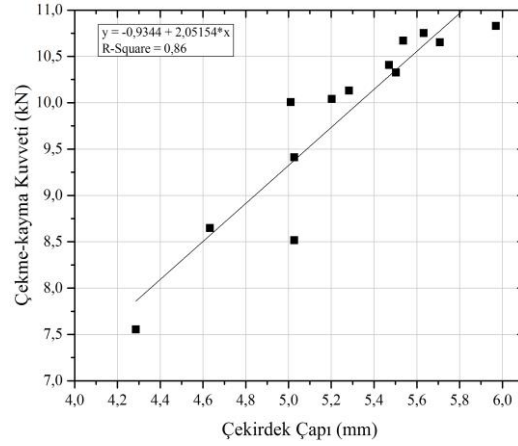
150 ms’lik kaynak zamanına kadar çekme-kayma kuvveti önemli ölçüde artarken, daha yüksek kaynak zamanlarında çekme-kayma kuvvetinde nispi bir düşüş kaydedilmiştir. Çekme-kayma kuvveti 150 ms’de maksimum değerine ulaşmıştır (10,83 kN). Kaynak zamanı 50 ms’den 150 ms’ye arttırıldığında, çekme-kayma kuvveti %27’nin üzerinde bir artış sergilemiştir. Kaynak zamanına bağlı olarak elde edilen çekme-kayma kuvveti değerleri ile ilgili numunelerin çekirdek çapları da tam bir uyum içerisinde.

Elektrot kuvvetinin çekme-kayma kuvveti üzerindeki etkisi çok sınırlı kalmıştır. Artan elektrot kuvveti ile çekme-kayma kuvvetinde az da olsa bir artış kaydedilmiştir. Elektrot kuvveti 1 kN'dan 2 kN'a arttırıldığında çekme-kayma kuvvetindeki artış sadece %4 civarında kalmıştır.



**Şekil 4.109.** Çekme-kayma kuvvetinin kaynak parametreleri ile değişimi a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu)

Çekirdek çapı artışı ile çekme-kayma kuvveti artmıştır (Şekil 4.110). Bu artışın, yüksek lineer korelasyon katsayısına sahip olduğunu vurgulamak gerekir ( $R^2=0,86$ ).



**Şekil 4.110.** Çekme-kayma kuvvetinin çekirdek çapı ile değişimi (%30 deformasyonlu B grubu)

#### 4.7.4. Kırılma yüzeylerinin analizi

Çekme testlerine tabi tutulan bazı numunelerin kırılma makro fotoğrafları Şekil 4.111’de verilmiştir. Kırılma yüzeylerinin analizi kısmında; tüm kırılma modlarının gözlemlendiği kaynak akımı grubundaki (30A1, 30A2, 30A3, 30A4 ve 30A5) numunelerin kırılma yüzeyi incelemelerine yer verilmiştir. Düşük kaynak akımları (8,5 kA’ya kadar) ile üretilen numunelerdeki kırılmalar düşük çekme-kayma kuvvetine sahip ara yüzey (interfacial) kırılması şeklinde gerçekleşmiştir. Kaynak akımı değeri 7,5 kA’e yükseldiğinde ise kırılma buton çekirdek kırılmasına dönmüş olup kaynaklı numunenin çekme-kayma kuvveti artmıştır. Kaynak akımının daha fazla (ITAB boyunca gerçekleşen kırılma). Benzer davranış, %15 deformasyonlu B grubu numunelerinde de gözlenmiştir.

Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmiş %30 deformasyon oranına sahip TWIP çeliklerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.112-4.116 arasında verilmiştir. Sünek kırılma davranışı sergileyen %30 deformasyon oranına sahip TWIP temel malzemesi, elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edildiğinde oldukça gevrek bir kırılma davranışına yönelmiştir.

Farklı kaynak akımları kullanılarak üretilen numuneler içerisinde en düşük kaynak mukavemetine sahip 30A1 numunesi ara yüzey tipinde bir kırılma davranışı sergilemiştir (Şekil 4.112) . Kırılma yüzeyinin kaynak merkezi civarı ve kaynak kenarı kırılmaları ayrı ayrı değerlendirildiğinde, merkez dışındaki bölge, az da olsa sünek tarzda kırılma işaretlerini içerse de gevrek kırılmanın baskın olduğu söylenebilir. Merkez bölge

civarında ise yine gevrek kırılma ön planda olmasına rağmen sünek kırılma işaretlerinin biraz daha fazlalaştığı söylenebilir. Tam merkez bölgede ise daha öncede üzerinde durulduğu gibi doğrudan dendritler arası ayrılma gözlenmiştir.

Nispeten düşük kaynak akımı ile üretilen 30A2 numunesinde de kırılma ara yüzey tipindedir (Şekil 4.113). 30A1 numunesine istinaden daha yüksek kaynak mukavemetine sahip 30A2 numunesinin kırılma yüzeyinde, özellikle merkeze yakın bölgelerde gevrek kırılma eğiliminin ve belirgin dendritik ayrışmaların nispeten azaldığı görülmektedir. Özellikle, kaynak merkezine yakın bölgedeki kırılma yüzeyi çekirdek veren tipte bir kırılmaya yaklaştığı izlenimi de vermektedir.

Nitekim, kaynak akımı biraz daha arttırıldığında (30A3 numunesi) buton tipte bir kırılma gerçekleşmiştir (Şekil 4.114). Bu numunenin merkez dışındaki kırılma yüzeyi 30A1 ve 30A2 numunelerinin merkez dışındaki kırılma yüzeyleri ile karşılaştırıldığında, gevrek kırılmanın baskınlaştığı, çekirdeğe doğru sünek kırılma karakteristiklerinin arttığı gözlenmiştir. Bu numunede, kaynak bölgesindeki doğrudan dendritik ayrışmaların olmadığını da vurgulamak gerekir. Çekirdek üzerindeki kırılmalarda ise gevrek klevaj kırılmayı da içeren yine gevrek kırılmalar ön plandadır.

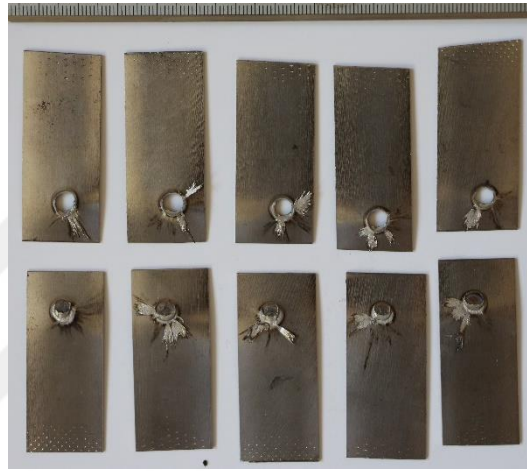
Buton tipi çekirdek veren yüksek kaynak mukavemetine sahip 30K3A4Z2 ve 30A5 numunelerinin kırılma yüzeyleri de Şekil 4.115 ve Şekil 4.116'da verilmiştir. 30K3A4Z2 numunesinin kaynak merkezi dışındaki bölgenin çekirdek üzerindeki kırılmaya nazaran nispeten daha zayıf bir bölge olduğu açıkça gözlenmektedir (Şekil 4.115): Bu bölgenin de ITAB'a denk düştüğü şekilden de görülebilir. 30A5 numunesinde de 30K3A4Z2 numunesi ile benzer kırılma karakteristikleri gözlenmiştir (Şekil 4.116). Ayrıca, bu numunelerde de doğrudan dendritik ayrılma şeklindeki kırılma karakteristiği gözlenmemiştir.



a)



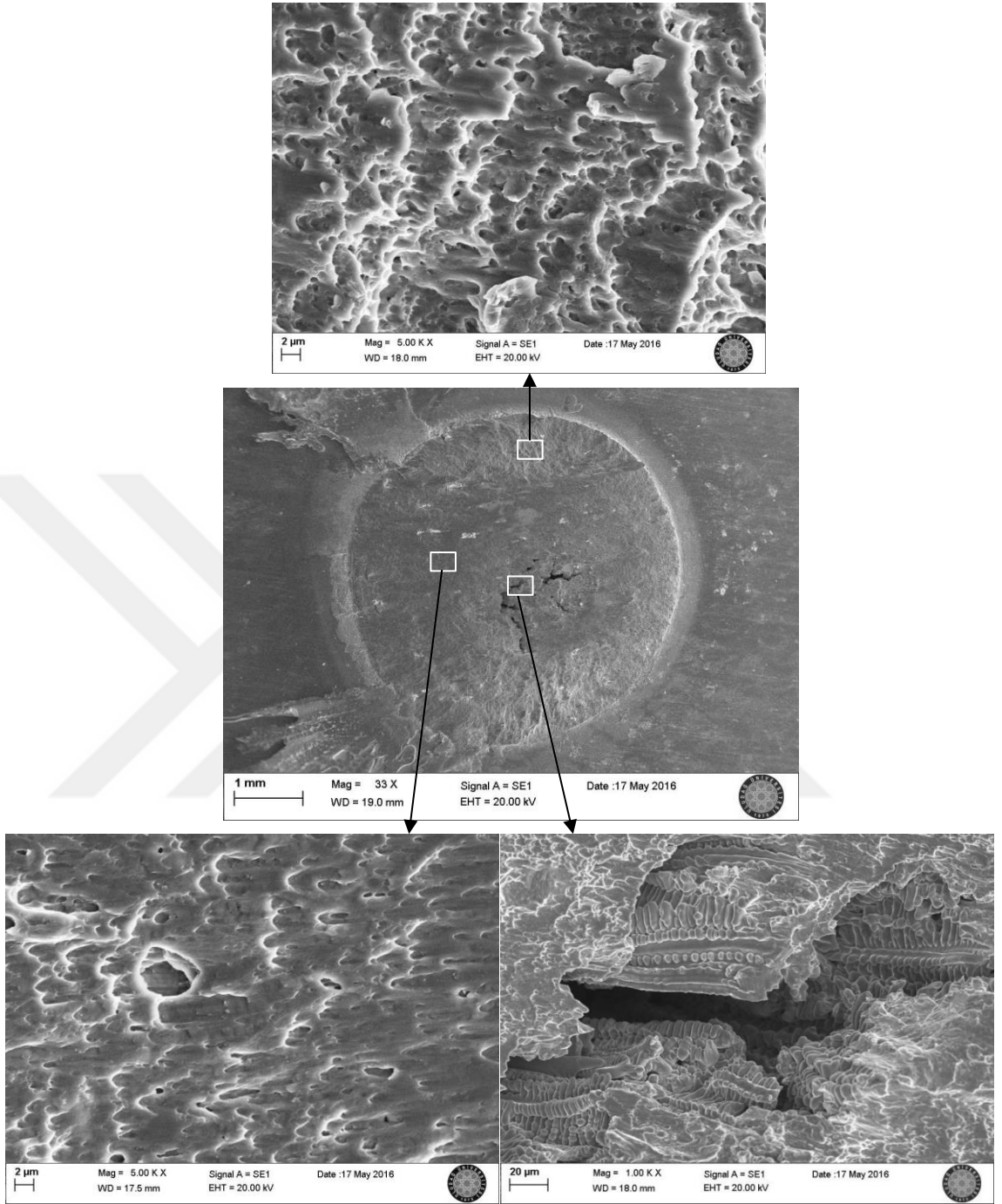
b)



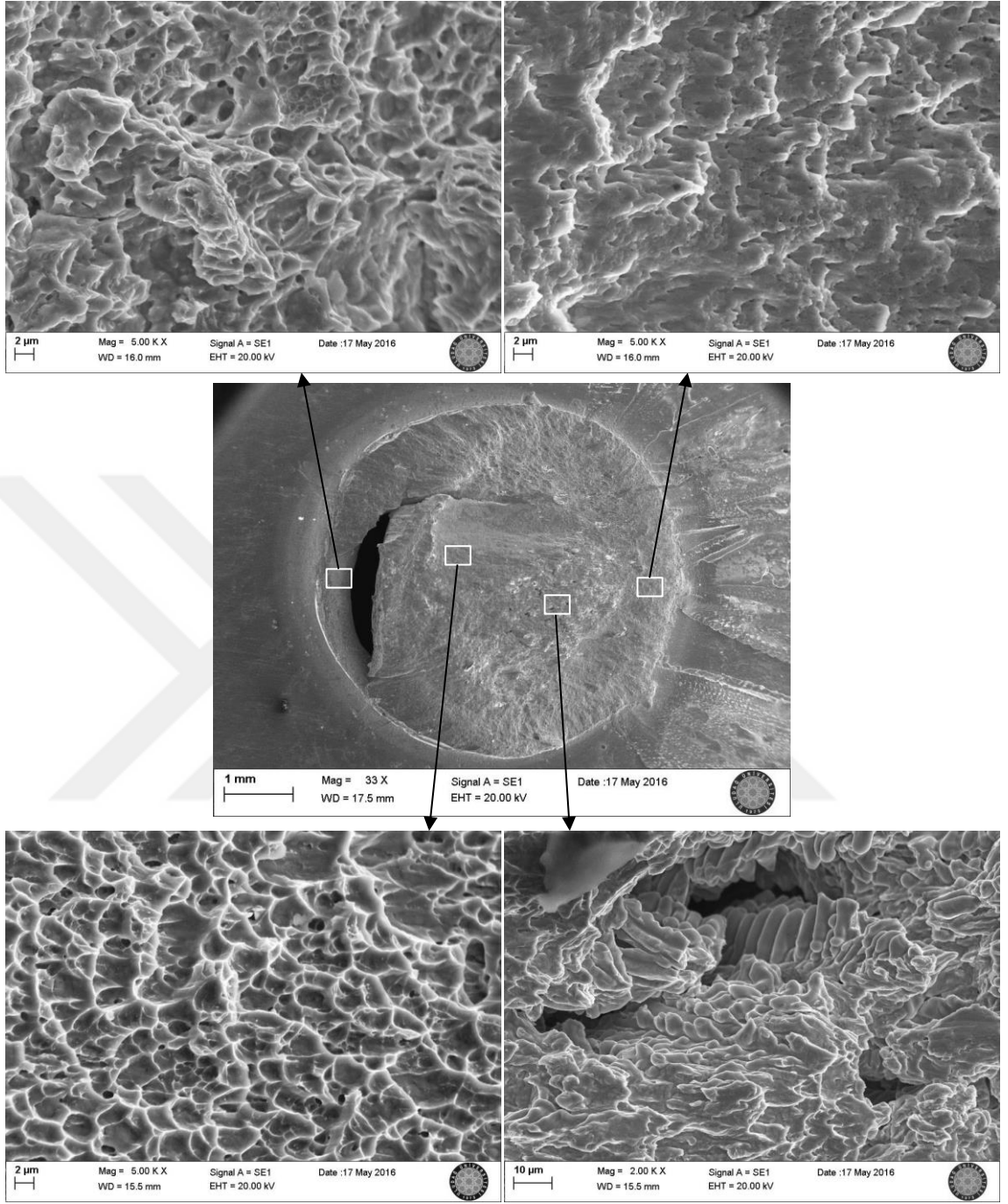
c)

**Şekil 4.111.** Çekme-kayma testi uygulanmış kaynaklı numuneler a) Kaynak akımı, b) Kaynak zamanı, c) Elektrot kuvveti (%30 deformasyonlu B grubu)

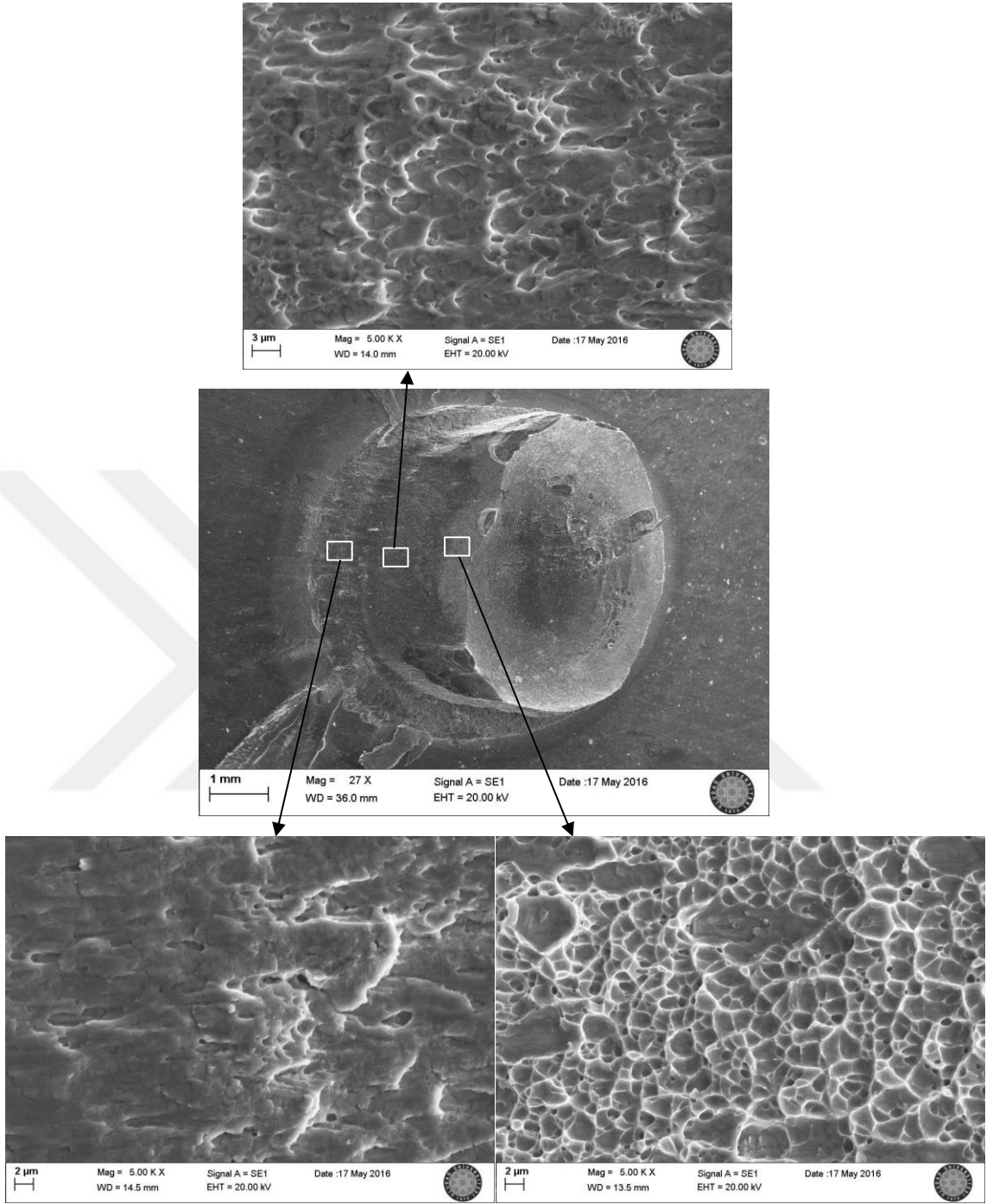




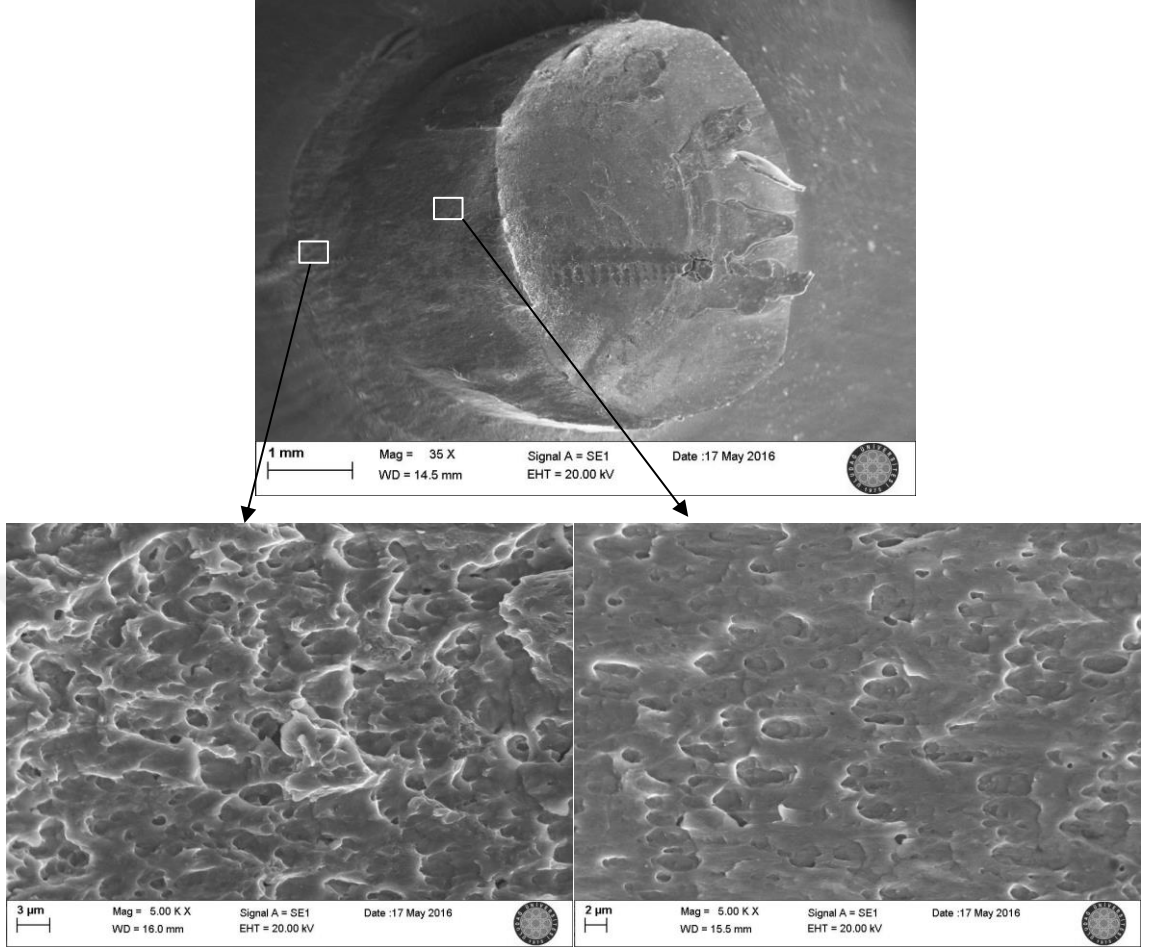
Şekil 4.112. SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30A1 numunesi)



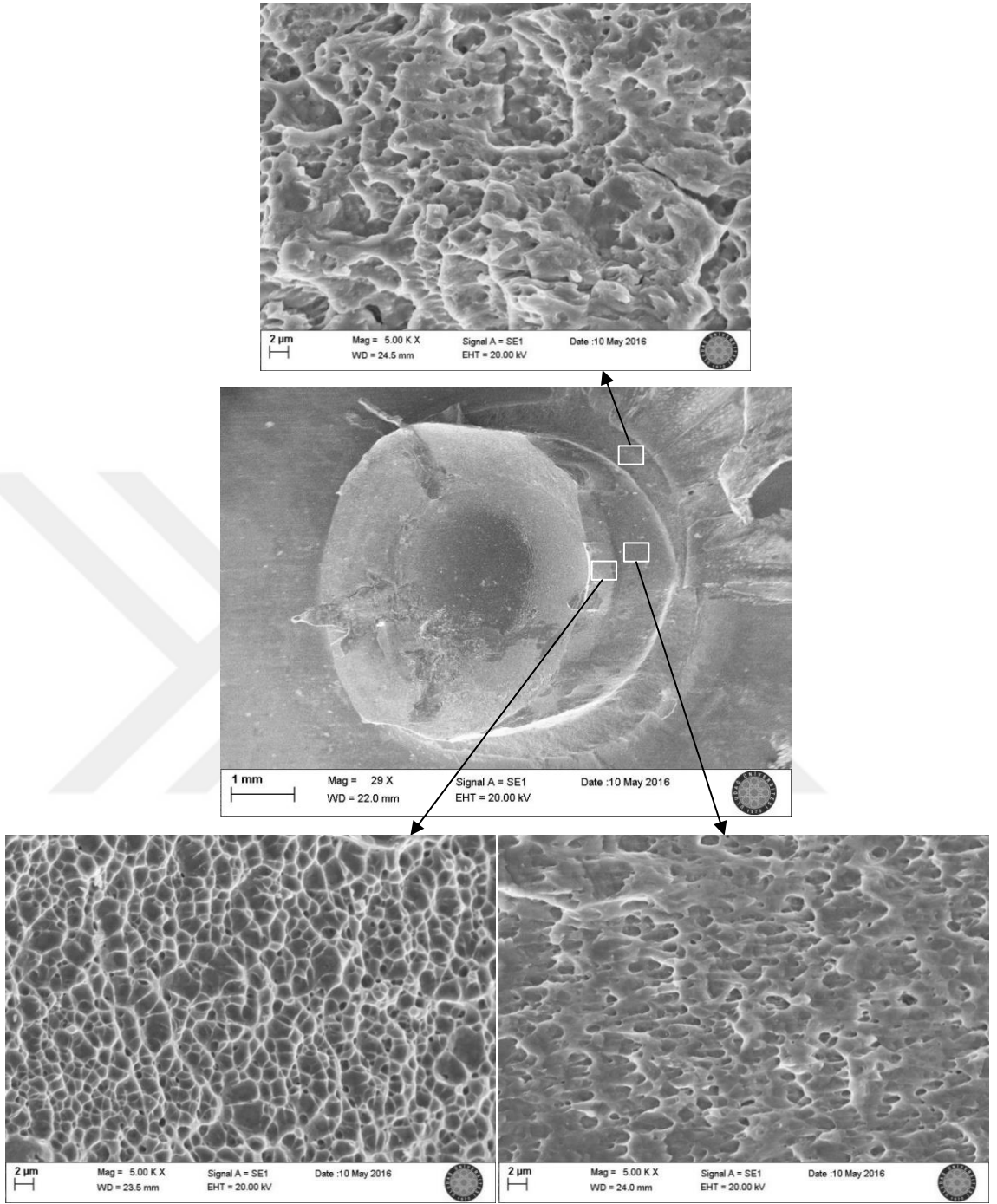
**Şekil 4.113.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30A2 numunesi)



Şekil 4.114. SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30A3 numunesi)



**Şekil 4.115.** SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30K3A4Z2 numunesi)



Şekil 4.116. SEM kırılma yüzeyi görüntüleri (30A5 numunesi)



## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, farklı deformasyon oranlarında soğuk haddelenen TWIP çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynak parametrelerinin optimizasyonu yapılmış ve her bir parametrenin mikro yapıya ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir.

Soğuk haddeleme ile TWIP çeliklerinde mukavemet artışı sağlayan mekanik ikiz yoğunluğu artmış, ancak mikro yapıda herhangi bir faz dönüşümü meydana gelmemiş ve ostenit taneleri kararlılıklarını devam ettirmiştir. Bu da, TWIP çeliğinin kimyasal içeriği (özellikle Mn miktarı) ile doğrudan ilişkilidir.

Farklı oranlarda soğuk deforme edilmiş TWIP çeliklerinin mekanik özellikleri, soğuk haddeleme ile mekanik ikiz yoğunluğunun artışını net olarak ortaya koymaktadır: %15 soğuk deformasyon ile çekme mukavemetinin artışı %25'e yaklaşırken %30 deformasyon ile bu artış %50'nin de üzerine çıkmıştır. Sertlik değerleri de benzer şekilde bir değişim göstermiş, %15 soğuk deformasyon ile meydana gelen sertlik artışı %40'a yaklaşırken %30 deformasyon ile meydana gelen sertlik artışı %60'ın üzerine çıkmıştır. Buna karşın, uzama değerleri düşüş göstermiş ve %15 soğuk deformasyon ile uzamadaki düşüş %57'ye yaklaşırken %30 deformasyon ile meydana gelen uzamadaki düşüş %85 civarında gerçekleşmiştir. Bu önemli düşüş, deformasyon oranı ile artan ikizlenme kırılma davranışı üzerindeki etkisi ile açıklanabilir: Yoğun ikiz sınırlarının oluşumuyla meydana gelen çok daha küçük gerinim bölgesi daha küçük bir bölgede plastik şekil değişimine neden olup gerilme yığılmaları oluşturarak kırılma davranışı üzerinde etki gösterir. Deformasyon ile uzamada meydana gelen bu düşüşün, özellikle, TWIP sacının otomotiv sanayindeki kullanımında göz önüne alınması gerekir. Soğuk olarak şekillendirilen otomotiv parçalarının bazı noktalarında deformasyon oranının belli değerleri geçmesine izin verilmemelidir.

Bilindiği gibi, elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmiş sacların çekirdek veren tipte kırılma sergilemeleri daha yüksek kaynak mukavemetine işaret etmektedir. 1,3 mm kalınlığındaki sonradan deforme edilmemiş TWIP çeliğinin çekirdek veren tipte bir kırılma sergilemesini sağlayacak kaynak parametrelerinin alt sınırları, elektrot kuvveti için 2 kN, kaynak akımı için 4 kA ve kaynak zamanı içinse 100 ms olarak bulunmuştur. %15 deforme edilmiş 1,1 mm kalınlığında bu değerler; elektrot kuvveti için 1,5 kN,

kaynak akımı için 3 kA ve kaynak zamanı içinse 100 ms'dir. %30 deforme edilmiş 0,90 mm kalınlığında ise; elektrot kuvveti için 0,5 kN, kaynak akımı için 2,5 kA ve kaynak zamanı içinse 100 ms'dir. Bu değerlerin, kaynaklı numunelerde sadece en küçük çekirdek çapının elde edilmesine yönelik olduğunu vurgulamak gerekir. Ayrıca, bu kaynak parametrelerinin belirlenmesinde, kaynak parametrelerinin de birbiri ile etkileşim içerisinde olduğunu unutmamak gerekir. Deformasyon oranının artması ile TWIP sacındaki kalınlığın azalmasına bağlı olarak kaynak parametrelerinin alt sınırlarının aşağıya ötelendiği görülmektedir. Sacdaki incelme ile daha düşük ısı girdisine ihtiyaç duyulmaktadır. Deformasyon oranı artışı ile meydana gelen mekanik ikizlerin (iç enerji ve saclarda meydana getireceği dayanım artışıyla) kaynak parametrelerinin değişimine etkisinin ihmal edilebilir ölçüde olduğu düşünülmektedir. Yapılan çalışma boyunca, esas etkinin kalınlık incelmesiyle ilişki olduğu görülmüştür.

Optimizasyon çalışmaları sonucu; 1,3 mm kalınlığındaki %0 deformasyonlu TWIP çeliğinin çekme-kayma kuvvetini (13,72 kN) maksimum yapan kaynak parametreleri, elektrot kuvveti için 3 kN, kaynak akımı için 12 kA ve kaynak zamanı içinse 300 ms olarak bulunmuştur. Çekme-kayma kuvvetini en çok etkileyen parametre kaynak akımı olmuştur. Elektrot kuvveti ve kaynak zamanı ise birbirine yakın oranlarda etkilere sahiptir. 1,1 mm kalınlığındaki %15 deforme edilmiş TWIP çeliğinin ise çekme-kayma kuvvetini (12,24 kN) maksimum yapan kaynak parametreleri; elektrot kuvveti için 2,25 kN, kaynak akımı için 9 kA ve kaynak zamanı içinse 250 ms olarak elde edilmiştir. Çekme-kayma kuvveti üzerindeki en etkin parametre yine kaynak akımı olmuştur. Elektrot kuvveti ve kaynak zamanının etkileri yine düşük oranlarda kalmıştır. %30 deforme edilmiş 0,90 mm kalınlığındaki TWIP çeliğinin çekme-kayma kuvvetini (10,13 kN) maksimum yapan kaynak parametreleri; elektrot kuvveti için 1,5 kN, kaynak akımı için 8,5 kA ve kaynak zamanı içinse 100 ms değerleri olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde, çekme-kayma kuvveti üzerindeki en etkili parametre yine kaynak akımı olmuştur. Kaynak akımının tüm deformasyon gruplarında en etkin parametre olmasının sebebi; kaynak parametreleri için belirlenen sınır değerlerinde, kaynak akımının diğer parametrelere göre (oransal olarak) daha büyük bir aralıkta dağılması ve çekme-kayma kuvvetini etkileyen en önemli faktörün ısı girdisi olduğu düşünüldüğünde (ısı girdisi akımın karesiyle orantılıdır) akımın ısı girdisine etkisinin daha büyük olması ile açıklanabilir.

TWIP eliklerinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinden sonra mikro yapısı, deformasyondan bağımsız olarak, 3 ana bölgeden meydana gelmektedir: Temel Malzeme (TM), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB), ve Erime Bölgesi (EB). Deformasyonsuz ve deformasyonlu TM mikro yapısı, genel itibariyle haddeleme doğrultusunda yönlenmiş deformasyon bantları ve deformasyon oranına bağlı olarak mekanik ikizleri de içeren ince taneli ostenitlerden; EB tipik dendritik döküm mikro yapısından; ITAB ise, iri tavlama ikizlerini de içeren oldukça kaba ostenitik yapıdan oluşmaktadır. Kaynak işlemi sırasında ortaya çıkan ısı, kaynak bölgesinde (ITAB ve EB’de) tüm mekanik ikizleri ortadan kaldırmış, herhangi bir faz dönüşümüne yol amayıp ostenit morfolojisinde farklılık meydana getirmiştir.

TWIP eliklerinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinden sonra, deformasyondan bağımsız olarak, kaynak bölgesinde meydana gelebilecek temel kaynak hataları şu şekilde sıralanabilir: Büzülme esaslı mikro ve makro gözenekler, makro sıçratma boşlukları, yüzey çatlakları, ITAB tane sınırlarında ergime ve katılaşma çatlakları. %30 deformasyon oranına sahip numunelerde çok düşük olan elektrot kuvvetlerinde yeterli sıkmanın gerçekleşmemesi ile elektrik direncinin bölgesel olarak çok yüksek değerlere çıkması sonucu EB’de yanmalar da meydana gelmiştir. Sonuç olarak, ince TWIP sacı kullanılması gereken otomotiv parçalarında bu hususa dikkat edilmesi gerekmektedir.

Deformasyonlu ve deformasyonsuz TWIP eliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında, ITAB genişliği için; kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile IGİ artışına bağlı olarak kuvvetli korelasyonlar elde edilmiştir. Diğer taraftan, elektrot kuvvetinin etkisinin diğer parametrelerden daha karmaşık olmasından dolayı, elektrot kuvveti ile ITAB genişliği arasında belirgin bir korelasyon elde edilememiştir. Deformasyonlu ve deformasyonsuz TWIP eliklerinde IGİ artışı ile ITAB genişliği genel itibariyle artmaktadır. Deformasyonsuz, %15 ve %30 deformasyonlu kaynaklı TWIP eliklerinde ITAB genişliği ve IGİ arasındaki lineer korelasyon katsayıları ( $R^2$ ), sırasıyla 0,64, 0,53 ve 0,73’tür. Nispeten düşük olan bu değerlerin sebebinin elektrot kuvveti ile ilişkili olduğu açıktır. Elektrot kuvveti ile ITAB genişliği arasında belirgin bir korelasyonun elde edilememesi bu sonuca önemli etkide bulunmuştur.

Deformasyonsuz ve deformasyonlu TWIP eliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında, genel itibariyle ısı girdisi artışıyla ITAB'daki taneler irileşmiş ve tavlama ikizlerinin kalınlıkları artmıştır. Ancak, %30 deformasyonlu TWIP eliklerinde daha düşük ısı girdisine bağlı olarak bu etki azalmıştır.

%0, %15 ve %30 deformasyon oranına sahip TWIP eliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında, çökme miktarı artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile ısı girdisi artışına bağlı olarak sürekli bir artış içerisinde. Diğer taraftan, elektrot kuvveti ile azalan ısı girdisine bağlı olarak önce çökme miktarı azalmış, sonrasında artan elektrot kuvveti ile daha yüksek sıkma kuvvetinden dolayı çökme miktarı artmaya başlamıştır. Genel itibariyle, ısı girdisinin ve/veya elektrot kuvvetinin azalması ile çökme miktarı azalmıştır.

TWIP eliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında, genel olarak kaynak bölgesi mikro sertlik değerleri temel malzeme sertlik değerinden daha düşüktür. En düşük sertlik değerleri ise ITAB'dadır. Kaynak parametreleri ve kaynak öncesi temel malzeme özellikleri (deforme edilmesi) kaynak bölgesi (EB ve ITAB'da) mikro sertlik değerlerinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır. Bunda en büyük etken, kaynak işlemi ile kaynak bölgesinde faz dönüşümünün meydana gelmemesi ve mekanik ikizlerin tamamının ortadan kalkmasıdır. Kaynaklı numuneler kendi içerisinde değerlendirildiğinde de, ısı girdisi değişimi ile kaynak bölgesinde (özellikle ITAB'da) nispi farklılık gösteren tane büyüklüğü ve tavlama ikizleri de sertlik üzerinde önemli sayılabilecek bir etkiye sahip olmamıştır.

Tüm gruptaki numuneler değerlendirildiğinde, genel itibariyle, çekirdek çapı artışı ile çekme-kayma kuvveti artmıştır. Deformasyonsuz, %15 ve %30 deformasyonlu kaynaklı TWIP eliklerinde çekirdek apıları ve çekme-kayma kuvvetleri arasındaki lineer korelasyon katsayıları ( $R^2$ ), sırasıyla 0,83, 0,53 ve 0,86'tür.

Kırılma yüzeyi görüntüleri incelendiğinde, temel malzemelerin (%0, %15 ve %30 deformasyon oranına sahip) kırılma yüzeyleri sünek kırılma özellikleri sergilemiştir. Temel malzemelerin kırılma karakteristiklerinde deformasyon ikizleri aktif rol oynamıştır. Diğer taraftan, TWIP saclarının elektrik direnç nokta kaynağı sonrasındaki kırılmalar temel malzemelere nazaran oldukça gevrek tarzda gerçekleşmiştir. Esas

itibariyle, ITAB civarındaki kırılma karakteristiği çekme-kayma kuvveti üzerinde etkin bir rol oynamıştır.

Kaynaklı numunelerin çok düşük çekme-kayma kuvvetine sahip ara yüzey kırılmalarında, kırılmalar ITAB'da başlayan etkin parçalı gevrek kırılma ile hız kazanmıştır. Bu da, söz konusu bölgede yeterli bir birleşmenin meydana gelmediğini göstermiştir. EB'ye karşılık gelen merkez bölgesi civarında ise az da olsa sünek kırılma karakteristikleri göze çarpmış olsa da gevrek kırılma ön planda olmuştur. Bu bölgede nispeten kuvvetli bir birleşme söz konusu olmuş, ancak merkez dışındaki bölgede (gevrek parçalı kırılma) çekme yükü altında oluşan çok sayıda çatlağın merkez bölgesine doğru ilerlemesi, kırılmanın çok düşük kuvvetlerde gerçekleşmesine neden olmuştur.

Nispeten daha yüksek çekme-kayma kuvveti gösteren ara yüzey kırılmalarında, ITAB civarındaki merkez dışındaki bölgede, sünek tarzda kırılma işaretlerini de içeren gevrek tarzda bir kırılma ön plandadır. Ancak, bu kez gevrek parçalı kırılma, yerini gevrek kırılmanın da olduğu gevrek-sünek tarzda karışık bir kırılmaya bırakmıştır: Bu bölgede çatlak ilerlemesinin daha fazla engel ile karşılaşacağı açıktır (duraklama izleri). Bu da, çekme-kayma kuvvetinin nispeten daha yüksek olmasını sağlamıştır. Ara yüzey kırılmalarında, kaynak kenarında (ITAB bölgesine denk düşen) çatlak oluşumunu ve çatlak ilerlemesini tetikleyen daha gevrek tarzdaki kırılmalar çekme-kayma kuvvetinin daha düşük çıkmasına yol açmıştır. Kaynak merkezi civarındaki kırılmalarda ise, kaynak kenarındaki kırılmalara nazaran daha fazla sünek kırılma karakteristikleri gözlenmiştir.

Yüksek çekme-kayma kuvvetine sahip buton tipi çekirdek veren, ITAB'dan başlayan kırılmalar gevrek-sünek tarzda kırılmalar şeklindedir. Merkeze daha yakın, çekirdek üzerindeki kırılmalarda ise daha fazla sünek kırılma karakteristikleri sergileyen gevrek-sünek tarzda kırılmalar söz konusudur. Daha yüksek çekme-kayma kuvveti gösteren numunelerin çekirdekleri üzerindeki kırılmalarda trans-granüler gevrek klevaj kırılmanın da varlığını vurgulamak gerekir. Ayrıca, daha yüksek çekme-kayma kuvvetine sahip numunelerde, çekirdek üzerindeki kırılmalarda daha fazla sünek kırılma karakteristikleri ön plana çıkabilmektedir.

Yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler grubu içerisinde bulunan TWIP çelikleri otomotiv sektörü için gelecek vaat eden çelikler olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca,



otomotiv sanayisinde kullanılacak çeliklerin üretim yöntemlerine (zellikle elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirme) uygunluğu kullanım potansiyeli açısından önem arz etmektedir. TWIP eliklerinin otomotiv sektörüne adaptasyonu sürecinde, bu çeliklerin kaynak edilebilirliği ve kaynak özellikleri, ihtiyaç duyulacak önemli bir bilgi niteliğindedir. Bu alışma ile TWIP eliğinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinde ihtiyaç olacak hususlar detaylı bir şekilde irdelenmiş ve dikkat edilmesi gereken noktalar belirtilmiştir.



## KAYNAKLAR

- Allain, S., Chateau, J.-P., Bouaziz, O., Migot, S. ve Guelton, N. 2004.** Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe–Mn–C alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 387–389, 158–162.
- ASTM E8/E8M. 2009.** Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, .
- Bintu, A., Vincze, G., Picu, C. R., Lopes, A. B., Grácio, J. J. ve Barlat, F. 2015.** Strain hardening rate sensitivity and strain rate sensitivity in TWIP steels, *Materials Science and Engineering A*, 629, 54–59.
- Bouaziz, O., Allain, S., Scott, C. P. P., Cugy, P. ve Barbier, D. 2011.** High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 15(4), 141–168.
- Chen, L., Zhao, Y. ve Qin, X. 2013.** Some aspects of high manganese twinning-induced plasticity (TWIP) steel, a review, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 26(1), 1–15.
- Chin, K.-G., Kang, C.-Y., Shin, S. Y., Hong, S., Lee, S., Kim, H. S., ... Kim, N. J. 2011.** Effects of Al addition on deformation and fracture mechanisms in two high manganese TWIP steels, *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2922–2928.
- Chun, Y. S., Park, K.-T. ve Lee, C. S. 2012.** Delayed static failure of twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia*, 66(12), 960–965.
- Cornette, D., Cugy, P., Hildenbrand, A., Bouzekri, M. ve Lovato, G. 2005.** Ultra High Strength FeMn TWIP Steels for automotive safety parts, *Le Revue de metallurgie*, 905–918.
- Curtze, S. ve Kuokkala, V.-T. 2010.** Dependence of tensile deformation behavior of TWIP steels on stacking fault energy, temperature and strain rate, *Acta Materialia*, 58(15), 5129–5141.
- De Cooman, B. C., Chin, K. ve Kim, J. 2011.** High Mn TWIP Steels for Automotive Applications, *New Trends and Developments in Automotive System Engineering* içinde , (ss. 1001–128), InTech.
- De Cooman, B. C., Kwon, O. ve Chin, K.-G. 2012.** State-of-the-knowledge on TWIP steel, *Materials Science and Technology*, 28(5), 513–527.
- Dieudonné, T., Marchetti, L., Wery, M., Chêne, J., Allely, C., Cugy, P. ve Scott, C. P. 2014.** Role of copper and aluminum additions on the hydrogen embrittlement susceptibility of austenitic Fe–Mn–C TWIP steels, *Corrosion Science*, 82, 218–226.
- Dini, G., Najafizadeh, A., Ueji, R. ve Monir-Vaghefi, S. M. 2010.** Tensile deformation

behavior of high manganese austenitic steel: The role of grain size, *Materials & Design*, 31(7), 3395–3402.

**Frommeyer, G., Br  x, U. ve Neumann, P. 2003.** Supra-Ductile and High-Strength Manganese-TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purposes, *ISIJ International*, 43(3), 438–446.

**Ghasri-Khouzani, M. ve McDermid, J. R. 2015.** Effect of carbon content on the mechanical properties and microstructural evolution of Fe–22Mn–C steels, *Materials Science and Engineering: A*, 621, 118–127.

**Gr  ssel, O., Frommeyer, G., Derder, C. ve Hofmann, H. 1997.** Phase Transformations and Mechanical Properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP-Steels, *Le Journal de Physique IV*, 7(C5), C5-383-C5-388.

**Gr  ssel, O., Kr  ger, L., Frommeyer, G. ve Meyer, L. W. 2000.** High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development - properties - application, *International journal of plasticity*, 16(10), 1391–1409.

**Guo, P., Qian, L., Meng, J., Zhang, F. ve Li, L. 2013.** Low-cycle fatigue behavior of a high manganese austenitic twin-induced plasticity steel, *Materials Science and Engineering: A*, 584, 133–142.

**Gutierrez-Urrutia, I. ve Raabe, D. 2011.** Study of Deformation Twinning and Planar Slip in a TWIP Steel by Electron Channeling Contrast Imaging in a SEM, *Materials Science Forum*, 702–703(DECEMBER), 523–529.

**Gutierrez-Urrutia, I. ve Raabe, D. 2012.** Grain size effect on strain hardening in twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia*, 66(12), 992–996.

**Gutierrez-Urrutia, I., Zaefferer, S. ve Raabe, D. 2010.** The effect of grain size and grain orientation on deformation twinning in a Fe–22wt.% Mn–0.6wt.% C TWIP steel, *Materials Science and Engineering: A*, 527(15), 3552–3560.

**G  ven, G. 2012.** *  kizlenme Yoluyla Plastisite Kazanan (Twinning Induced Plasticity (TWIP) Steel) Y  ksek Mukavemetli Yassı   eliklerin   retimi ve Geliştirilmesi*, Gebze Y  ksek Teknoloji Enstit  s  .

**Haase, C., Barrales-Mora, L. A., Molodov, D. A. ve Gottstein, G. 2013.** Tailoring the Mechanical Properties of a Twinning-Induced Plasticity Steel by Retention of Deformation Twins During Heat Treatment, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(10), 4445–4449.

**Hadfield, R. A. 1888.** Hadfield’s Manganese Steel, *Science*, ns-12(306), 284 LP-286.

**Hamada, A. S. 2007.** *Manufacturing, mechanical properties and corrosion behaviour of high Mn TWIP steels*, *Acta Universitatis Ouluensis C*, Oulu University Press.

**Hamada, A. S. ve Karjalainen, L. P. 2010.** High-cycle fatigue behavior of ultrafine-grained austenitic stainless and TWIP steels, *Materials Science and Engineering: A*,

527(21–22), 5715–5722.

- Han, D. K., Kim, Y. M., Han, H. N., Bhadeshia, H. K. D. H. ve Suh, D.-W. 2014.** Hydrogen and aluminium in high-manganese twinning-induced plasticity steel, *Scripta Materialia*, 80, 9–12.
- Han, D. K., Lee, S. K., Noh, S. J., Kim, S.-K. ve Suh, D.-W. 2015.** Effect of aluminium on hydrogen permeation of high-manganese twinning-induced plasticity steel, *Scripta Materialia*, 99, 45–48.
- Hilditch, T. B., de Souza, T. ve Hodgson, P. D. 2015.** Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS), *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)* içinde , (ss. 9–28), Elsevier.
- Holovenko, O., Ienco, M. G., Pastore, E., Pinasco, M. R., Matteis, P., Scavino, G. ve Firrao, D. 2013.** Microstructural and mechanical characterization of welded joints on innovative high-strength steels, *La Metallurgia Italiana*, (3), 3–12.
- Hong, S., Lee, J., Lee, B.-J., Kim, H. S., Kim, S.-K., Chin, K.-G. ve Lee, S. 2013.** Effects of intergranular carbide precipitation on delayed fracture behavior in three TWinning Induced Plasticity (TWIP) steels, *Materials Science and Engineering: A*, 587, 85–99.
- Hongning, K. 2011.** *Development of High Strength and High Ductility Nanosctructured TWIP Steels*, The Hong Kong Polytechnic University.
- Hwang, J.-K., Yi, I.-C., Son, I.-H., Yoo, J.-Y., Kim, B., Zargarani, A. ve Kim, N. J. 2015.** Microstructural evolution and deformation behavior of twinning-induced plasticity (TWIP) steel during wire drawing, *Materials Science and Engineering: A*, 644, 41–52.
- Jin, J. E. ve Lee, Y. K. 2009.** Strain hardening behavior of a Fe-18Mn-0.6C-1.5Al TWIP steel, *Materials Science and Engineering A*, 527(1–2), 157–161.
- Jin, J. E. ve Lee, Y. K. 2012.** Effects of Al on microstructure and tensile properties of C-bearing high Mn TWIP steel, *Acta Materialia*, 60(4), 1680–1688.
- Jung, I.-C. ve De Cooman, B. C. 2013.** Temperature dependence of the flow stress of Fe-18Mn-0.6C-xAl twinning-induced plasticity steel, *Acta Materialia*, 61(18), 6724–6735.
- Kim, J.-K., Chen, L., Kim, H.-S., Kim, S.-K., Estrin, Y. ve De Cooman, B. C. 2009.** On the Tensile Behavior of High-Manganese Twinning-Induced Plasticity Steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40(13), 3147–3158.
- Kumar, B. R., Das, S. K., Mahato, B., Das, A. ve Ghosh Chowdhury, S. 2007.** Effect of large strains on grain boundary character distribution in AISI 304L austenitic stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, 454, 239–244.
- Kwon, Y. J., Lee, T., Lee, J., Chun, Y. S. ve Lee, C. S. 2015.** Role of Cu on hydrogen

- embrittlement behavior in Fe–Mn–C–Cu TWIP steel, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(23), 7409–7419.
- Li, D., Feng, Y., Song, S., Liu, Q., Bai, Q., Ren, F. ve Shangguan, F. 2015.** Influences of silicon on the work hardening behavior and hot deformation behavior of Fe–25wt%Mn–(Si, Al) TWIP steel, *Journal of Alloys and Compounds*, 618, 768–775.
- Liang, Z. Y., Wang, X., Huang, W. ve Huang, M. X. 2015.** Strain rate sensitivity and evolution of dislocations and twins in a twinning-induced plasticity steel, *Acta Materialia*, 88, 170–179.
- Liu, F., Dan, W. J. ve Zhang, W. G. 2015.** Strain hardening model of twinning induced plasticity steel at different temperatures, *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 737–742.
- Ma, L., Wei, Y., Hou, L. ve Yan, B. 2014.** Microstructure and Mechanical Properties of TWIP Steel Joints, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21(8), 749–756.
- Ma, P., Qian, L., Meng, J., Liu, S. ve Zhang, F. 2015.** Influence of Al on the fatigue crack growth behavior of Fe-22Mn-(3Al)-0.6C TWIP steels, *Materials Science and Engineering A*, 645, 136–141.
- Matteis, P., Scavino, G., Sesana, R., Aiuto, F. D. ve Firrao, D. 2013.** Fatigue endurance of new high-strength car-body steels, *Convegni Nazionali IGF: Acta Fracturae içinde*, (445), .
- Mcgrath, M. C. 2012.** *Development of Third Generation Advanced High Strength Steels*, Missouri University of Science and Technology.
- Mújica Roncery, L., Weber, S., Pinto, H., Thomy, C. ve Vollertsen, F. 2010.** Microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of TWIP and TRIP steels, *Materials Science and Engineering A*, 527(7–8), 2071–2078.
- Mújica Roncery, L., Weber, S. ve Theisen, W. 2012.** Welding of twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia*, 66(12), 997–1001.
- Neu, R. W. 2013.** Performance and Characterization of TWIP Steels for automotive Applications, *Materials Performance and Characterization*, 2(1), 244–284.
- Niendorf, T., Lotze, C., Canadinc, D., Frehn, A. ve Maier, H. J. 2009.** The role of monotonic pre-deformation on the fatigue performance of a high-manganese austenitic TWIP steel, *Materials Science and Engineering: A*, 499(1–2), 518–524.
- Niendorf, T., Rubitschek, F., Maier, H. J., Niendorf, J., Richard, H. a. ve Frehn, a. 2010.** Fatigue crack growth-Microstructure relationships in a high-manganese austenitic TWIP steel, *Materials Science and Engineering A*, 527(9), 2412–2417.
- Park, I.-J., Jeong, K.-H., Jung, J.-G., Lee, C. S. ve Lee, Y.-K. 2012.** The mechanism of enhanced resistance to the hydrogen delayed fracture in Al-added Fe–18Mn–0.6C



twinning-induced plasticity steels, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(12), 9925–9932.

**Peng, X., Zhu, D., Hu, Z., Wang, M., Liu, L. ve Liu, H. 2014.** Effect of Carbon Content on Stacking Fault Energy of Fe-20Mn-3Cu TWIP Steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21(1), 116–120.

**Pouranvari, M. 2011.** Effect of Resistance Spot Welding Parameters on the HAZ Softening of DP980 Ferrite-Martensite Dual Phase Steel Welds, *World Applied Sciences Journal*, 15(10), 1454–1458.

**Rahman, K. M., Vorontsov, V. A. ve Dye, D. 2014.** The dynamic behaviour of a twinning induced plasticity steel, *Materials Science and Engineering: A*, 589, 252–261.

**Rahman, K. M., Vorontsov, V. A. ve Dye, D. 2015.** The effect of grain size on the twin initiation stress in a TWIP steel, *Acta Materialia*, 89, 247–257.

**Razmpoosh, M. H., Shamanian, M. ve Esmailzadeh, M. 2015.** The microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded Fe–31Mn–3Al–3Si TWIP steel, *Materials & Design*, 67, 571–576.

**Reyes-Calderón, F., Mejía, I., Boulaajaj, A. ve Cabrera, J. M. 2013.** Effect of microalloying elements (Nb, V and Ti) on the hot flow behavior of high-Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel, *Materials Science and Engineering: A*, 560, 552–560.

**Roa, J. J., Fargas, G., Calvo, J., Jiménez-Piqué, E. ve Mateo, A. 2015.** Plastic deformation and damage induced by fatigue in TWIP steels, *Materials Science and Engineering: A*, 628, 410–418.

**Ronevich, J. A., Kim, S. K., Speer, J. G. ve Matlock, D. K. 2012.** Hydrogen effects on cathodically charged twinning-induced plasticity steel, *Scripta Materialia*, 66(12), 956–959.

**Rossillon, F. 2007.** *Welding conditions influence on the fatigue behaviour of a spot-welded High Strength Dual Phase steel*, Université Blaise Pascal, LaMI-IFMA Clermont-Ferrand.

**Rossini, M., Spena, P. R., Cortese, L., Matteis, P. ve Firrao, D. 2015.** Investigation on dissimilar laser welding of advanced high strength steel sheets for the automotive industry, *Materials Science and Engineering: A*, 628, 288–296.

**Saha, D. C., Chang, I. ve Park, Y.-D. 2014.** Heat-affected zone liquation crack on resistance spot welded TWIP steels, *Materials Characterization*, 93, 40–51.

**Saha, D. C., Cho, Y. ve Park, Y.-D. 2013.** Metallographic and fracture characteristics of resistance spot welded TWIP steels, *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(8), 711–720.

- Saha, D. C., Han, S., Chin, K. G., Choi, I. ve Park, Y.-D. Do. 2012.** Weldability evaluation and microstructure analysis of resistance-spot- welded high-Mn steel in automotive application, *Steel Research International*, 83(4), 352–357.
- Saha, D. C. ve Park, Y. Do. 2013.** Weldability and liquation cracking characteristics on resistance-spot- welded high-Mn austenitic steel, *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research*, 330–335.
- Saleh, A. A., Gazder, A. A. ve Pereloma, E. V. 2013.** EBSD Observations of Recrystallisation and Tensile Deformation in Twinning Induced Plasticity Steel, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 66(5–6), 621–629.
- Shao, C. W., Zhang, P., Liu, R., Zhang, Z. J., Pang, J. C., Duan, Q. Q. ve Zhang, Z. F. 2016.** A remarkable improvement of low-cycle fatigue resistance of high-Mn austenitic TWIP alloys with similar tensile properties: Importance of slip mode, *Acta Materialia*, 118, 196–212.
- Shterner, V., Timokhina, I. B. ve Beladi, H. 2016.** On the work-hardening behaviour of a high manganese TWIP steel at different deformation temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, 669, 437–446.
- Song, S. W., Lee, J. H., Lee, H. J., Bae, C. M. ve Lee, C. S. 2016.** Enhancing high-cycle fatigue properties of cold-drawn Fe–Mn–C TWIP steels, *International Journal of Fatigue*, 85, 57–64.
- Spena, P. R., De Maddis, M., Lombardi, F. ve Rossini, M. 2015.** Investigation on resistance spot welding of TWIP steel sheets, *Steel Research International*, 6914(December 2015).
- Spena, P. R., De Maddis, M., Lombardi, F. ve Rossini, M. 2016.** Dissimilar Resistance Spot Welding of Q&P and TWIP Steel Sheets, *Materials and Manufacturing Processes*, 31(3), 291–299.
- Spena, P. R., Matteis, P., Sanchez, A. ve Scavino, G. 2013.** Strength and fracture of TWIP steel dissimilar weld joints, *In Convegno IGF XXII Roma*, 109–117.
- Ueji, R., Tsuchida, N., Terada, D., Tsuji, N., Tanaka, Y., Takemura, A. ve Kunishige, K. 2008.** Tensile properties and twinning behavior of high manganese austenitic steel with fine-grained structure, *Scripta Materialia*, 59(9), 963–966.
- Wang, B., Zhang, Z. J., Shao, C. W., Duan, Q. Q., Pang, J. C., Yang, H. J., ... Zhang, Z.-F. 2015.** Improving the High-Cycle Fatigue Lives of Fe-30Mn-0.9C Twinning-Induced Plasticity Steel Through Pre-straining, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(8), 3317–3323.
- Wang, K., Wang, D. ve Han, F. 2016.** Effect of crystalline grain structures on the mechanical properties of twinning-induced plasticity steel, *Acta Mechanica Sinica*, 32(1), 181–187.
- Wang, T., Zhang, M., Xiong, W., Liu, R., Shi, W. ve Li, L. 2015.** Microstructure and

tensile properties of the laser welded TWIP steel and the deformation behavior of the fusion zone, *Materials & Design*, 83, 103–111.

**Wang, X., Liang, Z. Y., Liu, R. D. ve Huang, M. X. 2015.** Evolution of dislocations and twins in high cycle fatigue of a twinning-induced plasticity steel, *Materials Science and Engineering: A*, 647, 249–255.

**Wei, S. T., Liu, R. D., Lv, D., Lin, L., Xu, R. J., Guo, J. Y., ... Lu, X. F. 2015.** Weldability and mechanical properties of similar and dissimilar resistance spot welds of three-layer advanced high strength steels, *Science and Technology of Welding and Joining*, 20(1), 20–26.

**Xiong, R., Peng, H., Wang, S., Si, H. ve Wen, Y. 2015.** Effect of stacking fault energy on work hardening behaviors in Fe – Mn – Si – C high manganese steels by varying silicon and carbon contents, *Jmade*, 85, 707–714.

**Yang, H. K., Zhang, Z. J., Dong, F. Y., Duan, Q. Q. ve Zhang, Z. F. 2014.** Strain rate effects on tensile deformation behaviors for Fe–22Mn–0.6C–(1.5Al) twinning-induced plasticity steel, *Materials Science and Engineering: A*, 607, 551–558.

**Yang, H. K., Zhang, Z. J. ve Zhang, Z. F. 2015.** Comparison of twinning evolution with work hardening ability in twinning-induced plasticity steel under different strain rates, *Materials Science and Engineering A*, 622, 184–188.

**Yoo, J. D., Hwang, S. W. ve Park, K.-T. 2009.** Factors influencing the tensile behavior of a Fe–28Mn–9Al–0.8C steel, *Materials Science and Engineering: A*, 508(1–2), 234–240.

**Yu, J., Choi, D. ve Rhee, S. 2014.** Improvement of weldability of 1 GPa grade twin-induced plasticity steel, *Welding Journal*, 93(3), 78s–84s.

**Yu, J., Shim, J. ve Rhee, S. 2012.** Characteristics of Resistance Spot Welding for 1 GPa Grade Twin Induced Plasticity Steel, *MATERIALS TRANSACTIONS*, 53(11), 2011–2018.

**Yuan, X., Chen, L., Zhao, Y., Di, H. ve Zhu, F. 2014.** Dependence of Grain Size on Mechanical Properties and Microstructures of High Manganese Austenitic Steel, *Procedia Engineering*, 81(October), 143–148.

**Yuan, X., Chen, L., Zhao, Y., Di, H. ve Zhu, F. 2015.** Influence of annealing temperature on mechanical properties and microstructures of a high manganese austenitic steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 278–285.

**Zan, N., Ding, H., Guo, X., Tang, Z. ve Bleck, W. 2015.** Effects of grain size on hydrogen embrittlement in a Fe–22Mn–0.6C TWIP steel, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(33), 10687–10696.

**Zhao, Y., Wang, J., Zhou, S. ve Wang, X. 2014.** Effects of rare earth addition on microstructure and mechanical properties of a Fe–15Mn–1.5Al–0.6C TWIP steel, *Materials Science and Engineering: A*, 608, 106–113.

**Zhou, K. ve Cai, L. 2014.** Study on effect of electrode force on resistance spot welding process, *Journal of Applied Physics*, 116(8), 84902.



## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı:** Mümin TUTAR

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Alanya-1982

**Yabancı Dili:** İngilizce

**Eğitim Durumu ( Kurum ve Yıl)**

**Lise:** Isparta Gazi Lisesi, 2000

**Lisans:** Pamukkale Üniversitesi, Makine Eğitimi Otomotiv Öğretmenliği Bölümü, Denizli, 2008

**Yüksek Lisans:** Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, 2011

**Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:**

Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü (Arş. Gör. ), 2009 - ...

**İletişim (e-posta):** mumin@tutar.net

**Yayınları:**

---

### **YAYINLAR (SCI & SCI-Exp)**

1. Yuce, C., **Tutar, M.**, Karpas, F., Yavuz, N., Tekin G. (2016). Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Performance of Fiber Laser Welded AA5182 Aluminum Alloys. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering (Accepted)
  2. Aydın, H., Tuncel, O., Umur, Y., **Tutar, M.**, Bayram, A. (2017) The effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy AA6082-T6 friction stir spot welds. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences (Accepted)
  3. Yuce, C., **Tutar, M.**, Karpas, F., Yavuz, N. (2016). The Optimization of Process Parameters and Microstructural Characterization of Fiber Laser Welded Dissimilar HSLA and MART Steel Joints. Metals, 6(10), 245.
  4. **Tutar M.**, Aydın H., Yüce C., Yavuz N., Bayram A., The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array Materials and Design 789-797 63 2014
  5. **Tutar M.**, Aydın H., Durmuş A., Bayram A., Yiğit K., The hydro-abrasive erosion wear behavior of duplex-treated surfaces of AISI H13 tool steel Science China Technological Sciences 1040-1051 57 2014
  6. Aydın H., Tunçel O., Yüce C., **Tutar M.**, Yavuz N., Bayram A., Effect of Rotational Speed and Dwell Time on Mechanical Properties of Dissimilar
-



---

AA1050-AA3105 Friction Stir Spot Welded Joints Materials Testing 818-825 56  
2014

7. Aydın H., **Tutar M.**, Durmuş A., Bayram A., Sayaca T. Effect of Welding Parameters on Tensile Properties and Fatigue Behavior of Friction Stir Welded 2014-T6 Aluminum Alloy Transactions of the Indian Institute of Metals 21-30 65 2012
8. Durmuş A., Aydın H., **Tutar M.**, Bayram A., Yiğit K., Effect of The Microstructure on The Notched Tensile Strength of As-cast and Austempered Ductile Cast Irons Journal of Mechanical Engineering Science, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C 2214-2229 226 2012

---

### **BİLİMSEL TOPLANTILAR**

1. Aydın H., **Tutar M.**, Bayram A., Effect of Welding Time on Weld Properties of 30% Cold Rolled TWIP Steel Resistance Spot Welds, International Science and Technology Conference (ISTEC), Berlin / GERMANY 2017
  2. **Tutar M.**, Aydın H, Bayram A., Multi objective Taguchi optimization approach for resistance spot welding of cold rolled TWIP steel sheets, The 6th International Conference on Manufacturing Engineering and Process (ICMEP 2017) Lisbon / PORTUGAL 2017
  3. Aydın H, Tuncel O, **Tutar M.**, Bayram A., Influence of Tool Pin Profile on Mechanical Properties of 6082-T6 Friction Stir Spot Welds, The 3rd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2017) Budapest / HUNGARY 2017
  4. Tuncel O, Yigit K., **Tutar M.**, Aydın H., Mechanical Properties of Dissimilar 5754- H22/6082-T6 Aluminum Alloy Lap Joints by FSSW, The 3rd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2017) Budapest / HUNGARY 2017
  5. **Tutar M.**, Bayram A., A Comparison of Friction Characteristics of Various Surface Treated Hot Work Tool Steel, 13. International Scientific Congress Machines. Technologies. Materials. 2016 Summer Session, Varna / BULGARIA 2016
  6. Aydın H., **Tutar M.**, Bayram A., The Influence of Welding Time on Mechanical Properties of Resistance Spot Welded TWIP Steel Sheets, 13. International Scientific Congress Machines. Technologies. Materials. 2016 Summer Session, Varna / BULGARIA 2016
  7. Aydın H., **Tutar M.**, Bayram A., Weld Current Effect on the Tensile Strength of Cold Rolled TWIP980 Steel Joints Welded by Resistance Spot Welding,
-

---

International Conference on Advanced Technology & Sciences ICAT 2016, Konya / TURKEY 2016

8. **Tutar M.**, Aydın H., Bayram A., Weld Current Effect on the Mechanical Properties of Resistance Spot Welded TWIP980 Steel Sheets, International Research Symposium on Recent Innovations in Engineering Science and Technology, Paris / FRANCE 2016
  9. Aydın H., **Tutar M.**, Bayram A., Otomotiv Sanayinde Kullanılan TWIP Çeliğinin Elektrik Direnç Punta Kaynağında Elektrod Baskı Kuvvetinin Mekanik Özelliklere Etkisi, Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON16, Bursa / TÜRKİYE 2016
  10. Tunçel O., Aydın H., **Tutar M.**, Bayram A., Mechanical Performance of Friction Stir Spot Welded AA6082-T6 Sheets, 4. IASTEM International Conference, Amsterdam / NETHERLANDS 2015
  11. **Tutar M.**, Aydın H., Yüce C., Tunçel O., Yavuz N., Bayram A., Influence of Welding Parameters on Mechanical Properties And Microstructure of Friction Stir Spot Welded AA5754 Aluminium Alloys, 15. International Materials Symposium, Denizli / TURKEY 2014
  12. Aydın H., Tunçel O., Yüce C., **Tutar M.**, Yavuz N., Bayram A., Effect of Rotational Speed and Dwell Time on Mechanical Properties of Dissimilar AA1050-AA3105 Joints Produced by Friction Stir Spot Welding, 3. International Conference on Welding Technologies and Exhibition – ICWET 2014, Manisa / TURKEY 2014
  13. Aydın H., Durgun İ., **Tutar M.**, Bayram A., Farklı Türdeki Yüksek Mukavemet Çeliklerinin Punta Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kaynak Zamanı ve Mekanik Özellikler Arasındaki Korelasyonlar, Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON14, Bursa / TÜRKİYE 2014
  14. Aydın H., Saraçoğlu M.H. Durmuş A., **Tutar M.**, Bayram A., Plazma Nitrürlemenin Sac Delme Kalıplarında Kullanılan Zımbaların Aşınma Davranışı Üzerindeki Etkisi, Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON10, Bursa / TÜRKİYE 2010
-