



**ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK VE İF  
ÇELİĞİNİN NOKTA DİRENÇ KAYNAK YÖNTEMİ  
İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Kadir KAYA**

**2022  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Yakup KAYA**

**ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK VE İF ÇELİĞİNİN NOKTA DİRENÇ  
KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Kadir KAYA**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Yakup KAYA**

**KARABÜK  
Ocak 2022**

Kadir KAYA tarafından hazırlanan “ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK VE İF ÇELİĞİNİN NOKTA DİRENÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yakup KAYA .....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 21/01/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ) .....

Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ) .....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Kadir KAYA

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK VE IF ÇELİĞİNİN NOKTA DİRENÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Kadir KAYA**

**Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Yakup KAYA**

**Ocak 2022, 87 sayfa**

Bu çalışmada, 1,2 mm kalınlığındaki yüksek korozyon dayanımlı paslanmaz (AISI 316 L) çelik ve yaşlanmaya dayanıklı ve ekstra derin çekmeye uygun çok düşük karbonlu arayer atomsuz IF (7114) çelikleri farklı parametreler kullanılarak nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmiş ve kaynak parametrelerinin (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı ve 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak süresi) kaynaklı birleştirmelere etkisinin belirlenmesi için araştırmalar yapılmıştır.

Kaynaklı bağlantılara ait numunelerin kaynak çekirdeği çap ve derinlikleri ölçülerek kaynak parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Ayrıca birleştirme dayanımlarını incelemek için numunelere çekme-makaslama testleri uygulanmış ve testler sonucunda numunelerin kırılma tipleri de araştırılmıştır. Ek olarak, numunelerin kaynak bölgeleri üzerinde sertlik ve mikroyapı çalışmaları yapılmıştır.

Kaynaklı numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda, kaynak çekirdeği çap ve derinliğinin, elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak suresi artışına bağlı olarak arttığı, bu artışa paralel olarak birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımlarının da arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca ekme-makaslama testleri sonrasında tüm numunelerde kopma, IF 7114 eliği ITAB’ında meydana gelmiştir.

Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değeri AISI 316 L-IF 7114 kaynak çekirdeğinden ölçülmüş onu sırasıyla ITAB’lar (AISI 316 L ITAB>IF 711 ITAB) ve ana malzemeler (AISI 316 L ana malzeme>IF 7114 ana malzeme) izlemiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak suresiyle kaynak çekirdeği kesitinin genişlediği ve artan ısı girdisi sebebiyle de IF 7114 ITAB’ında belirgin bir tane irileşmesi oluştuğu gözlenmiştir.

**Anahtar Szkler :** AISI 316 L stenitik paslanmaz elik, IF 7114 eliği, nokta direnç kaynağı, mekanik özellikler, mikroyapı.

**Bilim Kodu** : 91511

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF COMBINABILITY OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL AND IF STEEL WITH RESISTANCE SPOT WELDING METHOD**

**Kadir KAYA**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Associate Professor Yakup KAYA**

**January 2022, 87 pages**

In this study, 1,2 mm thick high corrosion resistant stainless (AISI 316L) and very low carbon, resistant aging and suitable extra deep drawing interstitial free IF (7114) steels were combined by resistance spot welding method using different parameters and the welding parameters (3 and 6 kN electrode forces, 3, 5, 7 and 9 kA welding currents and 10, 20, 30, 40 and 50 cycle welding times) studies have been conducted to determine the effect on welded joints.

The effect of welding parameters has been investigated by measuring the weld nugget diameter and depth of the samples belonging to the welded joints. Also, tensile-shear tests were applied to the samples in order to examine the strength of the welded joints and the fracture types of the samples were investigated as a result of the tests. In addition, hardness and microstructure studies were done on the welded regions of the samples.

As a result of the tests carried out on the welded samples, it was determined that the weld nugget diameter and depth increased depending on the increase in electrode force, welding current and welding time, and in parallel with this increase, the tensile-shear strength of the joints also increased. In addition, after the tensile-shear tests, rupture of all samples occurred in IF 7114 steel the heat effected zone (HAZ).

As a result of the hardness tests, the highest hardness value was measured from AISI 316 L-IF 7114 the weld nugget, followed by HAZs (AISI 316 L HAZ>IF 7114 HAZ) and base materials (AISI 316 L base material>IF 7114 base material), respectively. As a result of the microstructure investigations, it was observed that the weld nugget cross section expanded with increasing electrode force, welding current and welding time, and a significant grain coarsening occurred in IF 7114 HAZ due to increased heat input.

**Key Word** : AISI 316 L austenitic stainless steel, IF 7114 steel, resistance spot welding, mechanical properties, microstructure.

**Science Code** : 91511

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmamda desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım danıőman hocam Do. Dr. Yakup KAYA'ya,

Tezimin her aőamasında yardımlarını esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Behçet GÜLENÇ, Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU ve Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a

IF eliği temininde yardımlarını esirgemeyen ERDEMİR A.Ő.'ye,

her zaman desteğini yanımda hissettiğim eőim Gülbahar KAYA, kızlarım Hilal KAYA ve Aslı KAYA'ya teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
PASLANMAZ ÇELİKLER.....	4
2.1. GENEL ÖZELLİKLER .....	4
2.2. ÇEŞİTLERİ.....	5
2.2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	6
2.2.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	8
2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	9
2.2.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler.....	10
2.2.5. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	11
BÖLÜM 3 .....	13
IF (INTERSTITIAL FREE/AREYER ATOMSUZ) ÇELİĞİ .....	13
3.1. GENEL ÖZELLİKLER .....	13
3.2. ÇEŞİTLERİ.....	14
3.2.1. Ultra Düşük Karbonlu (ULC) IF Çelikleri .....	14
3.2.2. Fırında Sertleşebilen (BH) IF Çelikleri .....	15

	<u>Sayfa</u>
3.2.3. Yüksek Mukavemetli (HSS) IF Çelikleri .....	17
3.2.4. Ekstra Derin Çekilebilen (EDDQ) IF Çelikleri .....	17
3.2.5. Fosforlu IF Çelikleri .....	19
3.3. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR .....	20
BÖLÜM 4 .....	21
NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI .....	21
4.1. GENEL ÖZELLİKLER .....	21
4.2. ÇEŞİTLERİ .....	23
4.2.1 Nokta Kaynağı .....	24
4.2.2 Dikiş Kaynağı .....	26
4.2.3 Kabartı Kaynağı .....	27
BÖLÜM 5 .....	28
ÖNCEDEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR .....	28
5. 1. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN (AISI 316 L) NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI .....	28
5.2. ARAYER ATOMSUZ (IF) ÇELİKLERİNİN NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI .....	31
5.3. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK (AISI 316 L) VE ARAYER ATOMSUZ (IF) ÇELİKLERİNİN NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI .....	34
BÖLÜM 6 .....	37
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	37
6.1. KULLANILAN MALZEMELER .....	37
6.2. MALZEMELERİN KAYNAK İÇİN HAZIRLANMASI .....	38
6.3. MALZEMELERİN KAYNAĞI .....	39
6.4. TESTLER İÇİN NUMUNELERİN HAZIRLANMASI .....	41
6.4.1. Kaynak Çekirdek Çap ve Derinliklerinin Ölçümü .....	42
6.4.2. Çekme-Makaslama Deneyi .....	43
6.4.3. Sertlik Testi .....	44
6.4.4. Metalografik Muayene .....	45

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 7 .....	47
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	47
7.1. KAYNAK ÇEKİRDEĞİ ÇAP VE DERİNLİĞİ ÖLÇÜMÜ .....	47
7.2. ÇEKME-MAKASLAMA TESTİ VE KIRILMA TİPİ İNCELEMESİ.....	54
7.3. SERTLİK İNCELEMELERİ.....	63
7.4. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI.....	68
BÖLÜM 8 .....	80
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	80
KAYNAKLAR .....	82
ÖZGEÇMİŞ .....	87

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2. 1. Krom ve nikel içeriklerine göre paslanmaz çelik türleri.....	6
Şekil 4. 1. Nokta direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi.....	22
Şekil 4. 2. Nokta direnç kaynağı .....	22
Şekil 4. 3. Nokta direnç kaynağının prensip resmi. ....	24
Şekil 4. 4. Nokta direnç kaynağında kaynak çekirdeği ebatları.....	25
Şekil 4. 5. Dikiş direnç kaynak makinesi ve kaynak bölgesi detayı .....	26
Şekil 4. 6 a) tekli, b) çoklu kabartılı kaynak şematik resmi. ....	27
Şekil 6. 1. Nokta direnç kaynaklı sacların ölçüleri. ....	38
Şekil 6. 2. Kaynak işlemlerinde kullanılan ahşap kalıp .....	38
Şekil 6. 3. Kaynak işlemlerinde kullanılan nokta direnç kaynak makinesi .....	40
Şekil 6. 4. Kaynak işlemleri sonucunda elde edilen numuneler. ....	41
Şekil 6. 5. Nokta direnç kaynaklı numunelerin bindirme bölgesi.....	42
Şekil 6. 6. Çekme-makaslama test numunesi.....	43
Şekil 6. 7. Çekme-makaslama testi cihazı.....	43
Şekil 6. 8. Kaynaklı numuneler üzerinde mikrosertlik ölçüm noktaları. ....	44
Şekil 6. 9. Mikrosertlik ölçüm cihazı. ....	44
Şekil 6.10. Zımparalama ve parlatma cihazı. ....	45
Şekil 6.11. Optik mikroskop. ....	46
Şekil 7. 1. AISI 316 L tarafı kaynak çekirdeği çap ve derinlikleri. ....	48
Şekil 7. 2. IF 7114 tarafı kaynak çekirdeği çap ve derinlikleri. ....	49
Şekil 7. 3. AISI 316 L tarafı kaynak çekirdeği çapı grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti .....	50
Şekil 7. 4. AISI 316 L tarafı kaynak çekirdeği derinliği grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti. ....	50
Şekil 7. 5. IF 7114 tarafı kaynak çekirdeği çapı grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti. ....	51
Şekil 7. 6. IF 7114 tarafı kaynak çekirdeği derinliği grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti. ....	51
Şekil 7. 7. 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme testi grafikleri; a) çekme-makaslama, b) % uzama. ....	56

Şekil 7. 8. 6 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme testi grafikleri; a) çekme-makaslama, b) % uzama. ....	56
Şekil 7. 9. Çekme-makaslama testi sonucu kaynak bölgesi kopma görüntüleri. ....	60
Şekil 7.10. 3 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.....	63
Şekil 7.11. 3 kN elektrod kuvveti ve 5 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.....	64
Şekil 7.12. 3 kN elektrod kuvveti ve 7 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.....	64
Şekil 7.13. 3 kN elektrod kuvveti ve 9 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.....	64
Şekil 7.14. 6 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.....	65
Şekil 7.15. 6 kN elektrod kuvveti ve 5 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.....	65
Şekil 7.16. 6 kN elektrod kuvveti ve 7 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.....	65
Şekil 7.17. 6 kN elektrod kuvveti ve 9 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.....	66
Şekil 7.18. AISI 316 L paslanmaz çelik ana malzeme mikroyapı görüntüsü .....	69
Şekil 7.19. IF 7114 çeliği ana malzeme mikroyapı görüntüsü.....	69
Şekil 7.20. 3 kN elektrod kuvveti kullanılarak birleştirilen bazı numunelerin kaynak çekirdeği kesiti mikroyapı görüntüleri. ....	70
Şekil 7.21. 6 kN elektrod kuvveti kullanılarak birleştirilen bazı numunelerin kaynak çekirdeği kesiti mikroyapı görüntüleri. ....	71
Şekil 7.22. 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.....	73
Şekil 7.23. 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.....	74
Şekil 7.24. 3 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.....	75
Şekil 7.25. 6 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.....	76
Şekil 7.26. 3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresi kullanılarak birleştirilen numunenin kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüsü. ....	77
Şekil 7.27. Farklı parametrelerde birleştirilmiş numunelerin kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüleri.....	78

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2. 1. Bazı paslanmaz çelik türlerinin fiziksel özellikleri.....	4
Çizelge 2. 2. Ferritik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....	8
Çizelge 2. 3. Östenitik paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler.....	9
Çizelge 2. 4. Martenzitik paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler.....	10
Çizelge 2. 5. Dupleks paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler .....	11
Çizelge 2. 6. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler..	12
Çizelge 3. 1. Beyaz eşya üretiminde kullanılan soğuk çekme çeliklerin bazı mekanik özellikleri .....	15
Çizelge 3. 2. Galvanizlenmiş fırında sertleştirilen çeliklerin kimyasal ve mekanik özellikleri .....	16
Çizelge 3. 3. Soğuk haddelenmiş HSS-IF çeliklerine ait bazı mekanik özellikler ....	17
Çizelge 3. 4. Galvanizlenmiş yüksek mukavemetli IF çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri.....	18
Çizelge 6. 1. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi.....	37
Çizelge 6. 2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	37
Çizelge 6. 3. Kaynak işlemlerinde kullanılan makinenin özellikleri .....	39
Çizelge 6. 4. Kaynak işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri.....	41
Çizelge 7. 1. Çekme-makaslama testi sonuçları.....	55

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Al	: Alüminyum
B	: Bor
C	: Karbon
Cr	: Krom
Fe	: Demir
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Azot
Nb	: Niobyum
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
Ti	: Titanyum
P	: Fosfor
S	: Kükürt

## KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Topluluğu)
- AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
- BH : Bake Hardenable (Fırında Sertleşebilen)
- DDQ : (Derin Çekme Kalite)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- DP : Dual Phase (Çift Fazlı)
- EDDQ: (Ekstra Derin Çekilebilen)
- EDS : Energy Dispersive Spectrum (Enerji Dağıtıcı Spektrum)
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- HSS : High Strength Steel (Yüksek Mukavemetli Çelik)
- FSW : Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
- IF : Interstitial-Free (Arayer Atomsuz)
- ITAB : Isı Tesiri Altındaki Bölge
- SEM : Scanning Electron Microscope (Elektron Tarayıcı Mikroskop)
- ULC : Ultra Low Carbon (Ultra Düşük Karbonlu)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Paslanmaz çelik, birçok endüstri ve çevresinde geniş kullanım alanına sahip önemli bir mühendislik malzemesidir. Ülkemiz endüstrisinin paslanmaz çelik ihtiyacı hızla artmaktadır. Paslanmaz çeliklerin diğer çeliklere göre en belirgin farkı yüksek miktarda krom (%12) içermesidir. Paslanmaz çeliklere yüksek korozyon direncini kazandıran yüzeyinde bulunan krom oksit tabakasıdır. Paslanmaz çeliklerin neredeyse tamamının kaynak edilebilirliği yüksektir. Paslanmaz çelikler; baskın metalürjik faz dağılımına göre östenitik, martenzitik, ferritik, çökeltme sertleşmeli ve dubleks olarak sınıflandırılmaktadırlar (Türkyılmazoğlu, 2006 ve Yürük, 2015). Paslanmaz çelikler içerisinde en yüksek kullanım %70 ile östenitik paslanmaz çeliklere aittir (Gözütok vd, 2009). Bu çelikler, üstün korozyon dayanımı ve yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde depolama ve basınç tankları, makine üretim parçaları ve hijyen gerektiren gıda sektörü gibi birçok olanda kullanılan önemli bir malzemedir (Çörten vd, 2016).

Dünyada son zamanlardaki teknolojik gelişmeler ve artan rekabet ortamı, sürekli müşteri memnuniyeti gerektirmektedir. Çelik endüstrisinde bu teknoloji ve rekabete ayak uydurmak zorunda kalmıştır. Arayer atomsuz (Interstitial-Free, IF) çeliklerde bu son teknoloji ürünlerinden birisidir. Düşük akma ve çekme mukavemeti, yüksek % uzama oranı ve “r” değerine sahip olması sayesinde otomotiv ve beyaz eşya üretiminde tercih edilmektedir. Fakat bu çeliklerin üretim maliyetleri oldukça pahalıdır (Bak, 2010). IF çelikleri derin çekilebilirlik ve kaynak edilebilirliklerinin iyi olması nedeniyle özellikle otomobil, elektronik eşya, beyaz eşya v.b. endüstrilerinde kullanımı artmaktadır (Hasanbaşıoğlu, 2005). IF çeliği sahip olduğu düşük akma mukavemeti ve yüksek “r” değeri sayesinde ekstra derin çekilebilmekte ve çok karmaşık parçaların üretiminde kullanılmaktadır. IF çeliği içeriğinde bulunan C ve N miktarı vakumlu gaz giderme sistemi ve Ti ve/veya Ti + Nb ilave edilmesiyle 20

ppm'e kadar azaltılmıştır ve yaşlanma göstermeyen yüksek şekillendirilebilirlik özelliği sağlanmaktadır (Ekici, 2016).

İmalat endüstrisinde en çok kullanılan birleştirme yöntemlerinden biri de kaynaktır. Teknolojik ilerlemeler ışığında klasik kaynak metodları geliştirilmiş ve yeni kaynak metodları da kullanılmaya başlanmıştır. Teknolojik gelişmeler ve araştırmalarla elde edilen malzemelerin de kendine has özelliklerini kaybetmeden birleştirilebilmesi gerekmektedir.

Direnç kaynak yöntemi epeyce eski bir yöntemdir. 1867 yılında ABD'de rastlantıyla keşfedilmiş ve I. Dünya savaşına kadar oldukça az kullanılmıştır. II. Dünya savaşından günümüze kadar, elektrik/elektronik endüstrisindeki ilerlemelerle otomatikleştirilmesi devam etmektedir. Elektrik direnç kaynak yöntemi, iş parçalarının üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basınç uygulamasıyla yapılmaktadır. Kaynak işlemlerinde elektrodlar arasına yerleştirilen malzeme, üzerinden geçen yüksek akıma gösterdiği direnç sayesinde ısınmaktadır. Bu yöntemde tatbik edilen elektrod kuvveti ve kaynak akımı ana parametrelerdir.

Nokta direnç kaynak yöntemi; seri imalata uyarlanabilen ve epeyce yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem oldukça hızlıdır, bir düğme veya bir ayak pedalına basılarak yapılabilir. Bu sebeple diğer yöntemlerle kıyaslandığında kaynak başına işçilik maliyeti oldukça azdır. Diğer taraftan ise diğer kaynak yöntemlerine göre makine ve teçhizat maliyeti daha yüksektir. Direnç kaynak yöntemi uygulamasının ekonomik olması için, çok sayıda aynı veya benzer kaynak işlemi gerekmektedir. Bu yöntem; ilave metal kullanılmaması sebebiyle hafif olması, yüksek kaynak dayanımı, estetik görünüm, operatör becerisi gerektirmemesi ve yüksek kaynak hızı gibi sebeplerle de otomotiv ve uçak sanayinde, ayrıca metal eşya üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaya, 2010).

Bu çalışmanın amacı; yüksek korozyon dayanımı, mekanik özellikleri ve kolay şekillendirilebilir olması dolayısı ile başta otomotiv, kimya ve mutfak eşyası endüstrisi olmak üzere birçok alanda kullanılan östenitik paslanmaz çelik (AISI 316L) ve yüksek şekillendirilebilirlik ve derin çekme özelliklerinden dolayı başta otomotiv ve beyaz

eşya endüstrisi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılan arayer atomsuz IF (Interstitial Free) çeliği (7114) levhaları, nokta direnç kaynağıyla 40 farklı parametrede (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı ve 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak süresi) birleştirilerek, kaynaklı birleştirmelerin, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılmasıdır.

Bu tez çalışması genel olarak literatür araştırması ve deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Birinci bölüm olan literatür araştırmasında, deneysel çalışmalarda malzeme olarak kullanılan paslanmaz ve IF çelikleri ve bu malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan nokta direnç kaynak yöntemi, bu konu ile ilgili önceden yapılan lisansüstü tezleri, ulusal ve uluslararası bildiri ve makaleleri içeren literatür taraması ile anlatılmıştır. İkinci bölüm olan deneysel çalışmalar bölümünde ise, AISI 316 L ve 7114 IF çeliklerinin nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı parametreler kullanarak kaynaklanabilirliği incelenmiştir. Ayrıca kaynaklı numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için testler yapılmış ve elde edilen sonuçların kaynak parametreleri ile ilişkisinin değerlendirilmesi ve literatürle uyum/uyumsuzlukları tartışılmıştır.

## BÖLÜM 2

### PASLANMAZ ÇELİKLER

#### 2.1. GENEL ÖZELLİKLER

Kimyasal içeriklerinde minimum %10,5-12 Cr bulunan demir esaslı alaşımlardır. Bu çeliklerin yüzeyinde oluşan ince ama yoğun Cr-oksit ( $Cr_2O_3$ ) tabakası, yüksek korozyon dayanımı sağlar ve oksitlenmesinin yüzeyden derinlere ilerlemesine engel olur (Yumuşak, 2008). Yüzeydeki pasif oksit tabakası kaldırıldığında paslanmaz çelikler korozif saldırıya maruz kalırlar. Atmosfer ortamında paslanmaz çelikteki pasif film tabakasındaki artış Cr miktarına bağlıdır (Kaya, 2014).

##### 2.1.1. Fiziksel Özellikleri

Paslanmaz çeliklerde mekanik özellik, korozyon dayanımı, talaş kaldırma, şekillendirilebilme ve kaynak kabiliyetlerini arttırmak ve kullanım alanlarını genişletmek için ilave edilen alaşım elementleri bu çeliklerin fiziksel özelliklerine de önemli oranda etki eder. Bazı paslanmaz çeliklerin kaynaklanabilirliğini belirleyen fiziksel özellikler Çizelge 2.1.'de verilmiştir (Hasanbaşıoğlu, 2005).

Çizelge 2.1. Bazı paslanmaz çelik türlerinin fiziksel özellikleri.

	Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	Elektrik Direnci ( $\Omega mm^2/m$ )	Isıl İletkenliği (W/m.K)
<b>AISI 304</b>	16	0,73	15
<b>AISI 316</b>	16,5	0,75	15
<b>AISI 316L</b>	16,5	0,75	14
<b>AISI 409</b>	10,5	0,6	25
<b>AISI 420</b>	10,5	0,6	30
<b>AISI 430</b>	10	0,6	25

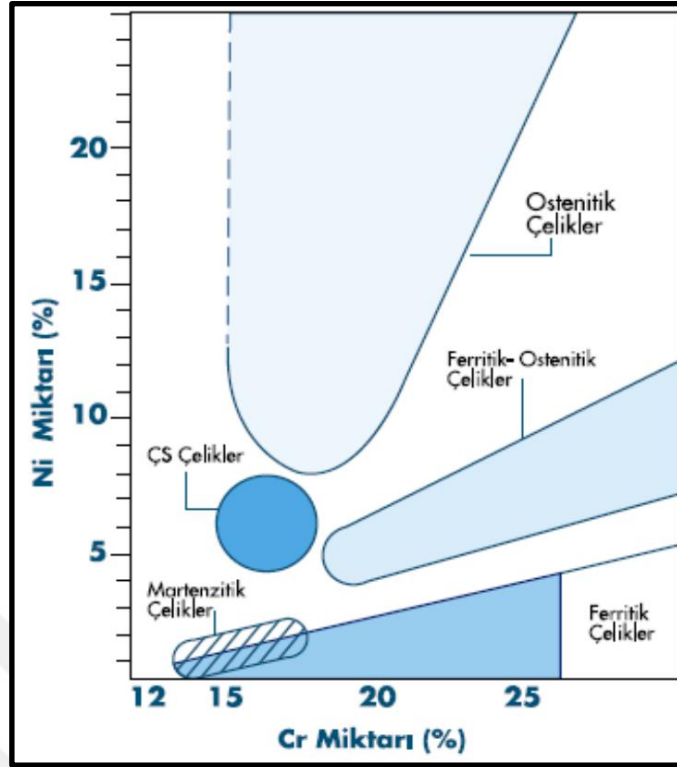
Paslanmaz eliklerin ısı iletim kabiliyetleri, alaşımsız çeliklerin yaklaşık olarak 1/2'si, stenitik Cr-Ni'li çeliklerin de 1/3'ü kadardır. Bu durum kaynak bölgesinin ısıya daha uzun süre maruz kalacağına işaret eder, bu da bazı problemlerin ortaya çıkmasına sebep olur. Ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklere göre elektrik dirençleri 1/5, zgöl ısıları ise 1/10 daha azdır. Fakat bütün paslanmaz çeliklerin elektrik dirençleri alaşımsız çeliklere göre yaklaşık olarak 4-7 kat daha fazladır. Bundan dolayı, paslanmaz çeliklerin kaynağında elektrodlar 1/4 daha az akımla yüklenir (Hasanbaşıoğlu, 2005).

## 2.2. ÇEŞİTLERİ

Günümüzde geniş kullanım alanına sahip paslanmaz çelikler, kimyasal içeriğine ve alaşım elementine göre değişebilen ve yapısının tamamıyla östenitik ve ferritik özelliklerine göre 5 gruba ayrılmaktadır.

- Ferritik,
- Östenitik,
- Martenzitik,
- Dupleks,
- Çökeltme sertleşmeli paslanmaz elikler (Yumuşak, 2008, Koca, 2010, Türkyılmazoğlu, 2006 ve Kaya, 2014).

Krom ve nikel, paslanmaz elik iç yapılarının östenitik veya ferritik olmasını belirleyen etkin elementlerdir. Şekil 2.1'de krom ve nikel miktarlarına göre oluşan paslanmaz elik türleri görölmektedir (Yürük, 2015).



Şekil 2.1. Krom ve nikel içeriklerine göre paslanmaz çelik türleri (Yürük, 2105 ve Türkyılmazoğlu, 2006).

### 2.2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Bileşimlerinde Fe-Cr-C içeren demir esaslı alaşımlardır. AISI 400 serisi gurubuna girerler. Mikroyapısında ferrit fazı ve karbürler bulunur. Bu çeliklerin bileşiminde %16-30 Cr ve %0,05-0,25 C bulunur. Alaşım elementi olarak Al, Nb, Mo ve Ti bu çeliklere ilave edilir. İçeriklerinde yüksek miktarda Cr ve az miktarda C bulunan, yüksek sıcaklıkta veya sıvı halden soğutulmaları sırasında hiç veya çok az östenit meydana gelir, dolayısı ile  $\gamma$ - $\alpha$  dönüşmesi yoktur. Bu nedenle ısıtma işlemi asla sertleştirilemezler. Bu çeliklerde Cr içeriklerinin yüksek olması, korozyon ve oksitleme dirençlerinin daha iyi olmasını sağlar. Ferritik paslanmaz çelikler manyetiktir ve ısıtma işlemi mekanik özellikleri değiştirilemez. Bu sebeple iyi bir dayanım için yapısının ince taneli olması gerekmektedir (Erdoğan, 2000, Çeltik, 2000, Çakan, 2000 ve Develi 2003). Çekilebilirlik ve tokluk için, yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 1100°C) homojenleştirme ısıtma işleminden sonra hızlıca soğutulmaları gerekmektedir (Osmanoğlu, 2012 ve Yürük, 2015).

Ferritik paslanmaz çelikler 400-525°C bölgesinde uzun süre kaldıkları ya da bu bölgede yavaş soğutulduklarında bir gevrekleşme olayı görülür. Gevrekleşmenin 470-480°C bölgesinde azamiye çıktığı ve malzemenin çentik darbe direnci özelliğinin düştüğü bilinmektedir. Kaynatılabilirliğini, sünekliliğini ve korozyon direncini artırmak için yapıdaki alaşım elementi olarak bulunan C ve N seviyeleri oldukça az tutulmalıdır (Erdoğan, 2000, Çeltik, 2000, Çakan, 2000 ve Develi 2003).

Diğer taraftan stabilize edilmemiş paslanmaz çeliklerin bilhassa kaynaklı birleştirmelerde yapılacak 700-800°C arasındaki bir tavlama, hem krom karbürü küreleştirir hemde oluşabilecek martenziti de temperleyerek tokluğun düşmesini engeller. Bunun yanında tane sınırlarındaki krom dağılımı yayınma ile biraz düzleştirilerek, pasiflik sınırlarına (%10,5-12 Cr) yeniden ulaşılır. Bu sebeplerle ferritik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri, östenitik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinden daha sorunludur. Bu sorunun giderilmesi için şunların yapılması gerekmektedir. (1) Başlangıçtaki tokluğu artırmak için 150-200°C civarında ön tavlama ve kaynak sonrasında 700-800°C civarında tavlama gerekli, (2) Tane irileşmesi ve karbür çökmesini engellemek için kaynakta ısı girdisi düşük tutulmalıdır. Ferritik paslanmaz çeliklerin en belirgin özelliği, kaynak metali ve ITAB'da meydana gelen ve kaynaklı bağlantı tokluk değerlerinde azalmaya sebep olan tane irileşmesidir. Tane irileşmesini azaltmak için kaynakta ısı girdisi düşük tutulmalı ve ön tavlama 300-450°C civarında sınırlandırılmalı veya sadece yararlıysa uygulanmalıdır (Yorulmazel, 2007 ve Yürük, 2015).

Ferritik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu çelikler bir miktar N ve C içerdikleri için daha çok uzama sergiler. Tavlanmış şartlardaki bu alaşımların C ve N içerikleri azaldığında darbe dayanımları artmakta, özellikle kriyojenik sıcaklıklarda sünek-gevrek geçiş sıcaklığını azaltmak için düşük C içeriği gereklidir (Türkyılmazoğlu, 2006, Erdoğan, 2000 ve Kaya, 2014).

Çizelge 2.2. Ferritik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri (Türkyılmazoğlu, 2006 ve Kaya, 2014).

Çelik Türü (AISI)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)
405	480	275	30	60
409	450	240	25	-
430	515	310	30	60
434	530	365	23	-
436	530	365	23	-
442	550	310	25	50
446	550	345	23	50

### 2.2.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Bu çelikler Fe-Cr-Ni içeren demir esaslı alaşımlardır. AISI 300 serisi olarak sınıflandırılırlar. Östenitik Cr-Ni'li paslanmaz çelikler, kimyasal içeriklerinde %12-25 Cr ve %8-25 Ni bulunur. Ni kuvvetli östenit yapıcı element olmasından dolayı, katılaşma sırasında oluşan östenit, oda sıcaklığı altında bile dönüşüme uğramaz. Soğuma sırasında  $\gamma$ - $\alpha$  dönüşümü oluşmadığı için östenitik paslanmaz çelikler de su vermeyle sertleştirilemezler (Kuşutan, 2003 ve Kaya, 2014).

Bu tür çeliklerin Cr içerikleri en az %16, Cr, Ni ve Mn toplam içeriği ise en az %24'tür. Cr oksitleme ve korozyon dayanımı sağlar iken, Ni ve Mn, yüksek soğuma hızlarında bile oda sıcaklığında dahi kararlı östenitik yapı sağlar. Çeliğin kompozisyonuna bağlı olarak yapısı, tamamen östenit veya östenit matris içinde ferrit şeklindedir (Kölük, 2000 ve Kaya, 2014). Bu sebeple de ısıtma işlemi büyük bir oranda sertleştirilemez.

Östenitik paslanmaz çelikler manyetik olmayıp, sünek ve tok bir yapıya sahiptirler. Dayanımları, genellikle soğuk şekillendirme uygulanarak artırılabilir gibi alaşımlandırma yaparak da artırılabilir. Bu malzemeler için C ve N en etkili alaşım elementleridir. Toplam paslanmaz çelik üretiminin %70'ini östenitik paslanmaz çelikler oluşturur (Şenyüz, 2008 ve Yürük, 2015).

Bu çeliklerin temel özellikleri ise; üstün korozyon direnci, iyi kaynak kabiliyeti, sünek olduğu için iyi şekillendirilebilme, hijyeniklik, temizlik ve bakım kolaylığı, yüksek sıcaklıkta iyi mekanik özellikler, düşük sıcaklıkta mükemmel mekanik özellikler, anti-

manyetiklik ve dayanımları sadece soğuk şekillendirme (pekleşme) ile artırılabilir (Kaya, 2014). Korozyon dayanımları ferritik ve martenzitik paslanmaz çeliklere oranla daha iyidir. Östenitik paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler Çizelge 2.3'te verilmiştir (Hasanbaşoğlu, 2005).

Çizelge 2.3. Östenitik paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler.

Çelik Türü (AISI)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)
301	758	276	60.0	-
304	580/565-586	290/241	60.0	- /70
310	655	310	50	-
316L	539	207	55	-

Bu çeliklerin kaynağında karşılaşılan sorunlar ise sırasıyla, (1) ITAB'da "Krom Karbür" oluşmasıyla oluşan hassas yapı, (2) kaynak metalinde "Sıcak Çatlak" meydana gelmesi ve (3) yüksek çalışma sıcaklıklarında meydana gelen "Sigma Fazı"dır (Yürük, 2015).

### 2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Bu çelikler Fe-Cr-C içeriğine sahip demir esaslı alaşımlardır. AISI 400 serisi gurubuna girerler. Bileşiminde C oranı %0,1-1,2 arasındadır. Yüksek oranda C içerenler de Cr oranı %18'e ulaşabilir. Bileşimlerinde %11,5 ile %18 arasında Cr bulunan ve her türlü soğuma şartlarında östenitin martenzite dönüştüğü paslanmaz çelik grubudur (Baylan, 2004 ve Kaya, 2014). Bu tür çelikleri 1000°C'den hızlı soğutulduğunda içeriğindeki martenzitik oranı maksimum olur. Bu ısıtma ve soğutma işlemleri martenzitik paslanmaz çeliğin kaynak davranışını belirler. Bu çeliklerin çekme dayanımı aynı miktarda karbon içeren, karbonlu ve az alaşımlı çeliklere oranla çok daha fazladır. Martenzitik paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler Çizelge 2.4'te verilmiştir (Hasanbaşoğlu, 2005 ve Kaya, 2014).

Çizelge 2.4. Martenzitik paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler.

Çelik Türü (AISI)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)
410	483	241	30	70
414	793	621	20	60
416-416S	517	276	30	60
420	655	345	25	55
431	862	655	20	55
440 A	724	414	20	45
440 B	738	427	18	35
440 C	756	468	14	25

Martenzitik paslanmaz çelikler yüksek alaşımlı çelikler gibi sertleştirilip temperleme işlemine tabi tutulurlar. Bu çelikler manyetiktir ve dayanım özellikleri iyidir. Üstün çekme dayanımına sahip olan bu çelikler, su verme işlemi uygulanmış ve temperlenmiş halde rahatlıkla piyasadan alınabilir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin sertleşmiş halde düşük tokluğa sahiptir ve temperleme ısıl işlemiyle tokluk uygun hale getirilebilir. Farklı dayanım düzeyleri temperleme ısıl işleminin sıcaklığı ile kontrol edilebilir (Hasanbaşoğlu, 2005 ve Kaya, 2014).

#### 2.2.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Bu çelikler, ferritik ve östenitik fazlarının korozyon dayanımı ve mekanik özelliklerini birleştirmek için üretilmiştir. Tokluk ve genel korozyon dayanımını östenitik yapı, mukavemet ve gerilmeli korozyona dayanımını ise ferritik yapı sağlamaktadır. Yaygın kullanıma sahip östenitik paslanmaz çeliklere alternatif olması için geliştirilmişlerdir. Yüksek mukavemet ve klorlu gerilmeli korozyon çatlaması dayanımına sahiptir ve bazı ortamlarda ise östenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek çukurcuk ve aralık korozyon dayanımına sahiptir. Bileşimlerinde %18-28 Cr (yüksek miktarda) ve %4,5-8 Ni (orta miktarda) bulunur. En yüksek Ni oranı %8'dir ve bu oran tamamen östenitik yapı için yetersiz kalır. Ferritik-Östenitik yapı, 1000-1050°C sıcaklıkta tavlama ve arkasından hızlıca soğutulmasıyla elde edilmektedir (Türkyılmazoğlu, 2006 ve Kaya, 2014).

Ferritik-Östenitik (dupleks) paslanmaz çelik türü ülkemizde fazla bilinmemekte ve bu çeliklerin bir Türk Standartı'nda yoktur. Avrupada ise bu çeliklere ait standartlar

hazırlanmasına rağmen genellikle üretici firma markalarıyla bilinmektedirler (Yumuşak 2008 ve Kaya, 2014). Ferritik-Östenitik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çelikler ile benzer çekme mukavemetine sahipken, akma mukavemetleri ise östenitik paslanmaz çeliklere oranla daha yüksektir. Bu sebeple bu çelikler yüksek akma mukavemeti ve ağırlık azaltılması gibi özellikleriyle tasarımda önemli üstünlükler sağlamaktadır. Östenitik paslanmaz çeliklerin ise % uzaması dubleks paslanmazlara oranla daha yüksektir. Çizelge 2.5'te dubleks paslanmaz çeliklerin bazı mekanik özellikleri görülmektedir (Yumuşak 2008 ve Kaya, 2014).

Çizelge 2.5. Dubleks paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler (Türkyılmazoğlu, 2006 ve Kaya, 2014).

Çelik Türü (AISI)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)
<b>2205</b>	827	448	25
<b>2304</b>	758	414	25
<b>255</b>	758	552	15
<b>2507</b>	800	550	15

Bu tür çeliklerin çoğu %2,5-4 Mo içerir, iyi dayanım ve süneklige sahiptirler. Dahası korozyon ortamlarda bile uygun yorulma mukavemetleri sergiler. Kaynaklanabilirliği talimatlara uyulduğunda yüksektir (Türkyılmazoğlu, 2006). Bu çelikler, üstün özellikleri sebebiyle farklı biçim ve ebatlarda endüstride kullanılmaktadır (Yumuşak 2008 ve Kaya, 2014).

### 2.2.5. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Kimyasal bileşiminde Cu, Mo, Ni, Ti ve Al gibi alaşım elementleri bulunan ve bu elementlerden biri ya da birkaç tanesinin etkisiyle çökeltme sertleşmesi gösteren Fe-Cr-Ni içeren demir esaslı çeliklerdir (Yumuşak, 2008 ve Aydın 2002).

Çökeltme sertleşmesi, alaşımı çözeltiyeye alma tavlama sonrasında gerçekleştirilen hızlı soğutmayı izleyen bir yaşlandırma işlemidir. Bu tür çeliklerin kimyasal içeriğinde varolan söz konusu elementler, çözeltiyeye alma tavlama esnasında çözünür ve yaşlandırma işlemi esnasında ise çok küçük parçacıklar halinde çökeltme matrisinde sertlik ve dayanım artışına sebep olurlar. Yaşlandırma sonrasında çökeltme sertleşmeli

paslanmaz çelikler, martenzitik paslanmaz çelik mekanik özellikleri ve östenitik paslanmaz çelik korozyon dayanımına ulaşabilir. Çökelme sertleşmeli çeliklerin üretilmesindeki en önemli avantajları, normalize halde rahatlıkla işlenip şekillendirildikten sonra 480-600°C’de bir ısıl işlemlerle mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesidir. Dayanımları 1700 MPa’a kadar yüksekebilmekte ve martenzitik paslanmaz çelik dayanımlarının üzerine bile çıkabilmektedir.

Bu tür çelikler, çözeltili alma tavlama sonrası işlemlerle oluşan yapısal dönüşümüne ve özelliklerine göre üç grupta toplanmaktadır. Bunlar ise; Martenzitik, Yarı-Östenitik ve Östenitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerdir (Yumuşak, 2008 ve Aydın 2002). Çizelge 2.6’da çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklere ait mekanik özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.6. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklere ait bazı mekanik özellikler (Türkyılmazoğlu, 2006).

Çelik Türü (AISI)	Isıl İşlem Şartı	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)
<b>15-5 PH</b>	H900	1310	1172	10	35
<b>15-5 PH</b>	H1150	931	724	16	50
<b>17-4 PH</b>	Çözelti Tavlaması	1034	758	10	45
<b>17-4 PH</b>	H900	1379	1227	12	48
<b>17-7 PH</b>	Çözelti Tavlaması	896	276	35	
<b>Custom 450</b>	Tavlı	862	655	10	40
<b>Custom 450</b>	H900	1241	1172	10	40
<b>Stainless W</b>	Çözelti Tavlaması	827	517	7	
<b>Stainless W</b>	H950	1344	1241	7	25

Günümüzde, bu tür çelikler geliştirilerek uçak, uzay ve savunma endüstrilerinde kullanılmaktadır (Yumuşak, 2008 ve Aydın 2002).

## BÖLÜM 3

### IF (INTERSTITIAL FREE/ARAYER ATOMSUZ) ÇELİĞİ

#### 3.1. GENEL ÖZELLİKLER

IF çeliği 1960'larda Japonlar tarafından geliştirilen ve diğer çelik türlerine göre çok düşük oranlarda arayer atomu içeren bir çelik türüdür. Geleneksel çeliklere göre farkı ise bu çelikler, Fe atomlarının arasında çözünmüş olarak bulunan C, O ve N gibi arayer elementlerinin düşürülebilecek en az düzeylere indirilmesiyle üretilmeleridir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için IF çeliği üretimi, standart çelik üretiminden farklı olarak, vakum altında gaz giderme ve alaşımlama kademelerini içermektedir. Vakum altında gaz giderme işleminde çelik içerisindeki karbon oranı mümkün olabilecek en düşük sınırlara kadar indirilmektedir. Ardından çelikte bulunan arayer atomları ile kimyasal ilgisi yüksek olan Ti ve Nb elementlerinin birinin ya da her ikisinin eklenmesi ile kalan arayer atomlarının bir kısmı da TiC, TiN veya NbCN olarak tutulmaktadır. Bu şekilde çeliğin içerdiği C ve N oranı %0,003 mertebelerine kadar düşürülmektedir. Elde edilen kararlı bileşikler yapıda ince çökelti şeklinde dağılmaktadır. IF çeliğinin sahip olduğu bu içyapı diğer çelik türlerine göre çok üstün süneklik ve şekillendirilebilirlik özellikleri sergilemelerine neden olmaktadır. Ancak, azaltılan arayer atomu miktarı katı çözümleri sertleşmesi etkisini de azaltmaktadır. Ayrıca, C ve N'un stabilize edilmesi için kullanılan alaşım elementlerinin oluşturduğu kararlı bileşiklerin miktarı çökelti sertleşmesi oluşturabilecek büyüklükte değildir. Bu nedenle IF çeliklerinin mukavemet değerleri diğer çelik türleri ile karşılaştırıldığında oldukça düşük değerlerde kalmaktadır (Saray, 2013).

IF çeliği sahip olduğu mükemmel şekillendirilebilirlik özellikleri nedeniyle derin çekme uygulamalarının düşük sıcaklıklarda ve düşük paso sayılarında gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle IF çeliği derin çekme uygulamalarının sıklıkla uygulandığı otomotiv ve beyaz eşya sektörlerinde daha yoğun

olarak kullanılmaktadır. Ancak IF çeliğinin mukavemet özelliklerinin düşük olması söz konusu malzemenin daha çok yüksek mukavemet gerektirmeyen gövde ve panel parçalarının üretiminde tercih edilmesine neden olmaktadır (Saray, 2013). Düşük akma ve çekme mukavemetleri, yüksek % uzama ve “r” değerleriyle ekstra derin çekilebilen bu çelikler, karmaşık şekilli parçaların üretimine uygun oldukları için, özellikle beyaz eşya ve otomotiv sektöründe popülerdir. Fakat IF çeliklerinin üretilmesinde kullanılan teknolojik altyapı oldukça pahalıdır. Şekillendirilebilirliği yüksek olan bu çelikler, sürekli tavlama hatlarında üretilmektedir. Tokyo’da bulunan NKK şirketi, IF çeliklerini en kaliteli ve yüksek üretim oranında yapan ve aynı zamanda teknolojisini geliştirerek, bu teknolojilerini de dünyaya pazarlayan bir şirkettir. Ülkemizde bu çelikler, NKK şirketinin desteği ile Erdemir’de üretilmektedir (Ekici, 2016).

### **3.2. ÇEŞİTLERİ**

Endüstride kullanılan IF çelikleri 5 ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bunlar;

- Ultra düşük karbonlu (ULC),
- Fırında sertleştirilebilien (BH),
- Yüksek mukavemetli (HSS),
- Ekstra derin çekilebilen (EDDQ),
- Fosforlu IF çelikleri’dir (Hasanbaşıoğlu, 2005).

#### **3.2.1. Ultra Düşük Karbonlu (ULC) IF Çelikleri**

IF çelikleri 150 MPa akma ve 300 MPa çekme dayanımına sahiptir. Günümüzde ise IF çelikleri geliştirilerek, üstün derin çekme ve gerdirmeyeyle yüksek şekillendirilebilme özelliği olan yeni ultra düşük karbonlu (ULC) ve yüksek dayanımlı çelikler üretilmekte ve daha yüksek dayanımlı çelikler de geliştirme evresindedir. Vakumlu gaz giderme yöntemi, günümüzde çelik ve sac üretiminde dayanım ve sünekliği arttırmak için kullanılır. C miktarı %0,003’ten daha az miktarlara düşürülebilmektedir. Hassas element ilave etme ve yöntemlerle, otomobil sektörü için yeni çelikler üretilmiştir. Bu yöntem başlangıçta büyük kesitler ve dökümlerden hidrojeni almak

için kullanılmakta iken sonrasında ise özel ve uniform kimyasal kontrolle daha temiz çelikler üretilmiştir. Vakumla gaz giderme yöntemiyle üretilen malzemeler; şekillendirilebilir çubuk, dövme kalıbı, büyük döküm kalıplar ve borular olarak sıralanabilir (Bak, 2010 ve Ekici 2016). Ayrıca ULC beyaz eşya üretiminde de yaşlanmaya dayanıklı ve ekstra derin çekmeye uygundur.

Otomobil endüstrisinde kullanılan sacların şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliği yüksek olması istenmektedir. Bu sebeple çelik üreticileri ULC IF çeliklerini üretmişlerdir. ULC IF çelikleri, daha düşük C oranına ve ilave olarak Ti ve Nb alaşım elementlerine sahiptir. IF çeliği özelliklerine, kimyasal içerik yanısıra sıcak çekme sıcaklığı da etkilidir. Düşük tavlama sıcaklığında Ti ve Nb hızlı çözülmesi engellenir ve yavaş soğumayla da yüksek kristalleşme elde edilir. Böylece malzemelerin elastikiyeti azalır ve akma-çekme dayanımı ise artar. Beyaz eşya üretiminde kullanılan soğuk haddelenmiş derin çekilebilir ve düşük karbonlu çeliklerin bazı mekanik özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir (Hasanbaşoğlu, 2005).

Çizelge 3.1. Beyaz eşya üretiminde kullanılan soğuk çekme çeliklerin bazı mekanik özellikleri.

<b>Erdemir Kalite No</b>	<b>Akma Dayanımı (MPa)</b>	<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Uzama (%)</b>
<b>7114</b>	210	270-350	38
<b>7115</b>	180	270-330	40
<b>7118</b>	180	270-350	38
<b>7122</b>	280	270-410	28
<b>7123</b>	240	270-370	34

### **3.2.2. Fırında Sertleşebilen (BH) IF Çelikleri**

Bu çelikler, otomotiv endüstrisinde rahatlıkla işlenebilen, düşük dayanımlı ve optimum şekil verilebilen çeliklerdir. Presleme esnasındaki deformasyon, şekil vermede çalışma sertleşmesiyle sertleşmeye yol açar. Vakumla gaz giderme yöntemiyle üretilmiş çelikler kendine has yaşlanma özelliklerine sahiptir. Otomotiv endüstrisinde kullanılan bu saclar, fırında sertleşebilen çelikler olarak bilinmektedir. Kimyasal içerik ve tavlama sonrasında mevcut arayer çözülmüş elementlerinin oranları, fırında sertleşebilir çelik üretiminde kritik rol oynar. Bu elementlerden C,

fırında sertleşebilirliğin kontrolünde anahtar elementtir. Isıl işlem esnasındaki bekleme, tavllanmış ürünlerdeki çözünmüş karbon düzeyini kontrol etmektedir.

Bu çeliklerin üretiminde sadece düşük C oranları yeterli olmamakta, aynı zamanda Mn oranı da azaltılır iken P oranı ise arttırılmaktadır. Bu kimyasal bileşim düzenlemeleri çelikte karbon çökmesini bastırmaya yardımcı olur. Böylelikle tavlama sonrasında gerekli olan 10-20 ppm C'un çözeltide kalması sağlanır. Ayrıca Si, miktarındaki artışlarda karbür çökmesini bastırarak fırında sertleşebilirliği arttırmaktadır. Ek olarak, tane boyutu da fırında sertleşebilirliğe etki etmektedir. Tane boyutu küçüldükçe sertleşebilirlik artar (Hasanbaşıoğlu, 2005).

Otomotiv gövde parçaları damgalanmadan önce depolamada yaşlanmaya dirençli olarak dizayn edilir. Şekil verme esnasında yaşlanmaya başlar ve boya pişirme fırınında ısıtıldıktan sonra ise tamamen yaşlanırlar. Orijinal dayanımlarıda ek olarak 35-70 MPa akma dayanımı artışına sahip son ürün elde edilir. Böylece otomotiv üretiminde şekillendirilebilirlikten ödün vermeden, ezilmeye dayanıklı parçalar elde edilir.

Fırında sertleşebilen çelikler 207 MPa akma dayanımı, %2 çekme deformasyonu ve 177°C'de ısıl işlem gördükten sonra 276 MPa akma dayanımına sahip olacak şekilde dizayn edilir. Çelik içeriğindeki C, Mn, P ve Si oranları yukarıda anlatıldığı gibi düzenlenirler. Düşük Mn oranı, ısıl işlemlili çeliklerde S oranı ile sınırlandırılır. Al oranı ise N'u bağlayacak düzeyde olmalıdır. Serbest C oranının hassas bir şekilde kontrolü çok zor olduğundan dolayı bu tür IF çeliği üretimi zordur. Çizelge 3.2'de galvanizlenmiş fırında sertleştirilen çeliklerin kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir (Bak, 2010 ve Ekici 2016).

Çizelge 3.2. Galvanizlenmiş fırında sertleştirilen çeliklerin kimyasal ve mekanik özellikleri.

Kalite No	C (ppm%)	Mn (ppm%)	P (ppm%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Anizotropi Katsayısı (r)	Deformasyon Sertleşmesi Üssü (n)
BH 180	20	250	30	211	312	2,04	0,19
BH 220	20	250	70	229	341	2,15	0,20

### 3.2.3. Yüksek Mukavemetli (HSS) IF Çelikleri

Bu çeliklerde, “r” değerinin yüksek, akma dayanımının ise düşük olması istenmektedir. Çünkü malzemenin preste şekillendirilmesi esnasında kopmaması ve yüzeyinin de eğilmemesi gerekmektedir. Çift fazlı çelik ve çökeltme sertleşmeli çelikler mukavemet açısından uygundur fakat “r” değerleri 1-1,3 civarındadır. Bu sebepten dolayı, çift fazlı çelikler ve çökeltme sertleşmeli çelikler otomobilde dış sac olarak kullanılamamaktadır.

P ilave edilen çeliklerde ise “r” değeri 1,6 civarında olmasından dolayı, otomobilde çamurluk gibi derin çekme gerektiren bölümler haricinde kullanılır. Ancak bükülme olmaması için de çekme mukavemetinin 240 MPa civarı olması gerekmektedir. HSS IF çelikleri “r” değeri 2 olarak üretilebilmekte ve bu çelikler Ti veya Ti ve Nb bazılarında ise P, Mn, Si ve silikon ilavesi ile sertleştirilir. Bu çeliklerde çekme mukavemeti 400 MPa civarındadır. Çizelge 3.3’te soğuk haddelenmiş HSS IF çeliklerine ait bazı mekanik özellikler verilmiştir (Akyol vd. 2001, Bak, 2010 ve Ekici 2016).

Çizelge 3.3. Soğuk haddelenmiş HSS-IF çeliklerine ait bazı mekanik özellikler.

Erdemir Kalite No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
7132	320-410	Min. 400	22
7136	360-460	Min. 430	20
7140	400-500	Min. 460	18

### 3.2.4. Ekstra Derin Çekilebilen (EDDQ) IF Çelikleri

Soğuk şekillendirilebilirlik yalnızca yeniden kristalleşen malzemelerde mümkün olduğu için bu yöntemin kinetiği karbonitrürün kalınlaşmasına bağlı olduğundan, karbonitrürlerce çökeltme sertleşmesinin uygulanma ihtimali EDDQ IF çeliklerinde dayanımı arttırmak için kullanılamaz. Bu sebeple, mukavemet artırma mekanizması olarak katı eriyik sertleştirilmesi kullanılmaktadır. Bu şartlara uygun elementler ise Mn ve Si’dur, bu elementler çekme dayanımını %0,1 Mn, 4 MPa ise %0,1 Si, 10 MPa arttırmaktadır. P etkisi ise daha büyük düzeydedir. Nb ile stabilize edilmiş çeliklerde

%0,1 P çekme dayanımını 100 MPa arttırmaktadır ve Ti'lu çeliklerde ise bu etki biraz daha azdır, daha düşük mukavemet artışı FeTiP fazının oluşumu ve P'un eriyik sertleştirme etkisini azaltmasıyla açıklanabilir. P'un olumsuz etkisi, tane sınırlarına yayılarak gevrekleşmeye yol açmasından kaynaklanmaktadır. Yığın tavlama sonrasında, herhangi bir ekstra P ilavesi olmadan IF çeliklerinde oluşan bu gevreklik oldukça önemlidir. Yüksek mukavemetli EDDQ çeliklerinde tipik P içeriği, kısa süreli tavlama da bile tane sınırı gevrekliğine yol açabilir. Bunu önlemek için, yüksek mukavemetli ULC çeliklerine B ilavesi yaygındır. Aynı zamanda bir arayer elementi de olan B'un, P'un tane sınırı segregasyonunu başarıyla engellemektedir ve bu etki Nb ile alaşımlandığında daha ince tane boyutu ile (daha fazla tane sınırı alanı) artmaktadır. Böylece Nb, P'un güçlendirici etkilerine ek olarak gevrekliği azaltmaya da yardımcı olur. Galvanizleme ya da galvanizleme ısıl işlemi yapılan çelik genellikle ana Si elementi içermemelidir.

Çizelge 3.4.'te galvanizlenmiş yüksek mukavemetli bir IF çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Galvanizlenmiş yüksek mukavemetli IF çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri.

Kimyasal Kompozisyon		Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Anizotropi Katsayısı (r)	Deformasyon Sertleşmesi Üssü (n)
C (ppm)	30	215	382	37	1,9	0,21
N (ppm)	30					
Nb (%)	0,35					
P (%)	0,05					
Al (%)	0,03					
Nb (%)	0,0035					
Ti (%)	0,002					
B (pp)	10					

Otomotiv üretiminde sacların fırında sertleşebilmesi istenen bir özelliktir, çünkü bu durumda saclar oldukça düşük kuvvetlerde preslenebilir ve boya pişirme sonrasında nihai üründe ise daha yüksek dayanım garantisi vardır. Fırın sertleşmesinde, dislokasyonların arayer atomlarınca kilitlemesini sağlayan bir Cottrell atmosferi etkisi de olur ve bu sayede çelik 5 ppm'in altında olmayan belirli bir miktarda çözünmüş C'a ihtiyaç duyulmaktadır.

Alaşım tasarımı Nb ile C bağlanmasında duyarlıdır ve soğuk haddeme sonrasında sac IF özellikleri gösterir. NbC düşük sıcaklıklarda yani ferrit bölgesinde meydana gelir. Böylece, sürekli tavlama yönteminde soğuk haddelenmiş sacın tamamen yeniden kristalleşmesi için gerekenden daha yüksek bir sıcaklık uygulanırsa kısmen çözünebilir. Bu çözünmeden sonraki hızlı soğutma, fırında sertleşebilirliğe sebep olarak birkaç ppm C'un çözeltide kalmasını sağlamaktadır. (Bakkaloğlu, 2001, Bak, 2010 ve Ekici 2016).

### 3.2.5. Fosforlu IF Çelikleri

Fosforlu IF çelikleri mukavemetlerini temel olarak katı eriyik sertleşmesiyle elde eder. Ayrıca, NbC, Ti<sub>4</sub>S<sub>2</sub>C<sub>2</sub> ve FeTiP'ün çökmesi de mukavemetlerine katkı sağlar. Sonuç olarak ise büyük oranlarda P ya da Mn ilavesi olmadan dayanım arttırmak için çökmenin hassas kontrolü gereklidir. Literatüre göre 150'nin üzerinde farklı IF çelik kalitesi mevcuttur. P katı eriyik sertleştirmesinde en etkili yer alan elementidir ancak, soğuk işlem gevrekliğine sebep olması açısından ise zararlıdır. Bu sebeple P ile katı eriyik sertleşmesi artırılarak, tane sınırlarına P'un hareketini engellemek gerekmektedir. Bu durum alaşım içeriği az olan mekanik özellikleri geliştirilmiş P'lu IF çeliklerinin üretilmesine sebep olmuştur. Önceden 220 MPa akma dayanımı eldesi için kullanılan IF bileşimi şimdilerde ise farklılaştırılarak 260 MPa akma dayanımı eldesi için başarıyla uygulanmaktadır (Bakkaloğlu, 2001, Bak, 2010 ve Ekici 2016).

Çizelge 3.5'te galvanizlenmiş IF-P çeliklerinin bileşimleri ve bazı mekanik özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Galvanizlenmiş IF-P çeliklerinin bileşimleri ve bazı mekanik özellikleri.

Kalite No	P (ppm%)	Ti (ppm%)	Nb (ppm%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Anizotropi Katsayısı (r)	Deformasyon Sertleşmesi Üssü (n)
IF-P220	70	15	18	252	372	2,26	0,203
IF-P260	7	15	18	285	399	1,67	0,181

### 3.3. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR

IF çelikleri mekanik özellikleri, kaynaklanabilirliği, çok iyi yüzey özellikleri sayesinde çelik sac kullanılan birçok endüstride kullanılmaktadır. Otomotiv, beyaz eşya ve elektronik eşya üretiminde IF çelikleri tercih edilmektedir. IF çeliklerinin %50'si otomotiv, %16'sı elektronik eşya, %7'si beyaz eşya ve kalan %27'si ise çeşitli üretim sektörlerinde kullanılmaktadır.

Soğuk haddelenmiş yüksek dayanımlı IF çelikleri; otomobilin arka kaportası, ön çamurluk, kapılar, kapı içi güvenlik barları, kaportalar vb yüksek dayanım istenen parçaların üretiminde kullanılır. Beyaz eşya endüstrisinde ise çamaşır makinelerinin motorla gövde arasındaki bağlantı parçaları ve gövde bölümünün imalatında çokça kullanılmaktadır (Bakkaloğlu, 2001, Bak, 2010 ve Ekici 2016).

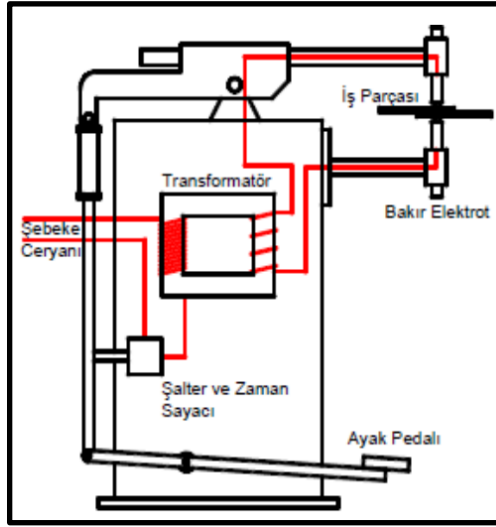
## BÖLÜM 4

### NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI

Günümüz konstrüksiyonları hem iş verimliliği ve iş emniyetini arttırmaya, boyutlarını ve ağırlığını azaltmaya hem de malzeme ve imalat maliyetlerini en aza indirmeyi hedeflemektedir. Buna paralel olarak geliştirilen birleştirme teknikleri de sürekli yeni problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, direnç kaynak metotları seri imalata entegre olabilen ve oldukça yaygın olarak kullanılabilen kaynak yöntemlerinden birisidir. Bunun başlıca nedeni ise kaynak banyosu etrafında cüruf kalıntılarının olmamasıdır. Bu yöntem; ilave metal kullanılmaması sebebiyle hafif olması, yüksek kaynak dayanımı, estetik görünüm, operatör becerisi gerektirmemesi ve yüksek kaynak hızı gibi sebeplerle, otomotiv ve uçak sanayinde ve metal eşya üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Hasanbaşoğlu, 2005).

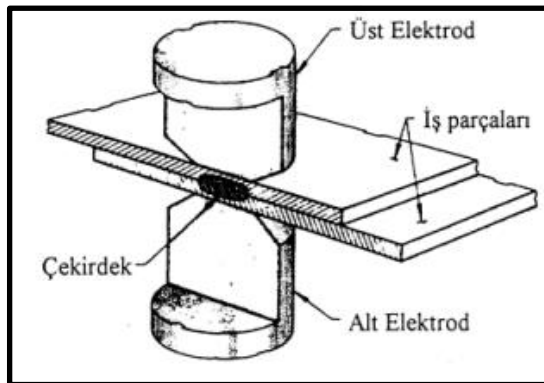
#### 4.1. GENEL ÖZELLİKLER

Bu kaynak yöntemi, elektrodlar arasında basınçla sıkıştırılan malzemelerin üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği dirençle oluşan ısıyla yapılan bir yöntemdir (Kahraman ve Güleç, 2009). Bir direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Akım yoğunlaşması ile ısıtılan kaynak metalinde erimiş çekirdek oluşur. Akım kesildiğindeyse, kaynak çekirdeği hızlıca soğuyup katılaştıkça elektrot kuvveti uygulanmaya devam eder (Kaya, 2010).



Şekil 4.1. Nokta direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi (Baydemir, 2011).

Saniyenin bir diliminde tamamlanan her kaynaktan sonra elektrotlar geri çekilmektedir. Kaynak dikişinin boyut ve şekli, ilk olarak elektrot uçlarının boyut ve şekliyle sınırlıdır. İç yüzeylerde kaynak çekirdeği oluşur fakat tamamen dış yüzeylere doğru genişlemez (Şekil 4.2). Düzgün bir nokta kaynağındaki çekirdeğin kesiti oval şekilde, üstten görünüşü ise elektrot ucu şeklinin aynı olup (çoğunlukla yuvarlak), yaklaşık olarak aynı boyuttadır. Elektrot gücüne dayanabilecek yeterli esas metal olmasını ve kaynak sırasında yerel distorsiyonun kaynaktan metal fişkırmasına neden olmamasını sağlamak için, noktalar iş parçasının kenarından yeterli uzaklıkta olmalıdır (Kaya, 2010).



Şekil 4.2. Nokta direnç kaynağı (Gürdaş, 1999).

Bu kaynak yöntemi, ısıtım işlem uygulanan tüm metal ve alaşımlarına uygulanır. Çoğunlukla aynı metallerin kaynağında kullanılır. Millerin alın kaynakları, çeşitli boru imalatları, ince sac kaynakları, bağlantı elemanları bu yöntemle kaynak olabilmektedir. Günümüzde kara ve hava taşıtlarında ince sac nokta kaynak robotları geliştirilip kullanılmaktadır (Hayat, 2005).

Nokta direnç kaynağında en önemli etken kaynak yapılacak malzemenin direncidir. Örneğin, demirin direnci yeteri kadar yüksek olduğu için demir parçaların kaynağı kolaydır, buna karşın alüminyumun direnci az olduğu için kaynatılması zordur (Keleş, 2008). Bu kaynak yöntemi, çelik saclarda 12 mm, bakır saclarda 1 mm, alüminyum saclarda ise 5 mm kalınlıkla sınırlıdır. Bakır ve alüminyum'un düşük elektrik direnci ve yüksek ısıtım iletim katsayıları sebebiyle kalın saclarda kaynağı güçtür (Coşkun, 2009).

#### **4.2. ÇEŞİTLERİ**

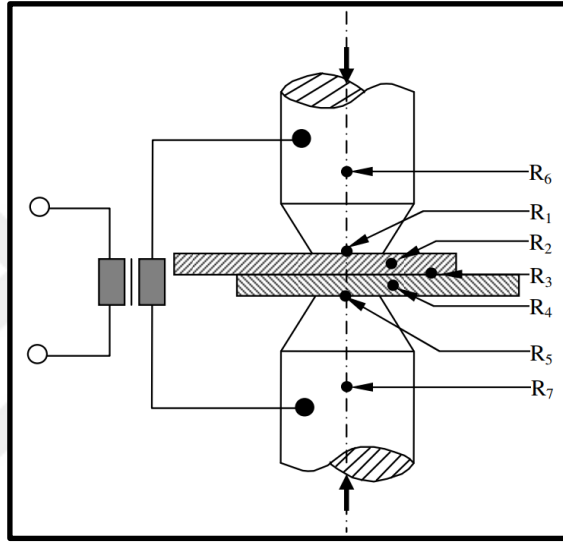
Elektrik direnç kaynağı metotlarının çok çeşitli türleri vardır. Bu yöntemlerde lokal olarak yüksek bir direnç meydana getirmek ve böylece de bağlantı noktalarında ısıyı yoğunlaştırabilmek için farklı teknikler kullanılır. Direnç, iletkenin öz direncine ve geometrisine bağlıdır. İşlem esnasında birleştirilecek parçalar arasında sınırlı bir akım yolu oluşturarak, bölgesel yüksek bir direnç meydana getirilir (kabartılı nokta kaynağı). Bu yöntem akım yoğunlaştırılması olarak da bilinmektedir. Bütün direnç kaynak yöntemlerinde, akımı ileten elektrotlar ve birleştirilecek parçalar arasında fiziksel bir temas olmalıdır.

Elektrik direnç kaynağı yöntemleri üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar; (Kahraman ve Gülenç, 2009):

- Nokta,
- Dikiş,
- Kabartılı kaynak'tır.

#### 4.2.1. Nokta Kaynağı

Nokta kaynak yöntemi prensibi, elektrodlar arasında basınçla sıkıştırılan malzemelerin üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği dirençle oluşan ısıyla yapılan bir yöntemdir (Şekil 4.3). Kaynak makinesi, şebekeden sağlanan yüksek voltaj ve düşük akımını, düşük voltaj ve yüksek akıma çevirerek kaynak için gerekli akımı sağlar. Kaynak için gereken elektrod kuvveti, mekanik ya da pnömatik donanımlardan elde edilir (Kahraman ve Güleç, 2009).



Şekil 4.3. Nokta direnç kaynağının prensip resmi (Kaya, 2010).

$I$  akımı,  $R$  omik direncinden,  $t$  süresince geçtiğinde, Joule kanununa bağlı olarak,  $J$  birim ısı açığa çıkmaktadır.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (4.1)$$

$$\text{Burada, } R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \text{ 'dir.} \quad (4.2)$$

Yani sekonder devredeki toplam dirençtir. Bu dirençler;

##### - Malzeme dirençleri

$R_6, R_7$  : Kullanılan elektrotların direnci

$R_2, R_4$  : İş parçalarının direnci'dir.

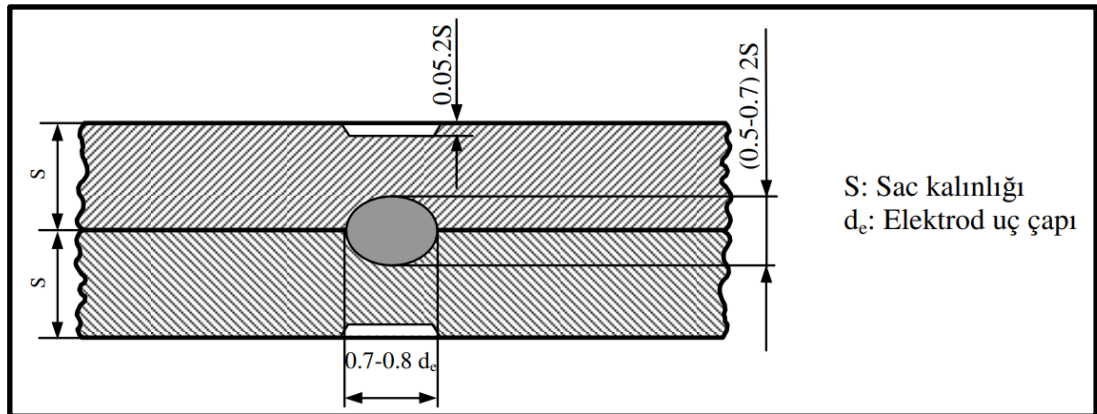
### - Temas dirençleri

$R_1, R_5$  : Elektrod - malzeme arası temas direnci

$R_3$  : Malzeme - malzeme arası temas direnci'dir.

Malzemelerin elektrik direnci, her malzemenin kendi fiziksel özelliğidir ve sabittir. Fakat temas dirençleri, malzemeler ve elektrodların temas durumuna göre değişmektedir. Kaynak esnasında  $R_3$ , en yüksek sıcaklığın oluşacağı direnç bölgesidir. Bu ise diğer direnç bölgelerinin düşük direnç göstermesi ile gerçekleşir. Bunu sağlamak, elektrod kuvveti (F), kaynak akımı ( $I_k$ ) ve kaynak süresi ( $t_k$ ) değişkenlerinin doğru seçimiyle mümkündür. Temas dirençleri ( $R_1, R_3$  ve  $R_5$ ) birleştirme kalitesine doğrudan etkilidir.  $R_3$  direnç bölgesindeki sıcaklık, malzeme veya malzemelerin ergime sıcaklıklarının üzerine çıkmaktadır. Bu bölgede sıcaklığın etkisiyle ergiyen malzeme veya malzemeler kaynak sonrasında katılarak kaynak çekirdeğini meydana getirir. Elektrod ve malzeme temas direnç bölgesindeki ( $R_1$  ve  $R_5$ ) sıcaklık oldukça düşük tutulur. Bunu sağlamak, elektrik direnci düşük elektrod ve malzeme yüzeyleri ile mümkündür. Malzeme yüzeylerinde düşük direnç için ise kir, yağ, pas ve boya vb. temizlenmesi gerekir.

Nokta kaynak yönteminde, kaynak çekirdeği çapı kullanılan elektrod çapına göre değişmektedir. Kusursuz bir birleştirmede, kaynak çekirdeği çapı elektrod çapının 0,7-0,8 katı olmalıdır. İdeal bir birleştirmede ise kaynak çekirdeği çapının elektrod çapına eşit olması gerekir. Kaynak çekirdeği ebatları ve değer aralıkları Şekil 4.4'te görülmektedir (Kahraman ve Gülenç, 2009).

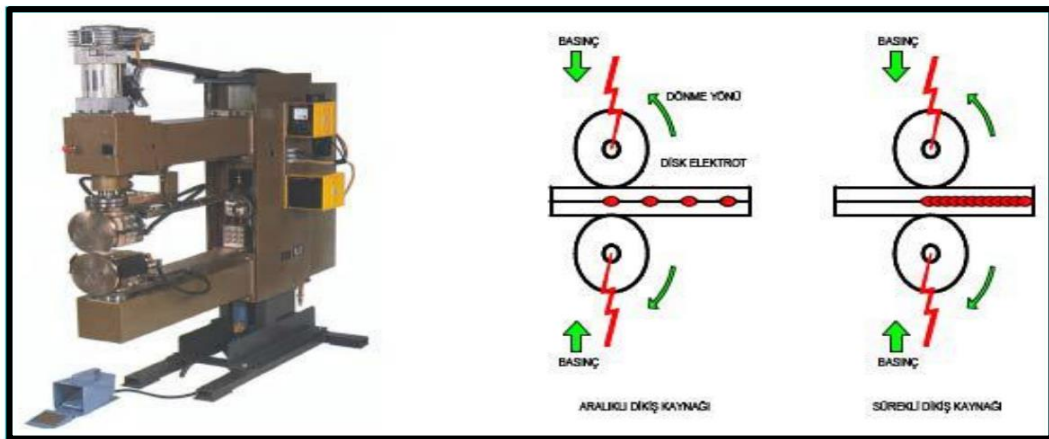


Şekil 4.4. Nokta direnç kaynağında kaynak çekirdeği ebatları (Kaya, 2010).

#### 4.2.2. Dikiş Kaynağı

Bu kaynak yöntemi, eksenini etrafında dönebilen elektrotlar ile yapılan seri bir nokta kaynağıdır. Üstüste bindirilen parçalar, temas yüzeylerinden geçirilen elektrik akımı ve malzemenin bu akıma direnciyle meydana gelen ısıyla ergitilerek birleştirilir. Dikiş kaynağı, nokta kaynağı yöntemine benzemektedir. Dikiş kaynağının diğer direnç kaynaklarına göre avantajı, sürekli dikiş yapabilmesi ve bazı uygulamalarda ise sızdırmazlık sağlayabilmesidir. Otomobil yakıt deposu üretimi bu kaynak yönteminin en önemli kullanım alanlarından biridir. Benzin deposu sızdırmazlığı emniyet açısından çok önemlidir. Bu yöntem seri üretime entegre olabilir ve parçalar birbirlerine tek bir parça gibi birleştirilebilir olması sebebiyle otomotiv endüstrisinde tercih edilmektedir.

Dikiş kaynak yönteminde, dikiş sürekliliği kaynak akımının uygulama süresine bağlıdır. Birleştirilecek parçalar, üstüste bindirilmiş olarak bakır elektrotlar arasına yerleştirilir. Elektrotlara kuvvet uygulanmasıyla parçalar üzerinden kaynak akımı geçer. Kaynak süresince kaynak akımı elektrotlardan geçer, parçalar arasındaki temas bölgesi bu akıma karşı en yüksek direnci gösterir ve ısınan malzemeler bu bölgede eriyerek kaynak çekirdeğini oluşturur. Kaynak akımının uygulanma süresine bağlı olarak farklı dikiş formları oluşur (Şekil 4.5) (Kahraman ve Gülenç, 2009).

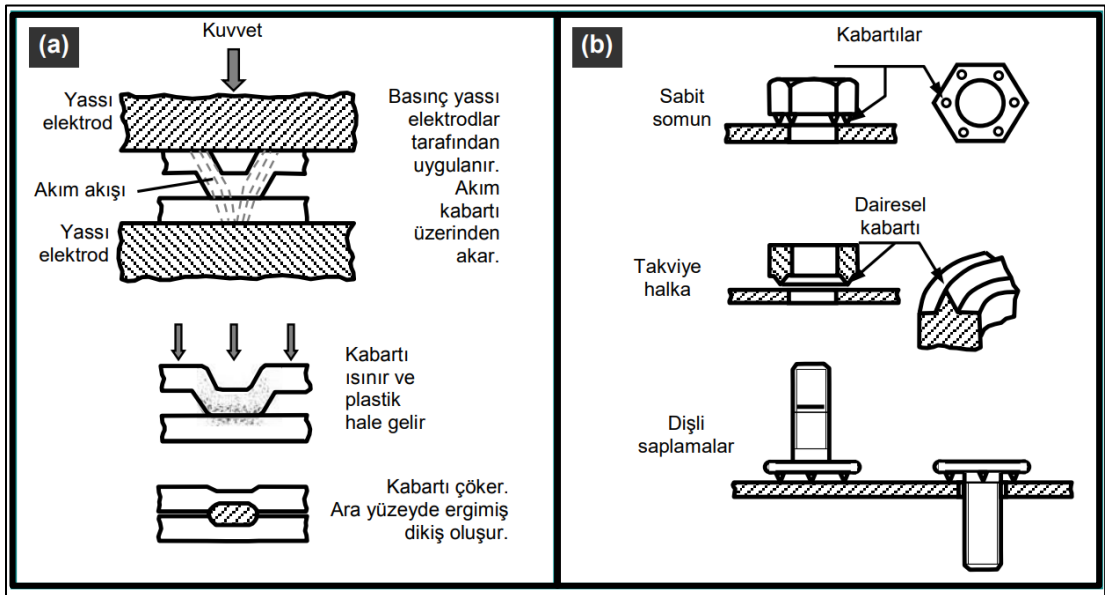


Şekil 4.5. Dikiş direnç kaynak makinesi ve kaynak bölgesi detayı (Yürük, 2015).

### 4.2.3. Kabartı Kaynağı

Nokta ve dikiş kaynaklarında arayüzeydeki akım yoğunlaşmasıyla elektrodlarla şekillendirerek ve temas yüzey alanlarıyla sınırlandırarak gerçekleştirilmektedir. Kabartılı kaynak yönteminde ise, kaynak bölgesi, parçalardan birinin yüzeyinde yükselen bir kabartıyla belirlenmektedir (Şekil 4.6.a). Birleştirilecek parçalar bir araya getirildiğinde sadece kabartı noktasında birbirlerine temas eder. Arayüzeyden geçen kaynak akımı kabartı bölgesinde, yoğunlaşır ve sıcaklık yükselir. Kabartı plastik hale gelir ve sonuçta da ergidiği için çöker ve arayüzeyde ergimiş bir bölge meydana gelir. Elde edilen kaynak, nokta yöntemiyle benzerdir.

Genelde 2 veya 3 kabartı aynı zamanda kaynaklanır. Kabartı kaynak makinaları, nokta kaynak makinalarına benzemektedir. Fakat nokta kaynağındaki elektrodlar yerine birleştirme bölgesine üniform bir basınç uygulayan, düz bakır tablalar bulunmaktadır. Kabartı form ve ebatları ön deneylerle belirlenir. Kabartılı kaynak, uzun bindirme birleştirmelerinde tercih edilmez, küçük bağlantı parçalarının sac yapılarla birleştirilmesinde tercih edilir. Otomotiv gövdesi, ev cihazları, büro mobilyaları ve makina parçaları imalatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak; sabit somunların araba şasisine birleştirilmesi, bir yüzeyde oluşturulmuş küçük kabartıların üretilmesi verilebilir (Şekil 4.6.b) (Kaya, 2010).



Şekil 4.6. a) tekli, b) çoklu kabartılı kaynak şematik resmi (Yürük, 2015).

## BÖLÜM 5

### ÖNCE DEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

#### 5.1. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN (AISI 316 L) NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI

Kocabekir vd. (2008) 316 L östenitik paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağında kaynak soğuma koşulları, kaynak atmosferi ve ısı girdisinin etkisi adlı çalışmalarında; 1 mm kalınlığındaki 316 L kalite östenitik paslanmaz çelik malzemeleri 6 Pa elektrod basıncı, 7 kA kaynak akımı, 10, 15 ve 20 çevrim kaynak zamanları, nitrojen veya atmosfer koşullarında ve havada veya %10 boraks solisyonunda direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynaklı bağlantıların mikroyapı, sertlik ve çekme-makaslama dayanımlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda kaynağın mekanik özelliklerinin doğrudan kaynak zamanı ve kaynak atmosferi ile ilgili olduğunu ayrıca kaynak zamanı ile ilgili olarak ısı girdisi artışıyla artan çekirdek boyutu nedeni ile kaynaklı parçaların çekme-makaslama dayanımlarında da artış olduğunu bildirmişlerdir.

Amadeh vd. (2014) AISI 316 L östenitik paslanmaz çelik levhaların nokta direnç kaynağı: Faz dönüşümleri, mekanik özellikler ve mikroyapı karakterizasyonları adlı çalışmalarında; 1 mm kalınlığındaki AISI 316 L östenitik paslanmaz çelik malzemeleri 4 kN elektrod kuvveti, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 kA kaynak zamanı ve 4, 5, 6 ve 7 çevrim kaynak zamanı kullanarak nokta direnç kaynak yöntemi birleştirmişler ve birleştirilen numuneler üzerinde mikroyapı, mikrosertlik ve çekme-makaslama çalışmaları yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda, 8 kA kaynak akımına kadar artan kaynak akımı ile kaynak çekirdek boyutundaki artışlar nedeniyle çekme-makaslama yük kapasitesi artış olduğu, ancak 9 kA kaynak akımında dayanımın azaldığı belirlenmiştir. Mikroyapı çalışmaları sonucunda kaynak çekirdeğinin farklı delta ferritlerden

oluşturduğunu, mikrosertlik çalışmalarında ise kaynak çekirdeği sertliğinin ITAB ve ana metalden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir.

Özyürek (2008) 316 L östenitik paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağında kaynak akımı ve kaynak atmosferinin etkisi adlı çalışmada; 1 mm kalınlığındaki 316 L paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile 4, 7 ve 9 kA kaynak akımlarında birleştirmiş ve kaynaklı bağlantıların mikroyapı, mikrosertlik ve yük taşıma kapasiteleri incelemiştir. Kaynak akımı arttırıldığında çekirdek boyutunun arttığı, buna bağlı olarak bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarında artış meydana geldiğini tespit etmiştir. Ayrıca kaynak esnasında azot gazının kullanıldığı birleştirmelerin dayanımlarının atmosferik şartlarda yapılanlardan daha yüksek olduğu sonucu bulunmuştur. Mikroyapı incelemeleri sonucunda ITAB'da kaba taneli bir bölgenin oluştuğu, sertlik testleri sonucunda ise ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeğinden ölçülen değerlerin birbirlerine yakın olduğu rapor edilmiştir.

Fukumoto vd. (2008) östenitik paslanmaz çeliklerin küçük ölçekli nokta direnç kaynağı adlı çalışmalarında; 200 µm kalınlığında, 25 mm uzunluğunda ve 8 mm genişliğinde çeşitli östenitik paslanmaz çelik levhaları, (302, 304, 310S, 316L ve 347) nokta direnç kaynağı ile birleştirmişler, kaynak akımı ve kaynak zamanının, çekirdek boyutu ve bağlantı mukavemetine etkisini araştırılmışlar ayrıca birleştirilen parçalarda çekme-makaslama, optik mikroskop, SEM ve EBSP incelemesi yapmışlardır. Kaynak bölgelerinin mikroyapı görüntüleri, hızlı soğuma oranı dolayısıyla neredeyse tamamı östenitik olduğu, tamamen östenitik mikroyapıya rağmen, nokta direnç kaynağı ile birleştirilen 302, 304, 316L, 310S ve 347 tipi östenitik paslanmaz çeliklerde, sıcak çatlama görülmediği bildirilmiştir. Nokta direnç kaynağında hızlı soğuma oranı ile oluşan mikroyapılar, geleneksel Schaeffler diyagramıyla zor tahmin edilebileceğini, çekme-makaslama testi sonucunda, 304 paslanmaz çeliğin nokta direnç kaynağında, kaynak akımı artışıyla çekirdek gelişmesinden dolayı makaslama gücü arttığını, kaynak çekirdeğinde çok az delta ferrite rağmen sıcak çatlak ve ITAB'da herhangi bir koşul altında hassaslık gözlenmediğini rapor etmişlerdir.

Baydemir (2011) östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin farklı kaynak parametreleri kullanılarak nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi ve bu parametrelerin mikroyapı ve

mekanik özelliklere olan etkisinin araştırıldığı yüksek lisans tezinde; 1 mm kalınlığında AISI 310 östenitik ve AISI 430 ferritik paslanmaz çelikleri 6 kN elektrot kuvveti, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 kA kaynak akımı ve 5, 15 ve 25 çevrim kaynak zamanında nokta direnç kaynak yöntemi ile kendi aralarında ve birbirleri ile birleştirmiştir. Birleştirme mukavemetlerini belirlemek için çekme-makaslama testleri yapmış ayrıca kaynak çekirdek çaplarını ölçmüş ve kaynak bölgeleri üzerinde mikrosertlik ve mikroskop çalışmalarıyla incelenmiştir. İncelemeler sonucunda; artan kaynak akımı ve kaynak zamanıyla kaynak çekirdeği çapı ve derinliğinin arttığı, buna paralel olarak da çekme-makaslama dayanımının arttığı, sertlik testlerinde, en yüksek sertlik değerinin kaynak çekirdeğinden ölçüldüğü onu sırasıyla ITAB ve ana malzemelerin izlediği, mikroyapı incelemelerinde, kaynak çekirdeğinde tane irileşmesi olduğu bildirilmiştir.

Haetham vd. (2021) nokta direnç kaynaklı AISI 316 L çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konulu çalışmalarında; 3 mm kalınlığında 316 L östenitik paslanmaz çelik levhaları 3 kN elektrod basıncı, 12 kA kaynak akımı ve 12-30 çevrim kaynak zamanında nokta kaynak yöntemiyle birleştirmişler ve kaynaklı bağlantılarda çekme-makaslama, sertlik ve mikroyapı çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yüksek kaynak akımından dolayı arayüzey hataları ve arayüzey fişkırımları gözlemediği, mikrosertlik testleri sonucunda ergime bölgesinde faz dönüşümü olduğu (martenzitik sütunlu taneler), ITAB'da faz dönüşümü olmadığı fakat esas metal ITAB arasında boşlukların bulunduğu (Cr, Ni ve Mo'nin ayrılmasından kaynaklanan), ergime bölgesi merkezinde düşük elektrod kuvveti ve yüksek kaynak akımının sebep olduğu arayüzey hatasına neden olan büyük bir boşluğun tespit edildiği ve yüksek kaliteli ve mukavemetli bir kaynak bağlantısı için elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi parametrelerinin optimize edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Taufiqurrahman vd. (2021) 316 L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V titanyum alaşımının alüminyum ara tabaka kullanarak farklı malzemelerin nokta direnç kaynağında tutma zamanının etkisi adlı çalışmalarında; 3 mm kalınlığında 316 L östenitik paslanmaz çelik ve ASTM Grade 5 titanyum alaşımı alüminyum ara tabaka ile 4 kN elektrod kuvveti, 12 kA kaynak akımı, 10 çevrim kaynak zamanı ve 10-30 çevrim tutma

süresinde nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve çekme-makaslama, mikroyapı ve sertlik çalışmaları yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, aynı malzemeler ile yapılan çalışmalara göre alüminyum ara tabaka kullanılmasının sebep olduğu kaynak mukavemetinde önemli bir artış görüldüğü, mikroyapı incelemesinde alüminyum ara tabaka ve titanyum arasında difüzyon oluştuğu, artan tutma süresinin çekme mukavemetini önemli ölçüde iyileştirdiği ve kaynaklı bağlantının boşluğunu ortadan kaldırdığı bildirilmiştir.

## **5.2. ARAYER ATOMSUZ (IF) ÇELİKLERİNİN NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI**

Bak (2010) IF çeliklerinin nokta direnç kaynağında deformasyon yaşlandırmasının mekanik özelliklere etkisi konulu yüksek lisans tezinde, 2 mm kalınlıkta ve ekstra derin çekilebilme özelliğine sahip 7114 kalite IF çeliklerini solisyona almış ve nokta direnç kaynak birleştirmesinde yaşlandırma davranışlarını, optik mikroskop, çekme-makaslama ve sertlik testleri ile incelemiştir. IF çeliğine çekme öncesinde uygulanan ön deformasyon ve ardından uygulanan yaşlandırma işleminin bu çeliğin kaynaklı ve kaynaklı olmayan bağlantılarının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Solisyona alınan numuneler 950°C'de 15 dk östenitlendikten sonra su ile soğutulmuştur. Sonrasında ise ana malzeme numuneleri ve solisyona alınan numuneler %8 ön deforme işlemi ardından da 70°C 5, 10, 20, 40, 60, 80 ve 120 dk yaşlandırma uygulanmıştır. İncelemelerde ana malzeme, solisyona alınan ve nokta direnç kaynaklı numunelerde deformasyon yaşlandırması olduğu görülmüştür. Ek olarak solisyona alınan ve solisyona alınan ve solisyona alınan kaynaklı numunelerde deformasyon yaşlandırması etkileri, ana malzeme ve kaynaklı malzemeye göre daha belirgin olarak görülmüştür.

Coşkun (2009) IF çeliği ve DP600 saclarının nokta direnç ve sürtünme karıştırma kaynakları ile birleştirilmesi konulu yüksek lisans tezinde, 1 mm kalınlığında IF 7114 ve DP600 saclar 4 kN elektrod kuvveti, 8 kA kaynak akımı, 5 periyod kaynak süresi, 10 periyod sıkıştırma ve 5 periyodluk tutma sürelerinde elektrik nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve kaynaklı numunelerde çekme-makaslama, mikroyapı ve mikrosertlik incelemeleri yapmıştır. İncelemeler sonucunda, çekme testleri sonucunda sürtünme karıştırma nokta kaynaklı numuneler nokta direnç kaynaklı numunelere

oranla daha yüksek dayanım sağladığı (esas metalin %42'si kadar dayanım) rapor edilmiştir.

Mutlusu ve Ertan (2020) nokta direnç kaynağı ile alüminyum ve titanyum levhaların IF çelikleri ile kaynaklanabilirliği konulu çalışmalarında, 1 mm kalınlığındaki IF 180 çeliğini ASTM Grade 2 ticari saf titanyum ve 5754 alüminyum saclarla farklı parametreler kullanarak (5, 10, 15 kN elektrod kuvveti, 10, 12,5 ve 15 kA kaynak akımı ve 10, 15 ve 20 çevrim kaynak zamanı) nokta kaynak yöntemiyle birleştirmişler ve kaynaklı bağlantıları üzerinde çekirdek çapı-derinliği, mikrosertlik ve çekme-makaslama testleri gerçekleştirmişler. Deneysel çalışmalar sonucunda, her iki birleştirmede de elektrod kuvveti ve kaynak akımının ve çekirdek çapı-derinliği ve çekme-makaslama dayanımına büyük ölçüde etki ettiğini ve kaynak parametrelerinin IF çeliği ve alüminyum alaşımı birleştirmesinin IF çeliği ve titanyum birleştirmesine göre mekanik özelliklerde daha etkili olduğu rapor etmişlerdir.

Mutlusu (2019) IF çeliklerinin nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği konulu tez çalışmasında, 1 mm kalınlığındaki IF 180 çeliğini ASTM Grade 2 ticari saf titanyum ve 5754 alüminyum saclarla farklı parametreler kullanarak (5, 10, 15 kN elektrod kuvveti, 10, 12,5 ve 15 kA kaynak akımı ve 10, 15 ve 20 çevrim kaynak zamanı) nokta kaynak yöntemiyle birleştirmişler ve kaynaklı bağlantıları üzerinde çekirdek çapı-derinliği, mikrosertlik ve çekme-makaslama testleri gerçekleştirmişler. Deneysel çalışmalar sonucunda, her iki birleştirmede de elektrod kuvveti ve kaynak akımının ve çekirdek çapı-derinliği ve çekme-makaslama dayanımına büyük ölçüde etki ettiğini ve kaynak parametrelerinin IF çeliği ve alüminyum alaşımı birleştirmesinin IF çeliği ve titanyum birleştirmesine göre mekanik özelliklerde daha etkili olduğu rapor etmişlerdir.

Hayat vd. (2009) nokta direnç kaynaklı IF çeliği mekanik özellikleri üzerinde kaynak akımı ve kaynak zamanının etkisi konulu çalışmalarında; 0,85 mm kalınlığındaki IF çeliklerini 3, 5, 7, 9 kA kaynak akımı ve 5, 10, 15, 20, 25, 30 çevrim kaynak zamanı kullanılarak punta kaynağı ile birleştirilmişler ve birleştirmelerin mikroyapı, mikrosertlik, çekme-makaslama mukavemeti ve çekme-sıyırma mukavemeti üzerine kaynak akımı ve kaynak süresinin etkilerini araştırmışlardır. İncelemeler sonucunda

kaynak süresi ve kaynak akımının artmasıyla sertliğin arttığı ve kaynak ve ITAB'da çekme-makaslama dayanımının da buna paralel arttığı, kaynak akımı ve/veya kaynak süresi artması ile kaynak çekirdeği çapının arttığı ve böylece çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımlarının arttığı bildirilmiştir.

Hayat (2011) BH 180-AISI 304 L çelikler ve BH 180-IF 7123 çeliklerinin nokta direnç kaynağı konulu çalışmasında, 0,8 mm kalınlığındaki fırında sertleşebilen BH 180 çeliği, arayer atomsuz 7123 IF çeliği ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelikler birbirleri ile 6 bar elektrod basıncı, 9 kA kaynak akımı ve 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 çevrim kaynak sürelerinde nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve birleştirmeler üzerinde mikroyapı, mikrosertlik ve çekme-makaslama çalışmaları gerçekleştirmiştir. Testler sonucunda, kaynaklı birleştirmelerde kaynak metallere herhangi bir kırılma olmadığı, BH 180-AISI 304 L birleştirmelerde artan kaynak süresi ile, ısı girdisinin daha hızlı bir artışı gösterdiği, kaynak çekirdeği ve ITAB'ın her numune için farklı oranlarda arttığı özellikle AISI 304 L çelik tarafında kaynak çekirdeği boyutunun daha düşük olduğu, kaynak zamanı artışına bağlı olarak artan ısı girdisi ile kaynak çekirdeği ve ITAB'ın tanelerinde irileşme meydana getirdiği, kaynak zamanının artmasıyla birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımlarının arttığı ve 25 çevrimden sonra ise azaldığı, BH 180-AISI 304 L bağlantısı çekme-makaslama dayanımlarının BH 180-IF 7123 bağlantısına göre daha yüksek olduğu, çekme-makaslama testi sonucunda kopmaların BH 180-IF 7123 birleştirmesinde IF tarafında, BH 180-AISI 304 L birleştirmesinde ise BH 180 tarafında meydana geldiği tespit edilmiştir.

Hayat vd. (2010) otomotiv uygulamaları için arayer atomsuz çeliklerin yapıştırıcı takviyeli nokta kaynağı konulu çalışmalarında, 1 mm kalınlığındaki 7315 IF çelikleri 6 bar elektrod basıncı, farklı kaynak akımı (5, 7 ve 9 kA) ve kaynak sürelerinde (10, 20 ve 30 çevrim) nokta direnç kaynağında, birleştirme dayanımı ve dayanım-süneklik davranışına yapıştırıcının (Terostat 9120-Grey ve Terostat 9220-Black sınıfı yapıştırıcılar) etkisini incelemiştir. Deneyler sonucunda, kaynak süresinin ve/veya kaynak akımının artmasıyla birlikte kaynak çekirdek çapı artmış buna bağlı olarak ise nokta kaynaklı ve yapıştırımlı nokta kaynaklı numunelerin çekme-makaslama dayanımlarının arttığı, punta kaynaklı numunelerin kaynak merkezi ve ITAB'ında tane irileşmesi olduğu bildirilmiştir.

### 5.3. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK (AISI 316 L) VE ARAYER ATOMSUZ (IF) ÇELİKLERİNİN NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI

Hasanbaşoğlu (2005) IF çeliği ve östenitik paslanmaz çelik sacların nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi konulu tez çalışmasında, 2 mm kalınlıktaki IF 7114 çeliği ile AISI 304 ve AISI 316 L östenitik paslanmaz çelikleri, 6 bar elektrod basıncı, 7 ve 9 kA kaynak akımı, 17 çevrim kaynak zamanı, hava veya azot kaynak atmosferinde, hava veya su + %10 bor yağı ortamında soğutarak kullanılarak nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynaklı bağlantılar üzerinde kaynak akımı, kaynak atmosferi ve soğutma ortamı etkisi mikroyapı, mikrosertlik ve çekme-makaslama mukavemetine etkisi irdelenmiştir. Testler sonucunda birleştirmelerin IF çeliği ITAB'ında meydana gelen aşırı tane irileşmesi sebebiyle en zayıf bölge olduğu, kaynak atmosferi olarak azot kullanıldığında birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımlarının arttığı, kaynak sonrası soğutmada su + %10 bor kullanıldığında ise çekme-makaslama dayanımının azaldığı bildirilmiştir. Ayrıca; IF çeliği-AISI 304 ve IF çeliği-AISI 316 L birleştirmelerinde kaynak akımı artışına bağlı olarak artan ısı girdisiyle, kaynak çekirdeği boyutları ve birleştirme arayüzey kesit kalınlığı da arttığı, artan kaynak akımı ile birleştirme çekme-makaslama dayanımının arttığı, her iki birleştirme türünde de azot atmosferinin çekme-makaslama dayanımını arttırdığı, su + %10 bor yağı ortamında soğutulan birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımında azalma olduğu ve her iki birleştirme türünde de artan kaynak akımına rağmen birbirine yakın sertlik değerleri ölçüldüğü rapor edilmiştir.

Hasanbaşoğlu ve Kaçar (2007), farklı malzemelerin nokta direnç kaynağı başlıklı çalışmalarında, 2 mm kalınlığındaki IF 7114 ve AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliği farklı kaynak parametreleri (4, 7 ve 9 kA kaynak akımı) kullanarak nokta direnç kaynak yöntemi ile (ısıl iletkenlik farkından dolayı 316 L tarafında 8 mm ve IF tarafında 9 mm elektrod çapı ile) birleştirmişler ve birleştirmelerde çekme-makaslama, mikrosertlik ve optik mikroskop çalışmaları yapmışlardır. Testler sonucunda, kaynak akımındaki artmaya paralel olarak çekirdek çapında artma oluştuğu ve bu artışa bağlı olarak da birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımlarında artış meydana geldiği, kaynak çekirdeğinin IF çeliği bölümünde östenitik paslanmaz çelik bölümüne göre daha fazla çap artışı olduğu, 7 kA kaynak akımı kabul edilebilir çekme-makaslama

dayanımı elde edilmesine rağmen, optimum dayanımının 9 kA kaynak akımı, 17 çevrim kaynak zamanı ve 6 bar elektrod basıncında elde edildiği, IF çeliği ITAB'ı üzerinde aşırı tane büyümesi sebebi ile meydana gelen çatlaktan dolayı kaynaklı bağlantı çekme-makaslama dayanımının azaldığı, buna bağlı olarak çekme-makaslama testi sonrasında kopmaların IF çeliği tarafında meydana geldiği, sertlik testlerinde en yüksek sertliğin genellikle kaynak çekirdeğinde tespit edildiği ve onu sırasıyla ITAB ve esas malzemenin izlediği, IF çeliği kimyasal bileşiminden sebebi ile bütün parametrelerde de (4, 7 ve 9 kA) kaynak bölgesinin kenarlarında sertlikte bir dalgalanma meydana gelmediği, nokta direnç kaynaklı numunelerde iç yapı hatalarının genellikle düşük elektrot basıncı, yüksek kaynak akımı veya aşırı kaynak ısı girdisi meydana getiren diğer parametrelerden kaynaklandığı rapor edilmiştir.

Hasanbaşoğlu vd. (2005) AISI 304 ve IF 7114 çeliği nokta direnç kaynağında kaynak akımının birleştirme özelliklerine etkisi adlı çalışmalarında, 2 mm kalınlıklı östenitik paslanmaz çelik AISI 304 ve IF 7114 çelik sacları farklı parametreler kullanarak (6 bar elektrod basıncı, 4, 7 ve 9 kA kaynak akımı, 18 periyot kaynak süresi) nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynaklı bağlantılara mikroyapı, çekme-makaslama ve sertlik testleri uygulamışlardır. Testler sonucunda en yüksek çekme-makaslama dayanımının 9 kA kaynak akımında elde edildiği ve kaynak bölgesi IF çeliği tarafında meydana gelen aşırı tane büyümesinden dolayı birleştirmelerin en zayıf yeri olarak tespit edildiği bildirilmiştir.

Lee vd. (2009), östenitik paslanmaz çelik ve IF (arayer atomsuz) çeliklerinin farklı malzeme nokta direnç kaynağı başlıklı çalışmalarında; AISI 316 ve IF çeliklerinin farklı malzeme nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğini incelenmişler ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi için kaynak çekirdeği şekli, çekme-makaslama kuvveti, sertlik ve mikroyapı çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Testler sonrasında kırılma yüzeyleri SEM incelemesinde, 316 östenitik paslanmaz çeliğin ergime bölgesinin daha yüksek ısı direncinden dolayı daha büyük hacimde ve kaynak çekirdeğinin asimetric olduğu, ergime bölgesi mikroyapısının tamamen martenzitik olduğu, mikroyapının daha fazla irdelenmesi için paslanmaz çelik seyrelmesi hesaplanarak Schaeffler diyagramına uygulandığı ve tahmin edilen mikroyapının da martenzitik olduğu, tahmin edilen mikroyapının doğrulanması için yapılan XRD

ölçümlerinde başlangıç kaynak çekirdeği yapısının östenit ve martenzitten oluştuğu bildirilmiştir.

Vural ve Akkuş (2004), galvanizli arayer atomsuz çelik levhalar ile östenitik paslanmaz çelik levhaların nokta kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği konulu çalışmalarında, 1,03 mm kalınlıklı galvanizli çelik ve 0,93 mm kalınlıklı östenitik paslanmaz çelik sacları, 5,5-13 kA (0,5 kA artışla) kaynak akımlarında ve 3400 N elektrod gücünde nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynaklı numuneler mikrosertlik, çekme-makaslama ve yorulma testleri ile incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kaynak akımı arttırıldığında kritik akım değerine kadar kaynak çekirdeği çapı arttığı, kaynak çekirdeği çapı arttıkça çekme-makaslama mukavemetinin arttığı, fakat kritik akım değeri geçildikten sonra, ara yüzeyde aşırı metal ergimesi ve sıçramasından dolayı, kaynak çekirdeği çapı azaldığı tespit edilmiştir. Malzemeler farklı özelliklere sahip olduğundan kaynak çekirdeğinde ısı dengesizliği görülmüş ve paslanmaz çelik saclar daha yüksek elektrik direncine sahip olduğundan kaynak çekirdeği çapının daha büyük olduğu ve galvanizli çelik saclarda çinko tabakanın, asimetric kaynak çekirdeği oluşumuna neden olduğu, elde edilen asimetric kaynak çekirdeğinin kaynak akımı artışından olabileceği bildirilmiştir. Mikrosertlik ölçümlerinde, en büyük sertlik değerleri kaynak külçesinin ortasında (350 HV) tespit edilmiştir.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 6.1. KULLANILAN MALZEMELER

Deneysel çalışmalarda, yüksek korozyon dayanımı sebebiyle beyaz eşya ve mutfak aletleri yapımında çok geniş kullanım alanına sahip östenitik paslanmaz (AISI 316 L) çelik ile yaşlanmaya dayanımı ve ekstra derin çekmeye uygun çok düşük karbonlu arayer atomsuz olması sebebiyle otomobil ve beyaz eşya endüstrisinde çok geniş kullanım alanına sahip IF (7114) çelik malzemeler kullanılmıştır. Çizelge 6.1’de deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 316 L ve IF 7114 malzemelerin kimyasal bileşimi ve Çizelge 6.2’de ise mekanik özellikleri verilmiştir.

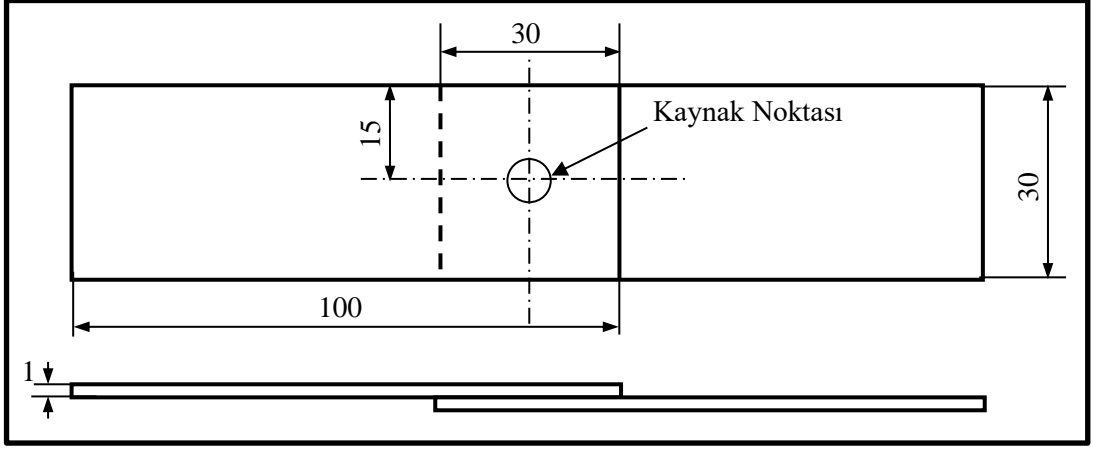
Çizelge 6.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi (%Ağırlık).

	C	Mn	P	S	Ti	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
<b>AISI 316 L</b>	0,008	1,75	0,045	0,003	-	0,95	17,8	12	2,7	Kalan
<b>IF 7114</b>	0,005	0,15	0,006	0,005	0,068	-	-	-		Kalan

Çizelge 6.2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)
<b>AISI 316 L</b>	207	539	55
<b>IF 7114</b>	210 max	270-350	38

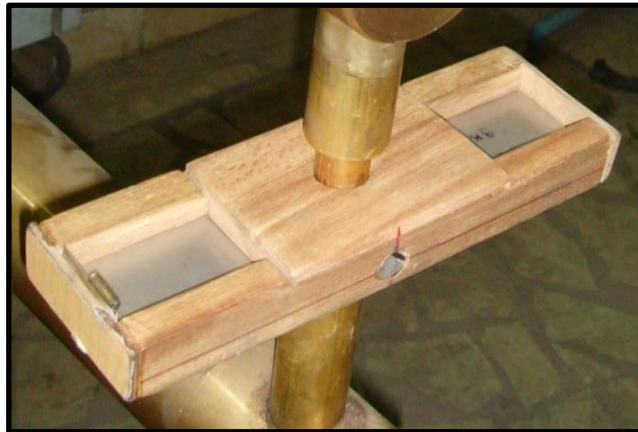
Kaynak işlemleri için AISI 316 L ve IF 7114 saclar, KBÜ Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Kaynaklı İmalat Laboratuvarlarında giyotin makas ile standartlara uygun olarak 100x30x1,2 mm boyutlarına kesilmiş ve nokta direnç kaynak standartlarına uygun olarak Şekil 6.1’de verilen ölçülerde üst üste bindirilerek kaynak işlemlerine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.1. Nokta direnç kaynaklı sacların ölçüleri.

## 6.2. MALZEMELERİN KAYNAK İÇİN HAZIRLANMASI

100 mm uzunluk, 30 mm genişlik ve 1,2 mm kalınlığa sahip AISI 316 L östenitik paslanmaz çelik ile IF 7114 çelik saclar nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmeden önce üst üste bindirilen birleştirme yüzeyleri 1000 mesh'lik SiC zımpara ile oksitlerinden arındırılmış ve bu yüzeyler aseton kullanılarak temizlenmiştir. Kaynak işlemleri esnasında üst üste bindirilmiş sacların, eksenlerinden kaymasını engellemek için Şekil 6.2'de verilen ahşap kalıp hazırlanarak numuneler içine yerleştirilmiştir. Kaynaklı parçaların standart olması için bütün kaynak işlemlerinde IF 7114 sacı altta, AISI 316 L sacın ise üstte olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 6.2. Kaynak işlemlerinde kullanılan ahşap kalıp.

### 6.3. MALZEMELERİN KAYNAĞI

Literatür araştırmalarında nokta direnç kaynaklı bağlantıların kalitesine en etkin parametrelerin; elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi olduğu tespit edilmiştir. Ön deneyler yapılarak, AISI 316 L östenitik paslanmaz çelik ile IF 7114 çelik sac malzemelerin nokta direnç kaynak yöntemi ile başarıyla birleştirileceği kaynak parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelerin az olduğunda yetersiz birleştirme, yetersiz çekirdek çapı ve ayrılma görülürken, çok yüksek olduğunda ise aşırı deformasyon, aşırı geniş çekirdek çapı ve kaynak bölgesinde aşırı ergimeden kaynaklanan fişkırma ve delinme olayı görülmüştür.

Ön deneylerden elde edilen verilerin irdelenmesi sonucunda; nokta direnç kaynağında kaynak parametreleri olarak, 3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı ve 10, 20, 30, 40, 50 çevrim (1 çevrim = 0,02 sn) kaynak süresinin kullanılması uygun görülmüştür.

Nokta direnç kaynak işlemlerinde; elektrod kuvveti 0 – 6 kN, kaynak akımı 0 – 9 kA ve kaynak zamanı 0 – 99 çevrim aralığında ayarlanabilen, pnömatik kontrollü ve su soğutmalı Baykal SPP 60 tipi nokta kaynak makinesi kullanılmıştır. Çizelge 6.3'te kaynak işlemlerinde kullanılan makinenin özellikleri, Şekil 6.3'te ise görüntüsü verilmiştir.

Çizelge 6.3. Kaynak işlemlerinde kullanılan makinenin özellikleri.

Makine Adı	<b>Baykal SPP 60</b>
Volt (V)	<b>380</b>
Güç (kVA)	<b>60</b>
Elektrod Basıncı (kN)	<b>0 – 6</b>
Kaynak Akımı (kA)	<b>0 – 9</b>
Kaynak Çevrimi (cycle)	<b>0 – 50</b>
Elektrod Çapı (mm)	<b>9</b>
Elektrod Türü	<b>Konik uçlu Cu (Bakır)</b>



Şekil 6.3. Kaynak işlemlerinde kullanılan nokta direnç kaynak makinesi.

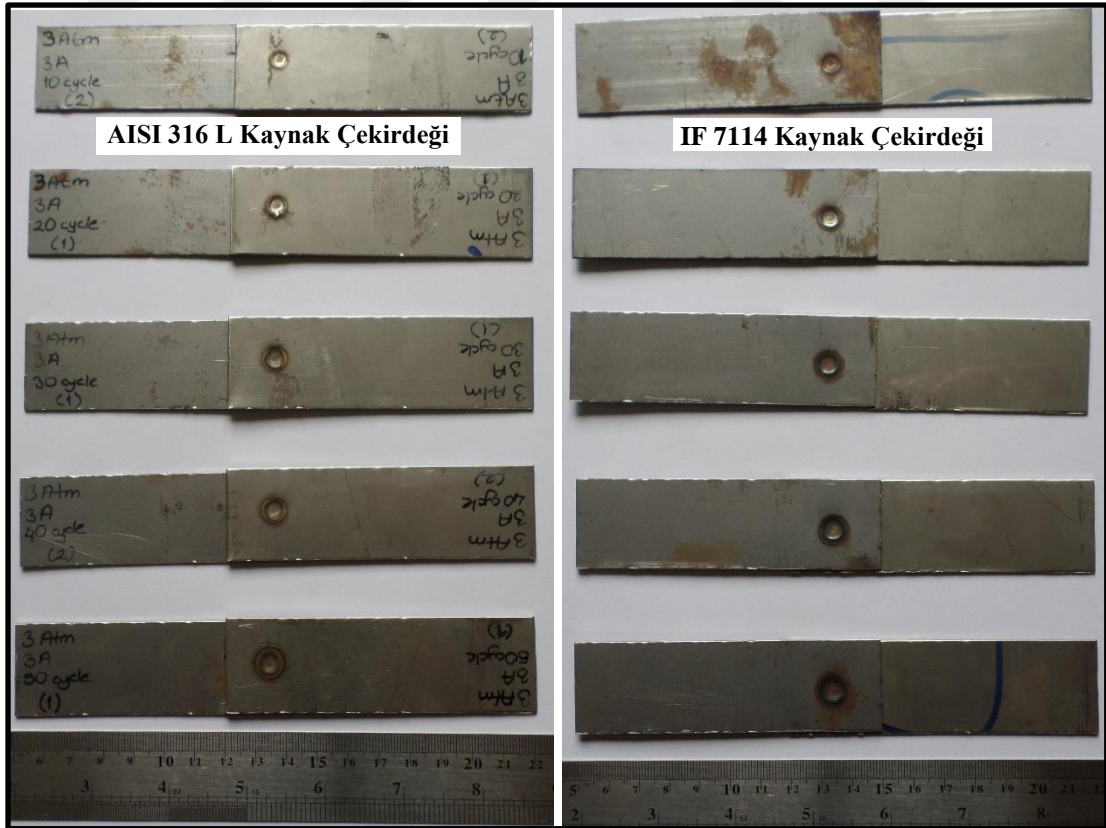
Birleştirme işlemlerinde kullanılacak AISI 316 L ve IF 7114 çeliklere uygulanan zımpara ve aseton işleminden sonra kaynaklı birleştirme standartına uygun olarak hazırlanan ahşap kalıba IF 7114 malzeme altta, AISI 316 L malzeme ise üstte kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Sonrasında bu kalıp elektrodlar arasına yerleştirilerek kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak esnasında parametrelere etkisi olan kompresör basıncı (elektrod kuvveti) ve kaynak çekirdeği morfolojine etkisi olan su akışı (bakır elektrodun ısı ile uç formunun bozulmamasını sağlayan) kontrol altında tutulmuştur. Kaynak işlemlerinde kullanılan parametreler Çizelge 6.4'te verilmiştir. Her bir parametreden 4'er adet (3 çekme-makaslama ve 1 mikroyapı/mikrosertlik) olmak üzere toplamda 160 adet kaynak işlemi gerçekleştirilmiş ve kaynak sonrası havada soğutulmuştur.

Çizelge 6.4. Kaynak işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri.

Elektrod kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (çevrim)					Sıkıştırma Zamanı (çevrim)	Ara Zaman (çevrim)	Tutma Zamanı (çevrim)
3	3	10	20	30	40	50	30	25	30
	5								
	7								
	9								
6	3	10	20	30	40	50	30	25	30
	5								
	7								
	9								

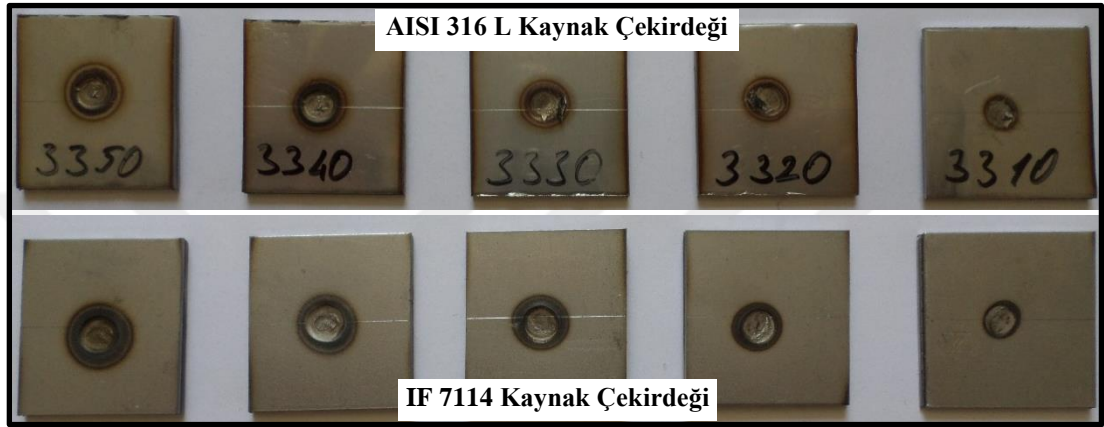
#### 6.4. TESTLER İÇİN NUMUNELERİNİN HAZIRLAMASI

170x30 mm boyutlarında, nokta direnç kaynaklı numune standartlarına uygun olarak elde edilen birleştirmelere örnek olması için 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak zamanlarında kaynaklanan numunelerin görüntüleri Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Kaynak işlemleri sonucunda elde edilen numuneler.

Kaynaklı numuneler üzerinde mikroyapı ve mikrosertlik çalışmaları yapılabilmesi için ise numunelerin 30x30 mm boyutlarındaki bindirme bölgesi (kaynak çekirdeği bölgesi) kesilerek alınmıştır (Şekil 6.5). Sonrasında ise 30x30 mm boyutlarındaki numuneler, kaynak çekirdeği merkezinden tekrar kesilerek numuneler (15x30 mm) mikroyapı ve mikrosertlik testlerinde kullanılması için hazırlanmıştır. Kesme işlemlerinde, bor yağlı soğutmalı Metkon Meta Cut 250 kesme makinası kullanılmıştır.



Şekil 6.5. Nokta direnç kaynaklı numunelerin bindirme bölgesi.

15x30 mm boyutlarında hazırlanan mikroyapı numuneleri bakalite alınmış ve daha sonra bu numunelere zımparalama ve parlatma (standart metalografik numune hazırlama) işlemleri uygulanmıştır. Mikroyapı çalışmalarından sonra aynı numuneler mikrosertlik ölçümlerinde de kullanılmıştır.

#### 6.4.1. Kaynak Çekirdek Çap ve Derinliklerinin Ölçümü

AISI 316 L ile IF 7114 çelik levhaların nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde kaynak parametrelerinden elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresinin etkisini incelemek amacıyla kaynak çekirdek çap ve derinlikleri ölçülmüştür. Kaynak çekirdek çapı ölçümlerinde dijital kumpas, çekirdek derinliği ölçümlerinde ise mikrometre kullanılmıştır.

#### 6.4.2. Çekme-Makaslama Deneyi

Nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 316 L ile IF 7114 çelik levhaların çekme-makaslama dayanımlarının belirlenmesi için Şekil 6.6'da görülen numuneye (170x30 boyutlarında), KBÜ Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka (5 ton) çekme cihazı kullanılarak çekme deneyleri yapılmıştır (Şekil 6.7). 40 farklı kaynak parametresi kullanılarak nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere, 2 mm/dk çekme hızında çekme-makaslama testi uygulanmıştır. Her bir parametreden 3'er adet çekme-makaslama testi yapılmış ve bu sonuçların ortalaması alınmıştır.



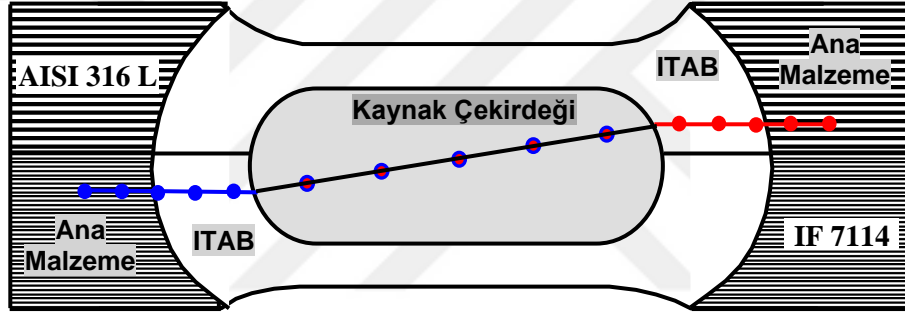
Şekil 6.6. Çekme-makaslama test numunesi.



Şekil 6.7. Çekme-makaslama testi cihazı.

### 6.4.3. Sertlik Testi

Farklı parametrelerle nokta direnç kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen AISI 316 L ile IF 7114 levha numunelerinin, kaynak bölgesi (kaynak çekirdeği ve ITAB) ve ana malzemeleri üzerindeki sertlik değişimlerini belirlemek için sertlik testleri yapılmıştır. Kaynaklı numuneler üzerindeki sertlik ölçümleri Şekil 6.8’de gösterildiği gibi AISI 316 L ve IF 7114 çelik saclarda yatay ekseninde birbirine paralel olarak 2’şer ana malzeme, 3’er ITAB ve 5 tane kaynak çekirdeği olmak üzere toplamda 15 noktada gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik deneyleri, KBÜ Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Malzeme Laboratuvarındaki Shimadzu HMV marka cihaz ile 500 g yük uygulanarak HV ( $HV_{0,5}$ ) cinsinden ölçülmüştür (Şekil 6.9).



Şekil 6.8. Kaynaklı numuneler üzerinde mikrosertlik ölçüm noktaları.



Şekil 6.9. Mikrosertlik ölçüm cihazı.

#### 6.4.4. Metalografik Muayene

AISI 316 L ile IF 7114 çelik saclar farklı parametreler kullanılarak nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş ve bu parametrelerin kaynak bölgesi (kaynak çekirdeği ve ITAB) tane yapısına etkilerinin incelenmesi amacıyla optik mikroskop çalışmaları yapılmıştır.

Bakalite alınan numuneler; sırasıyla 180, 320, 600, 1000 ve 1200 mesh'lik SiC su zımparası ile ve her zımpara değişiminde 90° çevrilerek zımparalanmıştır. Zımparalama işlemleri tamamlanan numunelere son olarak parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işlemleri, 3 µm'lik keçe ve 3 µm'lik elmas pasta kullanılarak Şekil 6.10'da görülen Mecapol P 262 marka parlatma cihazında yapılmıştır.

Parlatma işlemleri biten numuneler mikroyapı görüntülerinin alınabilmesi için dağlanmıştır. AISI 316 L tarafı %10 oksalit asit çözeltisinde ve elektrolitik olarak dağlanır iken IF 7114 tarafı ise %3 nitrik asit çözeltisinde dağlanmıştır. Dağlama işlemlerinden sonra numuneler, KBÜ Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında bulunan NIKON Epiphot 200 optik mikroskop ile görüntülenmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.10. Zımparalama ve parlatma cihazı.



Şekil 6.11. Optik mikroskop.

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

#### 7.1. KAYNAK ÇEKİRDEĞİ ÇAP VE DERİNLİĞİ ÖLÇÜMÜ

Farklı kaynak parametreleri (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı, 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak süresi) kullanarak nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelerin çekirdek çap (en ve boy) ve derinlikleri ölçülmüş ve kaynak parametrelerinin çekirdek çap ve derinliğine olan etkisi araştırılmıştır. Şekil 7.1’de AISI 316 L tarafı kaynak çekirdeği çap ve derinlikleri Şekil 7.2’de ise IF tarafı kaynak çekirdeği çap ve derinlikleri görüntü ve sayısal değer olarak verilmiştir. Ayrıca AISI 316 L tarafı çekirdek çapı grafikleri Şekil 7.3’te, çekirdek derinliği grafikleri Şekil 7.4’te ve IF 7114 tarafı çekirdek çapı grafikleri Şekil 7.5’te çekirdek derinliği grafikleri ise Şekil 7.6’da verilmiştir.

Almus (2006) titanyum ve düşük karbolu çelik sacların nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi konulu tez çalışmasında, optimum kaynak çekirdeği çapının; kaynak akımı ve zamanının ayarlanmasıyla elde edilebileceğini, kaynak süresinin kısa tutulması halinde kaynak çekirdeği çapının küçüleceğini, uzun tutulması halinde ise kaynak bölgesinde ergiyen hacmin artacağını ve ergiyiğin fişkıracığını bildirilmiştir.

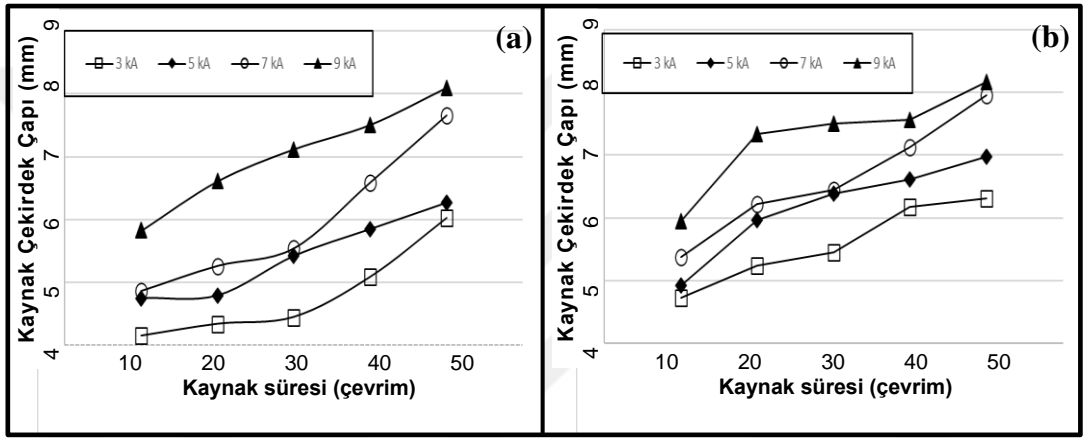
	10 çevrim	20 çevrim	Kaynak Zamanı 30 çevrim	40 çevrim	50 çevrim
3 kN Elektrod Kuvveti	3 kA Kaynak Akımı				
	4,15 mm 0,02 mm	4,34 mm 0,03 mm	4,45 mm 0,04 mm	5,09 mm 0,07 mm	6,03 mm 0,08 mm
	5 kA Kaynak Akımı				
	4,75 mm 0,06 mm	4,79 mm 0,11 mm	5,42 mm 0,15 mm	5,85 mm 0,27 mm	6,27 mm 0,36 mm
6 kN Elektrod Kuvveti	7 kA Kaynak Akımı				
	4,86 mm 0,11 mm	5,26 mm 0,21 mm	5,54 mm 0,24 mm	6,59 mm 0,32 mm	7,66 mm 0,46 mm
	9 kA Kaynak Akımı				
	5,82 mm 0,20 mm	6,61 mm 0,24 mm	7,12 mm 0,30 mm	7,51 mm 0,33 mm	8,10 mm 0,55 mm
3 kN Elektrod Kuvveti	3 kA Kaynak Akımı				
	4,73 mm 0,05 mm	5,24 mm 0,12 mm	5,45 mm 0,16 mm	6,17 mm 0,19 mm	6,31 mm 0,25 mm
	5 kA Kaynak Akımı				
	4,92 mm 0,11 mm	5,97 mm 0,23 mm	6,39 mm 0,28 mm	6,61 mm 0,32 mm	6,98 mm 0,39 mm
6 kN Elektrod Kuvveti	7 kA Kaynak Akımı				
	5,37 mm 0,19 mm	6,22 mm 0,26 mm	6,45 mm 0,36 mm	7,13 mm 0,41 mm	7,96 mm 0,51 mm
	9 kA Kaynak Akımı				
	5,95 mm 0,23 mm	7,34 mm 0,31 mm	7,51 mm 0,38 mm	7,57 mm 0,45 mm	8,17 mm 0,58 mm

Şekil 7.1. AISI 316 L tarafı kaynak çekirdeği çap ve derinlikleri.

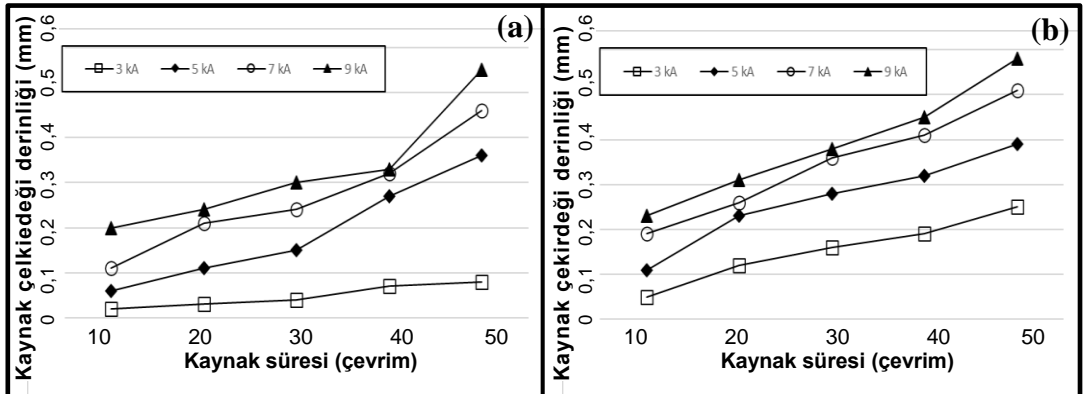
		Kaynak Zamanı				
		10 çevrim	20 çevrim	30 çevrim	40 çevrim	50 çevrim
3 kN Elektrod Kuvveti	3 kA Kaynak Akımı	4,87 mm 0,07 mm	5,12 mm 0,12 mm	5,30 mm 0,15 mm	5,47 mm 0,18 mm	6,81 mm 0,22 mm
	5 kA Kaynak Akımı	5,10 mm 0,16 mm	5,24 mm 0,22 mm	5,74 mm 0,24 mm	6,70 mm 0,30 mm	6,95 mm 0,37 mm
	7 kA Kaynak Akımı	5,15 mm 0,21 mm	5,59 mm 0,34 mm	6,29 mm 0,39 mm	7,03 mm 0,43 mm	8,02 mm 0,51 mm
	9 kA Kaynak Akımı	6,72 mm 0,36 mm	7,64 mm 0,41 mm	7,86 mm 0,46 mm	8,18 mm 0,51 mm	8,41 mm 0,59 mm
	3 kA Kaynak Akımı	5,18 mm 0,17 mm	5,69 mm 0,20 mm	6,36 mm 0,23 mm	6,48 mm 0,26 mm	6,92 mm 0,35 mm
6 kN Elektrod Kuvveti	5 kA Kaynak Akımı	5,33 mm 0,20 mm	6,88 mm 0,26 mm	7,12 mm 0,30 mm	7,43 mm 0,38 mm	7,51 mm 0,43 mm
	7 kA Kaynak Akımı	5,59 mm 0,32 mm	7,04 mm 0,43 mm	7,28 mm 0,45 mm	7,57 mm 0,50 mm	8,14 mm 0,61 mm
	9 kA Kaynak Akımı	7,41 mm 0,39 mm	7,73 mm 0,45 mm	7,99 mm 0,48 mm	8,21 mm 0,53 mm	8,49 mm 0,65 mm

Şekil 7.2. IF 7114 tarafı kaynak çekirdeği çap ve derinlikleri.

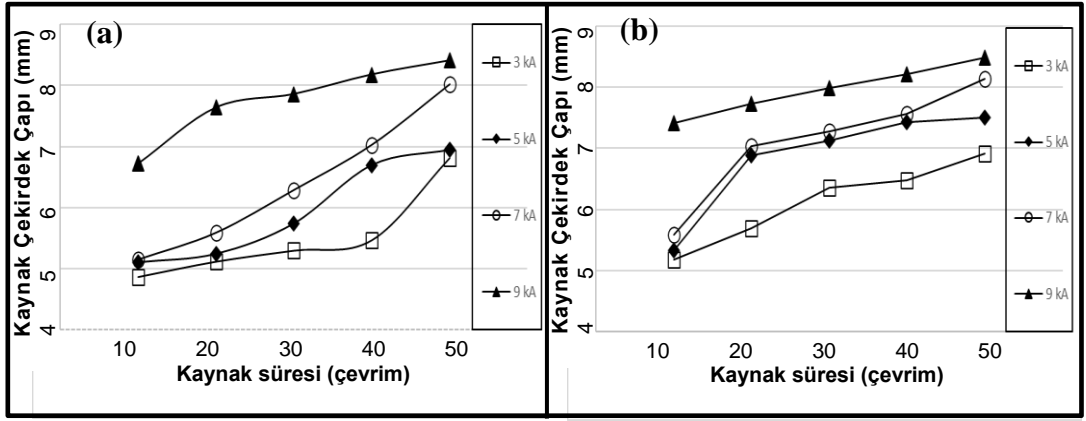
Şekil 7.1 ve 7.2 incelendiğinde; en büyük kaynak çekirdeği çapı (yatayda) ve derinliğinin (dikeyde), 6 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde AISI 316 L tarafında 8,17 mm kaynak çekirdek çapı ve 0,58 mm derinliği, IF 7114 tarafında ise 8,49 mm kaynak çekirdek çapı ve 0,65 mm derinliği olarak ölçülmüştür. En küçük kaynak çekirdek çapı ve derinliği ise, 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde AISI 316 L tarafında 4,15 mm kaynak çekirdek çapı ve 0,02 mm derinliği, IF 7114 tarafında ise 4,87 mm kaynak çekirdek çapı ve 0,07 mm derinliği olarak belirlenmiştir.



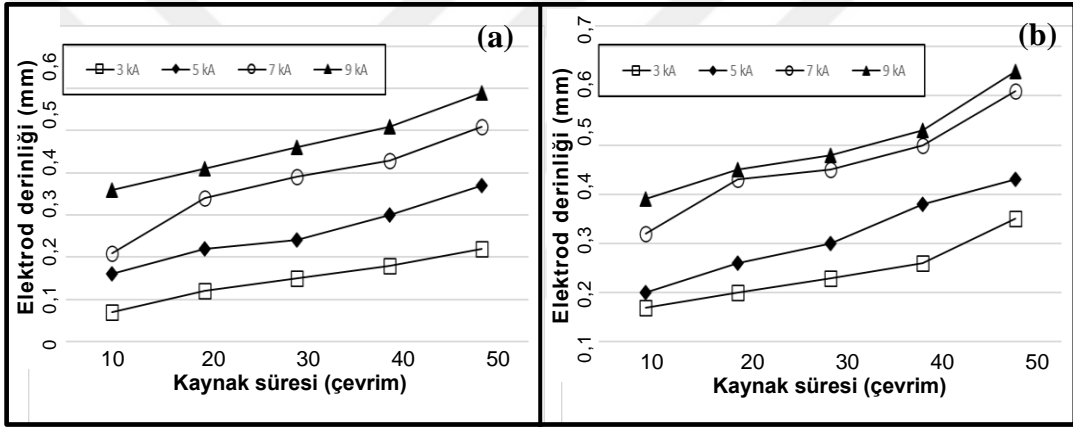
Şekil 7.3. AISI 316 L tarafı kaynak çekirdeği çapı grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti.



Şekil 7.4. AISI 316 L tarafı kaynak çekirdeği derinliği grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti.



Şekil 7.5. IF 7114 tarafı kaynak çekirdeği çapı grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti.



Şekil 7.6. IF 7114 tarafı kaynak çekirdeği derinliği grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti.

Şekil 7.1 ve 7.2'deki veriler, Şekil 7.3-7.6'daki grafikler incelendiğinde; 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin kaynak çekirdeği çapları (AISI 316 L tarafı) 4,45 mm/(IF 7114 tarafı) 5,30 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,04 mm/(IF 7114) 0,15 mm olarak ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit elektrod kuvveti arttırıldığında; 6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekirdek çapları (AISI 316 L) 5,45 mm/(IF 7114) 6,36 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,16 mm/(IF 7114) 0,23 mm olarak belirlenmiştir.

3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin kaynak çekirdeği çapları (AISI 316 L tarafı) 6,03

mm/(IF 7114 tarafı) 6,81 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,08 mm/(IF 7114) 0,22 mm olarak ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit kaynak akımı artırıldığında; 3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekirdek çapları (AISI 316 L) 6,27 mm/(IF 7114) 6,95 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,36 mm/(IF 7114) 0,37 mm olarak ölçülürken, 3 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekirdek çapları (AISI 316 L) 7,66 mm/(IF 7114) 8,02 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,46 mm/(IF 7114) 0,51 mm olarak ölçülürken, 3 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekirdek çapları ise (AISI 316 L) 8,10 mm/(IF 7114) 8,41 mm ve derinlikleri ise (AISI 316 L) 0,55 mm/(IF 7114) 0,59 mm olarak ölçülmüştür.

6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin kaynak çekirdeği çapları (AISI 316 L tarafı) 4,73 mm/(IF 7114 tarafı) 5,18 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,05 mm/(IF 7114) 0,17 mm olarak ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit kaynak süresi artırıldığında; 6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekirdek çapları (AISI 316 L) 5,24 mm/(IF 7114) 5,69 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,12 mm/(IF 7114) 0,20 mm olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekirdek çapları (AISI 316 L) 5,45 mm/(IF 7114) 6,36 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,16 mm/(IF 7114) 0,23 mm olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekirdek çapları (AISI 316 L) 6,17 mm/(IF 7114) 6,48 mm ve derinlikleri (AISI 316 L) 0,19 mm/(IF 7114) 0,26 mm olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekirdek çapları ise (AISI 316 L) 6,31 mm/(IF 7114) 6,92 mm ve derinlikleri ise (AISI 316 L) 0,25 mm/(IF 7114) 0,59 mm olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak bütün parametreler incelediğinde, AISI 316 L-IF 7114 çelik sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde; elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresinin artması ile ısı girdisinin arttığı buna bağlı olarak da her iki tarafta da kaynak çekirdeği çapı ve derinliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Ayrıca; nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 316 L- IF 7114 numunelerin IF 7114 çeliği tarafındaki kaynak çekirdeği çap ve derinliğinin AISI 316 L paslanmaz çelik tarafı ile kıyaslandığında tüm parametrelerde de daha büyük olduğu belirlenmiştir. IF 7114 çeliği tarafı kaynak çekirdeği çap ve derinliğinin tüm parametrelerde de AISI 316 L tarafına göre büyük olmasının sebebi olarak, malzemelerin farklı ısı iletim katsayılarına sahip olması gösterilebilir. Kaynak işlemleri sırasında ısının, ısı iletim katsayısı yüksek olan IF 7114 çeliği tarafında yoğunlaşmasıyla ısı iletim katsayısı düşük olan AISI 316 L paslanmaz çeliği tarafına oranla daha büyük kaynak çekirdek çapı ve derinliğine sebep olduğu düşünülmektedir.

Çalık (2004) AISI 316-AISI 4140 (düşük alaşımlı ıslah çeliği) çelikleri elektron ışın kaynağı ile, Kaya vd. (2012) AISI 430-düşük karbonlu çelikleri TIG, MIG ve elektrik ark kaynak yöntemleri ile birleştirmişler ve kaynak bölgesi kesiti incelendiğinde, paslanmaz çelik tarafında düşük karbonlu çelik tarafına göre ergime oranının düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Hasanbaşoğlu (2005) 7114 IF çeliği ile AISI 304 ve AISI 316 L östenitik paslanmaz çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynaklı birleştirmelerde kaynak akımı artışına bağlı olarak artan ısı girdisiyle, kaynak çekirdeği boyutları ve birleştirme arayüzey kesit kalınlığı da arttığı bildirilmiştir. Ayrıca IF çeliği tarafındaki kaynak çekirdek buyutunun AISI 304 ve AISI 316 L paslanmaz çelikleri tarafına oranla daha büyük olduğunu bunun sebebinin ise farklı ısı iletim katsayıları (IF ısı iletim katsayısının paslanmazların ısı iletim katsayısına oranla yüksek olması) ve IF tarafı (9 mm) elektrodunun paslanmaz çelikler tarafına (8 mm) oranla daha büyük olmasından kaynaklandığını rapor etmiştir.

Hasanbaşoğlu ve Kaçar (2007) IF 7114 ve AISI 316 L çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile (ısıl iletkenlik farkından dolayı 316 L tarafında 8 mm ve IF tarafında 9 mm elektrod çapı ile) birleştirmişler ve kaynak akımındaki artmaya paralel olarak çekirdek çapında artma oluştuğunu ve kaynak çekirdeğinin IF çeliği bölümünde östenitik paslanmaz çelik bölümüne göre daha fazla çap artışı olduğunu rapor etmişlerdir.

Vural ve Akkuş (2004), galvanizli arayer atomsuz çelik levhalar ile östenitik paslanmaz çelik levhaları nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirmişler ve kaynak akımı arttırıldığında kritik akım değerine kadar kaynak çekirdeği çapı arttığını, fakat kritik akım değeri geçildikten sonra, ara yüzeyde aşırı metal ergimesi ve sıçramasından dolayı, kaynak çekirdeği çapı azaldığını tespit etmişlerdir.

Nokta direnç kaynağının kullanıldığı farklı çalışmalarda da Kocabekir vd (2008) (316 L) artan kaynak zamanı ile ısı girişi arttığı ve buna paralel olarak da çekirdek boyutunda da artış olduğunu, Amadeh vd. (2014) (AISI 316 L) artan kaynak akımı ile kaynak çekirdek boyutunda artış meydana geldiğini, Özyürek (2008) (316) kaynak akımı artmasıyla çekirdek boyutunun da arttığını, Fukumoto vd. (2008) (302, 304, 310S, 316L ve 347) kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile çekirdek boyutunun arttığını, Baydemir (2011) (AISI 430 ve AISI 310) artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile kaynak çekirdeği çapı ve elektrot dalma derinliği arttığını, Mutlusu ve Ertan (2020) (IF 180- Grade 2 Ti ve IF 180-AA 5754) ve Mutlusu (2019) (IF 180-Grade 2 Ti ve IF180-AA 5754) her iki birleştirmede de kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği büyük ölçüde etki ettiğini, Hayat vd. (2009) (IF) kaynak akımı ve/veya kaynak süresi artması ile kaynak çekirdeği çapının arttığını, Hayat (2011) (BH 180-AISI 304 L ve BH 180-IF 7123) BH 180-AISI 304 L birleştirmelerde artan kaynak süresi ile, ısı girdisinin daha hızlı bir artışı gösterdiği, kaynak çekirdeği ve ITAB'ın her numune için farklı oranlarda arttığı özellikle AISI 304 L çelik tarafında kaynak çekirdeği boyutunun daha düşük olduğunu, Hayat vd. (2010) (7315 IF) kaynak süresinin ve/veya kaynak akımının artmasıyla birlikte kaynak çekirdek çapı arttığını bildirmişlerdir.

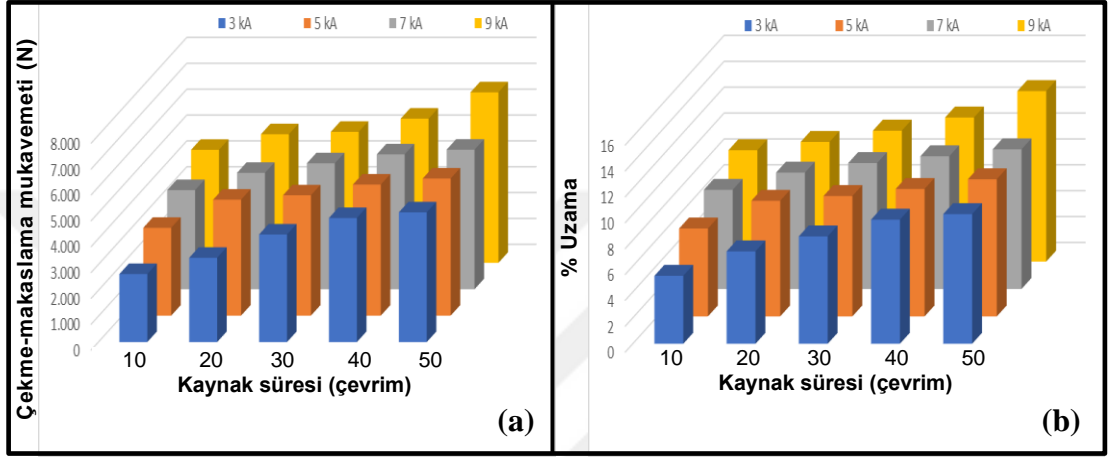
## **7.2. ÇEKME-MAKASLAMA TESTİ VE KIRILMA TİPİ İNCELEMESİ**

Elektrod kuvveti (3 ve 6 kN), kaynak akımı (3, 5, 7 ve 9 kA) ve kaynak süresi (10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim) olmak üzere toplamda 40 farklı kaynak parametresi kullanarak nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunelere çekme-makaslama testleri uygulanmış ve kullanılan farklı kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çizelge 7.1'de çekme-makaslama testi sonuçları, Şekil 7.7 ve 7.8 de ise grafikleri verilmiştir.

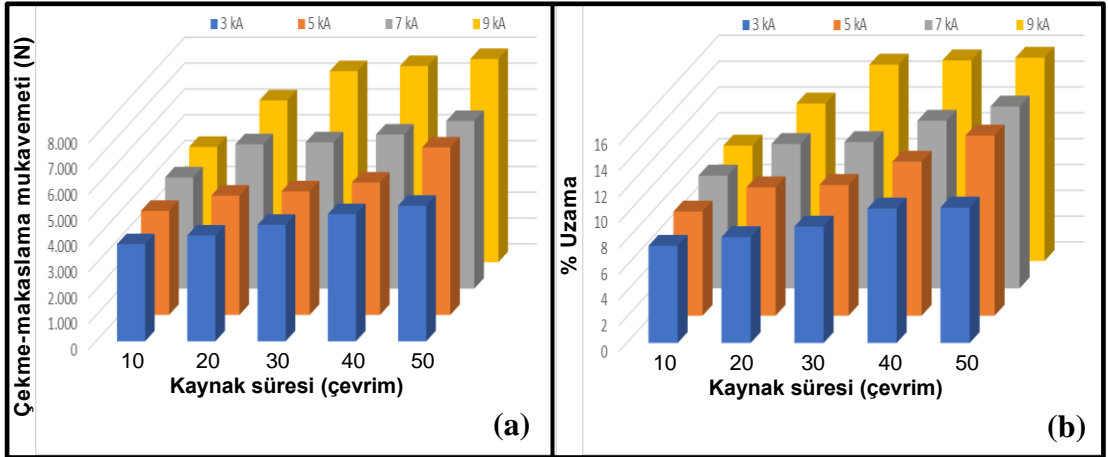
Çizelge 7.1 Çekme-makaslama testi sonuçları.

Elektrod Kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Süresi (çevrim)	Çekme-makaslama Mukavemeti (N)	Uzama (%)
3	3	10	2.629	5,25
		20	3.259	7,14
		30	4.159	8,30
		40	4.797	9,59
		50	5.014	10,02
	5	10	3.396	6,79
		20	4.482	8,93
		30	4.652	9,30
		40	5.066	9,85
		50	5.301	10,60
	7	10	3.831	7,66
		20	4.498	8,99
		30	4.869	9,73
		40	5.214	10,26
		50	5.396	10,79
	9	10	4.368	8,61
		20	4.970	9,25
		30	5.062	10,12
		40	5.572	11,14
		50	6.593	13,18
6	3	10	3.766	7,53
		20	4.101	8,20
		30	4.512	9,02
		40	4.925	10,42
		50	5.254	10,50
	5	10	4.036	8,07
		20	4.626	9,94
		30	4.792	10,13
		40	5.130	11,93
		50	6.490	13,95
	7	10	4.309	8,73
		20	5.594	11,18
		30	5.665	11,33
		40	5.967	12,98
		50	6.494	14,08
	9	10	4.472	8,94
		20	6.271	12,20
		30	7.403	15,21
		40	7.605	15,54
		50	7.877	15,75

Çizelge 7.1 incelendiğinde, en yüksek çekme-makaslama mukavemeti 7.877 N ile 6 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek % uzama miktarı 17,75 ile aynı parametreden elde edilmiştir. En düşük çekme-makaslama mukavemeti ise 3.396 N ile 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinden elde edilirken, en düşük % uzama miktarı da 6,79 ile aynı parametreden elde edilmiştir.



Şekil 7.7. 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme testi grafikleri; a) çekme-makaslama, b) % uzama.



Şekil 7.8. 6 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme testi grafikleri; a) çekme-makaslama, b) % uzama.

Çizelge 7.1'deki veriler, Şekil 7.7-7.8'deki grafikler incelendiğinde; 3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin çekme-makaslama mukavemeti 4.482 N ve % uzaması 8,93 olarak

ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit elektrod kuvveti arttırıldığında; 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 4.626 N ve % uzaması 9,94 olarak belirlenmiştir.

6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin çekme-makaslama mukavemeti 4.925 N ve % uzaması 10,42 olarak ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit kaynak akımı arttırıldığında; 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 5.130 N ve % uzaması 11,93 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 5.967 N ve % uzaması 12,98 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 7.605 N ve % uzaması ise 15,54 olarak ölçülmüştür.

3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin çekme-makaslama mukavemeti 3.396 N ve % uzaması 6,79 olarak ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit kaynak süresi arttırıldığında; 3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 4.482 N ve % uzaması 8,93 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 4.652 N ve % uzaması 9,30 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 5.066 N ve % uzaması 9,85 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 5.301 N ve % uzaması ise 10,60 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.1'deki veriler, Şekil 7.7-7.8'deki grafikler genel olarak incelendiğinde, kaynak işlemlerinde kullanılan parametrelerin (elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi) artmasıyla birlikte çekme-makaslama mukavemeti ve % uzama değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak ise elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi artmasıyla kaynak bölgesi ısı girdisinin arttığı buna bağlı olarak

da çekirdek çapı ve derinliğinin de artmasıyla birleştirmelerin çekme-makaslama mukavemetlerinin de arttığı belirlenmiştir.

Gourd (1996) nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin bağlantı dayanımlarında (çekme-makaslama mukavemetlerinde) elektrod baskı kuvvetinin etkisi olduğunu rapor etmiştir. Kaya (2010) nokta direnç kaynak yönteminde kaynak bölgesi ısı girdisinin  $Q=I^2.R.t$  formülüyle hesaplandığını, bu formülde  $I$ 'nin iş parçasından geçen akımı,  $R$ 'nin toplam direnci ve  $t$ 'nin ise kaynak süresini ifade ettiğini bildirmiştir. Ayrıca elektrod kuvvetinin artmasıyla,  $R$  toplam direncinin azalacağını, iş parçasından geçen akımın artacağını ve dolayısıyla ısı girdisinin de artacağını, sonuç olarak ise ısı girdisi artışıyla, kaynak çekirdeği çapının artacağını ve dolayısıyla kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama mukavemetlerinin de artışına sebep olacağını rapor etmiştir.

Hasanbaşoğlu (2005) IF 7114 çeliği ile AISI 304 ve AISI 316 L östenitik paslanmaz çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak akımı artışına bağlı olarak artan ısı girdisiyle, kaynak çekirdeği boyutları ve birleştirme arayüzey kesit kalınlığının arttığı, artan kaynak akımı ile birleştirme çekme-makaslama dayanımının da arttığını bildirmiştir.

Hasanbaşoğlu ve Kaçar (2007) IF 7114 ve AISI 316 L östenitik paslanmaz çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak akımındaki artmaya paralel olarak çekirdek çapında artma oluştuğunu ve bu artışa bağlı olarak da birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımında artış meydana geldiğini rapor etmişlerdir.

Vural ve Akkuş (2004), galvanizli arayer atomsuz çelik levhalar ile östenitik paslanmaz çelik levhaları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak akımı arttırıldığında kritik akım değerine kadar kaynak çekirdeği çapı arttığı, kaynak çekirdeği çapı arttıkça çekme-makaslama mukavemetinin de arttığını bildirilmişlerdir.

Nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirme yapılan farklı çalışmalarda da; Haetham vd. (2021) (AISI 316 L) yüksek kaliteli ve mukavemetli bir kaynak bağlantısı için elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi parametrelerinin optimize edilmesi

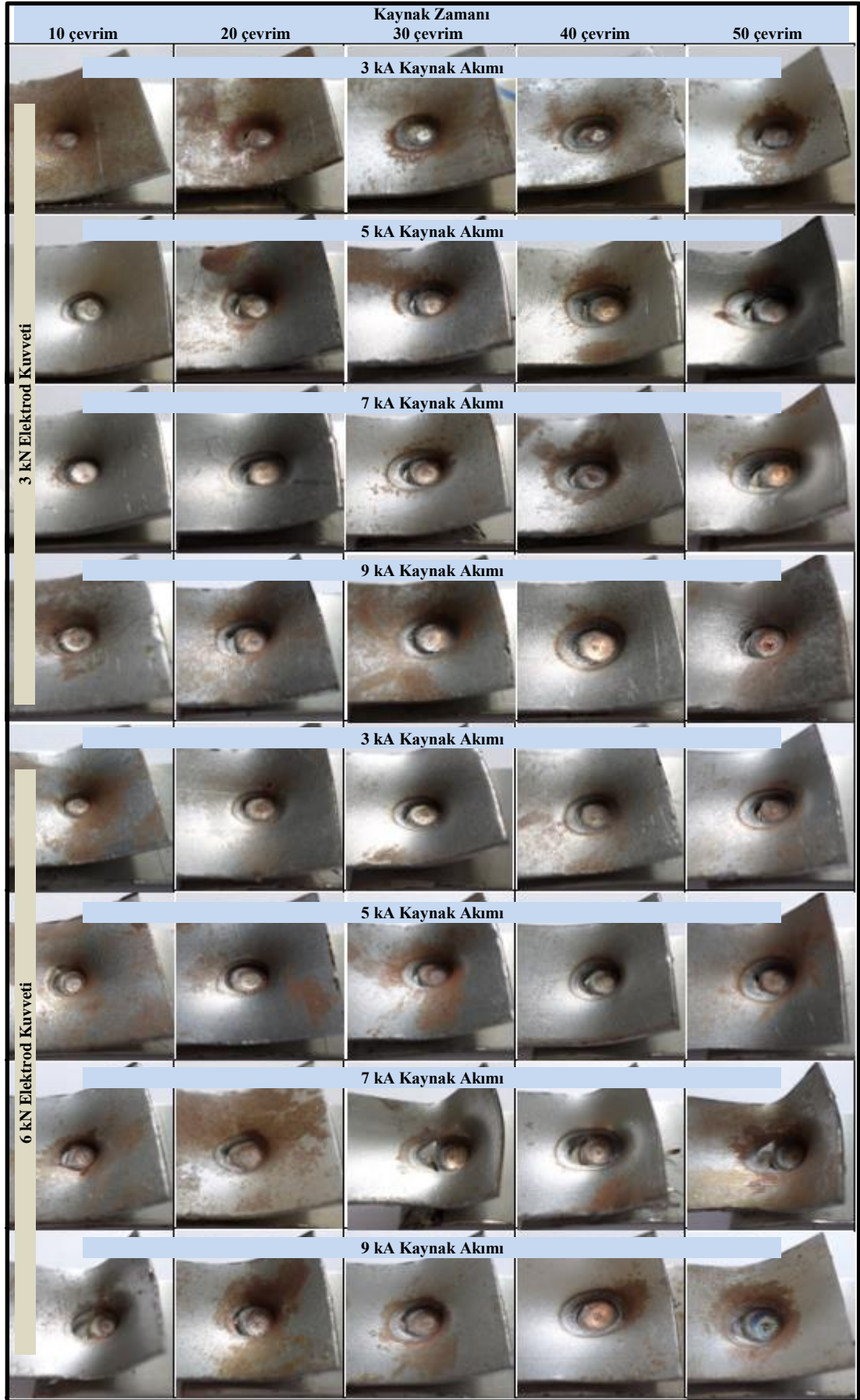
gerektiğini, Mutlusu ve Ertan (2020) ve Mutlusu (2019) (IF 180-Grade 2 Ti ve IF 180-AA5754) her iki birleştirmede de kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği ve çekme-makaslama dayanımına büyük ölçüde etki ettiğini bildirmişlerdir.

Baydemir (2011) (AISI 430 ferritik ve AISI 310) artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile kaynak çekirdeği çapı ve elektrod dalma derinliğinin arttığı, buna bağlı olarak da çekme-makaslama mukavemetinin arttığını, Hayat vd. (2009) (IF) kaynak akımı ve/veya kaynak süresi artması ile kaynak çekirdeği çapının arttığı ve böylece çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımlarının arttığını, Hayat vd. (2010) (7315 IF) kaynak süresinin ve/veya kaynak akımının artmasıyla birlikte kaynak çekirdek çapının arttığı buna bağlı olarak ise nokta kaynaklı numunelerin çekme-makaslama dayanımının da arttığını rapor etmişlerdir.

Amadeh vd. (2014) (AISI 316 L) artan kaynak akımı ile kaynak çekirdek boyutundaki artışlar nedeniyle çekme-makaslama dayanımında artış olduğunu, Özyürek (2008) (316 L) kaynak akımı arttırıldığında çekirdek boyutunun arttığı, buna bağlı olarak bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarında artış meydana geldiğini, Fukumoto vd. (2008) (302, 304, 310S, 316L ve 347) kaynak akımı artışıyla çekirdek gelişmesinden dolayı makaslama gücünün de arttığını bildirmişlerdir.

Kocabekir vd. (2008) (316 L östenitik paslanmaz çelik) kaynak zamanı ile ilgili olarak ısı girdisi artışıyla artan çekirdek boyutu nedeni ile kaynaklı parçaların çekme-makaslama dayanımında da artış olduğunu, Taufiqurrahman vd. (2021) (316 L-Ti6Al4V) artan tutma süresinin çekme mukavemetini de önemli ölçüde iyileştirdiği ve kaynaklı bağlantının boşluğunu ortadan kaldırdığını, Hayat (2011) (BH 180-AISI 304 L ve BH 180-IF 7123) kaynak zamanı artışına bağlı olarak artan ısı girdisi ile kaynak çekirdeği çapının arttığını ve kaynak zamanının artmasıyla birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımlarının da arttığını rapor etmişlerdir.

Şekil 7.9’de nokta direnç kaynak yöntemiyle farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiş AISI 316 L-IF 7114 çelik numunelerin çekme-makaslama testleri sonucu kaynak bölgesi kopma görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.9. Çekme-makaslama testi sonucu kaynak bölgesi kopma görüntüleri.

Şekil 7.9 incelendiğinde, nokta direnç kaynaklı AISI 316 L-IF 7114 çeliklere uygulanan çekme-makaslama testleri sonrasında tüm numunelerde kopma, daha düşük mukavemete sahip olan IF 7114 çelik tarafında meydana gelmiştir. Çizelge 6.2’de deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 316 L mukavemetinin  $539 \text{ N/mm}^2$  ve IF 7114 mukavemetinin ise  $270-350 \text{ N/mm}^2$  olduğu görülmektedir. Kullanılan çelik malzemelerin mukavemetleri incelendiğinde, kopmanın IF 7114 çelik malzemede meydana gelmesi beklenen bir durumdur. Ayrıca Şekil 7.9’daki fotoğraflar incelendiğinde, birleştirmelerin tümünde kopmanın IF çeliği tarafında ve ITAB tane irileşmesi bölgesinden başladığı tespit edilmiştir.

Hasanbaşoğlu (2005) (IF 7114-AISI 304 ve IF 7114-AISI 316 L), Hasanbaşoğlu ve Kaçar (2007) (IF 7114 ve AISI 316 L) ve Hasanbaşoğlu vd. (2005) (AISI 304 ve IF 7114) arayer atomsuz IF çeliği ve östenitik paslanmaz çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve birleştirilen numunelere uygulanan çekme-makaslama testleri sonrasında ise IF çeliği ITAB’ında meydana gelen tane irileşmesinden dolayı en zayıf bölge olduğunu, tüm şartlar ve kaynak parametrelerinde kopmanın IF çeliği tarafında meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Ek olarak, çekme-makaslama testi sonucu kopma tipleri (Şekil 7.9) incelenerek, farklı kaynak parametrelerinin (elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi) kopma tipine etkisi araştırılmıştır.

Hayat vd (2009) nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama testleri sonucunda; ayrılma, düğme ve yırtılma tipi olmak üzere üç farklı kopma tipinin olduğunu bildirmiştir.

Aslanlar vd (2008) düğme tip kopmada, kaynak süresi artmasıyla ısı girdisinin arttığını, buna paralel olarak da kaynak çekirdeği çapının arttığını ve çekme-makaslama mukavemetinin de arttığını, bunun ise kullanılan kaynak parametrelerinin uygun olduğunu gösterdiğini ifade etmiştir. Düğme tipi kopma, nokta direnç kaynaklı numunelerde istenilen bir kopma tipidir.

Aslanlar vd (2007) ayrılma tip kopmada, düşük kaynak akımı sebebi ile düşük ısı girdisi meydana geldiğini, buna paralel olarak da yetersiz kaynak çekirdeği çapı ve çekme-makaslama mukavemetinin de ana malzeme mukavemetinden daha az olduğunu, bunun ise kullanılan kaynak parametrelerinin yetersiz olduğunu gösterdiğini bildirilmişlerdir.

Aslanlar vd (2008) yırtılma tip kopmada, aşırı kaynak akımı artışı sebebi ile aşırı ısı girdisi meydana geldiğini, buna paralel olarak da aşırı ergime ve fışkırma oluştuğu ve çekme-makaslama mukavemetinde azalma olduğunu, bunun ise kullanılan kaynak parametrelerinin aşırı olduğunu gösterdiği tespit etmişlerdir. Ayrılma ve yırtılma tipi kopmalar, nokta direnç kaynaklı numunelerde istenilmeyen kopma tipleridir.

Çalışmamızda, kaynak işlemlerinden önce kullanılacak parametreleri belirlemek için ön testler yapıldığı için nokta direnç kaynaklı numunelerin çekme-makaslama testleri sonucunda ayrılma ve yırtılma tipi kopmalar olmamış, bütün parametrelerde de düğme tipi kopma meydana gelmiştir. Çekme-makaslama testleri sonucunda, kaynak çekirdeği çekme-makaslama mukavemetinin, IF 7114 malzeme (AISI 316 L-IF 7114 numunelerde kopma tüm parametrelerde de IF çeliği tarafında meydana gelmiştir.) çekme-makaslama mukavemetinden daha yüksek olması sebebi ile düğme tipi kopma meydana gelmiştir. Nokta direnç kaynaklı numunelerde, düğme tipi kopma istenilen bir kopma tipi olmasından dolayı ön testlerle belirlenerek seçilen ve kullanılan kaynak parametrelerinin uygun olduğu söylenebilir.

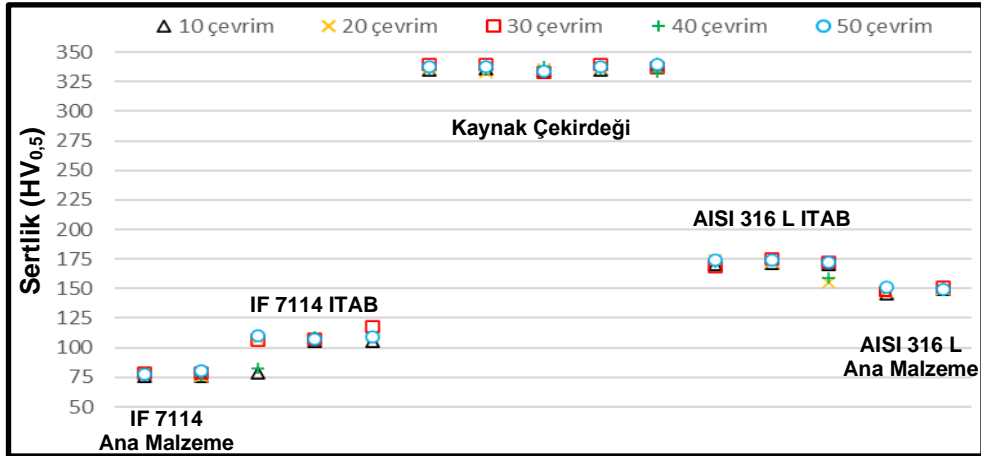
Nokta direnç kaynaklı farklı malzemelerin çekme-makaslama testleri sonucunda; Hayat (2005) (çift-fazlı çelikler) 10 çevrim kaynak süresinde ısı girdisinin düşük olması sebebiyle kaynak çekirdek çapının küçük olduğu, buna paralel olarak ise çekme-makaslama mukavemetinin de düşük olması sonucu ayrılma tip kopma meydana geldiği, kaynak akımı ve kaynak süresinin arttırılmasıyla ısı girdisinin arttığı, buna paralel olarak ise çekme-makaslama mukavemetinin de artması sonucunda düğme tip (malzemedan yırtılma) kopma meydana geldiği, başka bir çalışmasında ise Hayat (2009) (IF çeliği) düşük kaynak akımı ve kaynak süresinde ayrılma tip kopmanın meydana geldiği, kaynak akımı ve kaynak süresinin artmasıyla ise düğme tip kopmanın meydana geldiği bildirilmiştir. Ayrıca, Kaya (2010) (titanyum) kaynak

işlemleri öncesinde kullanılacak parametreleri belirlemek için ön testler yapıldığını ve bunun sonucunda ise kullanılan bütün parametrelerde de düğme tipi kopmanın meydana geldiğini rapor etmiştir.

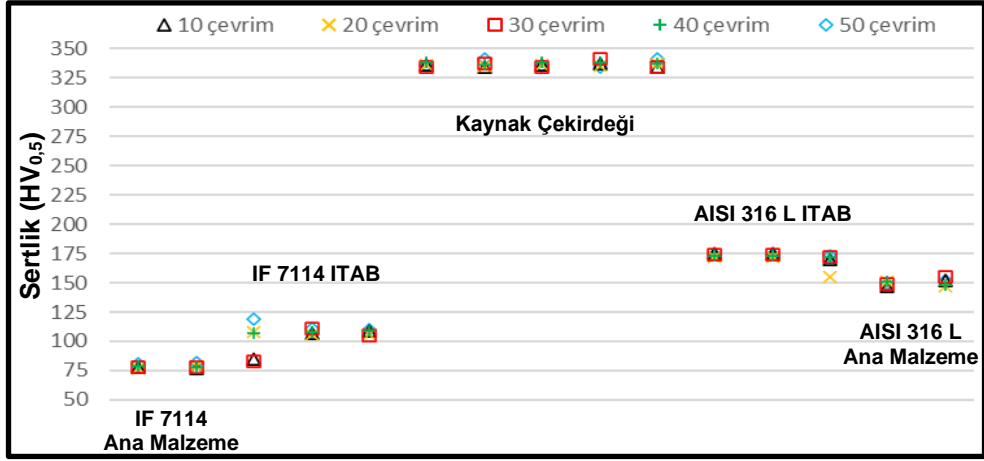
### 7.3. SERTLİK İNCELEMELERİ

Nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametreleri (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı, 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak zamanı) kullanılarak birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 çelik malzemelerin (ana malzemeler, ITAB'ları ve kaynak çekirdeği) sertlik değişimlerini incelemek için kaynaklı numunelere sertlik testleri uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri Şekil 6.8'de gösterildiği gibi AISI 316 L ve IF 7114 çelik saclarda yatay eksende birbirine paralel olarak toplamda 15 noktada (Ana malzemeler 4, ITAB 6 ve kaynak çekirdeği 5 nokta) yapılmıştır.

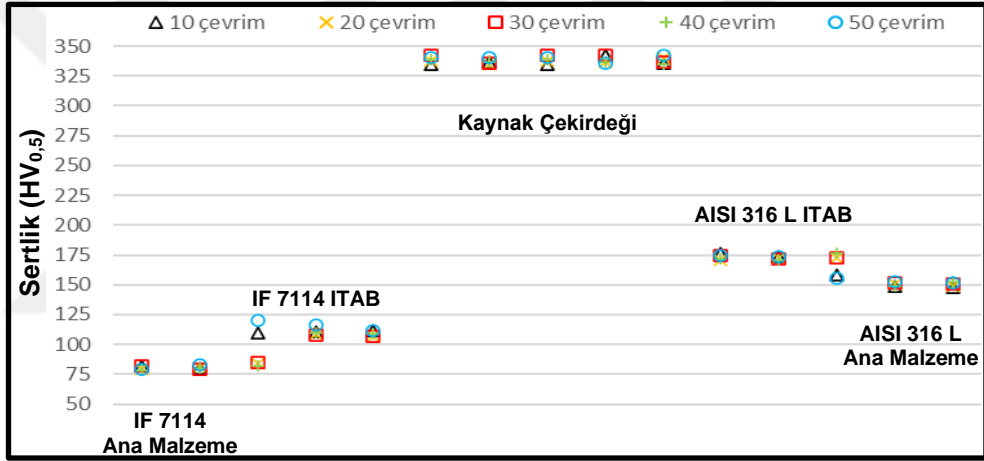
3 kN kaynak kuvvetinde gerçekleştirilen sertlik sonuçları sırasıyla 7.10-7.13 ve 6 kN kaynak kuvvetinde gerçekleştirilen sertlik sonuçları sırasıyla 7.14-7.17'de verilmiştir.



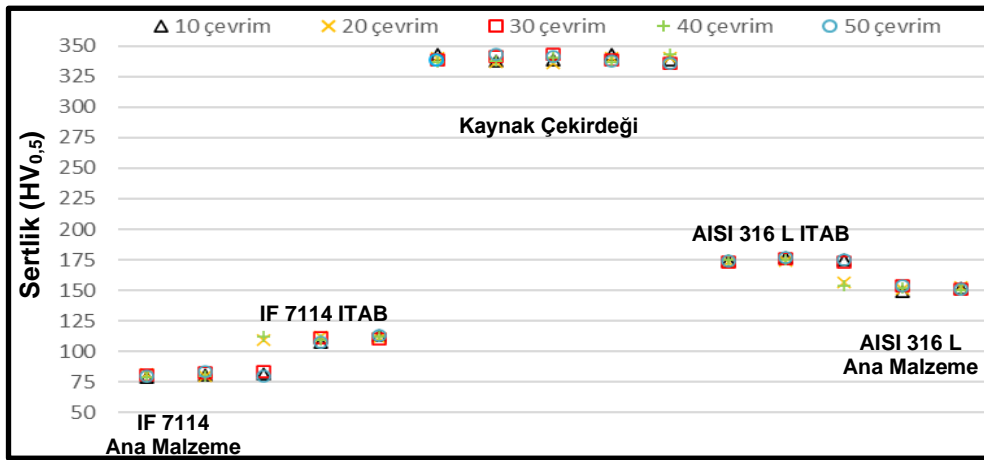
Şekil 7.10. 3 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



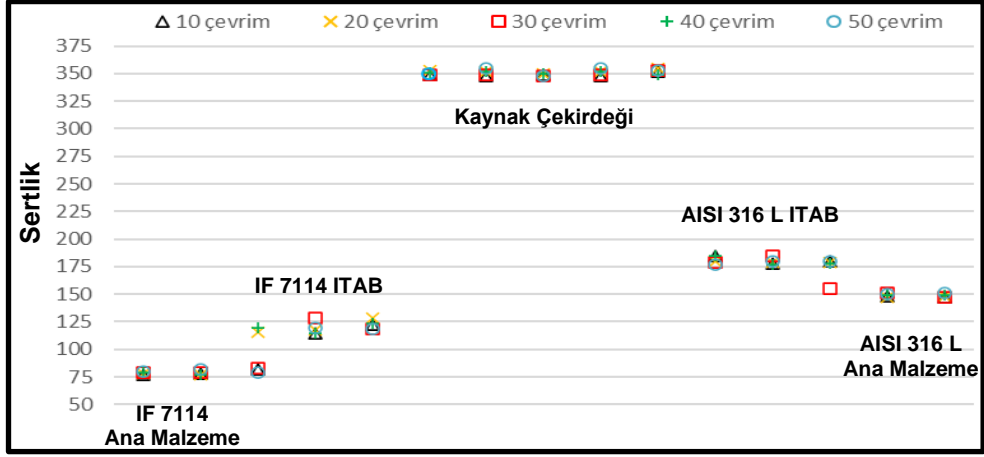
Şekil 7.11. 3 kN elektrod kuvveti ve 5 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



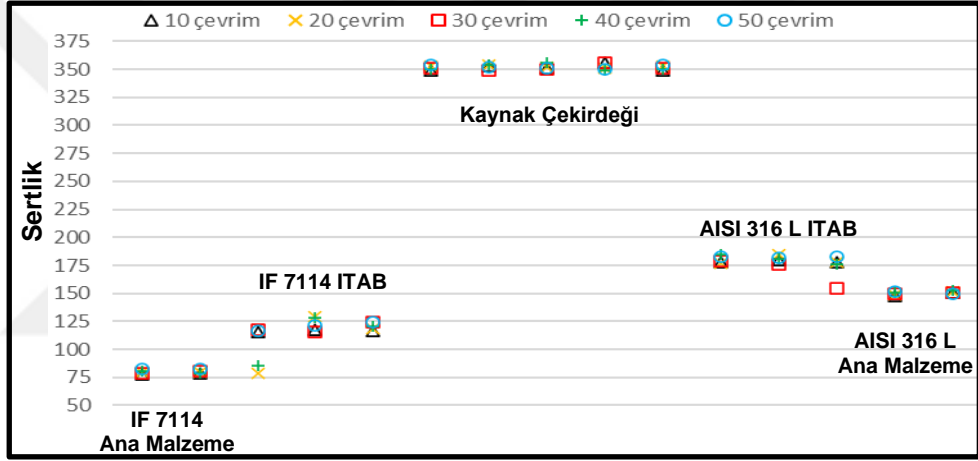
Şekil 7.12. 3 kN elektrod kuvveti ve 7 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



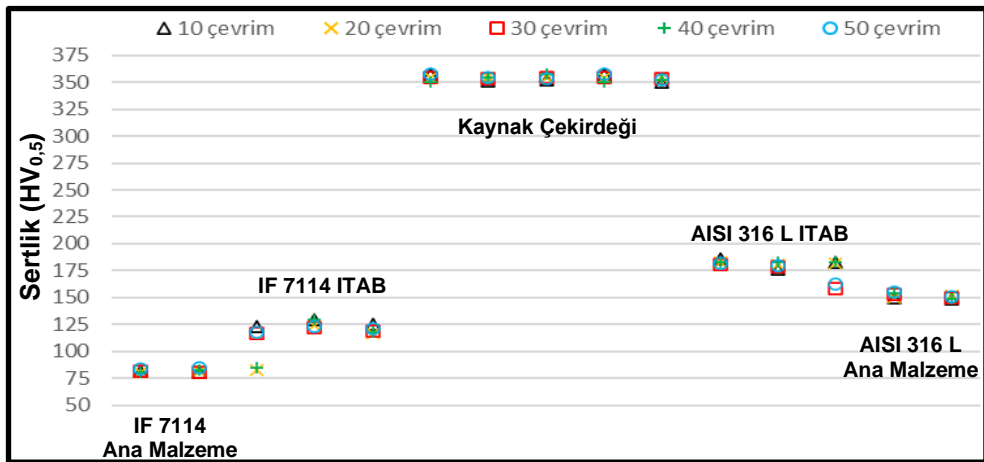
Şekil 7.13. 3 kN elektrod kuvveti ve 9 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



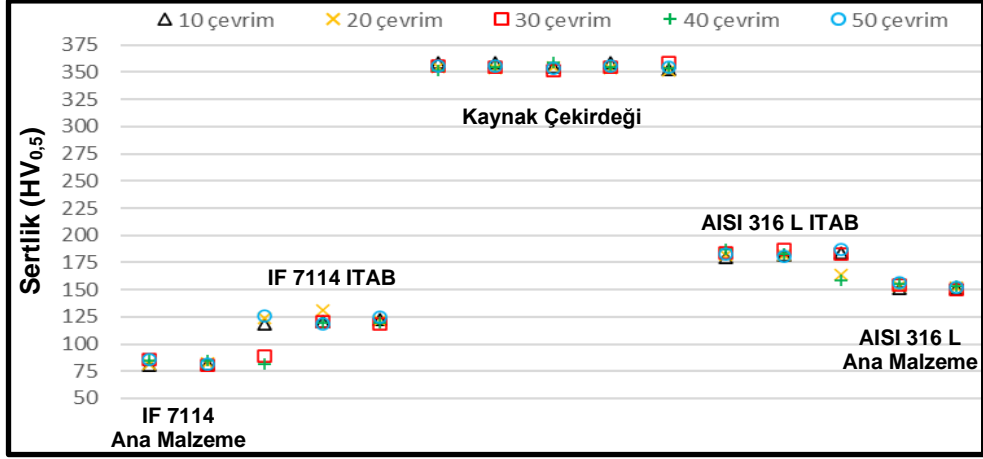
Şekil 7.14. 6 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



Şekil 7.15. 6 kN elektrod kuvveti ve 5 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



Şekil 7.16. 6 kN elektrod kuvveti ve 7 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



Şekil 7.17. 6 kN elektrod kuvveti ve 9 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.

Şekil 7.10-17'deki sertlik grafikleri genel olarak değerlendirildiğinde; kaynak çekirdeğinden (kaynak metalinden) ana malzemelere doğru ilerledikçe (sol taraf IF 7114 ve sağ taraf AISI 316 L) sertlik değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik değerleri AISI 316 L-IF 7114 kaynak çekirdeğinden ölçülmüş onu sırasıyla ITAB'lar (AISI 316 L ITAB>IF 711 ITAB) ve ana malzemeler (AISI 316 L ana malzeme>IF 7114 ana malzeme) izlemektedir.

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen numunelerin sertlik test sonuçları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek sertlik değeri, belirgin olmamakla birlikte, 6 kN elektrod kuvveti ve 9 kA kaynak akımında birleştirilen numunelerin kaynak çekirdeğinden  $359 \pm 5$  HV olarak ölçülmüştür. En düşük kaynak çekirdeği sertliği de 3 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımında birleştirilen numunelerde  $333 \pm 5$  HV olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kaynak işlemlerinde kullanılan ana malzemelerin sertlik değerleri ise AISI 316 L  $151 \pm 5$  HV ve IF 7114  $81 \pm 5$  HV olarak tespit edilmiştir.

Kaynak süresinin sertlik değerleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak sürelerinde kaynak çekirdeği sertliği  $339 \pm 5$  HV- $354 \pm 5$  HV aralığında ölçülmüştür. Kullanılan bütün parametrelerde de kaynak süresinin sertlik profiline (kaynak çekirdeği ve ITAB'lara) belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Kaynak akımının sertlik değerleri üzerindeki etkileri incelendiğinde ise, 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde  $333\pm 5$  HV- $337\pm 5$  HV aralığında ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit kaynak akımı arttırıldığında; 3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde  $335\pm 5$  HV- $337\pm 5$  HV olarak ölçülürken, 3 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde  $335\pm 5$  HV- $340\pm 5$  HV olarak ölçülürken, 3 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde  $336\pm 5$  HV- $340\pm 5$  HV olarak ölçülmüştür. Kullanılan bütün parametrelerde de kaynak akımının sertlik profiline (kaynak çekirdeği ve ITAB'lara) belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Son olarak, elektrod kuvvetinin sertlik değerleri üzerindeki etkileri incelendiğinde ise, 3 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde  $335\pm 5$  HV- $342\pm 5$  HV aralığında ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit elektrod kuvveti arttırıldığında; 6 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde  $351\pm 5$  HV- $358\pm 5$  HV olarak ölçülmüştür. Kullanılan bütün parametrelerde de elektrod kuvvetinin artmasıyla sertlik profiline (kaynak çekirdeği ve ITAB'lara) bir artış olduğu görülmüştür.

Çekirdek çapı ölçümü ve çekme-makaslama kısımlarında da belirtildiği gibi elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi artışına paralel olarak kaynak esnasında malzemelere uygulanan ısı girdisi de artmaktadır. Yüksek ısı girdisi ile kaynak bölgesinde ısı daha uzun süre kalmakta ve hızlı soğumayla birlikte sertlik artışına sebep olmaktadır. Fakat çalışmamızda kaynak akımı ve kaynak süresi parametrelerinin sertlik profiline belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bunun sebebi olarak, AISI 316 L tarafında, östenitik paslanmaz çeliklerin ısı ile sertleştirilememesi olarak ön görülürken, IF 7114 tarafının ise kimyasal içeriğinde soğuma hızı ve sertleşebilirliğe etkisi olan C ve Mn miktarının düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ek olarak elektrod kuvveti artışı ile sertlik değerlerinde artış meydana gelmesini ise kaynak esnasında elektrodun oluşturduğu deformasyon sertleşmesiyle açıklanabilir.

Hasanbaşoğlu (2005) AISI 304-IF 7114 ve AISI 316L-IF 7114 çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve birleştirmelerin sertlik profillerinin incelenmesi sonucunda, bütün parametre ve şartlarda, en yüksek sertlik değerinin kaynak çekirdek

merkezinden elde edildiğini, birleştirmelerin ITAB kaba tane kısmında kaynak çekirdek merkezine yakın değerler elde edilirken ITAB kısmı dönüşüme uğramış kısmında ise ana malzemeye yakın sertlik değerleri elde edildiği rapor edilmiştir. Ayrıca paslanmaz çelikler ve IF çeliği taraflarında, kaynak akımı artmasına rağmen ölçülen sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu bildirilmiştir. Ek olarak birleştirmelerin paslanmaz çelik tarafında kaynak akımı artışına bağlı olarak belirgin bir artış olmadığı rapor edilmiştir.

Hasanbaşoğlu ve Kaçar (2007) IF 7114 ve AISI 316 L çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve birleştirmelerin sertlik değerleri incelendiğinde, en yüksek sertlik değerlerinin genellikle kaynak çekirdeği merkezinden ölçüldüğünü bildirilmişlerdir. Ayrıca IF çeliği kimyasal bileşimi ve östenitik paslanmaz çeliklerin ise ısıtma işlemiyle sertleşmemesi sebebiyle, artan kaynak akımına rağmen birleştirmenin iki tarafında da birbirine yakın sertlik değerleri ölçüldüğü rapor edilmiştir.

Vural ve Akkuş (2004), galvanizli arayer atomsuz çelik levhalar ile östenitik paslanmaz çelik levhaları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve sertlik testleri sonucunda, en büyük sertlik değerlerinin kaynak külçesi (çekirdeği) ortasından (350 HV) elde edildiği bildirilmiştir.

Farklı çalışmalarda, nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere uygulanan sertlik testleri sonucunda ise, Baydemir (2011) (AISI 430 ferritik ve AISI 310) en yüksek sertlik değerinin kaynak çekirdeğinden ölçüldüğü onu sırasıyla ITAB ve ana malzemenin takip ettiğini, Özyürek (2008) (316 L) ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeğinden ölçülen değerlerin birbirlerine yakın olduğunu bildirmişlerdir.

#### **7.4. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI**

Nokta direnç kaynak yöntemiyle farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 sac malzemelerin orijinal mikroyapı görüntüleri Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'da verilmiştir.



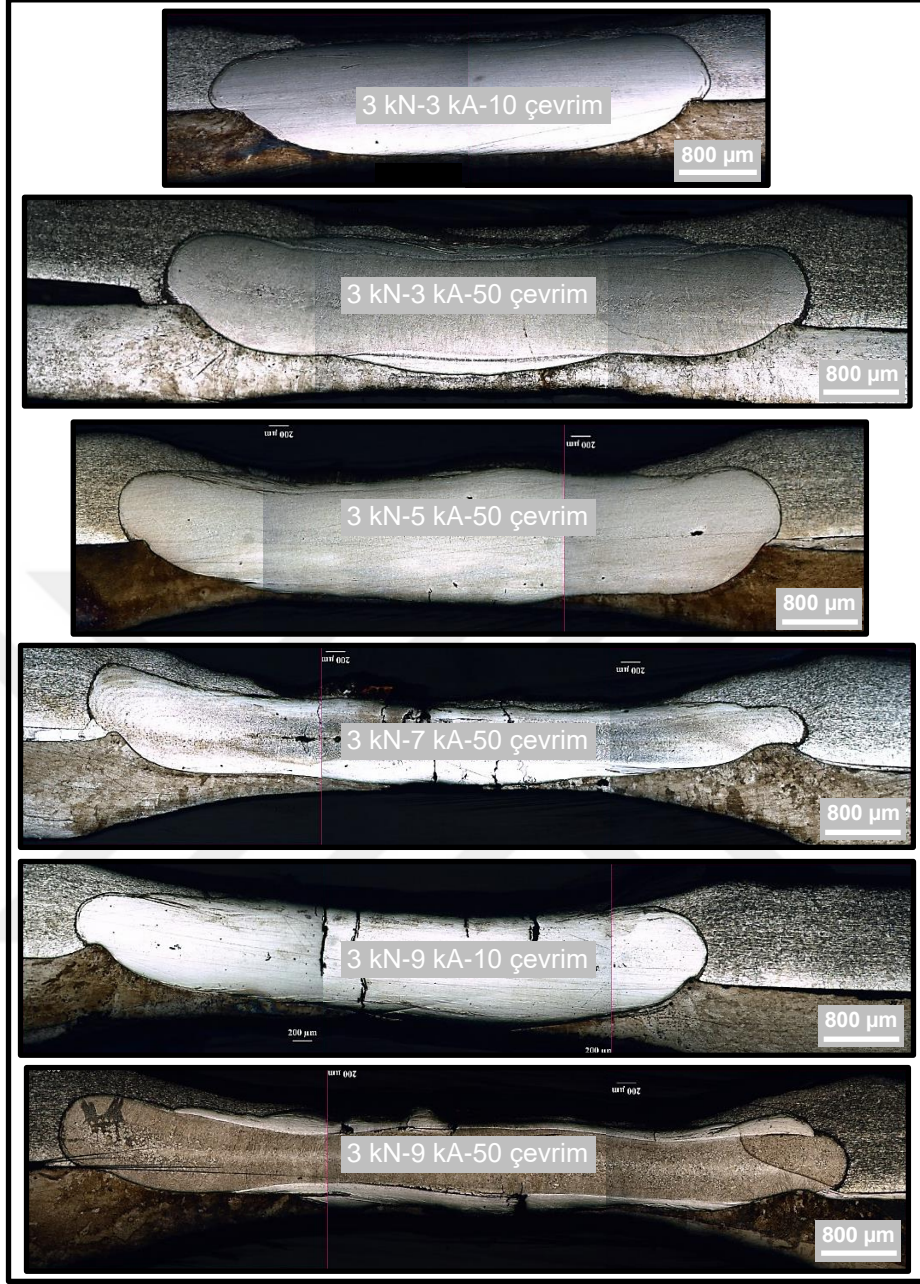
Şekil 7.18. AISI 316 L paslanmaz çelik ana malzeme mikroyapı görüntüsü.



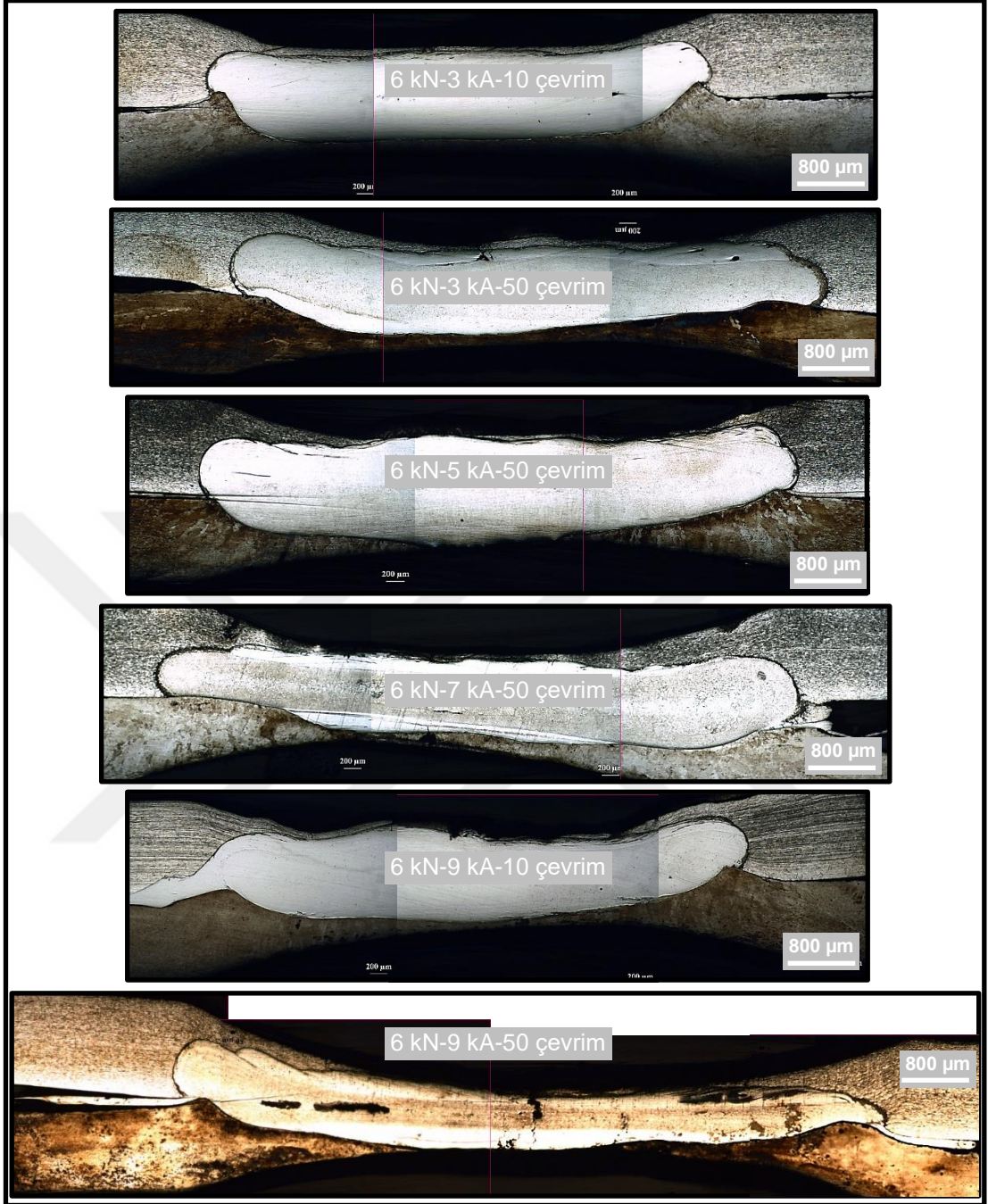
Şekil 7.19. IF 7114 çeliği ana malzeme mikroyapı görüntüsü.

Şekil 7.18’de görüldüğü gibi AISI 316 L paslanmaz çelik malzemenin yapısı östenit tanelerinden oluşmaktadır. IF 7114 çelik malzemenin yapısı ise (Şekil 7.19) kimyasal bileşimindeki çok düşük karbon miktarından dolayı eş eksenli ferrit tanelerinden meydana gelmektedir.

Şekil 7.20’de 3 kN ve Şekil 7.21’de ise 6 kN elektrod kuvvetleri kullanılarak birleştirilen bazı numunelerin kaynak çekirdeği kesiti mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.20. 3 kN elektrod kuvveti kullanılarak birleştirilen bazı numunelerin kaynak çekirdeği kesiti mikroyapı görüntüleri.



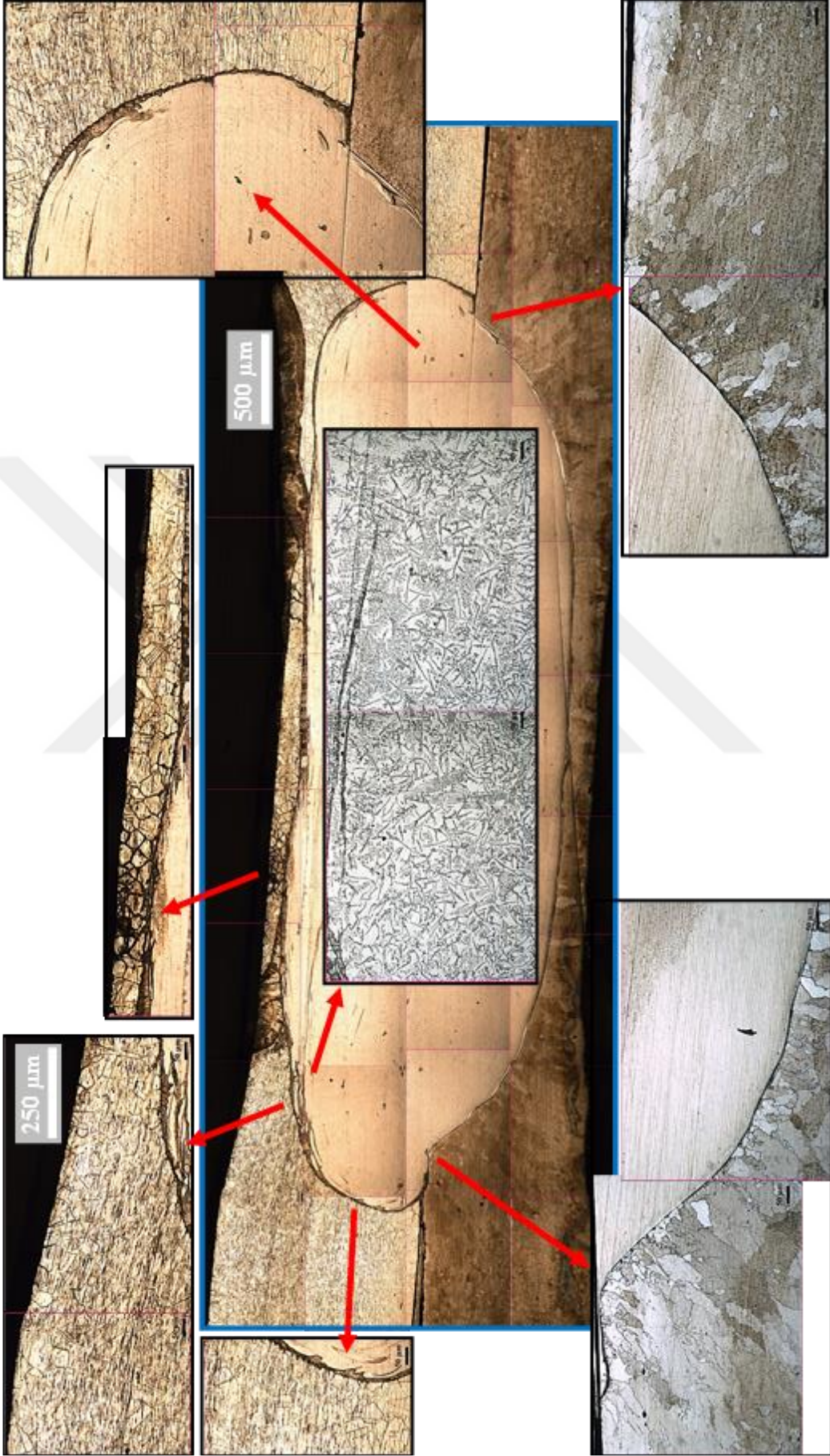
Şekil 7.21. 6 kN elektrod kuvveti kullanılarak birleştirilen bazı numunelerin kaynak çekirdeği kesiti mikroyapı görüntüleri.

Şekil 7.20 ve 7.21’de verilen nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin üst bölümü AISI 316 L, alt bölümü ise IF 7114 malzemeye aittir. Kaynak çekirdeği kesiti mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; birleştirmelerde kaynak çekirdeği kesitinin, uygulanan elektrod kuvveti etkisi, IF 7114 çeliği sertliğinin ( $81\pm 5$  HV), AISI 316 L paslanmaz çelik sertliğinden ( $151\pm 5$  HV) daha düşük olması ve IF çeliği tarafının paslanmaz

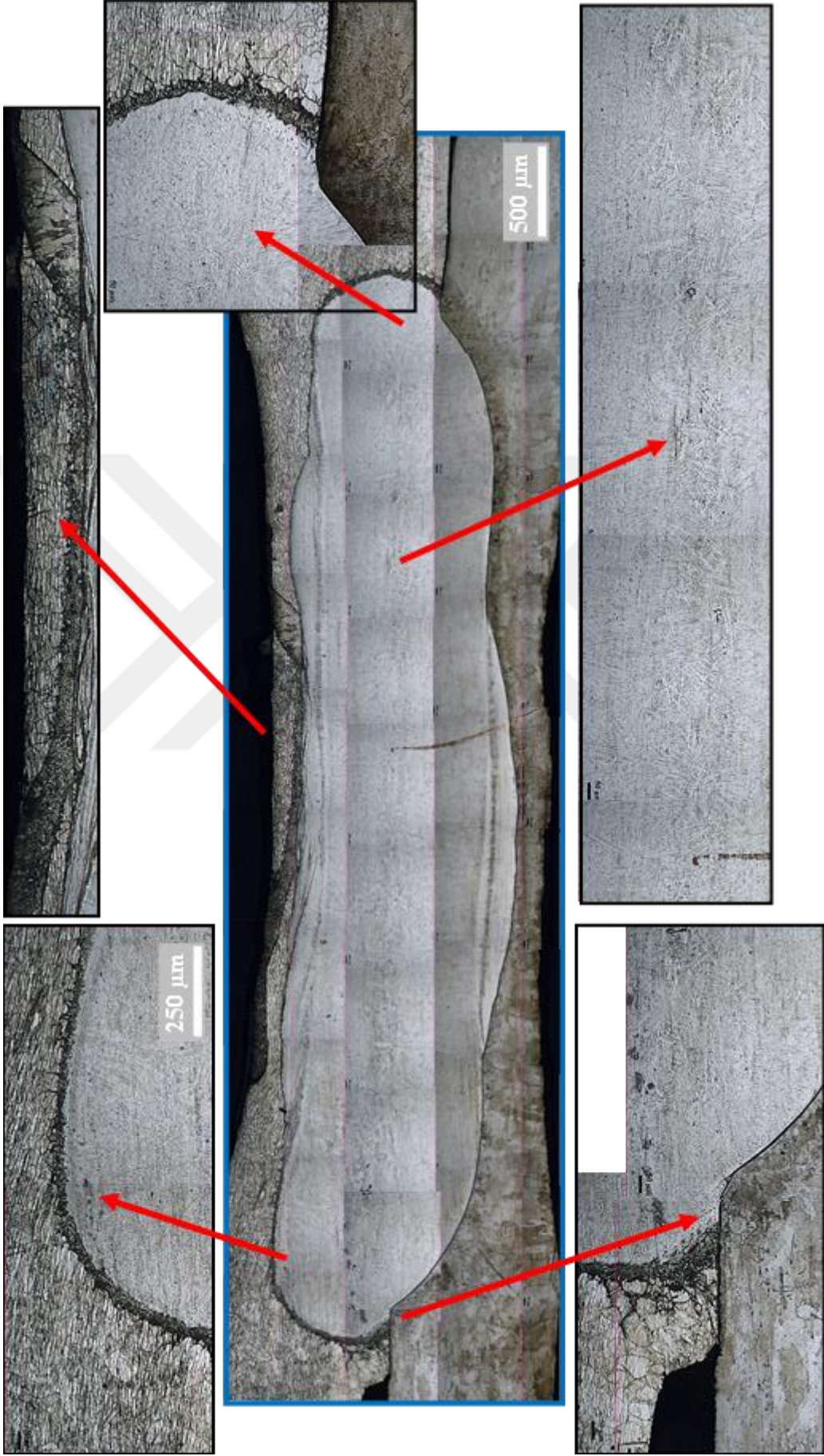
çeliğe göre daha şekillendirilebilir olmasından dolayı IF 7114 çelik tarafına doğru çökmeye uğradığı görülmüştür. Ayrıca birleştirme arayüzeyi incelendiğinde, asimetrik kaynak çekirdeği oluştuğu, kaynak çekirdeği kesitinin AISI 316 L tarafında IF 7114 tarafına oranla daha kalın olduğu görülmektedir. Bunun da paslanmaz çelik tarafının ısıl iletim katsayısının daha düşük olmasından kaynaklandığı öngörülmektedir.

Şekil 7.20 ve 7.21'deki bazı numunelerin kaynak çekirdeği kesit mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle kaynak çekirdeği kesitinin genişlediği görülmektedir. Artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle, kaynak çekirdeği kesiti genişlemesinin sebebi, artan ısı girdisinin etkisi olarak düşünülmüştür.

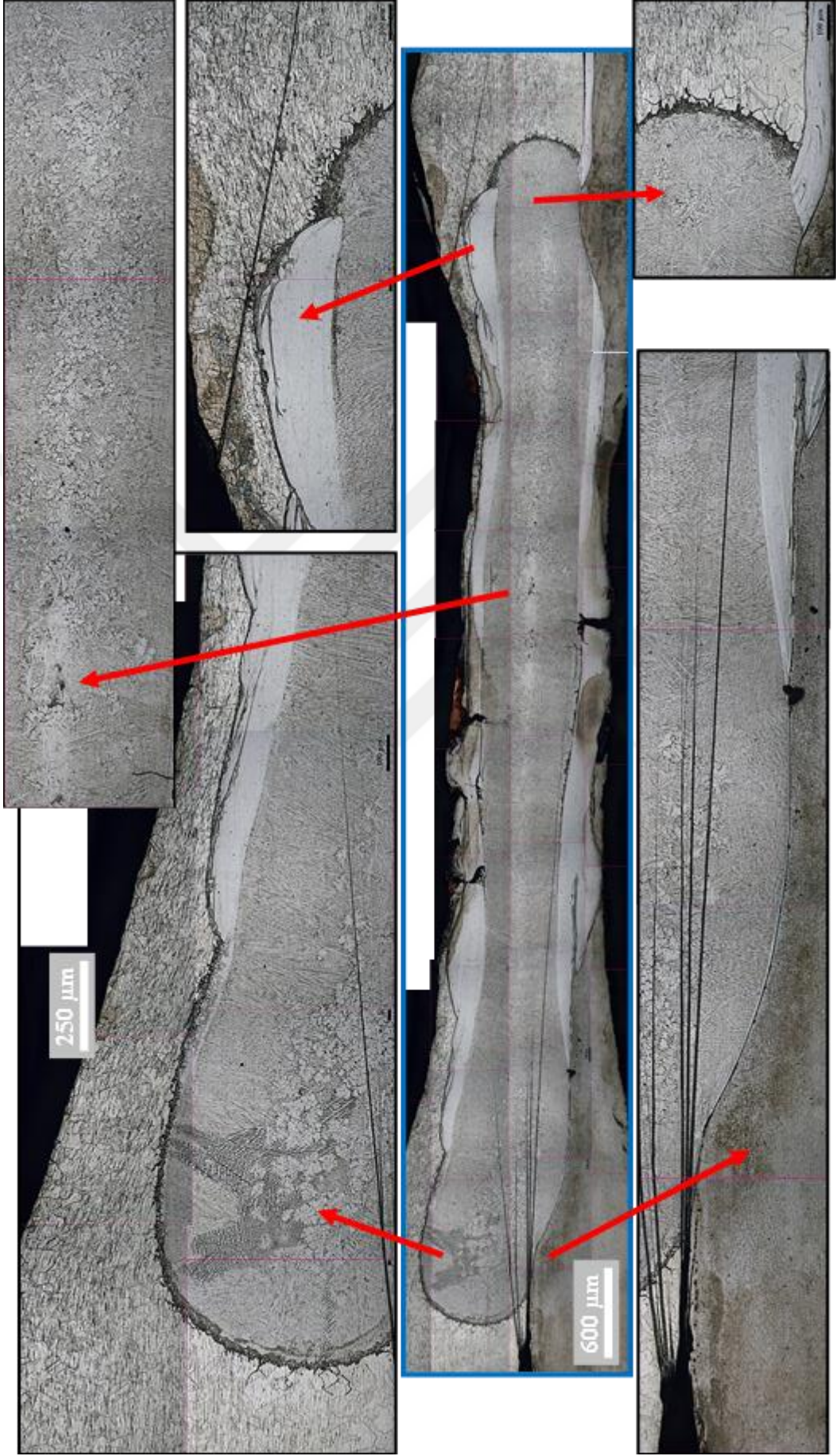
Şekil 7.22-7.25'te örnek olarak bazı parametrelerde nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş numunelerin 40-60 mikroyapı görüntüsü birleştirilerek elde edilmiş ve kaynak metali (kaynak çekirdeği kesiti), ITAB (iri tane, ince tane) vb. kısımların büyütülerek oluşturulmuş detay mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



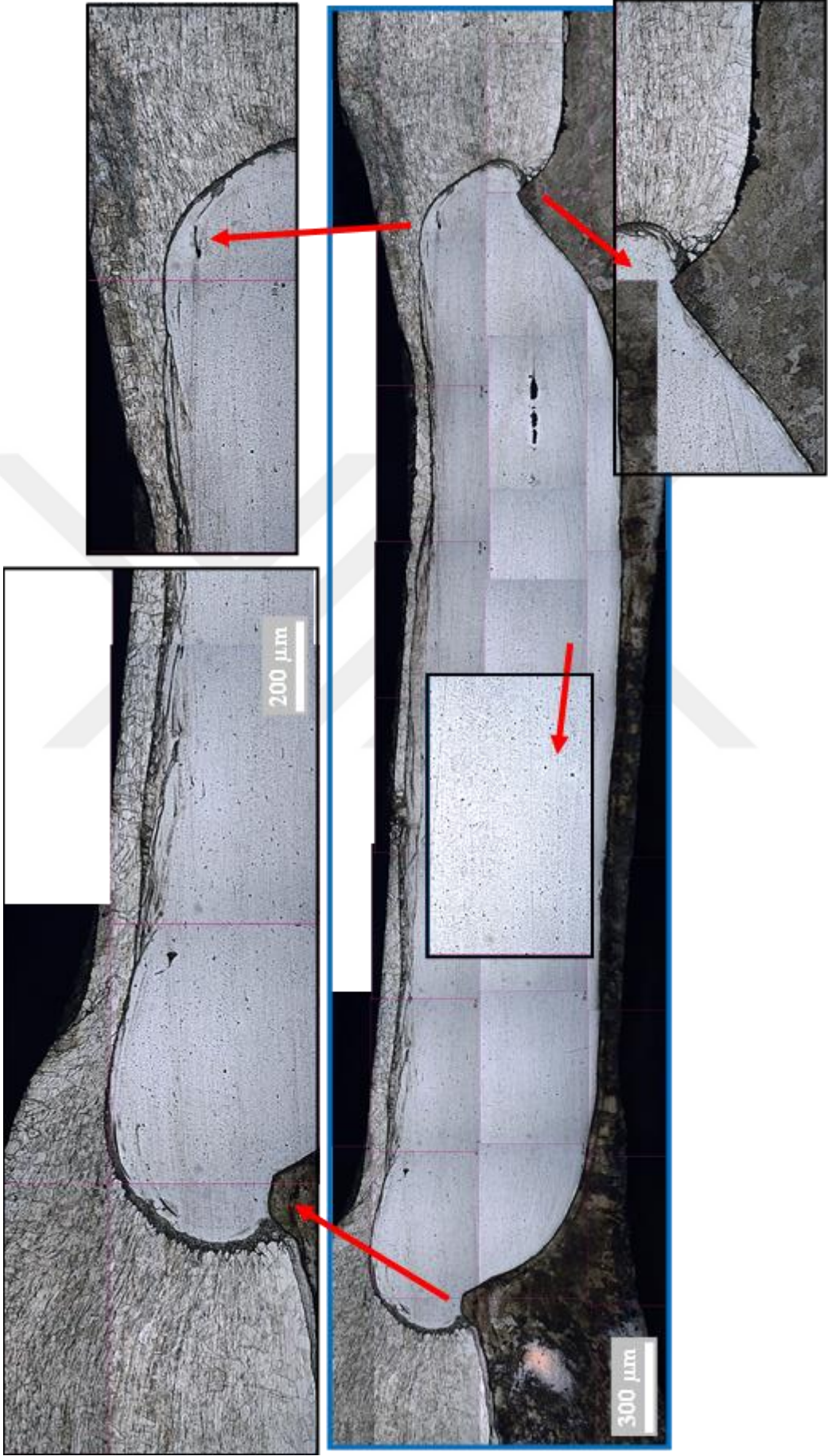
Şekil 7.22. 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü



Şekil 7.23. 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.



Şekil 7.24. 3 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.

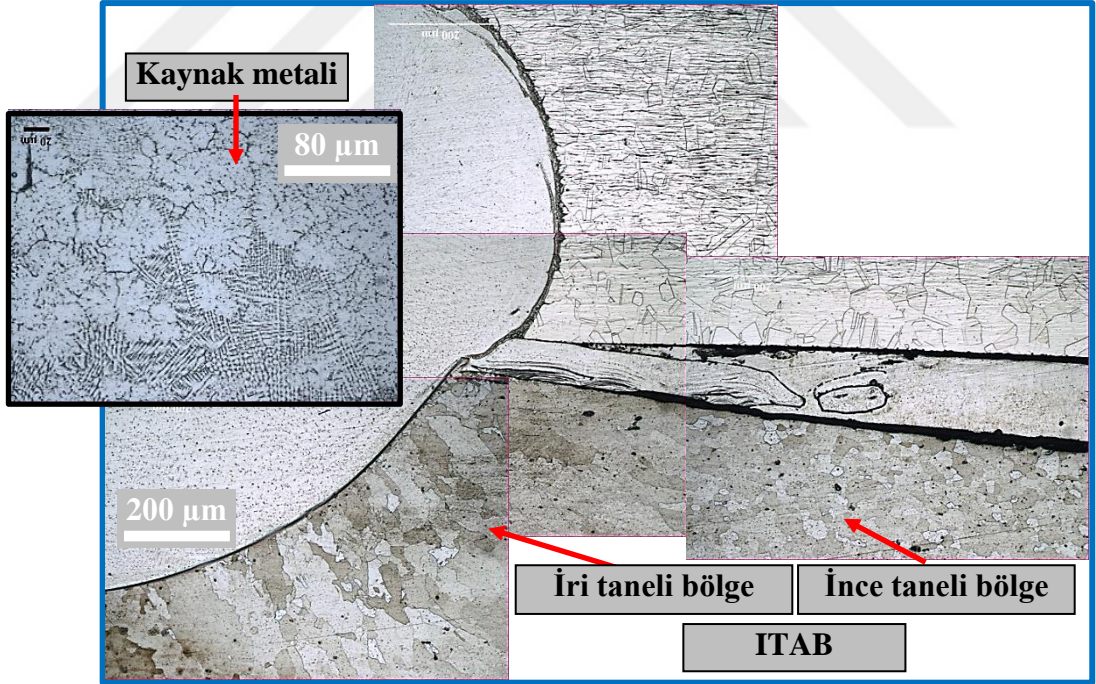


Şekil 7.25. 6 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.

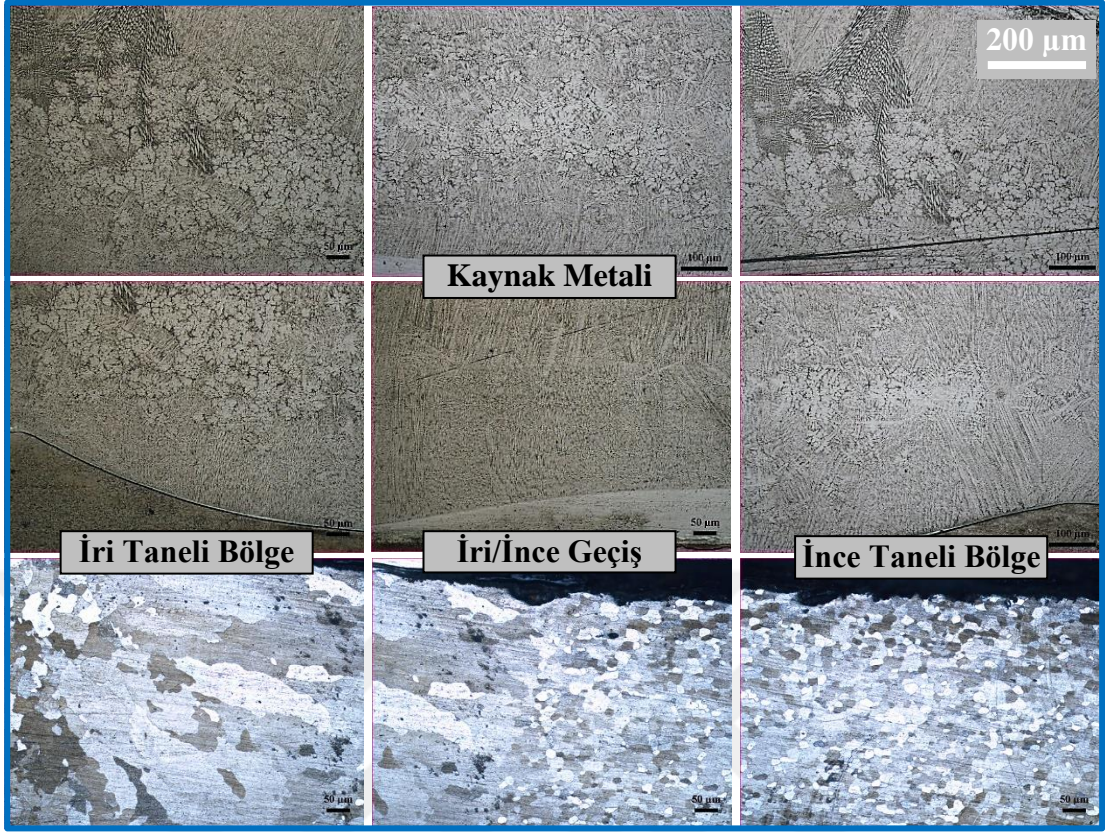
Şekil 7.22-7.25'teki nokta direnç kaynaklı numune detay mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; AISI 316 L paslanmaz çelik ana malzemenin tamamen östenit tanelerinden oluştuğu, IF 7114 çelik ana malzemenin ise ferrit tanelerinden oluştuğu görülmüştür. Daha yüksek ısı iletim katsayısı sebebiyle (yaklaşık 3 katı), IF 7114 çelik ITAB'nın AISI 316 L paslanmaz çelik ITAB'ına göre daha dar bir alanda oluştuğu tespit edilmiştir. Kaynak çekirdeği kesiti dışında görülen küçük taneler ise elektrod kuvveti ve ergime hızından dolayı oluşmaktadır.

Ayrıca, artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle benzer mikroyapıların oluştuğu, artan ısı girdisi nedeniyle tane boyutlarının arttığı fakat IF 7114 tarafında ise belirgin bir tane irileşmesi oluştuğu görülmektedir.

Şekil 7.26-7.27'de kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüleri (kaynak metali ve ITAB) verilmiştir.



Şekil 7.26. 3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresi kullanılarak birleştirilen numunenin kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüsü.



Şekil 7.27. Farklı parametrelerde birleştirilmiş numunelerin kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüleri.

Şekil 7.26-7.27'deki kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, kaynak metalinin sütunsal tanelerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca birleştirmelerin kaynak metalindeki tanelerin AISI 316 L ana malzemeye göre ısı iletim katsayısı daha yüksek olan IF 7114 çelik ana malzemeye doğru yönlendiği tespit edilmiştir.

Birleştirmelerin ITAB'ları incelendiğinde ise, AISI 316 L östenitik paslanmaz çelik tarafında aşırı tane irileşmesi görülmez iken, IF 7114 tarafında aşırı tane irileşmesi görülmektedir. Ayrıca ITAB iri taneli bölgede oluşan tanelerin de ana malzemeye doğru belirgin bir yönelme tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak ise IF çeliğinin yüksek ısı iletim katsayısından dolayı, kaynak sonrasında ısıyı çekerek soğumanın IF tarafına doğru olması ve yüksek ısıya daha uzun süre maruz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Hasanbaşoğlu (2005) IF 7114-AISI 316 L elik sacları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, birleştirmelerde IF eliği tarafına doğru çökme olduğu, paslanmaz elik tarafının daha kalın kaynak kesitine sahip olduğu, IF eliği ITAB'ının paslanmaz çeliğe göre daha dar bir alanda olduğu ve IF eliği ITAB'ında aşırı tane irileşmesi meydana geldiği bildirilmiştir. Diğer alışmalarında, Hasanbaşoğlu ve Kaçar (2007) IF 7114-AISI 316 L ve Hasanbaşoğlu vd. (2005) IF 7114 IF-AISI 304 elik sacları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, IF eliği ITAB'ı üzerinde aşırı tane büyümesi olduğunu rapor etmişlerdir.

Nokta direnç kaynak yönteminin kullanıldığı benzer çalışmalarda; Lee vd. (2009), AISI 316 stenitik paslanmaz elik ve IF (arayer atomsuz) eliğini birleştirmiş ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, kaynak çekirdeğinin asimetrik olduğu, kaynak çekirdeği yapısının östenit ve martenzitten olduğu bildirilmiştir. Vural ve Akkuş (2004), galvanizli arayer atomsuz elik levhalar ile östenitik paslanmaz elik levhaları birleştirmiş ve galvanizli elik saclarda çinko tabakanın, asimetrik kaynak çekirdeği oluşumuna neden olduğunu ve elde edilen asimetrik kaynak çekirdeğinin kaynak akımı artışından olabileceği bildirilmiştir.

## BÖLÜM 8

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

AISI 316 L ve IF 7114 çeliklerin farklı parametreler kullanılarak nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirildiği ve kaynak parametrelerinin (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı ve 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak zamanı) kaynaklı birleştirmelere etkisinin belirlenmesi için yapılan bu çalışma sonucunda;

- Farklı kaynak parametreleri kullanılarak nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin tümünde birleştirme sağlanmıştır.
- Elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresinin artması ile ısı girdisinin arttığı buna bağlı olarak da her iki tarafta da kaynak çekirdek çapı ve derinliğinin arttığı belirlenmiştir.
- Birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunelerin IF 7114 çelik tarafındaki kaynak çekirdek çap ve derinliğinin AISI 316 L paslanmaz çelik tarafı ile kıyaslandığında tüm parametrelerde de daha büyük olduğu tespit edilmiştir.
- Artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle birlikte çekme-makaslama mukavemeti de artmıştır.
- Çekme-makaslama testleri sonrasında tüm numunelerde kopma, IF 7114 çeliği ITAB'ında meydana gelmiştir.
- Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değeri AISI 316 L-IF 7114 kaynak çekirdeğinden ölçülmüş onu sırasıyla ITAB'lar (AISI 316 L ITAB>IF 711 ITAB) ve ana malzemeler (AISI 316 L ana malzeme>IF 7114 ana malzeme) izlemektedir.

- Kaynak çekirdeği kesit mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle kaynak çekirdeği kesitinin genişlediği tespit edilmiştir.
- Birleştirme arayüzeyi incelendiğinde, asimetric kaynak çekirdeği kesiti olduğu, kaynak çekirdeği kesitinin AISI 316 L tarafında IF 7114 tarafına oranla daha kalın olduğu belirlenmiştir.
- Mikroyapı incelemeleri sonucunda, artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle kaynak çekirdeğinin genişlediği ve artan ısı girdisi sebebiyle de IF 7114 ITAB'ında belirgin bir tane irileşmesi olduğu gözlenmiştir.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler;

- Farklı elektrod çapları kullanılarak ısı iletim katsayısı farkının oluşturduğu homojen olmayan ısı dağılımı giderilmesine yönelik çalışmalar yapılması önerilebilir.

## KAYNAKLAR

Akyol, M. A., Çimenoglu, H., Kayalı, E., “Düşük karbonlu çelik açların derin çekilebilme özelliklerinin geliştirilmesi” *1. Demir-Çelik Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 915-924 (2001).

Almus, Z., “Nokta direnç kaynağında ara bağlayıcının birleşme özelliklerine etkilerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-63 (2006).

Aslanlar, S., Uğur, A., Öz Saraç, U., İlhan, E., Demir, Z., “Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding”, *Materials and Design* (28): 2-7 (2007).

Aslanlar, S., Uğur, A., Öz Saraç, U., İlhan, E., “Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding”, *Materials and Design* (29): 1427-1431 (2008).

Amadeh, A. A., Kianersi, D., Mostafaei, A., “Resistance spot welding joints of AISI 316 L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations”, *Materials and Design*, 61: 251-263 (2014).

Aydın, T., “Paslanmaz çeliklerin MIG kaynağında kullanılan gazlar ve etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-86 (2002).

Bak, A., “Arayer atomu içermeyen (IF) çeliklerde ve bu çeliklerin nokta direnç kaynaklı bağlantılarında deformasyon yaşanmasının mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-107 (2010).

Bakkaloğlu, A., “IF çeliklerin üretim prosesi özellikleri ve uygulamaları”, *Makine ve Metal Teknolojisi*, 18(1), 76-82 (2001).

Baydemir, M., “Ostenitik AISI 310-ferritik AISI 430 paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-159 (2011).

Coşkun, M. H., “Otomotiv endüstrisinde kullanılan IF 7114 ve DP600 çelik sacların nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 13-22 (2009).

Çakan, A., “AISI 304 paslanmaz çeliğinin mikroyapı ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 4-23 (2000).

Çalık, A., “Elektron ışın kaynağı ile birleştirilmiş iki farklı çelik malzemenin kaynak bölgesinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-151 (2004).

Çeltik, İ., “AISI 310 paslanmaz çeliğinin mikroyapı ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 4-24 (2000).

Çörten, N., Şener. A., Kaya. Y., Kahraman. N., “AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin TIG kaynağıyla birleştirilebilirliğinin incelenmesi”, *4. uluslararası kaynak teknolojileri konferansı ve sergisi (ICWET'16)*, 11-13 Mayıs 2016, Gaziantep-Türkiye, 1488-1496 (2016).

Develi, K., “Östenitik paslanmaz çeliklerin MIG kaynağında argon hidrojen karışımının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara,6-37 (2003).

Ekici, M., “IF çeliklerinin MIG-Brazing yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-204 (2016).

Erdoğan, M., “Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, (1): 1-169 (2000).

Fukuomoto, S., Fujiwara, K., Toji, S., Yamamoto, A., “Small-scale resistance spot welding of austenitic stainless steels”, *Materials Science and Engineering A*, 492 (1-2): 243-249 (2008).

Gourd, M.L., “Kaynak teknolojisinin esasları”, Çeviri: Eryürek İ. B., Bodur O., Dikicioğlu A., *Birsen yayınevi*, İstanbul, 2-4 (1996).

Gözütok, E., Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., “The influence of hydrogen addition to the shielding argon gas in TIG welding of AISI 304 materials, *1th International Conference On Welding Technologies, ICWET'09*, 11-13 June Ankara/Turkey, 778-786 (2009).

Gürdaş, M., “Kaynaklı konstrüksiyonlarda alüminyum ve alaşımlarının kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-65 (1999).

Haetham, G.M., Turnad, L.G., Mazli, M., “The investigation of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded AISI 316L austenitic stainless steel”, *Materials Today: Proceedings* 46, 1640-1644 (2021).

Hasanbaşıoğlu, A., “Direnç kaynak yöntemiyle birleştirilen IF elikleri ile östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Zonguldak, 1-36 (2005).

Hasanbaşıoğlu, A., Kaçar, R., “Resistance spot weldability of dissimilar materials (AISI 316 L-DIN EN 10130-99 Steels)”, **Materials and Design**, 28 (6): 1794- 1800 (2007).

Hasanbaşıoğlu, A., Kaçar, R., Gündüz, S., Gülenç, B., “Akım şiddetinin AISI 304 - IF 7114 direnç kaynaklı birleştirmeleri özelliklerine etkisi”, **Kaynak Teknolojisi V. Ulusal Kongresi**, Kocaeli, 45-52 (2005).

Hayat, F., “ift-fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında mho ile kaynak süresinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 28-49 (2005).

Hayat F., “Resistance spot weldability of dissimilar materials: BH180-AISI304L steels and BH180-IF7123 steels”, **J. Mater. Sci. Technol.**, 27(11): 1047-1058 (2011).

Hayat, F., Demir, B., Acarer, M., Aslanlar, S., “Adhesive weld bonding of interstitial free steel at spot welding for automotive application”, **Kovove Mater.** 48, 137-143 (2010).

Hayat, F., Demir, B., Acarer, M., Aslanlar, S., “Effect of weld time and weld current on the mechanical properties of resistance spot welded IF (DIN EN 10130–1999) steel”, **Kovove Materials** 47 (1): 11-17 (2009).

Kahraman, N., Gülenç B., “Modern kaynak teknolojisi”, **Epa-Mat Basım Yayın Ltd. şti.**, Ankara, 1-99 (2009).

Kaya, Y., “Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-112 (2010).

Kaya, Y., “Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen grade a gemi sacı-paslanmaz elik kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-215 (2014).

Kaya, Y., Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., “Ferritik paslanmaz elik ile düşük karbonlu elik malzemelerin farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilebilirliğinin araştırılması” **International Iron & Steel symposium**, 02-04 April 2012, Karabük, Türkiye 779-788 (2012).

Keleş, S., “Tasarım ve imalatı yapılan punta kaynak makinasında nesne yönelimli işlem planlama sisteminin uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi**, Kütahya, 2-5 (2008).

Koca, E., “TIG kaynak yöntemiyle birleştirilen östenitik paslanmaz çeliklerin özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 50-88 (2010).

Kocabekir, B., “Isı girdisi ve kaynak atmosferinin 316L paslanmaz çeliklerin direnç kaynak birleştirmelerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 3-36 (2006).

Kocabekir, B., Kaçar, R., Gündüz, S., Hayat, F., “An effect of heat input, weld atmosphere and weld cooling conditions on the resistance spot weldability of 316L austenitic stainless steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 195: 327-335 (2008).

Kölük, F., “Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynak yönteminin ısı tesiri altında kalan bölgeye etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14-46 (2000).

Kuşutun, G., “Paslanmaz çeliklerin direnç kaynağında soğuma hızının birleştirmenin mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-63 (2003).

Lee, J.B., Nam, D.G., Kang, N.H., Kim, Y.D., Oh, W.T., Park, Y.D., “Resistance Spot Welding of Dissimilar Materials of Austenitic Stainless Steels and IF (Interstitial Free) Steels”, *Korean Journal of Materials Research* 19(7): 574-580 (2009).

Mutlusu, Ö., “Derin çekilebilir çelik sacların hafif metaller ile noktasal kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 1-63 (2019).

Mutlusu, Ö., Ertan, R., “Nokta direnç kaynak yöntemi ile alüminyum ve titanyum alaşımı sacların IF çelik saclarla kaynak kabiliyetinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1003-1013, (2020).

Osmanoğlu, T., “AISI 304 ve 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikroyapılarına, mekanik özelliklerine ve korozyon davranışlarına soğuk deformasyonun etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 7- 27 (2012).

Özyürek, D., “An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 316 L austenitic stainless steel”, *Materials and Design*, 29: 597-603 (2008).

Şenyüz, G., “304 kalite paslanmaz çelik ve galvanizli sacların şekillendirme kabiliyetlerinin çeşitli yönlerden incelenerek karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-22 (2008).

Taufiqurrahman, I., Turnad, L. G., Mazli, M., “The effect of holding time on dissimilar resistance spot welding of stainless steel 316L and Ti6Al4V titanium alloy with aluminum interlayer”, *Materials Today: Proceedings* 46, 1563-1568 (2021).

Türkyılmazoğlu, A., “Dubleks, martezitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya,16-55 (2006).

Vural, M., Akkuş, A., “On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets”, *Journal of Materials Processing Technology* 153(1): 1-6 (2004).

Yaşacan, D. A., Kayalı, E. S., “Soğuk haddelenmiş IF çeliklerinde anizotropi katsayısının (r) geliştirilmesi”, *İTÜ Dergisi*, 6(1), 47-52 (2007).

Yılmaz, R., Barlas, Z., “Paslanmaz çeliklerin gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde koruyucu gaz kompozisyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, (11): 388-392 (2005).

Yorulmazel, S. C., “Paslanmaz çelik konstrüksiyonlarda oluşan distorsiyonların etüdü”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 8-15 (2007).

Yumuşak, D. M., “Gaz altı kaynak yöntemi ile kaynatılan ferritik paslanmaz çeliklerde argon ve helyum gazlarının kaynak karakteristik üzerine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-49 (2008).

Yürük, A., “Elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen farklı özellikteki paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinin karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-109 (2015).

## ÖZGEÇMİŞ

Kadir KAYA; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Karabük Endüstri Meslek Lisesi Döküm Bölümünden mezun olduktan sonra 1992 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Öğretmenliği Bölümünde eğitimine devam etti ve 1997 yılında mezun oldu. 1998 yılında MEB’da Öğretmen olarak atandı ve halen mesleğine devam etmektedir. Evli ve 2 çocuk babasıdır.

