



**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YENİ  
NESİL YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİKLERİN  
DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI UYGULAMALARI VE  
KAYNAK BÖLGESİ KARAKTERİZASYONU**

**2023  
DOKTORA TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Kemal AYDIN**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YENİ NESİL YÜKSEK  
DAYANIMLI ÇELİKLERİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI  
UYGULAMALARI VE KAYNAK BÖLGESİ KARAKTERİZASYONU**

**Kemal AYDIN**

**Tez Danışmanı**

**Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**T.C.**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Ocak 2023**

Kemal AYDIN tarafından hazırlanan “OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YENİ NESİL YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİKLERİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI UYGULAMALARI VE KAYNAK BÖLGESİ KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN .....  
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 23/12/2022

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Behçet GÜLENC (GÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AYAN (KBÜ)	.....

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

Doç. Dr. Müslüm KUZU .....  
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.”*

Kemal AYDIN

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

# **OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YENİ NESİL YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİKLERİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI UYGULAMALARI VE KAYNAK BÖLGESİ KARAKTERİZASYONU**

**Kemal AYDIN**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**Ocak 2023, 159 sayfa**

STRENX ve DP çelikleri çift fazlı çelik türü olarak ileri yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) grubunda yer almaktadır. Bunlar düşük maliyet, yüksek yakıt verimliliği ve daha fazla yük hacmi taşıyabilen hafif araçların üretimi için otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada STRENX 700 CR ve DP 800 malzemeleri hem alternatif akım (AA), hem de orta frekans doğru akım (OFDA) kullanılarak direnç nokta kaynak (DNK) yöntemi ile birleştirilmişlerdir. Kaynak işlemleri öncesinde birleştirilecek parçaların ısı tesiri altında kalan bölgesine (ITAB) bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemi uygulanmıştır. BÖİ sisteminin tasarımı, imalatı ve DNK makinesine adaptasyonu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca birleştirme işlemlerinde, klasik DNK yöntemine farklı bir konsept kazandırmak için çeşitli fikstürler tasarlanmış imal edilmiştir. BÖİ ve fikstür sistemlerinin eş zamanlı olarak çalışması bilgisayar destekli yazılım ile kontrol edilmiştir.

Birleştirme işlemlerinden sonra STRENX 700 CR ve DP 800 çelikleri arasındaki DNK bağlantılarına sertlik, çekme-makaslama, çapraz-çekme ve yorulma testleri uygulanmış ve böylece bağlantıların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca NDK bağlantılarının mikroyapıları optik mikroskop ile incelenmiştir. Uygulanan bu testlerle mekanik özellik ve mikroyapı arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

Mikroyapı çalışmaları sonucunda tüm birleştirmelerde kaynak metali yapısının ferrit ve martenzit fazlarından oluştuğu görülmüştür. Sertlik testlerinde kaynak öncesi ITAB'a uygulanan BÖI işleminin kaynak metali sertliğini bir miktar düşürdüğü, hem kaynak metali hem de ITAB genişliğini arttırdığı belirlenmiştir. Kaynak öncesi ITAB'a uygulanan BÖI işlemiyle çekme-makaslama dayanımında %18, çapraz-çekme test dayanımında ise %13,5 artış bulunmuştur. Çekme-makaslama ve çapraz-çekme testlerinde kopmaların tümü ITAB'dan düğmelenme şeklinde gerçekleşmiştir. Yorulma testlerinde en yüksek yorulma ömrü BÖI işlemi uygulanan ve OFDA ile birleştirilen numunelerde bulunmuştur. Çalışmalar sonucunda OFDA teknolojisi ile birleştirilmiş numunelerin, AA ile birleştirilenlere göre daha iyi mekanik özellikler sergilediği görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler :** STRENX 700 CR, DP 800, direnç nokta kaynağı, çekme-makaslama, çapraz-çekme ve yorulma.

**Bilim Kodu** : 91514

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **RESISTANCE SPOT WELDING APPLICATIONS AND WELDING CHARACTERIZATION OF NEW GENERATION HIGH STRENGTH STEEL USED IN THE AUTOMOTIVE SECTOR**

**Kemal AYDIN**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**January 2023, 159 pages**

STRENGTH and DP steels are in the advanced high-strength steels (AHSS) group as a dual-phase steel type. They are used in the automotive industry for the production of light vehicles with low cost, high fuel efficiency and higher payload. In this study, STRENGTH 700 CR and DP 800 materials were joined by resistance spot welding (RSW) method using both alternating current (AC) and medium frequency direct current (MFDC). Before the welding processes, the regional pre-heating (RPH) process was applied to the heat affected zone (HAZ) of the parts to be joined. The design, manufacture and adaptation of the RPH system to the RSW machine were carried out within the scope of the study. In addition, various fixtures have been designed and manufactured to provide a different concept to the classical RSW method in joining processes. Simultaneous operation of RPH and fixture systems was controlled by a computer aided software.

After the joining processes, hardness, tensile-shear, cross-tensile and fatigue tests were applied to the RSW joints between STRENX 700 CR and DP 800 steels, and thus the mechanical properties of the joints were investigated. In addition, the microstructures of the joints were examined with an optical microscope. The relationship between mechanical properties and microstructure was demonstrated by these tests.

As a result of microstructure studies, it was observed that the weld metal structure in all joints consisted of ferrite and martensite phases. In the hardness tests, it was determined that the RPH process applied to the HAZ before welding slightly decreased the hardness of the weld metal and increased both the weld metal and HAZ width. With the RPH process applied to HAZ before welding, an increase of 18% in tensile-shear strength and 13.5% in cross-tensile strength was found. In the tensile-shear and cross-tensile tests, all of the ruptures occurred in the form of buttoning from the HAZ. In the fatigue tests, the highest fatigue life was found in the samples which were applied RPH process and joined with MFDC. As a result of the studies, it was seen that the samples joined with OFDA technology exhibited better mechanical properties than those joined with AA.

**Key Word** : STRENX 700 CR, DP 800, resistance spot welding, tensile-shear test, cross-tension test and fatigue.

**Science Code** : 91514



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın işleyişinde ve yürütülmesinde öneri ve görüşleriyle yardım ve desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Behçet GÜLENC, Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU ve Doç. Dr. Yakup KAYA hocalarıma teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarındaki kaynak işlemlerinin yapılmasında büyük emekleri olan UNİS makine ve çalışanlarına, çalışma süresince tezin başından sonuna kadar yardım ve desteklerini esirgemeyen Çoşkunöz Holding Ar-Ge İleri İmalat ve Birleştirme Teknolojileri Uzmanı Sayın Dr. Mehtap HİDİROĞLU ve desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AYAN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonu tarafından FDK-2020-2132 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. BAP birimi ve Karabük Üniversitesi Rektörlüğüne desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Sevgili eşim Gülistan AYDIN ve canım kızım Buğlem AYDIN'a manevi hiçbir yardımı esirgemediğim yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim. Son olarak ALLAH sağlıklı uzun ömürler vermesini dilediğim annem ve babama beni yetiştirdikleri için teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	ivi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	7
OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER .....	7
2.1. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER (DP).....	8
2.1.1. DP Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri .....	9
2.1.2. DP Çeliklerin Üretimi.....	11
2.2. STRENX ÇELİKLERİ.....	12
2.2.1. STRENX Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri.....	13
2.2.2. STRENX Çeliklerinin Üretimi .....	14
BÖLÜM 3 .....	15
LİTERATÜR ÇALIŞMALARI .....	15
3.1. DP VE STRENX ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	15
BÖLÜM 4 .....	37
GENEL BİLGİLER .....	37

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.1. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI.....	37
4.1.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı .....	39
4.2. DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI PARAMETRELERİ .....	41
4.2.1. Kaynak Akımı.....	41
4.2.2. Kaynak Süresi.....	42
4.2.3. Elektrot Bileşimi ve Şekli.....	42
4.2.4. Kaynak Kuvvetinin Etkisi.....	43
4.2.5. Esas Metalin Kimyasal Bileşimi.....	44
4.2.6. Kaynak Edilecek Parçaların Yüzey Etkisi.....	45
4.3. KAYNAK KABİLİYETİ DİYAGRAMI.....	45
4.4. DİRENÇ NOKTA KAYNAK MAKİNALARI .....	47
4.4.1. Alternatif Akım (AA) Kaynak Makinaları .....	47
4.4.2. Orta Frekans Doğru Akım (OFDA) Kaynak Makinaları.....	49
4.5. DUAL-FAZLI ÇELİKLERİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI .....	52
4.5.1. Kaynak Bölgesi Analizi (Çekirdek oluşumu ve ITAB).....	52
4.5.2. Kopma Türleri .....	55
BÖLÜM 5 .....	57
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	57
5.1. KULLANILAN MALZEMELER.....	57
5.2. MALZEMELERİN KAYNAĞA HAZIRLANMASI.....	58
5.3. BÖLGESEL ÖN ISITMA SİSTEMİ VE FİKSTÜR TASARIMLARI .....	59
5.4. NOKTA DİRENÇ KAYNAK SETİ .....	64
5.5. KAYNAK PARAMETRELERİ VE KAYNAĞIN YAPILIŞI .....	65
5.6. GÖRSEL MUAYENE VE MANYETİK PARÇAÇIK TESTİ.....	69
5.7. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLIĞI VE İNCELEMELERİ .....	70
5.8. MEKANİK ÖZELLİKLERİN TESPİTİ .....	72
5.8.1. Çekme-Makaslama Deneyi.....	73
5.8.2. Çapraz-Çekme Deneyi.....	73
5.8.3. Kopma Hasar Türlerinin İncelenmesi.....	74
5.8.4. Sertlik Testi.....	75
5.8.5. Yorulma Testi .....	77

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6 .....	81
SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	81
6.1. GENEL DEĞERLENDİRME .....	81
6.2. GÖRSEL MUAYENE VE MANYETİK PARÇAÇIK TESTİ.....	81
6.3. MAKRO-MİKROYAPI ÇALIŞMALARI.....	85
6.3.1. AA Normal Makro/Mikroyapı İncelemeleri.....	85
6.3.2. OFDA Makro/Mikroyapı İncelemeleri.....	89
6.3.3. AA ve OFDA Makro-Mikroyapı İncelemelerinin Değerlendirilmesi ....	93
6.4. MİKROSERTLİK İNCELEMELERİ .....	94
6.4.1. AA ile Birleştirilen Numunelerin Sertlik Analizleri.....	94
6.4.2. OFDA ile Birleştirilen Numunelerin Sertlik Analizleri.....	103
6.4.3. AA ve OFDA Mikrosertlik Ölçümlerinin Karşılaştırılması .....	106
6.5. ÇEKME TEST SONUÇLARI.....	108
6.5.1. Genel Değerlendirme.....	108
6.5.2. Çekme-Makaslama Testi .....	109
6.5.2.1. Çekme-Makaslama Testi Kopma Hasar Modları .....	113
6.5.2.2. Çekme-Makaslama Ayrılma Yüzeyi SEM İncelemesi .....	116
6.5.3. Çapraz-Çekme Testi .....	120
6.5.3.1. Çapraz-Çekme Testi Kopma Hasar Modları.....	123
6.6. YORULMA TEST SONUÇLARI .....	125
6.6.1. AA Birleştirmelerine Ait Yorulma Testi .....	126
6.6.2. OFDA Birleştirmelerine Ait Yorulma Testi .....	128
6.6.3. Yorulma Test Sonuçlarının Karşılaştırılması (AA ve OFDA) .....	131
6.6.4. Yorulma Testi Sonrası Kırık Yüzeylerin İncelenmesi.....	134
BÖLÜM 7 .....	140
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	140
KAYNAKLAR .....	144
ÖZGEÇMİŞ .....	159

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Çeliklerin tarihsel gelişim süreçleri ve çekme-uzama değerleri.....	8
Şekil 2.2. Otomotivde kullanılan DP çelik türleri ve konumları .....	9
Şekil 2.3. DP çeliğine ait (a) şematik ve (b) mikroyapı görüntüsü.....	9
Şekil 2.4. DP çeliklerde farklı MHO'nın çekme mukavemetine etkisi. ....	10
Şekil 2.5. DP çeliklerin diğer çeliklere göre stress/gerilim grafiği.....	11
Şekil 2.6. DP çelik üretimlerinin şematik gösterimi. ....	12
Şekil 2.7. STRENX çeliğine ait mikroyapı görüntüsü.....	13
Şekil 2.8. TMCP teknolojisi üretim aşaması ve oluşan mikroyapıları .....	14
Şekil 3.1. Elektrot kuvveti / sertlik grafiği.....	16
Şekil 3.2. Kaynaklı bağlantıların farklı kopma görüntüleri. ....	17
Şekil 3.3. Kaynak sonrası makroyapı görüntüleri (a) 6, (b) 8 ve (c) 10 kA. ....	18
Şekil 3.4. Kaynaklı bağlantıya ait düğmelenme şeklindeki kopma görüntüsü. ....	19
Şekil 3.5. Farklı kaynak akımlarının ergime bölgesine etkisi.....	20
Şekil 3.6. (a-b) ergime (c) kaba taneli ITAB (d) ince taneli ITAB.....	21
Şekil 3.7. Elemental analiz ile yapılan 3D görüntüsü.....	21
Şekil 3.8. DP600-DP 800 sertlik ölçüm noktaları ve değerleri.....	22
Şekil 3.9. Çinko kaplamanın oluşan çatlak içerisinde ilerleyişi. ....	23
Şekil 3.10. Kaynak sonrası elde edilen optimum verilerle oluşturulan lob. ....	24
Şekil 3.11. DP 800 makroyapı ve SEM görüntüleri. ....	25
Şekil 3.12. DP 800 kaynaklı bağlantının mikroyapı görüntüsü. ....	26
Şekil 3.13. DP 800 kaynaklı bağlantıya ait sertlik değerleri.....	27
Şekil 3.14. Farklı tür malzeme çiftlerinin çekme gerilme-uzama grafiği. ....	28
Şekil 3.15. DP 800 çeliğinde SAM kullanılarak elde edilen kaynak çapı. ....	29
Şekil 3.16. DNK (a) Tek ve (b) çift darbeli kaynak şeması.....	29
Şekil 3.17. Tek ve çift darbeli kaynaklı birleştirmelere ait OM görüntüleri.....	30
Şekil 3.18. Kaynak bölgelerinden elde edilen akma dayanım değerleri.....	31
Şekil 3.19. Farklı elektrot kuvvetleri uygulanarak elde edilen sertlik değerleri. ....	32
Şekil 3.20. Farklı parametrelerin kullanılması sonucu oluşan kaynak görünüşleri. ...	33
Şekil 3.21. STRENX ve mikro alaşım çeliğe ait mikroyapı. ....	34

## Sayfa

Şekil 3.22. STRENX 700 CR mikrosertlik analiz noktaları. ....	35
Şekil 3.23. Çekme-makaslama test ortalamaları. ....	36
Şekil 4.1. Su soğutmalı ve hidrolik basınç silindirli nokta kaynak makinası. ....	38
Şekil 4.2. Tipik nokta kaynak çevrimleri. ....	39
Şekil 4.3. Elektrik nokta direnç kaynak prensibi. ....	40
Şekil 4.4. Kaynak akımının çekme-makaslama dayanımına etkisi. ....	42
Şekil 4.5. İmalat sektöründe kullanılan elektrot uç formları. ....	43
Şekil 4.6. Direnç nokta kaynak boyutları. ....	44
Şekil 4.7. Kaynak kabiliyeti diyagramı. ....	46
Şekil 4.8. DNK devre yapısının şematik gösterimi. ....	48
Şekil 4.9. Alternatif akımda meydana gelen dalga formları. ....	48
Şekil 4.10. Orta frekans doğru akım (OFDA) kaynak makine kısımları. ....	49
Şekil 4.11. OFDA ile oluşan homojen ısı akışı. ....	51
Şekil 4.12. DNK ile oluşan dirençler, sıcaklık dağılımları ve bölgeler. ....	53
Şekil 4.13. DNK bölgesine ait metalurjik yapı ve elde edilen veriler. ....	54
Şekil 4.14. DP çeliklerde ITAB'da meydana gelen yumuşama. ....	54
Şekil 4.15. DNK'lı bağlantıların kopma türleri. ....	56
Şekil 5.1. Lazer kesimi yapılan levhalar. ....	58
Şekil 5.2. Çekme-makaslama test ölçüleri (mm). ....	58
Şekil 5.3. Çapraz-çekme test ölçüleri (mm). ....	59
Şekil 5.4. BÖİ işlemi için tasarlanan elektrod. ....	60
Şekil 5.5. Kaynak öncesi ITAB'da BÖİ işleminin şematik görünümü. ....	61
Şekil 5.6. Fikstürlerin 3D modelleme çizim görüntüleri. ....	62
Şekil 5.7. Tasarlanıp imal edilen çeşitli fikstürler. ....	62
Şekil 5.8. Proses içi BÖİ ve DNK elektrodları. ....	63
Şekil 5.9. Beta 214 MF direnç nokta kaynak makinesi. ....	65
Şekil 5.10. Kaynak parametrelerinin yazılım ile ayarlanması. ....	67
Şekil 5.11. DNK işleminin farklı açılardan gerçekleştirilmesi. ....	68
Şekil 5.12. OFDA ile üretilen çekme-makaslama ve çapraz-çekme numuneleri. ....	69
Şekil 5.13. Zımparalanmış ve bakalite alınmış test numuneleri. ....	70
Şekil 5.14. Parlatma işlemlerinin yapıldığı cihaz. ....	71
Şekil 5.15. Dijital kamera bağlantılı optik mikroskop. ....	72
Şekil 5.16. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı. ....	72

Şekil 5.17. Çekme test cihazı ve uygulama görüntüsü. ....	73
Şekil 5.18. Çapraz-çekme test cihazı ve kullanılan kalıp. ....	74
Şekil 5.19. Deneysel çalışmalarda kullanılan mikrosertlik ölçüm cihazı. ....	76
Şekil 5.20. AA-normal bağlantının mikrosertlik haritası.....	76
Şekil 5.21. Mikrosertlik ölçüm noktaları. ....	77
Şekil 5.22. Yorulma testlerinde kullanılan aktüatör. ....	79
Şekil 5.23. Yorulma test fikstür tasarımı ve imalat görüntüsü. ....	79
Şekil 5.24. Yorulma cihazı ve test görüntüleri. ....	80
Şekil 6.1. AA ve OFDA kaynak kesitleri makro görüntüleri.....	82
Şekil 6.2. AA ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların MP test görüntüleri. ....	84
Şekil 6.3. OFDA ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların MP test görüntüleri. ....	85
Şekil 6.4. AA (normal) ile üretilen numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri... ..	86
Şekil 6.5. AA (BÖI) ile üretilen numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri. ....	87
Şekil 6.6. OFDA (normal) numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri. ....	90
Şekil 6.7. OFDA (BÖI) numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri. ....	91
Şekil 6.8. AA-normal kaynaklı bağlantıların sertlik değer grafiği.....	95
Şekil 6.9. AA-BÖI uygulanan kaynaklı bağlantıların sertlik değer grafiği. ....	95
Şekil 6.10. AA-normal birleştirmelere ait sertlik ölçüm noktaları. ....	99
Şekil 6.11. AA-normal 3'lü kaynaklı bağlantıların sertlik grafikleri.....	100
Şekil 6.12. AA ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların sertlik haritaları.....	102
Şekil 6.13. Sertlik haritalarının oluşturulması için alınan ölçüm noktaları. ....	102
Şekil 6.14. OFDA-normal kaynaklı bağlantıların sertlik değer grafiği. ....	103
Şekil 6.15. OFDA-BÖI uygulanan kaynaklı bağlantıların sertlik değer grafiği. ....	104
Şekil 6.16. Ana malzemelerin çekme test grafikleri. ....	108
Şekil 6.17. Ana malzemelerin çekme testi öncesi ve sonrası görüntüleri.....	109
Şekil 6.18. Çekme-makaslama test grafikleri. ....	110
Şekil 6.19. Çekme-makaslama test ortalama sonuçları. ....	111
Şekil 6.20. Çekme-makaslama test sonrası genel görünüm. ....	114
Şekil 6.21. Çekme-makaslama test sonrası kopma görüntüleri. ....	115
Şekil 6.22. Çekme-makaslama (AA-normal) hasar modları SEM görüntüsü. ....	117
Şekil 6.23. Çekme-makaslama (AA-BÖI) hasar modları SEM görüntüsü.....	117
Şekil 6.24. Çekme-makaslama (OFDA-normal) hasar modları SEM görüntüsü. ...	118
Şekil 6.25. Çekme-makaslama (OFDA-BÖI) hasar modları SEM görüntüsü.....	118

## **Sayfa**

Şekil 6.26. Üçlü çapraz çekme sonuçları a) AA-normal ve b) OFDA-normal.....	121
Şekil 6.27. Çapraz çekme ortalama sonuçları.....	122
Şekil 6.28. OFDA-normal numunelerin kopma görüntüleri.....	124
Şekil 6.29. Çapraz çekme test sonrası kopma yüzeyleri.....	125
Şekil 6.30. AA yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.....	126
Şekil 6.31. OFDA yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.....	128
Şekil 6.32. AA ve OFDA yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.....	130
Şekil 6.33. AA-OFDA (normal) yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.....	133
Şekil 6.34. AA-OFDA (BÖI) yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.....	133
Şekil 6.35. Yorulma testi sonrası oluşan kırık yüzeylerin makro görüntüsü.....	134
Şekil 6.36. Kopma yüzeyinden SEM analizi için alınan parça.....	135
Şekil 6.37. AA-normal numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	136
Şekil 6.38. AA-BÖI uygulanan numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü. ...	137
Şekil 6.39. OFDA-normal numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	137
Şekil 6.40. OFDA-BÖI numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	138



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 5.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri .....	57
Çizelge 5.2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	57
Çizelge 5.3. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri.....	66
Çizelge 5.4. Deneysel çalışmalarda kullanılmak için birleştirilen numune sayısı.....	68
Çizelge 6.1. Kaynak çekirdek ve nokta ebatları. ....	82
Çizelge 6.2. Çekme-makaslama test sonuçları. ....	109
Çizelge 6.3. Çapraz-çekme test sonuçları. ....	120
Çizelge 6.4. Kaynaklı bağlantıların yorulma test sonuçları. ....	126

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Ag	: gümüş
Al	: alüminyum
C	: karbon
Cu	: bakır
Cr	: krom
Fe <sub>3</sub> C	: demir karbür
H	: hidrojen
Mn	: mangan
Mn <sub>3</sub> C	: mangan karbür
Mg	: magnezyum
Mo	: molibden
Nb	: niobyum
P	: fosfor
S	: kükürt
Si	: silisyum
Ti	: titanyum
V	: vanadyum

## KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
AK	: Arayüzey Kırılması
AHSS	: Advanced High Strength Steel (Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik)
BÖİ	: Bölgesel Ön Isıtma
CP	: Complex Phase (Kompleks Fazlı)
ÇK	: Çekme Tipi Kırılma
DA	: Doğru Akım
DNK	: Direnç Nokta Kaynağı
DP	: Dual Phase (Çift Fazlı)
EB	: Ergime Bölgesi
EM	: Esas Metal
EDS	: Enerji Dispersiv Spektrum (Enerji Dağılım Spektroskopisi)
FZ	: Füzyon Bölgesi (Ergime Bölgesi)
KM	: Kaynak Metali
KT	: Kaba Taneli
İT	: İnce Taneli
MART	: Martenzit Çelikler
MHO	: Martenzit Hacim Oranı
MP	: Manyetik Parçacık
HAZ	: Heat Affected Zone (Isı Tesiri Altındaki Bölge)
HSLA	: High Strength Low Alloy (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli)
HV	: Vickers Hardness (Vickers Sertliği)
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
OFDA	: Orta Frekans Doğru Akım
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TMCP	: Termo Mekanik İşleme Teknolojisi
TRIP	: Transformation Induced Plasticity (Dönüşümle Plastikliği Arttırılmış)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Otomotiv sektöründe en yaygın kullanılan malzeme çeliktir. Çelik malzemeleri kullanan üreticiler, hafif bir yapıya sahip olması, yüksek mukavemet özelliği göstermesi ve şekillendirilebilirlik özelliklerinden dolayı çelik malzeme kullanmayı tercih ederler. Otomotiv sektöründe farklı olarak plastik, alüminyum, magnezyum vb. malzemeler yakıt tüketimini düşürmeye yönelik iyi malzemeler olsa da güvenlik açısından çelik malzemeler hala önemini korumaktadır [1]. Otomotiv sektöründe kullanılan çelikler 3 kısımda incelenir [2]. Birincisi yumuşak çelikler olup yüksek dayanıma ihtiyaç duyulmayan yerlerde kullanılır. İkincisi ise yüksek mukavemetli çeliklerdir. Bu tür çelikler IF (interstitial free) denilen çok az arayer atomu içeren çeliklerdir ve son olarak üçüncü kısımda ise, ileri gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerdir. Bu tür çelikler çift fazlı ve martenzitik yapıdaki çeliklerdir ve dayanımları oldukça yüksektir. Bu çalışmada kullanılan STREX 700 CR ve DP (dual phase) 800 gelişmiş yüksek mukavemetli çelik grubuna girmektedir.

Otomotiv sektörünün ihtiyacı doğrultusunda yakıt, dayanım, mukavemet vb. özelliklerinin iyileştirilme isteğinden dolayı çelik üreticileri STREX 700 CR ve DP 800 olarak adlandırdığı gelişmiş yüksek mukavemetli otomotiv çeliklerini, Ar-Ge çalışmaları yaparak sektöre kazandırmışlardır [2-4] . Bu gelişmelerin altyapısında ise, insanların artan taleplerinin karşılanmasına bağlı olarak malzeme alanındaki ilerlemeler yer almaktadır. Böylelikle otomotiv üreticilerin artan talepleri ve rekabet edebilir seviyede olabilmeleri için yüksek dayanıklı çeliklere olan ihtiyacı her geçen gün artmaktadır.

Araç güvenliği, yakıt verimliliği ve hafiflik için sürekli geliştirilen ultra-yüksek mukavemetli çelikler (UHSS) otomotiv bünyelerinde gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yolcuların güvenliği için sağlanan çarpma direnci ve çevre bilincinin artmasıyla

birlikte hava kirliliğinin azaltılması amacıyla karbon emisyon değerini düşürmek için bu tür çelik türlerine olan ihtiyaç daha da artmaktadır [5,6]. Yüksek mukavemetli çelik grubuna giren DP çelikleri ferrit ve martenzit yapıdan oluşmaktadır [7–9]. Çift fazlı çelikler ferrit içerisinde %20 martenzit içerirler [10-12]. Yapısında oluşan martenzit fazı gerekli olan mukavemet değerinin artmasına neden olurken ferrit fazı ise istenilen sünekliğin gerçekleştirilmesini sağlayarak yapıya daha iyi bir şekillendirilebilirlik kazandırır. Ayrıca mukavemet-ağırlık ilişkisi de önem kazanmaktadır [13-16]. İleri yüksek dayanımlı çeliklerin (AHSS) kullanılmaya başlanmasıyla birlikte araçların ağırlıklarında yaklaşık olarak %25 oranında azalma meydana geldiği belirlenmiştir [17].

AHSS çelikleri araçların ön ve arka tampon kirişleri, A ve B direkleri, yan raylar, tüneller, takviyeli kapılar ve tavan rayları gibi araç kaza güvenliği yapı parçalarının en umut verici malzemelerinden biri haline gelmiştir. DP, TRIP (transformation induced plasticity), CP (complex phase) ve MS (martensitic steel) çelikleri oda sıcaklığında şekillendirilmek üzere geliştirilmiştir. Yüksek dayanımlı çelik sacların oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği düşüktür ve geri yaylanma problemlerinin çözümü geleneksel çeliklere kıyasla zordur. Ayrıca geleneksel şekil verme yöntemleri uygulanarak bu malzemelerle karmaşık geometriye parçalar elde edilmesi mümkün değildir. Yüksek ve çok yüksek dayanımlı çelik sacların büyük miktarlarda şekil değişimlerinin gerçekleştirilebilmesi için yüksek sıcaklıklara çıkılması gerekmektedir [18].

Otomobil gövdesi için yapılan çalışmalarda tasarımcıların uygun deformasyona sahip malzeme seçimi oldukça önemlidir. Tasarlanan araçların ön kısımlarından meydana gelebilecek darbelere karşı uzun mesafede gelen enerjiyi absorbe edebilen malzeme kullanılması gerekirken, orta kısımlarından gelebilecek herhangi bir darbeye karşı kısa mesafelerde çarpışmanın etkisiyle oluşan enerjiyi yolculara minimum seviyede hissettirerek darbeyi emebilen uygun tasarımlar yapılması gerekmektedir. Çarpışma özelliği iyi olan hafif sacların elde edilmesi için yüksek mukavemetli çeliklerin soğuk şekillendirme işlemi gerçekleştirilmekte veya bor alaşımlı çeliklerin sıcak şekillendirme işlemi yapılmaktadır. Sıcak şekillendirme işlemi sürecinde, malzemenin çekme mukavemeti 1500 MPa'nın üzerinde bir değere ulaşır ve aynı zamanda

malzeme büyük miktarda enerjiyi absorbe ederek küçük değerlerde deformasyonlara uğrar [19].

DOCOL serileri kaplamasız veya korozyondan korunmak için çinko (GI), galvaniz (GA) ve çinko-alüminyum (ZA) kaplamalı olarak üretilirler. Aynı zamanda DOCOL serilerinden DP 800 çelik türünün kaynaklanması kolaydır [20]. DP 800 çeliğinin çekirdek bölgesinde oluşan sertlik değeri ortalama 425 HV civarındadır [21]. Genellikle martenzit adaları gibi sert bir ikinci faz içeren bir ferrit matrisinden oluşan çelik türüdür [22,23]. DP çeliklerinin kullanımı sırasında, çeliklerin yükleme doğrultusuna göre hadde yönü ve deformasyon hızı oldukça önemlidir [24].

STRENX çelik türlerine ait referans kaynaklar araştırıldığında, fazla bir bilgiye ulaşılamadığı görülmüştür. Araştırma sonucunda ulaşılan bilgilerde ise sadece kendi aralarında (STRENX-STRENX ve DP-DP) yapılan kaynaklı birleştirme çalışmalarına dayanmaktadır. Otomotiv sektöründe DP 800; A-B-C direkleri, tavan-çatı rayı, marşpiyel ve tampon güçlendirme için kullanılırken, STRENX 700 CR koltuk çerçevesi, koltuk rayı, iş makineleri, yük taşıyıcı yapılar, ağır taşımacılıkta kullanılmaktadır ve aynı zamanda elektrikli araçların bataryalarını korumak için kullanılması düşünülmektedir. STRENX ve DP çeliklerini birleştirmek için kullanılan yöntemlere bakıldığında ise; MIG-MAG, TIG ve az da olsa direnç nokta kaynak (DNK) yöntemlerinin kullanıldığı bazı verilere sınırlı bir bilgi dâhilinde ulaşılabilmektedir. İşte bu nedenle yapılan tez çalışmasında, STRENX 700 CR ve DP 800 çelik malzemelerinin direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışma kapsamında alternatif akım (AA) yanında orta frekans doğru akım (OFDA) teknolojisi kullanılarak yeni nesil yüksek dayanımlı çelik malzemelerin (STRENX ve DP) kaynaklanabilirliği araştırılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmanın amaçları:

- Otomotiv sektöründe son zamanlarda yoğun bir şekilde kullanılan yüksek dayanımlı çeliklerin direnç nokta kaynaklı bağlantılarında, kaynaklı bağlantı dayanım özelliklerini artırmak ve bu şekilde araçların kaynaklı bağlantı performanslarını iyileştirmek.

- Yeni bir yaklaşım ve ürün ortaya çıkması sağlanarak ülkemizde, otomotiv yan sanayisine direnç nokta kaynak prosesi ile ilgili tamamen yerli ve gelişmiş kaynak prosedürü oluşturmak.
- Ülkemizde yerli otomobil üretimine yönelik çalışmaların yapıldığı da bilinmektedir. Çalışma kapsamında üretilecek olan yenilikçi sistemin yerli otomobil üretimi sürecine de yeni bir yaklaşımla kullanılmasına destek vermek.
- Başlangıçta otomotiv sektörü esas alınsa da çalışma kapsamında elde edilen sonuçların farklı malzemelerde ve farklı sektörlere doğrudan katkıda bulunmak.
- Yapılan çalışma kapsamında geliştirilen yeni yaklaşım ve üretilen yenilikçi sistemin sadece direnç nokta kaynak prosesi için değil benzer eksikliklerin bulunduğu diğer kaynak yöntemleriyle kullanılmasını sağlamak.
- Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçların kullanılmasıyla çeşitli bilimsel yayınlar yaparak literatüre yeni bir yaklaşım kazandırmak.
- Yapılan çalışmaların ve elde edilen ürünlerin geliştirilmeye açık bir veri kaynağı olmasını sağlayarak üretilen sistemin geliştirilebilir bir sistem olmasını sağlamak.

Yapılan çalışmanın hedefleri ise:

- STRENX 700 Cr ve DP 800 yüksek dayanımlı çeliklerin direnç nokta kaynak işleminden dolayı meydana gelen kaynaklı bağlantı hatalarının, proses içi bölgesel ısıtma (BÖİ) sistemiyle en aza indirilmesini veya giderilmesini sağlamak amacıyla yeni bir sistem tasarlanıp üretilmesi.
- Tasarlanan yeni sistemin direnç nokta kaynak makinesine uyarlanması.

- Tasarılan yenilikçi sistemin kullanılmasıyla kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve faz dönüşümlerini kontrol edebilmek ve böylelikle kaynak bölgesinin sertlik değerlerinin istenilen düzeyde olmasını sağlamak.

Yapılan tez çalışmasında genel olarak; gelişen otomotiv sektörünün ihtiyaç ve talepleri doğrultusunda geliştirilen ve ileri yüksek mukavemetli çelik (AHSS) türleri grubunda yer alan 1,2 mm kalınlıklarında STREX 700 CR ve DP 800 çelik sac malzemeler direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Gerçekleştirilen birleştirmelerin yapılabilmesi için çeşitli fikstürler tasarlanarak kaynak makinesine entegre edilmiştir. Birleştirme işlemlerinde alternatif akım (AA) ve orta frekans doğru akım (OFDA) türleri kullanılmış ve deney malzemelerine bölgesel ön ısıtma (BÖİ) ve ön ısıtmasız (normal) olarak uygulanmıştır. Daha sonra STREX 700 CR ve DP 800 çelikleri arasındaki direnç nokta kaynaklı bağlantıların mikroyapısı, mekanik özellikleri ve yorulma davranışı araştırılmış ve karakterize edilmiştir. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve kaynak metalindeki mikroyapısal özellikler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Mikroyapı ve çekme-makaslama / çapraz-çekme kuvveti arasındaki ilişki üzerine detaylı incelemeler yapılmış ve yorulmayı meydana getiren mekanizmalar incelenmiştir. Son olarak; elde edilen deneysel sonuçlar yorumlanarak otomotiv sektörünün kullanımına sunulmuştur. Çalışmada yapılanlar, kapsam ve içerik bakımından bölümlere ayrılarak aşağıda kısaca özetlenmiştir.

1. bölüm olan giriş bölümünde, konu kapsam ve içeriği özetlenerek yapılanlar hakkında kısa bilgiler verilmiştir. 2. bölümde ise, tez kapsamında kullanılan ve aynı zamanda otomotiv sektöründe önemli bir kullanım alanına sahip STREX ve DP çeliklerin mekanik ve kimyasal özellikleri hakkında bilgiler verilerek üretim yöntemlerinden söz edilmiştir. 3. bölüm literatür çalışmalarının araştırıldığı kısım olup, ulusal ve uluslararası yapılan çalışmalardan önemli kesitler verilmiştir. 4. bölümde, elektrik direnç nokta kaynak yöntemi hakkında bilgiler verilerek kaynak parametrelerine değinilmiştir. Daha sonra kaynak makinalarından bahsedilerek çift fazlı çeliklerin kaynaklanabilirliği ve kaynak bölgesi hakkında açıklamalar yapılmıştır. 5. bölümde ise, tez kapsamında gerçekleştirilen fikstür tasarımları, imal edilmesi ve kaynak makinesine entegre süreci hakkında bilgiler verilmiştir. Aynı zamanda bu bölümde, kullanılan malzemeler ve kaynak yöntemi anlatılarak gerçekleştirilen



deneysel çalışmalar hakkında detaylı bilgiler yer almaktadır. 6. b6l6mde uygulanan testler ayrı başlıklar altında incelenmiş ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler literat6r çalışmalarıyla ilişkilendirilmiştir. Son olarak 7. b6l6mde ise; genel sonuçlar 6zetlenerek ileride yapılacak çalışmalar için 6nerilerde bulunulmuştur.

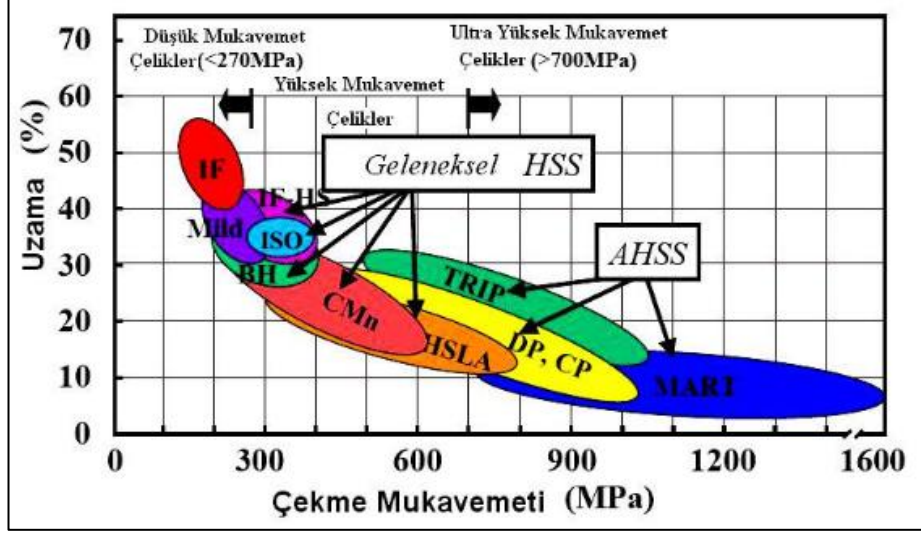
## BÖLÜM 2

### OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER

Otomotiv sektörüne bakıldığında gövde kısımlarının büyük bir çoğunluğunda çelik yapıların olduğu görülmektedir. Bu tür çelik kısımların şekil değiştirebilme kabiliyetlerinin yanında ileri derecede kaynaklanabilirlik özelliğine sahip olmaları da istenir [25,26]. Üreticilerin bu doğrultuda yapmış oldukları çalışmalar sonucunda ileri yüksek mukavemetli çelikler kullanılmaya başlanmış ve Advanced High Strength Steel (AHSS) adıyla sektördeki yerini almıştır [27,28]. AHSS çeliklerinin kullanılmasıyla birlikte Avrupa'da 2001 yılında %25 oranında araçların ağırlıklarında önemli oranda azalma olduğu belirlenmiştir [29]. Ağırlığın azaltılmasındaki en büyük etken yakıt ve çevre bilinci olarak görülse de artan çarpışma direnci, daha iyi şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirliğin yanında son olarak çeliklerin boyanılabilirliği eklenilebilir [30].

İleri yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), yüksek mukavemetli (HSS) ve ultra yüksek mukavemetli (UHSS) çelik gruplarını da kapsamaktadır [31,32]. AHSS çelikleri, diğer çelik gruplarına oranla daha fazla akma, çekme ve elastikiyet modülüne sahiptirler [33]. Otomotiv sektöründe kullanılan AHSS çeliklerinin gelişme süreçleri, çekme dayanımı ve % uzama oranları Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Çeliklerin gelişim süreçleri süneklilik ve mukavemet arasındaki ilişkinin önemini ortaya koymakta ve sürekli olarak gelişmekte olduğu da görülmektedir [34]. İleri yüksek mukavemetli çelikler; çift fazlı çelikler (DP), TWİP (twinning-induced plasticity steels) çelikleri, dönüşümle plastikliği artırılmış (TRIP) çelikleri, kompleks fazlı (CP) çelikleri, martenzit (Mart) çelikler, alüminyum takviyeli L-IP (lightweight steels with induced plasticity) ve SIP (shear band strengthened steels) gibi farklı çelik türlerini içermektedir. Otomobillerde kullanılan kısımlara bakıldığında ise; kapı profilleri, tamponlar, tavan,

A-B-C direkleri, kapı güçlendirmelerinde ve darbe enerjisinin absorbe edilerek emilmesini sağlamak amacıyla farklı kısımlarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Çeliklerin tarihsel gelişim süreçleri ve çekme-uzama değerleri [26,35,36].

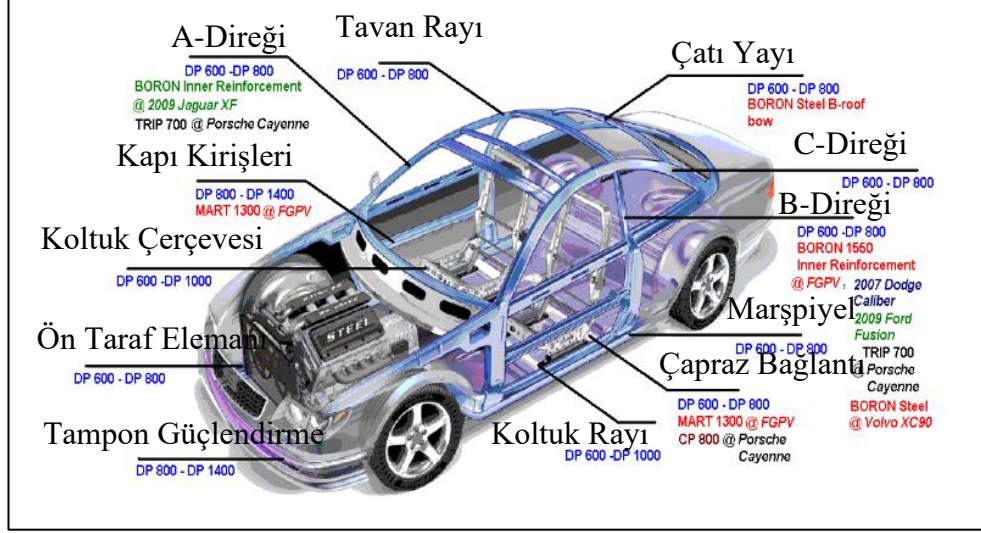
Yüksek dayanımlı (HSS) çeliklerinin çekme dayanımları 270-700 MPa, ultra yüksek dayanımlı çeliklerin (UHSS) 700 MPa ve üzerine çıkabilmekteyken yeni nesil çelik grubunda bulunan ve geliştirilmiş yüksek mukavemetli (AHSS) çelik olarak adlandırılan gruplarının çekme dayanımları 1500 MPa değerlerine ulaşabilmektedir [37,38].

## 2.1. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER (DP)

Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), günümüz teknolojisinde en hızlı şekilde büyüyen malzeme grubu arasında yer almaktadır [39,40]. Otomotiv sektöründe ağırlık, mukavemet ve performans özellikleri istenmesinden dolayı çelik üreticileri daha ince parçalar üretmek zorunda kalmışlardır. Bu bağlamda üretilen çift fazlı (DP) çelikler, yüksek mukavemetli çelik ailesi içerisinde yer almaktadır [41–43].

1970 yılından beri sürekli olarak geliştirilen DP çelikleri yüksek mukavemete sahip olması, HSS çeliklerine oranla daha iyi şekillendirilebilirlik, tokluk ve yorulma direnci gibi özelliklerinden dolayı oldukça tercih edilmektedir [37,44,45]. Ayrıca ekonomik açıdan maliyet hesabı yapıldığında sağlamış olduğu avantaj ve piyasada rahatlıkla

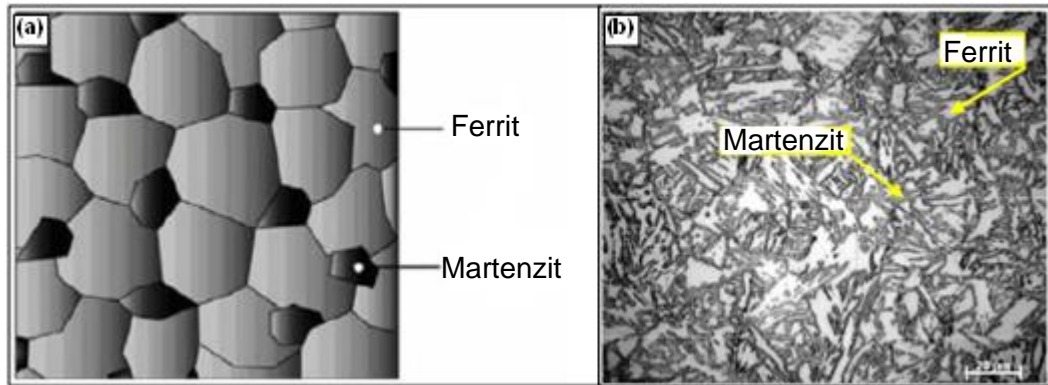
bulunmasından dolayı AHSS grubunda yer alan DP çeliklerinin önemi artmaktadır [46,47]. Şekil 2.2’de otomotiv gövdesinde kullanılan AHSS örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Otomotivde kullanılan DP çelik türleri ve konumları [48].

### 2.1.1. DP Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri

DP çeliklerinin mekanik özelliklerinin diğer çelik türlerine oranla iyi olmasının nedeni mikroyapılarına bakıldığında anlaşılmaktadır. Mikroyapıları ana matris ferrit fazı içerisine dağılmış martenzit adacıklarından oluştuğu görülmektedir [49–51].

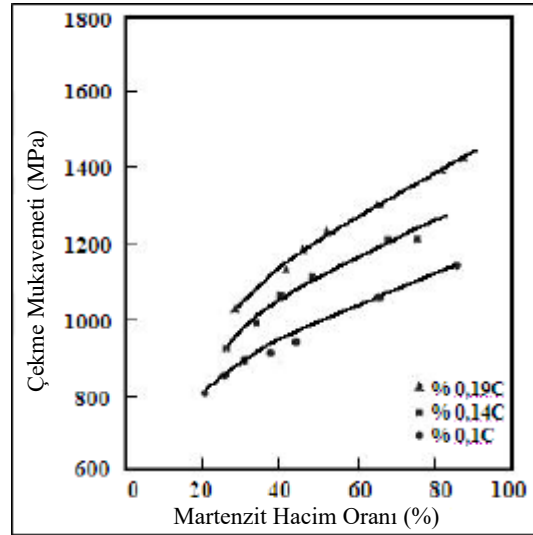


Şekil 2.3. DP çeliğine ait (a) şematik ve (b) mikroyapı görüntüsü [52,53].

Şekil 2.3’te DP çeliğe ait şematik ve optik mikroskop ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü vardır. Bu şekilde bir yapının var olması da DP çeliklerinin ferrit fazından dolayı şekil

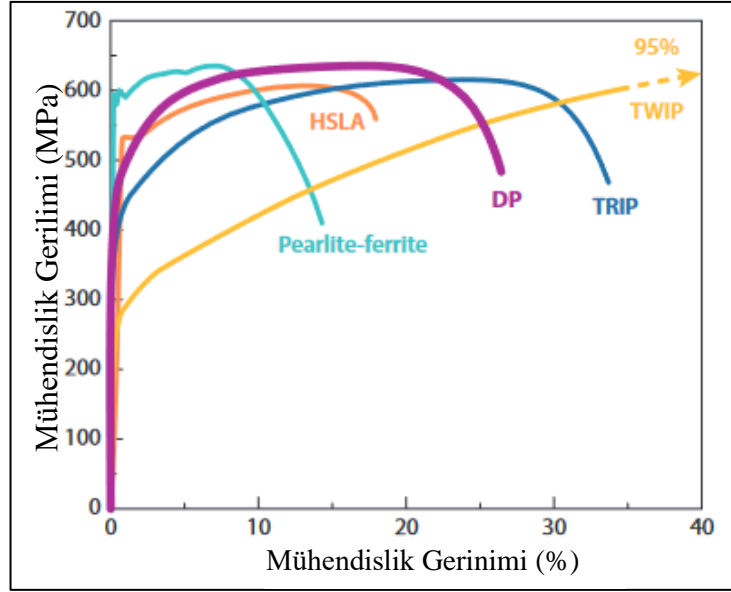
değişimine elverişli hale gelmesine sebep olurken, martenzit fazının da yapının sert olmasını sağlayarak mukavemet artışını neden olmaktadır.

DP çeliklerin mekanik davranışları; kimyasal bileşimlerine, segregasyonların varlığına, dislokasyonlara, tane boyutlarına ve fazların hacim oranlarına bağlı olduğu görülmektedir. Martenzit fazının yapıda bulunmasıyla birlikte çift fazlı çeliklerin dayanımı arttığı, yapı içerisindeki martenzit fazının karbon (C) miktarına bağlı olarak sertlik değerinin de artış gösterdiği belirlenmiştir [54]. Ayrıca çift fazlı çeliklerde martenzit hacim oranı %20-30 arasında olması istenmektedir [26,55,56]. Şekil 2.4'te DP çeliklerin farklı martenzit hacim oranlarına (MHO) sahip çekme / dayanım grafiği verilmiştir [37].



Şekil 2.4. DP çeliklerde farklı MHO'nun çekme mukavemetine etkisi [37].

DP çeliklerin gerilim-gerinim davranışları incelendiğinde, yüksek mukavemetli düşük alaşım (HSLA) gibi diğer çelik türlerine göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Yüksek çekme mukavemeti, sürekli ve düşük akma dayanımlarına sahiptirler. Bu etkenlerden dolayı deformasyona uğrama kapasiteleri oldukça yüksektir ve bu etkenler mükemmel şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu da bu tür çeliklerin otomotiv sektöründe neden tercih edildiğini açıkça ortaya koymaktadır [37,57]. Şekil 2.5'te DP çeliklerin diğer çelik türlerine göre gerilim-gerinim grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.5. DP çeliklerin diğer çeliklere göre stress/gerilim grafiği [57].

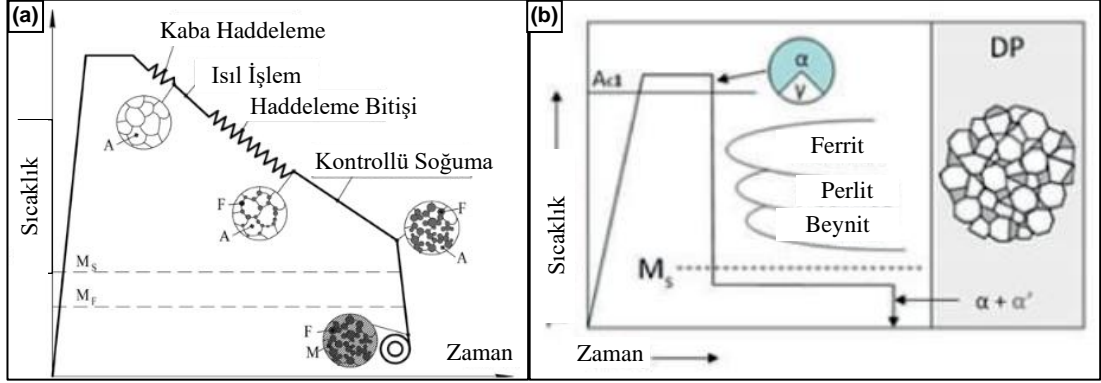
### 2.1.2. DP Çeliklerin Üretimi

DP çeliklerin üretiminde amaç mikroyapıda şekillendirilebilirlik açısından kolaylık sağlamak için ferrit, mukavemet ve sertliğin sağlanması için adalar şeklinde yapı içerisinde bulunan martenzit fazının elde edilmesidir. Ferrit ve martenzit yapıya sahip çeliklerin üretilmesi, sıcak haddeleme veya kritik tavlama gibi işlemlerin uygulanmasıyla elde edilebilmektedir.

Ferritik yapıya sahip çelik kontrollü bir şekilde belirli süre kritik bir sıcaklıkta (yaklaşık 750 °C) tavllanır ve ferrit fazıyla birlikte östenit fazında oluşturulur. Daha sonra yapıdaki östenit fazı martenzit fazına dönüşebilmesi için oda sıcaklığına kadar soğutulur. Fakat bazı durumlarda östenit fazının yapıda korunması da istenebilir. Böylelikle yapıda az da olsa belirli bir % olarak kalıntı östenit bulunur.

Diğer bir yöntem ise, östenit çeliklerin 800 °C'nin üzerinde su verme hızının kontrol edilmesiyle elde edilir. Böylelikle yapıdaki östenitin bir kısmı ferrit fazına dönüşürken geri kalanı ise martenzit fazına dönüşmektedir. Östenit fazının istenen dönüşüm sıcaklıkları  $A_{C1}$ 'de başlar ve  $A_{C3}$  sıcaklığında son bulur. Daha sonra oda sıcaklığına kadar soğutularak östenit fazı martenzit fazına dönüştürülür. Daha yavaş olan soğutma hızlarında martenzitik olmayan bileşenler (beynit) oluşturmak mümkündür. Yüksek

olan soğutma hızlarında östenit fazının tamamı martenzit fazına dönüştürülür [57-59]. Şekil 2.6'a da sıcak haddeleme, b'de ise kritik tavlama işlemleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. DP çelik üretimlerinin şematik gösterimi [60,61].

## 2.2. STREX ÇELİKLERİ

Teknolojinin ve sektörel bazda kullanıcıların talepleri doğrultusunda ihtiyaçların artmasıyla modern yapı çeliklerinin imalatta sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [62]. Bu ihtiyaç doğrultusunda yüksek mukavemetli çelik grubunda yer alan STREX çelikleri üretilmiş ve piyasaya sunulmuştur. Küresel piyasada öncü firmalar arasında yer alan otomotiv ve taşımacılık sektöründe lider çelik üreticisi olarak kabul gören SSAB firması tarafından STREX çelikleri üretilmektedir [63].

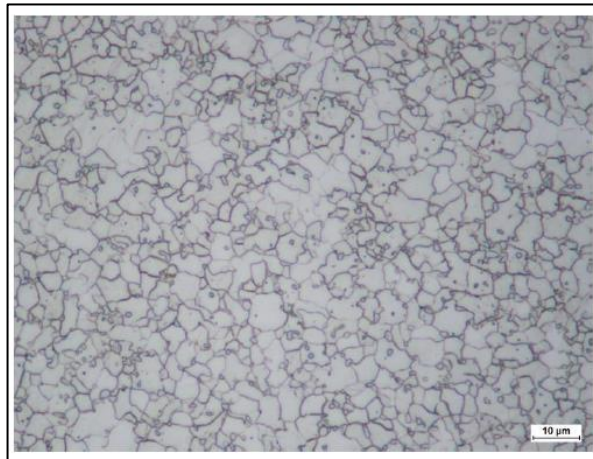
STREX çeliklerinin üretimiyle ince kesitli ve daha güçlü performans çeliklerinin ortaya çıkması sağlanmıştır. Bu sayede kesit inceltmesiyle birlikte daha hafif yapıların imal edilmesi mümkün hale gelmiştir. Ayrıca ağırlık azaltılmasıyla birlikte ekonomik değer yanında günümüz ve gelecek açısından her geçen gün önem kazanan çevre bilinci etkisiyle STREX kullanılan imalatlarda yakıt verimliliği sağlandığından doğaya salınan  $CO_2$  emisyon oranı azalmaktadır [64].

SSAB firması üretmiş olduğu çelik türlerinde diğer çelik üreticileri gibi fosil yakıtlar (kok kömürü vb.) kullanılmaktadır. Fakat firma dünya piyasasına 2026 yılında fosil yakıt kullanılmadan üretilen ilk çelik türünü sunmayı hedeflemektedir. 2045 yılında

ise üretmiş olduğu tüm çelik türlerinde HYBRIT teknolojisi kullanarak tamamen fosil yakıtsız üretim gerçekleştirmeyi planlamaktadır. Bu bağlamda STRENX çelik türlerinin üretiminde oluşan hava kirliliği en aza inerek çevreci bir üretim ile gerçekleştirilen çelik türü olacaktır. Yapılan bu üretim ile İsveç'te %10, Finlandiya'da ise %7 oranında CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinde bir azalma olacağı düşünülmektedir [65].

### 2.2.1. STRENX Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri

STRENX çelikleri kimyasal içerik bakımından incelendiğinde karbon değerinin oldukça az olduğu görülmektedir. Bu durum sonucunda yapıda oluşan mukavemet azalması alaşım elementlerinin katılmasıyla birlikte telafi edilmektedir [66]. Bu tür çelikler karbon elementinin yanında mangan, niyobyum, titanyum veya vanadyum gibi az da olsa alaşım elementlerini içerir [67–69]. Aynı zamanda alaşım elementleri yapı içerisinde tane küçültücü etkiye sahiptirler. STRENX çeliklerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ince taneli beynitik-martenzitik bir yapı olduğu görülmektedir. Ayrıca bazı durumlarda yapıda kalıntı östenit fazına da rastlanılmaktadır [70–74]. STRENX çelikleri yapısında yoğun şekilde ferrit fazı bulunmasıyla birlikte şekillendirilebilme kabiliyeti oldukça yüksek olurken, martenzit fazı nedeniyle de oldukça iyi bir dayanım sergilemektedir. Şekil 2.7'de STRENX çelik türüne ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



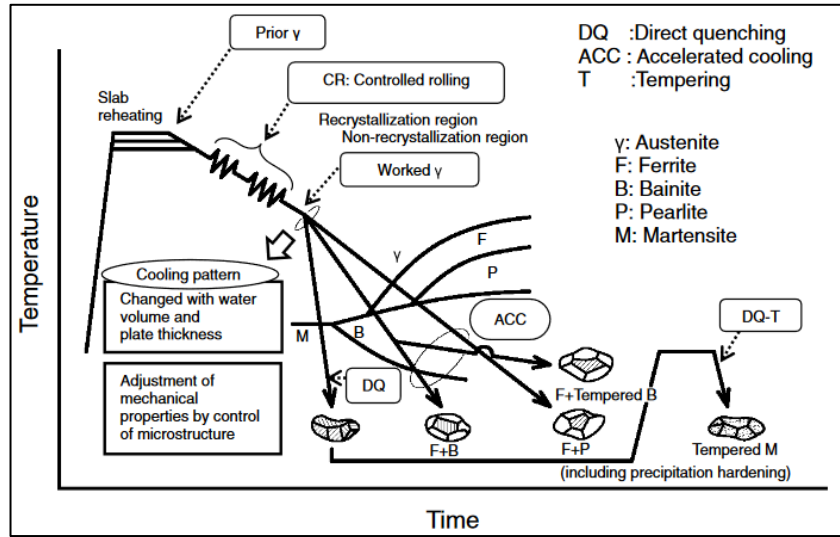
Şekil 2.7. STRENX çeliğine ait mikroyapı görüntüsü [66].



STRENGTH çelikleri 0,7-160 mm kalınlıklarında üretilmektedir. Üretim kalınlıklarına bağı olarak 600-1300 MPa akma dayanımına sahiptirler. Bu nedenle bu tür çeliklerin esneme kabiliyetleri oldukça iyidir. Düşük kalınlıkta üretildiklerinden dolayı ağırlıkları %30 oranında azalmaktadır ve bu sayede yüksek çalışma şartlarına imkân sağlar. Talaşlı imalatta mükemmel işlenebilme özelliğine sahip bu tür çelikler darbe tokluğuna karşı da dirençleri oldukça iyidir [75–77].

### 2.2.2. STRENGTH Çeliklerinin Üretimi

Yüksek mukavemetli çelik türlerinden olan STRENGTH çeliklerin özellikleri ve üretimi hakkında üretici firmanın sınırlı seviyede bilgi vermesine rağmen bu tür çelikler termomekanik olarak haddelendikten sonra su verilir ve temperleme işlemi uygulanarak üretilirler. Genel olarak yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler termomekanik işleme teknolojisi (TMCP) ile üretilirler. Bu teknoloji sayesinde çift fazlı yapılar işleme bağı olarak çok ince taneli olarak ferrit ve beyrit/martenzit yapısından oluşurlar [78,79]. Şekil 2.8’de termo mekanik üretim aşamaları ve kontrollü şekilde oluşan mikroyapılar gösterilmiştir.



Şekil 2.8. TMCP teknolojisi üretim aşaması ve oluşan mikroyapıları [80,81].

## BÖLÜM 3

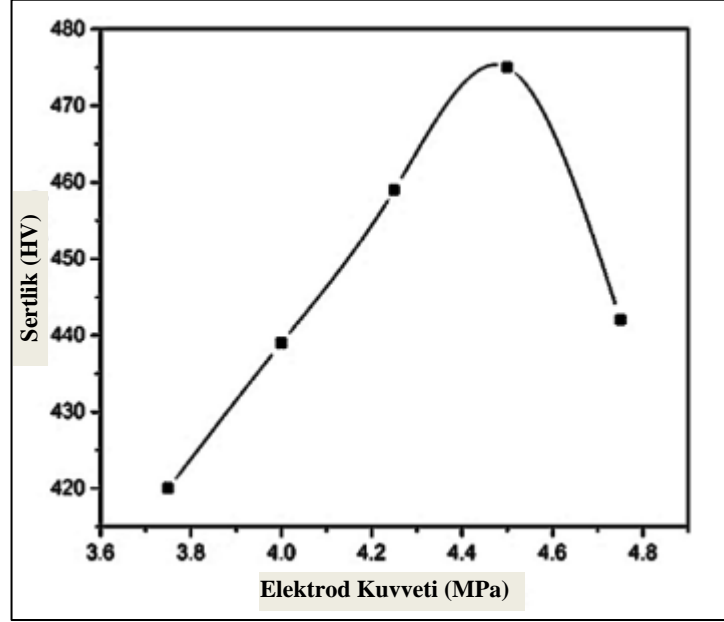
### LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler arasında yer alan ve aynı zamanda tez çalışmasında kullanılan DP ve STREX çelikleri hakkında literatür taraması yapılmıştır. Yapılan literatür taramaları; springer, web of science, scopus ve google akademik gibi en güncel yayınların olduğu veritabanlarında gerçekleştirilmiştir. Taramalar sonucunda ulusal ve uluslararası makale ve tez çalışmalarında DP çeliklere ait çalışmalar bulunurken, STREX başlığı altında yapılan aramalarda çalışmaların yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Scopus ve web of science veri tabanında STREX çeliklere ait toplam 161 adet çalışma bulunurken, STREX 700 CR özelinde yapılan aramalarda ise hiçbir makalenin olmaması yapılan tez çalışmasının ne denli doğru ve önemli olduğunun bir göstergesidir. STREX 700 CR ile DOCOL 1000 DP çeliklerin benzer özelliklere sahip olduklarından dolayı benzer çalışmalara DOCOL 1000 DP çeliği ile yapılan çalışmalar eklenmiştir [82,83]. Son olarak bu bölümde, direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen STREX ve DP yüksek mukavemetli çeliklerin mikroyapı, mikrosertlik, yorulma, çekme-makaslama ve çapraz-çekme sonuçları incelenmiş ve önemli noktaları görsellerle belirtilmiştir.

#### 3.1. DP VE STREX ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Rajarajan vd. [6], yapmış oldukları çalışmada, 1,6 mm DP 800 çeliği direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Orta frekans akıma sahip DA kaynak makinesinin kullanıldığı bu çalışmada, farklı elektrod basınçlarında (3,75-4,75 MPa) mikro/makro yapıları, sertlik, çapraz-çekme ve çekme-makaslama üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda, elektrot kuvvetinin artmasıyla birlikte ergime bölgesinin genişlediği, mekanik özelliklerin ise SEM incelemelerinde görülen martenzit yapıdan kaynaklandığı tespit edilmiştir. En yüksek çekme-makaslama ve çapraz-çekme mukavemet değerleri, 4,5 MPa elektrot

basıncında 18,3 kN ile 15,1 kN olarak belirtilmiştir. Sertlik ölçümlerine bakıldığında ise en yüksek sertliğin ergime bölgesinde 475 HV olduğu görülmüştür. Şekil 3.1’de farklı elektrot kuvvetlerinin sertlik üzerindeki etkisi görülmektedir.

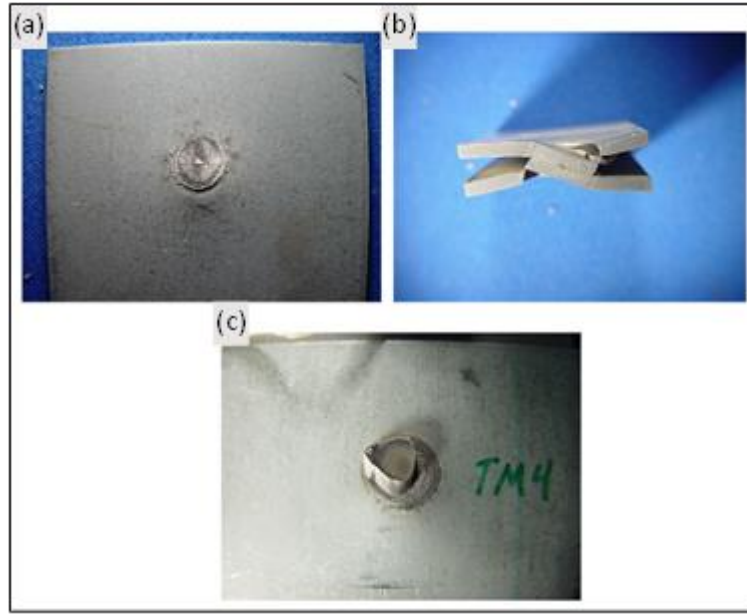


Şekil 3.1. Elektrot kuvveti / sertlik grafiği [6].

Rajarajan vd. [84], DP 800 çift fazlı çeliği nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynak süresi ve elektrot kuvveti gibi parametreler sabit tutulan çalışmada farklı kaynak akımları kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama, mikrosertlik ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kaynak akımının artmasıyla birlikte çekme-makaslama dayanımının belirli bir noktaya kadar arttığı daha sonra ise azaldığı belirlenmiştir. Aynı zamanda akımın artmasıyla birlikte ergime bölgesinde artış meydana geldiği ve yapılan mikrosertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değerinin de ergime bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. ITAB’daki sertlik değerinin düşük olması ise kaynak sırasında ısıdan etkilenmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Sun vd. [85], direnç nokta kaynak yöntemi ile DP 800 ve TRIP800 yüksek mukavemetli çelikleri birleştirmişlerdir. Bu çalışmada, elektrot kuvveti, kaynak süresi ve kaynak akımı gibi parametreler farklı değerlerde kullanılmıştır. Yapılan kaynaklı birleştirmelere sertlik, mikroyapı ve çekme testleri uygulanmış ve çekme testi

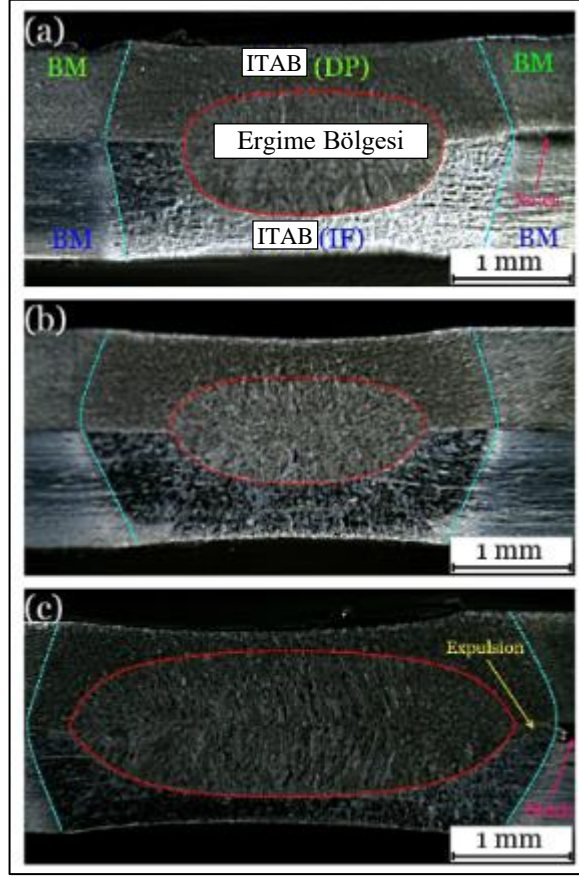
sonucunda oluşan kopma görüntüleri incelenmiştir. Sertlik ölçümlerinde, iki ana malzemenin sertlik değerleri birbirlerine benzerlik (250 HV) gösterse de TRIP800 çeliğinin DP 800 çeliğine göre kaynak bölgesi sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Isıdan etkilenen bölgeler (ITAB) incelendiğinde DP 800 çeliği TRIP çeliğine göre daha geniş bir ITAB'a sahip olduğu tespit edilmiştir. DP 800 ve TRIP800 kaynaklı bağlantıların kopma görüntüleri incelendiğinde kısmi arayüzey, arayüzey ve düğmelenme şeklinde hasar modları görülmüştür. Şekil 3.2'te kopma sonrasında görülen hasar modları gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kaynaklı bağlantıların farklı kopma görüntüleri [85].

Yaghoobi vd. [86], yüksek mukavemetli çift fazlı DP çelik ile ince taneli arayer atomsuz IF çeliğini direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişler. Elektrot kuvveti 5 kN olarak sabit tutulmuş olup 6,8 ve 10 kA akım şiddetleri kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantıların mikroyapı özellikleri ve mekanik davranışları incelenmiştir. Yapılan incelemelerde kaynak akımının artmasıyla birlikte ergime bölgesi (EB) çapının arttığı belirlenmiştir. Şekil 3.3'te farklı kaynak akımlarıyla birlikte ergime bölgesinin nasıl değiştiği gösterilmektedir. 6 ve 8 kA akımlarında EB çapı 2,2 mm iken, 10 kA akım şiddetinde ise önemli ölçüde artış göstererek 3.8 mm olarak tespit edilmiştir. DP çeliğinin iri taneli ITAB'ın martenzit oranı diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu, IF çeliğinin KT (kaba taneli) ITAB'da demir oksit mikroyapı

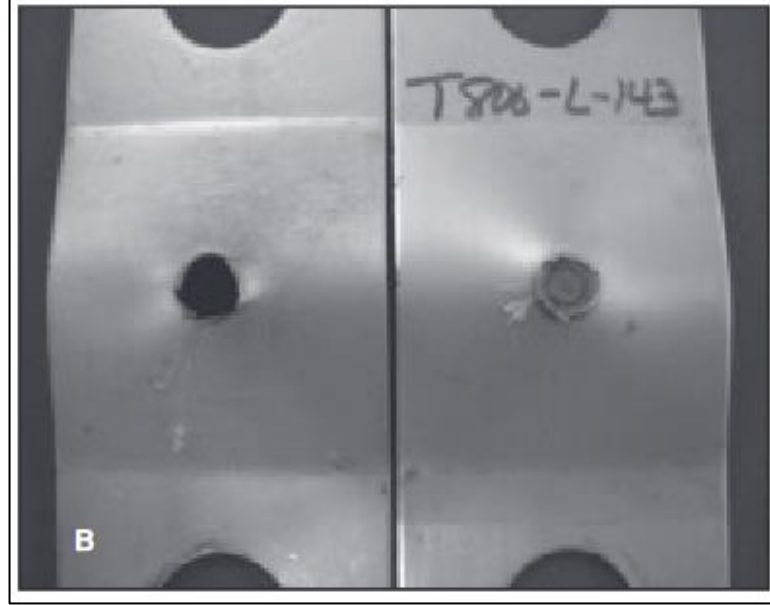
üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik dayanımları ölçüldüğünde ise 10 kA ile yapılan kaynaklı birleştirmenin ergime bölgesindeki sertlik homojenliği diğer bölgelerle kıyaslandığında daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. Kaynak sonrası makroyapı görüntüleri (a) 6, (b) 8 ve (c) 10 kA [86].

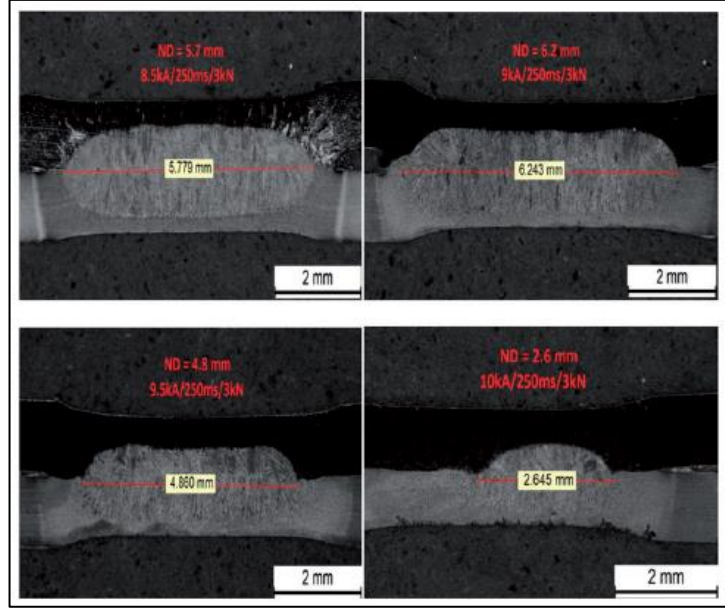
Sun vd. [87], yapmış oldukları çalışmada yüksek mukavemetli DP 800 ve TRIP800 çelikleri direnç nokta kaynak yöntemini kullanarak birleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada kaynak akımları değiştirilerek diğer parametreler sabit tutulmuştur. Kaynaklı birleştirmelere çapraz-çekme ve mikrosertlik testleri yapılarak kaynak sonrası oluşan bağlantıların kopma görüntüleri incelenmiştir. Yapılan sertlik ölçümlerinde TRIP800 çeliğinin sertlik değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca DP 800 çeliğinin ITAB'ında meydana gelen sertlik değerindeki azalmanın nedeni olarak yapıdaki martenzit fazının kaynak ısıyla birlikte temperlenmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Kaynaklı bağlantıların kopma görüntüleri incelendiğinde, arayüzey ve düğmelenme şeklinde arıza modları görünse de kısmi

arayüzey şeklinde kopmalar da görülmektedir. Şekil 3.4'te kaynaklı bağlantıya ait kopma görüntüsü verilmiştir.



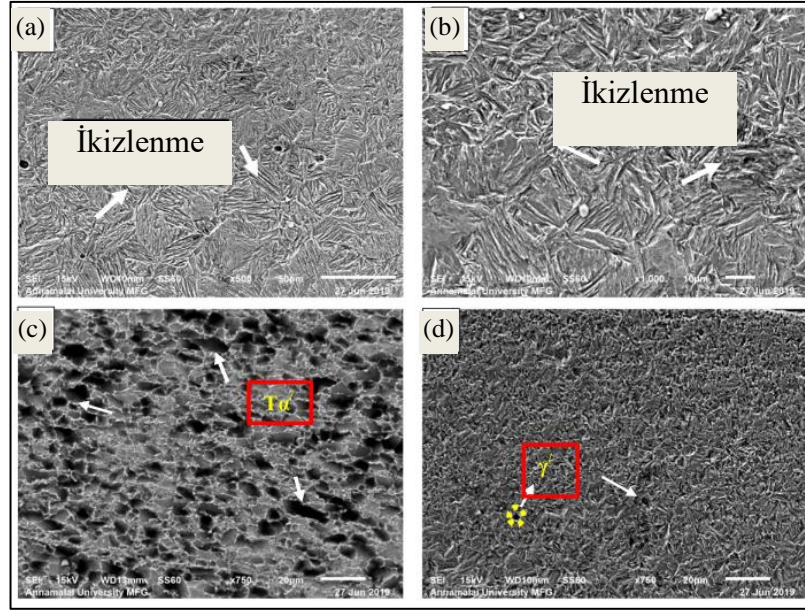
Şekil 3.4. Kaynaklı bağlantıya ait düğmelenme şeklindeki kopma görüntüsü [87].

Verma vd. [88], çift fazlı DP780 çeliği ile galvaniz kaplı (HIF) çeliği direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada farklı kaynak akımları ve elektrot kuvvetleri kullanılarak mikroyapı, çekme-makaslama mukavemeti ve sertlik deneyleri yapılarak sonuçlar irdelenmiştir. Farklı kaynak akımlarının kullanıldığı (6-9,5 kA aralığında) elektrot kuvveti (3kN) ve kaynak süresinin (250 ms) sabit olduğu deneysel çalışmalarda, kaynak akımının artmasıyla birlikte ergime bölgesinin arttığı gözlemlenmiştir. 6-9 kA kaynak akımları arasında ergiyik bölgesi artarken 9,5 kA ve üzeri kaynak akımlarının kullanılmasıyla birlikte ergiyik bölgesinde belirgin bir azalma görüldüğü tespit edilmiştir. Şekil 3.5'te kaynak akımının artmasıyla birlikte kaynak bölgesinin nasıl değiştiği görülmektedir. Akımın artmasıyla birlikte ısı girdisinde artış olduğundan çekme-makaslama dayanımında artış olduğu belirlenmiştir. Vickers mikrosertlik ölçümleri yapıldığında ise en yüksek sertliğin kaynak metalinde daha sonra ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) ve en yumuşak bölgenin 290 HV olarak ferritik-martenzitik yapıya sahip ana metalde olduğu tespit edilmiştir.



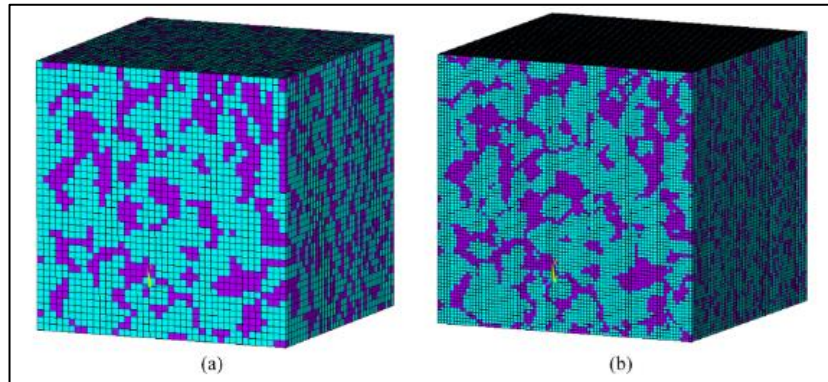
Şekil 3.5. Farklı kaynak akımlarının ergime bölgesine etkisi [88].

Rajarajan vd. [89], yüksek mukavemetli DP 800 çeliğini direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirerek mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Kaynak parametrelerini belirlemek için farklı akım, süre ve elektrot kuvveti gibi değişkenler kullanarak optimum değerleri belirlemişlerdir. Bu değerler; kaynak akımı 5,51 kA, elektrot kuvveti 4,5 bar ve süre 1,53 sn'dir. Kaynak bölgesine optik mikroskop, SEM, XRD, TEM ve EDS analizleri uygulayarak sertlik ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan sertlik ölçümlerinde ana metalin sertliği 295 HV olarak bulunurken ergime bölgesinin sertliği 584 HV olarak bulunduğunu ve bunun sebebinin ise ergime bölgesindeki martenzit yapısının hızlı soğumasından dolayı olduğunu belirtmişlerdir. Optik mikroskop incelemelerinde ergime bölgesinde iğneli martenzit fazının olduğu, ısıdan etkilenen bölgelerde ise temperlenmiş martenzit ve ferrit fazları gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. SEM incelemesi yapıldığında kaynak bölgesinde ferrit matris içerisinde ikiz martenzitik yapılar olduğu, kaba taneli (KT) ve ince taneli (İT) ITAB'da temperlenmiş martenzit ve kalıntı östenit fazlarına rastlanıldığını tespit etmişlerdir. Şekil 3.6'da SEM mikroyapı görüntüsüyle bu durum gösterilmiştir. Ayrıca XRD incelemelerinde, demir karbür ( $Fe_3C$ ) ve manganez karbür ( $Mn_3C$ ) bileşiklerine rastlanıldığını açıklamışlardır.



Şekil 3.6. (a-b) ergime (c) kaba taneli ITAB (d) ince taneli ITAB [89].

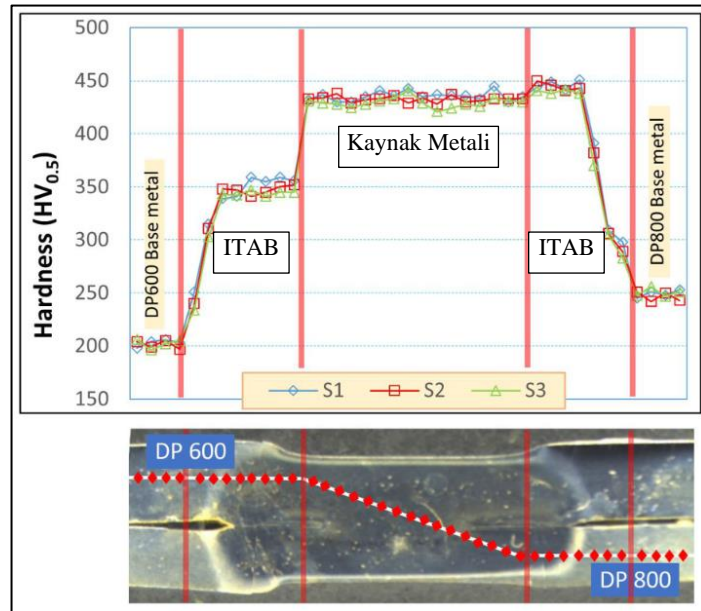
Darabi vd. [90], yüksek mukavemetli çelik grubunda yer alan DP 800 ve DP980 çelikleri direnç nokta kaynak yöntemini kullanarak birleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada kaynaklı bağlantıda oluşan fazların elementel analiz yöntemiyle mikro mekanik 2B ve 3B görüntüleri oluşturularak bir modelleme çalışması yapılmıştır. Şekil 3.7’de modelleme çalışmasına kaba (a) ve ince (b) ağ yapılarına ait resim gösterilmiştir. Çekme testi uygulanarak gerilim-gerinim eğrileri oluşturulan modellerle doğruluğu kıyaslanmıştır. 3B ile yapılan gerilim-gerinim eğrileri 2B ile yapılanlardan yaklaşık %20-24 oranında daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yapılan modelleme sonuçlarına göre 3B ile gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen verilerin 2B’ye göre gerçek sonuçlara daha yakın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. Elemental analiz ile yapılan 3D görüntüsü [90].



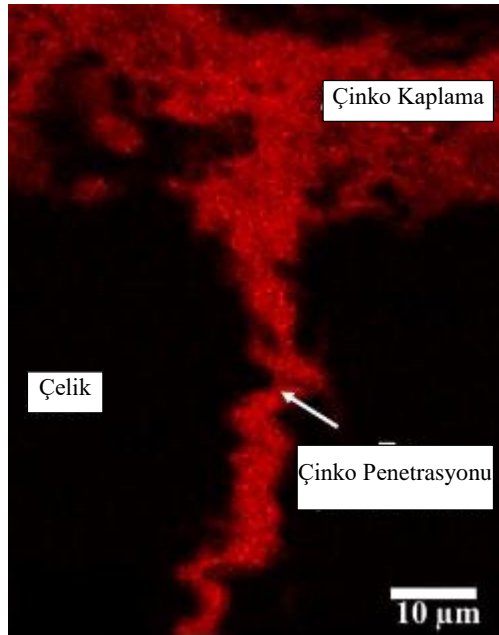
Aydın vd. [91], yapmış oldukları çalışmada DP600 ve DP 800 yüksek mukavemetli çift fazlı çelikleri direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Çalışmada farklı kaynak akımları (6, 7 ve 8 kA) kullanılırken diğer kaynak parametreleri sabit tutulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda farklı kaynak akımlarının mikroyapı, sertlik, çekme-makaslama ve çapraz-çekme dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir. Kaynaklı bağlantılar optik mikroskopu ile incelendiğinde iğneli martenzit ve ferrit fazlarına rastlanıldığı belirtilmiştir. Yapılan faz ölçümlerinde %27,6-29,97 martenzit ve %70,73-73,85 ferrit fazları bulunmuştur. Kaynak bölgesi sertlik incelemeleri yapıldığında ise kaynak sırasında oluşan ısı girdisine bağlı olarak martenzit fazının etkisiyle birlikte sertlik değerlerinde değişiklikler gözlemlendiği tespit edilmiştir. ITAB'daki sertlik değerleri incelendiğinde DP600'de  $356 \pm 5$  HV, DP800'de ise  $451 \pm 5$  HV olduğu ifade edilmiştir. Şekil 3.8'de sertlik değerleri ve bu değerlerin alındığı bölgeler gösterilmiştir. Kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme-makaslama ve çapraz-çekme test sonuçlarına göre kaynak akımının artmasıyla birlikte dayanımların arttığı ve bu artışın çekme-makaslamada 8kA'da 15,91 kN, çapraz-çekmede ise 8kA'da 4,91 kN olduğu belirtilmiştir.



Şekil 3.8. DP600-DP 800 sertlik ölçüm noktaları ve değerleri [91].

Bhattacharya vd. [92], yapmış oldukları çalışmada üç farklı yüksek mukavemetli çeliği direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve çeliklerin yüzey kaplamalarında

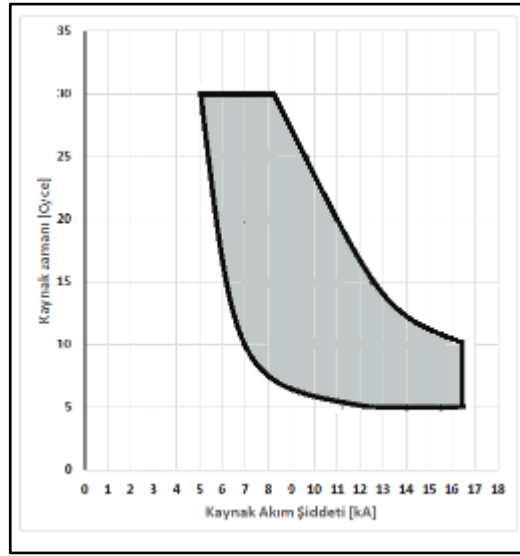
kullanılan çinkodan (Zn) kaynaklı oluşabilecek yüzey çatlaklarını incelemişlerdir. İncelenen yüzeylere çekme, SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Geleneksel düşük karbonlu çeliklere göre yüksek mukavemetli çeliklerin çinko kaplamaya karşı daha duyarlı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çatlakların oluşumu için gerekli olan kritik koşullar Gleeble termomekanik simülatör kullanılarak belirlenmiş ve üç farklı çelik üzerinde yüksek sıcaklık çekme testleri uygulamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda DH1000 çeliğinin DP 800 ve HSLA çeliklerine göre çatlama karşı daha eğilimli olduğunu belirttikleri çalışmada sıcaklık artışıyla birlikte kaplama olan DP 800 çeliğinin kaplama olmayan aynı çeliğe göre çekme dayanımlarında 700 °C’de değişim olmazken 800 °C’de %2,2 ve 900 °C’de %3 oranında azalma olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 3.9’da SEM analizi sonucunda DH1000 çeliğinde meydana gelen çatlak içerisinde bulunan çinkonun görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9. Çinko kaplamanın oluşan çatlak içerisinde ilerleyişi [92].

Aslanlar vd. [93], çift fazlı DP600 ve DP 800 çeliklerini direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Farklı kaynak akımları (8,2-16,8 kA) ve süreleri (5-30 periyot) kullanılan çalışmada elektrot kuvveti 6 kN’de sabit tutulmuştur. Yapılan kaynaklı bağlantılara çekme-makaslama testi uygulanarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. İncelemeler sonucunda kaynak akımının artmasıyla birlikte çekme-makaslama dayanımı belirli bir noktaya kadar arttığı daha sonra bu değer ergime

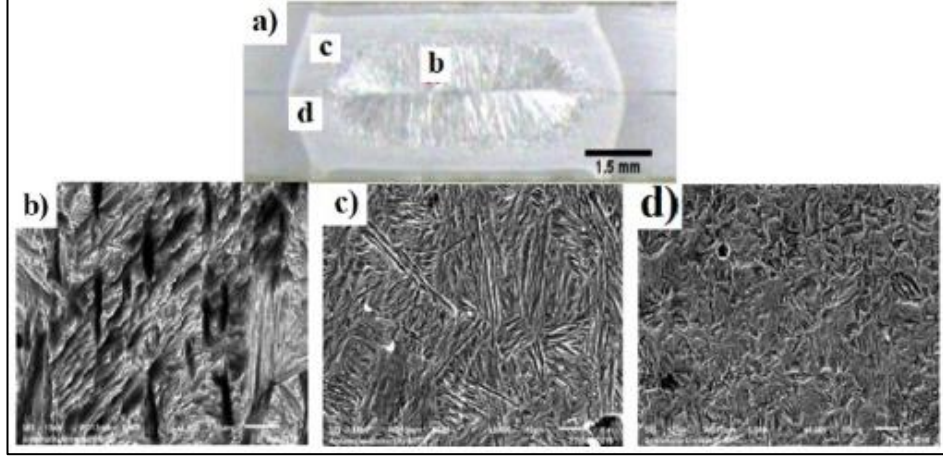
bölgesinin küçülmesiyle birlikte azaldığını tespit etmişlerdir. Çekme-makaslama dayanımında en yüksek değerin 20 periyot (cycle) zamanı ve 12 kA kaynak akımında 15000 N olarak ölçüldüğü ifade edilmiştir. Araştırmacılar en son aşamada çekme-makaslama sonuçlarından aldıkları verilerle optimum kaynak parametrelerini belirlemiş ve bu verilerle ideal bir kaynak lob grafiği oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu lob Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Kaynak sonrası elde edilen optimum verilerle oluşturulan lob [93].

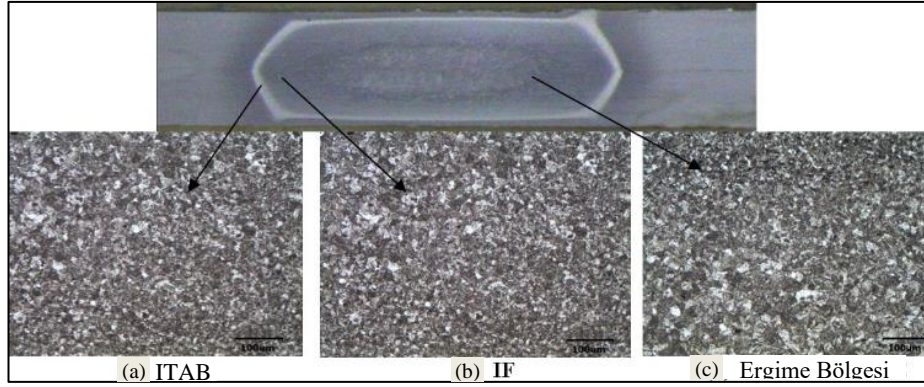
Rajarajan vd. [94], orta frekans akıma sahip direnç nokta kaynak makinesi kullanarak DP 800 çift fazlı çeliği birleştirmişlerdir. İlk olarak farklı kaynak akımı (4-6 kA), elektrot kuvveti (3,5-4,5 MPa) ve kaynak süresi (0,5-2,5 s) kullanılarak optimum parametre değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlerden kaynak akımının 5 kA, elektrot kuvvetinin 4MPa ve kaynak süresinin 1,5 s olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı zamanda sonuçları matematiksel modelleme ile karşılaştırmışlardır. Mikroyapı incelemeleri sonucunda kaynak bölgesinde martenzit ve ferrit fazlarının olduğunu ve aynı zamanda kaba taneli ITAB (KT-ITAB) ve ince taneli ITAB (İT-ITAB) görüldüğünü ifade etmişlerdir. Görülen bu bölgeler Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Kaba taneli-ITAB (c) bölgesinin İT-ITAB (d) ve ergime (b) bölgesinden daha yumuşak olduğunu bu durumun ise martenzit fazının temperlenmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, kaynaklı bağlantılara uyguladıkları çekme-makaslama test sonucunda 21,7 kN, çapraz-çekme testinde 17,65 kN ve sertlik ölçümlerinde 589

HV değerlerini bulmuşlardır. Bulunan bu değerler oluşturulan matematiksel modellerle karşılaştırıldığında %2'nin altında bir hata payı olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 3.11. DP 800 makroyapı ve SEM görüntüleri [94].

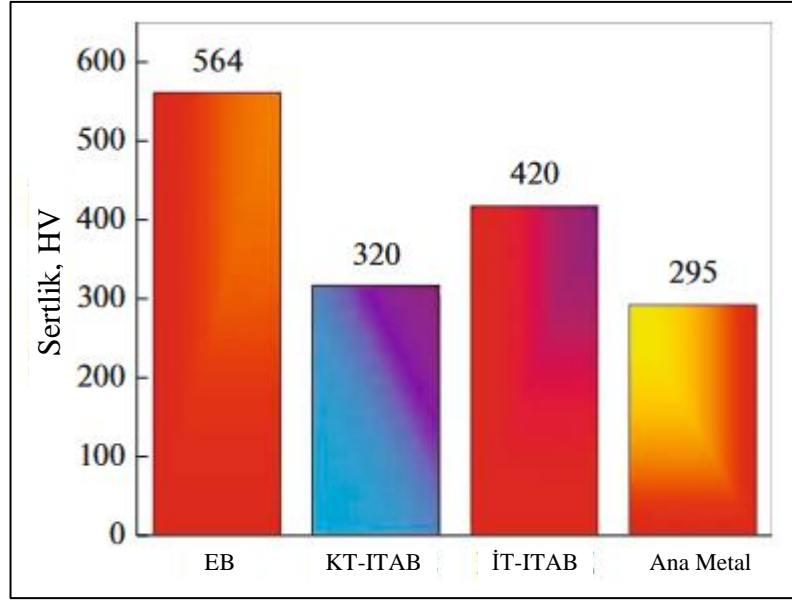
Rajaran vd. [95], DP 800 çift fazlı çeliği direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Yapılan kaynaklı birleştirmelerde kullanılan parametreler; kaynak akımı 40-60 kA, elektrot kuvveti 0,25-3,5 MPa ve kaynak süresi 0,5-2,5 sn aralıklarında olduğu ifade edilen çalışmada mikroyapı özellikleri optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Ayrıca çekme-makaslama, çapraz-çekme ve sertlik testleri kaynaklı bağlantılara uygulanarak mekanik özellikleri hakkında araştırma yapılmıştır. Araştırmacıların yaptıkları çalışmalar sonucunda kaynak akımının diğer kaynak parametrelerine oranla daha önemli bir etken olduğunu ifade etmişlerdir. Maksimum çekme-makaslama dayanımı 18 kN, çapraz-çekme dayanımı ise 15,6 kN olduğunu açıklayarak bu değerlerin 55 kA akım değerinde, 4 MPa elektrot kuvvetinde ve 2 sn kaynak süresinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Son olarak yapılan sertlik ölçümlerinde ergime bölgesinden elde edilen sertliğin en yüksek değerde olduğu, ITAB'da ise sertlik değerinde azalma görüldüğü ve bu azalmanın ısı girdisinden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Şekil 3.12'te optimize edilmiş parametreler ile gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.12. DP 800 kaynaklı bağlantının mikroyapı görüntüsü [95].

Rajarajan vd. [96], soğuk haddelenmiş DP 800 çift fazlı çeliği direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve elde edilen kaynaklı birleştirmelere makro-mikroyapı incelemeleri, çekme-makaslama, çapraz-çekme, mikrosertlik, SEM, EDS ve XRD analizleri uygulamışlardır. Yapılan uygulamalarda farklı kaynak akımları (4-6 kA) kullanılırken elektrot kuvveti (0,425 MPa) ve kaynak zamanı (1,5 s) sabit tutulmuştur. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda DP 800 çeliğinin ergime bölgesinde ferrit ana matris içerisinde iğneli martenzit fazına rastlanıldığını ifade etmişlerdir.

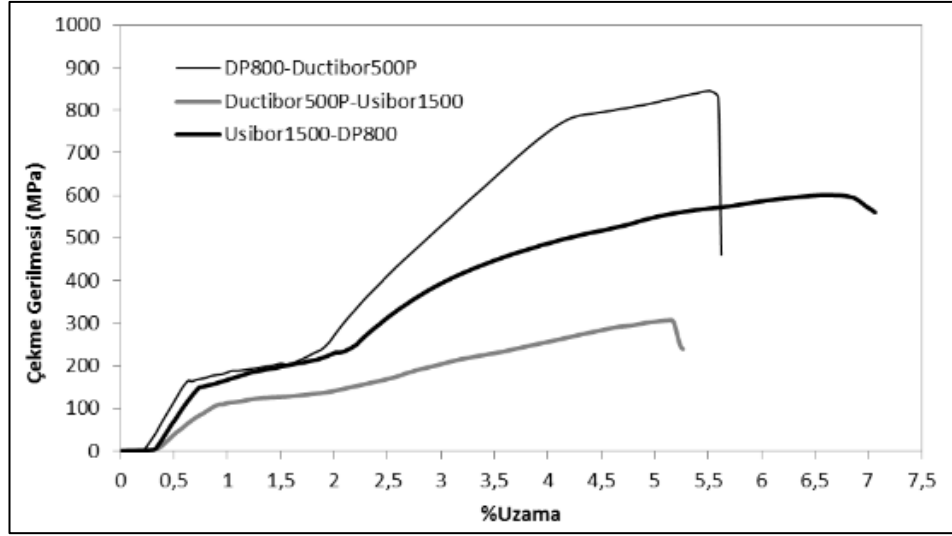
Kaynak akımının artmasıyla birlikte ergime bölgesinin arttığı ve 6 kA akım şiddeti ile birleştirilen test parçasının kaynak alanının 43.20 mm<sup>2</sup> olduğunu belirtmişlerdir. Çekme-makaslama ve çapraz-çekme test sonuçlarına göre maksimum değerlerin 5.5 kA akım şiddetinde 21 ve 17,26 kN olduğunu ve kaynak bölgesinden alınan sertlik değerlerinde ise en yüksek sertlik değerinin 564 HV ile ergime bölgesinden elde edildiğini bildirmişlerdir. Şekil 3.13'te farklı kaynak bölgelerinden elde edilen sertlik değerleri gösterilmiştir. EDS ve XRD analiz sonuçlarına göre C, Mn, Cr, Si, P ve S elementleriyle birlikte sementit (Fe<sub>3</sub>C) ve manganez karbür (Mn<sub>3</sub>C) fazlarına rastlanılmıştır.



Şekil 3.13. DP 800 kaynaklı bağlantıya ait sertlik değerleri [96].

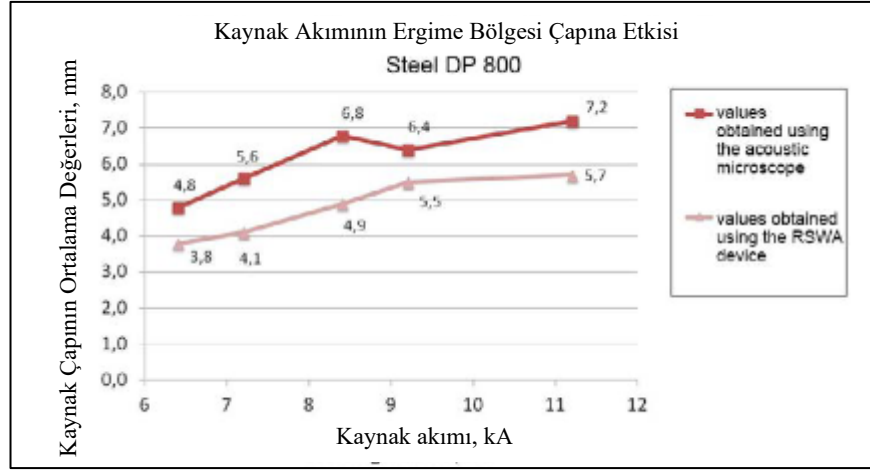
Aras vd. [21], yapmış oldukları çalışmada farklı kalınlıklara sahip DP800, Usibor 1500 ve Ductibor 500P yüksek mukavemetli çelikleri aynı ve farklı olan malzeme kombinasyonları deneyerek direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Daha sonra kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için sertlik ve çekme-makaslama testleri uygulamışlardır. Yapılan bu çalışmada 9,5 (kA) kaynak akımı ve 2,5 (bar) elektrot basıncı uygulanmıştır. Sertlik ölçümlerinde DP800-DP 800 malzeme çiftinin birleştirmesinden elde edilen değer yaklaşık 450 HV olduğu belirtilirken en yüksek değer Ductibor 500P’de 500 HV olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar bu iki çeliğin yüksek değerlerde sertliğe sahip olmasının nedenini içerisinde bulunan Mn ve Si elementlerinin etkisiyle birlikte martenzit oluşumuna bağlamaktadırlar.

DP 800 kaynaklı bağlantının ITAB’ında ise sertlikte %14 azalma meydana geldiği ve bu durumun kaynak bölgesine yakın kısımlarda martenzitin temperlenmesinden kaynaklandığını raporlamışlardır. Çekme-makaslama testi sonucunda en yüksek dayanımın DP800/Ductibor 500P ile birleştirilmesiyle elde edilen kaynaklı bağlantıda 836 MPa olduğu ifade edilmiş ve Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



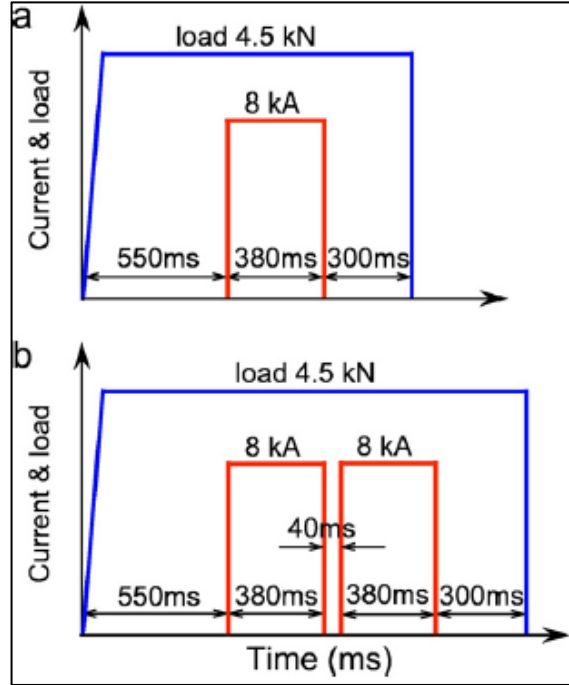
Şekil 3.14. Farklı tür malzeme çiftlerinin çekme gerilme-uzama grafiği [21].

Korzeniowski vd. [97], yapmış oldukları çalışmada DP 800 ve DP600 yüksek mukavemetli çelikleri direnç nokta kaynak yöntemini kullanarak AC akıma sahip 40 KVA'lık robotik sistem ile birleştirmişlerdir. Yapılan birleştirmede elektrot kuvveti ve zaman değerleri sabit tutulurken kaynak için kullanılan akım 6,4-11,2 kA aralığında değiştirilerek deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen kaynaklı birleştirmelere tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik test, taramalı akustik mikroskopu (SAM) ve metalografik testler uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda araştırmacılar kaynak akımının artmasıyla birlikte ergime çapının arttığı belirtmişlerdir. SAM ölçümünde DP 800 çeliğinin 6,4 kA, 9,2kA ve 11,2 kA akım değerleri sonucunda elde edilen ergime çapları 4,28 mm, 6,71 mm ve 7,01 mm olarak belirtilmiştir. Şekil 3.15'te DP 800 çeliğinden elde edilen kaynak çapı-akım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.15. DP 800 çeliğinde SAM kullanılarak elde edilen kaynak çapı [97].

Chabok vd. [98], orta frekans doğru akım (OFDA) kullanarak çift fazlı DP1000 çeliğini direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Sabit akım ve elektrot kuvvetinin kullanıldığı çalışmada tek ve çift darbeli kaynaklar kullanılmış ve Şekil 3.16'da bu değerler gösterilmiştir.



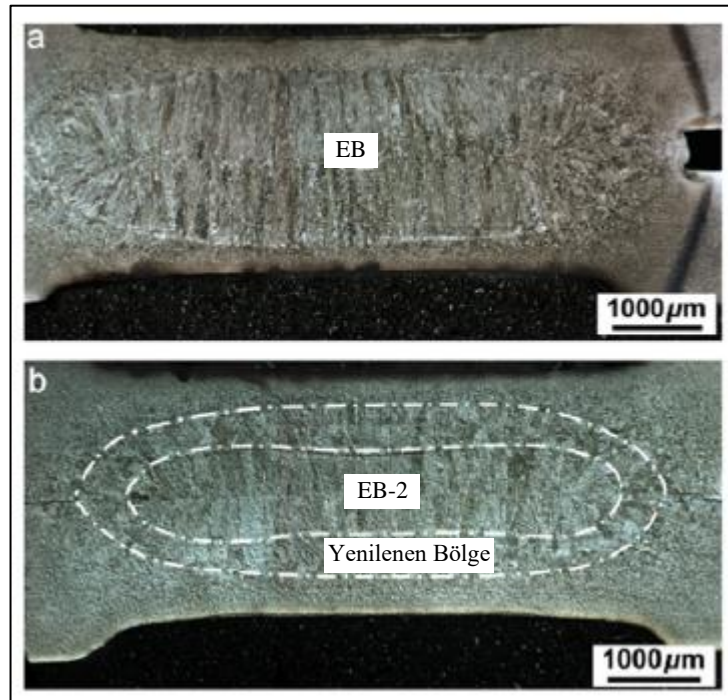
Şekil 3.16. DNK (a) Tek ve (b) çift darbeli kaynak şeması [98].

Daha sonra elde edilen kaynaklı birleştirmelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Optik mikroskop görüntülerine bakıldığında tek darbeli kaynak



kullanıldığında ergime bölgesinin (EB) tipik bir görünümüne sahip olduğu görülürken, çift darbeli kaynak kullanımında iki ayrı bölgenin oluştuğu ve iç kısmın sütunlu tanelerden meydana geldiği dış kısım ise eş eksenli tane yapısına sahip olduğu görülmektedir. Araştırmacılar oluşan ikinci bölgenin yeniden kristalleşen Rex bölgesi olarak ifade edildiğini belirtmişlerdir. Şekil 3.17’de tek ve çift darbe sonucunda oluşan kaynaklı bağlantıların optik mikroskop inceleme görüntüleri verilmiştir.

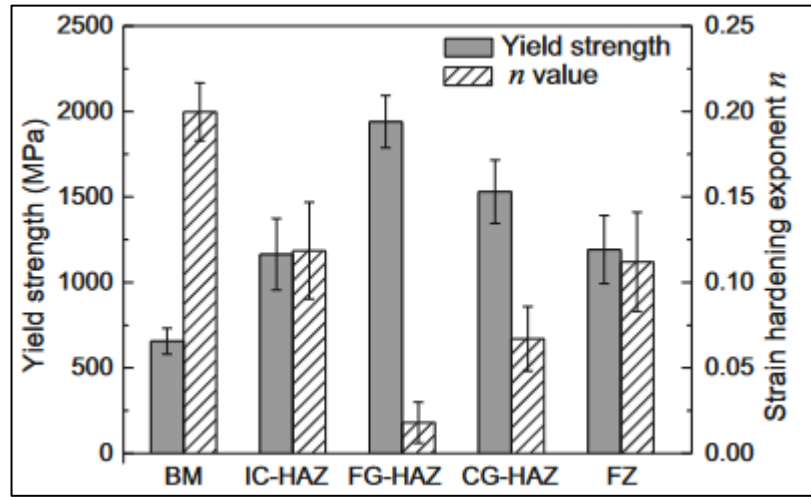
Vickers sertlik ölçümleri incelendiğinde tek darbeli kaynağın ergime bölgesi sertlik değeri 415 HV olurken, çift darbe ile yapılan birleştirmelerde ise 407 HV olduğu ve Rex bölgesinde bu sertliğin 380 HV’ye düştüğü araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir. Son olarak SEM incelemelerinde ferrit ana matris içerisinde dağılmış martenzit fazlarının olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.17. Tek ve çift darbeli kaynaklı birleştirmelere ait OM görüntüleri [98].

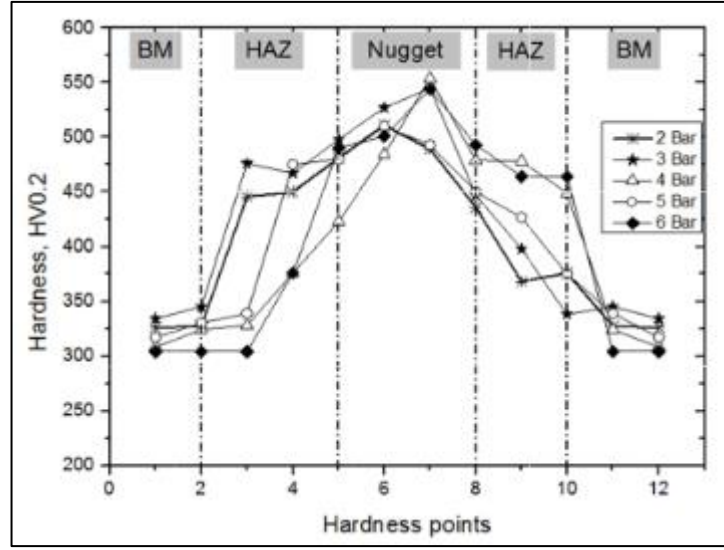
Chabok vd. [99], yüksek mukavemetli DP 1000 çeliğini OFDA akım türüne sahip direnç nokta kaynak makinesi ile birleştirmişlerdir. Yapılan birleştirmelerde sabit akım ve kuvvet (4,5 kN) uygulanmıştır. Kaynaklı birleştirmeler OM, SEM ve sertlik testlerine tabi tutulmuştur. İncemeler sonucunda ana metalin ferrit ve martenzit yapısından oluştuğu, tepe sıcaklık olan  $Ac_1$  ve  $Ac_3$  aralığında interkritik (İK-ITAB)

bölgesinin olduğu ve hızlı soğuma sayesinde oluşan östenitin martenzit+ferrit yapısına geri döndüğünü ifade etmişlerdir. Kaynak bölgesinde martenzit hacim oranının ana metalden daha yüksek olduğu ve ergime bölgesine bitişik olan KT-ITAB'da kaba yapıda olan martenzit fazlarının 960 nm kalınlığında olduğunu tespit etmişlerdir. Sertlik ölçümlerinde en yüksek sertliğin İT-ITAB'da  $6.3\pm 0.25$  (GPa) olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada farklı bölgelerin akma dayanım sonuçları grafik oluşturularak Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



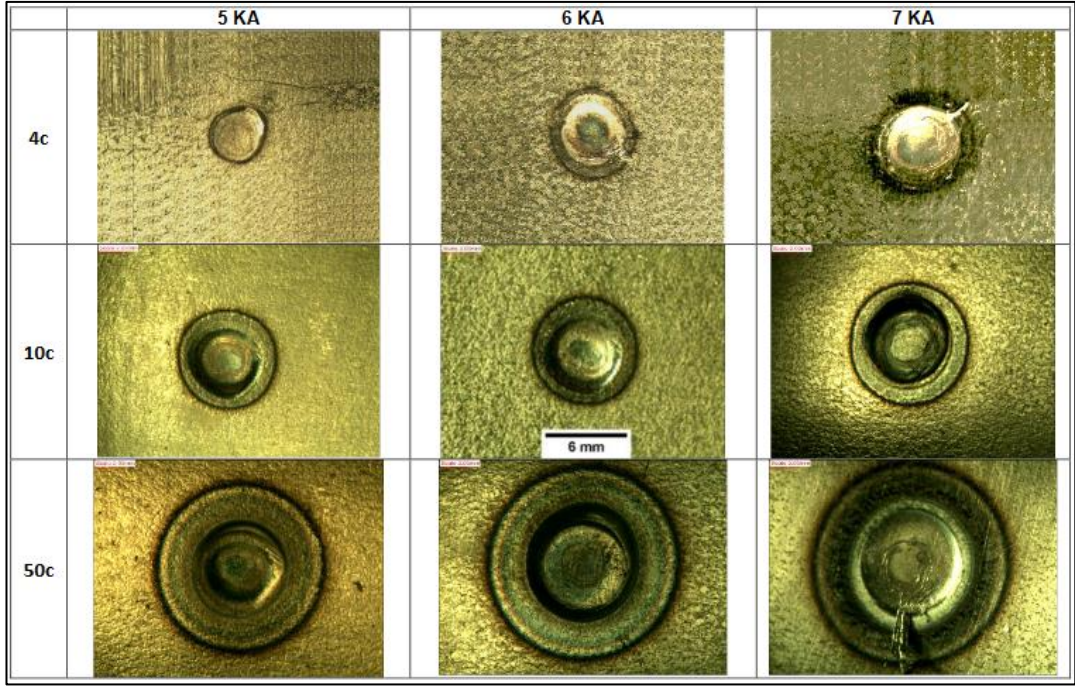
Şekil 3.18. Kaynak bölgelerinden elde edilen akma dayanım değerleri [99].

Elitaş ve Demir [100], yaptıkları çalışmada DP 1000 çeliğini direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilerek, kaynaklı bağlantılara mikroyapı, çekme-makaslama ve sertlik testleri uygulamışlardır. Yapılan kaynaklı birleştirmelerde 5-7 kA akım ve 2-6 bar elektrot kuvvet değerleri kullanılırken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Mikroyapı incelemelerinde yapıda ferrit ve martenzit fazının olduğu ve ITAB geçiş bölgelerinde martenzit fazına rastlanıldığını tespit etmişlerdir. Martenzit hacim oranları elektrot basıncının artmasıyla birlikte ana metal, ITAB ve kaynak metalinde artmış olduğunu tespit eden araştırmacılar, kaynaklı bölgenin sertlik değerleri incelediklerinde ise en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metali ve ITAB'da meydana geldiği ve 350 HV'den daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Şekil 3.19'da 7kA akım şiddeti kullanılarak elde edilen sertlik değerleri gösterilmiştir. Son olarak yapılan çekme-makaslama test sonuçlarına göre kaynak akım ve elektrot kuvvetinin artmasıyla birlikte çekme-makaslama dayanımının artmış olduğunu bildirmişlerdir.



Şekil 3.19. Farklı elektrot kuvvetleri uygulanarak elde edilen sertlik değerleri [100].

Marconi vd. [101], DP 1000 çift fazlı çeliği direnç nokta kaynak yöntemini kullanarak birleştirmiş, birleştirilen test malzemelerine optik ve taramalı elektron mikroskopu kullanarak makro-mikroyapı analizleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca kaynaklı bağlantılara Vickers mikrosertlik, sıyırma ve çekme-makaslama gibi mekanik testler uygulanarak sonuçlar analiz edilmiştir. Uygulanan kaynak parametrelerine bakıldığında elektrot kuvveti (2 kN) sabit tutulurken akım değerleri (5-7 kA) ve zaman periyotları (4,6,10,30 ve 50 cycle) değişkenlik göstermiştir. Yapılan incelemeler sonucunda bütün kaynak parametrelerinde gözle görülür bir kusur olmadığı özellikle 6 periyottan sonra yapılan birleştirmelerde iyi bir kaynak görünümü verdiği belirtilmiş ve bu görüntüler şekil 3.20’de gösterilmiştir.



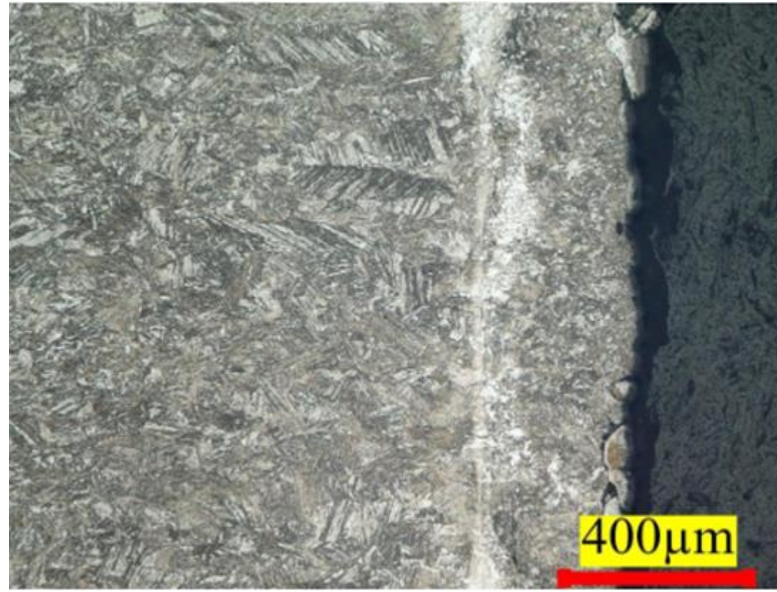
Şekil 3.20. Farklı parametrelerin kullanılması sonucu oluşan kaynak görünümleri [101].

6 kA akım şiddetinde 4,10 ve 50 periyotlar kullanıldığı bağlantılara bakıldığında periyotların artmasıyla birlikte ergime bölgesinin de artmış olduğu tespit edilmiştir. Optik incelemeler sonucunda yapıda dört farklı bölgenin oluştuğu belirtilerek temperlenmiş martenzit ve ferrit fazlarını içerdiği ifade edilmiştir.

Araştırmacılar mikrosertlik ölçümlerinde en düşük sertlik değerlerinin 230-260 HV aralığında olduğu, en yüksek değerlerin ise 410-450 HV olarak tespit edildiğini ve en yüksek değerlerin 5kA ile yapılan kaynaklı bağlantılardan elde edildiğini bildirmişlerdir. Bulunan düşük değerlerin martenzit fazının temperlenmesinden kaynaklandığını belirten araştırmacılar, yüksek sertliğin nedenini ise kaynak sırasında oluşan ısının etkisiyle soğuma hızına bağlamaktadırlar. Yapılan sıyırma test sonuçlarına göre, 5 kA- 4 periyod başarısız, 6 kA-4 periyod kısmi arayüzey, 5 kA- 10 cycle düğmelenme ve 7 kA-50 periyod ana metalden gerçekleşen kopma türleri meydana geldiğini araştırmacılar ifade etmişlerdir.

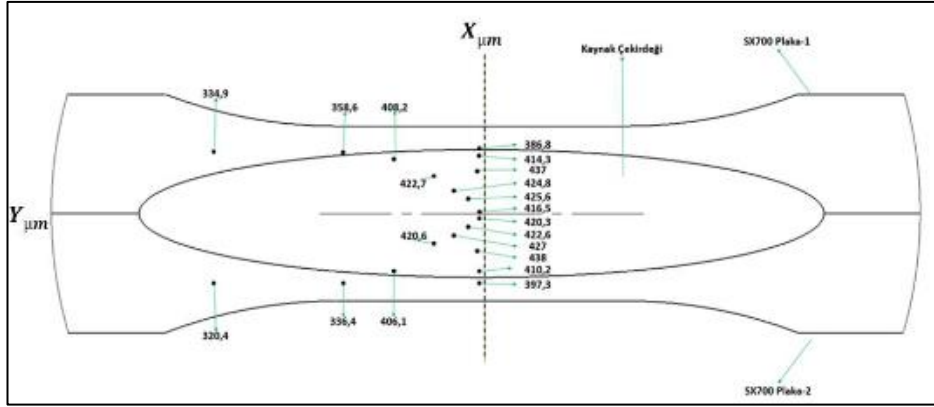
Uzun [102], yapmış olduğu çalışmada STRENX 700 çeliğini direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirerek elde edilen bağlantıların farklı sıcaklıklardaki (-10, +15, +30

°C) tokluk dayanımları, mikroyapı ve mikrosertlik analizlerini incelemiştir. Kaynaklı birleştirmede farklı kaynak akım ve zamanı kullanılırken uygulanan elektrod kuvveti 4 kN olarak sabit bırakılmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde STRENX 700 çekirdek bölgesinin hızlı soğumaya bağlı olarak martenzit yapıdan oluştuğunu ifade etmişlerdir. Şekil 3.21’de STRENX 700 ve mikro alaşım çeliğin kaynak sonrası elde edilen mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Ayrıca STRENX çeliğinin tane yapısının küçük olduğundan dolayı tokluk ve sertlik değerlerinin mikro alaşımli çeliğe göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.



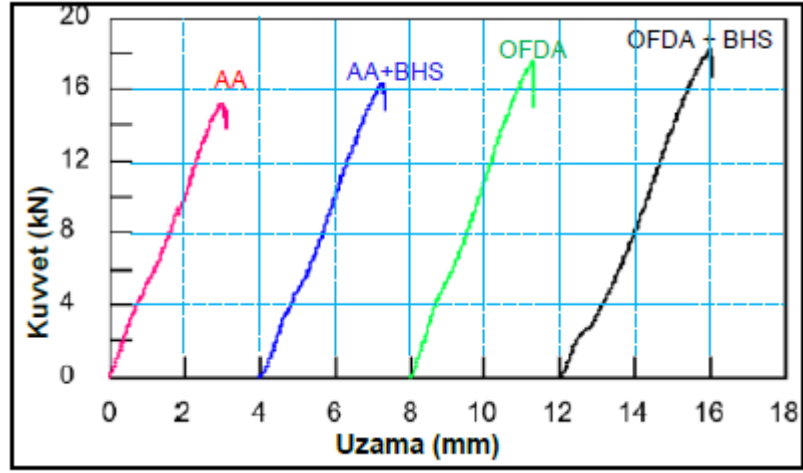
Şekil 3.21. STRENX ve mikro alaşım çeliğe ait mikroyapı [102].

Olgun [103], yapmış olduğu tez çalışmasında STRENX 700 çeliğini direnç nokta kaynak yöntemi kullanarak birleştirmiş ve elde edilen kaynaklı bağlantılara farklı sıcaklıklarda (-10, 0, +15, +30) çentik darbe, mikroyapı ve mikrosertlik testleri uygulamışlardır. Gerçekleştirilen kaynak işleminde farklı kaynak akımı ve zamanı kullanılırken elektrod kuvveti 4 kN olarak sabit tutulmuştur. Sonuçlara göre ITAB’dan çekirdek merkezine doğru sıcaklık artışıyla birlikte sertlik değerinin de arttığını belirlemişlerdir (Şekil 3.22). Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen darbe testi sonuçlarına göre kaynak bölgesinin dışından en zayıf olan bölgeden çentik etkisiyle yırtılma şeklinde kopmaların olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 3.22. STRENX 700 CR mikrosertlik analiz noktaları [103].

Hıdıroğlu [104], doktora çalışmasında, yüksek mukavemetli çelik grubunda yer alan DP600 ve bor alaşımlı 22MnB5 çelikleri direnç nokta kaynak yöntemi ile AA ve OFDA teknolojileri kullanarak birleştirmiştir. Birleştirilen kaynaklı bağlantılara, makro-mikroyapı, çekme-makaslama, çapraz-çekme, mikrosertlik ve yorulma analiz testleri uygulamışlardır. Ek olarak yapılan tez çalışmasında çeşitli fikstür tasarımı ve imalatı yapılarak kaynak makinesine entegre edilmiştir. Daha sonra ise alışılmış yöntemlerin aksine ITAB'a kaynak sonrası soğutucu azot gazı gönderilerek bu bölgede dayanım artışı sağlamayı amaçlamışlardır. Makro ve mikroyapı incelemelerine göre ergime bölgesinin tamamen martenzit fazından oluştuğunu belirlemiştir. Soğuma işlemi uygulanan veya uygulanmayan malzemelerin kaynaklı bölgeleri incelendiğinde 22MnB5 malzeme tarafındaki ITAB'ı daha fazla etkilediğini açıklamışlardır. Sertlik analizlerine göre OFDA teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte ITAB'ın daraldığı ve ek olarak bölgesel soğuma işlemi uygulanmasıyla birlikte ITAB'da bir miktar daha da daraldığını tespit etmişlerdir. AA teknolojisinde ITAB'a bölgesel hızlı soğutma işlemi uygulanmasıyla çekme-makaslama dayanımında %3, OFDA teknolojisinde soğutma işlemi uygulandığında ise %4 daha fazla bir dayanım artışı sağlandığını ifade etmişlerdir (Şekil 3.23). Çekme-makaslama ve çapraz-çekme dayanım sonuçlarına göre kaynaklı bağlantıların kopma hasarlarına bakıldığında tümünün düğmelenme şeklinde gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Bağlantıların yorulma dayanımlarını incelediklerinde ise bölgesel hızlı soğutma işlemi ile kaynak bölgesinde sertlik artışı ve buna paralel daha gevrek yapılar elde edilmesine bağlı olarak yorulma dayanımlarında daha düşük çevrim sayıları elde edildiğini belirtmişlerdir.



Şekil 3.23. Çekme-makaslama test ortalamaları [104].

## **BÖLÜM 4**

### **GENEL BİLGİLER**

Otomotiv sektörü, çelik yapı ve çelik eşya, uçak ve uzay teknolojileri, çelik boru ve hassas olan cihazların üretilmesinde ince kesite sahip metal malzemeler kullanılmaktadır. Fakat ince kesite sahip metal malzemelerin birleştirilmesinde yaşanan sorunlar sebebiyle yeni kaynak yöntemlerin gelişmesine neden olmuştur. İnce kesite sahip metalik malzemeler kaynak sırasında ısı girdisiyle birlikte plastik deformasyona maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle kaynak işleminin minimum ısı girdisi sağlayacak şekilde ve mümkün olduğunca kısa süre içerisinde gerçekleşmesi gerekmektedir [105].

Günümüz otomotiv sektöründe, metal parçaların birleştirilmesinde elektrik direnç nokta kaynağı hala en yaygın yöntem olarak kullanılmaktadır. Klasik bir araba şasesine bakıldığında yaklaşık olarak 3000-4000 arasında kaynaklı birleştirmelerin olduğu ve bu birleştirmelerin büyük bir kısmının direnç nokta kaynak yöntemi ile gerçekleştirildiği görülmektedir [106-108].

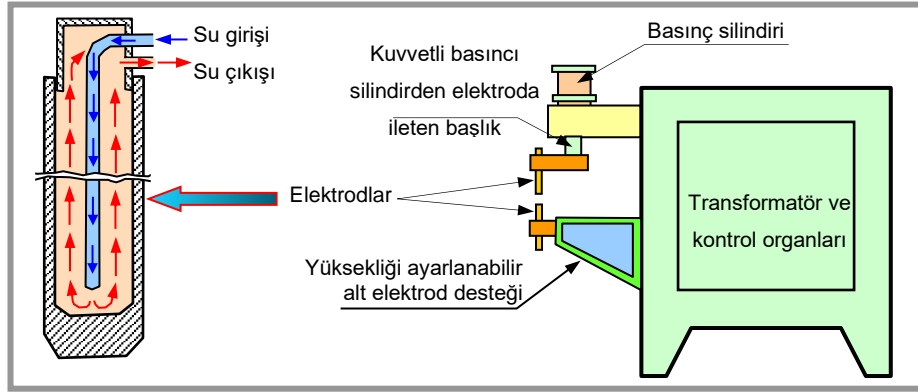
#### **4.1. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI**

Elektrik direnç kaynağı, 1877 yılında Amerika'da bulunmasından bugüne kadar önemi artarak devam etmiş ve imalat sektöründe önemli bir alan oluşturmuştur. Günümüz teknolojisinde seri üretim hatlarında kullanılmakta ve yeni nesil çeliklerin üretilmesiyle birlikte yapılamayan veya yapılmasında bazı sorunların olduğu kaynaklı birleştirmelerin DNK makinesine fikstür tasarlanması ve makineye entegre edilmesiyle birlikte yapılabilir hale gelmektedir. Kaynak makinesi, işlemin kolay ve hızlı bir şekilde yapılmasına fırsat verirken operatörün de fazla bir yeteneğe sahip olmasını gerektirmez. Diğer kaynak yöntemleriyle kıyaslandığında ise işçilik, zaman ve maliyet açısından oldukça avantajlı olduğu görülmektedir. Elektrik direnç kaynağı



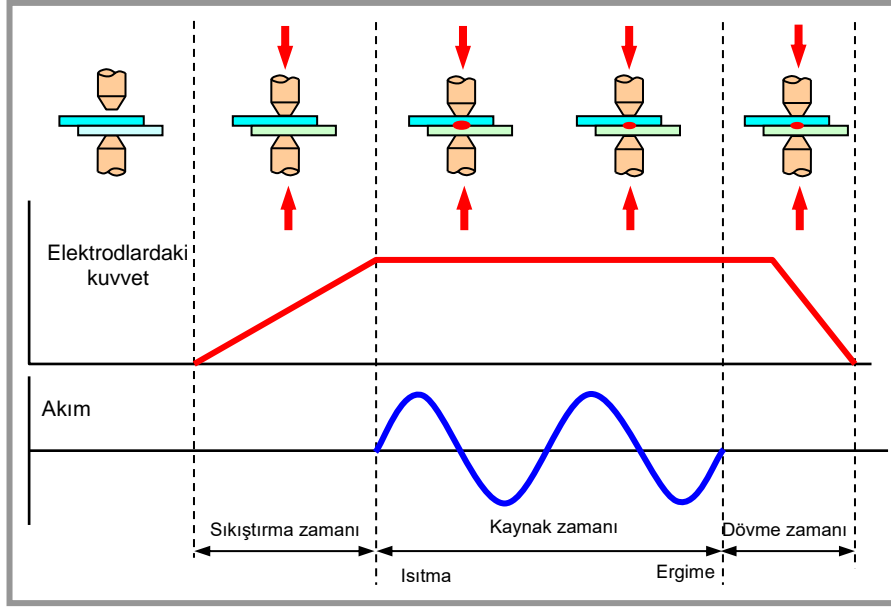
tanımına bakıldığında; birbirleri üzerine bindirilmiş iş parçalarının üzerlerinden akan elektrik akımına karşın, parçaların göstermiş olduğu dirençten dolayı elde edilen ısı ve uygulanan basma kuvvetiyle gerçekleşen bir yöntemdir. Bu kaynak yönteminde herhangi ilave bir ısı kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır [109]. Isı, birleştirilen malzemeler arasında meydana gelir ve kaynak için gerekli olan basınç, kaynak makinesinde bulunan çeneler veya elektrotlar aracılığıyla uygulanır. Yapılan bu açıklamalar ışığında kaynağın şematik görünümü Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Arayüzeyden geçen akımın akışıyla birlikte direnç oluşur ve bu sayede elde edilen enerji ısıya dönüşür. R arayüzey direnci olmak üzere, Ohm kanunu; (I) şiddetinde olan bir akımın geçebilmesi için gereken gerilimi  $U = I \times R$  olarak ifade ederken, t saniye kadar süren akım akışı için gereken toplam enerjiyi (H) aşağıdaki şekilde belirtir [110].

$$H = I \times U \times t \Rightarrow H = I \times (I \times R) \times t \Rightarrow H = I^2 \times R \times t \text{ (Joule)} \dots \dots \dots (4.1)$$



Şekil 4.1. Su soğutmalı ve hidrolik basınç silindirli nokta kaynak makinesi.

Nokta kaynağına bakıldığında genel olarak dört çevrimden meydana geldiği görülmektedir. Bunlar; kaynak akımıyla birlikte aynı anda uygulanan elektrot kuvveti arasında geçen basma süresi, akımının geçtiği zaman aralığı olan kaynak süresi, akımın kesilmesinden sonra kaynaklı bağlantı üzerinde elektrot kuvvet etkisinin devam ettiği tutma süresi ve kaynak elektrotlarının birleştirilen malzemeler ile temasta olmadığı ölü süre aralığıdır [33,37,111]. Şekil 4.2’de meydana gelen çevrimler gösterilmektedir. Endüstrideki uygulamalara bakıldığında bu yöntem; nokta kaynağı, dikiş kaynağı ve kabartılı kaynak olmak üzere üç farklı sınıflandırma içerisinde yer almaktadır.

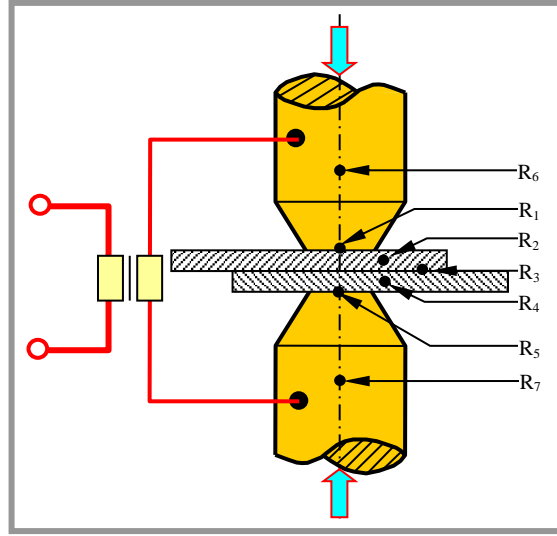


Şekil 4.2. Tipik nokta kaynak çevrimleri [112].

#### 4.1.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı

Elektrik direnç nokta kaynağı, elektrotların uyguladığı kuvvet yardımıyla iş parçalarının bir arada tutulması ve iş parçalarının üzerinden geçen elektrik akımına karşı gösterilen direnç sayesinde elde edilen ısı yardımıyla gerçekleşen kaynak yöntemidir. Direnç nokta kaynağının çalışma prensibi Şekil 4.3'te gösterilmiştir [113]. Kaynak yapabilmek için gerekli olan kaynak akımı ise, yüksek gerilime ve düşük akım şiddetine sahip şebeke akımını, düşük gerilim ve yüksek akıma çevirebilen kaynak makinalarından sağlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, nokta direnç kaynağı için gerekli olan akımı transformatörden geçirerek şebeke akımını kaynak yapılabilmesi için ayarlayan makinalardır. İş parçasının sabit tutulmasını sağlayan elektrotlar mekanik, hidrolik veya pinomatik sistemler sayesinde hareket etmektedir [105,109].

Direnç nokta kaynağında ısı girdisi hesaplanması için aşağıdaki formül (4.2) kullanılmaktadır.  $I$  akımın omik  $R$  direncinden  $t$  sürede geçmesiyle joule kanunu göre  $J$  birim değerinde ısı açığa çıkmaktadır.



Şekil 4.3. Elektrik nokta direnç kaynak prensibi.

$$Q = I^2 R t \dots\dots\dots(4.2)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \text{ 'dir} \dots\dots\dots(4.3)$$

Yani sekonder devrede bulunan toplam dirence eşittir. Bu dirençler;

**1-Malzeme dirençleri**

- R<sub>6</sub>,R<sub>7</sub> : Elektrodların direnci
- R<sub>2</sub>, R<sub>4</sub> : İş parçalarının dirençleri

**2-Temas dirençleri**

- R<sub>1</sub>, R<sub>5</sub> : Elektrod - malzeme temas direnci
- R<sub>3</sub> : Malzeme - malzeme temas direnci

Malzeme direnci, malzemelerin sahip olduğu fiziksel özelliklerle ilgilidir ve değişkenlik göstermezler. Kaynak esnasında R<sub>3</sub> değeri ise en büyük ısı direnci olarak seçilir. Diğer dirençlerin mümkün oldukça minimum olması gerekmektedir. Bu durumun belirlenmesi kaynak akımı (I), kaynak süresi (t) ve elektrot kuvvetinin (F) seçimi ile ilgilidir. Temas dirençleri (R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub> ve R<sub>5</sub>) kaynaklı bağlantının kalitesine doğrudan etki etmektedir. R<sub>1</sub> ve R<sub>5</sub> temas bölgelerinde meydana gelen ısınma, mümkün oldukça düşük seçilmelidir. Yüzeylerin yağ, kir ve pas vb. olumsuzluklardan

arındırılması gerekmektedir. Çünkü bu tür olumsuzluklar iletkenliği azaltır ve bağlantı kalitesini düşürür [33,105,108].

## **4.2. DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI PARAMETRELERİ**

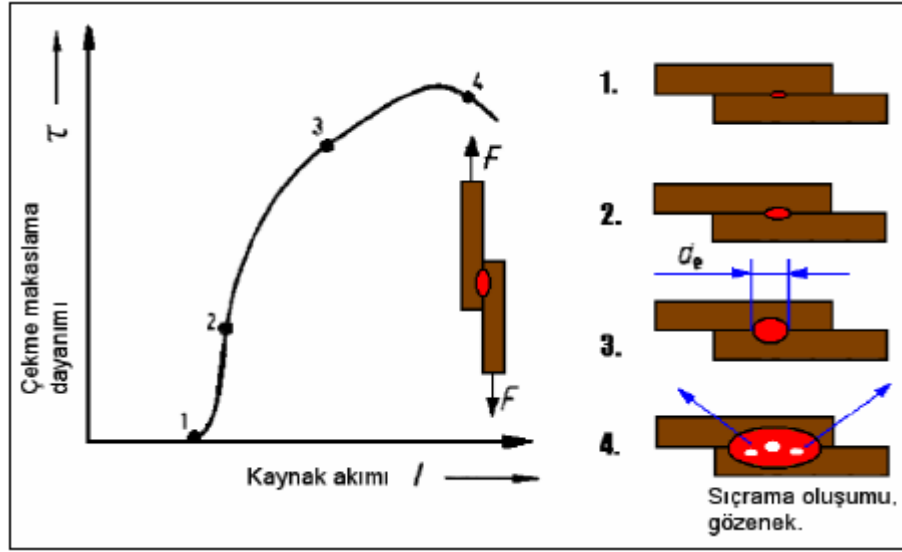
Kaynak işleminde kullanılan akım şiddeti, uygulanan elektrot kuvveti ve kaynak zamanı oldukça önem arz etmektedir. Kaynaklı bağlantıların iyi olabilmesi belirtilen değişkenlerin birbirleriyle uyum sağlayarak optimum değerlerin elde edilmesiyle gerçekleşir. Değişkenlerin ve otomasyon sistemin kontrol edilebilmesi için elektronik üniteler kullanılır. Kontrol ünitesinin kullanılmasıyla birlikte istenilen kaynak çekirdek çapı, akım şiddeti ve zaman ayarlanır ve optimum parametreler elde edilir. Zamanın kısa tutulmasıyla birlikte kaynak çapında küçülme olur, tam tersi şekilde uzun tutulduğunda ise kaynak bölgesinde ergiyik kısım artacağı gibi ergiyik dışarıya doğru fışkırır [33].

Elektrik direnç nokta kaynağı işleminde kaynaklı bağlantının kalitesini etkileyen bazı faktörler vardır. Bu faktörler;

- Elektrod bileşim ve şeklinin ısınma üzerine etkisi,
- Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının etkisi,
- Kaynak elektrod baskı kuvvetinin etkisi,
- İş parçasının malzemesi,
- Kaynak edilecek parçaların yüzeylerinin etkisi,
- Kaynaklı noktalar arasındaki mesafenin ısınma üzerine etkisi olarak belirtilmektedir.

### **4.2.1. Kaynak Akımı**

Kaynak sırasında meydana gelen ısı, zaman ve kaynak akımının karesiyle doğru orantılıdır. Akım ve zaman değişkenleri ısı üretimini etkilese de ısının oluşma hızı tamamen kaynak akımına bağlıdır [114,115]. Isı (enerji) formülü  $Q=K.I^2R.t$  şeklindedir [116–118]. Kaynak akımının değişmesi, çekme-makaslama dayanımı (Şekil 4.4), çekirdek çapı ve sertlik gibi özellikleri önemli derecede etkilemektedir [91].



Şekil 4.4. Kaynak akımının çekme-makaslama dayanımına etkisi [105].

#### 4.2.2. Kaynak Süresi

Kaynak işleminde zaman, üretilen ısıyı etkilemekte ve zaman artışıyla ısı paralellik göstermektedir. Bu nedenle kaynaklı bağlantının çekirdek çapı ve çekirdeğin h yüksekliği artar. Böylelikle kaynak yapılan bağlantının dayanımını artmış olur. Fakat kaynak süresinin fazla olmasıyla birlikte, kaynak akım şiddetinde olduğu gibi kaynak bölgesinde fışkırmalara neden olarak gözenek, çatlak ve dalma derinliği gibi kaynak hataların oluşmasına neden olur [108].

Kaynak süresinin azaltılabilmesi için akım şiddeti ve elektrot basıncının artırılması gereklidir. Kaynak bölgesinde akım şiddetinden dolayı oluşabilen fışkırmanın önüne geçebilmek için de yüksek basınç kuvvetine ihtiyaç duyulur. Aynı nokta çapının elde edilebilmesi için, kısa süre-yüksek akım veya uzun süre-düşük akım şiddeti kullanılmalıdır [33].

#### 4.2.3. Elektrod Bileşimi ve Şekli

Elektrotların ısınması minimumda olabilmesi için, elektrotların elektrik iletkenlikleri ve temas dirençlerinin düşük olmasına gerek vardır. Aynı zamanda elektrotun ucu ile iş parçasının temas ettiği alanlardaki ısının uzaklaştırılması için ısı iletkenliklerinin

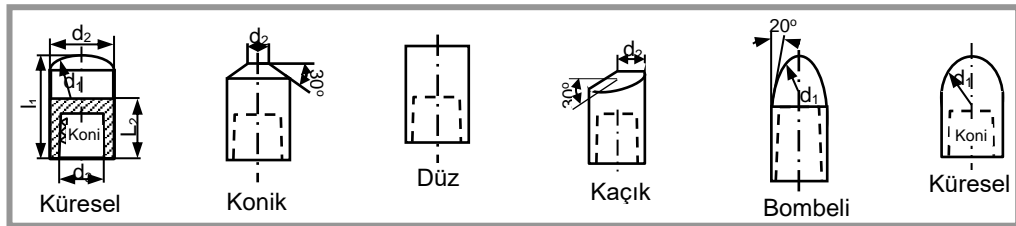
yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca, elektrotlar yüksek kuvvet yüklerine maruz kaldıkları için deformasyona karşı direnç gösterebilmelidirler. Kaynak işlemi yapılırken ısınmadan dolayı oluşabilecek alaşımlandırma eğiliminin düşük olması gerekmektedir.

Elektrolit bakırın yukarıda belirtilen ve istenen özelliklerden bazılarında sahip olduğundan, iletkenlik değerleri saf bakırdan daha düşük olmasına rağmen, bakır alaşımları veya tungsten-molibden elektrot malzemeler tercih edilir. Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşım ve özellikleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımları.

Alaşım	Sertlik (HRB)	İletkenlik (%Cu)	Yumuşama Sıcaklığı (°C)	Kullanıldığı Yer
Bakır	95	90	150	Alüminyum
Tellür-Bakır	100	90	175	Alüminyum
Kadmiyum-Bakır	110	85	250	İnce yumuşak çelik sac
Krom-Bakır	150	80	500	Tüm çelikler
Tungsten-Bakır	200-300	30	1000	Çelik ve bakır alaşımları

Elektrotların boyut ve şekilleri, kaynak işleminin tatbik edilecek iş parçalarının cins, şekil ve boyutlarına göre belirlenir. En çok kullanılan elektrotlar incelendiğinde, küresel ve kesik koni uç formuna sahip olan elektrotların tercih edildiği görülmektedir [1]. Şekil 4.5’te imalat sektöründe kullanılan elektrotların uç formları gösterilmiştir.



Şekil 4.5. İmalat sektöründe kullanılan elektrot uç formları [110].

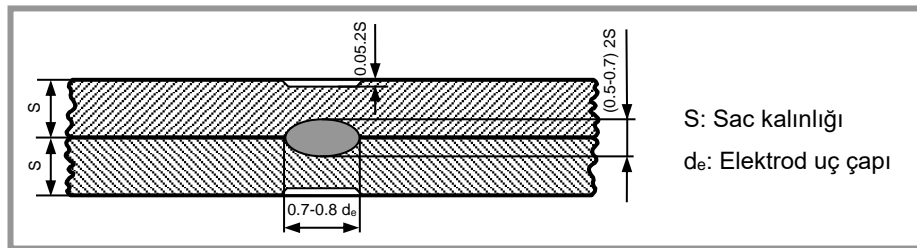
#### 4.2.4. Kaynak Kuvvetinin Etkisi

Elektrotlar birbirlerine yaklaştırılarak iş parçaları sıkıştırılır ve kuvvetin statik hale gelmesinin ardından kaynak işlemi başlamış olur. Kaynak işlemi için gerekli olan

temas direnci uygulanan kuvvetle ters orantılıdır. Kuvvet arttırıldığında temas direnci azalır ve bu azalma eğilimi malzemenin cinsine göre değişir. Bu bağlamda direnç azalırsa kaynak için gerekli olan ısı oluşamaz ve parçalar arasında birleşme sağlanamaz.

Elektrot kuvveti, kaynak işleminde üç aşamada önem arz etmektedir. Basma aşamasında elektrot kuvveti, iş parçaları arasında uygun bir temas direnci oluşturur ve aynı zamanda elektrot ile iş parçası arasında temas direncinin düşük bir değerde olmasını sağlar. Kaynak sırasında elektrot kuvveti sıvı metalin fışkırmasını önleyerek katı halde bulunan çukur içerisinde kalmasını sağlar ve böylelikle kaynağın hatasız bir şekilde olmasına imkân sağlar. Dövme aşamasında ise, kaynak bölgesinin soğuması ve katılaşması sırasında oluşabilecek çatlak, boşluk gibi kaynak hatalarının olmamasını sağlar [1].

Direnç nokta kaynağında, kaynak dikişlerinin hatalı olmasından kaçınabilmek için akım uygulaması sonunda elektrot kuvveti arttırılmaktadır. Nokta çapının büyük olması elektrot çapına bağlı olarak değişmektedir. Nokta çapının kusursuz olabilmesi için  $0.7-0.8 d_e$  olması gerekmektedir. Aynı zamanda belirtilen bu çapın elektrot çapına eşit olması gerekir. Kaynak noktasının diğer boyutları ve alabilecekleri en büyük değerler Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Direnç nokta kaynak boyutları [110].

#### 4.2.5. Esas Metalin Kimyasal Bileşimi

Metallerin kimyasal bileşimleri, özgül ısı değerlerini, ergime sıcaklıkları, ısı ve elektrik iletkenlikleri ve yoğunluk gibi özelliklerini etkilemektedirler. Gümüş (Ag) ve bakır (Cu) gibi metalik malzemeler yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmasına

rağmen yüksek akım değerlerinde dahi düşük ısı değeri meydana gelir. Aynı zamanda metalik malzemelerin ısı iletkenlikleri çok iyi olduğundan, çok az miktarda ısının oluşmasıyla iş parçası ve elektrotlar direkt etkilenir [119].

Kimyasal bileşimde bulunan fosfor (P) ve kükürt (S) kaynak kabiliyetine etki etmektedir ve buna bağlı olarak kaynaklı bağlantının çekirdek arayüzeyinde yırtılmaya bağlı kaynak hatalarının oluşmasına neden olmaktadır. Titanyumun yapı içerisindeki etkisine bakıldığında, çekirdek çapı ve çekme-makaslama dayanımının artmasına katkı sağladığı görülür. Kaynak sırasında iş parçası üzerindeki kir, yağ ve pas gibi olumsuzlukların etkisiyle yayılan hidrojen (H), kaynak alanının hasar almasına neden olur.

#### **4.2.6. Kaynak Edilecek Parçaların Yüzey Etkisi**

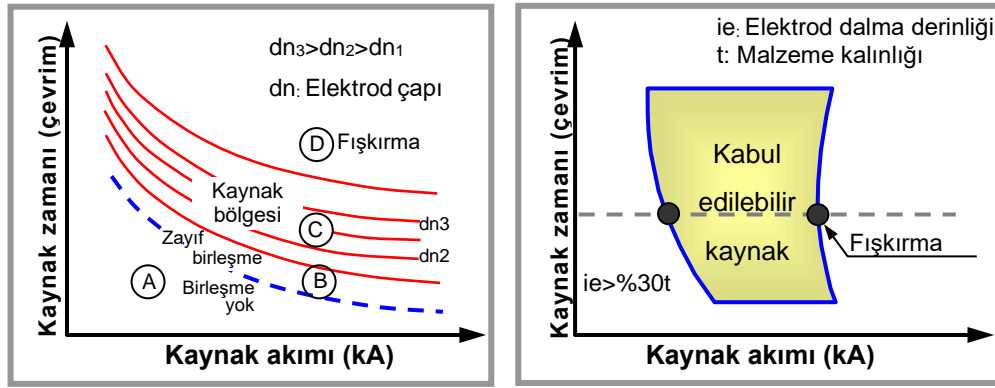
Direnç nokta kaynağının istenilen optimum parametre değerleri, iş parçalarının yüzeylerindeki kir, yağ, pas ve hadde cürufu vb. olumsuzlukların olmaması durumunda geçerlidir. Bu nedenle kaynak esnasında meydana gelebilecek inklüzyonların olmaması için mekanik veya kimyasal olarak iş parçalarının yüzeyleri temizlenmelidir. Mekanik olarak yapılan temizlemelerde malzeme yüzeylerinin çizilmesine neden olmayacak ölçüde yapılması gerekmektedir. Yabancı maddelerin kaynak bölgesinden uzaklaştırılmasıyla birlikte kaynak için kullanılan elektrotların aşımlandırma eğilimi azaltır ve elektrot ömrünün uzamasına neden olur [119].

### **4.3. KAYNAK KABİLİYETİ DİYAGRAMI**

Direnç nokta kaynak parametrelerine bakıldığında en önemlilerin elektrot kuvveti, kaynak zamanı ve akım şiddeti olduğu görülmektedir [120–123]. Kaynak sırasında elektrot kuvvetinin değiştirilmesinin zor olmasından dolayı ve elektrotların mantarlaşma olasılığından dolayı genellikle kaynak işlemlerinde sabit bir elektrot kuvveti seçilmektedir [124,125]. Elektrot kuvvetinin sabit olması durumunda ve değişkenlik gösterebilen kaynak parametre değerlerinde kabul edilebilir kaynaklı birleştirmeleri grafiksel olarak gösteren açıklamaya ‘kaynak kabiliyeti diyagramı’ adı verilir [126]. Belirlenen levha malzeme için, elektrot dalma derinliği, elektrot çapı,



kaynak çekirdek çapı ve elektrot kuvvetine bağlı olarak direnç nokta kaynaklı bağlantıların dayanımını gösteren kaynak kabiliyeti diyagramı oluşturmak mümkündür. Kaynak çekirdek çapının kabul edilebilir değerler arasında olması için ancak kaynak zamanının akım şiddetine göre değişebilmesiyle elde edilir. Kaynak kabiliyeti diyagram genişliği, imalatçılara uygun kaynak aralığının seçilmesine imkân sağlar. Direnç kaynağı elektrot uç çapı ve kaynaklı birleştirmede kullanılan elektrot baskı kuvveti için oluşturulan kaynak kabiliyet diyagramı Şekil 4.7’de gösterilmiştir [110].



Şekil 4.7. Kaynak kabiliyeti diyagramı [127–129].

Direnç nokta kaynak işlemi sonrasında meydana gelen kaynak çekirdeğinin çapı ‘dn’ olarak Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Diyagrama bakıldığında dört bölüme ayrıldığı görülmektedir. A bölgesinde ergime durumu veya birleşme söz konusu değildir. B bölgesinde ise, basınç kaynağı etkisiyle ergime söz konusu olmadan zayıf derecede bir birleşme meydana gelir. C bölgesine bakıldığında ergime ve kaynak bölgesini ifade eder. C ve B bölgelerinin sınır eğrilerinden başlar ve ergiyen kaynak bölgesinin boyutları, bu bölge içerisinde devam ederek artar. C bölge sınırları malzemenin cinsine bağlı olarak değişmektedir. Bazı metalik malzemelerde bu bölgenin dar olması nedeniyle kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Uygulama sırasında zaman ve akım değerleri C bölgesinin üst sınırına yakın olacak şekilde seçilmelidir. D bölgesi fıskırmanın meydana geldiği bölge olup, C bölgesinin üst sınırından sonra fıskırma görülmeye başlar [119]. Şekil 4.7’de gösterilen ve kabul edilebilir olan kaynak aralığı diyagramın sol tarafında, kaynak zamanı ve akım şiddetine bağlı elektrotun dalma derinliğinin işlem sırasında

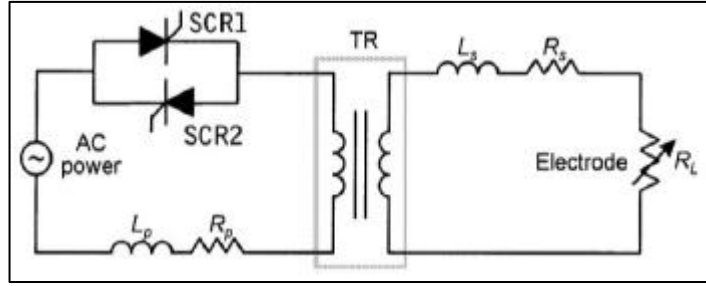
kullanılan iş parça kalınlığının %30'unu geçmeyecek şekilde seçilmesiyle ölçülür. Bu değerlerin üzerinde bir seçim yapılması durumunda fişkırmalar meydana gelebilir [130]. Elektrot dalma derinliğinin, kesit kalınlığının %30 altında olması durumunda direnç nokta kaynağı istenilen özellikleri sağlamayabildiği durumlar olabilir. Aksine bu değerlerin aşılması durumunda, kaynak kesit kalınlığında incelme meydana gelir ve bu durum yüzey kalitesini etkiler. Aynı zamanda yüzey kalitesinin bozulmasından dolayı boyama sırasında iyi bir görünüm sağlanamaz. Diyagramın sağ tarafı ise maksimum çekme-makaslama dayanımını veren değerler ile belirlenir ve o şekilde oluşturulur [110].

#### **4.4. DİRENÇ NOKTA KAYNAK MAKİNALARI**

Otomotiv endüstrisinde direnç nokta kaynağı sac metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaynak makina sistemini kontrol edebilmek için kullanılan elektrik akımının kontrol edilmesi gerekiyordu. 19. Yüzyılın sonlarına kadar direnç nokta kaynak yönteminde özellikle tek fazlı alternatif akım (AA) kaynak makinaları kullanılıyordu. Doğru akım (DA) kaynak makinaları ise özel imalatlar için sınırlandırılmıştı ve bu nedenle pek fazla kullanılmıyordu. Otomotiv sektöründe son yıllarda, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte DC kaynak teknolojisi geliştirilerek orta frekanslı doğru akım (OFDA) kaynak makinaları üretilmiş ve yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir [131].

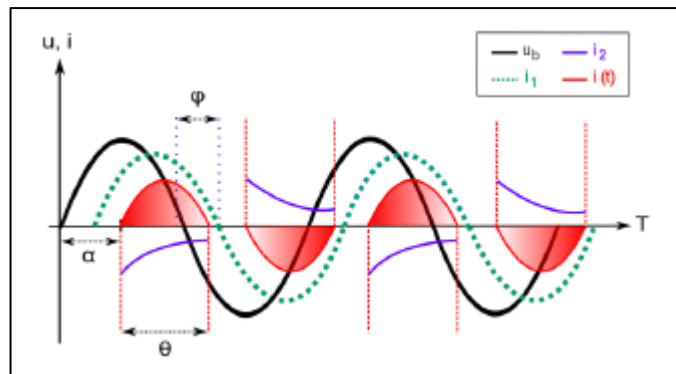
##### **4.4.1. Alternatif Akım (AA) Kaynak Makinaları**

Tek fazlı olan alternatif akım, güvenilir ve nispeten daha basit olduğundan kaynakta yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaynak kontrolünün kolay olmasının yanında ekipman maliyet giderleri oldukça ucuzdur. Güç kaynağı incelendiğinde akımı kontrol edebilmesi için silisyum kontrollü doğrultucu (SRC) adıyla bilinen ve ters şekilde paralel olarak bağlanmış iki adet tristörden oluşmaktadır. Ayrıca, sisteme sinüs dalgası denilen sinüzoidal gerilimi uygulanır [132,133]. Şekil 4.8'de direnç nokta kaynağında kullanılan alternatif akımın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.8. DNK devre yapısının şematik gösterimi [134,135].

Alternatif akım (AA), direnç nokta kaynağında kaynak kontrolünün sağlanabilmesi için tasarlanmış ve üretilmiştir. SCR, alternatif akımda güç kaynağının her yarım döngüsüne denk gelmektedir ve kontrol frekansı, sinüs dalga frekansının iki katı kadardır [134]. Sistem içerisinde bulunan SCR, ateşleme frekansını tetikler ve kontrollü bir kaynak çevriminin başlatılmasını sağlar. Kaynak sırasında, sistem içerisinde ters ve paralel şekilde bulunan tristörler şebeke geriliminin uygun olan alternansında sıralı bir şekilde ateşleme açısında ( $\alpha$ ) tetiklenir.  $\alpha$ , aynı zamanda kaynak akım miktarını belirleyen açıdır. Tetiklenen  $\alpha$  açısında SCR ile iletişime geçer ve iletilen gerilimden  $\varphi$  kadar gecikme meydana gelerek SCR de akım akışı başlamış olur. İletim tarafından aktarılan  $i_1$ , zıt yöndeki  $i_2$  tarafından düşürülür. İki bileşene bağımlı bir şekilde meydana gelen akım, kaynak işleminin etkin olduğu süreyi belirleyen bir iletim açısı ( $\theta$ ) kadar sürede iletir. Sistemde uygulanan gerilim sıfır geçişlerinde SCR kesilir ve SCR'nin kesilmesiyle tekrardan  $\varphi$  kadar gecikmeyle kaynak akımı kesilir. Alternatif akımda (AA), direnç nokta kaynak sisteminde kaynak akımının üretilmesinde oluşan dalga form görüntüleri Şekil 4.9'da verilmiştir [132,136].



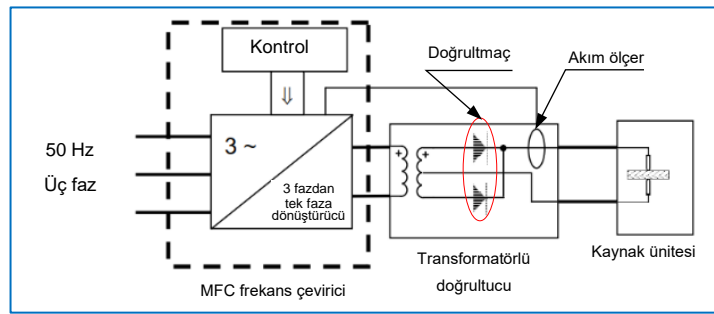
Şekil 4.9. Alternatif akımda meydana gelen dalga formları.

#### 4.4.2. Orta Frekans Doğru Akım (OFDA) Kaynak Makinaları

Son yıllarda, orta frekans doğru akım (OFDA) kaynak makinelerinin kullanımı otomotiv sektöründe giderek artmaktadır. Artan maliyet ve enerji kayıplarının etkisi ve daha önemlisi kaynak akımının kontrol edilebilir olması OFDA kaynak makinelerinin yaygınlaşmasına neden olmuştur [131].

Gelişmiş ülkelerde kaynaklı imalat yapan firmalar incelendiğinde 50 Hz olan direnç kaynak makinelerinin (AC) yerini, 1000 Hz orta frekans kaynak makineleri (MDFC= Medium Frequency Direct Current) almış durumdadır. Ülkemizde de otomotiv sanayi ve yan üreticilerinin MDFC kaynak makine kullanımı giderek artmaktadır.

Yeni nesil (2.ve 3. Nesil) yüksek mukavemetli çeliklerin birleştirilmesi için geliştirilen OFDA teknolojisi; alüminyum, titanyum ve titanyum alaşımlarının da bu teknoloji kullanılarak birleştirilmesi OFDA'nın öneminin giderek artmasına ve gelişmesine neden olmuştur. Kullanılan bu teknoloji üç fazlı beslemeye sahip invertör yardımıyla akımın doğrultulup filtrelenmesiyle, 500 V-1000 Hz alternatif gerilim üreterek doğrultulmuş kaynak akımı sağlayarak uygun bir trafoya besler. Şekil 4.10'da orta frekans doğru akım kaynak makinelerinin, orta frekans çevirici ve transformatör doğrultucu gibi kısımlardan oluştuğu görülmektedir [110].



Şekil 4.10. Orta frekans doğru akım (OFDA) kaynak makine kısımları.

Orta frekans çeviriciler, güç ve kontrol elektroniği olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

- Güç elektroniği: Üç faz besleme geriliminden kaynak transformatörüne değişken voltaj darbeleri üretilmesini sağlar.
- Kontrol elektroniği: Akımın kontrol edilmesine yönelik kaynak fonksiyonlarını yerine getirilmesini sağlar. İlave olarak programlanabilir otomatik görev ve haberleşme ara yüzlerinin desteklenmesini sağlamaktadır.

OFDA frekans çevirici olarak gösterilen kısımda (Şekil 4.10), 50-60 Hz üç fazlı besleme gerilimi, yarı kontrollü doğrultucu köprüsü tarafından gerilime dönüştürülür ve depolama kondansatörleri tarafından düzenlenir. Üretilmiş olunan doğru voltaj transistör içeren H köprüsüne uygulanır ve frekansı 1000 Hz'lik kare dalga voltajına dönüştürülmesini sağlar. Daha sonra gerilim bir transformatörlü doğrultucuya bağlanır. Kare dalganın genliğini değiştirme yöntemi (PWM, Pulse Width Modulation) ile voltajın değeri değiştirilebilir [110].

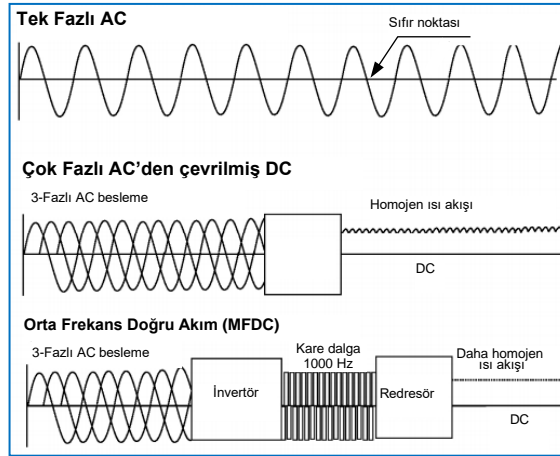
OFDA kaynak teknolojinin avantajları aşağıda sıralandığı gibidir;

- Enerji Tasarrufu: Punta başına oluşan enerji değerleri incelendiğinde, OFDA kaynak makinelerinin punta başına birim kaynak maliyeti yaklaşık %30 oranında düşürmektedir. DA olması sebebiyle de kaynak zamanı daha kısadır. Bu teknolojiyle, 1000 Hz'de yapılan bir kaynakta kompakt pulse formu ile yüksek güç elde edilir. Belirli bir kaynak süresi için, OFDA kaynağı ile geleneksel AA yöntemine kıyasla daha fazla ısı verilir. Bu nedenle OFDA metodu, AA kaynak formlarından daha kârlı olmasını sağlar.
- Programlanmış yük dağılımı: OFDA'da 3 faz kullanılır ve ek olarak, sistemin parçası olan kapasitörlerden ve ana şebekeden de akım çeker ve böylece tepe çizgisi akımlarını azaltır.
- Hassas kaynak kontrolü: Akım değeri saniyede 200-4000 kez değiştiğinden kaynak akımının ayarlanması için 1/20 nominal değere ihtiyaç duyulur. Akım her milisaniyede kontrol altına alınır, böylece çok hassas ve sabit bir kaynak akımı elde etmemizi sağlar. Hassas parametre ayarı sayesinde de yüksek kaynak kalitesi elde edilmiş olur.
- Artan kaynak kabiliyeti: Üç ya da dört malzemeye aynı anda kaynak yapabilme kabiliyetinin yanı sıra, yeni nesil yüksek mukavemetli çeliklerde, demir dışı

alüminyum ve titanyum malzemelerde yüksek kaynak kabiliyeti sağlar. OFDA teknolojisinde kısa kaynak süresi, alüminyum ve alaşımlarında kaynak kabiliyetinin artmasına neden olur.

- Daha küçük trafo boyutu: OFDA teknolojisinde trafo boyutları küçüldüğünden daha uzun olan kol boyu ve çene derinliğine imkân sağlar.
- Elektrod ömrü: Kep aşınmasını azaltır ve %30 ısıl ömrü iyileştirir. Akım piklerinin ve alternatif manyetik alan olmaması, elektrotların termal ve mekaniksel gerilimlerini düşürür.
- Kaynak izleri OFDA’da daha küçüktür.
- Sıçramalar bu teknolojiye daha azdır [110].

Aynı zamanda orta frekans doğru akım teknolojisi, titanyum veya galvaniz kaplı malzemelerde düşük kaynak izinin oluşmasını sağlarken, yüksek dikiş kaynak hızı elde edilmektedir.



Şekil 4.11. OFDA ile oluşan homojen ısı akışı [110].

Alüminyum-Silisyum kaplamalı malzemelerin kaynağında akımın her milisaniyede kontrol edilebilmesiyle çok kısa zamanda gerçekleşmesi, yüksek akım sayesinde kaplamanın parçalanması ve daha sonra kaynak akımının etkisiyle kaynak havuzunun oluşumu gerektiğinden bu yöntem diğerlerine oranla oldukça avantajlıdır. Şekil 4.11’de tek fazlı alternatif akım (AA), çok fazlı alternatif akımdan (AA) çevrilen doğru akım (DA) ve orta frekans doğru akım (OFDA) şematik olarak gösterilmiştir.

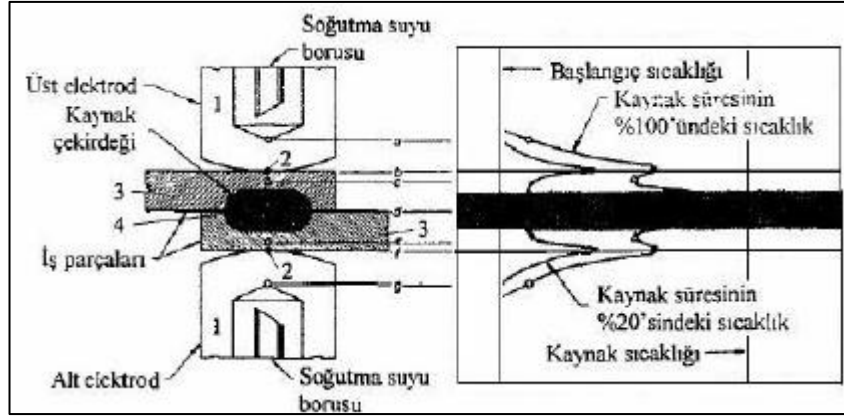
## 4.5. DUAL-FAZLI ÇELİKLERİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

Günümüzde direnç nokta kaynak yöntemi, en önemli birleştirme teknolojilerinden biri olarak otomotiv sektöründe hala yaygın olarak kullanılmaktadır. AHSS çelik gurupları arasında yer alan çift fazlı (DP) çelikler, yüksek mukavemet özellikleri, süneklilik, ferrit matris içerisinde dağılmış martenzit gibi benzersiz mikroyapı özellikleri nedeniyle araba gövdesi imalatında kullanılmaktadır [137]. DP çelikler, farklı kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilme imkânı olsa da direnç nokta kaynağı kullanılarak basit ve hızlı bir şekilde kaynak işlemi yapılabilmektedir. Bu yüzden otomotiv endüstrisinin kullandığı birkaç bin kaynak noktası direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir [138].

### 4.5.1. Kaynak Bölgesi Analizi (Çekirdek Oluşumu ve ITAB)

Direnç nokta kaynak yönteminde amaç, iki iş parçasının kaynak işlemi sonrası birleşme noktasında kaynak çekirdeğinin oluşturulmasıdır. Bu birleşme sırasında joule kanununa göre ısı meydana gelir ve bu oluşan ısı iki iş parçasının temas yüzeyleri arasında oluşur. Bu bölgede ısının etkisiyle birlikte ergime meydana gelir ve iki metalin birbiri içerisinde karışmasıyla birlikte kaynak çekirdeği oluşur [139].

Kaynak bölgesinin oluşması için gerekli olan kaynak ısı miktarı, sadece joule etkisine bağlı olmamakla birlikte malzemenin direnç nokta kaynağına olan uygunluk durumu da ısı olayı için önem arz etmektedir. İşlem sırasında kaynak akımı ve tutulan süreye bağlı olarak meydana gelen ısı miktarı, birleştirilen malzeme ve kaynak elektrotlarının ısı iletim özelliklerine bağlıdır. Aynı zamanda kaynak işlemi sırasındaki temas noktaları ve malzemelerin yüzey koşulları oluşan ısı miktarı açısından oldukça önemlidir. Şekil 4.12’de kaynak bölgeleri ve sıcaklık dağılımları gösterilmiştir [105].

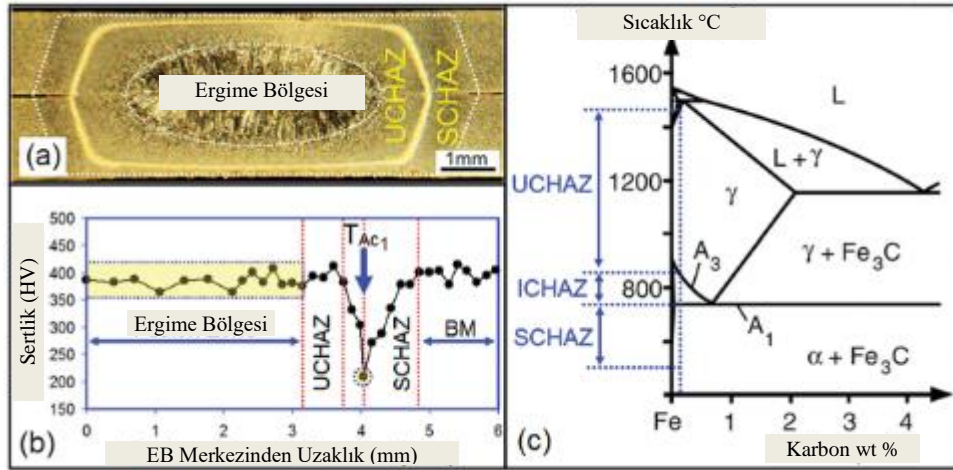


Şekil 4.12. DNK ile oluşan dirençler, sıcaklık dağılımları ve bölgeler.

Isı tesiri altında kalan bölge diye adlandırılan ITAB, ortam sıcaklığının üst kısmında kalan bölgeyi ifade etmenin yanısıra, genel anlamda kaynak işleminin yapılması sırasında oluşan ısının etkisiyle kaynaklı bağlantının etkilendiği bölgeyi tanımlar. Etkilenen bölgenin genişliği ve yapısı, direnç kaynak yönteminin ısıl çevrimi ve birleştirilen malzeme iç yapısına bağlı olarak değişmektedir.

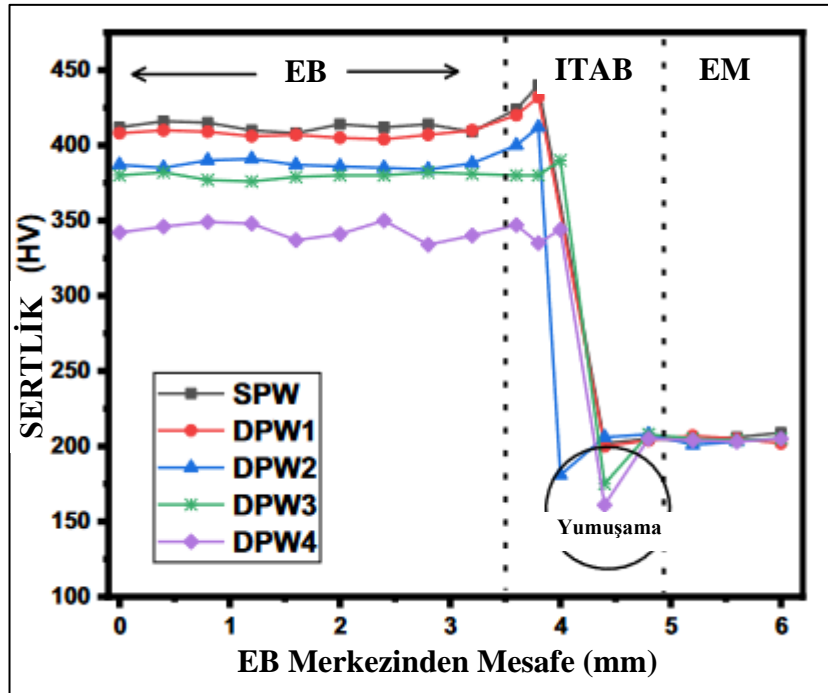
ITAB genel olarak incelendiğinde üç bölgeden meydana geldiği görülmektedir. Bu bölgeler; süper kritik bölge, orta bölge ve kritik altı diye adlandırılan bölgelerdir. Süper kritik bölge incelendiğinde kaynak çekirdeğine sınır konumunda olduğu ve tane irileşmesinin meydana geldiği bölgedir. Orta bölgeye bakıldığında, kısmi dönüşümün gerçekleştiği ve maksimum sıcaklık değerinin süper kritik bölgesine göre daha düşük olduğu görülmekle birlikte ana metalde olmayan fazların bu kısımda olabildiği görülür. Son olarak kritik altı bölge ise, herhangi bir dönüşümün olmadığı ve bazı durumlarda ince bir şekilde çökeltilerin olabildiği kısımdır [139,140]. Şekil 4.13'te direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen malzemelerin kaynak bölgeleri, sıcaklık dağılımları ve bu bölgelere ait sertlik değerleri verilmiştir [141].





Şekil 4.13. DNK bölgesine ait metalurjik yapı ve elde edilen veriler [141].

DP çeliklerin kaynak bölgesinde sertlik incelemeleri yapıldığında, kaynak bölgesinde ölçülen sertlik değerlerinin ana metalden daha yüksek olduğu görülmüştür [85]. Aynı zamanda ısıdan etkilenen bölgede ITAB yumuşaması (sertlikte azalma) adı verilen bölgelerin olduğu görülmekte ve bu yumuşamanın kaynak sırasında oluşan ısının etkisiyle yapı içerisinde bulunan martenzit fazının temperlenmesinden (Şekil 4.14) kaynaklandığı yapılan araştırmalar sonucunda belirlenmiştir [142–144].



Şekil 4.14. DP çeliklerde ITAB'da meydana gelen yumuşama.

ITAB yumuşamasının direnç nokta kaynaklı bağlantıların arayüzey şeklinde olan kırılmalarından çekme tipi şeklinde olan kırılma geçişlerinin yanısıra bağlantıların mekanik özelliklerini etkilemektedir [38]. Martenzit hacminin artması ITAB’da sertlik azalmasına neden olduğu ve bununla birlikte martenzit fazından kaynaklı ITAB yumuşamasının çekme mukavemetiyle korelasyona (doğrusal ilişki) sahip olduğu görülmektedir [145].

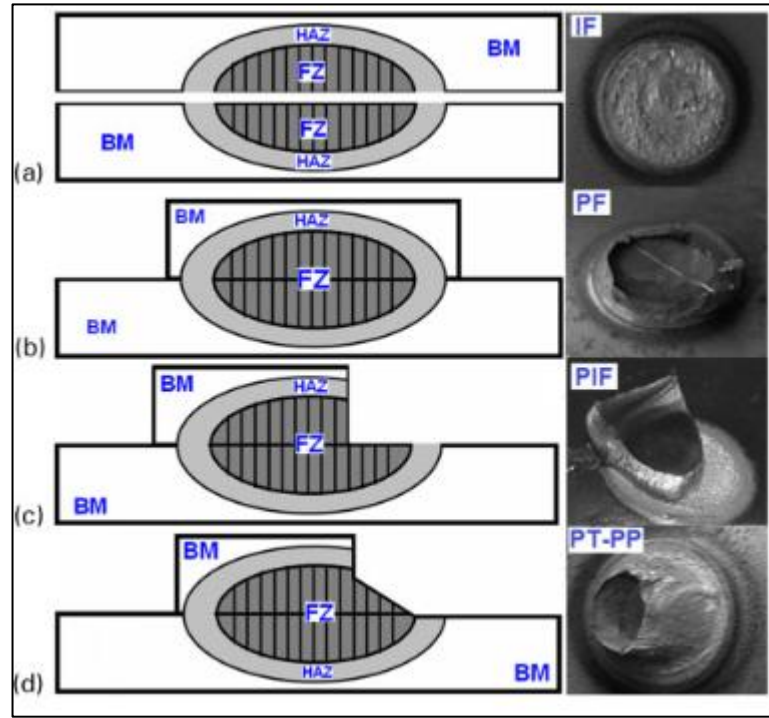
#### **4.5.2. Kopma Türleri**

Direnç nokta kaynak yöntemi uygulanarak yapılan kaynaklı bağlantıların mekanik test sonuçlarından biri olan kopma türleri görünümü malzemelerin nicel ölçüsünü göstermektedir. Kopma türleri; arayüzey, kısmi arayüzey ve düğmelenme ana başlıkları şeklinde olurken aynı zamanda bu üç farklı kopma türünün kombinasyonları şeklinde de gerçekleşebilir [146–148].

Kaynak metali boyunca gerçekleşen ve araçların çarpışması sonucunda olması gereken dayanım özellikleri açısından olumsuz bir etkiye sahip olan kopma türü arayüzey olarak adlandırılır. Kaynak sonucunda meydana gelen kaynak çekirdeğinin sacdan çekilmesi ile oluşan kopma görünümüne çekme tipi kopma görünümü adı verilmektedir. Bu tip kopma türü; kaynak metalinin özelliklerine bağlı olarak ana metal, ITAB veya ITAB-kaynak metali bölgesinde başlaması mümkündür. Aynı zamanda bu tür kopmalarda kaynak metalin geometrik şeklide de oldukça önemlidir ve genellikle çekme tipi olan kopmalarda istenilen mekanik özellikler sağlanmaktadır. Kopma başlangıcının ilk olarak kaynak metalinde gerçekleştiği ve daha sonra kalınlık yönünde devam ettiği kopma türüne ise kısmi arayüzey kopması denir. Son olarak gerçekleşen kopma türü ise; eğik olan çatlakların kaynak bölgesine doğru ilerlemesi sonucunda eşleşen sac kalınlığının bir kısmının kopma süresinde uzaklaştırılması sonucu oluşan kısmi kalınlık-kısmi çekme kopma türüdür[38]. Şekil 4.15’de kopma türleri gösterilmiştir [149]. Verilen şekilde a) arayüzey b) çekme c) kısmi arayüzey d) kısmi kalınlık-kısmi çekme türlerini göstermektedir.

Kaynaklı bağlantıların kopma türleri, direnç nokta kaynak yöntemlerinde enerjinin absorbe edilebilmesi ve yük taşıma kapasiteleri gibi konularda önem arz etmekte ve

oluşabilecek olumlu veya olumsuz özellikler hakkında bilgi sahibi olabilmemizi sağlamaktadır. Gerçekleşen kopma türleri arasında enerji absorpsiyonu ve plastik deformasyon özellikleri açısından çekme tipi olan kopmalar genellikle tercih edilmektedir. Çekme tipi olan kopmaların gerçekleşebilmesi için uygun malzeme seçimi, kaynak makinesi ve optimum kaynak parametrelerinin ayarlanması gerekir [38].



Şekil 4.15. DNK'lı bağlantıların kopma türleri [149].

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, ilk olarak çalışmada kullanılan DP 800 ve STREX 700 CR çeliklerin kimyasal bileşimleri, kaynak öncesi hazırlıkları, fikstür tasarımları, kaynak parametreleri ve kaynak işlemlerinin yapıldığı deney düzeneği anlatılmıştır. Daha sonra ise kaynaklı birleştirmelere uygulanan tahribatlı ve tahribatsız test yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

#### 5.1. KULLANILAN MALZEMELER

Deneysel çalışmada, gelişmiş yüksek mukavemetli çelik türlerinden olan ve aynı zamanda dayanım, maliyet, ağırlık, CO<sub>2</sub> salınımı gibi etkenlerden dolayı otomotiv sektöründe tercih edilen DP 800 ve STREX 700 CR sac malzemeler kullanılmıştır. 500x1250x1,2 mm boyutlarında ticari olarak temin edilen yüksek mukavemetli çeliklerin kimyasal özellikleri Çizelge 5.1’de ve mekanik özellikleri ise Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb+Ti	Cr	Ni+Cu	Fe
STREX 700 CR	0,16	0,40	1,80	0,02	0,01	0,015	0,10	-	-	Kalan
DP 800	0,15	0,20	1,72	0,012	0,003	0,040	0,20	0,42	0,050	Kalan

Çizelge 5.2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
STREX 700 CR	700	1000-1200	7
DP 800	620-770	800-950	10

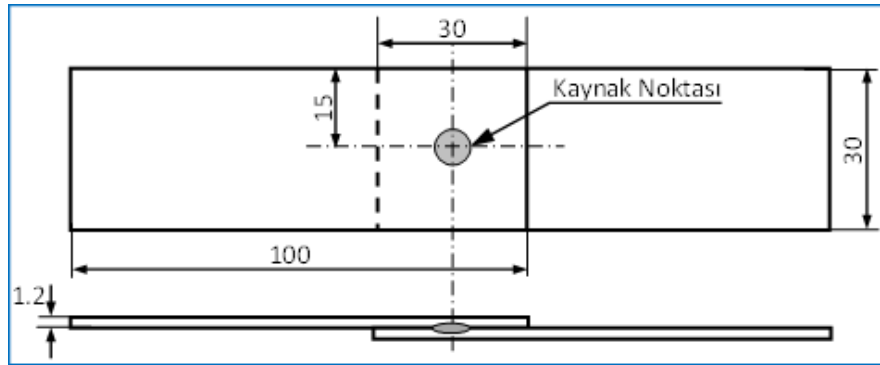
## 5.2. MALZEMELERİN KAYNAĞA HAZIRLANMASI

1,2 mm kalınlığında olan STRENX ve DP elik saclar, 100x30x1,2 mm lulerinde kaynaklı birleştirme için lazer kesim yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır (şekil 5.1).

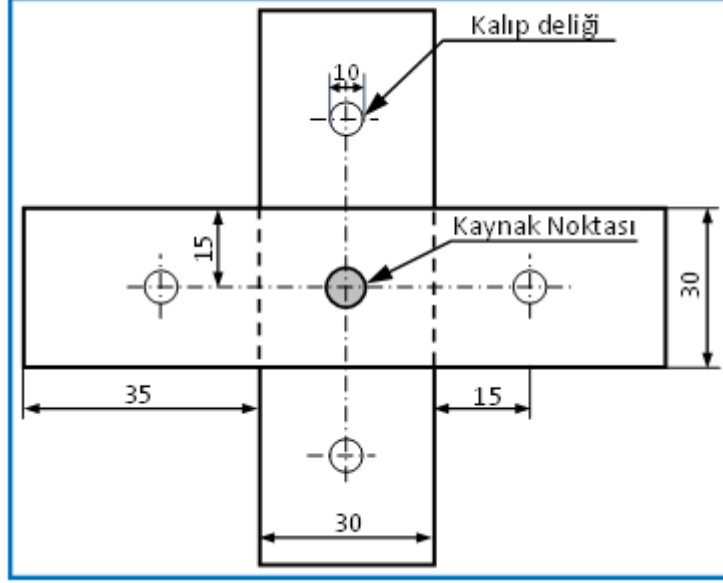


şekil 5.1. Lazer kesimi yapılan levhalar.

Kesimi yapılan deney numunelerinin üzerlerinde bulunan ve direnç nokta kaynak uygulaması sırasında sorun teşkil eden ve istenmeyen kir, yağ, oksit gibi olumsuzlukları uzaklaştırmak için 30 mm olan yüzeyler 800 ve 1000 mesh'lik zımpara kullanılarak yüzeyden uzaklaştırılmış daha sonra ise %99 saflıkta bulunan aseton ile numuneler temizlenmiştir. Kaynak işlemleri hem çekme-makaslama hemde çapraz-çekme testi yapılacak şekilde tasarlandığından temizlik işlemleri de ona göre yapılmıştır. şekil 5.2 ve 5.3'te EN ISO standartlarına uygun olarak hazırlanmış çekme-makaslama ve çapraz-çekme çalışma numunelerinin ölçüleri gösterilmiştir.



şekil 5.2. Çekme-makaslama test ölçüleri (mm).



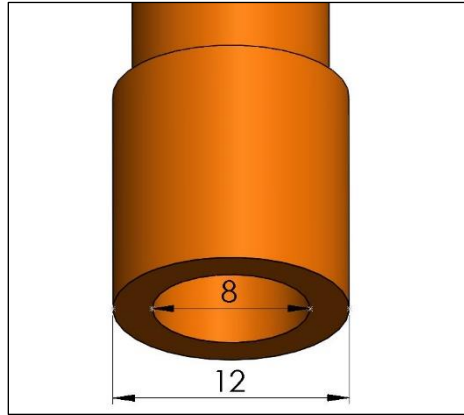
Şekil 5.3. Çapraz-çekme test ölçüleri (mm).

### 5.3. BÖLGESEL ÖN ISITMA SİSTEMİ VE FİKSTÜR TASARIMLARI

Günümüz otomotiv sektöründe kullanılan yeni nesil yüksek dayanımlı çeliklerin kaynak bağlantıları, araçların çarpışma esnasındaki kırılma dayanımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Çift fazlı çeliklerde görülen martenzit fazına bağlı olarak ITAB'daki gerilme yığılmaları çatlak oluşumuna sebebiyet verirken, araç güvenliği ve performansını azaltmaktadır.

Özellikle STRENGTH 700 CR malzemelerine ait kaynaklı bağlantıların ITAB'ı değerlendirildiğinde kaynak işleminden sonra bu malzemelerde yüksek sertlik ve düşük sünekliğe sahip yapıların oluştuğu görülmektedir. Bu çalışmada ITAB ve kaynak metalindeki sertlik değerlerini azaltarak esas metale daha yakın sertlik değerleri oluşturulmak istenmiş ve bu sayede çatlak vb. süreksizliklerin engellenmesi sağlanarak şekillendirilebilirlik özelliği kazandırılmak istenmiştir. ITAB'da sertliği düşürebilmek için en emin yol parçaya kaynaktan önce bir ön tav işlemi uygulamak ve bu sıcaklık derecesinde kaynak işlemini gerçekleştirmektir. Özellikle düşük soğuma hızlarında alt kritik sıcaklıklara maruz kalarak oluşan temperlenmiş bölge yüksek sertlikteki yapılar ile çevrelenmiştir. Bu durum bölgede gerilme yığılmasına ve çatlak yayılımına yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak ise kaynaklı bağlantılarda hasar meydana gelmektedir. Bu çalışmada geçmiş çalışmaların aksine kaynak

çekirdeğine bir işlem yapılmayıp ön tav işlemi sadece ısı tesiri altında kalan bölgeye uygulanmıştır. Direnç nokta kaynak makinasına ek ikinci bir kafa eklenerek ısıtma sistemi bu kafaya sabitlenmiştir. İşlem esnasında ısıtma kademesinden sonra alt tablanın ani hareketiyle (yaklaşık 0,7 sn.) parça kaynak için diğer kaynak kafasına gönderilerek kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Isıtma işleminde kullanılan bakır elektrod sadece ITAB'ı ısıtacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan elektrodun şematik görüntüsü (ölçüler mm) Şekil 5.4'te verilmiştir. Bölgesel ısıtma işlemi yaklaşık 0,2 sn süre ile gerçekleştirilmiş olup bölgede ölçülen sıcaklık yaklaşık 300-320 °C olarak ölçülmüştür. Yapılan araştırmalarda bu şekilde yapılmış bir ısıtma işlemine (bir nevi ısıl işlem) rastlanılmamıştır. DNK yöntemi kullanılarak kaynak öncesi veya kaynak sonrası ısıl işlem kaynak elektrotları ile sadece kaynak çekirdeğine uygulandığı çalışmalara literatürde rastlanılmaktadır. Fakat bu durumun kaynak bölgesinde farklı faz ve sertlik değerlerinin oluşmasına neden olduğu görülmüştür [38,104,149]. Sonuç olarak, tasarlanan BÖİ kaynak işlemi sonrasında yavaş soğuma ile meydana gelebilecek çatlak, mikroyapısal ve vb. hataları önleyerek teorik olarak, ardından da pratik olarak yeni bir düzenek çalışmasıyla literatüre katkı ve yeni bir boyut kazandırılacaktır.

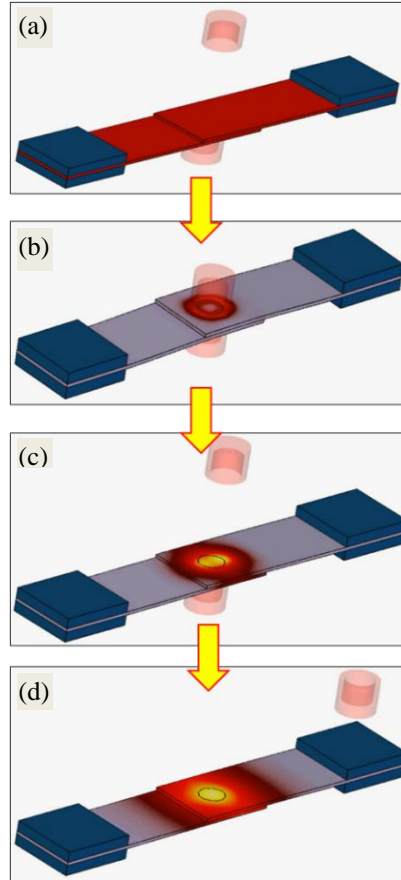


Şekil 5.4. BÖİ işlemi için tasarlanan elektrod.

Şekil 5.5'te bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminin klasik çalışmalardan farklı olarak sadece ısı tesiri altında kalan bölgeye (ITAB) uygulanma aşaması ve daha sonra gerçekleştirilen kaynak işleminin şematik görüntüsü verilmiştir. Burada "a" ile gösterilen kaynak öncesi hazırlanan STRENX 700 CR ve DP 800 malzeme çiftleri

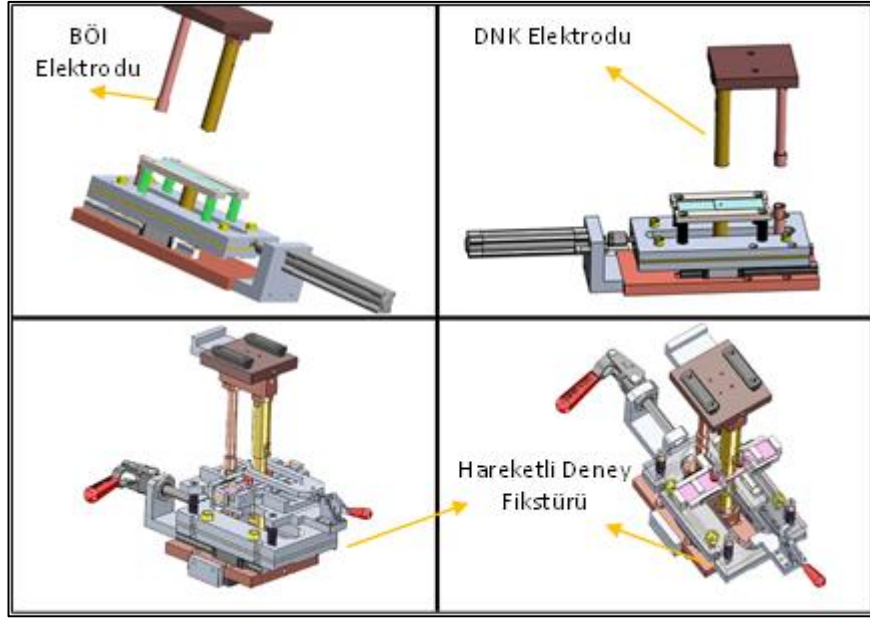
görülmektedir, “b” görüntüsünde ise gerçekleştirilen tez çalışmasının diğer çalışmalardan özgün olmasını sağlayan ve sadece kaynak öncesi ITAB’a uygulanan ve BÖİ diye adlandırılan bölgesel ön ısıtma işlemini ifade etmektedir. Şekilde verilen “c ve d” görüntüsünde, BÖİ işleminin ardından alt tablanın hareket etmesiyle birlikte yaklaşık 0,7 sn sonra gerçekleştirilen kaynak işlemini belirtmektedir.

STRENGTH 700 CR ve DP 800 çift fazlı çeliklerin kaynaktan sonra meydana gelen bölgesel sertliklerin önüne geçebilmek ve daha sünek bir yapı sağlayarak şekillendirilebilirlik kazandırmak için fikstür tasarımı yapılarak kaynak makinesine uyarlanmış ve daha sonra ise test numuneleri elde edilmiştir. Fikstür tasarımları 3D modelleme yapılarak çizilmiştir. Daha sonra ise modellemeler üzerinde küçük değişiklikler yapılarak revize edilmiş ve üretim aşamasına geçilmiştir. Tasarlanan ve üretimi yapılan fikstürlerin 3D modelleri (Şekil 5.6) ve imal edildikten sonraki görüntüleri (Şekil 5.7) gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Kaynak öncesi ITAB’da BÖİ işleminin şematik görünümü.





Şekil 5.6. Fikstürlerin 3D modelleme çizim görüntüleri.

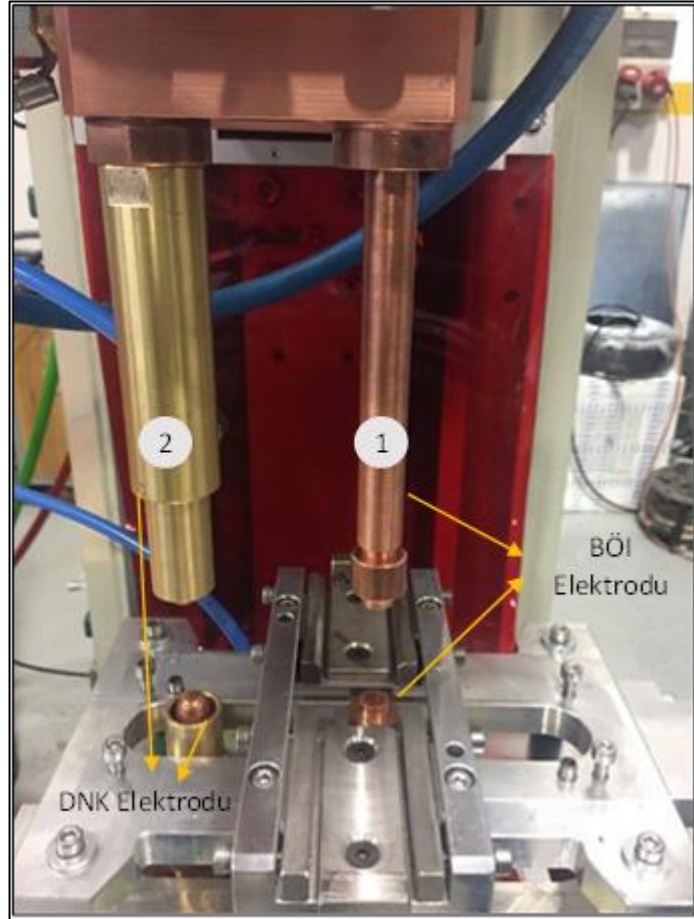


Şekil 5.7. Tasarlanıp imal edilen çeşitli fikstürler.

Şekil 5.6 ve 5.7'ye bakıldığında bölgesel ön ısıtma sistemi ve hareket kabiliyeti sağlayan deney fikstürleri gösterilirken, aynı zamanda çekme-makaslama ve çapraz

çekme numunelerinin herhangi bir eksen kayması sonucu oluşabilecek kaynak problemlerinin önüne geçebilmek için şekillerde de belirtildiği üzere çekme-makaslama ve çapraz-çekme tez fikstürleri tasarlanarak kaynak makinesine uyarlanmıştır.

STRENGTH 700 CR ve DP 800 çift fazlı çelik içeriğinde bulunan martenzit fazı ve ısı çevrimleri neticesinde meydana gelen ve ana metalden daha sert yapıların olduğu ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve kaynak metalinde olan yüksek sertlik değerlerinin azaltılması için tasarlanan ve kaynak makinesine uyarlanan kaynak elektrodları Şekil 5.8'de görülmektedir. Verilen şekilde aslında tez kapsamında ortaya atılan düşüncenin pratiğe dökülmüş özeti şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 5.8. Proses için BÖİ ve DNK elektrodları.

Şekil 5.8 incelendiğinde tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen DNK işleminin 2 adımında gerçekleştiği görülmektedir. 1. adımda ana metalde kaynak metaline doğru

homojen bir sertlik dağılımı elde edilmesi ve STRENX-DP çelik içeriğinde mevcut olan martenzit fazının temperlenmesini sağlayarak daha sünek bir yapı oluşturulması için tasarlanıp kaynak makinesine uyarlanan ek elektrod ile sadece ITAB'a bölgesel olarak ön ısıtma işlemi 2 mm genişliğindeki alana iç çapı 6 mm dış çapı 8 mm olan ve Şekil 5.8'de görülen elektrod ile uygulanmıştır. Bu sayede hem sertlik değerlerinin azalması hemde gerilme yığılmalarına bağlı oluşabilecek çatlakların önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.8'de görülen 2. adımda ise, bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminin çok kısa sürede (0,2 sn) uygulanmasıyla birlikte Şekil 5.7'de görüldüğü üzere hareketli deney fikstürü sayesinde alt tablanın kaymasıyla birlikte BÖİ işleminin etkisini kaybetmeden yani ITAB'ın soğumasına fırsat vermeden kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

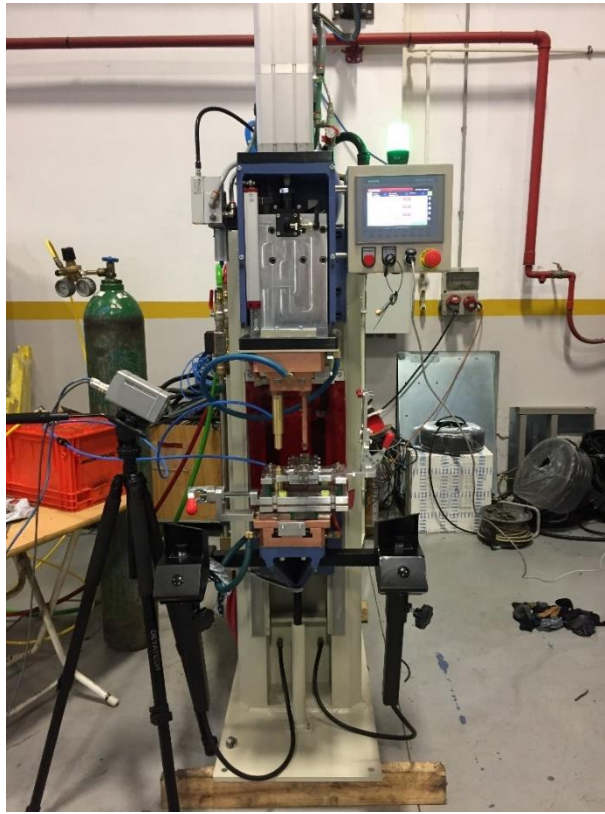
#### **5.4. NOKTA DİRENÇ KAYNAK SETİ**

Gerçekleştirilen bu çalışma iki farklı amaç üzerine kuruludur. Bunlardan birincisi yukarıda da bahsedildiği üzere bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemidir, ikincisi ise son yıllarda özellikle otomotiv sektöründe kullanımı giderek artan orta frekans doğru akım (OFDA) teknolojisinin alternatif akıma (AA) göre farklılıkların tespit edilmesi şeklindedir.

Günümüz koşullarında maliyet giderlerinin artması, kaynak sırasında meydana gelen enerji kayıplarının olması ve hepsinden daha da önemli olan kaynak akımının kontrol edilebilirliği sayesinde ısı girdisinin azalmasına bağlı olarak daha dar bir ITAB oluşumu, orta frekans doğru akım kaynak makinelerin kullanımının giderek artmasına neden olmuştur. Literatür kısmında da (bölüm 4) belirtildiği üzere gelişmiş ülkelerde 50 Hz olan DNK makinelerinin yerini, 1000 Hz frekansa sahip orta frekans doğru akım kaynak makineleri almıştır. OFDA teknolojisi kullanılarak yeni nesil yüksek mukavemetli çeliklerin yanında, alüminyum ve titanyum gibi demir dışı metallere birleştirilmesi bu teknolojiyi daha da önemli kılmaktadır.

Deney çalışmalarında, 100 KVA gücünde BETA 214 MF marka ve model içeriğine sahip, kaynak akım ve zamanın kontrol edilebildiği aynı zamanda pnömatik basma sistemi olan direnç nokta kaynak makinesi kullanılmıştır. Kaynak zamanı, akım

şiddeti, tutma süresi ve uygulanan kuvvet değerleri kaynak makinesinin üzerinde bulunan ve Unis makine tarafından geliştirilen yazılım ve donanım üzerinden ayarlanmıştır. Deney seti içeriğine bakıldığında ise; makine gövdesi, üst ve alt kol, pnömatik kaynak silindiri, trafo, bağlantı elemanları, elektrot grubu, pnömatik devre, su soğutma devresi ve donanımı kısımlarından oluşmaktadır. Alternatif akım (AA) ve orta frekans doğru akım (OFDA) teknolojisine sahip kaynak makineleri kullanılan çalışmada sadece örnek görsel olması açısından Şekil 5.9’da OFDA teknolojisine sahip kaynak deney setine ait fotoğraf gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Beta 214 MF direnç nokta kaynak makinesi.

## 5.5. KAYNAK PARAMETRELERİ VE KAYNAĞIN YAPILIŞI

İlk olarak, STREX ve DP çelik levhaların birleştirilebileceği optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi için ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön deney çalışmalarında, direnç nokta kaynak işlem parametrelerinden; kaynak akımı, elektrot kuvveti ve kaynak zamanı değiştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Uygulanan kaynak parametreleri çok düşük seçildiğinde

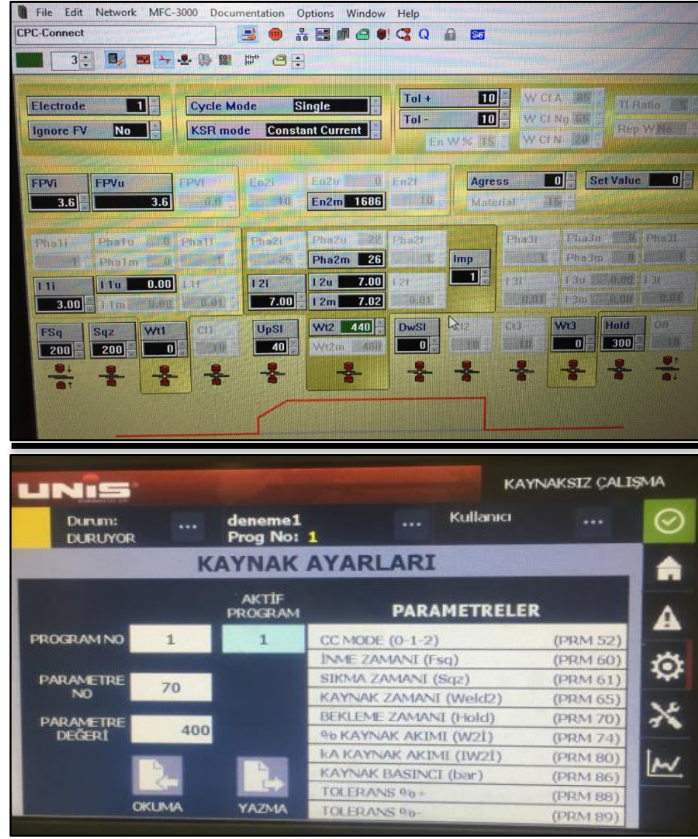
yetersiz birleşmelerin olduğu veya çok yüksek değerlerde seçildiğince ise aşırı deformasyon nedeniyle kaynak çekirdeği sınırlarının aşıldığı ön çalışmalarda görülmüş ve bu durum dikkate alınarak kaynak parametreleri oluşturulmuştur (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri.

Akım Türü	Ortam	Ön Tavlama Darbesi				Kaynak Darbesi		
		Akım (kA)	Elektrot Kuvveti (bar)	Kaynak Zamanı (ms)	Kaynak Akımı (kA)	Elektrot Kuvveti (bar)	Darbe (Pulse)	Kaynak Zamanı (ms)
Alternatif Akım	Normal	5	3,6	100	7	3,6	1	500
	BÖİ	5	3,6	100	7	3,6	1	500
Orta Frekans Doğru Akım	Normal	3	3,6	100	7	3,6	1	500
	BÖİ	3	3,6	100	7	3,6	1	500

Ayrıca ön deney çalışmalarında, STREX ve DP çelik yüzeyleri kimyasal (aseton vb.) veya mekanik olarak (zımparalama vb.) temizlenmediğinde, kaynak sırasında birleştirilecek yüzeylerde bulunan oksit tabakasının fişkırmaya neden olarak kaynak hatasına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Alternatif akım (AA) ve orta frekans doğru akım (OFDA) türleri kullanılarak yapılan kaynaklı birleştirmelere Çizelge 5.3'te belirtildiği üzere normal (ön ısıtmasız) ve bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemleri uygulanmış, 3-10 devirlik süre zarfında düşük bir değerden daha yüksek bir değere kademeli olarak yükselme adı verilen upslope değerleri alternatif akımda 5kA'dan 7kA'ya, orta frekans doğru akımda ise, 3kA'dan 7kA'ya yükseltilerek istenilen kaynak akım değeri elde edilmiştir. Aynı zamanda, elektrot kuvveti 3.6 (bar) ve kaynak zamanı 500 (ms) olarak optimum kaynak parametre değerleri belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerin uygulanması amacıyla yazılım geliştirilerek direnç nokta kaynak makinesine entegre edilmiş, bu sayede kaynaklı bağlantılara farklı parametre değerleri uygulanmasının önüne geçilerek hassas bir şekilde birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmesi sağlanarak oluşabilecek hata payı minimize edilmiştir. Kaynak işlemi 6 mm çapındaki Cu-Cr-Zr alaşımlı elektrot kepleri ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10'da geliştirilen ve kaynak makinesine entegre edilen yazılımdan bazı görseller verilmiştir.

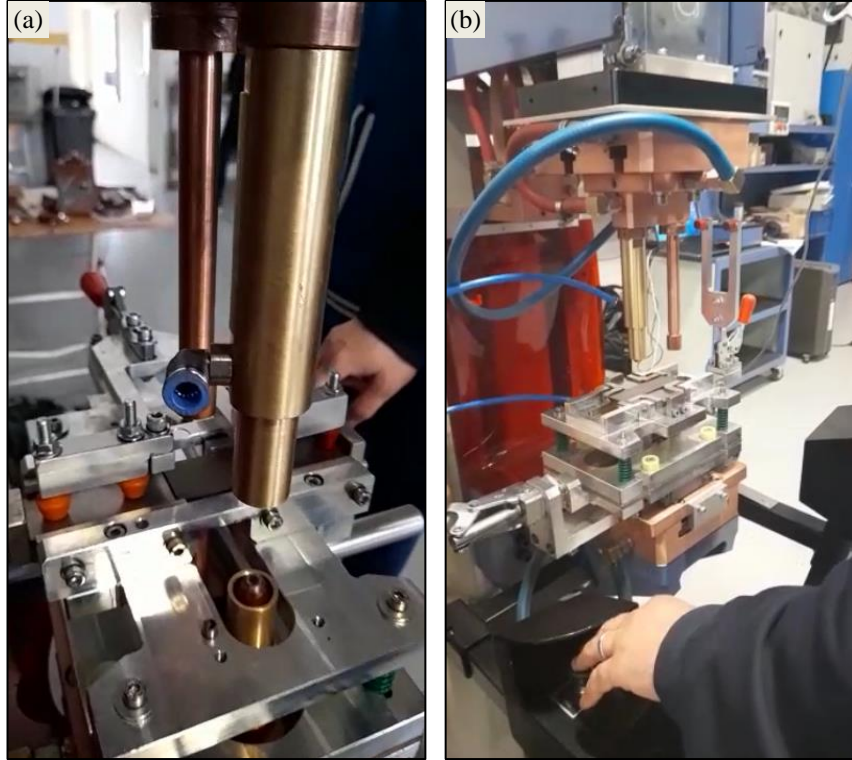


Şekil 5.10. Kaynak parametrelerinin yazılım ile ayarlanması.

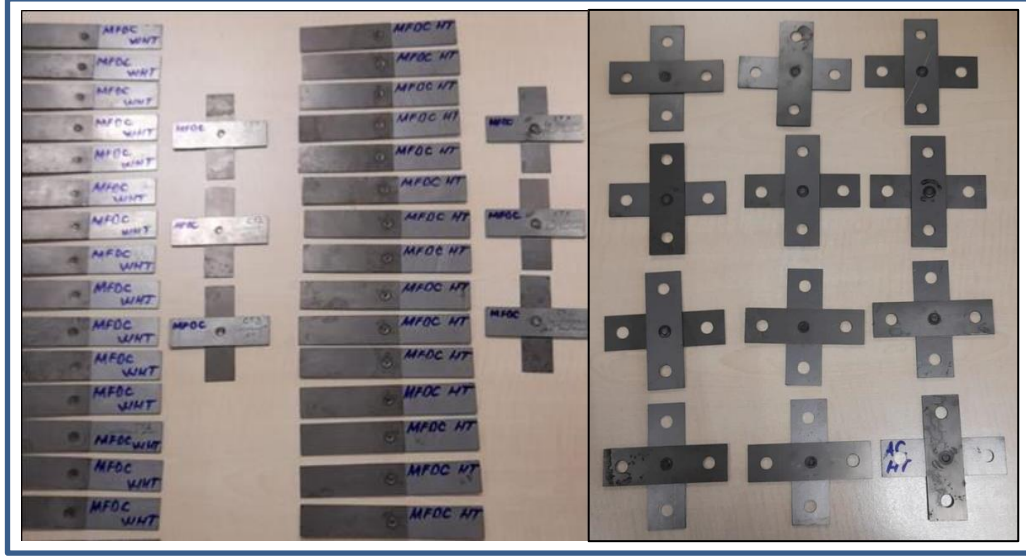
Ayrıca kaynak işlemleri alternatif akım ve orta frekans doğru akım da olmak üzere normal (ön ısıtışlımsız) ve BÖİ ortamlarında her bir parametreden 20'şer adet olmak üzere toplam 80 adet gerçekleştirilmiş ve Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Kaynak işlemi sırasında alınan fotoğraflar Şekil 5.11'de verilmiştir. Verilen şekilde a) çekme-makaslama testi, b) çapraz-çekme test numunelerinin alınması sırasında çekilmiştir. Direnç nokta kaynağı ile birleştirilen ve tabloda belirtilen deney numunelerinden sadece örnek olması açısından OFDA ile birleştirilen numunelerin çekme-makaslama ve çapraz-çekme makro görüntüleri ise Şekil 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Deneysel çalışmalarda kullanılmak için birleştirilen numune sayısı.

Akım Türü	Ortam	Çekme- makaslama	Çapraz- çekme	Yorulma	Sertlik ve mikroyapı
AA	Normal	3	3	12	2
	BÖİ	3	3	12	2
OFDA	Normal	3	3	12	2
	BÖİ	3	3	12	2
	Toplam	12	12	48	8
GENEL TOPLAM: 80					



Şekil 5.11. DNK işleminin farklı açılardan gerçekleştirilmesi.



Şekil 5.12. OFDA ile üretilen çekme-makaslama ve çapraz-çekme numuneleri.

## 5.6. GÖRSEL MUAYENE VE MANYETİK PARÇACIK TESTİ

Metalografik işlemlere başlanılmadan önce direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen kaynaklı numuneler, farklı akım etkilerinin oluşturabileceği olumsuzlukların tespit edilmesi amacıyla bütün test parçalarının yüzeylerinde oluşabilecek süreksizlikler, yapısal bozukluklar gibi yüzey kalitesini etkileyen parametrelerin belirlenmesi amacıyla el feneri ve kaynak kumpası kullanılarak görsel olarak incelenmiştir. Yapılan incelemeler ile kaynaklı numunelerin elektrot dalma derinlikleriyle birlikte kaynakların nokta çapları ölçülmüştür. Ayrıca elektrod dalma derinliği (mm) ve nokta çapı (mm) ölçümleri kumpas ve mikrometre ile 5 farklı test numunesinden elde edilen ortalama değerler dikkate alınarak tablo oluşturulmuş ve Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Daha sonra tahribatsız muayene yöntemleri arasında olan ve sıklıkla kullanılan manyetik parçacık (MP) testi her bir test paketinden birer numuneye uygulanarak yüzeyde veya yüzeye yakın bölgelerde oluşabilecek süreksizlikler tespit edilmiştir. Aynı zamanda kullanılan malzemelerin üretici firma tarafından korozyon direncini artırması amacıyla kullanılan galvaniz kaplamaların kaynak işlemi esnasında elektrot temas yüzeyi ve çevresinde oluşabilecek sıvı metal kırılmalığının tespit edilmesi amacıyla manyetik parçacık testi uygulanmıştır.



## 5.7. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLIĞI VE İNCELEMELERİ

Direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen STRENX ve DP çelik sacların kaynak bölge morfolojisini incelemek amacıyla mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma numunelerinin standartlara uygun hale getirilmesi için uygulanan kesme işleminde oluşan deformasyon ve numuneler üzerinde bulunan kir, yağ ve pas gibi olumsuzlukların giderilmesi, orijinal yapının net bir şekilde görülebilmesi için zımparalama ve parlatma işlemi uygulanır.

Çalışma numuneleri, epoksi reçine kullanılarak bakalite alınmış ve sonrasında standart şekilde metalografik hazırlık süreci olan zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Zımparalanmış ve bakalite alınmış test numuneleri.

STRENX ve DP çelik sacların mikroyapı incelemelerinin yapılabilmesi için metalografik olarak hazırlanmış olan numunelere farklı mesh kalınlıklarında (240-1200) zımparalama işlemleri uygulanmış daha sonra ise keçeler üzerine 1-3  $\mu\text{m}$ 'lik elmas pastalar emdirilerek parlatma uygulaması yapılmıştır. Yapılan parlatma işlemi Şekil 5.14'te gösterilen Metkon Forcipol 202 marka ve model makinede gerçekleştirilmiştir. Zımparalama ve parlatma işlemi yapılan numunelerin

metalografik olarak gerçek içyapı özelliklerinin belirlenmesi için parlatma işleminden sonra numune yüzeylerine kimyasal dağlama işlemi uygulanmıştır.



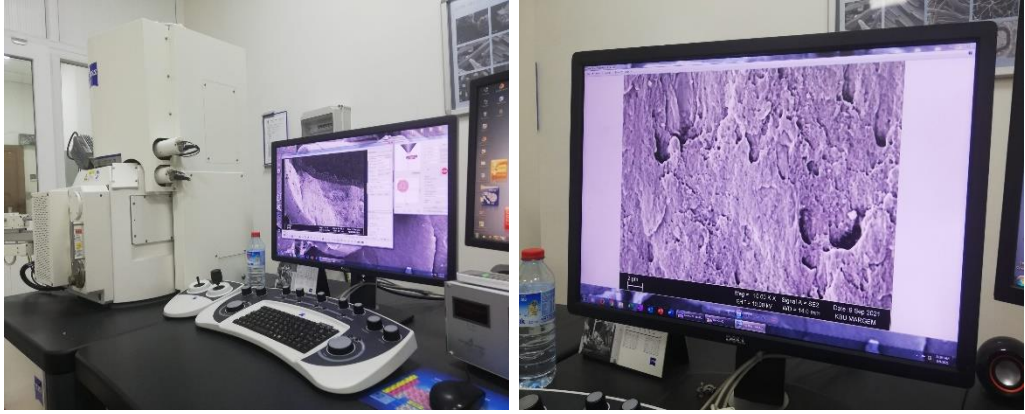
Şekil 5.14. Parlatma işlemlerinin yapıldığı cihaz.

Dağlama işlemiyle, parlatma sonucunda görülemeyen mikroyapı özelliklerinin ortaya çıkmasına neden olarak; fazların cinsi, tane sınırları ve kaynak arayüzeyi etütlerinin yapılmasını kolaylaştırır. Bu amaç doğrultusunda çalışma numuneleri %2 nital ile 5 saniye boyunca dağlanmıştır. Dağlanma işlemi tamamlanan numuneler Şekil 5.15'te belirtilen Nikon marka dijital kamera bağlantılı optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeğinden oluşan kaynak bölgesi görüntüleri farklı büyütme oranları kullanılarak kaynak bölgesi incelenmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ise, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında (sadece yorulma kırık yüzeyleri) gerçekleştirilmiştir. Karabük Üniversitesindeki deneylerin gerçekleştirildiği Zeiss Ultra Plus marka taramalı elektron mikroskobu cihazının görüntüsü Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Dijital kamera bağlantılı optik mikroskop.



Şekil 5.16. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı.

## 5.8. MEKANİK ÖZELLİKLERİN TESPİTİ

STRENX ve DP çeliklerin direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıların statik kuvvet etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla çekme-makaslama ve çapraz-çekme testleri uygulanmıştır. Aynı zamanda farklı kaynak parametrelerinin uygulandığı kaynaklı bağlantıların sertlik profili çıkartılarak analiz edilmiştir.

### 5.8.1. Çekme-Makaslama Deneyi

Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen çekme-makaslama testi sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen çeliklerin her bir parametresinden 3'er adet olmak üzere toplam 12 adet çekme-makaslama testi yapılmıştır.

DIN EN ISO 14272 standartına uygun olarak gerçekleştirilen çekme-makaslama deneyi, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesinde bulunan 50kN kapasiteye sahip SHIMADZU marka çekme test cihazında 2 mm/dk çekme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.17). Çekme-makaslama deneylerinde yukarıda belirtildiği üzere her bir parametreden 3 adet uygulanmış ve elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak grafikler çizilmiştir.



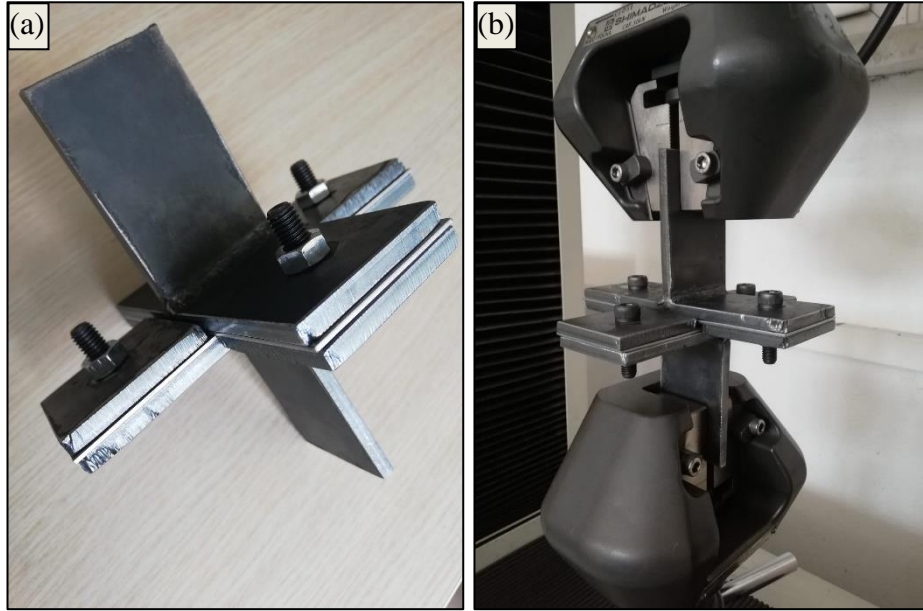
Şekil 5.17. Çekme test cihazı ve uygulama görüntüsü.

### 5.8.2. Çapraz-Çekme Deneyi

Kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme-makaslama deneyinin yanısıra mekanik özelliklerin belirlenmesinde uygulanan diğer bir yöntem de çapraz-çekme testidir.

Uygulanan bu deneyde de her bir parametreden 3'er adet olmak üzere toplam 12 adet kaynaklı bağlantının çapraz-çekme testi yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak grafikler oluşturulmuştur.

DIN EN ISO 14272 standartlarına uygun olarak hazırlanan deneysel çalışma numuneleri, 50 kN kapasiteye sahip SHIMADZU marka çekme test cihazında 2 mm/dk çekme hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin çekme işlemi sırasında herhangi bir eksen kaymasının önüne geçebilmek için zorunlu olarak bir kalıp tasarlanmış ve üretilmiştir. Şekil 5.18 a'da tasarlanan ve üretilen kalıp, b'de ise çapraz-çekme test işlemi esnasındaki görüntü verilmiştir.



Şekil 5.18. Çapraz-çekme test cihazı ve kullanılan kalıp.

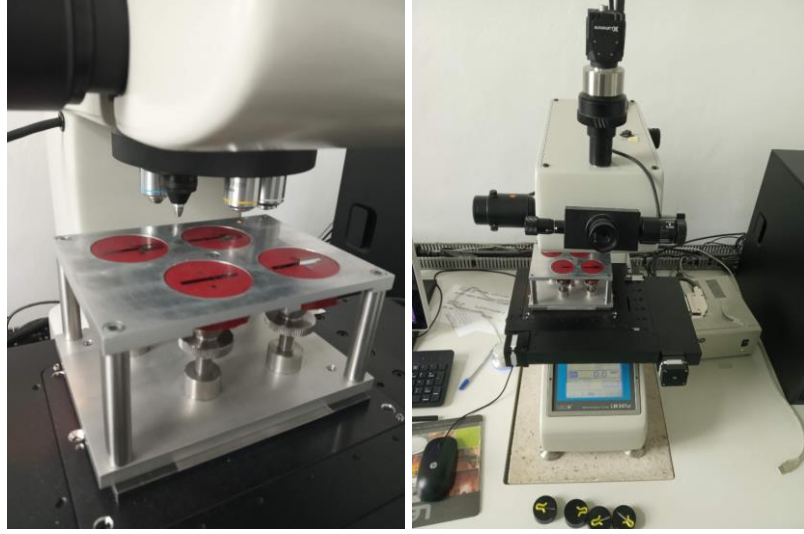
### 5.8.3. Kopma Hasar Türlerinin İncelenmesi

Otomotiv uygulamalarında direnç nokta kaynak yöntemi sonrasında kaynaklı bağlantıların güvenilirliğini kontrol etmek için kopma hasar modları incelenmektedir. Direnç nokta kaynaklı bağlantıların kopma hasar türleri incelendiğinde; arayüzey (Mod A), kısmi arayüzey (Mod B) ve düğmelenme (Mod C ve D) şeklinde ayrılımlar meydana geldiği görülür [150,151]. Düğmelenme şeklinde kopma türleri analiz edildiğinde direnç nokta kaynaklı bağlantılarda görülmek istenilen hasar modunun

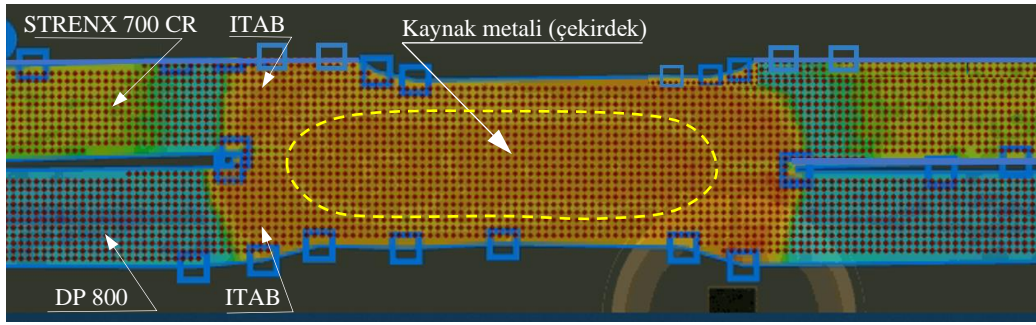
olduğu belirlenmiştir. Bu tür kopmaların oluşma nedenlerine bakıldığında ise kaynak parametrelerinin optimum seviyede olduğu, buna paralel olarak uygulanan mekanik testlerin sonucunda yük taşıma kapasitelerinin arttığı hasar modu olduğu görülür. İstenmeyen kopma hasarlarının nedeni olarak ise kaynak parametrelerinin yetersiz seçilmesi, düşük ısı girdisi ve buna bağlı olarak yeterli ergime ısısına ulaşılamaması sonucu kaynak bölgesinin istenilen seviyede olmaması olarak gösterilir ve bu durumun önüne geçebilmek için kaynak parametreleri değiştirilerek istenilen hasar modunun elde edilmesi sağlanır. Bu nedenle STRENX 700 CR ve DP 800 eliklerin DNK uygulaması sonrasında kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme-makaslama ve çapraz-çekme dayanım testlerinin ardından meydana gelen kopmaların hasar modları incelenmiştir.

#### **5.8.4. Sertlik Testi**

Direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen STRENX ve DP eliklerin kaynaklı bağlantılarının farklı kaynak parametreleri sonucunda; ana malzeme, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve kaynak çekirdeği üzerinde meydana gelen sertlik değişimlerinin belirlenmesi amacıyla kaynaklı numunelere mikrosertlik testi uygulanmıştır. Mikrosertlik deneyleri, Çekya’da University of Defence laboratuvarında bulunan ve Şekil 5.19’da gösterilen Leco 247 AT marka ve model içeriğine sahip cihaz ile HV cinsinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca cornerstone yazılımı kullanılarak kaynak bölgesi (ana metal+ITAB+kaynak metali) 100-120  $\mu\text{m}$  aralıklarla, 145-157 arasında değişen noktalardan sertlik ölçümleri yapılmış, elde edilen ölçüm değerleriyle birlikte sertlik grafikleri ve kaynak bölgesinin renkli sertlik haritaları oluşturulmuştur. Sertlik haritaları AA-normal ve AA-Bİ sonucunu elde edilen numunelere uygulanmış ve örnek olması açısından sadece Şekil 5.20’de AA-normal kaynaklı bağlantıdan elde edilen sertlik haritası verilmiştir.

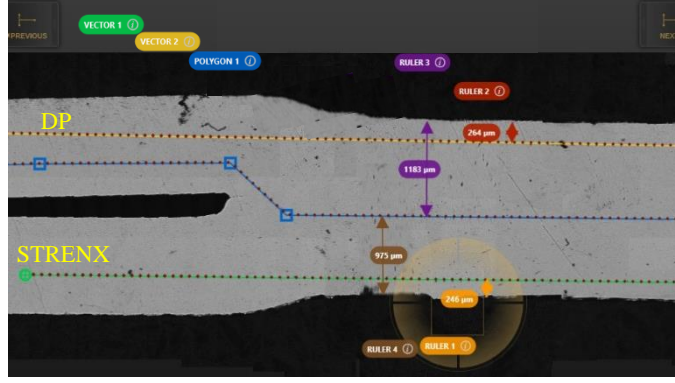


Şekil 5.19. Deneysel çalışmalarda kullanılan mikrosertlik ölçüm cihazı.



Şekil 5.20. AA-normal bağlantının mikrosertlik haritası.

Metalografik olarak hazırlanmış olan numuneler üzerinde, Şekil 5.21’de görüldüğü üzere kaynak dikişine paralel olacak şekilde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Her bir parametreden 1 test numunesi olacak şekilde gerçekleştirilen sertlik ölçümleri poligon şeklinde uygulanmıştır. Sadece AA teknolojisi kullanılarak bölgesel ön ısıtma işlemi uygulanmayan kaynaklı bağlantı numunesine diğer test numunelerinden farklı olarak Şekil 5.21’de turuncu ve kırmızı renk ile gösterilen vektör 1 ve vektör 2 doğrultularında ilave sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.21. Mikrosertlik ölçüm noktaları.

### 5.8.5. Yorulma Testi

Titreşim, tüm yapılarda olduğu gibi otomotiv sektörü içinde oldukça önemli bir konudur. Araç içerisinde bulunan yolcuların sadece gürültüden dolayı rahatsız olmalarının yanında titreşim, özellikle otomotivde bulunan kaynaklı bağlantılar için büyük önem arz etmektedir. Yorulmanın titreşimden kaynaklı gürültü problemlerinin yanında, herhangi bir çatlak çekirdeklenmesi oluşumuna sebep olmayan çevrimsel yük uygulamalarında statik dayanım performansını düşürmemiş olsa bile darbe yükleme şartlarında direnç nokta kaynaklı bağlantıların performansını düşürdüğü tespit edilmiştir. Ek olarak, daha önceki yapılan çalışmalarda yorulma çatlak oluşması durumunda statik dayanımın önemli derecede azaldığı belirlenmiştir [38].

Yarı statik yükleme koşullarından daha düşük yüklerde bile yorulma kusuru meydana gelebildiğinden direnç nokta kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımları otomotiv sektörü için önem teşkil etmektedir.

Kaynaklı bağlantıların çekirdek çapı ve kopma türleri yapılan birleştirmenin özellikleri hakkında önemli bilgiler vermektedir. Meydana gelebilecek arayüzey kopma türü, yüksek yüklemelerde küçük çaplı çekirdek boyutuna sahip kaynaklı bağlantılarda yorulma yüklemesi boyunca görülebilmektedir. Yorulma yüklemelerinde meydana gelen arayüzey kopma türü eğilimi yarı statik yüklemelere göre oluşma olasılığı daha düşüktür ve yapılan yorulma testlerinde çekme türü olan kopmalar sıklıkla görülmektedir.

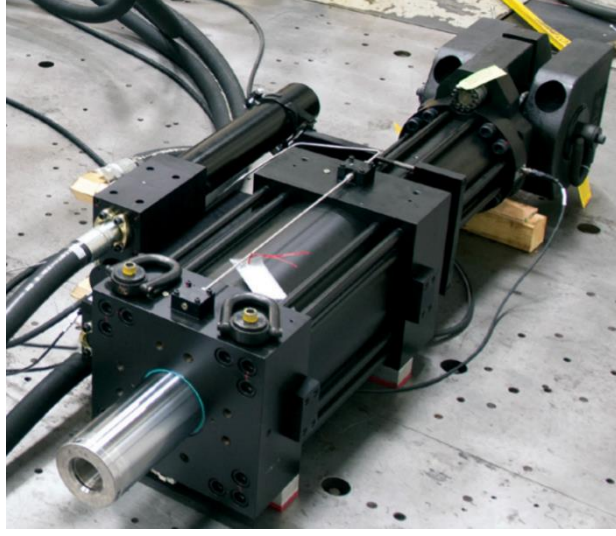


Direnç nokta kaynak yönteminde yorulma ömrüne etki eden faktörler; yükleme koşulu, sac kalınlığı, kaynak çekirdek çapı, kalıntı gerilmeleri ve malzeme özellikleridir. Yükleme koşulunda, kesme bileşeninin artmasıyla kaynaklı bağlantıların yorulma ömrü azalırken, arayüzey kopma türü eğilimi artış göstermektedir. Sac kalınlığının artmasıyla birlikte yorulma ömründe uzamaktadır ve aynı zamanda yorulma dayanımı sac kalınlığının karekökü ile orantılıdır.

Kaynak çekirdek çapı ile yorulma dayanımı doğru orantılıdır. Otomotiv sektöründe optimum kaynak çekirdek çapının  $5t^{0.5}$  olması istenir fakat  $3,5t^{0.5}$  çekirdek boyutu da otomotiv endüstrisinde kabul edilebilir. Ancak  $5t^{0.5}$ 'den  $3,5t^{0.5}$ 'e düşmesiyle birlikte yorulma ömürleri incelendiğinde kayma gerilmesinde %70 ve sıyırma yükleme koşullarında %80 azalma meydana geldiği bilinmektedir [38].

Tez kapsamında, yorulma testleri COŞKUNÖZ Ar-Ge bünyesinde bulunan otomotiv komponent testleri için kullanılan MTS marka modüler bir hidrolik güç ve kontrol ünitesi yardımı ile farklı yük değerlerinde (0.2, 0.3, 0.5 ve 0.75 kN) ve 5 Hz sabit frekans değerinde eğmeli yorulma testi yapan bir cihazda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.22'te görülen MTS 244 Serisinden 244.21 model Aktüatör yorulma testlerinde kullanılmıştır. 50 kN kapasiteli bu aktüatörün maksimum piston stroğu  $\pm 135$  mm'dir.

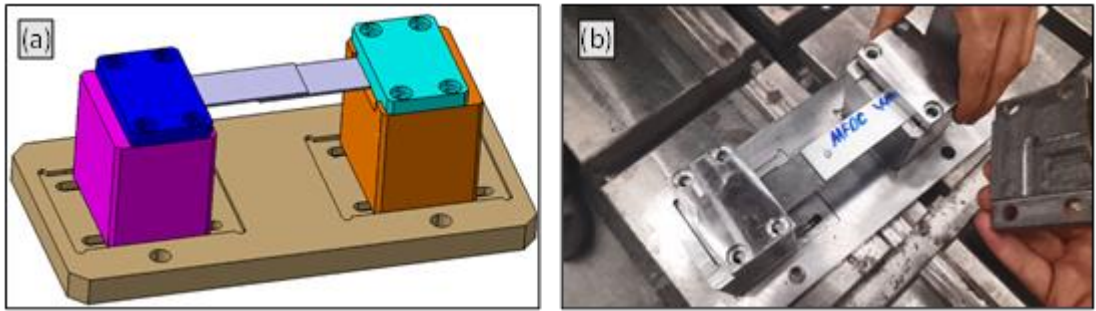
STRENX ve DP çeliklerin direnç nokta kaynaklı bağlantıların her bir parametresinden 12 adet yorulma testi yapılmış ve elde edilen yorulma ömürleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Kaynaklı bağlantıların mukavemetinde matematiksel hesaplamayla yapılan elastik eğrinin kuvvet sonuçları ile elde edilen deney sonuçları mukayese edilmiştir ve aynı zamanda yorulma dayanımı testi sırasında test parçalarında meydana gelen kopma türleri incelenerek yorumlanmıştır.



Şekil 5.22. Yorulma testlerinde kullanılan aktüatör.

Aynı zamanda yorulma testlerinin yapılabilmesi için fikstür tasarımları yapılarak yorulma cihazına entegre edilmiştir. Deney düzeneğinde 15 mm olan silindirik kesit kaynak çekirdeği merkezine yük uygulamaktadır.

Şekil 5.23-a'da tasarımı tez kapsamında yapılan fikstürün 3 boyutlu tasarımı gösterilirken, 5.23-b'de ise tasarımı gerçekleştirilen fikstürün üretilerek montaj edilen resmi gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 5.24'de yorulma test cihazı ve yapılan deneysel çalışma görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.23. Yorulma test fikstür tasarımı ve imalat görüntüsü.



Şekil 5.24. Yorulma cihazı ve test görüntüleri.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

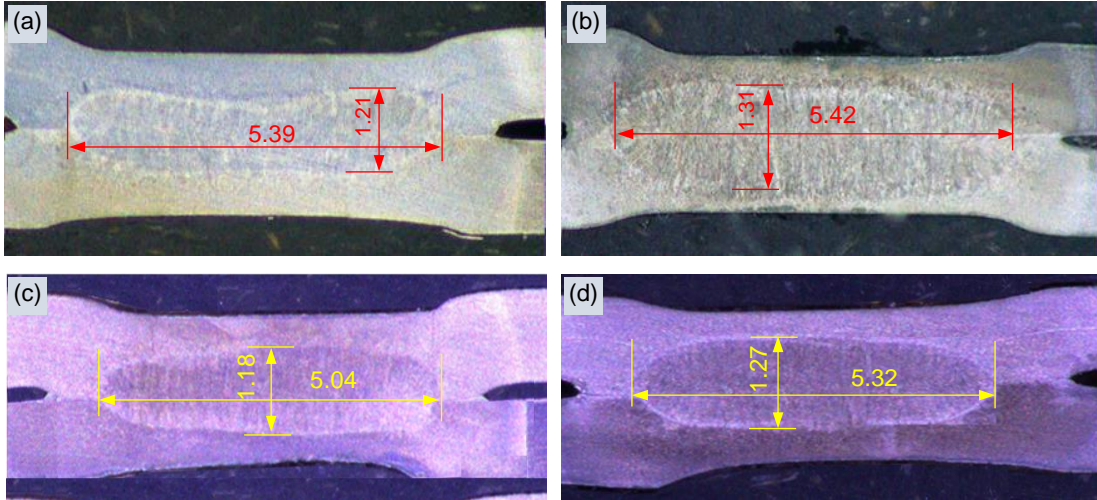
#### 6.1. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu bölümde otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan ve önemi giderek artan çift fazlı çelik ailesinden olan 1,2 mm kalınlıklarında STRENGTH 700 CR ve DP 800 çelikleri, alternatif akım ve orta frekans doğru akım teknolojileri kullanılarak birleştirilmiştir. İlk olarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin tümüne gözle muayene kontrolü yapılmış ve ardından bağlantıların yüzeylerinde oluşabilecek süreksizliklerin tespiti için tahribatsız muayene yöntemlerinden olan manyetik parçacık testi uygulanmıştır. Daha sonra ise kaynak bölgesi karakterizasyonu için yapılan makro ve mikroyapı çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Sonraki aşamalarda kaynak bölgesinden elde edilen sertlik değerleri hakkında bilgi verilirken aynı zamanda kaynaklı bağlantılara ait mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan çekme-makaslama ve çapraz-çekme sonuçlarına yer verilmiştir. Son olarak direnç nokta kaynak işlemi uygulanan test parçalarına yorulma testi uygulanarak kaynaklı bağlantıların yorulma ömürleri hesaplanmıştır. Tüm bu deneysel çalışmalar laboratuvar şartlarında gerçekleştirilirken elde edilen veriler literatür çalışmalarına paralel olarak sebep-sonuç ilişkisi içerisinde değerlendirilmiştir.

#### 6.2. GÖRSEL MUAYENE VE MANYETİK PARÇACIK TESTİ

Direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılara ait yüzeysel olarak herhangi bir hatanın olup olmadığı konusunda, hem AA hemde OFDA teknolojisi kullanılarak birleştirilen numunelere görsel muayene testi yapılmıştır. Kaynak bölgesi ve etrafında oluşabilecek yüzeysel deformasyon veya çatlak vb. hataların araştırılması yapılarak, kaynak çekirdek çapı, yüksekliği, elektrod dalma

derinliği ve nokta çapı mm olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümlere ait görseller Şekil 6.1’de, tablo şeklindeki veriler ise Çizelge 6.1’de verilmiştir. Şekil 6.1’de a-AA-normal, b-AA-BÖI, c-OFDA-normal ve d-OFDA-BÖI işlemlerini ifade etmektedir.



Şekil 6.1. AA ve OFDA kaynak kesitleri makro görüntüleri.

Çizelge 6.1. Kaynak çekirdek ve nokta ebatları.

		Çekirdek apı (mm)	Çekirdek yüksekliği (mm)	Elektrod dalma derinliği (mm)	Nokta apı (mm)
AA	Normal	5,39	1,21	0,54	6,21
	BÖI	5,42	1,31	0,59	6,25
OFDA	Normal	5,04	1,18	0,52	6,13
	BÖI	5,32	1,27	0,58	6,18

Elektrod dalma derinliği ve nokta çapı ölçümleri kumpas ve mikrometre yardımı ile fiziksel olarak gerçekleştirilmiştir.

Otomotiv sektöründe minimum kaynak boyutunun belirlenmesi için farklı standartlar bulunmaktadır. AWS-AISI-ANSI standartlarına göre direnç nokta kaynaklı bağlantıların (DNK) boyutlandırılmasında,  $D = 4 \times t^{0.5}$  kuralı uygulanırken, Japon JIS ve Alman DVS standartlarına göre  $D = 5 \times t^{0.5}$  kuralı uygulanmaktadır. D ifadesi çekirdek çapını ifade ederken t ise malzeme kalınlığını belirtmektedir [38,87,152]. Kaynaklı bağlantının istenilen yükü taşıyabilmesi için kaynak çekirdeğinin boyutunun maksimum seviyede büyük olması istenmektedir. Kaynak çekirdek boyutunun sadece sac kalınlığı ile alakalı olmadığı aynı zamanda da kaynak edilen malzemelerin özelliklerinin de oldukça önemli olduğu literatür araştırmalarında (bölüm 4) belirtilmiştir. Çizelge 6.1 incelendiğinde elektrod dalma derinliği 0,52 mm iken,

çekirdek çapının 5,04 mm olduğu aynı şekilde 0,59 mm elektrod dalma derinliğinde çekirdek çapı 5,42 mm olduğu görülmektedir. Elektrod dalma derinliğinin artmasıyla birlikte kaynak çekirdek çaplarının da artmış olduğu görülmektedir. Kaynak çaplarındaki artış sonucunda da daha önceki literatür çalışmalarında da belirtildiği üzere kaynak bağlantı kalitesinin de artış gösterdiği ifade edilmişti. Bu bağlamda bölüm 6’da elde edilen çekme-makaslama dayanım sonuçları Şekil 6.1 ve Çizelge 6.1’i destekler nitelikte olduğu görülmektedir.

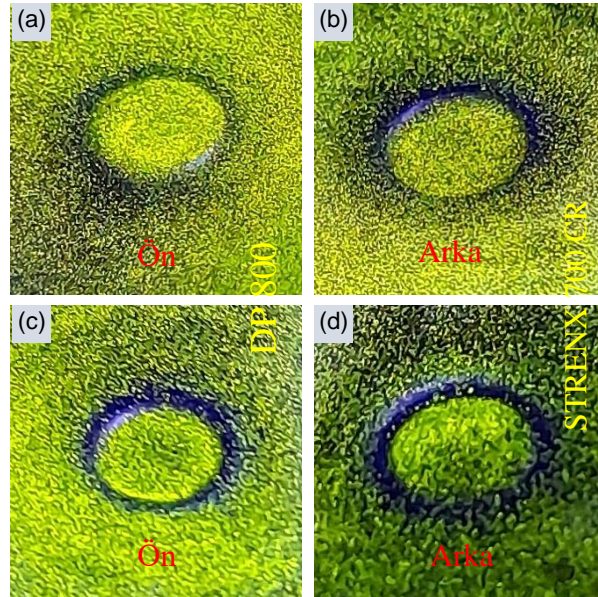
AA ve OFDA teknolojisi ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılara ait görüntüler 5. bölüm Şekil 5.12’de daha önceden verilmişti. Verilen bu kaynaklı bağlantıların göz ile muayenesi gerçekleştirildiğinde kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak, yüzeysel bir deformasyon ve arayüzey fişkırmaları gibi hataların olmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda gerçekleştirilen DNK yönteminde parametre seçimlerinin uygun olduğu sonucu çıkarılabilmektedir. Elbette herhangi bir kaynak hatasına rastlanılmamasında kaynak makinesinin günümüz teknolojisine uyarlanması sonucunda yazılımsal olarak uygulama yapılabilmesi sayesinde insan odaklı oluşabilecek hataların minimize edilmesi ile gerçekleşmiş olduğu bir gerçektir.

Görsel muayenenin ardından nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen test parçalarının yüzeyinde veya yüzeye yakın iç yapılarında gözle tespit edilemeyen süreksizliklerin belirlenmesi amacıyla manyetik parçacık (MP) testi uygulanmıştır. Bu test yönteminin yapılmasındaki amaç ise; direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen yüksek dayanımlı mukavemet çeliklerinin üretim aşamasında korozyon dayanımına katkı sağlaması için yapılan çinko (Zn) kaplamasından dolayıdır. Bilindiği üzere literatür araştırmaları sonucunda direnç nokta kaynak işlemi sonrasında çinko kaplamanın ergimesiyle birlikte özellikle östenit fazı içeren çeliklerde sıvı metal gevrekliği (SMG) ya da kırılabilirlik denilen kaynak hatası karşımıza çıkmaktadır [153–155]. Ergiyen metalin hassas olan metalik malzemelerle temas etmesiyle birlikte sıvı metal gevrekliği meydana gelir. Bu kırılabilirliğin bilimsel olarak oluşumu ise; kaynak ısısının etkisiyle birlikte ergiyen sıvı malzeme içerisine emilir ve tane sınırları boyunca bağlanma kuvvetini azaltarak çatlak oluşumuna neden olması şeklinde açıklanabilir. Bu tür çatlaklar kaynaklı bağlantıların güvenilirliğini sorgularken mekanik olarak araç performansını etkiler ve araçların kullanımı esnasında titreşimden

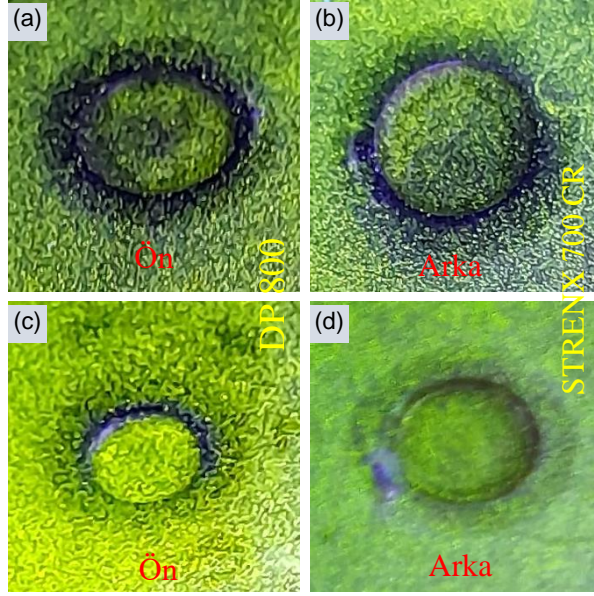
kaynaklanabilecek çatlak büyümelerine neden olur [108,156]. Bölüm 2’de tez çalışması kapsamında kullanılan malzemelerin özelliklerini belirtirken STRENX ve DP çeliklerin çoğunlukla ferrit ve martenzit fazı içerdiklerini fakat bazı durumlarda kalıntı östenit fazına rastlanılabileceği belirtilmiştir.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı, STRENX ve DP kaynaklı bağlantıların her iki tarafından manyetik parçacık testi yapılmış ve elde edilen görseller Şekil 6.2 ve 6.3’ te verilmiştir. Şekil 6.2’te a ve b, AA-normal kaynaklı bağlantıları ifade ederken, c ve d ise AA-BÖİ işlemlileri ifade etmektedir. Şekil 6.3’te benzer şekilde a ve b, OFDA-normal kaynaklı bağlantıları ifade ederken, c ve d OFDA-BÖİ işlemlileri ifade etmektedir.

Şekil 6.2 ve 6.3 incelendiğinde kalıntı östenit nedeniyle, çinko kaplama ile çelik arasında intermetaliklerin oluşmasıyla birlikte meydana gelebilecek sıvı metal gevrekliğinin görülmediği belirlenmiştir. Sonuç olarak birleştirilen çeliklerin östenit fazı içermemesinden dolayı ya da çok küçük oranlarda bulunabilecek kalıntı östenitin ergiyen sıvı çinko ile difüzyon olamadığı, çeliklerin kimyasal ve mekanik özellikleri ve kaynak işlemleri için seçilen parametrelerin uygunluğu hatasız bir kaynak olmasını desteklediği düşünülmektedir [154,155].



Şekil 6.2. AA ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların MP test görüntüleri.



Şekil 6.3. OFDA ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların MP test görüntüleri.

Başer [157], gerçekleştirdiği çalışmada galvaniz kaplı beynitik ferrit destekli TRIP (TBF) çeliği orta frekans doğru akım teknolojisi (OFDA) kullanarak DNK ile birleştirmiş ve gerçekleştirilen birleştirmelere sıvı metal gevrekliğinin tespiti için manyetik parçaçık (MP) testi uygulamıştır. Manyetik parçaçık testi sonucunda kaynak çekirdeği ve ITAB'da sıvı metal gevrekliği tespit edilmediğini bildirmiştir.

### 6.3. MAKRO-MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

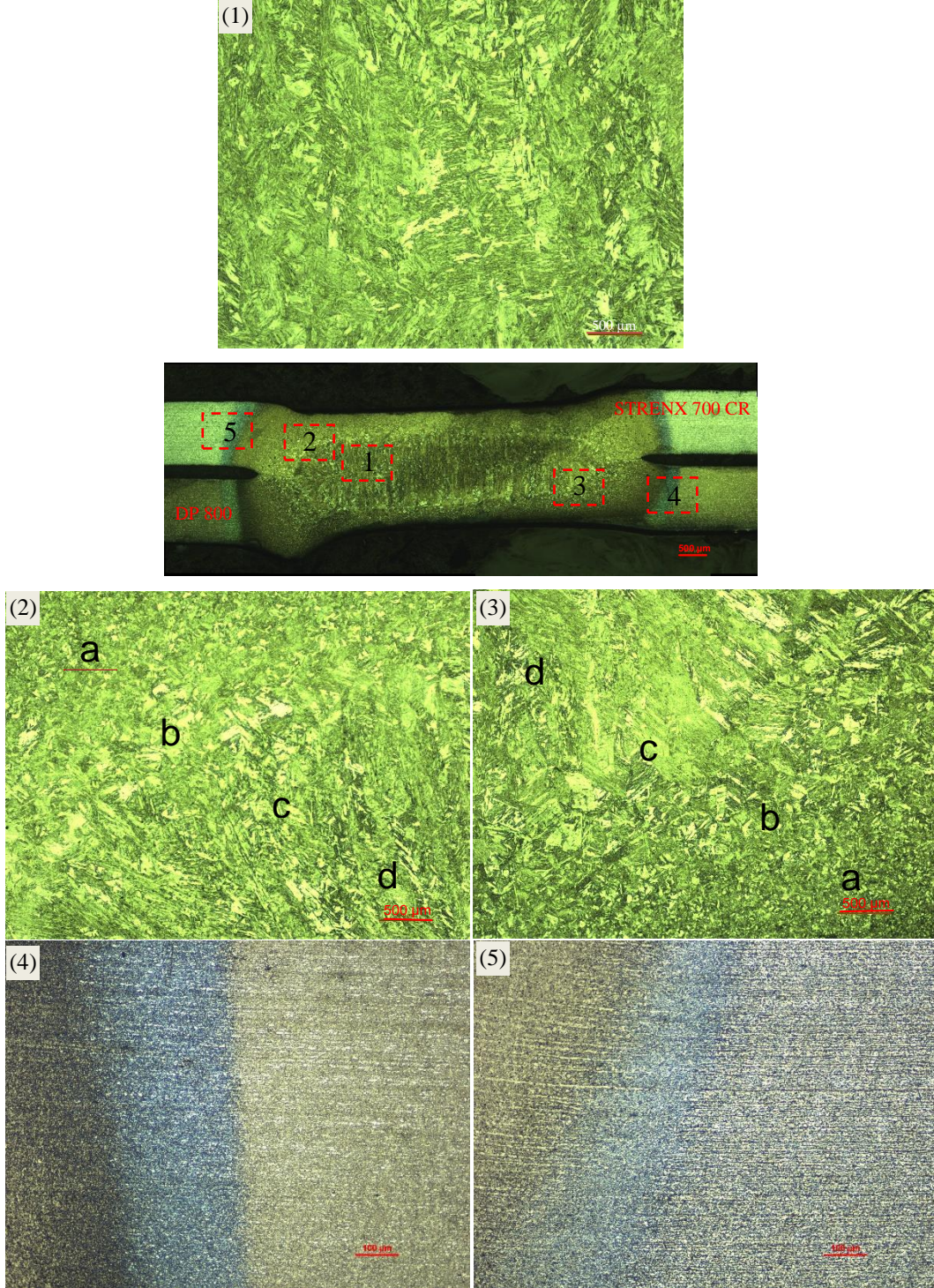
Tüm kaynak yöntemlerinde, gerçekleştirilen kaynak işlemi sonrasında mikroyapıda meydana gelen değişimlerin ya da birleştirme etkilerinin anlaşılabilmesi için kaynak bölgesinde yapılan mikroyapı çalışmaları oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında farklı akım dalga formları (AA ve OFDA) ve BÖİ işleminin kaynak çekirdeği ve özellikle etrafındaki ITAB'a etkilerini belirlemek için kaynaklı numunelere makro ve mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

#### 6.3.1. AA Normal Makro/Mikroyapı İncelemeleri

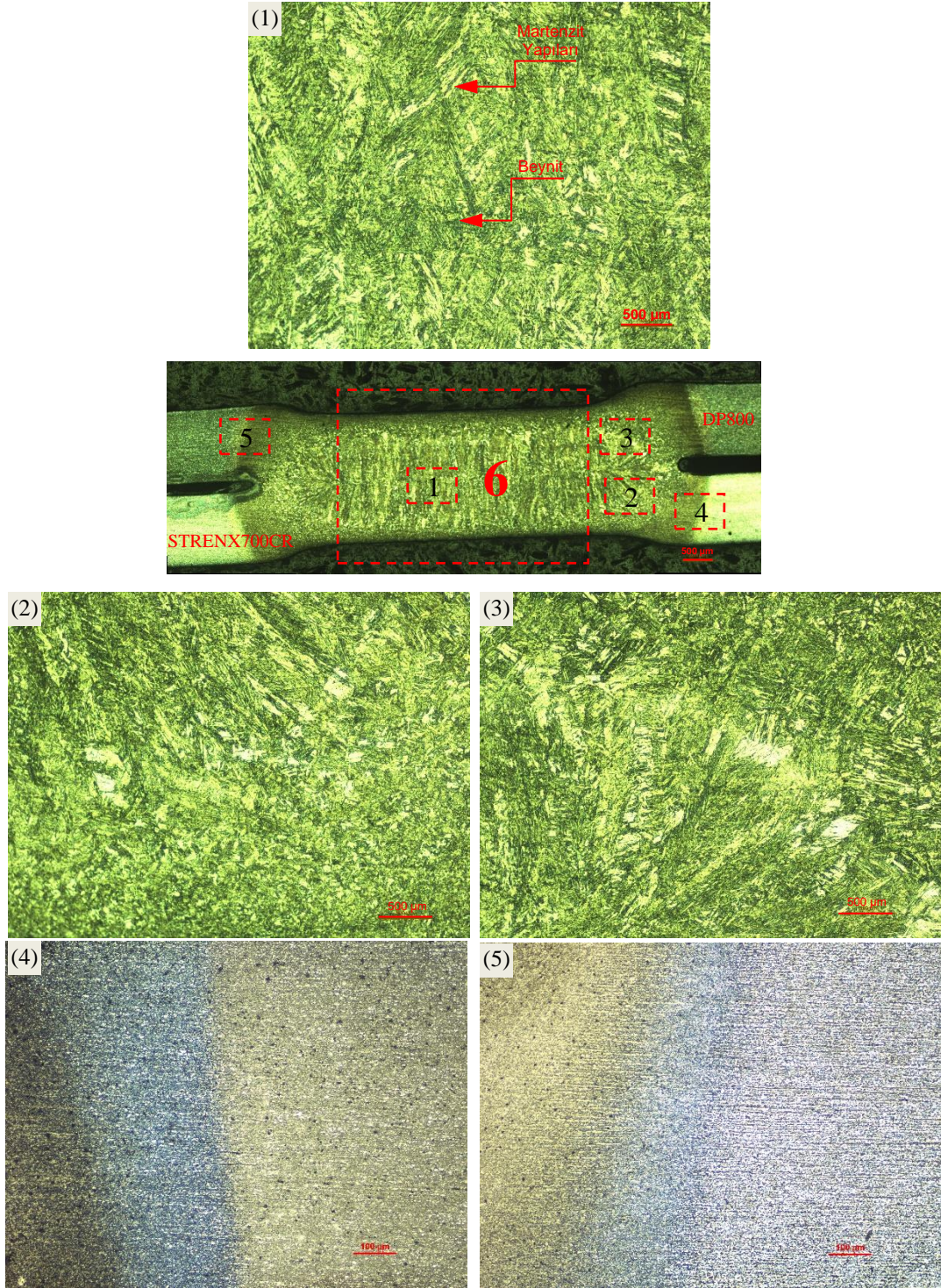
Şekil 6.4'te alternatif akım teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen normal (AA-normal) kaynaklı birleştirmeye, Şekil 6.5'te ise alternatif akım teknolojisinin yanında



bölgesel ön ısıtma (AA-BÖİ) işlemi uygulanan kaynaklı birleştirmeye ait makro ve mikroyapı fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 6.4. AA (normal) ile üretilen numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri.



Şekil 6.5. AA (BÖI) ile üretilen numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri.

Şekil 6.4'te BÖI (bölgesel ön ısıtma) uygulanmamış, Şekil 6.5'te ise BÖI uygulanmış alternatif akım direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin, kesitlerinden alınmış optik mikroskop makro-mikroyapı görüntülerine bakıldığında; 1-kaynak metali, 2 ve 3- çekirdek-ITAB geçiş bölgesini, 4 ve 5 ise yüksek büyütmede ITAB'dan

ana malzemeye geçişi göstermektedir. Şekil 6.5'te 3 numaralı bölgede kaynak öncesi ITAB ve çevresine çember şeklinde bir elektrod yardımı ile uygulanan BÖİ, ısı girdisi artışına, bölgenin daha geç soğumasına ve buradaki mikroyapının bir miktar kabalaşmasına sebebiyet vermiştir.

Şekil 6.4'te 2 ve 3 numaralı çekirdek-ITAB ve Şekil 6.5'te 2 ve 3 numaralı çekirdek-ITAB görsellerinin 4 bölgeye ayrıldığı fark edilmektedir. Görsellerdeki "a" bölgesi ince taneli ITAB'I gösterirken, "b" kaba taneli ITAB'ı, "c" ergime sınırı ve çevresini, "d" ise çekirdek metalini göstermektedir.

Çekirdek çevresinde AA BÖİ uygulanmamış normal numunede, AA BÖİ uygulanmış numuneye göre çekirdek sınırında daha belirgin bir hale (halo clouds) meydana geldiği görülmektedir. Ergime sınırını belirgin bir şekilde ortaya çıkartan ısıl işlem uygulanmamış numunenin ergime sınırında oluşan beyaz hale şeklindeki bölge, literatürdeki adıyla "Halo ring" AA BÖİ uygulanmış mikroyapı fotoğraflarında görülmektedir [158]. Ergime bölgesinden daha yumuşak olan ve ergime sınırında oluşan yaklaşık 150-200 mikron genişliğindeki bu dar bölgenin delta fazından dışarı göç eden karbonun, parçanın hızlı soğuması sonucu geri yayılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Burada, meydana gelen hızlı soğuma yeterli difüzyon zamanı oluşmamasından dolayı kısmi bir ergime bölgesi oluşumuna neden olmuştur. Ancak BÖİ uygulanmış numunenin ergime sınırında daha yavaş soğuma olması nedeniyle delta fazından dışarı göç eden karbon parçanın hızlı soğuması sebebi ile geri yayılmak için daha fazla zaman bulabilmiştir.

Ramachandran ve arkadaşları [158], çalışmalarında Q&P 980 yüksek mukavemetli çeliği direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve halo ring'in kontrol edilmesiyle mekanik özelliklerin iyileştirilebilirliğini araştırmışlardır. Yapmış oldukları makro-mikroyapı incelemeleri sonucunda halo ring'in ergime sınırı ile ITAB aralığında meydana geldiğini bildirmişlerdir. Ayrıca halo ring bölgesi boyunca gevrek şekilde kırılmaların meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

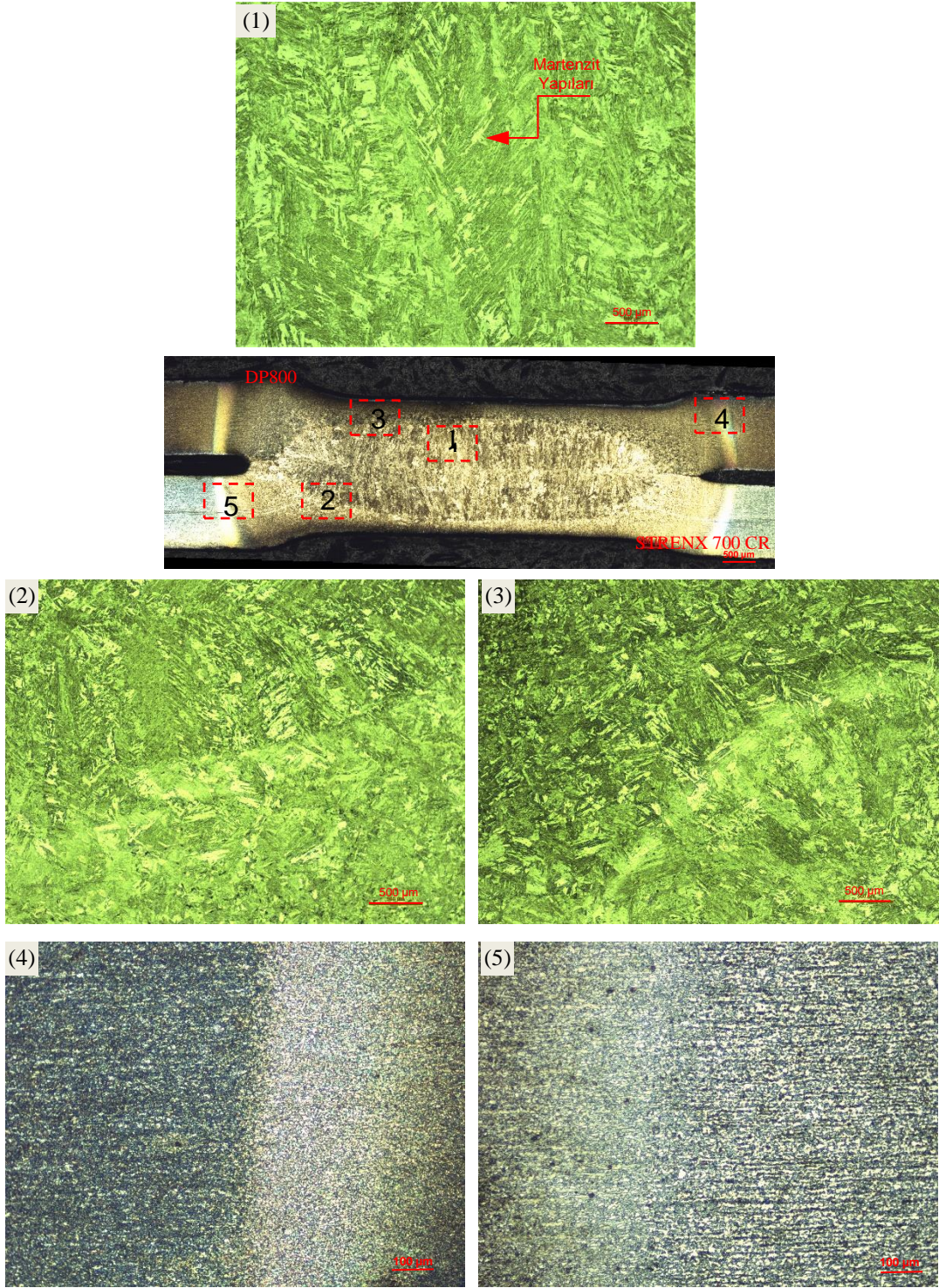
Şekil 6.4'te 1 numaralı çekirdek kaynak metali ve Şekil 6.5'te 1 numaralı çekirdek kaynak metali görselleri incelendiğinde ergime sınırından kaynak merkezine doğru

epitaksiyel katılma ile seyreden büyüme sütunlu yapıya sahip iğne benzeri martenzitik yapıların oluşmasına neden olmuştur. 18 C° tutulan bakır elektrotlar dövme zamanında kaynak çekirdeğinde zaten olması beklenen martenzitik bir mikroyapının oluşmasına katkı sağlamıştır [104].

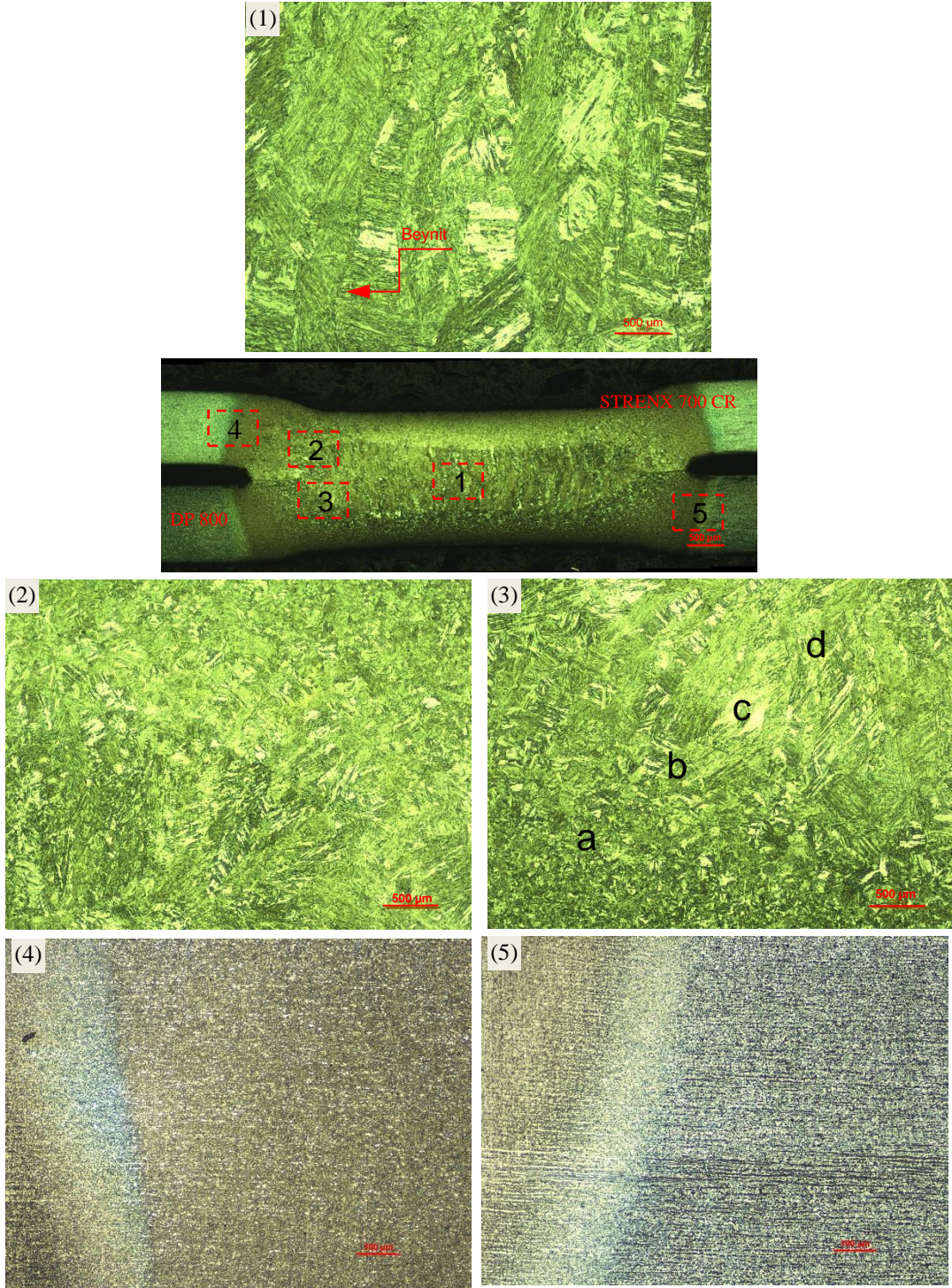
Çalışmada kullanılan her iki malzemenin farklı kimyasal kompozisyonlara sahip olsa da ikisi de çift fazlı çelik olduğundan (aynı sınıfın farklı mukavemetteki serileri) öz dirençlerinin birbirine yakın olduğu söylenebilir. Bu nedenle kesit görüntüleri simetrik olmasa da simetriğe yakındır. Ek olarak her iki malzemeninde yine aynı çelik grubundan olmasının ve kimyasal özelliklerinin benzer olması nedeni ile kaynak metali karışımına katılımının benzer olduğunu söylemek mümkündür.

### **6.3.2. OFDA Makro/Mikroyapı İncelemeleri**

Şekil 6.6'da orta frekans doğru akım (OFDA) teknolojisi uygulanarak gerçekleştirilen normal kaynaklı bağlantılara, Şekil 6.7'de ise OFDA-BÖİ işlemi uygulanarak elde edilen kaynaklı bağlantılara ait makro-mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.6. OFDA (normal) numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri.



Şekil 6.7. OFDA (BÖI) numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri.

Şekil 6.6'da orta frekans doğru akım teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen ve bölgesel ön ısıtma işlemi uygulanmamış (normal) direnç nokta kaynaklı bağlantıların alınan numune kesitlerinde yapılan incelemelerde; 1-kaynak metalini, 2 ve 3-çekirdek-ITAB geçiş bölgesini son olarak 4 ve 5 ise ITAB'dan ana malzemeye geçiş bölgesini

göstermektedir. Şekil 6.7’de görülen ve BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı numunelere ait makro ve mikroyapılar incelendiğinde Şekil 6.6’da olduğu gibi benzer geçiş bölgelerinin olduğu ayrıca Şekil 6.7-3 numaralı görselde verildiği üzere çekirdek-ITAB’ın 4 farklı bölgeye ayrıldığı görülmüştür. Şekil 6.7 üzerinde bulunan a-ince taneli ITAB, b-kaba taneli ITAB, c-çekirdek sınırı ergime bölgesini gösterirken d ise çekirdek metali bölgesini temsil etmektedir.

BÖİ uygulanmış numunelerin ITAB’tan ana metale geçiş bölgelerinde perlit-ferrit fazlarının arttığı Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de görülmektedir. Daha net bir şekilde anlaşılır olması açısından OFDA teknolojisi ile BÖİ işlemi uygulanmış kaynaklı bağlantıdan elde edilen ITAB’dan ana metale geçiş bölgesi mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, bu bölgelerde nispeten daha açık renkte perlit-ferrit yapıları görülürken bu bölgenin çevresinde de temperlenmiş martenzit yapılarının oluşumu dikkat çekmektedir. Nikosohbat ve arkadaşları [159], çift fazlı çelik gurubunda yer alan DP980 çeliğini direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve birleştirme sonucunda elde edilen kaynaklı numunelerden kesitler alarak makro ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda ITAB’ın ferrit ve martenzit fazından oluştuğunu, ana metalden kaynak bölgesine doğru gidildiğinde ITAB’da yumuşamanın olduğu ve bu durumun da martenzit fazının ısı etkisiyle birlikte temperlendiğini ifade etmişlerdir.

Kaynak bölgesi ergime sınır görünüşleri AA birleştirmelerinde olduğu gibi STRENX 700 CR ve DP 800 yüksek mukavemetli çeliklerin kimyasal kompozisyonları farklı olsa da öz dirençlerinin birbirlerine yakın olmasından dolayı kesit görüntüleri oldukça benzerlik göstermektedir. STRENX 700 CR malzemenin ITAB ve kaynak çekirdeğine olan etkisinin DP800’e göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Daha sonraki yapılan sertlik çalışmalarında elde edilen sonuçların STRENX 700 CR çeliğinin kaynak üzerindeki etkisinin daha fazla olduğunu destekler niteliktedir.

Şekil 6.7’de OFDA kaynak teknolojisi ile üretilen kaynaklı bağlantıların mikroyapı görüntülerine bakıldığında ITAB’da görülen kaba taneli ve ince taneli yapıların, direnç nokta kaynak işlemi sırasında ulaşılan tepe sıcaklığının  $A_{c3}$  sıcaklığı üzerinde olmasından dolayı yapının östenit fazına dönüştüğü daha sonra ise soğumaya bağlı olarak kaba taneli martenzit fazlarının meydana geldiği ve bununda bölgesel ön ısıtma

işlemi (BÖİ) ile birlikte kaynaklı bağlantının geç soğumasına bağlı olarak kaba tanelerin oluşumuna etki ettiği görülmektedir.

### **6.3.3. AA ve OFDA Makro-Mikroyapı İncelemelerinin Değerlendirilmesi**

AA ve OFDA teknolojilerinin kullanılmasıyla birlikte normal ya da BÖİ işlemi uygulanan tüm kaynaklı bağlantılar incelendiğinde (Şekil 6.4-6.7) özellikle ITAB’da önemli değişikliklerin olduğu görülmektedir. DP 800 çelik malzemenin olduğu taraftan ziyade STREX 700 CR çelik tarafında termal dönüşümlerin olduğu ve kaynaklı bağlantıyı önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. DP800’e göre STREX 700 CR çeliğinin martenzit hacim oranının fazla olmasına bağlı olarak direnç nokta kaynak sonrası kaynak bölgesini daha fazla etkilediği ve bu nedenle daha sonraki bölüm çalışmalarında (Sertlik analizleri) belirtildiği üzere esas (ana) metalden daha sert bir kaynak bölgesi oluşumunu sağlamıştır. Şekil 6.4-6.7’de gösterilen mikroyapı görüntülerine bakıldığında 1 numara ile belirtilen tüm görüntülerde bu durum açık bir şekilde görülmektedir.

Kaynak bölgesinde meydana gelen sertlik artışının mikroyapı inceleme sonucunda hızlı soğumaya bağlı olarak martenzit fazından kaynaklandığı görülmüştür. Yani kaynak metalinin martenzitik bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Bunun nedeni olarak, oluşan kaynak havuzunun soğuması sırasında karbon difüzyonunun ihtiyacı olan zamanın sağlanmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

AA ve OFDA teknolojisi ile üretilen kaynaklı bağlantıların ITAB mikroyapıları, sertlik analizi sonucunda daha net olarak anlaşılan temperlenmiş kritik altı ITAB’ın ince taneli olan ara kritik ITAB ile ana malzeme arasında olduğu ve alt kritik sıcaklık değerlerine maruz kaldığında bu bölgede temperlenmiş martenzit yapısının ince taneli olduğu görülmektedir.

Literatür çalışmalarına bakıldığında çift fazlı (DP) çeliklerde, ITAB’ın dört farklı gruba ayrıldığı görülmektedir. Bunlar; çok kritik olmayan bölge, kritik bölge, ince taneli bölge ve son olarak kaba taneli bölgedir. Kritik olmayan bölgenin en yüksek sıcaklığı  $Ac_1$  altında olduğundan dolayı martenzit fazının temperlenmesi ile



oluşabilmektedir. Kritik ITAB için ise en yüksek sıcaklık  $Ac_1$ - $Ac_3$  aralığındadır. Yüksek sıcaklığa bağlı olarak östenit fazının oluşmasına sebep olurken yüksek soğuma hızlarından kaynaklı östenit fazı tekrar martenzit fazına dönüşür. İnce taneli ITAB'da ise en yüksek sıcaklık  $Ac_3$  değerini geçer fakat kısa süreli tutulduğundan tanelerin daha fazla büyümesi engellenir. Kaba taneli ITAB'da ise en yüksek sıcaklık  $Ac_3$  değerinin üzerindedir ve östenit tanelerinin büyümesi için yeterli zamanın olduğu bölgedir [38].

Mikroyapı görüntülerinde verilen özellikle STREX 700 CR ince taneli ITAB (ara kritik ITAB)  $Ac_3$  sıcaklığını geçse de soğumaya bağlı olarak martenzit yapıda olduğu görülmektedir. Fakat burada bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemi ile yavaş soğumaya bağlı olarak martenzit taneleri normal kaynaklı bağlantılara göre biraz daha iri olduğu anlaşılmaktadır.

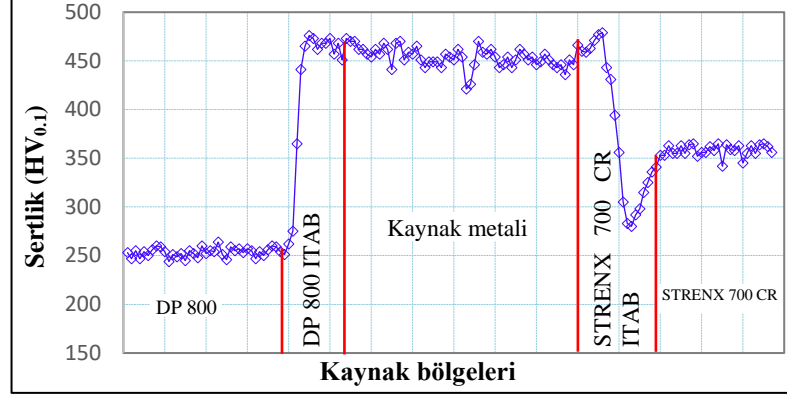
#### **6.4. MİKROSERTLİK İNCELEMELERİ**

Mikrosertlik, malzemelerin içyapısında bulunan fazların, kaynak işleminden sonra meydana gelen faz dönüşümlerinin ve oluşabilecek kalıntı gerilmelerin etkisiyle kaynaklı bağlantının mekanik değişimlerini incelemek için kullanılan bir tahribatlı muayene yöntemidir. Direnç nokta kaynak yöntemi (DNK) ile birleştirilen test parçaları üzerinde çizgi boyunca sertlik ölçümleri alınarak kaynak bölgesinde meydana gelen sertlik değişimlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda kaynaklı birleştirmelerin sertlik profillerini belirlemek amacıyla DP 800 ve STREX 700 CR malzemeler ve kaynak çekirdeği bölgelerinden ölçümler yapılmıştır. Yapılan mikrosertlik ölçümleri ve bu ölçümlerin neden olduğu değişimler aşağıda ayrı başlıklar altında verilmiş ve elde edilen sonuçlar literatür bilgileri ile değerlendirilmiştir.

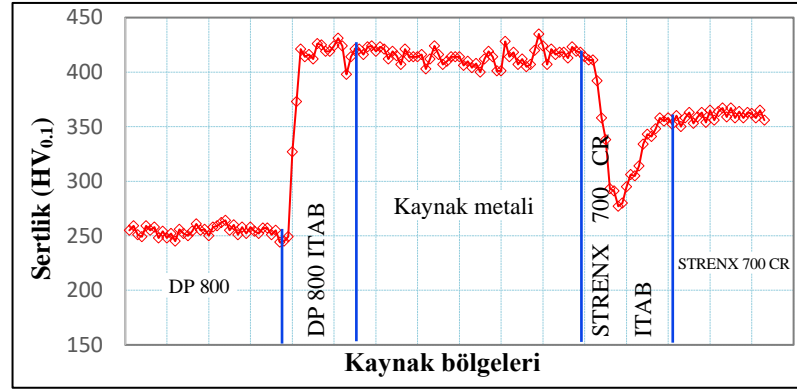
##### **6.4.1. AA ile Birleştirilen Numunelerin Sertlik Analizleri**

Alternatif akım türünde birleştirilen (BÖİ ve normal) direnç nokta kaynaklı bağlantıların, sertlik dayanımları üzerinde meydana gelen değişimleri incelemek üzere oluşturulan grafikler Şekil 6.8, 6.9 ve 6.11'de gösterilmiştir. Bölgesel ön ısıtma uygulanmış ve uygulanmamış olan bu grafikler, kaynaklı bağlantıların kesit

doğrultuları boyunca 100 µm aralıklarla ve ortalama 157 adet sertlik ölçüm noktalarından elde edilmiştir.



Şekil 6.8. AA-normal kaynaklı bağlantıların sertlik değer grafiği.



Şekil 6.9. AA-BÖİ uygulanan kaynaklı bağlantıların sertlik değer grafiği.

Sertlik grafiklerine genel olarak bakıldığında STRENX ve DP çeliklerin kaynak işleminden sonra kaynak bölgesi sertlik değerlerinde gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Bu sertlik artışları incelendiğinde AA normal şartlarda gerçekleşen kaynaklı birleştirmelerde DP800'de yaklaşık olarak 1,9, STRENX çeliğinde ise 1,4 kat bir artış gerçekleşirken, bölgesel ön ısıtma (BÖİ) uygulanan AA akım türünde gerçekleştirilen birleştirmelerde DP800'de 1,8, STRENX çeliğinde ise 1,2 kat yaklaşık değerlerde artışların olduğu gözlemlenmektedir. Sertlik artışıyla birlikte kaynaklı bağlantıların dayanımları da arttığı bilindiğinden elde edilen sonuçların önemli olduğu görülmektedir. Bu bağlamda AA ile normal ve bölgesel ön ısıtma uygulanarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların mikrosertlik dayanımlarının iyi analiz

edilebilmesi için DP ve STRENX çeliklerinin mikroyapı ve kaynak sonrasında oluşabilecek metalurjik yapıların iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Şekil 6.8-6.9'a bakıldığında ana malzemelerin sertlik değerleri STRENX çeliğinde  $350\pm 5$  HV ölçülürken, DP 800 çeliğinde ana metal sertlik değeri  $250\pm 5$  HV olarak ölçülmüştür. Grafiklere bakıldığında literatür araştırmalarında benzer çalışmalarda da görülen ITAB yumuşamasının hem normal hemde ısıtma uygulanan kaynaklarda meydana geldiği görülmektedir. DP 800 tarafında çok küçük bir alanda ITAB yumuşaması görülse de özellikle STRENX 700 CR ITAB'ında bariz bir şekilde görülmektedir. Şekil 6.8'de STRENX ana metalinden 364 HV sertlik değerinden ölçüm yapılmaya devam ederken ITAB'a gelindiğinde sertlik değerinin 280 HV'ye kadar düştüğü daha sonra kaynak metaline doğru gidildiğinde sertlik değerinin artarak 477 HV'ye çıktığı görülmektedir. Bölgesel ön ısıtma uygulanan kaynaklı bağlantıların ITAB'ında benzer özellikler görülmekle birlikte STRENX 700 CR ITAB tarafında, kaynak metaline yaklaştıkça artan sertlik değeri normal kaynaklı (477 HV) bağlantılara kıyasla yaklaşık %11 azalarak ve 423 HV olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonucun tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminin önemli amaçlarından biri olan ve literatürde ITAB yumuşaması diye adlandırılan (soft zone) bölgesinin sertlik değerini çok fazla düşürmeden sadece interkritik bölgenin yani  $Ac_1$  ve  $Ac_3$  aralığındaki en yüksek sertliği düşürerek yapıda meydana gelebilecek gevrek kırılmaların önüne geçmek olduğundan elde edilen bu sonuçlar gerçekleştirilen çalışmanın doğruluğunu destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Ayrıca bölgesel ön ısıtma (BÖİ) yapılan kaynaklı bağlantıların ITAB'ı genişlemektedir ve bu durumun kaynak öncesi yapılan bölgesel ön ısıtma işleminin nedeniyle kaynak bölgesinin geç soğumasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Grafikler incelendiğinde özellikle STRENX çeliğinin ITAB tarafında görülen sertlik değerindeki azalmayı biraz irdelenecek olur isek; literatürde "ITAB Yumuşaması" diye adlandırılan ve çift fazlı çeliklerde sıklıkla görülen bir termal olay olarak karşımıza çıkmaktadır. Elde edilen sertlik sonuçları, STRENX çeliğinin ITAB'ının bölüm 3'te yapılan benzer çalışmalarda olduğu gibi 3'e ayrıldığı ve bu bölgelerin; interkritik (İK), kaba taneli (KT) ve ince taneli (İT) ITAB olduğu tespit edilmiştir [89,94,99].  $Ac_1$  ve  $Ac_3$  aralığındaki interkritik ITAB'ın kaynak sırasında oluşan ısının

etkisiyle birlikte meydana gelen östenit fazının soğuma sırasında tekrar ferrit ve martenzit yapısına geri döndüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca literatür taramalarında Ac<sub>1</sub> altı diye adlandırılan ve temperlenmiş martenzit fazı bulunduran bölgeye de kritik altı ITAB denilmekte ve maksimum yumuşama da bu bölgede oluşmaktadır. Tüm bu bilgiler ışığında grafiklerden elde edilen sertlik değerleri incelendiğinde, 477 HV sertlik değerinin ince taneli martenzit fazı içeren interkritik ITAB bulunduğu, 280 HV değerinin ise maksimum yumuşamanın olduğu kritik altı ITAB'a ait olduğu yapılan sertlik ölçümleri ve mikroyapı çalışmalarından tespit edilmiştir. Bölgesel ön ısıtma işlemi uygulanmış olan numunelerin sertlik değerlerine bakıldığında kritik altı ITAB'da meydana gelen maksimum yumuşaklığın normal kaynak işlemi yapılan numuneler ile benzer özellik gösterdiği ve Şekil 6.9'da görüldüğü üzere kritik altı ITAB'da bu sertliğin 277 HV olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Burada bölgesel ön ısıtma işleminin uygulanmasıyla birlikte kritik altı ITAB'da diğer bir ifade ile soft zone'da elde edilen sertlik değerlerinde neredeyse bir değişikliğin olmadığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda bölgesel ön ısıtma işleminin ITAB'a uygulanmasıyla birlikte soft zone'un sertlik değerlerinde çok fazla bir değişiklik olmaması ve Şekil 6.9'da görülen BÖİ işlemiyle birlikte ITAB'ın genişlemesi sonucunda, kaynaklı bağlantılara uygulanan herhangi bir mekanik kuvvet etkisinde, yükün daha geniş bir alana yayılmasına sebep olacağı ve kaynaklı bağlantılar üzerinde oluşabilecek deformasyon başlangıcı için kesin bir bölgenin oluşamayacağı düşünülmektedir.

Ayrıca interkritik ITAB'da bulunan maksimum sertliğin AA-BÖİ işlemlili kaynaklı bağlantıda 423 HV'ye düştüğü bunun nedeninin ise yapılan bölgesel ön ısıtma (BÖİ) ile yapı içerisinde bulunan sert martenzit fazının östenit bölgesinden yavaş soğuması ile birlikte kalıntı östenit fazının oluşmasından (bölüm 2'de belirtilmişti) ve martenzit fazının temperlenmesinden kaynaklandığı literatür bilgilerinden ve mikroyapı çalışmalarından anlaşılmaktadır. Bu bölgeler (interkritik-kritik altı) birbirleri ile kıyaslandığında kritik altı bölge, interkritik bölgeye göre daha önem arz etmektedir. Bunun nedeni ise temperlenmiş bölgenin kaynaklı birleştirmeler üzerinde mekanik özelliklere etkisi olarak söyleyebiliriz [160].

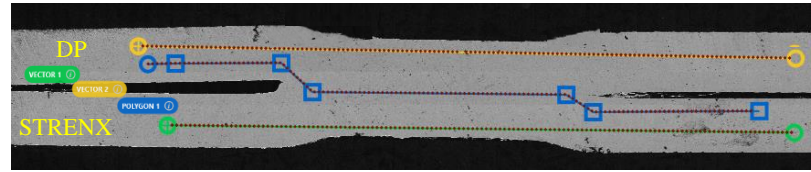
Hernandez vd. [161], DP çelikleri direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve birleştirme sonucunda ITAB'da meydana gelen yumuşamayı ayrıntılı olarak

incelemişlerdir. ITAB'da meydana gelen yumuşamayı tanımlarken  $Ac_1$  kritik altı denilen bölgede maksimum yumuşamanın olduğu ve 298 HV olarak ölçüldüğünü bildirmişler ve kaynak sırasında yapı içerisinde bulunan martenzit ve ferrit fazlarının bir kısmı  $Ac_1$  tepe sıcaklığında östenit fazına dönüşmekte, soğuma sırasında ise tekrardan martenzit fazına dönüştüğünü ifade etmişlerdir. Son olarak östenit tane sınırlarında bulunan martenzit fazının ayrışması ya da diğer bir ifade ile temperlenmesinden dolayı ITAB'da böyle bir yumuşamanın gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Pouranvari vd. [160], yapmış oldukları benzer çalışmalarda yüksek mukavemetli MS1200 çeliğini nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve yapmış oldukları sertlik incelemelerinde ITAB'ı 3'e ayırmışlardır.  $Ac_1$  ve  $Ac_3$  aralığındaki interkritik ITAB'ın kısmi östenitleşme bölgesi olduğu ve en yüksek sertleşebilirliğin burada görüldüğünü ifade etmişlerdir.  $Ac_1$  altında olan bölgeyi alt kritik ITAB olarak ifade ettikleri çalışmada bu bölgenin ilk martenzitin temperlendiği kısım olarak belirtmişler ve bu sonuçlar yapmış olduğumuz çalışmalar ile örtüşmektedir.

Şekil 6.8 ve 6.9'da DP 800 kaynak bölgesine bakıldığında STREX 700 CR ITAB'ında görülen martenzit yumuşamasına normal ve bölgesel ön ısıtmalı birleştirmelerde rastlanılmamıştır. ITAB'da yapılan ölçümlerde (Şekil 6.8) en yüksek sertliğin normal kaynaklı bağlantılarda 476 HV, bölgesel ön ısıtma (BÖİ) yapılan uygulamalarda ise 431 HV olarak ölçülmüştür. Grafiklerde kaynak metallerinin sertlik değerlerine bakıldığında normal kaynaklı bağlantıda 421-470 HV, bölgesel ön ısıtma ile yapılan birleştirmelerde 400-435 HV sertlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür. AA normal ve AA bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemlerinden elde edilen kaynak metali sertliklerine göre, kaynak öncesinde uygulanan BÖİ işleminin sadece kaynak bölgesindeki ITAB'da etkili olmadığı aynı zamanda kaynak metalinin de sertliğinin azalmasına neden olduğu net bir şekilde görülmektedir. Elde edilen sertlik sonuçları kaynak metali sertliğinin azalmasıyla birlikte normal kaynaklı (Şekil 6.8) bağlantılara göre kaynak metalindeki gevrek yapının azalmasına sebep olurken, aynı zamanda ana metale daha yakın sertlik değerleri elde edilerek daha homojen bir yapının oluşmasına ve bu sayede daha sünek bir yapının meydana gelmesine neden olduğu anlaşılmaktadır.

Her iki malzeme için (STRENX 700 CR-DP800) ITAB ve kaynak metali esas metalden daha sert olduğu grafikler üzerinden açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Burada ITAB'ın daha sert olmasının sebebi yukarıda da bahsedildiği üzere kaynaktan sonra martenzit fazının etkisiyle gerçekleşen hızlı soğumadan dolayıdır. Her iki grafikte yüksek sertlik değerlerine sahip olan kritik ITAB'da normal birleştirmelerde 477 HV olan sertliğin kaynak öncesinde gerçekleştirilen bölgesel ön ısıtmadan dolayı bu bölgenin sertliği 423 HV'ye düşmüştür. Bu sayede bölgesel ısıtma nedeniyle yaklaşık olarak %11,4 oranında sertlik değerlerinde bir azalma sağlanmıştır.

AA ve OFDA teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen tüm kaynaklı birleştirmelere birer sertlik ölçümü yapılırken sadece AA-normal kaynaklı bağlantıya ait sertlik ölçümünde Şekil 10'da görüldüğü üzere ayrıca iki ölçüm daha yapıldığı bir önceki bölümde (bölüm 5) ifade edilmişti.

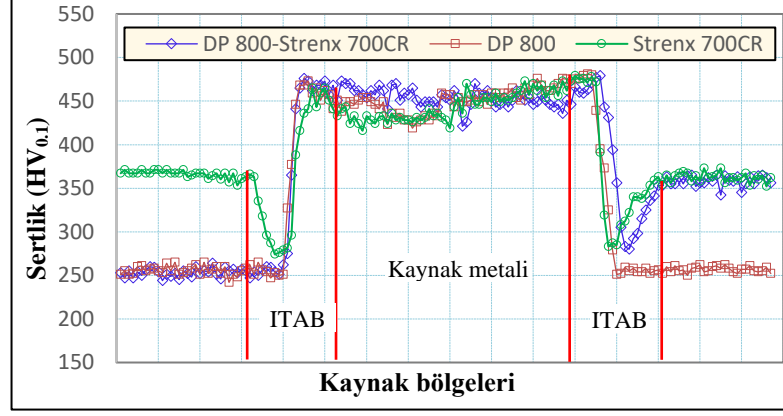


Şekil 6.10. AA-normal birleştirmelere ait sertlik ölçüm noktaları.

Sertlik çalışmalarına farklı bir bakış açısıyla yaklaşabilmek için AA teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantının normal şartlar altındaki test numunelerinden elde edilen ve Şekil 6.10'da gösterilen vektör ve poligon çizgilerinden ayrı ayrı her birinden 157 noktadan alınan ölçüm sonuçlarına ait sertlik grafiği oluşturulmuş ve Şekil 6.11'de verilmiştir.

Şekil 6.11'e bakıldığında DP 800 ve STRENX 700 CR kaynaklı bağlantıların ana metalden başlayarak önemli derecede sertlik değerlerinde farklılıkların olduğu görülmektedir. DP 800 ana metal sertliği 252 HV'den başlarken bu değer STRENX 700 CR'de 367 HV olduğu grafik yardımıyla belirlenmiştir. Normal kaynaklı bağlantıların ITAB'ında ise çift fazlı çeliklerde görülen ve yukarıda verilen grafiklerde de bahsedilen ITAB yumuşaması DP800'de yok denecek kadar az iken STRENX 700 CR'de net bir şekilde görülmektedir ve STRENX ana metal sertlik değeri 364 HV'den

yaklaşık %23 azalarak kritik altı ITAB'da 280 HV'ye düşmektedir. Bu sayede sünek bir yapı sağlanırken aynı zamanda DP 800 çelik sertliğine yaklaşılarak homojen bir sertlik dağılımının elde edilmesine katkı sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.11. AA-normal 3'lü kaynaklı bağlantıların sertlik grafikleri.

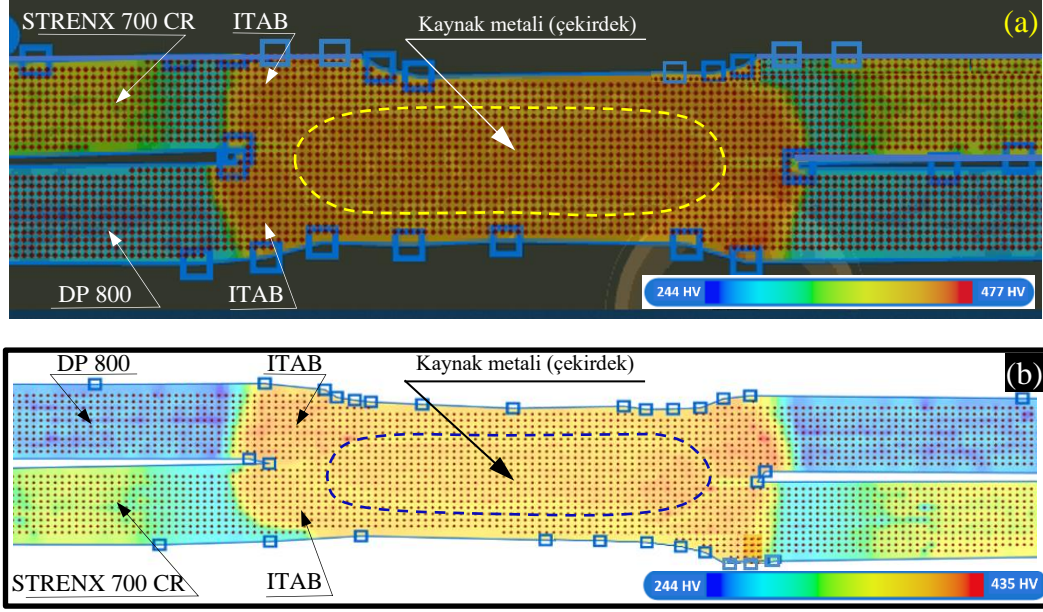
Grafik üzerinde STRENX 700 CR tarafındaki vektör 1 doğrultusuna bakıldığında sertliğin yukarıda da bahsedildiği üzere ITAB'da martenzit fazının temperlenmesinden kaynaklı azaldığı ve kaynak metaline doğru giderek arttığı görülmektedir. Diğer bir ifade ile ana metalde 367 HV olan STRENX 700 CR sertliğinin kaynak metalinde yaklaşık % 29 artarak 473 HV olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde vektör 2 doğrultusunda DP 800 ana malzemedeki sertliğin ana metalden kaynak metaline doğru arttığı görülürken STRENX 700 CR ölçümlerinde görülen ITAB'da sertlik azalmasının bu bölgede görülmediği Şekil 6.11'den anlaşılmaktadır. Şekil 10'da görülen poligon şeklindeki sertlik ölçüm noktaları Şekil 6.11 ile desteklendiğinde, DP800-STRENX 700 CR poligon çizgisinin DP 800 tarafında başlanılan sertlik ölçümlerinin vektör 2 doğrultusunda gerçekleştirilen ölçüm değerlerine yakın olduğu daha sonra kaynak bölgesine doğru gidildikçe sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Kaynak metalindeki sertlik değerlerine bakıldığında STRENX 700 CR test numunelerinden elde edilen sertlik değerlerine daha yakın olduğu bu durumda mikroyapı analiz sonuçlarında görüldüğü ve anlatıldığı üzere kaynak bölgesine STRENX 700 CR malzemesinin gerek kimyasal gerekse fiziksel özelliklerinden dolayı daha fazla etki ettiği ve bu sayede sertlik değerlerinde benzerlik gösterdiği düşünülmektedir. Poligon çizgisinin devamında

STREX 700 CR tarafında 473HV olan sertliği %40 azalarak 280 HV olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir.

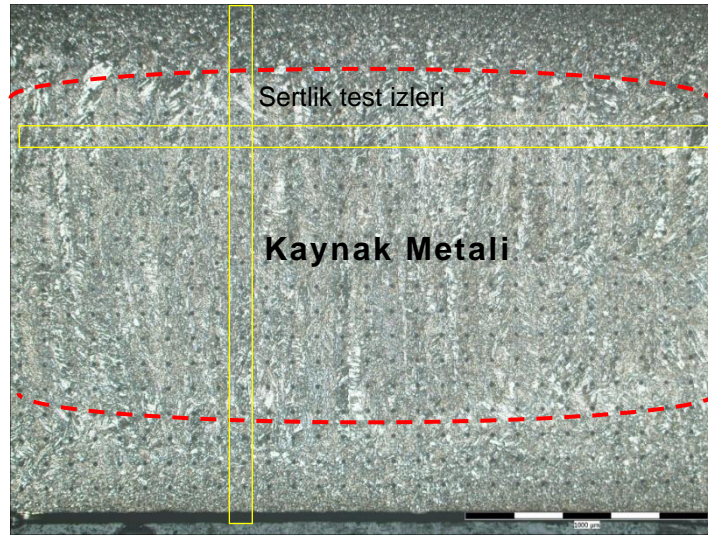
Şekil 6.11’de kaynak metali yapısının sertlik değeri, mikroyapı çalışmalarıyla birlikte desteklendiğinde, bu gölgenin hemen hemen martenzit fazından oluştuğu söylenebilir. Martenzit fazı, çelikler için sertleştirme ve dayanım artırıcı bir mekanizma olarak kullanılmaktadır. Hareket etmeyen dislokasyon yapısı, kayma, pekleşme, hacimce genleşme ve ikizlenme gibi faktörlerden dolayı dislokasyon hareketlerini engellediğinden dolayı oldukça sert ve gevrek bir yapı şeklindedir. Bu çalışmada kullanılan çelikler direnç nokta kaynak öncesinde bilindiğı üzere ferrit ve martenzit fazı içermektedirler ve hızlı ısıtma ve soğuma etkisinden dolayı martenzit fazı oluşumuna sebep olmaktadır. Sonuç olarak düşünüldüğünde kaynak metali ve ITAB’ın esas metale göre daha sert olması kaçınılmazdır.

Kaynak bölgesinin daha iyi analiz edilmesi ve farklı bir bakış açısı kazandırmak için 100 µm aralıklarla sertlik ölçümleri yapılarak, ısıtma işlemi ve normal kaynaklı tüm birleştirmelerin sertlik değeri sertlik cihazına bağı olarak geliştirilen bilgisayar yazılımı ile birlikte kaynak bölgesi renklendirilmiş ve Şekil 6.12’te gösterilen sertlik haritaları oluşturulmuştur. AA teknolojisi kullanılarak oluşturulan harita üzerinde “a” normal, “b” ise BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı bağlantıları ifade etmektedir. Ayrıca örnek olması açısından AA teknolojisi kullanımına ek olarak uygulanan bölgesel ön ısıtma işlemi ile sertlik haritalarının oluşturulması amacıyla alınan sertlik ölçüm noktalarının mikroyapı görüntüsü Şekil 6.13’te verilmiştir. Verilen sertlik ölçüm noktalarına ait mikroyapı görüntüsü Şekil 6.5’te görülen 6 numaralı bölgeden elde edilmiştir.





Şekil 6.12. AA ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların sertlik haritaları.



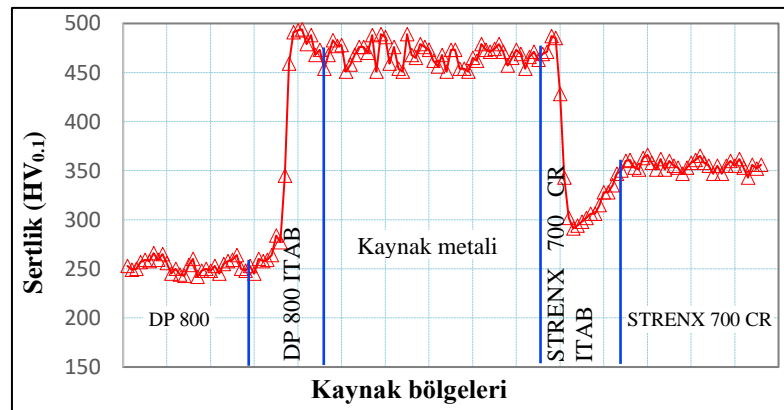
Şekil 6.13. Sertlik haritalarının oluşturulması için alınan ölçüm noktaları.

Sertlik haritaları incelendiğinde, kaynak bölgelerinin ısının etkisiyle birlikte farklı bölgelere ayrıldığı görülmektedir. Haritalar üzerinde farklı renklerin görülmesinin yanında, kaynak bölgelerinin açık maviden kırmızıya dönüştüğünü gösteren renk skalaları mevcuttur. STRENX ve DP çeliklerin kaynaklı bağlantılarına ait Şekil 6.12'deki haritalara bakıldığında ana metalden kaynak bölgesine doğru geçişte mavi kahverengi karışımının daha az belli olduğu haritada (a), STRENX 700 CR tarafında kaynak çekirdeğinin devamında görülen kahverengi kısım kaba taneli kritik üstü

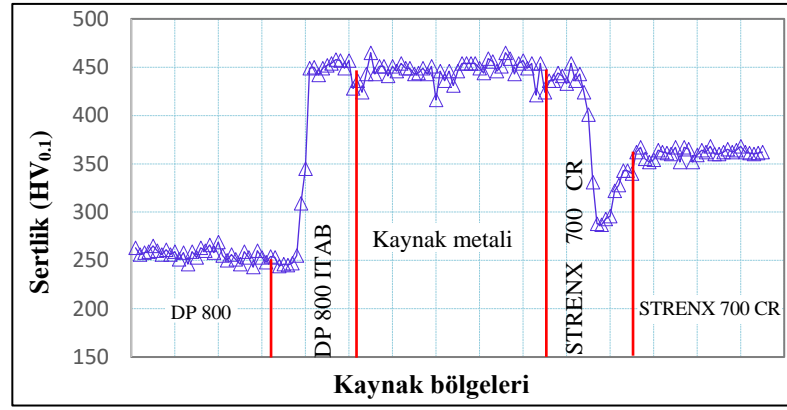
ITAB'ı, dar ve biraz daha açık kahverengi görülen kısım ise ince taneli ara kritik ITAB'ı ve son olarak ince taneli ara kritik ITAB ile ana malzeme arasında kahverengi turkuaz karışımı olan bölge temperlenmiş kritik altı ITAB' ı belirtmektedir. Şekil 6.12'deki "b" ile gösterilen haritaya bakıldığında ise; STRENX 700 CR tarafında, kaynak çekirdeğini takip eden turuncu olarak görülen kısım kaba taneli kritik üstü ITAB'ı, dar ve sarı renkte görülen kısım ise ince taneli ara kritik ITAB'ı göstermektedir. Ana malzeme ile ince taneli ara kritik ITAB arasında kalan turkuaz yeşil karışımı renk ile görülen kısım ise temperlenmiş alt kritik ITAB'ı (maksimum yumuşamanın görüldüğü bölge) ifade etmektedir. DP 800 tarafındaki haritalara bakıldığında (Şekil 6.12) ise, yeşil ve sarı renklerin karıştığı kaba taneli olan kritik üstü ITAB, turkuaz rengi ince taneli olan ara kritik ITAB'ı ve açık mavi ile görülen ana malzemeye geçiş bölgesini ifade etmektedir. Sonuç olarak sertlik haritaları değerlendirildiğinde, sertlik grafikleri ve mikroyapı çalışmalarından elde edilen sonuçlar bir bütünlük göstermektedir ve yapılan çalışmaların doğruluğunu ortaya koymaktadır.

#### 6.4.2. OFDA ile Birleştirilen Numunelerin Sertlik Analizleri

Orta frekans doğru akım (OFDA) türünde birleştirilen (BÖİ ve normal) direnç nokta kaynaklı bağlantıların, sertlik dayanımları üzerinde meydana gelen değişimleri incelemek üzere oluşturulan grafikler Şekil 6.14-6.15'te gösterilmiştir. Bölgesel ön ısıtma (BÖİ) uygulanmış ve uygulanmamış olan bu grafikler, kaynaklı bağlantıların kesit doğrultuları boyunca 120 µm aralıklarla ve ortalama 145 adet sertlik ölçüm noktalarından elde edilmiştir.



Şekil 6.14. OFDA-normal kaynaklı bağlantıların sertlik değer grafiği.



Şekil 6.15. OFDA-BÖİ uygulanan kaynaklı bağlantıların sertlik değer grafiği.

Şekil 6.14 ve 6.15 incelendiğinde, OFDA teknolojisi normal kaynaklı bağlantılarda kaynak metali sertlik değeri en yüksek 487 HV olduğu tespit edilirken, OFDA teknolojisine ek olarak uygulanan bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminden sonra kaynak metalindeki en yüksek sertlik değerinin ise 454 HV olduğu tespit edilmiştir. Ortaya çıkan bu sonuç bölgesel ön ısıtma ile birlikte kaynak metalinde yaklaşık olarak %7 oranında bir sertlik azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Böylelikle bu bölgedeki sertlik değerlerinin BÖİ işlemiyle birlikte azalmasıyla ana metal sertliğine daha yakın olmasını sağlayarak daha homojen bir yapının olmasını sağladığı görülmüştür.

Orta frekans doğru akım kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıların (Şekil 6.14) STRENX 700 CR ITAB'ında en düşük sertliğin 291 HV olduğu, en yüksek sertliğin ise 487 HV olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Bölgesel ön ısıtma (BÖİ) uygulanarak yapılan kaynaklı birleştirmelerde STRENX 700 CR ITAB'da en düşük sertliğin 287 HV, en yüksek sertliğin ise 454 HV olduğu yapılan sertlik ölçümleri ve oluşturulan grafiklerden görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre STRENX 700 CR bölgelerinde (Şekil 6.14 ve 6.15) martenzit yumuşaması görülen ITAB'da yani alt kritik bölgede ölçülen sertlik değerlerinde neredeyse bir değişiklik olmaz iken, interkritik ITAB'da 33 HV'lık bir azalma meydana gelmektedir. Sonuç olarak STRENX 700 CR ITAB'ında kaynak öncesi bölgesel ön ısıtma işlemine bağlı olarak yaklaşık olarak %6,8 oranında bir sertlik azalması meydana gelmiştir. Böylelikle çalışma kapsamında istenilen hedefler doğrultusunda gerçekleştirilen bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminin AA teknolojisinde olduğu gibi OFDA teknolojisinde de etkili olduğu ve ITAB bölgesindeki üst kritik sertliğini azaltarak daha sünek kırılmaların

oluşmasına imkân sağladığı görülmektedir. Aynı zamanda kritik altı ITAB'da hem normal hemde bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemi uygulanan test numunlerinde sertlik değerlerindeki değişikliklerin yok denecek kadar az olması ve BÖİ işlemleri ölçümlerde ITAB'ın genişlemesiyle birlikte kaynaklı bağlantılara uygulanan kuvvetlerin daha geniş bir alana yayılmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu sayede DNK'lı bağlantıya mekanik bir kuvvet etki ettiğinde deformasyonun başlangıç noktası için daha keskin bir bölge oluşumuna engel olduğu anlaşılmaktadır.

Grafikler üzerinden DP 800 ITAB'ı incelendiğinde, STRENX 700 CR ITAB'da görülen martenzit yumuşamasının burada görülmediği anlaşılmaktadır. Yapılan ölçümlerde DP 800 ITAB tarafında meydana gelen en yüksek sertliğin normal kaynaklı birleştirmelerde 493 HV, bölgesel ön ısıtma uygulanan kaynaklı birleştirmelerde ise 458 HV olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarından DP ITAB'ında bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminin uygulanmasıyla birlikte %7,8 oranında bir sertlik azalması meydana geldiği tespit edilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda kaynak metalinde görülen en düşük sertlik değerleri grafikler üzerinden birbirleri ile kıyaslandığında (Şekil 6.14 ve 6.15) meydana gelen sertlik değerlerinde 35 HV bir azalma görülmüştür. Aynı şekilde kaynak metalindeki yapılan ölçümlerde görülen en yüksek sertlik değerleri arasındaki farkın 24 HV olduğu yapılan ölçümlerde anlaşılmıştır. Sonuç olarak OFDA ile gerçekleştirilen birleştirmelerde ısıtma işlemi uygulanması sonucunda görülen en düşük sertlikte yaklaşık %7,8, en yüksek sertlik değerinde ise %5 oranlarında kaynak metali sertliklerinde düşüş gerçekleştirilmiştir.

Chabok vd. [99], yapmış oldukları çalışmada OFDA türü kullanarak DP1000 çeliğini direnç nokta kaynak makinesi ile birleştirmiş ve sertlik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Tepe sıcaklık olarak kabul ettikleri  $Ac_1$  ve  $Ac_3$  aralığında interkritik ITAB olduğunu ve kaynak bölgesindeki martenzit hacim oranının ana metalden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

### 6.4.3. AA ve OFDA Mikrosertlik Ölçümlerinin Karşılaştırılması

AA ve OFDA kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıların kaynak bölgeleri literatür araştırmaları ve elde edilen mikrosertlik sonuçlarıyla paralel olarak daha önceki kısımlarda yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu kısımda ise sonuçlar bir bütün olarak değerlendirilmiş daha sonrasında ise akım türü değişimiyle elde edilen farklılıklara değinilmiştir.

Şekil 6.8 ve 6.14'e bakıldığında AA ve OFDA teknolojisi ile normal (ön ısıtmasız) bir şekilde gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların sertlik grafikleri incelendiğinde, kaynak metalindeki en yüksek sertlik, AA'da 470 HV iken bu değer OFDA'da 489 HV olduğu görülmektedir. Gerçekleşen 19 HV'lik sertlik artışının alternatif akım teknolojisinin kullanılmasıyla ısı girdisinin daha fazla olduğu ve bu sayede DNK'lı bağlantının OFDA teknolojisine göre daha geç soğumasına sebep olduğu anlaşılmaktadır.

AA kullanılmasıyla birlikte (normal) STRENX 700 CR ITAB tarafında en yüksek sertlik 477 HV olurken (Şekil 6.8), OFDA teknolojisi kullanımıyla birlikte meydana gelen sertliğin 487 HV (Şekil 6.14) olduğu tespit edilmiştir ve yukarıda da ifade edildiği gibi AA teknolojisinde ısı girdisinin geç soğumaya karşı ITAB'da sertlik azalmasına neden olduğu birkez daha görülmektedir.

Alternatif akım ve orta frekans doğru akım teknolojilerine ek olarak uygulanan bölgesel ön ısıtma (BÖI) işlemi sonrasında gerçekleştirilen sertlik ölçümlerine bakıldığında, AA teknolojisinde kaynak metalinin sertliği en yüksek 435 HV, OFDA'da 465 HV olduğu Şekil 6.9 ve 6.15'ten anlaşılmaktadır. Burada orta frekans doğru akım teknolojisinde ısı girdisinin daha az olmasından dolayı kaynaklı bağlantının DNK sonrası hızlı soğumasına bağlı olarak kaynak metalinin sertlik değerinin OFDA'da %6,8 arttığı belirlenmiştir. Bu sayede gerçekleşen sertlik artışına bağlı olarak daha sonraki çalışmalarda da görüldüğü üzere uygulanan mekanik dayanım testlerinde AA teknolojisine göre daha üstün özellikler sergilediği görülmüştür.

Bölgesel ön ısıtma (BÖI) uygulanan kaynaklı bağlantılardan elde edilen sonuçlara göre; AA ITAB'da elde edilen en yüksek sertlik 423 HV, OFDA kullanılarak elde

edilen en yüksek sertlik de 454 HV olduğu Şekil 6.9 ve 6.15'ten tespit edilmiştir. Burada da diğer karşılaştırmalarda olduğu gibi OFDA teknolojisinde ısı girdisinin az olması ve bu nedenle hızlı soğumaya bağlı olarak sertlik değerinin artmış olduğu anlaşılmaktadır. AA teknolojisi kullanılarak yapılan kaynaklı birleştirmelerdeki kritik altı ITAB'a bakıldığında (Şekil 6.9) sertlik değerinin 277 HV olduğu, OFDA'da 287 HV olduğu ve çok fazla bir sertlik değişimi olmadığı görülmektedir ve çalışma kapsamında martenzit temperlenmesi de denilen bu bölgenin sertlik azalması çok fazla istenmediği için gerçekleştirilen çalışmanın olumlu olduğu anlaşılmaktadır.

DP 800 ITAB'ına AA ve OFDA teknolojisi kullanılarak elde edilen sonuçlar yönünden bakıldığında ise; normal kaynaklı bağlantılarda AA'da en yüksek sertlik 476 HV ölçülürken, OFDA'da bu değerin 493 HV olduğu tespit edilmiştir. Bölgesel ön ısıtma (BÖİ) uygulanarak yapılan kaynaklı birleştirmelerde ise AA'da 431 HV, OFDA'da 458 HV olarak ölçülmüştür. DP 800 ITAB'ı genel olarak değerlendirildiğinde AA yerine OFDA teknolojinin kullanılmasıyla birlikte normal kaynaklı bağlantılarda sertlik dayanımı yaklaşık olarak %3,6 artarken, bu oran BÖİ işleminin uygulanan kaynaklı bağlantılarda %6,3'e çıkmaktadır.

DP 800 ve STREX 700 CR ITAB bölge genişlikleri incelendiğinde (Şekil 6.8, 6.9, 6.11, 6.14 ve 6.15), hem AA'da hemde OFDA teknolojisinde bölgesel ön ısıtma işleminin uygulanan kaynaklı bağlantıların, normal (ön ısıtmasız) kaynaklı bağlantıların ITAB'ına göre daha geniş olduğu anlaşılmaktadır. Bu sayede kaynaklı bağlantılara uygulanan kuvvet etkisi sonucunda genişleyen ITAB sayesinde daha geniş bir alana kuvvet etkisinin yayılması sağlanmış olduğu ve bu sayede daha fazla yük dayanımlarına karşı DNK'lı bağlantının dayanım göstereceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminin ile ITAB'da kuvvet aralığı azaldığından ana metale daha yakın ve homojen bir sertlik değerinin meydana geldiği tespit edilmiştir.

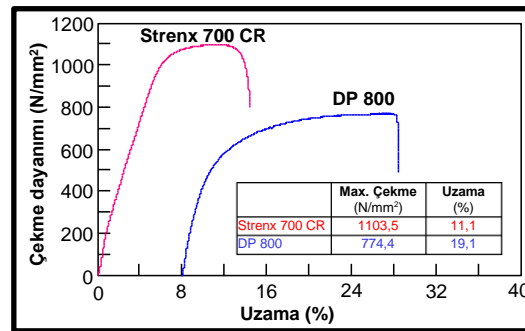
Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde tez kapsamında düşünölen ve hedeflenen bölgesel ön ısıtma ile bölgesel yumuşamanın sağlanması amacıyla gerçekleştirilen çalışmaların amaçlarımıza uygun olduğu düşünölmektedir.

## 6.5. ÇEKME TEST SONUÇLARI

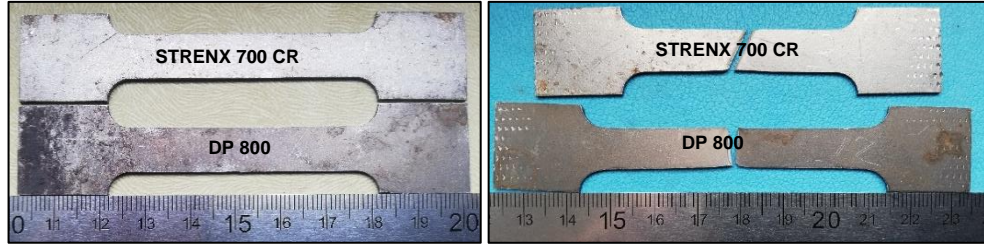
### 6.5.1. Genel Değerlendirme

Çalışmadaki amacımız öncelikli olarak STRENX 700 CR ve DP 800 yüksek mukavemetli çelik gurubunda yer alan çift faz içeriğine sahip çelikleri DNK ile birleştirmektir. Bu hedeften hareketle öncelikle çalışmada kullanılan STRENX 700 CR ve DP 800 malzemeler 3'er adet çekme testine tabi tutulmuş ve Şekil 6.17'de birer adet olmak üzere çekme öncesi ve sonrası görüntüleri, Şekil 6.19'da ise çekme grafiklerinin ortalamaları verilmiştir. Çekme sonucu elde edilen değerler incelendiğinde değerlerin katalog değerleri ile örtüştüğü ve STRENX malzemenin dayanımının DP malzemededen daha yüksek olduğu görülmüştür. Burada bu 2 malzemenin katalog değerlerine bakıldığında STRENX 700 CR çekme dayanımı 1000-1200 Mpa, akma dayanımı 700 Mpa ve % uzama miktarı %7 olduğu görülmektedir. Aynı şekilde DP 800 çekme dayanımı 800-950 Mpa, akma dayanımı 620-770 ve uzama değeri %10 olarak verilmiştir. Ayrıca uzama değerlerinin de benzer biçimde literatür ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Birleştirilen kaynaklı bağlantıların statik bir kuvvet uygulanması sonucunda oluşabilecek mekanik özelliklerdeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla çekme-makaslama ve çapraz-çekme testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda bulunan başlıklar altında değerlendirilmiştir. Ayrıca STRENX 700 CR ve DP 800 çeliklerin temin edildiği şekilde gerçekleştirilen çekme testi sonucunda oluşturulan grafik Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.16. Ana malzemelerin çekme test grafikleri.



Şekil 6.17. Ana malzemelerin çekme testi öncesi ve sonrası görüntüleri.

### 6.5.2. Çekme-Makaslama Testi

Alternatif akım (AA) ve Orta frekans doğru akım (OFDA) teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen normal ve bölgesel ön Isıtma (BÖİ) işlemi uygulanan kaynaklı bağlantıların her bir test numunesinden ayrı ayrı olmak üzere çekme-makaslama testi gerçekleştirilmiş ve bu sayede statik yük altında meydana gelen değişimler yorumlanmaya çalışılmıştır.

Çekme-makaslama testleri her bir parametrede birleştirilen kaynaklı numunelerden 3'er adet yapılmış ve tüm numunelerin grafikleri ayrı ayrı oluşturulmuş ve sadece alternatif akımda ve orta frekans doğru akımda birleştirilen birer numune serisi örnek olması açısından verilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere uygulanan çekme-makaslama testi sonucunda elde edilen uzama (mm) ve kuvvet (kN) değerleri Çizelge 6.2'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Çekme-makaslama test sonuçları.

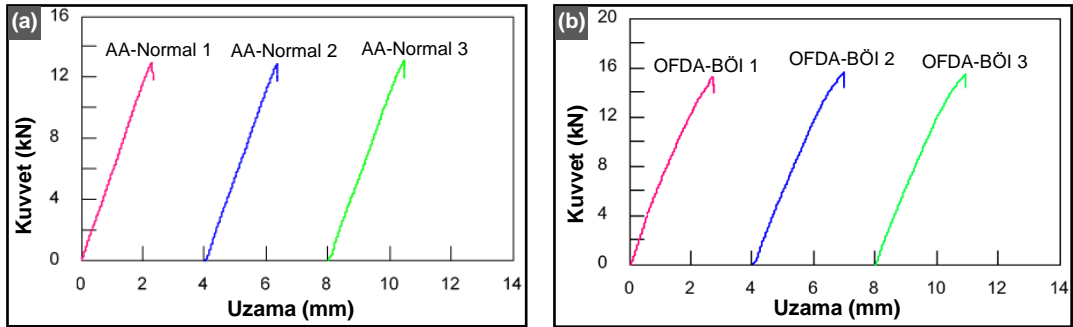
	AA-Normal		AA-BÖİ		OFDA-Normal		OFDA-BÖİ	
	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)
1. Ölçüm	13,11	2,33	13,47	2,29	14,33	2,48	15,52	2,68
2. Ölçüm	12,99	2,15	13,83	2,28	14,68	2,42	15,58	2,97
3. Ölçüm	13,20	2,29	13,65	2,36	14,52	2,61	15,26	2,93
Ortalama	13,10	2,25	13,65	2,31	14,51	2,50	15,45	2,86

Çizelge 6.2 genel olarak değerlendirildiğinde iki farklı akım türünde normal ve bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemi uygulanan tüm kaynaklı bağlantılardan elde edilen çekme-makaslama ölçümlerinin hem kuvvet (kN) hem de uzama (mm) olarak birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Benzer sonuçların elde edilmesinde



farklı etkenler vardır ve bunları sıralayacak olur isek; sağlıklı bir kaynak gerçekleştirmek ve kaynak sırasında kuvvet etkisi veya insan odaklı bindirmeler üzerinde oluşabilecek kaymaların önüne geçebilmek için çeşitli fikstürler tasarlanarak imal edilmiş ve kaynak makinesine entegre edilerek kaynak geometrisi korunmuştur. Kaynak işlemi esnasında iletkenlik özelliği sağlayan ve kuvvet etkisi ile deforme olmaya elverişli olan elektrotların etkin bir şekilde soğutulması da bu etkenler arasında yer almaktadır. Son olarak kaynak parametreleri klasik kaynak makinelerinde bulunan ve makine üzerindeki düğmelerle ayarlamalar yapılmayıp, kaynak makinesine entegre olan bilgisayar yazılımı ile parametre ayarları yapılmıştır. Tüm bu yapılan iyileştirmeler sayesinde insan odaklı veya makine etkisi ile oluşabilecek problemlerin önüne geçilerek kontrollü bir kaynak çalışması gerçekleştirilmiştir.

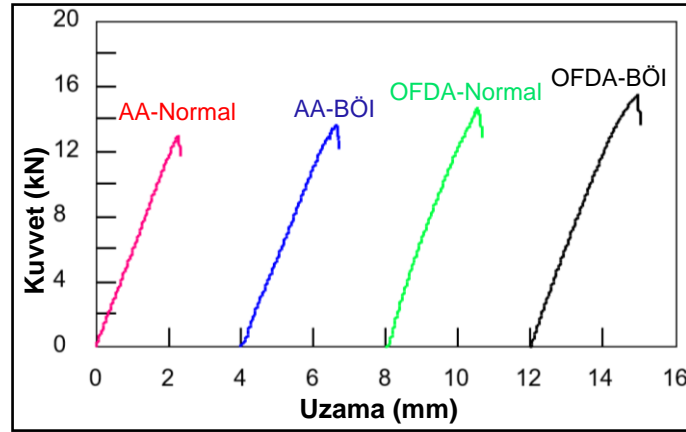
Kaynaklı bağlantılara uygulanan mekanik test sonucunda oluşturulan ve aşağıda verilen çekme-makaslama grafiklerinden; Şekil 6.18'a alternatif akımda (AA) ısıl işlemsiz (normal) birleştirilen numuneleri, Şekil 6.18'b ise orta frekans doğru akımda (OFDA) bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemi sonrası birleştirilmiş kaynaklı numuneleri ifade etmektedir. Şekil 6.18 incelendiğinde yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı grafik görünümünün birbirine son derece benzer olduğu birbirine yakın olduğu Çizelge 6.2 yardımıyla da net bir şekilde görülmektedir. Bu durum deneylerin tekrarlanabilirlik özelliğinin çok iyi olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Alternatif akım ile birleştirilen ön ısıtmasız (normal) test numunelerinden elde edilen en yüksek yük taşıma kapasitesi 13,20 kN olurken, orta frekans doğru akım bölgesel ön ısıtma (BÖİ) ile gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerde bu kapasite 15,58 kN olarak ölçülmektedir.



Şekil 6.18. Çekme-makaslama test grafikleri.

Bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemiyle birlikte OFDA teknolojisinin kullanılması kaynaklı bağlantının çekme-makaslama yük taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak %18 artmasına neden olmuştur. Gerçekleşen dayanım artışında bölgesel ön ısıtma ile ITAB'da meydana gelen genişlemeye bağlı olarak çekme-makaslama dayanımına karşı daha geniş bir alanda tepki vermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak yapılan bölgesel ön ısıtma işleminin (BÖİ) çekme-makaslama dayanımına önemli bir katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Wang vd.[162], yapmış oldukları çalışmada ön ısıtma işleminin çekme-makaslama dayanımını arttırdığını belirtirken, Manladan vd.[122] ise ön ısıtma işleminin oksit tabakasının temizlenmesine yardımcı olurken, temas direnci ve kaynak kalitesinin arttığını ifade etmişlerdir. Lia vd.[163] direnç nokta kaynağında ön ısıtma işleminin yapılmasıyla birlikte ergiyik bölge oluşumunu teşvik ederken aynı zamanda kaynak mukavemetini arttırdığını bildirmişlerdir.

Şekil 6.19'da ise kaynak esnasında kullanılan kaynak parametrelerinin etkilerini daha kolay anlaşılabilir hale getirmek için oluşturulmuş çekme-makaslama grafiği verilmiştir.



Şekil 6.19. Çekme-makaslama test ortalama sonuçları.

Bir başka ifade ile yukarıda verilen grafik Şekil 5.12'de tüm çekme-makaslama numunelerinden (toplam 12 adet) elde edilen grafiklerin ortalamaları alınarak oluşturulmuş çekme-makaslama grafiğidir.

Şekil 6.19 incelendiğinde alternatif akım (AA) kullanılarak gerçekleştirilen birleştirme dayanımlarının orta frekans doğru akım (OFDA) kullanılarak birleştirilen numune

dayanımlarından daha düşük olduğu görülmektedir. Benzer şekilde hem alternatif akım hem de orta frekans doğru akım ile birleştirilen kaynaklı numunelere uygulanan bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminin kaynaklı numunelerin dayanımlarında artışa neden olduğu açıkça görülmektedir. Normal (ısıl işlemsiz) AA ile birleştirilmiş numune (13,10 kN) ile bölgesel ön ısıtma işlemi uygulanmış AA kaynaklı (13,65 kN) numunelerdeki dayanım artışı yaklaşık %4,2 olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde ön ısıtma işlemi uygulanmamış OFDA ile birleştirilmiş numune (14,51 kN) ile bölgesel ön ısıtma işlemi uygulanmış OFDA kaynaklı (15,45 kN) numunelerdeki dayanım artışı yaklaşık %6,7 olarak ölçülmüştür. Burada ön ısıtma işleminin OFDA kaynaklı numunelerde AA kaynaklı numunelere göre yaklaşık olarak 1,6 kat daha etkili olduğu sonucu çıkarılabilir.

AA bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemi uygulanmış kaynaklı bağlantılar ile OFDA ön ısıtma işlemi uygulanmayan (normal) kaynaklı bağlantıların çekme makaslama dayanımları karşılaştırıldığında (Çizelge 6.2) OFDA teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte yaklaşık olarak %6,5'lik bir dayanım artışı olduğu gözlemlenmektedir. AA normal kaynaklı bağlantılar ile OFDA normal kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımları karşılaştırıldığında ise, OFDA'da yük taşıma kapasitesinin 1,41 kN daha fazla olduğu tespit edilmiştir. OFDA'da gerçekleşen 1,41 kN'lik yük artışının AA teknolojisine göre OFDA'nın ısı girdisinin az olmasına bağlı olarak ITAB yumuşaması görülen bölgenin yani diğer bir ifade ile soft zone'un sertliğinin OFDA'da daha yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde OFDA teknolojisinde bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemi uygulanmasıyla birlikte AA normal kaynaklı bağlantılara göre dayanım artışının yaklaşık %18 olduğu belirlenmiştir. Yüzde uzamalara bakıldığında ise çekme-makaslama dayanımları ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Çekme makaslama sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, sertlik çalışmalarıyla paralellik gösterdiği ve sertlik dayanımlarındaki değişimlerin çekme-makaslama dayanım kapasiteleri üzerinde etkili olduğu hem yapmış olduğumuz çalışmalarla hem de literatür kaynaklarla desteklenmektedir [164]. Aynı zamanda çekme makaslama dayanımlarının belirlenmesinde kaynaklı bağlantıların yapı morfolojisini de iyi bilmek gerekmektedir. Yüksek mukavemetli çift faz içeren çelikler

genelde diğ er ç eliklerde (düş ük karbonlu ç elikler, yüksek mukavemetli düşük alaş ımlı ç elikler vb.) oldu ğ u gibi, ç ekme-makaslama hasarı ana metalden de ğ il de ITAB'dan gerç ekleş ir ve gerç ekleş en bu durumun diğ er ç eliklerden farklı olarak ITAB yumuş amasından kaynaklandı ğ ı düşün ülmektedir [165]. Bu nedenle deney sonrasında ç ekme-makaslama hasarları incelendiğ inde tüm hasarların DP800'den de ğ il de STRENX 700 CR ITAB'dan gerç ekleş tiğ i gör ülmektedir. Bu durumun yaş anmasında, ısı l dönü ş ümlerin meydana geldiğ i ITAB'daki düşük sertlik de ğ erinin gör üldü ğ ü kritik altı bölge (martenzit yumuş aması olan bölge) ve en yüksek sertlik de ğ erinin ölç üldü ğ ü interkritik bölgelerin oluş umu büyük bir rol oynamaktadır.

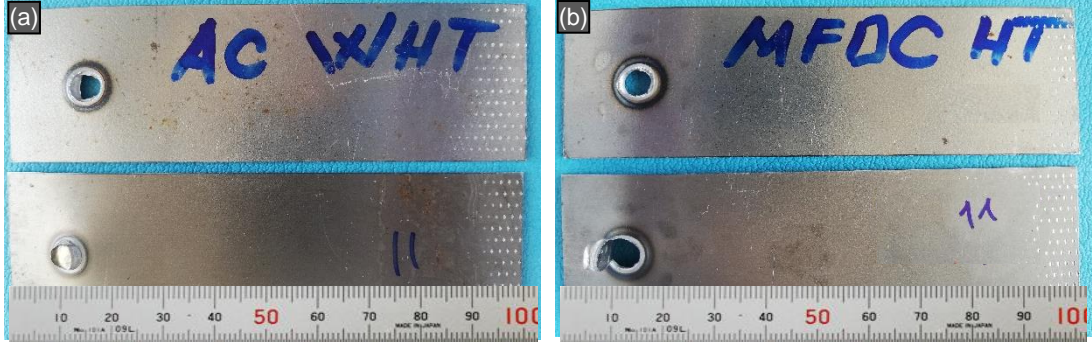
Sonuç olarak ç ekme-makaslama dayanım sonuçlarına bakıldığında (Ç izelge 6.2), normal kaynaklı bağlantılara göre BÖI iş lemlili numunelerin hem AA hemde OFDA teknolojisi kullanımıyla artmış oldu ğ u gör ülmektedir. Bunun nedenleri arasında AA'ya göre OFDA'da ısı l girdisinin az olmasına rağ men ç alış ma kapsamında uygulanan BÖI iş leminin kaynaklı bağlantının geç soğ umasına neden oldu ğ u ve termal dönü ş ümlerin sağ lanabileceğ i sürelerle olanak sağ ladı ğ ı gör ülmektedir. Bu bağ lamda yapılan diğ er ç alış malarla ortak bir düşün ce gerç ekleş tiğ inde BÖI'nın üst kritik ITAB'daki sertliğ i azaltarak dar bir alana toplaması aynı zamanda ITAB'ın geniş lemesini sağ layarak mekanik olarak uygulanan ç ekme-makaslama kuvvetinin daha geniş bir alana yayılmasına sebep oldu ğ u ve bu sayede normal kaynaklı bağlantılara göre hem AA'da hemde OFDA teknolojisi kullanımında ç ekme-makaslama dayanımı diğ er bir ifade ile yük taşı ma kapasitesinin artmış oldu ğ u gör ülmektedir.

#### **6.5.2.1. Ç ekme-Makaslama Testi Kopma Hasar Modları**

Direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak gerç ekleş tirilen, (BÖI) ve normal kaynaklı bağlantıların ç ekme-makaslama dayanım testi sonrasında elde edilen kopma gör üntüleri bu kısımda incelenmiştir.

Kopma türlerinin daha önceki bölümlerde (bölüm 4 ve 5) DNK yöntemi ile gerç ekleş tirilen kaynaklı bağlantıların mekanik test sonuçlarından biri oldu ğ unu ve gerç ekleş en kopma türleri gör ünümlerinin malzemeler hakkında nicel bilgiler

verdiğini söylemiştik. Bu nedenle bu çalışmada gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme-makaslama dayanımı sonrasında elde edilen kopma görüntüleri diğer bir ifade ile hasar modları Şekil 6.20 ve 6.21’de verilmiştir. Şekil 6.20’de gösterilen a) AA-normal ve b) OFDA-BÖİ işlemlerini ifade ederken, Şekil 6.21’de ise a) AA-normal, b) AA-BÖİ, c) OFDA-normal ve d) OFDA-BÖİ’yü ifade etmektedir.



Şekil 6.20. Çekme-makaslama test sonrası genel görünüm.

Şekil 6.20’de AA ve OFDA teknolojisi ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların hasar analizlerini değerlendirmeden önce resimlerde de görüldüğü üzere gerçekleşen kopmaları anlamak gerekmektedir. Bu bağlamda 4. bölümde Şekil 4.15’in iyi analiz edilmesi oldukça önemlidir. Hasar modlarının; arayüzey, kısmi arayüzey ve düğmelenme şeklinde gerçekleşebileceği literatür kaynaklardan bilinmektedir. Kopma sonrası uzmanların istemiş olduğu hasar modunun düğmelenme şeklinde gerçekleşen ve ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) ile ana malzeme arasında olan ayrılmalar olduğu bilinmektedir [144,151]. Bu kopma türünde ısı girdisinin artmasıyla birlikte kaynak çekirdek çapı ve bu sayede kaynaklı bağlantının çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. Şekil 6.20-a’ya bakıldığında AA-normal kaynaklı bağlantıya ait çekme-makaslama dayanımında ortalama 13,10 kN yük taşıma kapasitesine sahip kopma hasar modu görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 6.20-b’de, OFDA-BÖİ işlemli kaynaklı bağlantıya ait ve 15,45 kN ortalama yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 6.20’de görülen kopma hasar modlarının literatür bilgileri ile karşılaştırıldığında istenilen bir kopma türü olan düğmelenme şeklindeki hasar modları olduğu ve bunun da hem AA hemde OFDA teknolojisinde optimum kaynak parametreleri sağlanarak gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 6.21. Çekme-makaslama test sonrası kopma görüntüleri.

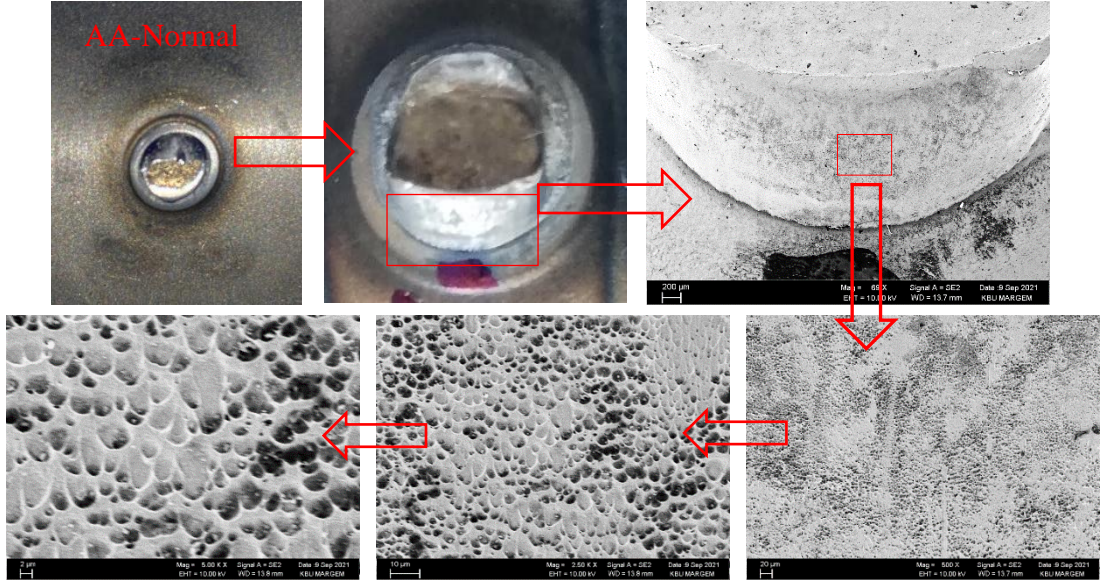
Şekil 6.21’de belirtildiği üzere dört farklı proses işlemleri uygulandıktan sonra gerçekleşen çekme-makaslama deneyi sonrası elde edilen kopma görüntüleri incelendiğinde, ortalama yük taşıma kapasitelerinin a-13,10 kN, b-13,65 kN, c-14,51 kN ve son olarak d-15,45 kN olduğu Çizelge 6.2’den anlaşılmaktadır. AA ve OFDA’da, normal ve BÖİ işlemlili numunelerin (Şekil 6.21) kopma hasar modlarına bakıldığında otomotiv sektörünün istemiş olduğu ve literatür kaynaklarda da belirtilen kopma türü olan düğmelenme şeklinde kopmalar gerçekleşmiştir. Çift fazlı çelik içeren kaynaklı birleşimlerin çekme-makaslama testi sonrasında düğmelenme şeklinde hasar modlarının oluşumu yanında arayüzey ayrılmaları da görülebilir. Kaynak parametrelerinin iyi bir şekilde ayarlanması ile arayüzey hasar modundan düğmelenme şeklinde hasar modlarına geçiş yapılabilir ve optimum yapısal performans dayanımları da düğmelenme şeklinde hasar modlarında gerçekleşir [38]. Deneysel çalışmalar kısmında belirtildiği gibi kaynak prosedürünün insan odaklı herhangi bir değişikliğe sebebiyet vermeden kaynak teknolojisinin üst seviyede kullanılmasıyla birlikte Şekil 6.21’de görüldüğü üzere elde edilen tüm kopma yüzey görüntülerinde STRENX 700 CR tarafında düğmelenme şeklinde kopmalar gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu nedenle de çekme-makaslama dayanımında maksimum seviyede yük taşıma kapasitesi ve enerji absorpsiyonu elde edilmiştir.

Yapı morfolojisi incelendiğinde gerçekleşen kopmanın neden STRENX 700 CR tarafından kaynaklandığı açıklanabilir. Mikroyapı çalışmalarına bakıldığında yapı

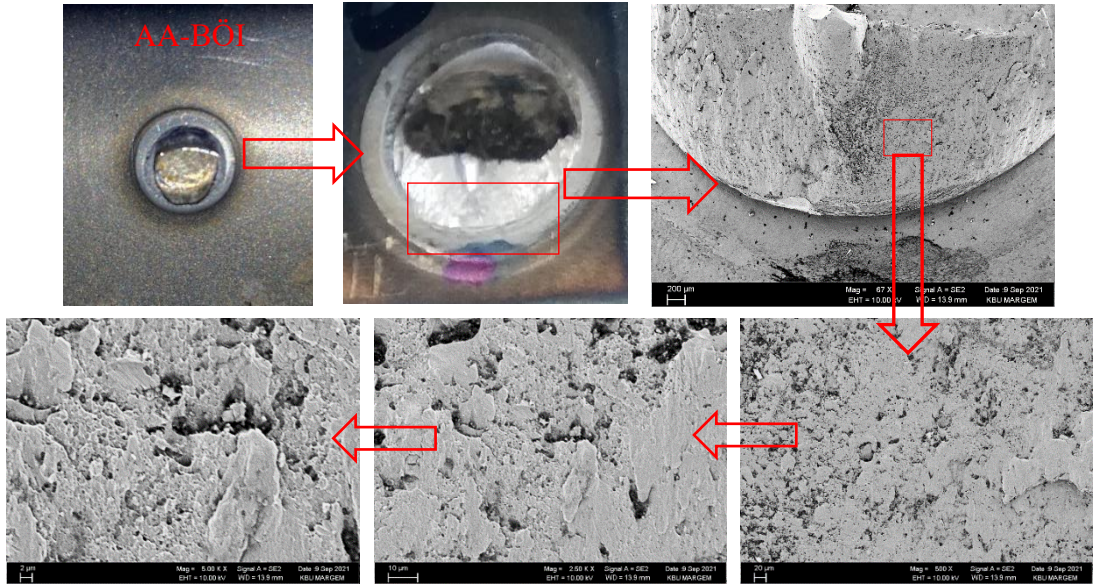
içerisinde bulunan özellikle martenzit fazının termal döngü içerisinde önemli olduğu aynı zamanda, mikrosertlik ölçümlerinde kritik altı ITAB'da meydana gelen temperlenmiş martenzit yumuşamasının gerçekleşen düğmelenme şeklindeki kopmalarda etken olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 6.21 a-b-c ve d'de görülen düğmelenme şeklindeki hasar modlarının oluşmasında en zayıf bölge olan ITAB'ın kaynak sonrası AA ve OFDA teknolojilerine ek olarak kullanılan BÖI işlemi ile sertlik test sonuçlarında da görüldüğü üzere  $Ac_3$  ile  $Ac_1$  arasında olan üst kritik ITAB sertliğinin azalmasına bağlı olarak daha homojen bir yapı olmasının yanında, BÖI işlemi ile genişleyen ITAB, çekme-makaslama dayanımı için uygulanan yük gerilmelerini daha geniş bir alanda karşılanmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca kaynak çekirdeği bölgesinde görülen faylanma yüzey kısımlarına yakın olan sınırlar zayıf bağlanmış ve kırılabilirlik özelliği göstermektedir. Düğmelenme şeklinde görülen kopma türlerinde esas kuvvetin kaynak metali etrafını çevreleyen çekme gerilmeleridir. Literatür çalışmalarına bakıldığında meydana gelen çatlakların da kaynak çekirdeği kenarında ya da ITAB'da meydana geldiği görülmektedir. Elitaş [38], yapmış olduğu benzer çalışmada, ana metale yakın kritik olmayan ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) martenzit temperlenmesi sonucunda yumuşama bölgelerinin bulunduğunu ve bu yumuşama bölgeleri varlığının çekme-makaslama testi boyunca kopma türlerine etki edebileceğini bildirmiştir.

#### **6.5.2.2. Çekme-Makaslama Ayrılma Yüzeyi SEM İncelemesi**

STRENX 700 CR ve DP 800 çeliklere uygulanan dört farklı proses işleminden sonra gerçekleştirilen çekme-makaslama dayanımı sonrasında elde edilen kopma hasarlarına ait SEM görüntüleri Şekil 6.22-6.25 arasında gösterilmektedir. Aşağıda Şekil 6.22'de AA-normal, 6.23'te AA-BÖI, 6.24'te OFDA-normal ve 6.25'te OFDA-BÖI işlemlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir.

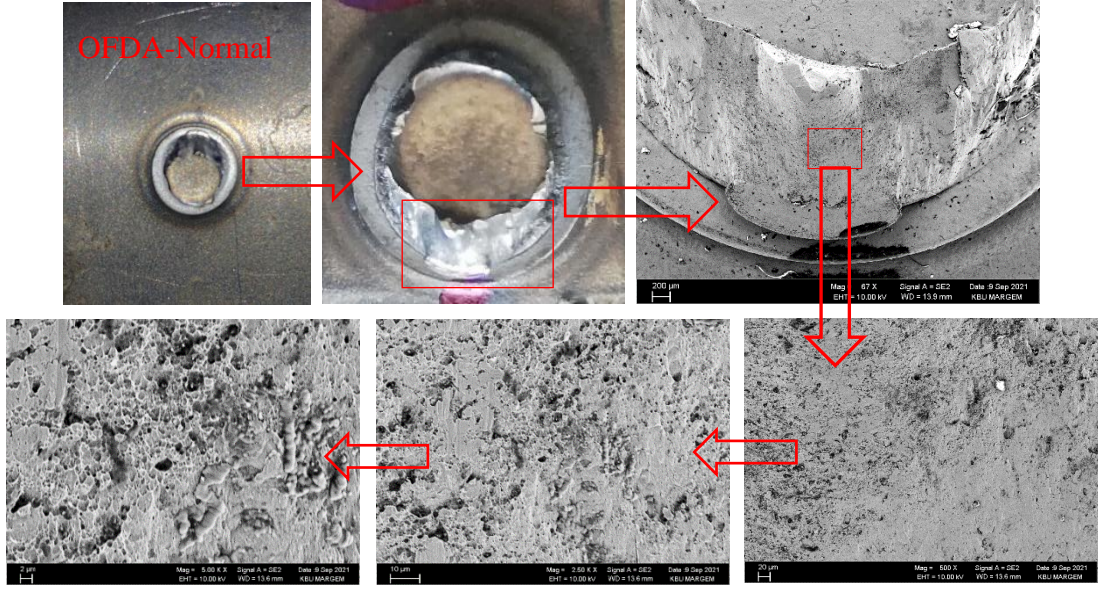


Şekil 6.22. Çekme-makaslama (AA-normal) hasar modları SEM görüntüsü.

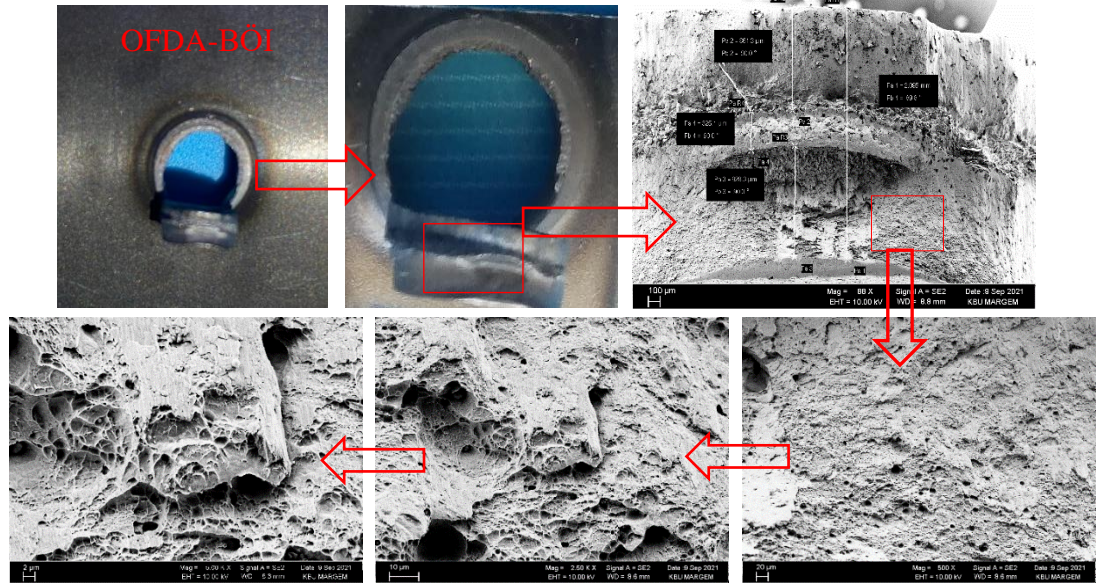


Şekil 6.23. Çekme-makaslama (AA-BÖİ) hasar modları SEM görüntüsü.





Şekil 6.24. Çekme-makaslama (OFDA-normal) hasar modları SEM görüntüsü.



Şekil 6.25. Çekme-makaslama (OFDA-BÖİ) hasar modları SEM görüntüsü.

Şekil 6.22-6.25'te verilen tüm SEM görüntüleri incelendiğinde düğmelenme şeklinde gerçekleşen kopmaların gevrek ve yarı sünek-gevrek şeklinde hasar modlarının oluşumuna yol açtığı görülmektedir. Yapı morfolojisi incelendiğinde elde edilen sonuçların çift fazlı çeliklerde görülen ve kritik altı ITAB'da martenzit hacim oranı, temper derecesi ve şiddetine bağlı olarak değişiklik gösterebilen martenzit yumuşamasının sonuçlarından biri olduğu değerlendirilmektedir. Martenzit yumuşaması görülen bölge, ergime sınırı ile yapı içerisinde bulunan ve hızlı

soğumadan dolayı meydana gelen martenzit fazı ile çevrili olduğundan çekme-makaslama dayanım sonrası düğmelenme şeklinde kopmaların gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Direnç nokta kaynaklı birleştirmelerin SEM görüntüleri incelenmeye devam edildiğinde, çatlakların ilk olarak STREX 700 CR alt kritik ITAB'dan başladığı daha sonra yüksek mikrosertlik değerlerinin elde edildiği üst kritik ITAB'a devam ederek daha sonra ergiyik bölgeyi çevrelemesiyle kopmaların gerçekleştiği sonucu çıkarılabilir. Ayrıca ITAB'da heterojen yapıların iç gerilmeleri tetikleyerek çatlak oluşumuna neden olduğu değerlendirilmektedir. Benzer şekilde yapılan çalışmalar bu durumu desteklemektedir [166].

Genel olarak direnç nokta kaynak (DNK) yönteminde gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin düğmelenme şeklinde hasar modlarının oluşumu istenmektedir ve bu tür hasar modlarının oluşumu için de gerekli olan kaynak çekirdek çapının bazı kaynaklarda yaklaşık olarak  $4\sqrt{t}$  ( $t$ =sac kalınlığı, mm) [33,167], bazılarında ise  $5\sqrt{t}$  olması istenmektedir [38]. Bu tür literatür karışıklıklarının olmasının sebebi olarak, yeni nesil yüksek mukavemetli çeliklerin geliştirilmesiyle birlikte istenilen düğmelenme şeklindeki hasar modlarının bazı durumlarda elde edilememesi olduğu düşünülmekte ve bu tür sorunların olmaması için direnç nokta kaynaklı çift fazlı çeliklerin birleştirilmesinde araştırmacılar farklı kaynak arayışına gitmişlerdir[159]. Bizlerde yapmış olduğumuz tez çalışması kapsamında çekme-makaslama dayanımı sonucunda otomotiv sektörü özelinde tüm direnç nokta kaynaklı bağlantılardan istenilen düğmelenme şeklinde kopmaların oluşabilmesi ve daha önceden meydana gelebilecek kaynak hatalarının önüne geçebilmek için kaynaklı bağlantıların metalurjik özellikleri dikkate alınarak farklı bir kaynak deney seti hazırlanmış ve yukarıda belirtilen olumsuzlukların önüne geçilmiştir.

Son olarak 4. bölümde Şekil 4.7'de gösterildiği üzere kaynak kabiliyet diyagramındaki bölgeler incelendiğinde yapmış olduğumuz çalışma sonucunda elde edilen kaynaklı bağlantılarda yetersiz birleşme veya fişkıma gibi olumsuzluklar görülmemiştir ve elde etmiş olduğumuz sonuçlara göre kaynak kabiliyet diyagramına bakıldığında "C"

bölgesine denk geldiği ve bu bölgenin maksimum çekme-makaslama dayanımı sağladığı bilinmektedir.

### 6.5.3. Çapraz-Çekme Testi

Direnç nokta kaynaklı bağlantıların mekanik davranışlarını belirlemek için sık olarak kullanılan yöntemlerden biri de çapraz-çekme testi olduğu bilinmektedir [168,169]. Bu test yöntemi, kaynaklı bağlantılara uygulanan statik bir kuvvet etkisiyle meydana gelen ayrılmaların başlangıç yerlerinin belirlenmesi ve ayrılma şekil geometrilerini tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu bağlamda, gerçekleştirilen tüm kaynaklı bağlantılara çapraz-çekme testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar hem kuvvet (kN) hemde uzama (mm) olarak Çizelge 6.3'te verilmiştir.

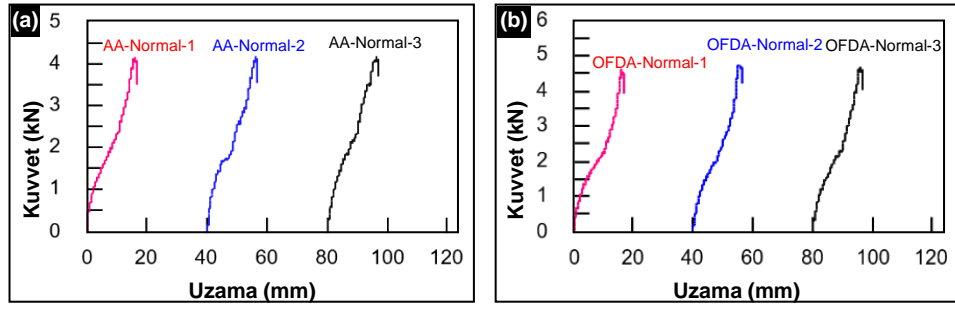
Çizelge 6.3. Çapraz-çekme test sonuçları.

	AA-Normal		AA-BÖI		OFDA-Normal		OFDA-BÖI	
	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)
1. Ölçüm	4,18	16,1	4,53	16,59	4,67	16,2	4,97	16,4
2. Ölçüm	4,20	16,2	4,58	16,18	4,78	16,3	4,94	16,8
3. Ölçüm	4,20	16,1	4,54	15,98	4,75	16,4	5,01	16,2
<b>ORTALAMA</b>	4,19	16,13	4,55	16,25	4,73	16,3	4,97	16,46

Çizelge 6.3 incelendiğinde farklı akım türlerinde gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların normal ve bölgesel ön ısıtma (BÖI) işlemi uygulanmış numunelerden elde edilen çapraz-çekme test sonuçları görülmektedir. Çapraz-çekme dayanım ortalamaları düşükten yükseğe doğru incelendiğinde, en düşük dayanımın AA-normal kaynaklı birleştirmelerde 4,19 kN olduğu ve sırasıyla AA-bölgesel ön ısıtmalı da 4,55 kN, OFDA-normal 4,73 kN ve en yüksek çapraz-çekme dayanımının OFDA-bölgesel ön ısıtma (BÖI) işlemi uygulanmış olan numunelerden elde edildiği ve bu değer 4,97 kN olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen kaynak operasyonları birbirleri arasında genel olarak kıyas edildiğinde; AA-BÖI işlemi uygulanmış numunelerin AA normal numunelere oranla yaklaşık olarak dayanımlarının %8,7 kN arttığı, OFDA-BÖI işlemi uygulanmış kaynaklı numunelerin OFDA-normal kaynaklı numunelere oranla çapraz-çekme dayanımlarında yaklaşık %5,3 kN'lik bir artış sağlandığı tespit

edilmiştir. Akım türleri değiştirilip kıyaslama yapıldığında ise; OFDA-normal kaynaklı birleştirmeler AA-normal kaynaklı birleştirmelere göre %13 kN, OFDA-bölgesel ön ısıtmalı kaynaklı birleştirmelerin AA-BÖİ'li kaynaklı birleştirmelere oranla yaklaşık %9,3 kN'lik bir dayanım artışı sağlandığı belirlenmiştir.

Çapraz-çekme testi için, her bir parametreden 3 kaynaklı birleştirme yapılmış ve bunlardan sadece iki tanesi (AA-normal ve OFDA-normal) örnek olması açısından AA için (a) grafiği ve OFDA için (b) grafiği oluşturularak Şekil 6.26'da verilmiştir.

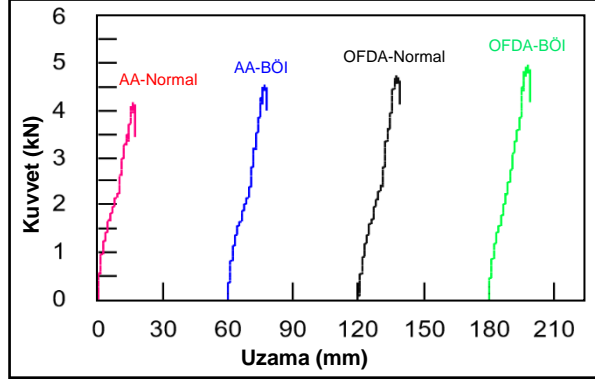


Şekil 6.26. Üçlü çapraz çekme sonuçları a) AA-normal ve b) OFDA-normal.

Şekil 6.26 incelendiğinde alternatif akımda (AA) çapraz-çekme dayanım kuvvetinin maksimum 4,20 kN, uzamanın ise 16,2 mm olduğu görülmektedir. Orta frekans doğru akımda (OFDA) ise bu değerlere bakıldığında en yüksek dayanımın 4,78 kN, uzamanın ise 16,4 mm olduğu grafikten ve Çizelge 6.3'ten açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Farklı akım değerleri kullanılarak oluşturulan grafikte, çapraz-çekme test sonuçlarına göre uzama miktarlarında hemen hemen benzer uzama değerleri görülürken, OFDA teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen birleştirmelerde çapraz-çekme dayanımında yaklaşık olarak %13,5 kN'lik bir dayanım artışı olduğu tespit edilmiştir.

Çapraz çekme sonuçlarını bir arada görebilmek ve kolay anlaşılabilmesi açısından her 4 farklı parametrede birleştirilmiş kaynaklı numunelerin (toplam 12 adet) 3'lü grafiklerinin ortalamalarından oluşturulmuş grafik Şekil 6.27'de verilmiştir. Bu şekle bakıldığında, alternatif akım ve orta frekans doğru akım teknolojilerinin çapraz-çekme dayanım artışı yanında önemli bir değişkenlik sağlamanın yanı sıra yapılan tez çalışması

kapsamında uygulanan bölgesel ısıtma işleminin de elde edilen dayanım artışında önemli bir katkı sunduğu net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6.27. Çapraz çekme ortalama sonuçları.

Elde edilen grafiğin bu şekilde meydana gelmesi aslında beklenen bir durumdur. Bunun nedeni ise daha önceden yapılan mikroyapı ve sertlik analiz çalışmalarından elde edilen verilerin yorumlanması ile çekme-makaslama test sonucunda oluşabilmesi muhtemel sonuçların varlığından kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifade ile kaynak sonrası meydana gelen martenzit yumuşamasının etkisiyle birlikte kritik altı ITAB oluşumu, üst kritik ITAB ve ayrıca orta frekans doğru akım teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte kaynak bölgesine daha az ısı girdisi sağlanmasından dolayı meydana gelen değişimler sonucunda çapraz-çekme dayanımında artış sağlanmış olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda Şekil 6.27’de görülen AA ve OFDA’da BÖI işlemi uygulanan kaynaklı bağlantıların çapraz-çekme dayanımlarının yüksek çıkmasında, BÖI işlemi ile ITAB bölgesinde görülen ve kritik altı ITAB’ın (soft zone) diye adlandırılan bölgenin genişlemesine bağlı olarak test numunelerine uygulanan kuvvetin, kaynak bağlantısını daha geniş bir alanda deformasyona zorlandığı dolayısıyla da yırtılmaların normal kaynaklı bağlantılara göre daha geniş bir alana yayıldığı ve bu sayede çapraz-çekme yük dayanımının arttığı tahmin edilmektedir. İlave olarak kaynaklı numunelerden yapılan ölçümlerde çapraz-çekme dayanım değerlerinin, çekme-makaslama dayanım değerlerine oranla yaklaşık 3 kat daha az olduğu tespit edilmiştir. Direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak yapılan birleştirmelerde bu durumun ortaya çıkmasında test sırasında kuvvetin uygulanma şekline kaynaklandığı bilinmektedir. Hernandez [170], direnç nokta direnç kaynak

yöntemi kullanarak DP çelikleri birleştirmiş ve çapraz-çekme değerlerinin çekme-makaslama test değerlerine göre daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Chao [171]'da yapmış olduğu çalışmada, yüksek mukavemetli çelikleri DNK yöntemi ile birleştirerek kaynaklı bağlantılara çekme-makaslama ve çapraz çekme testleri uygulamıştır. Elde etmiş olduğu sonuçlara göre, çapraz-çekme dayanımının çekme-makaslama dayanımına göre daha düşük olduğunu belirtmiştir.

Sonuç olarak, çekme-makaslama test sonuçlarının çapraz-çekme test sonuçlarıyla paralellik gösterdiği ve ortaya çıkan sonuçların birbirlerini doğruladığı gözlemlenmiştir. Çekme-makaslama testinde olduğu gibi çapraz-çekme testinde de elde edilen dayanım artışları aynı doğrultuda değişmektedir. Sonuçların bu şekilde çıkmasında, fikstür tasarımlarının üretilip kaynak makinesine entegre edilmesi, kaynak parametrelerinin geliştirilen bilgisayar yazılımıyla kontrolü ve kaynak operatörünün işlem sırasında çok fazla etkili olmamasından kaynaklandığı söylenebilir.

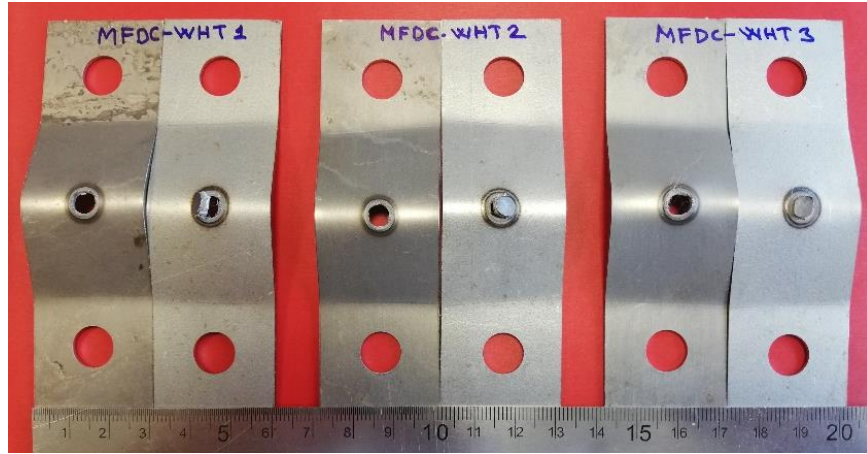
#### **6.5.3.1. Çapraz-Çekme Testi Kopma Hasar Modları**

Direnç nokta kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen numunelerin çapraz-çekme sonucunda elde edilen sayısal verilerin (mukavemet değerleri) yanısıra test sonrası oluşan kopma hasar modları da oldukça önemlidir.

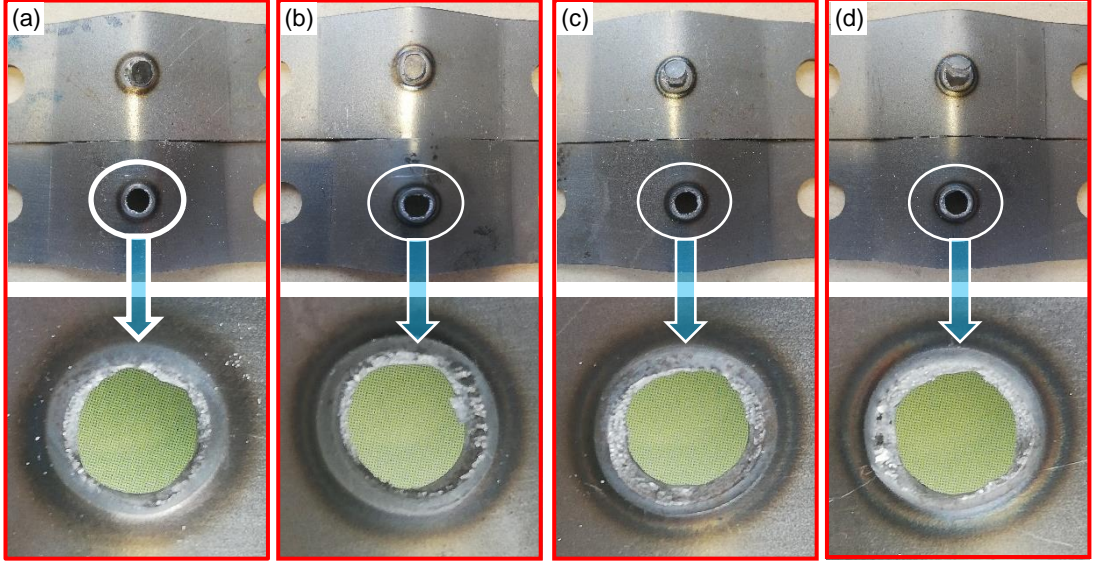
Otomotiv sektöründe çarpışma esnasında maksimum yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan çapraz-çekme testi ile imal edilen araçların güvenilirliği belirlenmekte ve sıklıkla bu yöntem kullanılmaktadır. Bu nedenle DNK'lı numunelerin çapraz-çekme testi sonrasında elde edilen kopma yüzeyleri makro olarak detaylı bir şekilde incelenmiş ve test sonrasında numunelerin kopma bölgelerinden alınan görüntüler Şekil 6.28 ve 6.29'da verilmiştir. Şekil 6.29'da verilen a) AA-normal, b) AA- BÖİ, c) OFDA-normal ve d) OFDA-BÖİ işlemlerini ifade etmektedir.

Çapraz-çekme testleri dört farklı parametrede birleştirilen kaynaklı numunelerin tümüne uygulanmış ve Şekil 6.28'de örnek olması açısından bir seride yapılan çapraz-çekme test numunelerinin tamamının (OFDA-normal) kopma görüntüleri verilmiştir.

Şekil 6.29’da ise her bir parametrede birleştirilmiş numunelerden yapılan çapraz çekme testleri sonucunda elde edilen kopma görüntüleri yer almıştır. Kopma hasar modları DNK bağlantıların tokluk ve yük taşıma kapasitelerinin tespit edilmesinde oldukça önemlidir. Şekil 6.28 ve 6.29’a bakıldığında meydana gelen tüm hasar modlarının düğmelenme şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Çapraz-çekme test sonucunda görülen düğmelenme şeklindeki hasar modları çekirdek etrafından veya ITAB’dan gerçekleştiğini ifade etmektedir. Düğmelenme hasar modunun oluşması, uygulanan kuvvet sonucunda kaynak çekirdeği etrafında çatlamanın başladığı ve kuvvetin yüklenmeye devam etmesiyle birlikte ilerlediği düşünülmektedir. Bu şekilde gerçekleşen hasar modları, kaynaklı birleştirmenin statik bir kuvvet uygulaması sonucunda yapının ayrılmaya zorlandığında gerekli mukavemeti de göstereceğini işaret etmektedir.



Şekil 6.28. OFDA-normal numunelerin kopma görüntüleri.



Şekil 6.29. Çapraz çekme test sonrası kopma yüzeyleri.

Çapraz-çekme testi sonucunda gerçekleşen kopmaların STRENX 700 CR tarafında gevrek ve yarı gevrek bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Yapı morfolojisine bakıldığında martenzit yumuşaması ve üst kritik ITAB gibi etkenlerin bu tür kopmaları tetiklediği düşünülmektedir. Bu bağlamda elde edilen çapraz-çekme sonuçlarının çekme-makaslama sonuçlarıyla paralellik gösterdiği ve bu nedenle çekme-makaslama sonucu tespit edilen optimum kaynak parametrelerinin çapraz-çekme testi sonucunda da teyit edilmiştir.

## 6.6. YORULMA TEST SONUÇLARI

Direnç nokta kaynak (DNK) yöntemi ile birleştirilen DP ve STRENX çelikleri yorulma testine tabii tutularak kaynak parametrelerinin yorulma ömürleri üzerinde oluşturmuş olduğu etkiler incelenmiştir. Farklı akım türlerinde (AA ve OFDA) gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların ileride kullanım koşullarına bağlı olarak sürekli tekrarlı yüklere maruz kalması sonucunda meydana gelebilecek süreksizliklerin (çatlak oluşumu vb.) öngörülebilmesi için, farklı yük değerlerinde (0,2, 0,3, 0,5, 0,75 kN) ve 5 Hz sabit frekans ile gerçekleştirilen yorulma test sonuçlarından elde edilen sayısal veriler Çizelge 6.4'te gösterilmiştir. Ayrıca yapılan yorulma testleri sonucunda elde edilen veriler ışığında kuvvet-ömür eğrileri oluşturulmuş ve her bir parametre için oluşturulan grafikler ayrı ayrı başlıklarda açıklanmıştır.

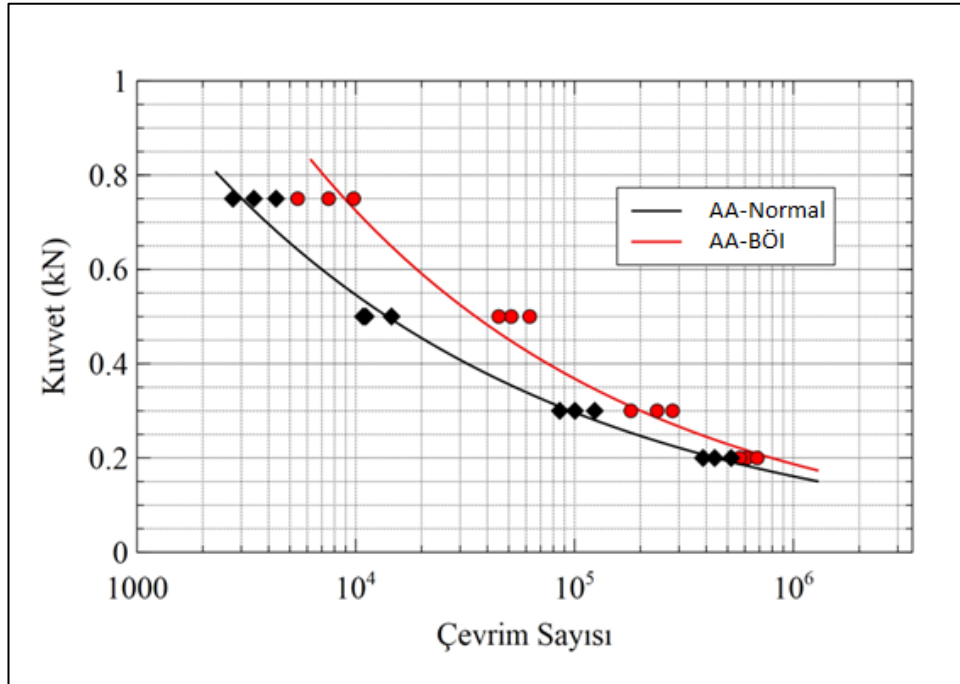


Çizelge 6.4. Kaynaklı bağlantıların yorulma test sonuçları.

Numune (No)	Kuvvet (kN)	Çevrim Sayısı Ömür				Kırılma yeri
		AA	AA+BÖİ	OFDA	OFDA+BÖİ	
1	0,75	2747	9787	4802	10219	ITAB
2	0,75	4325	5429	5468	8179	ITAB
3	0,75	3423	7522	4280	12139	ITAB
4	0,5	11113	62404	25598	45813	ITAB
5	0,5	10807	51393	18748	38954	ITAB
6	0,5	14570	45057	15880	63654	ITAB
7	0,3	100423	238428	112381	323060	ITAB
8	0,3	85609	280640	118440	356201	ITAB
9	0,3	123721	180908	102024	421654	ITAB
10	0,2	386483	612522	351483	913978	Kırılma Oluşmadı
11	0,2	436961	568432	334029	728325	Kırılma Oluşmadı
12	0,2	519968	683246	295838	1200594	Kırılma Oluşmadı

### 6.6.1. AA Birleştirmelerine Ait Yorulma Testi

Bu bölüm kapsamında alternatif akım ile gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerde gerek normal gerekse bölgesel ön ısıtma uygulanan tüm kaynak serilerinden oluşan yorulma analiz verilerine dayanılarak elde edilen kuvvet-ömür eğrileri sonuç grafiği Şekil 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6.30. AA yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.

Yukarıda verilen Şekil 6.30 incelendiğinde her iki test serilerinde de (AA normal ve AA+BÖİ) yük değerlerinin 0,2-0,75 kN aralığında olduğu ve yorulma ömürlerinin 0,75 kN'dan 0,2 kN'a doğru artarak devam ettiği görülmektedir. Ortaya çıkan bu sonucun aslında beklenen bir durum olduğu söylenebilir. Bunun nedeni ise, yorulma testi sırasında uygulanan kuvvet artışıyla birlikte kaynak bölgesine daha fazla gerilim oluşturarak deformasyon artışına sebep olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

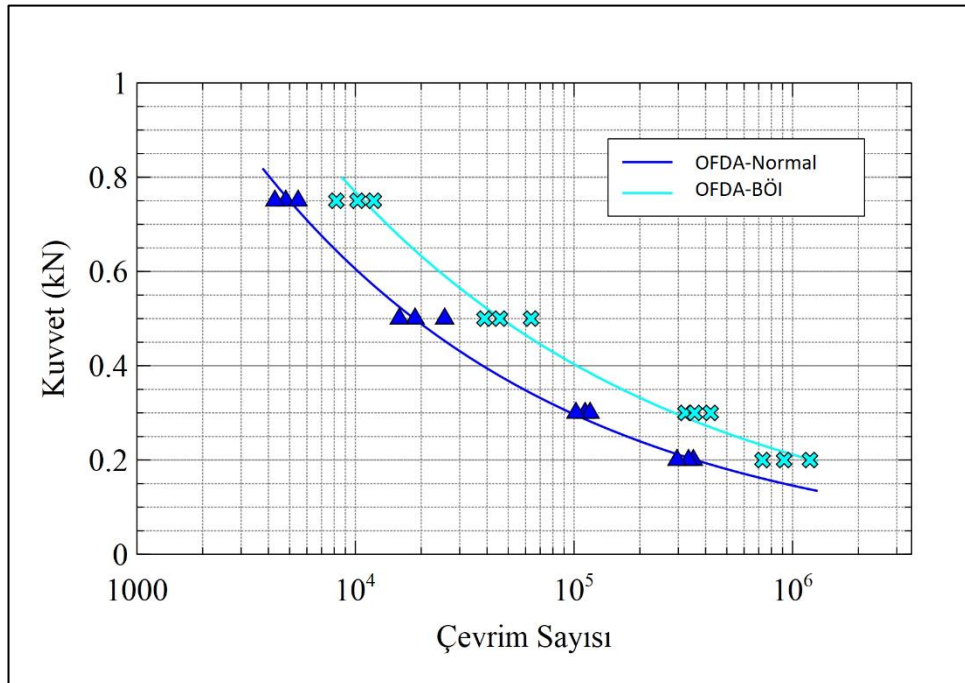
Alternatif akım (AA) kaynak formu ile normal ve bölgesel ön ısıtma (BÖİ) şeklinde üretilen numuneler birbirleri ile kıyaslandığında, Çizelge 6.4 yardımıyla elde edilen kuvvet-çevrim sayıları arasındaki ilişki değerlendirildiğinde BÖİ işlemi gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların, herhangi ek bir işlem yapılmadan yani normal bir şekilde AA ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılara oranla önemli ölçüde bir fark oluşturduğu görülmektedir. Örneğin; 0,75 kN yük değerlerindeki yorulma testi sonucunda elde edilen çevrim sayılarının ortalamalarına bakıldığında, AA-normal kaynaklı bağlantılarda 3,498 çevrim sayısına ulaşılırken bu oran AA-BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı bağlantılarda ise yaklaşık %116 artarak 7,579 çevrim sayısına ulaştığı görülmektedir. 0,2 kN yük uygulandığında elde edilen ortalama çevrim sayılarına bakıldığında, AA-normal kaynaklı bağlantılarda 1,343.362 çevrim sayısına ulaşılırken bu oran AA-BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı bağlantılarda ise yaklaşık %38,77 artarak 1,864.200 çevrim sayısına ulaşmıştır.

Sonuç olarak AA kaynak formları incelendiğinde BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının önemli ölçüde artmış olduğu görülmektedir. Yorulma dayanımındaki bu artışın yaşanılmasında en önemli nedenin kaynak bölgesindeki yapılan sertlik incelemelerinden de anlaşılacağı üzere kaynak metali ve ITAB'da kaynak sonrasında meydana gelen ve çift fazlı çeliklerde görülmesi muhtemel ITAB yumuşaması sonucunda sertlik değerlerinde azalmaların meydana gelmesi gösterilebilir. Ayrıca bölgesel ön ısıtma yapılmayan numunelerde yumuşamanın çok dar bir alanda meydana gelmesi, BÖİ uygulandığında ise bu yumuşak bölgenin genişlemesiyle test esnasında uygulanan yükün daha geniş bir alana yayılarak kaynaklı bağlantıların çevrim sayılarında önemli ölçüde bir artışa neden olduğu düşünülmektedir.

## 6.6.2. OFDA Birleştirmelerine Ait Yorulma Testi

OFDA teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların (normal ve BÖİ) yorulma testi sonucunda elde edilen sayısal verilere dayanılarak üretilen sonuç grafiği Şekil 6.31’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde AA akım türü ile gerçekleştirilen birleştirmeler ile paralellik gösterdiği görölmektedir. OFDA teknolojisinde de BÖİ işleminin kuvvet-çevrim ilişkisi incelendiğinde yük azalmasına bağlı olarak yorulma çevrim sayılarında önemli derecede artışlar olduğu belirlenmiştir.

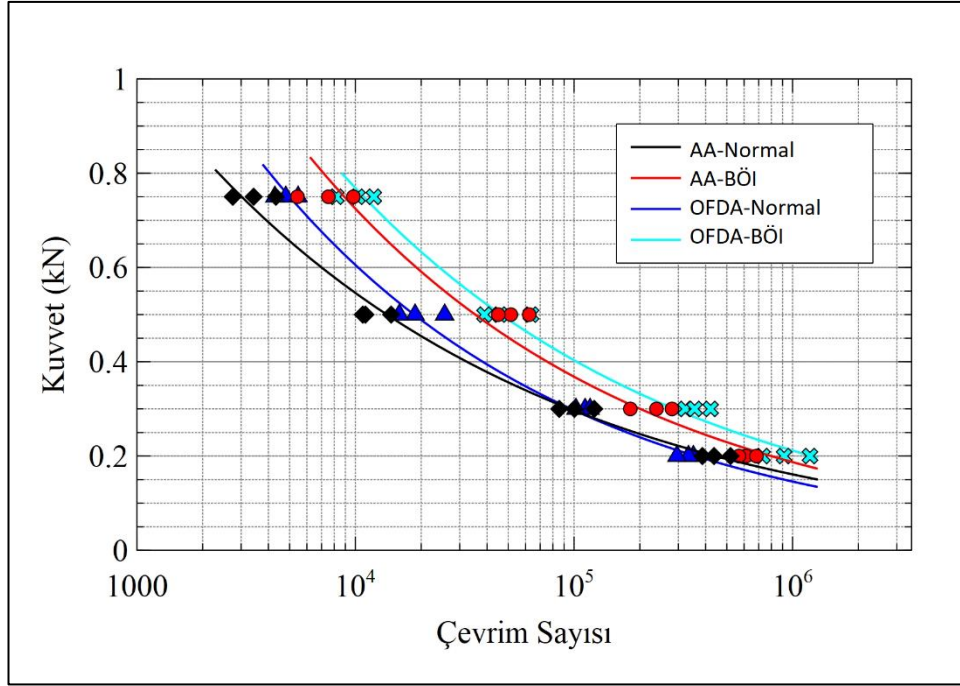
OFDA teknolojisi ile üretilen kaynaklı bağlantılar kendi aralarında incelendiğinde normal işlemlili numunelerde 0,75 kN yük altındaki ortalama çevrim sayıları 4,850 olurken bu oran BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımında %109 artarak 10,179 çevrim sayısına ulaştığı görölmektedir. Benzer Şekilde 0,2 kN yük uygulanan OFDA-normal işlemlili bağlantıların yorulma çevrim sayıları ortalaması 327,116 olurken, OFDA BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı bağlantılarda bu oran %189 artarak 947,632 çevrim sayısına ulaştığı izelge 6.4 yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 6.31. OFDA yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.

Sonuç olarak, yorulma dayanımı sırasında uygulanan kuvvetin azalmasına bağlı olarak çevrim sayılarında önemli derecede artış olduğu tespit edilmiştir. Artan çevrim sayılarının oluşmasında kaynak öncesinde bölgesel ön ısıtma işleminin etkili olduğu açıkça görölmektedir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde OFDA teknolojisinin kullanılmasıyla BÖİ işlemleri uygulanan kaynaklı bağlantıların herhangi bir işlem uygulanmayan yani normal kaynaklı bağlantılara oranla yorulma dayanımlarının yüksek çıkmasının daha önce gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sırasında görölen ve ayrıntılı olarak açıklanan ITAB'daki yumuşak bölgenin genişliğinin artmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.

AA ve OFDA teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelere uygulanan yorulma testlerini normal ve BÖİ işlemleri uygulanması sonucunda oluşan farklılıkların daha net bir şekilde anlaşılabilmesi için ve Çizelge 6.4'ten yararlanılarak elde edilen yorulma grafiğı Şekil 6.32'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde orta frekans akım teknolojisinin alternatif akım teknolojisine oranla yorulma dayanımına önemli derecede katkı sağladığı görölmektedir. Ayrıca bölgesel ön ısıtma işlemi (BÖİ) uygulanan test numunelerinin herhangi bir işlem uygulanmadan gerçekleştirilen test numunelerine oranla yorulma testinde uygulanan kuvvetin azaltılmasıyla birlikte çevrim sayılarında gözle görölr bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Bu artış sonucunda da BÖİ kaynak prosesinin kaynak işlemine olumlu bir katkı sağladığı ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.32. AA ve OFDA yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.

Yorulma testi sırasında uygulanan 0,75 kN yük altında elde edilen verilere bakıldığında ortalama çevrim sayıları; AA-normal kaynaklı bağlantıda 3.431, AA-BÖİ işlemi uygulananda 7.579, OFDA-normal işlemlide 4.850 ve son olarak OFDA-BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı bağlantılarda ise 10.179'dır. Yorulma test sonuçlarından elde edilen çevrim ömürleri dikkate alındığında OFDA-BÖİ işlemi ile birlikte diğer parametrelere oranla yaklaşık %196'lık bir artış sağlandığı tespit edilmiştir. Varılan bu sonuç ise; BÖİ etkisiyle birlikte meydana gelen ITAB'daki yumuşak bölgenin genişleyerek OFDA teknolojisinin yanında BÖİ prosesinin uygulanmasıyla ömür çevriminin arttığı düşünülmektedir.

Yukarıda verilen Şekil 6.32 genel olarak değerlendirildiğinde ise yorulma dayanım eğrilerinin bu şekilde oluşmasının nedenleri arasında birkaç faktörün etkili olduğu düşünülmektedir. AA ve OFDA teknolojilerinde BÖİ işleminin kaynak sürecine dahil olmasıyla birlikte kaynak bölgesinde meydana gelen ve daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere kaynak sonrasında görülen ITAB yumuşaması, alt kritik ve üst kritik bölgelerin sonucu olarak değerlendirilmektedir. BÖİ işlemiyle birlikte, herhangi bir işlem uygulanmayan normal kaynaklara göre ITAB'ın genişlediği tespit edilmiştir. BÖİ işleminin etkisiyle gerçekleşen etkilerin (martenzit yumuşaması gibi.) sonucunda

sertlik değerlerinde azalma meydana geldiği ve bu bağlamda yapı sünek bir davranış göstererek yorulma testi sırasında uygulanan tekrarlı kuvvetler doğrultusunda tokluk değerlerinde artış gösterdiğinden daha yüksek çevrim sayılarına ulaştığı değerlendirilmektedir.

Ordenez ve arkadaşları [172], DP980 çift fazlı çeliği direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve elde edilen kaynaklı birleştirmelere yorulma testi uygulamışlardır. Kaynak sonrasında yapı içerisinde bulunan martenzit fazının östenitleşme sıcaklığına ulaşamamasından dolayı martenzitin temperlenmesiyle yumuşak bir bölgenin oluştuğunu, oluşan yumuşak bölgenin ve aynı zamanda yumuşamaya bağlı sertlik değerlerindeki azalmanın ITAB üzerinde oluşabilecek yorulma hasarlarının iyileşmesine sebep olabileceğini ifade etmişlerdir. Ordenez ve arkadaşlarının yapmış oldukları bu çalışma, tez kapsamında uygulanan BÖI kaynak prosesi sonrasında elde edilen yorulma test sonuçlarını doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

Banarjee ve arkadaşları [173], DP590 çeliğini direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirerek kaynak çap ve geometrilerinin yorulma performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yorulma testi sonunda elde edilen sonuçlara göre; uygulanan kuvvet ve kaynak çaplarının yorulma dayanımı üzerinde etkili olduğunu aynı zamanda yetersiz yorulma dayanımlarının elde edildiği sonuçların, küçük kaynak çaplarında ve yüksek yük gerilmelerinde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Çizelge 6.4'te gösterildiği üzere 0,75 kN yük dayanımlarında en düşük yorulma ömürlerine sahip olduğu görülmekle birlikte Banerjee ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmayla benzerlik göstermektedir.

### **6.6.3. Yorulma Test Sonuçlarının Karşılaştırılması (AA ve OFDA)**

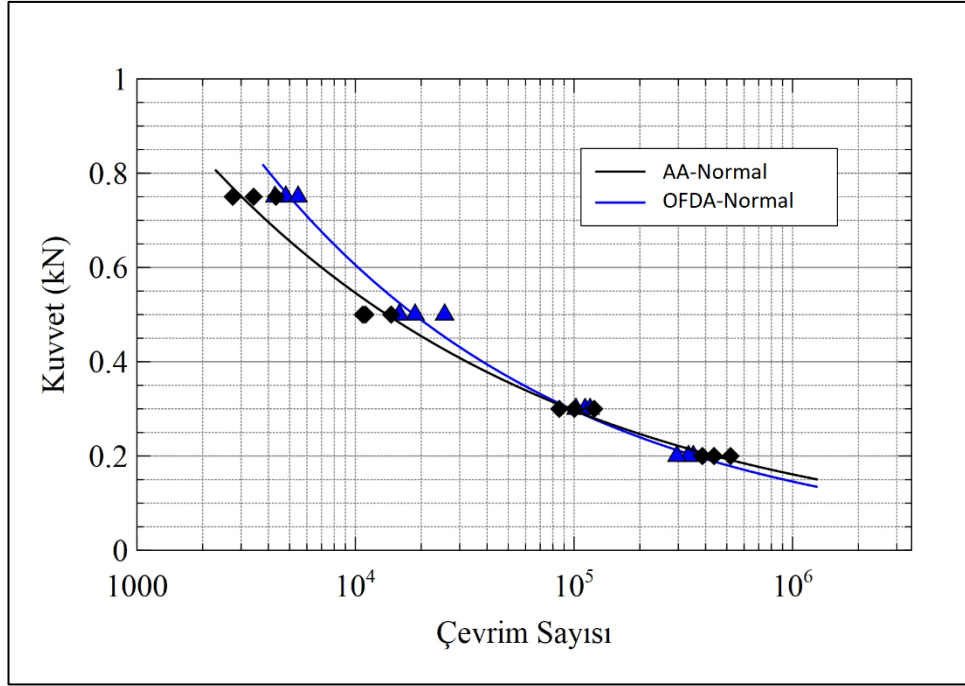
Alternatif akım (AA) ve orta frekans doğru akım (OFDA) teknolojilerinin karşılaştırılmasının yanısıra, kaynak öncesi uygulanan bölgesel ön ısıtma işleminin etkilerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 6.33 ve 6.34'te AA-OFDA (normal) ve AA-OFDA (BÖI) kaynak formlarında elde edilen numunelere ait yorulma grafikleri verilmiştir. OFDA teknolojisinin AA teknolojisine oranla daha üstün olduğu ve bu durumun yorulma dayanımına olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Bu durumun

nedeni olarak OFDA teknolojisinin AA teknolojisine kıyasla daha düşük ısı girdisi sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Her iki teknolojinin kullanımında uygulanan yüksek yük değerlerinden düşük yük değerlerine doğru gidildikçe (0,75-0,2 kN) yorulma çevrim değerlerinin arttığı net bir şekilde görülmektedir. 0,2 kN kuvvet uygulandığında AA-OFDA (normal-BÖİ) kaynaklı bağlantıların yorulma çevrim sınırlarını aştığı ve kırılmanın gerçekleşmediği belirlenmiştir.

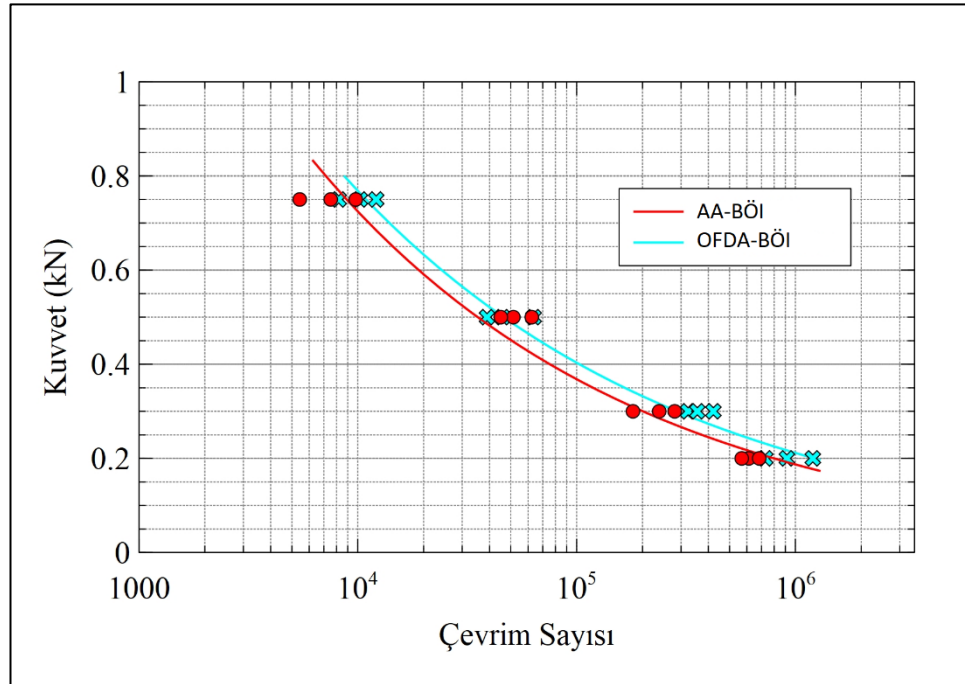
OFDA teknolojisinin yorulma ömrüne katkı sağlamasının yanında, kaynak öncesinde uygulanan BÖİ işleminin de oldukça etkin olduğu görülmektedir. BÖİ işleminin uygulanmasıyla birlikte ITAB'daki yumuşak bölgenin genişlemesine bağlı olarak ve aynı zamanda yapıda bulunan martenzit fazının ısı etkisiyle birlikte temperlenmesi sonucunda meydana yumuşamayla, sünek bir yapının var olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Kaynak sonrası meydana gelen sertlik azalmasıyla birlikte yorulma testi sırasında çatlak oluşabilmesi için daha yüksek çevrim sayılarına ulaşıldığı söylenebilir.

Ayrıca OFDA'nın AA teknolojisine göre daha düşük ısı girdisine sahip olduğundan OFDA ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların ITAB'ındaki yumuşak bölgenin en düşük sertliği AA'dan daha yüksek olduğu (OFDA normal:291 HV, AA normal:280 HV-OFDA BÖİ:287 HV ve AA BÖİ: 277 HV) bu nedenle yorulma testlerinde OFDA teknolojisi ile birleştirilen numunelerden daha yüksek yorulma dayanımı elde edildiği görülmüştür.

Farabi ve arkadaşları [174], yapmış oldukları çalışmada DP980 ve DP600 çift fazlı çelikleri kaynakla birleştirmeleri sonucunda ITAB'da meydana gelen yumuşamanın yorulma dayanımı üzerinde oldukça etkili olduğunu ve yorulma sınırının azalmasına katkı sağladığını ifade etmişlerdir. Böylece Farabi ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışma, yorulma testi sonucunda elde etmiş olduğumuz sonuçları destekler nitelikte olduğu görülmektedir.



Şekil 6.33. AA-OFDA (normal) yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.

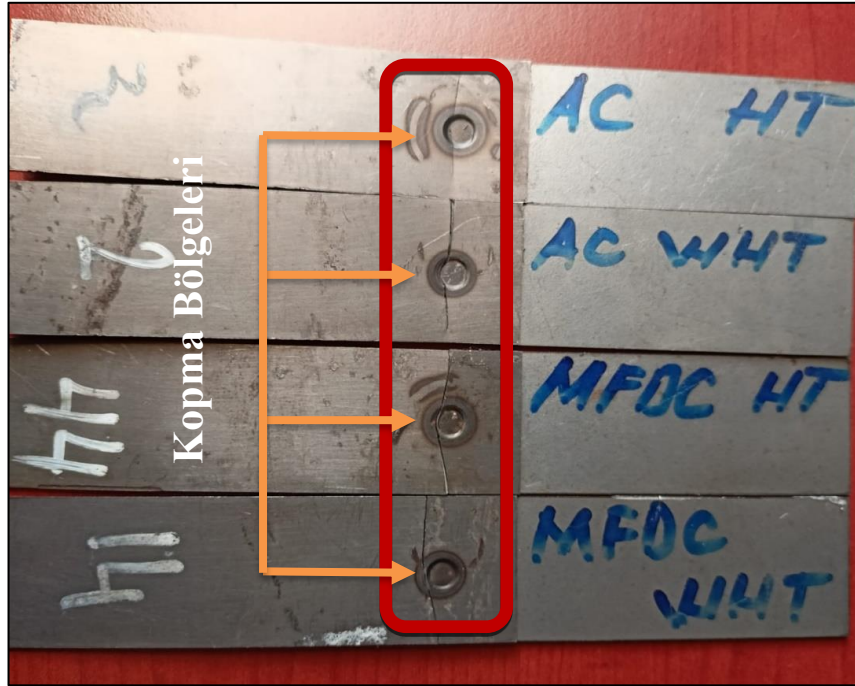


Şekil 6.34. AA-OFDA (BÖI) yorulma test verilerine ait sonuç grafiği.

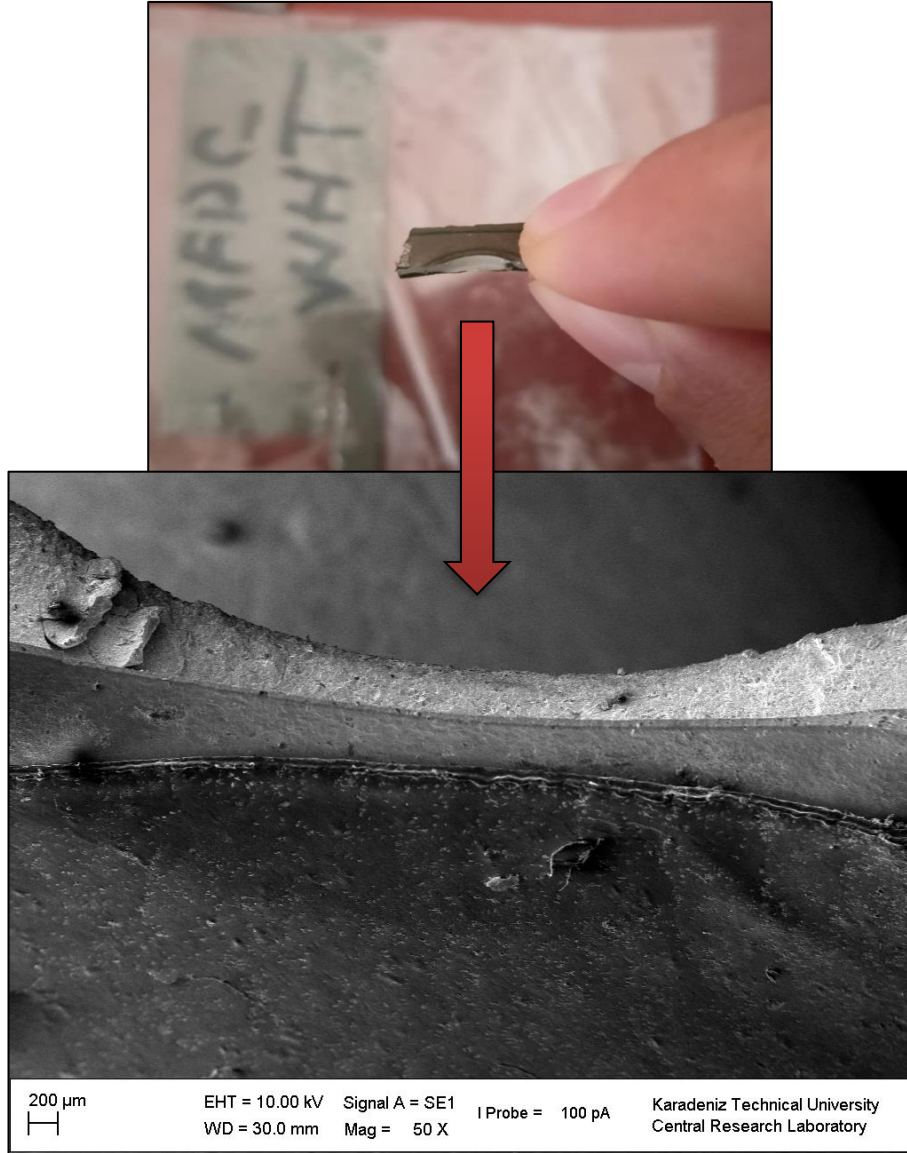


#### 6.6.4. Yorulma Testi Sonrası Kırık Yüzeylerin İncelenmesi

Yorulma dayanımı sonrasında elde edilen kopma görüntülerinin incelenmesi sonucunda, tüm kaynaklı bağlantılarda gerçekleşen kopmaların kaynak çekirdeği ve ITAB arayüzeyinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Otomotiv sektöründe gerçekleştirilen DNK çalışmalarında yorulma dayanımlarının; malzemelerin performansları ve mikroyapılarının yanısıra geometrik özelliklerinin önemli olduğu bilinmektedir [175,176]. Yorulma sonrası tespit edilen kopmaların analiz edilebilmesi için her bir numune serisinden 1 adet olmak üzere inceleme yapılmıştır. Şekil 6.35'te kaynaklı numunelere ait kopma yüzeylerinin makro görüntüsü verilirken, Şekil 6.36'da ise kopma sonrası oluşan kırık bölgeden SEM analizi için kesilip alınan parçanın makro ve SEM görüntüsü verilmiştir. Yorulma testi sırasında oluşan çatlak başlangıcının kaynak çekirdeği etrafında olduğu ve ısı etkisiyle birlikte dislokasyon yoğunluğundaki artışa bağlı olarak, oluşan çatlağın ITAB'dan devam ettiği ve daha sonra malzeme boyunca ilerlediği söylenebilir. Xu ve arkadaşları [177], DNK yöntemi ile çift fazlı çeliklerin yorulma performanslarını araştırmışlar ve yorulma çatlağının ilk olarak çekirdek etrafında başladığını tespit etmişlerdir.



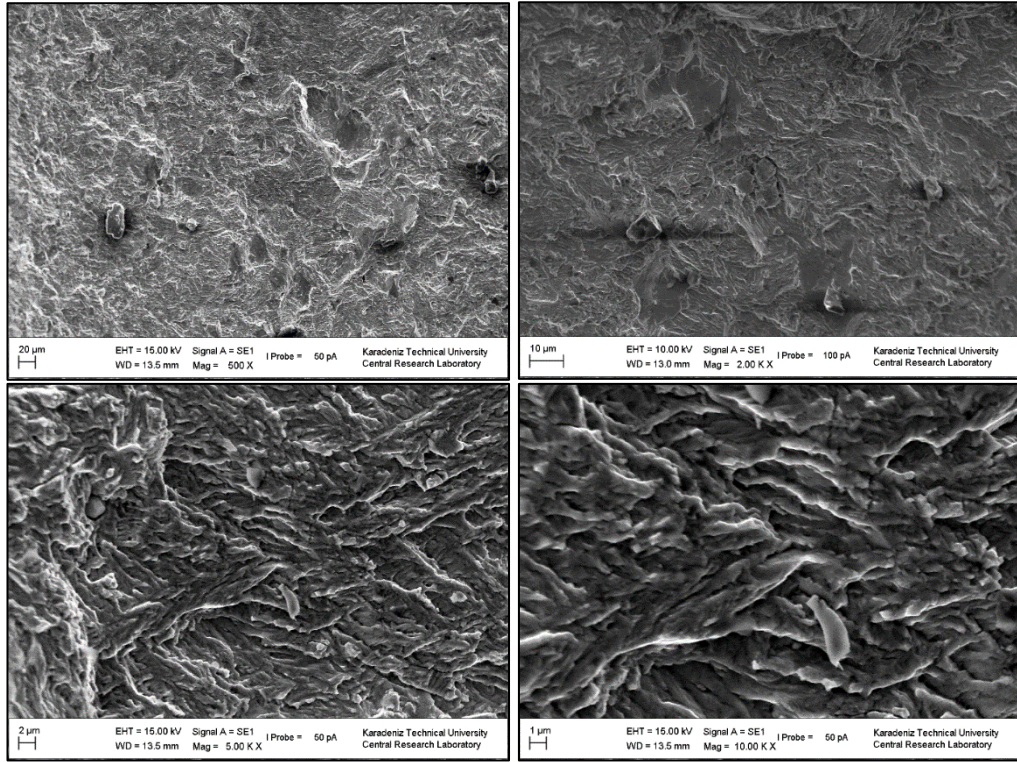
Şekil 6.35. Yorulma testi sonrası oluşan kırık yüzeylerin makro görüntüsü.



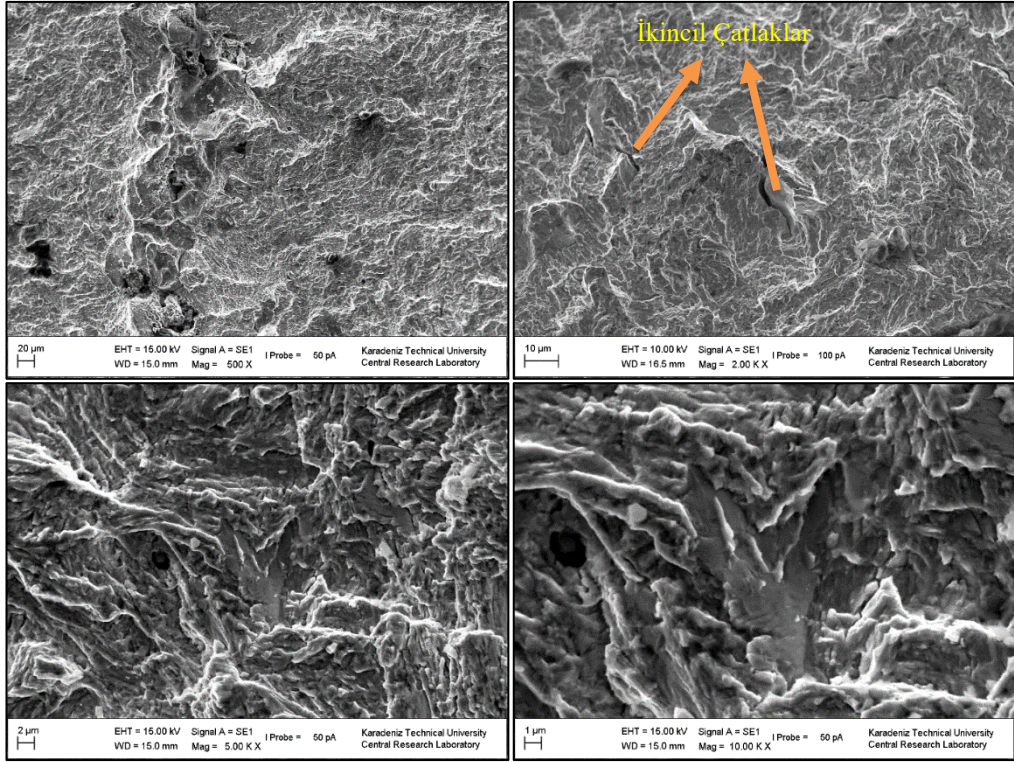
Şekil 6.36. Kopma yüzeyinden SEM analizi için alınan parça.

Şekil 6.35 incelendiğinde hem AA hem de OFDA teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin yorulma sonrasında gerçekleşen kopma şekillerinin birbirlerine çok yakın ve benzer olduğu görülmektedir. Aynı zamanda gerçekleşen tüm kırılmaların yapı içerisinde kaynak sonrasında meydana gelen kaynak çekirdeği-ITAB yumuşaması ile başladığı ve daha sonra çatlak ilerleyerek devam ettiği düşünülmektedir. Özellikle STREX 700 CR bölgesinde meydana gelen termal dönüşümlere bağlı olarak gerçekleşen sertlik azalmaları, ITAB genişlemesi ve martenzit yumuşamasının çatlak başlangıcında ve kopma şekillerinin oluşmasında büyük bir etken olduğu söylenebilir.

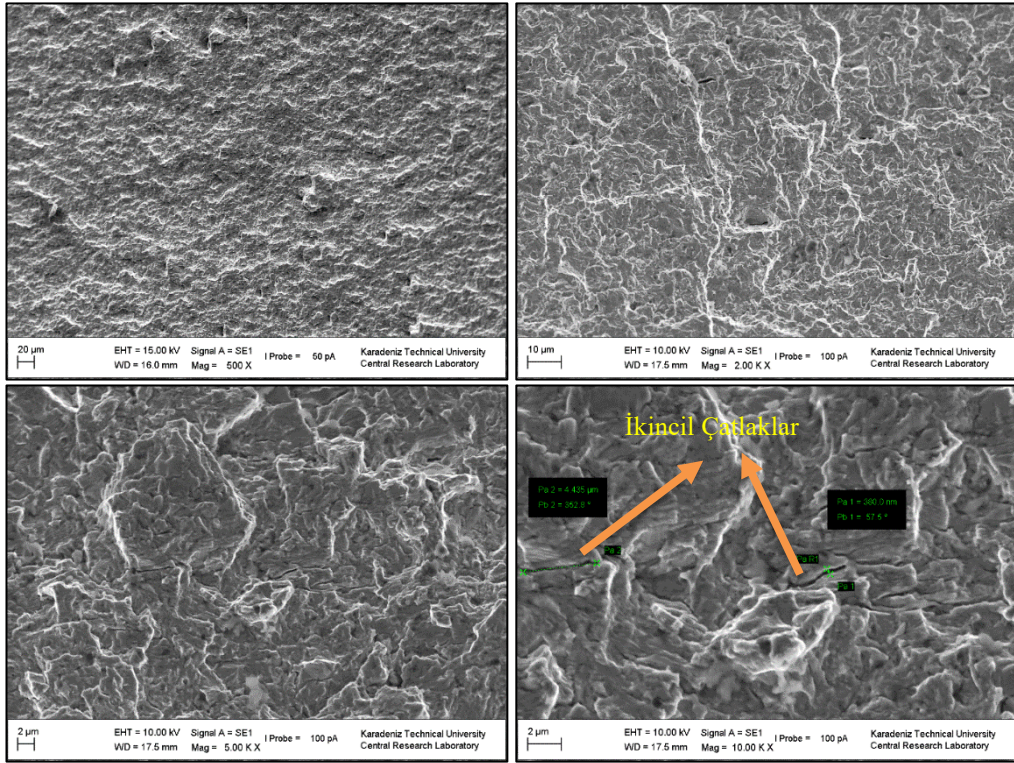
İki farklı teknoloji (AA-OFDA) ile birleştirilen kaynaklı numunelere uygulanan yorulma testi sonrasında Şekil 6.36'da görüldüğü gibi her bir test serisinden olmak üzere, kaynak bölgesinden kesilen parçaların kırık yüzeylerine SEM analizi yapılmıştır. SEM analizinin uygulanmasındaki amaç, yorulma sırasında uygulanan kuvvet sonucunda meydana gelen kopmaların yapı morfolojisini incelemektir. Bu sayede gerçekleşen kopmaların sünek, gevrek ya da sünek-gevrek geçişe sahip bir davranış sergiledikleri belirlenmektedir. Şekil 6.37 ve 6.38'de AA normal ve BÖİ işlemi uygulanan numunelere ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri verilirken, Şekil 6.39 ve 6.40'ta ise OFDA ile normal ve BÖİ işlemi uygulanan numunelere ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir.



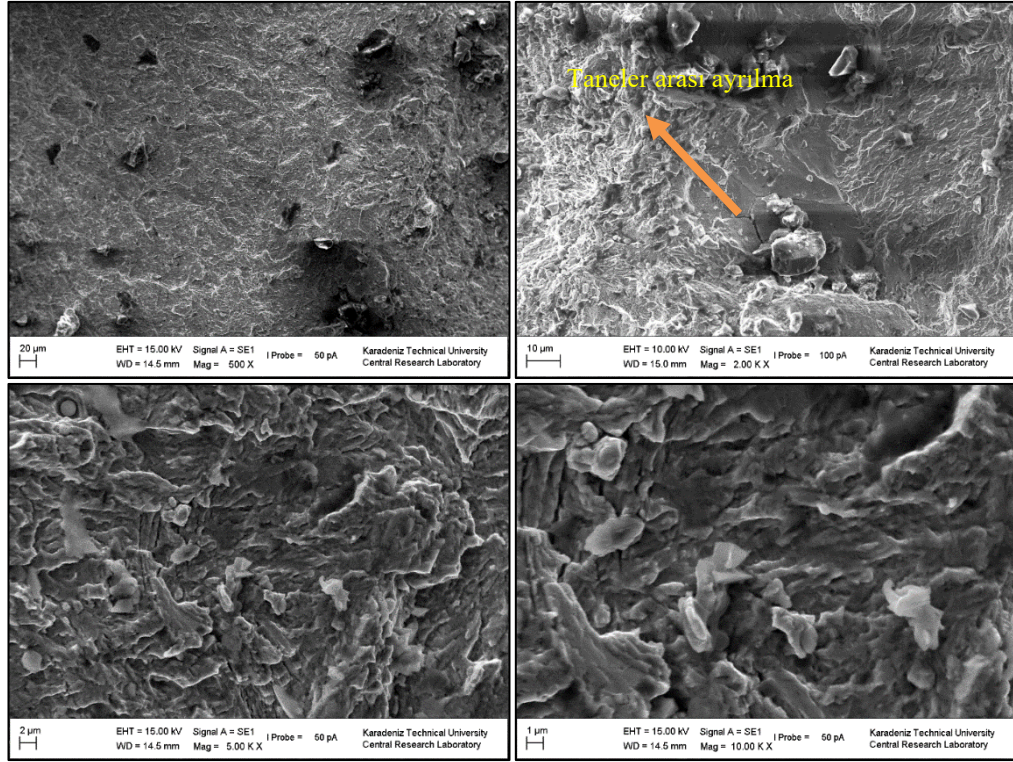
Şekil 6.37. AA-normal numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.



Şekil 6.38. AA-BÖİ uygulanan numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.



Şekil 6.39. OFDA-normal numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.



Şekil 6.40. OFDA-BÖI numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.

Yukarıda verilen SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 6.37-6.40), yorulma testi sırasında oluşan çatlakların temperlenmiş bölgeden yani STRENX 700 CR ITAB'dan başladığı, daha sonra kesit boyunca devam ederek kaba taneli ITAB ve yüzey kaplamasına kadar ulaşarak gevrek kırılmalara sebep olduğu düşünülmektedir [176]. Aynı zamanda yer yer sünek-gevrek şekilde kırılma bölgelerinin oluşması kuvvetle muhtemeldir. Literatür araştırması yapıldığında, DNK işleminden sonra ana malzemeye göre meydana gelen yorulma dayanımındaki düşüşün DNK'da meydana gelen çentik etkisi ve esas metal, ITAB ve kaynak metalinde oluşturmuş olduğu hotorejen mikroyapıdan kaynaklanmış olabileceği ifade edilmiştir [38]. Bu nedenle, yapıda meydana gelen heterojen şeklindeki mikroyapı varlığından dolayı SEM analizi için alınan bölgelerin kırılma görüntüleri farklılık gösterebilmektedir.

Holovenko ve arkadaşları [178], yapmış oldukları çalışmada yüksek mukavemetli çelikleri direnç nokta ve lazer kaynak yöntemlerini kullanarak birleştirmişlerdir. Birleştirilen kaynaklı numunelerin yorulma ömürlerini incelediklerinde DNK yönteminin lazer kaynak yöntemine göre gözle görülür bir azalma meydana geldiğini

bunun da DNK yönteminin bir sonucu olduğunu ayrıca bu azalmanın kaynak geometrisinden oluşan çentik etkisi, mikro yapıların farklı mekanik özellik göstermeleri ve ITAB'dan kaynaklandığını bildirmişlerdir.

SEM görüntülerine (Şekil 6.37-6.40) bağlı olarak yorulma kırılmaları incelendiğinde, belirli düzlemlerde atomlar arası bağların kopması şeklinde görülen ve klivaj mekanizması diye adlandırılan çatlak ilerlemelerinin olduğu düşünülmektedir. Bu ilerlemeler tane içinde veya tane sınırlarında da görülebilir. Yapıda bulunan ferrit fazının akma mukavemeti martenzit fazından daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu nedenle martenzit fazı elastik halde bulunurken ferrit fazı plastik deformasyona maruz kalmaktadır. Bu etkiyle birlikte ferritteki stress gerilimi artar ve böylelikle bölgesel olarak deformasyonlar görülebilir [179]. Sonuç olarak farklı morfolojilere bağlı olarak sünek kırılma ya da klivaj türü gevrek kırılmalar görülebilir. Şekil 6.40'ta ölçülen bir çatlağın genişliği 380  $\mu\text{m}$  iken diğer bir çatlağın uzunluğu ise 4,435  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bu bağlamda; SEM görüntülerinden bağlı yorulma kırılmalarında klivaj çatlakların meydana geldiği görülürken, örneğin Şekil 6.40'ta tane sınırlarında meydana gelen çatlakların da olabileceği görülmüştür.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışması kapsamında, otomotiv sektörü gövde imalatında sıklıkla kullanılmakta olan ve aynı zamanda yüksek mukavemetli çelikler grubunda yer alan 1,2 mm kalınlıklarında STREX 700 CR ve DP 800 malzemeler direnç nokta kaynak yöntemi (DNK) kullanılarak birleştirilmiştir. Gerçekleştirilen birleştirmelerde alternatif akım (AA) ve günümüz otomotiv sektöründe kullanımı giderek artmakta olan yeni nesil orta frekans doğru akım (OFDA) teknolojilerine sahip kaynak makineleri kullanılmıştır. Farklı akım teknolojilerinin kullanılmasındaki amaç, DP ve STREX yüksek mukavemetli çeliklerin kaynak sonrası bağlantı dayanımlarını arttırmak ve oluşabilecek kaynak performans düşüklüklerinin önüne geçebilmektir.

Yukarıda amaçlanan hedefler doğrultusunda çift fazlı çeliklerin yapısında bulunan martenzit fazına bağlı olarak ITAB’da meydana gelen sertlik artışlarının azaltılmasını sağlamak için proses içi bölgesel ön ısıtma (BÖİ) diye adlandırılan bir fikir geliştirilmiştir. Geliştirilen fikrin uygulanabilir olması için çeşitli fikstür tasarımları yapılmış ve kaynak makinesine uyarlanmıştır. Kısacası gerçekleştirilen tez kapsamında AA ve OFDA teknolojilerinin kullanılmasının yanı sıra BÖİ işlemi de sisteme dahil edilmiş ve kaynaklı test numuneleri hazırlanmıştır. Son olarak; birleştirilen kaynaklı test numunelerin mikroyapı, sertlik, çekme-makaslama, çapraz-çekme ve yorulma dayanımları incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Kaynaklı numuneler üzerinde gerçekleştirilen gözle muayene ve makro inceleme sonuçlarında, kaynak bölgesi ve çevresinde çatlak, boşluk, porozite, arayüzey fişkırması vb. kaynak hatalarına rastlanılmamıştır.

- Tüm kaynaklı numunelerin kaynak çekirdeği ve çevresine uygulanan manyetik parçacık testi sonucunda, kaynak çekirdeği ve ITAB'da sıvı metal gevrekliği hatasına rastlanılmamıştır.
- Direnç nokta kaynaklı tüm numunelerden elde edilen makro ve mikroyapı incelemelerine göre, kaynak metalinin mikroyapılarının martenzit fazından oluştuğu, ancak kaynak öncesi uygulanan BÖİ işlemi sonucunda az miktarda bölgesel beynitik yapıların da oluştuğu tespit edilmiştir.
- STRENX 700 CR çeliği ile DP 800 çeliğinin kimyasal element içerikleri ve öz direnç farklılıkları kaynak esnasındaki ergime-katılma sırasında kaynak çekirdeği üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.
- Hem AA hem de OFDA teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilen tüm kaynaklı bağlantılar incelendiğinde, DP800'e göre STRENX 700 CR tarafındaki ITAB'da değişimin daha fazla görüldüğü ve BÖİ işleminin uygulanmasıyla birlikte ITAB'ın genişlediği tespit edilmiştir.
- AA teknolojisi ile gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin STRENX 700 CR ITAB tarafında elde edilen sertlik değerlerine bakıldığında, bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işleminin uygulanmasıyla birlikte normal kaynaklı bağlantılara göre yaklaşık olarak %11,4 oranında sertlik değerlerinde bir azalma sağlandığı belirlenmiştir. Aynı değerler OFDA teknolojisinde ise, BÖİ işleminin uygulanmasıyla birlikte yaklaşık olarak %7,2 değerinde ITAB'da sertliğin azaldığı tespit edilmiş ve bu sayede gevrek bir yapıdan daha sünek bir yapıya geçişin mümkün olduğu belirlenmiştir.
- Yapılan sertlik analiz sonuçlarına göre, hem AA hem de OFDA teknolojilerine ek olarak uygulanan BÖİ işlemi ile kritik altı ITAB diye adlandırılan yumuşak bölge sertliğinin çok fazla bir değişikliğe uğramadığı fakat Ac<sub>1</sub>- ve Ac<sub>3</sub> aralığındaki üst kritik ITAB'ın sertliği azalarak daha homojen bir yapının oluşmasına katkı sağladığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda AA teknolojisine göre OFDA teknolojisinde ısı girdisi daha az olduğundan dolayı hızlı soğumaya bağlı olarak kritik altı ITAB'ın sertliği daha yüksek çıktığı belirlenmiştir.



- AA teknolojisi kullanılarak birleştirilen numunelerin çekme-makaslama dayanım sonuçları kendi aralarında incelendiğinde, AA bölgesel ön ısıtma işlemi uygulanan numunelerde yaklaşık % 4,2 dayanım artışı sağlanırken, OFDA ile birleştirilen numunelerde BÖİ işleminin devreye alınmasıyla birlikte normal kaynaklı bağlantılara göre % 6,7'lik bir dayanım artışı sağlandığı tespit edilmiştir.
- Kaynaklı bağlantıların çapraz-çekme dayanımları incelendiğinde, AA bölgesel ön ısıtma (BÖİ) işlemi uygulanan numunelerin AA normal kaynaklı numunelere oranla çapraz-çekme dayanımlarının yaklaşık olarak % 8,7 kN arttığı belirlenirken, OFDA BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı numunelerin OFDA normal kaynaklı numunelere oranla çapraz-çekme dayanımlarında yaklaşık % 5,3 kN'luk bir artış sağlandığı tespit edilmiştir.
- Akım teknolojileri değiştirilerek çapraz-çekme sonuç kıyaslamaları yapıldığında, OFDA-normal kaynaklı birleştirmelerin AA-normal birleştirmelere oranla % 13 kN, OFDA-BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı birleştirmelerin AA-BÖİ işlemi uygulanan kaynaklı birleştirmelere göre çapraz-çekme dayanımlarında yaklaşık % 9,3 kN'luk bir dayanım artışı sağladığı tespit edilmiştir.
- Çekme-makaslama ve çapraz-çekme dayanım sonuçlarına bakıldığında, AA ve OFDA teknolojilerinin yanında BÖİ işleminin uygulanmasıyla genişleyen ITAB nedeniyle, kaynaklı bağlantılara uygulanan kuvvet sonrasında deformasyonun daha geniş bir alana yayıldığı ve bu sayede çekme-makaslama ve çapraz-çekme dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.
- Çekme-makaslama ve çapraz-çekme testi sonrasında meydana gelen kopma hasar modları incelendiğinde, tüm kaynaklı bağlantıların düğmelenme şeklinde koptuğu ve gerçekleşen kopmaların kaynak çekirdeği ile STRENX 700 CR ITAB arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Yorulma testi sonrasında tüm kaynaklı bağlantıların 0,2 kN yük değerinde kritik çevrim sayısına ulaştığı ve bu yük değerinde AA-normal kaynaklı bağlantıların

ortalama 1.343.362 çevrim sayısına ulaşılırken bu oran AA-BÖI işlemlerinde yaklaşık % 38,77 artarak 1.864.200 olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde 0,2 kN yük değerindeki OFDA-normal kaynaklı bağlantıların ortalama yorulma dayanım çevrimleri 327.116 olurken, OFDA-BÖI işlemlerinde bu oran % 189 artarak 947.632 çevrim sayısına ulaştığı belirlenmiştir.

- AA ve OFDA teknolojilerine ek olarak bölgesel ön ısıtma (BÖI) işleminin uygulanmasıyla birlikte tüm kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarında önemli bir artışın sağlandığı görülmüştür. Bunun sebebinin kaynak öncesi sadece ITAB'a uygulanan ön ısıtma işleminin kaynak çekirdeği ve çevresinde soğuma hızını düşürdüğü, dolayısıyla da ITAB'da mevcut yumuşak bölgeyi genişleterek tekrarlı yüklerin keskin bir nokta yerine daha geniş bir alana yayılmasıyla kaynaklı bağlantıların çevrim sayılarında önemli ölçüde artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen bilimsel veriler ışığında gelecekte benzer konularda çalışma yapacak araştırmacılara aşağıda verilen öneriler yapılabilir.

- BÖI işlemi uygulayan elektrodun çapları ve uygulama sıcaklık ve süreleri değiştirilerek optimum parametreler belirlenebilir.
- Araştırmacılar için diğer bir öneri ise, kaynak öncesinde ITAB'a uygulanan sıcaklık değeri artırılarak daha geniş bir ITAB'ın elde edilmesi sağlanabilir. Bu sayede kaynak metali ve özellikle ITAB'ın sertlik değerlerinde daha homojen bir dağılımın olmasını sağlayarak yorulma dayanımlarına karşı bir direnç oluşturacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Kaya, Y., "Titanium Sacların Nokta Direnç Kaynağı İle Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-112 (2010).
2. Hayat, F., "TRIP Çeliklerinin Otomotiv Endüstrisinde Kullanımının İncelenmesi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 25 (4): 701–712 (2010).
3. Ovalı, C. K., "TRIP800 / DP 800 / DP600 Çeliklerinin Lazer Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-74 (2014).
4. Hayat, F. and Ovalı, C. K., "Investigation of laser welding mechanical properties of high strength steels", **International Symposium on Multidisciplinary Studies**, 59-68 (2017).
5. Ch.Darabi, A., Chamani, H. R., Kadkhodapour, J., Anaraki, A. P., Alaie, A., and Ayatollahi, M. R., "Micromechanical analysis of two heat-treated dual phase steels: DP 800 and DP980", **Mechanics Of Materials**, 110: (2017).
6. Rajarajan, C., Sivaraj, P., Seeman, M., and Balasubramanian, V., "Influence of electrode force on metallurgical studies and mechanical properties of resistance spot welded dual phase (DP800) steel joints", **Materials Today: Proceedings**, 22: (2020).
7. Chabok, A., van der Aa, E., Basu, I., de Hosson, J., and Pei, Y., "Effect of pulse scheme on the microstructural evolution, residual stress state and mechanical performance of resistance spot welded DP1000-GI steel", **Science And Technology Of Welding And Joining**, 23 (8): (2018).
8. Movahed, P., Kolahgar, S., Marashi, S. P. H., Pouranvari, M., and Parvin, N., "The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets", **Materials Science And Engineering: A**, 518 (1–2): (2009).
9. Hıdıroğlu, M., Kahraman, Ü., and Kahraman, N., "The effect of AC and MFDC resistance spot welding technology on mechanical properties of new generation automotive steels", **Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences**, 27 (4): (2021).
10. Hayat, F. and Uzun, H., "Effect of Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Ship and Dual Phase Steels", **Journal Of Iron And Steel Research International**, 18 (8): 65–72 (2011).

11. Toros, S., "TRIP800 Çeliğinin Şekillendirme Kabiliyetinin İncelenmesi ve Modellenmesi", Doktora Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 1-243 (2013).
12. Liang, J., Zhao, Z., Wu, H., Peng, C., Sun, B., Guo, B., Liang, J., and Tang, D., "Mechanical Behavior of Two Ferrite-Martensite Dual-Phase Steels over a Broad Range of Strain Rates", *Metals*, 8 (4): (2018).
13. Kılıç, S., Öztürk, F., and Toros, S., "DP 800 çeliğinin Mekanik Özelliklerinin ve Geri Esneme Davranışının İncelenmesi", *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 11 (1): 40–45 (2009).
14. Kleiner, M., Geiger, M., and Klaus, A., "Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming", *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 52 (2): (2003).
15. Kleiner, M., Chatti, S., and Klaus, A., "Metal forming techniques for lightweight construction", *Journal of Materials Processing Technology*, 177: 2–7 (2006).
16. Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M., and Sterzing, A., "Sheet Metal Forming at Elevated Temperatures", *Annals of The Cirp*, 55 (2): (2006).
17. Zhang, X. Y., Zhang, Y. S., and Chen, G. L., "Research on Weldability for Dual-Phase Steels Using Servo Gun Spot Welding System", *Key Engineering Materials*, 353–358: (2007).
18. Shao, J. and Hou, C., "Resistance Spot Welding and In-Process Heat Treatment of Hot Stamped Boron Steel", *Master's Thesis*, Waterloo of University, Ontario, Canada, (2016).
19. Steinbeiss, H., So, H., Michelitsch, T., and Hoffmann, H., "Method for optimizing the cooling design of hot stamping tools", *Production Engineering*, 1 (2): (2007).
20. Internet: <https://www.ssab.com/products/brands/docol/products/docol-800dp> (2022)
21. Aras, S., Ertan, R., and Özgül, H. G., "Investigation of mechanical properties of high strength steel welded by resistance spot welding", *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences*, 24 (1): (2018).
22. Kalashami, A. G., Kermanpur, A., Najafizadeh, A., and Mazaheri, Y., "Development of a high strength and ductile Nb-bearing dual phase steel by cold-rolling and intercritical annealing of the ferrite-martensite microstructures", *Materials Science And Engineering: A*, 658: (2016).
23. Schmitt, J. H. and Iung, T., "New developments of advanced high-strength steels for automotive applications", *Comptes Rendus Physique*, 19 (8): (2018).
24. Aydın, H., Tuncel, O., Karpuz, M., ve Aydın, Ö., "Otomotiv endüstrisinde kullanılan DP450 ve DP 800 saçlarında deformasyon hızının ve haddeleme

- yönünün çekme özelliklerine etkisi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1): 323-335 (2019).
25. Saha, D. C., Han, S., Chin, K. G., Choi, I., and Park, Y.-D., "Weldability Evaluation and Microstructure Analysis of Resistance-Spot-Welded High-Mn Steel in Automotive Application", *Steel Research International*, 83 (4): 352–357 (2012).
  26. Göktaş, M., "Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilmiş DP1000 Çeliğinin Farklı Yüklerdeki Yorulma Ömrüne Korozif Ortamın Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, 1-127 (2020).
  27. Van Der Aa, E. M., Amirthalingam, M., Winter, J., Hanlon, D. N., Hermans, M. J. M., Rijnders, M., and Richardson, I. M., "Improved Resistance Spot Weldability Of 3 Rd Generation AHSS For Automotive Applications", *11 th International Seminar On Numerical Analysis Of Weldability, Graz, Austria*, (2015)
  28. Tisza, M., "Development of Advanced High Strength Automotive Steels", *Acta Materialia Transylvanica*, 4 (1): 9–17 (2021).
  29. Zhang, X., Chen, G., Zhang, Y., and Lai, X., "Improvement of resistance spot weldability for dual-phase (DP600) steels using servo gun", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (5): 2671–2675 (2009).
  30. Garcia, C. I., "High Strenght Low Alloyed (HSLA) Steels", Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications, Rana, R. and S. S. B., *Woodhead Publishing Is An Imprint Of Elsevier*, United Kingdom, 145–167 (2017).
  31. López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A., Muñoa, J., Salgado, M. A., and Sánchez, J. A., "Improving the high-speed finishing of forming tools for advanced high-strength steels (AHSS)", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 29 (1–2): 49–63 (2006).
  32. Soomro, I. A., Pedapati, S. R., and Awang, M., "A review of advances in resistance spot welding of automotive sheet steels: emerging methods to improve joint mechanical performance", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, (2021).
  33. Ertek Emre, H., "TRIP800 Çeliğinin Nokta Direnç Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-198 (2016).
  34. Hall, J. N. and Fekete, J. R., "Steels for auto bodies", Automotive Steels, *Elsevier*, 19–45 (2017).
  35. Raid Fekreddine, M. and Tisza, M., "Third generation of advanced high strength sheet steels for the automotive sector: A literature review", *Multidisziplináris Tudományok*, 11 (4): 241–247 (2021).

36. Selova, L., "Üçlü Sac Elektrik Direnç Nokta Kaynak Birleştirmelerinde Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 1-59 (2019).
37. Aslan, H., "DP 800 Çelik Sacların Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Hasar Modunun Tespiti", Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 1-104 (2017).
38. Elitaş, M., "Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen İleri Dayanımlı Otomotiv Sac Çeliklerinin Yorulma Davranışlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-166 (2018).
39. He, H., Forouzan, F., Volpp, J., Robertson, S. M., and Vuorinen, E., "Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Welded DP Steels Used in the Automotive Industry", **Materials**, 14 (2): 456 (2021).
40. Ebrahimi, F., Saeidi, N., and Raeissi, M., "Microstructural Modifications of Dual-Phase Steels: An Overview of Recent Progress and Challenges", **Steel Research International**, 91 (10): 2000178 (2020).
41. Öztürk, E., "Tailor-Welded Saclarda Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin Mikro ve Makro Boyutta İncelenmesi", Doktora Tezi, **Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 1-143 (2021).
42. Frómeta, D., Cuadrado, N., Rehrl, J., Suppan, C., Dieudonné, T., Dietsch, P., Calvo, J., and Casellas, D., "Microstructural effects on fracture toughness of ultra-high strength dual phase sheet steels", **Materials Science And Engineering: A**, 802: 140631 (2021).
43. Balisetty, V., Chakkingal, U., and Venugopal, S., "Evaluation of stretch flangeability of dual-phase steels by hole expansion test", **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, 114 (1–2): 205–217 (2021).
44. Lesch, C., Kwiaton, N., and Klose, F. B., "Advanced High Strength Steels (AHSS) for Automotive Applications – Tailored Properties by Smart Microstructural Adjustments", **Steel Research International**, 88 (10): 1700210 (2017).
45. Matlock, D. K., Speer, J. G., de Moor, E., Wang, J., and Gibbs, P. J., "Recent Developments In Advanced High Strength Sheet Steels For Automotive Applications: An Overview", **JESTECH**, 15 (1): 1–12 (2012).
46. Alemdar, F. E., "DP ve STREX Çeliklerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Sakarya, 1-48 (2021).
47. Dwivedi, S. K. and Vishwakarma, M., "Effect of hydrogen in advanced high strength steel materials", **International Journal Of Hydrogen Energy**, 44 (51): 28007–28030 (2019).

48. Cora, O. N., "Development of Rapid Die Wear Test Method For Assessment Of Die Life And Performance In Stamping Of Advanced/Ultra High Strength Steel (A/UHSS) Sheet Materials", Degree Of Doctor, *Virginia Commonwealth University*, Virginia, 1-175 (2009).
49. Badkoobeh, F., Mostaan, H., Rafiei, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., and Berto, F., "Microstructural Characteristics and Strengthening Mechanisms of Ferritic–Martensitic Dual-Phase Steels: A Review", *Metals*, 12 (1): 101 (2022).
50. Wang, J., Li, W., Zhu, X., You, L., and Zhang, L., "Characterization of the Trace Phosphorus Segregation and Mechanical Properties of Dual-Phase Steels", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 35 (2): 341–352 (2022).
51. Wang, J., Li, W., Zhu, X., and Zhang, L., "Effect of martensite morphology and volume fraction on the low-temperature impact toughness of dual-phase steels", *Materials Science And Engineering: A*, 832: 142424 (2022).
52. Basantia, S. K., Singh, V., Bhattacharya B, N Khutia, A., and Das, D., "Prediction of Tensile Behaviour of Ferrite-Martensite Dual Phase Steel using Real Microstructure-based RVE Simulations", *Materials Today: Proceedings*, 5: 18275–18280 (2018).
53. Sezgin, C. T., "Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Elektron Işın Kaynağının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-98 (2016).
54. Belgasam, T., "Multiscale Modeling And Simulation Of The Mechanical Behavior Of The Dual Phase Steels: Parametric Study And Microstructure Optimization", PhD Thesis, *Washington State University*, Washington, (2017).
55. Kumar, S., Kumar, A., Vinaya, Madhusudhan, R., Sah, R., and Manjini, S., "Mechanical and Electrochemical Behavior of Dual-Phase Steels Having Varying Ferrite–Martensite Volume Fractions", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 28 (6): 3600–3613 (2019).
56. Scott, C. P., Shalchi Amirkhiz, B., Pushkareva, I., Fazeli, F., Allain, S. Y. P., and Azizi, H., "New insights into martensite strength and the damage behaviour of dual phase steels", *Acta Materialia*, 159: 112–122 (2018).
57. Alharbi, K., "Damage Investigation in Dual-Phase 1000 Steel and Behaviour Prediction Using Microstructure Based Modelling", *Phd Thesis*, The Universty Of Sheffield, England, 1-183 (2015).
58. Tasan, C. C., Diehl, M., Yan, D., Bechtold, M., Roters, F., Schemmann, L., Zheng, C., Peranio, N., Ponge, D., Koyama, M., Tsuzaki, K., and Raabe, D., "An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure-Oriented Processing and Micromechanically Guided Design", *Annual Review Of Materials Research*, 45 (1): 391–431 (2015).

59. Madrid, M., "Hole Expansion Performance And The Resistance To Crack Propagation In High Strength DP And QP Steels", Degree Of Master Of Science, *Colorado School of Mines*, Colorado, (2018).
60. Bezobrazov, Y. A., Kolbasnikov N G, and Naumov A A, "High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling", *Materials Science And Technology*, 7 (11): 1054–1061 (2012).
61. Ennis, B. L., Jimenez-Melero, E., Atzema, E. H., Krugla, M., Azeem, M. A., Rowley, D., Daisenberger, D., Hanlon, D. N., and Lee, P. D., "Metastable austenite driven work-hardening behaviour in a TRIP-assisted dual phase steel", *International Journal Of Plasticity*, 88: 126–139 (2017).
62. Kurc-Lisiecka, A., Piwnik, J., and Lisiecki, A., "Laser Welding of New Grade of Advanced High Strength Steel STRENX 1100 MC", *Archives Of Metallurgy And Materials*, 62 (3): 1651–1657 (2017).
63. Internet: STRENX çeliklerine genel bakış, <https://www.ssab.com.tr/markalar-ve-urunler/STRENX> (2022).
64. Schmidová, E., Bozkurt, F., Culek, B., Kumar, S., Kuchariková, L., and Uhrčík, M., "Influence of Welding on Dynamic Fracture Toughness of STRENX 700MC Steel", *Metals*, 9 (5): 494 (2019).
65. Internet: Fosil yakıtsız çelik, <https://www.ssab.com.tr/fossil-free-steel> (2022)
66. Laarich, A., "Designing a Heat Treatment to Achieve Ductile Advanced High Strength Steels", Master, *Luleå University of Technology*, Lulea, SWEDEN, (2020).
67. Goritskii, V. M., Shneiderov, G. R., and Guseva, I. A., "Study of Impact Toughness Anisotropy and Tendency Towards Lamination of STRENX 650 MC and STRENX 700 MC Steels After Thermomechanical Rolling", *Metallurgist*, 62 (7–8): 753–765 (2018).
68. Prochenka, P., Makowska, K., and Janiszewski, J., "Assessment of Mechanical Properties of Laser Beam Welded Joints Made of Steel STRENX S700MC Subjected to High Impact Load", *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2018 (2): 51–60 (2018).
69. Trško, L., Lago, J., Jambor, M., Nový, F., Bokůvka, O., and Florková, Z., "Microstructure and residual stress analysis of STRENX 700 MC welded joint", *Production Engineering Archives*, 26 (2): 41–44 (2020).
70. Ulewicz, R. and Novy, F., "Fatigue life of high strength steel for cold forming", *Metalurgija*, 56: 115–118 (2017).
71. Gallina, B., Volcanoglo Biehl, L., Braz Medeiros, J. L., and de Souza, J., "The influence of different heat treatment cycles on the properties of the steels HARDOX® 500 and STRENX® 700", *Revista Liberato*, 67–74 (2020).



72. İnternet: STRENX ve Hardox çeliklerin daha iyi kaynaklanabilirliği için el kitabı, <https://www.ssab.com/-/media/Handbooks/Welding%20Handbook/ssab-welding-handbook-ed2.pdf> (2022).
73. Kurc-Lisiecka, A., "Impact toughness of laser-welded butt joints of the new steel grade STRENX 1100MC", *Materiali In Tehnologije*, 51 (4): 643–649 (2017).
74. Sepe, R., Bollino, F., Caiazzo, F., and Berto, F., "Stress corrosion cracking behavior of welding joint of high strength steel", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1038 (1): 012055 (2021).
75. İnternet: Yüksek mukavemetli yapısal çelikler, <https://www.damatech.com/en/Prehardened-steel/STRENX> (2022).
76. İnternet: STRENX çelik, <https://www.abraservice.com.tr/materials/high-strength-steel/STRENX#downloads> (2022).
77. İnternet: STRENX çeliklerin özellikleri ve kullanım alanları, <https://www.asinmazcelik.com/STRENX.html> (2022).
78. Satoshi, I. and Masaru, M., "Development of Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) and High Performance Steels in JFE Steel", *JFE Tech.*, 26, 1-7 (2021).
79. Bozkurt Fatih, "Dynamic Fracture Behaviour Of High Strength Steels", *Phd. Thesis*, University of Pardubice, Pardubice, 18-120, (2018).
80. Nishioka, K. and Ichikawa, K., "Progress in thermomechanical control of steel plates and their commercialization", *Science And Technology Of Advanced Materials*, 13 (2): 023001 (2012).
81. Komizo, Y.-I., "Status & Prospects of Shipbuilding Steel and Its Weldability", *Transactions Of JWRI*, 36: 1–6 (2007).
82. İnternet: STRENX çelikleri, <https://tosec.nl/nl/wiki/STRENX/> (2022).
83. İnternet: STRENX çelikleri ve Docol, <https://sezginsac.com/index.php/sac-cesitleri/30-docol-kapak-saci/71-docol-1000-dp-STRENX-700-cr> (2022).
84. Rajarajan, C., Sivaraj, P., and Balasubramanian, V., "Microstructural Characteristics and Load Carrying Capability of Resistance Spot Welded Dual Phase (DP800) Steel Joints", *Journal Of Advanced Microscopy Research*, 13 (2): 198–203 (2018).
85. Sun, X., Stephens, E. v., and Khaleel, M. A., "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions", *Engineering Failure Analysis*, 15 (4): 356–367 (2008).

86. Yaghoobi, F., Jamaati, R., and Aval, H. J., "Resistance spot welding of high-strength DP steel and nano/ultrafine-grained IF steel sheets", *Materials Chemistry And Physics*, 281: 125909 (2022).
87. By X. Sun, E. V. Stephens, and M. A. Khaleel, "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high-strength steel spot welds", *Welding Journal*, 86 (1): 18–25 (2007).
88. Verma, R., Arora, K. S., Sharma, L., and Chhibber, R., "Experimental investigation on resistance spot welding of dissimilar weld joints", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, 235 (2): 505–513 (2021).
89. Rajarajan, C., Sivaraj, P., and Balasubramanian, V., "Microstructural analysis of weld nugget properties on resistance spot-welded advanced high strength dual phase ( $\alpha+\alpha$ ) steel joints", *Materials Research Express*, 7 (1): 016555 (2020).
90. Ch.Darabi, A., Chamani, H. R., Kadkhodapour, J., Anaraki, A. P., Alaie, A., and Ayatollahi, M. R., "Micromechanical analysis of two heat-treated dual phase steels: DP 800 and DP980", *Mechanics Of Materials*, 110: 68–83 (2017).
91. Aydin, K., Hidiroglu, M., and Kahraman, N., "Characterization of the Welding Zone of Automotive Sheets of Different Thickness (DP600 and DP800) Joined by Resistance Spot Welding", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 75(5), (2022).
92. Bhattacharya, D., Cho, L., Ghassemi-Armaki, H., van der Aa, E., Pichler, A., Findley, K. O., and Speer, J. G., "Quantitative Assessment Of The Characteristics Of Liquid Metal Embrittlement During Resistance Spot Welding Of Zn-Coated High-Strength Steels", *Sheet Metal Welding Conference XVIII*, Livonia, 1-10, (2018).
93. Aslanlar, Y. S., Özsaraç, U., Kekik, M., Barlas, Z., Aslan, H., and Aslanlar, S., "The Effect of Welding Parameters on Tensile-Shear Force of Resistance Spot Welded Dissimilar Dual-Phase Steels", *19th International Metallurgy and Materials Congress*, 1-3, (2018).
94. Rajarajan, C., Sivaraj, P., Sonar, T., Raja, S., and Mathiazhagan, N., "Resistance spot welding of advanced high strength steel for fabrication of thin-walled automotive structural frames", *Forces In Mechanics*, 7: 100084 (2022).
95. Rajarajan, C., Sivaraj, P., and Balasubramanian, V., "An Empirical Relationship For Estimating Metallurgical And Mechanical Behavior Of Resistance Spot Welded DP 800 Steel Joints", *Journal Of Manufacturing Engineering*, 14 (2): (2019).
96. Rajarajan, C., Sivaraj, P., and Balasubramanian, V., "Role of Welding Current on Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of Resistance Spot Welded Dual Phase Steel Joints", *Physics Of Metals And Metallography*, 121 (14): 1447–1454 (2020).

97. Korzeniowski, M., Białobrzeska, B., and Maciejewska, M., "Effect of Steel Grades on Technological Properties of Spot Welds", *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2017 (5): 73–80 (2017).
98. Chabok, A., van der Aa, E., de Hosson, J. T. M., and Pei, Y. T., "Mechanical behavior and failure mechanism of resistance spot welded DP1000 dual phase steel", *Materials & Design*, 124: 171–182 (2017).
99. Chabok, A., Galinmoghaddam, E., de Hosson, J. T. M., and Pei, Y. T., "Micromechanical evaluation of DP1000-GI dual-phase high-strength steel resistance spot weld", *Journal Of Materials Science*, 54 (2): 1703–1715 (2019).
100. Elitas, M. and Demir, B., "The Effects of the Welding Parameters on Tensile Properties of RSW Junctions of DP1000 Sheet Steel", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8 (4): 3116–3120 (2018).
101. Marconi, C. D., Castillo, M. J., Consigli, C. F., and Svoboda, H. G., "Optimizaci3n del proceso RSW para acero DP 1000", *Mat3ria (Rio De Janeiro)*, 23 (2): (2018).
102. Uzun, A., "Elektrik Direnç Nokta Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, 1-64 (2022).
103. Olgun, H., "SX700-CR Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Tokluk Dayanımlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, 1-70 (2022).
104. Hıdıroğlu, M., "Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Yüksek ve Ultra Yüksek Dayanımlı Otomotiv Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, 1-149 (2022).
105. Çalışoğlu, İ., "Tiçari Olarak Temin Edilen ve %10 Soğuk Deforme Edilen Erdemir 7660 Kalite Dual Fazlı Çeliğin Nokta Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 1-117 (2009).
106. Bayraktar, E., Kaplan, D., and Grumbach, M., "Application of impact tensile testing to spot welded sheets", *Journal Of Materials Processing Technology*, 153–154: 80–86 (2004).
107. Yang, Y. S. and Lee, S. H., "A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications", *Journal Of Materials Processing Technology*, 94 (2–3): 151–156 (1999).
108. Ferik, E., "TWIP-DP Yeni Nesil Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Hasar Modunun Belirlenmesi", Doktora Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, 1-111 (2019).

109. Demirkesen, A., "Otomotiv Gövdesinde Kullanılan JAC270C VE JAC590R Sac Levha Malzemelerin Nokta Direnç Kaynağının Mukavemet Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-48 (2020).
110. Kahraman, N. and Gülenç, B., "Modern Kaynak Teknolojisi", *Epa-Mat Basımevi*, Ankara, 160–184 (2020).
111. Anik, S., "Kaynak Teknolojisi El Kitabı", Gedik Eğitim Vakfı. Ed., 1–250 (2020).
112. Kahraman, N., "The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets", *Materials & Design*, 28 (2): 420–427 (2007).
113. Aslanlar, S., Ogur, A., Ozsarac, U., and Ilhan, E., "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding", *Materials & Design*, 29 (7): 1427–1431 (2008).
114. Miller, C. C. E., "The Joining of Advanced High Strength Steels using Resistance Spot Welding", *PhD Thesis*, Swensea Universty, Swensea, 1-134 (2008).
115. Aslanlar, S., Ogur, A., Ozsarac, U., Ilhan, E., and Demir, Z., "Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding", *Materials & Design*, 28 (1): 2–7 (2007).
116. Aydın, M. and Gülenç, B., "Elektro ve Sıcak Daldırma Metodlarıyla Galvaniz Kaplanmış Çelik Saclarının Paslanmaz Çeliğe Direnç Kaynağı İle Kaynaklanabilirliği", *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 179–187 (2003).
117. Ertek Emre, H. and Kaçar, R., "Resistance Spot Weldability of Galvanize Coated and Uncoated TRIP Steels", *Metals*, 6 (12): 299 (2016).
118. Wan, X., Wang, Y., and Zhang, P., "Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 214 (11): 2723–2729 (2014).
119. Hayat, F., "Çift-Fazlı Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağında MHO ile Kaynak Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-86 (2005).
120. Zhang, Y. S., Zhang, X. Y., Lai, X. M., and Chen, G. L., "Online quality inspection of resistance spot welded joint based on electrode indentation using servo gun", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 12 (5): 449–454 (2007).
121. Cho, Y., Li, W., and Hu, S. J., "Design of experiment analysis and weld lobe estimation for aluminum resistance spot welding", *Supplement To The Welding Journal*, 45–51 (2006).

122. Manladan, S. M., Yusof, F., Ramesh, S., Fadzil, M., Luo, Z., and Ao, S., "A review on resistance spot welding of aluminum alloys", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 90 (1–4): 605–634 (2017).
123. Muhammad, N., Manurung, Y. H. P., Hafidzi, M., Abas, S. K., Tham, G., and Haruman, E., "Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM", *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 26 (8): 2365–2370 (2012).
124. Aslanlar, S., "The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry", *Materials & Design*, 27 (2): 125–131 (2006).
125. Xing, B., "Monitoring and characterization of abnormal process conditions in resistance spot welding", *PhD. Thesis*, Australian National University, Canberra, 1-149 (2018).
126. Zhang, X. Q., Chen, G. L., and Zhang, Y. S., "Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels", *Materials & Design*, 29 (1): 279–283 (2008).
127. Emre, H. E. and Kaçar, R., "Development of weld lobe for resistance spot-welded TRIP800 steel and evaluation of fracture mode of its weldment", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (9–12): 1737–1747 (2016).
128. Sun, H. T., Lai, X. M., Zhang, Y. S., and Shen, J., "Effect of variable electrode force on weld quality in resistance spot welding", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 12 (8): 718–724 (2007).
129. Zhang, X., Chen, G., Zhang, Y., and Lai, X., "Improvement of resistance spot weldability for dual-phase (DP600) steels using servo gun", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (5): 2671–2675 (2009).
130. Xinmin, L., Xiaoyun, Z., Yansong, Z., and Guanlong, C., "Weld Quality Inspection Based on Online Measured Indentation From Servo Encoder in Resistance Spot Welding", *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 56 (4): 1501–1505 (2007).
131. Li, W., Cerjanec, D., and Grzadzinski, G. A., "A Comparative Study of Single-Phase AC and Multiphase DC Resistance Spot Welding", *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, 127 (3): 583–589 (2005).
132. Özensoy, C., "Yazılım Kontrollü Orta Frekanslı DA Nokta Kaynak Sistemi Tasarımı ve Gerçeklenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 1-152 (2021).
133. Zhang, H. and Senkara, J., "Resistance Welding", *CRC Press*, (2011).

134. Kang, Z., "Development of an Online Quality Control System for Resistance Spot Welding", PhD Thesis, *The Hong Kong University of Science and Technology*, Hong Kong, (2012).
135. Gong, L. and Liu, C., "Dynamic Power Factor Measurement in A.C. Resistance Spot Welding with Embedded ANN", *2006 IEEE International Conference On Industrial Informatics*, 1183–1188 (2006).
136. Zhou, K. and Yao, P., "Simulation of a uniform energy control strategy of single-phase AC resistance spot welding", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (5–8): 1771–1779 (2018).
137. Li, Y. B., Li, Y. T., Shen, Q., and Lin, Z. Q., "Magnetically Assisted Resistance Spot Welding Of Dual-Phase Steel", *Welding Journal*, 92 (4): 124–132 (2013).
138. Liao, X., Wang, X., Guo, Z., Wang, M., Wu, Y., and Rong, Y., "Microstructures in a resistance spot welded high strength dual phase steel", *Materials Characterization*, 61 (3): 341–346 (2010).
139. Yavuz, B., "Nokta Direnç Kaynağında Isıl Ve Yapısal Analizlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-47 (2015).
140. Doruk, E., "Bir Binek Araç Gövdesindeki Çelik Sacların Direnç Nokta Kaynaklı Birleştirmelerinin Yorulma Dayanımlarının Parametrik Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-89 (2018).
141. Tamizi, M., Pouranvari, M., and Movahedi, M., "Welding metallurgy of martensitic advanced high strength steels during resistance spot welding", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 22 (4): 327–335 (2017).
142. Abdelmotagaly, A., "High Entropy Alloy Interlayers For Mitigation Of Liquid Metal Embrittlement In Galvannealed Advanced High Strength Steel Welds", Master Thesis, *Colorado School of Mines*, Colorado, 1-115 (2020).
143. Rezayat, H., "The Role of Heterogeneous Constitutive Properties on Mechanical Behavior of Advanced High Strength Steel Spot Welds", Doktora Tezi, *The University of Tennessee*, Knoxville, 1-115 (2019).
144. Soomro, I. A., Pedapati, S. R., and Awang, M., "Influence of in situ postweld heat treatment on microstructure and failure behavior of dual-phase steel resistance spot weld", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 114 (11–12): 3739–3750 (2021).
145. Huh, D., "Electrode Life and Weldability Improvement in Resistance Spot Welding of DP600", Master Thesis, *University of Waterloo*, Waterloo, 1-105 (2017).

146. Tumuluru, M., "Resistance spot weld performance and weld failure modes for dual phase and TRIP steels", Failure Mechanisms of Advanced Welding Processes, *Woodhead Publishing*, 43–64 (2010).
147. Niu, S., Lou, M., Ma, Y., Yang, B., Shan, H., and Li, Y., "Resistance rivet welding of magnesium/steel dissimilar materials", *Materials Letters*, 282: 128876 (2021).
148. Siar, O., Dancette, S., Dupuy, T., and Fabrègue, D., "Impact of liquid metal embrittlement inner cracks on the mechanical behavior of 3 generation advanced high strength steel spot welds", *Journal Of Materials Research And Technology*, 15: 6678–6689 (2021).
149. Pouranvari, M. and Marashi, S. P. H., "Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 18 (5): 361–403 (2013).
150. Pouranvari, M., "Susceptibility to interfacial failure mode in similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 dual phase steel and low carbon steel during cross-tension and tensile-shear loading conditions", *Materials Science And Engineering: A*, 546: 129–138 (2012).
151. Pouranvari, M. and Marashi, S. P. H., "Failure of resistance spot welds: tensile shear versus coach peel loading conditions", *Ironmaking & Steelmaking*, 39 (2): 104–111 (2012).
152. Pouranvari, M., Marashi, S. P. H., and Safanama, D. S., "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part II: Experimental investigation and model validation", *Materials Science And Engineering: A*, 528 (29–30): 8344–8352 (2011).
153. Ma, Y., Yu, Y., Geng, P., Ihara, R., Maeda, K., Suzuki, R., Suga, T., and Ma, N., "Fracture modeling of resistance spot welded ultra-high-strength steel considering the effect of liquid metal embrittlement crack", *Materials & Design*, 210: 110075 (2021).
154. Tumuluru, M., "Effect of Silicon and Retained Austenite on the Liquid Metal Embrittlement Cracking Behavior of GEN3 and High-Strength Automotive Steels", *Welding Journal*, 98 (12): 351s–364s (2019).
155. Frei, J. and Rethmeier, M., "Susceptibility of electrolytically galvanized dual-phase steel sheets to liquid metal embrittlement during resistance spot welding", *Welding In The World*, 62 (5): 1031–1037 (2018).
156. Lee, H., Jo, M. C., Sohn, S. S., Kim, S.-H., Song, T., Kim, S.-K., Kim, H. S., Kim, N. J., and Lee, S., "Microstructural evolution of liquid metal embrittlement in resistance-spot-welded galvanized TWinning-Induced Plasticity (TWIP) steel sheets", *Materials Characterization*, 147: 233–241 (2019).

157. Başer, T. A., "Resistance Spot Welding of Zn-Coated Third Generation Automotive Steels Using Mid-Frequency Direct Current Technology", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, Article in Press (2022).
158. Ramachandran, D. C., Figueredo, B., Sherepenko, O., Jin, W., Park, Y.-D., and Biro, E., "A study on improving the mechanical performance by controlling the halo ring in the Q&P 980 steel resistance spot welds", *Journal Of Manufacturing Processes*, 75: 320–330 (2022).
159. Nikoosohbat, F., Kheirandish, S., Goodarzi, M., Pouranvari, M., and Marashi, S. P. H., "Microstructure and failure behaviour of resistance spot welded DP980 dual phase steel", *Materials Science And Technology*, 26 (6): 738–744 (2010).
160. Pouranvari, M., Sobhani, S., and Goodarzi, F., "Resistance spot welding of MS1200 martensitic advanced high strength steel: Microstructure-properties relationship", *Journal Of Manufacturing Processes*, 31: 867–874 (2018).
161. Baltazar Hernandez, V. H., Panda, S. K., Kuntz, M. L., and Zhou, Y., "Nanoindentation and microstructure analysis of resistance spot welded dual phase steel", *Materials Letters*, 64 (2): 207–210 (2010).
162. Wang, X. P., Zhang, Y.Q., Ju, J. bin, and Zhang, J. Q., "Characteristics of Welding Crack Defects and Failure Mode in Resistance Spot Welding of DP780 Steel", *Journal of Iron and Steel Research*, 23 (10): 1104–1110 (2016).
163. Lin, H. C., Hsu, C. A., Lee, C. S., Kuo, T. Y., and Jeng, S. L., "Effects of zinc layer thickness on resistance spot welding of galvanized mild steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 251: 205–213 (2018).
164. Kaya, Y. and Kahraman, N., "The effects of electrode force, welding current and welding time on the resistance spot weldability of pure titanium", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 60 (1–4): 127–134 (2012).
165. Pouranvari, M. and Marashi, S. P. H., "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors", *Materials Science And Engineering: A*, 528 (29–30): 8337–8343 (2011).
166. Betiku, O. T., Shojaee, M., Sherepenko, O., Midawi, A. R. H., Chertov, A. M., Ghassemi-Armaki, H., Maev, R. G., and Biro, E., "Optimizing post-weld performance of press-hardened steel resistance spot welds by controlling fusion zone porosity", *Welding In The World*, 66 (9): 1733–1746 (2022).
167. Marashi, P., Pouranvari, M., Sanaee, S. M. H., Abedi, A., Abootalebi, S. H., and Goodarzi, M., "Relationship between failure behaviour and weld fusion zone attributes of austenitic stainless steel resistance spot welds", *Materials Science And Technology*, 24 (12): 1506–1512 (2008).
168. Jing, Y., Xu, Y., Wang, D., Lu, L., Li, J., and Yu, Y., "Improving mechanical properties of welds through tailoring microstructure characteristics and fracture



- mechanism in multi-pulse resistance spot welding of Q&P980 steel", *Materials Science And Engineering: A*, 843: 143130 (2022).
169. Wang, H., Kasuya, T., Kondo, T., and Inoue, J., "An integrated approach for numerically predicting the failure of resistance spot welds", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 27 (4): 229–237 (2022).
  170. Baltazar Hernandez, V. H., "Effects of Martensite Tempering on HAZ-Softening and Tensile Properties of Resistance Spot Welded Dual-Phase Steels", *PhD. Thesis*, University of Waterloo, Ontario, 1-155 (2010).
  171. Chao, Y. J., "Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Shear Loads", *Journal Of Engineering Materials And Technology*, 125 (2): 125–132 (2003).
  172. Ordoñez, J. H., Ambriz, R. R., García, C., Plascencia, G., and Jaramillo, D., "Overloading effect on the fatigue strength in resistance spot welding joints of a DP980 steel", *International Journal Of Fatigue*, 121: 163–171 (2019).
  173. Banerjee, P., Sarkar, R., Pal, T. K., and Shome, M., "Effect of nugget size and notch geometry on the high cycle fatigue performance of resistance spot welded DP590 steel sheets", *Journal Of Materials Processing Technology*, 238: 226–243 (2016).
  174. Farabi, N., Chen, D. L., and Zhou, Y., "Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints", *Journal Of Alloys And Compounds*, 509 (3): 982–989 (2011).
  175. Hilditch, T. B., Speer, J. G., and Matlock, D. K., "Effect of susceptibility to interfacial fracture on fatigue properties of spot-welded high strength sheet steel", *Materials & Design*, 28 (10): 2566–2576 (2007).
  176. Akkuş, A. and Vural, M., "Nokta kaynaklı farklı çelik sacların yorulma dayanımlarının deneysel analizi", *İTÜ Dergisi*, 6 (1): 37–46 (2007).
  177. Xu, J., Zhang, Y. S., Xinmin, L., and Chen, G. L., "Experimental investigation of fatigue performance of spot welded dual phase sheet steels", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 13 (8): 726–731 (2008).
  178. Holovenko, O., Ienco, M. G., Pastore, E., Pinasco, M. R., Matteis, P., Scavino, G., and Firrao, D., "Microstructural and mechanical characterization of welded joints on innovative high-strength steels", *La Metallurgia Italiana*, 3: 3–12 (2013).
  179. Uzun, H. and Hayat, F., "Investigation of Producabil of Dual-Phase Steel From Grade A Ship Plate Steel", *IATS'09*, 1-6 (2009).

## ÖZGEÇMİŞ

Kemal AYDIN ilk, orta ve lise öğrenimini TRABZON’da tamamlamıştır. 2004 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi bölümü, Metal Öğretmenliği programında Lisans eğitime başlamış ve 2008 yılında mezun olmuştur. 2011 yılında ise Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi anabilim dalında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. Özel şirketlerde kalite kontrol mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2013 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon bölümünde öğretim elemanı olarak çalışmaya başlamış ve halen aynı görevine devam etmektedir.