T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TWIP-DP YENİ NESİL ÇELİKLERİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Erman FERİK

Enstitü Anabilim Dalı	**:**	**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı	**:**	**Prof. Dr. Salim ASLANLAR**

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TWIP-DP YENİ NESİL ÇELİKLERİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Erman FERİK

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 14/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. **Salim ASLANLAR** **Jüri Başkanı**	**Prof. Dr.** **Uğur ÖZSARAÇ** **Üye**	**Dr. Öğr. Üyesi** **Faruk VAROL** **Üye**
Dr. Öğr. Üyesi **Volkan ONAR** **Üye**	**Dr. Öğr. Üyesi** **Emre DORUK** **Üye**	

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Erman Ferik

14/06/2019

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, başta tez danışmanım Prof. Dr. Salim ASLANLAR olmak üzere, Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ'a, Doç. Dr. Faruk VAROL'a teşekkürlerimi sunarım.

Ermetal A.Ş. firmasına, ayrıca Ermetal A.Ş. çalışanları Serdar AKTAŞ ve Ceyhun ADIYAMAN'a teşekkür ederim. Laboratuar olanakları için Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Başta İbrahim KUŞAT olmak üzere doktora eğitimim boyunca desteklerini benden esirgemeyen arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her zaman gördüğüm annem Halime FERİK'e, babam Turgut FERİK'e ve kardeşim Erdem FERİK'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
KISALTMALAR ..... **vi**
SİMGELER ..... **vii**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **viii**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xv**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**

BÖLÜM 2.
TWIP ÇELİKLERİ **3**
2.1. Giriş 3
2.2. TWIP Çelikleri 3
2.3. Mikroyapı 4
2.4. Mekanik Özellikler 4
2.4.1. Deformasyon modu 6
2.5. Alaşım Elementlerinin TWIP Çeliklerine Olan Etkileri 7
2.6. TWIP Çeliğinin Kullanıldığı Alanlar 7

BÖLÜM 3.
ÇİFT FAZLI ÇELİKLER **9**
3.1. Giriş 9
3.2. Çift Fazlı Çelikler 9
3.3. Mikroyapı 9
3.4. Çift Fazlı Çeliklerin Üretimi ve Isıl İşlemi 11
3.5. Çift Fazlı Çeliklerde Alaşım Elementleri 12
3.5.1. Karbon (C) 13
3.5.2. Mangan (Mn) 13
3.5.3. Silisyum (Si), Molibyum (Mo) ve Krom (Cr) 13
3.5.4. Mikro alaşım elementleri 14
3.5.5. Kalıntı elementler 14

3.6. Çift Fazlı Çeliklerin Kullanım Alanları 14

BÖLÜM 4.
ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI 16
4.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağının Prensibi 16
4.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Isı Oluşumu 17
4.3. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Kabiliyeti 19
4.4. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Bağlantı Kalitesi Parametreleri 20
4.4.1. Kullanılan kaynak eletrodu türü ve üretildiği malzeme türü 21
4.4.2. Kullanılan kaynak elektrodunun baskı kuvveti 21
4.4.3. Kullanılan kaynak akım şiddeti 22
4.4.4. Kullanılan kaynak zamanı 23
4.5. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Bağlantı Kalitesi 23
4.5.1. Kaynağın mekanik ve performans özellikleri 24
4.5.2. Kaynağın geometrik ve fiziksel özellikleri 24
4.6. Kaynak Eğrisi Grafiği 26

BÖLÜM 5.
LİTERATÜR ÇALIŞMASI 27
5.1. Giriş 27
5.2. Çift Fazlı Çeliklerin Direnç Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi Çalışmaları 27
5.3. TWIP Çeliklerin Direnç Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi Çalışmaları 36

BÖLÜM 6.
DENEYSEL ÇALIŞMALAR 42
6.1. Giriş 42
6.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler 42
6.3. Deney Parçalarının Hazırlanması 43
6.4. Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makinesi 44
6.5. Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Elektrotları 45
6.6. Ön Deneyler 46
6.7. Deneylerin Uygulanması 46
6.8. Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz Çekme Deneyleri 48
6.9. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskopu ile Yapılan Çalışmalar 51
6.10. Çekirdek Boyutlarının Tespiti 52
6.11. Sertlik Değerlerinin Ölçümü 53

BÖLÜM 7.
DENEYSEL SONUÇLAR 55
7.1. Giriş 55
7.2. TWIP-DP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz Çekme Dayanımına Etkisi 55
7.2.1. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-makaslama dayanımına etkisi 56

7.2.2. TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımına etkisi 57
7.2.3. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi 61
7.2.4. TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi 62
7.2.5. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çapraz çekme dayanımına etkisi 63
7.2.6. TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çapraz çekme dayanımına etkisi 64
7.3. TWIP-DP bağlantılarda Kaynak Değişkenlerinin Çekirdek Boyutlarına Etkisi 65
7.3.1. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi 65
7.3.2. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının çekirdek yüksekliğine etkisi 66
7.3.2.1. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin TWIP çeliğinde oluşan kaynak çekirdeği yüksekliğine etkisi 66
7.3.2.2. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin DP çeliğinde oluşan kaynak çekirdeği yüksekliğine etkisi 68
7.3.2.3. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin TWIP-DP kaynaklı birleştirmelerde oluşan toplam kaynak çekirdeği yüksekliğine etkisi 69
7.3.3. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının çekirdek boyut oranına etkisi 70
7.4. TWIP-DP Bağlantılarda Kaynak Değişkenlerinin Dalam Derinliğine Etkisi 71
7.4.1. TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının ve kaynak akım şiddetinin elektrot dalma derinliğine etkisi 71
7.4.1.1. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin TWIP çeliğinde oluşan elektrot dalma derinliğine etkisi 71
7.4.1.2. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin DP çeliğinde oluşan elektrot dalma derinliğine etkisi 73
7.4.1.3. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin TWIP-DP çeliğinde kaynaklı birleştirmede oluşan toplam elektrot dalma derinliğine etkisi 74
7.5. TWIP-DP Bağlantıların Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Çekirdek Boyutlarının Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz Çekme Dayanımına Etkisi 75
7.5.1. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi 75
7.5.2. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi 77
7.5.3. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi 78
7.5.4. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi 80
7.5.5. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi 81

7.5.6. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi 83
7.5.7. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çapraz çekme dayanımına etkisi 84
7.5.8. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çapraz çekme dayanımına etkisi 86
7.5.9. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çapraz çekme dayanımına etkisi 87
7.6. TWIP-DP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Elektrot Dalma Derinliğinin Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz Çekme Dayanımına Etkisi 89
7.6.1. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında elektrot dalma derinliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi 89
7.6.2. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında elektrot dalma derinliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi 90
7.6.3. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında elektrot dalma derinliğinin çapraz çekme dayanımına etkisi 92
7.7. Kaynak Değişkenlerinin Bağlantıların Sertlik Değerlerine Etkisi 93
7.7.1. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak değişkenlerinin sertlik değerlerine etkisi 94
7.7.2. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetlerinin sertlik değerlerine etkisi 97
7.8. TWIP-DP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynaklı Birleştirmelerin Mikroyapısına Etkisi 99
7.8.1. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak değişkenlerinin bağlantıların mikroyapısına etkisi 99
7.9. TWIP-DP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında SEM Görüntüleri 101
7.10. TWIP-DP Bağlantıların Makroyapı İncelemesi 105
7.10.1. TWIP-DP bağlantıların makroyapı fotoğrafları 105
7.11. Bağlantıların Kaynak Eğrisi (Weld Lobe) 107
7.11.1. Elektrik direnç nokta kaynağında TWIP-DP sac çiftlerine ait kaynak eğrisi (Weld Lobe) 107

BÖLÜM 8.
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 108
8.1. Sonuçların İrdelenmesi ve Öneriler 108
8.2. Konuyla İlgili İleride Yapılabilecek Çalışmalar 110

KAYNAKLAR 112

EKLER 120

ÖZGEÇMİŞ 165

KISALTMALAR

A	: Amper
ASTM	: The American Society for Testing and Materials
AWS	: American Welding Society
BH	: Bake Hardening
cm	: Santimetre
cycle	: Çevrim
d_{ind}	: Elektrot Dalma Derinliği (mm)
dn	: Kaynak çekirdek çapı (mm)
DP	: Çift fazlı
EN	**:** European Standard
HSLA	: High Strength Low Alloy
HV	: Hardness Vickers
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
kA	: Kilo Amper
kN	: Kilo Newton
kVA	: Kilo Volt Amper
Mf	: Martenzit Bitiş Sıcaklığı
mm	: Milimetre
MPa	: Mega Paskal
Ms	: Martenzit başlangıç sıcaklığı
N	: Newton
per	: periyot
SEM	: Scanning Electron Microscopy
TRIP	: Dönüşüm katkılı plastiklik
TWIP	: İkizlenme katkılı plastiklik

SİMGELER

α	: Ferrit
γ	: Östenit
^{o}	: Derece
I	: Kaynak Akım Şiddeti (A)
Q	: Kaynak Bölgesinde Üretilen Toplam Isı (joule)
R	: Toplam Direnç (Ω)
s	: Malzeme Kalınlığı (mm)
t	: Kaynak Süresi (t)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 : TWIP çeliklerinin sınıfları ve kullanıldığı yerler. 7
Tablo 3.1 : DP çeliklerine ilave edilen alaşım elementleri ve etkileri. 12
Tablo 3.2 : DP çeliklerini türleri ve kullanım alanları. 14
Tablo 4.1 : Malzemelerin kaynak kabiliyeti değerlendirmesi. 20
Tablo 6.1 : TWIP950 ve DP800 çelik saclarının kimyasal bileşimleri. 42
Tablo 6.2 : TWIP950 ve DP800 çelik saclarının mekanik özellikleri. 43
Tablo 6.3 : Deneylerde kullanılan elektrotun kimyasal bileşimi ve elektrodun mekanik özellikleri. 46
Tablo 6.4 : Çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme deneylerinde oluşan hasar tipleri. 49
Tablo 7.1 : TWIP-DP bağlantılarda çekme-makaslama numunelerinin durumları. .. 58
Tablo 7.2 : TWIP-DP bağlantılara ait bazı mikroyapı görüntüleri. 100
Tablo 7.3 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeye ait EDS kimyasal içeriği. 103
Tablo 7.4 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeden alınan EDS kimyasal içeriği. 104
Tablo 7.5 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek bölgesine ait EDS kimyasal içeriği. . 105
Tablo 7.6 : TWIP-DP bağlantılarda bazı makroyapılar. 106
Tablo 7.7 : TWIP-DP bağlantılarda bazı aşırı dalma derinliği ve fışkırma makroyapıları. 106
Tablo A.1 : 5 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri. 121
Tablo A.2 : 5 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri. 122
Tablo A.3 : 5 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri. 123
Tablo A.4 : 5 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri. 124
Tablo A.5 : 5 periyot 14,5 kA mikroyapı görüntüleri. 125
Tablo A.6 : 5 periyot 15,7 kA mikroyapı görüntüleri. 126
Tablo A.7 : 10 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri. 127
Tablo A.8 : 10 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri. 128
Tablo A.9 : 10 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri. 129
Tablo A.10 : 10 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri. 130
Tablo A.11 : 10 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri. 131
Tablo A.12 : 10 periyot 14,5 kA mikroyapı görüntüleri. 132
Tablo A.13 : 10 periyot 15,7 kA mikroyapı görüntüleri. 133
Tablo A.14 : 15 periyot 6,33 kA mikroyapı görüntüleri. 134
Tablo A.15 : 15 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri. 135
Tablo A.16 : 15 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri. 136
Tablo A.17 : 15 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri. 137
Tablo A.18 : 15 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri. 138
Tablo A.19 : 15 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri. 139
Tablo A.20 : 15 periyot 14,5 kA mikroyapı görüntüleri. 140

Tablo A.21 : 15 periyot 15,7 kA mikroyapı görüntüleri. 141
Tablo A.22 : 20 periyot 6,33 kA mikroyapı görüntüleri. 142
Tablo A.23 : 20 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri. 143
Tablo A.24 : 20 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri. 144
Tablo A.25 : 20 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri. 145
Tablo A.26 : 20 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri. 145
Tablo A.27 : 20 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri. 146
Tablo A.28 : 20 periyot 14,5 kA mikroyapı görüntüleri. 147
Tablo A.29 : 25 periyot 6,33 kA mikroyapı görüntüleri. 148
Tablo A.30 : 25 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri. 149
Tablo A.31 : 25 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri. 150
Tablo A.32 : 25 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri. 151
Tablo A.33 : 25 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri. 152
Tablo A.34 : 25 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri. 153
Tablo A.35 : 30 periyot 6,33 kA mikroyapı görüntüleri. 154
Tablo A.36 : 30 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri. 155
Tablo A.37 : 30 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri. 156
Tablo A.38 : 30 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri. 157
Tablo A.39 : 30 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri. 158
Tablo A.40 : 30 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri. 159
Tablo A.40 : 5 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri. 160
Tablo B.1 : 5 periyot ve 10 periyot makroyapı görüntüleri. 161
Tablo B.2 : 15 periyot makroyapı görüntüleri. 162
Tablo B.3 : 20 periyot ve 25 periyot makroyapı görüntüleri. 163
Tablo B.4 : 30 periyot makroyapı görüntüleri. 164

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : TWIP çeliği mikroyapısı. 4
Şekil 2.2 : Farklı otomotiv çelikleri için yüzde uzama-çekme mukavemeti diyagramı. 5
Şekil 2.3 : SFE'nin deformasyon modu üzerindeki etkisinin şematik gösterimi. 6
Şekil 2.4 : FIAT marka bir araçta POSCO firması tarafından sağlanan TWIP 1000 çelik sacı ile üretilmiş tampon kirişi ve mono darbe emici crashbox. 8
Şekil 3.1 : (a) DP çeliğinin şematik mikroyapısı, (b) DP çeliğinin optik mikroskop mikroyapısı, (c) DP çeliğinin SEM görüntüsündeki mikroyapı. .10
Şekil 3.2 : DP çelik sacların sürekli tavlanması sırasındaki sıcaklık ve faz değişimleri. 11
Şekil 3.3 : DP çeliğine eklenen alaşım elementlerinin TTT diyagramına etkileri. 12
Şekil 3.4 : Çift fazlı çeliklerin otomobillerde kullanıldığı yerler. 15
Şekil 4.1 : Elektrik direnç nokta kaynağı kaynak çevrimi. 17
Şekil 4.2 : Elektrik direnç nokta kaynağındaki meydana gelen dirençler. 19
Şekil 4.3 : Örnek bir kaynak eğrisi grafiği. 26
Şekil 6.1 : Çekme-makaslama deney numunelerinin ölçüleri. 43
Şekil 6.2 : Çekme-makaslama deney numuneleri. 43
Şekil 6.3 : Çekme-sıyırma deney numuneleri. 44
Şekil 6.4 : Çapraz çekme deney numuneleri. 44
Şekil 6.5 : Deneylerde kullanılan elektrik direnç nokta kaynağı makinesi. 45
Şekil 6.6 : Deneylerde kullanılan akım şiddeti ölçüm cihazı. 45
Şekil 6.7 : Deneylerde kullanılan elektrotların boyutları. 45
Şekil 6.8 : Bazı ön deney numuneleri. 46
Şekil 6.9 : Deney parametreleri. 47
Şekil 6.10 : Bazı çekme-makaslama deneyi numuneleri. 47
Şekil 6.11 : Bazı çekme-sıyırma deneyi numuneleri. 47
Şekil 6.12 : Bazı çapraz çekme deneyi numuneleri. 48
Şekil 6.13 : Çapraz çekme deneyi görüntüsü. 50
Şekil 6.14 : Deneylerde kullanılan çekme cihazı. .51
Şekil 6.15 : Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop. 51
Şekil 6.16 : Mikroyapı incelemelerinde kullanılan taramalı elektron mikroskopu (SEM). 52
Şekil 6.17 : Makroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop. 52
Şekil 6.18 : Elektrik direnç nokta kaynağı çekirdek geometrisinin şematik olarak gösterimi. 53
Şekil 6.19 : Elektrik direnç nokta kaynağı çekirdek geometrisi. 53
Şekil 6.20 : Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrovickers sertlik ölçme cihazı. 54
Şekil 7.1 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-makaslama dayanımına etkisi. 56

Şekil 7.2 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımına etkisi. 57
Şekil 7.3 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi. 62
Şekil 7.4 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi. 63
Şekil 7.5 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çapraz çekme dayanımına etkisi. 64
Şekil 7.6 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çapraz çekme dayanımına etkisi. 65
Şekil 7.7 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek çapına etkisi. . 65
Şekil 7.8 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi. 66
Şekil 7.9 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin TWIP çeliğinde oluşan kaynak çekirdek yüksekliğine etkisi. 67
Şekil 7.10 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının TWIP çeliğinde oluşan kaynak çekirdek yüksekliğine etkisi. 67
Şekil 7.11 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin DP çeliğinde oluşan kaynak çekirdek yüksekliğine etkisi. 68
Şekil 7.12 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının DP çeliğinde oluşan kaynak çekirdek yüksekliğine etkisi. 68
Şekil 7.13 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek yüksekliğine etkisi. ..... .69
Şekil 7.14 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekirdek yüksekliğine etkisi. ..... .70
Şekil 7.15 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi. 70
Şekil 7.16 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi. 71
Şekil 7.17 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin TWIP çeliğinin elektrot dalma derinliğine etkisi. 72
Şekil 7.18 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının TWIP çeliğinin elektrot dalma derinliğine etkisi. 72
Şekil 7.19 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin DP çeliğinin elektrot dalma derinliğine etkisi. 73
Şekil 7.20 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının DP çeliğinin elektrot dalma derinliğine etkisi. 73
Şekil 7.21 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin toplam elektrot dalma derinliğine etkisi. 74
Şekil 7.22 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak süresinin toplam elektrot dalma derinliğine etkisi. 74
Şekil 7.23 : TWIP-DP bağlantıların çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 76
Şekil 7.24 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken kaynak zamanı değişken). 76
Şekil 7.25 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 77

Şekil 7.26 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 78
Şekil 7.27 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 79
Şekil 7.28 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 79
Şekil 7.29 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 80
Şekil 7.30 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 80
Şekil 7.31 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 81
Şekil 7.32 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). ..... .82
Şekil 7.33 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 83
Şekil 7.34 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 83
Şekil 7.35 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 84
Şekil 7.36 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 85
Şekil 7.37 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 86
Şekil 7.38 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 86
Şekil 7.39 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 87
Şekil 7.40 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 88
Şekil 7.41 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 89
Şekil 7.42 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 90
Şekil 7.43 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 91

Şekil 7.44 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 91
Şekil 7.45 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken). 92
Şekil 7.46 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit). 92
Şekil 7.47 : Kaynaklı numunelerin sertlik ölçüm doğrultuları. 93
Şekil 7.48 : TWIP-DP bağlantıların 5 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi. 94
Şekil 7.49 : TWIP-DP bağlantıların 10 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi. 95
Şekil 7.50 : TWIP-DP bağlantıların 15 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi..... 95
Şekil 7.51 : TWIP-DP bağlantıların 20 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi. 95
Şekil 7.52 : TWIP-DP bağlantıların 25 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi..... 96
Şekil 7.53 : TWIP-DP bağlantıların 30 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi..... 96
Şekil 7.54 : 6330 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi..... 96
Şekil 7.55 : 7270 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi..... 97
Şekil 7.56 : 8170 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi. 97
Şekil 7.57 : 9660 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi. 97
Şekil 7.58 : 11900 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi. 98
Şekil 7.59 : 13500 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi. 98
Şekil 7.60 : 14500 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi..... 98
Şekil 7.61 : 15700 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi. 99
Şekil 7.62 : TWIP-DP bağlantılarda DP ana malzemeye ait mikroyapı (x100, x200 ve x500 büyütme)..... 99
Şekil 7.63 : TWIP-DP bağlantılarda TWIP ana malzemeye ait mikroyapı (x100, x200 ve x500 büyütme)..... 100
Şekil 7.64 : TWIP-DP bağlantılarda TWIP esas metale ait SEM görüntüsü (x15000 büyütme). 101
Şekil 7.65 : TWIP-DP bağlantılarda ITAB'ye ait SEM görüntüsü (x5000 büyütme). 101
Şekil 7.66 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak çekirdeğine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme). 102
Şekil 7.67 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeye ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme). 102
Şekil 7.68 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeye ait EDS görüntüsü. 102
Şekil 7.69 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeden alınan EDS görüntüsü. 103
Şekil 7.70 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek bölgesine ait EDS görüntüsü..... 104
Şekil 7.71 : TWIP-DP bağlantılara ait kaynak eğrisi (weld lobe). 106

TWIP-DP YENİ NESİL ÇELİKLERİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN BELİRLENMESİ

ÖZET

Son yıllarda otomotiv endüstrisinde kullanılmaya başlayan TWIP çelikleri; yüksek dayanım, yüksek uzama (yaklaşık %50) ve iyi enerji absorbe etme özelliklerine sahiptir. Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DP çelikleri ise yüksek dayanım ve iyi uzama oranı ve iyi şekillendirilebilme özelliklerine sahiptir.

Elektrik direnç nokta kaynağı diğer birleştirme yöntemlerine kıyasla daha düşük maliyetli olması, hızlı birleştirme yapılabilmesi ve otomasyona elverişli olması, yapılan birleştirme sonucu elde edilen kaynaklı numunede diğer birleştirme yöntemlerine kıyasla daha az distorsiyon meydana gelmesi gibi avantajlarıyla otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca farklı çelik türlerinin veya farklı metallerin birleştirilmesi yapılabilmektedir.

Bu çalışmada 1,4 mm kalınlığındaki TWIP950 çelik sacları ile 1,2 mm kalınlığındaki DP800 çelik saclar elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi ile birleştirilmiştir. Farklı kaynak zamanı değerleri ve farklı kaynak akım şiddeti değerleri kullanılarak numuneler birleştirilmiş ve bulunan sonuçlar incelenmiştir.

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş deney numunelerinin mukavemet özellikleri, sertlik dağılımları incelenmiştir. Makroyapı ve mikroyapı incelemeleri yapılırken optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada, TWIP950 ve DP800 çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerinde en uygun kaynak parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: TWIP çeliği, DP çeliği, elektrik direnç nokta kaynağı

DETERMATION OF FAILURE MODE IN ELECTRIC RESISTANCE SPOT WELDING OF TWIP-DP NEW GENERATION STEELS

SUMMARY

TWIP steels that have been used in automotive industry in recent years; which has high strength, high elongation rate (about 50%) and good energy absorption capacity. DP steels, which are widely used in automotive industry, have high strength and good elongation rate and good formability.

The electrical resistance spot welding is widely used in the automotive industry with its advantages such as being more cost effective than other joining methods, fast joining and being suitable for automation, resulting in less distortion than other joining methods in the welded sample. In addition, different types of steel or different metals can be combined.

In this study, TWIP 950 steel sheets of 1,4 mm thickness and DP 800 steel sheets of 1,2 mm thickness were combined with electrical resistance spot welding method. The samples were combined and the results were examined by using different welding time values and different welding current intensity values.

The strength properties and hardness distributions of the test specimens combined with electrical resistance spot welding were investigated. Optical microscope and scanning electron microscope were used in macrostructure and microstructure investigations. In this study, it was tried to determine the most suitable welding parameters in electrical resistance point welded joints of TWIP950 and DP800 steel sheets.

Keywords: TWIP steel, DP steel, electric resistance spot welding

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüz otomotiv endüstrisinde üreticiler, daha hafif, daha fazla yakıt tasarrufuna sahip, yolcu güvenliği daha fazla araçlar üretmeye yönelmişlerdir. Taşıtlarda bu özelliklerin temini için, araç ağırlığının büyük kısmını oluşturan çelik malzemelerin gelişimi ve daha hafif ve daha dayanımlı çelik türlerinin taşıtlarda geleneksel çelik malzemelerin yerine kullanımı ilgi çeken bir araştırma konusudur. Bu konudaki yapılan araştırmalar ve alınan patent sayıları artarak devam etmektedir.

Yeni nesil çeliklerden otomotiv endüstrisinin beklentisi kullanıldığı bölgeye göre yüksek mukavemetli, yüksek uzama oranına sahip ve iyi şekillendirilebilmesidir. Bu konuda yüksek mukavemetli, yüksek uzama oranına ve iyi şekillendirilebilme özeliğine sahip TWIP çelikleri aynı zamanda yüksek enerji absorbe edebilme özellikleri ile otomotiv endüstrisinde crash box gibi yüksek enerji absorbe edilmesi gereken yerlerde kullanılmaya başlanmıştır.

DP çelikleri sahip oldukları yüksek mukavemet ve iyi uzama oranı ve iyi şekillendirilebilme özellikleri ile son yıllarda otomotiv endüstrisinde HSLA çelikleri gibi geleneksel çeliklerin yerinin almaya başlamıştır. DP çelikleri araçlarda panel parçaları, karoser parçaları, şasi ve koltuk desteği gibi birçok bölgede kullanılmaktadır.

Otomotiv endüstrisinde birleştirmede en fazla uygulanan birleştirme metodu elektrik direnç nokta kaynağıdır. Diğer kaynak yöntemlerine kıyasla nispeten düşük maliyetli olması, hızlı uygulanabilir ve otomasyona uygun olması, farklı türde çeliklerin ve farklı malzemelerin birleştirilebilmesi, birleştirme neticesinde iş parçasında distorsiyonunun az olması gibi etkenler bu yöntemin otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanımını sağlamıştır.

Yapılan bu çalışmada otomotiv endüstrisinde halen kullanılmakta olan TWIP 950 ile DP 800 çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağı ile direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Uygulanan farklı kaynak zamanları ve farklı kaynak

akımları sonucu elde edilen kaynaklı numunelerin çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme deneyleri yapılarak numunelerin dayanımları incelenmiştir. Numunelerin çeşitli bölgelerinden mikrosertlik değerleri alınmıştır. Yapılan mikroyapı incelemeleri ile iki farklı çeliğin ana metal bölgeleri, ayrıca ITAB, çekirdek bölgesi ve bu bölgelerin aralarındaki geçiş bölgeleri incelenmiştir. Ayrıca seçilen bazı numuneler taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Yapılan makroyapı incelemeleri ile kaynak çekirdeği boyutu tespit edilmiştir.

Çalışmada TWIP950 ve DP800 çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerinde en uygun kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmeler ve elde edilen sonuçlar ile en uygun birleştirmelerin yapılabilmesi için gerekli elektrik direnç nokta kaynağı parametreleri kaynak eğrisi diyagramı ile gösterilmiştir.

BÖLÜM 2. TWIP ÇELİKLERİ

2.1. Giriş

Yüksek mangan içerikli TWIP (TWinning Induced Plasticity) östenitik çelikler son yıllarda malzeme ve metalurji alanında önemli bir çalışma konusudur. TWIP çelikleri hakkındaki bu önemli ilgi, yalnızca otomobil endüstrisi alanındaki önemli yapısal uygulama olanakları sebebiyle değil, aynı zamanda bu çeliğin metalurjik bakımdan ortaya çıkardığı problemlerin çözümündeki bilimsel soruların zenginliği ve karmaşıklığı nedeniyledir. Son yıllarda TWIP çelikleri hakkında yapılan akademik yayınlar ve alınan patent sayıları artarak devam etmektedir.

2.2. TWIP Çelikleri

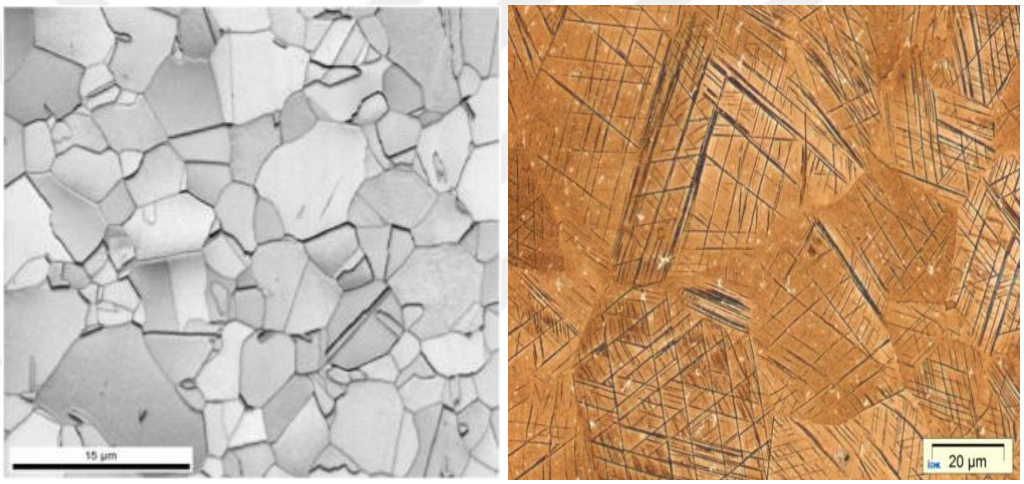
İkizlenme katkılı plastik (TWIP) çeliklerinin yüksek mukavemet ile yüksek sünekliği birleştirmeleri onları otomotiv endüstrisi için ilgi çekici yapmıştır. TWIP çelikleri bileşimlerinde yüksek miktarda mangan içermesi nedeniyle oda sıcaklığında tamamen östenitik bir yapıya sahiptir. İlk olarak 1882'de Robert Hadfield tarafından yüksek mangan içerikli çelikler konusunda çalışmalar yapılmış ve endüstriyel uygulamalarda ve demiryolu sektöründe hızla kullanılmaya başlanmıştır. Hadfield'ın adıyla anılan bu çeliklerdeki özgün kimyasal bileşim %1,2 karbon ve %12 mangan olmakla beraber son zamanlarda özellikle kaynak yapılabilirliği artırmak amacıyla bileşimdeki element oranları değiştirilmiştir. Son on yılda, otomotiv uygulamaları için östenitik Fe-Mn-C alaşımları üzerinde birçok çalışma yapılmıştır [1].

2.3. Mikroyapı

TWIP çeliklerinin mikroyapıları tamamen östenit fazı içerir. Yeterli miktarda alaşım elementi ilavesi ile östenitin stabilize edilmesi ve oda sıcaklığında tamamen östenitik yapıların elde edilmesini sağlar. TWIP çeliklerinin paslanmaz çelik türlerinde nikel, krom

ve mangan kullanılır. Matrisin katı çözelti sertleştirmeyle güçlendirilmesi için diğer alaşım elementleri; hacimce %1'den az karbon, %3'den az alüminyum ve %3'den az silisyum östenitik TWIP çeliklerine ilave edilir [2].

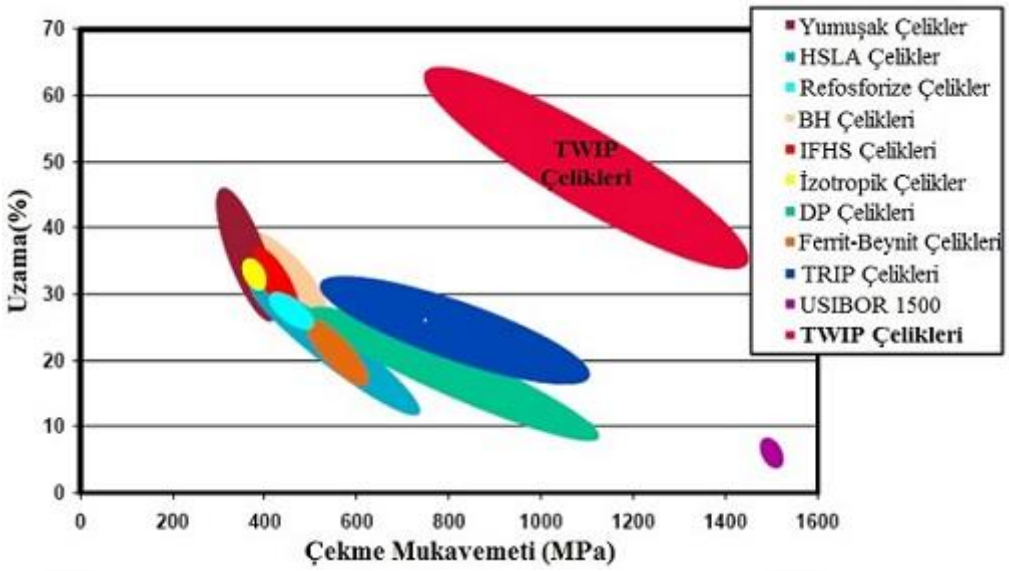
Bu östenitik çelikler yapısal olarak az veya çok kararlı olabilirler. Aslında, martenzitik dönüşüm iki martenzitik fazın ortaya çıkmasına neden olan iç veya dış gerilimler altında gerçekleşebilir. α' martenzit ve ε martenzitin Bu dönüşümler şunlardır: östenitten α' martenzite doğrudan dönüşüm olabileceği gibi veya α' martenzitin ε martenzitten meydana geldiği iki aşamalı dönüşümün de olabileceği iki adet dönüşüm mevcuttur [2].



Şekil 2.1 : TWIP çeliği mikroyapısı [2, 3].

2.4. Mekanik Özellikler

Östenitik TWIP çelikleri otomobil imalatında kullanılan diğer çelik kalitelerine kıyasla yüksek çalışma sertleşme kapasitesine dayanan üstün mukavemet (>950 MPa) ve üstün süneklik (>%50) özellikleri sergilerler. TWIP çelikleri sahip oldukları istisnai özellikleri tamamen östenitik yapıda olmalarından ve ikizlenme deformasyon modu ile rekabet halinde olan klasik dislokasyon kaymasından kaynaklanır [4].



Şekil 2.2 : Farklı otomotiv çelikleri için % uzama-çekme mukavemeti diyagramı [5].

TWIP çeliklerinin mekanik özellikleri aşağıdaki özellikler ile tanımlanır:

- Yüksek akma gerilmesi (>500 MPa)

- Yüksek maksimum çekme dayanımı (>950 MPa)

- Çok yüksek süneklik ve özellikle yüksek homojen uzama

- Çok yüksek gerilme sertleşme oranı

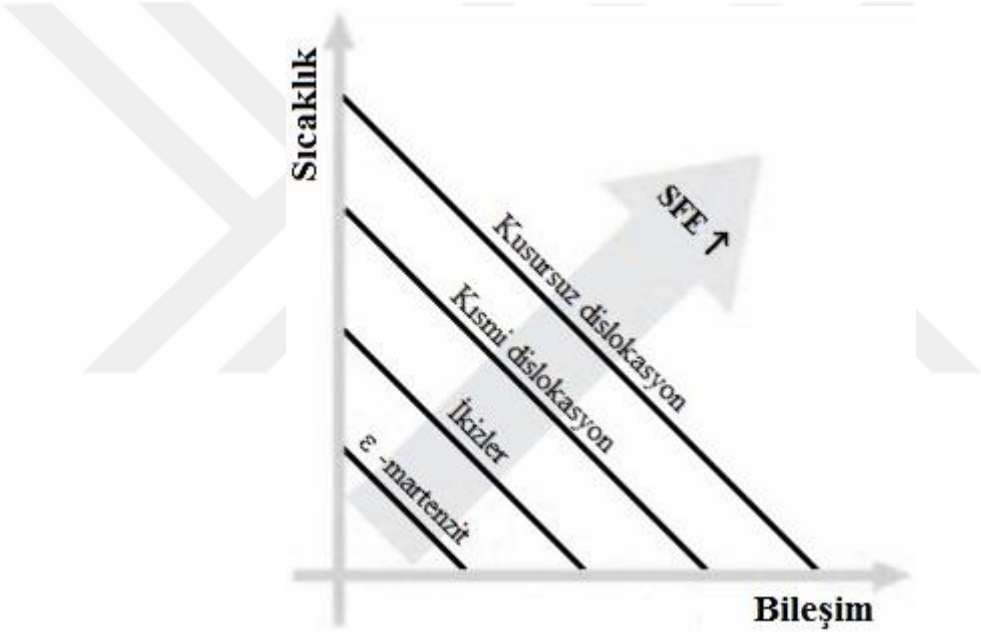
TWIP çeliklerinin deforme miktarı fazla olduğunda yüksek dayanıma ulaştığı görülebilir. Derin çekme ile elde edilen karmaşık şekilli parçaların tasarımı için bu çelikler büyük ilgi çekmektedir [6].

2.4.1. Deformasyon modu

Östenitik fazın farklı deformasyon mekanizmaları tarafından kontrol edilen istifleme hata enerjisi (SFE) yüksek mangan içeren TWIP çeliklerinde etkinleştirilebilir. Çeşitli araştırmacılara göre ve [DUM 07]' e göre α- martenzitin oluşumu süneklik azalmasıyla sonuçlanarak SFE<12 mJ/m^2 için meydana gelir. Mekanik ikizlenme oluşumu için 12-35 mJ/m^2 arasında değerler gerektirirken östenitin ε martenzite dönüşümü SFE<18 mJ/m^2

değerlerinde gerçekleşir. Daha yüksek SFE değerleri için dislokasyon kayma mekanizması etkindir [7-9].

Östenitik çeliklerin çoğu, orta veya düşük derecede istifleme hata enerjisi (SFE)'ye sahiptir. İstifleme hata enerjisi sıcaklıkla ve çeliğin bileşimi ile değişir. Şekil 2.3'de artan sıcaklık ile istif hata enerjisinin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Araştırmacılar istifleme hata enerjisinin sıcaklıkla değişimini incelemişler ve azalan sıcaklıkla beraber 400 °C'de istif hata enerjisi azalıp ve sadece dislokasyon kayması meydana geldiğini, 20 °C'de mekanik ikizlenme ile dislokasyon kayması rekabet halinde olup -196 °C'de ise ε martenzitik dönüşümün aktive olduğunu rapor etmişlerdir [8].



Şekil 2.3 : SFE' nin deformasyon modu üzerindeki etkisinin şematik gösterimi [10].

TWIP çeliklerindeki ikiz sınırları çalışma sertleşmesi sağlayan dislokasyon kaymasının önündeki engeller gibi davranır. Kayma esnasında, ikizlerin hacim oranı artar ve yapının sürekli incelmesini sağlayarak, boyun vermeyi daha yüksek gerilmeye geciktirerek dolayısıyla ortalama serbest dislokasyon yolu azalır. Bu dinamik Hall-Petch etkisi ile ifade edilir [11].

2.5. Alaşım Elementlerinin TWIP Çeliklerine Olan Etkileri

Östenitin kararlılığı ve östenitin ikizlenme veya martenzitik dönüşümle deforme olma kabiliyeti kuvvetli ölçüde alaşım elementlerine bağlıdır.

Mangan TWIP çeliklerine oda sıcaklığında tamamen östenitik yapının östenitik yapının elde edilmesi için ilave edilir, ayrıca süneklik özelliğini arttır. Mangan bu çeliklere genellikle %15 ila %30 arasında ilave edilir. Ayrıca istifleme hata enerjisini arttırır.

Karbon elementi ilavesi TWIP çeliklerinde dayanımı arttırır, fakat aynı zamanda çeliğin sünekliğini azaltır ve kaynak kabiliyeti de karbon artışıyla kötüleşir. Karbon östenit stabilizörü olmakla beraber ayrıca istifleme hata enerjisini arttırır. Ayrıca alüminyum genelde istifleme hata enerjisini arttırırken silisyum ise istifleme hata enerjisini azaltma eğilimindedir [12-15].

2.6. TWIP Çeliğinin Kullanıldığı Alanlar

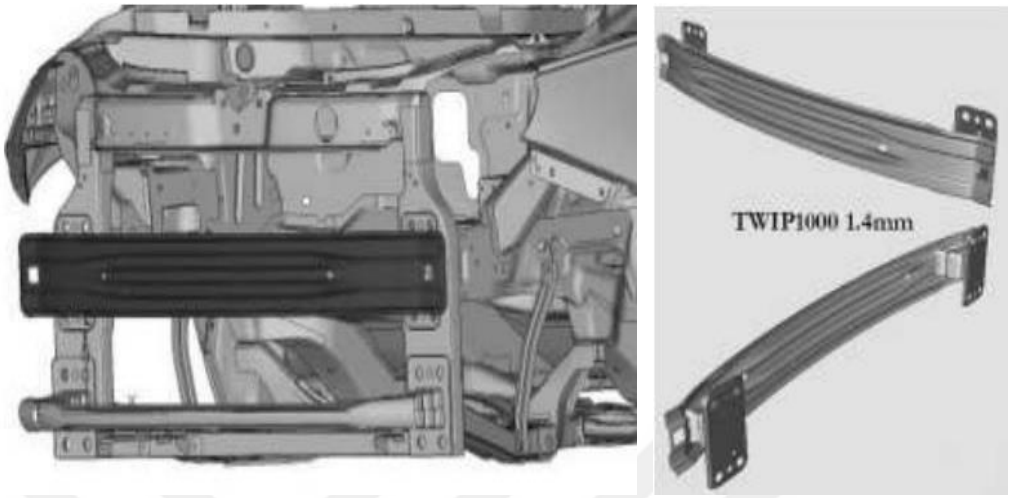
TWIP çeliklerinin performansı genel anlamda otomotiv endüstrisinde kullanılan ferritik matrisli çeliklere kıyasla hem dayanıklılık hem de süneklik bakımından üstündür. TWIP çelikler, son derece yüksek mukavemeti ve son derece yüksek gerilebilirlik özelliğine sahiptir. Sac halindeki çelik malzeme deforme olduğunda malzemenin ne kadar güçlendiğini gösteren n sabiti yaklaşık %30luk bir mühendislik geriliminde 0,4 değerine yükselir ve daha sonra hem homojen hem de toplam uzama %50'ye ulaşana kadar sabit kalır. Yani gerilim esnasında homojen uzama elde edilir [6, 16].

Şu an otomotiv uygulamalarında kullanılan TWIP sınıfları şunlardır:

Tablo 2.1 : TWIP çeliklerinin sınıfları ve kullanıldığı yerler [2].

TWIP Çeliği Türü	Kullanıldığı Yer
TWIP500/900	A-sütunu, tekerlek yuvası, ön yan parça
TWIP500/980	Tekerlek, alt kontrol kolu, ön ve arka tampon kirişleri, B sütunu, tekerlek jantı
TWIP600/900	Döşeme traversi, tekerlek yuvası
TWIP750/1000	Kapı darbe kirişi
TWIP950/1200	Kapı darbe kirişi

Şekil 2.4' de POSCO firması tarafından üretilen TWIP1000 çelik sacının ürün halinde montajı görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 2.4 : FIAT marka bir araçta POSCO firması tarafından sağlanan TWIP 1000 çelik sacı ile üretilmiş (a) tampon kirişi, (b) mono darbe emici crashbox [17].

BÖLÜM 3. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER

3.1. Giriş

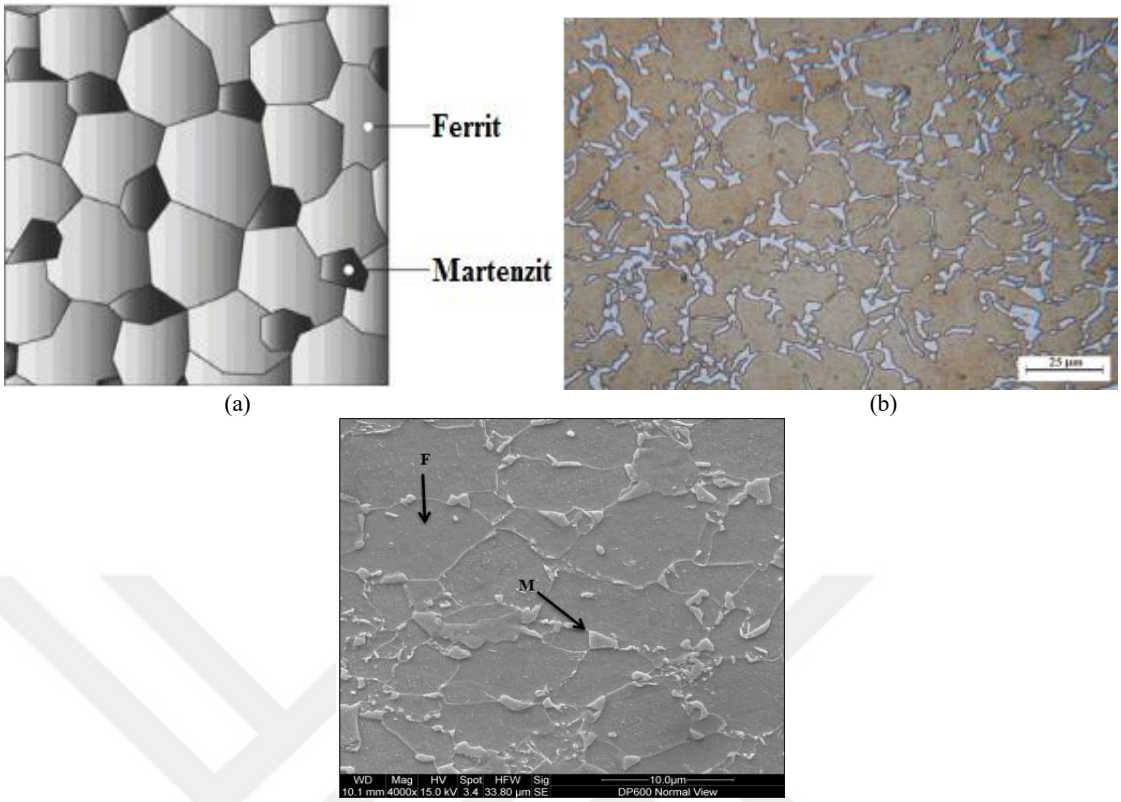
Gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) otomotiv endüstrisinde yakıt tüketimi ekonomisi ve yolcu güvenliği gereksinimlerini yerine getirme potansiyeline sahip olduklarından otomotiv uygulamaları için hatırı sayılır bir öneme sahiptir. Otomotiv endüstrisinde bu çeliklerin kullanılmasına yönelik son yıllarda büyük bir ilgi vardır. Yeni nesil AHSS çeliklerinin kullanımı toplam araç ağırlığının azaltılması ve gelişmiş sürücü ve yolcu güvenliğine olanak sağlamaktadır. AHSS çeliklerinden olan çift fazlı (DP) çelikler son yıllarda geliştirilmiş biçimlendirilebilme özelliği, çarpışma enerjisini emme kapasitesi ve yorulma dayanımı nedeniyle yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (HSLA) çeliklerin yerini almaktadır.

3.2. Çift Fazlı Çelikler

1970'li yılların başından itibaren çift fazlı çelikler otomotiv uygulamalarında kullanılmaktadır. Çift fazlı çelikler düşük karbonlu çeliklerden (%0,05-0,2) interkritik tavlama ile üretilirler. Çift fazlı çelikler iyi süneklik, uzama ve mukavemet özelliklerinin bileşimi oldukları için tercih edilirler [18].

3.3. Mikroyapı

Çift fazlı çeliklerin mikroyapısı tane sınırlarında küçük martenzit adaları içeren ferrit matrisi ile karakterize edilir. Mikroyapıdaki sert martenzit partikülleri önemli ölçüde dayanım kazanılması sağlarken sünek ferrit ana yapı ise iyi süneklik ve şekillendirilebilirlik özelliği sağlar. Ferrit-martenzit mikroyapısındaki ki bu çift fazlı karışım, parçacık takviyeli bir kompozite benzer davranış sergiler.



(a) (b)

(c)

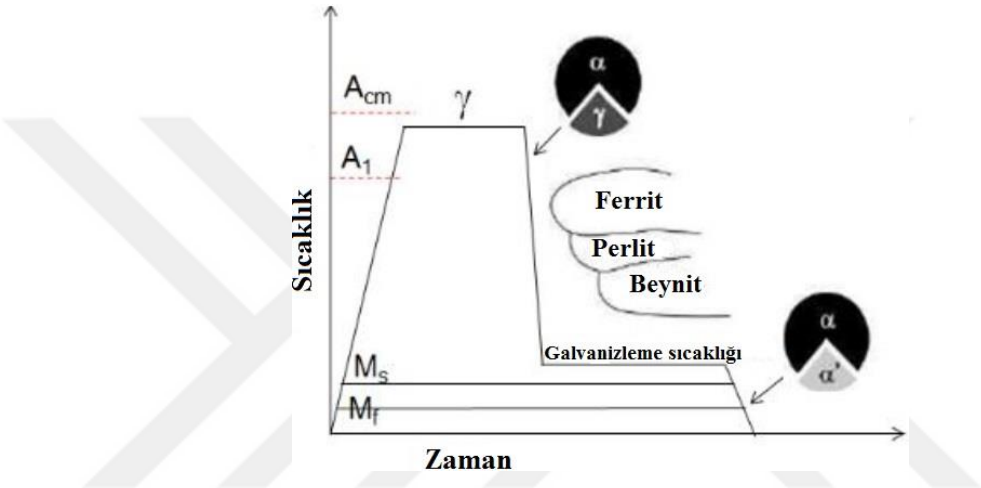
Şekil 3.1 : (a) DP çeliğinin şematik mikroyapısı [18], (b) DP çeliğinin optik mikroskop mikroyapısı [19], (c) DP çeliğinin SEM görüntüsündeki mikroyapı [20].

DP çelikleri deforme olduğunda bu çelik türünün sergilediği eşsiz yüksek çalışma sertleşme oranı oluşur ve gerilme düşük yoğunluklu ferritte yoğunlaşır. Yüksek çalışma sertleşme oranı ve mükemmel süneklik kombinasyonu DP çeliğine benzer akma dayanımına sahip geleneksel çeliklerden çok daha yüksek nihai çekme dayanımı ve homojen bir uzama sağlamak için bir araya gelir. Martenzit fazı ferrit fazına göre yapısal olarak daha dayanımlı bir faz olduğundan DP çeliğindeki martenzit fazının oranının artması çift fazlı çeliklerin dayanımının dayanımını arttırır. Fakat martenzit içeriğinin arttırılması sünekliği azaltır bu nedenle martenzit fazının DP çeliğindeki hacimsel oranı martenzitin birbirine bağlı ferrit matris içinde ayrı izole adalar olarak kaldığı yüzde on ila yüzde yirmi aralığında sınırlanır. Ayrıca DP çeliklerinde yüksek sünekliği korumak için sadece martenzit fazı oranının sınırlandırılmasının haricinde aynı zamanda martenzit fazının karbon içeriğinin de sınırlandırılması istenir. Düşük karbon içeriklerinde yüksek karbonlu ikiz martenzit yerine martenzit kafesleri oluşur. Martenzit kafesi için sınırlı derecede deforme olacağından ve bu malzeme plastik gerinim altında olduğu zaman, martenzit/ferrit arayüzlerinde boşluk oluşumunu

geciktirmeye yardımcı olduğundan arzu edilir. Ayrıca, düşük karbon içeriği kaynaklanabilirliğe ve şekillendirilebilirliğe yardımcı olur. Bu nedenle, çift fazlı çeliklerin karbon içeriği genellikle ağırlıkça %0,1 ile sınırlıdır [21].

3.4. Çift Fazlı Çeliklerin Üretimi ve Isıl İşlemi

Çift fazlı DP çeliklerini üretmek için kullanılan standart yöntem, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi ferrit/perlit fazı içeren çeliği interkritik sıcaklık aralığında tavlamaktır.



Şekil 3.2 : DP çelik sacların sürekli tavlanması sırasındaki sıcaklık ve faz değişimleri [22].

DP çelikleri, A_{C1} ve A_{C3} sıcaklıklarının arasında yani 780-880 °C aralığına kadar ısıtıldıktan sonra ilk olarak ferrit + östenit çift fazlı bölgesi olan oda sıcaklığının büyük kısmı ferritin faz olarak kararlı kalacağı 780-880 °C içinde tutulur. İnterkritik tavlama adımı esnasında östenit meydana gelir ve karbon ve mangan açısından zengindir. Daha sonra çeliğe su verilir ve östenit martenzite dönüşürken ferrit değişmeden kalır. Daha sonra DP çeliği bir kısım martenzitlerin ayrışmasına izin vermek için temper döngüsüne tabi tutulur. Çelikteki martenzit miktarının yanı sıra temper derecesinin kontrol edilmesiyle, hem faz parçacıkları hem de martenzitin özellikleri ayarlanabilir.

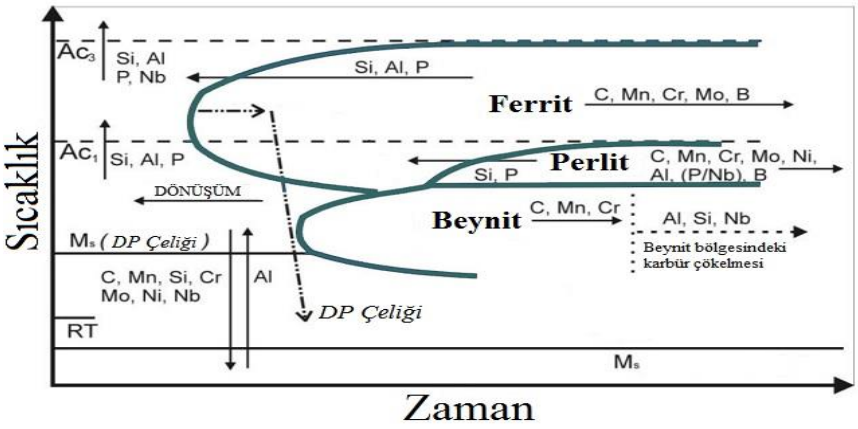
DP çeliğinin uzama oranı martenzitin yüksek hacimli kısmından dolayı genellikle yüzde yirminin altındadır ve bu nedenle çeşitli karmaşık deformasyon işlemlerinin yapılması için uygun değildir. Bu nedenle yüksek dayanımlı TRIP ve TWIP destekli çelik saclara artan bir ilgi gösterilmektedir [21].

3.5. Çift Fazlı Çeliklerde Alaşım Elementleri

DP çeliklerinde iki fazın oluşumunda önemli olan unsurların gözden geçirilmesi önemlilik arz etmektedir. DP çeliğinin üretiminde alaşım elementleri olarak C, Mn, Si, Cr, Mo, V, ve Nb elementleri kullanılmaktadır.

Tablo 3.1 : DP çeliklerine ilave edilen alaşım elementleri ve etkileri [22].

Alaşım Elementi	DP çeliğine etkisi ve eklenme nedeni
C (%0,06-0,15)	Östenit stabilizörü Martenzit fazını güçlendirir Faz dağılımını belirler
Mn (%1,5-2,5)	Östenit stabilizörü Ferrit fazının katı çözeltisini güçlendirir Ferrit oluşumunu geciktirir
Si	Ferritik dönüşümü destekler
Cr, Mo (%0,4'e kadar)	Östenit stabilizörleri Perlit ve beynit oluşumunu geciktirirler
V (%0,4'e kadar)	Östenit stabilizörü Çökelme fazlarını güçlendirir Mikroyapıyı rafine eder
Nb (%0,4'e kadar)	Östenit stabilizörü M_s sıcaklığını düşürür Mikroyapıyı rafine eder ve yeniden kristalize edilmiş östenitten ferrit dönüşümünü teşvik eder



Şekil 3.3 : DP çeliğine eklenen alaşım elementlerinin TTT diyagramına etkileri [23].

3.5.1. Karbon (C)

DP çeliklerindeki düşük karbon içeriği, çelikte kaynaklanabilirliği ve şekillendirilebilirliği artırmaya yardımcı olur. Karbonun ferrit fazındaki düşük çözünürlüğü nedeniyle karbon östenit fazına ayrılır. DP çeliğinin sertliğini arttırarak östenit fazı (Fe + C) martenzite dönüşür [24].

3.5.2. Mangan (Mn)

DP çeliklerine mangan ilavesi birkaç önemli etkiye neden olmaktadır. A_{C1} sıcaklığının altında deforme olmaya başlayan malzemelerin mikroyapısındaki sementit ve perlit fazlarının daha ince bir tane dağılıma sahip olmalarının DP çeliklerinde daha ince tane boyutuna yol açtığı gözlemlenmiştir. Belirli bir Mn içeriğinin interkritik tavlama sırasında tane büyümesinin önlenmesini ve soğumada sertleşebilirliğin sağlanması için gereklidir [24].

Başlangıç mikroyapısına bağlı olarak interkritik tavlama sırasında manganın tercihen östenit fazına geçtiği böylece martenzit oluşumu için kritik soğutma oranını düşürerek sertleşebilirliği arttırması önemlidir. Martenzit başlangıç sıcaklığına daha fazla zaman kazandırmak için TTT diyagramının ucu sağa doğru kayar böylece perlit/beynit dönüşümünün başlangıcını geciktirir. Mangan ferrit + östenit + sementit alanını genişletmenin yanı sıra interkritik tavlama sıcaklığını azalttır. Daha düşük interkritik tavlama sıcaklığı (760 °C) ile, sertleşebilirlik daha fazla karbon içeren ferrit fazına ayrılır, daha yüksek interkritik tavlama sıcaklığında (810 °C) ise sertleşebilirilik östenit fazına ayrılan mikro alaşımlama elementlerine bağlıdır [25].

3.5.3. Silisyum (Si), Molibyum (Mo) ve Krom (Cr)

Bu alaşım elementleri TTT diyagramını sağa doğru kaydırır ve böylece sertleşebilirliği azaltabilen kritik soğutma oranını (su verme işlemi sırasında östenitin martenzite dönüşmesini sağlamak için gerekli minimum soğutma oranı) azaltırlar [26].

3.5.4. Mikro alaşım elementleri

Niyobyum (Nb), vanadyum (V) ve titanyum (Ti) gibi alaşım elementleri DP çeliklerine düşük miktarlarda eklenir. Bu elementlerin güçlü karbür oluşturucuları olduğu kabul edilir. Bu karbürlerin östenit tane sınırlarındaki varlığı sıcak haddeleme sırasında tane büyümesini geciktirir. İnterkritik tavlamadan sonra ince taneli östenit ince taneli martenzite dönüşür [26].

3.5.5. Kalıntı elementler

Bazı elementler çeliğin başlangıcında gelen veya döküm işleminden kalan artıklardır. Bu elementler çeliğe bilinçli olarak eklenmez ve genel özelliklere zarar vermeye küçük miktarlar ile kontrol edilirler. Bu elementler arasında kalsiyum (Ca), kalay (Sn) ve kükürt (S) bulunur.

3.6. Çift Fazlı Çeliklerin Kullanım Alanları

Çift fazlı çelikler sahip oldukları, otomobillerde ve diğer araçlarda yüksek mukavemet, güvenlik, hafiflik, iyi korozyon dayanımı ve güvenlik gereksinimlerini yerine getirmek için üretilmiş çelik çeşitleridir [27, 28].

Çift fazlı çeliklerin kullanım alanları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 : DP çeliklerini türleri ve kullanım alanları [21].

DP Çeliği Türü	Kullanıldığı Yerler
DP500	Tavan dışı, kapı dışı, gövde yanı dışı, arka konsol, zemin paneli
DP600	Taban paneli, dış kaput, kaporta, çamurluk, zemin takviye
DP800	İç yan karoser, arka raylar, arka şok takviyeleri
DP980	Güvenlik kafesi bileşenleri (B sütunu, zemin paneli, ön alt şasi desteği, koltuk desteği)
DP1000	Tavan kuşağı
DP1180	Üst B direği

Çift fazlı çeliklerin otomobillerde kullanıldığı bölgeler Şekil 3.4'de kırmızı renkli olarak gösterilmiştir.



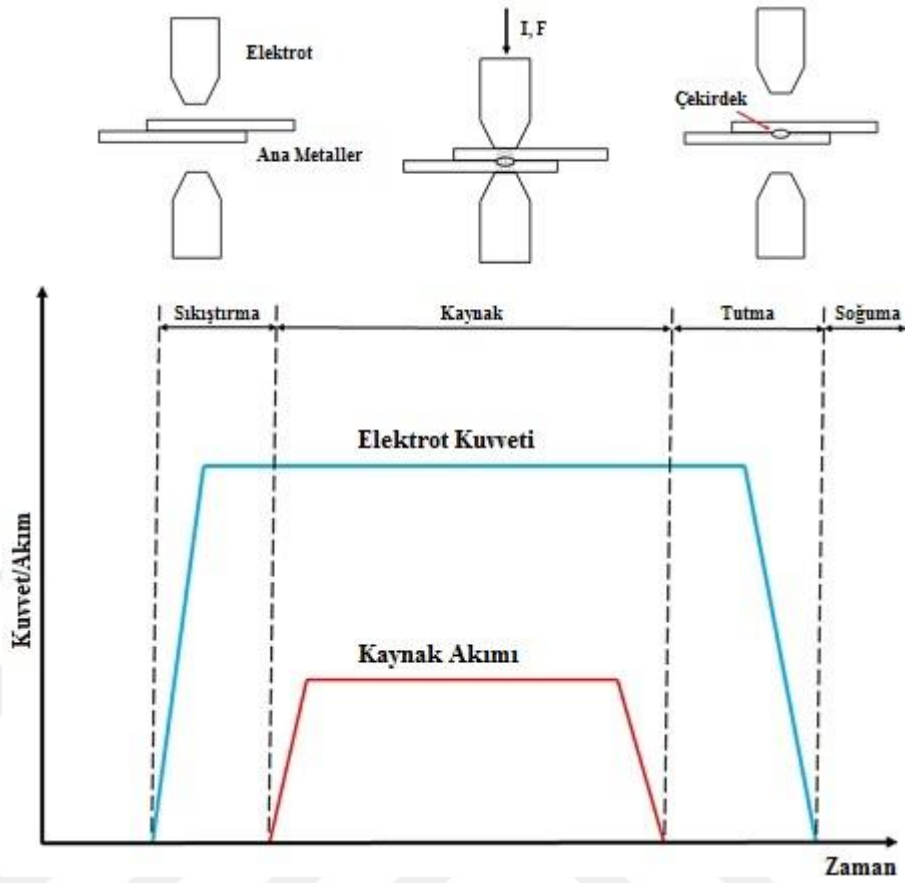
Şekil 3.4 : Çift fazlı çeliklerin otomobillerde kullanıldığı yerler [29].

BÖLÜM 4. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

Elektrik direnç nokta kaynağı otomotiv endüstrisi için metal parçaların birleştirilmesinde hala en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Tipik bir araba şasisinde yaklaşık 3000 ila 4000 arasında kaynaklı birleştirme vardır ve bu sayının büyük kısmı elektrik direnç nokta kaynağı birleştirmeleridir. Her ne kadar çelik saçların birleştirmeleri için geleneksel olarak elektrik direnç nokta kaynağı kullanılsa da yüksek dayanımlı alaşımlı çeliklerin, alüminyum alaşımlarının, magnezyum alaşımlarının ve alüminyum-çelik gibi farklı malzemelerin taşıtlar ve savunma vb. alanlardaki kullanımı ve elektrik direnç kaynağı ile birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar halen devam etmektedir Bu alanlarda ilgi çekici olan konular, havacılık uygulamaları için güvenilir alüminyum kaynağı ve özellikle otomotiv, havacılık ve askeri uygulamalar için alüminyum ile yüksek dayanımlı çeliklerin birleştirilmesidir. Endüstrideki uzun kullanım geçmişine rağmen elektrik dirençli nokta kaynağı özellikle gerçek zamanlı kalite kontrol ve sürecin geri bildirimi alanında halen aktif bir araştırma alanıdır. Bugüne kadar, elektrik direnç kaynağı yöntemi temel olarak aynı kalmış, ancak daha hızlı elektronikler, akıllı geri bildirim sistemleri ve işlemin robotik otomasyonu, özellikle yeni kaynaklarda, elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerin kalitesini ve güvenilirliğini geliştirmek için geniş bir araç paleti sağlamıştır [30].

4.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağının Prensibi

Tipik bir elektrik direnç nokta kaynağı işlemi Şekil 4.1'de gösterildiği üzere sıkma, kaynak, tutma ve soğutma olmak üzere dört aşamaya ayrılabilir.



Şekil 4.1 : Elektrik direnç nokta kaynağı kaynak çevrimi [31].

Sıkıştırma aşamasında, elektrotlar birbirine yaklaşır ve ana metaller sabit bir elektrot kuvveti ile sıkıştırılır. Sıkıştırma aşamasını kaynak aşaması takip eder. Kaynak akımı, elektrotlar ve ana metal boyunca iletilir ve üretilen ısı, ana metalleri eritir ve iki ayrı metalin birleşmesine neden olur. Elektrot kuvveti, kaynak aşaması boyunca uygulanır. Tutma aşamasında, kaynak akımı kesilir ve elektrotlar, erimiş metalin tam olarak soğuması için sıkıştırma halinde kalır. Ve daha sonra çekirdek oluşur.

4.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Isı Oluşumu

Kaynak akımı, üst elektrot, ana metaller ve alt elektrottan geçer. Üretilen ısı şu şekilde tanımlanabilir:

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

Buradaki Q (J) üretilen ısı, I (A) kaynak akımı, R (Ω) devredeki toplam direnç, t (s) ise kaynak zamanıdır. Kaynak akımı ve kaynak zamanı ölçülebilir değerler olmasına

rağmen devredeki toplam elektrik direncini ölçebilmek zordur. Toplam direnç olan R, ana malzemelerin direnci, elektrotlar ve ana malzemeler arası temas dirençleri ve ana malzemeler arasındaki temas direncinin birleşiminden oluşur. Toplam direnç ayrıca elektrotların ana malzemelere temas eden elektrot yüzey çaplarının boyutlarına bağlıdır, ayrıca ana malzemelerin birbirine temas yüzeylerinin temizliliği ve pürüzlülüğüne de bağlıdır.

$$R_{Toplam} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (4.2)$$

Formüldeki dirençler şunlardır;

R_1: Üst çenedeki elektrotun direnci

R_2: Üst çenedeki elektrot ile üstteki ana malzeme arasındaki temas direnci

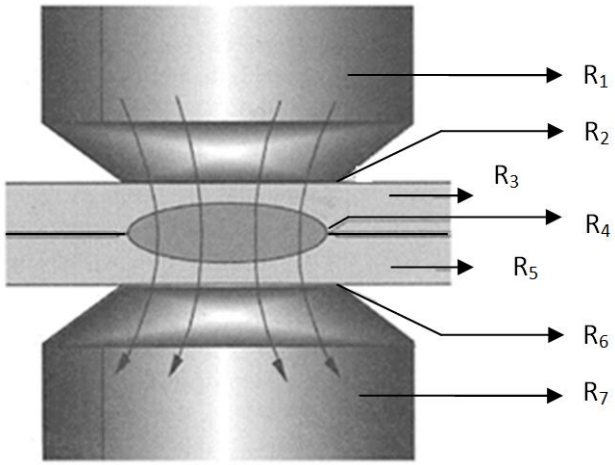
R_3: Üstteki ana malzemenin direnci

R_4: Üst ana malzeme ile alt ana malzeme arasındaki temas direnci

R_5: Alttaki ana malzemenin direnci

R_6: Alt çenedeki elektrot ile alttaki ana malzeme arasındaki temas direnci

R_7: Alt çenedeki elektrotun direnci



Şekil 4.2 : Elektrik direnç nokta kaynağındaki meydana gelen dirençler [32].

Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak bağlantısının oluşabilmesi için, sistemden geçen kaynak akımı ile üretilen ısının, birim zamanda sistemden iletilen ısıdan büyük olması ve böylece ısının sistemde yığılabilmesi gereklidir. Sistemde yüksek soğuma hızları istenmez, kaynaklı iş parçasının çok hızlı soğuması özellikle iki malzemenin birleşim bölgesi olan çekirdek bölgesinde fazların değişimine, çatlaklara ve yüksek sertliğe neden olur. Bunun engellenmesi için elektrotları su ile soğutmak etkili bir yöntemdir [33].

4.3. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Kabiliyeti

Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak yapılacak metalik malzemeler belli kademelere kadar kaynak işlemi yapılabilmekte ve bu da bazı sınırlamalar ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca yapılan elektrik direnç nokta kaynak işleminin kalitesini belirlemede işlemin atmosfer koruması veya ekstra işlemlere gereksinim duyulmaması kalitesini olumlu yönde etkiler.

Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak kabiliyeti kullanılan malzeme türünün çeşitli özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bunlar malzemenin ergime sıcaklığı, malzemenin ısıl iletkenliği ve malzemenin elektriksel direnci olup kaynak işleminde kullanılan iş parçası malzemesinin türüne göre değişmektedir. Örneğin alüminyum ve çeliğin ergime sıcaklığı, ısıl iletkenliği ve elektriksel dirençleri farklıdır. Alüminyumun elektrik ve ısıl iletkenliği çeliğe göre yüksektir, alüminyumun elektriksel direnci çeliğe göre düşüktür

bu da çeliğe göre alüminyumun elektrik nokta direnç kaynağı kabiliyetinin daha kötü olduğunu göstermektedir [34, 35].

Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak kabiliyeti aşağıdaki deneysel denklem ile ifade edilmektedir.

$$S = \frac{10^4}{(\lambda)x(\alpha)x(t_e)} \tag{4.3}$$

S: Kaynak kabiliyeti faktörüdür.

α: Kaynak yapılan iş malzemesinin elektrik iletkenliği (mega-siemens/m)'dir.

λ: Kaynak yapılan iş malzemesinin ısıl iletkenliği (W/mK)'dir.

t_e: Kaynak yapılan iş malzemesinin ergime noktası (ºC)'dir.

Malzemelerin kaynak kabiliyetlerinin değerlendirilmesi Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 : Malzemelerin kaynak kabiliyeti değerlendirmesi.

Kaynak Kabiliyeti Faktörü	Kaynak Kabiliyeti Durumu
(S) < 0,25	Kötü
0,25 < (S) < 0,75	Yeterli
0,75 < (S) < 2,00	İyi
2,00<(S)	Çok iyi

4.4. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Bağlantı Kalitesi Parametreleri

Elektrik direnç nokta kaynağında uygulanan kaynaklı birleştirmelerin kalitesine etki eden parametreler şunlardır;

- Kullanılan kaynak elektrodunun türü ve üretildiği malzeme türü
- Kullanılan kaynak elektrodunun baskı kuvveti
- Kullanılan kaynak akım şiddeti
- Kullanılan kaynak akım süresi

4.4.1. Kullanılan kaynak eletrodu türü ve üretildiği malzeme türü

Elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan elektrotlardan bazı özellikleri taşımaları istenmektedir. Bunlar şunlardır;

- Kullanılan elektrot uçlarının emniyetli olarak soğutulması gereklidir.
- Kullanılan elektrotların kullanılan iş malzemeleri ile alaşımlaşma yapmaması gereklidir.
- Kullanılan elektrotların iyi ısı iletkenliği ve iyi elektrik iletkenliği olmalıdır.
- Kullanılan elektrotların yüksek sıcaklıklarda sertliği düşmemelidir.
- Kullanılan elektrodun üretildiği malzeme yüksek dayanımlı olmalıdır.

Elektrot olarak kullanılmak için malzeme seçiminde saf bakırın elektriği iyi iletmesine rağmen düşük dayanıma sahip olması nadir olarak saf bakırın elektrot üretilecek malzeme olarak kullanılmasına sebep olur. Saf bakırın istenmeyen özellikleri olan düşük dayanım gibi özellikleri alaşımlama giderilebilir. Bu amaçla saf bakıra çeşitli alaşım elementleri ilave edilerek alaşımlandırma yapılır. Sıklıkla zirkonyum ve krom elementleri saf bakıra elektrot yapımı için ilave edilir [36].

Elektrik direnç nokta kaynağında elektrotun özellikleri kullanılacak iş parçasının özelliklerine göre seçilmelidir. Örneğin yüksek elektrik iletkenliğine sahip malzemelerin kaynağında elektrotların da yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmaları gerekir. Eğer dayanımı yüksek malzemeler birleştirilecek ise ise elektrotların da dayanımlarının yüksek olması gereklidir [37].

4.4.2. Kullanılan kaynak elektrodunun baskı kuvveti

Elektrot baskı kuvveti, kaynak çevrimi işlemi süresince iş parçalarına elektrotlar ile uygulanan baskı kuvveti olarak tarif edilebilir. Kullanılan elektrotlardaki uygulanan

baskı kuvveti özelikle kaynak çevrimindeki elektrik akımını ve kaynak edilecek malzemelerdeki birbirine olan temas direncini etkilemektedir. Kullanılan elektrot baskı kuvvetinin yüksek değerlerde olması kaynak edilecek malzemelerin yüzeylerindeki dalma derinliklerinin yüksek olmasına neden olur [34, 36, 38].

Elektrot baskı kuvveti elektrot direnç nokta kaynağı için önemini şu şekilde tarif edilebilir. Elektrot baskı kuvveti ile kaynak yapılacak iş parçalarının birbirine olan temas dirençlerinin daha küçük olması sağlanırken ayrıca iş parçalarına uygulanacak kaynağın yerinin belli olması sağlanır. Elektrik direnç kaynağının kaynak aşamasında elektrotlar, baskı kuvveti ile kaynak yapılan malzemelerin birbiriyle temas eden yüzeylerindeki fışkırma oluşuma çalışan sıvı metal kütlesini baskı kuvveti ile fışkırmanın engeller. Kaynak aşamasından sonraki soğuma aşamasında ise elektrotlar, gerek kullanılan malzemelerdeki elementlerin bileşimi gerekse kaynak bölgesine giren ısının sebep olduğu istenmeyen kaynak bölgesinde boşluklar ve kaynak bölgesindeki çatlakların engellenmesinin en aza indirilmesine yardımcı olur [37].

4.4.3. Kullanılan kaynak akım şiddeti

Kaynak akım şiddeti ve kullanılan devredeki dirençlerin etkisi ile sistemde ısı meydana gelir. Meydana gelen bu ısı elektrik direnç nokta kaynağı prosesinde oluşan kaynak devresindeki dirençlerden meydana gelir. Bu ısı radyasyon yoluyla ve konveksiyon yoluyla olmak üzere çeşitli yollarla sistemden kullanılan elektrotlar ve kullanılan malzemeler ile uzaklaşmaya çalışır. Oluşan bu ısı kaynak devresinde oluşan dirençlerden dolayı meydana gelir. Meydana gelen ısının en yoğun olduğu bölgeler kullanılan kaynaklı birleştirme yapılan malzemelerde ve bu malzemelerin ara bölgelerinde meydana gelir. Çünkü kaynaklı birleştirmede kullanılan kaynak elektrotlarının kaynaklı birleştirmede kullanılan malzemelere nazaran elektriksel iletkenleri daha fazladır ve ayrıca kaynak edilen malzemelere kıyasla elektriksel dirençleri daha azdır. Ayrıca kullanılan kaynak elektrotları elektrotların ısının etkisiyle deforme olmaması için kaynak esnasında soğutulmaktadır [39].

Elektrik direnç nokta kaynağında kullanıln amper değeri yani kaynak akım şiddetinin yükselmesi neticesinde oluşan kaynak çekirdek ebatlarının ölçüleri artar ayrıca

kaynaklı birleştirmenin dayanımı artmış olur. Fakat elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan kaynak akımı değerinin çok yüksek olması kaynaklı birleştirmenin dayanımın azalmasına, kullanılan kaynak elektrotlarının ısı neticesiyle deforme olmasına ve kullanılan malzemelere elektrot izleri oluşmasına dolayısıyla kaynak birleştirmnin yüzeyinde kötü bir görünüme, kaynak bölgesinde gözeneklerin oluşumuna, kaynak bölgesinde çatlak oluşumuna sebep olur.

4.4.4. Kullanılan kaynak zamanı

Elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan kaynak zamanı uygulanan kaynaklı birleştirmede sisteme giren toplam ısı miktarını doğrudan etkiler. Uygulanan kaynak süresinin artması kaynak çekirdeğinin boyutlarını yani kaynak çekirdeğinin yüksekliğini ve kaynak çekirdeğinin çapını arttırır. Kaynak çekirdeğinin ebatları büyüdüğünden kaynaklı bağlantının dayanım değeri yükselir. Kaynak zamanının gerekenden uzun olması sonucu kaynaklı birleştirmede istenmeyen aşırı elektrot dalma derinliğine, çatlaklara, gözenekler meydana gelebilir. Uygulanan kaynak süresinin az olması halinde ise kaynak çekirdeğinin yüksekliği ve kaynak çekirdeğinin çapının küçük boyutlarda olur ve elektrot dalma derinliği de düşük miktarda meydana gelir. Ve bu da kaynaklı birleştirmenin dayanımının düşük olmasına neden olur. Kaynak akım şiddeti ve kaynak akım şiddetinin uygun değerlerde tatbik edilmesi kaynak çekirdeğinin uygun ebatlarda olmasını sağlar [40].

4.5. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Bağlantı Kalitesi

Elektrik direnç kaynağı uygulanmış numunelerin kalitesini ölçmek için uygulanmış olan kaynak işleminin çeşitli özellikleri incelemeye tabi tutulur. Bu özellikler iki tane olup şu şekildedir. Kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri kaynaklı bağlantının mekanik dayanım ve performans özelliklerini içerir. Kaynağın fiziksel özellikleri ise kaynaklı bağlantının geometrik ve fiziksel özelliklerini içerir. Elektrik direnç nokta kaynağında genellikle bağlantının kalitesini değerlendirmede birden fazla özellik göz önünde bulundurulur [32].

4.5.1. Kaynağın mekanik ve performans özellikleri

Elektrik direnç nokta kaynağı kullanılarak yapılan uygulamalarda kaynaklı birleştirmenin kalitesi için incelenen kaynağın mekanik özellikleri şu şekildedir:

- Kaynaklı bağlantının çekme-makaslama deneyi dayanım kuvveti
- Kaynaklı bağlantının çekme-sıyırma deneyi dayanım kuvveti
- Kaynaklı bağlantının artı çekme deneyi dayanımı
- Kaynaklı bağlantının yorulma davranışı
- Kaynaklı bağlantının korozyon dayanımı

Yapılan deneylerde elektrik direnç nokta kaynağı uygulanmış kaynaklı birleştirmelerin performans kriterleri için dikkate alınan performans parametreleri kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama dayanım kuvvetleri, çekme-sıyırma dayanım kuvvetleri ve artı çekme dayanım kuvvetleridir.

4.5.2. Kaynağın geometrik ve fiziksel özellikleri

Elektrik direnç nokta kaynağında birleştirmenin kalitesine etki eden geometrik faktörler şunlardır:

- Kaynak çekirdeğinin yükseklik ölçüsü (hn): Kaynak işleminde meydana gelen çekirdeğin en üst noktasından en alt noktasına kadar uzaklığın ölçüsüdür.

- Kaynak çekirdeğinin çap ölçüsü (dn): Kaynak işleminde meydana gelen çekirdeğin en sol noktasından en sağ noktasına kadar uzaklığın ölçüsüdür.

- Kaynak çekirdeğinin çekirdek boyut oranı (hn/dn): Kaynak işleminde meydana gelen çekirdeğin yükseklik ölçüsünün çekirdek çap ölçüsüne bölünmesiyle elde edilen orandır.

- Kaynak elektrot dalma derinliği (d_{ind1} +d_{ind2}): Kaynak işleminde meydana gelen ve üst ve alt elektrotların birleştirilen alt ve üst iş parçalarına baskısı sonucu iş parçalarındaki batma derinlik ölçülerinin toplamıdır.

Elektrik direnç nokta kaynağında birleştirmenin kalitesine etki eden fiziksel faktörler ise şunlardır:

- Kaynak işleminden sonra meydana gelen iç süreksizlikler
- Kaynak işleminden sonraki yüzey görünümü
- Kaynak işlemi esnasında meydana gelen fışkırma

Elektrik direnç nokta kaynağında birleştirmenin kalitesine etki eden geometrik faktörlerden kaynak birleştirmenin dayanımınına en fazla etki eden geometrik faktör kaynak çekirdeğinin çapıdır. Kaynak çekirdek çapı elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Daha sonra ise çekirdeğin yüksekliği, ve buna olarak çekirdeğin boyut oranı özelliği etkilidir. Referans çalışmalarda kaynak çekirdek alanında bu konuda incelendiği görülmüştür [35, 41-43].

Bir elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmede bağlantının sahip olması gereken en küçük çekirdek çapının formülü şu şekildedir.

$$d_n = 4s^{0,5} \tag{4.4}$$

formülde "s" ile gösterilen ifade kaynak işleminde kullanılan iş parçasının kalınlığını ifade etmektedir.

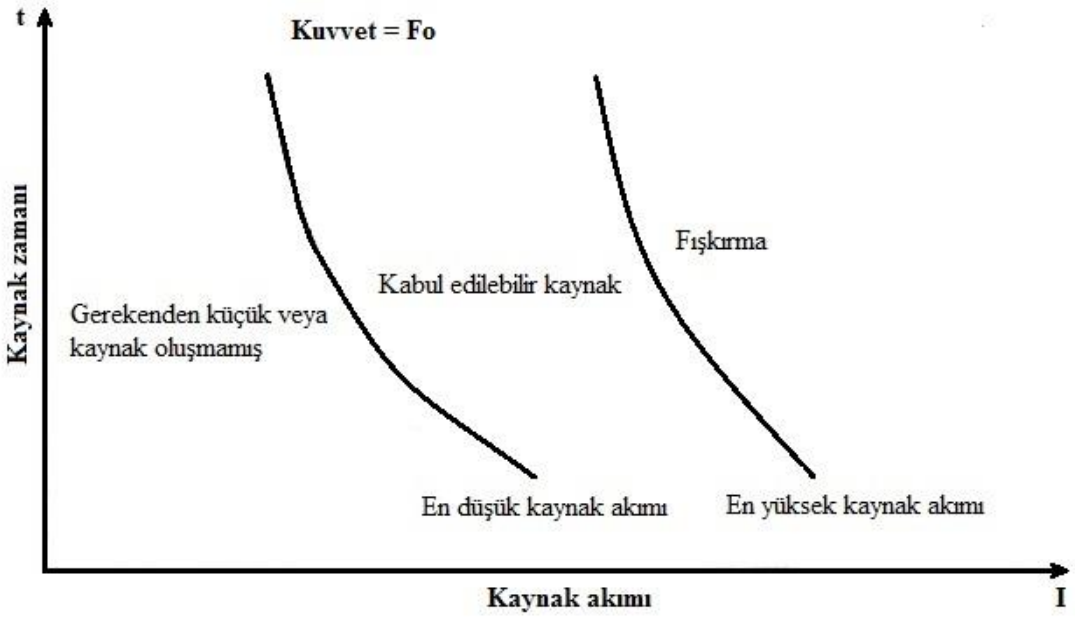
Genel olarak elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantılarda en küçük boyuttaki çekirdek yüksekliği kaynak ile birleştirilecek olan parçaların toplam kalınlıklarının yüzde yirmisi olarak kabul edilir. Bu bağlantılardaki en büyük boyuttaki çekirdek yüksekliği ise birleştirilecek parçalardan ince olanın yüzde sekseni olarak kabul edilir [46].

Elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantılarda elektrot dalma derinliği ise kaynaklı bağlantılarda bağlantı kalite ölçütü olarak kabul edilir. Elektrot dalma derinliğinin gereken değerlerden fazla olması elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların dayanımlarını azaltır. Tavsiye edilen standartlara göre elektrik direnç nokta kaynağında elektrot dalma derinliğinin kaynaklı bağlantı yapılacak iş parçalarının toplam kalınlıklarının yüzde otuzunu aşmaması gereklidir [45].

4.6. Kaynak Eğrisi grafiği

Elekrik direnç nokta kaynağında kaynak çekirdeğinin fiziksel ve geometrik özelliklerini etkileyen ana parametreler kullanılan elektrotun kuvveti, kullanılan kaynak akımının şiddeti ve kullanılan kaynak zamanıdır. Bu üç farklı değerin kaynak yapılacak malzemeye göre seçilmesi kaynak eğrisi grafikleri yardımıyla gerçekleştirilir. Şekil 4.3'de örnek bir kaynak eğrisi grafiği gösterilmektedir [46].

Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak lobu grafiklerinin işlevi üretim aşamasında iyi kalitede birleşmenin ve kaynak planının hangi zaman aralıklarında yapılacağını göstermektir. Çekme makaslama dayanımı ve kopma modu ile çekirdek geometrisi ve elektrot dalma derinliği ilişkilendirilerek değerlendirilir ve bu esnada bazı parametrerler sabit tutularak kaynak lobu grafikleri çizilir.



Şekil 4.3 : Örnek bir kaynak eğrisi grafiği [32].

BÖLÜM 5. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

5.1. Giriş

Yapılan literatür çalışmalarının araştırılmasında DP çeliği ve TWIP çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı ile alakalı yapılan az sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar incelenerek konu ile alakalı bilgiler aktarılmıştır.

5.2. Çift Fazlı Çeliklerin Direnç Nokta Kaynağı İle Birleştirilmesi Çalışmaları

Yang ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri araştırmada, DP600 çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı eliptik çekirdeğin farklı kaynak akım zamanları ile modifiye edilmiş elektrot uçları vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Ardından kaynak çekirdeği genişliği ve kritik numune boyutları arasındaki ilişki, numune genişliği ve sac kalınlığı da dahil olmak üzere numunelerin çekme-makaslama testlerindeki kopma şekilleri analiz edilerek istatiksel bir yöntem kullanılmıştır. Sonuçlar çekirdek genişliğinin, numune ebatının ve sac kalınlığının numune kopma modları üzerinde büyük etkisi olduğunu göstermiştir [47].

Hayat'ın gerçekleştirdiği araştırmada, galvanizli ve galvanizsiz DP600 çeliğinin yapıştırıcıyla birleştirme, elektrik direnç nokta kaynağı, yapıştırma ve nokta direnç kaynağı kombine olarak uygulanmıştır. Ayrıca HCl ile DP çeliğinin yüzeyindeki çinko tabakası uzaklaştırılarak çinko kaplamasının etkisi araştırılmıştır. Mikroyapı, çekme-makaslama ve kırılma özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak üç farklı birleştirme yönteminde de çekme-makaslama dayanımlarının çinko kaplamalı numunelerde daha yüksek olduğu ve ayrıca yapıştırma ve elektrik direnç nokta kaynağının kombine olarak uygulandığı numunelerin dayanımlarının sadece yapıştırma ve sadece elektrik direnç kaynağının uygulandığı numunelere kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür [48].

Banerjee ve arkadaşları yaptıkları araştırmada, elektrik direnç kaynağının uygulandığı DP590 çelik saclarının yorulma özelliği kaynak çekirdek boyut, mikroyapılar ve çentik geometrisi ile incelenmiştir. Yüksek ısı girdisi olan kaynak uygulamalarında iki sacın çekirdek ile birleşme bölgesine yakın dikdörtgen şekilli büyük ve dörtgen şekilli çentik oluşurken, düşük ısı girdisi olan uygulamalarda ise sivri bir çentik ve çentikten önce çentiğe kısmen bağlı arayüz oluştuğu belirtmişlerdir. Yüksek yük rejiminde birleşmenin performası direkt olarak çekirdeğin büyüklüğü ile ilişkilendirilebilirken düşük yüklerde ise öncelikle çentik geometrisi tarafından kontrol edildiğini belirtmişlerdir [49].

Liu ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, çalışma sertleşmesinin elektrik direnç nokta kaynağındaki mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. %0, %4, %8 ve %12 önceden gerilmiş DP780 çelikleri 1500 MPa çekme dayanımına sahip 22 MnB5 çeliğiyle elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Mekanik davranıştaki çalışma sertliğinin etkisi, sertlik ve profili ve kaynaklı birleştirmelerin ısın etkilediği bölgenin sertliğinin azalması ayrı incelenmiş olup sonuç olarak çalışma sertliğinin elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların taşıma kapasitesini %5 arttırırken enerji absorblama kapasitesini %20 oranında düşüreceğini belirtmişlerdir [50].

Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, 1,2 mm DP780 ve 1,5 mm DP600 çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ve birleştirmelerin çekme-makaslama deneylerindeki kırılma modu ve kırılma mekaniği incelenmiştir. Ara yüzeyden, kısmı olarak ara yüzeyden ve düğmelenme olmak üzere üç farklı kırılma görülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerin gerilme analizleri incelendiğinde çekme gerilmesinin arayüzey kırılmasına yol açtığı ve makaslama(kayma) gerilmesinin ise düğmelenmeye yol açtığı görülmüştür. DP780 tarafındaki daha ciddi gerilme konsantrasyonu ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) yumuşaması nedeniyle kırılmanın DP780 çeliğinden başladığını belirtmişlerdir [51].

Xiaoyun ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, 1,5 mm DP600 çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş elektrot kuvvetini değiştirerek güvenliği çalışma aralığı belirten kaynak lobu diyagramının genişlemesini sağlamaya çalışmışlardır. Amerikan Kaynak Derneği (AWS), Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) ve Amerika Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) tarafından seçilen kriterlere göre ilk olarak kaynak akım değeri 9-12 kA, kaynak zamanı 240-480 ms, elektrot

kuvveti 4-5,5 kN kullanılmış olup, daha sonra ise kaynak akım değeri, kaynak zamanı aynı tutulup elektrot kuvveti ise değiştirilmiştir. 1,48 kA olan kaynak lobu aralığı elektrot kuvvetinin değiştirilmesi ile birlikte neredeyse iki katı olan 2,78 kA'a genişlemiştir. Sonuç olarak, çift fazlı çeliğin kaynaklanabilirliği, elektrik direnç nokta kaynak işlemi sırasında elektrot kuvvetini ayarlayarak büyük ölçüde iyileştirilebilir [52].

Chabok ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, elektrik direnç nokta kaynaklı DP1000 çelik sacının iki farklı kaynak koşulunda mikroyapısal gelişimi ve bu gelişimin ve mekanik performans ve hasar mekanizmaları ile olan ilişkileri incelenmiştir. Çift darbeli kaynak şemasının, tek darbeli kaynağa kıyasla çapraz çekme kuvvetinde bir artışa yol açtığı gösterilmiştir. Yapılan çalışmada çift darbeli kaynak planı tek darbeli kaynağa kıyasla artı çekme dayanımında artışa öncülük ettiği görülmüştür. İkinci darbe ilk darbenin geçiş bölgesini iki bölge içerisine alt bölümlere ayırır. İç bölge ikinci darbeden sonra sütunsu yapıda katılaşır, oysaki ikinci darbe ile daha dış kısım önceki östenit tanelerinin eş eksenli yapısının oluşumuna öncülük ederek tekrar kristalize olur. Ayrıca, çift darbeli kaynak kritik altı ısının tesiri altındaki bir bölge oluşturur, bu da kaynak çekirdeğinin kenarlarındaki artı çekme deneyi sırasındaki gerilme yoğunlaşmasını azaltır. Çift darbeli kaynağın daha iyi mekanik özellikleri kritik altı ısının tesiri altındaki bölgenin sertliğinin azalmasına, çekirdek ve ısının tesiri altındaki bölge arasında kalın bir ikincil geçiş bölgesi oluşumuna, daha düşük artık gerilmeli ve yüksek dereceli tane sınırlarının yüksek bölümü ve kaba taneli ısının tesiri altındaki bölgedeki tanelerin daha ince olmasından ileri gelir. Ve bu yüksek açılı taneler bir engel gibi davranarak çatlak ilerlemesine karşı bir engel oluştururlar. Tek darbeli kaynakta artı çekme deneyinde maksimum kuvvet 9,2 kN iken maksimum yükteki absorbe edilen enerji miktarı ise 55,3 kJ'dur. Çift darbeli kaynakta artı çekme deneyinde maksimum kuvvet 11,7 kN iken maksimum yükteki absorbe edilen enerji miktarı ise 75,2 kJ'dur [53].

Pouranvari ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, özel şekillendirme kalitesindeki AISI 1080 düşük karbon çeliği ile DP600 çeliği arasındaki elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerin kaynak parametrelerinin (kaynak zamanı, kaynak akımı ve elektrot kuvvetinin) aşırı yükleme kırılma modunda ve mekanik performansının araştırılmıştır. Nokta kaynaklarının mekanik özelikleri kırılma modları, maksimum yük

ve enerji absorbsiyonu yarı statik çekme-makaslama testi boyunca ifade edilmiştir. Çekme-makaslama testi esnasında ara yüzey, düğmelenme ve kısmi saçtan kısmi düğmelenme olmak üzere üç çeşit kırılma modu gözlenmiştir. Kaynak akım şiddeti olarak 8, 9, 10, 11 ve 12 kA, kaynak zamanı olarak 15, 20, 25 ve 30 cycle, elektrot kuvveti olarak 4,1, 5,1 ve 5,7 kN kullanılmıştır. Yapılan çekme-makaslama deneylerinde genel beklentinin aksine hasar daha mukamevetli bölge olan DP600'den başlamıştır. Artan kaynak zamanı, artan kaynak akımı ve azalan elektrot kuvveti hasar modunun arayüzeyden düğmelenmeye dönüşmesine rehberlik etmiştir. Fakat aşırı kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti şiddetli fışkırmaya ve elektrot izine neden olarak tipik olarak daha düşük maksimum çekme kuvveti ve enerji absorbsiyonuyla sonuçlanır. Kaynak parametrelerini optimize etmek için düğmelenme hasar modu elde etmek için fışkırma ve elektrot izlerinde kaçınılmadır [54].

Ma ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, galvanizli 1,2 mm kalınlığındaki DP600 çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerinde mikroyapı karakterizasyonu, mikro sertlik testleri, çekme makaslama testleri ve yorulma testleri yapılarak sonuçlar incelenmiştir. DP600 saclar 18 cycle kaynak zamanı kullanılarak, 6.83, 8.14, ve 8.54 kA kaynak akım şiddetleri kullanılarak birleştirilmiş, elektrot kuvveti 2 kN ve 3,34 kN olarak denenmiştir. Elektrik direnç nokta kaynağından sonra çekirdek-ITAB geçiş bölgesi ve ısının tesiri altındaki bölge ısını tesiri altındaki bölgedeki ince taneli martenzit ve çekirdek-ITAB geçiş bölgesinde kaba taneli iğne yapıdaki martenzit olmak üzere genel olarak martenzit alanları içerir. İğnesel yapıdaki martenzitin oluşumundan dolayı ITAB-çekirdek geçiş bölgesi ve kaynak çekirdeği bölgesinin sertliği ana malzeme sertliğinin iki katından daha fazladır. Maksimum çekme-makaslama kuvveti 8,1-8,3 kA arasındaki kaynak akım şiddetlerinde elde elmiş olup fışkırma oluşumuna sahip deney numuneleri daha düşük maksimum çekme-makaslama kuvveti sergilemiştir. Yorulma testlerinde de fışkırma oluşumuna sahip deney numuneleri biraz daha düşük bir yorulma sınırı göstermiştir. Hem yorulma hem de çekme-makaslama deneylerinde çatlak başlangıcı iki sacın arasındaki arayüzde ve kaynak çekirdeğinin sınırında gözlenmiştir. Bu bölge maksimum gerilmelerin meydana geldiği bölgedir. Yanlış kaynak parametreleri boşluklardaki karakteristik dendrit mikro yapıların gözlemlendiği yerlerde boşluk ya da katılaşma çatlağı oluşumuna yol açarak, uygulanan statik veya döngüsel altında arayüzey kırılması ile sonuçlanır [55].

Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, 1,5 mm kalınlığındaki DP600 çelik sacları ile 1,2 mm kalınlığındaki DP780 çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerinde 8 kA kaynak akım şiddeti, 30 cycle kaynak zamanı ve 4 kN elektrot kuvveti kullanılmıştır. Martenzitin hacim oranına bakıldığında ana metalden ısının tesiri altındaki bölgeye ve oradan da çekirdek bölgesine giderken arttığı gözlemlenmiştir. Sıcaklık ve soğutma hızı martenzit miktarını belirler. Ana metallerin martenzit hacim oranları çok çeşitli olsa da, çekirdek bölgesinin martenzit hacim oranları yaklaşık olarak eşit kalmaktadır. Çekirdek bölgesindeki elementlerin dağılımı incelendiğinde karbon, silisyum, molibden, krom, mangan ve demir elementlerinin iyi bir karışımının olduğu fark edilir. Bu çekirdek bölgesindeki iyi elektromanyetik karışma nedeniyledir. Kaynak akımı ve indüklenen manyetik alan tarafından üretilen manyetik güç alanı çok güçlü ve düzenlidir. Manyetik kuvvet, çekirdek bölgesindeki erimiş metalin her yönde yüksek hızda düzenli akış yapmasına neden olur. Kısa elektrik direnç kaynağı süresi elementlerin dağılımı için sınırlayıcı bir faktör değildir. Bu nedenle, elemental dağılım düzgündür. Çekirdek bölgesindeki sertlik değerleri ana metallerin sertlik değerlerinden önemli ölçüde daha yüksektir. Ana metalin yanındaki ITAB bölgesinde oluşan martenzitin temperlenmesi nedeni ile sertlikte azalma görülmüştür. Kırılma modları temel olarak çekirdek boyutlarına bağlıdır [56].

Chen ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, elektrik direnç nokta kaynaklı 1,5 mm kalınlığındaki A5052 alüminyum alaşımı saclar ile 1,2 mm kalınlığındaki DP600 çift fazlı çelik sacların mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Elektrot kuvveti olarak 3 kN, kaynak zamanı olarak 14 cycle kullanılmış, kaynak akım şiddeti ise 10,5 kA, 11,5 kA, 12,5 kA, 13,5 kA ve 14,5 kA denenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin çekirdek bölgesinin DP 600 tarafından alınan EBSD görüntüleri iğnesel martenzit içerdiğini, ITAB bölgesinin ise ferrit ve iğnesel martenzit içerdiğini göstermiştir. DP 600 tarafında erimiş çekirdeğin oluşumu çeliğin merkezinden başlamış, A5052 tarafında erimiş çekirdeğin oluşumu çelik ve alüminyum alaşımı arasındaki arayüzey bölgesinden başlamıştır. A5052'in çekirdek ve ITAB bölgelerinin tane yapısı hücresel kristal yapıda, çekirdek bölgesinin sınır bölümü sütunlu kristal forma sahiptir. 3.3 μm kalınlığında meydana gelen iğne şeklindeki Fe_4Al_{13} intermetalik bileşiği tabakası alüminyum alaşımlı tarafa bitişik, 0,67 μm ile 15,8 μm arasında değişen Fe_2Al_5 intermetalik bileşiği tabakası çelik tarafına bitişiktir. Maksimum çekme-makaslama kuvveti kaynak

çekirdeği genişliği 6,3 mm ve kaynak akım şiddeti 12,5 olan numunelerde, 5 kN bulunmuştur [57].

Wan ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, 1,7 mm kalınlığındaki DP 600 çelik sacları 14 cycle kaynak zamanı, 3,5 kN elektrot kuvveti, kaynak akım şiddeti ise 6 kA, 8 kA, 10 kA ve 12 kA denenerek elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmeler yapılmıştır. Mikroyapı ve çekme-makaslama deneylerindeki performansları gözlenip araştırılmıştır. Kaynak akımının DP600 nokta kaynaklarının mikro özellikleri üzerinde uygulanan parametrelerde cüzi bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak çekirdeğinin büyüklüğü ve şekli kaynak akımına büyük ölçüde bağlı olduğu gözlemlenmiştir. 12 kA kaynak akımı şiddetinde fışkırma meydana gelmiş ve istenmeyen kısmi arayüzey kırılması gözlemlenmiştir [58].

Kishore ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, her ikisi de 1,3 mm kalınlığındaki biri galvanizli diğeri ise galvanizsiz DP600 çelik saclarının 7,5 cycle, 11,25 cycle ve 15 cycle kaynak zamanı, 2,8 kN elektrot kuvveti, kaynak akım şiddeti ise 6 kA, 7 kA, 8 kA 9 kA ve 10 kA ile toplamda 15 farklı parametre denenerek elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmeler yapılmıştır. Elektrot olarak 6 mm çapındaki Cu-Cr-Zr elektrotlar elektriksel iletim ve yüksek sıcaklık özelliklerinin optimum bileşimi için seçilmiş olup elektrotların kenarlarının kubbe şekilli olması kesik koni biçimli elektrotla karşılaştırıldığında literatürdeki çalışmalara göre daha büyük çekirdek boyutu ile sonuçlandığı bulunmuştur. Çalışmanın amacı uygulanan çekme-makaslama ve çekme-sıyırma parametrelerindeki maksimum çekme kuvvetini elde etmek için elektrik direnç nokta kaynağı parametrelerini optimize etmeye çalışmaktır. Çalışma sonucunda istenen düğmelenme kopma modunun görüldüğü minimum kritik çekirdek genişliği gereklidir. Düğmelenme hasar modu için kritik çekirdek çapı 4,4 mm olarak belirlenmiştir. Kaynak süresinin yanı sıra kaynak akım şiddetinde de bir artış olması ile elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların çekirdek çapı ve maksimum çekme kuvvetinde bir artış olduğu görülmüştür. Sonuçta hem çekme-makaslama hem de çekme-sıyırma deneylerinde bulunan maksimum çekme kuvvetleri değerleri çekirdek çapı tarafından yönetildiği gözlemlenmiştir. Bütün değerlerde elde edilen çekme-makaslama maksimum çekme kuvveti değerleri çekme-sıyırma kuvveti değerlerinden daha büyüktür. Kaynak akım şiddeti 9 kA ve kaynak zamanı 11,25 cycle olan parametrede hem çekme-makaslama

hem de çekme-sıyırma değerleri en yüksek değerlerdir. 10 kA ve 11,25 cycle değerinde fışkırma görülmesine kadar kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı arttırıldığında çekirdek çapı artmaktadır. Kısmi arayüzey kırılma modundan düğmelenme kırılma moduna değişimi, çekirdek çapı boyutundaki artış ve kırılma mekanizmasının taneiçi kırılması ve yarılma benzeri kırılmanın arzu edilen sünek moda değişimi tarafından dikte edilir. Elektrik direnç nokta kaynağı galvaniz kaplı DP600'ün yüzeyindeki çinkoyu kaynağın farklı bölgelerine tekrar dağıtmış olup çekirdek bölgesinde çinko bulunmamakta fakat çekirdeğe en yakın kaba taneli ITAB'da çinko en fazla oranda bulunmaktadır [59].

Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, 1,2 mm kalınlığındaki DP780 çelik sacları ile 1,5 mm kalınlığındaki DP600 çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı uygulanarak birleştirilmiş, çekirdek çapı, elektrot dalma boyutları, elektrot dalma oranı ve ergime oranı açısından tarif edilerek makro olarak incelenmiştir. Kaynak zamanı olarak 18 cycle kullanılmış, kaynak akım şiddeti olarak 6 kA,7 kA, 8 kA, 9 kA,10 kA,11kA ve 12kA, elektrot kuvveti olarak ise 3,5 kN, 4 kN, 4,5 kN, 5 kN, 5,5 kN ve 6 kN denenmiştir. Elektrot dalma oranı sonuçlarına göre DP600 tarafının DP780 tarafınınkinden daha yüksek olduğu ortaya koyulmuştur ve DP600 tarafının elektrot dalma oranı kaynaklı bağlantıların DP780 tarafınınkinden daha düşüktür. DP600 ve DP780 çelik sacların birleştirmede sıranın önemli olduğu, aynı kaynak parametrelerinde üstte DP780 altta DP600'ün olduğu kaynaklı birleştirmelerde üstte DP600 altta DP780'in olduğu kaynaklı birleştirmelere kıyasla daha büyük bir çekirdeğe sahip olma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bunun DP780'in DP600'e göre elektriksel özdirenç ve ısı absorbe etme kapasitesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. DP600 ve DP780 taraflarının elektrot dalma çap ölçüleri elektrot geometrisine ve kuvvetine dayanır. . Elektrot dalma derinliği minimum değerde tutulmalıdır. Azalan elektrot dalma derinliği elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların enerji absorbe etme kapasitesini ve yük taşıma kapasitesinin arttırabilir. İyi bir kaynak yüzeyi elde etmek için, elektrot dalma derinliği birleştirilen çelik sacların kalınlığının %20'siyle sınırlı olmalıdır [60].

Yuan ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, 1 mm kalınlığındaki ultra düşük karbonlu DC54 çelik sacları ile 1,6 mm kalınlığındaki galvanizli DP600 sacları elektrik direnç nokta kaynağı uygulanarak birleştirilmiş, çekme-makaslama testi ve makroyapı,

mikroyapı testleri uygulanmıştır. Kaynak zamanı olarak 5 cycle, 8 cycle, 11 cycle, 14 cycle, 17 cycle ve 20 cycle, kaynak akım şiddeti olarak 6 kA,7 kA, 8 kA, 9 kA,10 kA ve 11 kA elektrot kuvveti olarak ise 1,8 kN, 2,2 kN, 2,6 kN, 3 kN, 3,4 kN denenmiştir. Çekme-makaslama deneyi sonucunda arayüzey kırılma modu ve düğmelenme modu görülmüştür. Düşük kaynak akım şiddetlerinde arayüzey kırılması görülmüş, kaynak akım şiddeti arttığında kırılma düğmelenme şeklinde olmuştur. DP600 tarafı için çekirdek ve ITAB bölgelerindeki mikrosertlik değerleri ısıtma boyunca meydana gelen ergime ve östenitleşme ayrıca soğutma sonucunda östenitin martenzite dönüşmesiyle ana malzemenin sertlik değerlerinden çok daha yüksektir. Maksimum çekme-makaslama kuvveti kaynak akım şiddeti, kaynak zamanı ve elektrot kuvvetinin artmasıyla belirgin bir artış göstermiş daha sonra ise hafif bir düşüş göstermiştir. Maksimum çekme-makaslama kuvveti 9 kA kaynak akım şiddeti, 14 cycle kaynak zamanı, ve 2,6 kN elektrot kuvveti kullanılarak 6,385 kN bulunmuştur. Çekirdek bölgesi tamamen yüksek soğuma hızı nedeniyle iğnesel martenzit içermektedir, DP600'ün kaba taneli, ince taneli ve interkritik bölgeleri seçilebilmektedir. Birleştirmenin DP600 tarafı için ana metalin aksine ITAB bölgesindeki martenzit yüzdesi artmıştır. Kaynak çekirdeğinin çapı artan kaynak akım şiddeti ve artan kaynak zamanı dolayısıyla artan ısı girdisi ile büyümüştür. Elektrot dalma derinliği artan kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı ile artmıştır [61].

Pouranvari'nin gerçekleştirdiği çalışmada, 2 mm kalınlığındaki düşük karbon çeliği(LC) saclar ile 2 mm kalınlığındaki DP600 çelik saclar elektrik direnç nokta kaynağı uygulanarak LC/LC, LC/DP ve DP/DP çiftleri şeklinde birleştirilmiştir. Elektrot kuvveti 5,1 kN ve bekleme zamanı 0,2 saniye olarak sabit tutulmuş, kaynak akım şiddeti 7,5 kA'den 11 kA'e kadar adım adım 0,5 kA arttırılmıştır. Çekme-makaslama ve artı çekme deneylerinde kaynak akım şiddetinin artmasıyla artan çekirdek bölgesi boyutları ile kırılma modunun arayüzey kırılma modundan düğmelenme kırılma moduna geçtiği gözlemlenmiştir. Artı çekme deneyi boyunca kırılma modunun arayüzey kırılma modundan düğmelenme kırılma moduna geçmesi çekirdek bölgesinin kırılma tokluğu ve kırılma bölgesinin yerinin (örneğin ITAB) mukavemeti tarafından kontrol edilir. Çekme-makaslama deneyinde düğmelenme kırılma modu için itici güç çekirdek çevresindeki çekme gerilmesidir, artı çekme deneyinde ise ITAB'daki kayma gerilmesi itici güçtür. Artı çekme deneyi boyunca çekirdek çevresi neredeyse homojen bir kayma

gerilmesine maruz kalır. Çekirdek bölgesinin karbon eşdeğeri artı çekme deneyi boyunca elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerinde önemli rol oynar. Çekme-makaslama deneyi boyunca kırılma modunun arayüzey kırılma modundan düğmelenme kırılma moduna geçmesi çekirdek bölgesinin sertliği ve birleşmenin sertliği tarafından kontrol edilir. Düğmelenme kırılma modunun sağlanması için gerekli minimum çekirdek boyutu ana metalin sertliğinin çekirdek bölgesinin sertliğine oranı (ortalama) ile orantılıdır. Çekirdek bölgesinin boyutu artı çekme deneyi ve çekme-makaslama deneylerindeki yapılan bütün deney kombinasyonlarının maksimum kuvvet ve enerji absorblamasını kontrol eden anahtar faktör olduğu kanıtlanmıştır [62].

Marya ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, 2 mm kalınlığındaki farklı tür galvanizli DP600 çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı uygulanarak birleştirilmiştir. Çekirdek bölgesindeki boşluk oluşumlarını araştırmak amacıyla iki farklı şekilde parametreler değiştirilmiştir. İlk olarak kaynak çekirdeğindeki boşlukların kaynak zamanıyla ilişkisini incelemek amacıyla, elektrot kuvveti 5,3 kN sabit tutulmuş, 12 kA kaynak akım şiddeti ve 8 cycle, 9 cycle, 10 cycle, 11 cycle, 12 cycle ve 13 cycle kaynak zamanları denenmiştir, ikinci olarak çekirdeğindeki boşlukların kaynak akım şiddetiyle ilişkisini incelemek amacıyla elektrot kuvveti 2,7 kN, 4 kN, 5,3 kN ve 7,6 kN, kaynak akım şiddeti 8 kA, 9 kA, 10 kA, 11 kA ve 12 kA ve kaynak zamanı 20 cycle sabit tutularak deneme yapılmıştır. İki farklı DP600 türü çelik sac arayüzey kırılmasına dayanıklı birleştirmeler elde etmek için elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Düşük kaynak akım şiddeti(<10 kA), arttırılan kaynak zamanı (>25 cycle) ve yüksek elektrot kuvveti (>4 kN) düğme şekilli büyük çekirdek bölgeleri ve derin fakat kabul edilebilir elektrot dalma derinliği oluşumunu destekler. Galvaniz kaplamalar genelde kaynak kırılma modu üzerinde önemsiz bir etkiye sahiptir. Fakat azalan kaynak zamanı ve artan kaynak akım şiddeti katılaşma çatlaklarına neden olan çinkonun çekirdek bölgesine girişine neden olmuştur. Birçok kaynakta dendritik yüzey morfolojileri ile tanınan büzülme boşlukları gözlenmiştir. Yüksek akım şiddeti, uzun kaynak zamanı ve yüksek elektrot kuvveti, büzülme boşluklarını azaltmaya yardımcı olur [63].

5.3. TWIP Çeliklerinin Direnç Nokta Kaynağı İle Birleştirilmesi Çalışmaları

Saha ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada 1,4 mm kalınlığındaki soğuk haddelenmiş 0.6C–18Mn–1.5Al ve minör alaşım elementleri içeren TWIP çelik sacları kendi aralarında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Bu çalışmada elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş TWIP çeliklerindeki çatlak oluşumu incelenmiştir. Kaynak akım şiddeti 6 kN sabit tutularak kaynak zamanı 5 cycle, 7 cycle, 10 cycle, 12 cycle ve 14 cycle uygulanarak kaynak zamanının çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisi incelenmiş, ilave olarak kaynak akım şiddeti 4 kN, 5 kN ve 6 kN ve kaynak zamanı 25 cycle sabit tutularak kaynak akım şiddetinin çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. ITAB sıvılaşma çatlağı ve ayrışma davranışı gözlemlenmiştir. Çekirdeğe en yakın olan kısmen ergimiş kaba taneli ITAB bölgesinden başlayan çatlaklar ince taneli ITAB bölgesinde ilerleyerek ana metale doğru ilerler. Isı girişi ile çatlak uzunluğu ve çatlak açıklığı genişliğinin arttığı; ve kaynak akım şiddetinin, çatlak oluşumu için en etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Yüksek ısı girişi kaba taneli ITAB bölgesini genişletmiş ve çekirdek basıncındaki artış ardından çatlağın açılmasına olanak verir. Isı girişi ile de orantılı olan Çekirdek büyüklüğü ile ilişkili ısı girişi ile orantılı olan sıvılaşma çatlaklarının oluşumu, minimum çekirdek çapına ulaşılana kadar ITAB bölgesinde çatlakların oluşmadığı görülmüştür. Çatlaklar kaba taneli ITAB bölgesinde çekirdek bölgesi çapı 4,5 mm ve daha büyük olduğu zaman ortaya çıkmıştır. Çekirdek bölgesinin çapı 4,5-5 mm olduğunda çatlak başlangıç bölgesidir, çekirdek bölgesi çapının 5 mm'nin üzerinde olması tam gelişmiş çatlak oluşmasını sağlar. Ayrıca sıvılaşma çatlaklarının elektrot yönünde değil iki çelik sac arasındaki çentik boyunca meydana geldiği bulunmuştur. Sonuç olarak TWIP çeliği sıvılaşma çatlaklarına karşı oldukça hassastır. Çatlağın taneler arası özellikleri ve çatlak içerisine doldurulmuş sıvı metalin varlığı sıcaklık koşuluyla meydana gelen çatlağı gösterir. C, Mn ve Ti gibi ana alaşım elementleri güçlü bir ayrışma göstermiş ve çatlak bölgesini takip etmiştir [64].

Papadimitriou ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada galvanizli 1,12 mm kalınlığındaki (Fe–12Mn–1.5Al–1Si–0.5C) kimyasal kompozisyonuna sahip TWIP900 çelik sacları kendi aralarında ve 2 mm kalınlığındaki 5754 (Al-0.3Si-0.3Fe-0.1Cu-0.5Mn-0.3Mg) alüminyum saclar ve 1,2 mm kalınlığındaki 6111 (Al-0.75Mg-0.85Si-

0.7Cu-0.25Fe-0.3Mn) saclar ile kendinden delmeli perçinleme (SPR), curb konus perçinleme (KKR) ve Ejoweld teknikleri ile birleştirilmiştir. TWIP çelik saclar ile alüminyum sacların birleştirme akım şiddeti çok fazla olacağından sadece TWIP-TWIP birleştirmelerde elektrik direnç nokta kaynağı uygulanmış diğer birleştirmelerde diğer yöntemlerde uygulanmıştır. Elektrik direnç nokta kaynağında ilk olarak 6 kA kaynak zamanı sabit tutulmuş kaynak zamanı olarak 10 cycle kullanılmış ikinci olarak ön tavlama yapılarak kaynak süresi 20 cycle'a uzatılmıştır. Yaklaşık kaynak süresi birinci parametreye kıyasla 1,5 sn uzamıştır. İkinci parametre çinko gevrekliğini ve ardından meydana gelen sıvı metal gevrekliği çatlağı oluşumunu minimumda tutmak için seçilmiştir. TWIP-TWIP birleştirmeler için çekme-makaslama deneyi sonuçları kıyaslandığında öntav yapılan ikinci numunenin maksimum çekme kuvveti ve uzama değerleri ilk numuneye kıyasla değer olarak %20 daha fazladır. Çekme makaslama deneyi sonucu ilk numunenin maksimum çekme kuvveti 10,52 kN, ikinci numunenin maksimum çekme kuvveti 13.11 kN bulunmuştur. curb konus perçinlemede (KKR) numunenin maksimum çekme kuvveti 5,32 kN, kendinden delmeli perçinleme yönteminde(SPR) numunenin maksimum çekme kuvveti 7,43 kN, Ejoweld yönteminde ise numunenin maksimum çekme kuvveti 6.36 kN bulunmuştur. Ayrıca kimyasal analiz, TWIP çeliğinin çinko kaplaması-yüzeyinin yakınında sıvı metal gevrekliği çatlağı oluşumu göstermiştir [65].

Colombo ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, yüzeyi kaplanmamış soğuk haddelenmiş 0,8 mm kalınlığındaki Fe–Mn–C–Si–Al TWIP980 çelik sacları(ağırlıkça % Fe-16,4Mn-0,75C-1,9Al) elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak akım şiddeti olarak 6 kA, 7 kA ve 8 kA, kaynak zamanı olarak 8 cycle, 12 cycle ve 16 cycle, elektrot kuvveti olarak 2 kN, 4 kN ve 6 kN kullanılarak denenmiştir. Deney numuneleri çekme-makaslama deneyine tabi tutulmuş, mikroyapı ve mikrosertlik deneyleri yapılmıştır. Çekme-makaslama deneyi sonucunda kırılma modlarında arayüzey kırılma modundan kısmi arayüzey kırılması ve düğmelenme moduna değişimi gözlemlenmiştir. Yüksek akım şiddetleri (8 kN) ve daha düşük elektrot kuvveti (2 kN) uygulandığında arayüzey kırılma modu bastırılır ve düğmelenme kırılma modu baskındır. ITAB boyunca mekanik özelliklerin dağılımının kaynak parametrelerine güçlü bir şekilde bağlı olduğu görünmektedir. Daha yüksek akım şiddetleri ve daha uzun kaynak süreleri daha düşük elektrot kuvvetleriyle birleştiklerinde, ITAB'dan

çekirdek bölgesine kadar sertlikte daha az ani değişiklikler olarak ITAB yoluyla daha homojen bir sertlik dağılımı sağlama eğilimindedir. Maksimum gerilme kaynak parametrelerine bağlı olarak değişme göstermektedir. Belli bir değerden sonra kaynak akımı ne kadar yüksek olursa, maksimum çekme-makaslama kuvveti de o kadar düşer. Kaynak süresindeki artış da, daha düzgün bir maksimum çekme-makaslama kuvveti eğrisinin eşlik ettiği benzer bir etki gösterir. Elektrot kuvveti arttığında maksimum çekme-makaslama kuvveti de azalmaktadır. Bu çalışmadaki bulgular göz önüne alındığında, bulunan optimum kaynak parametreleri 8 kA kaynak akım şiddeti, 16 cycle kaynak zamanı ve 2 kN elektrot kuvvetidir [66].

Lee ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, deneysel olarak üretilmiş ve ısıl işlem yapılmış 1,4 mm kalınlığındaki galvanizli TWIP çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirilmiştir. Kaynak akım şiddeti olarak 5,6 kA, 6,2 kA ve 6,6 kA, kaynak zamanı olarak 17,5 cycle, elektrot kuvveti olarak 2,6 kN, kullanılarak denenmiştir. Ve çalışmada TWIP saclarında sıvı metal çatlağı önlenmesi hakkında incelemeler yapılmıştır. Sıvı metal gevrekliği çatlağı ya da sıvı metal çatlağı, ergimiş metallerin hassas malzemelerle temas ettiğinde meydana gelen bir çatlak şeklidir. Sıvı metal, malzemenin içine emilir ve bağlanma kuvvetinin tane sınırları boyunca azalmasına ve çatlamasına neden olur. Bu çatlaklar, kaynakların güvenilirliğini ve mekanik performansını etkilerler, çünkü araç titreşimleri sırasında ciddi şekilde büyüyebilirler. Buna örnek çinko kaplı yani galvanizli çelik sacları verebiliriz. Birçok otomotiv çeliği içerisinde TWIP çelik sacları, sıvı çinko östenit matrisinde ferrit matrisinde olduğundan daha hassas bir durum gösterdiğinden, sıvı metal çatlağına karşı ciddi olarak hassastır. Düşük karbonlu, DP veya TRIP çelikleri ferrit bazlı mikroyapıda oldukları için işlem sıcaklıklarını östenit bölgesinin altında tutarak sıvı metal çatlağı kontrol edilebilir. Diğer yandan TWIP çeliklerinde ise sıvı metal çatlağı, östenit bazlı mikroyapıların tüm elektrik direnç nokta kaynağı sıcaklık aralığında mevcut olması nedeniyle sıklıkla meydana gelir. İncelemeler sonucu çinko tabakası ve TWIP çeliği arasındaki arayüzeyde Fe_2Al_5 tabakasının oluştuğu, bu tabakanın da difüzyon engelleyici bir tabaka olarak çinko ile çelik arasındaki arayüze çinko demir intermetaliklerinin oluşumunu engellediği görülmüştür. Yeterli elektrik direnç nokta kaynağı işlemi ısısı ile difüzyon engelleyici tabaka olan Fe_2Al_5 tabakası yırtılmış ve bu nedenle çinko ve demir arasındaki reaksiyonlar engellenememiştir. Fe_3Zn_{10} intermetalik

bileşikleri ve çinko içeren ferrit (α-Fe (Zn)) çinko ve demirin ilgili içeriğine bağlı olarak çinko ve çelik arayüzeyinde oluşmuştur. Çatlak bölgesinde rastgele yönelimli ince α-Fe (Zn) tanecikleri çelik yüzey üzerine dağılmış ve çatlak α-Fe (Zn) tabakasının altındaki östenit tanecik sınırları boyunca iç kısma girmiştir. Çelik yüzeyinde oluşan α-Fe (Zn) tanecikleri ince ebatlarından dolayı toplam yüzey alanını arttırmış, dolayısıyla sıvı çinkonun içeri sızması için bir yol temin etmişlerdir. Yapılarındaki alüminyum ve çinko yüksek içeriği nedeniyle kırılgan fazlar olduklarından sünekliği azaltarak sıvı metal çatlağı oluşumunu hızlandırmada kritik rol oynamışlardır. Ayrıca kaynak akımının artışı genel olarak sıvı metal çatlağı oluşumunu arttırmıştır [67].

Ashiri ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, 1,4 mm kalınlığındaki Fe–18Mn–0.6C–2Al bileşimine sahip galvanizli TWIP çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirilmiştir. Çinko kaplamasının sıvı metal gevrekleşmesi kaynaklı çatlaklara olan etkisi araştırılmıştır. Çinko kaplamasız, galvanizli, galvaniz tavlı, elektrogalvanizli olmak üzere dört farklı şekilde sıvı çinkonun etkisini ve farklı kaplamaların çatlak direncini incelemek için araştırma yapılmıştır. Kaynak akım şiddeti 5 kA, kaynak zamanı 21 cycle ve elektrot kuvveti 3,6 kN, kullanılarak denenmiştir. Kaynaklarda çatlak oluşumu için süperkritik alan olduğu ve kritik çekirdek çapı olduğu tespit edilmiştir. Bu, çatlaksız kaynakların yalnızca, fışkırma akım şiddetinde oluşan maksimum çekirdek çapının, sıvı metal gevrekleşmesinin kritik çekirdek çapından küçük olması durumunda elde edildiğini gösterir. Ayrıca farklı çinko kaplı (galvanizli, galvaniz tavlı, elektrogalvanizli) TWIP çelikleri sıvı çinko tarafından kırılganlaşır ama çatlak oluşumuna karşı dirençleri kaplama malzemelerinin kimyasal bileşimi ve işlem şartlarına bağlıdır. Kritik çekirdek çapı galvanizli numuneler için 6,15 mm, galvaniz tavlı numuneler için 6,21 mm ve elektrogalvanizli numuneler için 6,42 mm'dir. Sıvı metal gevrekliği çatlağı için süper kritik alan ise elektrotun ve iş parçası arasındaki boşlukta, zayıf soğutması nedeniyle elektrotun çevresindeki boşlukta meydana gelir. Yapılan bilgisayar simülasyonları çalışmaları ayrıca bu bölgenin sıvı metal gevrekliği çatlağı oluşması için gerekli olan yüksek sıcaklıklar ve yüksek gerilimlere maruz kaldığını onaylamıştır [68].

Razmpoosh ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, Fe–31Mn–3Al–3Si bileşimine sahip 1 mm kalınlığındaki TWIP çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağı

kabiliyeti incelenmiştir. Altı farklı deney parametresi hazırlanmış, kaynak akım şiddetleri 2,5 kA, 3,75 kA, 5 kA, 6,25 kA olarak denenmiş, bekleme zamanları 25 cycle, 50 cycle ve 100 cycle denenmiş ve farklı kombinasyonlar oluşturulmuş, kaynak zamanı 25 cycle olarak sabit tutulmuştur. Mekanik özellikler çekme-makaslama ve mikrosertlik deneyleri ile incelenmiş, mikroyapısal özellikler optik mikroskop ve SEM ile araştırılmıştır. Üst kaynak parametrelerinde çekirdek bölgesinde büzülme boşlukları oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu boşlukların oluşumu, fışkırma sırasında oluşan bol miktarda malzeme kaybına bağlanmıştır. 2,5 kA kaynak akımında ve 25 cycle kaynak zamanında kusursuz nokta kaynakları elde edilmiştir. Çekirdek bölgesinde dendritik bir yapı ortaya çıkarken, ITAB'da önemli tane büyümesi sadece dar bir bantta gerçekleşmiştir. Bu olay, deney çeliğinin düşük ısı iletkenliği açısından açıklanmıştır. Bazı örneklerde, dendritik bölgelerde yüksek katılaşma büzülmesinden dolayı meydana gelen dendritik mikro gözenekler gözlenmiştir. Mikrosertlik deneyi değerleri ITAB bölgesinde hafif bir azalma göstermiştir. Çekirdek bölgesindeki daha yüksek mikrosertlik deneyi değerlerinin bu bölgenin dendritik yapısına bağlı olduğu düşünülmektedir. Kaynak akımı ve kaynak süresindeki artışın, çekme-makaslama deneyleri sırasında maksimum çekme-makaslama kuvvetinde önemli bir düşüşe yol açtığı gözlemlenmiştir [69].

Zeytin ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, Fe-0,024C-32Mn-2,36Si-3,16Al bileşimine sahip 1 mm kalınlığındaki TWIP çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı uygulanarak birleştirilmiştir. Kaynak akım şiddeti 3 kA, 5 kA, 7 kA ve 9 kA, kaynak zamanı 5 cycle, 10 cycle, 15 cycle, 20 cycle, 25 cycle ve 30 cycle ve elektrot kuvveti 6 kN kullanılarak denenmiştir. Kaynaklı numunelerin maksimum çekme-makaslama kuvvetleri 7 kA ve 20 cycle kaynak zamanına kadar artış göstermiştir. Sonuçlar kaynak zamanında 3 kA ve 5 kA akım şiddetleri 20 cycle kaynak zamanları uygulanmış numuneler ve 7 kA akım şiddeti ve 5 cycle kaynak zamanları uygulanmış numuneler hariç kaynak işlem parametrelerinin tüm kombinasyonları otomotiv endüstrisi için kabul edilebilir çekme-makaslama dayanımı sağlar. 7 kA kaynak akım şiddeti ve 25 cycle kaynak zamanı ve bu parametreden sonra kaynaklı numunenin çekme-makaslama dayanımı, fışkırma veya çekirdek bölgesinin yüksekliğinin azalması sonucu azalır. 3 kA kaynak zamanı ve 15 cycle kaynak zamanına kadar olan düşük kaynak parametrelerinde kırılma biçimi kısmi arayüzey kırılması şeklinde olmuştur. Kısmi arayüzey kırılması

modu kaynak çekirdeğinin sünek özellikli olan numunelerde mevcuttur. ITAB'daki dayanım azalmasının birincil sebebinin tane büyüme mekanizması olabileceği düşünülmektedir. Kaynak çekirdeğinde mevcut olan tam östenitik katılaşma, kimyasal bileşimde yüksek miktarda mangan ve düşük miktarda karbondan kaynaklanmaktadır. Çekirdek bölgesi mikroyapısı tamamen östenitik olduğundan, kaynak termal döngüsü yapıyı değiştirmemiş, ferritik dönüşüm veya martenzitik dönüşüm metalografik incelemeler ile tespit edilmemiştir. Kaynak çekirdeği bölgesi ile ITAB bölgesi arasındaki geçiş bölgesinden alınan EDS analizleri, bu bölgedeki oluşmuş bazı partiküllerin ikinci faz parçacıklarının oluşumuna neden olabilecek yüksek miktarda alüminyum ve mangan içerdiğini göstermiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde otomotiv endüstrisi için kabul edilebilir çekme-makaslama dayanımı ve düğmelenme kırılma modu özelliklerini gösteren kaynak akım şiddeti 7 kA, kaynak zamanı olarak 20 cycle ve 25 cycle'da elde edilmiştir [70].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Giriş

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan iki farklı galvanizli saclar elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi ile birleştirilerek elektrik direnç nokta kaynak bağlantılı numune serileri elde edilmiştir. Yapılan deneylerde kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti değiştirilmiş sıkıştırma zamanı, tutma zamanı ve elektrot kuvveti sabit bırakılmıştır. Kaynaklı bağlantı serilerinin dayanım değerlerinin belirlenmesi için her bir seriye çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve artı-çekme testleri uygulanmıştır.

6.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Çalışmalar kapsamında kullanılan çelik saclar, otomotiv endüstrisinde kullanılmakta olan 1,4 mm kalınlığındaki TWIP950 ve 1,2 mm kalınlığındaki DP800 sınıfı çelik saclardır. Deneylerde kullanılan TWIP950 ve DP800 çelik saclarının kimyasal bileşimleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 : TWIP950 ve DP800 çelik saclarının kimyasal bileşimleri.

Malzemeler	C	Si	Mn	Al	Cr	Ti	W	V	Fe
DP800	0.147	0.450	1.930	0.310	0.256	0.016	0.135	0.039	96.717
TWIP950	0.654	0.039	17.605	1.712	0.007	0.060	0.129	0.004	79.790

TWIP950 ve DP800 çelik saclarının çekme testleri ve sertlik testleri sonucu elde edilen mekanik özellikleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

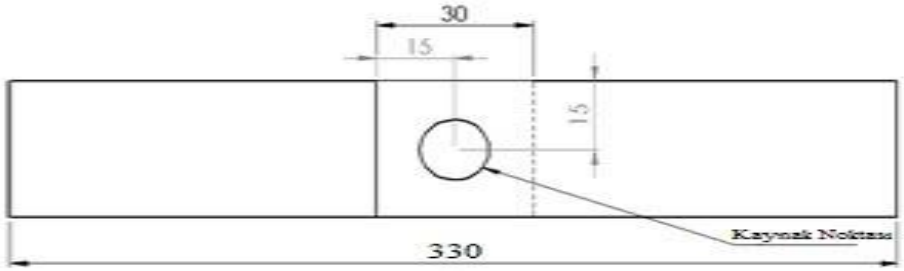
Tablo 6.2 : TWIP 950 ve DP 800 çelik saclarının mekanik özellikleri.

Malzemeler	DP 800	TWIP 950
Akma Dayanımı [MPa]	448	541
Maks. Çekme Dayanımı [MPa]	785	966
Uzama [%]	16,8	56
Sertlik [HV]	250	300

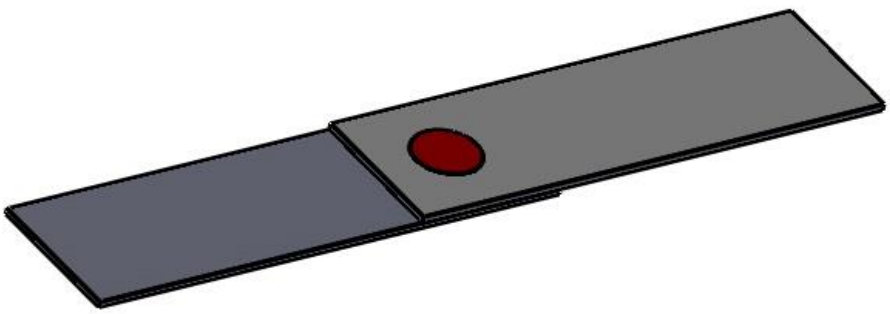
6.3. Deney Parçalarının Hazırlanması

Deneylerde kullanılacak çelik sacların hadde yönleri belirlenmiş, çelik sac plakalar giyotin makas yardımıyla kesildikten sonra, sacların yüzeylerini kir, yağ ve pas gibi istenmeyen maddelerden arındırmak amacıyla aseton ve temiz bir bezle silinmiştir.

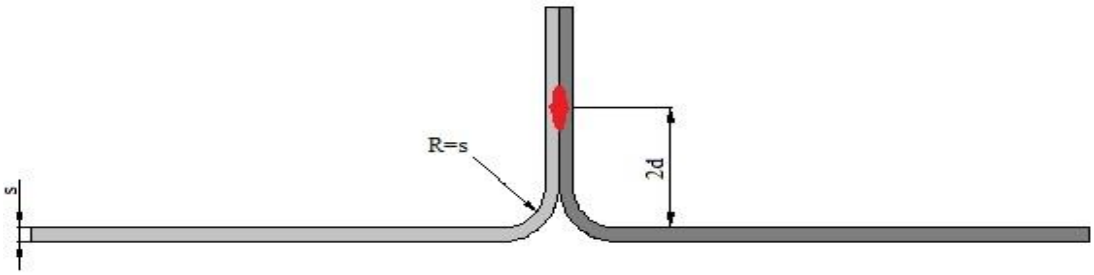
Çekme-makaslama deneyinde kullanılacak numuneler EN ISO 14273 [71] standartlarında hazırlanmıştır. Çekme-sıyırma deneyinde kullanılacak numuneler EN ISO 14270 [72] standartlarında hazırlanmıştır. Çapraz çekme deneyinde kullanılacak numuneler EN ISO 14272 [73] standartlarında hazırlanmıştır.



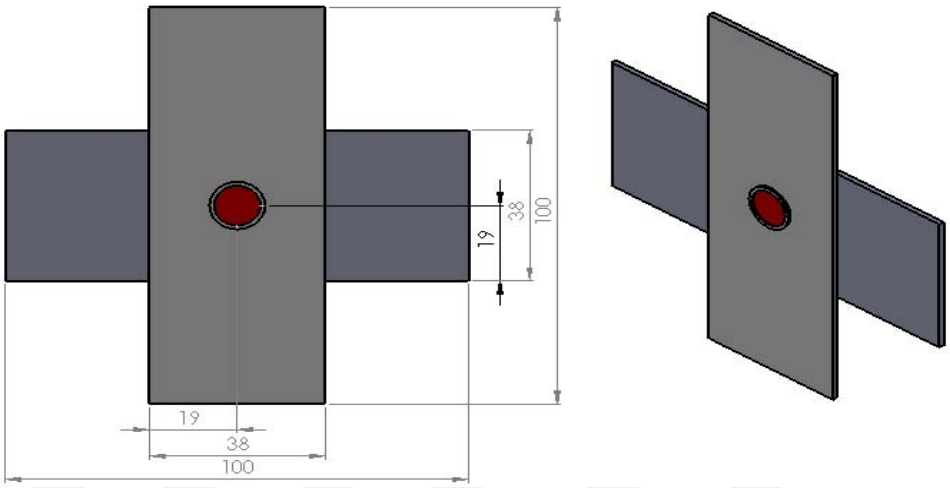
Şekil 6.1 : Çekme-makaslama deney numunelerinin ölçüleri.



Şekil 6.2 : Çekme-makaslama deney numuneleri.



Şekil 6.3: Çekme-sıyırma deney numuneleri.



Şekil 6.4 : Çapraz çekme deney numuneleri.

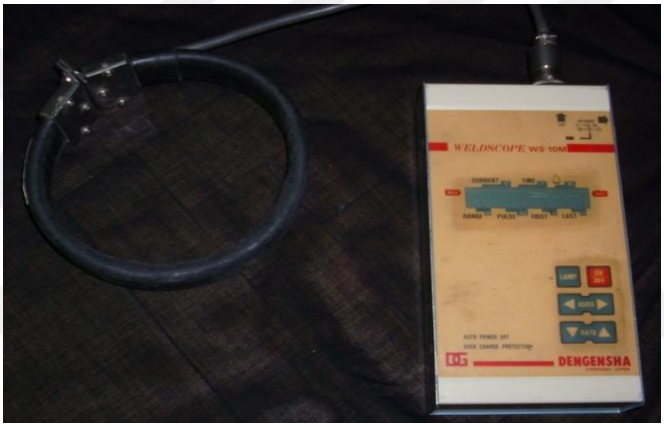
6.4. Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makinesi

Yapılan deneylerde, tek kollu, 120 kVA gücünde elektronik zaman ve akım kontrollü, pnömatik basma tertibatlı elektrik direnç nokta kaynağı makinesi kullanılmıştır. Deneylerde uygulanan kaynak sıkıştırma, kaynak tutma süreleri ve kaynak zamanı makinenin elektronik donanımları aracılığıyla ayarlanmıştır. Deneylerde kullanılan elektrik direnç nokta kaynak makinesi Şekil 6.4'de gösterilmektedir.

Deneylerde uygulanan kaynak akım şiddeti değerleri, elektrik direnç nokta kaynak makinesinin üst koluna yerleştirilen toroidal bir bobin vasıtasıyla ölçülmüştür. Akım şiddeti ölçüm cihazı Şekil 6.5'de gösterilmektedir.



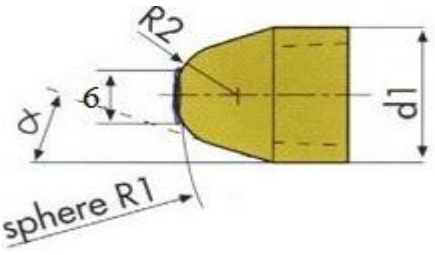
Şekil 6.5 : Deneylerde kullanılan elektrik direnç nokta kaynağı makinesi.



Şekil 6.6 : Deneylerde kullanılan akım şiddeti ölçüm cihazı.

6.5. Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Elektrotları

Yapılan deneylerde, kullanılan elektrotlar uç çapı 6 mm olan mm. olan bakır-krom-zirkonyum alaşımı elektrotlardır. Elektrotların boyutları Şekil 6.7'de elektrotların kimyasal ve mekanik özellikleri ise Tablo 6.3'de verilmiştir.



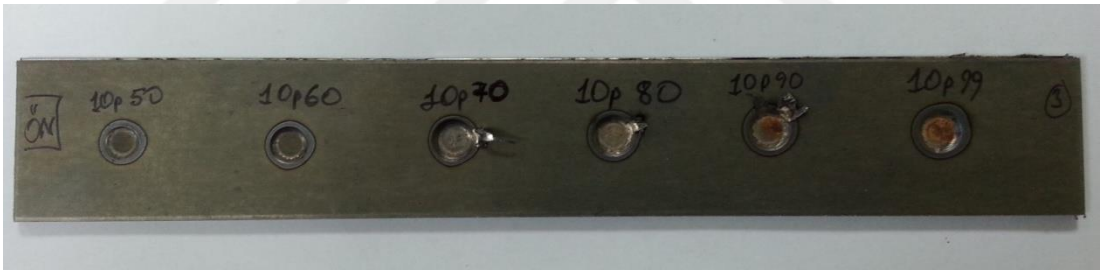
Şekil 6.7 : Deneylerde kullanılan elektrotların boyutları.

Tablo 6.3. Deneylerde kullanılan elektrotun kimyasal bileşimi ve elektrodun mekanik özellikleri.

Alaşım	Kimyasal Bileşim (%)	Isıl İletkenlik (J/Cms°K)	Elektrik İletkenliği (m/Ωmm^2)	Çekme Dayanımı (MPa)
CuCrZr	Cr > 0,4 Zr > 0,03 g.k. Cu	320	48	590

6.6. Ön Deneyler

Deney numuneleri, deney çalışma aralığının seçilebilmesi için üst üste bindirilerek kaynak edilerek birleştirilmiştir. Bazı ön deney numuneleri Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



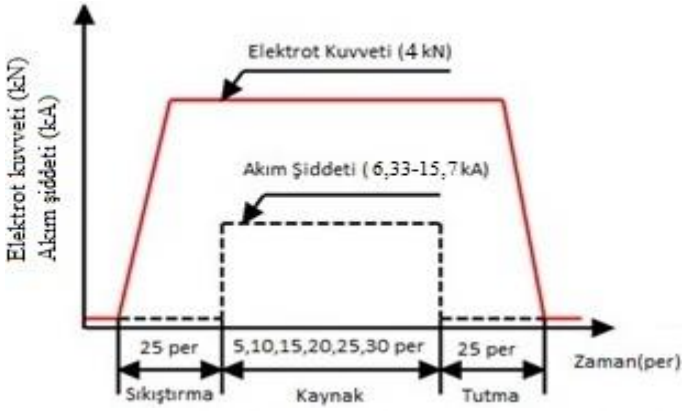
Şekil 6.8 : Bazı ön deney numuneleri.

Yapılan ön deneylerde 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 periyot kaynak sürelerinde kaynak işleminin meydana geldiği en küçük akım değerinden (6,33 kA) malzemelerin delindiği en büyük değere (15,7 kA) kadar kaynak işlemi yapılmıştır.

6.7. Deneylerin Uygulanması

Numuneler, Şekil 6.1, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de gösterilen boyutlarda hazırlanıp temizlendikten sonra kaynak edilmiştir. Elektrot kuvveti tüm deney boyunca 4 kN değerinde sabit tutulmuş ve sürekli olarak kontrol edilmiştir. Uygulanan kaynak zamanı 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 periyot olarak değiştirilmiştir. Kaynak tutma ve sıkıştırma

süreleri 25 periyot olarak sabit tutulmuştur. Deneylerde uygulanan kaynak parametreleri Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9 : Deney parametreleri.

Her deney koşulunda elektrik direnç nokta kaynak bağlantılı parçalar elde edilmiştir. Bir numune mikro vickers sertlik ölçümleri ile çekirdek boyut ölçümlerinin yapılması, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile mikroyapı fotoğraflarının çekilmesi için kullanılmıştır. Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen bazı numuneler Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12' de gösterilmiştir.



Şekil 6.10 : Bazı çekme-makaslama deneyi numuneleri.



Şekil 6.11 : Bazı çekme-sıyırma deneyi numuneleri.



Şekil 6.12 : Bazı çapraz çekme deneyi numuneleri.

6.8. Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz Çekme Deneyleri

Şekil 6.1, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'e göre kaynak yapılan numuneler, laboratuar koşullarında 5 ton kapasiteli "Shimadzu" marka çekme makinasında çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Şekil 6.14'de deneylerde kullanılan çekme cihazı görülmektedir.

Yapılan çekme deneyleri sırasında çekme hızı 10 mm/dk olarak belirlenmiştir. Çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme dayanımı olarak verilen değerler, çekme makinesinin kontrol ünitesindeki kuvvet–zaman grafiğinden okunan maksimum değerlerdir. Yapılan deneylerde çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme deneylerinde üç farklı hasar tipi meydana gelmiştir:

- Ayrılma
- Düğmelenme
- Yırtılma

Tablo 6.4'de ayrılma, düğmelenme ve yırtılma tipi hasar oluşan bazı numuneler gösterilmektedir. Şekil 6.13'de deneylerde kullanılan çapraz çekme aparatı görülmektedir.

Tablo 6.4 : Çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme deneylerinde oluşan hasar tipleri.

Deney Adı	Kopma Tipi	Hasar Görüntüsü
Çekme-Makaslama	Ayrılma	
Çekme-Makaslama	Düğmelenme	
Çekme-Makaslama	Yırtılma	
Çekme-Sıyırma	Ayrılma	
Çekme-Sıyırma	Düğmelenme	
Çekme-Sıyırma	Yırtılma	

Tablo 6.4. (Devamı)

Deney Adı	Kopma Tipi	Hasar Görüntüsü
Çapraz Çekme	Ayrılma	
Çapraz Çekme	Düğümlenme	
Çapraz Çekme	Yırtılma	



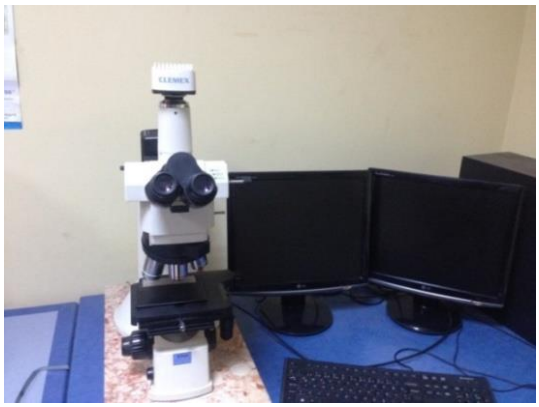
Şekil 6.13 : Çapraz çekme deneyi görüntüsü.



Şekil 6.14 : Deneylerde kullanılan çekme cihazı.

6.9. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskopu ile Yapılan Çalışmalar

Deney parçalarının her birinden alınan numuneler, çekirdek ortasından kesilmiş ve bakalit içine gömülmüştür. Bakalit içerisindeki bu numuneler zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra %3 Nital reaktifi ile dağlanmıştır. Esas metaller, kaynak çekirdeği ve ısının tesiri altındaki bölgeler (ITAB) optik ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak mikro yapı fotoğrafları çekilerek kaynak sonrası oluşan içyapı değişimleri incelenmiştir. Şekil 6.15'de mikroyapı incelemeleri için kullanılan "Nikon ECLIPSE L150" marka optik mikroskop gösterilmiştir.



Şekil 6.15 : Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop.

Şekil 6.16'da taramalı elektron mikroskobu çalışmalarında kullanılan "JEOL JSM-6060LV" cihaz gösterilmiştir.



Şekil 6.16 : Mikroyapı incelemelerinde kullanılan taramalı elektron mikroskopu (SEM).

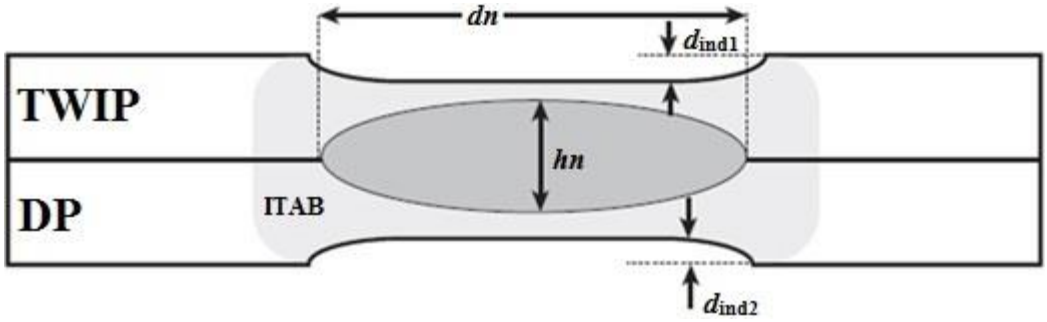
6.10. Çekirdek Boyutlarının Tespiti

Kaynak zamanının ve kaynak akım şiddetinin çekirdek boyutları üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, kaynak çekirdeğinin makro fotoğrafları çekilerek çekirdek boyutları tespit edilmiştir.

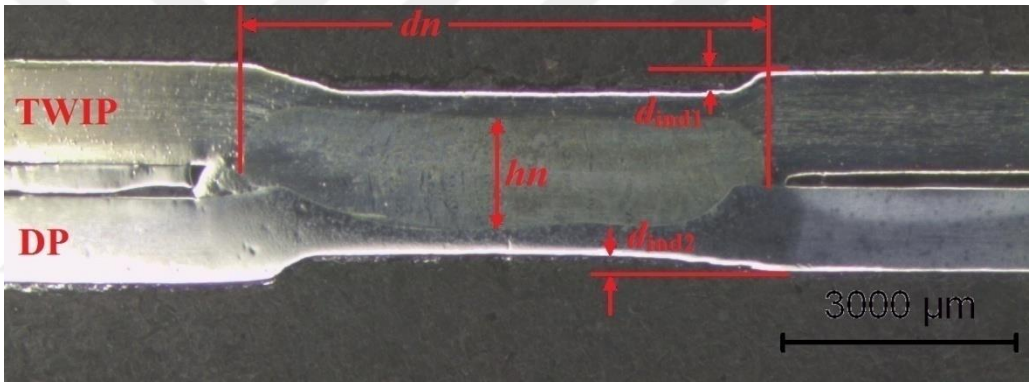


Şekil 6.17 : Makroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop.

Elektrik direnç nokta kaynaklı numunelerin şematik olarak çekirdek geometrisi Şekil 6.18'de, Şekil 6.19'da ise çekirdek geometrisi gösterilmiştir [43].



Şekil 6.18 : Elektrik direnç nokta kaynağı çekirdek geometrisinin şematik olarak gösterimi.



Şekil 6.19 : Elektrik direnç nokta kaynağı çekirdek geometrisi.

6.11. Sertlik Değerlerinin Ölçümü

Kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının bağlantının sertliğine etkisini incelemek amacıyla, her bir numunenin sertlik değerleri mikro vickers sertlik ölçme cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümler çekirdek enine ve boyuna kesitinde esas metal, ısının tesiri altındaki bölge ve kaynak çekirdeğini içerisine alacak şekilde yapılmıştır. Kaynak bölgesi iki farklı malzemeden meydana geldiği için çekideğin sol üst kısmından başlayarak çekirdeğin sağ alt kısmına doğru çapraz bir yol izlenmiştir. 0,5 mm aralıklarla mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Sertlik ölçümleri Şekil 6.20'de görülen Wolpert-Wilson marka cihaz ile yapılmıştır. Mikrosertlik deneyi laboratuar koşullarında yapılmış bütün sertlik ölçümleri mikro vickers sertlik ölçüm test metodu kullanılarak

yapılmış ve 100 gram yük ve piramit batıcı uç 10 saniye süre ile uygulanmıştır. Ölçümler EN ISO 14271 standardına göre yapılmıştır [74].



Şekil 6.20 : Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrovickers sertlik ölçme cihazı.

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR

7.1. Giriş

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan 1,4 mm kalınlığındaki TWIP950 ve 1,2 mm kalınlığındaki DP800 galvanizli saclar elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi yardımıyla birleştirilmiştir. Değişken parametreler olarak kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti belirlenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak kaynak akım şiddeti ile kaynak zamanının ve bu değişkenlere bağlı olarak çekirdek geometrisinin bağlantının çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme dayanımına, sertlik dağılımına ve makro-mikro yapısına etkileri araştırılmıştır. Deney malzemeleri otomobil gövdelerinde kullanılan çelik saclardır. Deneyler laboratuar koşullarında yapılmıştır.

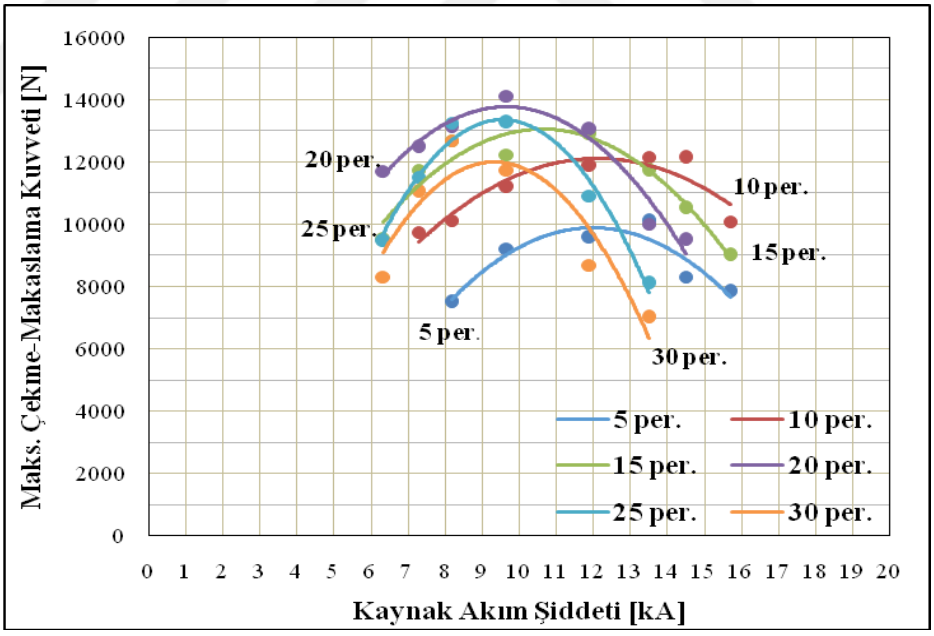
7.2. TWIP-DP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz Çekme Dayanımına Etkisi

Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının bağlantıların çekme dayanımı üzerine etkisini incelemek için numunelere EN ISO 14273 [71] standardına uygun olarak çekme-makaslama, EN ISO 14270 [72] standardına uygun olarak çekme-sıyırma ve EN ISO 14272 [73] standardına uygun olarak çapraz çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme testlerinde her bir parametre için üç numune test edilmiş ve sonuçlar üç numunenin ortalaması alınarak bağlantının çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme kuvveti olarak verilmiştir.

Bağlantıların çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımlarını belirlemek için 6,33 kA, 7,27 kA, 8,17 kA, 9,66 kA, 11,9 kA, 13,5 kA, 14,5 kA ve 15,7 kA kaynak akım şiddeti 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 periyot kaynak zamanında deney parçalarına uygulanmıştır.

7.2.1. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-makaslama dayanımına etkisi

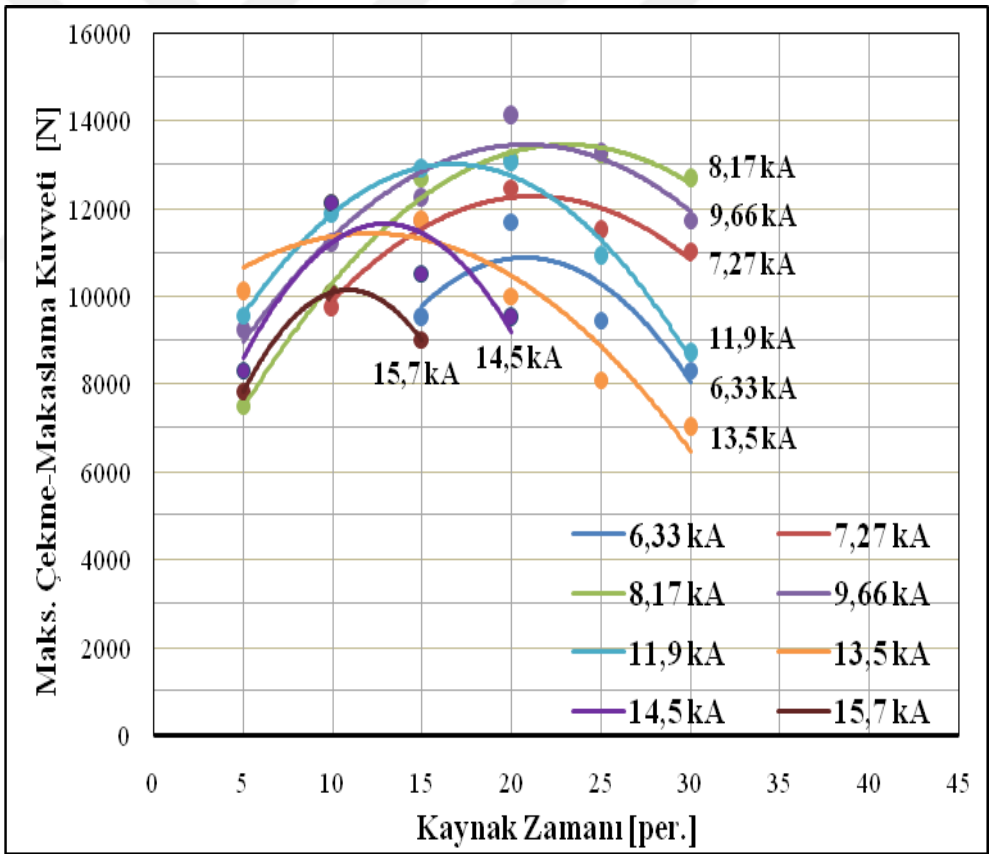
Şekil 7.1'de görüldüğü üzere TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin artmasıyla birlikte çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. Maksimum çekme-makaslama kuvvetine 20 periyot (per) kaynak zamanı ve 9,66 kA kaynak akım şiddetinde ulaşıldığı görülür [75]. 5 periyot kaynak zamanında elde edilen bağlantıların çekme-makaslama dayanımları oldukça düşüktür. İstenen çekme-makaslama dayanımına sahip bağlantılar 10 periyot ve 15 periyot kaynak zamanında 6,33-11,9 kA arasında; 20 periyot, 25 periyot ve 30 periyot kaynak zamanında ise 6,33-9,66 kA arasında elde edilmiştir. Bu değerlerden sonra ısı girdisinin oldukça artması nedeniyle dalma derinliği ve fışkırmalar artmıştır. Bu yüzden malzeme ara kesitinde erime artmıştır. Bir diğer ifade ile kesit daralmıştır. Buna bağlı olarak çekme-makaslama kuvveti hızla düşmüştür. Bununla birlikte elektrot yapışması, derin elektrot izleri ve aşırı renklenme görülmüştür. Literatürde yer alan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [76-83].



Şekil 7.1 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.

7.2.2. TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 7.2'de görüldüğü gibi kaynak zamanının artmasıyla kaynak bölgesine verilen ısının artması sebebiyle çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. İstenen çekme-makaslama dayanımına sahip bağlantılar 6,33 kA akım şiddetinde 15-20 periyot arası; 7,27 kA, 8,17 kA ve 9,66 kA akım şiddetlerinde 10-20 periyot arası; 11,9 kA ve 13,5 kA akım şiddetlerinde 10-15 periyot arası; 14,5 kA ve 15,7 kA akım şiddetlerinde 10 periyotta elde edilmiştir. 5 periyot kaynak zamanında istenen dayanım değerine sahip bağlantı elde edilememiştir. Kaynak zamanının belirli bir değerinden sonra çekirdek kesitinden fışkırmaların ortaya çıkmasıyla birlikte çekme-makaslama dayanımı değerlerinde hızlı bir düşüş görülmektedir [77, 80, 81, 83, 84].

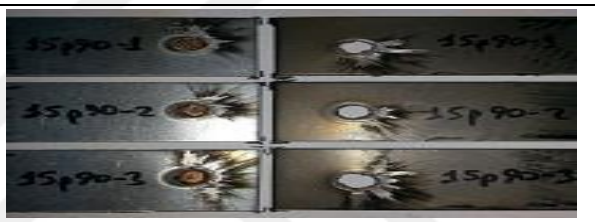
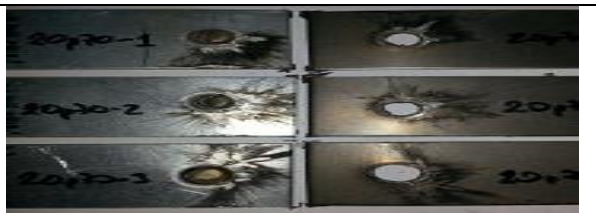
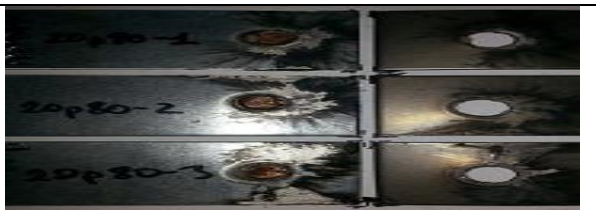


Şekil 7.2 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımına etkisi.

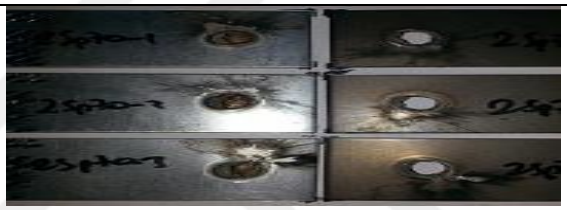
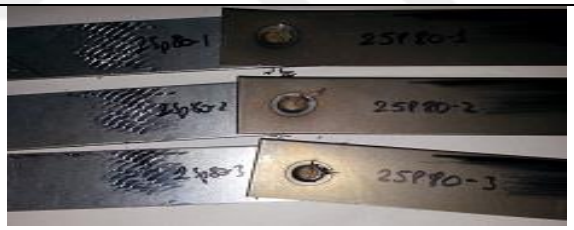
Tablo 7.1 : TWIP-DP bağlantılarda çekme-makaslama numunelerinin durumları.

Kaynak Zamanı (per)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Hata Tipi	Deney Numunesinin Resmi
5 per.	13,5	Fışkırma başlangıcı	
5 per.	14,5	Fışkırma Elektrot yapışması	
5 per.	15,7	Fışkırma çok fazla Elektrot yapışması Renk değişimi	
10 per.	11,9	Fışkırma başlangıcı	
10 per.	13,5	Fışkırma	
10 per.	14,5	Fışkırma Elektrot yapışması Renk değişimi	

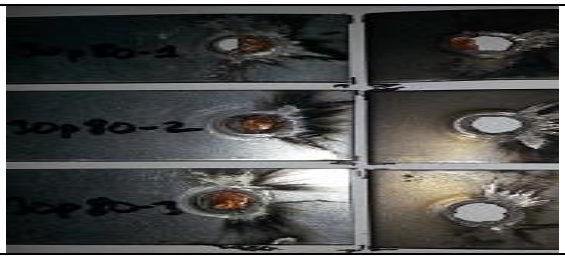
Tablo 7.1 : (Devamı).

Kaynak Zamanı(per)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Hata Tipi	Deney Numunesinin Resmi
10 per.	15,7	Fışkırma çok fazla Elektrot yapışması Renk değişimi	
15 per.	13,5	Fışkırma başlangıcı	
15 per.	14,5	Fışkırma Elektrot Yapışması Renk Değişimi	
15 per.	15,7	Fışkırma çok fazla Elektrot yapışması Renk değişimi	
20 per.	11,9	Fışkırma başlangıcı	
20 per.	13,5	Fışkırma Elektrot yapışması	

Tablo 7.1 : (Devamı).

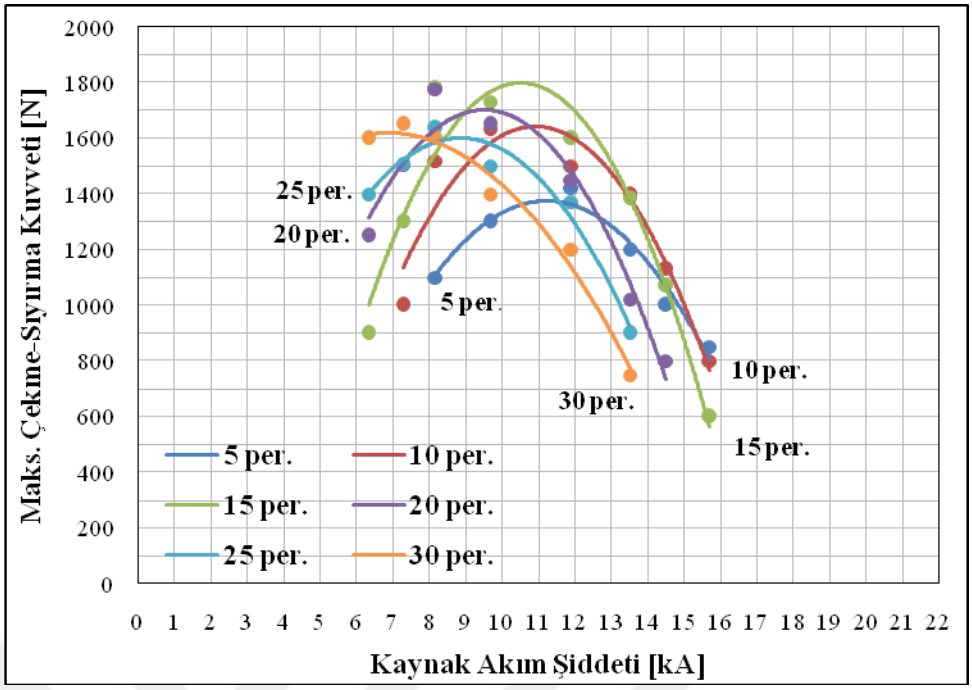
Kaynak Zamanı (per)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Hata Tipi	Deney Numunesinin Resmi
20 per.	14,5	Fışkırma Elektrot yapışması Renk değişimi	
25 per.	9,66	Fışkırma başlangıcı	
25 per.	11,9	Fışkırma Elektrot Yapışması	
25 per.	13,5	Fışkırma Elektrot Yapışması Renk Değişimi	
30 per.	9,66	Fışkırma başlangıcı	
30 per.	11,9	Fışkırma Elektrot Yapışması	

Tablo 7.1 : (Devamı).

Kaynak Zamanı (per)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Hata Tipi	Deney Numunesinin Resmi
30 per.	13,5	Fışkırma Elektrot yapışması Renk Değişimi	

7.2.3. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi

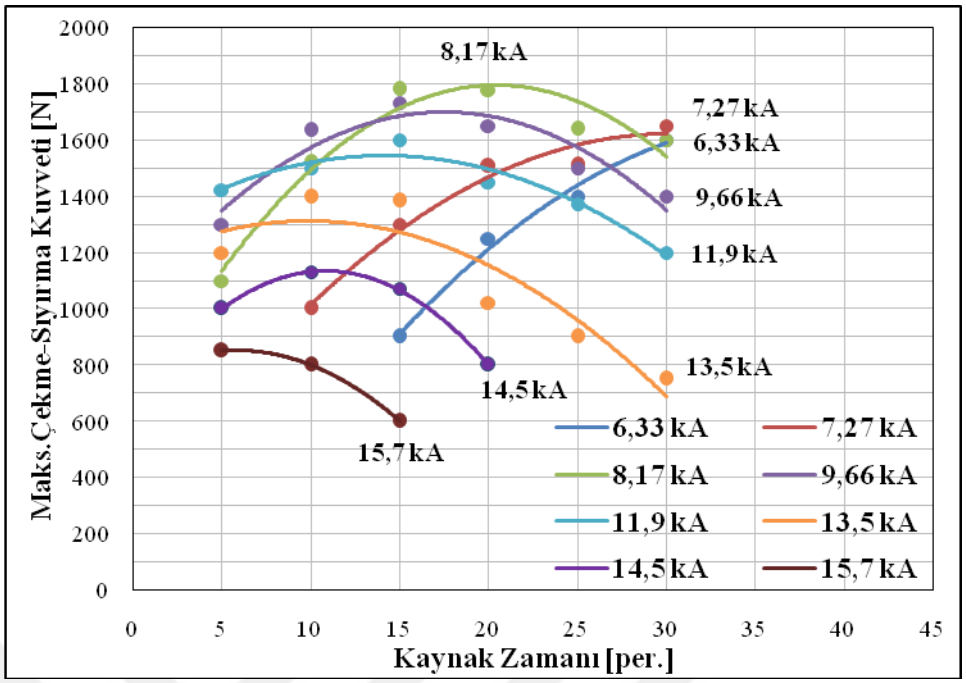
Şekil 7.3'de görüldüğü gibi kaynak akım şiddetinin artmasıyla çekme-sıyırma dayanımı da artmaktadır. 5 periyot kaynak zamanında istenen bağlantı elde edilememiştir. 10 periyot ve 15 periyot kaynak zamanında 6,33-8,17 kA arasında, 20 periyot ve 25 periyot kaynak zamanında 6,33-9,66 kA arasında, 30 periyot kaynak zamanında ise 6,33-8,17 kA arasında istenen çekme-sıyırma dayanımına sahip bağlantılar elde edilmiştir. Maksimum çekme-sıyırma dayanımına 20 periyot kaynak zamanı 11,7 kA kaynak akım şiddetinde ulaşıldığı görülmektedir. Bu değerlerden sonra ısı girdisinin artışıyla beraber toplam elektrot dalma derinliğinin toplam sac kalınlığının % 20'sini geçmesinden dolayı kaliteli bir kaynaklı bağlantı oluşmamakta ve bu nedenle de çekme-sıyırma dayanımı düşmektedir. Ayrıca çekirdek kesitinde fışkırmalar ortaya çıkmıştır, renklenme ve yapışma görülmüştür. Literatürde yer alan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [77, 79, 80, 85].



Şekil 7.3 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.

7.2.4. TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi

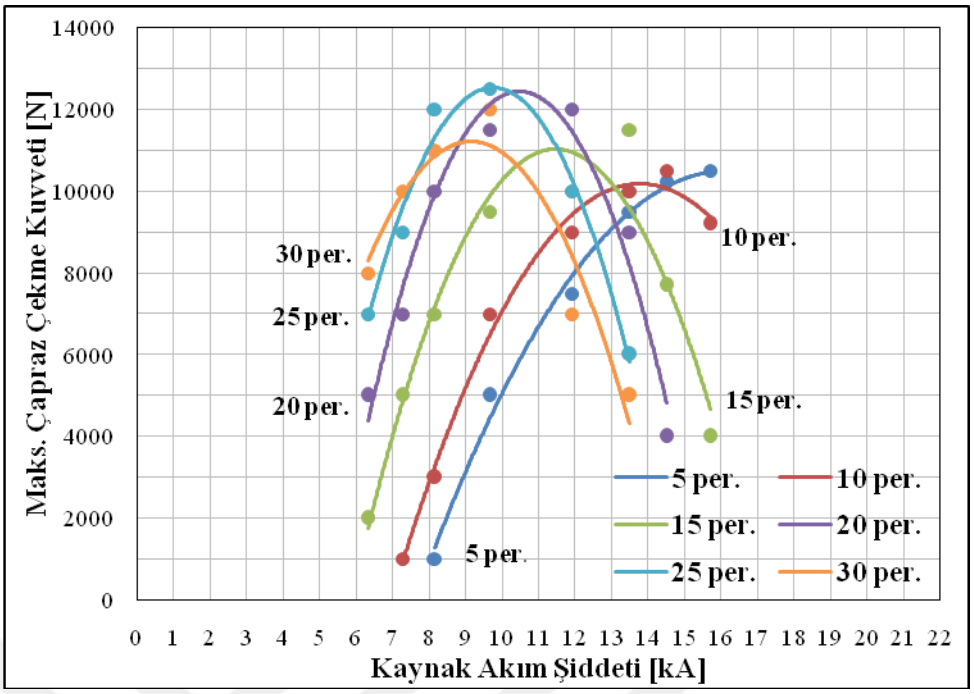
Şekil 7.4'de kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi görülmektedir. İstenen çekme-sıyırma dayanımına sahip bağlantılar 6,33 kA akım şiddetinde 15-30 periyot arası; 7,27 kA akım şiddetinde 10-30 periyot arası; 8,17 kA ve 9,66 kA akım şiddetlerinde 5-15 periyot arası; 11,9 kA akım şiddetinde 5-15 periyot arası; 13,5 kA akım şiddetinde 10-15 periyot arasında istenen çekme-sıyırma dayanımına sahip bağlantılar elde edilmiştir. 14,5 kA ve 15,7 kA akım şiddetlerinde çekme-sıyırma dayanımı büyük ölçüde azalmıştır. 9,66 kA akım şiddetinden sonra çekme-sıyırma dayanımı azalmaya başlamıştır. Kaynak zamanının belirli bir değerinden sonra aşırı dalma derinliği ve fışkırmalar ortaya çıkmıştır. Bu durum çekme-sıyırma dayanımının azalmasına yol açmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [77, 79, 80, 85].



Şekil 7.4 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.

7.2.5. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çapraz çekme dayanımına etkisi

Şekil 7.5'de görüldüğü gibi kaynak akım şiddetinin artmasıyla çapraz çekme dayanımı da artmaktadır. Fakat dayanımdaki bu artış belirli bir noktadan sonra azalma göstermektedir. İstenen çapraz-çekme dayanımına sahip bağlantılar 5 periyot kaynak zamanında 13,5 kA, 14,5 kA ve 15,7 kA akım şiddetinde, 10 periyot kaynak zamanında; 11,5 kA, 13,5 kA ve 14,5 kA akım şiddetinde, 15 periyot kaynak zamanında 9,66 kA, 11,5 kA ve 13,5 kA akım şiddetinde, 20 periyot, 25 periyot ve 30 periyot kaynak zamanında 7,27 kA, 8,17 kA ve 9,66 kA akım şiddetinde elde edilmiştir. Bu akım şiddeti değerlerinden sonra toplam elektrot dalma derinliğinin toplam sac kalınlığının %20'sini geçmesinden dolayı kaliteli bir kaynaklı bağlantı oluşmamakta ve bu nedenle de çapraz çekme dayanımı düşmektedir.

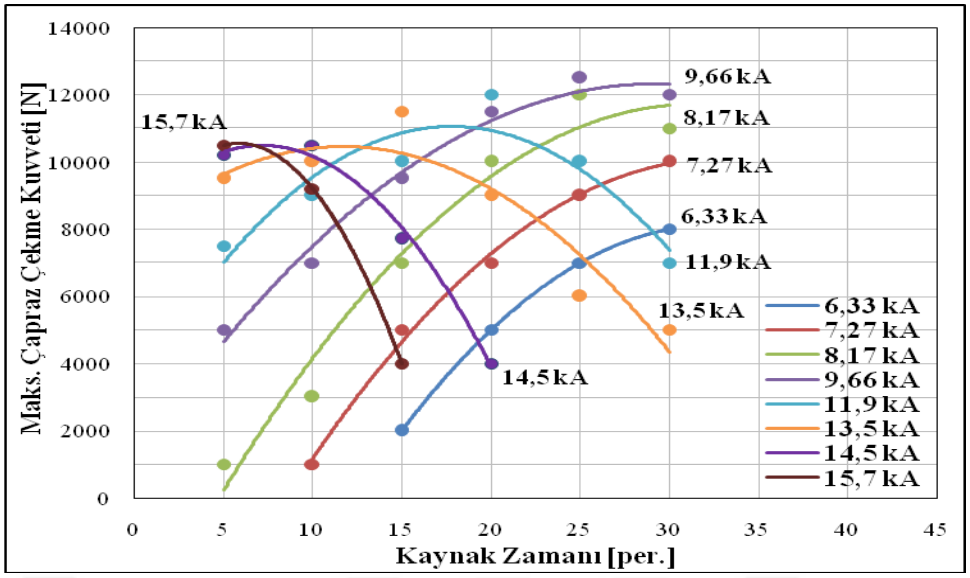


Şekil 7.5 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çapraz çekme dayanımına etkisi.

7.2.6. TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çapraz çekme dayanımına etkisi

Kaynak zamanının artması ile çapraz çekme dayanımının arttığı Şekil 7.6'da görülmektedir. 6,33 kA, 7,27 kA, 8,17 kA ve 9,66 kA kaynak akım şiddetleri kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılarda kaynak zamanı arttıkça çapraz çekme dayanımının arttığı görülmüştür. 9,66 kA kaynak akım şiddetinden sonra kaynak akım şiddetinin artması ile çapraz çekme dayanımı azalma göstermektedir. En yüksek çapraz çekme dayanımı 25 periyot kaynak zamanı 9,66 kA kaynak akım şiddetinde elde edilmiştir. Bulunan sonuçlar literatürde daha önce yapılan çalışmalara benzerlik göstermektedir [77, 79-81, 84-86].

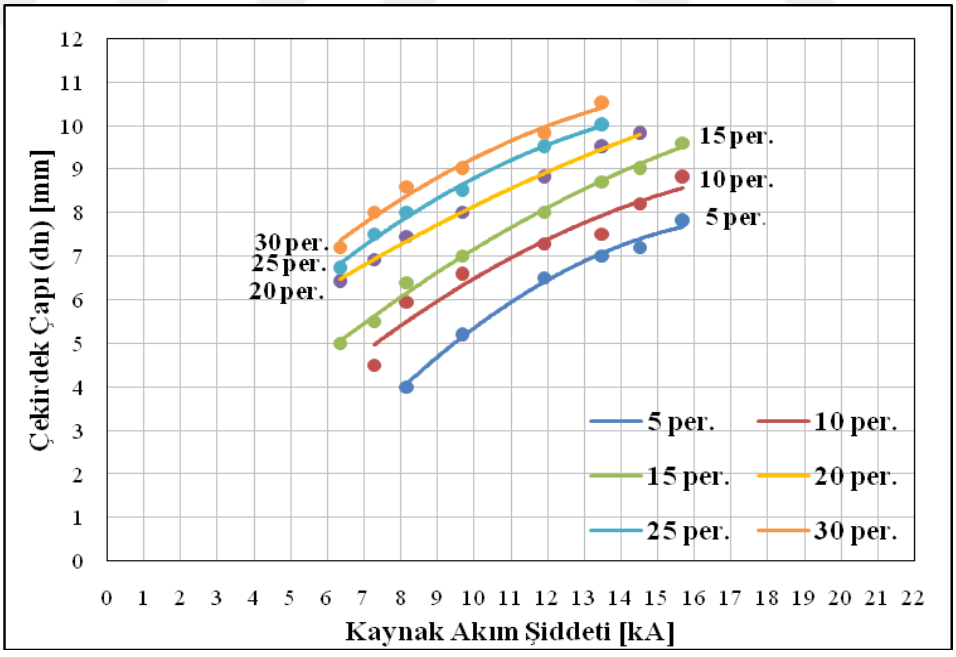
Kaynak zamanının belirli bir değerinden sonra aşırı dalma derinliği ve fışkırmalar da ortaya çıkmıştır. Bu durum çapraz çekme dayanımının azalmasına yol açmaktadır.



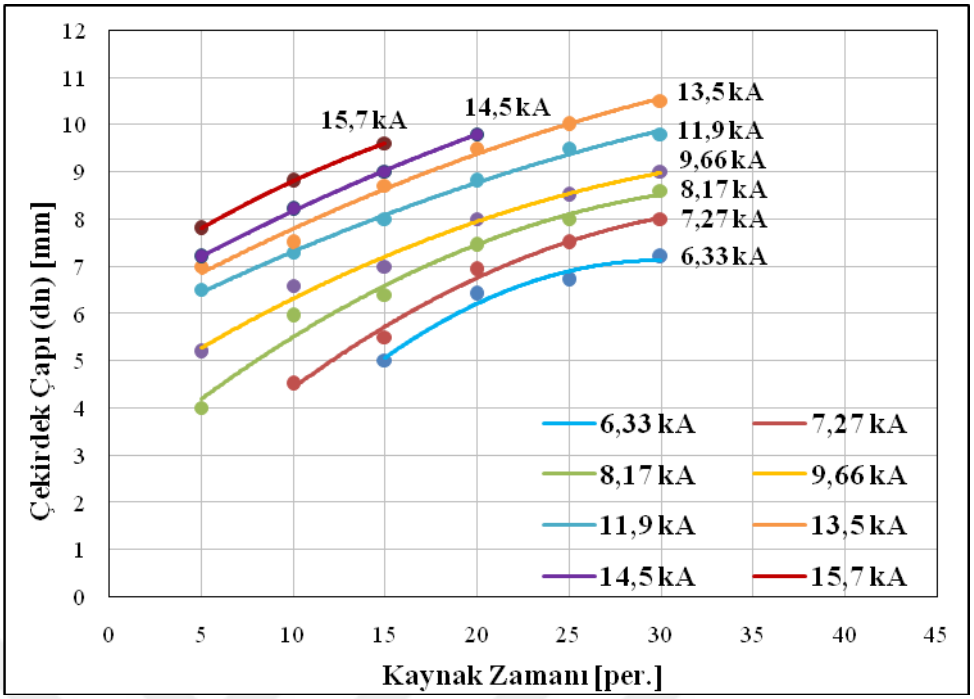
Şekil 7.6 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çapraz çekme dayanımına etkisi.

7.3. TWIP-DP bağlantılarda Kaynak Değişkenlerinin Çekirdek Boyutlarına Etkisi

7.3.1. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi



Şekil 7.7 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek çapına etkisi.



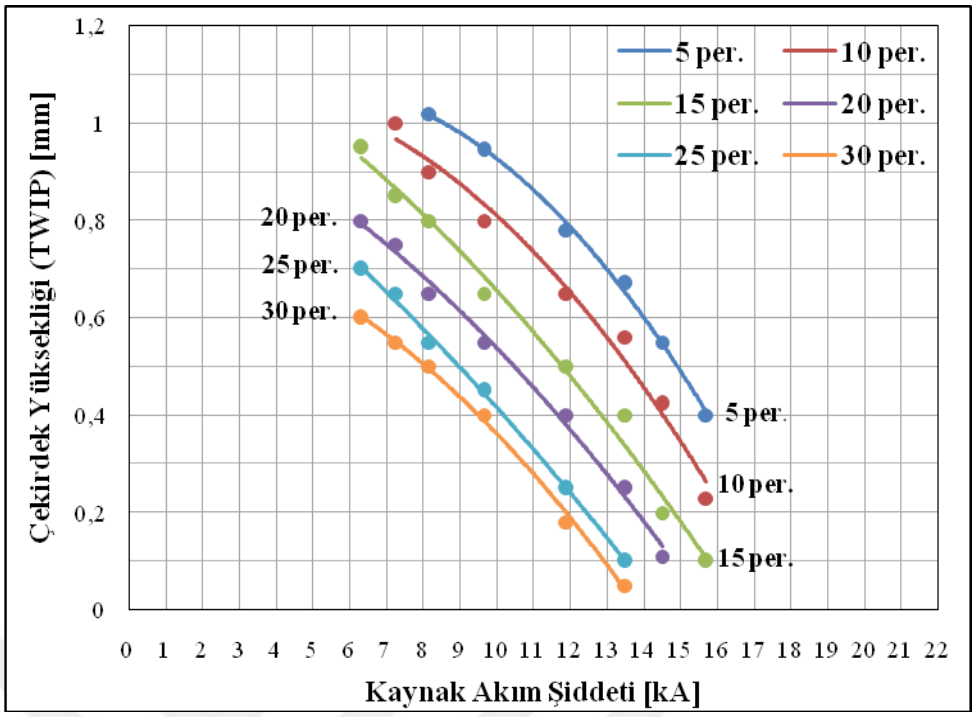
Şekil 7.8 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi.

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de görüldüğü gibi kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasıyla birlikte ısı girdisi artmakta ve buna bağlı olarak çekirdek çapı da artmaktadır [85]. Fakat kaynak akım zamanının ve kaynak akım şiddetinin belli bir değerinden sonra aşırı ısı girdisi nedeniyle malzeme ara kesitinde eriyen metal miktarı artmakta ve bu yüzden derin elektrot izleri bir başka ifadeyle aşırı dalma derinliği ve metal fışkırmaları oluşmaktadır [34, 45, 76, 79, 87].

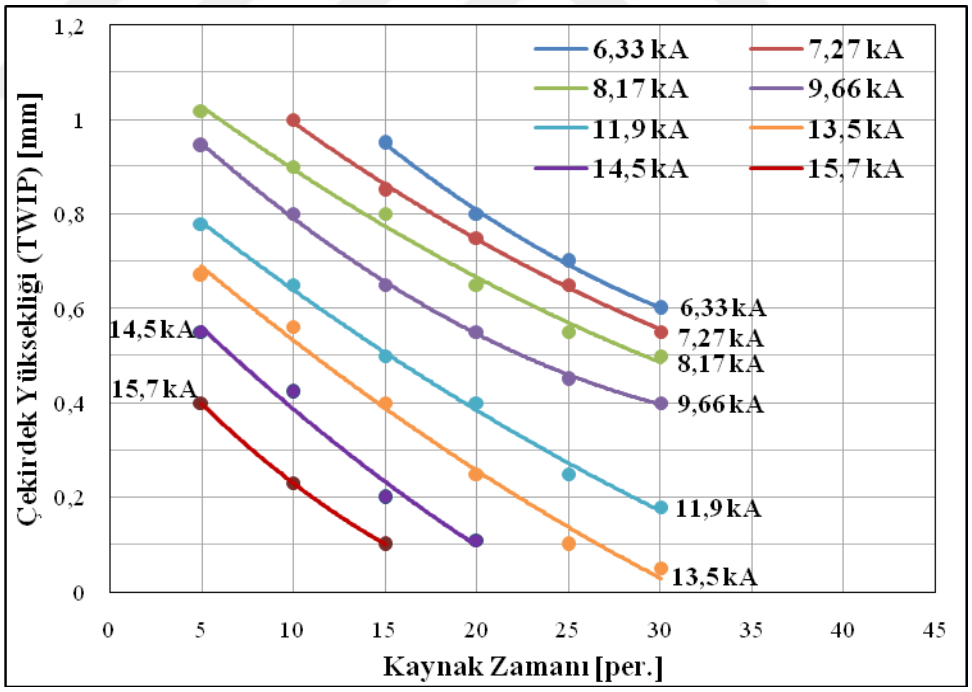
7.3.2. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının çekirdek yüksekliğine etkisi

7.3.2.1. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin TWIP çeliğinde oluşan kaynak çekirdeği yüksekliğine etkisi

Şekil 7.9 ve 7.10'da görüldüğü gibi kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin artmasına rağmen TWIP çeliğinde oluşan çekirdek yüksekliği azalmaktadır. 0,6-1 mm aralığında olan çekirdek yüksekliği akım şiddetinin artmasıyla 0,05-0,4 mm aralığına azalmaktadır.

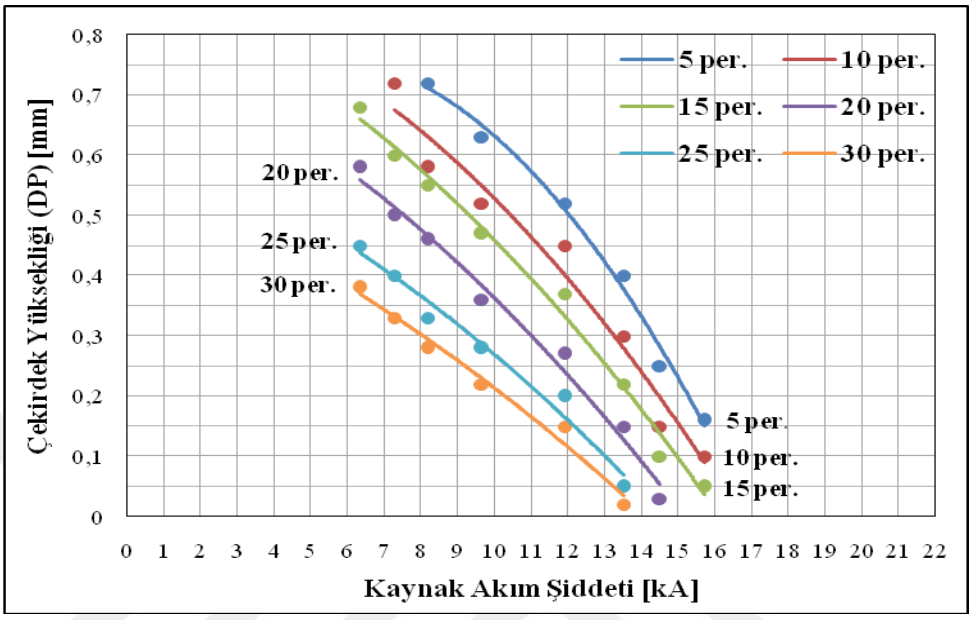


Şekil 7.9 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin TWIP çeliğinde oluşan kaynak çekirdek yüksekliğine etkisi.

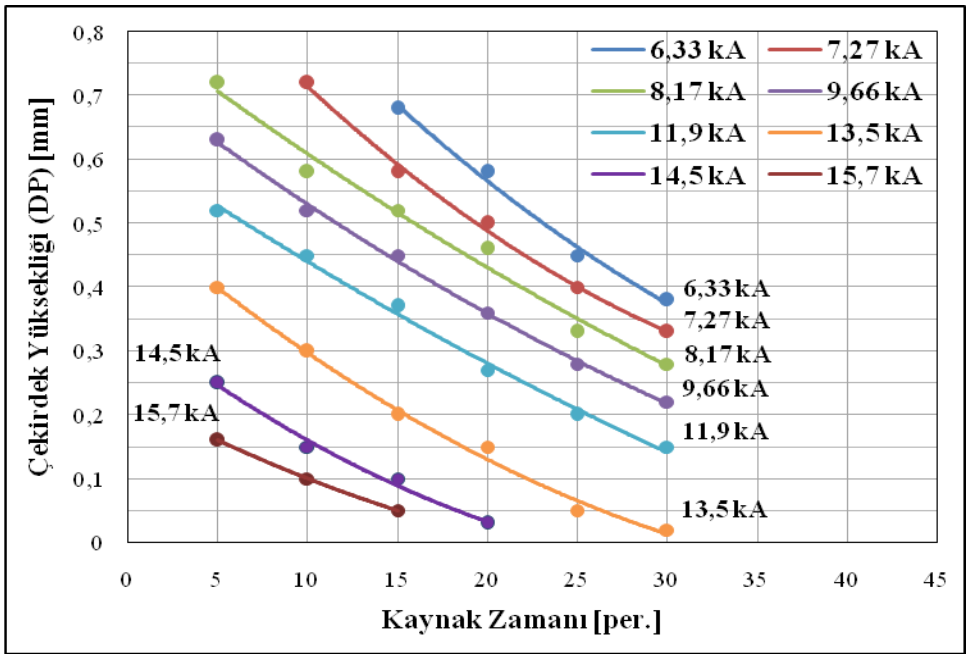


Şekil 7.10 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının TWIP çeliğinde oluşan kaynak çekirdek yüksekliğine etkisi.

7.3.2.2. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin DP çeliğinde oluşan kaynak çekirdeği yüksekliğine etkisi



Şekil 7.11 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin DP çeliğinde oluşan kaynak çekirdek yüksekliğine etkisi.

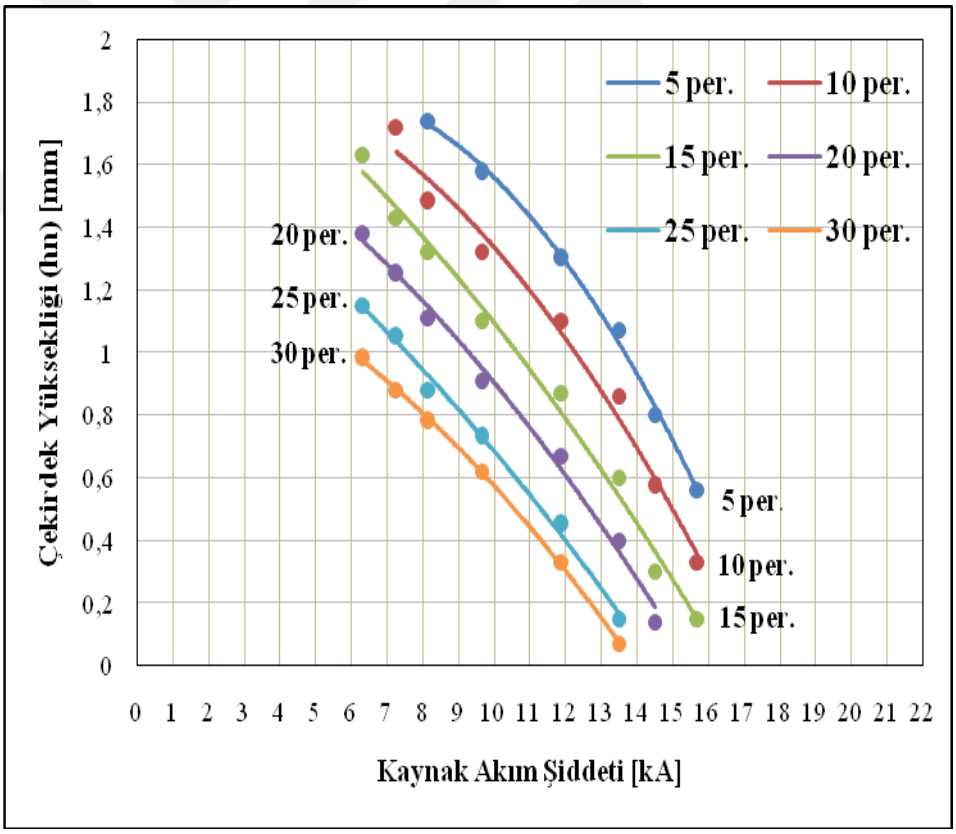


Şekil 7.12 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının DP çeliğinde oluşan kaynak çekirdek yüksekliğine etkisi.

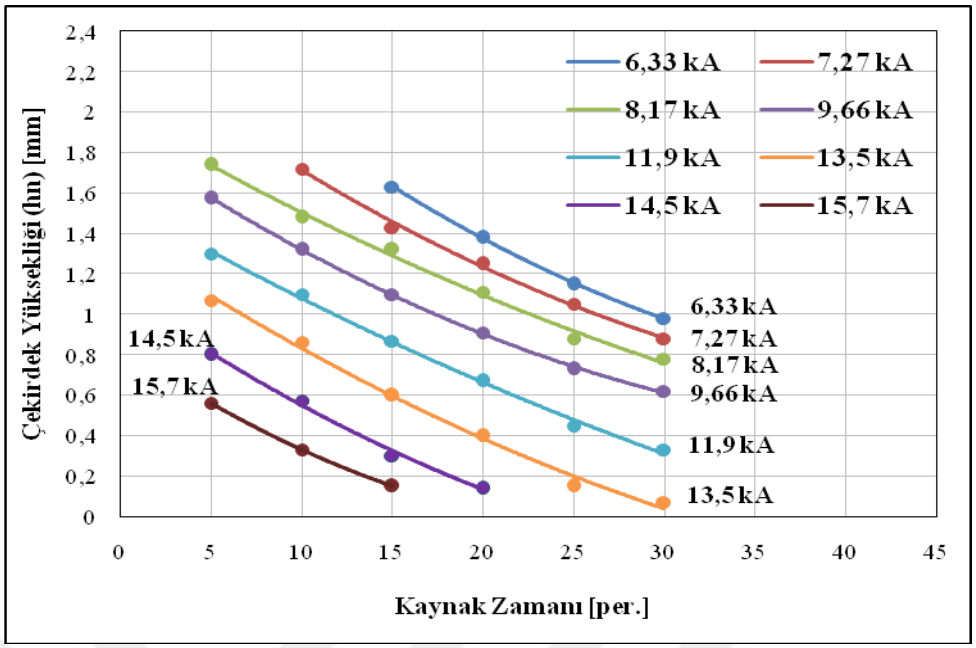
Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de görüldüğü gibi kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin artmasına rağmen DP çeliğinde oluşan çekirdek yüksekliği azalmaktadır. 0,4-0,7 mm aralığında olan çekirdek yüksekliği akım şiddetinin artmasıyla 0,05-0,15 mm aralığına azalmaktadır.

7.3.2.3. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin TWIP-DP kaynaklı birleştirmelerde oluşan toplam kaynak çekirdeği yüksekliğine etkisi

Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de görüldüğü gibi kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasına rağmen çekirdek yüksekliği azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasıyla birlikte artan ısı girdisi sebebiyle eriyen metal miktarı artmakta ve bununla birlikte aşırı dalma derinliği ile çekirdek kesitinden fışkırmalar oluşmaktadır. Bu yüzden çekirdek yüksekliği azalmaktadır [43, 77, 79, 88].

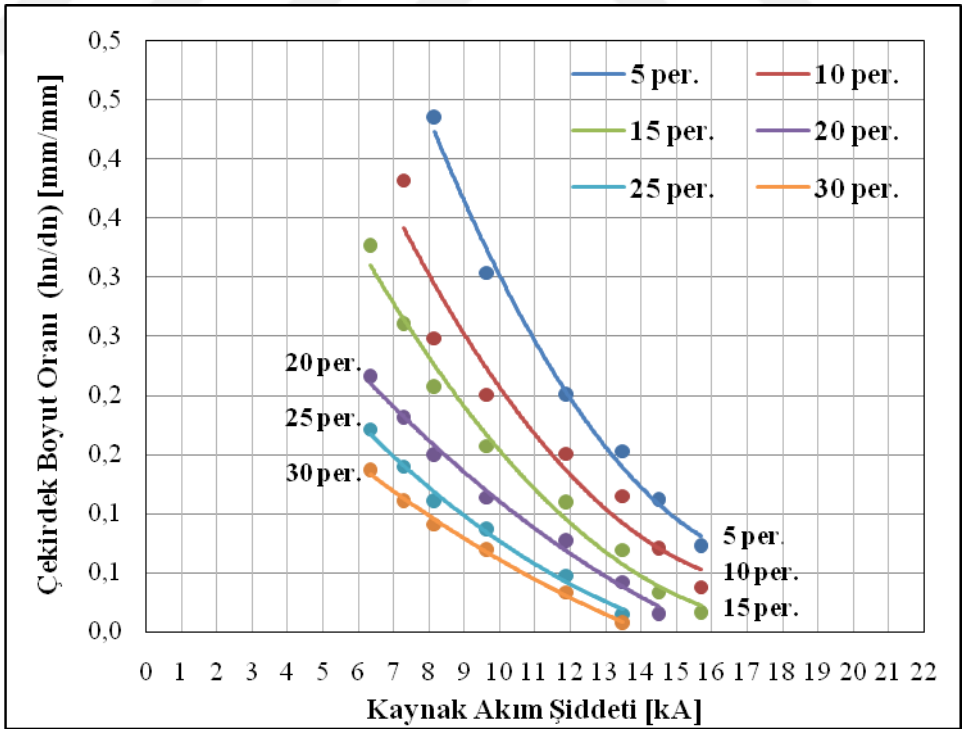


Şekil 7.13 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek yüksekliğine etkisi.

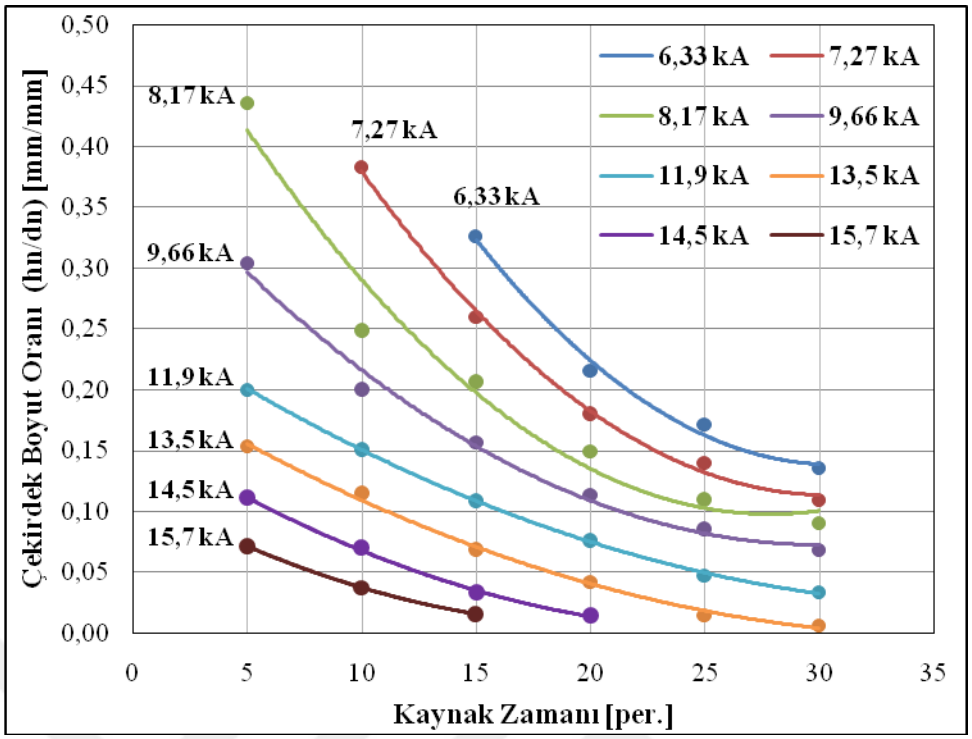


Şekil 7.14 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının çekirdek yüksekliğine etkisi.

7.3.3. TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının çekirdek boyut oranına etkisi



Şekil 7.15 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi.



Şekil 7.16 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi.

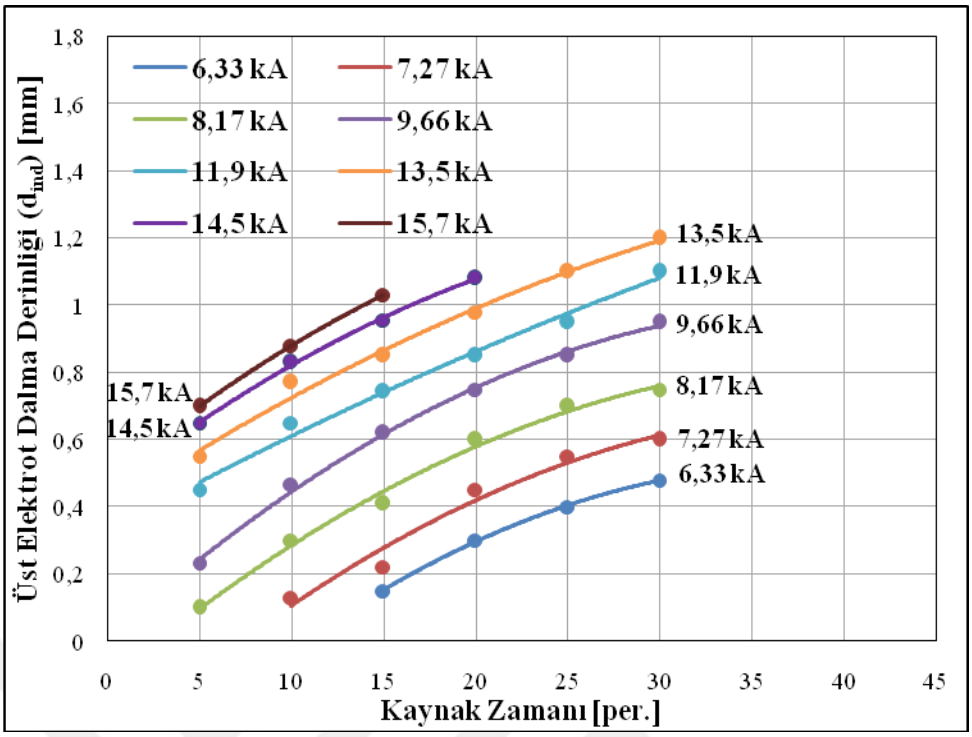
Şekil 7.15. ve Şekil 7.16.'da görüldüğü gibi kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasına rağmen çekirdek boyut oranı azalmaktadır Literatürde yer alan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [43, 79].

7.4. TWIP-DP Bağlantılarda Kaynak Değişkenlerinin Dalma Derinliğine Etkisi

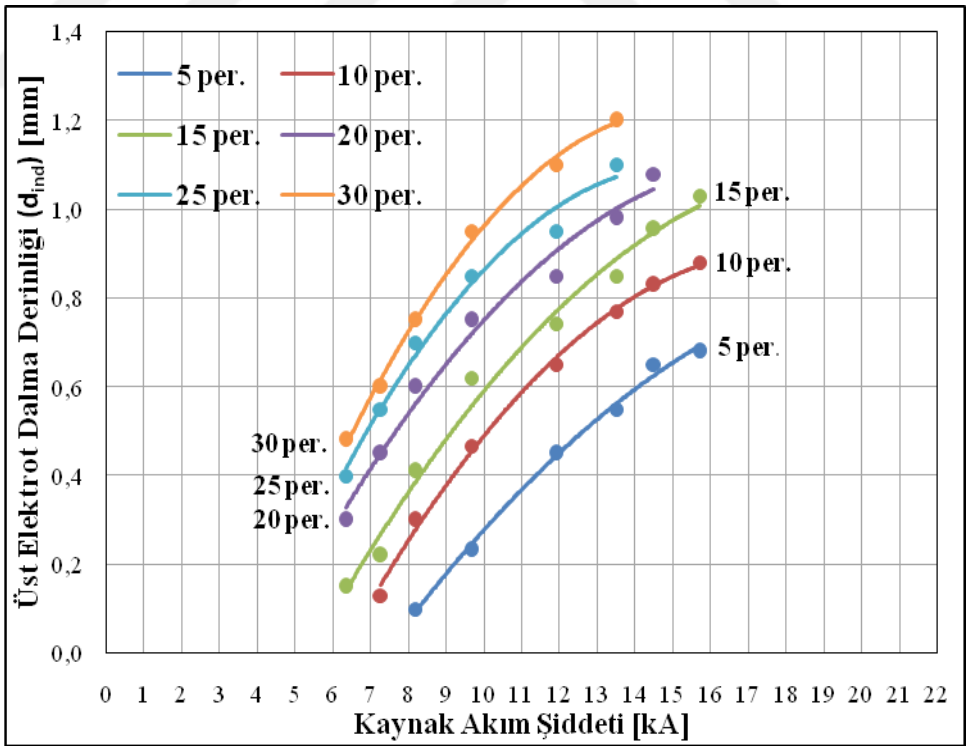
7.4.1. TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının ve kaynak akım şiddetinin elektrot dalma derinliğine etkisi

7.4.1.1. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin TWIP çeliğinde oluşan elektrot dalma derinliğine etkisi

Şekil 7.17 ve Şekil 7.18'de görüldüğü gibi akım şiddetinin ve kaynak zamanının artmasıyla birlikte TWIP saclarına temas eden elektrotun dalma derinliği de artmaktadır. Daha önce literatürde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [76-86].

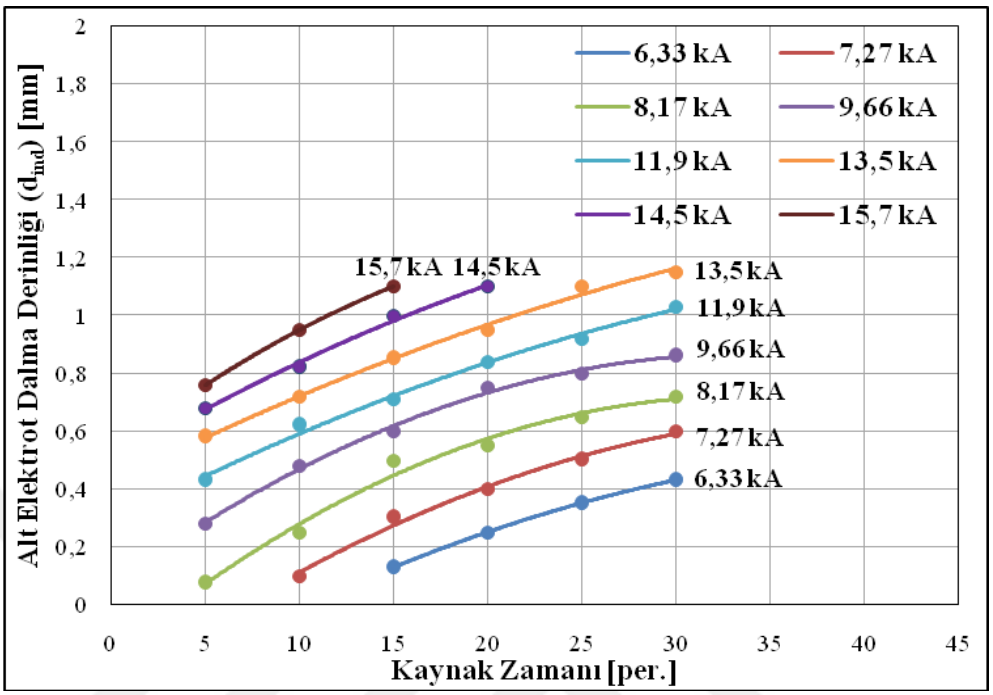


Şekil 7.17 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin TWIP çeliğinin elektrot dalma derinliğine etkisi.

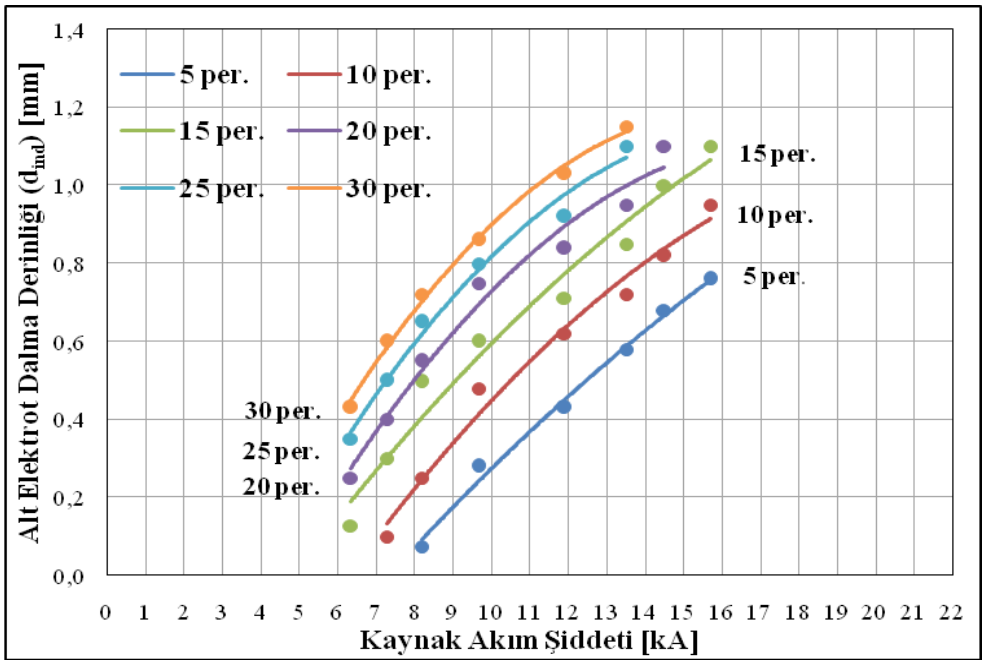


Şekil 7.18 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının TWIP çeliğinin elektrot dalma derinliğine etkisi.

7.4.1.2. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin DP çeliğinde oluşan elektrot dalma derinliğine etkisi



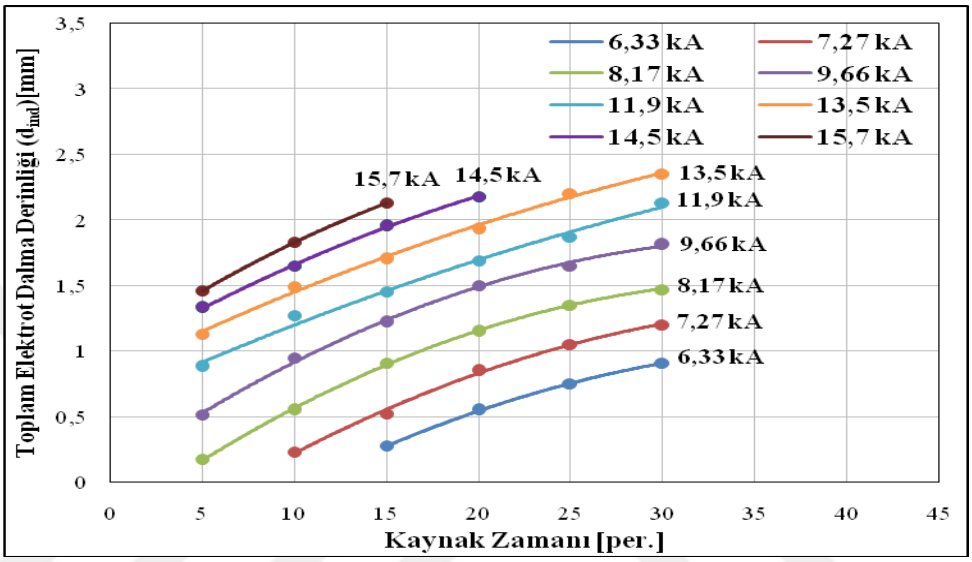
Şekil 7.19 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin DP çeliğinin elektrot dalma derinliğine etkisi.



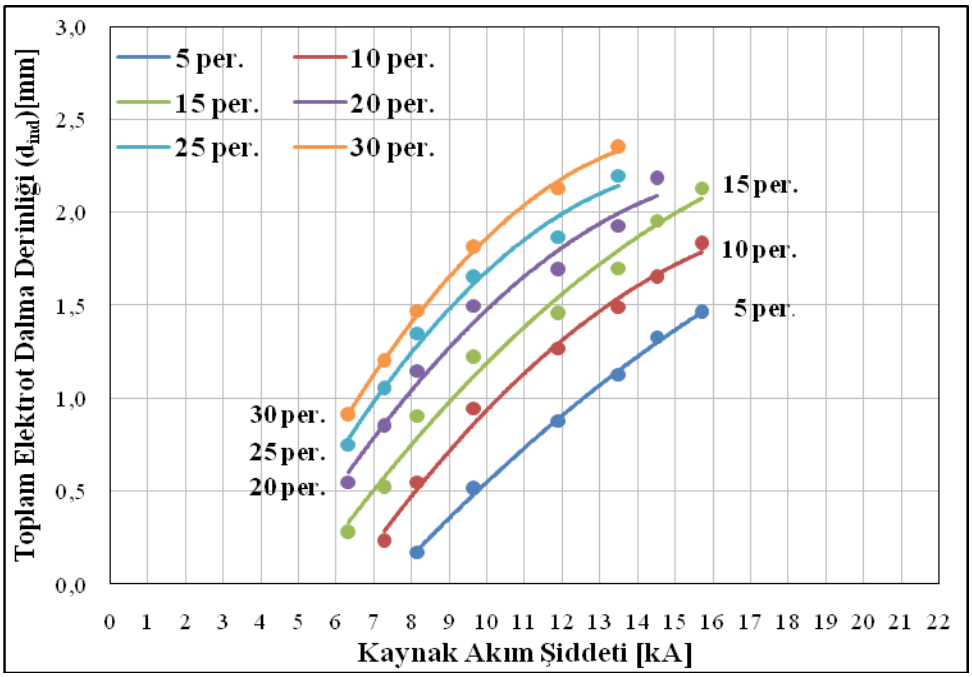
Şekil 7.20 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak zamanının DP çeliğinin elektrot dalma derinliğine etkisi.

Kaynak akım şiddeti ve kaynak süresinin artmasıyla DP çeliğiyle temas eden elektrotun dalma derinliğinin TWIP sacında olduğu gibi arttığı Şekil 7.19 ve Şekil 7.20'de görülmektedir.

7.4.1.3. Kaynak süresinin ve kaynak akım şiddetinin TWIP-DP kaynaklı birleştirmede oluşan toplam elektrot dalma derinliğine etkisi



Şekil 7.21 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin toplam elektrot dalma derinliğine etkisi.



Şekil 7.22 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak süresinin toplam elektrot dalma derinliğine etkisi.

Kaynak süresi ve kaynak akım şiddetinin artmasıyla beraber ısı girdisinin de artmasından dolayı kaynaklı birleştirmelerin elektrotların temas ettiği yüzeyleri de lineer olarak arttığı Şekil 7.21 ve Şekil 7.22'de gösterilmiştir [76-86].

7.5. TWIP-DP Bağlantıların Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Çekirdek Boyutlarının Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz Çekme Dayanımına Etkisi

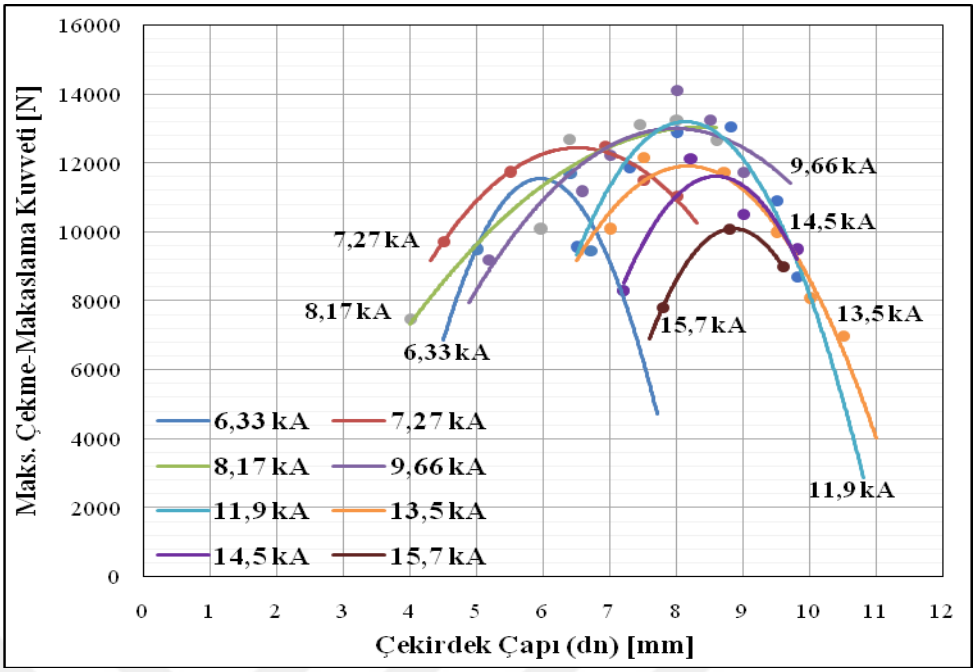
7.5.1. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 7.23 ve Şekil 7.24'de çekirdek çapı arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımının da arttığı görülmektedir. Kaynak çekirdeğinin boyutu büyüdükçe, yük taşıyan kesit artmaktadır ve o bölgedeki gerilme değeri giderek küçülmektedir. Bunun sonucu olarak da, kaynaklı bölge daha yüksek gerilme kuvvet değerlerinde hasara uğramaktadır.

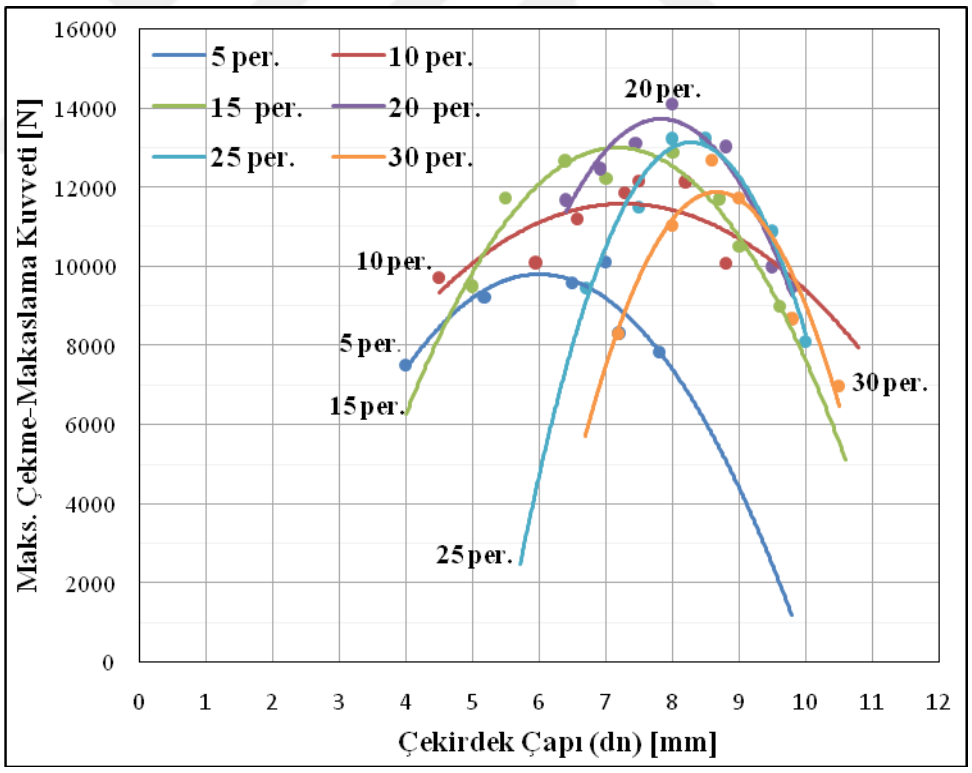
Maksimum çekme-makaslama dayanımı 10 periyotta 8,2 mm çekirdek çapında; 15 periyotta 8 mm çekirdek çapında; 20 periyotta 8 mm çekirdek çapında; 25 periyotta 8 mm çekirdek çapında; 30 periyotta 9 mm çekirdek çapında elde edilmiştir. Bu değerlerden sonra kaynak çekirdek çapının artmasına rağmen bulunan dayanım değerleri azalmaktadır.

Elektrik kaynak süresindeki artış her bir deneysel parametre sonucu için çekme-makaslama kuvvetini artırırken belirli bir noktayı geçtikten sonra da tam tersi bir etki yapmaktadır.

Yüksek çekirdek çapı ölçülerinde ısı girdisinin artmasına paralel dayanımın belli bir noktadan sonra giderek azalmaya başladığı yapılan literatür taramalarında elde edilen sonuçlarla ve deneysel çalışma sonuçları ile uyumludur [76-86].



Şekil 7.23 : TWIP-DP bağlantıların çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).

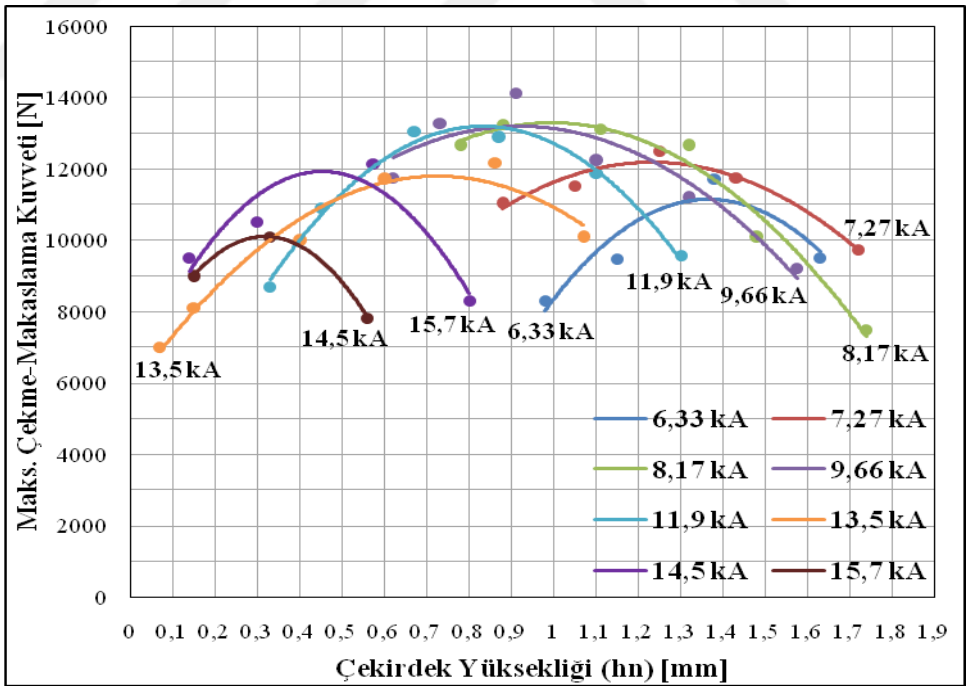


Şekil 7.24 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken kaynak zamanı sabit).

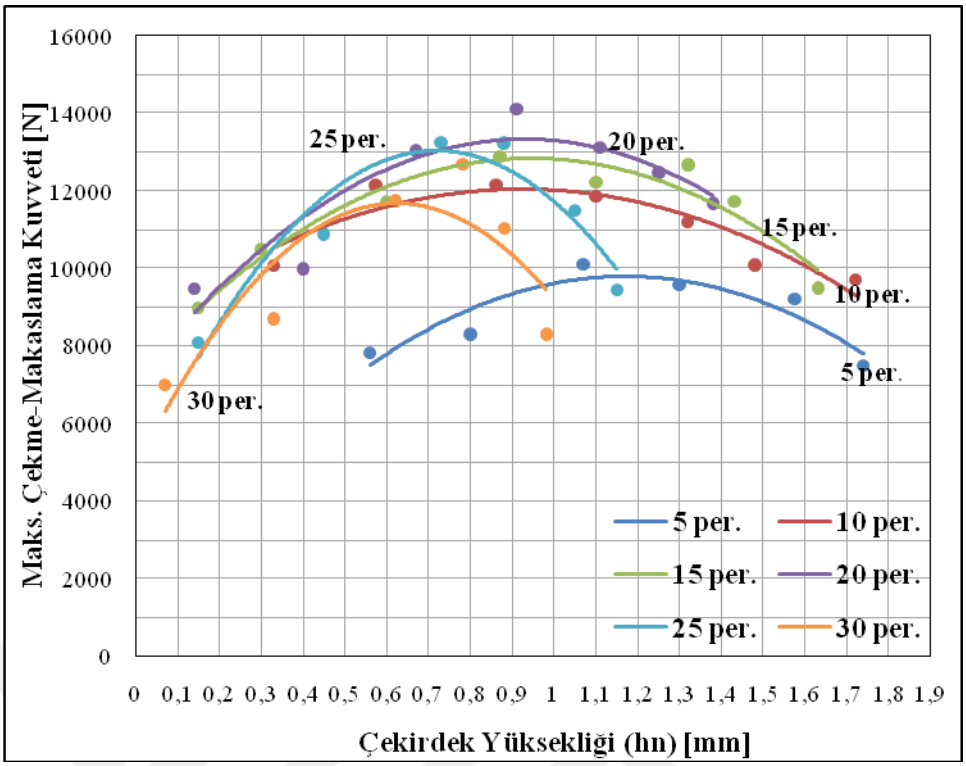
7.5.2. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'da görüldüğü gibi kaynak çekirdek yüksekliği arttıkça, kaynaklı bağlantının çekme-makaslama dayanımının belli bir noktaya kadar arttığı sonra ise azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın nedeni kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin artmasıyla birlikte kaynak çekirdeğine artan ısı girdisi sebebiyle elektrotların dalma derinlikleri artmakta ve buna bağlı olarak da çekirdek yüksekliği azalmasıdır. Dolayısıyla düşük kaynak zamanı ve akım şiddeti değerlerinde kaynak çekirdek bölgesine düşük ısı girişine bağlı olarak çekme-makaslama dayanımı da düşük olmaktadır.

Maksimum çekme-makaslama dayanımı 5 periyotta 1,07 mm; 10 periyotta 0,86 mm; 15 periyotta 0,87 mm; 20 periyotta 0,91 mm; 25 periyotta 0,73 mm; ve 30 periyotta 0,78 mm çekirdek yüksekliğinde elde edilmiştir. Literatür çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır [43, 79].



Şekil 7.25 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).

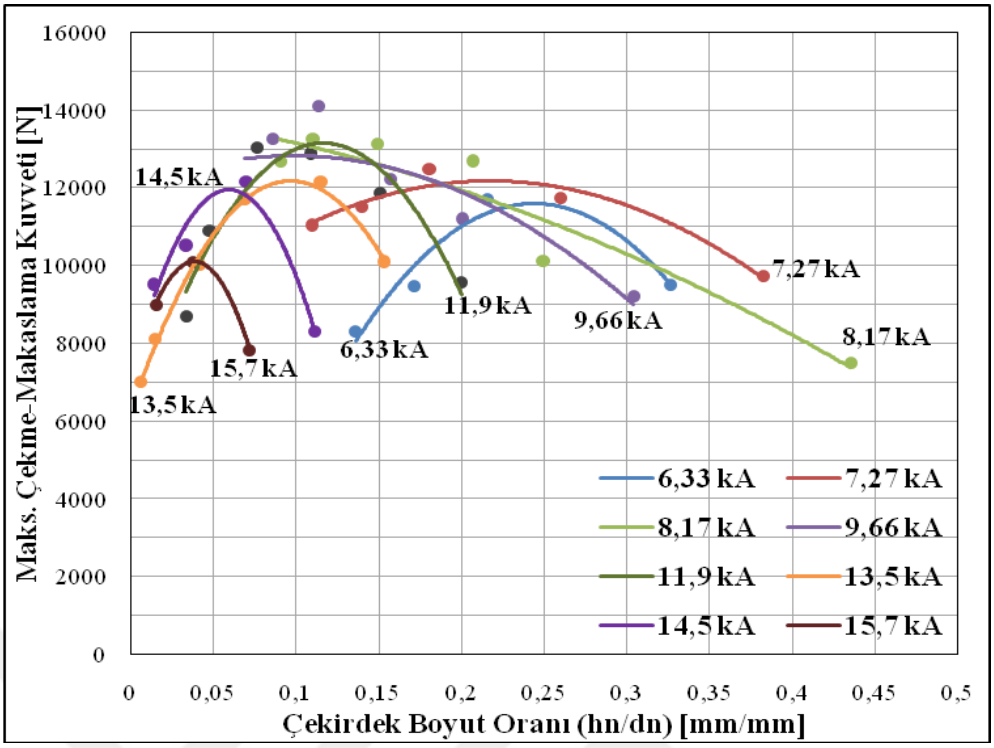


Şekil 7.26 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

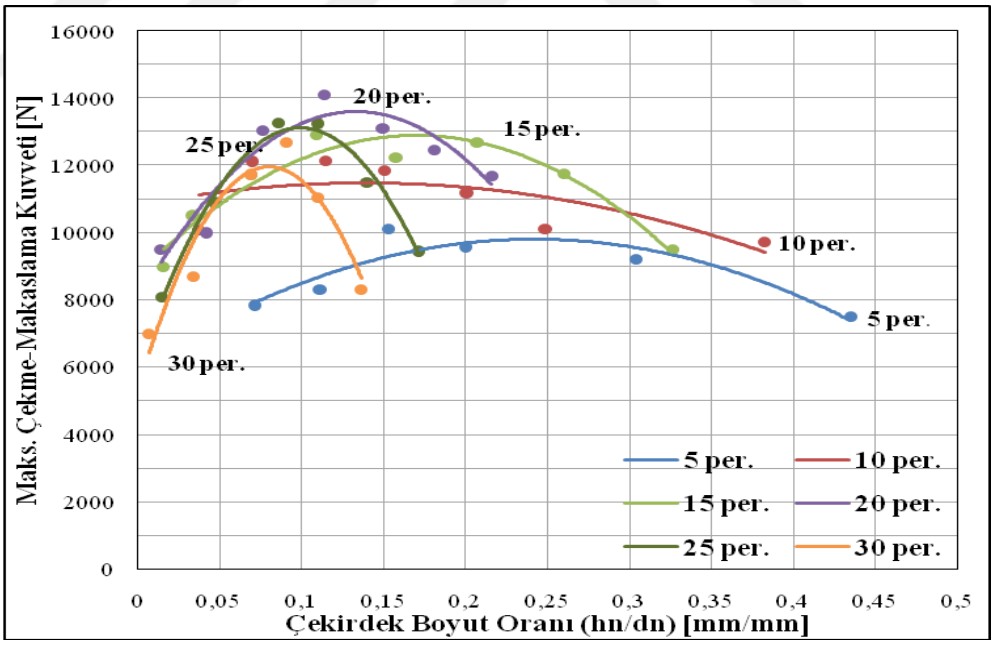
7.5.3. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'de görüldüğü gibi çekirdek boyut oranı arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımının belli bir noktaya kadar arttığı daha sonra ise azaldığı görülmektedir. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin artmasıyla birlikte artan ısı girdisi sebebiyle elektrotların dalma derinlikleri artar ve buna bağlı olarak çekirdek yüksekliği azalırken çekirdek çapı artar. Yani çekirdek boyut oranı azalır. Çekirdek boyut oranının yüksek olduğu düşük kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı değerlerinde ise düşük ısı girişine bağlı olarak çekme-makaslama dayanımı da düşüktür.

Maksimum çekme-makaslama dayanımı 5 periyotta 0,15; 10 periyotta 0,11; 15 periyotta 0,2; 20 periyotta 0,13; 25 periyotta 0,08; ve 30 periyotta 0,09 çekirdek boyut oranında elde edilmiştir. Bu noktalardan sonra çekirdek boyut oranı artmasına rağmen dayanım azalmaktadır. Literatür çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır [43, 79].

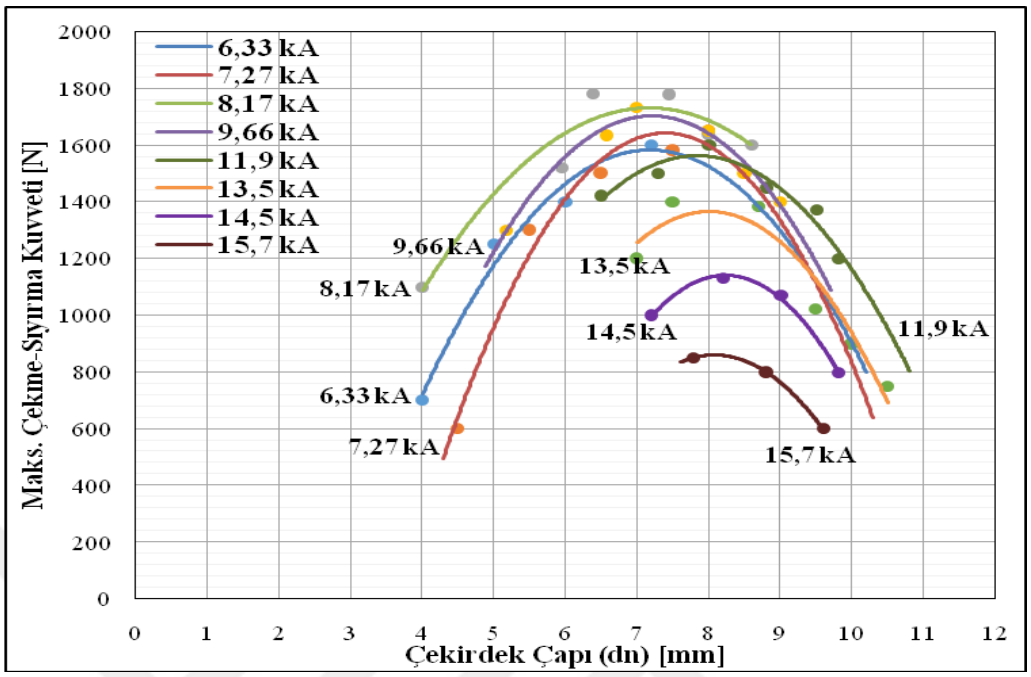


Şekil 7.27 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).

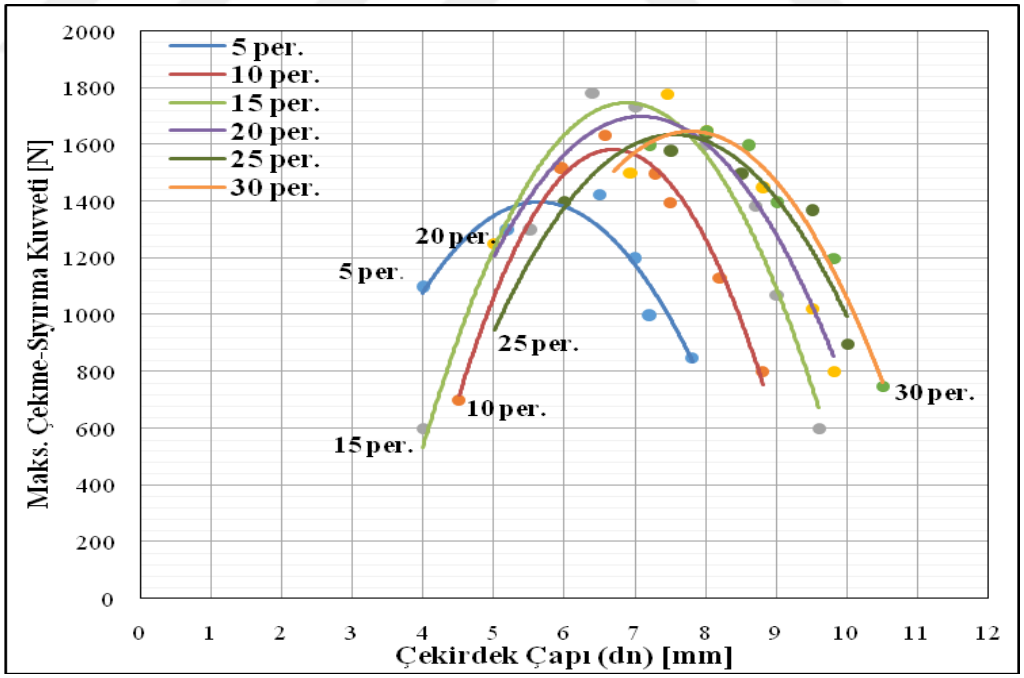


Şekil 7.28 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

7.5.4. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi



Şekil 7.29 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).

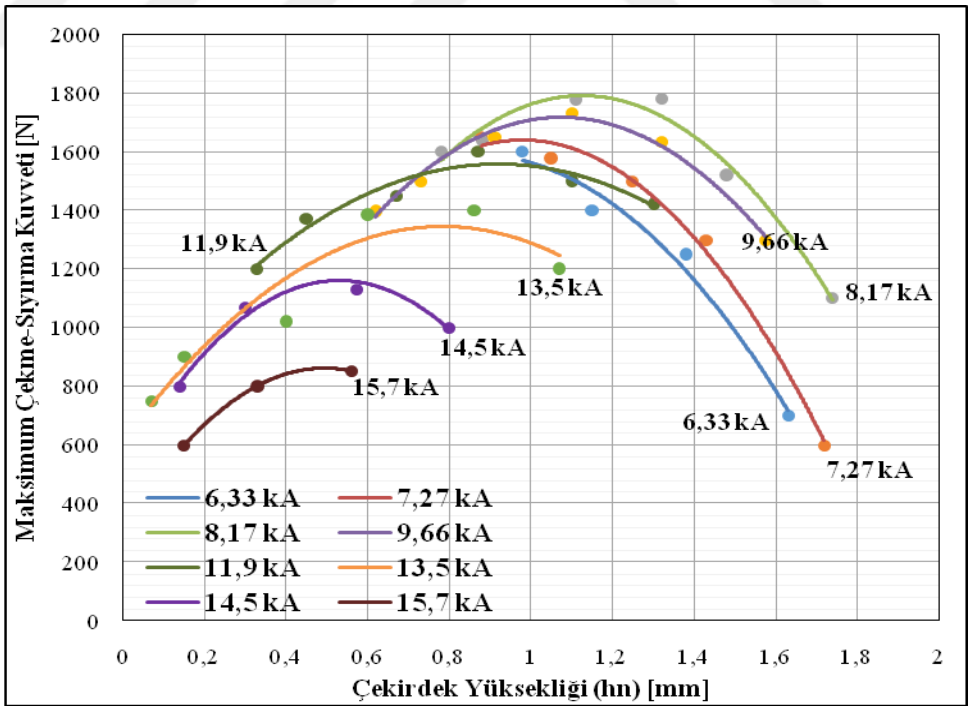


Şekil 7.30 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

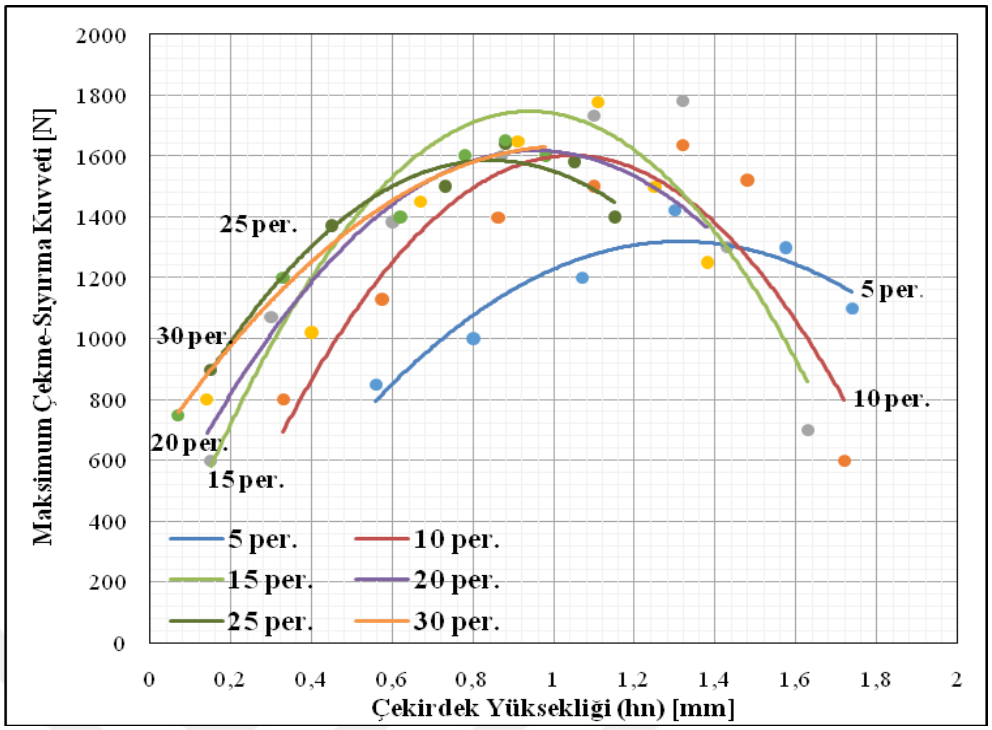
Şekil 7.29. ve Şekil 7.30.'da görüldüğü gibi çekirdek çapı arttıkça, bağlantının çekme-sıyırma dayanımı da artmaktadır. Ancak belirli bir noktadan sonra çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi aşırı dalma derinliği ve fışkırma nedeniyle çekme-sıyırma dayanımı azalmaktadır.

Maksimum çekme-sıyırma dayanımı 5 periyotta 6,5 mm çekirdek çapında; 10 periyotta 6,5 mm çekirdek çapında; 15 periyotta 6,4 mm çekirdek çapında; 20 periyotta 7,4 mm çekirdek çapında; 25 periyotta 8 mm çekirdek çapında; 30 periyotta 8 mm çekirdek çapında elde edilmiştir. Çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi bu noktalardan sonra çekirdek çapı artmasına rağmen çekme-sıyırma dayanımı azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fışkırmaların olmasıdır. Literatür çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır [43, 79].

7.5.5. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi



Şekil 7.31 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit -kaynak zamanı değişken).

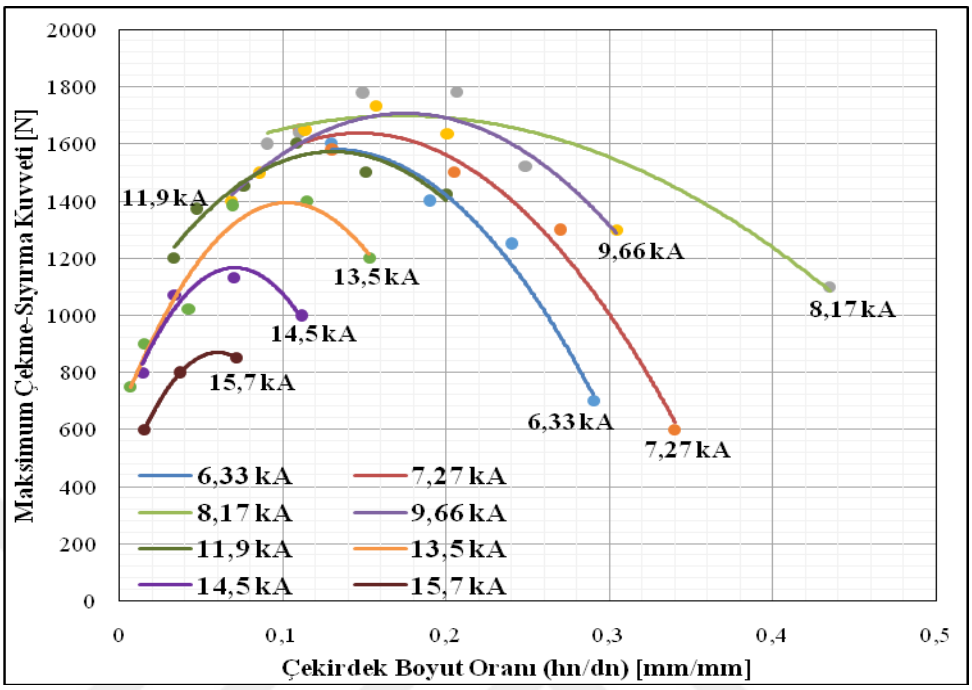


Şekil 7.32 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

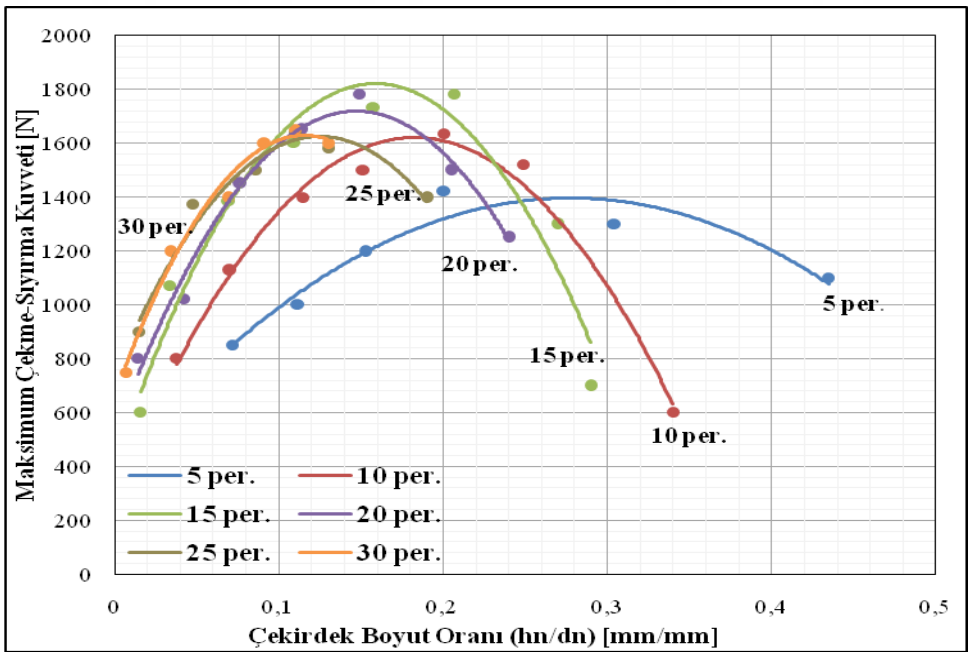
Şekil 7.31 ve Şekil 7.32'de görüldüğü gibi maksimum çekme-sıyırma dayanımı 5 periyotta 1,3 mm çekirdek yüksekliğinde; 10 periyotta 1,32 mm çekirdek yüksekliğinde; 15 periyotta 1,32 mm çekirdek yüksekliğinde; 20 periyotta 1,11 mm çekirdek yüksekliğinde; 25 periyotta 0,88 mm çekirdek yüksekliğinde; 30 periyotta 0,88 mm çekirdek yüksekliğinde elde edilmiştir. Çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi bu noktalardan sonra çekirdek çapı artmasına rağmen çekme-sıyırma dayanımı azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fışkırmaların olmasıdır.

Bu yüzden eriyen metal miktarının artması ve elektrot kuvveti nedeniyle çekirdek çapının artmasına rağmen çekme-sıyırma dayanımı azalmaktadır. Literatür çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır [43, 79].

7.5.6. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi



Şekil 7.33 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit -kaynak zamanı değişken).

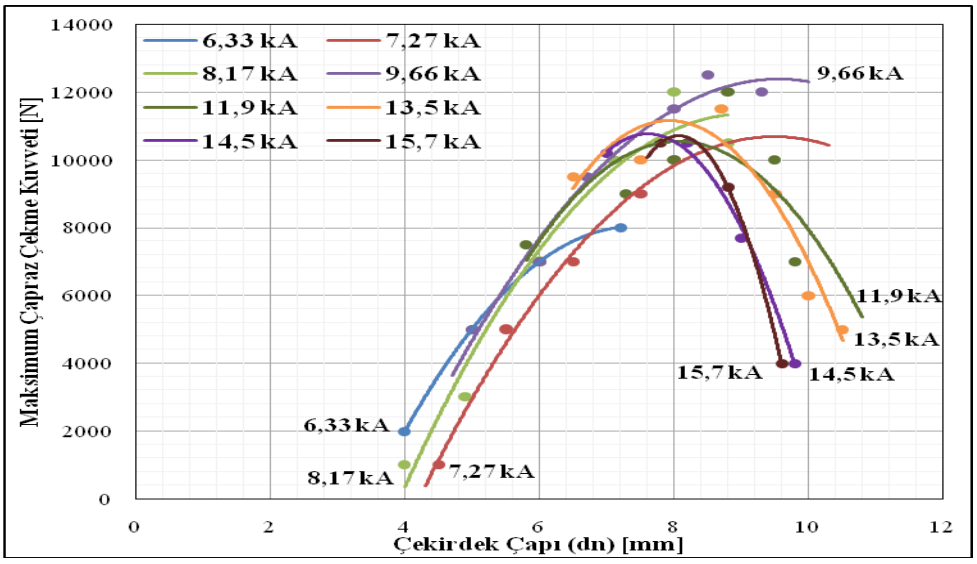


Şekil 7.34 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

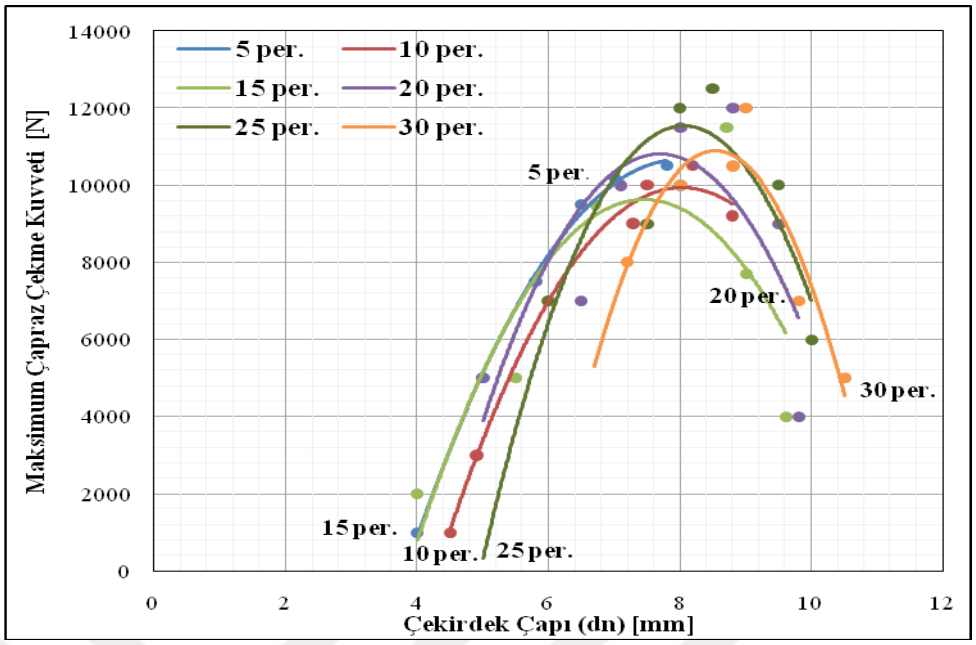
Şekil 7.33 ve Şekil 7.34'de görüldüğü gibi çekirdek boyut oranı arttıkça, bağlantının çekme-sıyırma dayanımı da azalmaktadır. Kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasıyla birlikte artan ısı girdisi sebebiyle elektrotların dalma derinlikleri artar ve buna bağlı olarak çekirdek yüksekliği azalırken çekirdek çapı artar. Yani çekirdek boyut oranı azalır. Çekirdek boyut oranının yüksek olduğu düşük akım ve zaman değerlerinde ise düşük ısı girişine bağlı olarak çekme-sıyırma dayanımı da düşüktür.

Maksimum çekme-sıyırma dayanımı 5 periyotta 0,2 çekirdek boyut oranında; 10 periyotta 0,2 çekirdek boyut oranında; 15 periyotta 0,2 çekirdek boyut oranında; 20 periyotta 0,14 çekirdek boyut oranında; 25 periyotta 0,11 çekirdek boyut oranında; 30 periyotta 0,11 çekirdek boyut oranında elde edilmiştir. Çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi bu noktalardan sonra çekirdek boyut oranı artmasına rağmen çekme-sıyırma dayanımı da azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fışkırmaların olmasıdır. Literatür çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır [43, 75, 76, 79].

7.5.7. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çapraz çekme dayanımına etkisi



Şekil 7.35 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).

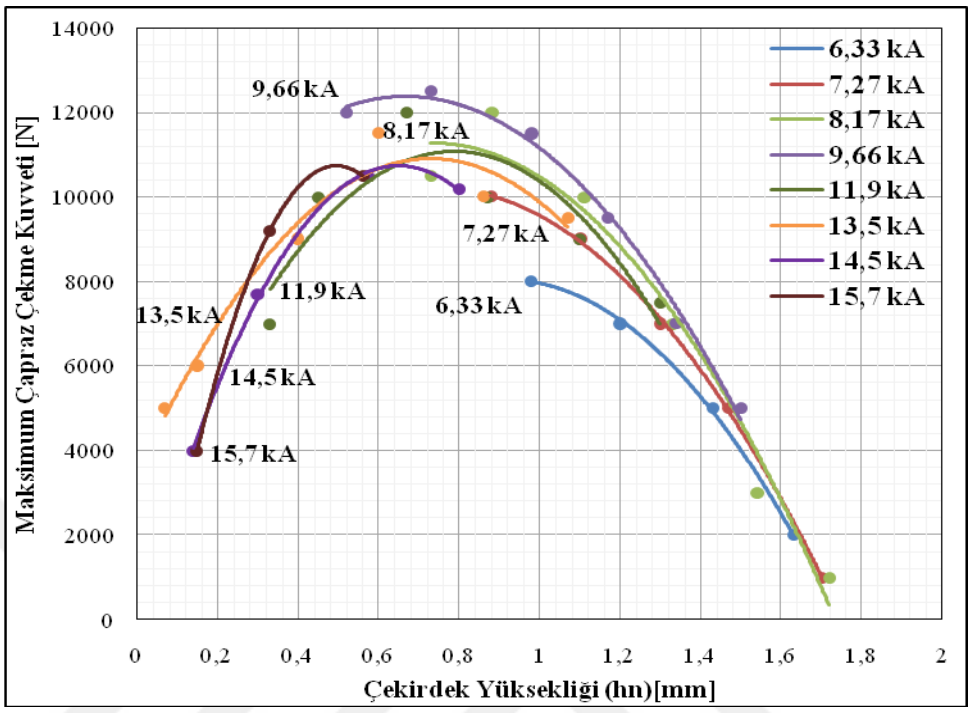


Şekil 7.36 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek çapının çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

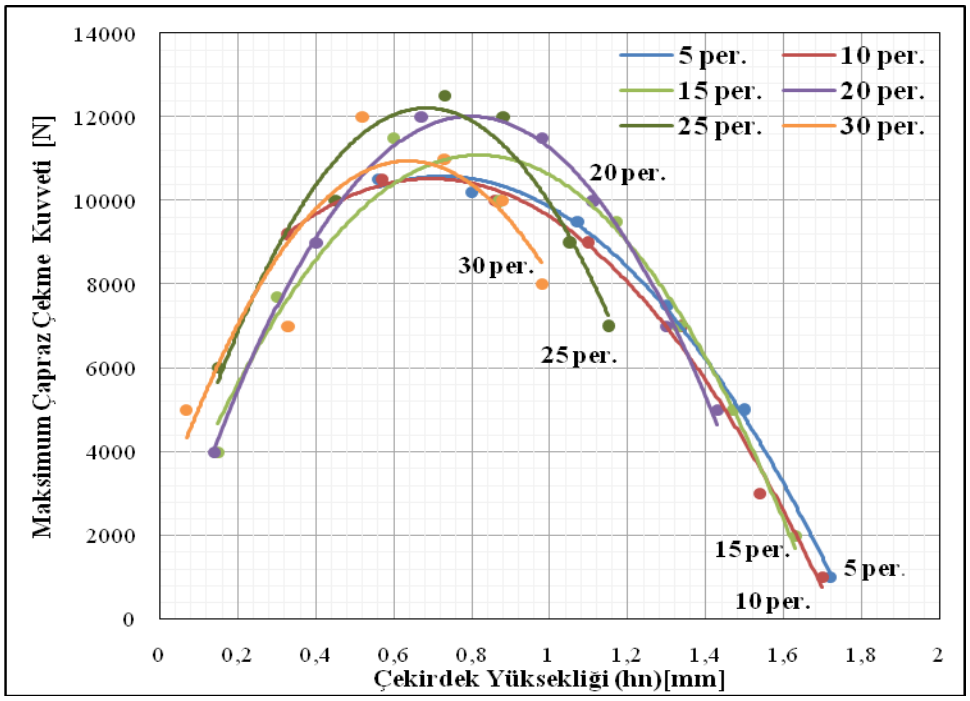
Maksimum çapraz çekme dayanımı 5 periyotta 7,8 mm çekirdek çapında; 10 periyotta 8,2 mm çekirdek çapında; 15 periyotta 8,7 mm çekirdek çapında; 20 periyotta 8,8 mm çekirdek çapında; 25 periyotta 8,5 mm çekirdek çapında; 30 periyotta 9 mm çekirdek çapında elde edilmiştir. Bu değerlerden sonra kaynak çekirdek çapının artmasına rağmen bulunan dayanım değerleri azalmaktadır.

Kaynak akım şiddetleri arasında sıralama yapacak olursak en yüksek çapraz çekme kuvveti, 6,33 kA'de 7,2 mm kaynak çekirdek çapında, 7,27 kA'de 8 mm kaynak çekirdek çapında, 8,17 kA'de 8 mm kaynak çekirdek çapında, 9,66 kA'de 8,5 mm kaynak çekirdek çapında, 11,9 kA' de 8,8 mm kaynak çekirdek çapında 13,5 kA' de 8,7 mm kaynak çekirdeği çapında, 14,5 kA'de 8,2 mm kaynak çekirdek çapında ve 15,7 kA'de 7,8 mm kaynak çekirdek çapında elde edilmiştir. Literatür çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır [43, 75, 76, 79].

7.5.8. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çapraz çekme dayanımına etkisi



Şekil 7.37 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).

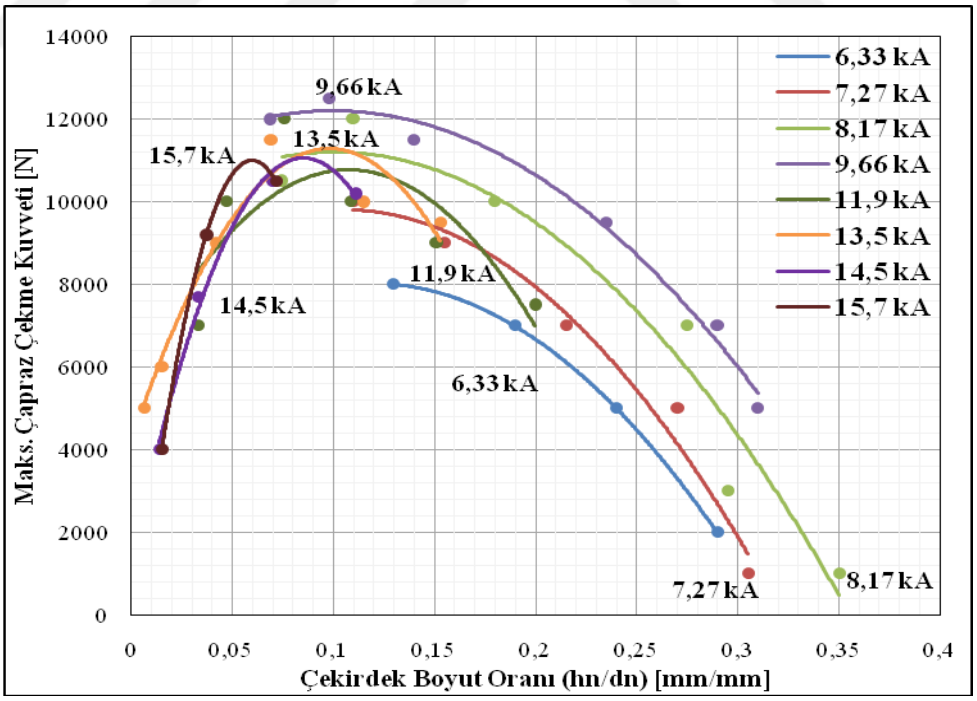


Şekil 7.38 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

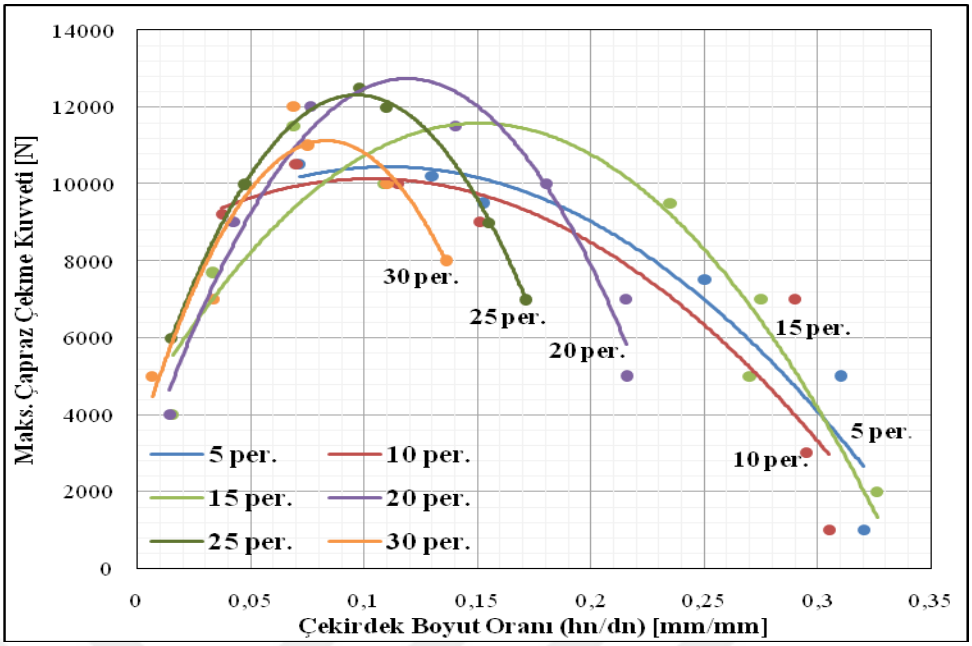
Maksimum çapraz çekme dayanımı 5 periyotta 0,56 mm çekirdek yüksekliğinde; 10 periyotta 0,57 mm çekirdek yüksekliğinde; 15 periyotta 0,87 mm çekirdek yüksekliğinde; 20 periyotta 0,67 mm çekirdek yüksekliğinde; 25 periyotta 0,73 mm çekirdek yüksekliğinde; 30 periyotta 0,52 mm çekirdek yüksekliğinde elde edilmiştir. Bu değerlerden sonra kaynak çekirdek çapının artmasına rağmen bulunan dayanım değerleri azalmaktadır.

Kaynak akım şiddetleri arasında sıralama yapacak olursak en yüksek çapraz çekme kuvveti, 6,33 kA'de 7,2 mm kaynak çekirdek çapında, 7,27 kA'de 8 mm kaynak çekirdek çapında, 8,17 kA'de 8 mm kaynak çekirdek çapında, 9,66 kA'de 8,5 mm kaynak çekirdek çapında, 11,9 kA'de 8,8 mm kaynak çekirdek çapında 13,5 kA' de 8,7 mm kaynak çekirdeği çapında, 14,5 kA'de 8,2 mm kaynak çekirdek çapında ve 15,7 kA'de 7,8 mm kaynak çekirdek çapında, elde edilmiştir.

7.5.9. TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çapraz çekme dayanımına etkisi



Şekil 7.39 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).



Şekil 7.40 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

Şekil 7.39 ve Şekil 7.40'da görüldüğü üzere kaynak çekirdek boyut oranındaki artış ile birlikte kaynaklı birleştirmenin maksimum çapraz çekme kuvveti belirli bir noktaya kadar artarken daha sonra azalmaktadır. Yüksek kaynak akım şiddetlerinde çekirdek boyut oranı minimum olmasına rağmen çapraz çekme kuvvetinin en yüksek noktaya ulaştığı görülmektedir. Düşük akım şiddetlerinde çekirdek boyut oranı ısı girdisinin azlığı ile artarken çapraz çekme dayanımı en düşük seviyelere inmiştir. Çekirdek çapının çok düşmesi buna bağlı olarak da çekirdek boyut oranının artması çapraz çekme dayanımını olumsuz etkilemektedir.

Maksimum çapraz çekme kuvveti 5 periyotta 0,13 çekirdek boyut oranında; 10 periyotta 0,06 çekirdek boyut oranında; 15 periyotta 0,06 çekirdek boyut oranında; 20 periyotta 0,07 çekirdek boyut oranında; 25 periyotta 0,09 çekirdek boyut oranında; 30 periyotta 0,06 çekirdek boyut oranında elde edilmiştir.

Kaynak akım şiddetleri arasında sıralama yapacak olursak en yüksek çapraz çekme kuvveti, 6,33 kA'de 0,136 çekirdek boyut oranında, 7,27 kA'de 0,11 çekirdek boyut oranında, 8,17 kA'de 0,11 çekirdek boyut oranında, 9,66 kA'de 0,09 çekirdek boyut oranında, 11,9 kA'de 0,07 çekirdek boyut oranında, 13,5 kA' de 0,06 çekirdek boyut

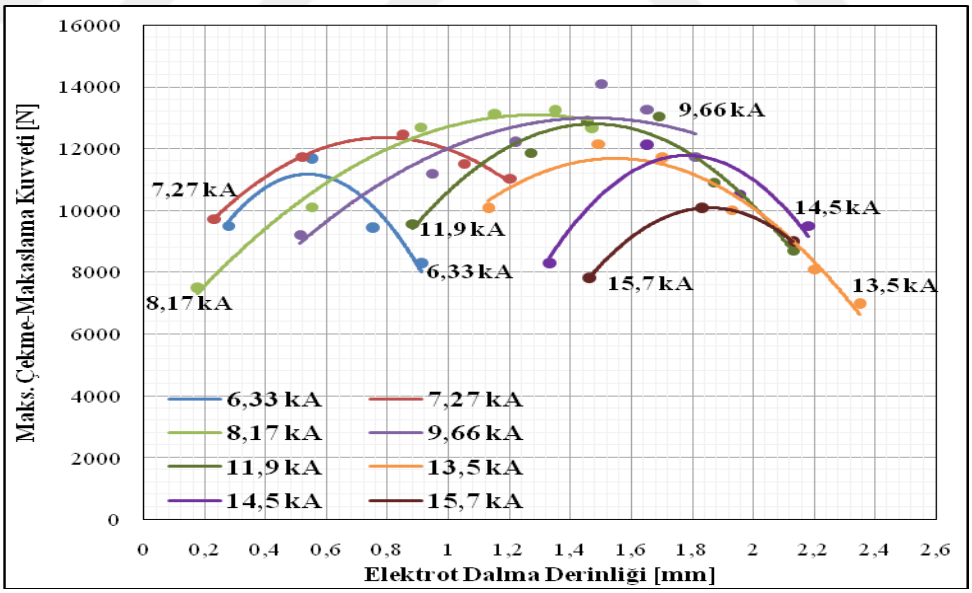
oranında, 14,5 kA'de 0,13 çekirdek boyut oranında ve 15,7 kA'de 0,07 çekirdek boyut oranında elde edilmiştir.

Çekirdek çapının çok küçülmesi buna bağlı olarak da çekirdek boyut oranının artmasının çapraz çekme dayanımını olumsuz etkilediği görülmektedir.

7.6. TWIP-DP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Elektrot Dalma Derinliğinin Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz Çekme Dayanımına Etkisi

7.6.1. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında elektrot dalma derinliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi

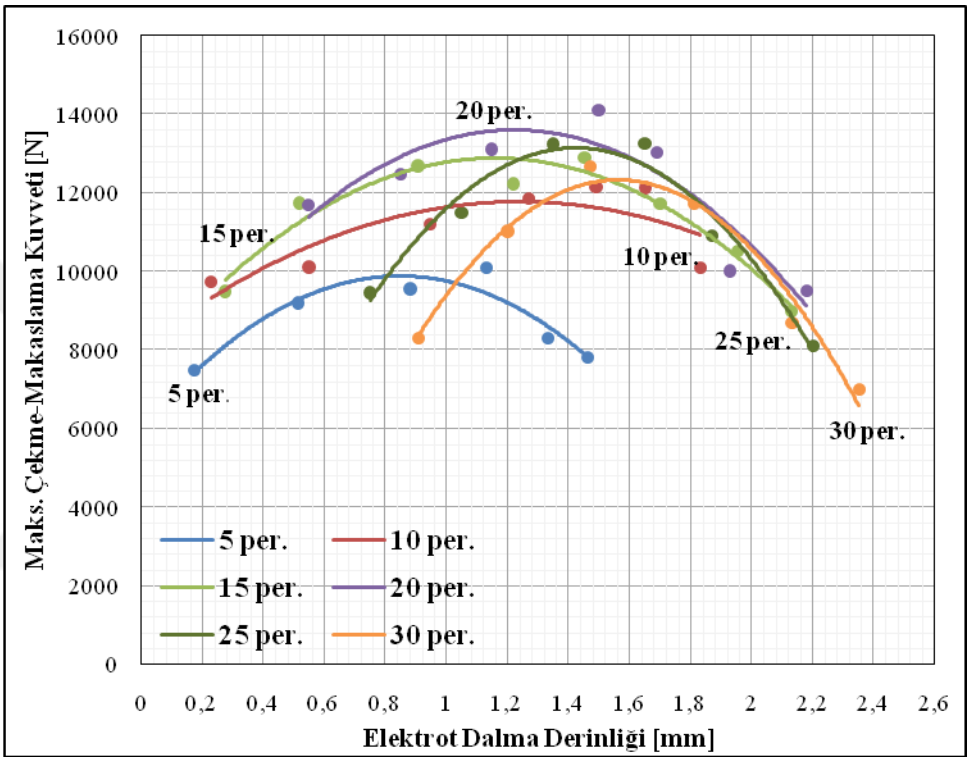
Şekil 7.41 ve Şekil 7.42'de görüldüğü gibi dalma derinliği arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. Fakat belli bir çekme makaslama noktasından sonra kaynak bölgesine giren yüksek ısı nedeniyle malzeme ara kesitinde meydana gelen erimeye bağlı olarak fışkırma oluşur ve bu yüzden dayanım düşmeye başlar.



Şekil 7.41 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).

Maksimum çekme-makaslama dayanımı 5 periyotta 1,13 mm dalma derinliğinde; 10 periyotta 1,49 mm dalma derinliğinde; 15 periyotta 1,45 mm dalma derinliğinde; 20

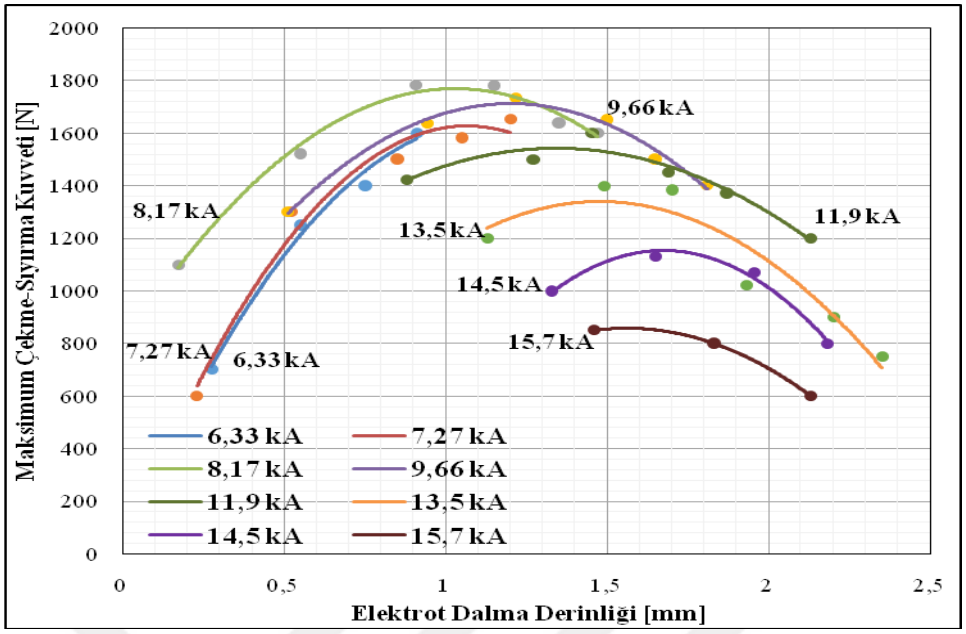
periyotta 1,5 mm dalma derinliğinde; 25 periyotta 1,65 mm dalma derinliğinde; 30 periyotta 1,47 mm dalma derinliğinde elde edilmiştir. Bu noktalardan sonra dalma derinliği artmasına rağmen dayanım azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fışkırmaların olmasıdır. Bu yüzden eriyen metal miktarının artması ve elektrot kuvveti nedeniyle dalma derinliğinin artmasına rağmen dayanım azalmaktadır.



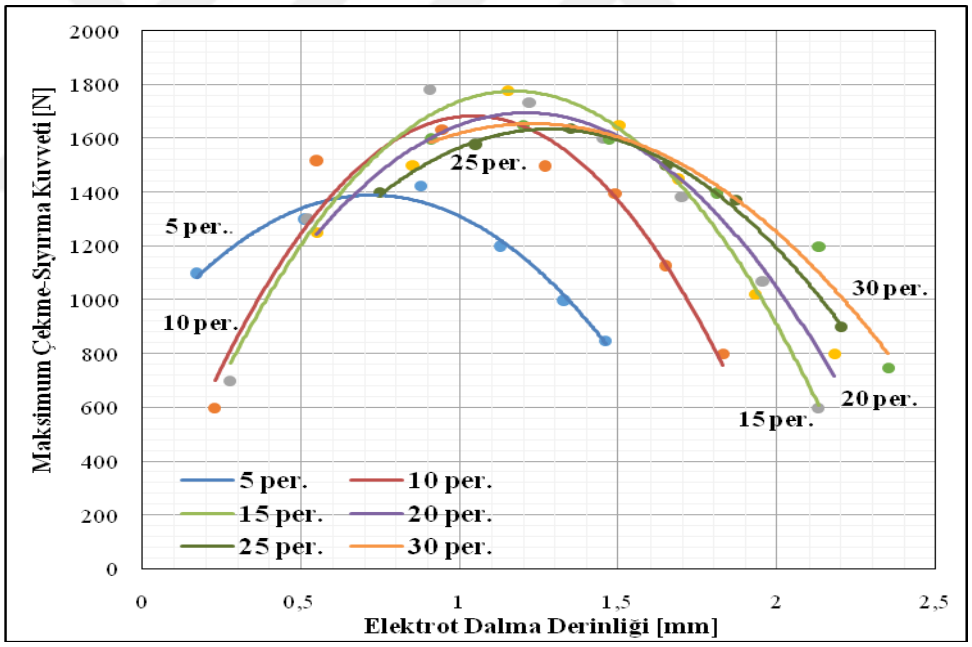
Şekil 7.42 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

7.6.2. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında elektrot dalma derinliklerinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi

Şekil 7.43 ve şekil 7.44'de görüldüğü gibi dalma derinliği arttıkça, bağlantının çekme-sıyırma dayanımı da artmaktadır. Ancak çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi belli bir noktadan sonra fışkırma nedeniyle çekme-sıyırma dayanımı da düşmeye başlar.



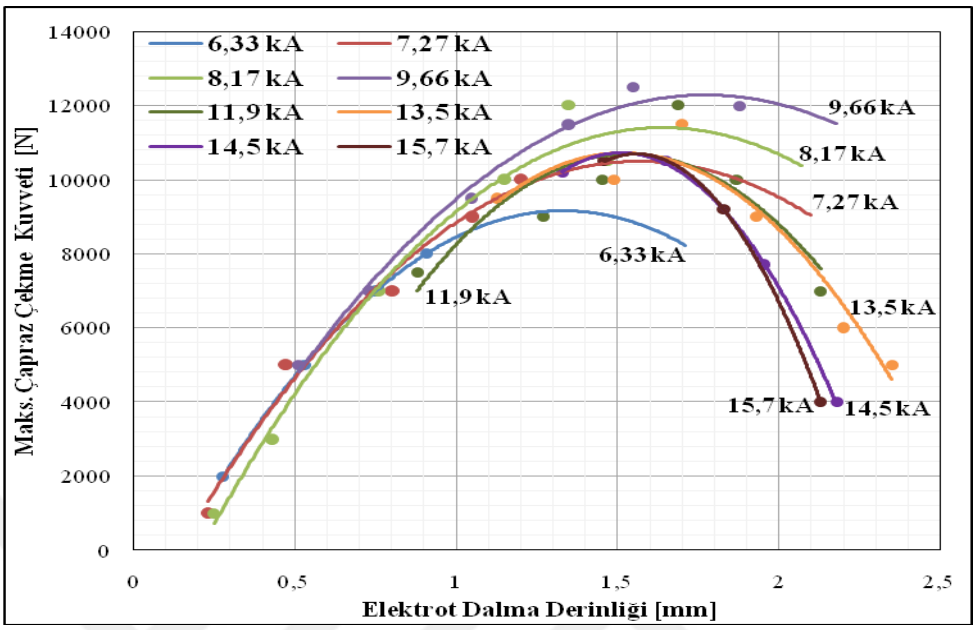
Şekil 7.43 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).



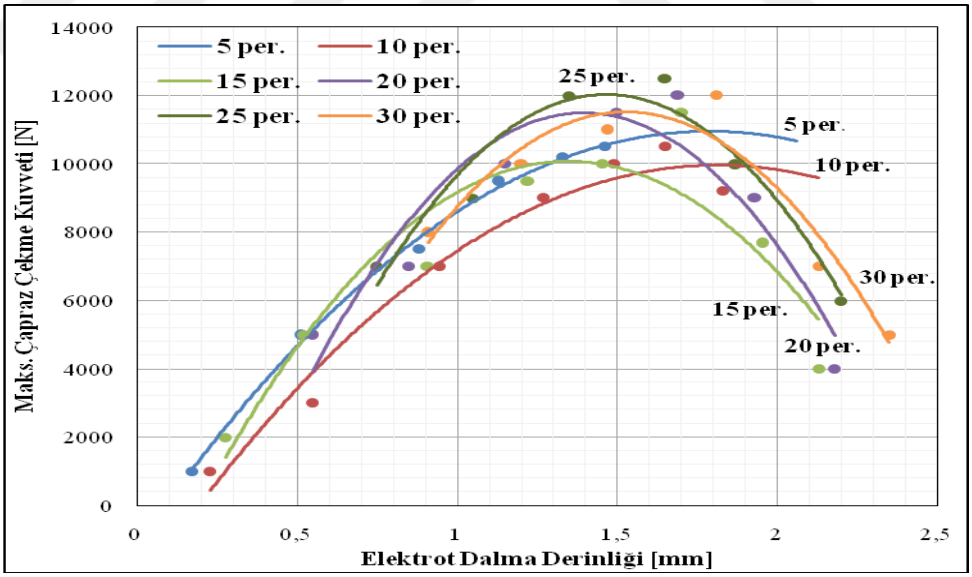
Şekil 7.44. TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

Maksimum çekme-sıyırma dayanımı 5 periyotta 0,88 mm dalma derinliğinde; 10 periyotta 0,94 mm dalma derinliğinde; 15 periyotta 0,9 mm dalma derinliğinde; 20 periyotta 1,15 mm dalma derinliğinde; 25 periyotta 1,35 mm dalma derinliğinde; 30 periyotta 1,2 mm dalma derinliğinde elde edilmiştir.

7.6.3. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında elektrot dalma derinliklerinin çapraz çekme dayanımına etkisi



Şekil 7.45 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit-kaynak zamanı değişken).



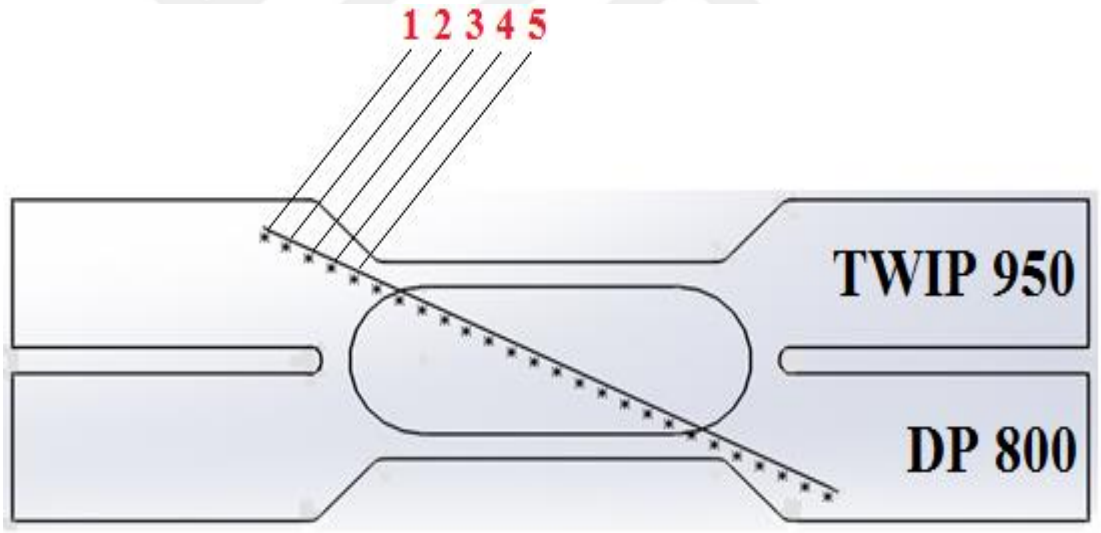
Şekil 7.46 : TWIP-DP bağlantılarda dalma derinliğinin çapraz çekme dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit).

Şekil 7.45. ve şekil 7.46.'da görüldüğü gibi dalma derinliği arttıkça, bağlantının çapraz çekme dayanımı da artmaktadır. Ancak çapraz çekme dayanımında olduğu gibi belli bir noktadan sonra fışkırma nedeniyle çapraz çekme dayanımı da düşmeye başlar.

Maksimum çapraz çekme dayanımı 5 periyotta 1,33 mm dalma derinliğinde; 10 periyotta 1,65 mm dalma derinliğinde; 15 periyotta 1,7 mm dalma derinliğinde; 20 periyotta 1,68 mm dalma derinliğinde; 25 periyotta 1,65 mm dalma derinliğinde; 30 periyotta 1,81 mm dalma derinliğinde elde edilmiştir.

7.7. Kaynak Değişkenlerinin Bağlantıların Sertlik Değerlerine Etkisi

Elektrik nokta kaynağı yapılmış TWIP-DP bağlantılarda şekil 7.47'de gösterildiği biçimde TWIP çeliğinin kaynaktan etkilenmemiş ana metal bölgesinden başlayarak ITAB bölgesinden ve kaynak çekirdeğinin tam ortasından geçecek şekilde çapraz doğrultuda DP çeliğinin kaynaktan etkilenmemiş bölgesine kadar sertlik değerleri alınmıştır. Mikrovickers sertlik değerleri 0,5 mm aralıklarla alınmış ve değerler 100 gram yük ve 10 sn batma süresi uygulanarak ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri EN ISO 14271 standardına göre yapılmıştır [76, 81].



Şekil 7.47 : Kaynaklı numunelerin sertlik ölçüm doğrultuları.

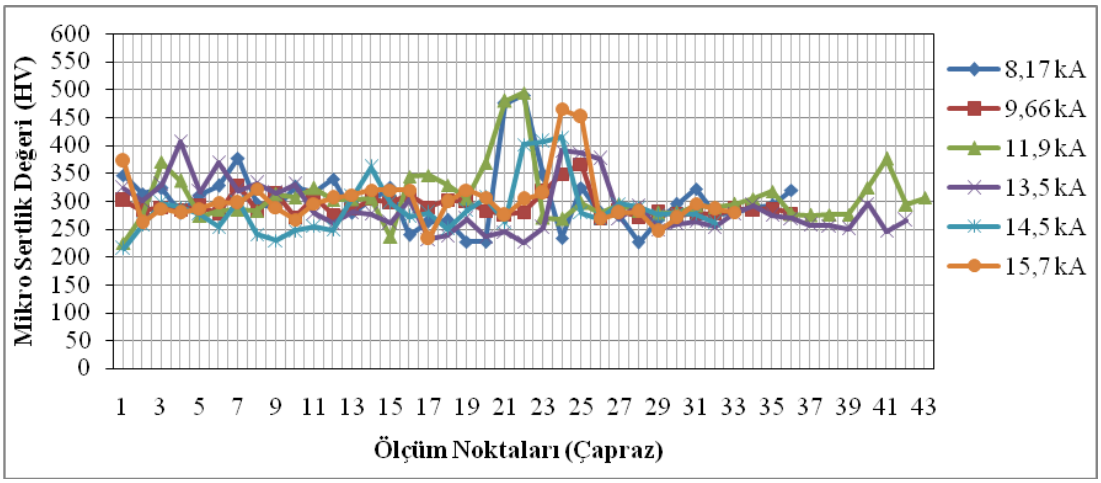
7.7.1. TWIP-DP çelik sac çiflerinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak değişkenlerinin sertlik değerlerine etkisi

TWIP-DP bağlantılara ait sertlik grafikleri incelendiğinde; bağlantının aşağıda belirtildiği gibi beş farklı bölgeden oluştuğu görülmektedir:

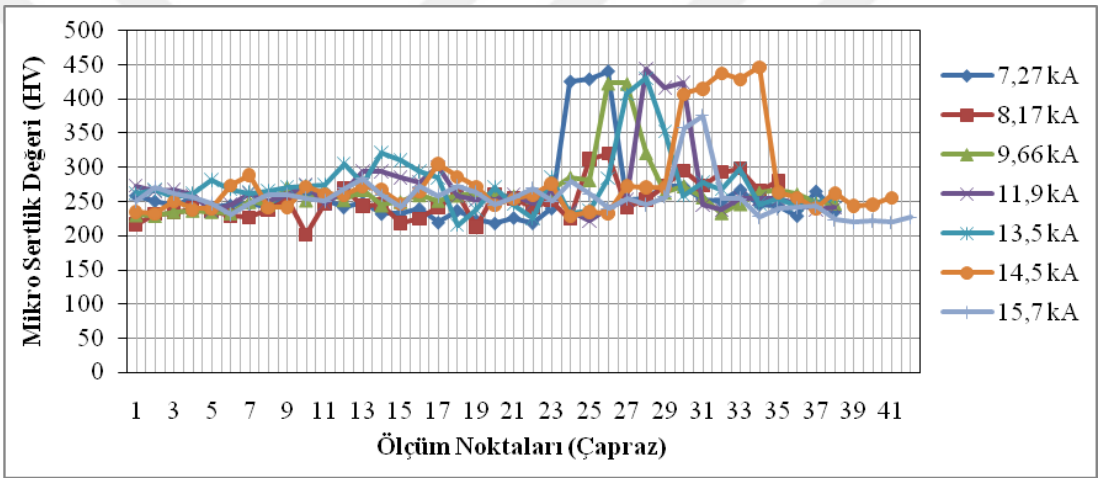
- TWIP çeliğinin ısıdan etkilenmeyen esas metal bölgesi
- TWIP bölgesi ITAB
- Kaynak çekirdeği
- DP bölgesi ITAB
- DP çeliğinin ısıdan etkilenmeyen esas metal bölgesi

Kaynaklı birleştirmelerin ilk bölgesinden (TWIP çeliği) alınan sertlik değeri ortalama 310 HV, son bölgesinden alınan (DP çeliği) sertlik değeri ortalama 250 HV iken iki taraftan da kaynak çekirdeğine gidildikçe sertlik değerleri artmıştır. Ortalama olarak ITAB-çekirdek bölgesi arasında sertlik değeri 450 HV'e ulaşmıştır. Sertlik değeri yaklaşık iki kat artmıştır. Bunun nedeni kaynak bölgesinin çok kısa bir zaman içerisinde ısınıp soğumasına bağlı olarak oluşan martenzit yapıdır.

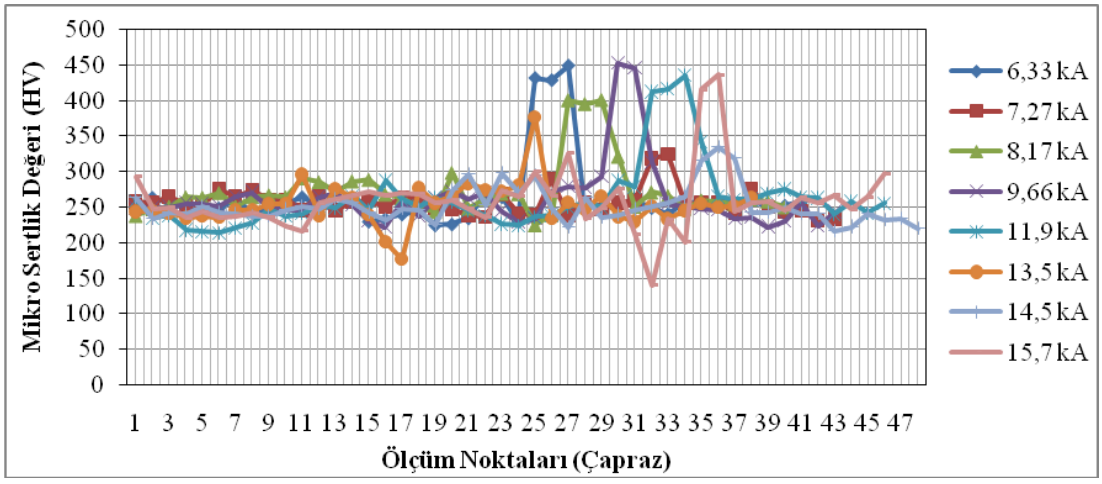
Şekil 7.48, Şekil 7.49, Şekil 7.50, Şekil 7.51, Şekil 7.52 ve Şekil 7.53'de kaynak sürelerinin farklı kaynak akım şiddetlerinde kaynaklı birleştirmelerin sertliğine etkisi görülmektedir.



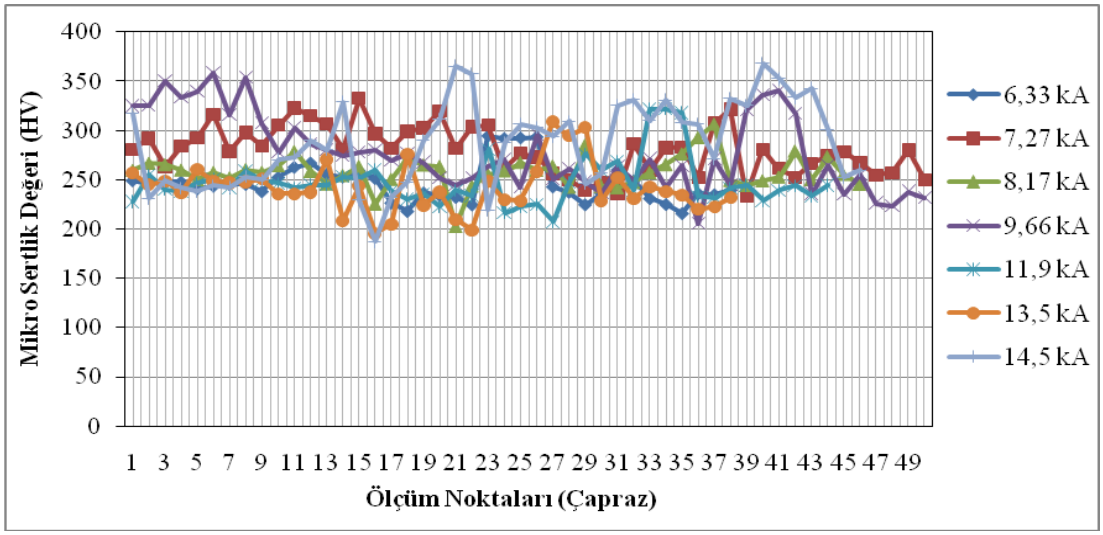
Şekil 7.48 : TWIP-DP bağlantıların 5 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.



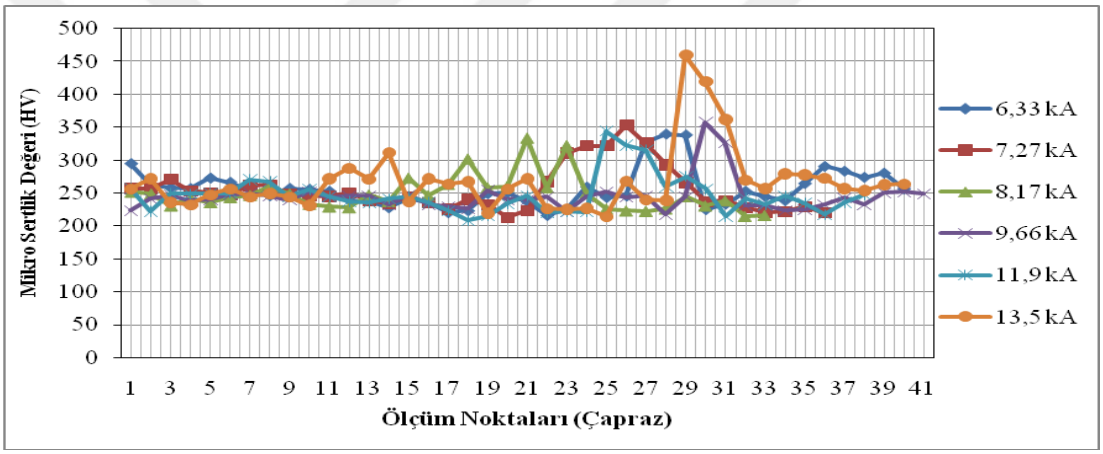
Şekil 7.49 : TWIP-DP bağlantıların 10 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.



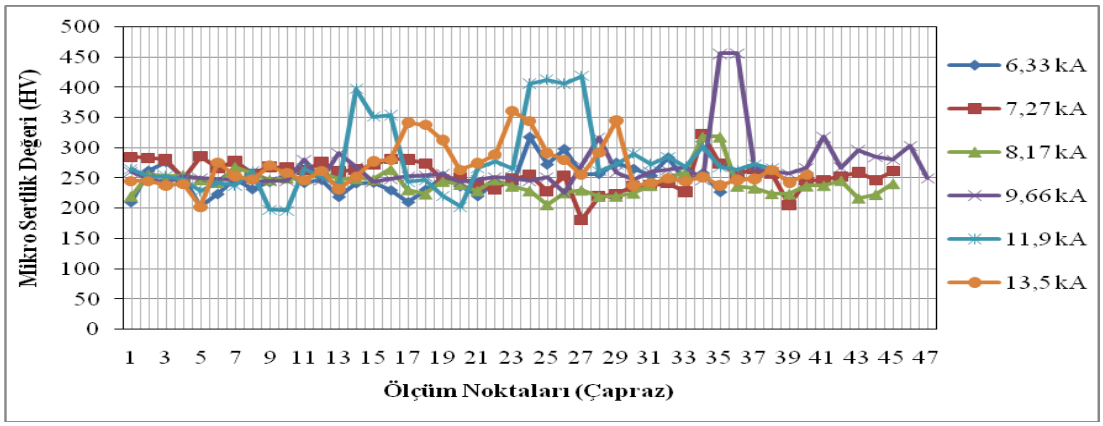
Şekil 7.50 : TWIP-DP bağlantıların 15 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.



Şekil 7.51 : TWIP-DP bağlantıların 20 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.

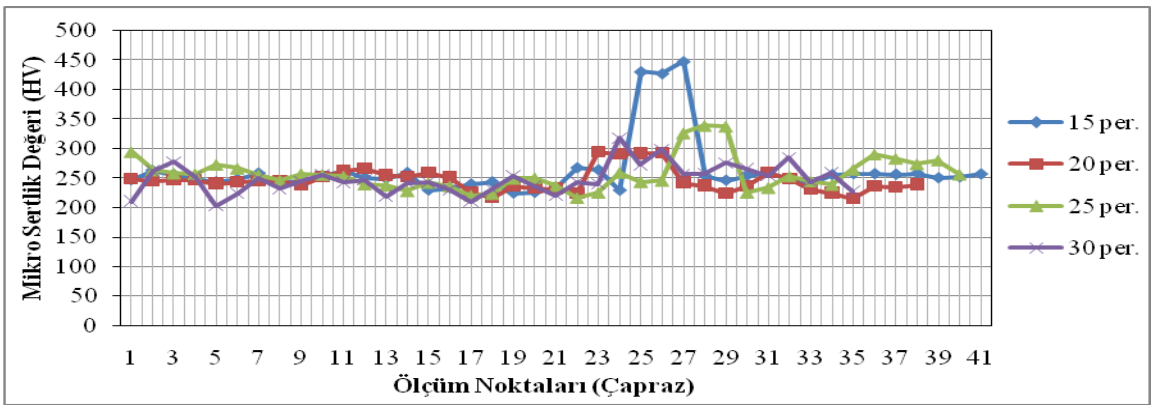


Şekil 7.52 : TWIP-DP bağlantıların 25 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.

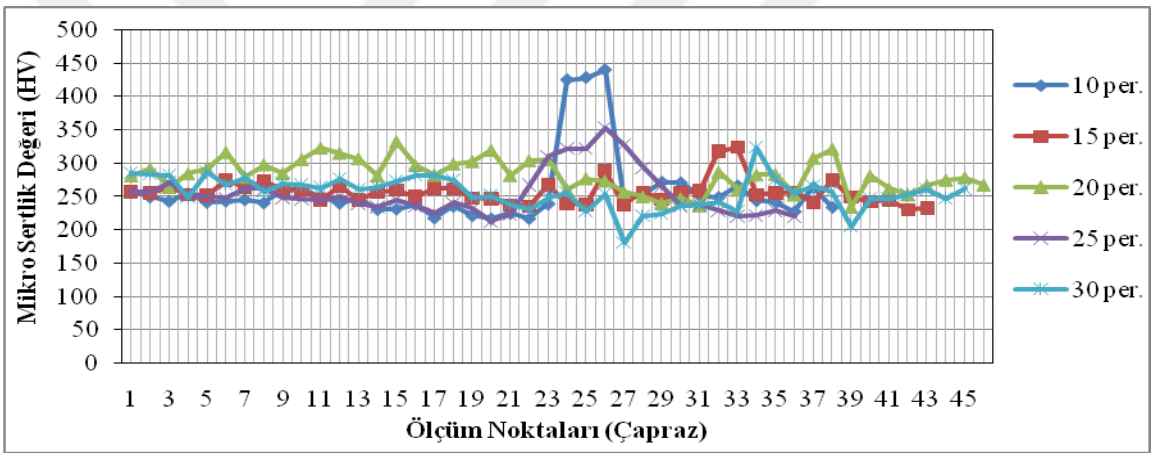


Şekil 7.53 : TWIP-DP bağlantıların 30 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.

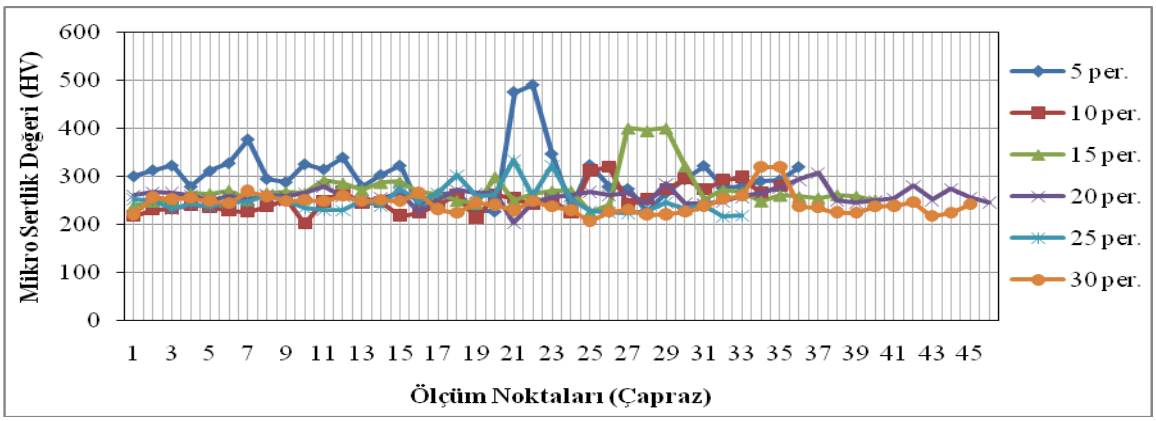
7.7.2. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetlerinin sertlik değerlerine etkisi



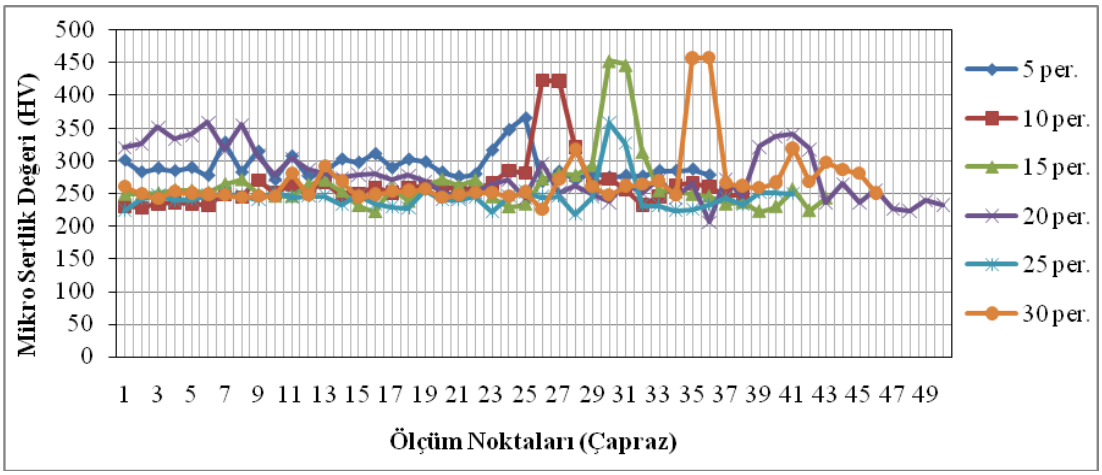
Şekil 7.54 : 6330 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi.



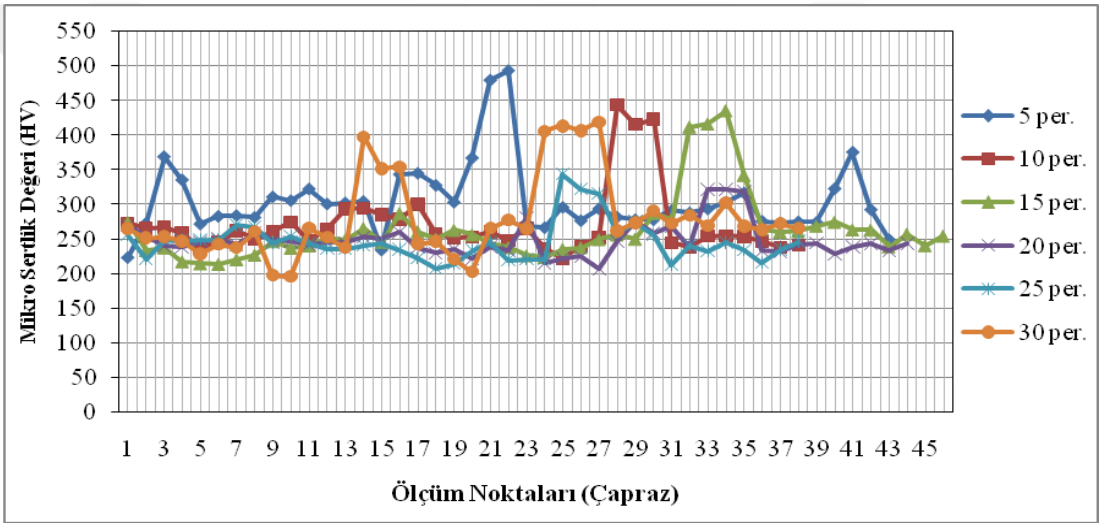
Şekil 7.55 : 7270 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi.



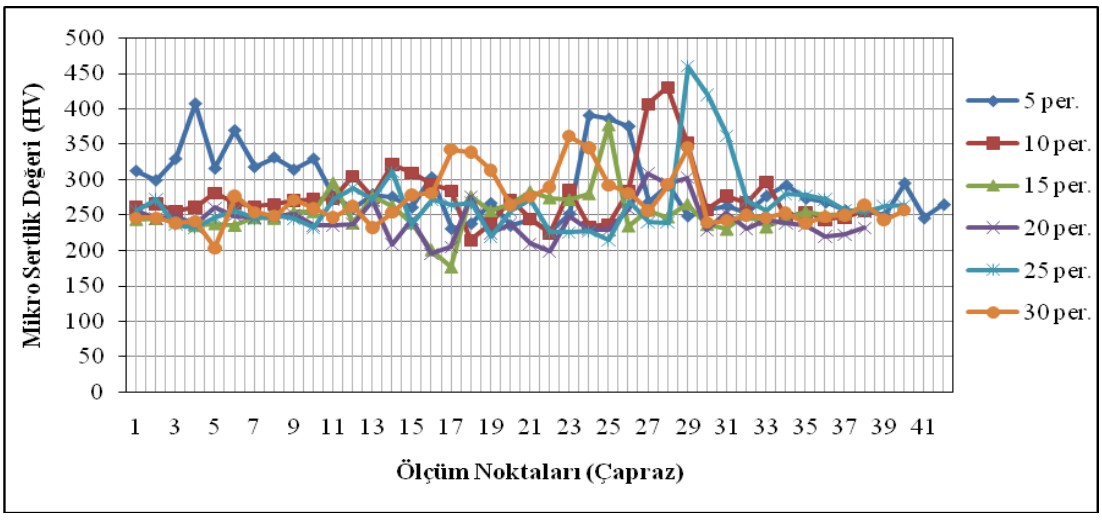
Şekil 7.56 : 8170 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi.



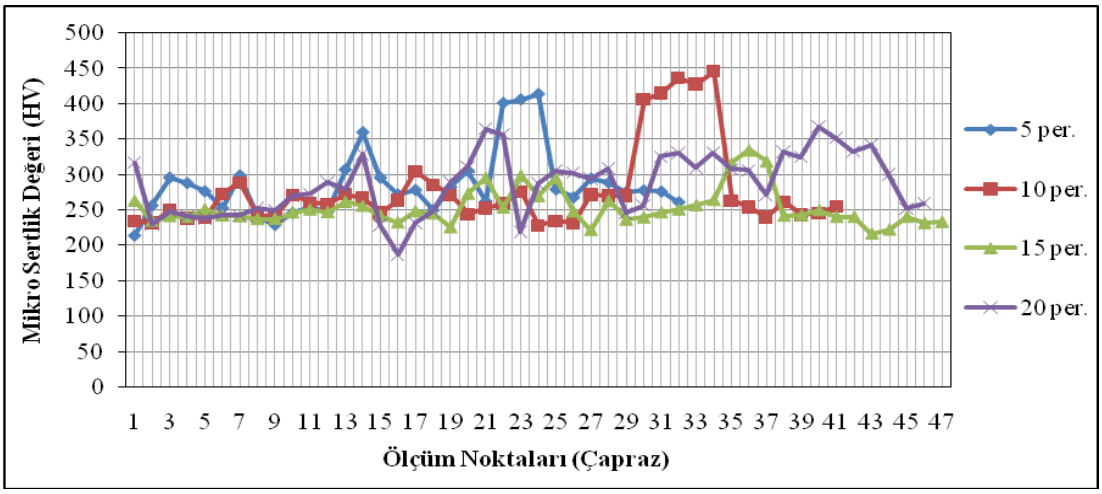
Şekil 7.57 : 9660 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi.



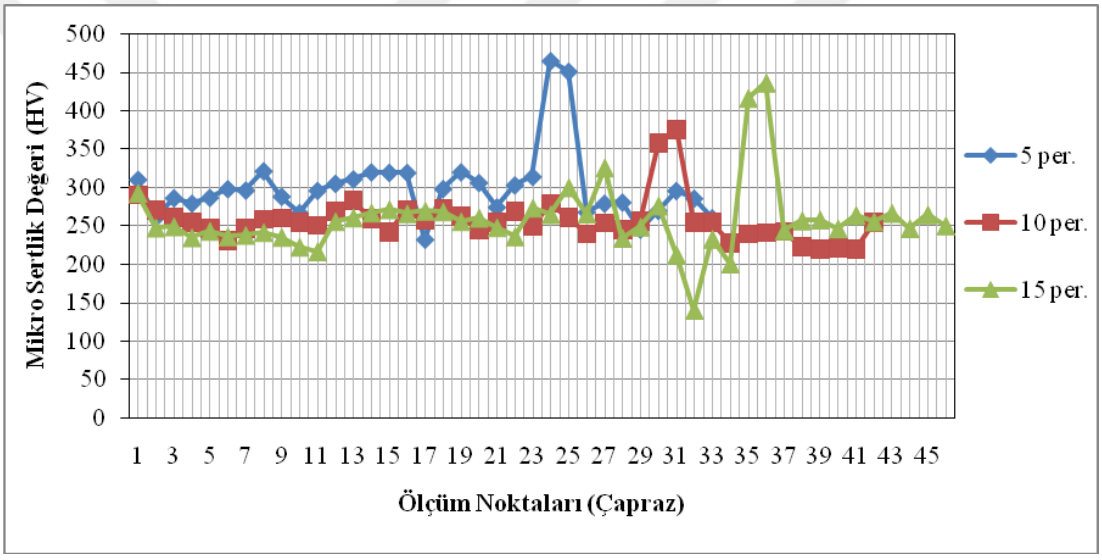
Şekil 7.58 : 11900 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi.



Şekil 7.59 : 13500 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi.



Şekil 7.60 : 14500 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi.



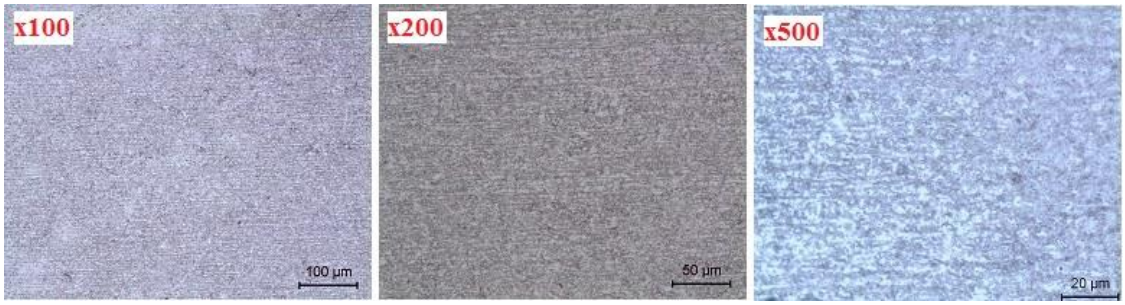
Şekil 7.61 : 15700 A kaynak akım şiddetinde kaynak zamanının sertliğe etkisi.

7.8. TWIP-DP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynaklı Birleştirmelerin Mikroyapısına Etkisi

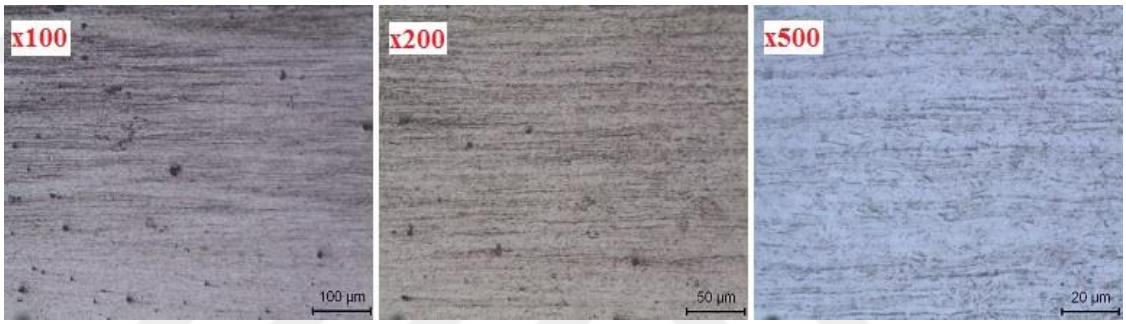
7.8.1. TWIP-DP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak değişkenlerinin bağlantıların mikroyapısına etkisi

TWIP-DP kaynaklı bağlantılarda esas metale ait x100, x200 ve x500 büyütmelerde çekilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.62 ve Şekil 7.63'de gösterilmiştir. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin değiştirilmesiyle elde edilen TWIP-DP bağlantıların esas metal, ITAB ve çekirdek bölgelerine ait x200 ve x500 büyütmelerde çekilen mikro

yapı fotoğraflarının bazıları Tablo 7.2.'de gösterilmiştir. x100, x200 ve x500 büyütmelerde çekilen mikroyapı fotoğrafları bu çalışmanın ekinde verilmiştir.



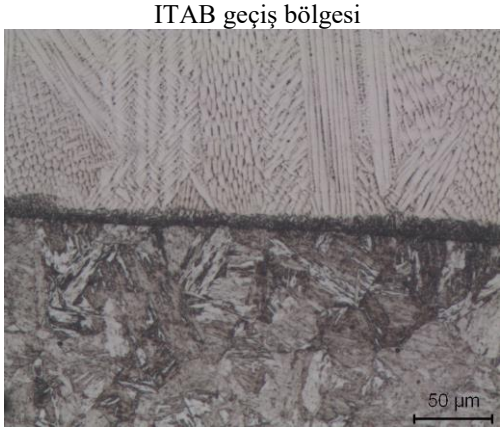
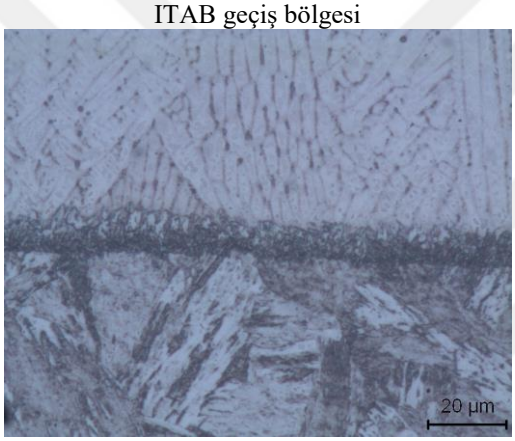
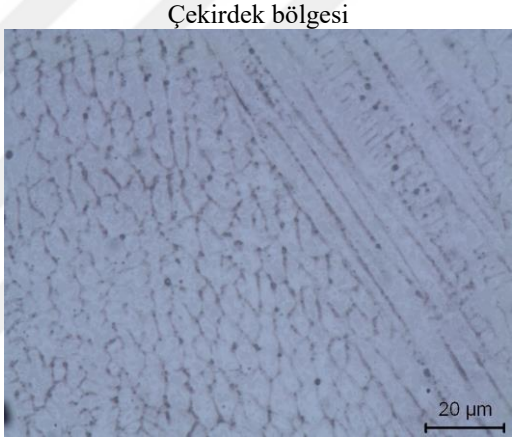
Şekil 7.62 : TWIP-DP bağlantılarda DP ana malzemeye ait mikroyapı (x100, x200 ve x500 büyütme).



Şekil 7.63 : TWIP-DP bağlantılarda TWIP ana malzemeye ait mikroyapı (x100, x200 ve x500 büyütme).

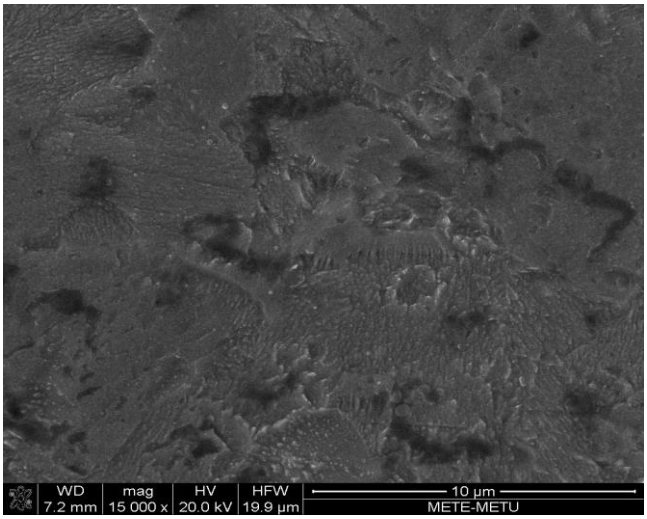
TWIP-DP bağlantılara ait mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde DP çeliğinin yapı olarak ferrit (açık renk alanlar) ve tane sınırlarında çökelmiş az bir miktar martenzit (koyu renk alanlar) tanelerinden oluştuğu görülmektedir [89]. TWIP çeliğinin ise östenit fazından oluştuğu bilinmektedir [90].

Tablo 7.2 : TWIP-DP bağlantılara ait bazı mikroyapı görüntüleri.

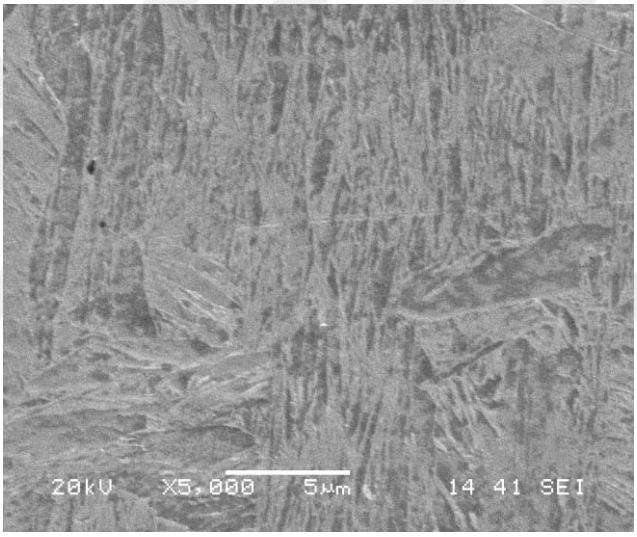
x200 büyütme ITAB geçiş bölgesi	x200 büyütme Çekirdek bölgesi
	
x500 büyütme ITAB geçiş bölgesi	x500 büyütme Çekirdek bölgesi
	

7.9. TWIP-DP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında SEM Görüntüleri

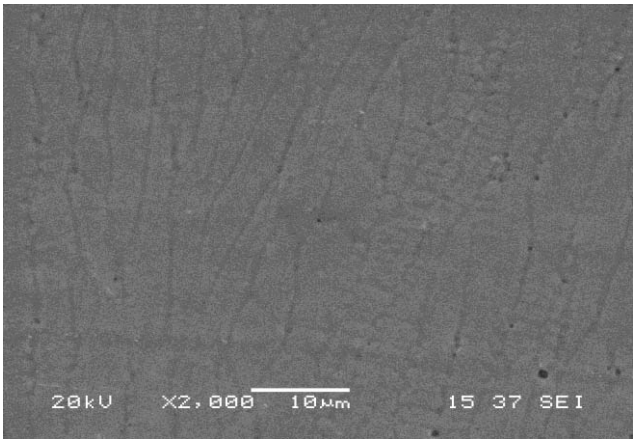
TWIP-DP bağlantıların esas metal, ITAB ve kaynak çekirdeğine ait SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 7.64, Şekil 7.65, Şekil 7.66 ve Şekil 7.67'de gösterilmiştir.



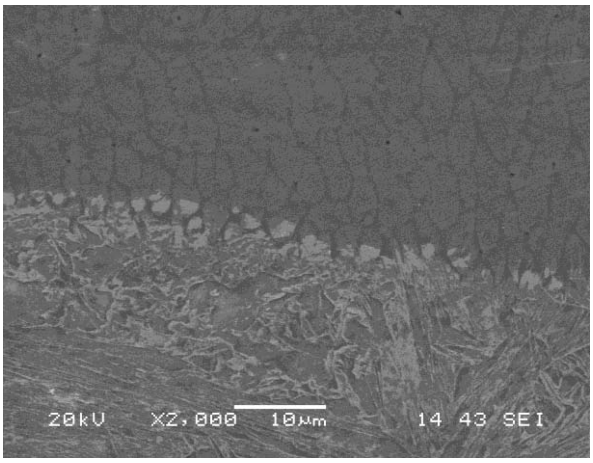
Şekil 7.64 : TWIP-DP bağlantılarda TWIP esas metale ait SEM görüntüsü (x15000 büyütme).



Şekil 7.65 : TWIP-DP bağlantılarda ITAB'ye ait SEM görüntüsü (x5000 büyütme).

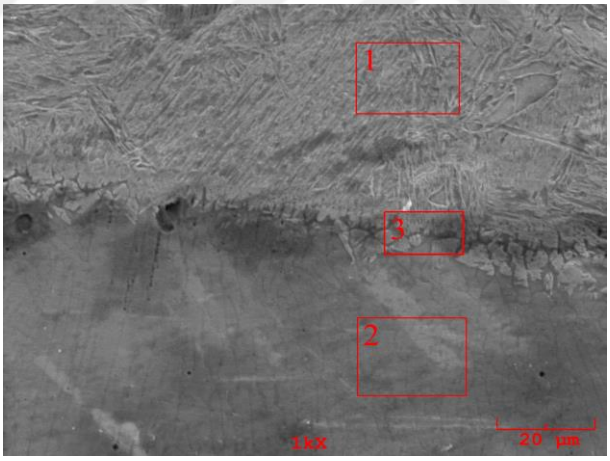


Şekil 7.66 : TWIP-DP bağlantılarda kaynak çekirdeğine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme).



Şekil 7.67 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeye ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme).

Şekil 7.68 ve Tablo 7.3'de çekirdek ve ITAB bölgeleri arasındaki ara bölgenin SEM görüntüsü üzerinde işaretlenen (1), (2) ve (3) noktalarındaki element miktarının belirlenmesi amacıyla EDS analizi yapılmıştır.

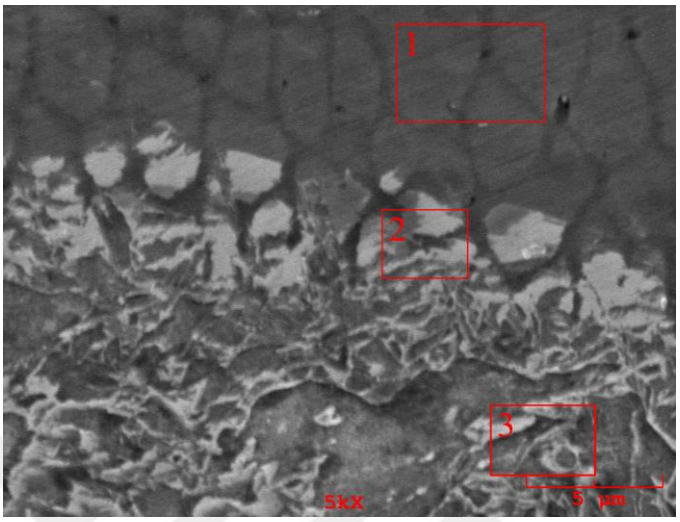


Şekil 7.68 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeye ait EDS görüntüsü.

Tablo 7.3 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeye ait EDS kimyasal içeriği.

Alınan Nokta	Element (Ağırlıkça %)			
	C	Mn	Al	Fe
1	0,047	1,464	0	98,489
2	0,291	11,833	1,817	86,058
3	1,492	8,698	1,228	88,583

Şekil 7.69 ve Tablo 7.4'de çekirdek ve ITAB bölgeleri arasındaki ara bölgenin SEM görüntüsü üzerinde işaretlenen (1), (2) ve (3) noktalarındaki element miktarının belirlenmesi amacıyla EDS analizi yapılmıştır.

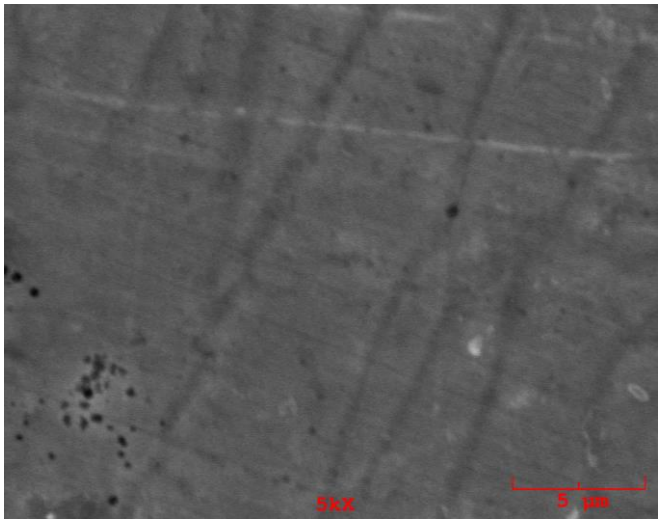


Şekil 7.69 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeden alınan EDS görüntüsü.

Tablo 7.4 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek-ITAB ara bölgeye ait EDS kimyasal içeriği.

Alınan Nokta	Element (Ağırlıkça %)			
	C	Mn	Al	Fe
1	2,079	10,756	1,677	85,488
2	0,443	7,911	1,602	90,044
3	0	1,971	0	98,029

Şekil 7.70 ve Tablo 7.5'de çekirdek bölgesindeki element miktarının belirlenmesi amacıyla EDS analizi yapılmıştır.



Şekil 7.70 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek bölgesine ait EDS görüntüsü.

Tablo 7.5 : TWIP-DP bağlantılarda çekirdek bölgesine ait EDS kimyasal içeriği.

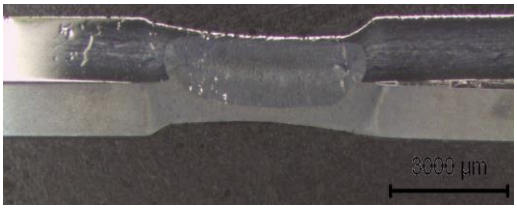
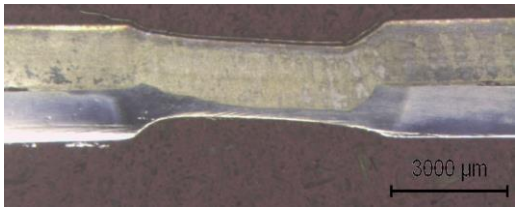
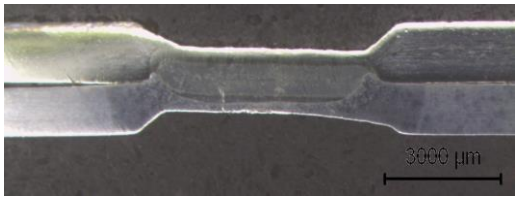
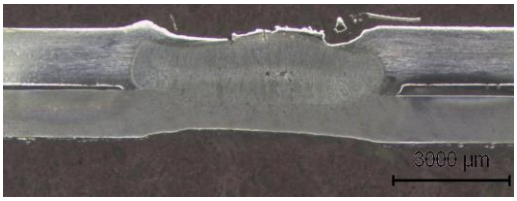
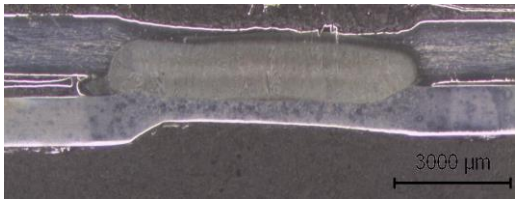
Element	C	Mn	Al	Fe
(Ağırlıkça %)	0,967	10,635	1,752	86,646

7.10. TWIP-DP Bağlantıların Makroyapı İncelemesi

7.10.1. TWIP-DP bağlantıların makroyapı fotoğrafları

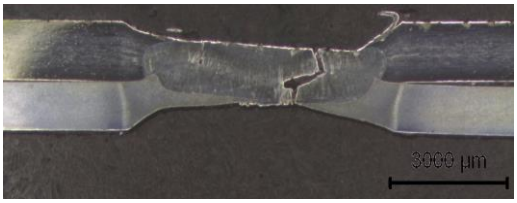
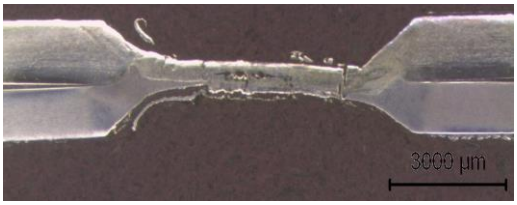
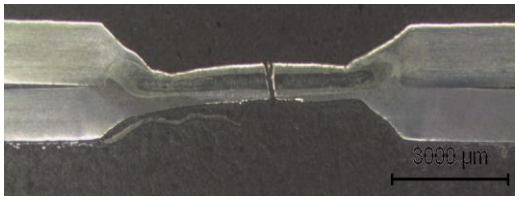
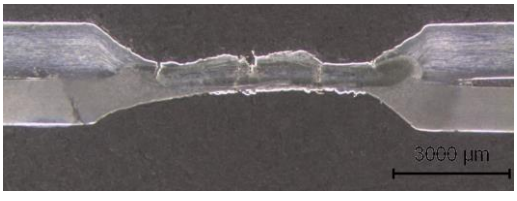
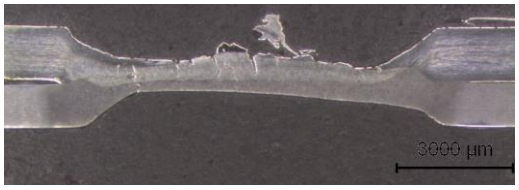
TWIP-DP sac çiftlerine ait makroyapı fotoğrafları incelendiğinde kaynak çekirdeğinin 5 periyot kaynak süresinde olduğu saptanmıştır. Akım şiddetinin büyümesiyle 10, 15, 20, 25 ve 30 periyotta çekirdek boyutlarının da büyüdüğü görülmektedir. 5 periyotta 13,5 kA'den sonra, 10 periyotta 11,9 kA'den sonra, 15 periyotta 8,17 kA'den sonra, 20 periyotta 9,66 kA'den sonra, 25 periyotta 9,66 kA'den sonra, 30 periyotta 9,66 kA'den sonra aşırı dalma derinliği ve fışkırmadan dolayı istenmeyen kaynak çekirdekleri oluşmuştur.

Tablo 7.6 : TWIP-DP bağlantılarda bazı makroyapılar.

5 per –11,9 kA	10 per –9,66 kA
	
15 per –8,17 kA	20 per –9,66 kA
	
25 per –6,33kA	30 per –8,17 kA
	

TWIP-DP sac bağlantılara ait aşırı dalma derinliği ve fışkırmanın oluştuğu makroyapı fotoğrafları Tablo 7.7'de gösterilmiştir.

Tablo 7.7 : TWIP-DP bağlantılarda bazı aşırı dalma derinliği ve fışkırma makroyapıları.

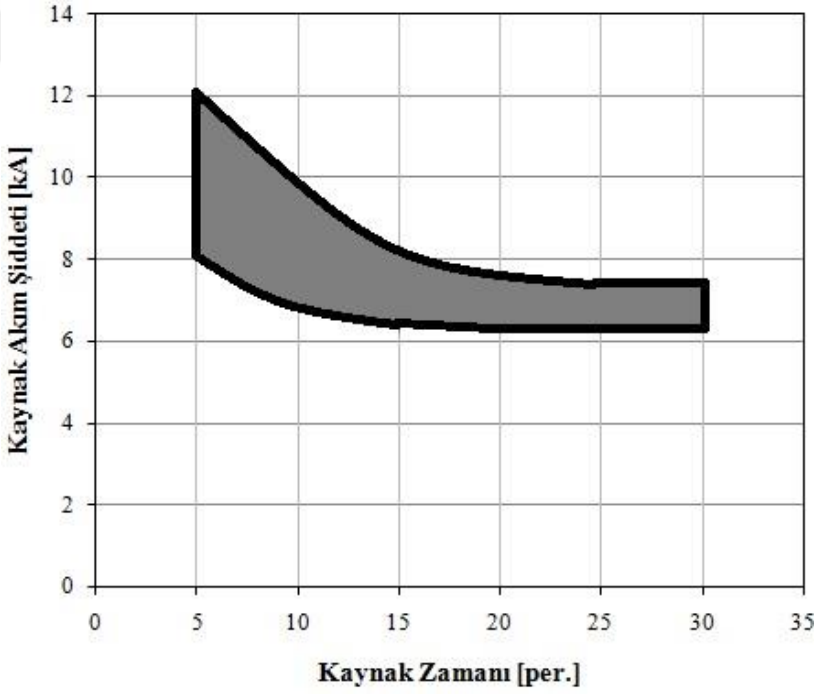
5 per –14,5 kA	10 per –15,7 kA
	
15 per –14,5 kA	20 per –13,5 kA
	
25 per –13,5 kA	30 per – 11,9kA
	

7.11. Bağlantıların Kaynak Eğrisi (Weld Lobe)

Elektrik direnç nokta kaynak uygulanmış bağlantıların kalitesini tanımlamada kullanılan en önemli özelliklerden biri çekirdek boyutlarıdır. Çekirdek boyutlarını etkileyen başlıca parametreler ise kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanıdır. Diğer değişkenler sabit tutulmak kaydıyla kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının değiştirilmesiyle elde edilen kabul edilebilir bağlantıların oluştuğu alan kaynak eğrisi grafiklerinde gösterilmiştir.

7.11.1. Elektrik direnç nokta kaynağında TWIP-DP sac çiftlerine ait kaynak eğrisi (Weld Lobe)

TWIP-DP çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında kabul edilebilir bağlantıların elde edildiği kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanını gösteren kaynak eğrileri (weld lobe) Şekil 7.71'de gösterilmiştir.



Şekil 7.71 : TWIP-DP bağlantılara ait kaynak eğrisi (weld lobe).

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçların İrdelenmesi ve Öneriler

Bu doktora tez çalışmasında, otomotiv endüstrisinde şasi ve kaportada kullanılan TWIP 950 ve DP 800 yüksek mukavemetli saclar elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilerek elektrik direnç nokta kaynaklı numune serileri elde edilmiştir. Yapılan kaynaklı birleştirmelerde elektrot baskı kuvveti, sıkıştırma zamanı ve tutma zamanı sabit tutulmuş kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti değiştirilmiştir. Ön deneyler kaynak prosesinin gerçekleştiği en küçük değerden malzemelerin delindiği en büyük değere kadar kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti değiştirilerek kaynak işlemi yapılmıştır. Ön deneylerin değerlendirilmesinden sonra 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 periyot kaynak zamanları için 6330, 7270, 8170, 9660, 11900, 13500, 14500 ve 15700A olmak üzere 8 farklı akım şiddetinde kaynaklı numuneler elde edilmiştir. Her parametrede üç adet kaynaklı numune yapılmıştır. Farklı kaynak akım şiddeti ve farklı kaynak zamanlarında elde edilen bu kaynaklı deney numunelerinin, çekme-makaslama deneyi, çekme-sıyırma deneyi, çapraz çekme deneyi, vickers sertlik deneyi, taramalı elektron mikroskobu, EDS element analizi, mikroyapı incelemesi ve makroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- TWIP-DP çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında maksimum çekme-makaslama dayanımı 20 periyot kaynak zamanı ve 9,66 kA kaynak akım şiddetinde elde edilmiştir.

- Maksimum çekme-sıyırma dayanımı 20 periyot kaynak zamanı ve 8,17 kA kaynak akım şiddetinde ulaşıldığı görülür. Elde edilen bu değer maksimum çekme-makaslama dayanımının yaklaşık olarak %15'i kadardır.

- Maksimum çapraz çekme dayanımına 25 periyot kaynak zamanı ve 9,66 kA kaynak akım şiddetinde ulaşıldığı görülür.

- Maksimum çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme dayanımlarına sırasıyla 8 mm, 7,4 mm ve 8,5 mm kaynak çekirdek çaplarında, 0,91 mm, 1,11 mm, 0,73 mm kaynak çekirdek yüksekliklerinde ve 0,11, 0,14, 0,08 kaynak çekirdek boyut oranlarında bulunmuştur.

- Kaynak yüzey kalitesinin önemli olduğu yerlerde uygun kaynaklı bağlantılar için 5 periyot kaynak zamanında 11,9 kA'den, 10 periyot kaynak zamanında 9,66 kA'den, 15 periyot kaynak zamanında 11,9 kA'den, 20 periyot kaynak zamanında 9,66 kA'den, 25 ve 30 periyot kaynak zamanlarında 8,17 kA'den; sonraki birleştirmeler tercih edilmelidir. bu kaynak akım şiddeti ve kaynak akım şiddeti üzerindeki değerlerde yapılan elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerde elektrot yapışmaları, yüzey kirlilikleri ve fışkırmalar meydana gelmektedir.

- Düşük kaynak akım şiddetleri ve düşük kaynak zamanlarında uygulanan elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerde düşük ısı girdisi ile beraber çekirdek çapı ve ve çekirdek yüksekliği küçük boyutta olduğundan dolayı çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme dayanımları da buna bağlı olarak düşüktür. Yapılan deneyler sonucunda meydana gelen kopma tipleri de bu sebep itibariyle ayrılma tipinde olmuştur.

- Yüksek akım şiddetleri ve yüksek kaynak kaynak zamanlarında uygulanan elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerde yüksek ısı girdisi ile beraber iki malzemenin ara kesitindeki erime miktarı artmakta çekirdek çapı büyümekte, elektrot dalma derinliği artmakta buna bağlı olarak çekirdek yüksekliği azalmakta ve çekirdek boyut oranı küçülmektedir. Çekirdek boyut oranının küçülmesi ile beraber uygulanan elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz çekme dayanımları da yükselmiştir. Yapılan deneyler sonucunda meydana gelen kopma tipleri de bu sebep itibariyle düğmelenme ve yırtılma tipinde olmuştur. Ayrıca kaynak

çekirdeğinden fışkırmalar ortaya çımaya başlamış, elektrot yapışmaları, derin elektrot izleri, yüzey kirlilikleri oluşmaktadır.

- Elektrik direnç nokta kaynak bağlantılı numunelerden alınan sertlik değerlerinde ITAB bölgesinin biraz dışında ana metalin sertliğinde biraz düşüş yaşanmış, kaynak çekirdeğine doğru gidildikçe sertlik değerlerinde bir artış olmaktadır. Kaynak çekirdeğinin sertliği DP çeliğinin sertliğinin yaklaşık olarak 1,5 katı, TWIP çeliğinin sertliğinin yaklaşık 1,3 katı olmaktadır. Bunun nedeninin kaynak yapılan bölgenin çok kısa bir zaman içerisinde ısınıp daha sonra soğumasıyla beraber oluşan martenzit yapıdır.

- Yapılan elektrik direnç nokta kaynaklı numunelerin ITAB bölgelerinde tane büyümelerinin mevcut olduğu, bu büyümenin ise ısı girdisiyle beraber tane sınırlarının yok olarak tanelerin birbirlerini yutarak büyüdüğü oluşan bu yeni büyük tanelerin ise kaynak çekirdeğine doğru yönlenmiş olduğu gözlemlenmiştir. Kaynaklı numunelerin çekirdek bölgelerinde ise çok kısa bir zaman içerisinde ısınıp daha sonra soğuma ile oluşan birbiri içine geçmiş iğnemsi martenzit plakaların olduğu gözlemlenmiştir.

8.2. Konuyla İlgili İleride Yapılabilecek Çalışmalar

- 1,2 mm kalınlığında olan DP800 çeliğine temas eden kaynak elektrotu çapı artırılarak 1,4 mm kalınlığında olan TWIP950 çeliğine temas eden kaynak elektrot çapı aynı bırakılarak kaynak çekirdeğinin simetrikliğinin sağlanması ve ısıl dengenin arttırılması incelenebilir.

- TWIP ve DP çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı işleminde farklı kaynak zamanı ve farklı kaynak akım şiddeti uygulanan kaynaklı numunelerde yorulma dayanımlarına etkisi incelenebilir.

- TWIP ve DP çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı işleminde farklı kaynak zamanı ve farklı kaynak akım şiddeti uygulanan kaynaklı numunelerde yağmur suyu ortamında korozyon dayanımları incelenebilir.

- TWIP ve DP çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı işleminde farklı kaynak zamanı ve farklı kaynak akım şiddeti uygulanan kaynaklı numunelerde birleştirme şekilleri değiştirilerek burulma dayanımları incelenebilir.

- TWIP ve DP çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı işleminde farklı kaynak zamanı ve farklı kaynak akım şiddeti uygulanan kaynaklı numunelerde çentik darbe testi uygulanabilir.

- TWIP ve DP çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı işleminde farklı kaynak zamanı ve farklı kaynak akım şiddeti uygulanan kaynaklı numunelerde birleştirme ile birlikte aynı zamanda yapıştırma işlemi beraber kombineli olarak gerçekleştirilip mekanik özellikler incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] Beal C., Mechanical behaviour of a new automotive high manganese TWIP steel in the presence of liquid zinc, (Doktora Tezi), ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[2] https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/twinning-induced-plasticity-twip-steel/ erişim tarihi:13.06.2019

[3] Bleck, W. ve Hoffmann S. (2009, Ağustos). Characterisation of strain hardening mechanisms in austenitic high manganese steels. *Thermec 2009*, Maritim Hotel Berlin.

[4] Hofmann H., Menne M., Göklü. S. ve Richter H., (2005). Properties of austenitic high manganese steels with induced plasticity (LIP steels). *Procedings of International Conference on Steel Future for the Automotive Industry*, 73-80. Wiesbaden.

[5] Cugy P., Hildenbrand A., Bouzekri M., Cornette D., Göklü S. ve Hofmann, H. (2005). A super high strength Fe-Mn-C austenitic steel with excellent formability for automobile applications, *First International Conference Super-High Strength Steels*, Rome.

[6] Madivala M. ve Bleck W. (2019). Strain rate dependent mechanical properties of TWIP steel. *The Journal of The Minerals,* 71, 4, 1291-1302. doi: 0.1007/s11837-018-3137-0

[7] Verleene A. (2005). Comportement à la fatigue de l'acier martensitique T91 à 300 °C dans un eutectique liquide plomb-bismuth. (Doktora tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[8] Allain S., Chateau J.-P., Bouaziz O., Migot S., ve Guelton N. (2004). Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys. *Materials Science and Engineering A*, Volumes 387-389, 158-162. doi:10.1016/j.msea.2004.01.059

[9] Dumay A., Chateau J.-P., Allain S., Migot S. ve Bouaziz O. (2008). Influence of addition elements on the stacking-fault energy and mechanical properties of an austenitic Fe-Mn-C steel. *Materials Science and Engineering A*, 483-484, 184-187. doi:10.1016/j.msea.2006.12.170

[10] Hamada A.S. (2007). Manufacturing, mechanical properties and corrosion behavior of high-Mn TWIP steels. (Yüksek lisans tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[11] Allain S. (2004). Caractérisation et modélisation thermomécaniques multi-échelles des mécanismes de déformation et d'écrouissage d'aciers austénitiques à haute teneur en manganèse- Application à l'effet TWIP. (Doktora tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[12] Schumann, V. H. (1972). Martensitische Umwandlung in austenitischen Mangan-Kohlenstoff-Stählen, *Neue Hütte*, 10, 17, 605-609.

[13] Beal C., Kleber X., Fabregue D. ve Bouzekri M. (2012). Embrittlement of a zinc coated high manganese TWIP steel**.** *Materials Science and Engineering: A*. Volume 543, 76-83. doi: 10.1016/j.msea.2012.02.049

[14] Hamada A. S., Karjalainen L. P. ve Somani M. C. (2007). The influence of aluminum on hot deformation behavior and tensile properties of high-Mn TWIP steels. *Materials Science and Engineering A,* 467, 114-124. doi: 10.1016/j.msea.2007.02.074

[15] Park K.-T., Jin K. G., Han S. H., Hwang S. W., Choi K. ve Lee C. S. (2010). Stacking fault energy and plastic deformation of fully austenitic high manganese steels: Effect of Al addition. *Materials Science and Engineering A*, 527, 3651-3661. doi:10.1016/j.msea.2010.02.058

[16] Kusakin P. S. ve Kaibyshev R. O. (2016). High-Mn twinning-induced plasticity steels: Microstructure and mechanical properties, *Reviews on Advanced Materials Science*, 44, 326-360.

[17] Maggi S., Federici C. ve d'Aiuto F. (2012). TWIP steel application on the Fiat Nuova Panda body. *Presentation Fiat-Chrystler*

[18] McCallum B. (2014). Characterization of DP600 steel subject to electrohydraulic forming. (Yüksek lisans tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[19] Zhao J. ve Jiang Z. (2018). Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*, 94, 174-242. doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.01.006

[20] https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels erişim tarihi: 13.06.2019

[21] Clark D. D. (2013). Response of DP 600 products to dynamic impact loads. (Yüksek lisans tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[22] Kuziak, R., Kawalla R. ve Waengler S. (2008). Advanced high strength steels for automotive industry. *Archives Of Civil And Mechanical Engineering,* 3. doi: 10.1016/S1644-9665(12)60197-6

[23] Ferik E. (2017). TRIP800 çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında mekanik özelliklerinin incelenmesi. (Yüksek lisans tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 461727)

[24] Calcagnotto, M., Ponge, D. ve Raabe, D. (2012). On the effect of manganese on grain size stability and hardenability in ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels. *Met. Trans. A*, 43A, 37-46. doi: 10.1007/s11661-011-0828-3

[25] Geib, M. D., Matlock, D. K. ve Krauss, G. (1980). The effect of intercritical annealing temperature on the structure of niobium microalloyed dual-phase steel, *Metallurgical Transactions A*, Volume 11A, 1683-1689. (ISSN: 0360-2133/80l 1013-1683500.75/0)

[26] Jamwal, R. S. (2011). Microstructural origins of variability in the tensile ductility of dual phase steels. (Yüksek lisans tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[27] Zhang, X. Q., Chen, G. L., Zhang, Y. S. ve Bohn L. (2008). Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels. *Material and Design*, 29, 1, 279-283. doi: 10.1016/j.matdes.2006.10.025

[28] Ma, C., Chen, D. L, Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A. ve Biro, E. (2008). Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Material Science and Engineering A*, 485, 1-2, 334-346. doi: 10.1016/j.msea.2007.08.010

[29] https://newsroom.posco.com/en/posco-giga-steel-opens-door-future-auto-industry/ Son erişim tarihi: 13.06.2019

[30] Anık, S. (1991). Kaynak tekniği el kitabı. Erişim adresi: http://www.gedikegitimvakfi.org.tr/wp-content/uploads/2013/12/library_6.pdf

[31] Xing B. (2018). Monitoring and characterization of abnormal process conditions in resistance spot welding. (Doktora tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[32] Zhang, H. ve Senkara, J. (2006). Resistance welding: fundamentals and applications. (ISBN: 10:0-8493-2346-0), CRC Press Taylor & Francis Group.

[33] AWS. (2003). Welding Handbook-Welding science and technology. (ISBN: 0-87171-657-7). Miami.

[34] Akkuş, A. (2006). Galvanizli ve östenitik paslanmaz çelik sacların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma dayanımlarının araştırılması. (Doktora Tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 223743)

[35] Aslanlar, S. (1999). Galvanizli kromatlı mikro alaşımlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında uygun hasar modunun tespiti. (Doktora tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 90888)

[36] Anık, S. (1991). Kaynak tekniği el kitabı. Erişim adresi:

http://www.gedikegitimvakfi.org.tr/wp-content/uploads/2013/12/library_6.pdf

[37] Aslanlar, S. (2014). Otomotiv sektöründe kullanılan kaynak yöntemleri ders notları. Yayımlanmamış ders notu, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya.

[38] Khan, M. I. (2007). Spot welding of advanced high strength steels. (Doktora tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[39] Pouranvari, M. ve Marashi, S. P. H. (2011). Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors. *Materials Science and Engineering A*, 528, 8337-8343. doi:10.1016/j.msea.2011.08.017

[40] Hayat, F. ve Demir, B. (2009). The effect of the weld time on dept intensity factor and strength at RSW junctions of commercial DP600 sheet steel. *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu(IATS'09)*, Karabük.

[41] Karloff, A.C. (2013). Real-time expulsion detection and characterization on ultrasound M-scans of the resistance spot welding process. (Doktora tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No: 1456443)

[42] Al-Mukhtar A. M. ve Doos, Q. (2013). The spot weldability of carbon steel sheet, *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2013, 6. doi: 10.1155/2013/146896

[43] Aslanlar, S. (2006). The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. *Materials and Design*, 27, 2, 125-131. doi: 10.1016/j.matdes.2004.09.025

[44] AWS. (2003). Welding Handbook-Welding science and technology. (ISBN: 0-87171-657-7). Miami.

[45] AWS. (2005). D8.7M. Recommended practices for automotive weld quality-resistance spot welding.

[46] Pouranvari, M. ve Ranjbarnoodeh, E. (2011). Resistance spot welding characteristic of ferrite-martensite DP600 dual phase advanced high strength steel-Part II: Failure mode. *World Applied Sciences Journal,* 15, 11, 1527-1531. (ISSN: 1818-4952)

[47] Yang H. G., Zhang Y.S., Lai X. M. ve Chen G. (2008). An experimental investigation on critical specimen sizes of high strength steels DP600 in resistance spot welding. *Materials and Design*, 29, 1679-1684. doi: 10.1016/j.matdes.2008.04.009

[48] Hayat F. (2011). Comparing properties of adhesive bonding resistance spot welding and adhesive weld bonding of coated and uncoated DP 600 steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 18(9), 70-78. doi: 10.1016/S1006-706X(12)60037-5

[49] Banerjee P., Sarkar R., Pal T. K. ve Shome M. (2016). 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. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.023

[50] Liu C., Zheng X., He H., Wang W. ve Wei X. (2016). Effect of work hardening on mechanical behavior of resistance spot welding joint during tension shear test. *Materials and Design*, 100, 188-197. doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.120

[51] Zhang H., Qiu X., Xing F., Bai J. ve Chen J. (2014). Failure analysis of dissimilar thickness resistance spot welded joints in dual-phase steels during tensile shear test. *Materials and Design*, 55, 366-372. doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.040

[52] Xiaoyun Z., Guanlong C., Yansong Z. ve Xinmin L. (2009). Improvement of resistance spot weldability for dual-phase (DP600) steels using servo gun. *Journal of Materials Processing Technolog,* 209, 2671-2675. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.008

[53] Chabok A., van der Aa E. M., De Hosson J. T. M. ve Pei Y. T. (2017). Mechanical behavior and failure mechanism of resistance spot welded DP1000 dual phase steel. *Materials and Design,* 124, 171-182. doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.070

[54] Pouranvari M., Mousavizadeh S. M., Marashi S. P. H., Goodarzi M. ve Ghorbani M. (2011). Influence of fusion zone size and failure mode on mechanical performance of dissimilar resistance spot welds of AISI 1008 low carbon steel and DP600 advanced high strength steel. *Materials and Design*, 32, 1390-1398. doi: 10.1016/j.matdes.2010.09.010

[55] Ma, C., Chen, D. L, Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A. ve Biro, E. (2008). Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Material Science and Engineering A*, 485, 1-2, 334-346. doi: 10.1016/j.msea.2007.08.010

[56] Zhang H., Wei A., Qiu X. ve Chen J. (2014). Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints. *Materials and Design*, 54, 443-449. doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.027

[57] Chen J., Yuan X., Hu Z., Sun C., Zhang Y. ve Zhang Y. (2016). Microstructure and mechanical properties of resistance-spot-welded joints for A5052 aluminum alloy and DP 600 steel. *Materials Characterization,* 120, 45-52. doi: 10.1016/j.matchar.2016.08.015

[58] Wan X., Wang Y. ve Zhang P. (2014). Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2723-2729. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.009

[59] Kishore K., Kumar P. ve Mukhopadhyay G. (2019). Resistance spot weldability of galvannealed and bare DP600 steel. *Journal of Materials Processing Technology,* 271, 237-248. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.005

[60] Zhang H., Qiu X., Bai Y., Xing F., Yu H. ve Shi Y. (2014). Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels, *Materials and Design*, 63, 151-158. doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.060

[61] Yuan X., Li C., Chen J., Li X., Liang X. ve Pan X. (2017). Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 31-41. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.012

[62] Pouranvari M. (2012). 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. doi: 10.1016/j.msea.2012.03.040

[63] Marya M. ve Gayden X. Q. (2005). Development of requirements for resistance spot welding dual-phase (DP600) steels part 1 - the causes of interfacial fracture. *Welding Journal*,172-182.

[64] Saha D. C., Chang I. S. ve Park Y-D. (2014). Heat-affected zone liquation crack on resistance spot welded TWIP steels. *Materials Characterization,* 93, 40-51. doi: 10.1016/j.matchar.2014.03.016

[65] Papadimitriou I., Efthymiadis P., Kotadia H. R., Sohn I. R. ve Sridhar S. (2017). Joining TWIP to TWIP and TWIP to aluminium: A comparative study between joining processes, joint properties and mechanical performance. *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 195-207. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.09.012

[66] Colombo T. C. A., Rego R. R., Otubo J. ve de Faria A. R. (2019). Mechanical reliability of TWIP steel spot weldings. *Journal of Materials Processing Tech.*, 266, 662-674. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.11.021

[67] Lee H., Jo M. C., Sohn S. S., Kim S.-H., Song T., Kim S.-K., Kim H. S., Kim N. J. ve Lee S. (2019). Microstructural evolution of liquid metal embrittlement in resistance-spotwelded galvanized twinning-induced plasticity (TWIP) steel sheets. *Materials Characterization*, 147, 233-241. doi: 10.1016/j.matchar.2018.11.008

[68] Ashiri R., Haque M. A., Ji C.-W., Shamanian M., Salimijazi H. R. ve Park Y.-D. (2015). Supercritical area and critical nugget diameter for liquid metal embrittlement of Zn-coated twining induced plasticity steels. *Scripta Materialia*, 109, 6-10. doi: 10.1016/j.scriptamat.2015.07.006

[69] Razmpoosh M. H., Shamanian M. ve Esmailzadeh M. (2015). The microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded Fe-31Mn-3Al-3Si TWIP steel. *Materials and Design*, 67, 571-576. doi:10.1016/j.matdes.2014.10.090

[70] Zeytin H. K., Emre H. E. ve Kaçar R. (2017). Properties of resistance spot-welded TWIP steels. *Metals*, 7, 14. doi: 10.3390/met7010014

[71] Türk Standardları Enstitüsü. (2007). EN ISO 14373, Resistance welding-Procedure for spot welding of uncoated and coated low carbon steels.

[72] Türk Standardları Enstitüsü. (2001). EN ISO 14270, Specimen dimensions and procedure for mechanized peel testing resistance spot, seam and embossed projection welds.

[73] Türk Standardları Enstitüsü. (2011). EN ISO 14372, Resistance welding - Destructive testing of welds – Specimen dimensions and procedure for cross tension testing of resistance spot and embosed projection welds.

[74] Türk Standardları Enstitüsü. (2011). EN ISO 14271, Resistance-Vickers hardness testing (low-force and microhardness) of resistance spot, projection, and seam welds.

[75] Akkaş, N., Varol, F., Ferik, E., İlhan, E., Özsaraç, U., ve Aslanlar, S. (2014). Effect of welding current on mechanical properties of welding joints in S235JR(Cu) steel sheets in resistance spot welding. *Acta Physica Polonica A*, 125, 2, 500-502. doi: 10.12693/APhysPolA.130.60

[76] Sawhill, J. M.,Watanabe, H. ve Mitchell, J. W. (1977). Spot weldability of Mn-Mo-Cb,V-N, and SAE 1008 steels, *AWS Welding Research Supplement July 1977*, 217-224.

[77] Kaluç, E. (1988). Ferritik-östenitik paslanmaz çelik çiftinin nokta kaynağında kaynak parametrelerinin çekme-makaslama mukavemetine ve taneler arası korozyona etkisi. (Doktora tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 14051)

[78] Pollard, B. (1974). Spot welding characteristics of HSLA steel for automotive applications. *AWS Welding Research Supplement August 1974*, 343-350.

[79] Aslanlar, S. (1999). Galvanizli kromatlı mikro alaşımlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında uygun hasar modunun tespiti. (Doktora tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 90888)

[80] Aslanlar, S., Oğur, A., Özsaraç, U., İlhan, E. ve Demir, Z. (2007). Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding. *Materials and Design,* 28, 1, 2-7. doi: 10.1016/j.matdes.2005.06.022

[81] Akkaş, N. (2014). Raylı sistem araçlarında kullanılan atmosferik korozyona dayanıklı çelik sacların birleştirilme kabiliyetinin incelenmesi. (Doktora Tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 503876)

[82] Akkaş, N., İlhan, E., Aslanlar, S., ve Varol, F. (2014, Mayıs). Welding time effect on mechanical properties in resistance spot welding of SPA-C steel sheets used in rail vehicles. *7th Automotive Technologies Congress(Otekon 2014)*, Bursa.

[83] Han, Z. (1992). Expulsion in resistance spot welding of a high strength cold rolled sheet steel. (Doktora tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No:1456443)

[84] Han, Z., Indacochea, J. E., Chen, C. H. ve Bhat, S. (1993). Weld nugget development and integrity in resistance spot welding of high-strength cold-rolled sheet steels, *AWS Welding Research Supplement May 1993*, 209-216.

[85] Onar V., Ferik E., Acar İ., Şıkşık V., Varol F., Özsaraç U. ve Aslanlar S. (2018, Nisan). The effect of nugget sizes on tensile peel loading in resistance spot welding of DP 800 and TWIP 950 steel sheets used in automotive industry. *8rd International Advance in Applied Physics & Materials Science Congress and Exhibition(APMAS'18),* Muğla.

[86] Ghosh, P. K., Gupta, P. C., Ramavtar ve JHA, B. K. (1991). Weldability of intercritical annealed Dual-Phase steel with the resistance spot welding process. *AWS Welding Research Supplement January 1991*, 7-14.

[87] Gould, J.E. (1987). An examination of nugget development during spot welding, using both experimental and analytical techniques. *AWS Welding Research Supplement January 1987*, 1-11.

[88] Nieto, J., Guerrero-Mata, M.P., Colas, R. ve Mani, A. (2006). Experimental investigation on resistance spotwelding of galvannealed HSLA steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11, 6,717-722. doi: 10.1179/174329306X153187

[89] Varol F. (2013). MIG lehimleme yöntemi ile dual fazlı çelik sacların birleştirilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. (Doktora tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 337024)

[90] Tutar M. (2017). Kaynaklı TWIP çeliklerinde mikroyapı ve mekanik özellikler arasındaki ilişkilerin araştırılması. (Doktora tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 497182)

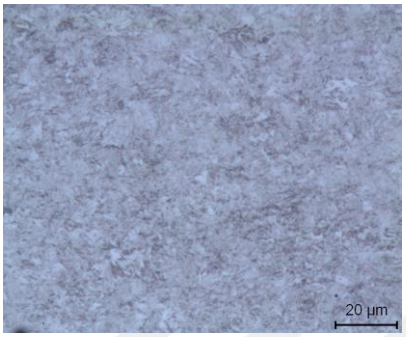
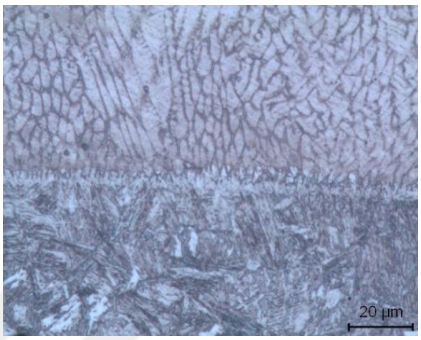
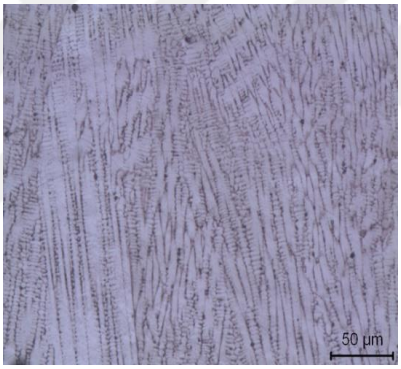
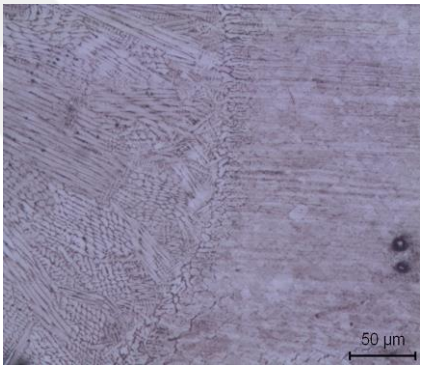
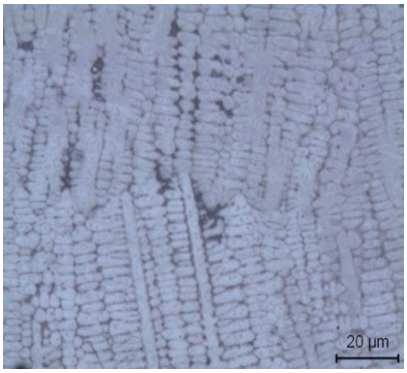
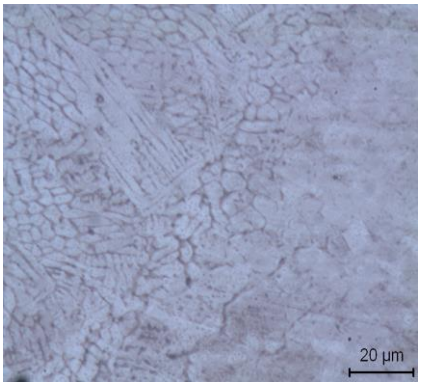
EKLER

EK A: TWIP-DP bağlantılara ait mikroyapı görüntüleri

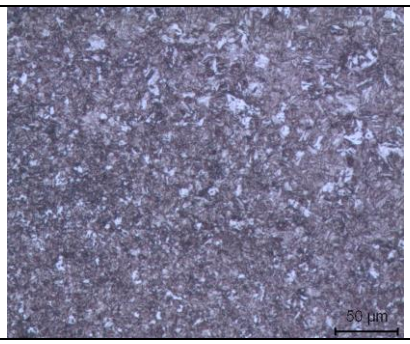
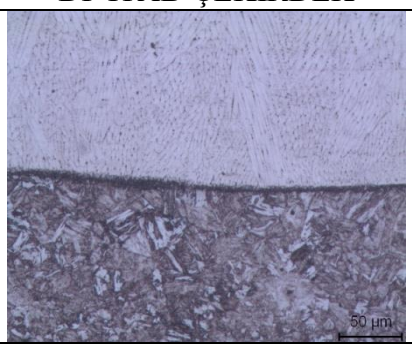
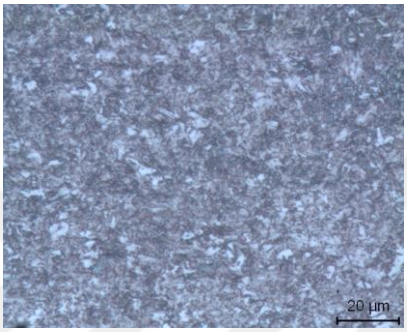
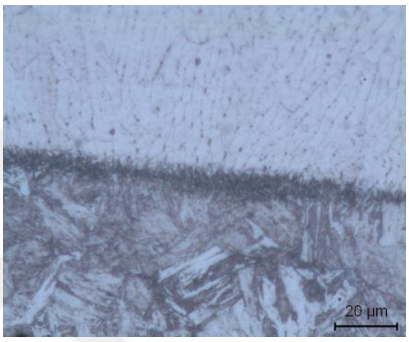
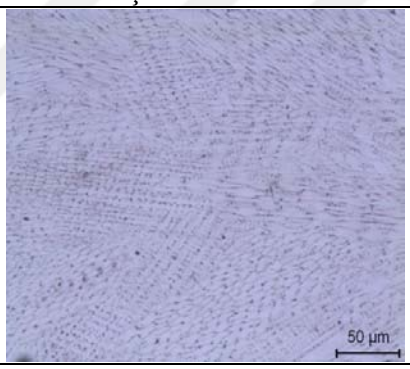
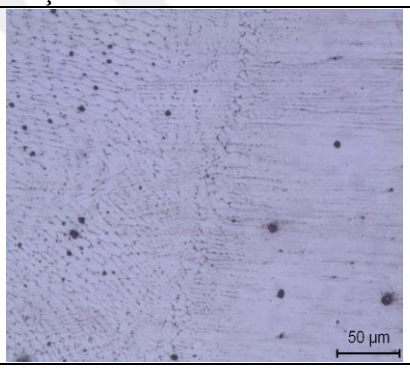
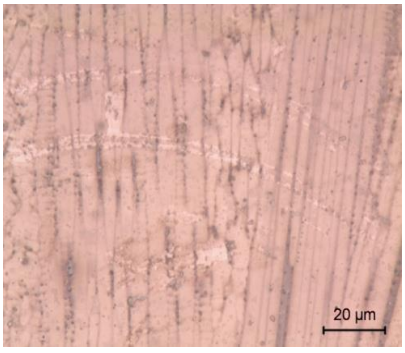
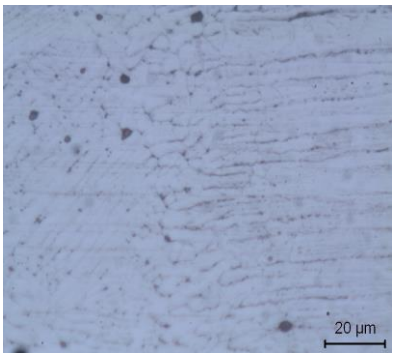
EK B: TWIP-DP bağlantılara ait makroyapı görüntüleri

EK A: TWIP-DP bağlantılara ait mikroyapı görüntüleri

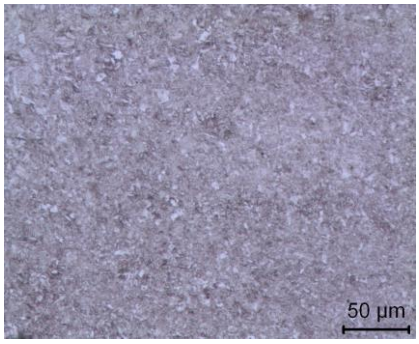
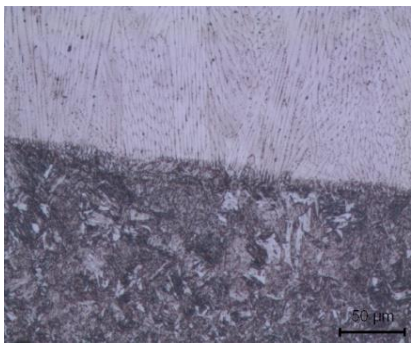
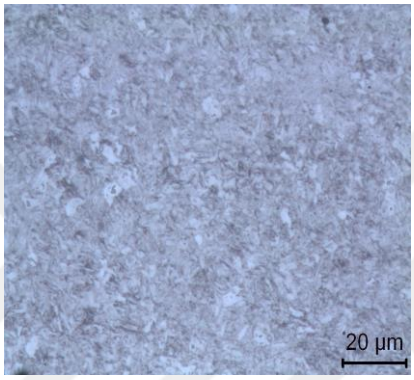
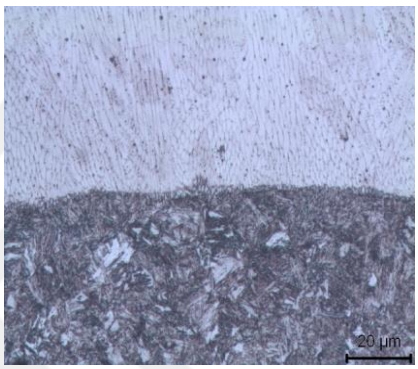
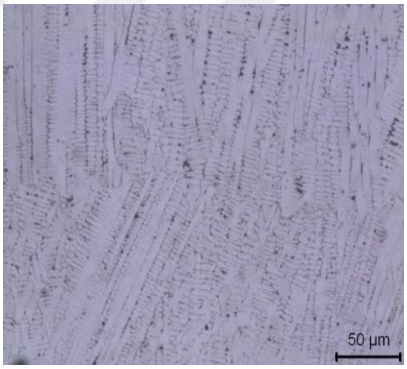
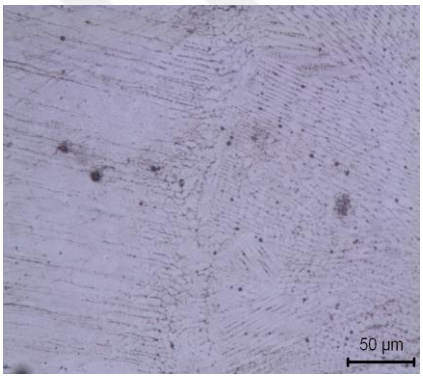
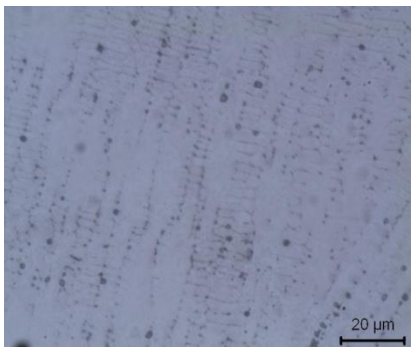
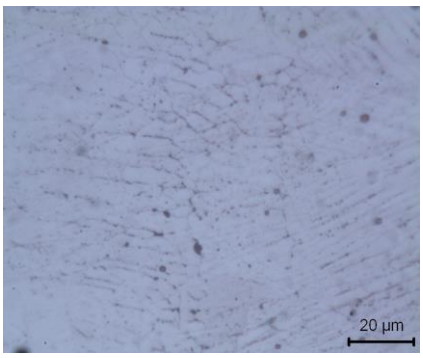
Tablo A.1: 5 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri.

5 PERİYOT 8,17 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
500x		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
200x		
500x		

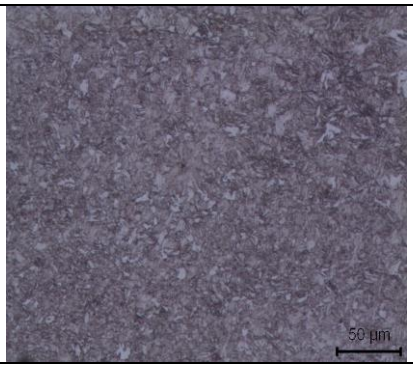
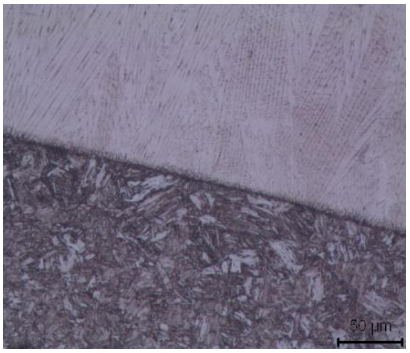
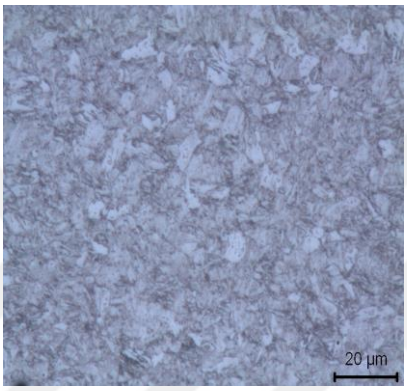
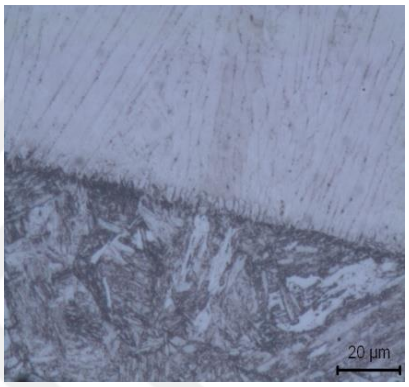
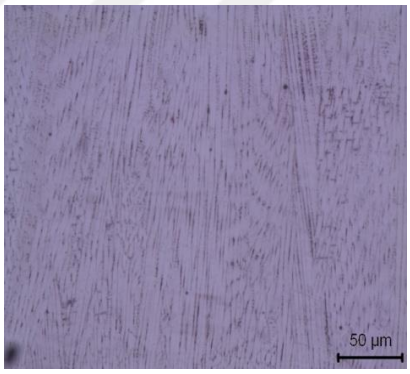
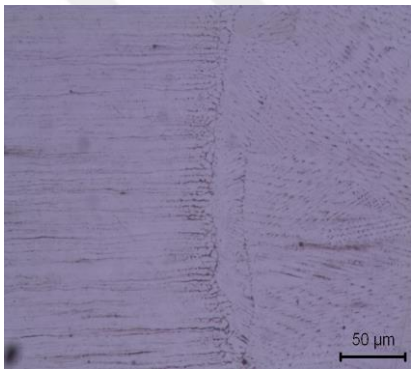
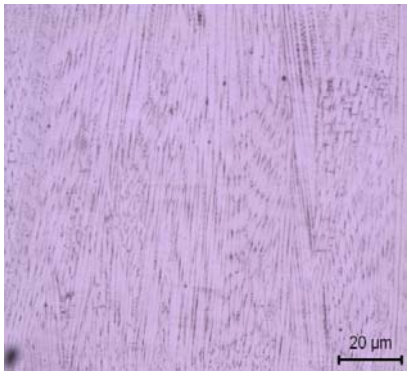
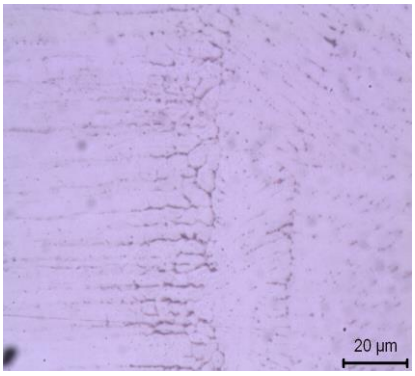
Tablo A.2: 5 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri

5 PERİYOT 9,66 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

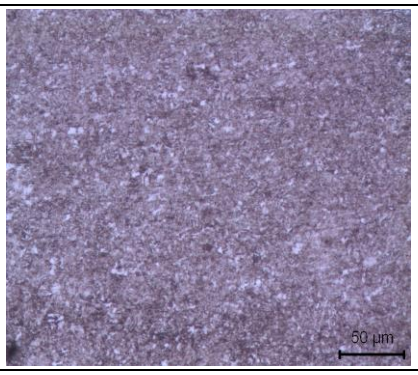
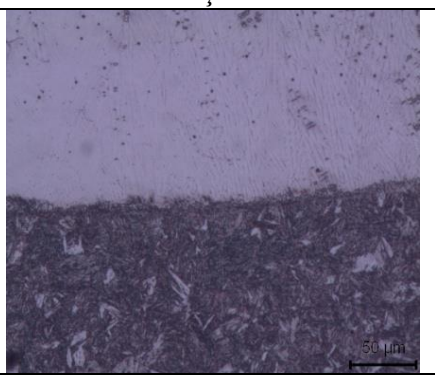
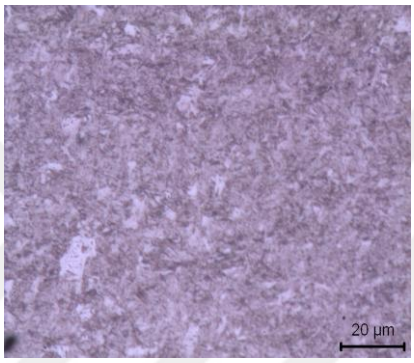
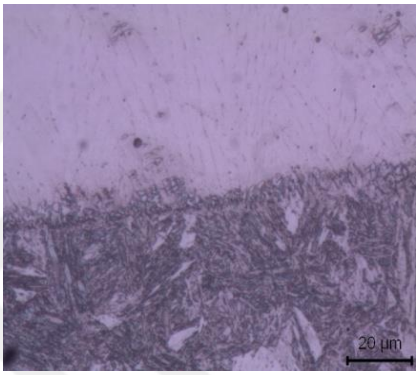
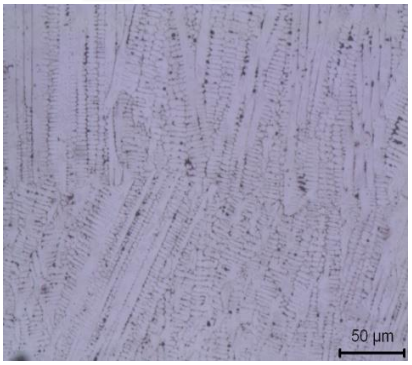
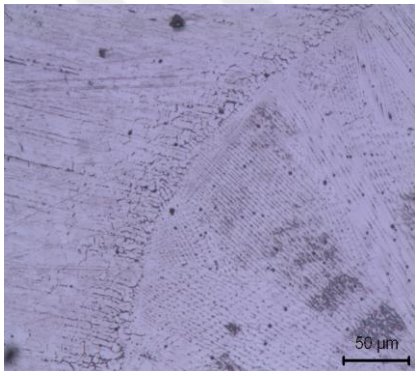
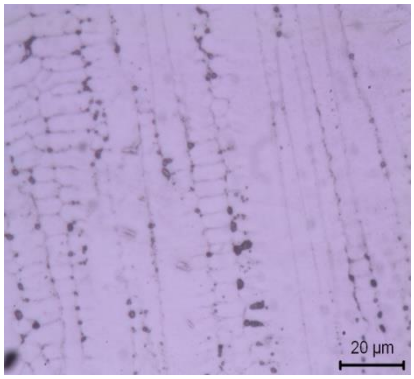
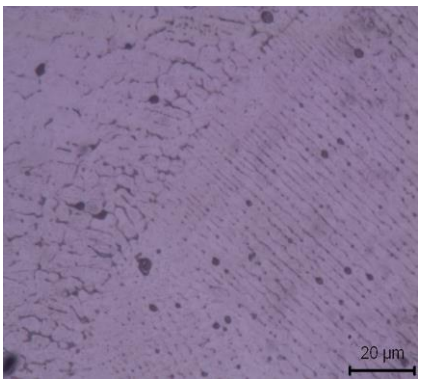
Tablo A.3: 5 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri.

5 PERİYOT 11,9 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

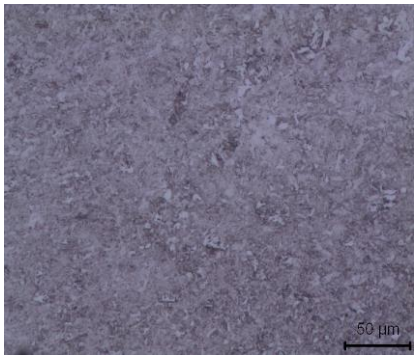
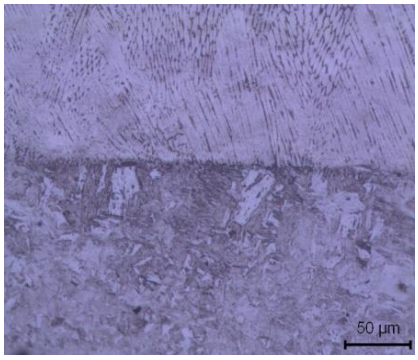
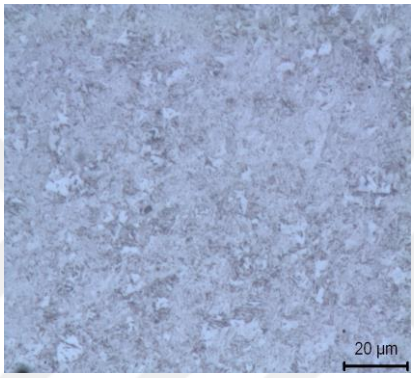
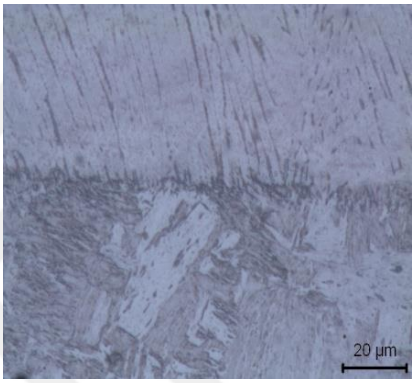
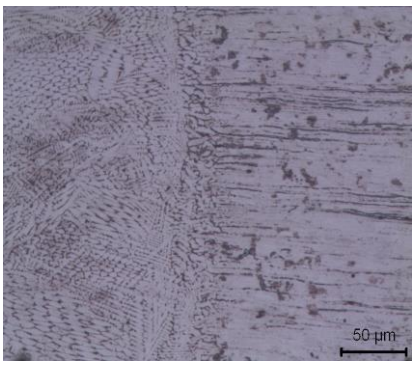
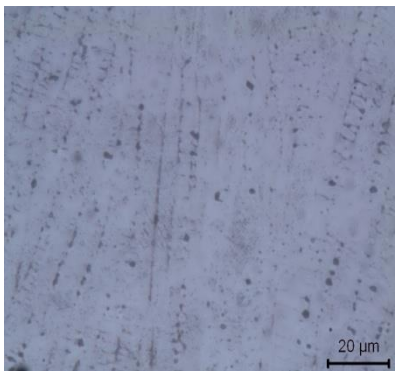
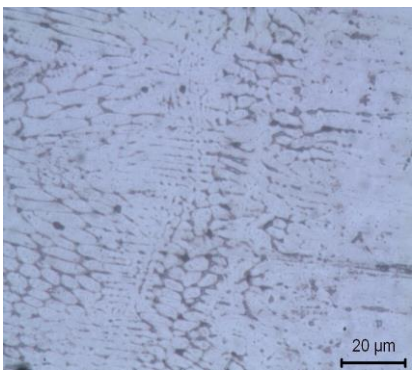
Tablo A.4: 5 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri.

5 PERİYOT 13,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

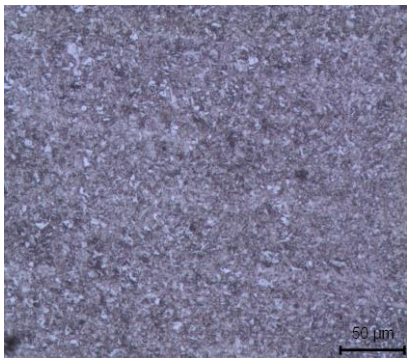
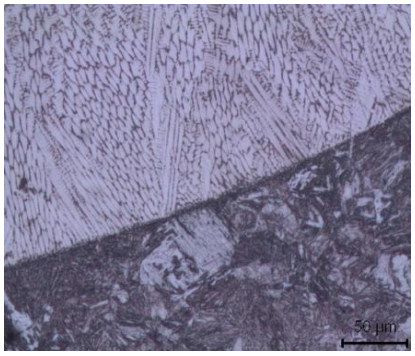
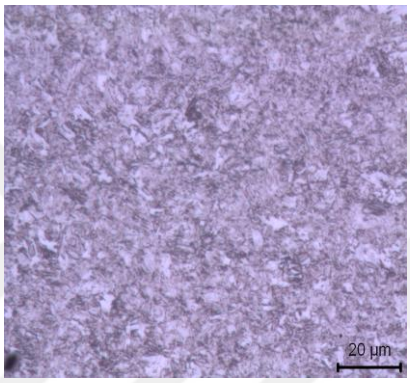
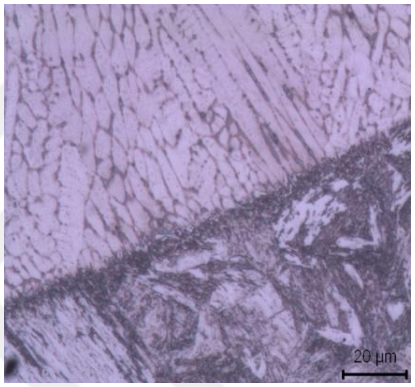
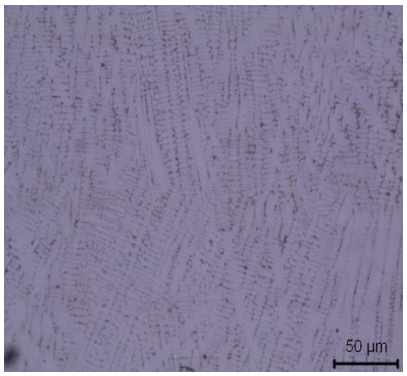
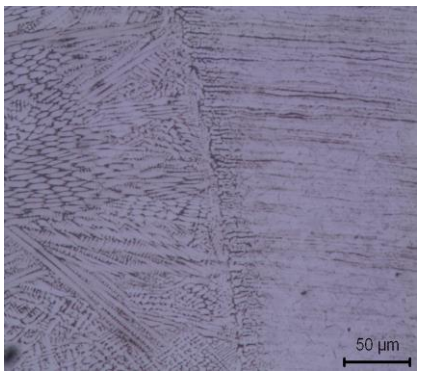
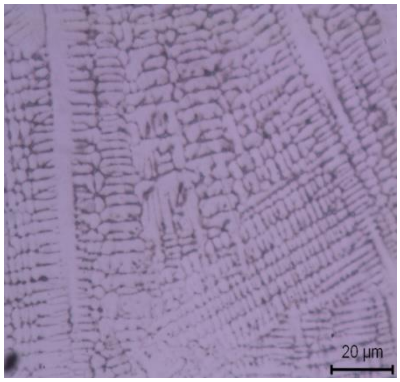
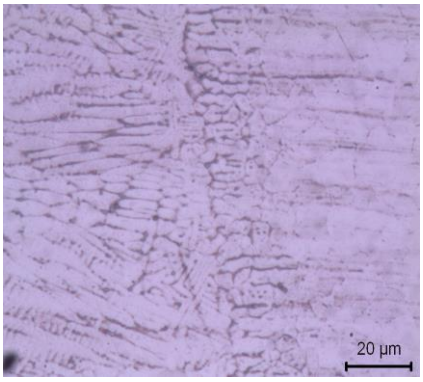
Tablo A.5: 5 periyot 14,5 kA mikroyapı görüntüleri.

5 PERİYOT 14,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

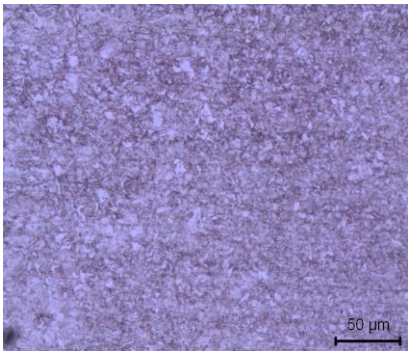
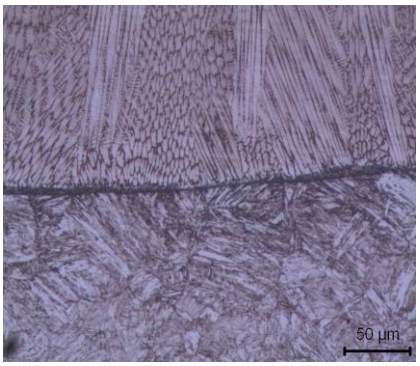
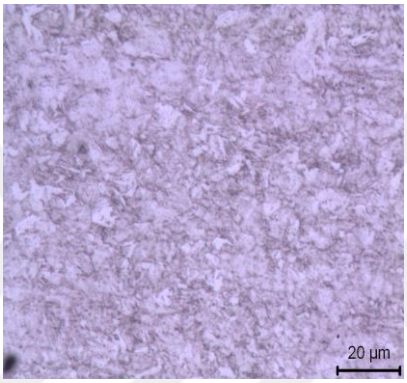
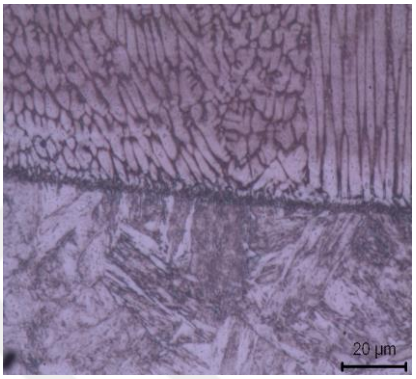
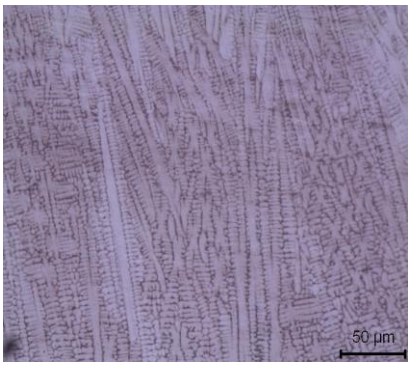
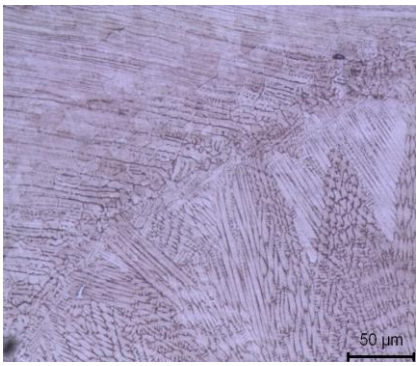
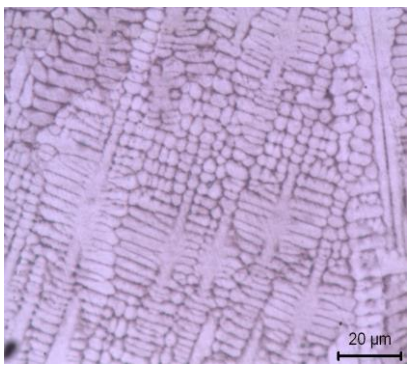
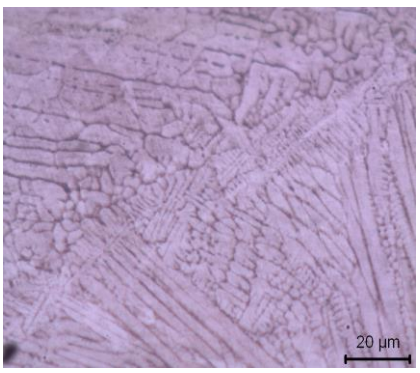
Tablo A.6: 5 periyot 15,7 kA mikroyapı görüntüleri.

5 PERİYOT 15,7 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

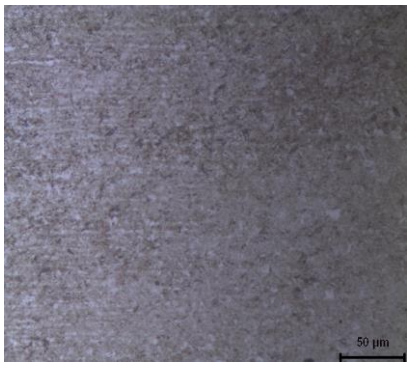
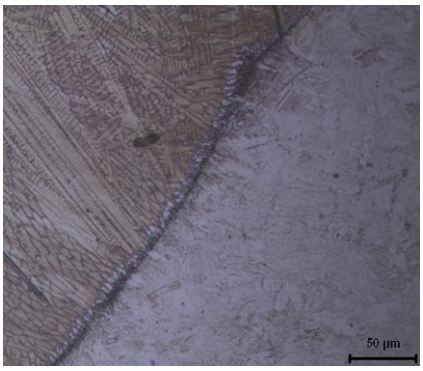
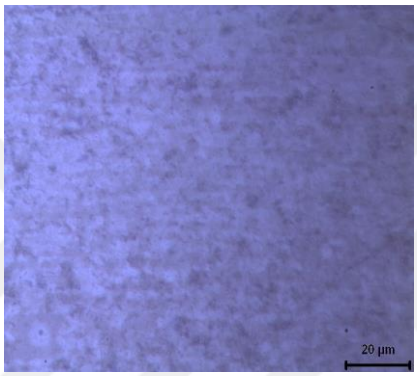
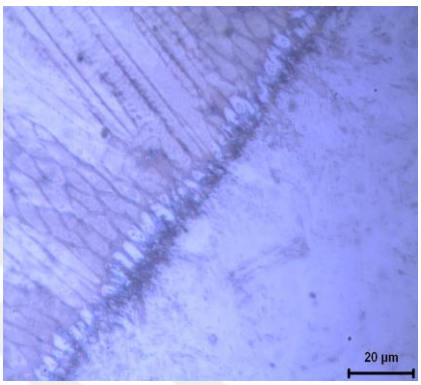
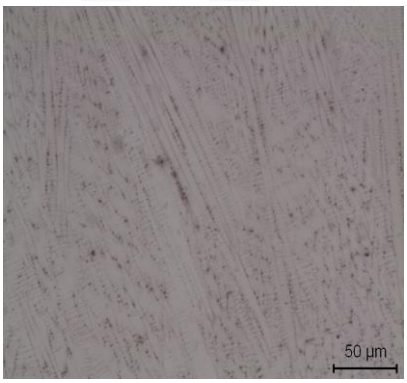
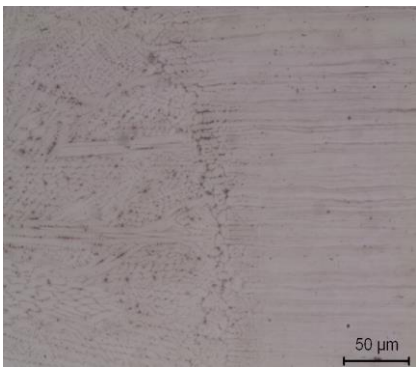
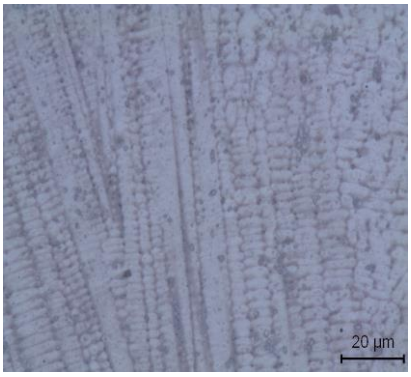
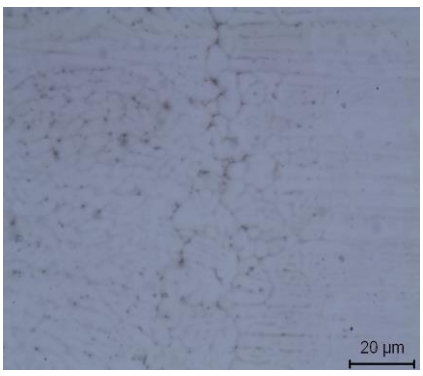
Tablo A.7: 10 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri.

10 PERİYOT 7,27 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

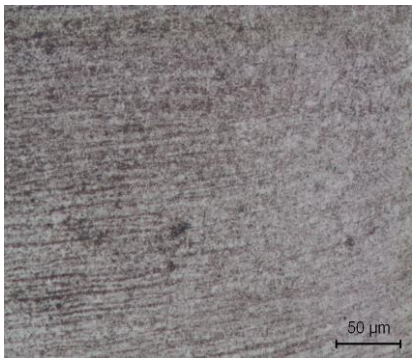
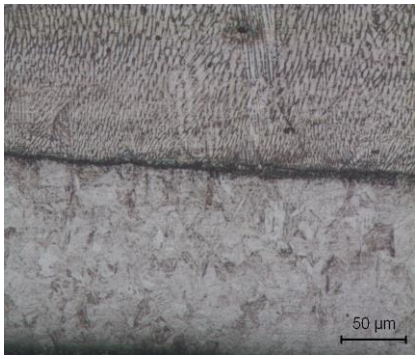
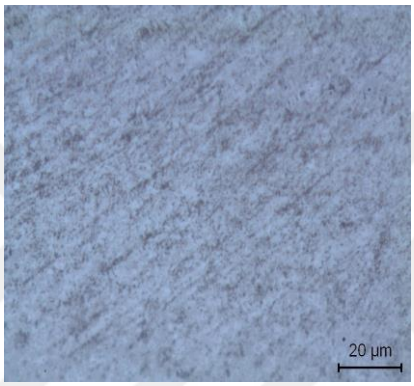
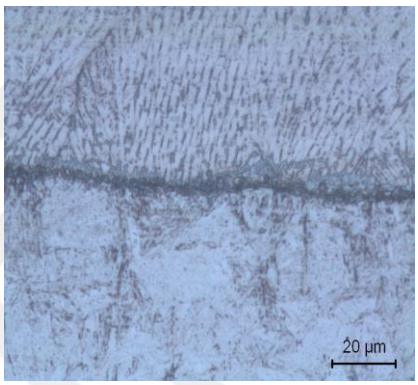
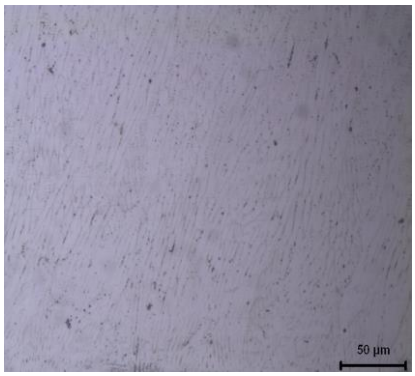
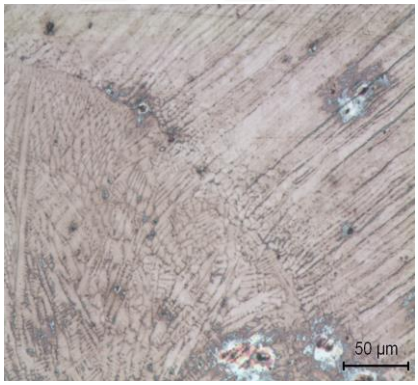
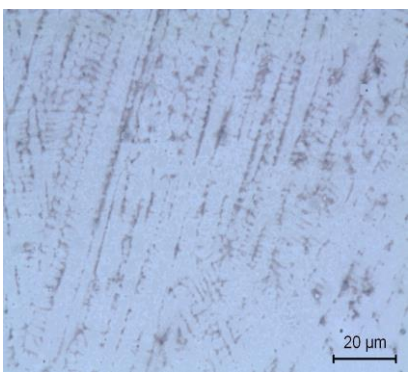
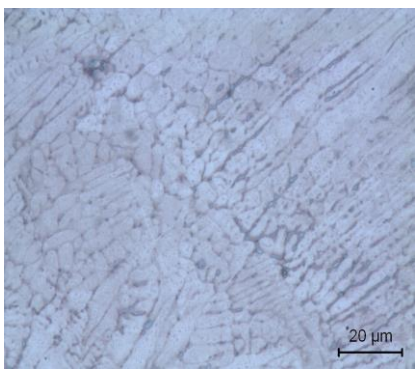
Tablo A.8: 10 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri.

10 PERİYOT 8,17 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

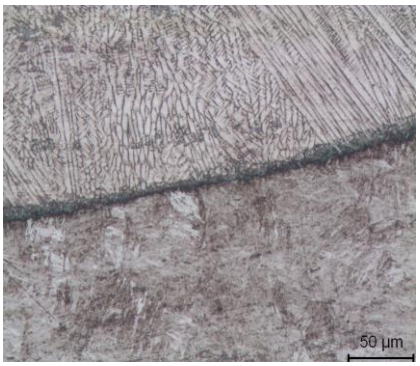
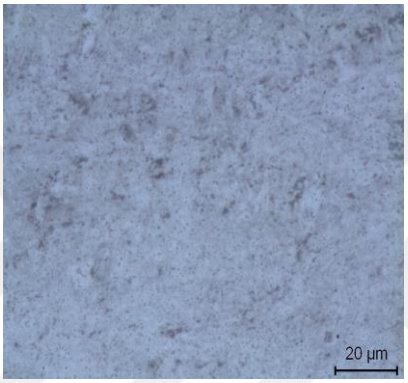
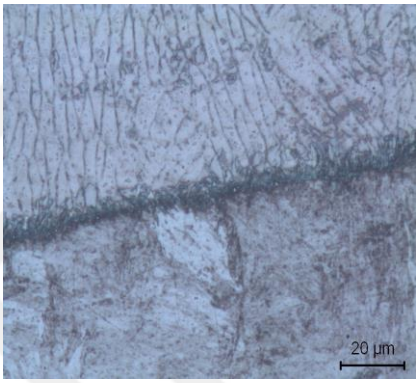
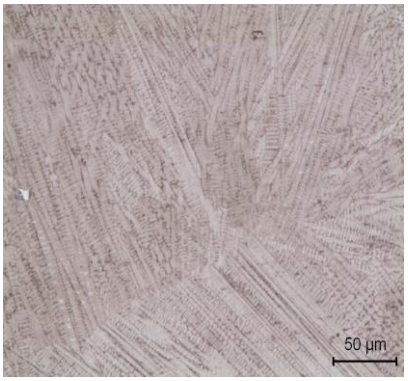
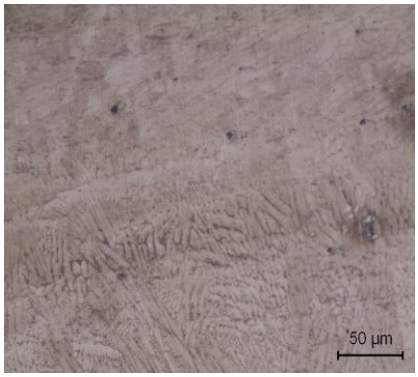
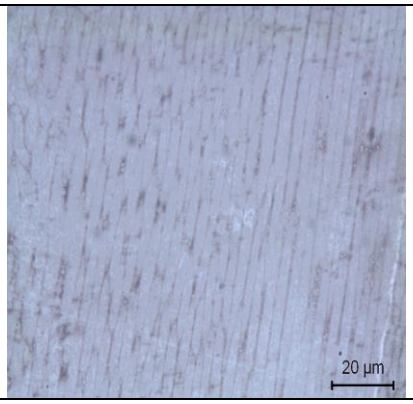
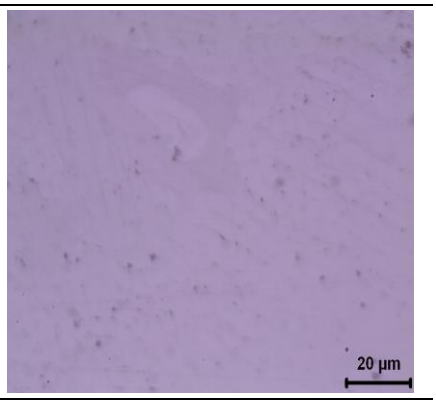
Tablo A.9: 10 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri.

10 PERİYOT 9,66 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

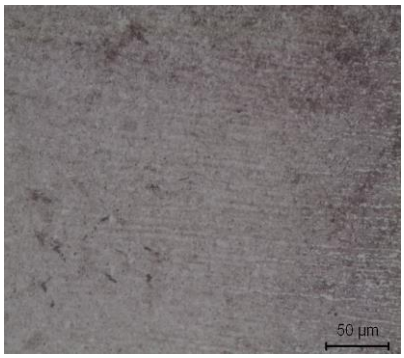
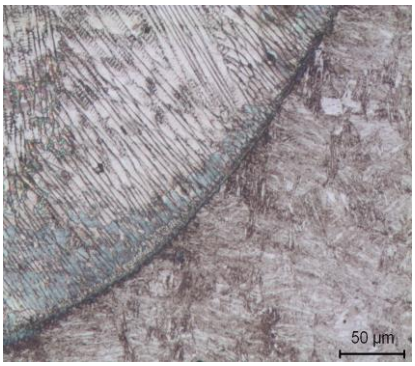
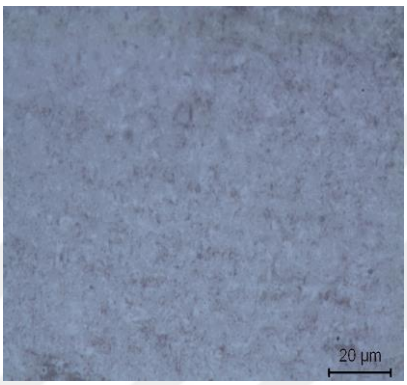
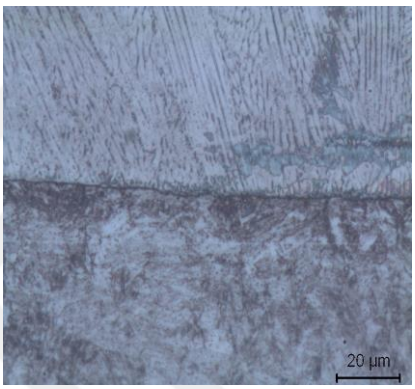
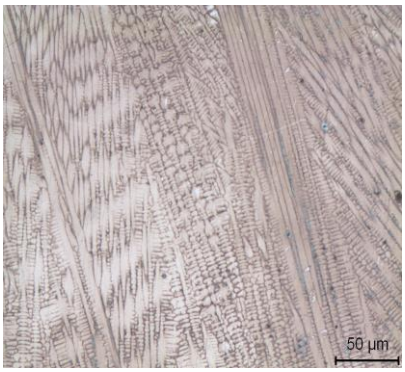
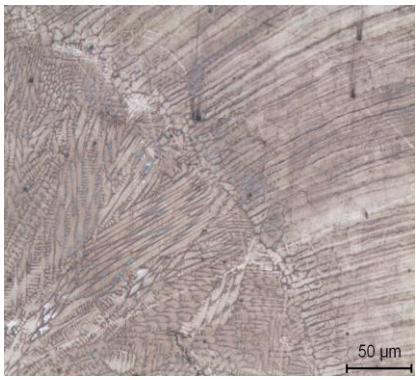
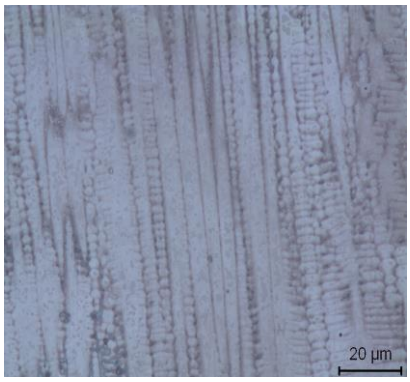
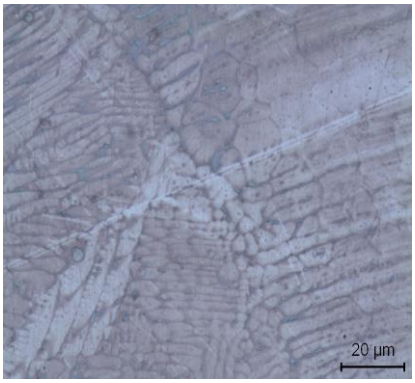
Tablo A.10: 10 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri.

10 PERİYOT 11,9 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

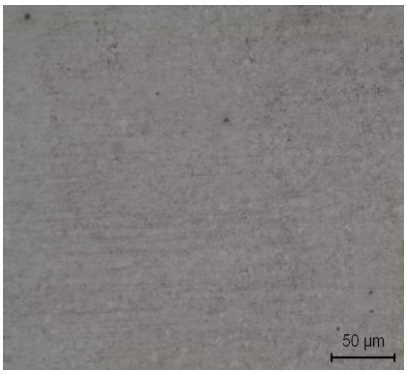
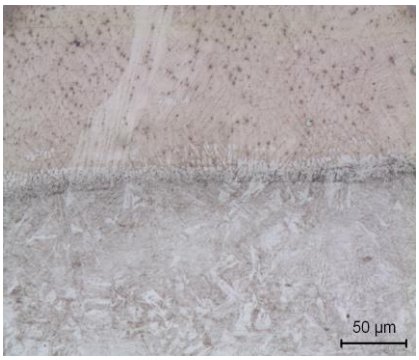
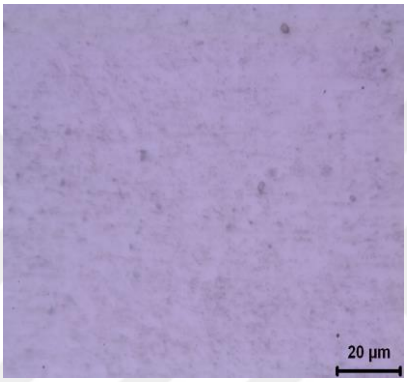
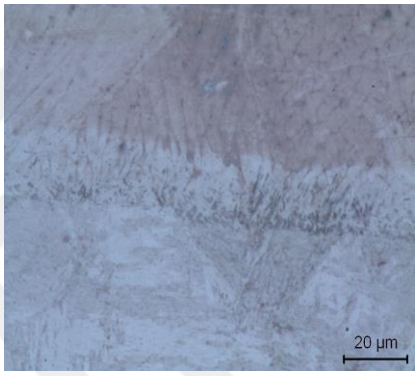
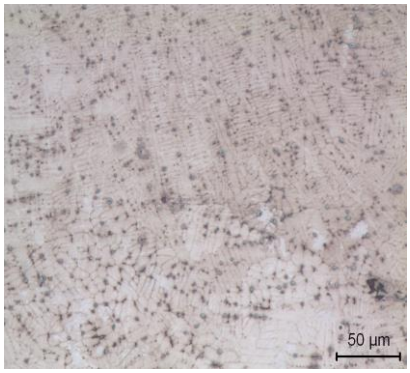
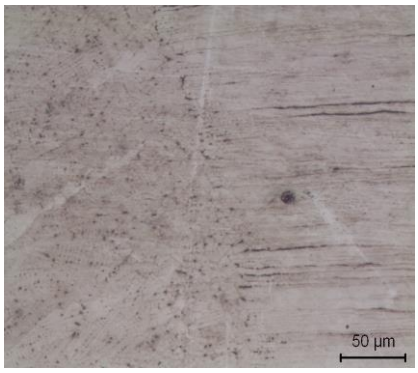
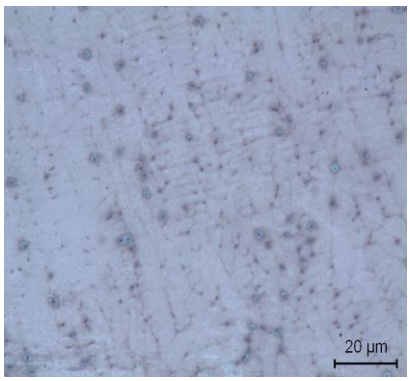
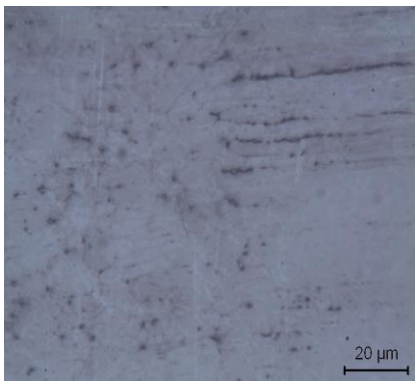
Tablo A.11: 10 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri.

10 PERİYOT 13,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

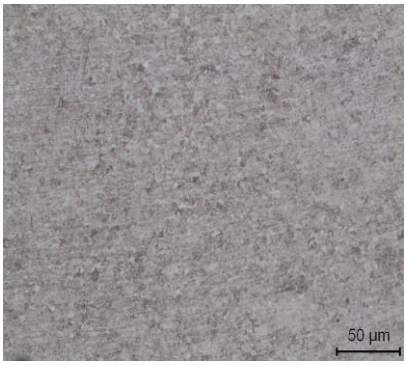
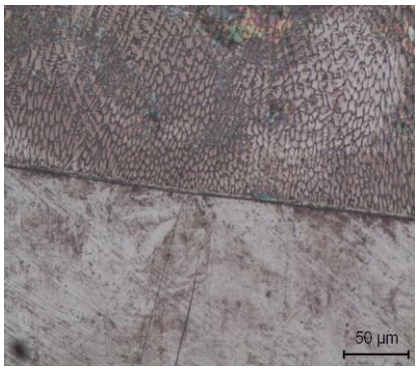
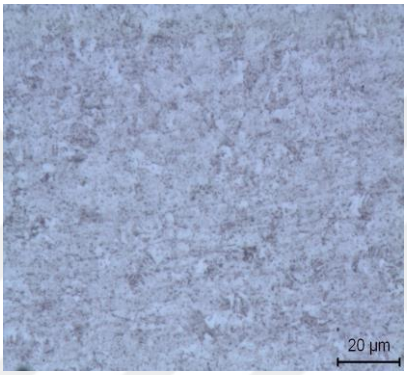
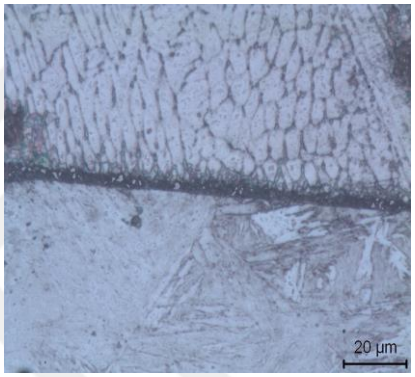
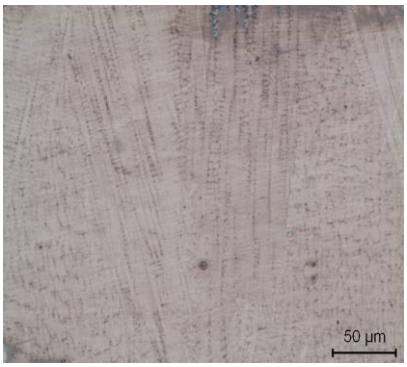
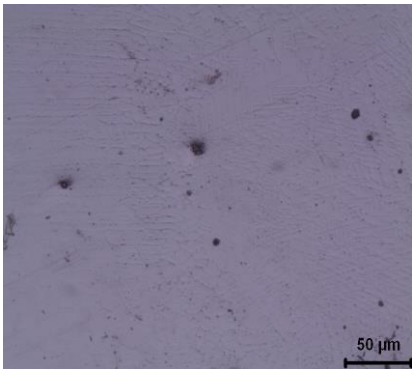
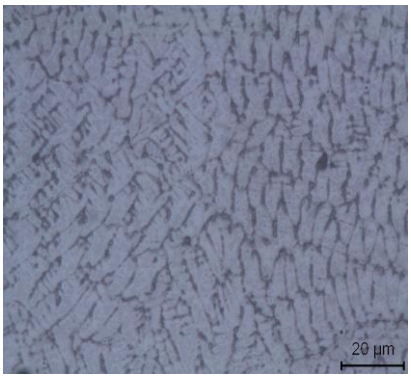
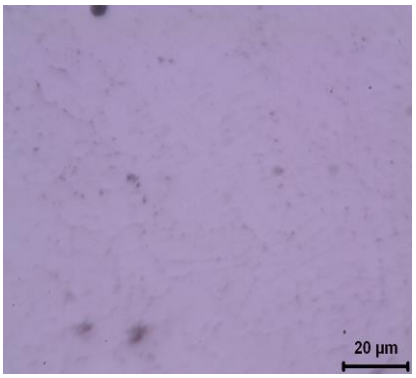
Tablo A.12: 10 periyot 14,5 kA mikroyapı görüntüleri.

10 PERİYOT 14,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

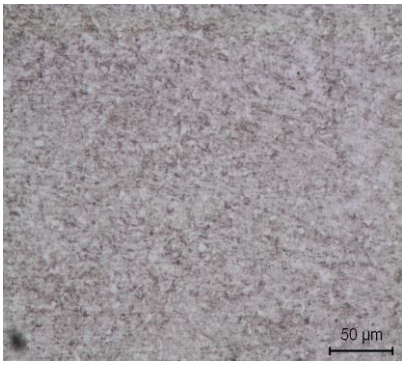
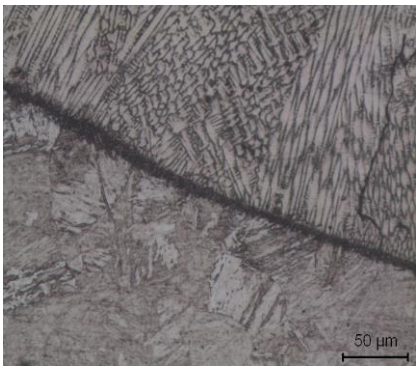
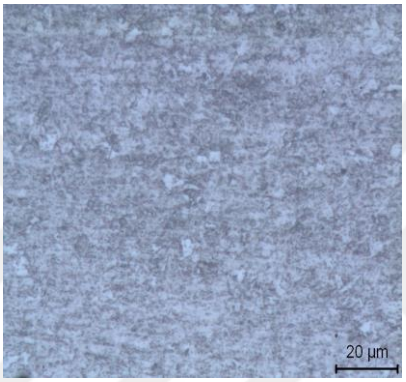
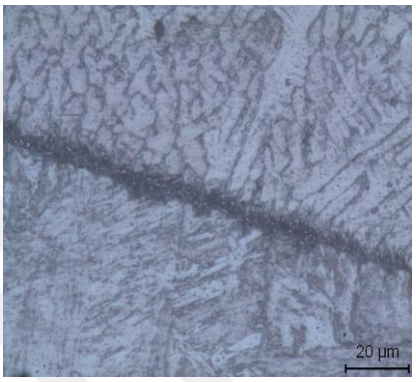
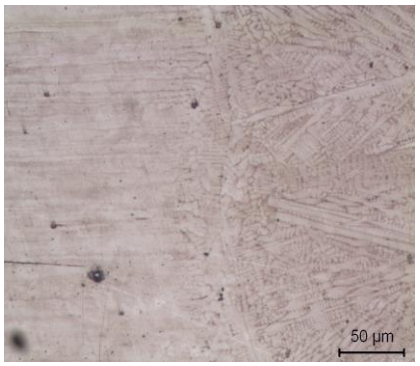
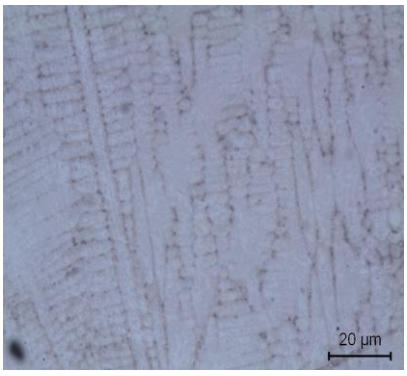
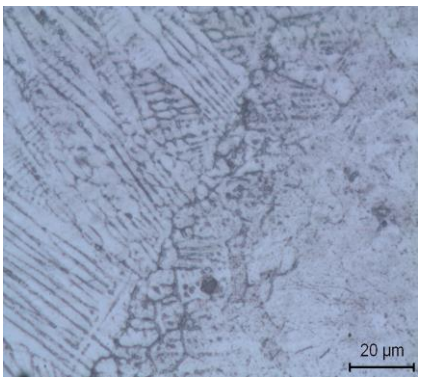
Tablo A.13: 10 periyot 15,7 kA mikroyapı görüntüleri.

10 PERİYOT 15,7 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

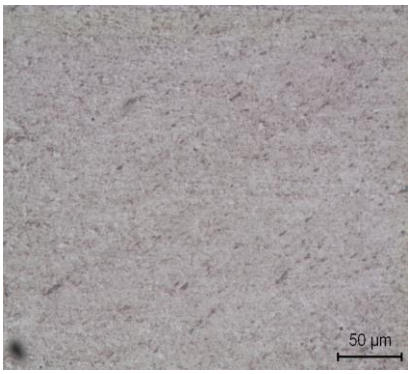
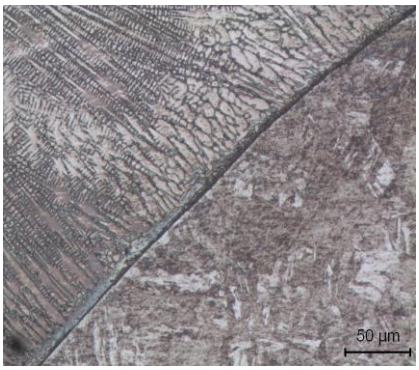
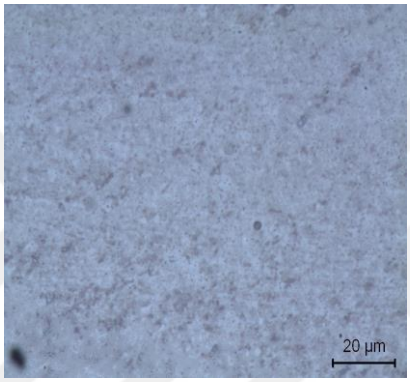
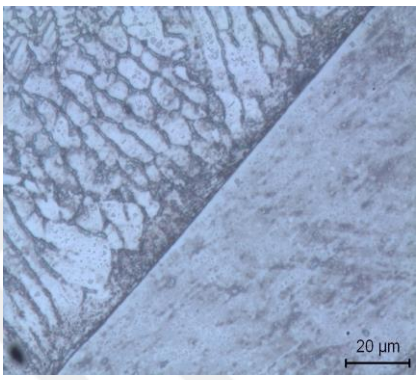
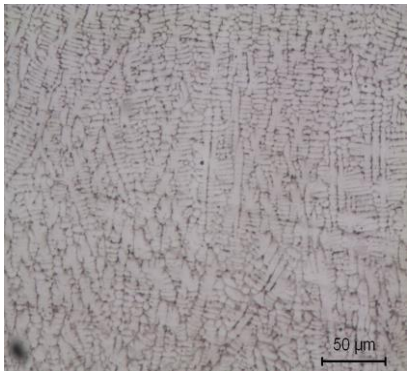
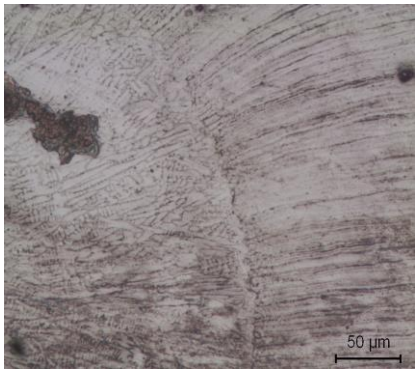
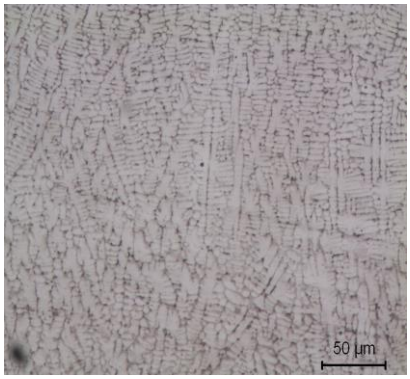
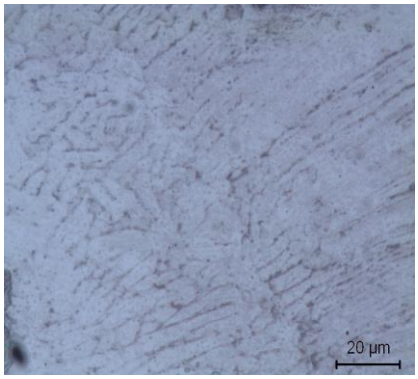
Tablo A.14: 15 periyot 6,33 kA mikroyapı görüntüleri.

15 PERİYOT 6,33 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

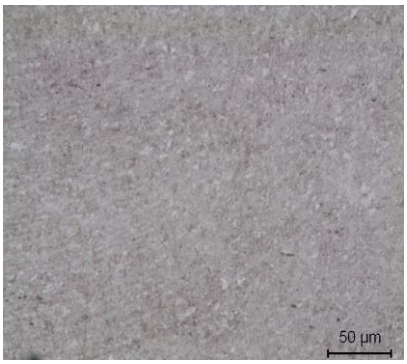
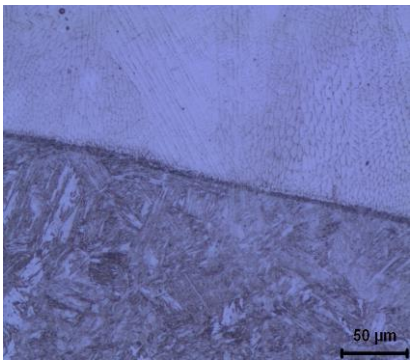
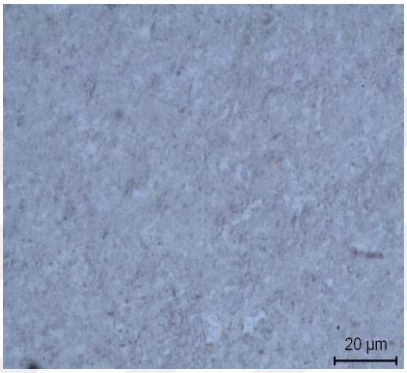
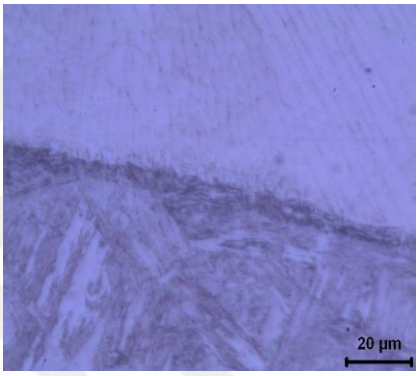
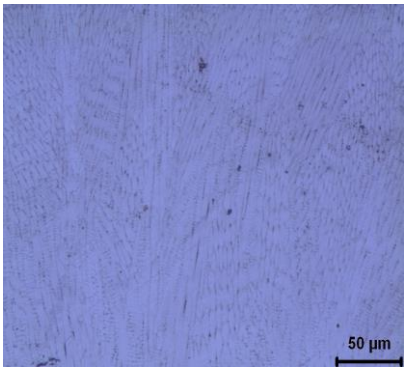
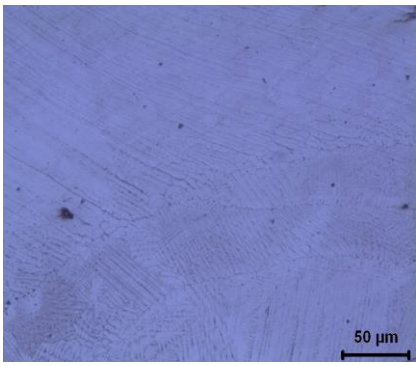
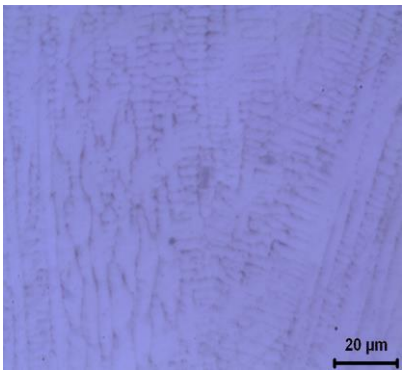
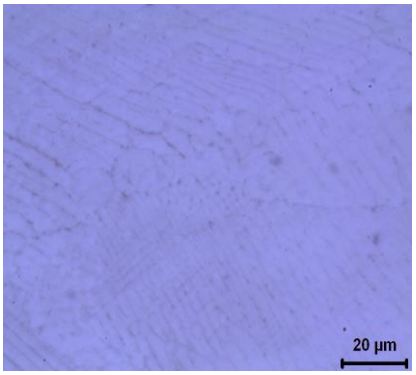
Tablo A.15: 15 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri.

15 PERİYOT 7,27 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

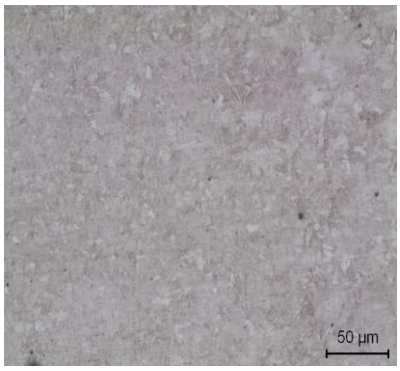
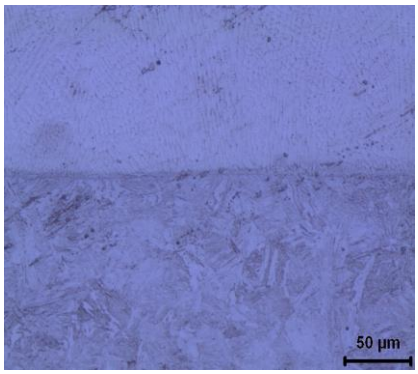
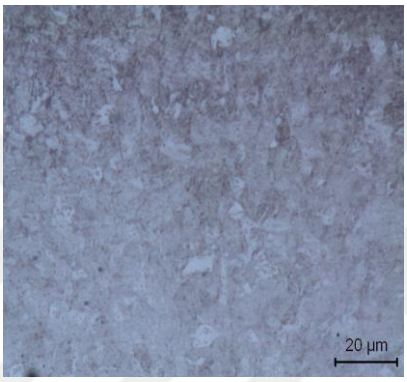
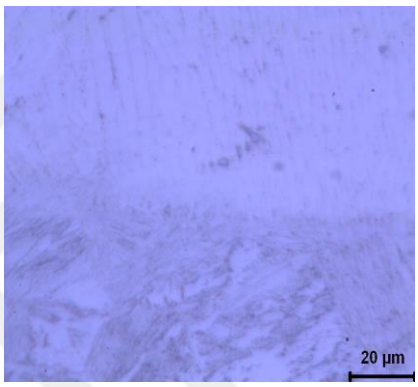
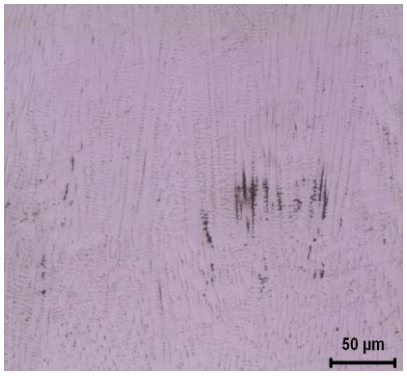
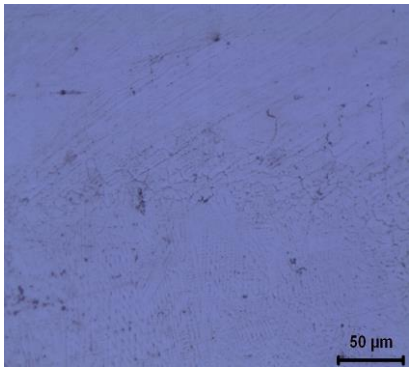
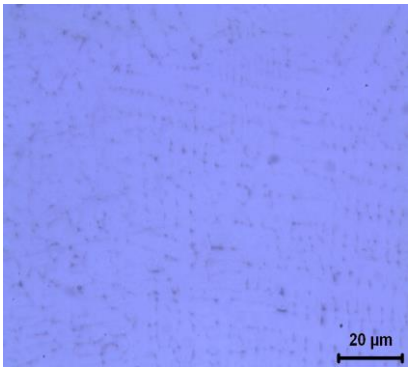
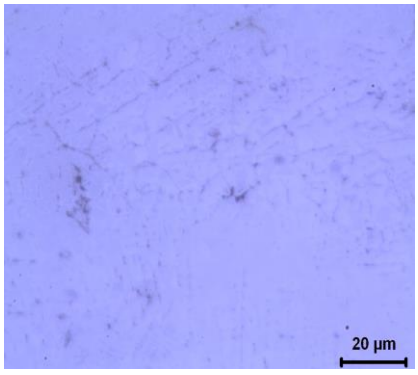
Tablo A.16: 15 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri.

15 PERİYOT 8,17 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

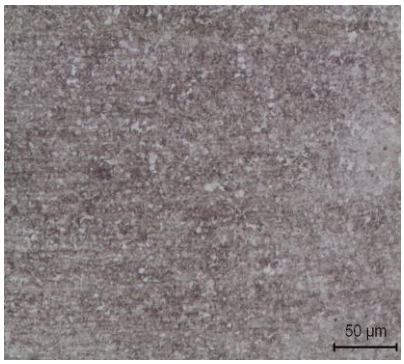
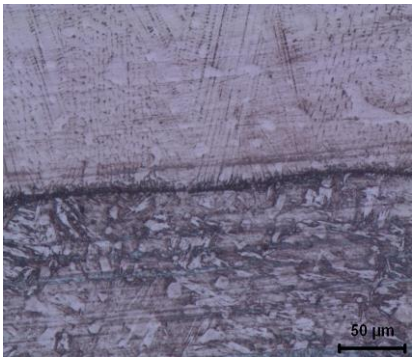
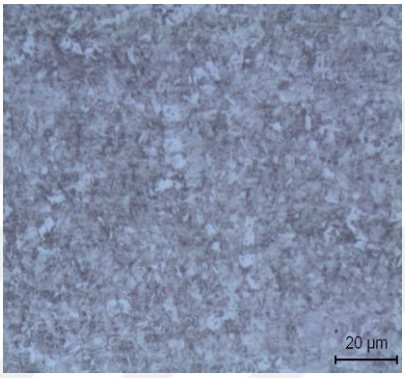
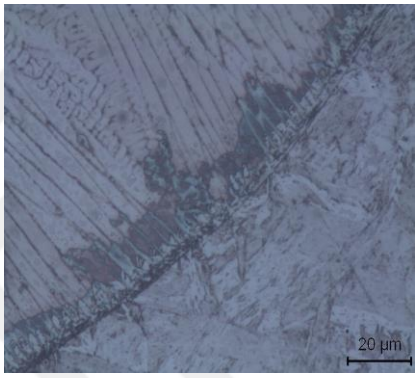
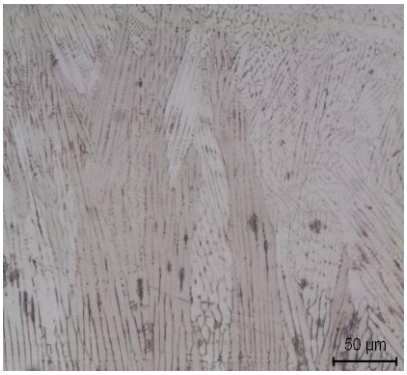
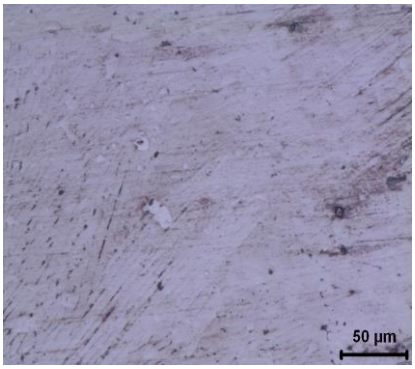
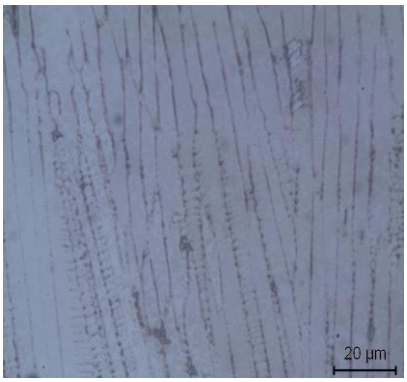
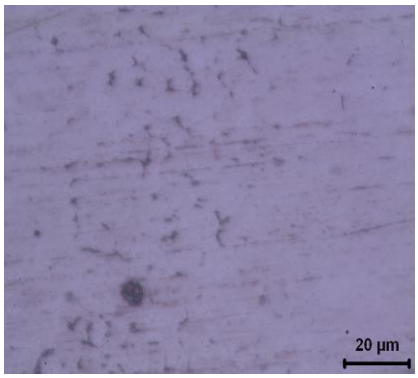
Tablo A.17: 15 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri.

15 PERİYOT 9,66 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

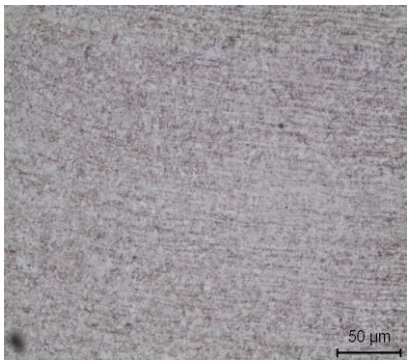
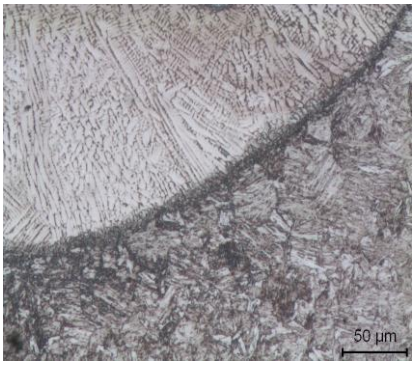
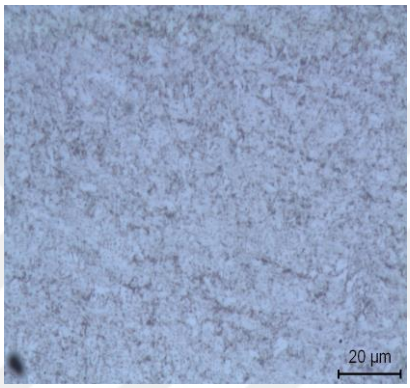
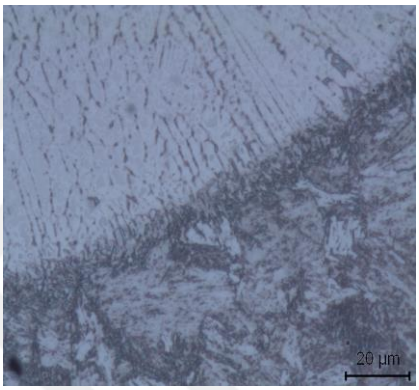
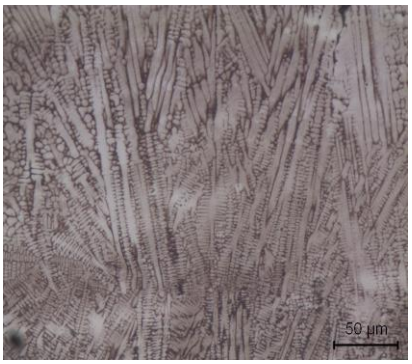
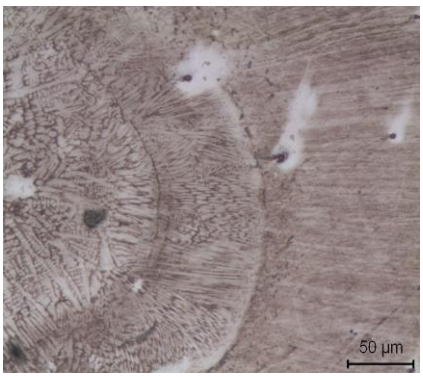
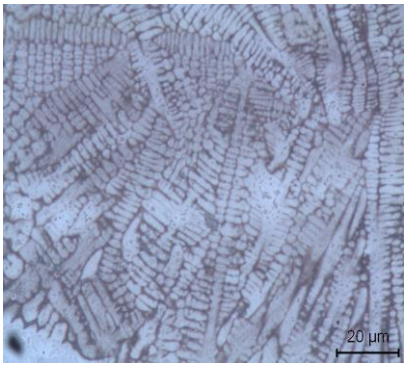
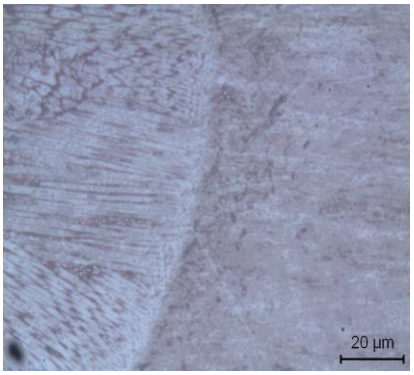
Tablo A.18: 15 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri.

15 PERİYOT 11,9 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

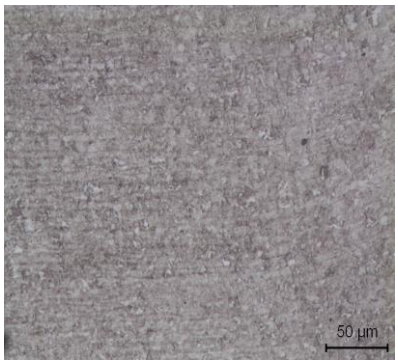
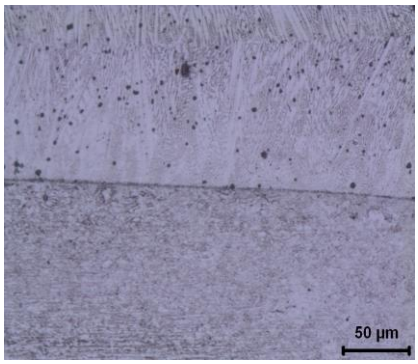
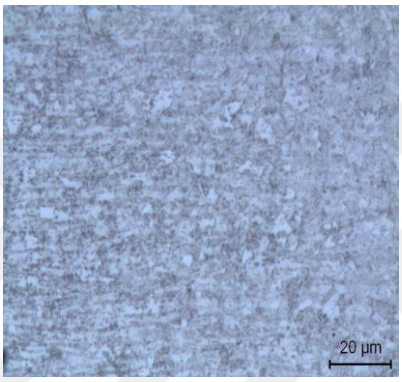
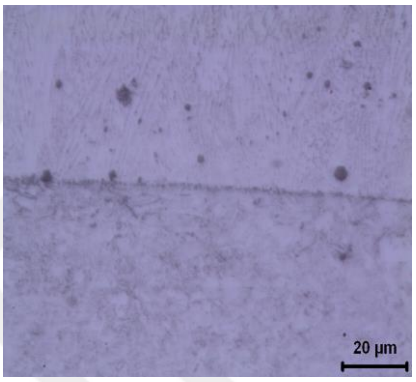
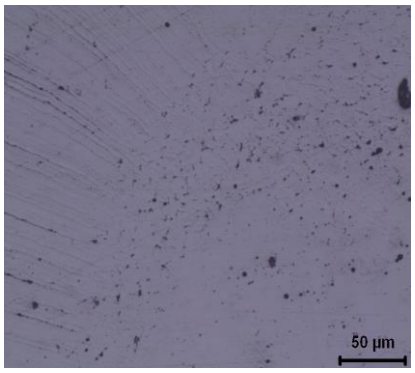
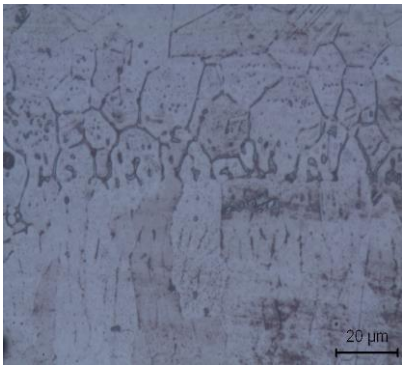
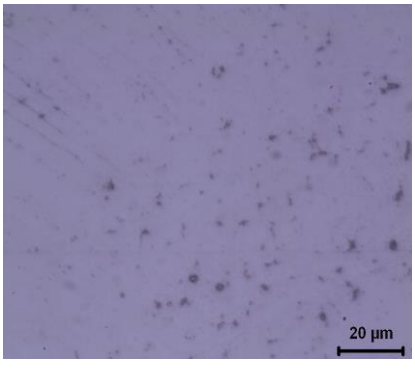
Tablo A.19: 15 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri.

15 PERİYOT 13,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

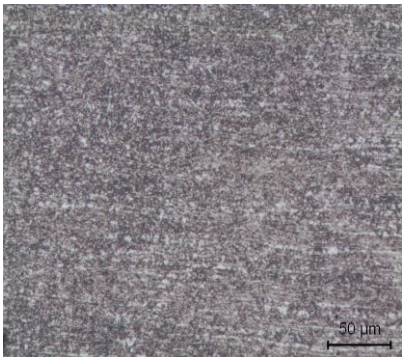
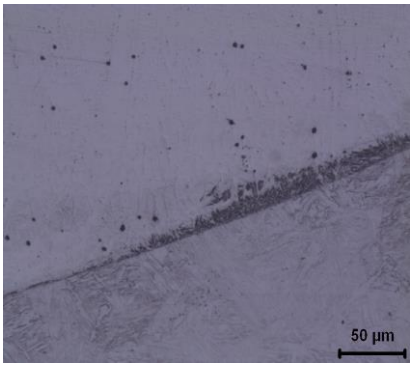
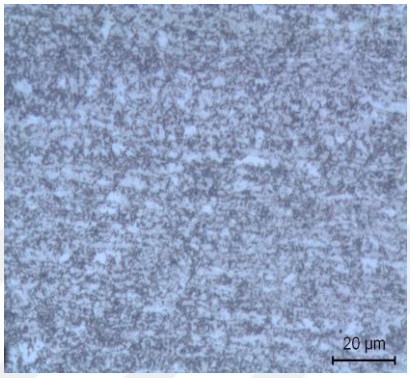
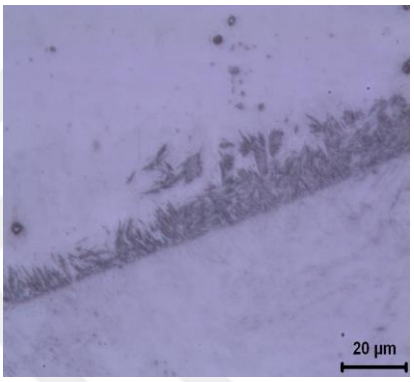
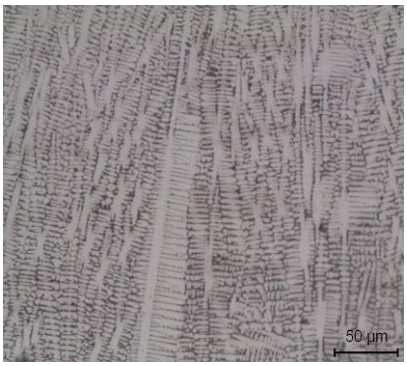
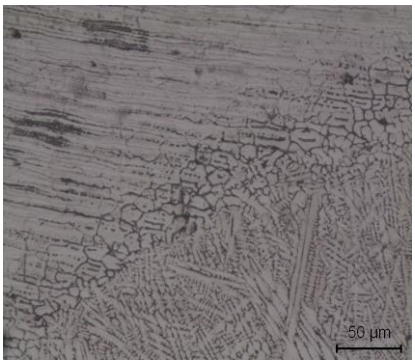
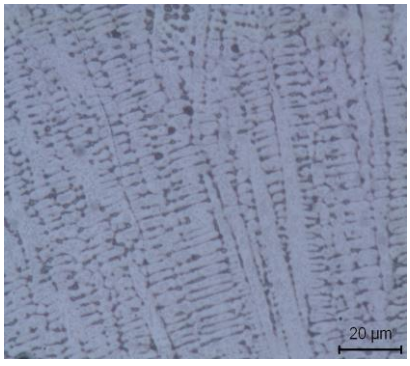
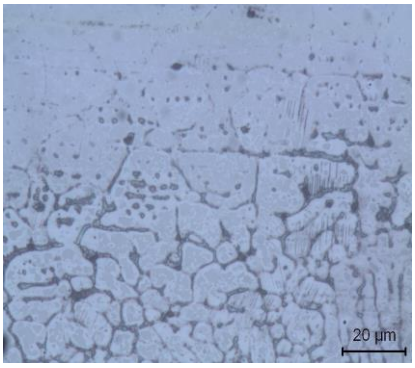
Tablo A.20: 15 periyot 14,5 kA mikroyapı görüntüleri.

15 PERİYOT 14,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

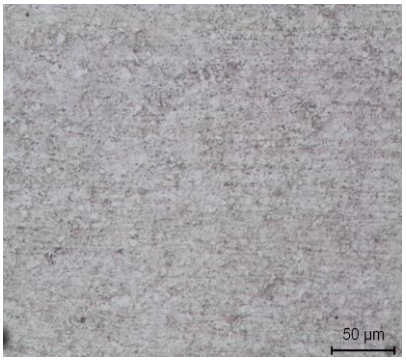
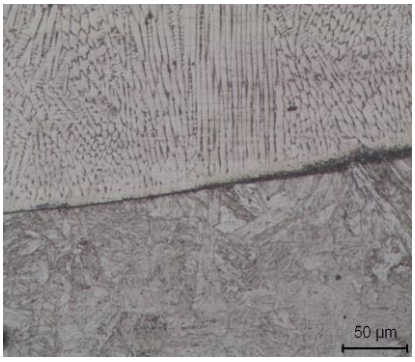
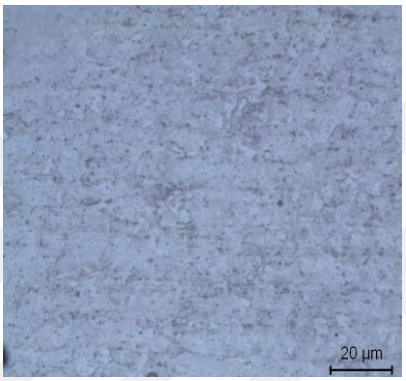
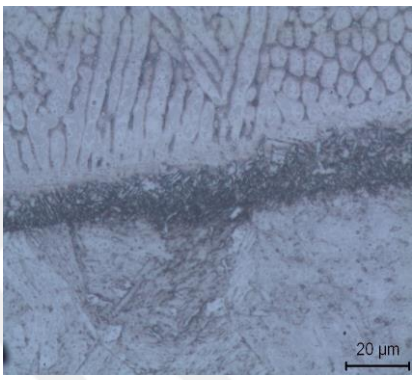
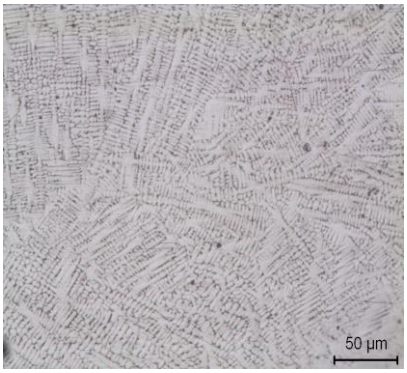
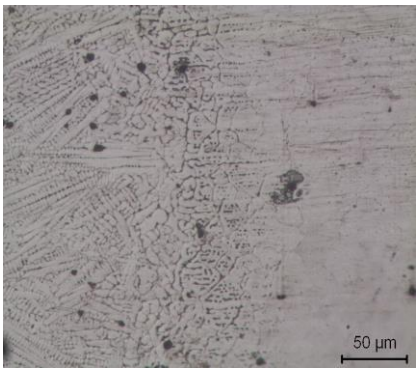
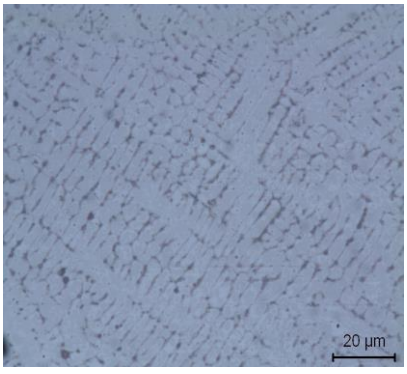
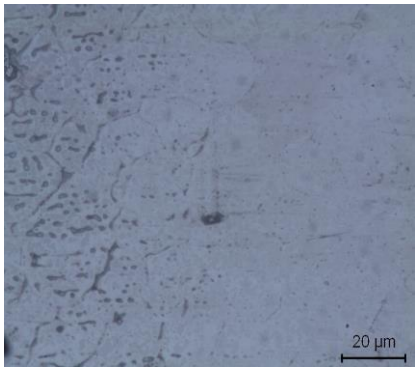
Tablo A.21: 15 periyot 15,7 kA mikroyapı görüntüleri.

15 PERİYOT 15,7 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

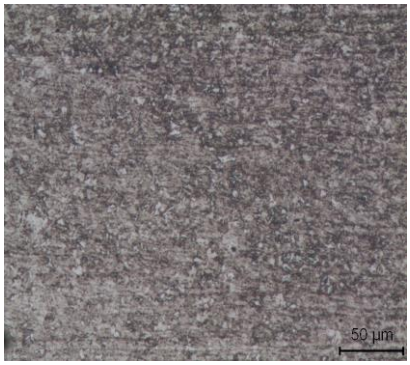
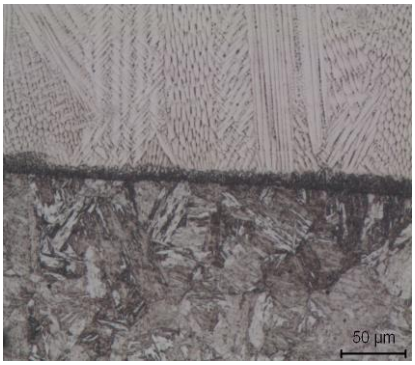
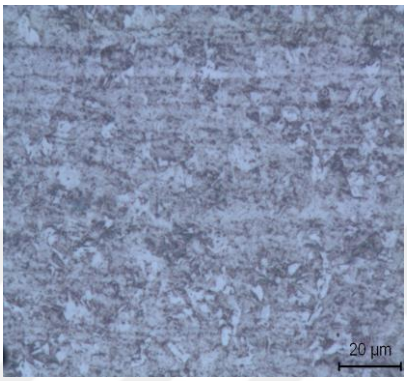
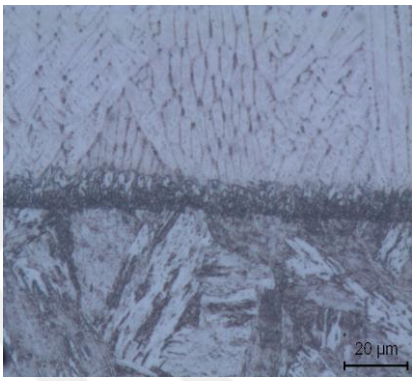
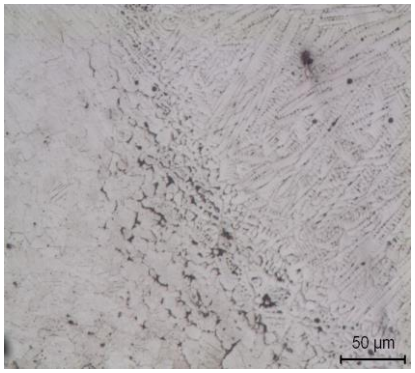
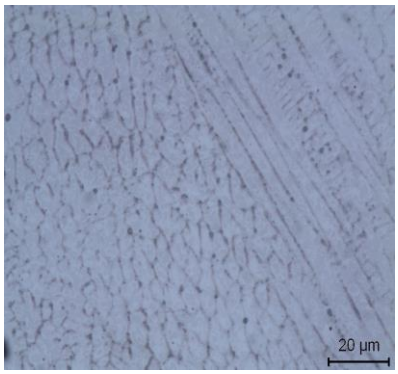
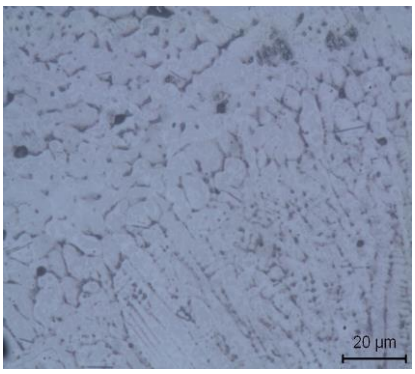
Tablo A.22: 20 periyot 6,33 kA mikroyapı görüntüleri.

20 PERİYOT 6,33 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

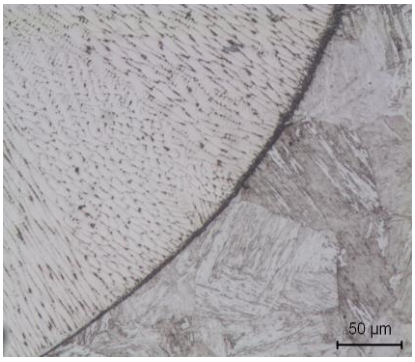
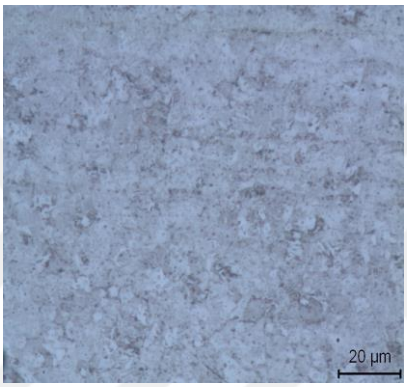
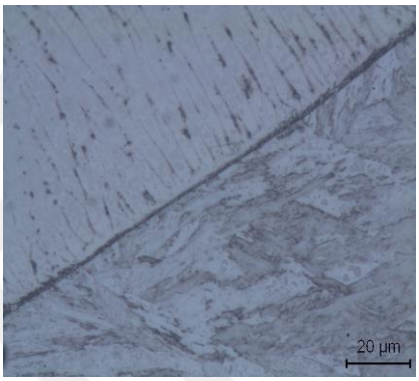
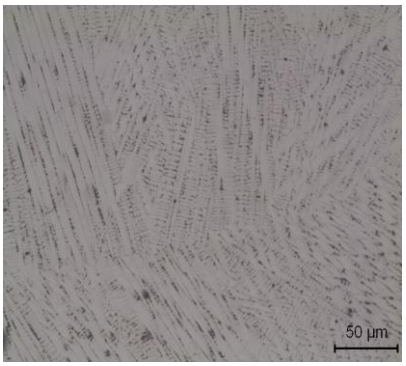
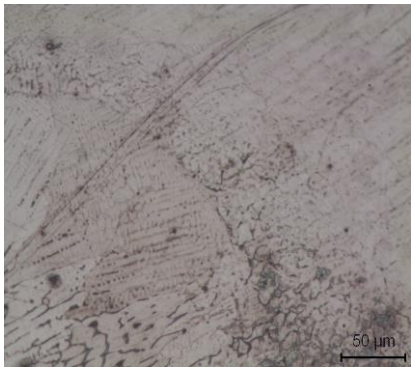
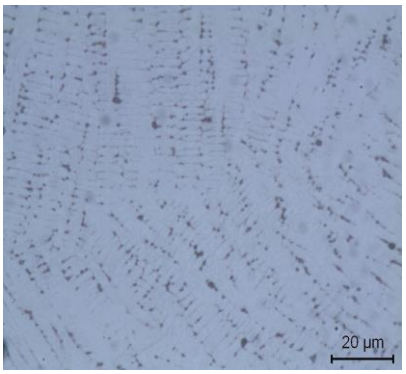
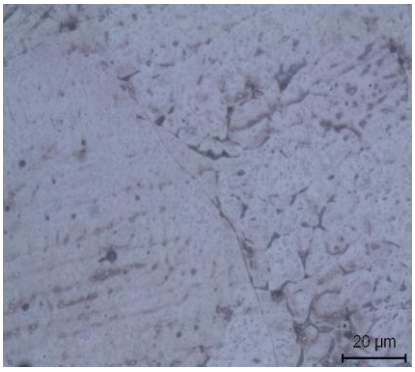
Tablo A.23: 20 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri.

20 PERİYOT 7,27 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

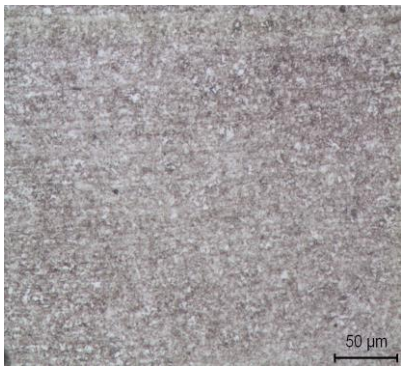
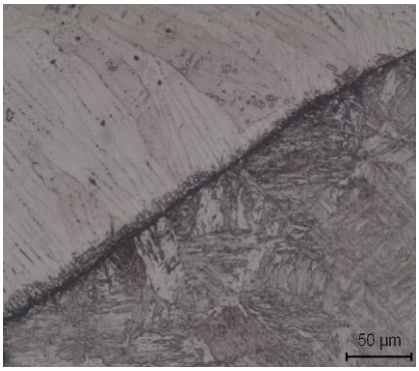
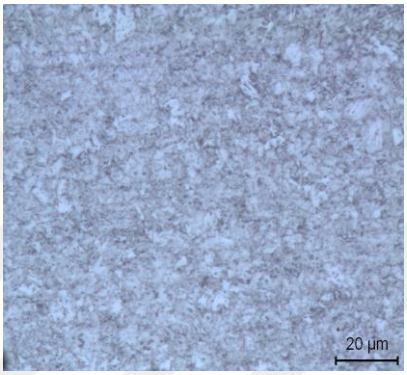
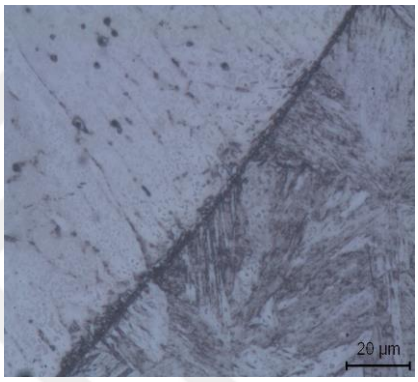
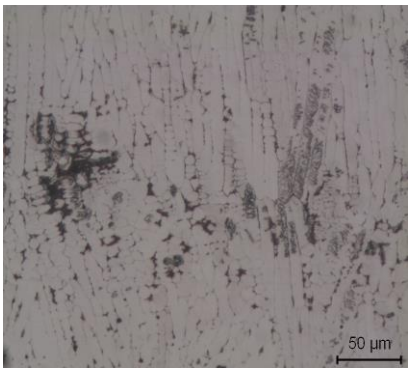
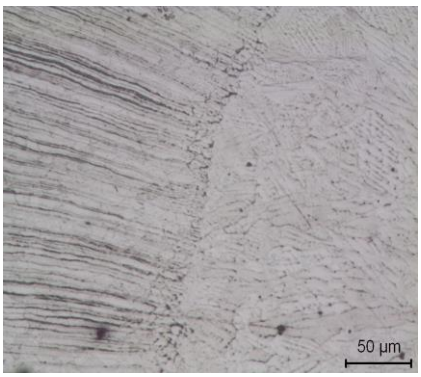
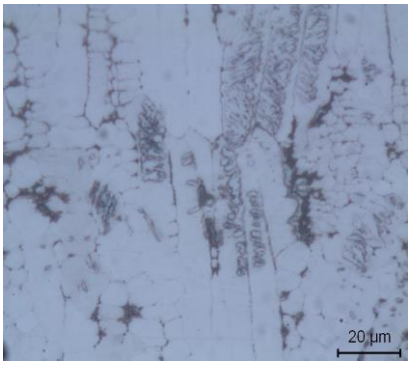
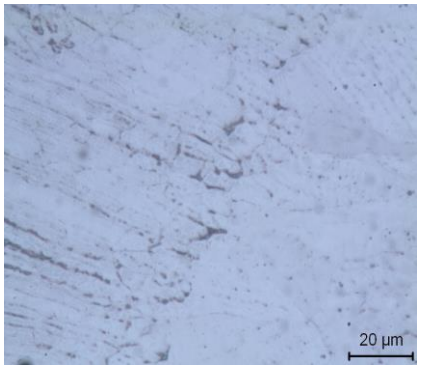
Tablo A.24: 20 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri.

20 PERİYOT 8,17 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

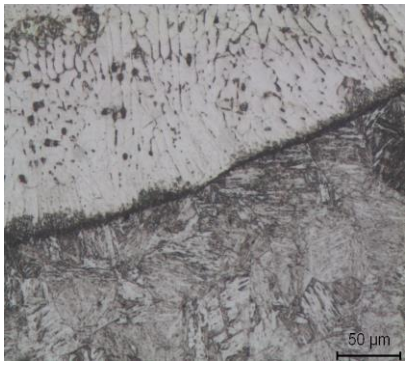
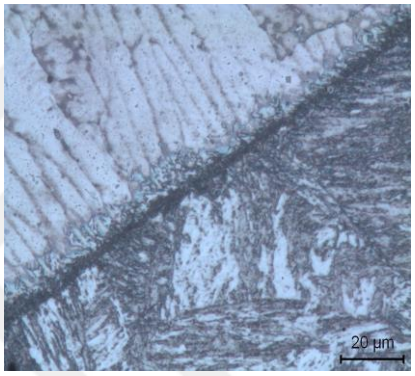
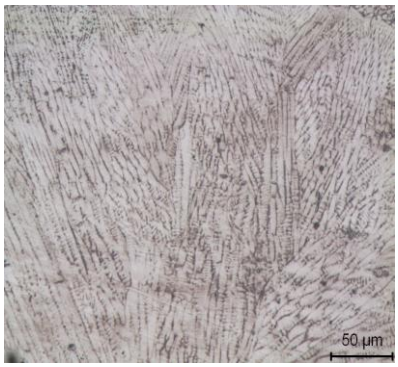
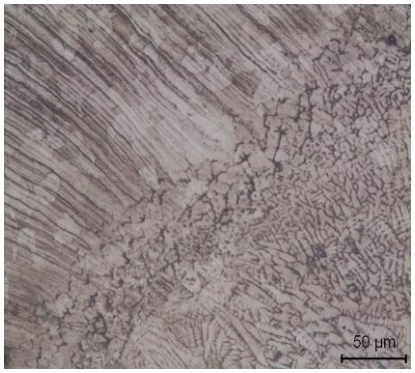
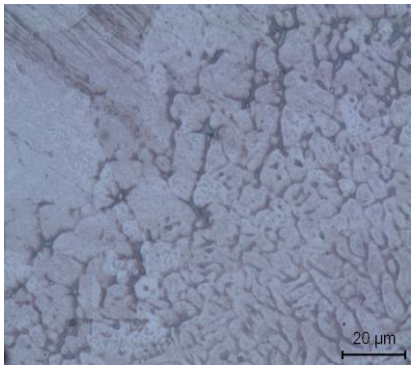
Tablo A.25: 20 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri.

20 PERİYOT 9,66 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

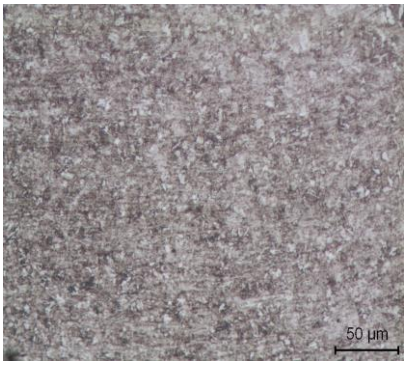
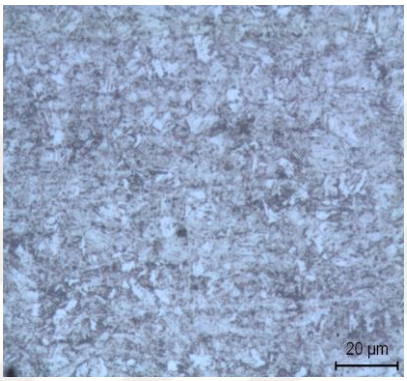
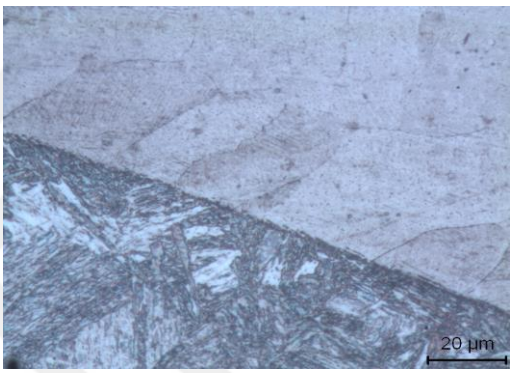
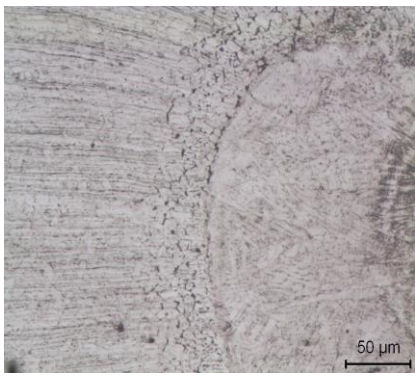
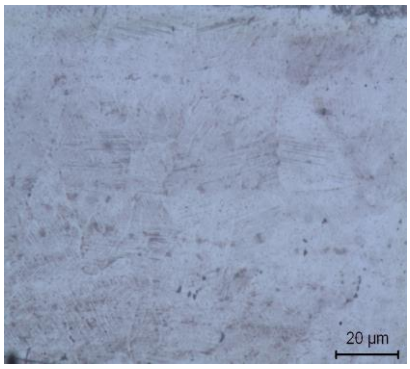
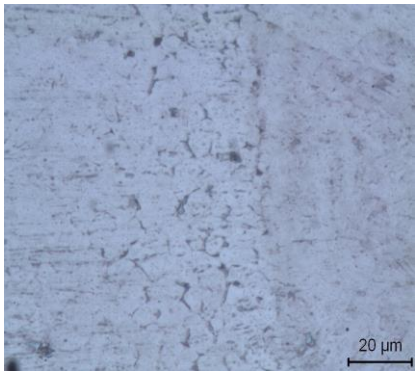
Tablo A.26: 20 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri.

20 PERİYOT 11,9 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

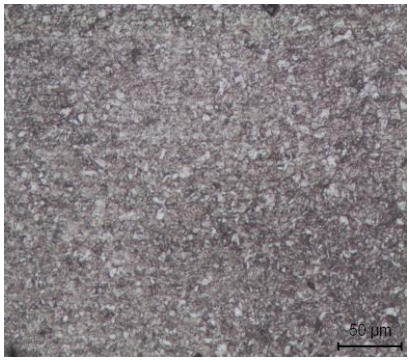
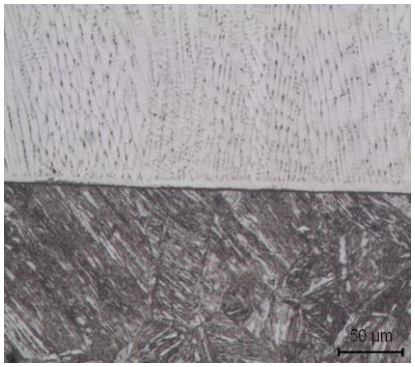
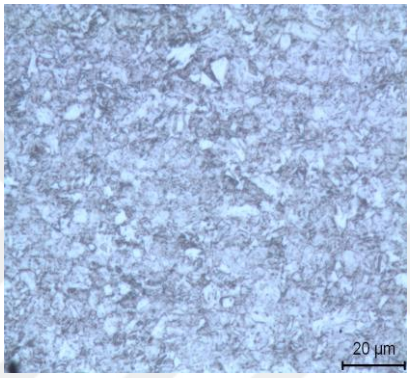
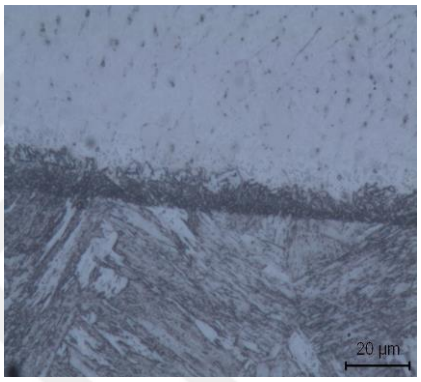
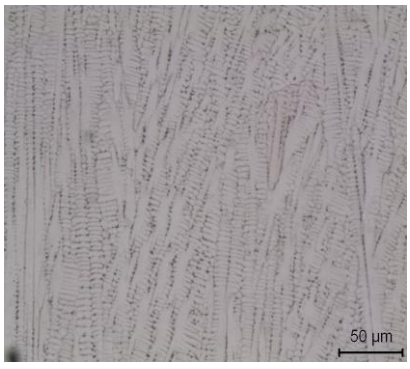
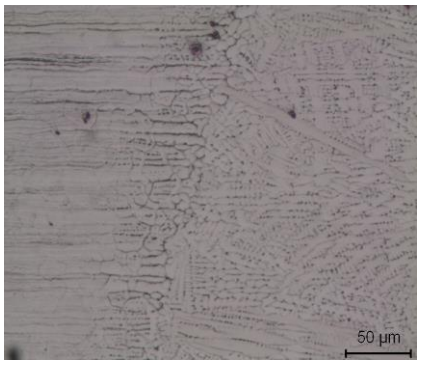
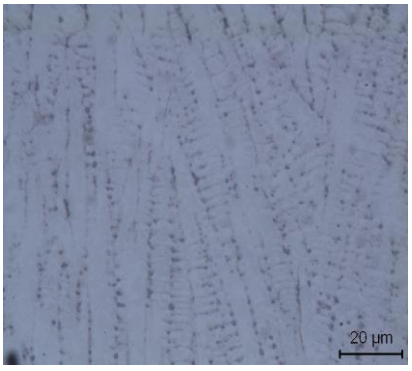
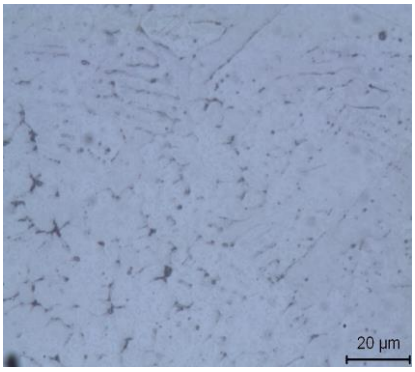
Tablo A.27: 20 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri.

20 PERİYOT 13,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

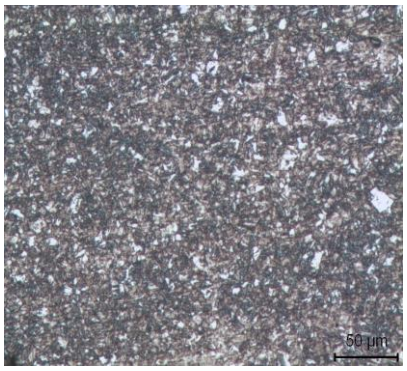
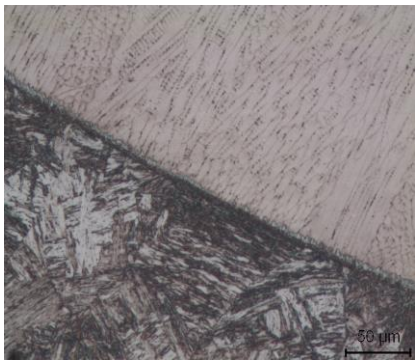
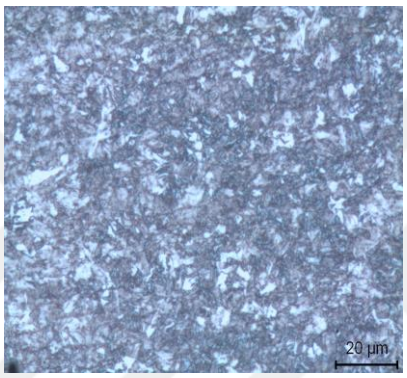
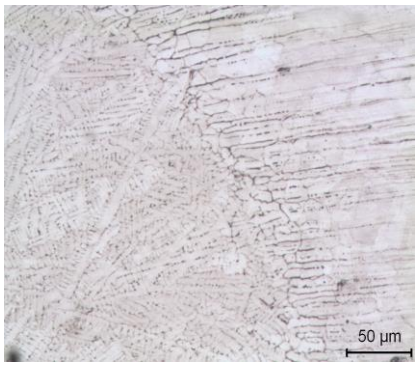
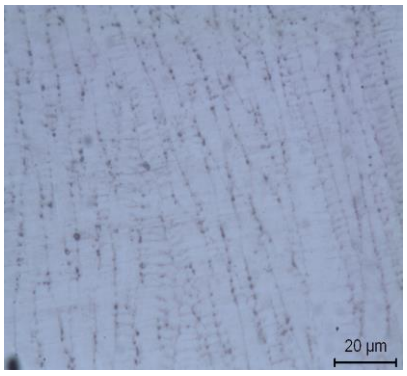
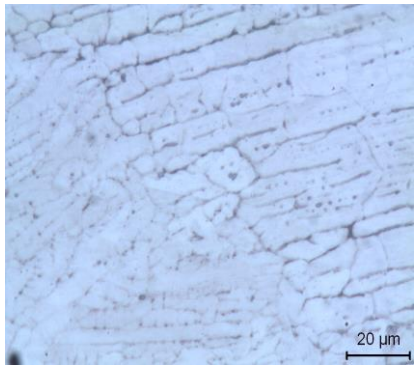
Tablo A.28: 20 periyot 14,5 kA mikroyapı görüntüleri.

20 PERİYOT 14,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

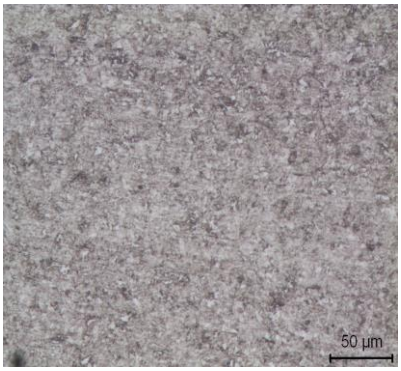
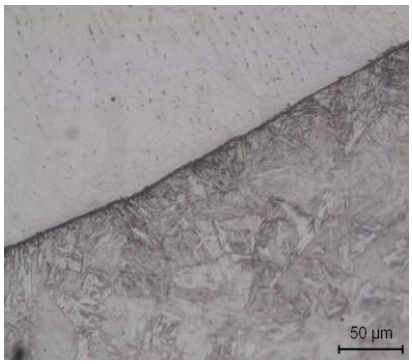
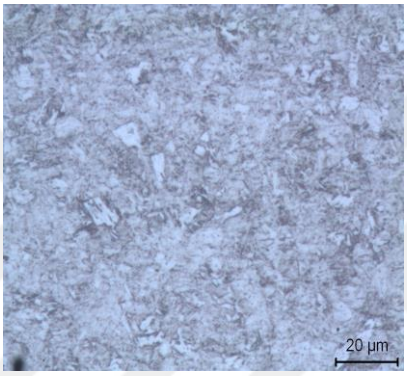
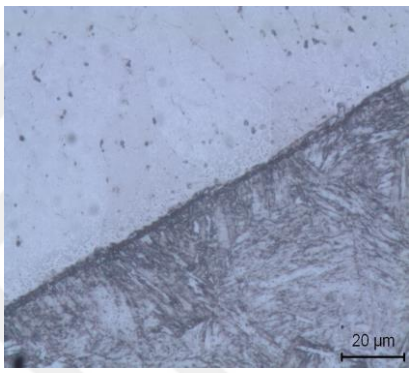
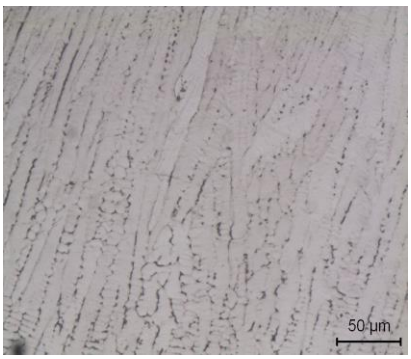
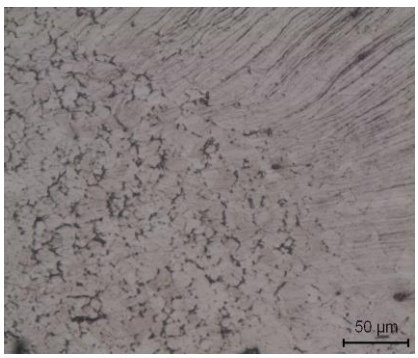
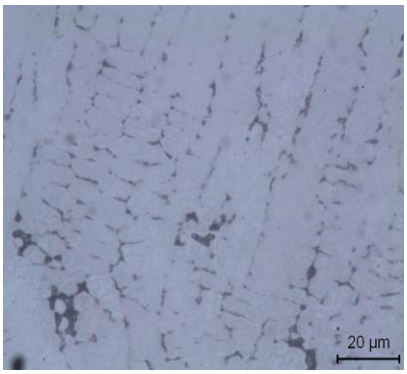
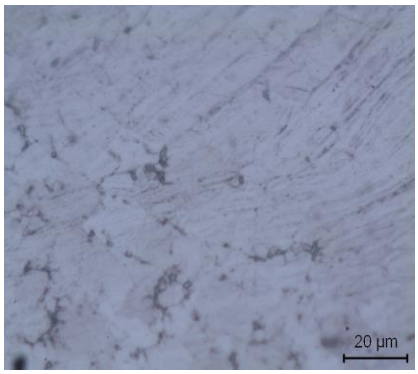
Tablo A.29: 25 periyot 6,33 kA mikroyapı görüntüleri.

25 PERİYOT 6,33 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

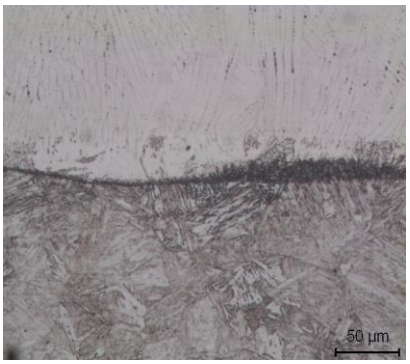
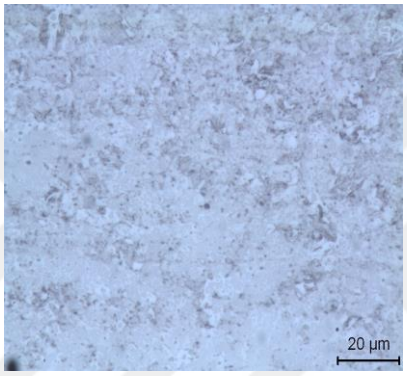
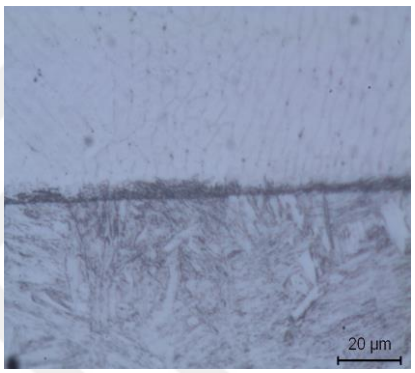
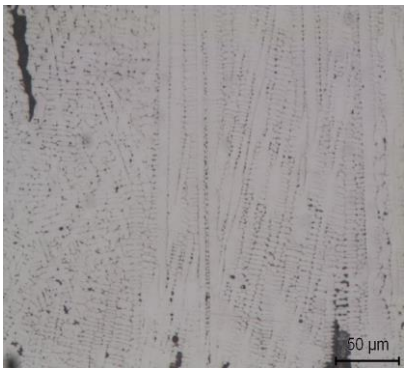
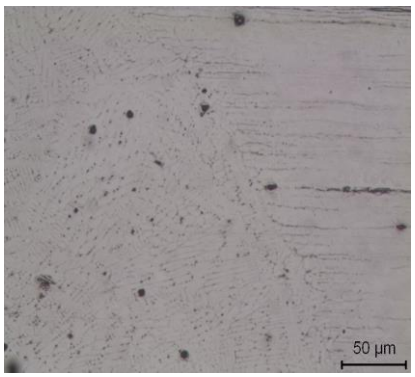
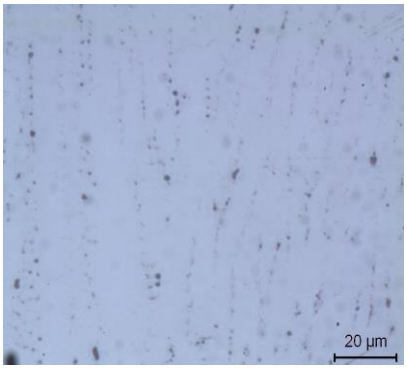
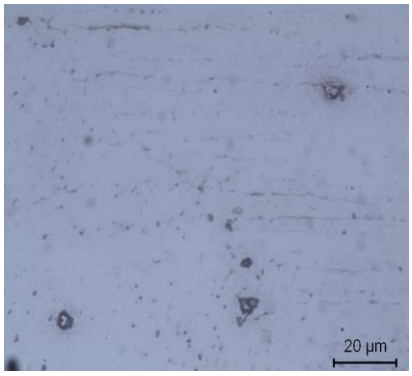
Tablo A.30: 25 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri.

25 PERİYOT 7,27 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

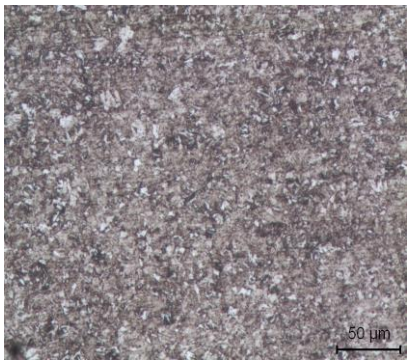
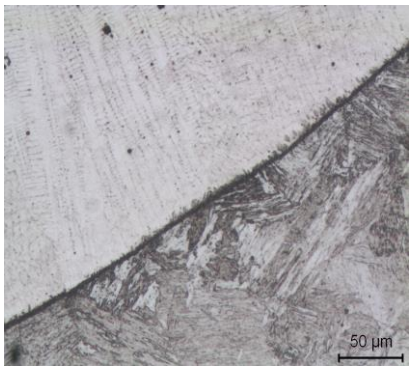
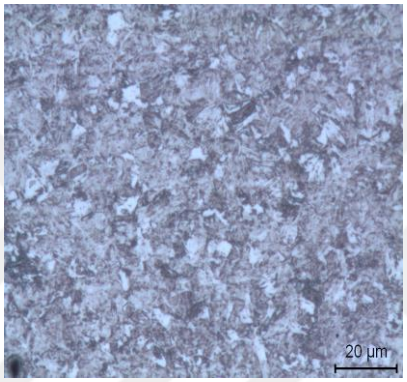
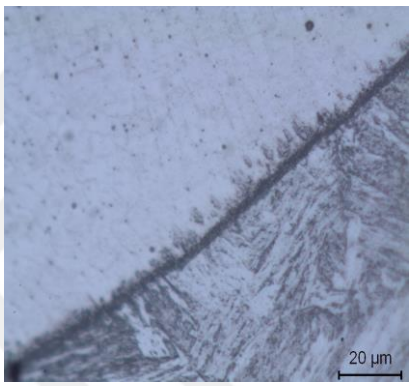
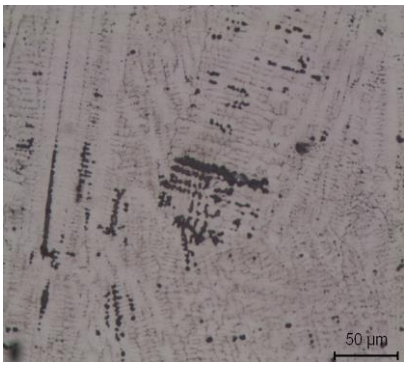
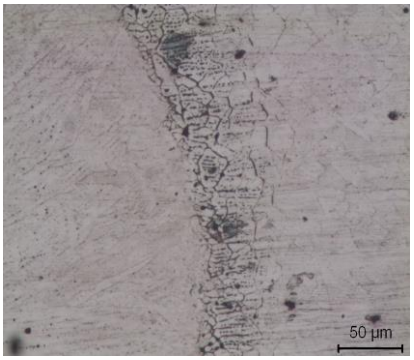
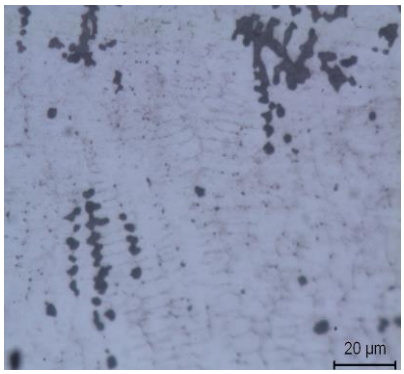
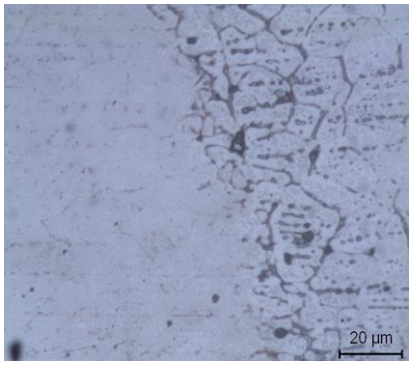
Tablo A.31: 25 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri.

25 PERİYOT 8,17 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

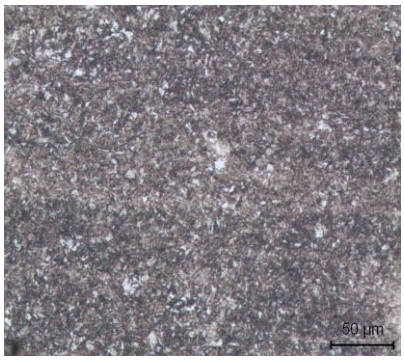
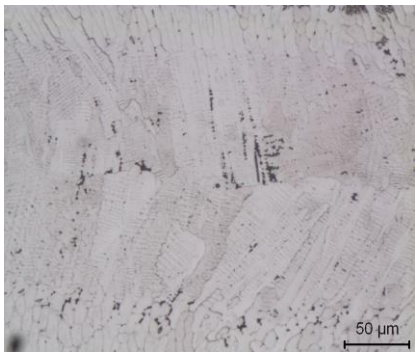
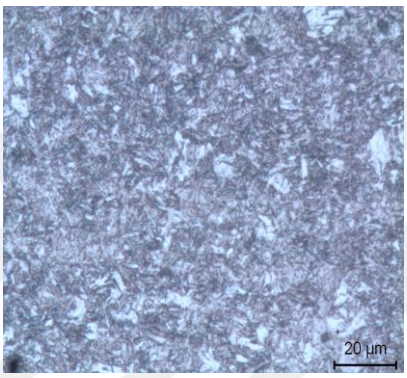
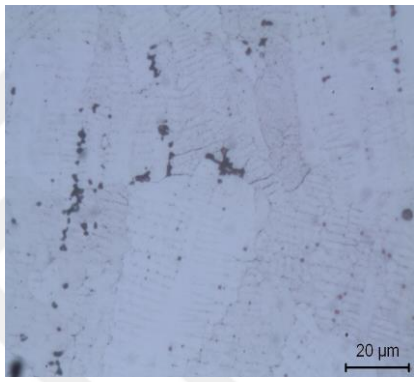
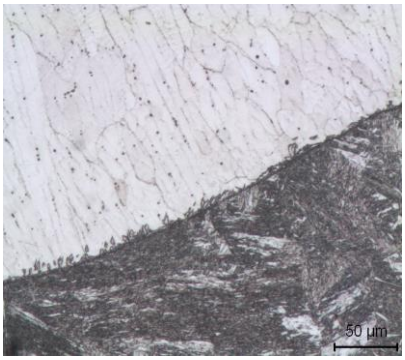
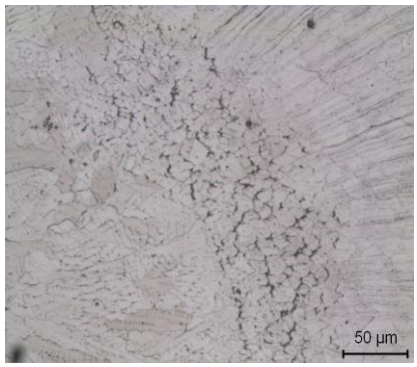
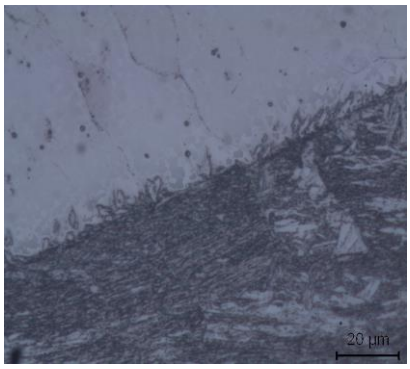
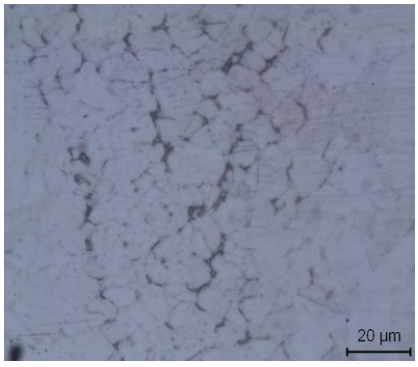
Tablo A.32: 25 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri.

25 PERİYOT 9,66 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

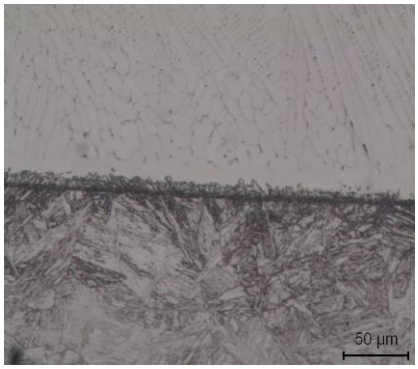
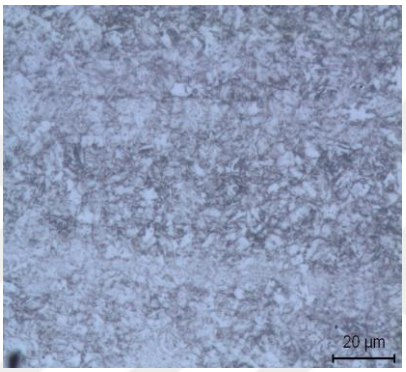
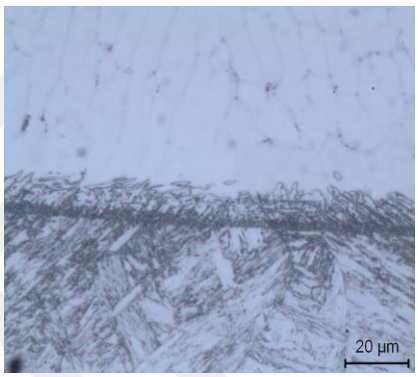
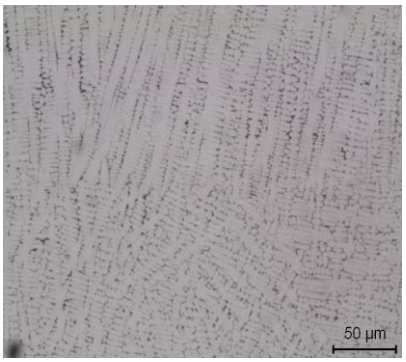
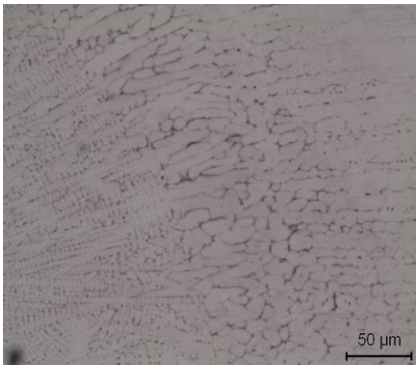
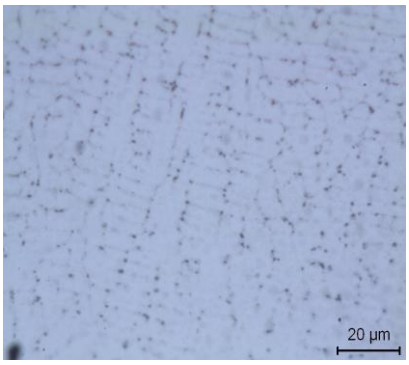
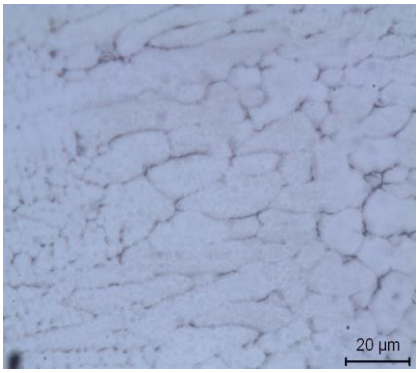
Tablo A.33: 25 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri.

25 PERİYOT 11,9 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

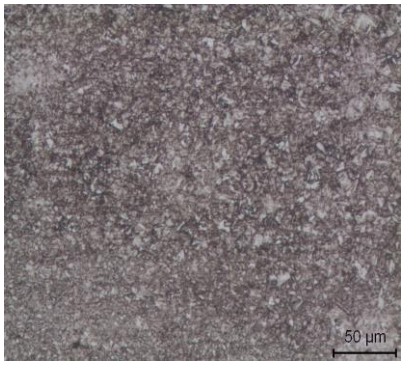
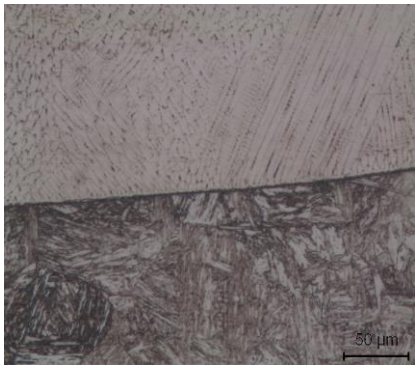
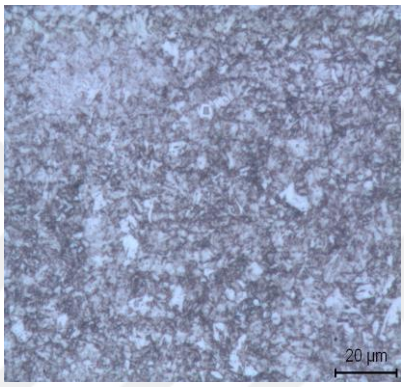
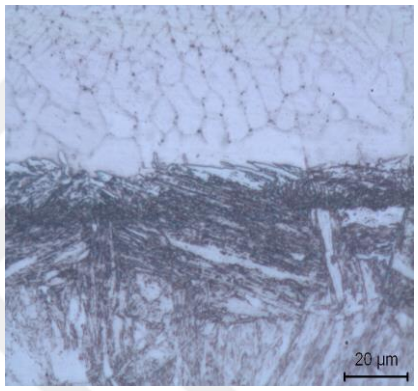
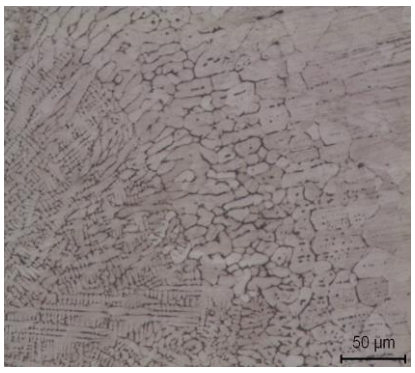
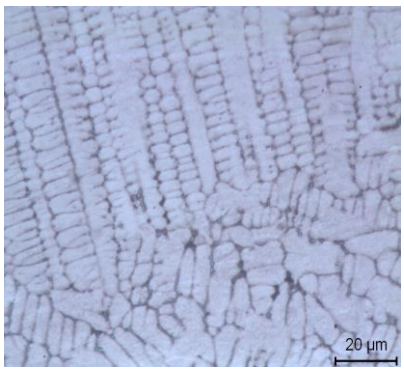
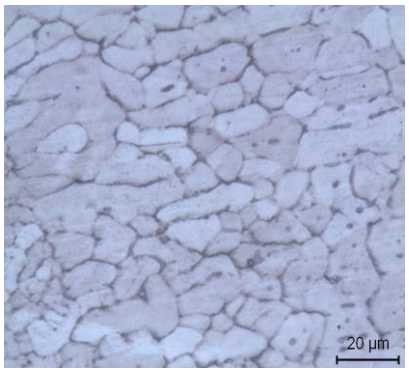
Tablo A.34: 25 periyot 13,5 kA mikroyapı görüntüleri.

25 PERİYOT 13,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

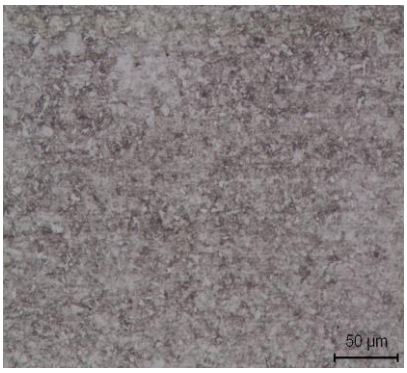
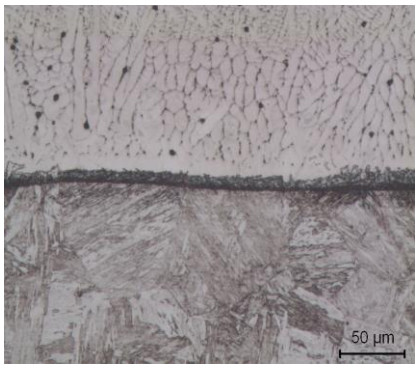
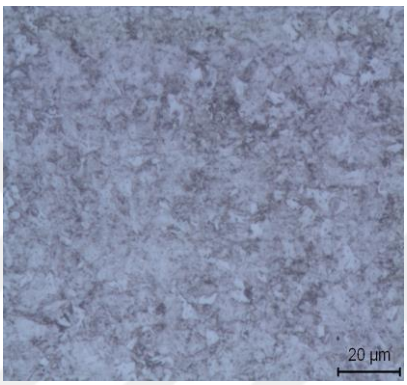
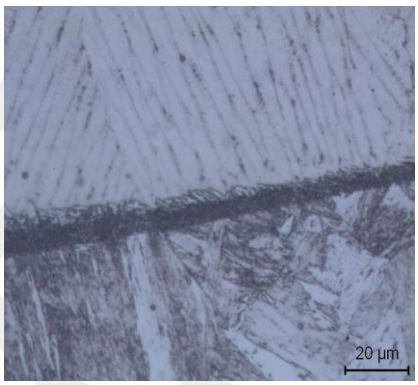
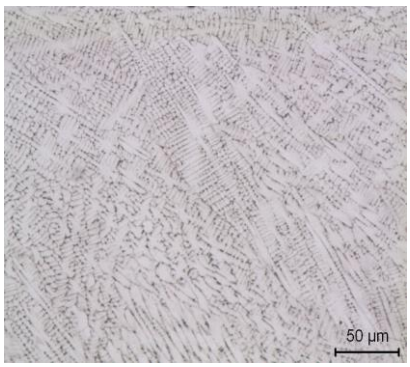
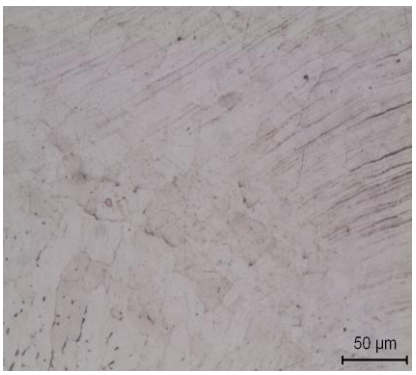
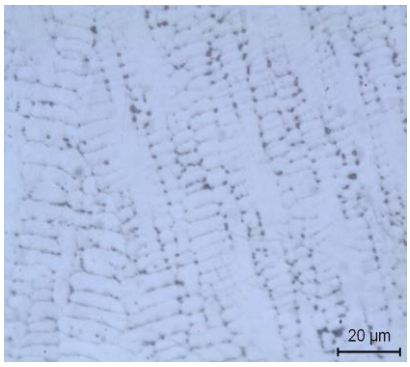
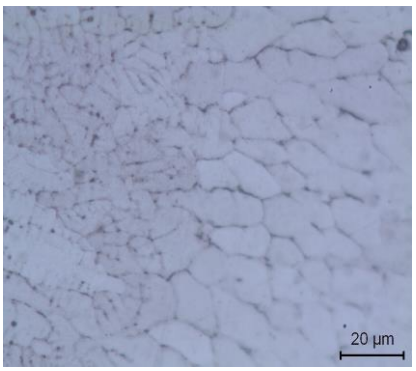
Tablo A.35: 30 periyot 6,33 kA mikroyapı görüntüleri.

30 PERİYOT 6,33 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

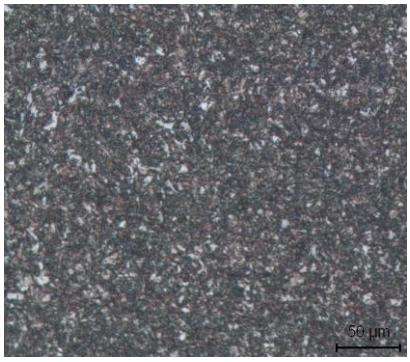
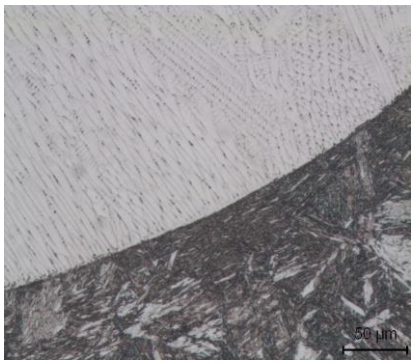
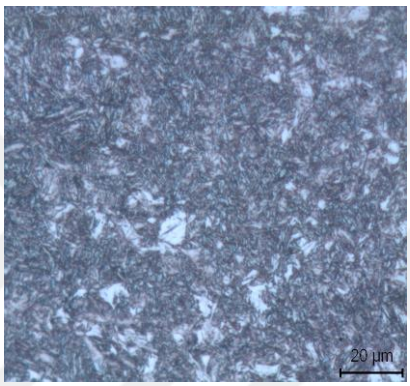
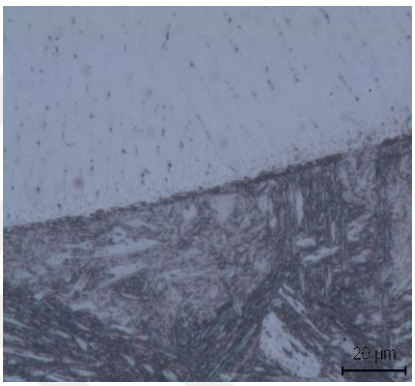
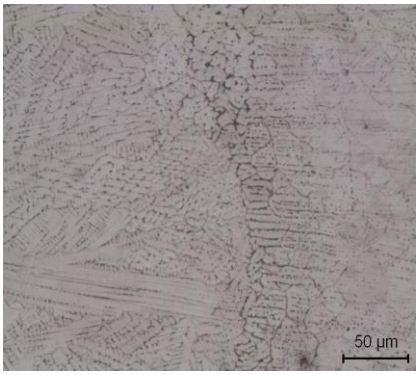
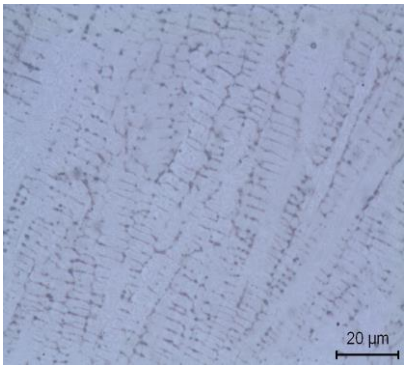
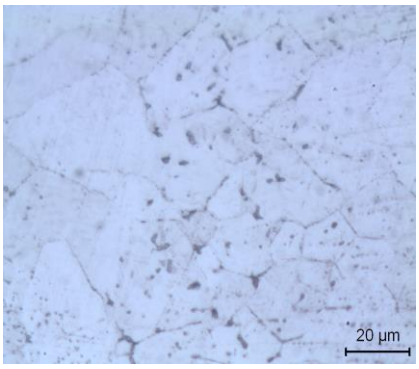
Tablo A.36: 30 periyot 7,27 kA mikroyapı görüntüleri.

30 PERİYOT 7,27 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

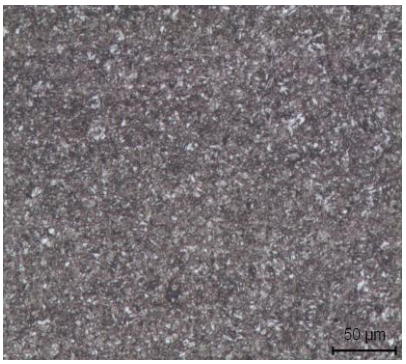
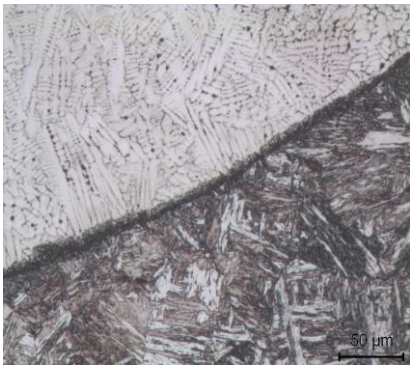
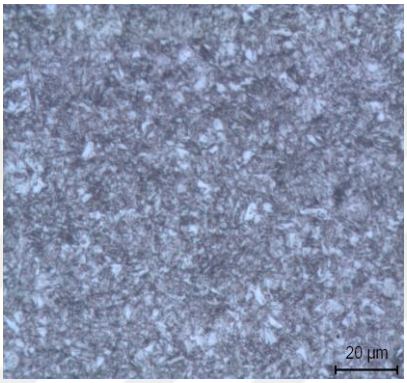
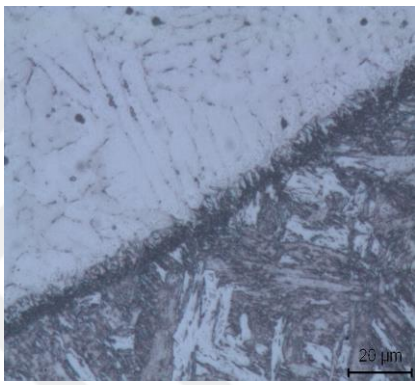
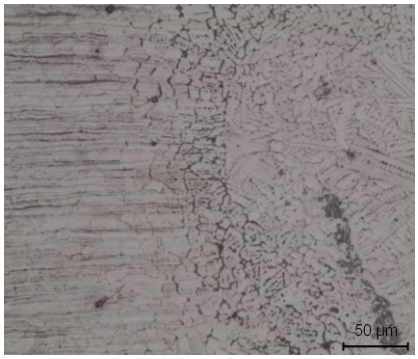
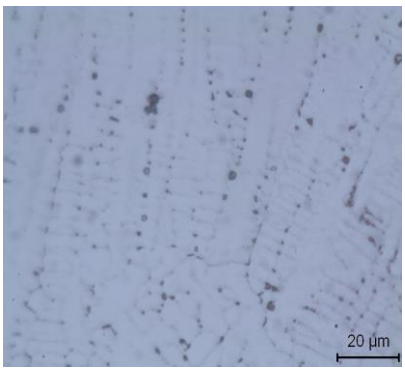
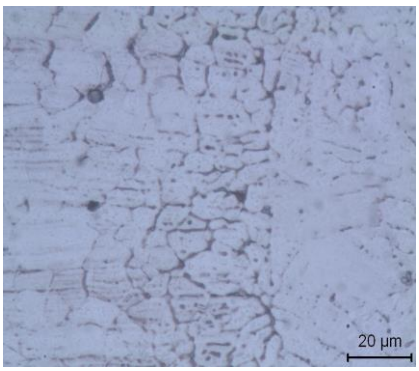
Tablo A.37: 30 periyot 8,17 kA mikroyapı görüntüleri.

30 PERİYOT 8,17 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

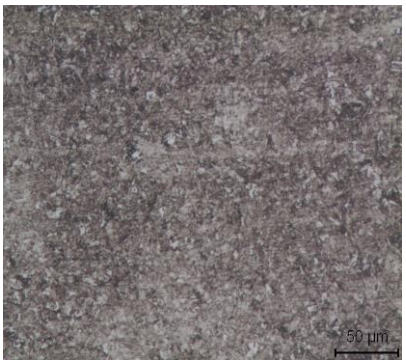
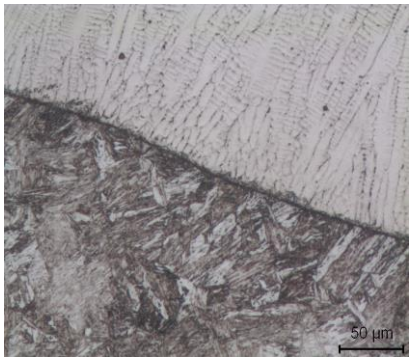
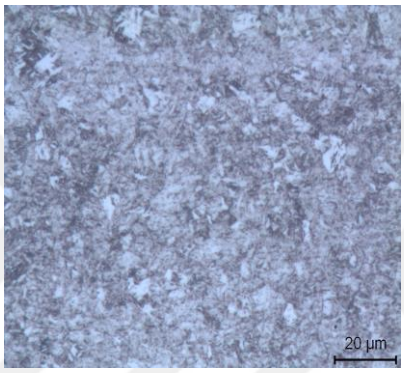
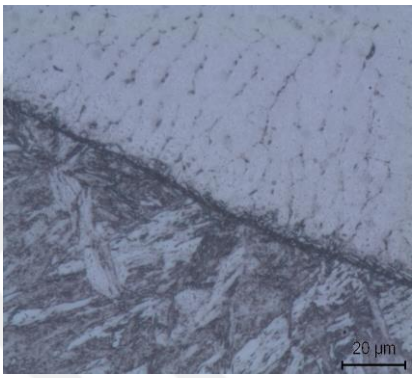
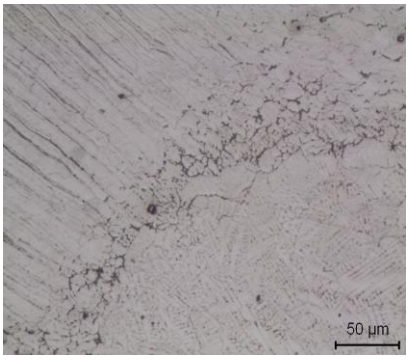
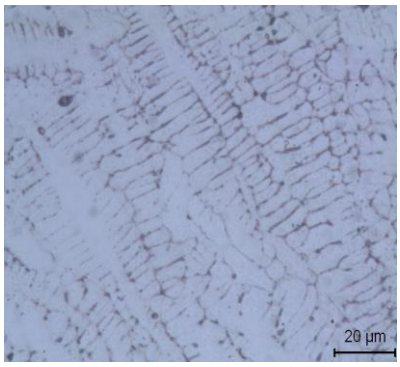
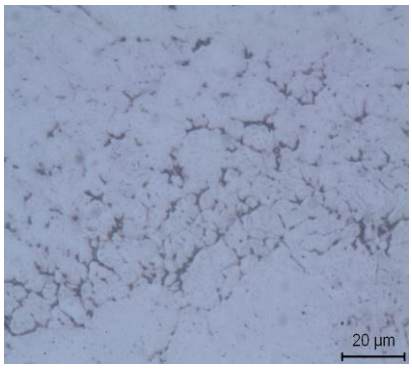
Tablo A.38: 30 periyot 9,66 kA mikroyapı görüntüleri.

30 PERİYOT 9,66 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

Tablo A.39: 30 periyot 11,9 kA mikroyapı görüntüleri.

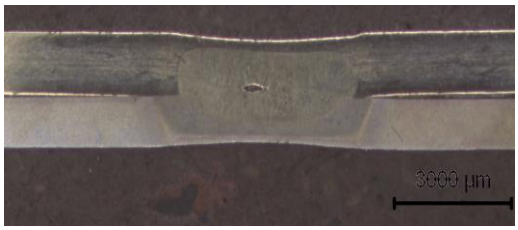
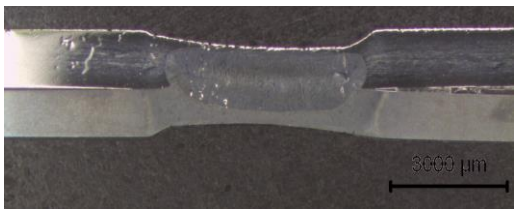
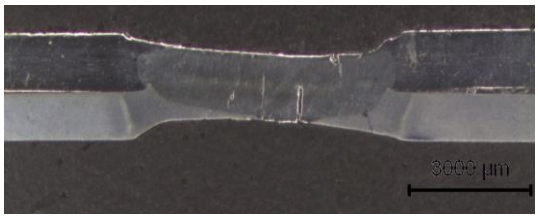
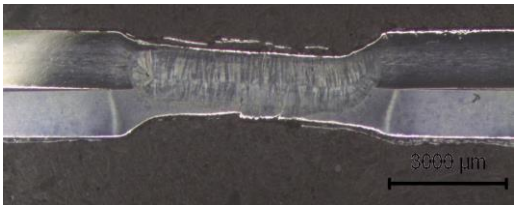
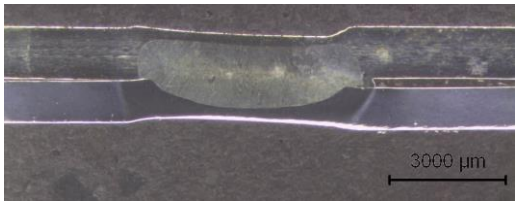
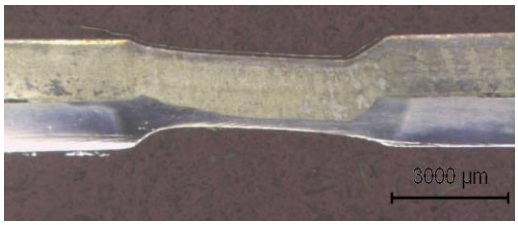
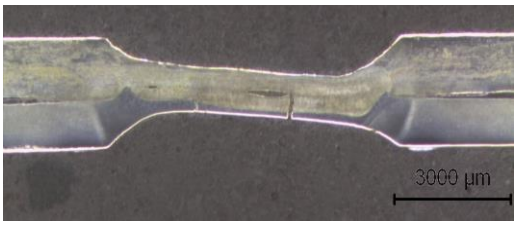
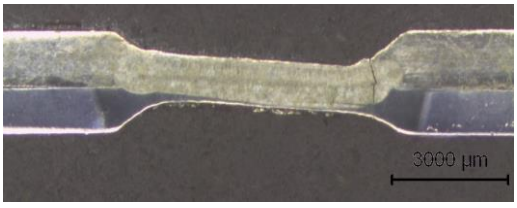
30 PERİYOT 11,9 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

Tablo A.40: 30 periyot 13,5kA mikroyapı görüntüleri.

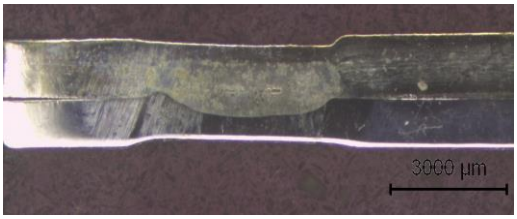
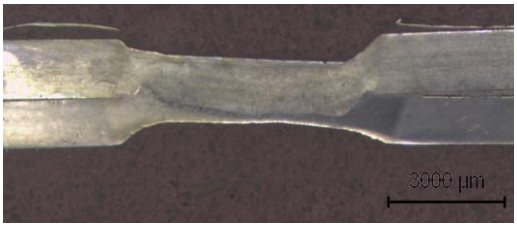
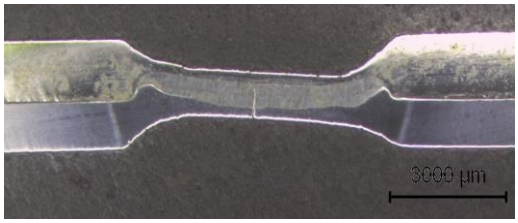
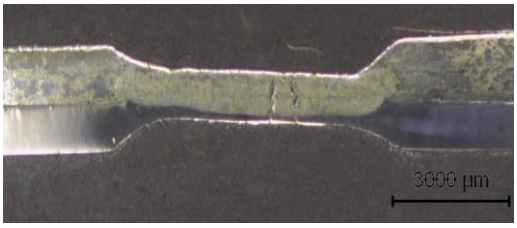
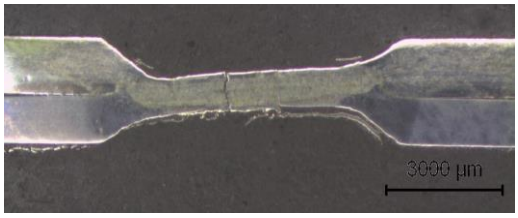
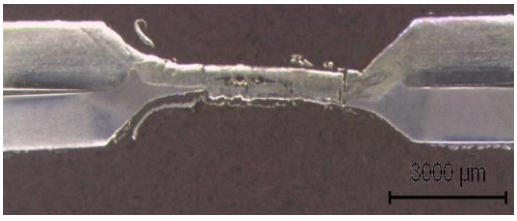
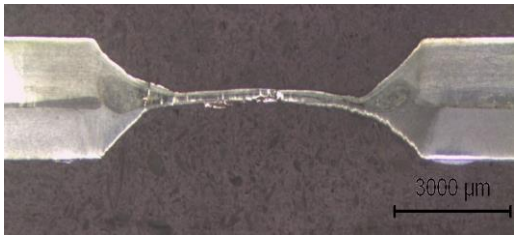
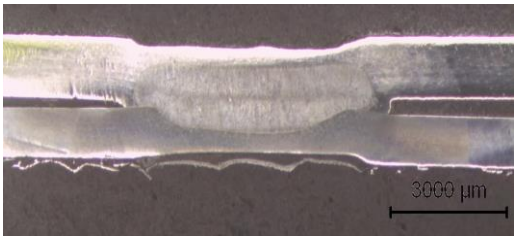
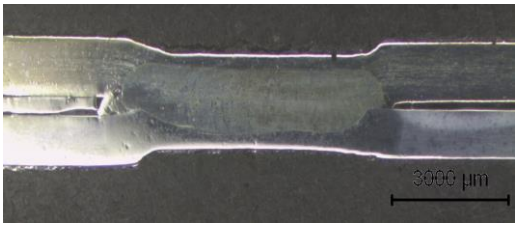
30 PERİYOT 13,5 KA		
BÜYÜTME	DP ITAB BÖLGESİ	DP ITAB-ÇEKİRDEK
x200		
x500		
BÜYÜTME	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK-TWIP ITAB
x200		
x500		

EK B. TWIP-DP bağlantılara ait makroyapı görüntüleri

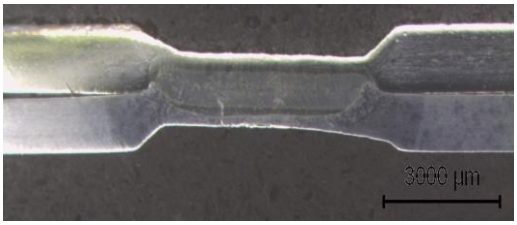
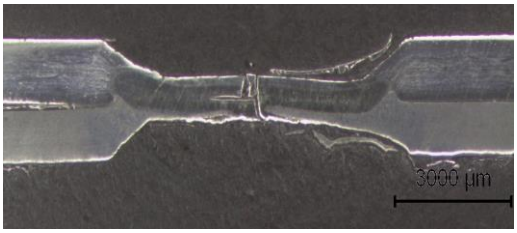
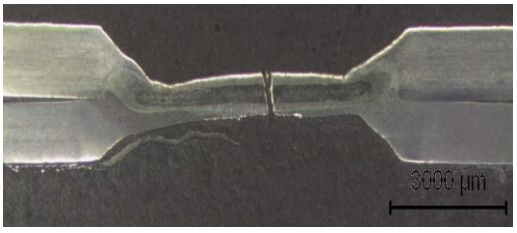
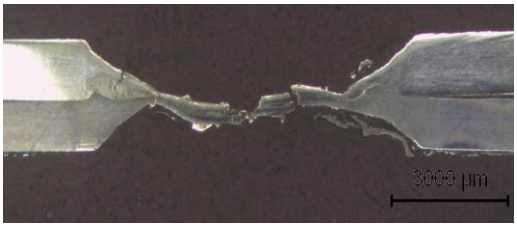
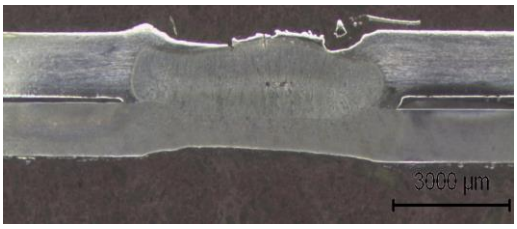
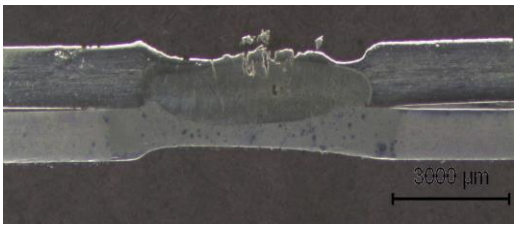
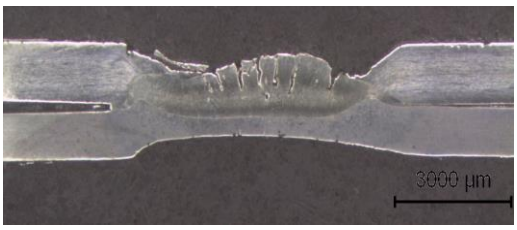
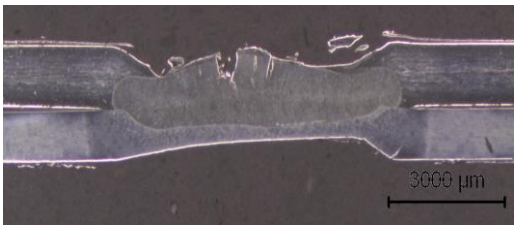
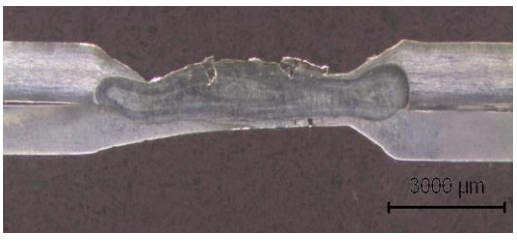
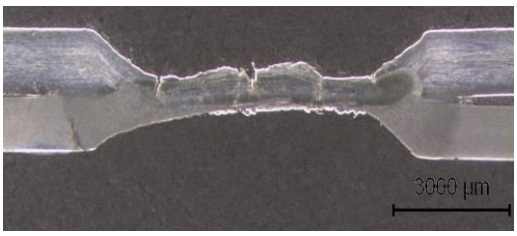
Tablo B.1: 5 periyot ve 10 periyot makroyapı görüntüleri.

5 periyot - 8,17 kA	5 periyot - 9,66 kA
	
5 periyot - 11,9 kA	5 periyot - 13,5 kA
	
5 periyot - 14,5 kA	5 periyot - 15,7 kA
	
10 periyot - 7,27 kA	10 periyot - 8,17 kA
	
10 periyot - 9,66 kA	10 periyot - 11,9 kA
	
10 periyot - 13,5 kA	10 periyot - 14,5 kA
	

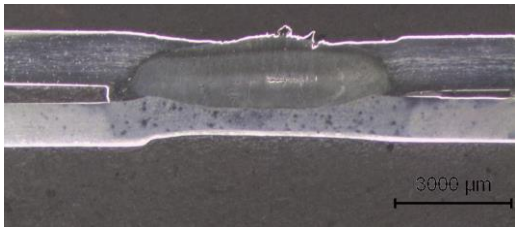
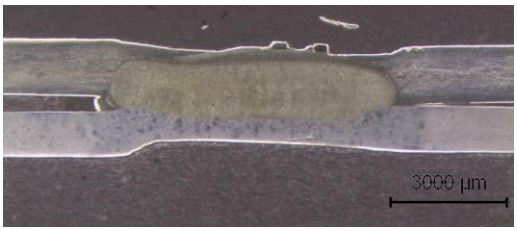
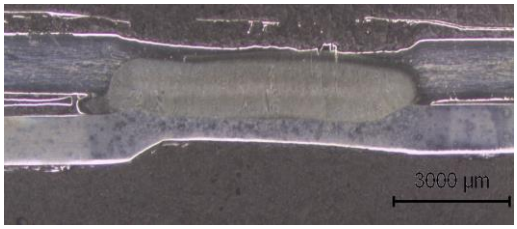
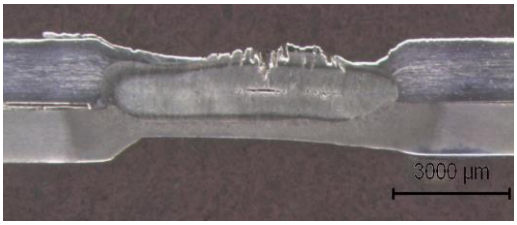
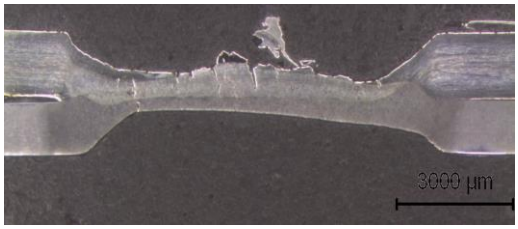
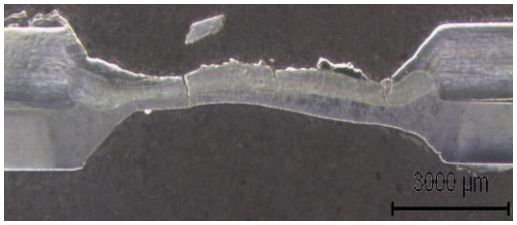
Tablo B.2: 15 periyot makroyapı görüntüleri.

10 periyot - 15,7 kA	15 periyot - 6,33 kA
	
15 periyot - 7,27 kA	15 periyot - 8,17 kA
	
15 periyot - 9,66 kA	15 periyot - 11,9 kA
	
15 periyot - 13,5 kA	15 periyot - 14,5 kA
	
15 periyot - 15,7 kA	20 periyot - 6,33 kA
	
20 periyot - 7,27 kA	20 periyot - 8,17 kA
	

Tablo B.3: 20 periyot ve 25 periyot makroyapı görüntüleri.

20 periyot - 9,66 kA	20 periyot - 11,9 kA
	
20 periyot - 13,5 kA	20 periyot - 14,5 kA
	
25 periyot - 6,33 kA	25 periyot - 7,27 kA
	
25 periyot - 8,17 kA	25 periyot - 9,66 kA
	
25 periyot - 11,9 kA	25 periyot - 13,5 kA
	

Tablo B.4: 30 periyot makroyapı görüntüleri.

30 periyot - 6,33 kA	30 periyot - 7,27 kA
	
30 periyot - 8,17 kA	30 periyot - 9,66 kA
	
30 periyot - 11,9 kA	30 periyot - 13,5 kA
	

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Erman FERİK

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 27.04.1987 Bursa

E-posta **:** ermanferik@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2011, Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Öğretmenliği Bölümü
- **Lisans** **:** 2016, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** **:** 2014, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** **:** 2017, Sakarya Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, İmalat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013-2014 yılları arasında Kütahya Dumlupınar Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı.
- 2019 yılında Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi'nde doktorasını tamamladı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Onar V., Ferik E., Acar İ., Şıkşık V., Varol F., Özsaraç U., Aslanlar S.** (Basımda). The Effect of Nugget Sizes on Tensile Peel Loading in Resistance Spot Welding of DP800 and TWIP950 Steel Sheets Used in Automotive Industry, *Acta Physica Polonica A*.