T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL ARAÇLARDA KULLANILAN DP1000HF-CP800 ÇELİK SACLARIN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN TESPİTİ

DOKTORA TEZİ

Melih KEKİK

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

Nisan 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL ARAÇLARDA KULLANILAN DP1000HF-CP800 ÇELİK SACLARIN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN TESPİTİ

DOKTORA TEZİ

Melih KEKİK

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 08/04/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Salim ASLANLAR	Başarılı
Üye: Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ	Başarılı
Üye: Doç. Dr. Nuri AKKAŞ	Başarılı
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Volkan ONAR	Başarılı
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY	Başarılı

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.

Melih KEKİK

08.04.2021

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca tecrübe, bilgi ve birikimlerinden yararlandığım, tezim boyunca beni her konuda en ince ayrıntısına kadar titiz bir şekilde bilgilendirip yönlendiren, çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Salim ASLANLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları için Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne ve ERMETAL A.Ş. Kalite Departmanı çalışanlarına ve müdürü Serdar AKTAŞ'a, BORÇELİK Ar-Ge Test Merkezi çalışanlarına ve sorumlusu Ömer YILDIRIM'a teşekkür ederim. Ayrıca Ak-Pres'te bulunan tüm ekip arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatımda maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyip motivasyonumu yukarıda tutmamı sağlayan, beni her konuda destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **i**

İÇİNDEKİLER ..... **ii**

KISALTMALAR ..... **v**

SİMGELER LİSTESİ ..... **vi**

TABLOLAR LİSTESİ ..... **vii**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **viii**

ÖZET ..... **xi**

SUMMARY ..... **xii**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**

BÖLÜM 2.
KOMPLEKS FAZLI ÇELİKLER **4**

BÖLÜM 3.
DP ÇELİKLERİ **12**

BÖLÜM 4.
ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI **21**

BÖLÜM 5.
MATERYAL VE METOT **25**
5.1. Deneysel çalışmaya genel bakış 25
5.2. Kullanılan Deney Malzemeleri 25
5.3. Deneysel Çalışma Kapsamında Malzemelerin Hazırlanması 26
5.4. Kullanılan Kaynak Makinesi ve Cihazlar 27
5.5. Kaynak Elektrotu 28
5.6. Deney Parametrelerinin Seçilmesi 28
5.7. Ön Test Sonrası Belirlenen Parametreler ile Deneylerin Yapılması 29

5.8. Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz-Çekme Deneyleri 31
5.9. Çekirdek boyut ölçümü ve Makro görüntülerin analizi 32
5.10. Optik Mikroskop görüntülerinin alınması 33
5.11. Mikrosertlik Değerleri Ölçümü 34
5.12. SEM ve EDS Analizleri 34

BÖLÜM 6.
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 36
6.1. Deneysel sonuçlara giriş 36
6.2. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Kaynak parametrelerinin Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz-Çekme Kuvvetine Etkisi 36
6.2.1. Kaynak akım şiddetinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi 38
6.2.2. Kaynak zamanının çekme-makaslama kuvvetine etkisi 39
6.2.3. Kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 40
6.2.4. Kaynak zamanının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 41
6.2.5. Kaynak akım şiddetinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi 41
6.2.6. Kaynak zamanının çapraz-çekme kuvvetine etkisi 42
6.3. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Çekirdek Boyutlarına Etkisi 44
6.3.1. Kaynak Zamanı ve Kaynak Akım Şiddetinin CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerindeki Kaynak Çekirdeğinin Çapına Etkisi 44
6.3.2. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki kaynak çekirdeğinin yüksekliğine etkisi 45
6.3.3. Kaynak Zamanı ve Kaynak Akım Şiddetinin CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerindeki Çekirdek Boyut Oranına Etkisi 49
6.3.4. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki elektrot dalma derinliğine etkisi 53
6.3.5. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki elektrot genişliğine etkisi 57
6.4. CP800 ve DP1000HF birleştirmelerinde kaynak parametrelerinin çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz-çekme kuvvetine etkisi 61
6.4.1. Çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi 61
6.4.2. Çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi 62
6.4.3. Çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi 64
6.4.4. Elektrot dalma derinliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi 65
6.4.5. Çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 67
6.4.6. Çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 68
6.4.7. Çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 70
6.4.8. Elektrot dalma derinliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 71
6.4.9. Çekirdek çapının çapraz-çekme kuvvetine etkisi 73
6.4.10. Çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi 74
6.4.11. Çekirdek boyut oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi 76
6.4.12. Elektrot dalma derinliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi 77
6.5. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Kaynak parametrelerinin Sertlik Değerine Etkisi 79
6.6. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Mikroyapı Görüntüleri ve Analizi 82
6.7. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde SEM Görüntüleri ve EDS Analizi 85

6.8. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Makroyapı Görüntüleri.....90

BÖLÜM 7.
KAYNAK GRAFİĞİ (WELD LOBE) 91

BÖLÜM 8.
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 92
8.1. Öneriler.....93

KAYNAKÇA 94
EKLER.....103

KISALTMALAR

ASTM	: The American Society for Testing and Materials
AWS	: American Welding Society
d_1	: Kaynak Çekirdek Çapı (mm)
d_2	: Kaynak Çekirdek Yüksekliği (mm)
Edd	: Elektrot Dalma Derinliği (mm)
EN	: European Standard
HV	: Hardness Vickers
I	: Kaynak Akım Şiddeti (A)
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
kA	: Kilo Amper
kN	: Kilo Newton
kVA	: Kilo Volt Amper
N	: Newton
MPa	: Mega Pascal
per	: Periyot
Q	: Kaynak Bölgesinde Üretilen Toplam Isı (joule)
s	: Malzeme Kalınlığı (mm)
SAE	: Society of Automotive Engineers
DP	: Çift Fazlı Sac (Dual Phase)
SEM	: Scanning Electron Microscopy
t	: Kaynak Süresi (s)
CP	: Kompleks Fazlı Çelik(Complex Phase)
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
ISO	: International Organization of Standardization

SİMGELER LİSTESİ

Hv	: Vickers
°C	: Santigrat Derece
γ	: Ostenit
σ	: Gerilme
μm	: Mikrometre

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 5.1: CP800 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (wt.-%) 25
Tablo 5.2: DP1000HF çeliğinin kimyasal kompozisyonu (wt.-%) 25
Tablo 5.3: CP800 ve DP1000HF çeliklerinin mekanik özellikleri 25
Tablo 5.4: Kaynak elektrotlarının kimyasal kompozisyonu ve özellikleri 28
Tablo 5.5: Çekme deneyi sonucunda oluşan hasar modları 32
Tablo 6.1: Testlerde kullanılmak üzere hazırlanmış numune sayıları 37
Tablo 6.2: CP800 ve DP1000HF birleştirmelerinde numune durum analizi 37
Tablo 6.3: ITAB ve kaynak çekirdeğinin farklı büyütmelerde mikroyapı görüntüleri ... 85
Tablo 6.4: Farklı parametlere ait bazı makroyapı görüntüleri 90

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1: CP Çeliğinin şematik mikroyapı gösterimi....4
Şekil 2.2: CP çeliğinin mukavemet-uzama grafiği....5
Şekil 2.3: Marşpiyel takviye sacı.....5
Şekil 2.4: CP Çeliğinin araç üzerindeki kullanım noktaları.....5
Şekil 2.5: CP üretim sıcaklığının şematik olarak gösterimi....6
Şekil 2.6: CP çeliği üretimindeki kritik tavlama sıcaklıkları diyagramı....7
Şekil 2.7: Soğuk haddelenmiş CP çeliklerindeki tavlama döngüleri.....7
Şekil 2.8: CP çeliğinin üretimdeki soğuma şeması.....7
Şekil 2.9: CP çeliğinde alaşım elementlerinin TTT diyagramına etkisi....8
Şekil 3.1: DP çeliğinin şematik mikroyapısı....12
Şekil 3.2: DP çeliği oluşumu şematik gösterimi.....13
Şekil 3.3: DP çeliği oluşumu mikroyapılı şematik gösterimi.....13
Şekil 3.4: DP çeliğinde gerçeklesen hasar modu....14
Şekil 3.5: DP çeliğinin araç üzerindeki kullanım yerleri....14
Şekil 4.1: Direnç nokta kaynağında oluşan direnç ve sıcaklıkların şematik gösterimi...22
Şekil 4.2: Kaynak akımı ve kaynak zamanı arasındaki ilişkinin şematik gösterimi....23
Şekil 5.1: Çekme-Makaslama deney numunesi şematik gösterimi....26
Şekil 5.2: Çekme-Sıyırma deney numunesi şematik gösterimi....26
Şekil 5.3: Çapraz-Çekme deney numunesi şematik gösterimi....26
Şekil 5.4: Işık Kaynak üretimi EDNK makinesi....27
Şekil 5.5: DENGESHA Elektrot kuvveti ölçme cihazı....27
Şekil 5.6: DENGESHA Kaynak akımı ölçme cihazı....28
Şekil 5.7: Kaynaklanmış ön test numuneleri....29
Şekil 5.8: Elektrik direnç nokta kaynağında uygulanan parametreler....30
Şekil 5.9: Çekme-Makaslama numuneleri....30
Şekil 5.10: Çekme-Sıyırma numuneleri....30
Şekil 5.11: Çapraz-Çekme Numuneleri....31
Şekil 5.12: Instron Çekme cihazı....31
Şekil 5.13: Çekirdek boyut ölçümü yapılan Nikon optik mikroskop....33
Şekil 5.14: Mikroyapı görüntü elde edilen Zeiss marka optik mikroskop....33
Şekil 5.15: Emcotest marka Mikrosertlik ölçüm cihazı....34
Şekil 5.16: SEM ve EDS analizinde kullanılan cihazlar....35
Şekil 6.1: Kaynak akım şiddetinin Çekme-Makaslama kuvvetine etkisi....38
Şekil 6.2: Kaynak zamanının Çekme-Makaslama kuvvetine etkisi....39
Şekil 6.3: Kaynak akım şiddetinin Çekme-Sıyırma kuvvetine etkisi....40
Şekil 6.4: Kaynak zamanının Çekme-Sıyırma kuvvetine etkisi....41
Şekil 6.5: Kaynak akım şiddetinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi....42
Şekil 6.6: Kaynak Zamanının Çapraz-Çekme Kuvvetine Etkisi....43
Şekil 6.7: Kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi....44

Şekil 6.8: Kaynak akım şiddetinin çekirdek çapına etkisi 45
Şekil 6.9: Kaynak zamanının CP tarafındaki Çekirdek Yüksekliğine olan etkisi..... 46
Şekil 6.10: Kaynak akım şiddetinin CP tarafındaki Çekirdek Yüksekliğine olan etkisi 46
Şekil 6.11: Kaynak zamanının DP tarafındaki Çekirdek Yüksekliğine olan etkisi 47
Şekil 6.12: Kaynak akım şiddetinin DP tarafındaki Çekirdek Yüksekliğine olan etkisi 47
Şekil 6.13: Kaynak zamanının toplam çekirdek yüksekliğine etkisi 48
Şekil 6.14: Kaynak akım şiddetinin toplam çekirdek yüksekliğine etkisi 49
Şekil 6.15: Kaynak zamanının CP800 tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi..... 50
Şekil 6.16: Kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi .. 50
Şekil 6.17: Kaynak zamanının DP1000HF tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi ... 51
Şekil 6.18: Kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi 51
Şekil 6.19: Kaynak zamanının toplam çekirdek boyut oranına etkisi..... 52
Şekil 6.20: Kaynak akım şiddetinin toplam çekirdek boyut oranına etkisi..... 53
Şekil 6.21: Kaynak zamanının CP800 tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi 54
Şekil 6.22: Kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi 54
Şekil 6.23: Kaynak zamanının DP1000HF tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi 55
Şekil 6.24: Kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi 55
Şekil 6.25: Kaynak zamanının toplam elektrot dalma derinliğine etkisi 56
Şekil 6.26: Kaynak akım şiddetinin toplam elektrot dalma derinliğine etkisi 56
Şekil 6.27: Kaynak zamanının CP800 tarafındaki elektrot genişliğine etkisi..... 57
Şekil 6.28: Kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki elektrot genişliğine etkisi..... 58
Şekil 6.29: Kaynak zamanının DP1000HF tarafındaki elektrot genişliğine etkisi 58
Şekil 6.30: Kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafındaki elektrot genişliğine etkisi . 59
Şekil 6.31: Kaynak zamanının toplam elektrot dalma derinliğine etkisi 60
Şekil 6.32: Kaynak akım şiddetinin toplam elektrot dalma derinliğine etkisi 60
Şekil 6.33: Kaynak zamanına bağlı çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi 61
Şekil 6.34: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi 62
Şekil 6.35: Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi 63
Şekil 6.36: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi 63
Şekil 6.37: Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi 64
Şekil 6.38: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi 65
Şekil 6.39: Kaynak zamanına bağlı elektrot dalma derinliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi 66
Şekil 6.40: Kaynak zamanına bağlı elektrot dalma derinliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi 66
Şekil 6.41: Kaynak zamanına bağlı çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi .. 67
Şekil 6.42: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 68

Şekil 6.43: Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 69
Şekil 6.44: Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 69
Şekil 6.45: Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 70
Şekil 6.46: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 71
Şekil 6.47: Kaynak zamanına bağlı elektrot dalma derinliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 72
Şekil 6.48: Kaynak akım şiddetine bağlı elektrot dalma derinliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi 72
Şekil 6.49: Kaynak zamanına bağlı çekirdek çapının çapraz-çekme kuvvetine etkisi ... 73
Şekil 6.50: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek çapının çapraz-çekme kuvvetine etkisi 74
Şekil 6.51: Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi 75
Şekil 6.52: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi 75
Şekil 6.53: Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi 76
Şekil 6.54: Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi 77
Şekil 6.55: Kaynak zamanına bağlı elektrot dalma derinliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi 78
Şekil 6.56: Kaynak akım şiddetine bağlı elektrot dalma derinliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi 78
Şekil 6.57: Sertlik ölçüm yönü 79
Şekil 6.58: 5 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi 80
Şekil 6.59: 10 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi 80
Şekil 6.60: 15 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi 80
Şekil 6.61: 20 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi 80
Şekil 6.62: 25 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi 81
Şekil 6.63: Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi 81
Şekil 6.64: 5850 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi 81
Şekil 6.65: 9610 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi 81
Şekil 6.66: 11800 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi 82
Şekil 6.67: 13400 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi 82
Şekil 6.68: 14600 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi 82
Şekil 6.69: CP çeliği ana metali x500 mikroyapı görüntüsü 83
Şekil 6.70: DP çeliği ana metali x500 mikroyapı görüntüsü 83
Şekil 6.71: CP çeliği ana metalinin SEM görüntüsü 86
Şekil 6.72: CP çeliğinden çekirdek yönüne ITAB bölgesinin SEM görüntüsü 87
Şekil 6.73: DP çeliği ana metalinin SEM görüntüsü 87
Şekil 6.74: Çekme-makaslama numunesine ait kopma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri 88
Şekil 6.75: Kaynak çekirdeği bölgesindeki EDS analizi 89
Şekil 7.1: CP800 ve DP1000HF çeliklerine ait Kaynak Grafiği (Weld Lobe) 91

YENİ NESİL ARAÇLARDA KULLANILAN DP1000HF-CP800 ÇELİK SACLARIN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN TESPİTİ

ÖZET

Bu çalışmada yeni nesil çelikler içerisinde otomotiv sektöründe kapı iç takviye sacı ve B-sütunu olarak sıklıkla kullanılan DP1000HF ve marşpiyel sacı olarak sıklıkla kullanılan CP800 çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi araştırılmıştır.

Elektrik direnç nokta kaynak yöntemindeki değişkenler kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti olarak belirlenip sabit çene basıncı, tutma ve ayrılma süresinde kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Değişken kaynak zamanları 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 periyot (1 periyot:0,02sn.), kaynak akım şiddetleri ise 5 kA ile 16 kA aralığında yer almakta olup yaklaşık 2 kA artırılarak uygulanmıştır.

Kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanı değişkenlerinin tüm mekanik testlerdeki etkisi belirlenmiş ve grafiklerle desteklenmiştir. Araştırmada mekanik test olarak çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz-çekme testi uygulanmıştır. Aynı zamanda optik mikroskop kullanılarak oluşan birleşmenin her bölgedeki makro ve mikroyapısı incelenmiştir. Mikroyapı analizine ek olarak SEM ve EDS analizi yapılıp ek olarak mikro-sertlikleri vickers cinsinden ölçülmüştür.

Sonuç olarak DP1000HF ve CP800 çeliklerinin birleştirmeleri incelendiğinde herhangi bir sorunla karşılaşılmamış, birleştirmelerin uygulanabilirliği gösterilmiştir. Yapılan tüm analizler sonucunda optimum kaynak aralığını gösteren kaynak grafiği weld lobe elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: DP çelikleri, CP çelikleri, Elektrik Direnç Nokta Kaynağı, AHSS.

DETERMINATION OF FAILURE MODE IN ELECTRIC RESISTANCE SPOT WELDING OF DP1000HF-CP800 STEEL SHEETS USED IN NEW GENERATION VEHICLES

SUMMARY

In this study, the combination of DP1000HF steels, which are frequently used as door reinforcement steel and B-pillars in the automotive industry, and CP800 steels, which are frequently used as sill plates, among new generation steels, were investigated by electric resistance spot welding method.

The variables in the electric resistance spot welding method were determined as welding time and welding current intensity, and the welding process was performed in the fixed jaw pressure, holding and separation time. Variable welding times are 5, 10, 15, 20, 25 and 30 periods (1 period: 0.02sec.), Welding current intensities are between 5 kA and 16 kA and are applied by increasing approximately 2 kA.

The effect of welding current intensity and welding time variables in all mechanical tests was determined and supported with graphics. Tensile-shear, pull-peel and cross-pull tests were used as mechanical tests in the study. At the same time, the macro and microstructure of the merger in each region was examined using an optical microscope. In addition to microstructure analysis, SEM and EDS analysis were performed and additionally micro-hardness was measured in terms of vickers.

As a result, when joining of DP1000HF and CP800 steels were examined, no problem was encountered and the applicability of joints was shown. As a result of all the analyzes performed, the weld lobe chart showing the optimum welding range was obtained.

Keywords: DP steels, CP steels, Electric Resistance Spot Welding, AHSS.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde günümüzde oluşan yüksek güvenlik ihtiyaçlarını karşılamak ve son kullanıcıdan gelen talepleri gerçekleştirebilmek için her konuda yoğun bir şekilde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların arasında her zaman can güvenliği ile ilgili konular ön plana çıkmaktadır. Araç içerisindeki can güvenliğini sağlamak adına yapılan çalışmalarda, gerçek darbe esnasındaki karoser davranışına yaklaşmak için çekme-makaslama, çekme-sıyırma, çapraz-çekme testleri vb. deneyler yapılmaktadır.

Günümüzde son kullanıcıdan gelen talepleri karşılamak da pazarda yerini korumak isteyen otomobil üreticilerinin yükümlülükleri arasındadır, son kullanıcının talep ettiği diğer bir konu uzun ömürlülük ve konfordur. Uzun kullanım sürelerine ulaşılmak istenirken otomotiv endüstrisinin üzerinde durduğu ilk adım saclardaki korozyon dirençlerini iyileştirmek ve konfor iyileştirmek için de bağlantıları güçlendirmektir.

Otomobil üreticilerinin sağlamak zorunda olduğu bir diğer yükümlülük ise karbon salınım değerlerini düşük tutmaktır. Çevresel duyarlılığın küresel boyutta giderek değer kazandığı günümüz şartlarında ise son kullanıcı tercihlerini etkileyebilecek olan bu konuda yapılan çalışmalar araç karoserinde kullanılan çelik sacların giderek incelmesine yol açmıştır [1]. İncelen sacların mukavemet değerlerinin de arttırmak için düşük alaşım yüksek mukavemetli (HSLA) çelikler üretilmiştir. Bununla birlikte uzun süren araştırmalar ile geliştirilmiş yüksek mukavemetli yeni nesil çelikler (AHSS) ortaya çıkmıştır [2].

Endüstride bir talep karşılanırken üreticinin uzun süre çalıştığı konulardan en önemlisi ürünün piyasa rekabetini güçlendirmek için ekonomik olmasıdır [3]. AHSS grubundaki çelikler ilk başlarda yüksek maliyet gerektirse de geliştirmeler sonucunda her araç üzerinde kullanılabilir seviyelerdedir [4]. Son yıllarda karoser hafifletme kapsamındaki çalışmalar ile araç üzerinde AHSS kullanım miktarı giderek artmaktadır. AHSS çelikleri kompleks yapılı, özelleştirilmiş, dikkatle seçilmiş kimyasal bileşimlere sahip ve

bünyesinde çoklu mikroyapı barındıran, hassas ısıtma ve soğutma prosesleriyle üretilmiş çeliklerdir [5].

Uluslararası Motorlu Araçlar Üreticileri Organizasyonu'nun 2017 yılında açıkladığı rakamlara göre dünyada her yıl yaklaşık 97 milyon araç üretilmekte ve her araç üzerinde yaklaşık 900kg çelik bulunmaktadır [6]. Bu rakam araç ağırlığının yaklaşık %65'ine denk gelmektedir yani ağırlık azaltılması, yakıt tüketimi ve karbon emisyonundaki rolü büyüktür. AHSS ve UHSS grubu içerisinde otomotiv üreticilerinin en çok tercih ettiği çelikler ise; DP (Dual Phase), CP (Complex Phase), TRIP (Transformation Induced Plasticity), TWIP (Twinning-Induced Plasticity), MS (Martensitic Steel), IF (Interstitial Free), Hot-Formed(HF)'dir [7]–[11].

DP (Dual Phase) çeliklerin tercih edilme nedeni yüksek enerji absorbsiyonu ile mükemmel çarpışma bölgesi oluşturmasıdır. Bunu sağlayan ise ferrit matrisi içerisindeki martenzit yapısıdır [12]. Martenzitik (MS) ve Boronlu Preste Sertleştirilmiş (PHS) çelikler kadar yüksek bir dayanımına sahip olduğu ve yolcu güvenliğinde de aynı oranda başarılı olduğu görülmüştür. 1000MPa üzeri dayanıma sahip olabilen DP Çeliği, UHSS sınıfında özel alaşımlı ve termo-mekanik işlenmiş olarak yüksek dayanım ve sünekliği birlikte sunabilen, yüksek birleşme verimliliği ve düşük maliyet sunduğundan çok verimli bir çeliktir [13].

CP (Complex Phase) çelikleri, ismini de taşıdığı üzere oldukça kompleks mikroyapıya sahip olan özelleştirilmiş UHSS sınıfı bir çelik türüdür. Beynit ve ferrit matrisi içindeki kalıntı östenit ve perlit mikroyapısına sahip olan CP çeliğinin en önemli özelliği darbe altındaki yüksek enerji absorbe edebilmesidir. Dünyanın en saygın otomotiv yayınlarından olan World Auto Steel'in Geleceğin Çelik Araçları araştırmaları kapsamında yayınlanan hafif ve düşük karbon emisyonuna sahip araçların Faz 2 sonuç raporunda CP çeliğinin karoser üzerindeki yanal darbeler için kullanılan Rocker Sub-System'in en önemli malzemesi olduğu ve bu sayede tüm çarpışma testlerinden beş yıldız almayı başardığı kanıtlanmıştır [14].

Otomobil üretiminde en yaygın kullanılan birleştirme yöntemi olan kaynak, uygulama kolaylığı ve çeşitliliği sayesinde vazgeçilmezdir. Kaynak yöntemleri arasında karoser üretiminde en çok kullanılan yöntem Elektrik Direnç Nokta Kaynağı (EDNK)'dır. En büyük avantajı çok hızlı olması, ekstra parça gerektirmemesi ve seri üretime

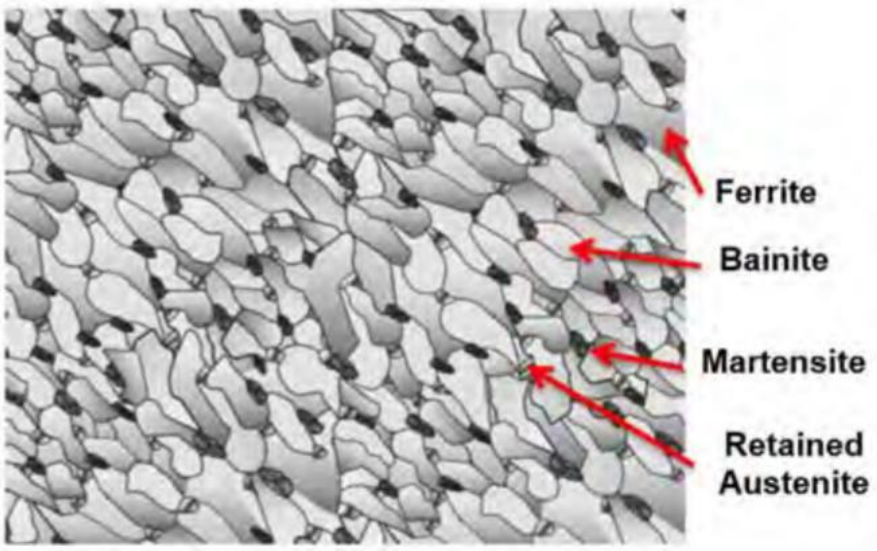
uygunluğudur [15]. Günümüzde bir araç üzerinde yaklaşık olarak 3000-6000 arası nokta kaynağı bulunmaktadır [16].

Arka süspansiyon braketleri, marşpiyel takviye sacları, çamurluk kirişleri ve çarpışma traverslerinde kullanılan CP800 ile yan direk (B-pillar), koltuk rayları ve kapı takviye sacları gibi kritik öneme sahip noktalarda kullanılan DP1000HF saclarının elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesine literatürde rastlanmamıştır.

Bu çalışmada kullanılan CP800 ve DP1000HF çeliklerin üretim hattının en yaygın yöntemi olan elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynaklanabilirliği çalışılmıştır. Bu birleştirmenin amacı iki sac malzemenin birlikte kullanılması durumlarında uygulanacak optimum kaynak değerlerini göstermek ve bu birleşim noktasındaki çekme; makaslama, sıyırma ve çapraz-çekme testleri ile mekanik özellikleri grafiklerle gösterilecektir. Mikroyapı, SEM ve EDS analizleri gibi görüntüleme teknikleri ile bağlantının sağlıklı olup olmadığı araştırılmıştır.

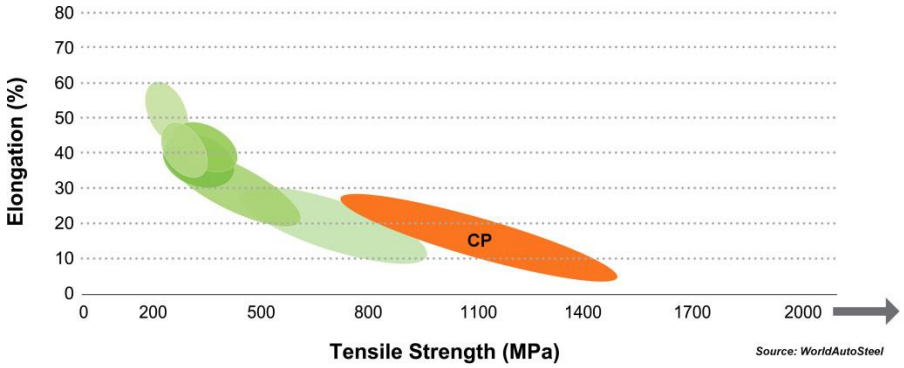
BÖLÜM 2. KOMPLEKS FAZLI ÇELİKLER

Kompleks Fazlı (CP) çelik, esasen çok fazlı bir mikroyapı sunduğu için geleneksel çeliklerden farklılaşan gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler arasında yer almaktadır [17]. Fazların bu bir arada bulunması, yüksek gerilme mukavemeti ve yüksek uzama gibi gelişmiş mekanik özellikleri sağlamaktadır. CP çeliği, ferritik/beynitik bir matris, martenzit ve küçük östenit adaları ile çok hassas bir mikroyapıya sahiptir [18].



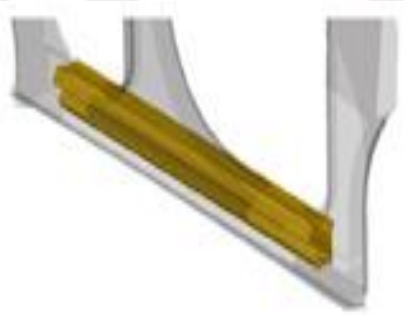
Şekil 2.1: CP Çeliğinin şematik mikroyapı gösterimi

Fazlar arasında dağılmış ince çökeltilerle birlikte dağılmış olarak bulunan sert fazların ve daha düşük sertlikteki fazlarının çok bileşenli ve çok özel bir mikro yapısı ile kompleks fazlı çelik, mukavemet ve süneklik açısından mükemmel özellikler sağlar. Ti ve Nb gibi alaşım elementleriyle mikroyapı kontrolünü tane incelterek ve yeniden kristalleşmeyi geciktirerek gerçekleştirmektedir. Bu yöntemle iyileştirilmiş uzamasıyla CP çeliğinin uzama grafiği Şekil 2.'de gösterilmektedir [19].



Şekil 2.2: CP çeliğinin mukavemet-uzama grafiği

CP çeliği araç üzerinde; şasi bileşenleri, travers, B-sütunu takviye sacı, arka süspansiyon braketi, arka tampon takviye sacı, çamurluk kirişleri ve darbe anında kritik öneme sahip marşpiyel takviye sacı olarak kullanılmaktadır [19][20]. Otomotiv üreticileri araç karoserini darbe esnasında ön-arka tamponlar ve çarpışma traversleriyle büyük ölçüde korumaktadır [21]. Karoserin en çok takviyeye ihtiyaç duyduğu nokta tampon koruması olmadığından B-sütunu ve marşpiyel saclarındaki takviye elemanlarıdır[22]. Bu noktada yüksek enerji absorbsiyonu ve mukavemet değerleriyle Şekil 3. Ve Şekil 4.'te gösterildiği gibi CP çeliği yer almaktadır [23].

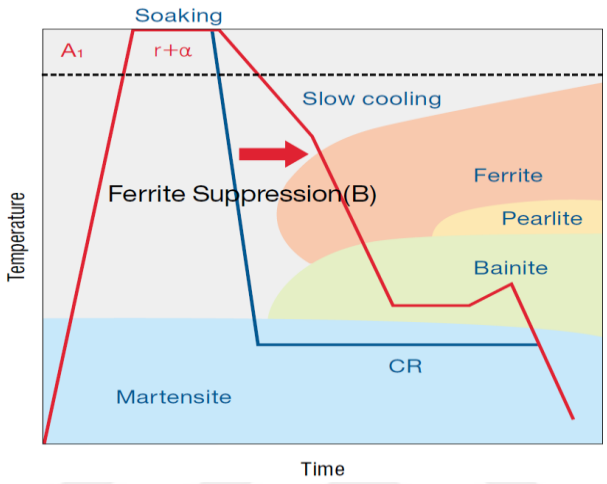


Şekil 2.3: Marşpiyel takviye sacı.



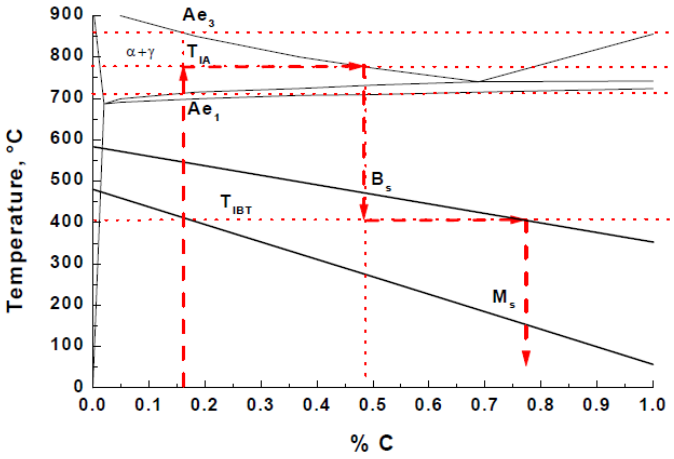
Şekil 2.4: CP Çeliğinin araç üzerindeki kullanım noktaları.

Kompleks fazlı çeliği oluşturan özelleşmiş mikroyapılarını oluşturmak için gerçekleştirilen üretimin zamana bağlı sıcaklık eğrisi şematik olarak Şekil 2.5.'de gösterilmektedir. CR olarak gösterilen soğuk hadde CP çeliğinin üretimi için kritik sıcaklığın üzerine çıkıldıktan sonra hızlı soğutma ile daha fazla martenzit daha az ferrit ve kalıntı östenit oluşturulması hedeflenmiştir [24].



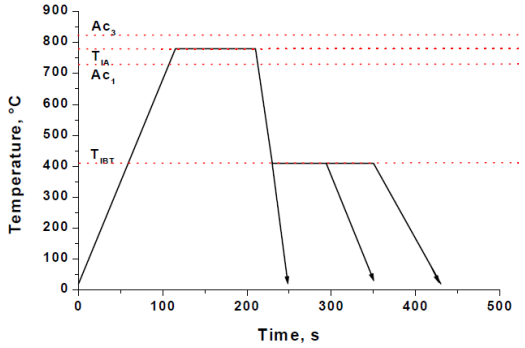
Şekil 2.5: CP üretim sıcaklığının şematik olarak gösterimi

Şekil 2.6'da gösterilen Fe-C diyagramında ferrit hacim oranının ve karbon içeriğinin, kritik tavlama (IA) sıcaklığı ve tavlama süresi tarafından kontrol edildiği görülmektedir [25]. Soğutma ve bekletme sırasında, kritik östenitin bir kısmı beynite dönüşür. Beynitin hacim oranı, östenit içindeki karbon içeriğini ve dolayısıyla beynit başlangıç (Bs) sıcaklığını ve izotermal beynit dönüşümü (IBT) sıcaklığını ve süresini belirleyen IA sıcaklığının bir fonksiyonudur. Sonraki oda sıcaklığına soğutma sırasında martenzit oluşur ve bir miktar östenit dönüştürülmeden kalabilir ve mikroyapıda görülen kalıntı östenit bu aşamada ortaya çıkmaktadır [26].

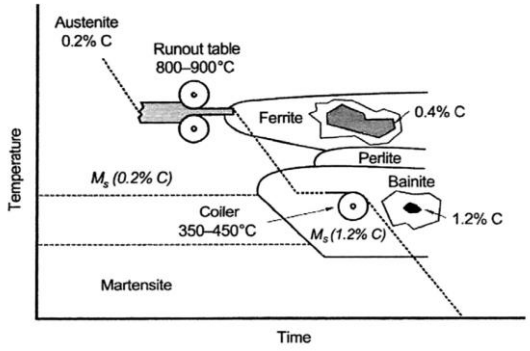


Şekil 2.6: CP çeliği üretimindeki kritik tavlama sıcaklıkları diyagramı

Soğuk haddelenmiş CP çeliklerindeki istenen mikroyapıya göre uygulanan tavlama döngüleri şematik olarak Şekil 2.7.'de gösterilmektedir. Üretim hattındaki CP çeliğinde soğumayla gerçekleşen mikroyapıları gösteren diyagram Şekil 2.8.'de gösterilmektedir [27].

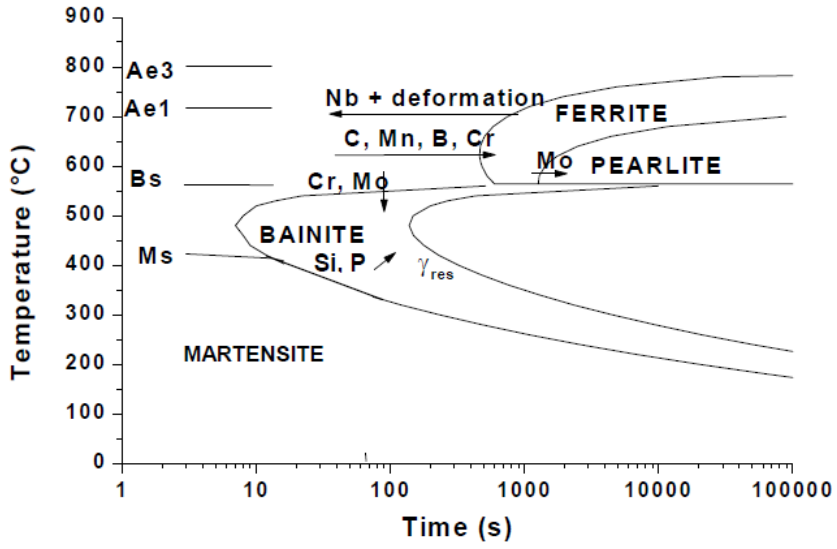


Şekil 2.7: Soğuk haddelenmiş CP çeliklerindeki tavlama döngüleri.



Şekil 2.8: CP çeliğinin üretimdeki soğuma şeması.

Dünyanın önde gelen çelik üreticileri CP çeliğini özelleştirmek için alaşım elementi olarak Mn, B, Cr, Nb, Mo, Si ve P gibi birçok element tercih etmektedir. Bu alaşım elementlerini kullanmaktaki asıl amaç zaman sıcaklık dönüşüm diyagramındaki ferrit, perlit, beynit ve östenit geçişlerini kontrol altına alarak doğru mikroyapıyı elde etmektir [28]. Örneğin; C, Mn, B ve Cr elementlerin oranı çoğaldığında yapının ferrit oranı artmaktadır. Soğuk haddelenmiş CP çeliğine alaşım elementlerinin etkisi kritik dönüşüm sıcaklıkları ile birlikte Şekil 2.9.'da gösterilmektedir [29].



Şekil 2.9: CP çeliğinde alaşım elementlerinin TTT diyagramına etkisi

Çalışma kapsamında yapılan literatür araştırmasında kompleks fazlı çelikler ile elektrik direnç nokta kaynağı tekniği kullanılarak yapılan çalışmaya rastlanmamıştır. Fakat otomotiv sektöründe benzer konuda çalışmalar olduğu ve gerek aynı malzeme gerekse benzer teknikler ile yapılan çalışmalara göre;

Yapılan çalışmada Baoshan Iron & Steel Company tarafından üretişmiş 3,5mm kalınlığındaki sıcak haddelenmiş CP800 çeliğinden hazırlanan 2 numune için %0-4-8-12 olarak ön-gerinim uygulanmış ve sonrası çekme, yorgunluk gibi davranışları araştırılmıştır. Toplamda 4 adet numune üzerinden yürütülen çalışmada diğer 2 numune için bu uygulanan ön-gerinimler sonrasında tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. %0 ön-gerinim uygulanmış numunede tavlanmamış numuneye oranla tavlanan numunedeki ferrit miktarı oldukça artmış bu sayede çekme ve tokluk kabiliyetinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Beynit/temperlenmiş martenzit ve martenzit/kalıntı östenit içeriği

tavlama öncesi %62 olarak ölçülmüşken tavlama ile bu oran %68 olarak gerçekleşmiştir. Bu orana benzer oranlar diğer tüm tavlanan numunelerde gözlemlenmiştir ve sonuçlara göre tavlamanın akma-çekme dayanımı ve uzama oranını %8 ön-gerinim miktarına kadar arttırdığı fakat %12'de tekrar düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir [30].

Yapılan bu çalışmada CP800 ve DP780 çeliklerine hole-expansion (delik genişletme) ve hole-tension (delik gerilimi) testi uygulanmış, çatlak oluşumu incelenmiştir. Delik delme işlemi 9,5mm çapındaki pilot delik ile başlanıp 10mm çapındaki esas yük uygulanmasıyla gerçekleşmiştir. Bu işlemin amacı ideal delik oluşabilmesi için deliğinin istenen boyuta getirilmeden önceki aşamada parlatma yapılmasıdır. Delikler delindikten sonra bu köşelerin görüntüleri SEM ile incelenmiş ve çatlak ilerleyişi gözlemlenmiştir. Her iki çelik için de gerçekleştirilen bu işlem sonrasında delik etrafında oluşan çatlardaki ilerleyiş ve oluşum dikkatle incelenmiştir. Sonuç olarak CP800 ve DP780 çeliğinin birbirine çok benzer çatlak ilerleyişi gözlemlendiği için delik genişletme kabiliyetleri içerdikleri martenzit yapıdan dolayı benzer olduğu kanıtlanmıştır [31].

Yapılan çalışmada Stahl Linz GmbH, Austria üretimi 1,2mm kalınlığında benzer kimyasal özelliklere sahip CP800 ve DP800 çelik sacı ile çalışılmıştır. LePera, Beraha I ve Kalling I dağlama yöntemleriyle çeşitli renkli mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Bunun nedeni ise optik mikroskop altında ferrit ve martenzit matrisinde ikincil faz olan beynit ve kalıntı östenit yapıları görebilmektir. Hole-expansion (delik genişletme) deneyi konik panç ile 60 derece açıyla gerçekleştirilmiştir. Delik delme hareketi çatlak oluşumunda bitmek üzere gözlemlenmiştir. Delikte oluşturulan çatlak incelendikten sonra SEM görüntülerinde CP800 çeliğinin daha sünek özellik göstererek çatlak oluşumunu geciktirdiği gözlemlenmiştir. Ana malzeme uzamasında DP çeliğinin daha iyi olsa da delikteki çatlak oluşumunda mekanik olarak daha homojen bir yapıya sahip olan CP çeliği daha iyi performans göstermiştir. Deney sonrasında CP800 çeliğinin hole-expansion oranı DP800'e göre daha yüksek çıkmaktadır, bu da bize CP800 çeliğinin hole-expansion kabiliyetinin daha iyi olduğunu göstermektedir [32].

Yapılan çalışmada kullanılan CP600 çelik sacının mikroyapı karakterizasyonu daha iyi bir görüntü elde etmek adına farklı dağlama teknikleri dağlanmaya olan etkisi araştırılmıştır. Doğru faz analizi yapabilmek için görüntüleme teknikleri kadar dağlama tekniklerinin de önemli olduğu vurgulanan bu çalışmada tane sınırlarındaki kontrast

görüntü ve çökelen yapıları ortaya çıkartmak için denenen dağlayıcılar şunlardır; Nital, LePera, Beraha I, Kalling I ve Nital+asit çözeltisi. Nital ile dağlanan çelik yüzeyindeki tane sınırları belirginleşmiştir. LePera ve Beraha I ile dağlanmış çeliğin yüzeyi anodik olarak dağlanmıştır. Kalling I ile dağlanan CP800 çeliğinin yüzeyi ise katodik olarak dağlanmıştır. Nital+asit çözeltisi ile dağlanan çeliğin hem yüzeyi hem de tane sınırları anodik olarak dağlanmıştır. Optik mikroskop kullanılarak 1500x büyütmeye yapılan incemeler sonucunda tüm dağlayıcılar ile yüzeyin dağlanabildiği fakat en iyi görüntü alınan dağlayıcının Nital+asit çözeltisi olduğu gösterilmiştir [33].

Yapılan çalışmada otomotiv sektöründe sıkça kullanılan AHSS sınıfında yer alan CP800, DP800 ve DP600 çelik saclarının mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın amacı araçlarda bulunan çelik sacların sürekli yük altındaki mekanik özelliklerinin tespit edilmesidir. Bu saclardan hadde yönüne bağlı kalınarak 0, 45 ve 90 derecede kesilmiş numuneler hazırlanmıştır. Stereo ccd kamera sistemi ile izlenen sistemin amacı numunelerin mühendislik gerilme-gerinim eğrisine ulaşmaktır. Başlangıç yüksekliği DIN50106 standartına uygun 15mm olan numune 300kN kapasiteli hücreye yerleştirildikten sonra baskı uygulanarak deney tamamlanmıştır. Yüzey baskı testinden elde edilen sonuçlar Ludwig, Swift ve Gosh kanunları göz önünde bulundurularak yorumlanmış ve çıkan eğrilerde CP800 çeliğinin yük kapasitesinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [34].

Yapılan çalışmada AHSS grubunda yer alan 2,5mm kalınlığındaki CPW800 çeliğinin geliştirilmiş ikiz-spot lazer kaynağı uygulanabilirliği araştırılmıştır. Kaynak makinesinin 2 farklı lineer enerji ve 3 farklı lazer dağılım oranı kullanılarak yapılan çalışmada kaynak ve ITAB bölgeleri mikroyapısal olarak incelenmiştir. Kaynak bölgesinde martenzit adacıklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. HAZ bölgesinde karakteristik özelliğini sürdürmeye devam ederek sertliğin yüksekliği gösterilmiştir. Sonuç olarak lazer kaynağında kullanılan enerjinin her numunede önemli ölçüde etkili olduğu, geçiş bölgelerindeki kalıntı östenitlerin ise çekme dayanımını yükselttiği gösterilmiştir [35].

Yapılan çalışmada kromatlı 0,8mm, galvaniz ve kromatlı 1mm kalınlığındaki mikroalaşımlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağındaki kaynak zamanı ve kaynak şiddetinin çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımına olan etkisi incelenmiştir. 5 farklı kaynak zamanıyla yapılan çalışmada çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama ve

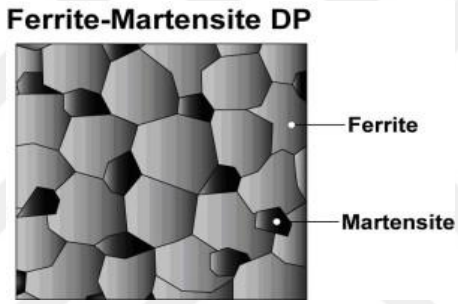
çekme-sıyırma dayanımına etkisi de incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda bu iki mikroalaşımlı çelik için 6 kN çene kuvveti sabitinde en iyi yüzey kalitesini iyi dayanım kuvvetliye 6-7kA aralığında 15 kaynak zamanında bulunduğu gösterilmiştir [36].

Yapılan çalışmada TRIP ve mikroalaşımlı çelikler elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. 1,5mm TRIP ve 1mm mikroalaşımlı çelik kullanılarak yapılan çalışmada değişken olarak kaynak akım zamanı ve şiddeti kullanılmış çene kuvveti sabit 6 kN olarak belirlenmiştir. Çekme-makaslama ve çekme-sıyırma deneylerinde 3 tip kopma gözlemlenmiş olup bunlar; yırtılma, düğmelenme ve ayrılma tipi kopma olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak en yüksek çekme-makaslama dayanımını 20 periyot 13,5 kA değerinde ulaşıldığı gösterilmiştir [37].

Yapılan çalışmada TWIP1000 ile Martenzitik çeliğin elektrik direnç nokta kaynağındaki kaynak akım zamanı ve kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Yüksek akım şiddetlerinde gerçekleşen sıçrantılar analiz edilmiştir. Yüksek kaynak akım şiddeti ve uzun kaynak zamanlarında çok fazla renk değişimi ve beraberinde olan sıçrantıların kopma modlarına olan etkisi grafiklerle anlatılmaktadır. Sonucunda ayrılma tipi kopmaların düşük akım şiddeti ve kısa kaynak zamanında gerçekleştiği gösterilmiştir [38].

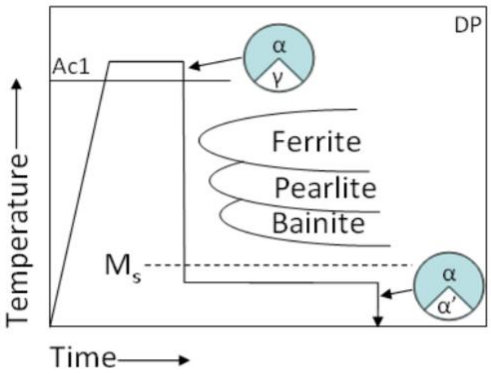
BÖLÜM 3. DP ÇELİKLERİ

Dual Phase (DP) çelikleri yapı olarak ferrit matrisi içerisinde bulunan martenzit adacıklarından meydana gelmektedir [39]. Bu yapının en büyük avantajı dengeli martenzit içermesinden dolayı çok iyi kaynak edilebilirlik ve çok iyi şekillenebilme kabiliyetidir [40].

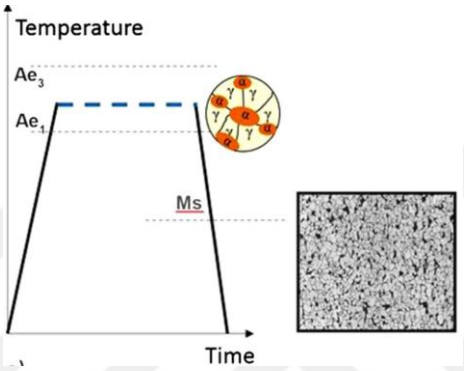


Şekil 3.1: DP çeliğinin şematik mikroyapısı

DP çeliği oluşumunu özetleyecek olursak, demir-karbon denge diyagramındaki Ac1 çizgisi üzeri, Ac3 çizgisi altında kalan kritik sıcaklığa çıkarıldıktan sonra su verme işlemiyle ikincil yapı olan martenzit adacıklarının yumuşak ferrit matrisi içerisindeki yüksek östenit dönüşümü başlatılmış olur [41][42]. Bu aşamadaki esas nokta martenzit adacıklarının yapı içerisindeki yoğunluğudur çünkü bu martenzit yapının az olması düşük mukavemet yüksek uzama, çok olması ise yüksek mukavemet düşük uzamaya neden olmaktadır [43][44]. Oluşum aşaması şematik olarak Şekil 3.2.'de ve mikroyapıları ile birlikte şekil 3.3.'de gösterilmektedir [45].

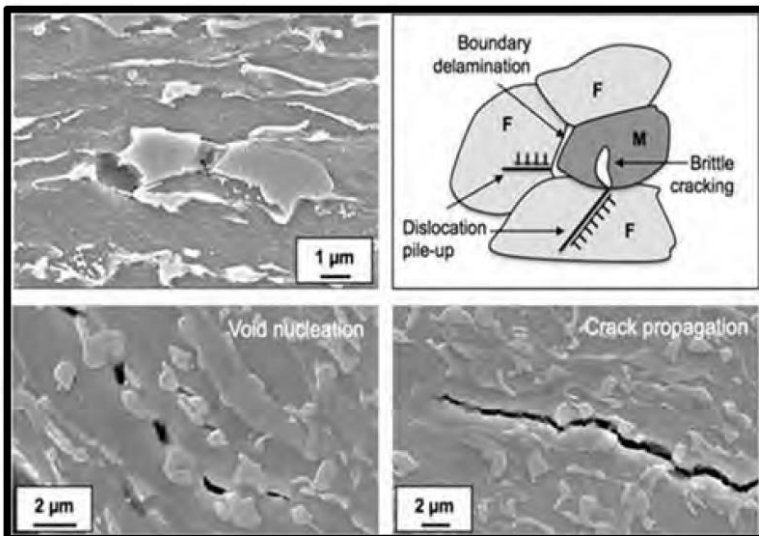


Şekil 3.2: DP çeliği oluşumu şematik gösterimi.



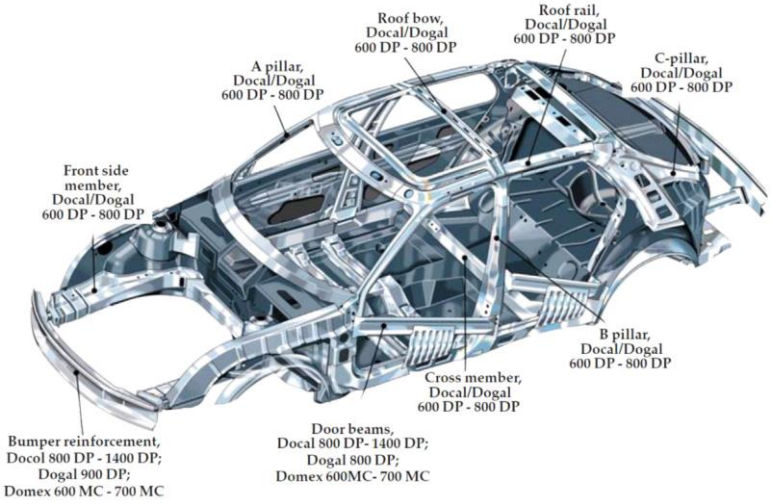
Şekil 3.3: DP çeliği oluşumu mikroyapılı şematik gösterimi.

Çift fazlı çelikler üzerinde yapılan araştırmalar gösteriyor ki şekillendirme sorunu olarak yaşanan kopmalardaki hasar modunun nedeni çok sert martenzit adacıklarını saran yumuşak ferrit mikroyapısında gerçekleşen dislokasyon hatalarının başlangıç noktası martenzit adacıklarında gerçekleşen gevrek kırılmadır. Kırılma yüzeyi ferrit-martenzit arayüzeyi boyunca tane sınırı büyümesi olarak da Şekil 3.4.'deki gibi görülebilmektedir [46].



Şekil 3.4: DP çeliğinde gerçeklesen hasar modu

DP çeliklerinde karbon, çeliğin sertleşebilirliğini artırarak hızlı soğutma hızlarında martenzit oluşumunu sağlar [47]. Tek tek veya kombinasyon halinde eklenen manganez, krom, molibden, vanadyum ve nikel de sertleşebilirliği artırmaya yardımcı olur. Karbon ayrıca ferrit matrisindeki martenziti sertleştirirken silikon ve fosfor gibi yapıları da güçlendirir. Bu eklemeler, yalnızca benzersiz mekanik özellikler üretmek için değil, aynı zamanda direnç nokta kaynağında daha iyi performans göstermesi için zekice dengelenmiştir [48]. DP çeliklerinin araç üzerindeki uygulamaları Şekil 14.'te gösterilmektedir [49].



Şekil 3.5: DP çeliğinin araç üzerindeki kullanım yerleri

DP çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı tekniğiyle yapılan birleştirmeleri konusunda yapılan literatürde çalışmasında CP çeliği ile birleştirilmesi çalışılmadığı saptanmıştır. Fakat DP çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi ve benzer konularda literatürde yer alan diğer çalışmalar şöyledir;

Yapılan çalışmada araç karoseri üzerinde sıklıkla kullanılan DP1000 çeliğinin 1.5mm kalınlığındaki sac levhası ile direnç nokta kaynağı tekniğinde kendi arasında birleştirilmiştir. Çene kuvveti olarak 1 ve 5 kN belirlenmiş olup 100x50mm boyutunda numuneler ile yapılan çalışmada 2 farklı kaynak akımı ve 2 elektrot türü kullanılmıştır. Numerik analizler ve simülasyonlar sonucunda gerçeğe yakın değerler bulunan çalışmada sıvı metal kırılganlığı(LME) araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda sonucunda sıvı metal kırılganlığının ortadan kaldırılması isteniyorsa malzemenin gerilim değerinin %60'ı kadar ön gerilme uygulanmasının gerekli olduğu belirlenmiştir. Ön gerilme uygulanan malzemenin simule edilmesi ile bu durumun eskisine oranla 2-3 kat daha iyi olduğu görülmüş ve LME oluşumunun neredeyse imkânsız hale getirildiği gösterilmektedir [50].

DP600 ve DP800 sac levhaların elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinin incelendiği yüksek lisans tezinde malzeme kalınlıkları 1 mm, çene kuvveti 6 kN olarak belirlenmiştir. 5-30 periyot kaynak zamanı arasında 6 farklı kaynak zamanı ve 8,2-16,8 kA arasında değişen 7 farklı kaynak akım şiddetinin kullanıldığı çalışmada kaynak sonrasında yapılan çekme-makaslama ve çekme-sıyırma deneyleri ile 3 farklı kopma türü saptanmıştır. Ayrılma, düğmelenme ve yırtılma olarak belirlenen kopma türlerinin oluşmasındaki en önemli neden ısı girdisi olduğuna belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda ise iki malzeme için maksimum 15kN çekme makaslama dayanımına ulaşılmıştır. Bu iki malzemenin düzgün yüzey kalitesi ile kullanılması durumunda kaynak akım şiddetinin 8,2-9,5kA ve kaynak zamanının 15-20 periyot aralığında olması gerektiği saptanmıştır [51].

DP1000 çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağındaki gerilimini inceleyen çalışmada %10 uzamaya sahip 980MPa akma dayanımına sahip 1.45mm kalınlığındaki kaplamasız DP çelik mikroyapı olarak %68 martenzit ve %32 ferrit içermektedir ve ana malzeme mikrosertliği 300-350HV arasındadır. Kaynak çekirdeğinde ise mikrosertlik yaklaşık 150HV daha fazla gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak kaynak sonrası artık gerilmenin meydana getirdiği bir durum olduğu belirlenmiştir. SYSWELD ve FEM simülasyonu

kullanılarak yapılan çalışmada ise malzemenin kritik A1 sıcaklığının üzerine çıkıldıktan sonra %5 oranında martenzit kaybettiği ve bunun kalıntı gerilmeyi giderdiği aynı zamanda çekirdekteki aşırı sertleşmeyi azalttığı tespit edilmiştir [52].

AHSS sınıfı 1.5mm kalınlığındaki DP1000 ile elektrik direnç nokta kaynağı tekniği uygulanan bu çalışmada çene kuvveti 4.5kN olarak sabit bırakılmıştır. Bölgesel mekanik özelliklerin incelendiği bu çalışmada direnç nokta kaynağı sonrası nano-içerikler ve mikro-kalıntılar tespit edilmiştir. Elektron mikroskobu görüntüleriyle desteklenen çalışmada farklı kaynak bölgelerinin kırılma tokluğu hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda DP1000 çeliği dengeli elastik kırılma mekanizmasına sahip olduğundan dolayı uzun plastik akma bölgesine sahip olduğu saptanmıştır [53].

1.2mm DP980, 1.2mm DP780 ve 1.0mm DP780 ile elektrik direnç nokta kaynağı birleştirilmesi gerçekleştirilen bu çalışmada kopma davranışı ve karakteristiği incelenmiştir. Yüklenme açısının 0-45-90 derece olarak değiştirildiği fikstür ile sabitlenmiş numunelerin kaynaklanarak gerçekleştirilen çalışmada çekirdek çevresindeki plastik deformasyon incelenmiştir. İncelemeler sonucunda AHSS grubu çeliklerin aynı akma noktasına sahip olan konvansiyonel çeliklere oranla çok daha iyi performans gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak DP980 ve DP780 malzemelerin kopma performansının sadece çekme dayanımına değil sac kalınlığına göre de değiştiği gösterilmektedir [54].

1mm DP1000 ve 1.2mm QP1180 çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin elektrik direnç nokta kaynağı ile incelendiği bu çalışmada 240 kVA kapasiteli nokta kaynak makinesi kullanılmıştır. 100x40mm olarak belirlenen numune boyutlarına 6mm elektrot temas yüzeyi sabitinde ve 2.5kN çene kuvveti ile nokta kaynağı uygulanmıştır. Kaynak akım şiddetinin 7-11kA aralığında 1'er kA yükseltilerek yapılan çalışmadaki kaynak zamanları 12,20 ve 20 periyot ve kullanılan elektrot soğuma tipi hava soğutmalıdır. Çalışmanın sonucunda yüksek ısı girdisi nedeniyle kaynağın sağlıklı gerçekleşmediği tek parametrenin 11kA 28periyot olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak çekirdek oluşumundaki yüksek ısı girdisi nedeniyle incelen kesitle beraber oluşan makro boşluklar olarak tespit edilmiştir. QP1180 tarafındaki ısıdan etkilenen bölgenin DP1000 tarafındakine oranla daha dar bir alana sahip olduğu belirlenmiştir [55].

Yapılan çalışmada soğuk haddelenmiş DP1000 çeliği ile Mo mikroalaşımlı olan DP1000 çeliğinin mikroyapı ve özellikleri karşılaştırılmıştır. C-Si-Mn-Cr ve C-Si-Mn-Cr-Mo alaşım sistemine sahip olan iki çeliğin de mikroyapısı martenzit ve ferritten oluşmaktadır. Mo içeren çeliğin mikroyapısındaki martenzit oranı %69 ve daha küçük martenzit adacıklarından meydana geldiği görülmekteyken, Mo içermeyen çeliğin martenzit oranı %64'tür. Molibden içermeyen çeliğin akma dayanımı 548 MPa, Mo içeren çeliğin akma dayanımı 746 MPa olarak tespit edilmiştir. Bunun nedeni daha küçük martenzit adacıklarına sahip olmasından ve güçlendirilmiş ferrit mikroyapısına sahip olmasıdır ve bu nedende akma dayanımı belirgin bir şekilde yaklaşık 200 MPa artış göstermektedir [56].

Yapılan çalışmada 1mm kalınlığındaki DOCOL 1200M sacı yeni nesil bir teknik olan CMT-lehimleme ile ergime derecesi nispeten düşük CuAl8 teli kullanılarak birleştirilmesi incelenmiştir. İki farklı yöntem ile birleştirmeler sağlanırken bunlar; alın tipi ve bindirme tipi bağlantılar olarak uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda lehim bölgesinden kopan 40-50A olmuştur. 60-65-70-80-90-95A akım şiddetlerinde gerçekleştirilen birleştirmelerde ise kopma ITAB bölgesinden olmuştur. En yüksek çekme mukavemeti 21.81 cm/dk. lehim ilerleme hızında saptanmıştır. Gaz debisi değişkeninde ise 10 L/dk.'dan 12 L/dk.'ya çıkıldığında mukavemet artsa da 12 L/dk.'dan itibaren mukavemet değerlerinde düşüş tespit edilmiştir [57].

DP590 çelik sacıyla yapılan bu çalışmada elektrik direnç nokta kaynağındaki elektrot yapısının etkisi araştırılmıştır. 3 farklı elektrot tipinin kullanıldığı bu çalışmada DP sacı nokta kaynağında birleştirilmiş, elektrot temas yüzeyinin ve uç yapısının çekirdeğin oluşumunda önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Sonlu eleman (FE) analizi ile çekirdek yapısı ve boyutu tahmin edilmeye çalışılmış ve gerçek sonuçlara yakın değerler bulunarak güvenilir analiz tekniği olduğu saptanmıştır. Çekme-makaslama testi uygulanan çalışmada üç farklı çekirdek tipiyle iki farklı kopma türü tespit edilmiştir. Sonuçlara göre Elektrot yüzey tipinin etkisi çekirdeğin merkez yapısında daha önemli rol oynarken yüzey alanının etkisi kopma davranışını değiştirdiği belirlenmiştir [58].

DP600 ve düşük karbonlu DC54D çelik sacları kendi aralarında ve birbirleriyle eşleştirilerek elektrik direnç nokta kaynağında birleştirilmesi yapılan çalışmada çekirdek geometrisi ve mekanizması araştırılmıştır. 1mm kalınlığındaki DC54D ve 1.6mm

kalınlığındaki DP600 çelik sacları 1-14 periyot aralığındaki kaynak zamanlarında birleştirilmiştir. Sonuçlara göre kaynak çapı kaynak zamanı arttıkça artış göstermiştir. En yüksek çekme-makaslama dayanımı 6kN olmuştur. DC54D-DP600 arası birleştirmelerde kaynak çekirdeği DP600 çelik sacı tarafında daha yoğun görünmektedir. Isıl denge sağlanmadığından çekirdek kayması yaşanmış, tüm kopmaların DC54D tarafında gerçekleştiği tespit edilmiştir [59].

Bu çalışmada DP çeliklerinde elektrik direnç nokta kaynağı sonrasında oluşan ITAB bölgesindeki yumuşamanın nedeni incelenmiştir. 1.2mm DP980 çelik sacı kullanılan çalışmadaki ana metal yaklaşık %48 oranında martenzit içermektedir. Üç farklı yüzey türünün ele alındığı çalışmada mekanik parlatılmış, kimyasal dağlanmış ve elektrolitik parlatma yapılmış yüzeylerde nano-sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elektrik direnç nokta kaynağı 8 kA akım şiddeti, 3.5 kN çene kuvveti ve 20 periyotta yapılmıştır. Sıkıştırma ve tutma süreleri sırasıyla 25 ve 5 periyot olarak uygulanmıştır. ITAB bölgesinden ana metale doğru 100-200-400-600-800 nanometre aralıklarla işaretlemeler yapıldıktan sonra nano-sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve ulaşılan sonuçlara göre mekanik parlatılmış ve dağlanmış yüzeyin sertlik ölçüm performansı kabul edilebilir seviyede olduğu tespit edilmiştir. Geçiş bölgesindeki yumuşamanın esas nedeni kaynak sonrası Ac1 kritik sıcaklığın altında kalarak temperlenmiş martenzit oluşumudur [60].

Galvanizli ve galvanizsiz DP600 çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağında birleştirilmesi araştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan iki sac kalınlığı da 1.3mm'dir. Kaynak parametreleri ise; Kaynak zamanı 7,5-11,25-15 periyot olarak, kaynak akım şiddeti ise 6-10 kA aralığında 1'er kA artışla ve 2.8 kN çene kuvveti sabitinde toplam 15 farklı parametre değerinde uygulanmıştır. Kubbe tipi elektrot kullanılan çalışmada koni tipi elektrotla yapılan kaynaklardaki çekirdeklere oranla daha büyük olduğundan tercih edilmiştir. Temas yüzeyi 6 mm olan elektrotların alaşımı Cu-Cr-Zr'dir. Kaynak akım şiddeti ve zamanı arttıkça çekme-makaslama ve çekme-sıyırma kuvveti de 10 kA 11,25 periyota kadar artış göstermiştir. En yüksek dayanım değerleri iki test için de 9 kA ve 11,25 periyotta gerçekleşmiştir. Galvanizli yüzeydeki çinkonun çekirdekte bulunmadığı fakat kaba taneli HAZ bölgesinde görüldüğü tespit edilmiştir [60].

Yapılan çalışmada 1,2mm DP780 ve 1,5mm kalınlığındaki DP600 sacları elektrik direnç nokta kaynağında birleştirilmesi araştırılmıştır. Çekirdek geometrisinin detaylı

incelendiği çalışmada kaynak şiddeti 6-12 kA aralığında 1'er kA arttırılarak, elektrot kuvveti 3,5-6 kN aralığında 0,5 kN arttırılarak 18 periyot sabit kaynak zamanında gerçekleştirilmiştir. Nokta kaynağının uygulanmasında benzer kimyasal kompozisyona sahip DP sacları arasında dahi hangisinin üstte olduğu çekirdek oluşumu için önemli rol oynadığını göstermiştir, DP780 üstte olduğu durumda daha küçük kaynak çekirdeği oluşurken DP600 üst pozisyonda kaynak yapıldığında daha büyük geometriye sahip çekirdek oluşumu gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak ısı iletim katsayısı ve ısı absorbe etme özelliği olarak açıklanmıştır. Elektrotun dalma derinliğinin daha az olduğu birleştirilmelerde daha yüksek dayanım elde edildiği tespit edilmiştir [61].

Bu çalışmada DP600 ve AISI 1080 kalitesindeki çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında birleşebilirliği araştırılmıştır. Kaynak akım şiddetinin 8-12kA aralığında 1'er kA artışla, kaynak zamanının 15-30 periyot arası 5'er artışla ve elektrot kuvvetinin 4,1-5,1 ve 5,7 kullanıldığı çalışmada ara yüzey, düğmelenme ve kısmi sac kısmi düğmelenme olarak gerçekleşen üç tip kopma tespit edilmiştir. Çekme-makaslama deneylerindeki kopma başlangıcı DP600 malzemesinden gerçekleşmiştir. Yüksek akım şiddeti, akım süresi ve elektrot kuvveti fışkırmaya neden olup düşük dayanım göstermiştir. İstenen düğmelenme tipi kopmanın gerçekleşmesi için daha düşük elektrot kuvvetinde ve yükseğe yakın akım şiddeti ve zamanı kullanılması gerektiği belirlenmiştir [62].

Yapılan çalışmada 1,6mm kalınlığında galvanizlenmiş DP800 ile 1,5mm kalınlığında kaplamasız TRIP800 çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağındaki birleşebilirliği araştırılmıştır. 7.9mm temas yüzeyi bulunan elektrotlar kullanılmıştır. Nokta kaynağında en sık görülen hasar mekanizmaları çekirdek çekmesi ve arayüzey kırılmalarıdır fakat kısmi arayüzey kopmaları da görülmektedir. Çekirdek çekmesinin en önemli etkisi arayüzey kopmalara sebep olmasıyla görülmektedir. Yapılan birleştirmelerde oluşan çekirdeği etkileyen en önemli faktörün ergime alanının büyüklüğü olduğu ve bunun kaynak kalitesini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir [63].

Otomotiv sektöründeki sıkça kullanılan ve AHSS sınıfında yer alan kaplamasız 1.4mm kalınlığa sahip DP980 ve TWIP980 çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağı ile birleşebilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışmada elektrot kuvveti 3 kN, tutuma süresi 300ms olarak sabitlenmiş olup kaynak zamanı 150-350 ms. aralığında 50 ms. artırılarak gerçekleştirilmiştir. Östenit fazının TWIP saclarının çekirdek, ITAB ve ana metalinde

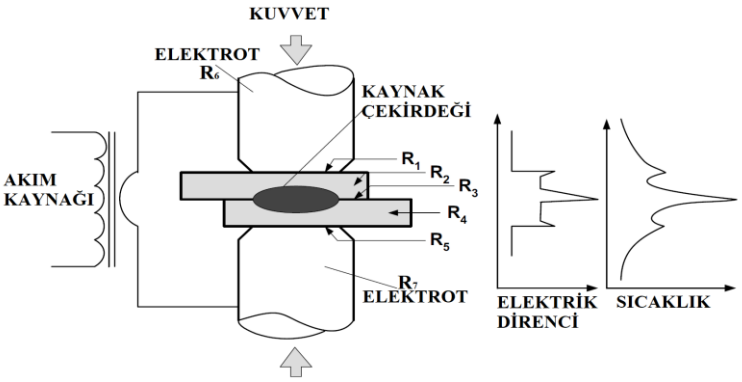
görülmüştür. DP saclarında ise çekirdek ve ITAB bölgelerinde martenzitik ve ferritik yapılar bulunmaktadır. Sonuçlara göre DP sacının aynı ısı girdisinde daha büyük geometriye sahip çekirdek oluşturduğu, aynı çekirdek geometrisinde ise DP sacının TWIP'den 1,5 kattan daha fazla dayanım gösterdiği tespit edilmiştir [64].

AHSS sınıfı çeliklerden dört tanesi ile yapılan çalışmada elektrik direnç nokta kaynak performansları incelenmiştir. HSLA, 590R, DP600, DP780 ve TRIP780 kullanılarak yapılan çalışmada 60 Hz 250 kVA kapasiteli ve pinomatik sistemli Center-Line nokta kaynak makinesi kullanılmıştır. Su soğutmalı tipi elektrot kullanılan çalışmada elektrot temas yüzeyi 6mm olarak uygulanmıştır. Kaynak akım şiddeti olarak 7-10kA, elektrot kuvveti 3.5-5.5kN, kaynak zamanı 10-20 periyot aralığında gerçekleştirilmiştir. Toplamda 11 test uygulanmış 5 tanesi çekme-makaslama 5 tanesi çekme-sıyırma ve 1 tanesi metalürjik inceleme için kullanılmıştır. LePera dağlama tekniği kullanılan çalışmada 0,2mm aralıklarla Mikro-vickers sertliği ölçülmüştür. Sonuç olarak DP600 çeliğinde arayüzey tipi koparken diğerlerinde düğmelenme tipi kopma meydana geldiği tespit edilmiştir [65].

BÖLÜM 4. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

Elektrik direnç nokta kaynağı otomotiv endüstrisinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Literatürde genellikle EDNK olarak kısaltılarak bahsedilen yöntemin araç üreticileri tarafından vazgeçilemez olması; seri üretim ve otomasyona uygun, operatörün becerisine ihtiyaç duymadan basit uygulanabilen, geleneksel ark yöntemine oranla hızlı ve ilave dolgu metali kullanımına gerek duyulmamasıdır. Farklı türdeki metalleri de birleştirebilen sistemin getirdiği avantajlar sayesinde seri üretimin her aşamasında önemli rol oynamaktadır [66]. Bir araç montajı sırasında çeşitli parçalar üzerinde en az 2000 nokta kaynağı uygulanmaktadır [67].

Elektrik direnç nokta kaynağının temeli ısı oluşumudur. Isıyı oluşturabilmek için minimum kayıpla iş parçalarına iletmek gerekir ve bunun için yüksek iletkenliğe sahip iki elektrot kullanılır. İki elektrot arasında bulunan iş parçalarına elektrotlar tarafından çene kuvveti uygulanır. Elektrik akımının başlamasıyla birlikte yüksek amper düşük voltajın etkisi hızlıca ısıyı oluşturur. İş parçalarının birbirine temas ettikleri malzeme-malzeme arayüzeyinde oluşan temas direnci ergitmeyi başlatır. Bu ergime her zaman akımın en kısa oluştuğu yerde gerçekleşmektedir. Akım süresi devam ettikçe kaynak çekirdeği büyür. Akım sona erdiğinde çekirdek katılaşarak kaynak gerçekleştirilmiş olur. Tüm bu işlem çoğunlukla 1 saniyeden daha hızlıdır. Birleştirilen iş parçasının kalınlığı ve kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak kaynak akım süresi, kaynak akım şiddeti, elektrot kuvveti ve elektrot tipi belirlenir [68]–[71].



Şekil 4.1: Direnç nokta kaynağında oluşan direnç ve sıcaklıkların şematik gösterimi

Elektrik direnç nokta kaynağındaki dirençler Şekil 15.'te gösterildiği gibi 7 farklı noktada gerçekleşmektedir. R1 ve R5 malzeme-elektrot arası, R2 ve R4 malzeme dirençleri, R6 ve R7 ise elektrotlarda, R3 ise malzeme-malzeme arasındaki temas direnci olup kaynak çekirdeğinin oluştuğu dirençtir. En yüksek direnç ve ısının oluştuğu nokta R3'tür. Direnç oluşumunda etkili olan bir diğer faktör ise temizliktir [72]. Kaynak esnasında iş parçasında kir, pas, yağ vb. maddeler bulunuyorsa bu sistemde oluşan dirençleri etkileyeceği gibi oluşan toplam direncin düşmesine ve beklenen kaynak çekirdeğinin oluşmamasıyla sonuçlanacak hatalara neden olmaktadır [73]. Toplam direncin hesaplanması oluşan tüm dirençlerin toplanmasıyla elde edilir;

$$R_{toplam}=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6+R_7 \quad (4.1)$$

Direnç nokta kaynağındaki parametreler ise dört grupta; Kaynak akımı, Kaynak zamanı, Elektrot çene kuvveti, Elektrot malzemesi ve türü olarak değerlendirilir [74]. Direnç Nokta kaynağının uygulanışı ise 4 aşamada gerçekleşmektedir; Sıkma zamanı, Kaynak Zamanı, Tutma zamanı ve Ayrılma zamanıdır [75]. Sıkma zamanında elektrotlar önceden belirlenen çene baskı kuvveti ile iş parçalarını sıkar. Kaynak zamanında ise 50Hz bir makinede çalışılıyorsa 1 periyot kaynak zamanı 1/50sn. olacak şekilde belirlenen sürede çekirdek oluşur. Tutma süresinde oluşan yüksek ısı bir anda kaybolmadığından yavaş soğuma ile çekirdek katılaşması kontrol altına alınmaktadır. Ayrılma süresinde elektrotlar iş parçasıyla teması keser ve kaynak işlemi son bulur [76].

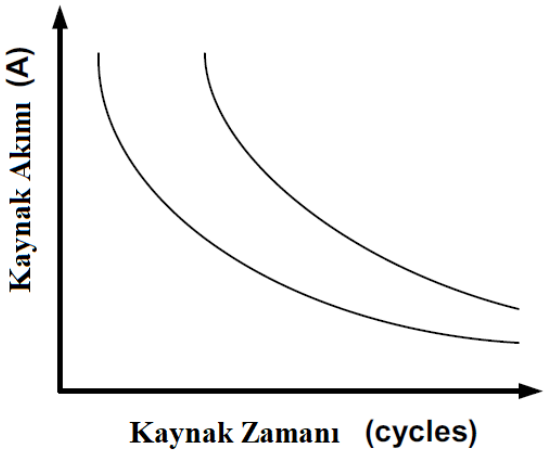
Sistemdeki dirençlere etki eden bir diğer etmen ise elektrot alaşımı ve elektrot kuvvetidir. Elektrot alaşımında genellikle Cu-Cr-Zr tercih edilmektedir. Bunun nedeni ilk nedeni elektrotun hem yüksek elektrik iletkenliğine hem de düşük ısı direncine sahip olması beklenmektedir [77]. Elektriği iletirken kayıp yaşanmadan direnci kaynak çekirdeğine

ulaştırması gerekmektedir. İkinci nedeni ise yüksek sıcaklarda deformasyona uğramadan işlevini yerine getirmesi gerekmektedir. Su soğutmalı sistem ile çalışan elektrotlar daha uzun ömürlü olmakla beraber daha sağlıklı kaynaklar elde edilebilmektedir ve taşınan suyun minimum dakikada 4 litre olması gerekmektedir [78].

Elektrik direnç nokta kaynağında en önemli proses parametreleri Joule Kanunu'na göre akım, zaman ve elektrik direnci'dir. Kaynakta oluşan ısıyı Joule biriminden belirleyen kanunun formülü;

H (Isı[Joule]) = I^2 (Kaynak Akımı[A]) x R(Direnç) x t (Kaynak süresi) (4.2)

Çekirdeğin oluşabilmesi için sistemde üretilen ısının iletilen ısıdan büyük olması gerekmektedir. Kaynak sırasında oluşan ısı, zaman ve akımın karesiyle orantılıdır. Isı üretiminden bu iki parametre sorumlu olsa da, kaynağın ısınma hızını yalnızca akım belirler. Çünkü parça ve elektrotlar ile kaybedilen ısı kaynak süresiyle artar. Herhangi bir metal için gereken akım, malzemenin termal ve elektriksel dirençleriyle ters orantılıdır [79]–[84].



Şekil 4.2: Kaynak akımı ve kaynak zamanı arasındaki ilişkinin şematik gösterimi

Kaynak işleminde dikkat edilmesi gerek diğer konu akım şöntlenmesidir. Bir nevi sistemin kısa devre yapmasına akım şöntlenmesi denir. Elektrik direnç nokta kaynağı yakın iki farklı pozisyonda uygulanacaksa aradaki uzaklığın ilk yapılan kaynak çekirdeğinin en az 1.5 katı uzaklığında olması gerekir [85]. Uzaklık kuralına uyulmayan durumda oluşacak ikinci çekirdek beklenenden daha küçük geometriye sahip olur. Bunun nedeni akımın diğer kaynaktan da geçmesiyle sistemdeki direnç kayıplarıyla beklenen

ısıyı oluşturamaz ve kaynak çekirdeği hesaplanan geometriye sahip olamaz. Aynı zamanda sistemdeki dirençlerin oluştuğu elektrot gibi diğer noktalarda fazladan direnç oluşması nedeniyle bozulmalar meydana getirip kısa sürede elektrotların değiştirilmesini gerektirir [86].

BÖLÜM 5. MATERYAL VE METOT

5.1. Deneysel çalışmaya genel bakış

Yapılan çalışmada, otomotiv endüstrisinde şasi ve karoserde yoğunlukla yer alan galvanizli CP ve kaplamasız DP çelik sacı elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Yapılan birleştirmelerde değişken olarak kaynak akım zamanı ve süresi belirlenmiştir. Birleştirilen tüm parametrelerin; mikro-makro yapısı, mikro-vickers sertliği, çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz-çekme testleri yapılmıştır.

5.2. Kullanılan Deney Malzemeleri

Bu çalışmada otomobil karoserinde; B sütunu, tampon takviye sacı olarak kullanılan galvanizlenmiş 1,5mm kalınlığındaki CP800 ile yine karoser üzerinde sıklıkla A sütunu, kapı takviye sacı noktalarında kullanılan kaplamasız 1,4mm kalınlığındaki DP1000HF sacları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan sacların kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikleri Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1: CP800 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (wt.-%)

C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	Fe
0.133	.19	1.49	.001	.04	.05	.02	.01	.01	.039	Kalan

Tablo 5.2: DP1000HF çeliğinin kimyasal kompozisyonu (wt.-%)

C	Si	Mn	P	Al	Ti	Nb	B	Fe
0.112	.93	2.7	.009	.046	.002	.002	.0002	Kalan

Tablo 5.3: CP800 ve DP1000HF çeliklerinin mekanik özellikleri

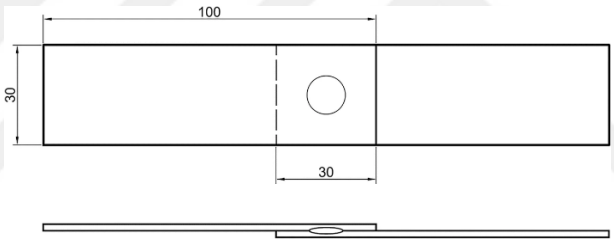
	Malzeme Kalınlığı (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Karbon Eşdeğerliği (CEV)
CP800	1,5	642	840	12,5	0,4
DP1000HF	1,4	728	1046	14,2	0,56

Karbon eşdeğerliği normal soğutulmuş ısıl işlem uygulanmamış çeliklerde kullanılan CEV değeri olarak Ceş = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5 formülünden hesaplanmıştır.

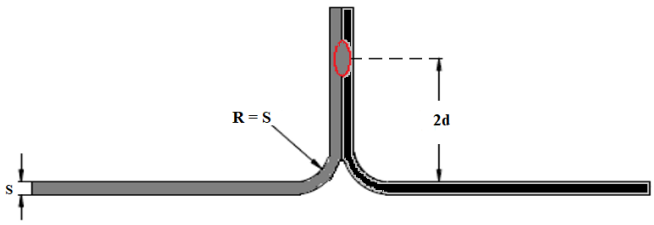
5.3. Deneysel Çalışma Kapsamında Malzemelerin Hazırlanması

Deney numuneleri ilk hazırlık aşamasında sac levhadan 30x100mm boyutlarında hidrolik kontrollü giyotin makasta kesilerek hazırlanmıştır. Sac levha yüzeylerindeki tüm yağ, pas gibi tüm kirlerinden yüksek saflıktaki aseton ile arındırılmıştır.

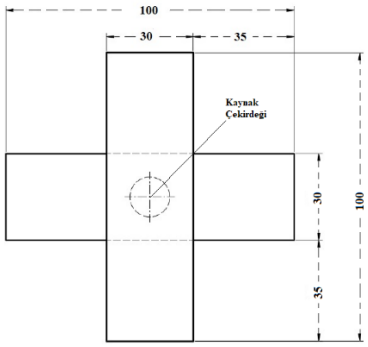
Çekme-makaslama deneyin kullanılacak numuneler EN ISO 14270, çekme-sıyırma deney numuneleri EN ISO 14273, çapraz-çekme deney numuneleri ise EN ISO 14272 standartlarına uygun olarak hazırlanmış olup şematik olarak Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3'de gösterilmektedir [87]–[89].



Şekil 5.1: Çekme-Makaslama deney numunesi şematik gösterimi



Şekil 5.2: Çekme-Sıyırma deney numunesi şematik gösterimi



Şekil 5.3: Çapraz-Çekme deney numunesi şematik gösterimi

5.4. Kullanılan Kaynak Makinesi ve Cihazlar

Çalışma kapsamında yapılan tüm birleştirmelerde 120 kVA gücünde, çene basıncı pnömatik kontrollü, su tertibatına sahip, kaynak akım şiddet ve zamanı ayarlanabilen Işık Kaynak üretimi Şekil 5.4.'de gösterilen elektrik direnç nokta kaynağı makinesi kullanılmıştır. Regülatör kontrollü 5 Bar 4 kN çene kuvveti tüm birleştirmelerde sabit tutulmuştur. Şekil 5.5.'de gösterilen elektrot kuvveti ölçüm cihazı ile her birleştirmede kontrolü sağlanmıştır. Yapılan tüm birleştirmelerde makine ekranında okunan gücün yüzdelik oranının gerçek kA değeri Şekil 5.6.'da gösterilen DENGESHA marka akımölçer yardımı ile ölçülmüştür.



Şekil 5.4: Işık Kaynak üretimi EDNK makinesi



Şekil 5.5: DENGESHA Elektrot kuvveti ölçme cihazı



Şekil 5.6: DENGESHA Kaynak akımı ölçme cihazı

5.5. Kaynak Elektrotu

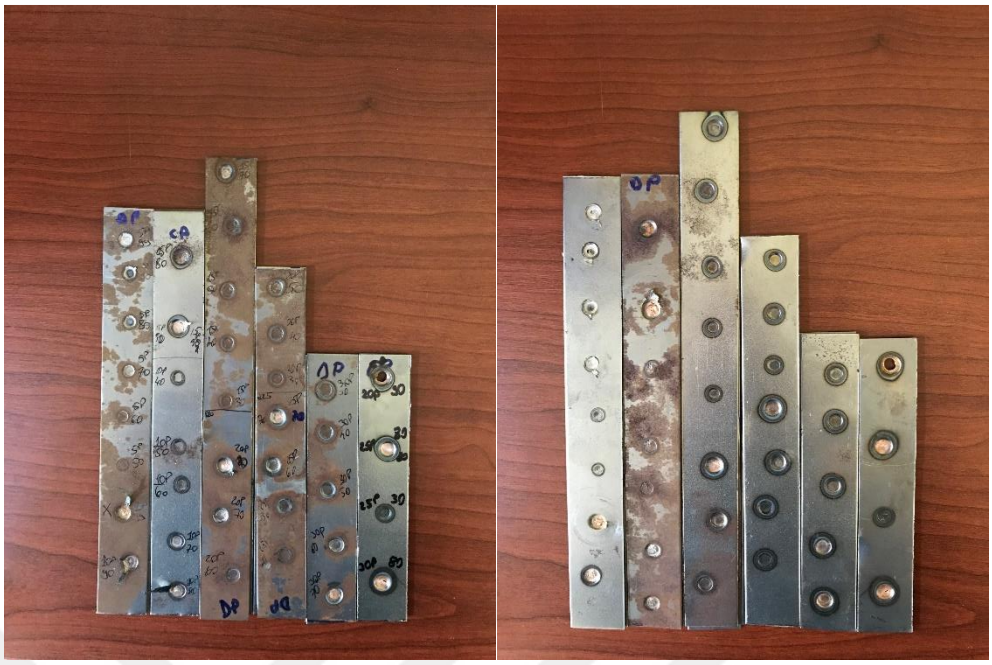
Yapılan tüm birleştirmelerde konik uçlu küresel sıkı geçmeli tip elektrik direnç nokta kaynağı elektrotları kullanılmıştır. Su tertibatı ile soğutma sağlanması için sıkı geçmeli olan elektrotların kullanım ömrü ve kaynak kalitesi iyileştirilmiştir. Yapılan soğutmada su debisi 4 lt/dk. olarak belirlenmiştir. Elektrotların temas yüzeyi 6mm olarak belirlenmiştir. Cu-Cr-Zr alaşımlı kaynak elektrotlarının kimyasal kompozisyonu ve detaylı özellikleri Tablo 5.4.'de gösterilmektedir.

Tablo 5.4: Kaynak elektrotlarının kimyasal kompozisyonu ve özellikleri

Alaşım	Kimyasal Bileşim (%)	Isıl İletkenlik (J/Cms ^{o}K)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elektrik İletkenliği (m/Ωmm^{2})
Cu-Cr-Zr (RWMA/DIN 44759) 2. Grup	Cr = 4 Zr = 0,03 Cu = 95,97	320	590	48

5.6. Deney Parametrelerinin Seçilmesi

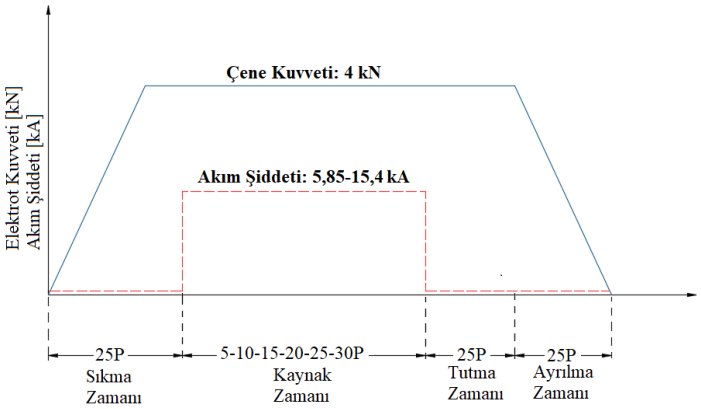
Şerit halinde kesilen saclar üst üste bindirilerek ön testler için kaynaklanmıştır. Yapılan kaynak işlemi sonrasında ön test numuneleri Şekil 5.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7: Kaynaklanmış ön test numuneleri

5.7. Ön Test Sonrası Belirlenen Parametreler ile Deneylerin Yapılması

Ön testler sonrasında belirlenen uygun parametreleri Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de şematik olarak gösterilen ebatlarda hazırladıktan sonra yüzey temizlikleri yapılarak elektrik direnç nokta kaynağı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm deney numunelerinin kaynağından önce regülatör kontrol edilerek elektrot çene kuvvetinin 4 kN olarak sabit tutularak sabit çene kuvvetinde gerçekleşmesi sağlanmıştır. Ön deneyler doğrultusunda deneylerde kullanılan değişken parametreler; kaynak zamanları 5,10,15,20,25 ve 30 periyot (1periyot: 0,02sn [50Hz]), kaynak akım şiddeti ise 5,85-15,4 kA aralığında tamamlanmıştır. Sıkma, tutma ve ayrılma zamanları 25 periyot değerinde sabit tutulmuştur.



Şekil 5.8: Elektrik direnç nokta kaynağında uygulanan parametreler

Çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz-çekme testlerinde kullanılan numuneler dışında mikroyapı, mikrosertlik ve SEM analizlerinde kullanılmak üzere tüm parametrelerde fazladan numuneler elde edilip kullanılmıştır.

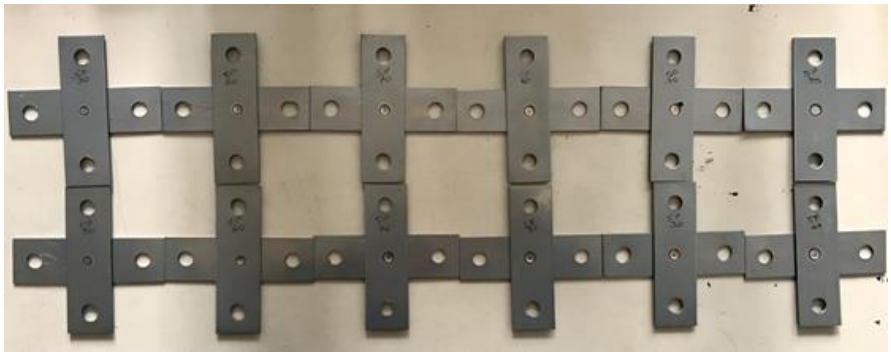
Yapılan deneyler sonucunda elde edilen elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş bazı numuneler Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de gösterilmektedir.



Şekil 5.9: Çekme-Makaslama numuneleri



Şekil 5.10: Çekme-Sıyırma numuneleri



Şekil 5.11: Çapraz-Çekme Numuneleri

Deneylerde kullanılan parametrelerin her biri için on adet kaynaklanmış numune üretilmiştir. Üretilen numunelerden üç adet çekme-makaslama, üç adet çekme-sıyırma, üç adet çapraz-çekme deneyi için kullanılmış olup kalan numune SEM, EDS, mikroyapı, makroyapı ve mikrosertlik için kullanılmıştır.

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

Önceki bölümde hazırlanıp görselleri verilen numunelerin çekme deneyleri Şekil 5.12'de gösterilen 10 Ton kapasiteli Instron marka cihazla gerçekleştirilmiştir. Çekme hızı dakikada 10mm ayarlanarak deneyler yapılmıştır.



Şekil 5.12: Instron Çekme cihazı

Literatürde elektrik direnç nokta kaynağı konusundaki çalışmalarda üç farklı hasar modundan bahsedilmektedir [73], [85], [86]. Yapılan çalışmada çekme deneyleri sonucunda iki farklı hasar modu oluşmasının nedeni ön testler sonucunda

kullanılamayacak kadar zayıf olan ayrılma tipi bağlantıyı sağlayan parametrelerin deneylere dahil edilmemesidir. Oluşan iki hasar modunun üç farklı çekme deneyindeki sonuçları Tablo 5.6.'da gösterilmektedir.

Tablo 5.5: Çekme deneyi sonucunda oluşan hasar modları

Çekme–Makaslama deneyinde oluşan hasar modları 1- Düğmelenme 2- Yırtılma	
Çekme–Sıyırma deneyinde oluşan hasar modları 1- Düğmelenme 2- Yırtılma	
Çapraz-Çekme deneyinde oluşan hasar modları 1-Düğmelenme 2- Yırtılma	

5.9. Çekirdek boyut ölçümü ve Makro görüntülerin analizi

Elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirilmiş her bir parametre için oluşan çekirdeğin boyutunu etkileyen faktörler kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanıdır. Bu iki değişken ile gerçekleştirilen tüm bağlantılarda oluşan çekirdek, makroyapısındaki değişimlerinin incelenmesi için numune 30mm çapında iletken özellikteki bakalite alınmıştır. Bakalite alma işleminden sonra kalından en inceye doğru zımparalama işlemi yapılmış ve parlatma işlemi yapıldıktan sonra görüntüler EN ISO 14329 standartları kapsamında Şekil 5.13'de gösterilen Borçelik Ar-Ge Test Merkezinde bulunan Nikon SMZ 745T marka optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13: Çekirdek boyut ölçümü yapılan Nikon optik mikroskop

5.10. Optik Mikroskop görüntülerinin alınması

Her bir parametrede oluşan çekirdekten doğru görüntü elde etmek için çekirdek tam ortadan kesilmiş olup bu işlem sonrasında bakalite alınmıştır. Bakalite alma işleminin ardından zımparalanan numuneler 1 mikrona kadar parlatılmıştır. Dağlama işleminde %2 nital çözeltisi kullanılarak 30 saniyede dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi sonrası ana metal, her iki metalin geçiş bölgeleri ve çekirdek optik mikroskop ile incelenerek her bölgeden farklı büyütmelerde görüntüler elde edilmiştir. Görüntülerin elde edilmesinde Şekil 5.14.'te gösterilen Borçelik Ar-ge Test Merkezinde bulunan Zeiss Imager M2m marka optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 5.14: Mikroyapı görüntü elde edilen Zeiss marka optik mikroskop

5.11. Mikrosertlik Değerleri Ölçümü

Yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikro ve makroyapı incelemeleri sonrasında mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Mikrosertlik değeri ölçümü için 100gr yük kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirmeler iki metalden oluştuğundan çekirdek bölgesi ortada kalacak şekilde mikrosertlik ölçümleri her numune için CP çeliği sol üstte kalarak başlanmış ve merkezdeki çekirdekten geçerek sağ alt ana metal olan DP çeliğinde sonlandırılmıştır. Mikrosertlik ölçümü yapılırken EN ISO 14271 standartına uygun ve noktalar arası aralık 0,2mikron olarak gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümünde Borçelik Ar-ge Test Merkezinde bulunan Şekil 5.15'de gösterilen Emcotest DuraScan cihazı kullanmıştır.



Şekil 5.15: Emcotest marka Mikrosertlik ölçüm cihazı

5.12. SEM ve EDS Analizleri

Mikroyapı ve makroyapı görüntü analizi sonrasında her numunenin mikrosertlikte yük uygulanmadan önce SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler yapılırken Şekil 5.16'da gösterilen Borçelik Ar-ge Test Merkezinde bulunan Zeiss EVO 50 marka Taramalı Elektron Mikroskopu ve Oxford Instruments X-act marka analiz cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.16: SEM ve EDS analizinde kullanılan cihazlar

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Deneysel sonuçlara giriş

Yapılan çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan 1,5 mm CP800 ve 1,4 mm DP1000HF çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Değişken parametreler kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı olarak belirlenmiş olup yapılan tüm birleştirmelerdeki çekirdek geometrisinin mekanik özelliklere ve mikroyapıya olan etkileri incelenmiştir. Tüm deneysel çalışmalar laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

6.2. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Kaynak parametrelerinin Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz-Çekme Kuvvetine Etkisi

Yapılan birleştirmelerde kaynak değişken parametreleri olan kaynak zamanı ve akım şiddetinin çekme dayanımına etkisini incelemek için çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz-çekme testleri yapılmıştır. Çekme sonucunu doğru elde edebilmek adına her parametre değerinden üçer adet test numunesi üretilmiş ve ortalama değeri kullanılarak grafikler oluşturulmuştur. Kaynaklı birleştirilmiş dört numune çiftinden üç adeti çekme deneylerinde kullanıldıktan sonra kalan numuneler SEM ve EDS gibi mikroyapı analizlerinde kullanılmıştır. Tüm kaynaklı bağlantılardaki numune sayıları aşağıdaki Tablo 6.1.'de gösterilmektedir.

Tablo 6.1: Testlerde kullanılmak üzere hazırlanmış numune sayıları

Akım Şiddeti (A)	**Kaynak Süresi (Cycle)**					
	5 Periyot	**10 Periyot**	**15P Periyot**	**20 Periyot**	**25 Periyot**	**30 Periyot**
5850	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet
6910	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet
8070	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet
9400	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet
11700	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet
13400	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet
14600	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet
15400	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet	4Adet
Toplam Numune:	32 Adet	32 Adet	32 Adet	32 Adet	32 Adet	32 Adet

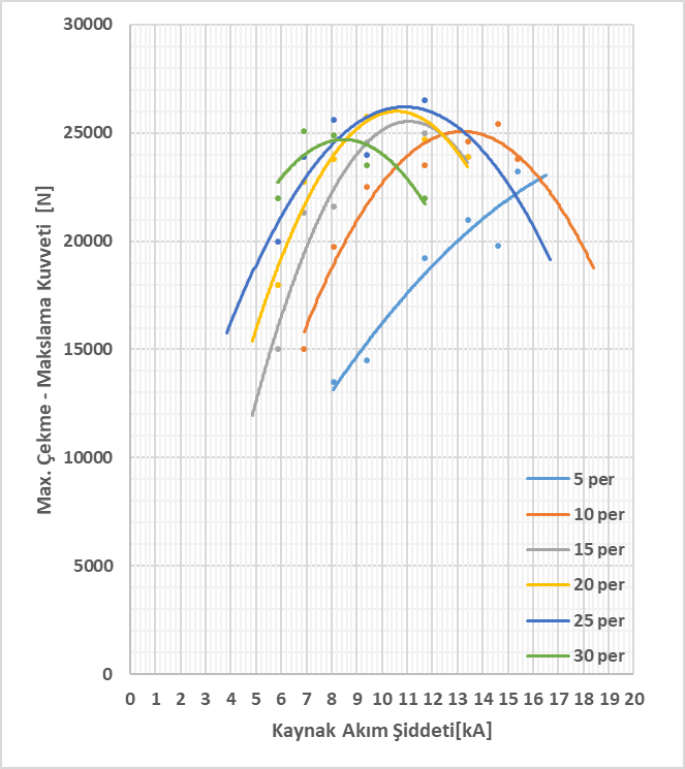
Tablo 6.2: CP800 ve DP1000HF birleştirmelerinde numune durum analizi

Kaynak Süresi (Cycle)	Kaynak Akımı (A)	Durum	Kaynaklanmış Numune
20 P	6910	-Az Miktarda Fışkırma Başlangıcı	
20 P	8070	-Fışkırma Başlangıç Seviyesinde -Renk Değişimi	
20 P	9400	-Yapışma -Fışkırma	
20 P	11700	-Yapışma Artışı -Renk Değişimi -Fışkırma Artışı	
20 P	13400	-Fışkırma -Elektrot Derinliği Artışı -Aşırı Renklenme	
20 P	14600	-Yüksek Miktarda Fışkırma -Elektrot Derinliği Çok Fazla -Aşırı Renklenme -Elektrot Yapışması Artışı	

6.2.1. Kaynak akım şiddetinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi

Aşağıdaki Şekil 6.1'de verilen grafikte görüldüğü üzere akım şiddeti arttıkça çekme dayanımı da bir noktaya kadar artmaktadır. Dayanımdaki artışın bitme nedeni ise artan fışkırmalar ile ortamdan uzaklaşan ana metaller ve elektrot dalma derinliğindeki artış ile kesit alanındaki daralmadır. En yüksek Çekme-Makaslama dayanımına 25 Periyot kaynak süresinde 11700A kaynak akım şiddetinde 26500N olarak gerçekleşmiştir.

5 Periyot kaynak zamanında gerçekleştirilen testlerdeki en yüksek çekme-makaslama dayanımı 23200N ile 15400A akım şiddetinde gerçekleşmiştir. 10 Periyot kaynak zamanında ise en yüksek dayanım 25400N ile 14600A akım şiddetinde gerçekleşmiştir. 15 Periyot kaynak zamanında en yüksek dayanım 25000N olarak 11700A akım şiddetinde elde edilmiştir. 20 Periyotta 25750N olan en yüksek çekme-makaslama dayanımı 9400A akım şiddetinde gerçekleşmiştir. 25 Periyot kaynak zamanında en yüksek dayanım değeri 26500N olarak 11700A akım şiddetinde elde edilmiştir. 30 Periyot kaynak zamanında ise gerçekleşen en yüksek çekme-makaslama dayanımı 25100N ile 6910A akım şiddetinde gerçekleşmiştir.

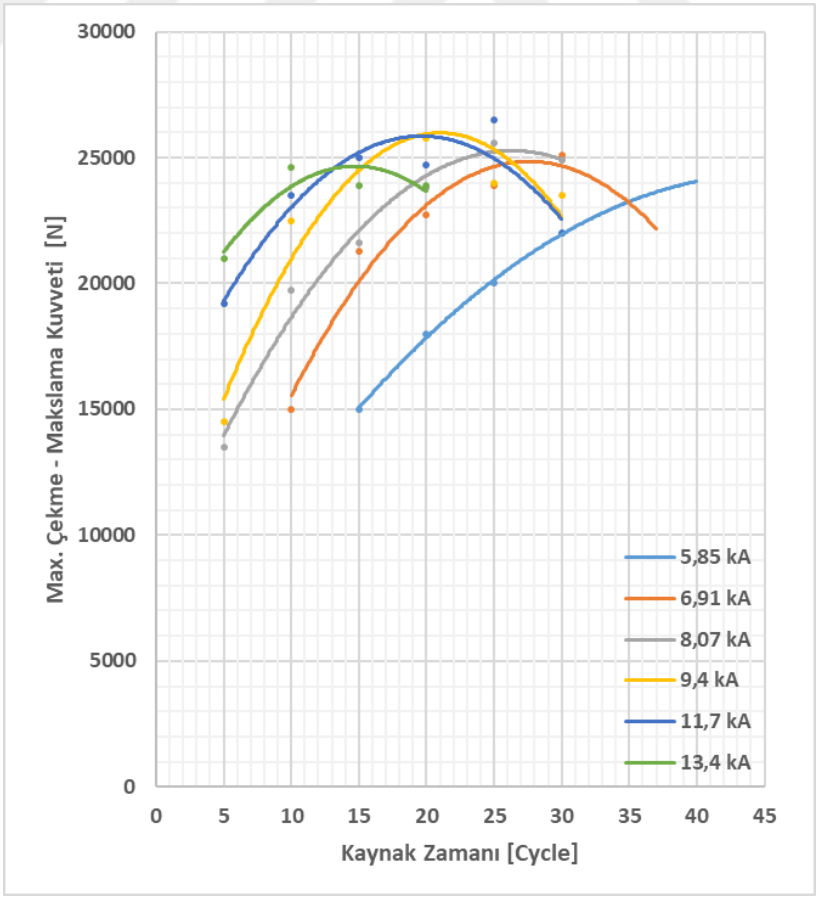


Şekil 6.1: Kaynak akım şiddetinin Çekme-Makaslama kuvvetine etkisi

Grafiği oluşturan verilerden yola çıkarak kaynaklı numunelerde yapılan inceleme sonucunda yüksek ısı girdisinin kaynak süresinin uzamasıyla birlikte elektrotun dalma derinliğinin arkadaki çelik sacına kadar gittiği görülmektedir. Bunun etkisi olarak arayüzeyde meydana gelen fışkırmalar artmaktadır. Böylece çekme-makaslama kuvvetinde düşüş gerçekleşmektedir.

6.2.2. Kaynak zamanının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

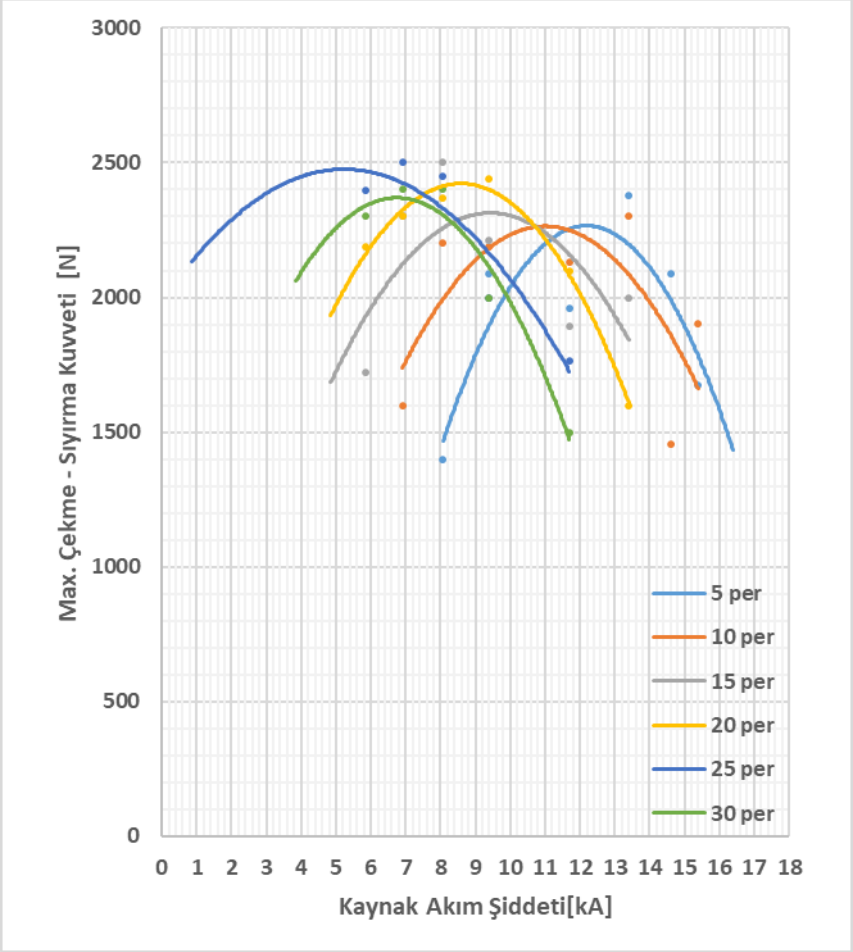
CP800-DP1000HF çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirilmesinden elde edilen çekme-makaslama grafiğinde görüldüğü üzere kaynak zamanı arttıkça ısı girdisinin artışla çekme-makaslama kuvvetlerinde artış bir noktaya kadar devam etmektedir. Düşük akım şiddetinde görüldüğü gibi ısı girdisinin artışıyla tüm parametrelerde bir artış meydana gelmiştir ve yüksek akım şiddetlerinde ise daha orta seviyedeki kaynak sürelerinde bile fışkırmalardan dolayı çekme kuvvetinde düşüş meydana gelmiştir. Literatürde buna benzer birçok çalışma yer almaktadır [75]–[78].



Şekil 6.2: Kaynak zamanının Çekme-Makaslama kuvvetine etkisi

6.2.3. Kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

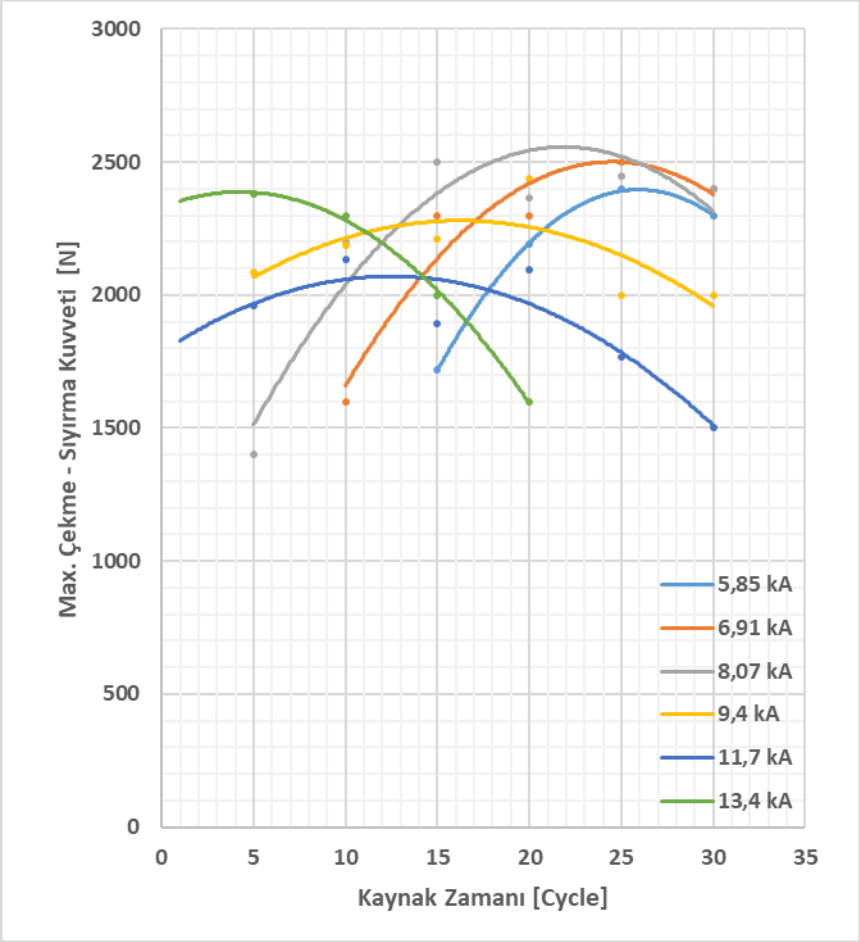
Kaynak akım şiddetinde meydana gelen artış ile çekme-sıyırma kuvveti bir noktaya kadar artsa da bu artışın giderek artan ısı girdisiyle oluşan fışkırmalar sonucunda düştüğü Şekil 6.3.'de gösterilmektedir. En yüksek çekme-sıyırma kuvvetine sahip olan birleştirmenin 2450 N ile 6910 A akım şiddetinde 25 periyotta meydana geldiği tespit edilmiştir. En düşük çekme-sıyırma kuvveti ise en kısa kaynak zamanı olan 5 periyotta ve en düşük akım şiddeti olan 8070 A'de 1400 N olarak meydana geldiği görülmektedir. Bunun nedeni düşük akım şiddeti ve kaynak sürelerinde yeterli büyüklükte çekirdeğin oluşmaması olduğu tespit edilmiştir. Çok yüksek akım şiddetlerinde ise çekirdek fazla büyüdüğünde elektrot dalma derinliği artar ve çekirdek olması gereken geometrisinin dışına çıktığından çekme-sıyırma kuvvetinde düşüş meydana gelir.



Şekil 6.3: Kaynak akım şiddetinin Çekme-Sıyırma kuvvetine etkisi

6.2.4. Kaynak zamanının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

Kaynak zamanındaki artış sonucunda da aynı kaynak akım şiddetindeki gibi bir noktadan sonra çekme-sıyırma kuvvetinde düşüş meydana geldiği Şekil 6.4.'de görülmektedir. Kaynak zamanının artması aynı akım şiddetinde dahi ısı girdisini önemli ölçüde arttırdığından çekirdeğe olan etkisi oldukça fazladır. Çekirdek geometrisindeki bozulma yüksek ısı girdisi ve elektrotların çene kuvvetiyle çekirdek yüksekliğindeki azalma ile meydana gelmektedir. En yüksek çekme-sıyırma dayanımı 2500 N olarak 6910 A ve 25 periyot kaynak zamanında tespit edilmiştir.

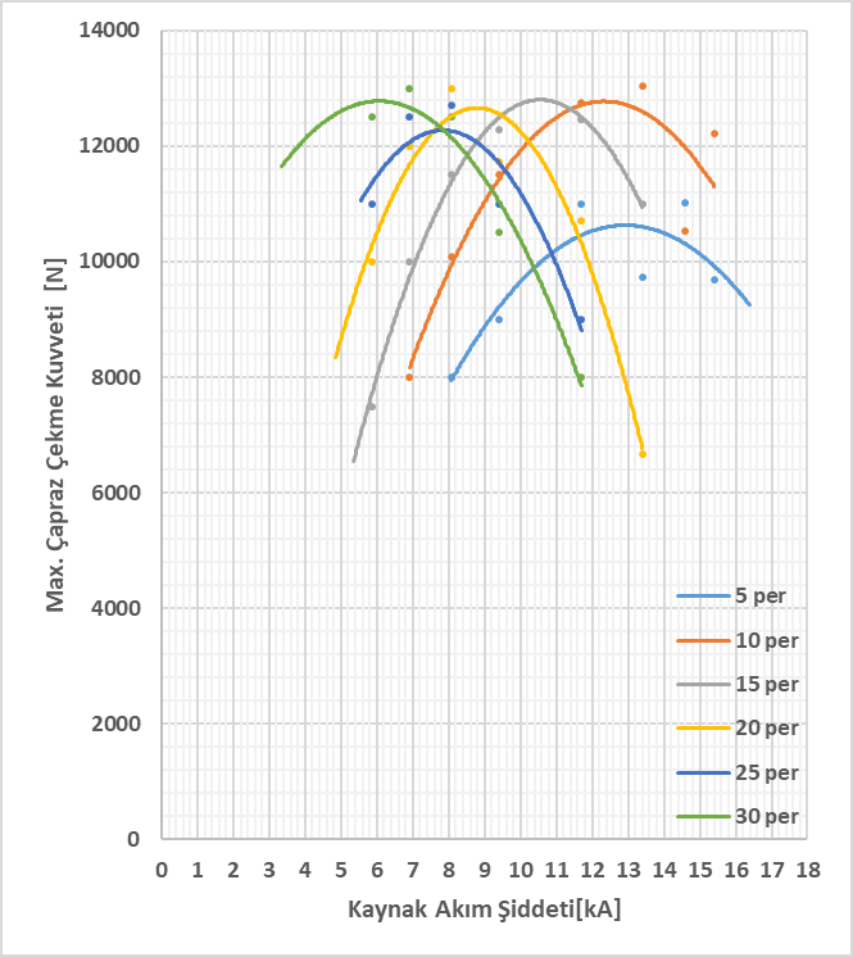


Şekil 6.4: Kaynak zamanının Çekme-Sıyırma kuvvetine etkisi

6.2.5. Kaynak akım şiddetinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Kaynak akım şiddetinin artışı ile ısı girdisi doğrusal olarak artış gösterdiği için bir noktaya kadar çapraz-çekme kuvvetinde artış meydana getirmektedir. 5, 10 ve 15 periyottaki

yükselen çapraz-çekme mukavemetinin en yüksek kaynak akım şiddetine gelmeden hemen önce düşmesinin nedeni de budur. Düşük ısı girdilerinde çekirdek nispeten daha küçük olduğu için daha düşük kuvvetlerde kopmaktadır. 15, 20 ve 25 periyottaki birleştirmelerin kısa kaynak zamanlarında dahi yüksek çapraz-çekme kuvvetlerine sahip olması ve kaynak sürelerinin artmasıyla çapraz-çekme kuvvetlerindeki düşüşün nedeni aşırı artan ısı girdisiyle elektrot dalma derinliğinin artması ve ergiyen metalin fışkırmasıyla meydana gelmektedir. Şekil 6.5.'de CP800-DP1000HF için kaynak akım şiddetinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi gösterilmektedir.

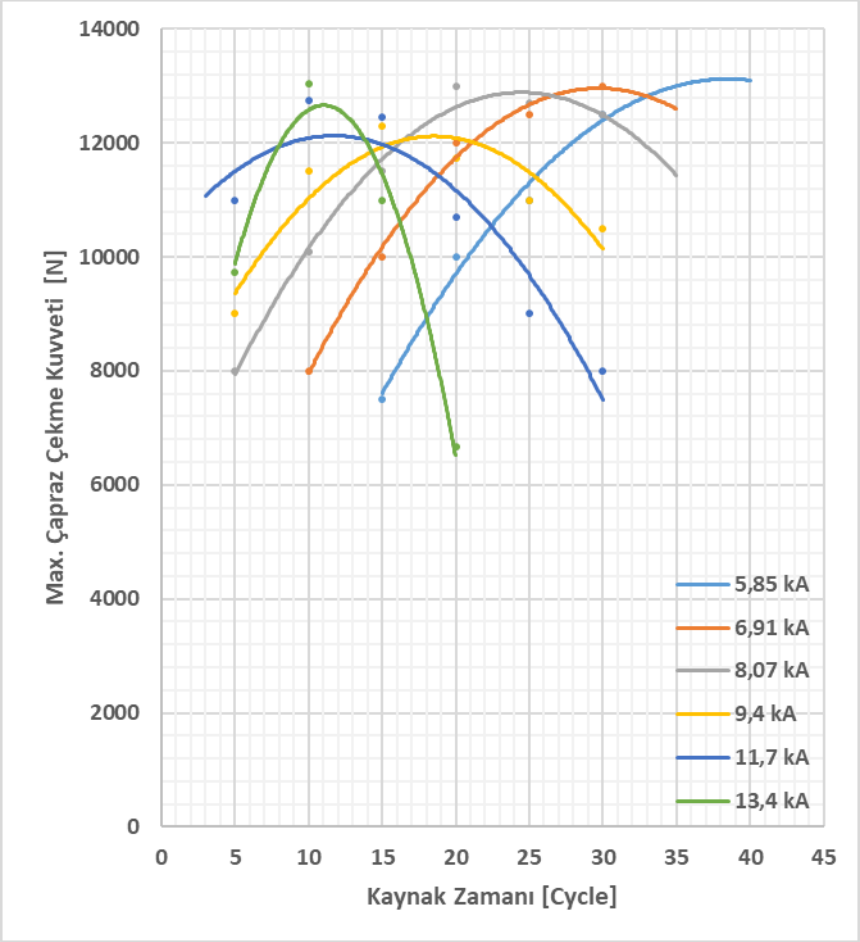


Şekil 6.5: Kaynak akım şiddetinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi

6.2.6. Kaynak zamanının çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Kaynak zamanının artmasıyla çapraz-çekme kuvveti de doğrusal olarak artmaktadır fakat bir noktadan sonra çapraz-çekme kuvveti azalmaktadır. Çapraz-çekme kuvvetinin düşmesi çekirdek oluşurken kaynak esnasındaki aşırı ısı girdisiyle olmaktadır. Isı girdisi

için hem kaynak zamanı hem kaynak akım şiddeti önem taşımaktadır. Bu iki değişken parametreden kaynak zamanının aynı olduğu birleştirmelerdeki farklı kaynak akım şiddetlerini Şekil 6.6'daki grafik üzerinden açıklayacak olursak 5 periyot için en yüksek çapraz-çekme kuvvetinin 11025 N ile 14600 A akım şiddetinde meydana geldiği görülmektedir. 30 Periyot için en yüksek çapraz-çekme kuvvetinin 13000 N ile 6910 A akım şiddetinde yani düşük akım değerinde meydana geldiği görülmektedir. Yüksek akım şiddetlerinde nispeten düşük kaynak süreleri ve uzun kaynak zamanlarında ise nispeten düşük akım şiddetlerinin doğru çekirdek oluşturduğu ve kabul edilebilir aralığı bu şekilde meydana getirdiği çekme testlerindeki sonuçlardan tespit edilmiştir.

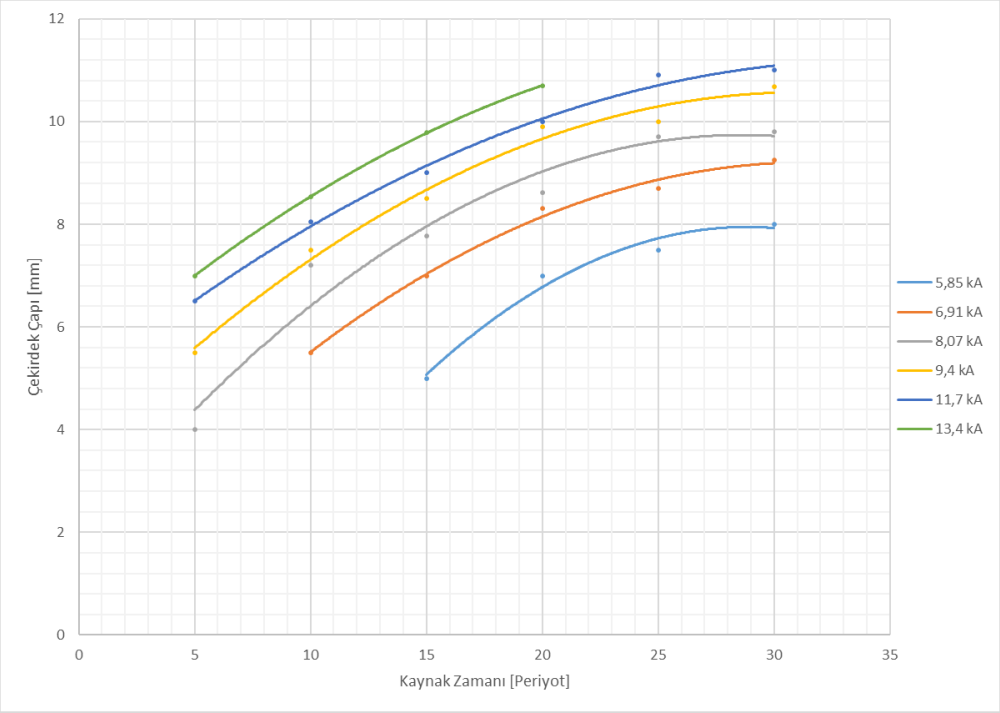


Şekil 6.6: Kaynak Zamanının Çapraz-Çekme Kuvvetine Etkisi

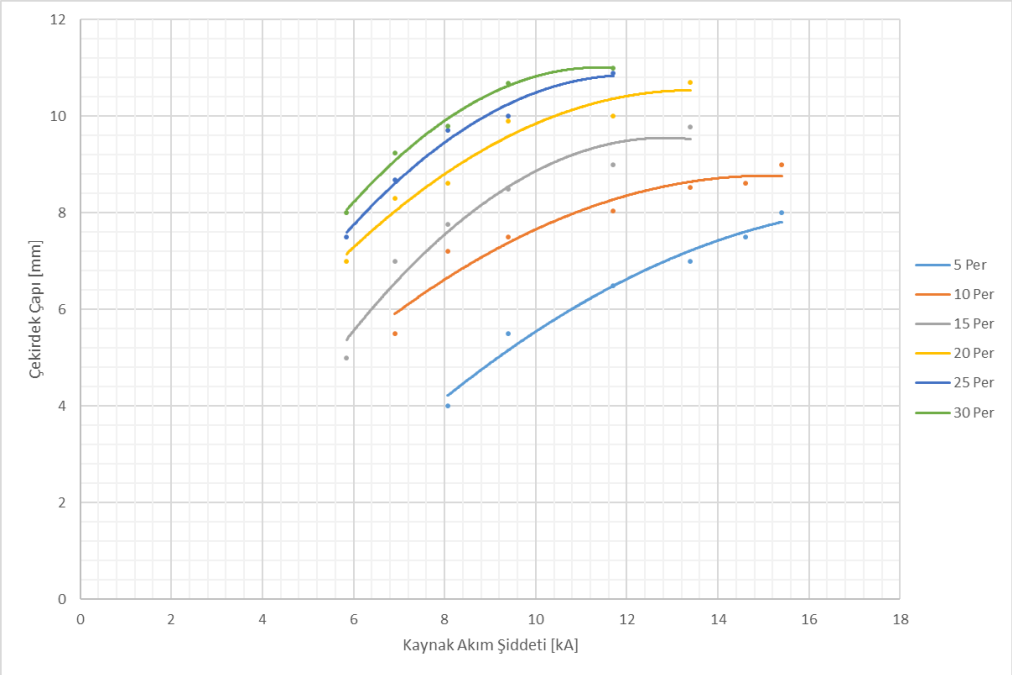
6.3. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Çekirdek Boyutlarına Etkisi

6.3.1. Kaynak Zamanı ve Kaynak Akım Şiddetinin CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerindeki Kaynak Çekirdeğinin Çapına Etkisi

CP800 ve DP1000HF çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirmelerinde meydana gelen çekirdek, kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin değişmesiyle boyutlarında değişimler meydana gelmektedir. Oluşan bu geometri farklarından en önemli sayılabilecek olanı çekirdek çapıdır. Yapılan birleştirmelerde en yüksek çekirdek çapı 11700 A akım şiddeti ve 30 periyot kaynak zamanında 11 mm olarak meydana gelmiştir. Şekil 6.7. ve Şekil 6.8.'de oluşan çekirdek çapının değişken parametreler ile meydana getirdiği grafikler görülmektedir.



Şekil 6.7: Kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi

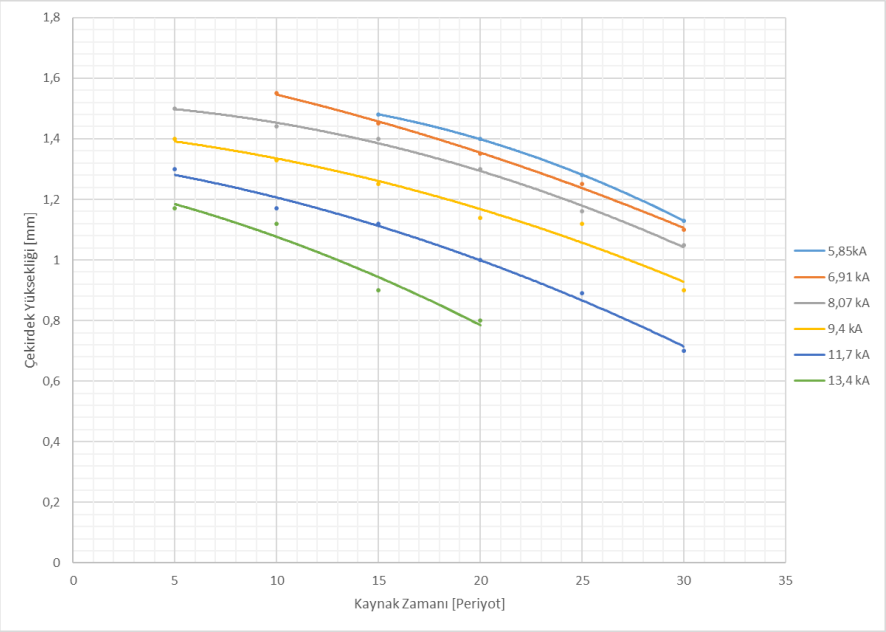


Şekil 6.8: Kaynak akım şiddetinin çekirdek çapına etkisi

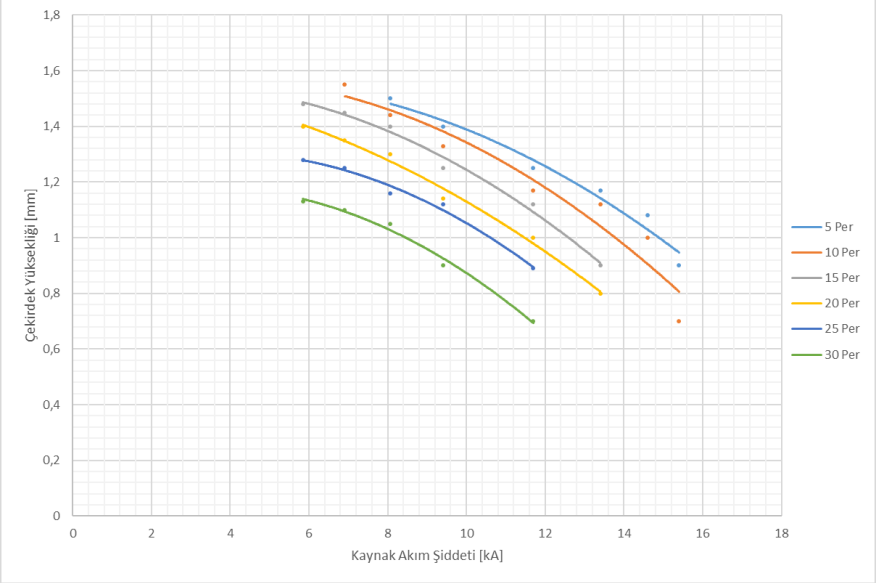
6.3.2. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki kaynak çekirdeğinin yüksekliğine etkisi

6.3.2.1. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 tarafında oluşan çekirdek yüksekliğine etkisi

Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin artışı ile birlikte tüm periyotlarda benzer ölçüde çekirdek yüksekliğinde düşüş gerçekleştiği Şekil 6.9. ve Şekil 6.10.'da görülmektedir. CP çeliğindeki optimum çekirdek yüksekliğinin 0,9 ile 1,2 mm aralığında gerçekleştiği saptanmıştır. Bu sonuç 1,5 mm kalınlığındaki CP çeliğinde meydana gelen çekirdeğin yüksekliğinin çok düşük veya çok yüksek olmaması gerektiğini göstermektedir. Çekirdeğin daha yüksek olması yani daha büyük oluşmasının daha iyi sonuçları göstermediği, her zaman optimum değer aralığının önem taşıdığı hem kaynak akım şiddeti hem de kaynak zamanı etkisi grafiğinde tespit edilmiştir.



Şekil 6.9: Kaynak zamanının CP tarafındaki Çekirdek Yüksekliğine olan etkisi

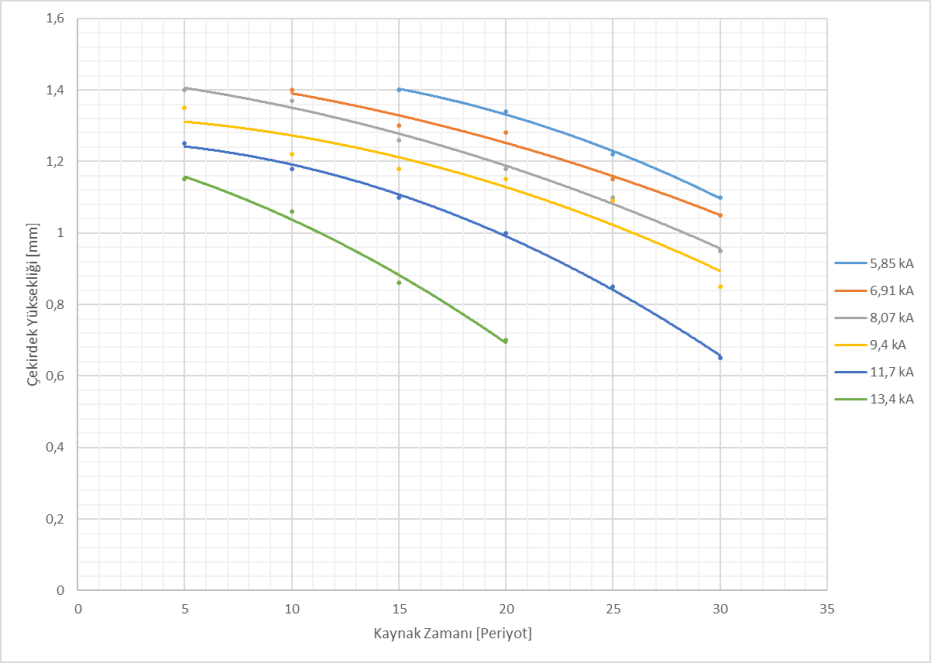


Şekil 6.10: Kaynak akım şiddetinin CP tarafındaki Çekirdek Yüksekliğine olan etkisi

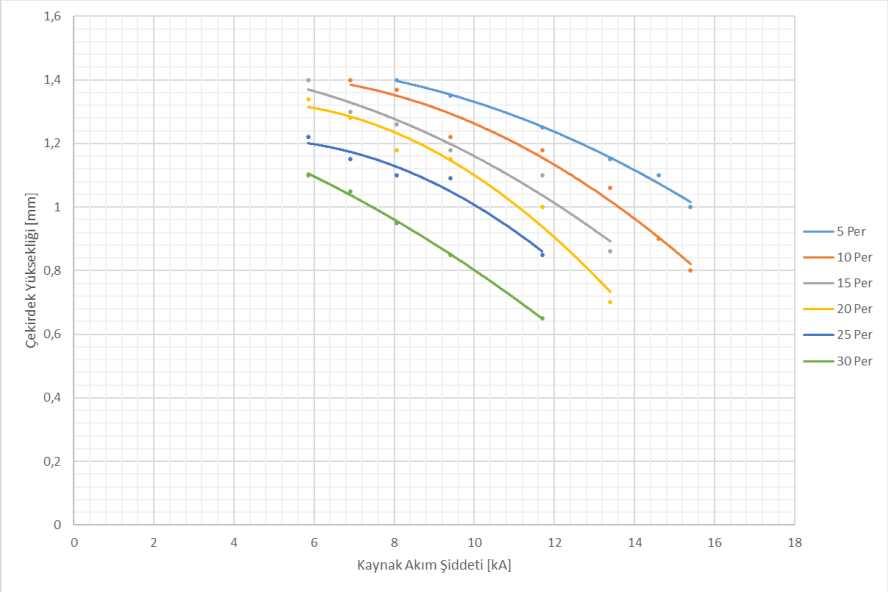
6.3.2.2. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafında oluşan çekirdek yüksekliğine etkisi

Kaynak zamanı ve akım şiddetinin artışıyla birlikte DP tarafında da CP çeliğindeki benzer etkiler görülmektedir. Bunun nedeni artan ısı girdisinin etkisiyle ergiyen metalin artması ve çekirdeğin genişlemesidir. Büyüyen çekirdek her iki çelik tarafında da benzer davranışlar göstererek büyür, bunun nedeni de neredeyse aynı olan kalınlıkları ile

benzer kimyasal yapıya sahip olmalarıdır. Yüksek akım şiddeti ve kaynak zamanındaki birleştirmelerdeki düşük olan çekirdek yüksekliklerini ergiyen metalin artışıyla beraber uygulanan çene kuvvetiyle çekirdek dışarısına sıçrantı şeklinde atılması ve çekirdeğin baskı kuvvetiyle daha yatay oluşmasıyla gerçekleştiği belirlenmiştir. Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de görüleceği gibi DP tarafında oluşan çekirdek yüksekliğinin kabul edilebilir aralığı 0,8-1 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.11: Kaynak zamanının DP tarafındaki Çekirdek Yüksekliğine olan etkisi

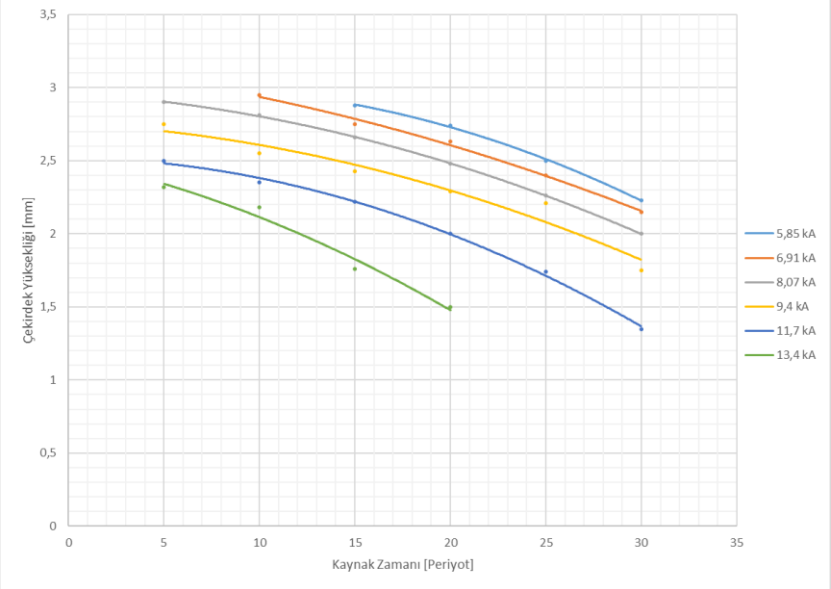


Şekil 6.12: Kaynak akım şiddetinin DP tarafındaki Çekirdek Yüksekliğine olan etkisi

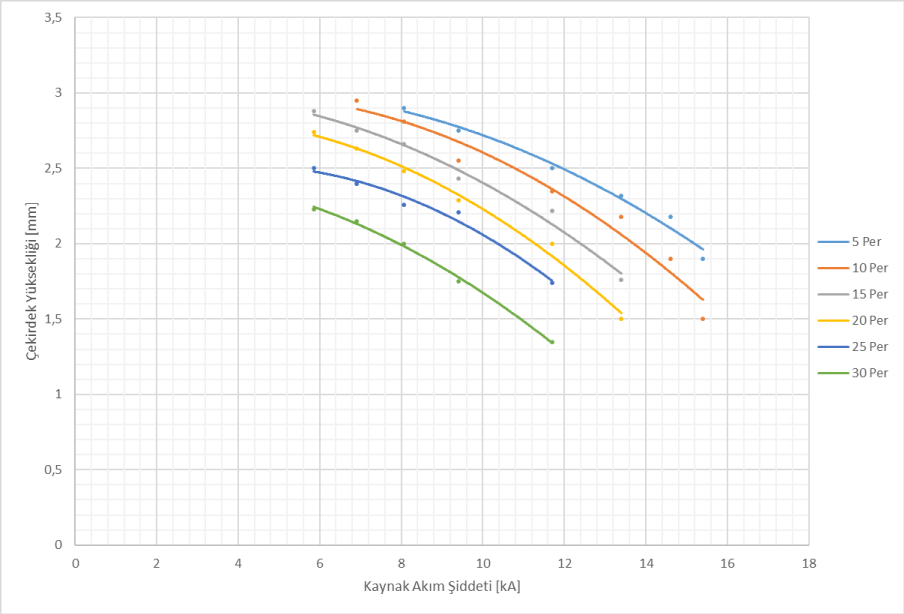
6.3.2.3. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki kaynak çekirdeğinin toplam yüksekliğine etkisi

Çekirdek yüksekliğinin 1,5 mm kalınlığındaki CP800 ve 1,4 mm kalınlığındaki DP1000HF çelik sacı için incelendiğinde, 0,1 mm kalınlık farkı nedeniyle ısıl dengenin oluşamayacağı görülmektedir. Bu nedenle çekirdek yüksekliklerinde her iki tarafa doğru farklı kaymalar meydana geldiği Şekil 6.9 ve Şekil 6.11 arasındaki farklılıklardan görülmektedir. Çelik saclar arasındaki 0,1 mm kalınlık farkının çekirdek yüksekliğini doğru hesaplandığı görebilmek adına, CP çeliğinde 1,25; DP çeliğinde ise 1,29 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan bir parametrede 0,04 mm değerinde fark bulunmaktadır. Bu farkın değeri aynı parametrede ısıl dengenin oluşumu için gerekli hesap yapılarak 0,1/2,9=0,034 olarak elde edilir. Burada iki çelik sacın arasındaki kalınlık farkını toplam kalınlığa bölerek ısıl dengedeki sapma hesap edilir. Aynı parametreye ait olan elektrot dalma derinliklerindeki 0,04 mm fark ile ısıl dengedeki 0,034 değerinin arasında neredeyse hiç fark olmaması çekirdeğin doğru oluştuğunu göstermektedir.

CP800-DP1000HF birleştirmelerindeki kaynak çekirdeğinin yükseklik değişimi iki çelik için de incelendiğinde hem kaynak akım şiddeti hem de kaynak zamanının artmasıyla bir düşüş yaşandığı tüm parametreler için görülmektedir. Toplam çekirdek yüksekliğine olan etkisini kaynak zamanı ve akım şiddeti için incelendiğinde oluşan grafikler Şekil 6.13. ve Şekil 6.14.'de görülmektedir.



Şekil 6.13: Kaynak zamanının toplam çekirdek yüksekliğine etkisi

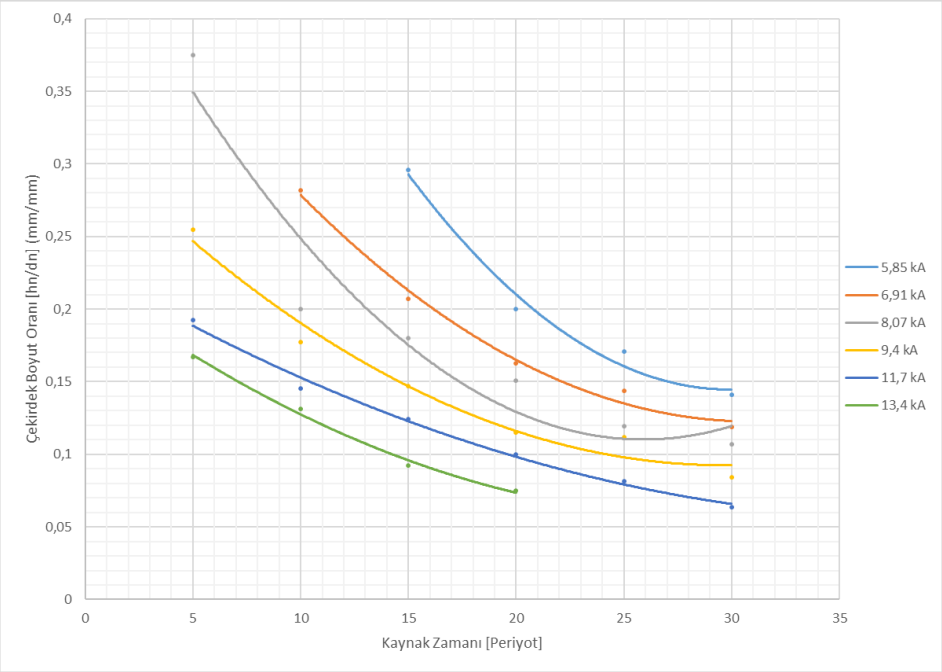


Şekil 6.14: Kaynak akım şiddetinin toplam çekirdek yüksekliğine etkisi

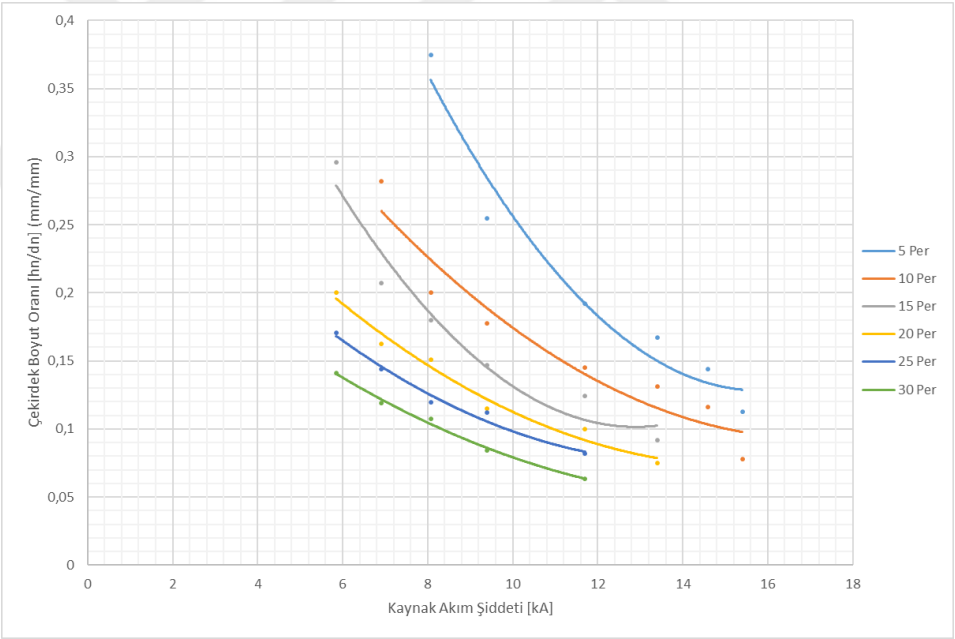
6.3.3. Kaynak Zamanı ve Kaynak Akım Şiddetinin CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerindeki Çekirdek Boyut Oranına Etkisi

6.3.3.1. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi

Kaynak çekirdeğinin çekirdek boyut oranı değeri, çekirdek yüksekliğinin çekirdeğin çapına olan bölümünden çıkan sonucu ifade etmektedir. Bu değer kaynak çekirdeğinin geometrisindeki değişimi iki farklı değerin oranıyla ortaya çıkar. Şekil boyut oranı olarak da adlandırılabilmektedir. CP800 tarafındaki çekirdek boyut oranının, oluşan çekirdeğin çapının kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının etkisiyle çekirdeğin yüksekliğine oranla hızlı arttığından dolayı çekirdek boyut oranında tüm kaynak parametrelerinde oluşan düşüşler Şekil 6.15. ve Şekil 6.16.'da görülmektedir.



Şekil 6.15: Kaynak zamanının CP800 tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi

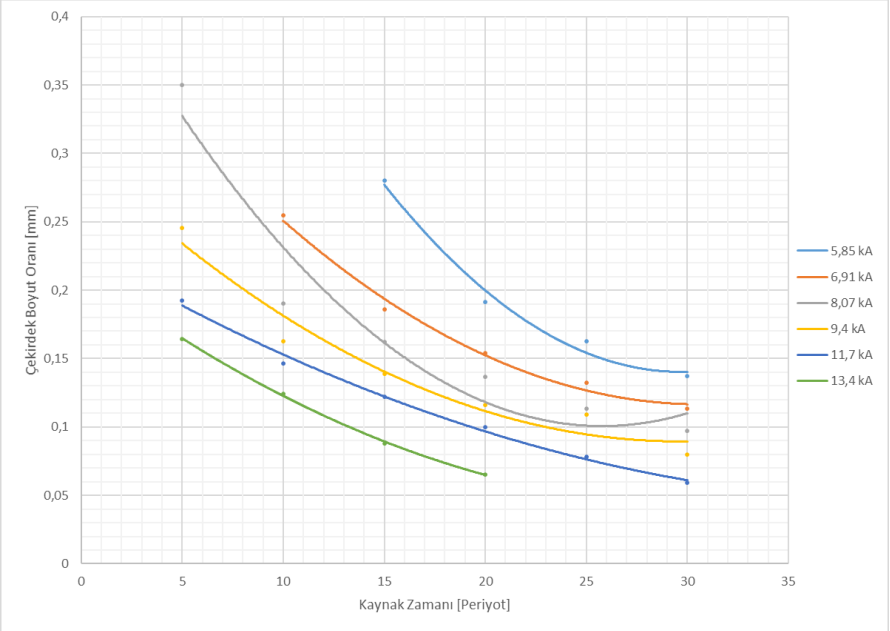


Şekil 6.16: Kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi

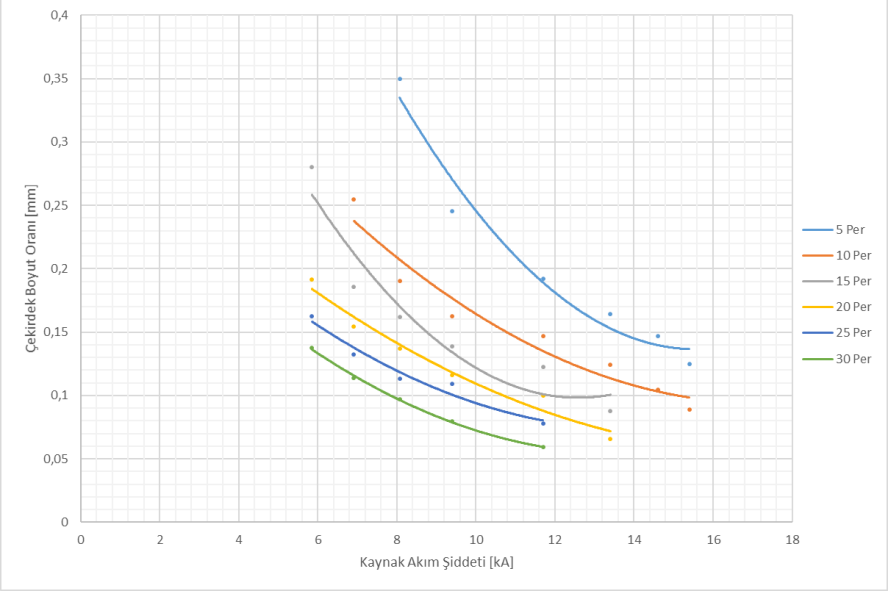
6.3.3.2. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi

Çekirdek boyut oranının DP1000HF tarafında da aynı CP800 gibi giderek düşen bir değere sahip olduğu Şekil 6.17 ve Şekil 6.18.'de görülmektedir. Bunun nedeni çekirdek çapındaki büyümenin, çekirdek yüksekliğinden hızlı olmasıyla açıklanır. En düşük

çekirdek boyut oranlarının, yüksek akım şiddeti ve uzun kaynak zamanlarında oluşan çok geniş çekirdeğin etkisiyle olduğu tespit edilmiştir.



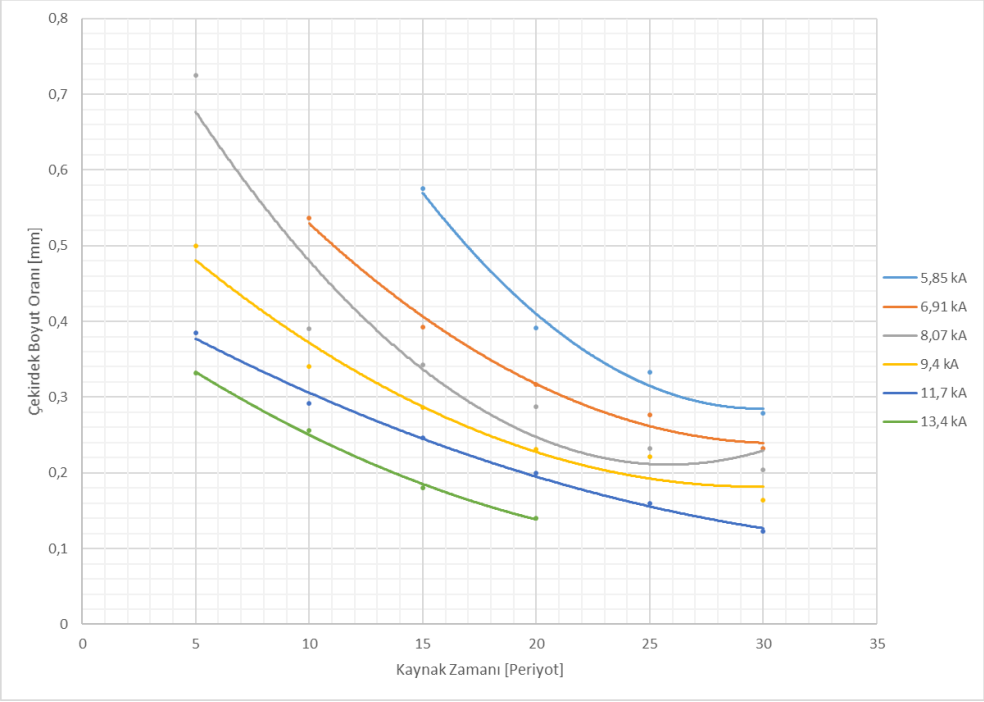
Şekil 6.17: Kaynak zamanının DP1000HF tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi



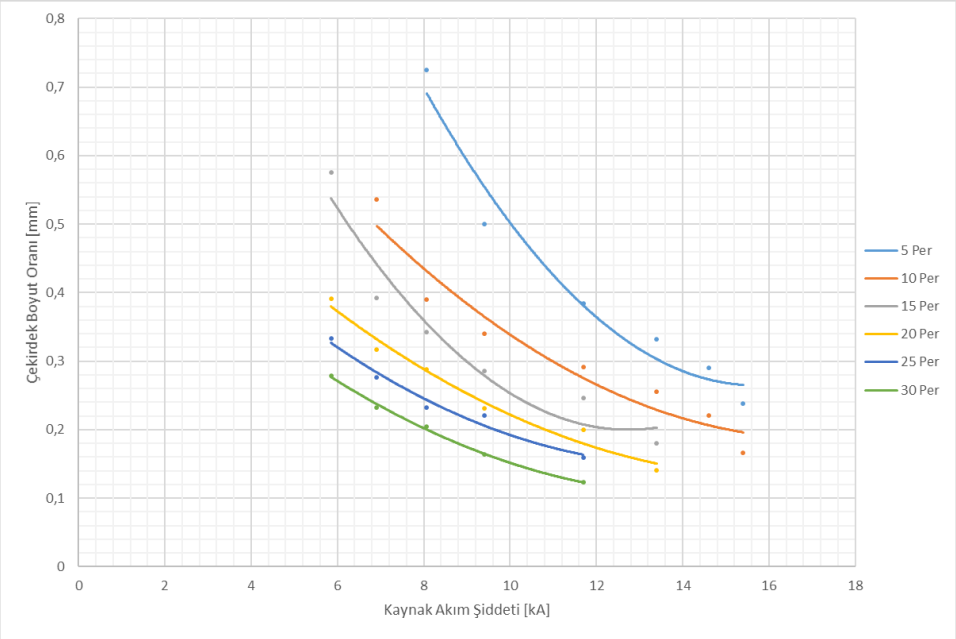
Şekil 6.18: Kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafındaki çekirdek boyut oranına etkisi

6.3.3.3. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki toplam çekirdek boyut oranına etkisi

Çekirdek boyut oranındaki değişim CP800 ve DP1000HF birleştirmelerinde oluşan çekirdeğin çapının yüksekliğine oranla daha hızlı arttığını Şekil 6.19. ve Şekil 6.20.'de göstermektedir. Kaynak zamanının da kaynak akım şiddeti kadar çekirdek geometrisinin oluşumunda etkili olduğu Şekil 6.19. ve Şekil 6.20.'deki grafiklerdeki benzer düşüş davranışlarıyla görülmektedir. Benzer sonuçların literatürde yer alan diğer çalışmalarda da elde edildiği belirlenmiştir[73], [85], [86].



Şekil 6.19: Kaynak zamanının toplam çekirdek boyut oranına etkisi

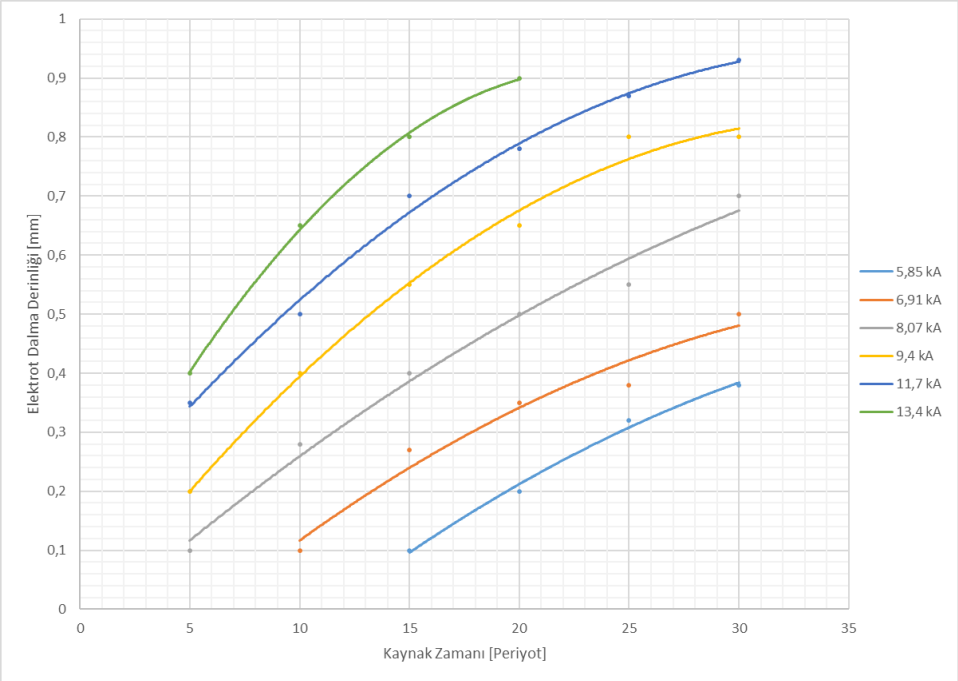


Şekil 6.20: Kaynak akım şiddetinin toplam çekirdek boyut oranına etkisi

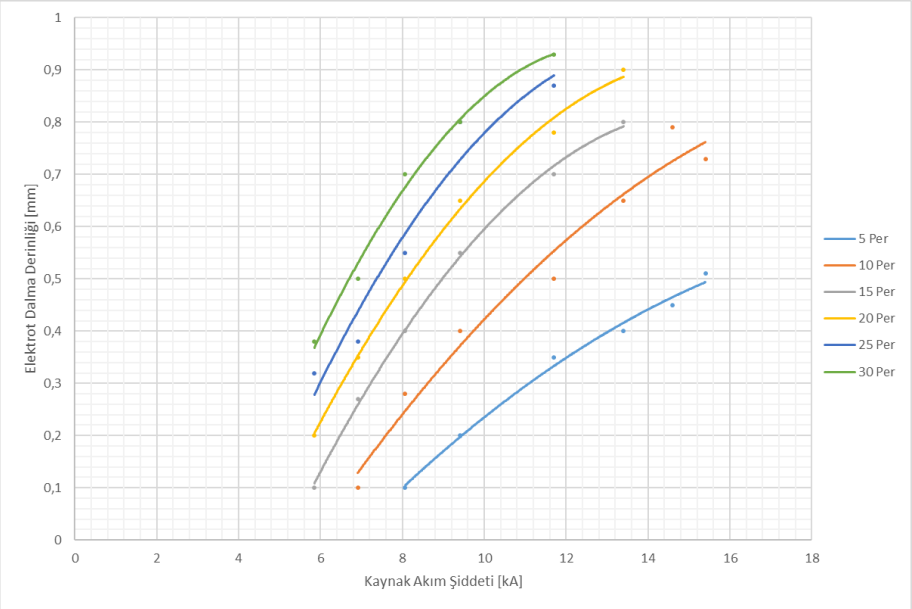
6.3.4. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki elektrot dalma derinliğine etkisi

6.3.4.1. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi

Kaynak zamanının artmasıyla elektrot baskı kuvvetinin daha uzun süre uygulanması anlamına geldiğinden dolayı ortamda oluşan ısının daha uzun süre kalmasıyla beraber elektrotun izini belirgin hale getirerek dalma derinliğini arttırdığı Şekil 6.21. ve Şekil 6.22.'de görülmektedir. En yüksek elektrot dalma derinliği 0,93 mm ile 11700 A akım şiddetinde oluşmuş olup yakın değerleri 25 ve 30 periyot kaynak zamanlarında ulaşılmıştır. Elektrotun dalma derinliğinde meydana gelen artış yükselen ısı girdisini göstermektedir. Isı girdisinin yükselmesiyle birlikte uzun kaynak zamanları ve yüksek akım şiddetlerinde aşırı sıçrantılar oluşmaktadır.



Şekil 6.21: Kaynak zamanının CP800 tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi

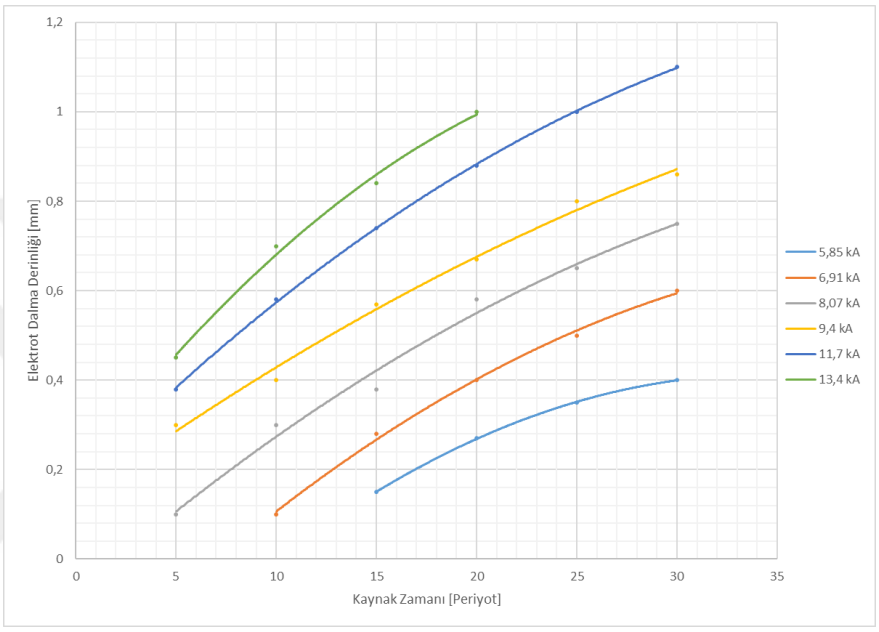


Şekil 6.22: Kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi

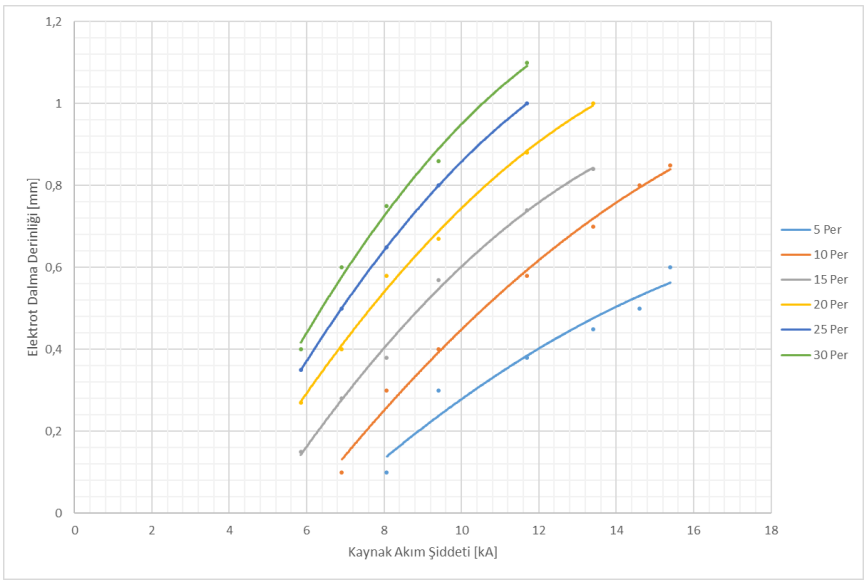
6.3.4.2. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi

Elektrot baskı kuvvetiyle birlikte kaynak akım şiddeti ve kaynak akım zamanı gibi değişken parametrelerin yüksek ısı girdisi sağladığı durumlarda çekirdekteki aşırı ergime ile sıçrantı oluşur ve elektrotun dalma derinliği artar. En yüksek elektrot dalma derinliği

her zaman uzun kaynak zamanları ve kaynak akım şiddetlerinin meydana getirdiği noktalarda meydana gelmektedir. En yüksek elektrot dalma derinliği 1,1 mm 30 periyot kaynak zamanında gerçekleşmiş olup yakın değerleri 11000 A üzerindeki kaynak akım şiddetlerinde meydana gelmektedir. Şekil 6.22 ve Şekil 6.23.'de görüldüğü üzere DP1000HF çeliği tarafında da yanı CP800 gibi giderek artan bir elektrot dalma derinliği tespit edilmiştir.



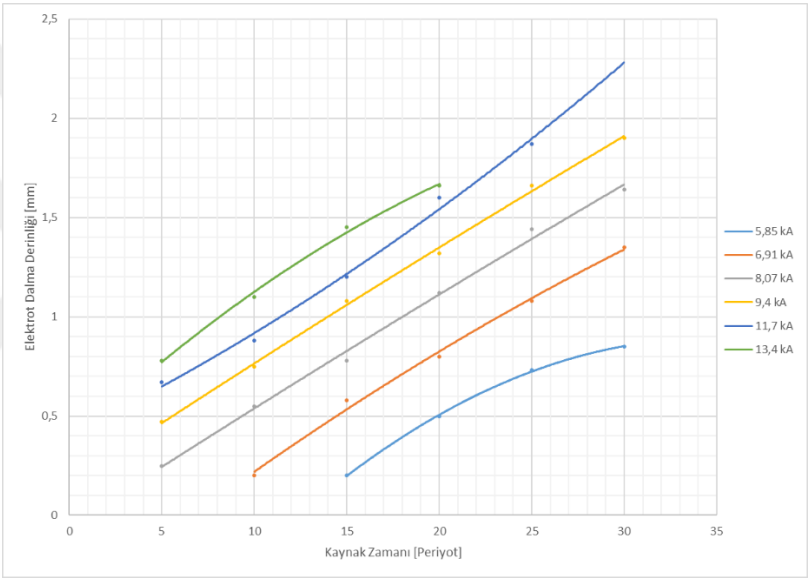
Şekil 6.23: Kaynak zamanının DP1000HF tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi



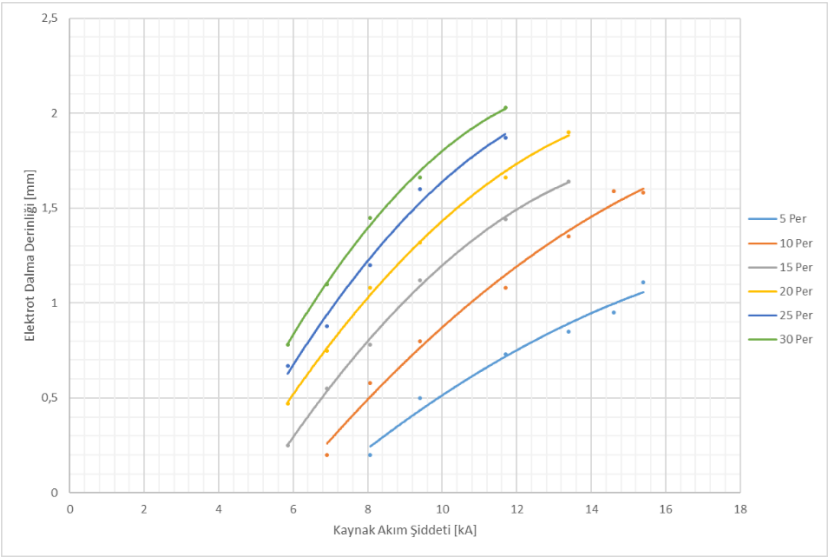
Şekil 6.24: Kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafındaki elektrot dalma derinliğine etkisi

6.3.4.3. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki toplam elektrot dalma derinliğine etkisi

Yapılan tüm kaynaklı birleştirmelerinde CP800 ve DP1000HF için her iki çelik sacı değerlendirildiğinde elektrot dalma derinliğinde gerçekleşen artıştan dolayı toplam elektrot dalma derinliğindeki artış meydana gelmektedir. Kaynak akım zamanı ve kaynak akım şiddetinin etkisiyle artan ısı girdisi ortamdaki ergiyen metalin oluşan fışkırmalar ile atılmasıyla daha derin bir iz ve renklenmeler bırakarak yüksek elektrot dalma derinliğine ulaştığı Şekil 6.23. ve Şekil 6.24.'te görülmektedir.



Şekil 6.25: Kaynak zamanının toplam elektrot dalma derinliğine etkisi

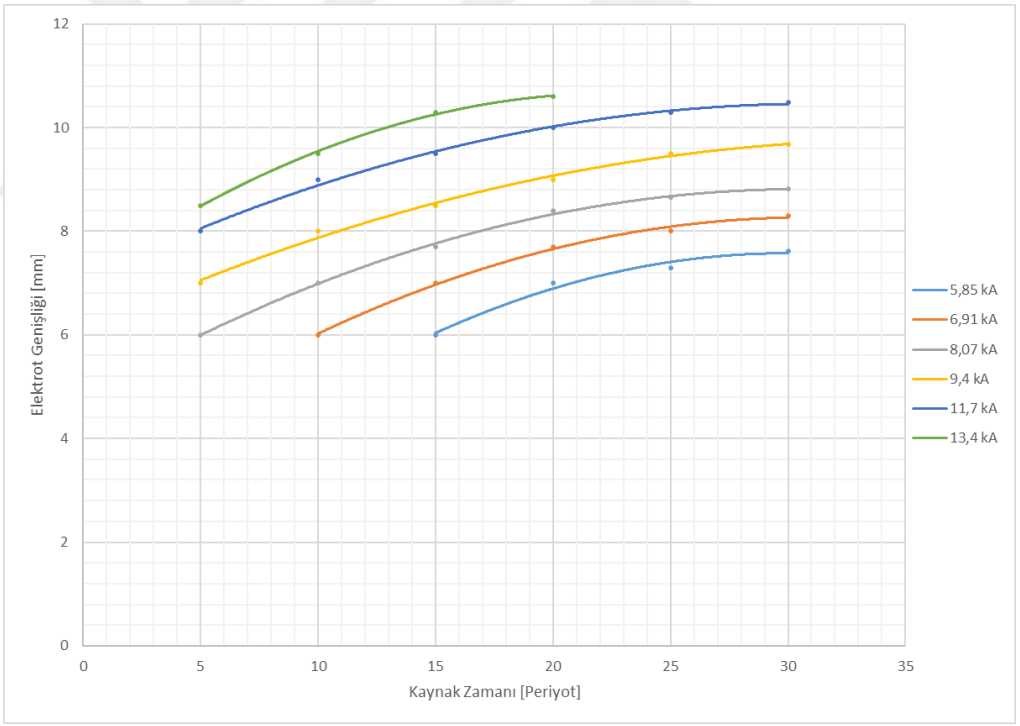


Şekil 6.26: Kaynak akım şiddetinin toplam elektrot dalma derinliğine etkisi

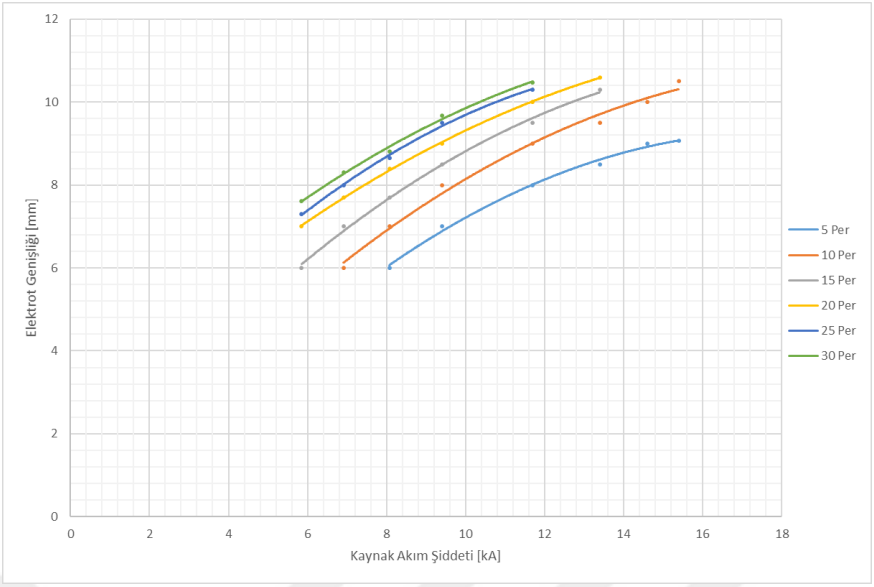
6.3.5. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki elektrot genişliğine etkisi

6.3.5.1. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki elektrot genişliğine etkisi

Kaynak akım şiddetleri ve kaynak zamanları arttıkça elektrot dalma derinliğinde olduğu gibi elektrot genişliği de artmaktadır. Elektrotun genişliğinin artmasının en önemli nedeni ise ergiyen metalin uzun kaynak zamanlarında ve yüksek akım şiddetlerinde daha fazla çekirdek dışarısına sıçrantılar ile atılmasıyla olur. En yüksek elektrot genişliğine 13400 A akım şiddeti ve 20 Periyot kaynak zamanında 10,6 mm olarak ulaşılmıştır. Şekil 6.25 ve Şekil 6.26.'da elektrot genişliğinin kaynak zamanı ve akım şiddetinin artmasına bağlı olarak yükselmesi görülmektedir.



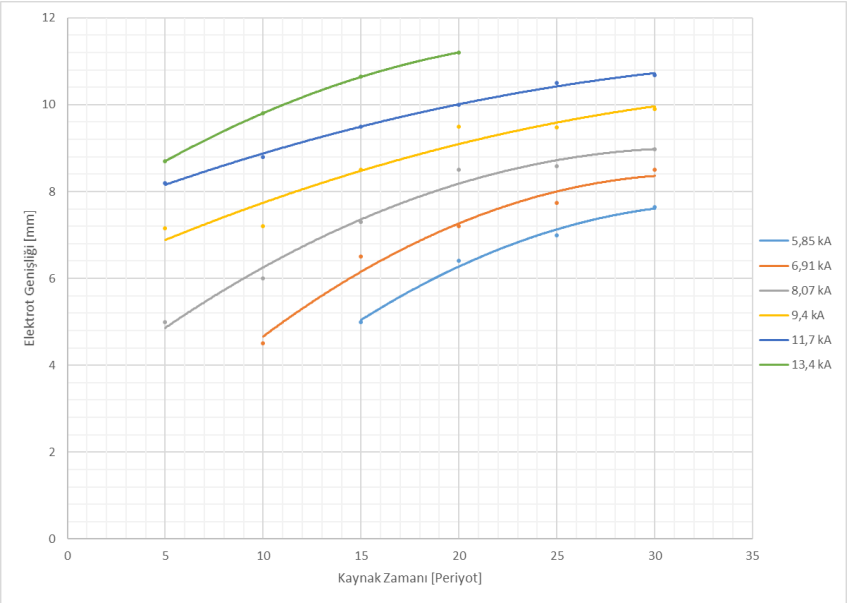
Şekil 6.27: Kaynak zamanının CP800 tarafındaki elektrot genişliğine etkisi



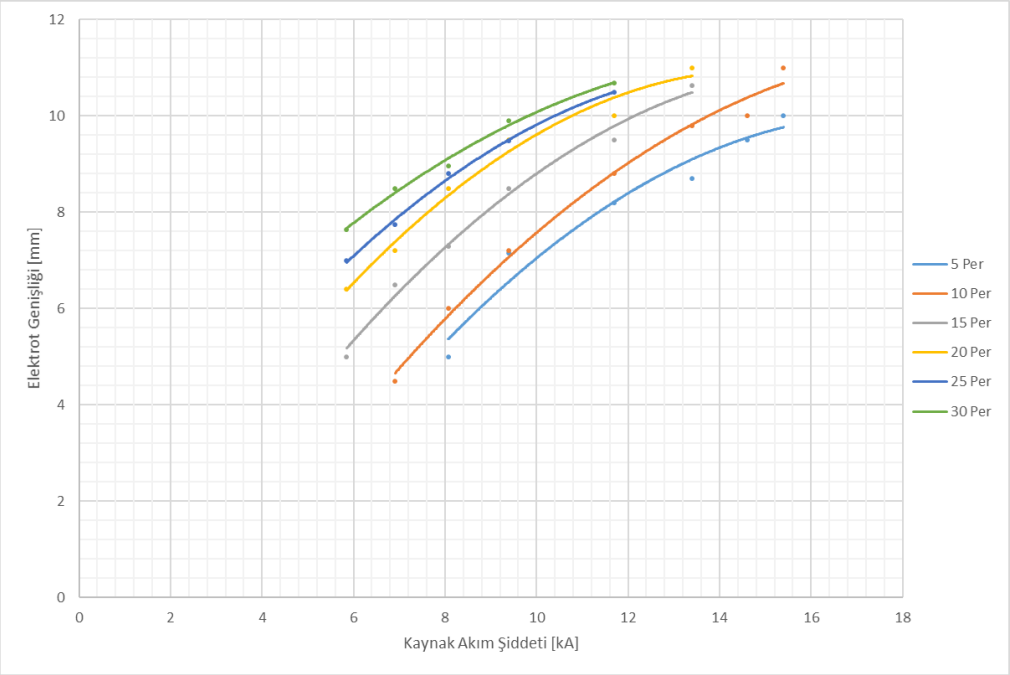
Şekil 6.28: Kaynak akım şiddetinin CP800 tarafındaki elektrot genişliğine etkisi

6.3.5.2. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin DP1000 tarafındaki elektrot genişliğine etkisi

Kaynak akım zamanı ve akım şiddeti arttıkça DP1000HF çeliği tarafındaki elektrot genişliğinin arttığı Şekil 6.27. ve Şekil 6.28'de görülmektedir. En yüksek elektrot genişliği değerine 11700 A akım şiddeti ve 30 Periyot kaynak zamanında 10,68 mm ile ulaşılmıştır.



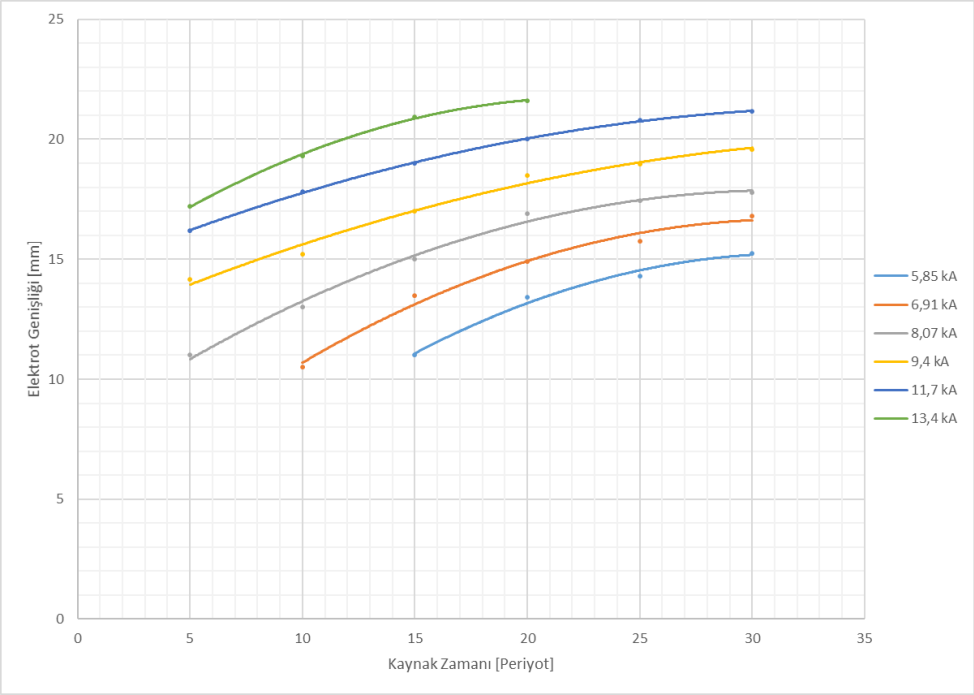
Şekil 6.29: Kaynak zamanının DP1000HF tarafındaki elektrot genişliğine etkisi



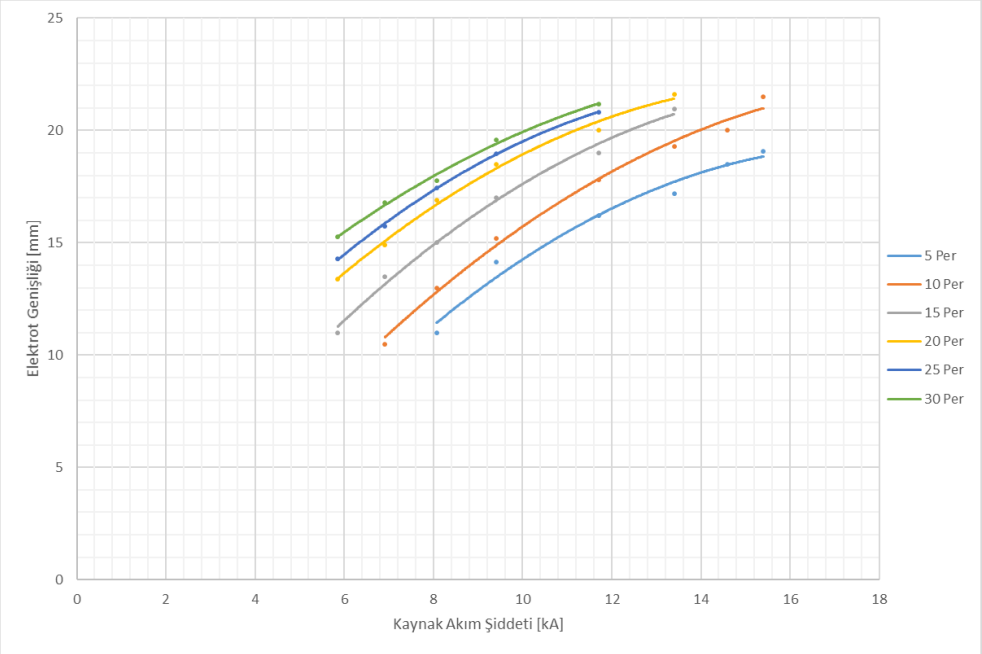
Şekil 6.30: Kaynak akım şiddetinin DP1000HF tarafındaki elektrot genişliğine etkisi

6.3.5.3. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetinin CP800 ve DP1000HF birleştirmelerindeki toplam elektrot genişliğine etkisi

CP800 ve DP1000HF çeliklerinin elektrot genişliğindeki değişim ayrı ayrı incelendiğinde kaynak zamanına oranla kaynak akım şiddetinin elektrot genişliği üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni grafikler arasındaki artışın kaynak akım şiddetinde daha fazla olmasıdır. Daha dik artış gösteren grafiklerden yola çıkarak bu sonuca ulaşılmıştır. Toplam elektrot genişliği, her iki çelik için de benzer olan kaynak akım şiddetindeki artışın grafiğe daha dik olarak yansıdığı yani elektrot genişliği için daha etkili bir parametre olduğu Şekil 6.29. ve Şekil 6.30.'da görülmektedir.



Şekil 6.31: Kaynak zamanının toplam elektrot dalma derinliğine etkisi

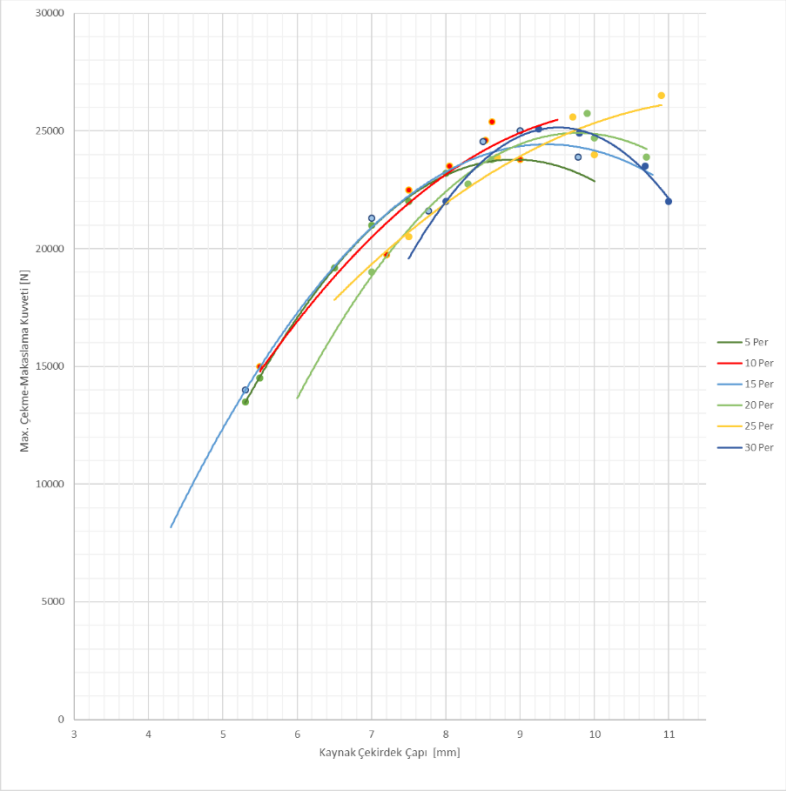


Şekil 6.32: Kaynak akım şiddetinin toplam elektrot dalma derinliğine etkisi

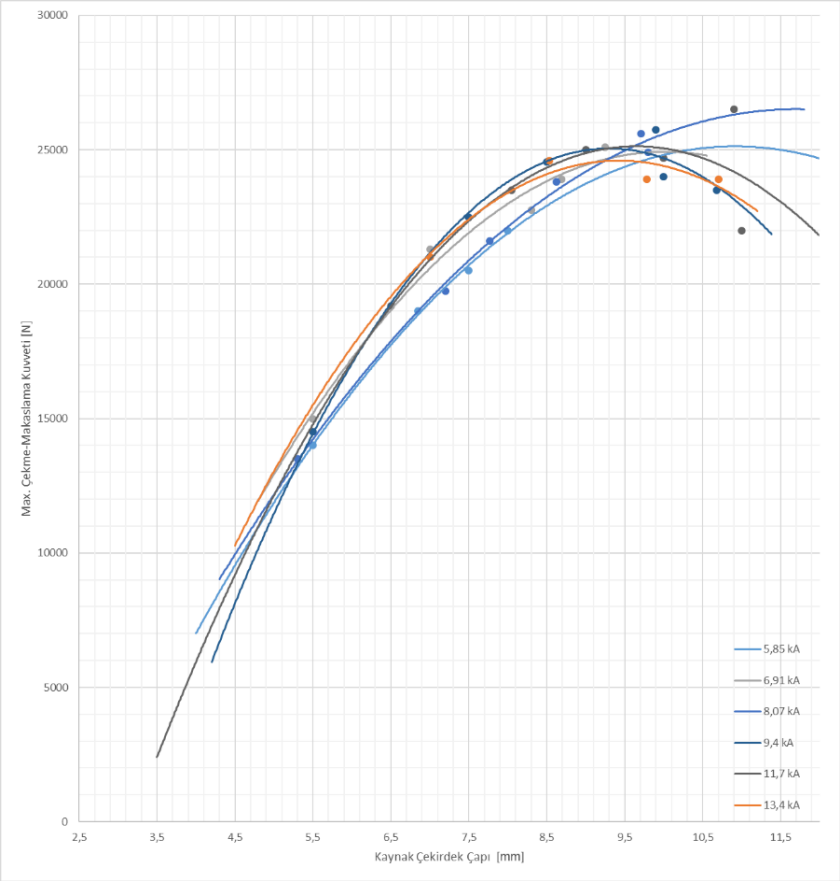
6.4. CP800 ve DP1000HF birleştirmelerinde kaynak parametrelerinin çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz-çekme kuvvetine etkisi

6.4.1. Çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

Çekirdek çapının artışıyla birlikte çekme-makaslama kuvveti artmaktadır. Fakat çekirdek çapının 9 mm'den sonraki boyutlarında bu kuvvet artışı görülmemektedir. Bunun nedeni çekirdeğin genişlerken çok fazla sıçrantıyla birlikte metalden yüksek miktarda kayıp vermesidir. Şekil 6.31 ve 6.32'de görüldüğü gibi çekirdek çapının 10,9 mm olduğu nokta için en yüksek çekme-makaslama kuvveti 26500 N olarak görülse de bu 25 periyot kaynak süresinde gerçekleşmiş olup derin elektrot izine sahip bir bağlantıdır. 30 periyot için incelendiğinde 9,25 mm çekirdek çapında maksimum çekme-makaslama kuvveti 25100 N olduğu görülmektedir. Buradan çekirdek çapının büyümeye devam ettikçe çekme-makaslama kuvvetinin de artmadığı görülmektedir. Benzer sonuçlar alındığı literatür taramasında karşılaşılan diğer çalışmalarda görülmektedir [51], [73], [86].



Şekil 6.33: Kaynak zamanına bağlı çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

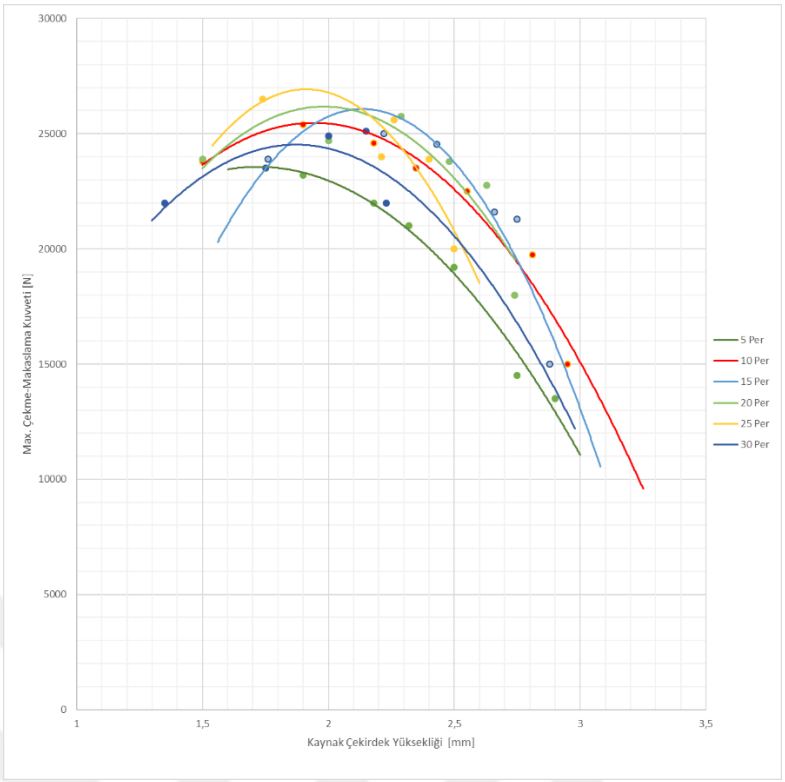


Şekil 6.34: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

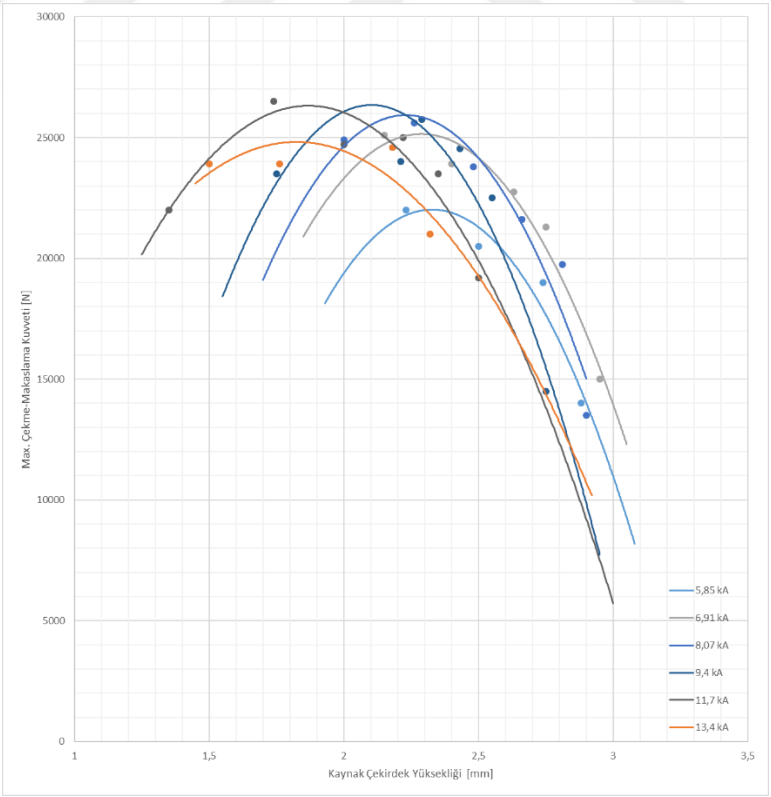
6.4.2. Çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi

Tüm kaynak zamanlarında çekirdek yüksekliği kısa süreliğine bir artış göstermiş olsa da kaynak zamanının uzadığı tüm durumlarda çekirdeğin yüksekliğindeki düşüş Şekil 6.33. ve Şekil 6.34.'te görülmektedir. Çekirdek yüksekliğindeki düşüşün nedeni çapın elektrot baskı kuvvetinden dolayı çekirdeğin genişlemesinden dolayı oluşmaktadır. Artan ısı girdisinin etkisiyle çekirdek bir yüksekliğe kadar oluşur fakat sonrasında aşırı ergiyen metalin etkisi elektrotların çene kuvvetiyle birlikte çekirdeğin çapını arttırarak geometrisini değiştirmektedir.

Kaynak akım şiddetini de kaynak zamanı kadar çekirdek yüksekliğine bağlı çekme-makaslama kuvvetinin değişiminde önem taşımaktadır. En yüksek çekme-makaslama kuvvetine 1,74 mm çekirdek yüksekliğinde 25 periyot kaynak zamanında ulaşılmıştır.



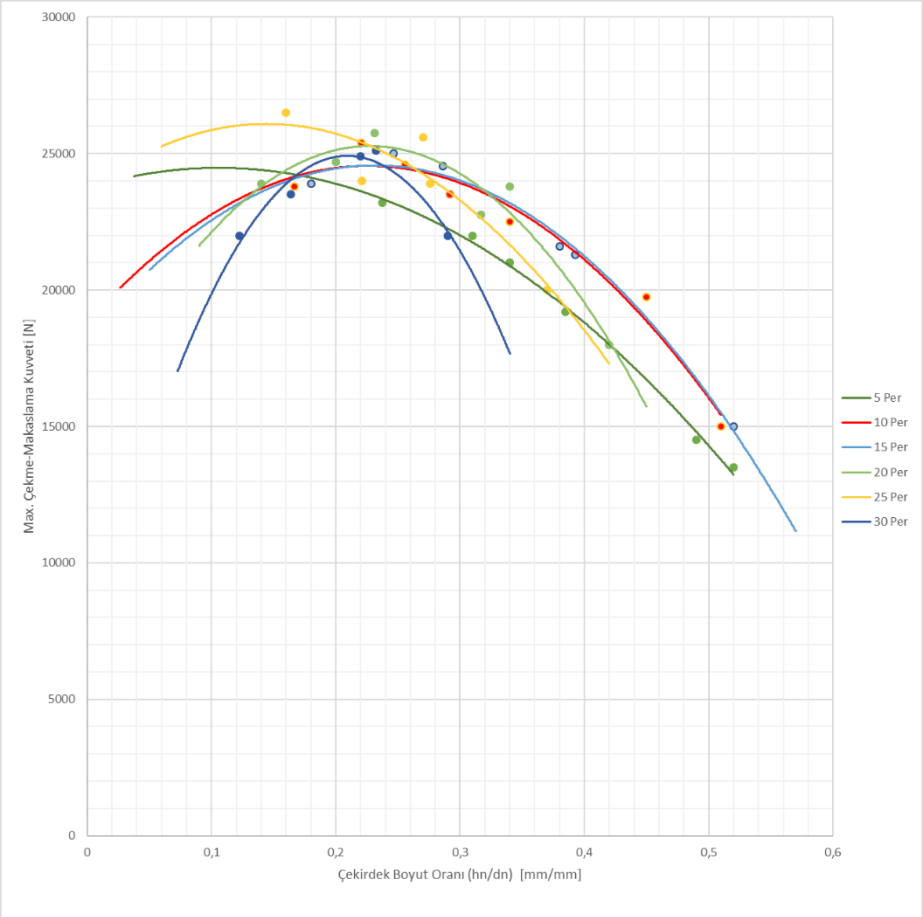
Şekil 6.35: Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi



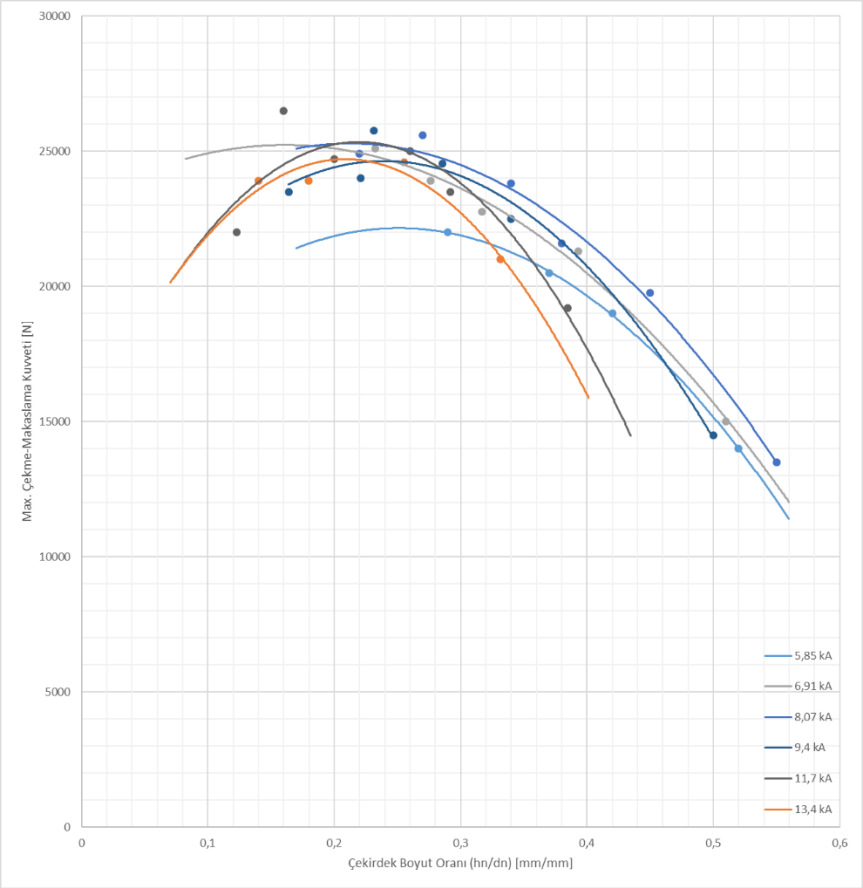
Şekil 6.36: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi

6.4.3. Çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranı; 5, 10 ve 15 periyot gibi nispeten kısa kaynak zamanları için daha yatay bir düşüş gerçekleştirmiş olup çekme-makaslama kuvvetini kabul edilebilir seviyede birden fazla parametre için korumaktadır. 20, 25 ve 30 periyot gibi uzun kaynak sürelerinde ise Şekil 6.35.'de görüldüğü gibi çekme-makaslama kuvvetine hızlı bir düşüş görülmektedir. Kaynak akım şiddeti için de aynı durum söz konusudur ve yüksek akım şiddetlerinde benzer sonuçlar Şekil 6.36.'da görülmekte olup yatay davranışlar bunu desteklemektedir. Bunun nedeni ise uzun kaynak zamanlarındaki aşırı ısı girdisine bağlı olarak çekirdek boyut oranındaki paydada yer alan çekirdek çap değerinin aşırı artmasıdır. Geniş çaplı çekirdeklerin yüksekliği az olduğu durumlarda çekirdek boyut oranı yüksektir ve bu da çekme-makaslama kuvvetini azaltmaktadır.



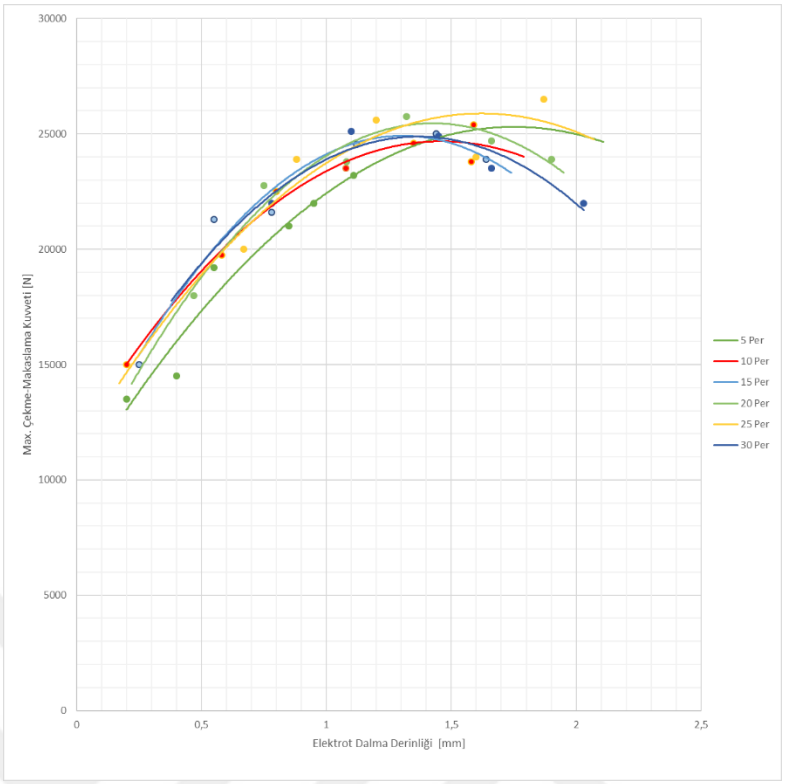
Şekil 6.37: Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi



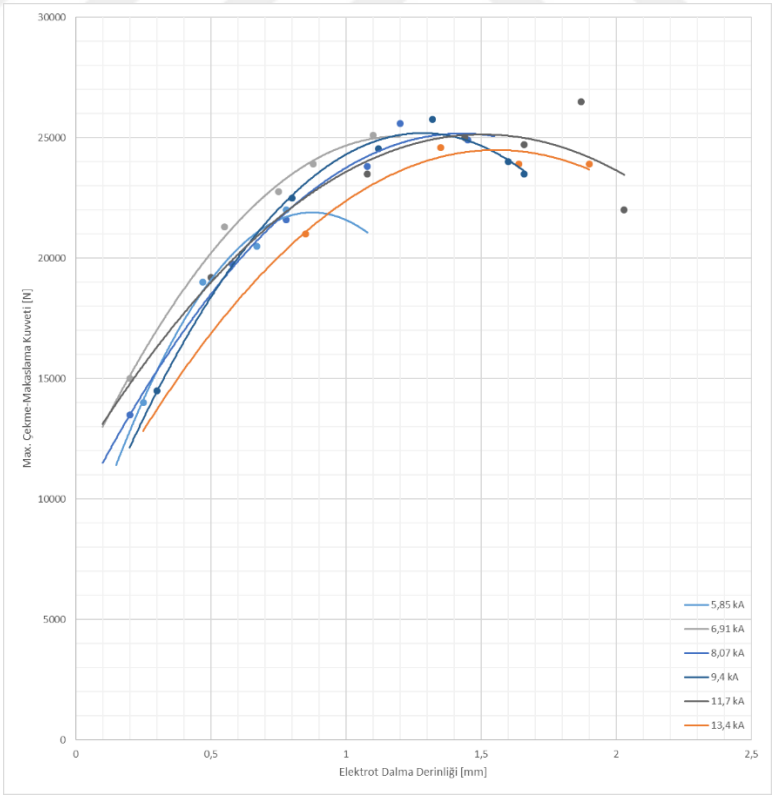
Şekil 6.38: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

6.4.4. Elektrot dalma derinliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi

Elektrot dalma derinliği elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek geometrisi için önemlidir çünkü elektrot her zaman yüksek ısı girdilerinde ergiyen malzeme dolayısıyla çene kuvvetiyle daha derin dalma yapmaktadır. Bu dalmanın sonucu olarak sıçrantı şeklinde metal çıkışı olur. Bu bölgedeki metal çıkışını bir noktadan sonra çok fazla olur ve çekme-makaslama kuvvetini düşürdüğü hem kaynak zamanı hem de kaynak akım şiddetine bağlı olarak Şekil 6.37. ve Şekil 6.38.'de görülmektedir. En yüksek elektrot dalma derinliği kaynak zamanına bağlı olarak 25 periyotta 1,87 mm olarak gerçekleşmiştir. En düşük elektrot dalma derinliği ise 5 periyotta 0,2 mm olarak gerçekleşmiştir.



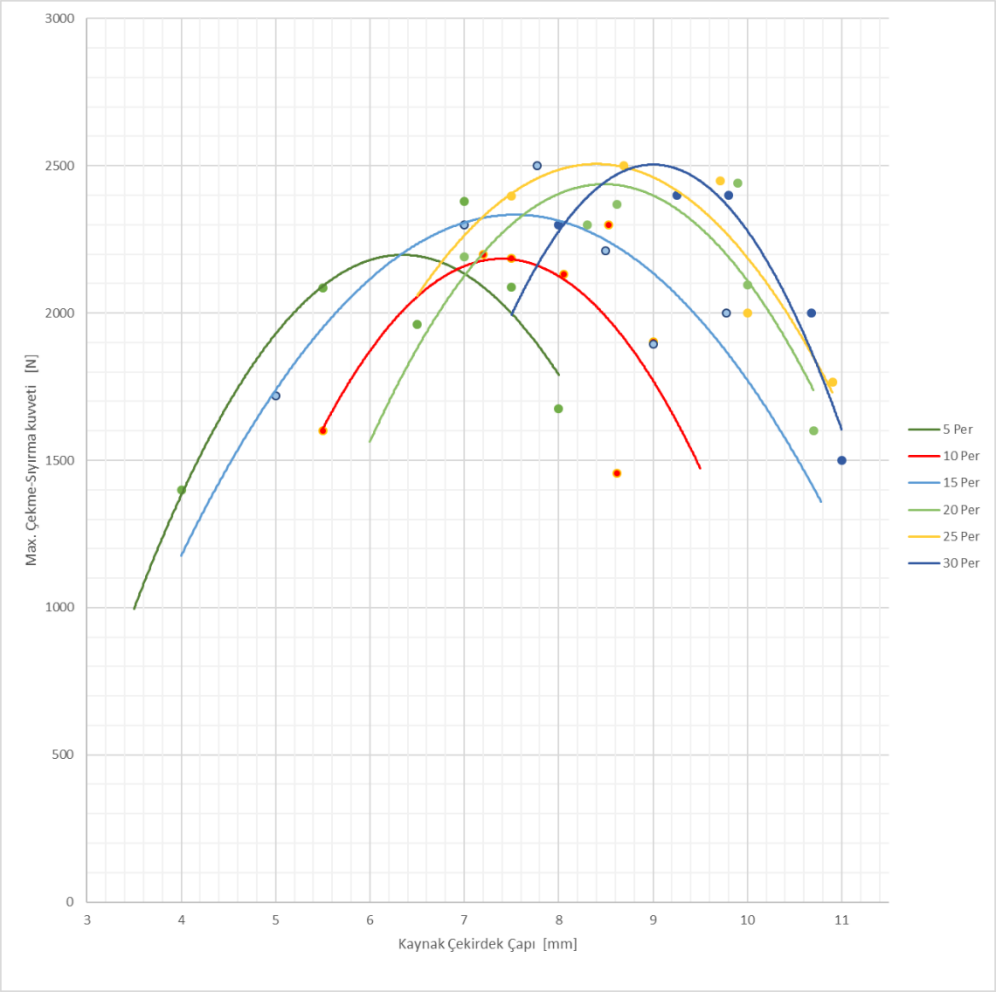
Şekil 6.39: Kaynak zamanına bağlı elektrot dalma derinliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi



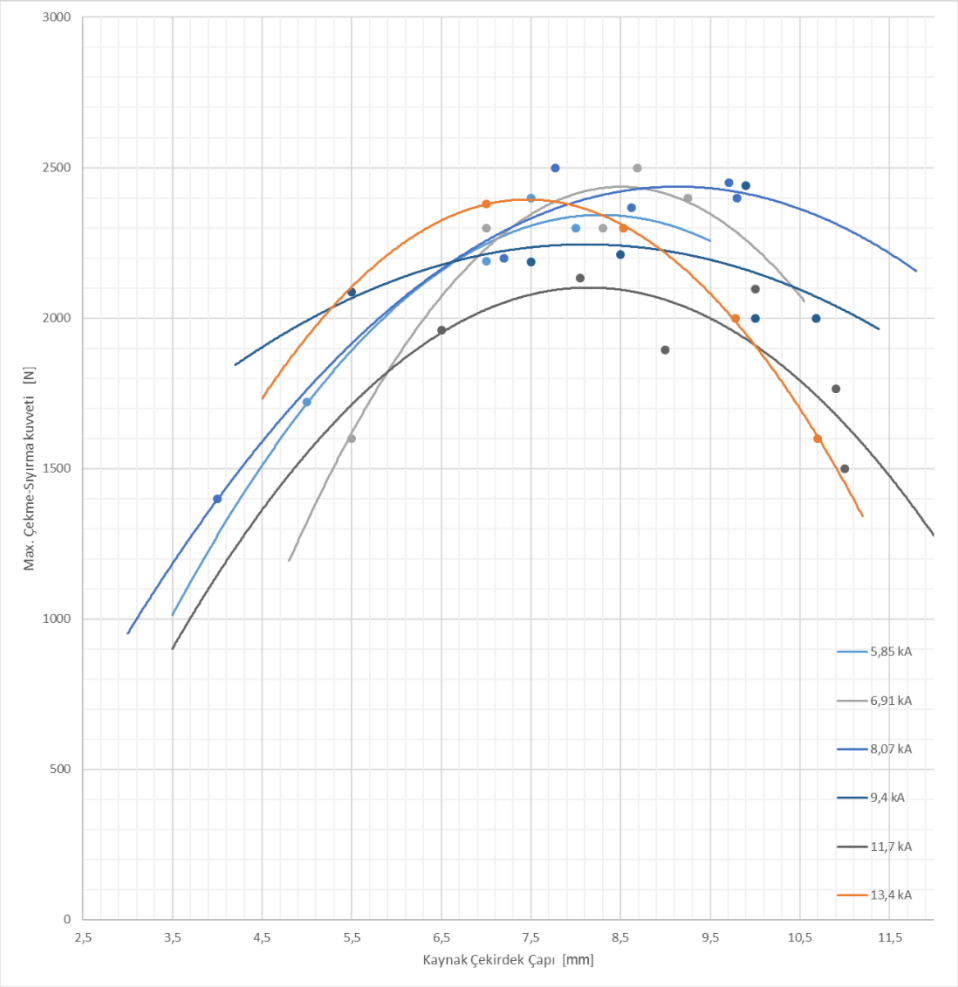
Şekil 6.40: Kaynak zamanına bağlı elektrot dalma derinliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi

6.4.5. Çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

Çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine olan etkisi aynı çekme-makaslama kuvvetine olan etkisi gibi bir noktaya kadar artarken çekirdeğin 8 mm'den sonraki çap boyutlarında çekme-sıyırma kuvvetinde düşüş gerçekleştiği Şekil 6.39. ve Şekil 6.40.'da görülmektedir. Bağlantıların ekme-sıyırma mukavemetleri çekme-makaslamaya göre yaklaşık 10 kat daha düşük kuvvete sahip çıkmıştır ve bunun nedeni noktanın daha farklı bir şekilde zorlanması olup noktanın hasar anındaki gerçek davranışına yakın sonuçlar görebilmek asıl kaynak grafiği oluşturulurken çapraz-çekme dahil birçok mekanik test sonucuyla birlikte değerlendirilmektedir. Kaynak zamanına göre en yüksek çekme-sıyırma kuvveti 15 periyotta 7,77 mm'de 25 periyotta ise 8,69'da tespit edilmiştir.



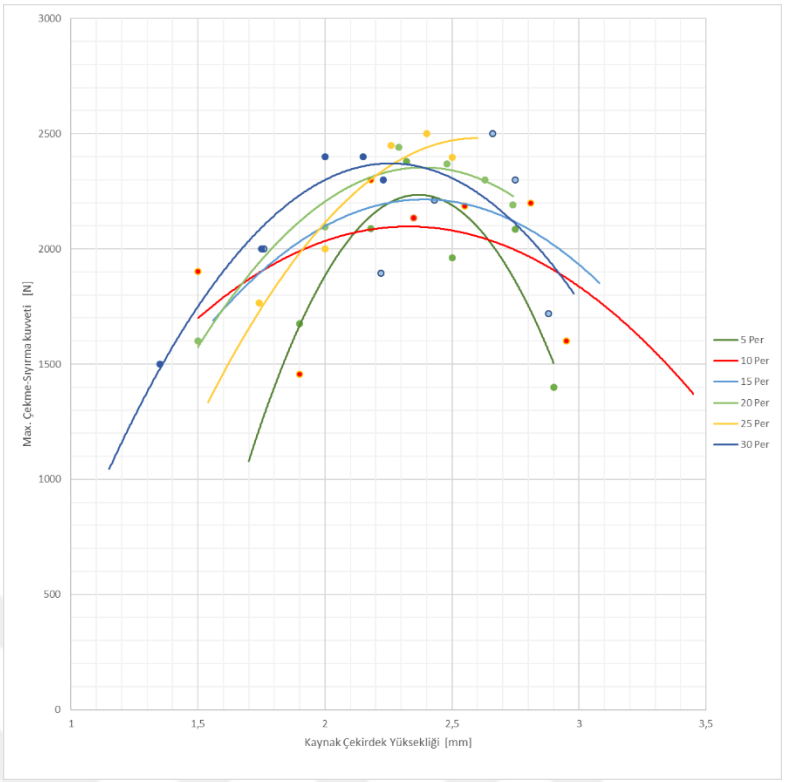
Şekil 6.41: Kaynak zamanına bağlı çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi



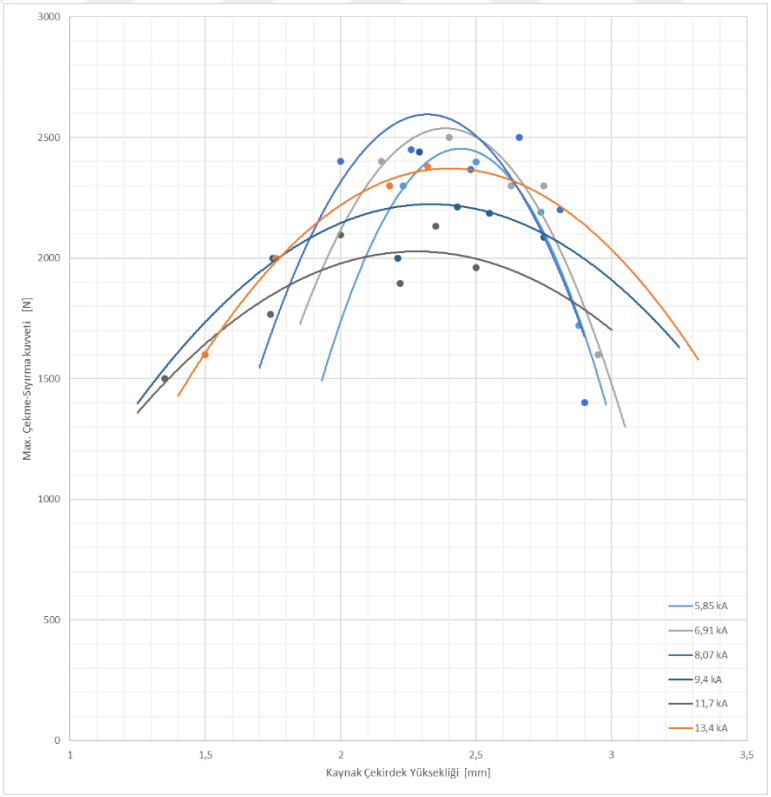
Şekil 6.42: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

6.4.6. Çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

Çekirdek yüksekliğinin kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetine bağlı olarak değişimini gösteren grafikler Şekil 6.41. ve Şekil 6.42.'de görülmektedir. Kaynak akım şiddetinin çekirdek yüksekliği üzerindeki etkisi kaynak zamanından daha fazla olduğu Şekil 6.42.'de görülen 9400, 11700 ve 13400 A kaynak akım şiddetlerindeki daha keskin olan düşüşten görülmektedir. Yüksek akım şiddetlerinde gerçekleşen aşırı ısı girdisinde etkili olan akım şiddetinin etki oranı değerin karesi ile çarpılırken bu oran kaynak zamanında 1 ile çarpılarak hesaplanır. Bu sebepten dolayı akım şiddetine bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma grafiğinde bu sonuçlar gerçekleşmektedir. En yüksek çekme-sıyırma kuvvetinin 15 periyot ve 8070 A, 25 periyot 6910 A değerlerinde olduğu tespit edilmiştir.



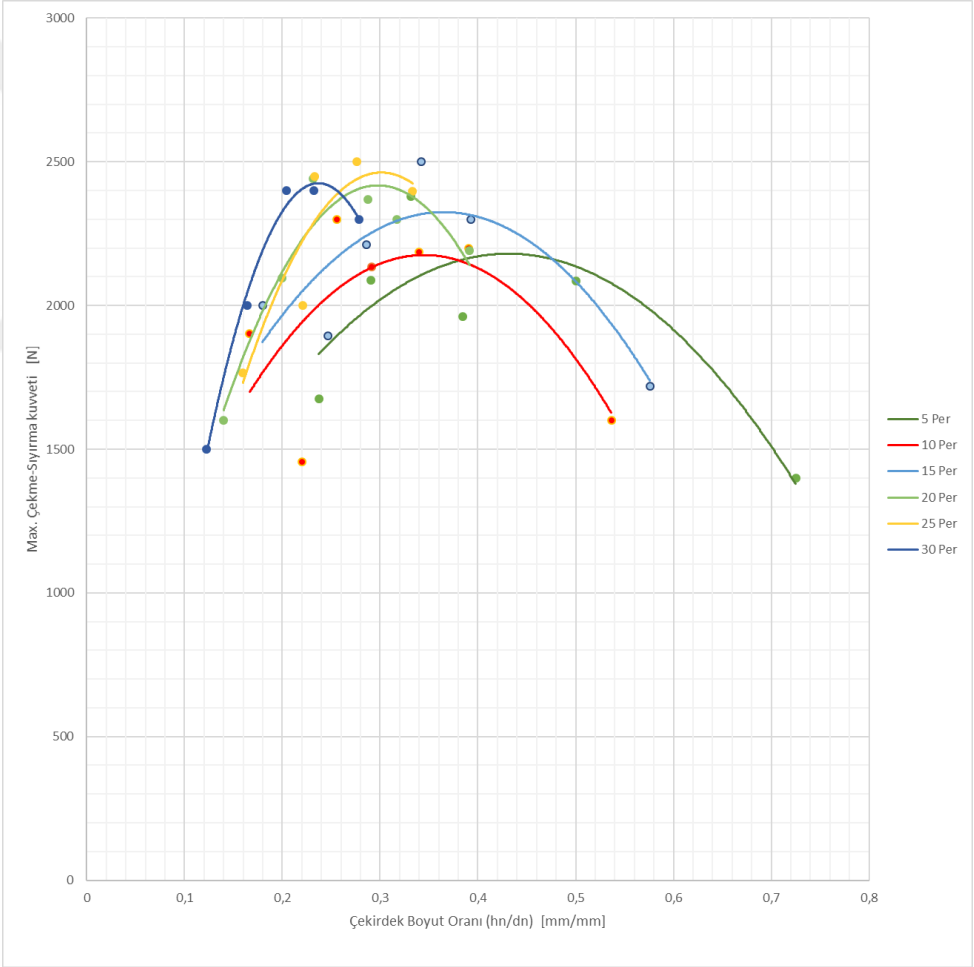
Şekil 6.43: Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi



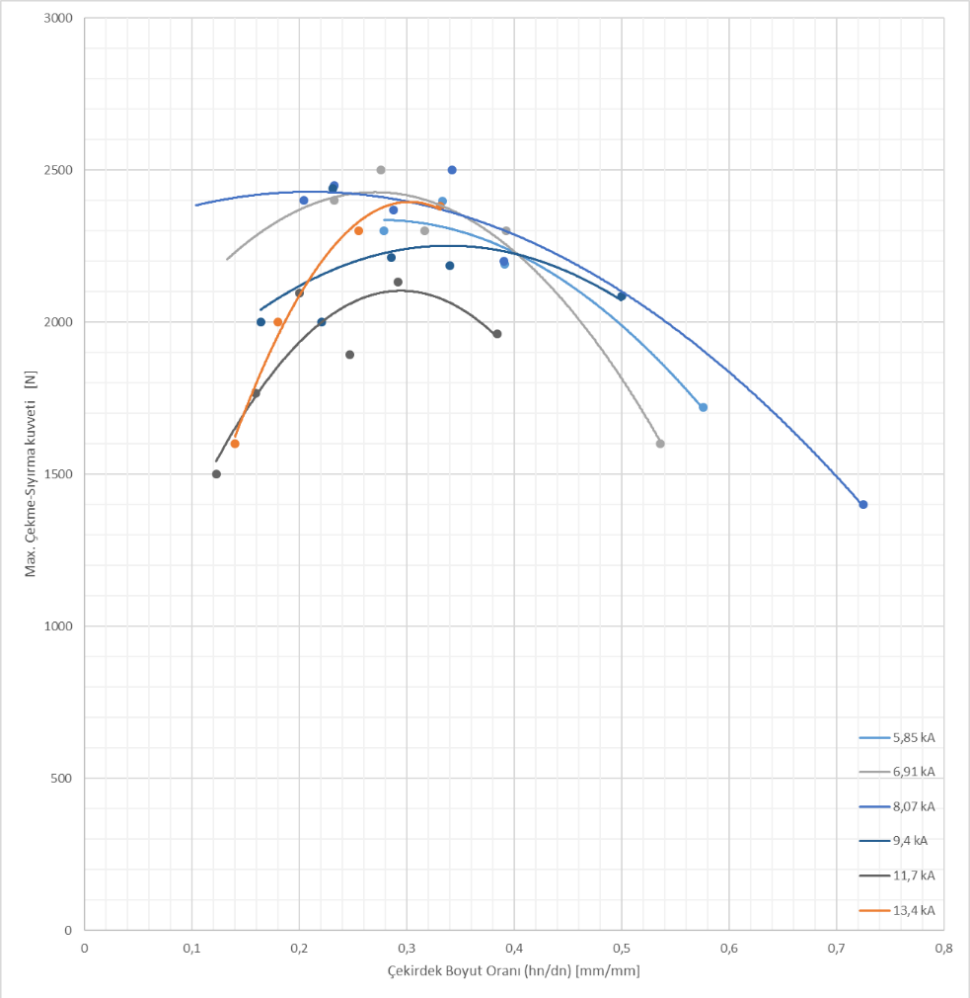
Şekil 6.44: Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

6.4.7. Çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

En düşük çekirdek boyut oranları yüksek ısı girdisinin oluşturduğu çapı büyük yüksekliği düşük çekirdekten kaynaklı olarak en uzun kaynak zamanları ve en yüksek kaynak akım şiddetlerinde gerçekleşmiştir. En yüksek çekme-sıyırma kuvvetlerine çekirdek boyut oranının 0,27 ve 0,24 olduğu noktalarda erişilirken kaynak akım süreleri 15 ve 25 periyot olarak gerçekleşmiştir. Kaynak akım şiddetine göre en yüksek çekme-sıyırma kuvvetine 6910 ve 8070 A değerlerinde ulaşıldığı Şekil 6.42. ve Şekil 6.43.'de görülmektedir. En düşük çekme-sıyırma kuvvetleri kaynak zamanına göre 5 ve 10 periyot; akım şiddetine göre ise 5850 A olan en düşük akım şiddetinde olduğu tespit edilmiştir.



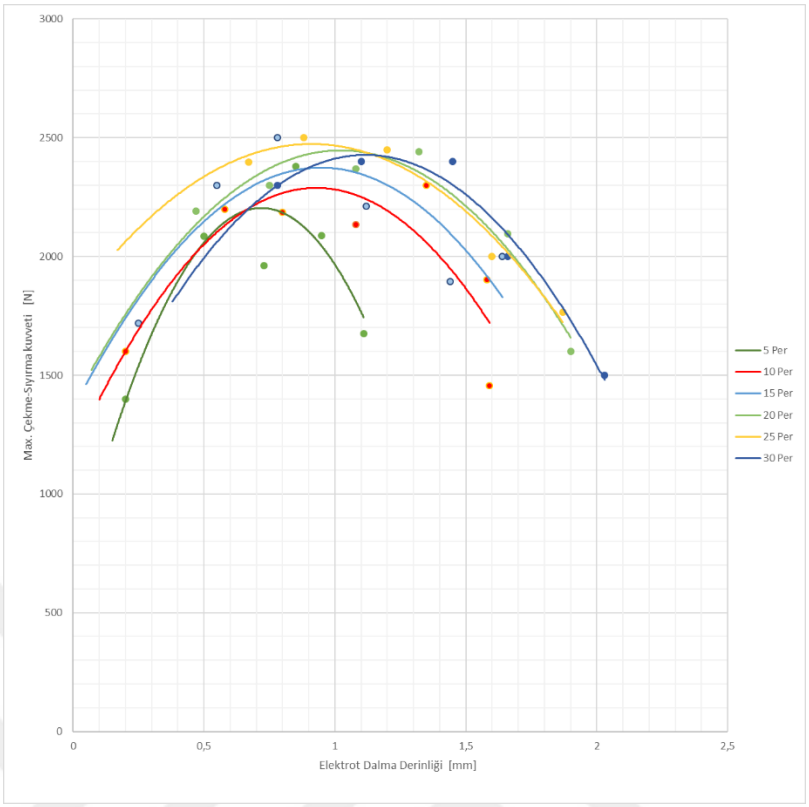
Şekil 6.45: Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi



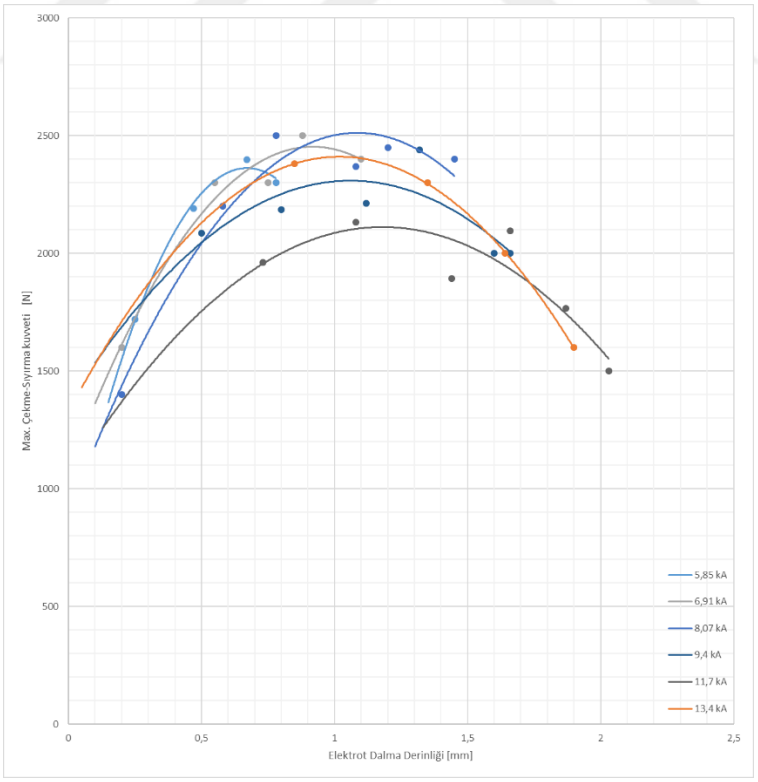
Şekil 6.46: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

6.4.8. Elektrot dalma derinliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

Elektrot dalma derinliği hem kaynak zamanı hem de kaynak akım şiddeti için daha düşük ısı girdisi oluşan parametrelerde en düşük değerlere sahiptir. Bunun açıklaması elektrotun ergimenin nispeten az olduğu yerde çene basıncı sabit olduğundan dolayı daha fazla dalma yapamamasıdır. En düşük çekme-sıyırma kuvvetlerine kaynak zamanına göre 5 ve 10 periyotta gerçekleşmiştir. En yüksek çekme-sıyırma kuvveti ise 15 ve 25 periyot kaynak zamanında; 6910 A ve 8070 A akım şiddetlerinde meydana geldiği tespit edilmiş olup Şekil 6.44. ve Şekil 6.45.'te görülmektedir.



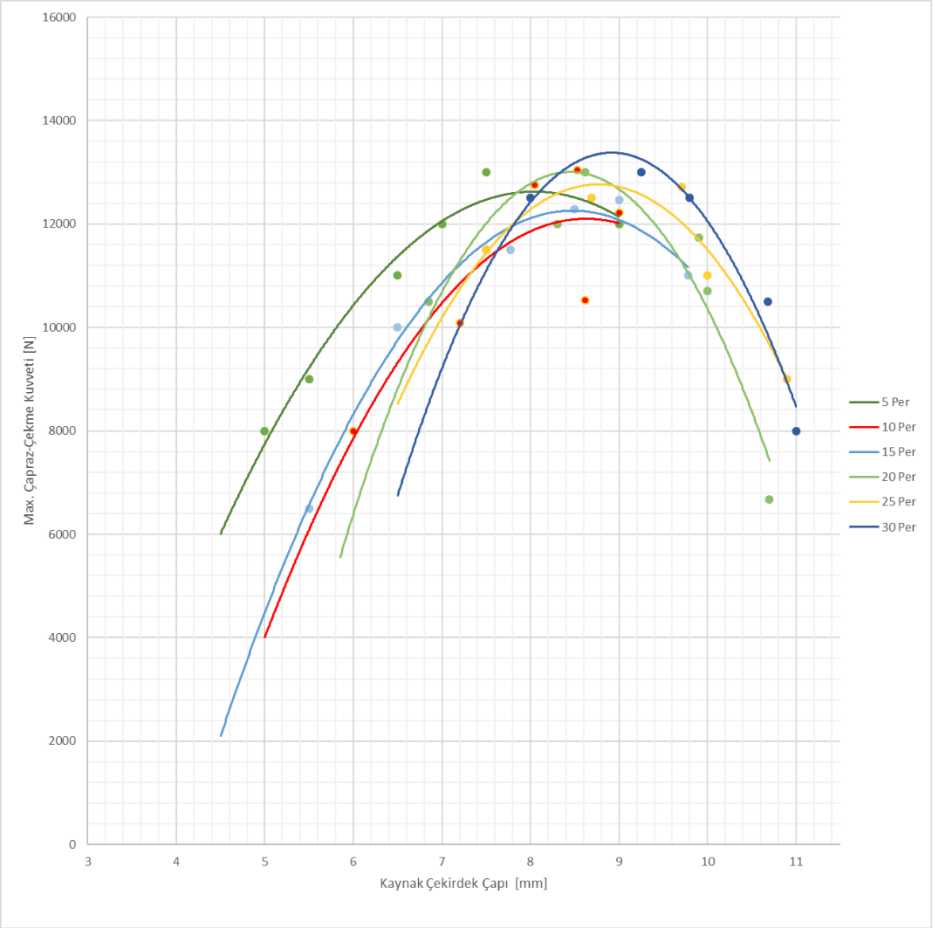
Şekil 6.47: Kaynak zamanına bağlı elektrot dalma derinliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi



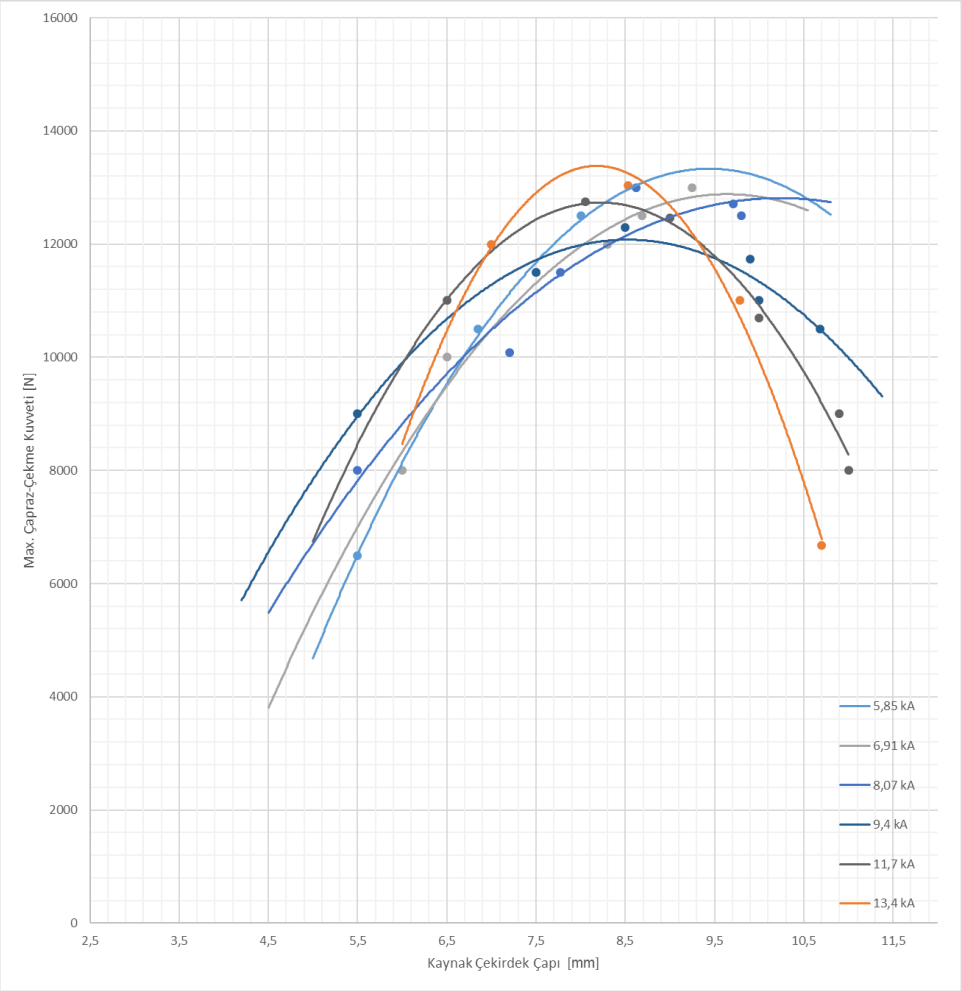
Şekil 6.48: Kaynak akım şiddetine bağlı elektrot dalma derinliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

6.4.9. Çekirdek çapının çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Çekirdek çapının 9 mm'den sonraki boyutlarında çapraz-çekme kuvvetinde bir düşüş yaşandığı Şekil 6.46. ve 6.47.'de görülmektedir. Kuvvetteki düşüşün nedeni çapın artarken aynı zamanda çekirdek yüksekliğindeki kayıptır. Çekirdek yüksekliğini kaybettiği durumda elektrotlar aşırı ergimiş metali sıçrantıyla atmasıyla kesit daralıyor ve bağlantı zayıflayıp çapraz-çekme kuvvetinde düşüşü meydana getirmektedir. En yüksek çapraz-çekme kuvvetine kaynak zamanına göre 8,53 mm çapında 15 periyotta ulaşılmıştır. Kaynak akım şiddetine göre ise en yüksek çapraz-çekme kuvveti 13400 A değerinde gerçekleşmiştir.



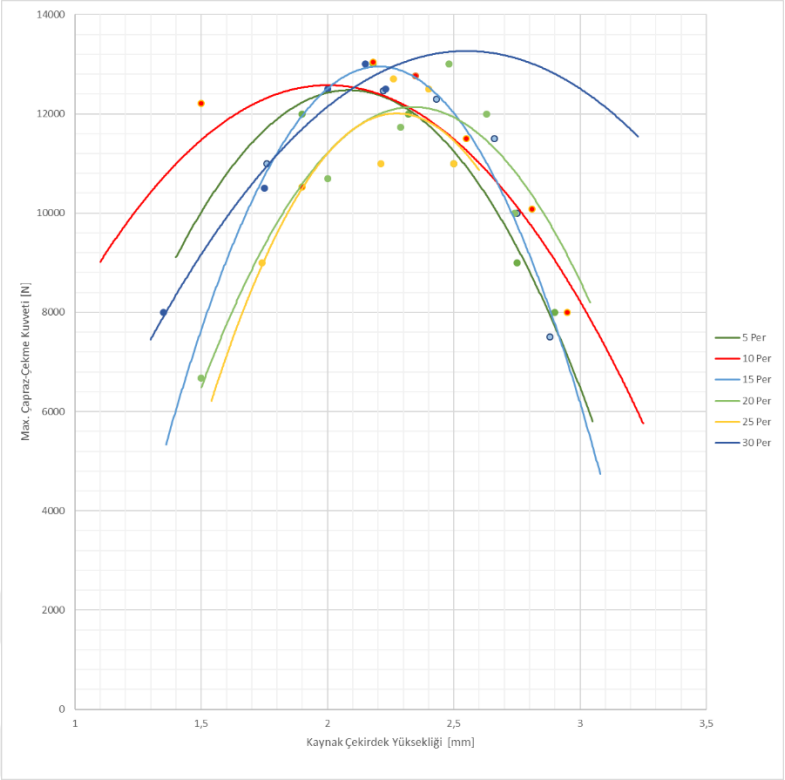
Şekil 6.49: Kaynak zamanına bağlı çekirdek çapının çapraz-çekme kuvvetine etkisi



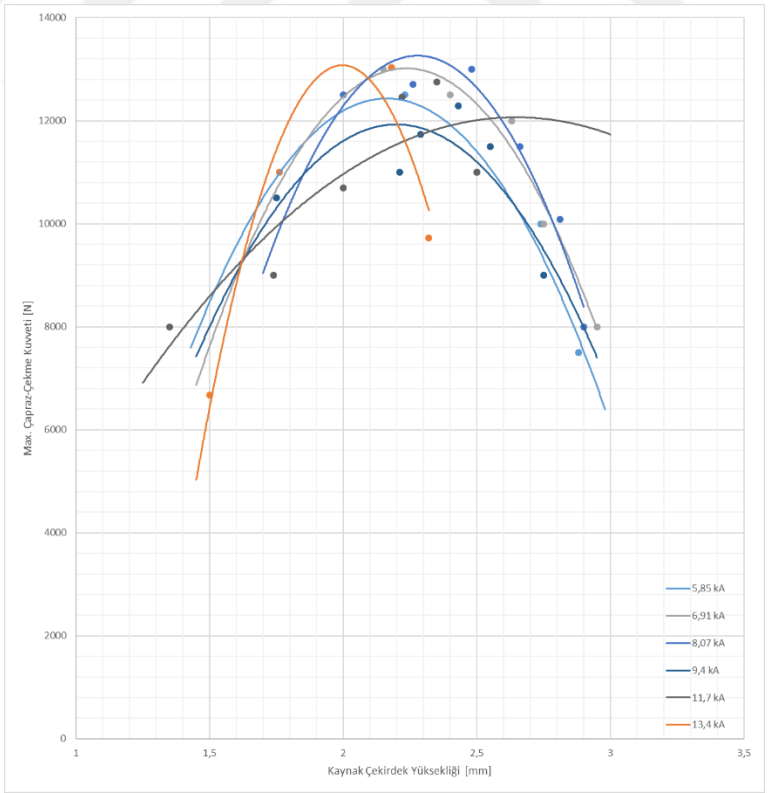
Şekil 6.50: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek çapının çapraz-çekme kuvvetine etkisi

6.4.10. Çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Çekirdek yüksekliği kaynak süresiyle birlikte sabit çene kuvvetinden dolayı uzayan kaynak sürelerinde ergiyen metalin artışıyla elektrotun daha fazla dalma davranışı göstermesiyle azaldığı Şekil 6.48. ve 6.49.'da görülmektedir. Kaynak zamanına göre en yüksek çapraz-çekme kuvvetine 10 periyot zamanında 2,38 mm çekirdek yüksekliğinde ulaşılmıştır. Kaynak akım şiddetine göre en yüksek çapraz-çekme kuvveti 13400 A akım şiddetinde tespit edilmiştir. Çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetini bir noktaya kadar artırmasının nedeni olarak artan ısı girdisiyle büyüme eğiliminde olan çekirdeğin bir noktadan sonra optimum geometrisini kaybedip çap olarak fazla büyümesiyle yüksekliğindeki azalmayla açıklanabilmektedir ve literatürde buna benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir [73], [85], [86].



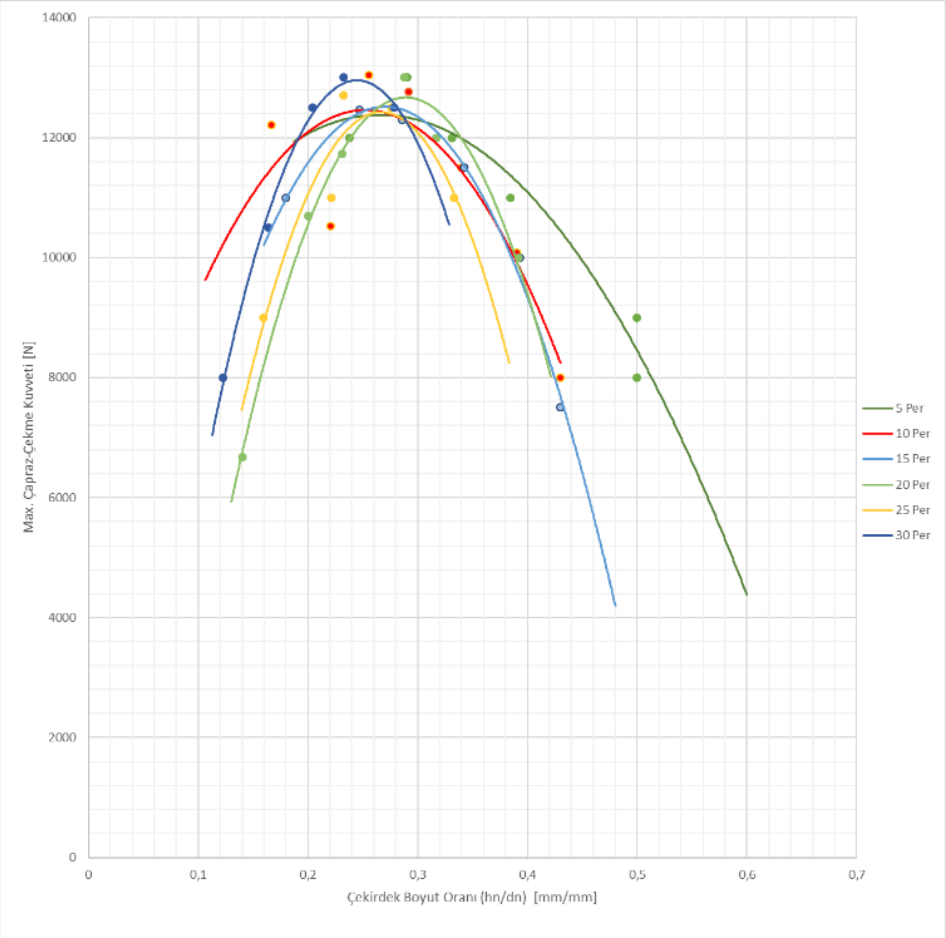
Şekil 6.51: Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi



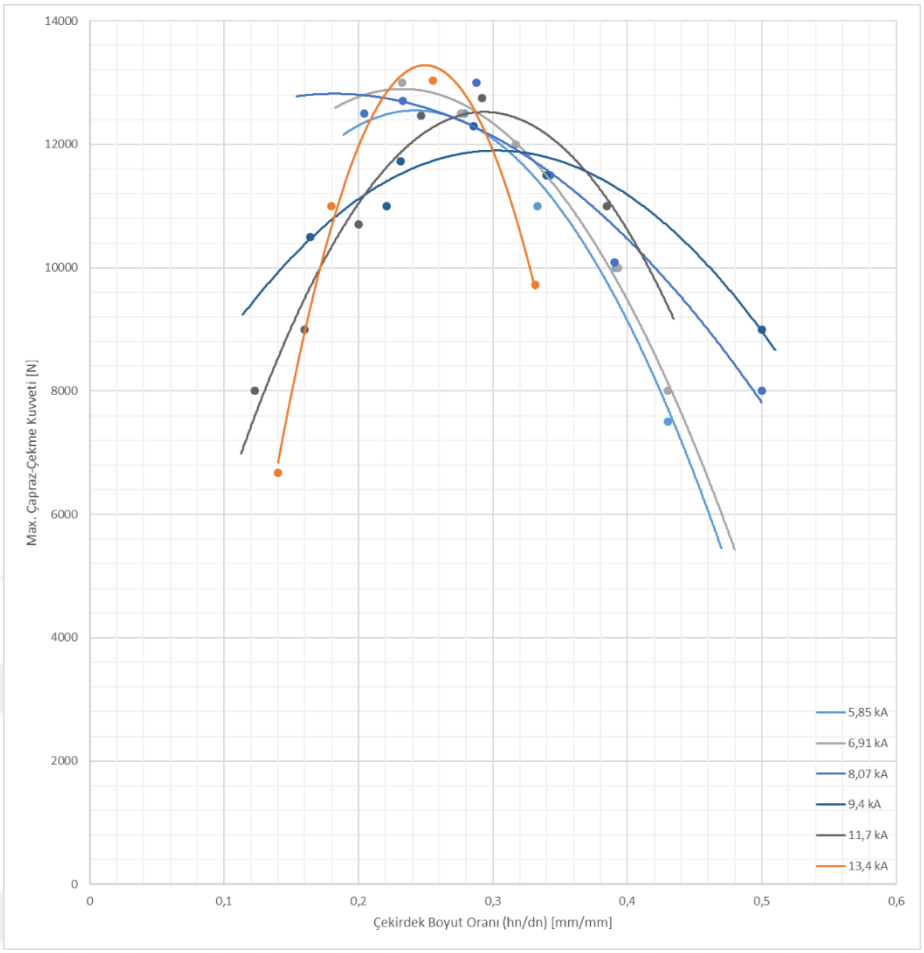
Şekil 6.52: Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi

6.4.11. Çekirdek boyut oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Çekirdek boyut oranı hn/dn olarak hesaplanıp şekil boyut oranı olarak da bilinmektedir. Çekirdek yüksekliğinin çekirdek çapına bölünmesiyle ulaşılan sonucun değeri bizlere çekirdeğin geometrisi hakkında fikir vermektedir. En düşük çapraz-çekme kuvveti kaynak zamanına göre 5 periyotta gerçekleşmiştir. En yüksek çapraz-çekme değeri 10 periyot kaynak zamanı, 13400 A akım şiddetinde 0,25 çekirdek boyut oranı değerinde gerçekleştiği Şekil 6.50. ve 6.51.'de görülmektedir. Çekirdek boyut oranı bir noktadan sonra düşmesinin nedeni çapın yüksekliğe oranla daha hızlı büyümesi olarak tespit edilmiştir. Düşük ısı girdisi nedeniyse en az olan kaynak zamanlarındaki çapraz-çekme kuvveti minimumlarda kalmıştır.



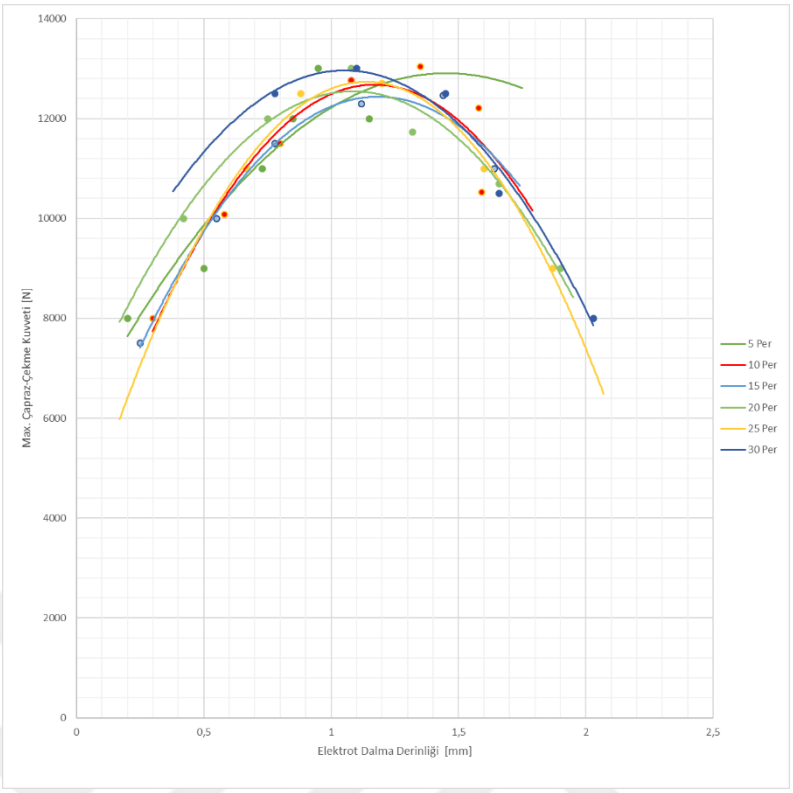
Şekil 6.53: Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi



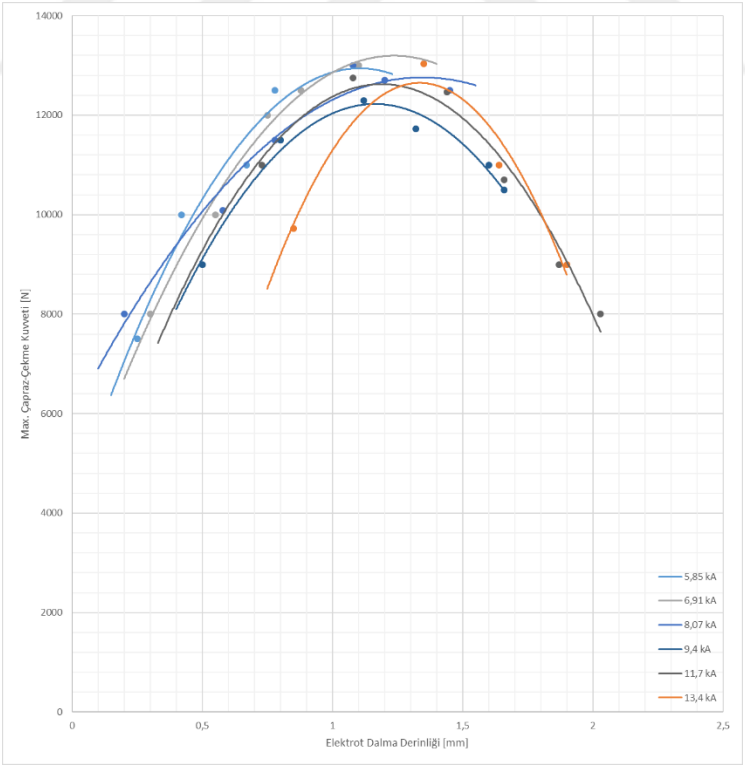
Şekil 6.54: Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi

6.4.12. Elektrot dalma derinliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Elektrot dalma derinliğindeki artış tıpkı diğer bölümlerdeki çekme-makaslama ve çekme-sıyırma kuvvetinde gösterdiği davranış gibi bir noktaya kadar artarak devam edip sonrasında düşüş göstermektedir. En yüksek dalma derinliğine sahip değerler kaynak zamanına göre 30 periyotta yer almaktadır. Bunun nedeni düşük akım şiddetlerinde dahi yüksek ısı girdisi oluşturabilmesi ve bu esnada çene kuvvetinin etkisi ile elektrotların daha fazla dalmasıdır. En yüksek çapraz-çekme kuvveti kaynak zamanına göre 10 periyotta ve 13400 A akım şiddetinde 1,35 mm daldığı durumda tespit edildiği Şekil 6.52. ve Şekil 6.53.'de görülmektedir.



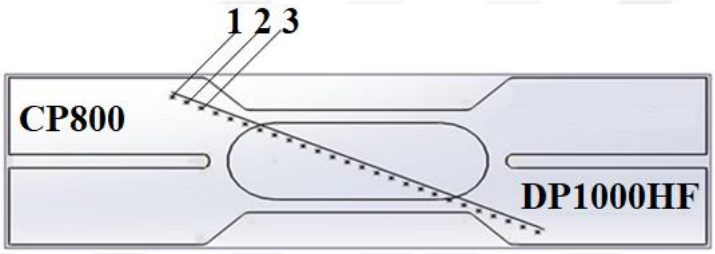
Şekil 6.55: Kaynak zamanına bağlı elektrot dalma derinliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi



Şekil 6.56: Kaynak akım şiddetine bağlı elektrot dalma derinliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi

6.5. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Kaynak parametrelerinin Sertlik Değerine Etkisi

CP800 ve DP1000HF elektrik direnç nokta kaynağıyla yapılan birleştirmelerindeki sertlik ölçümleri Şekil 8.54'de şematik olarak gösterilmektedir. Ölçümler CP çeliğinin ana metalinden başlanarak gerçekleştirilmiş olup kaynak çekirdeğinin tam ortasından geçecek şekilde çapraz ilerleyerek DP çeliğinin ana metalinde sonlandırılarak uygulanmıştır. Mikro-vickers sertlik değerleri tespit edilirken 0,3 mm aralıklar ile 0,2 kg yük uygulanarak ölçüm gerçekleştirilmiştir. Tüm sertlik ölçümleri EN ISO 14271 standartına uygun şekilde yapılarak tamamlanmıştır.



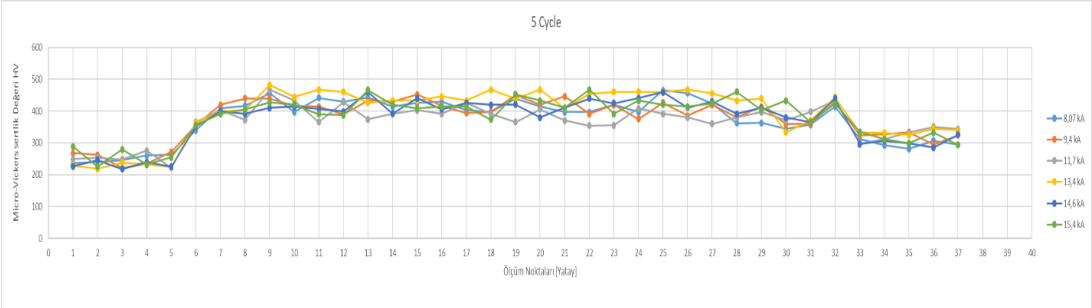
Şekil 6.57: Sertlik ölçüm yönü

CP800 ve DP1000HF elektrik direnç nokta kaynağıyla yapılan birleştirmelerindeki sertlik ölçümleri dört farklı bölge içermekte olup bunlar;

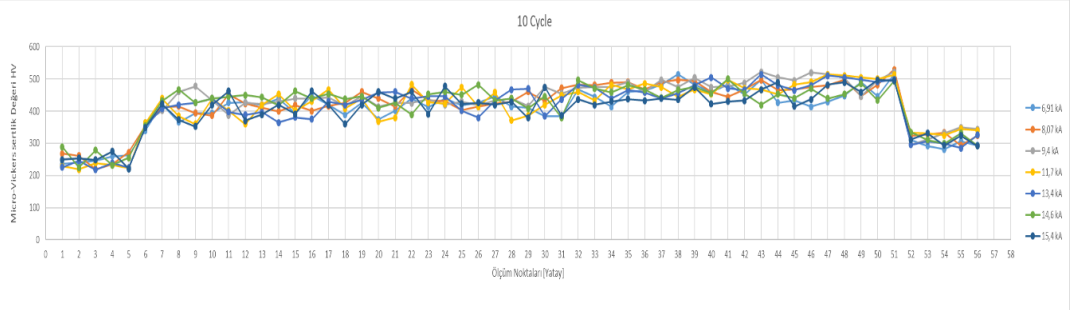
1. CP çeliği ana metali
2. ITAB
3. Kaynak çekirdeği
4. ITAB
5. DP çeliği ana metali'dir.

CP çeliğinden kaynak çekirdeğine doğru ilerlendiğinde CP ana metalindeki yaklaşık 250 HV olan sertlik değerinin ITAB bölgesinde kademeli artarak kaynak çekirdeğinde yaklaşık 450HV sertlik değeri elde edilmiştir. Kaynak çekirdeğindeki artışın nedeni küçülen taneler ve oluşan yeni tane sınırlarıdır. Fakat çekirdek bölgesinin çok yüksek sertlik değerlerinde olması istenmez, tokluğa ihtiyaç duyulan bölgelerde kullanılmasının önüne geçmemek adına gevrek kırılma yaşanmaması için ana metal sertliğinden çok uzaklaşılmaması önemlidir. Kaynak çekirdeğinden DP ana metaline geçişteki ITAB bölgesindeki artışa literatürde yer alan diğer kaynaklarda görülmektedir [52], [62]. DP

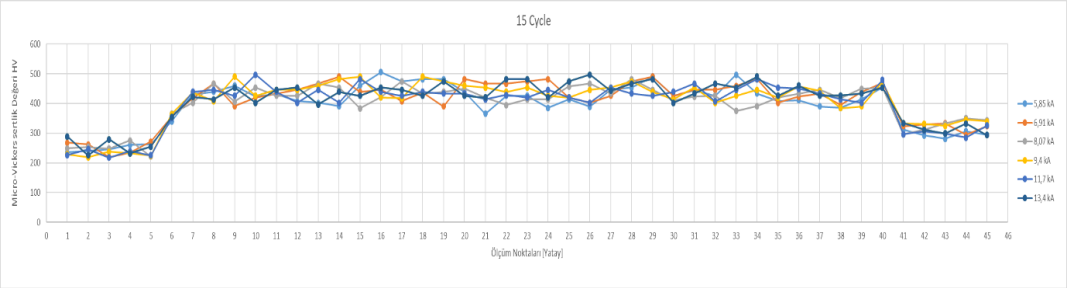
ana metalindeki sertlik değeri 300HV civarında tespit edilmiş olup Şekil 6.55. ve Şekil 6.64.'e kadar olan grafiklerde gösterilmekte olup literatürde benzer sonuçlar yer almaktadır [90]–[94].



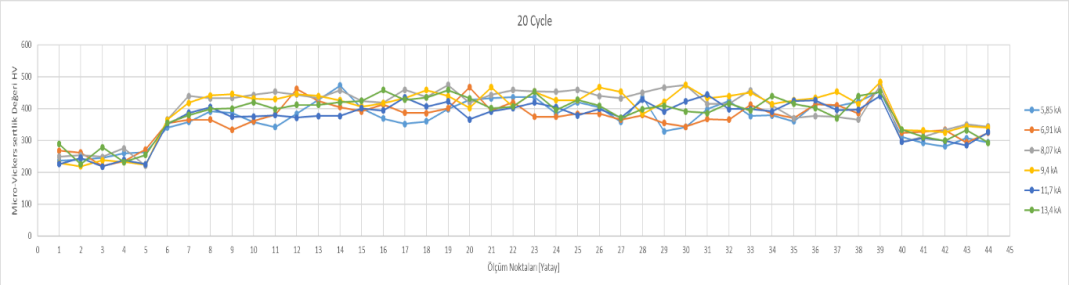
Şekil 6.58: 5 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi



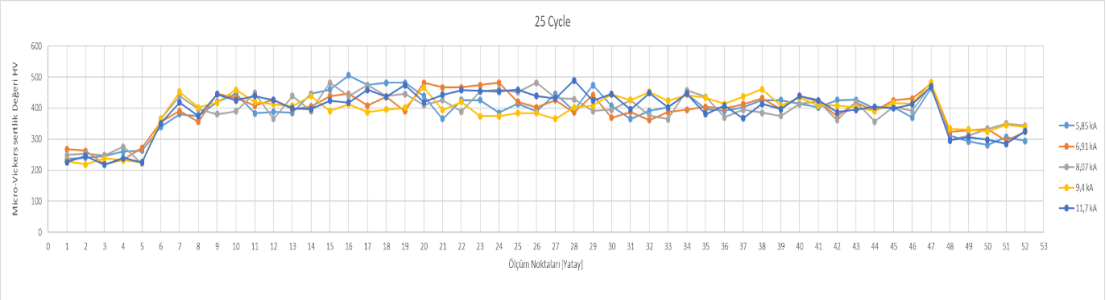
Şekil 6.59: 10 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi



Şekil 6.60: 15 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi



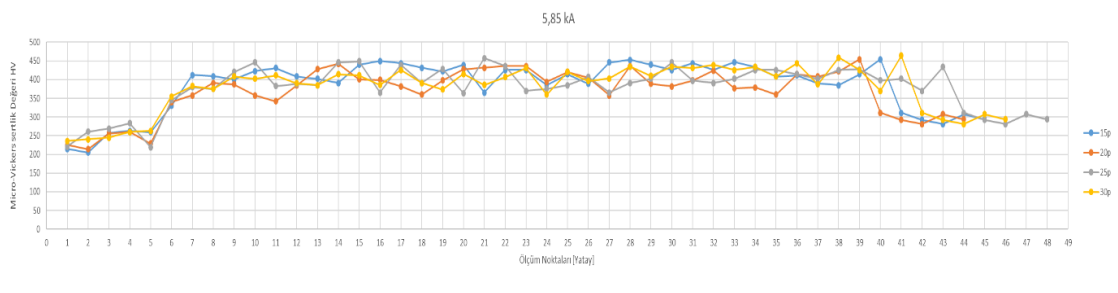
Şekil 6.61: 20 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi



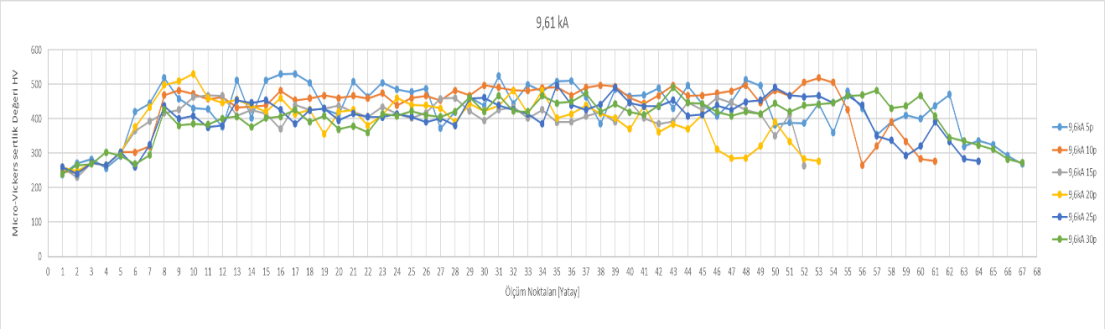
Şekil 6.62: 25 Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi



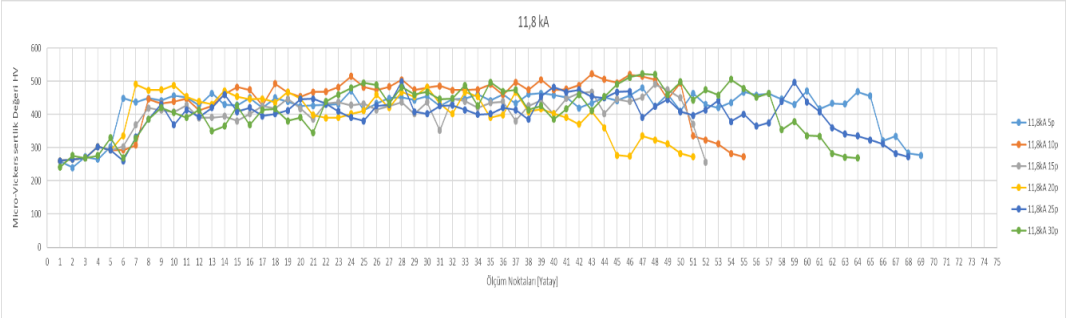
Şekil 6.63: Periyot kaynak zamanındaki sertlik değişimi



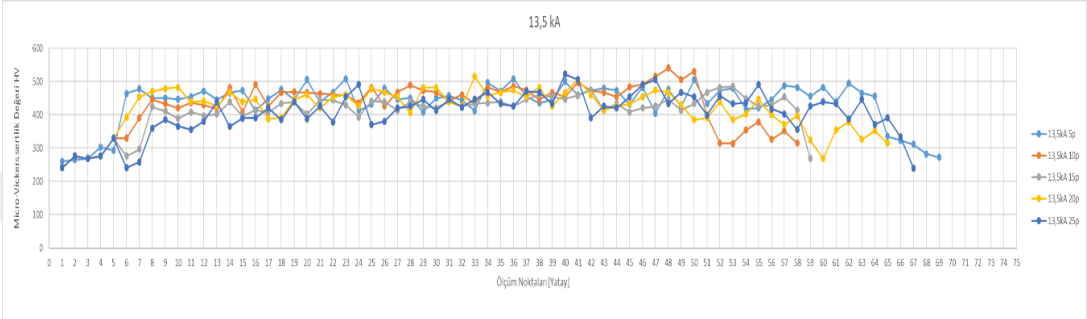
Şekil 6.64: 5850 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi



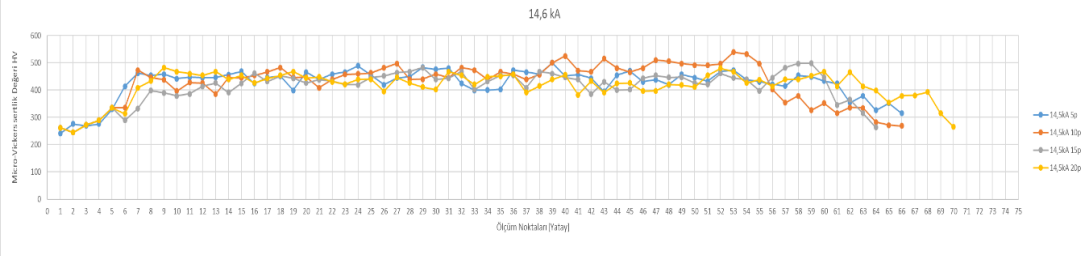
Şekil 6.65: 9610 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi



Şekil 6.66: 11800 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi



Şekil 6.67: 13400 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi



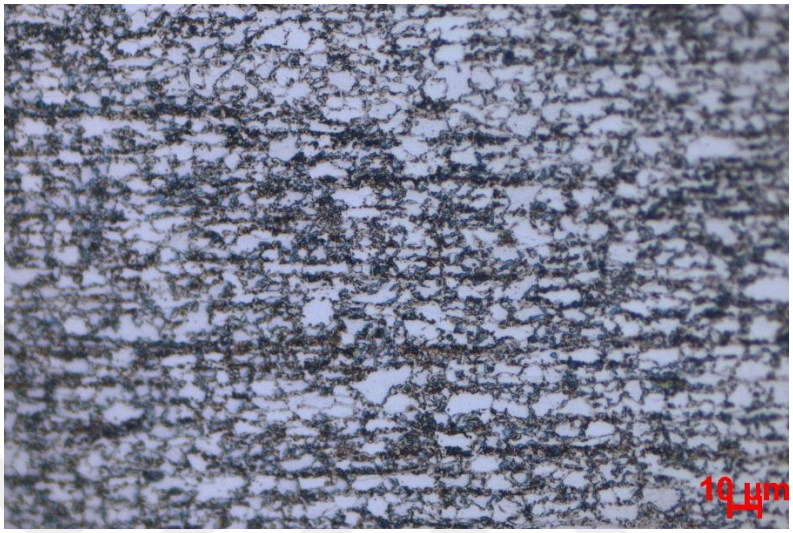
Şekil 6.68: 14600 A Akım şiddetindeki kaynak sertlik değişimi

6.6. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Mikroyapı Görüntüleri ve Analizi

Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanıyla beraber CP800 ve DP1000HF çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde ana metal, ITAB ve kaynak çekirdeklerinden x50,100 ve 200 büyütmelerde çekilen mikroyapı görüntüleri Tablo 6.2.'de gösterilmekte olup ek mikroyapı görüntüleri tez sonundaki eklerde mevcuttur. Ancak her bölge için tek tek inceleyecek olursak;

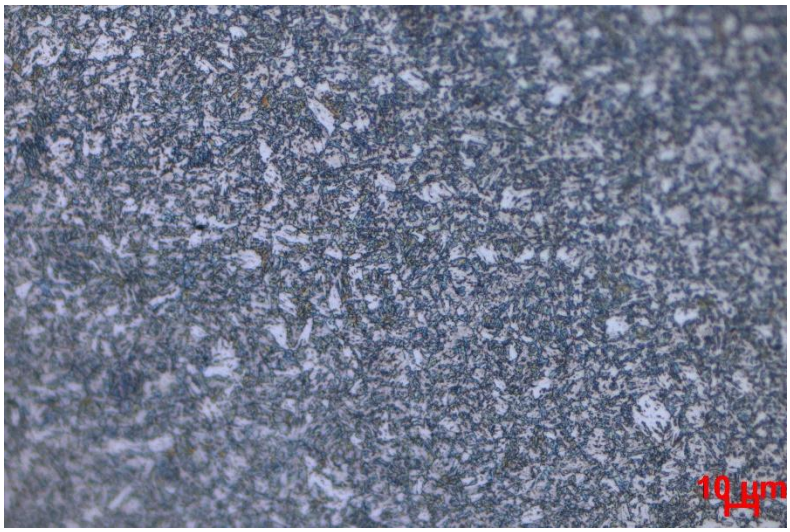
CP çeliği yapısında ana metalde beyaz görülen yerler ferrit adacıkları veya kalıntı östenit olarak görülmektedir. Siyah olarak görülen bölgeler ise martenzit ve gri beyniti göstermektedir. Kalıntı östenitin kenarlarındaki düz tane sınırları ve diğer bir deyişle mükemmel tane kenarları oluşmaktadır. Aynı şekilde tane içlerinde ısıl işlem

ikizlenmelerin oluşu o noktadaki mikroyapının kalıntı östenit veya östenit olduğunu göstermektedir. Ancak CP çeliğinin mikroyapısı söz konusu olduğu için tam östenitik yapıların olması beklenemez. Bu nedenle dönüşümü tamamlanmamış kalıntı östenit olarak mikroyapıda varlığını görülmektedir [91], [93].



Şekil 6.69: CP çeliği ana metali x500 mikroyapı görüntüsü

DP çeliğinin mikroyapısına bakıldığında ferrit adacıklarını çevreleyen martenzitler görülmektedir. DP çeliklerinin yapısı itibarıyla başka faz oluşumu beklenmez. Mikroyapı da bunu doğrular şekildedir. Genellikle ferrit tanelerinin büyüklüğü 3-10 mikron arasında değişmektedir.



Şekil 6.70: DP çeliği ana metali x500 mikroyapı görüntüsü

ITAB incelendiğinde termal dönüşmüş bölge sınırı ana metalden kendini net şekilde ayrılmakta olduğu görülmektedir. Tane sınırına yaklaştıkça çeşitli ferrit adacıkları ve kalıntı östenit adacıklarına rastlamak mümkündür. Büyüme yönü termal gradyan eş eksenlidir.

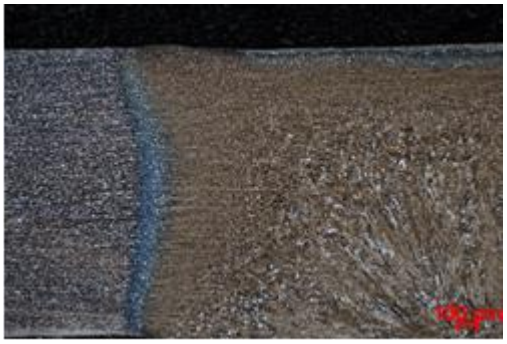
CP yönündeki kaynak çekirdeği tamamıyla yönlenmiş taneciklerden oluştuğu görülmektedir. Yine tane büyümeleri daha net bir şekilde büyüdüğü görülmektedir.

DP yönündeki kaynak çekirdeğine bakacak olursak ferrit adacıklarının net biçimde büyüdüğü görülmektedir. Ancak bu büyüme kaynak çekirdek sınırında en büyük haline ulaşmaktadır. ITAB her ne kadar büyük gibi görünse de tanelerin büyüdüğü bölge çekirdeğe olan 150mikron uzaklığı geçmemektedir. Bunun nedeni yeniden kristalleşme sıcaklığının ferritin bu noktadaki yeniden kristalleşme sıcaklığından düşük olmasıdır.

ITAB bölgesinin dış kısmındaki baskın siyah bölge ile hemen içindeki baskın beyaz bölge martenzit yapının bir miktar ferrit içerisinde çözündüğünü göstermektedir. Ferrit nital solüsyonu ile dağlanamadığından dolayı ve martenzit nital solüsyonu ile dağlandığında siyah renk vereceğinden bu sonuca ulaşılmıştır. Bu da ITAB sınırının aslında martenzitin ferrit içerisinde çözünmeye başladığı sınırdır. Aynı zamanda bu sınır karbonun alfa-ferrit içerisinde etkin çözünme sıcaklığının sınırını bize gösterir.

Her iki tarafın elektrot temas yüzeyi incelendiğinde ana metal ile aynı karakterizasyonu gösteren ince ve uzun bölgeler görülmektedir. Bu bölgeler elektrot temas yüzeyinin hemen altında oluşmuştur. Bu bölgeler aslında hiçbir dönüşüm gerçekleşmediğini bize göstermektedir. Bunun asıl sebebi elektrot içerisindeki soğutma sıvısının etkinliği ile bu bölgenin dönüşüm sıcaklığının altında kalmasından kaynaklanmaktadır [90].

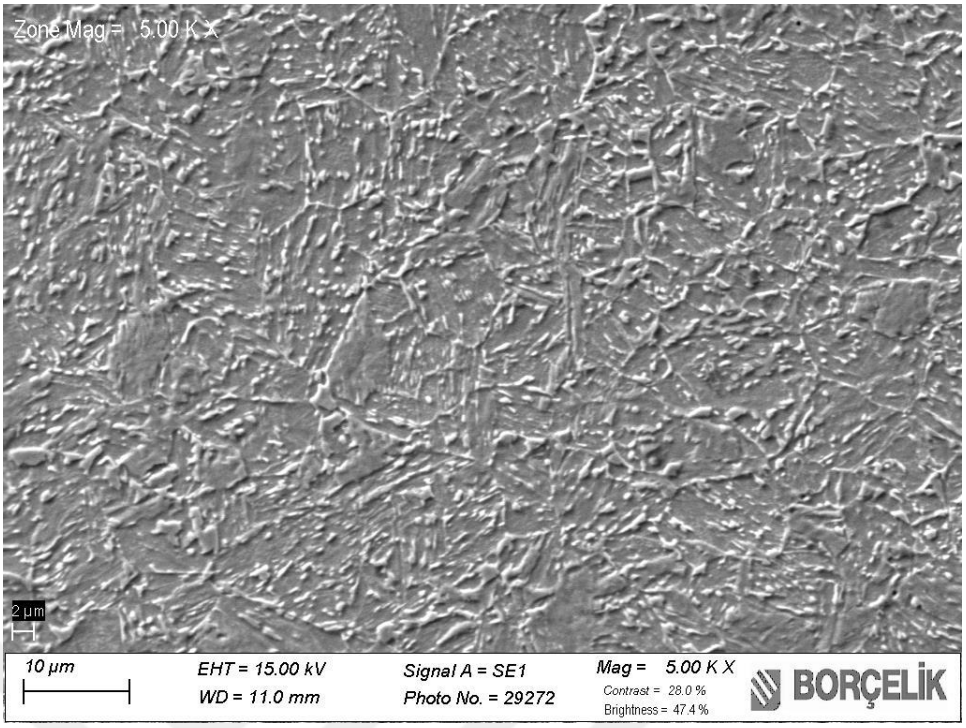
Tablo 6.3: ITAB ve kaynak çekirdeğinin farklı büyütmelerde mikroyapı görüntüleri

ITAB	ÇEKİRDEK
x50	x50
	
x100	x100
	
x200	x200
	

6.7. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde SEM Görüntüleri ve EDS Analizi

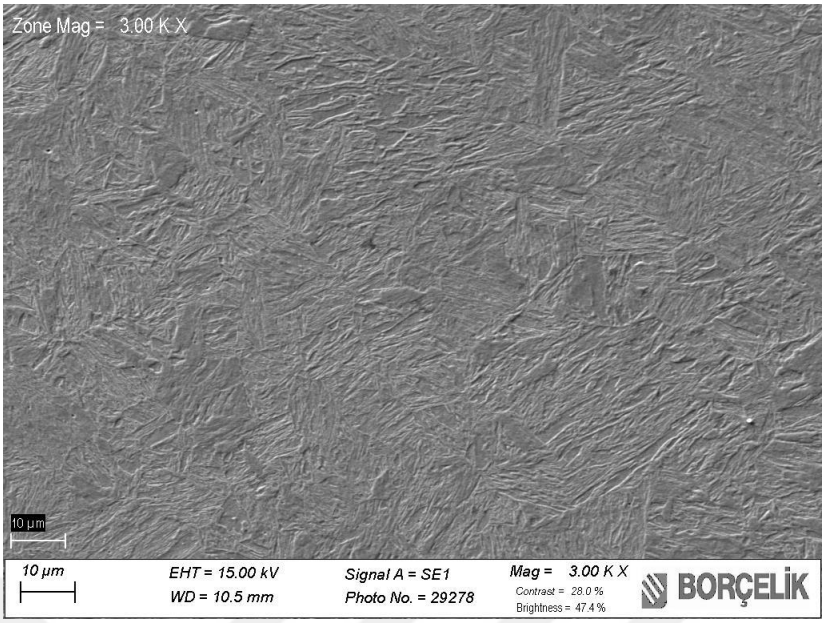
CP800 ve DP1000HF çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirmelerinin ana metal, ITAB ve çekirdek bölgelerinden elde edilen SEM görüntüleri ve EDS analizlerine bu bölümde yer verilmektedir.

CP ana metali incelendiğinde adacık şeklinde yükselti oluşturan yapıların kalıntı östenit, eser miktarda östenit ve ferritten oluşmaktadır. Üst üste istiflenmiş iğnemsi yapılar ise martenzit fazını, daha açık iğnemsi yapılar ise beynit fazını göstermektedir [91], [93].



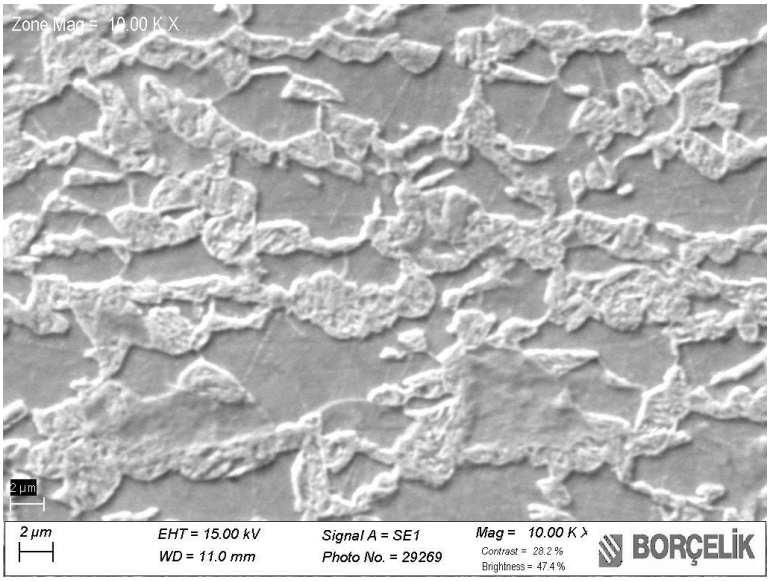
Şekil 6.71: CP çeliği ana metalinin SEM görüntüsü

CP ITAB bölgesi incelendiğinde ferrit ve kalıntı östenit adacıkları büyüdüğü görülmektedir. Ancak kaynak çekirdeğine geçildiğinde tam ergimiş mikroyapı yerini martenzitik ve ferritik yapılara bıraktığı görülmektedir. Kalıntı östenit içerisinde bulunan mangan ve karbon kısmi olarak östenitin baskılanmasında bir araç olarak kullanılmaktaydı ancak tam ergime ile manganın mikroyapı içerisinde difüze olmasıyla martenzitik dönüşümün kritik sıcaklığı düşmüş olup kritik soğuma hızı yükselmiştir. Böylelikle kaynak çekirdeği içerisinde yoğunlukla martenzit oluşması doğal bir sonuç haline gelmiştir.



Şekil 6.72: CP çeliğinden çekirdek yönüne ITAB bölgesinin SEM görüntüsü

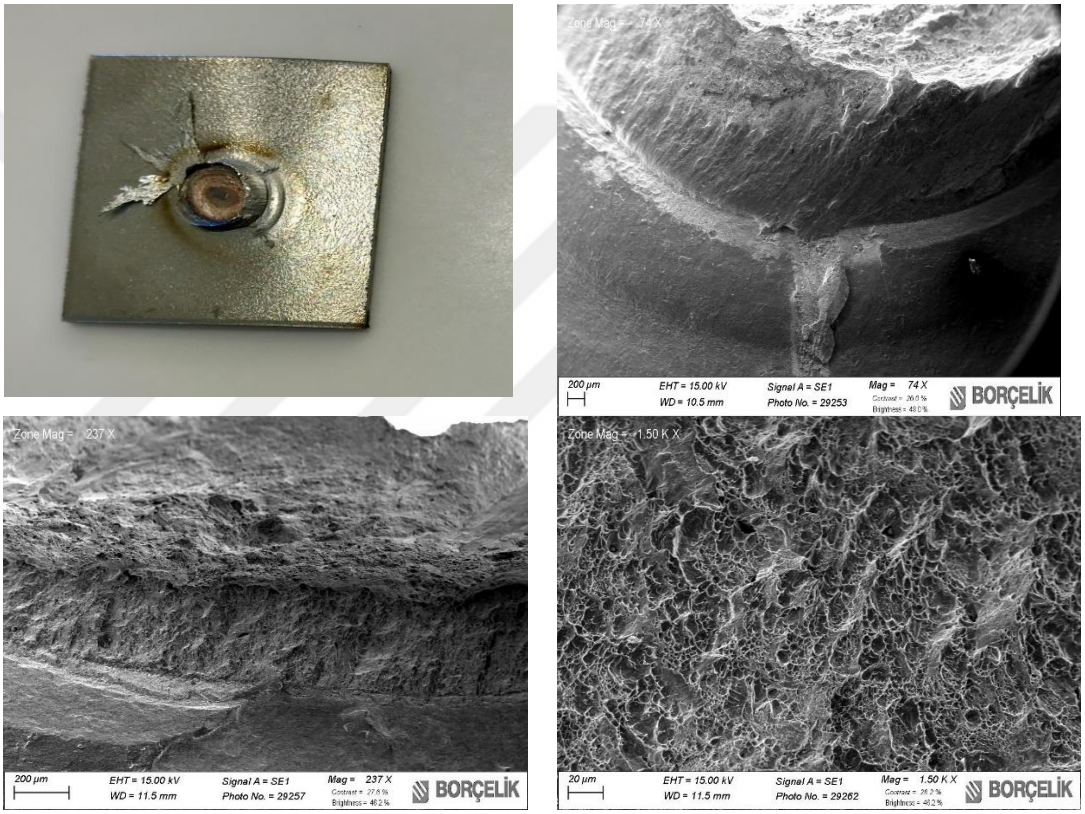
DP ana metali incelendiğinde mikroyapının adacıklar şeklinde gösterilen görüntü alfa-ferriti göstermektedir. Tane kenarlarında bulunan iğnemsi yapılar ise martenziti göstermektedir. Zaman zaman tane kenarlarında perlitik oluşumların gerçekleştiği görülmektedir. Tane yönleri hadde yönünü takip etmektedir. Ancak çok uzun ve yassı taneler bulunmamaktadır. Tane büyüklükleri genel olarak 1-10 mikron arasında değişmektedir.



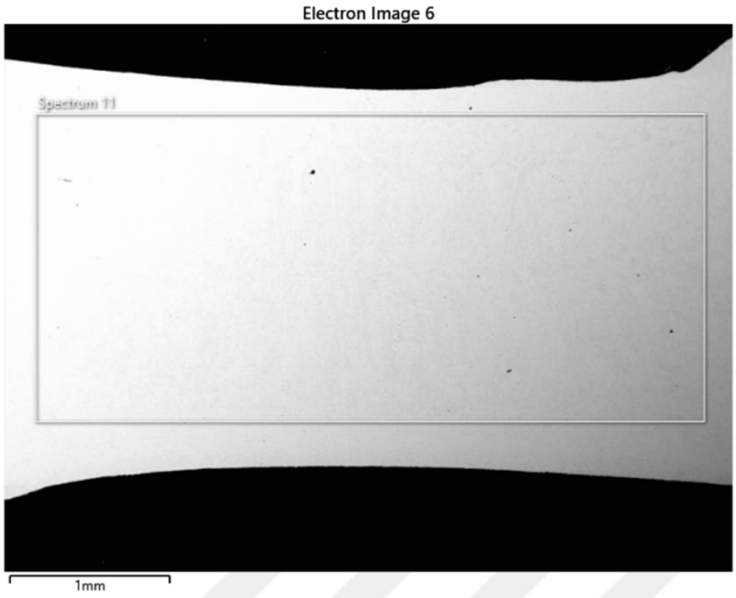
Şekil 6.73: DP çeliği ana metalinin SEM görüntüsü

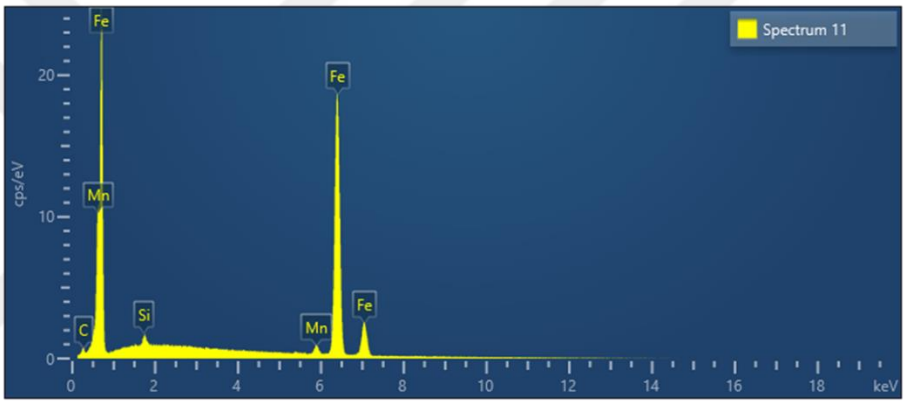
Kalınlık olarak DP daha ince olduğundan dolayı en yüksek gerilme DP çeliği tarafında gerçekleşir. Çekirdek ile ana metal arasındaki ITAB bölgesinde taneler çekirdeğe doğru gittikçe büyüdüğü için çekirdek kenarında kopmayı kolaylaştıracak mekanizmalar oluşur. Bunun nedeni de martenzit ve ferrit büyümelerinden DP çeliği kısmından daha çok kopar ve çekirdek CP tarafında kalır [92].

Kopma yüzeyi incelendiğinde oluşan yapılardan görüldüğü üzere sünek kopmalar baskın bir şekilde hasar modunu karakterize etmektedir. Ancak mikroyapıdaki martenzitin gevrek bir şekilde kırıldığı da çeşitli oyuklardan ve yüzeylerden görülmektedir.



Şekil 6.74: Çekme-makaslama numunesine ait kopma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri





Spectrum 11

Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Fe	K series	95.22	0.22	89.31
Si	K series	0.58	0.05	1.07
C	K series	1.64	0.19	7.17
Mn	K series	2.56	0.12	2.44
Total		100.00		100.00

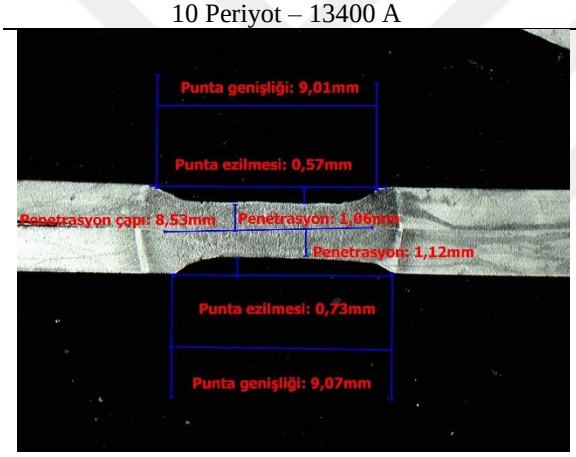
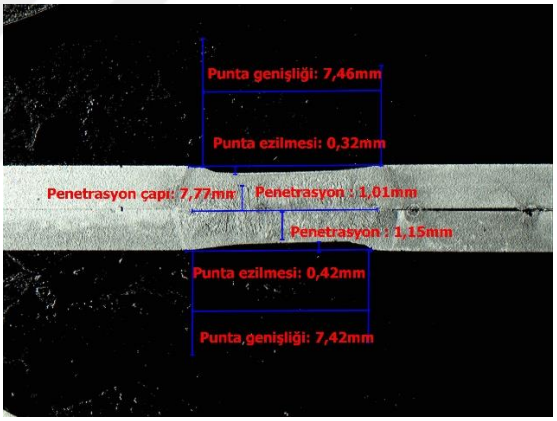
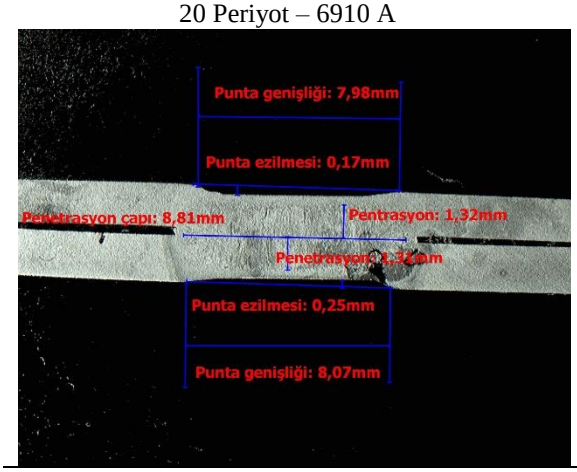
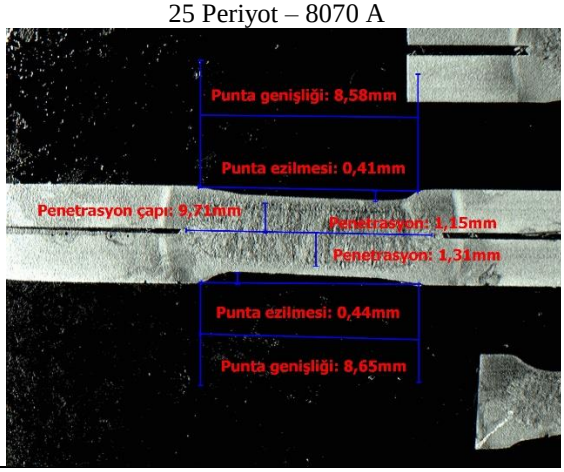
Şekil 6.75: Kaynak çekirdeği bölgesindeki EDS analizi

Kaynak çekirdek bölgesi tarandığında her iki yapıdaki element miktarlarının birbirine difüze olduğundan emin olunmaktadır. Mangan miktarı ve soğuma hızı düşük olsaydı martenzitik dönüşümün daha az olacağı ve ferrit adacıklarının daha kolay oluşabileceğini söyleyebiliriz. Ancak su soğutmalı elektrot sisteminin mangan oranının ağırlıkça %2,56 olarak ölçülmesi martenzitik dönüşümün kolay bir şekilde gerçekleştiğinin bir işaretidir.

6.8. CP800 ve DP1000HF Birleştirmelerinde Makroyapı Görüntüleri

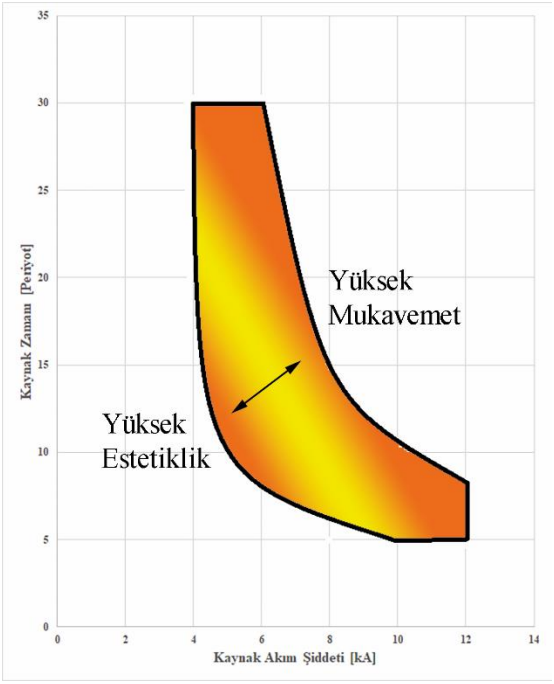
CP800 ve DP1000HF çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirmelerinin makroyapı görüntüleri incelendiğinde 5 periyot için belirgin elektrot izi ancak 14600 A ve 15400 A değerinde; 10 periyot için ise 11700 A ve üzerinde; 15 periyot için 9400 A; 20 periyot için 9400 A; 25 periyot için 9400 A ve 30 periyot için ise 8070 A akım şiddetinde gerçekleşmiş olduğu görülmektedir. Bu akım seviyelerinden sonra aynı periyot için dalma derinliğinin artışıyla fışkırmalar artmakta ve istenmeyen çekirdek geometrisine ulaşılmaktadır. CP800 ve DP1000HF çelik sacların makroyapı görüntülerinden bazılarına Tablo 6.3.'de yer verilmekte olup tüm makroyapı fotoğrafları tezin ekler bölümünde yer almaktadır.

Tablo 6.4: Farklı parametlere ait bazı makroyapı görüntüleri

10 Periyot – 13400 A	15 Periyot – 8070 A
	
20 Periyot – 6910 A	25 Periyot – 8070 A
	

BÖLÜM 7. KAYNAK GRAFİĞİ (WELD LOBE)

CP800 ve DP1000HF çelikleri için elektrik direnç nokta kaynağı ile yapılan birleştirmeler için uygulanan bütün deneylerin sonuçları bir araya getirilip analiz edilerek oluşturulmuş Kaynak Grafiği (Weld Lobe) Şekil 7.1.'de görülmektedir. Kaynak grafiği bu iki çelik sacı için kabul edilebilir kaynak aralığını göstermektedir. Aynı zamanda grafiğin dışında kalan bölgelere doğru olan parametreler için çekirdekte ne gibi değişimler olacağını mukavemet-esneklik açısından göstermektedir. Kaynak grafiği oluşturulurken mekanik test sonuçlarının en iyi değerleri %100 kabul edilerek %20 tolerans tanınarak kabul edilir, elektrot dalma derinliğinin ise %30'a kadar olan parametreleri kabul edilmektedir. Kaynak parametresinin seçiminde eğer yüksek mukavemet isteniyorsa grafiğin sağına doğru, yüksek estetik görünüme ihtiyaç duyuluyorsa grafiğin içerisinde sola doğru olan parametreleri tercih etmek doğru olacaktır. Otomotiv sektöründeki uygulayıcı için en uygun parametreyi tespit etmek için en iyi yöntem Weld Lobe'dan yararlanmaktır.



Şekil 7.1: CP800 ve DP1000HF çeliklerine ait Kaynak Grafiği (Weld Lobe)

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada otomotiv sektöründe oldukça önemli ve sıklıkla kullanılan CP800 ve DP1000HF çelik sacları ile elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle birleştirmeler yapılarak hasar modu tespit edilmiş olup tüm oluşum mekanizmaları incelenmiştir. Yapılan birleştirmelerin tüm deney sonuçlarının analiz edilmesiyle kaynak grafiği olan weld lobe elde edilmiştir. Yapılan tüm mekanik testler, mikro ve makroyapı incelemeleriyle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. En yüksek çekme-makaslama kuvveti 25 periyot kaynak zamanı 11700 A akım şiddetinde 26500 N olarak meydana gelmiştir. Çekme-makaslama grafiğinde görülen bir noktaya kadar yükselip sonra düşüşün nedeni ısı girdisinin artmasıyla ergiyen metalin fışkırmasıyla gerçekleşmektedir.
2. En yüksek çekme-sıyırma kuvveti 15 periyot 8070 A ve 25 periyot 6910 A değerlerinde 2500 N olarak elde edilmiştir. Çekme-sıyırma kuvvetinin makaslamaya oranla neredeyse on kat daha düşük olmasının nedeni noktanın sıyırma deneyindeki zorlanma biçimidir, çekirdek geometrisine bağlı olarak en düşük çıkan kuvvet değerleri bu testte tespit edilmiştir.
3. En yüksek çapraz-çekme kuvveti 10 periyot kaynak zamanı 13400 A akım şiddetinde 13038 N olarak elde edilmiştir. Çapraz-çekme kuvvetinde de makaslamaya benzer bir yükselme ve ardından düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Düşük akım şiddetlerinde daha yumuşak olan bu düşüş yüksek akım şiddetlerinde diğer bir deyişle ısı girdisinin etkisini daha çok gösterdiği bağlantılarda daha hızlı düşüş yaşandığı tespit edilmiştir.
4. Tüm mekanik deneyler sonucunda sadece düğmelenme ve yırtılma tipi kopmaya rastlanmıştır. Bunun nedeni ayrılma tipi kopmanın hiçbir grafikte kabul edilebilirliği olmadığından dolayı bu tip kopmaların gerçekleştiği parametrelerin ön deneyler sonrasında kullanılmamasıdır.

5. Deneyler sonrasında istenen kopma türü olan düğmelenme tipi ayrılmanın daha fazla yaşandığı görülmüştür. Kopma yüzeyi analiz edildiğinde martenzit ve ferrit büyümelerinden dolayı DP çeliği kısmından kopar ve burada ayrılan çekirdeğin daha çok CP tarafında kaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle hasar modu olarak sünek bir ayrılma davranışı gerçekleşmiştir.
6. Kaynaktaki ısı girdisine etki eden en önemli etken karesiyle orantılı olduğundan akım şiddetidir. Akım şiddetine bağlı olan grafiklerdeki eğimler kaynak zamanına oranla daha fazla etkilenip etken parametreye göre daha keskin davranış göstermektedir.
7. CP ve DP çeliklerinin elektrik dirençleri, ergime sıcaklıkları ve kalınlıkları farklı olduğundan ısıl denge oluşmamıştır. Isıl denge DP tarafında daha çok oluşmuş olup çekirdek yüksekliği CP tarafında oranla daha yüksektir.
8. Kaynak sonrası mikroyapı incelemelerinde çekirdekteki dentritik yapılar soğuma esnasındaki yönlenmeye bağlı olarak gerçekleşmiştir.
9. Kaynak sonrasındaki makroyapılarda elektrot temas yüzeyine paralel olarak her iki çelik tarafında da ince bir tabaka görülmektedir. Bunun nedeni soğutmalı elektrot sayesinde bu bölgenin dönüşüm sıcaklığının altında kalarak hiçbir dönüşüm gerçekleşmediği tespit edilmiştir.
10. Kaynak çekirdeği incelendiğinde oluşan dentritik yapıların çok yüksek ısı girdilerinde sıçrantılar nedeniyle ortasında bulunabilen çekme boşlukları ile değerlendirildiğinde çekirdeğin en son soğuyan bölge olduğu görülmektedir.
11. Farklı iki kalınlıktaki CP ve DP çelikleri elektrik direnç nokta kaynağında birleştirilmiş olup çeşitli mikroyapı incelemelerinde kaynak sonrasında ITAB veya çekirdek bölgelerinde herhangi bir empürite oluşumuna rastlanmamıştır.

8.1. Öneriler

- Malzeme kalınlıkları aynı tutularak veya ince olan taraf için daha kalın bir elektrot kullanılarak ısıl denge sağlanıp deneyler tekrarlanabilir.
- Yağmur suyu korozyon dayanımı ölçülebilir.
- Yorulma, Burulma ve Çentik darbe deneyleri yapılabilir.
- Yapıştırma ile birlikte kombine bağlantıya kaynak işlemi uygulanarak mukavemet artışı sağlanabilir.

KAYNAKÇA

[1] J. P. Varis, “The suitability of clinching as a joining method for high-strength structural steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 132, no. 1–3, pp. 242–249, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00933-0.

[2] B. K. Show, R. Veerababu, R. Balamuralikrishnan, and G. Malakondaiah, “Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of a microalloyed HSLA steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 6, pp. 1595–1604, 2010, doi: 10.1016/j.msea.2009.10.049.

[3] L. F. Porter and P. E. Repas, “The Evolution of HSLA Steels,” *JOM J. Miner. Met. Mater. Soc.*, vol. 34, no. 4, pp. 14–21, 1982, doi: 10.1007/BF03337994.

[4] R. Kuziak, R. Kawalla, and S. Waengler, “Advanced high strength steels for automotive industry: A review,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 103–117, 2008, doi: 10.1016/s1644-9665(12)60197-6.

[5] J. Kempken, “Technological challenges and solutions for the production of state-of-the-art 2nd- and 3rd-generation AHSS grades,” *AISTech - Iron Steel Technol. Conf. Proc.*, vol. 2018-May, pp. 1825–1828, 2018.

[6] “Url-1.” https://www.oica.net/category/production-statistics/2017-statistics/ (accessed Dec. 29, 2020).

[7] C. Scott, S. Allain, and N. G. Arcelor, “The development of a new Fe-Mn-C austenitic steel for automotive applications ductile austenitic steels or low-density steels alloyed with Développement d ’ une nouvelle nuance d ’ acier austénitique Fe-Mn-C pour applications,” 2006.

[8] E. de Moor, S. Lacroix, A. J. Clarke, J. Penning, and J. G. Speer, “Effect of retained austenite stabilized via quench and partitioning on the strain hardening of martensitic steels,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 11, pp. 2586–2595, 2008, doi: 10.1007/s11661-008-9609-z.

[9] D. K. Matlock and J. G. Speer, “Third Generation of AHSS: Microstructure Design Concepts,” *Microstruct. Texture Steels*, pp. 185–205, 2009, doi: 10.1007/978-1-84882-454-6_11.

[10] G. H. Bae and H. Huh, “Comparison of the optimum designs of center pillar assembly of an auto-body between conventional steel and ahss with a simplified side impact analysis,” *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 205–213, 2012, doi: 10.1007/s12239-012-0017-4.

[11] J. bo Peng *et al.*, “In-situ analysis of retained austenite transformation in high-performance micro-alloyed TRIP steel,” *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 24, no. 3, pp. 313–320, 2017, doi: 10.1016/S1006-706X(17)30045-6.

[12] D. Das and P. P. Chattopadhyay, “Influence of martensite morphology on the work-hardening behavior of high strength ferrite-martensite dual-phase steel,” *J. Mater. Sci.*, vol. 44, no. 11, pp. 2957–2965, 2009, doi: 10.1007/s10853-009-3392-0.

[13] “Url-2.” https://www.industr.com/en/steel-ahss-in-automotive-prominence-and-impact-2361539 (accessed Dec. 29, 2020).

[14] “Url-3.” https://www.worldautosteel.org/projects/future-steel-vehicle/phase-2-results/ (accessed Dec. 29, 2020).

[15] E. Doruk and M. Pakdil, “Otomotiv sektöründe direnç nokta kaynaği uygulamalari,” pp. 49–51, 2016.

[16] G. Weber and S. Göklü, “Resistance spot welding of uncoated and zinc coated advanced high-strength steels (AHSS) - Weldability and process reliability-influence of welding parameters,” *Weld. World*, vol. 50, no. 3–4, pp. 3–12, 2006, doi: 10.1007/BF03263428.

[17] E. Dias, L. Horimoto, and M. Pereira, “Microstructural characterization of CP steel used in automotive industry,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 775–776, pp. 141–145, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.775-776.141.

[18] S. Winkler, A. Thompson, C. Salisbury, M. Worswick, I. Riemsdijk, and R. Mayer, “Strain rate and temperature effects on the formability and damage of advanced high-strength steels,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 39 A, no. 6, pp. 1350–1358, 2008, doi: 10.1007/s11661-008-9495-4.

[19] “Url-4.” https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/complex-phase-cp-steels/ (accessed Dec. 29, 2020).

[20] C. Suppan, T. Hebesberger, A. Pichler, J. Rehrl, and O. Kolednik, “On the microstructure control of the bendability of advanced high strength steels,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 735, no. February, pp. 89–98, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.07.080.

[21] J. H. Schmitt and T. Iung, “New developments of advanced high-strength steels for automotive applications,” *Comptes Rendus Phys.*, vol. 19, no. 8, pp. 641–656, 2018, doi: 10.1016/j.crhy.2018.11.004.

[22] Y. U. Feng and W. Laifu, “Manufacturing method of welded tube for CP800 torsion beam.”

[23] Z. Liu, L. Lang, S. Ruan, M. Zhang, F. Lv, and J. Qi, “Effect of internal pressure assisted on hydroforming for CP800 high-strength steel torsion beam,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 2, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1570-9.

[24] Arcelor Mittal, “Complex Phase,” 2018. [Online]. Available: http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/C_EN.pdf.

[25] G. B. Olson and M. Cohen, “A general mechanism of martensitic nucleation: Part I. General concepts and the FCC → HCP transformation,” *Metall. Trans. A*, vol. 7, no. 12, pp. 1897–1904, 1976, doi: 10.1007/BF02659822.

[26] A. I. Zaitsev, A. V. Koldaev, N. A. Arutyunyan, and S. F. Dunaev, “Principles of Creating New Economically Alloyed Ferritic Steels with a Unique Set of Properties,” *Metallurgist*, vol. 62, no. 5–6, pp. 532–540, 2018, doi: 10.1007/s11015-018-0690-2.

[27] K. Sugimoto and M. Mukherjee, “TRIP aided and complex phase steels,” in *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 217–257.

[28] C. Mesplont, *Phase Transformations and Microstructure - Mechanical Properties Relations in Complex Phase High Strength Steels*. Universitet Gent, 2002.

[29] P. J. van der Wolk, *Modelling CCT diagrams of engineering steels using neural networks*. DUP Science, 2001.

[30] H. Sun, K. Wei, X. Yang, Z. Xiao, and Y. Wu, “Effects of pre-strain and annealing on the fatigue properties of complex phase steel CP800,” *Int. J. Fatigue*, vol. 131, no. June 2019, p. 105364, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105364.

[31] N. Pathak, C. Butcher, M. J. Worswick, E. Bellhouse, and J. Gao, “Damage evolution in complex-phase and dual-phase steels during edge stretching,” *Materials (Basel).*, vol. 10, no. 4, pp. 1–29, 2017, doi: 10.3390/ma10040346.

[32] A. Karelova, C. Krempaszky, E. Werner, P. Tsipouridis, T. Hebesberger, and A. Pichler, “Hole expansion of dual-phase and complex-phase AHS steels - Effect of edge conditions,” *Steel Res. Int.*, vol. 80, no. 1, pp. 71–77, 2009, doi: 10.2374/SRI08SP110.

[33] F. Hairer and A. Karelova, “Etching techniques for the microstructural characterization of complex phase steels by light microscopy,” *Int. Dr. Semin.*, pp. 50–54, 2008.

[34] M. Geiger, M. Merklein, and M. Kaupper, “Investigation of the mechanical behaviour of advanced high strength steels under various loading conditions,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. SUPPL. 1, pp. 225–228, 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0361-0.

[35] M. Rózański, M. Morawiec, A. Grajcar, and S. Stano, “Modified Twin-Spot Laser Welding of Complex Phase Steel,” *Arch. Metall. Mater.*, vol. 61, no. 4, pp. 1999–2008, 2016, doi: 10.1515/amm-2016-0323.

[36] S. Aslanlar, “The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry,” *Mater. Des.*, vol. 27, no. 2, pp. 125–131, 2006, doi: 10.1016/j.matdes.2004.09.025.

[37] V. Onar, S. Aslanlar, and N. Akkaş, “Effect of welding current on tensile-peel loading of welding joints in TRIP 800 and micro-alloyed steels in resistance spot welding,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 132, no. 3, pp. 822–824, 2017, doi: 10.12693/APhysPolA.132.822.

[38] V. Onar *et al.*, “Effect of welding time on tensile-shear load in resistance spot welded TRIP 800 and microalloyed steels,” *Indian J. Chem. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 355–357, 2019.

[39] “Url-5.” https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/ (accessed Jan. 04, 2021).

[40] Z. Xiaodong, M. Zhaohui, and W. Li, “Current Status of Advanced High Strength Steel for Auto-making and its Development in Baosteel,” pp. 1–8, 2011.

[41] B. Ennis, “A review of the effects of chemical and phase segregation on the mechanical behaviour of multi-phase steels,” 2016. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1604.06485.

[42] M. Mazinani and W. J. Poole, “Effect of martensite plasticity on the deformation behavior of a low-carbon dual-phase steel,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 2, pp. 328–339, 2007, doi: 10.1007/s11661-006-9023-3.

[43] S. Oliver, T. B. Jones, and G. Fourlaris, “Dual phase versus TRIP strip steels: Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing,” *Mater. Charact.*, vol. 58, no. 4, pp. 390–400, 2007, doi: 10.1016/j.matchar.2006.07.004.

[44] Nack J. Kım and A. H. Nakagaw, “Effective Grain Size of Dual-phase Steel,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 83, pp. 145–149, 1986.

[45] J. Adamczyk and A. Grajcar, “Heat treatment and mechanical properties of low-carbon steel with dual-phase microstructure,” *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 13–20, 2007.

[46] S. Keeler, M. Kimchi, and P. J. Mooney, “Advanced High-Strength Steels Guidelines Version 6.0,” *WorldAutoSteel*, no. September, p. 314, 2017, [Online]. Available: https://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/.

[47] S. Gündüz, “Effect of chemical composition, martensite volume fraction and tempering on tensile behaviour of dual phase steels,” *Mater. Lett.*, vol. 63, no. 27, pp. 2381–2383, 2009, doi: 10.1016/j.matlet.2009.08.015.

[48] N. Fonstein, “Dual-phase steels,” in *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*, 2016, pp. 169–216.

[49] J. N. Hall and J. R. Fekete, *Steels for auto bodies: A general overview*. Elsevier Ltd, 2017.

[50] J. Frei, M. Biegler, M. Rethmeier, C. Böhne, and G. Meschut, “Investigation of liquid metal embrittlement of dual phase steel joints by electro-thermomechanical spot-welding simulation,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 24, no. 7, pp. 624–633, 2019, doi: 10.1080/13621718.2019.1582203.

[51] Y. S. Aslanlar, “DP600-DP800 Saclarının Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesinde Hasar Modunun Tespiti,” Ms.C. Thesis, 2019.

[52] J. Pakkanen, R. Vallant, and M. Kičin, “Experimental investigation and numerical simulation of resistance spot welding for residual stress evaluation of DP1000 steel,” *Weld. World*, vol. 60, no. 3, pp. 393–402, 2016, doi: 10.1007/s40194-016-0301-4.

[53] A. Chabok, E. Galinmoghaddam, J. T. M. De Hosson, and Y. T. Pei, “Micromechanical evaluation of DP1000-GI dual-phase high-strength steel resistance spot weld,” *J. Mater. Sci.*, vol. 54, no. 2, pp. 1703–1715, 2019, doi: 10.1007/s10853-018-2886-z.

[54] J. Ha, H. Huh, J. H. Song, and J. H. Lim, “Prediction of failure characteristics of spot welds of DP and trip steels with an equivalent strength failure model,” *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 67–78, 2013, doi: 10.1007/s12239-013-0009-z.

[55] I. Ozturk Yilmaz, A. Y. Bilici, and H. Aydin, “Microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welded DP1000–QP1180 steel sheets,” *J. Cent. South Univ.*, vol. 26, no. 1, pp. 25–42, 2019, doi: 10.1007/s11771-019-3980-3.

[56] Q. H. Han, Y. L. Kang, X. M. Zhao, C. Lü, and L. F. Gao, “Microstructure and properties of mo microalloyed cold rolled DP1000 steels,” *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 18, no. 5, pp. 52–58, 2011, doi: 10.1016/S1006-706X(11)60065-4.

[57] Ü. Gül, “1200M Çeliğinin CMT Kaynak Yöntemi Birleştirilmesinde Mekanik ve Metalurjik Özelliklerinin İncelenmesi,” M.Sc. Thesis, 2017.

[58] B. Wang, L. Hua, X. Wang, Y. Song, and Y. Liu, “Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 9–12, pp. 1917–1926, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7703-0.

[59] C. Li, X. Yuan, K. Wu, H. Wang, Z. Hu, and X. Pan, “Nugget formation and its mechanism of resistance spot welded joints in DP600 dual-phase and DC54D ultralow carbon steel,” *Met. Mater. Int.*, vol. 23, no. 3, pp. 543–553, 2017, doi: 10.1007/s12540-017-6557-4.

[60] V. H. Baltazar Hernandez, S. K. Panda, Y. Okita, and N. Y. Zhou, “A study on heat affected zone softening in resistance spot welded dual phase steel by nanoindentation,” *J. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 6, pp. 1638–1647, 2010, doi: 10.1007/s10853-009-4141-0.

[61] H. Zhang, X. Qiu, Y. Bai, F. Xing, H. Yu, and Y. Shi, “Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels,” *Mater. Des.*, vol. 63, pp. 151–158, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.060.

[62] M. Pouranvari, S. M. Mousavizadeh, S. P. H. Marashi, M. Goodarzi, and M. Ghorbani, “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,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1390–1398, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.09.010.

[63] X. Sun, E. V. Stephens, and M. A. Khaleel, “Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 15, no. 4, pp. 356–367, 2008, doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.01.018.

[64] J. Yu, J. Shim, and S. Rhee, “Characteristics of resistance spot welding for 1GPa grade twin induced plasticity steel,” *Mater. Trans.*, vol. 53, no. 11, pp. 2011–2018, 2012, doi: 10.2320/matertrans.M2012167.

[65] M. I. Khan, M. L. Kuntz, E. Biro, and Y. Zhou, “Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels,” *Mater. Trans.*, vol. 49, no. 7, pp. 1629–1637, 2008, doi: 10.2320/matertrans.MRA2008031.

[66] O. Andersson, D. Semere, A. Melander, M. Arvidsson, and B. Lindberg, “Digitalization of Process Planning of Spot Welding in Body-in-white,” *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 618–623, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.05.082.

[67] H. Zhang, “Resistance Spot Weld,” in *Resistance Welding Fundamentals and Applications*, Taylor & Francis, 2006, pp. 1–427.

[68] Y. J. Chao, “Failure of Spot Weld: A Competition between Crack Mechanics and Plastic Collapse,” *Recent Adv. Exp. Mech.*, pp. 245–256, 2002.

[69] J. H. Ordoñez Lara, R. R. Ambriz, C. García, G. Plascencia, and D. Jaramillo, "Fatigue Life of Resistance Spot Welding on Dual-Phase Steels," *Proc. 17th Int. Conf. New Trends Fatigue Fract.*, no. 8, pp. 225–236, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-70365-7_26.

[70] W. Hatch and K. Yamamura, "Welding Technology," in *Asia in Japan's Embrace*, 2012, pp. 97–112.

[71] A. Pashkevich, "Welding Automation," vol. 12, no. 11, 1970, pp. 1646–1659.

[72] D. L. Olson, T. A. Siewert, S. Liu, and G. R. Edward, "Gas-metal arc welding," in *ASM Handbook, Vol 6*, 1993, pp. 180–185.

[73] V. Onar, "Trip çelikler ile mikroalaşımlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında birleştirilebilirliğinin incelenmesi," Ph.D. Thesis, 2017.

[74] E. Esendir, "Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı İle Birleştirilmesi," Ph.D. Thesis, 2009.

[75] S. Aktas, U. Ozsarac, and S. Aslanlar, "Effect of spot welding parameters on tensile properties of DP 600 steel sheet joints," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 27, no. 7, pp. 756–764, 2012, doi: 10.1080/10426914.2011.647940.

[76] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan, and Z. Demir, "Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 1, pp. 2–7, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2005.06.022.

[77] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, and E. Ilhan, "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 7, pp. 1427–1431, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.09.004.

[78] V. Onar and S. Aslanlar, "Welding time effect of welding joints in micro alloyed and TRIP 800 steels in resistance spot welding," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 131, no. 3, pp. 389–391, 2017, doi: 10.12693/APhysPolA.131.389.

[79] S. M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh, and M. Fadzil, "A review on resistance spot welding of magnesium alloys," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 86, no. 5–8, pp. 1805–1825, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8258-9.

[80] H. Ghazanfari and M. Naderi, "Expulsion characterization in resistance spot welding by means of a hardness mapping technique," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 21, no. 9, pp. 894–897, 2014, doi: 10.1007/s12613-014-0986-6.

[81] D. Zhao, Y. Wang, Z. Lin, and S. Sheng, "An effective quality assessment method for small scale resistance spot welding based on process parameters," *NDT E Int.*, vol. 55, pp. 36–41, 2013, doi: 10.1016/j.ndteint.2013.01.008.

[82] G. Fourlaris, S. J. Hambling, and T. B. Jones, “Influence of steel strength and loading mode on fatigue properties of resistance spot welded H section specimen,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 39–44, 2006, doi: 10.1179/174328406X74257.

[83] H. Eisazadeh, M. Hamedi, and A. Halvaee, “New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 149–157, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.06.042.

[84] H. Moshayedi and I. Sattari-Far, “Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 2, pp. 347–354, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.004.

[85] S. Aslanlar, “Galvanizli Kromatlı Mikro Alaşımlı Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Uygun Hasar Modunun Tespiti,” Ph.D. Thesis, 1999.

[86] F. Özen, “Martenzitik Yapılı Çelikler İle Twıp Yapılı Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi,” Ph.D. Thesis, 2020.

[87] S. Provided and I. S. O. No, “INTERNATIONAL STANDARD Resistance welding — Destructive testing of welds — ISO 14272,” vol. 2015, 2015, [Online]. Available: https://www.sis.se/api/document/preview/920217/.

[88] S. Provided and I. S. O. No, “INTERNATIONAL STANDARD Resistance welding — Destructive testing of welds — ISO 14270,” vol. 2015, 2015, [Online]. Available: https://www.sis.se/api/document/preview/920216.

[89] E. Ics, “INTERNATIONAL STANDARD Resistance welding — Destructive testing of welds — ISO 14273,” no. 121687, 2012, [Online]. Available: https://www.sis.se/api/document/preview/8019745/.

[90] J. Yu, M. Faridh, and Y. W. Park, “Adaptive resistance spot welding method that reduces the shunting effect,” *J. Manuf. Process.*, vol. 35, no. April, pp. 604–613, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.09.002.

[91] J. P. Kong, T. K. Han, K. G. Chin, B. G. Park, and C. Y. Kang, “Effect of boron content and welding current on the mechanical properties of electrical resistance spot welds in complex-phase steels,” *Mater. Des.*, vol. 54, pp. 598–609, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.098.

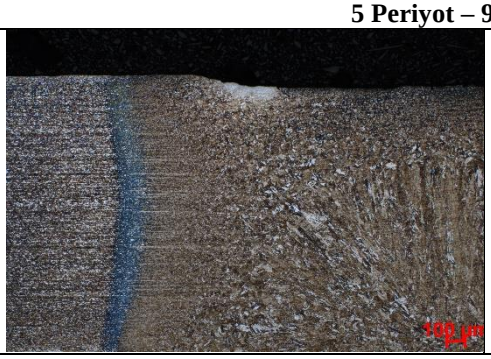
[92] H. E. Emre and R. Kaçar, “Development of weld lobe for resistance spot-welded TRIP800 steel and evaluation of fracture mode of its weldment,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 9–12, pp. 1737–1747, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7605-1.

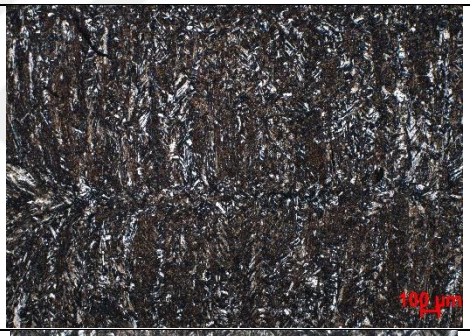
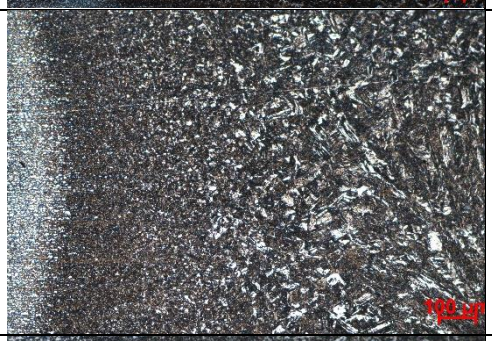
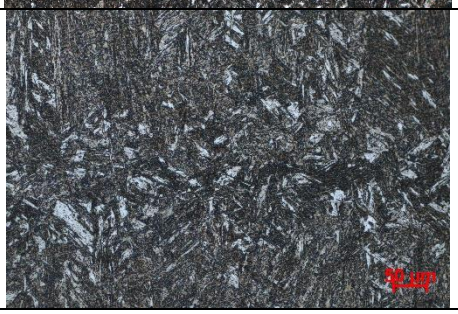
[93] M. Morawiec, M. Różański, A. Grajcar, and S. Stano, “Effect of dual beam laser welding on microstructure–property relationships of hot-rolled complex phase steel sheets,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 145–153, 2017, doi: 10.1016/j.acme.2016.09.007.

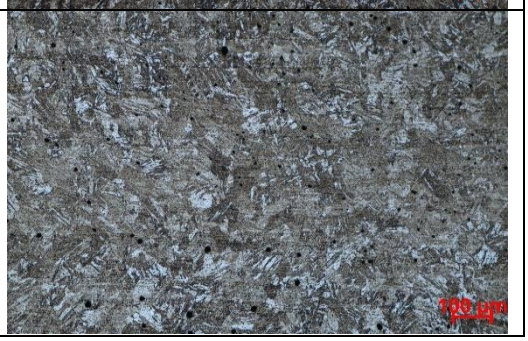
[94] K. Paveebunvipak and V. Uthaisangsuk, “Microstructure based modeling of deformation and failure of spot-welded advanced high strength steels sheets,” *Mater. Des.*, vol. 160, pp. 731–751, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.09.052.

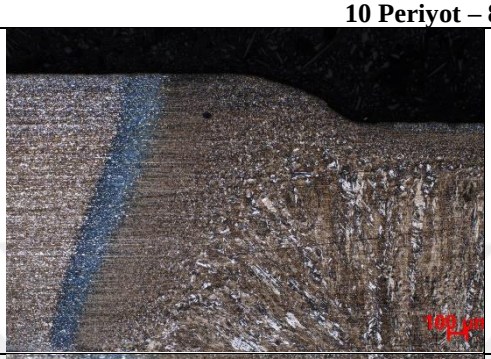
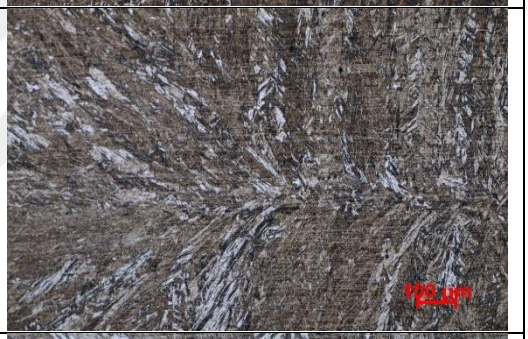
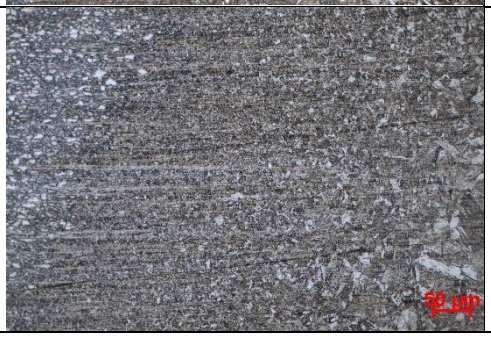
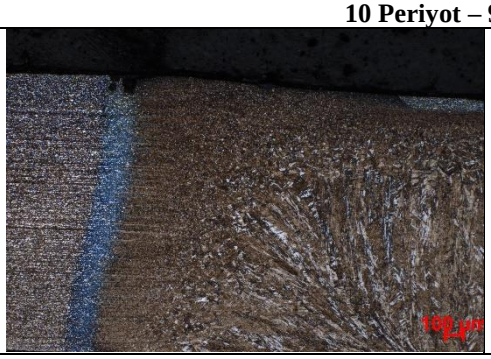
EKLER

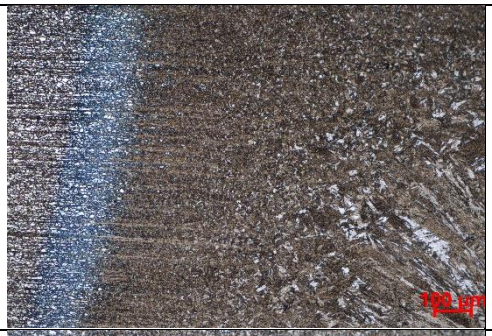
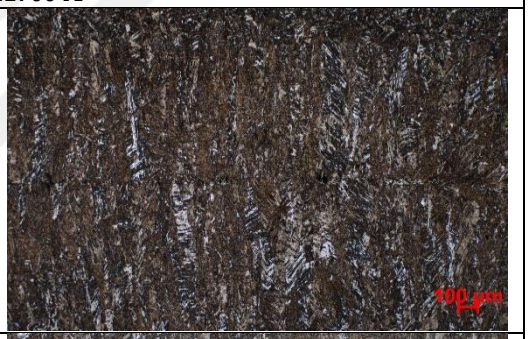
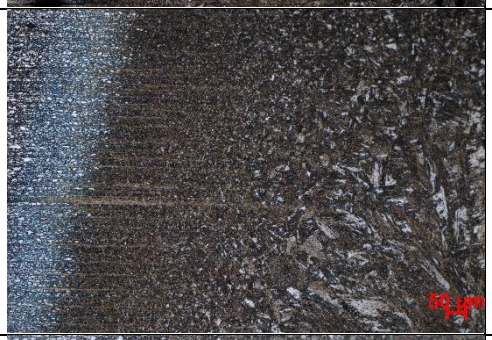
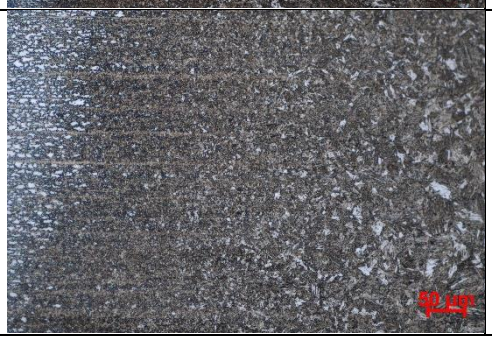
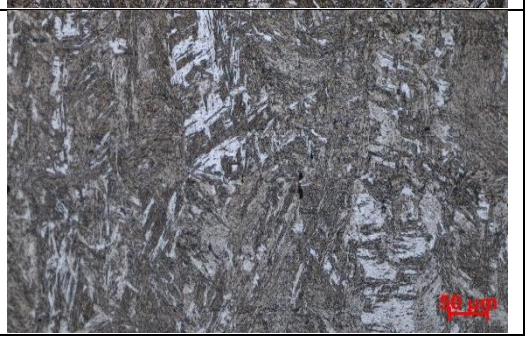
Ek A: DP1000HF-CP800 birleştirmelerinin mikroyapı görüntüleri

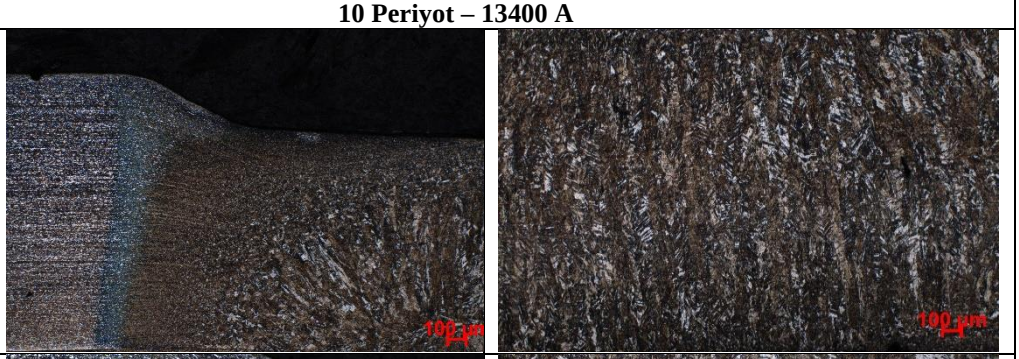
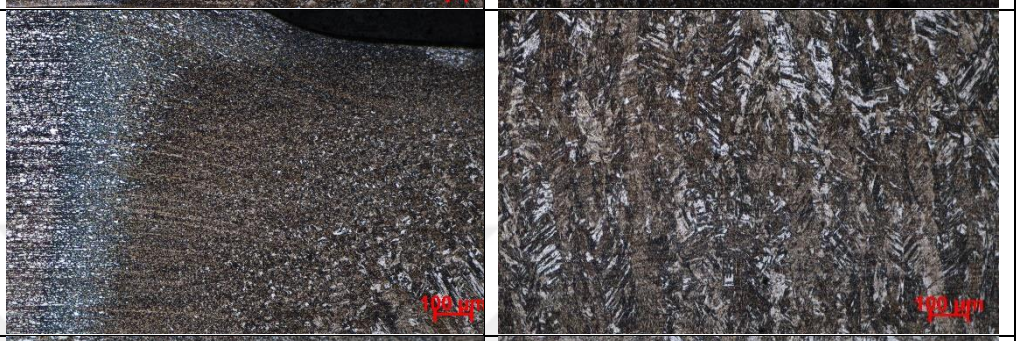
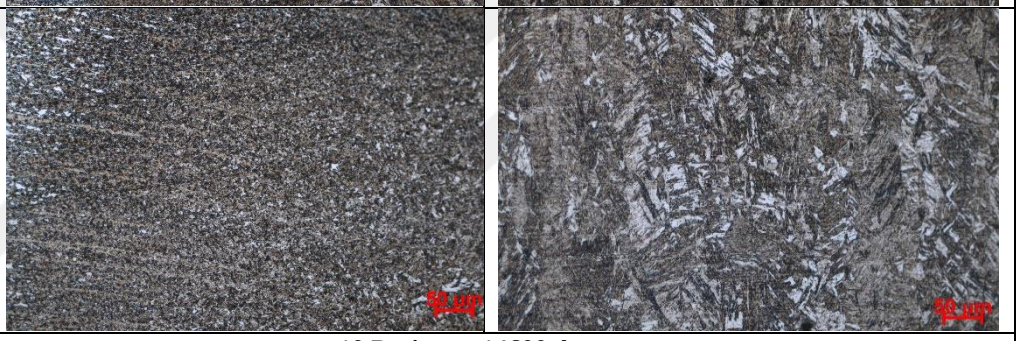
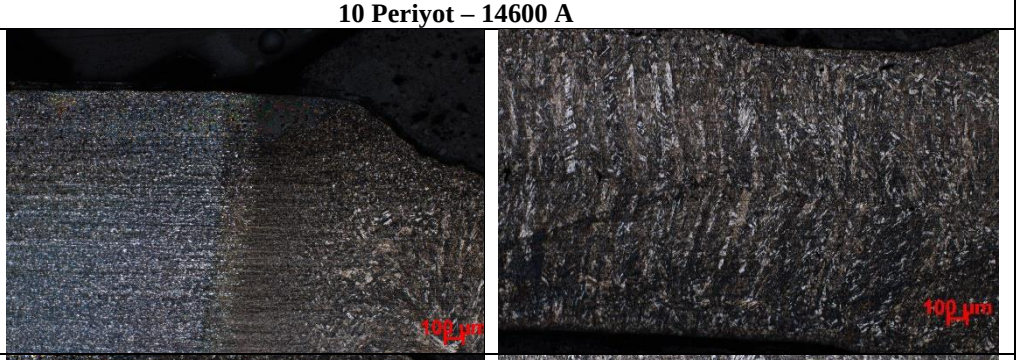
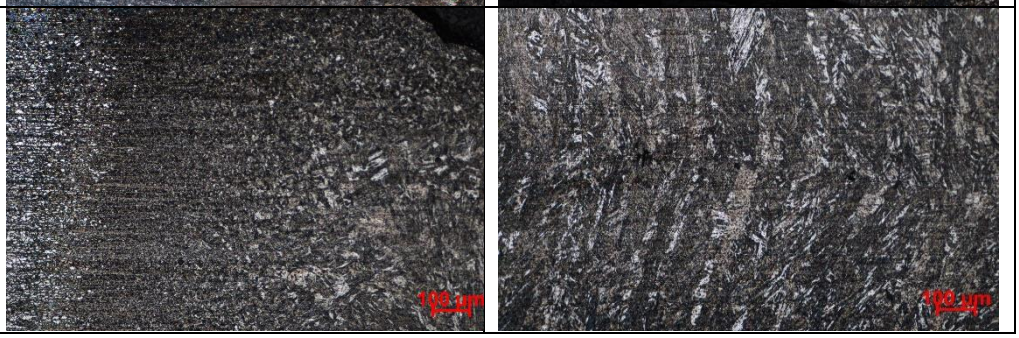
5 Periyot – 8070 A		
Büyütme	**ITAB**	**Çekirdek**
50x		
100x		
200x		
5 Periyot – 9400 A		
50x		

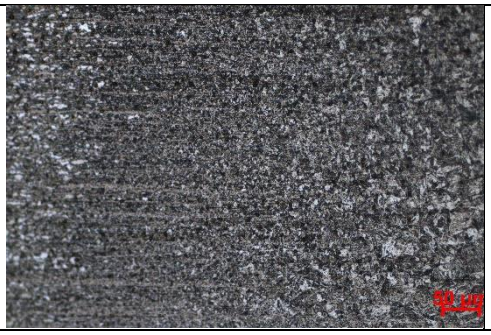
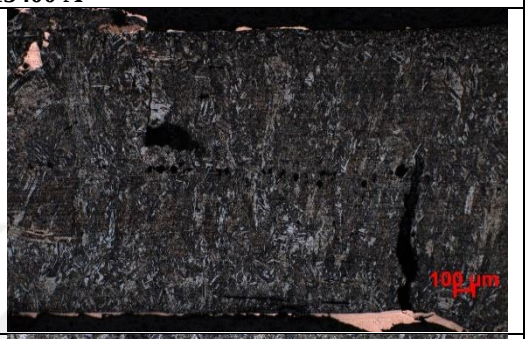
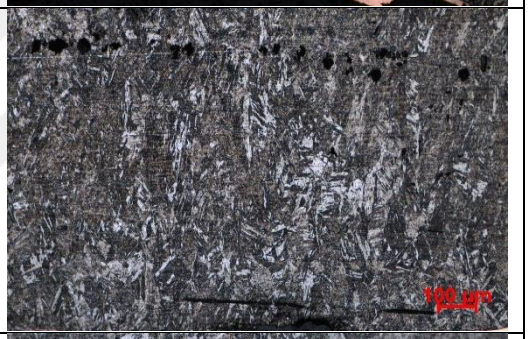
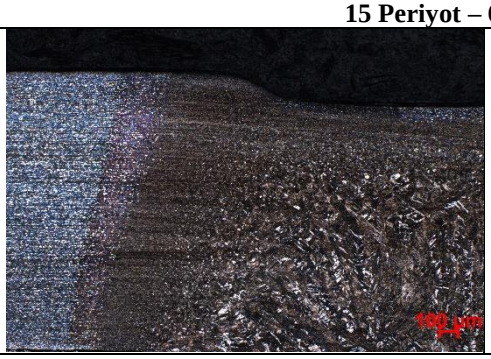
100x		
200x		
5 Periyot – 11700 A		
50x		
100x		
200x		

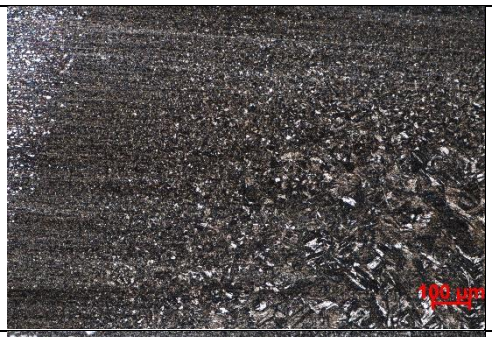
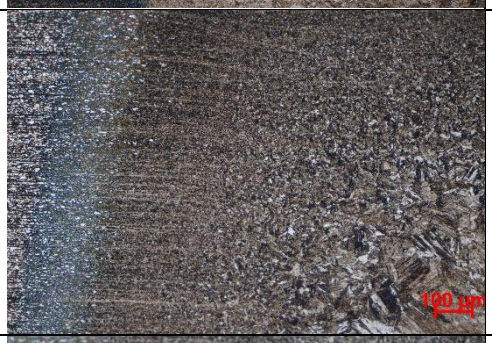
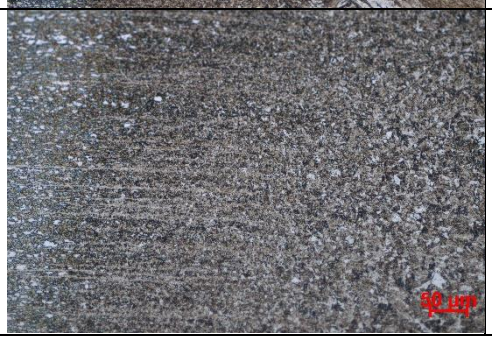
5 Periyot – 13400 A		
50x		
100x		
200x		
5 Periyot – 14600 A		
50x		
100x		

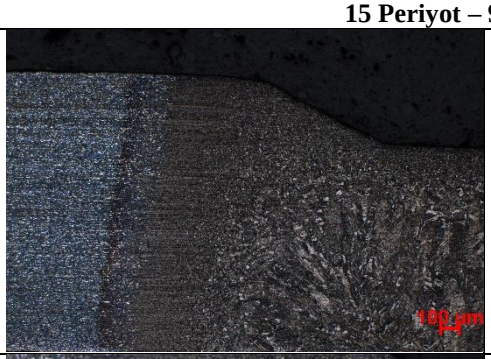
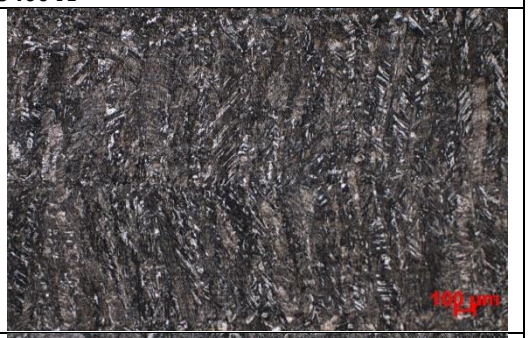
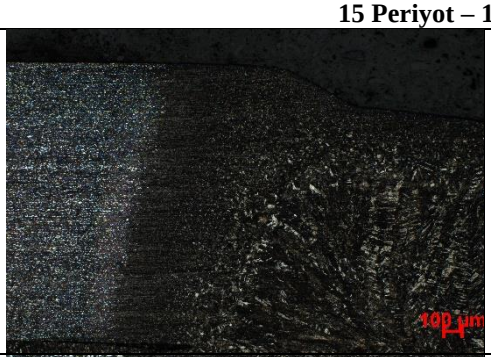
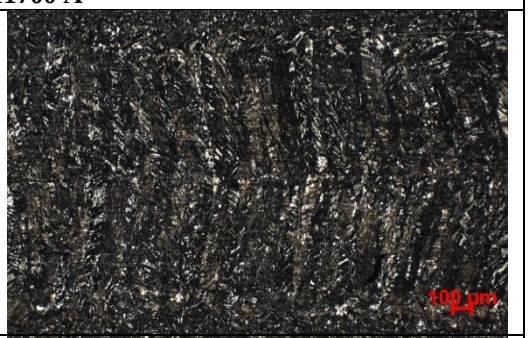
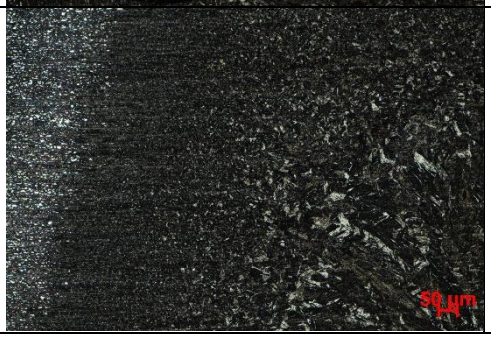
200x		
10 Periyot – 8070 A		
50x		
100x		
200x		
10 Periyot – 9400 A		
50x		

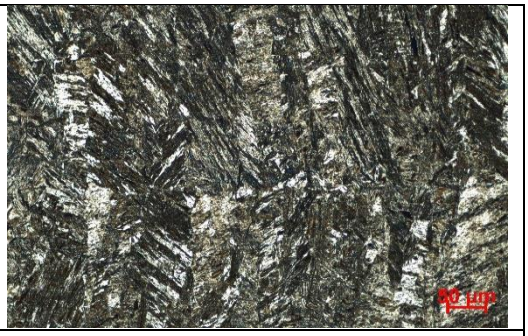
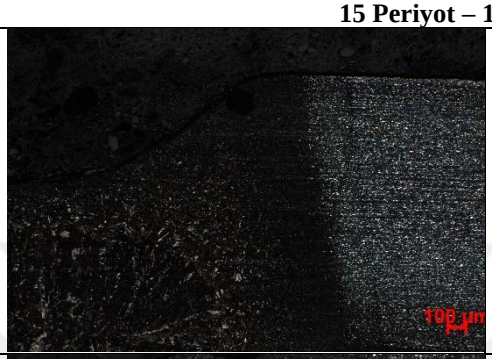
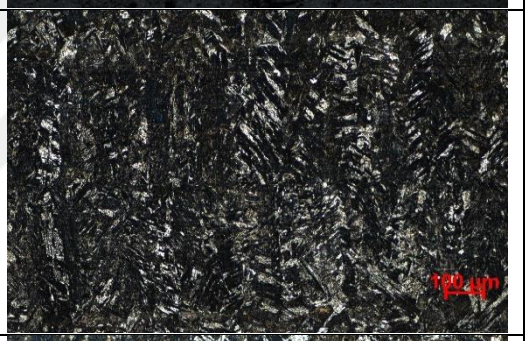
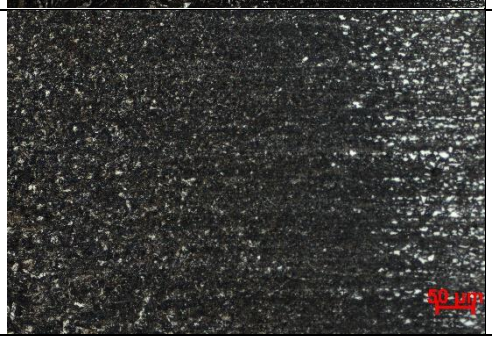
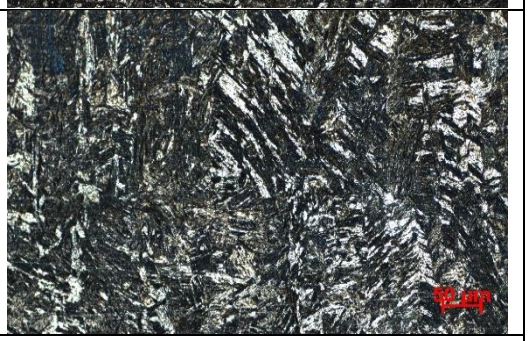
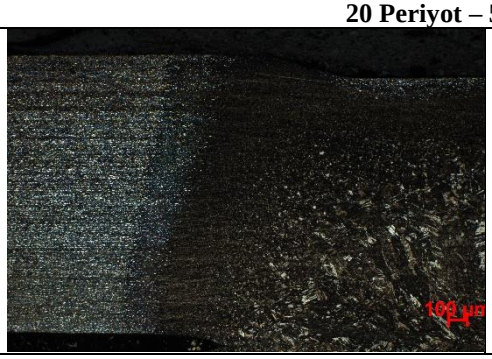
100x		
200x		
10 Periyot – 11700 A		
50x		
100x		
200x		

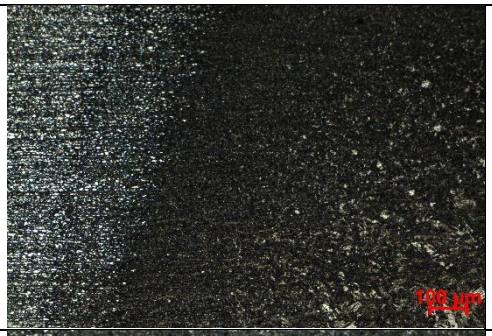
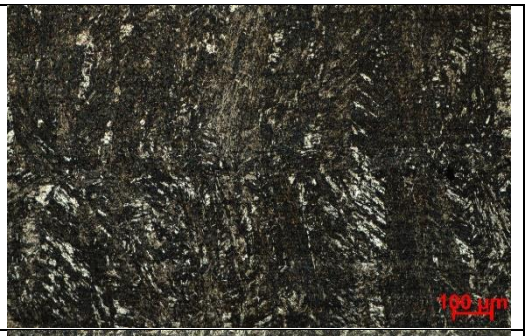
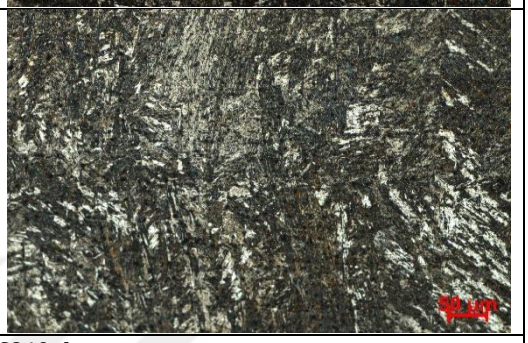
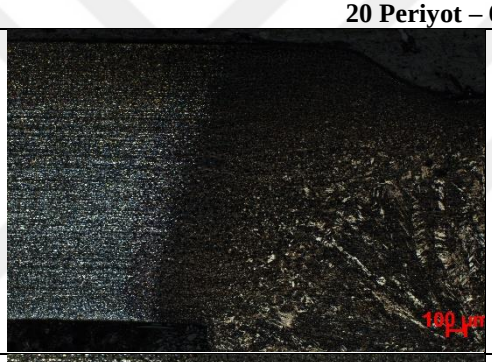
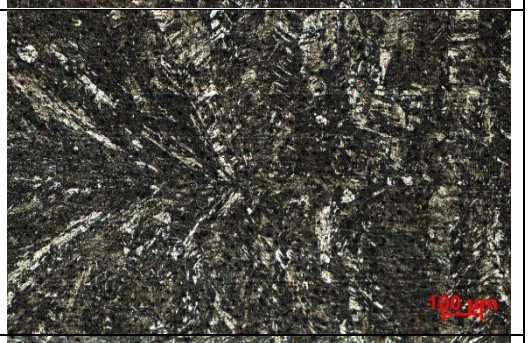
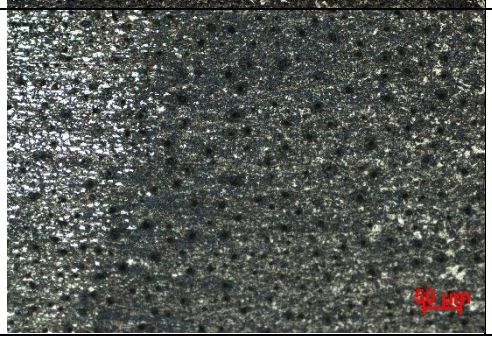
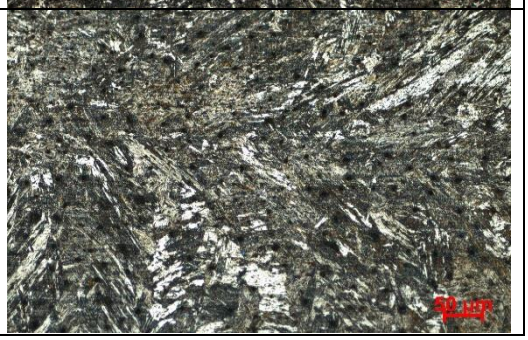
10 Periyot – 13400 A	
50x	
100x	
200x	
10 Periyot – 14600 A	
50x	
100x	

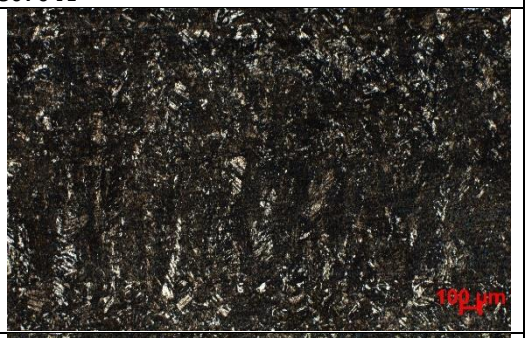
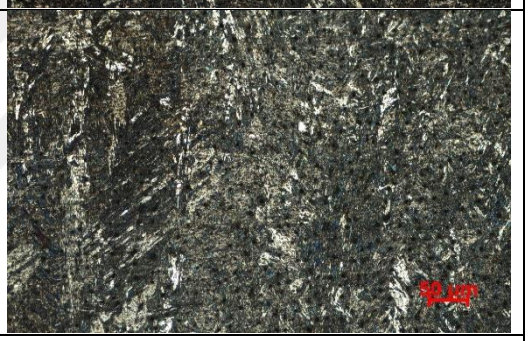
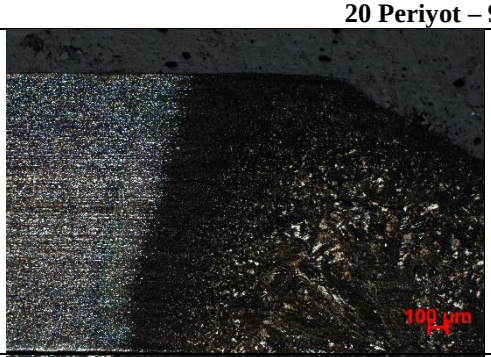
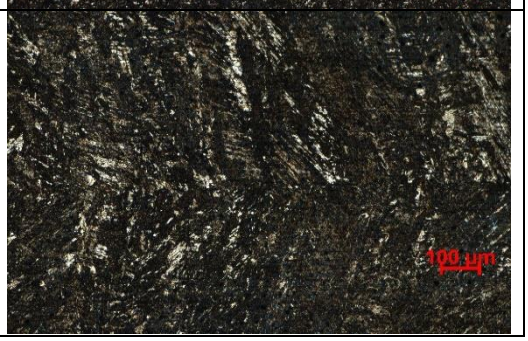
200x		
10 Periyot – 15400 A		
50x		
100x		
200x		
15 Periyot – 6910 A		
50x		

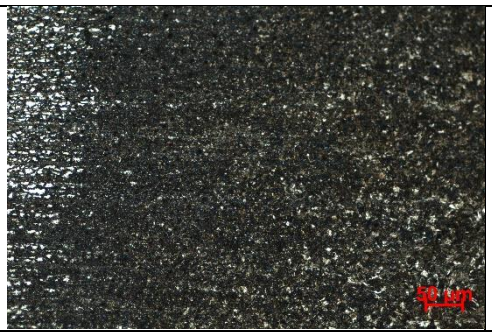
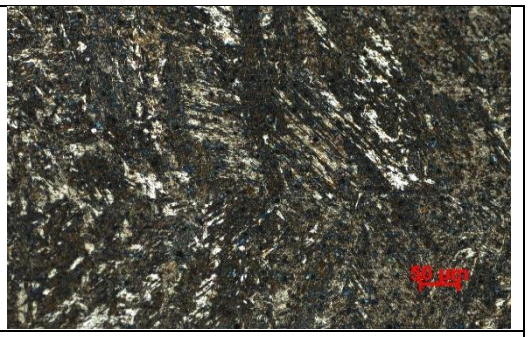
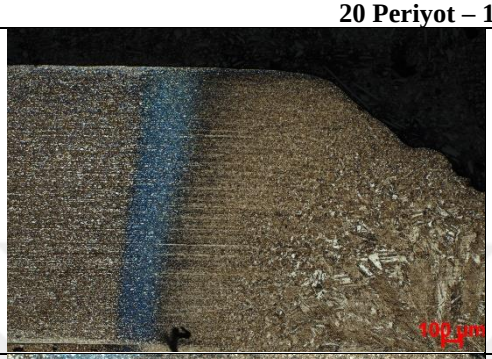
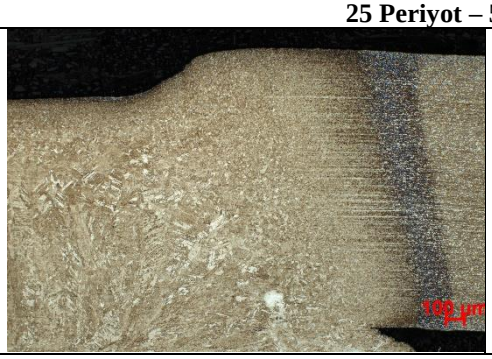
100x		
200x		
15 Periyot – 8070 A		
50x		
100x		
200x		

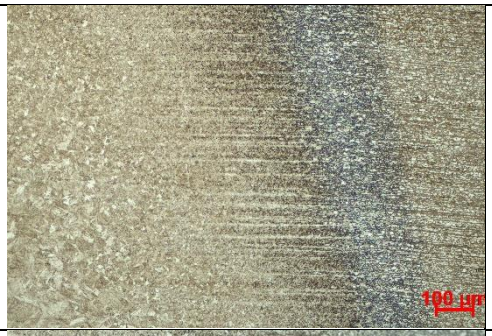
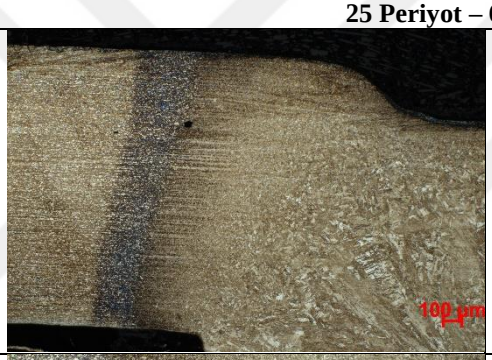
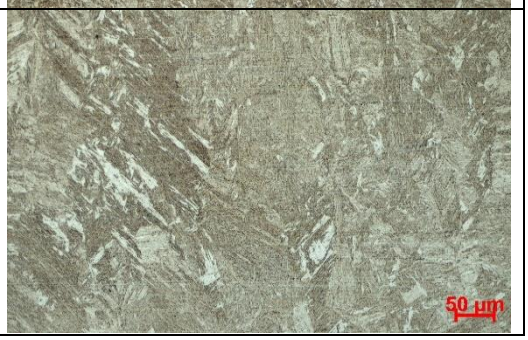
15 Periyot – 9400 A		
50x		
100x		
200x		
15 Periyot – 11700 A		
50x		
100x		

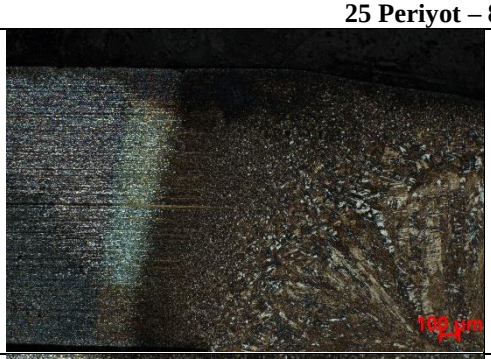
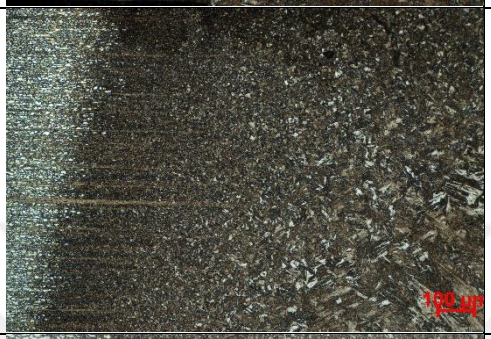
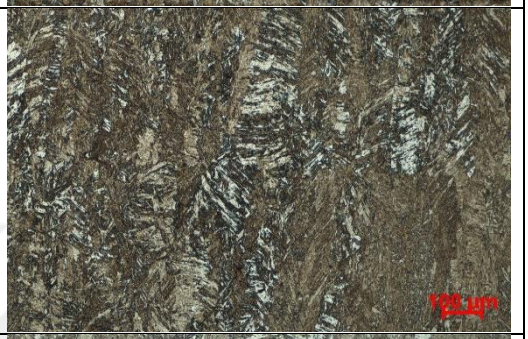
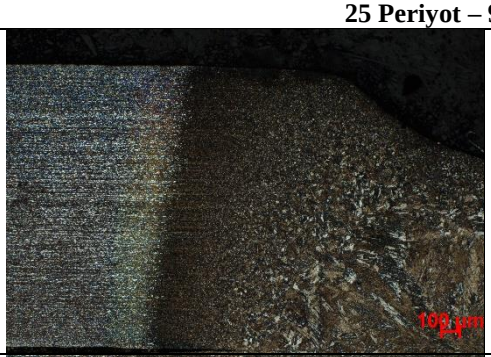
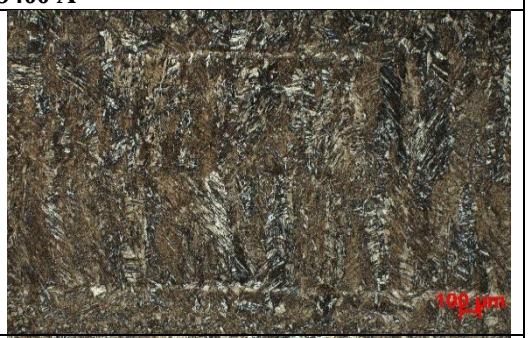
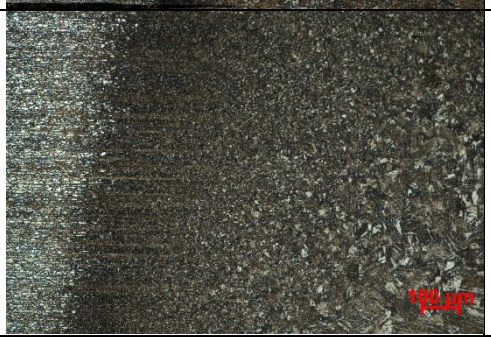
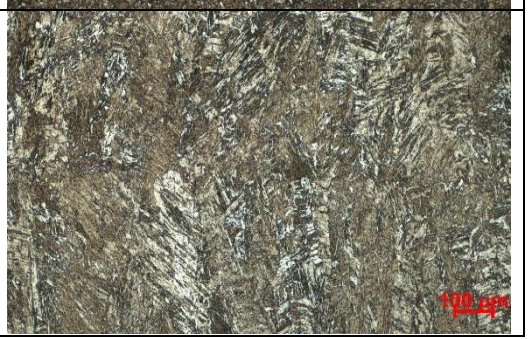
200x		
15 Periyot – 13400 A		
50x		
100x		
200x		
20 Periyot – 5850 A		
50x		

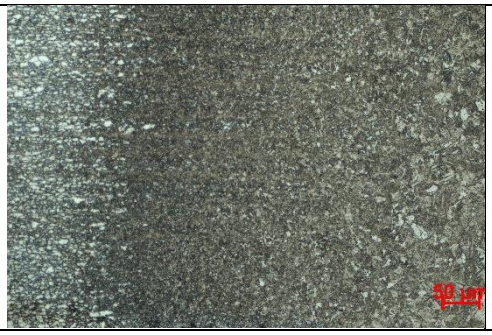
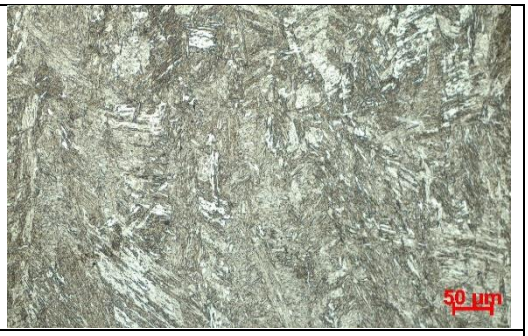
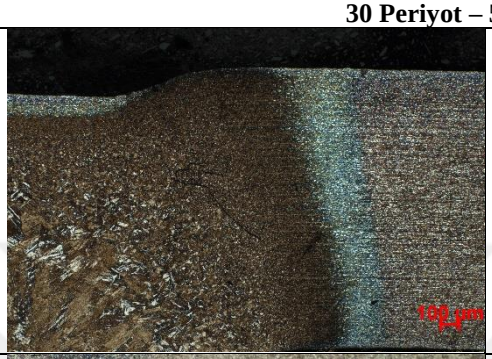
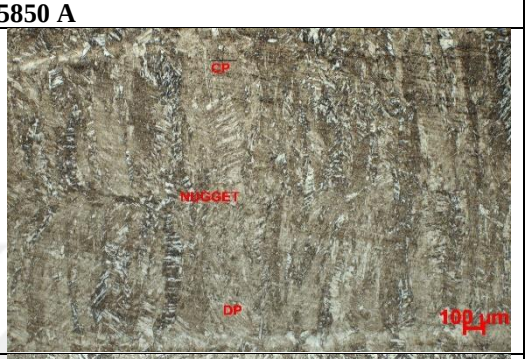
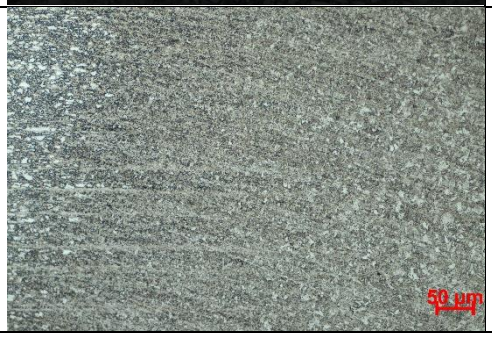
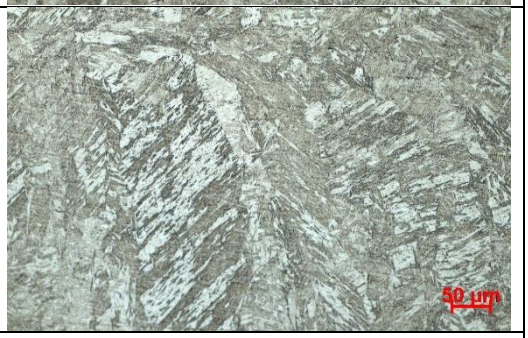
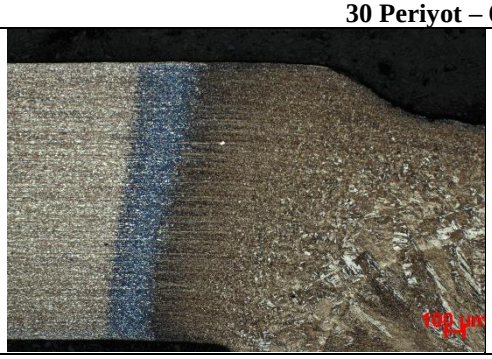
100x		
200x		
20 Periyot – 6910 A		
50x		
100x		
200x		

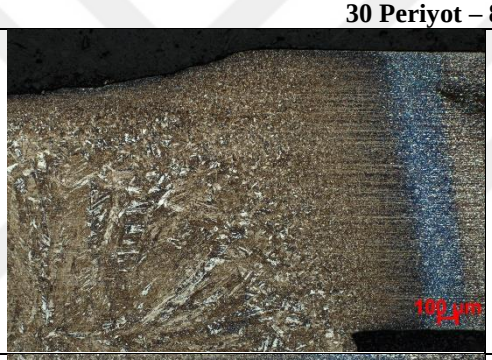
20 Periyot – 8070 A		
50x		
100x		
200x		
20 Periyot – 9400 A		
50x		
100x		

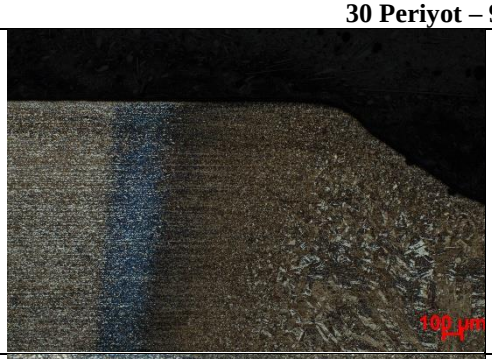
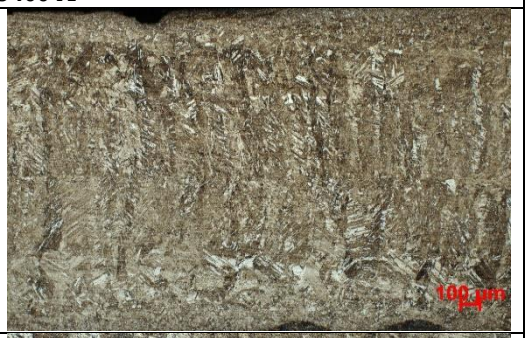
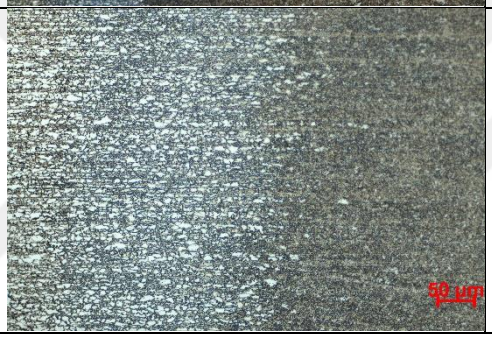
200x		
20 Periyot – 11700 A		
50x		
100x		
200x		
25 Periyot – 5850 A		
50x		

100x		
200x		
25 Periyot – 6910 A		
50x		
100x		
200x		

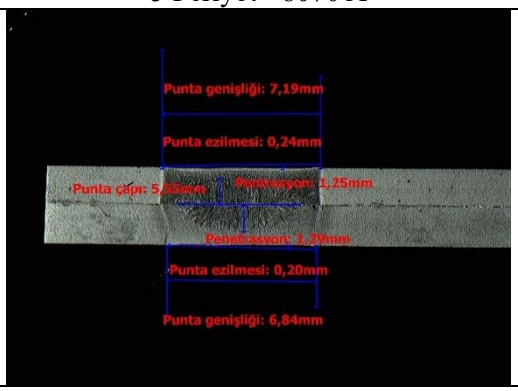
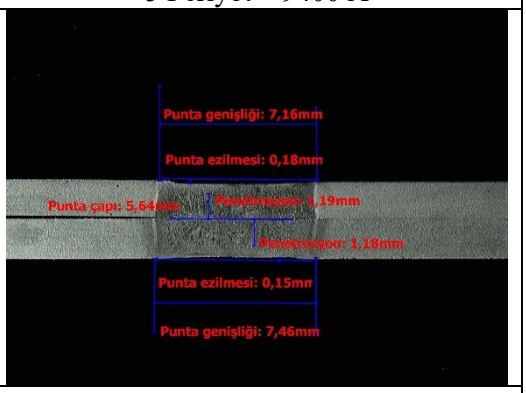
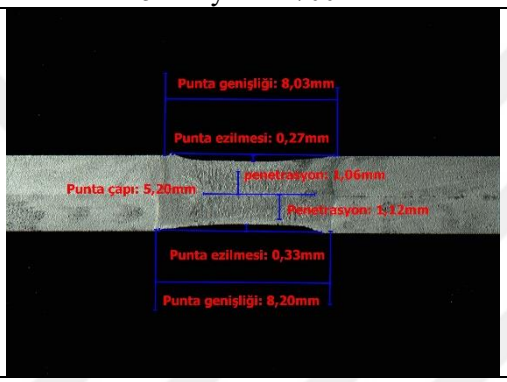
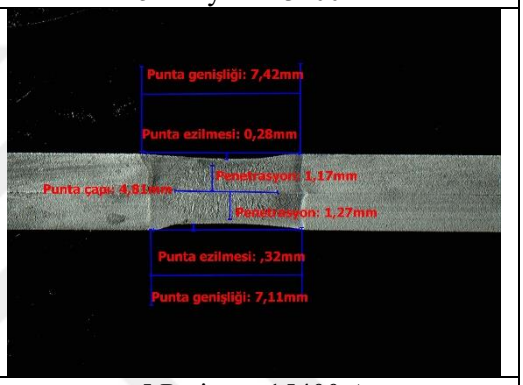
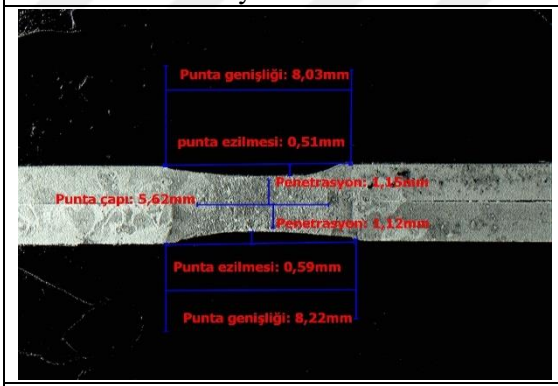
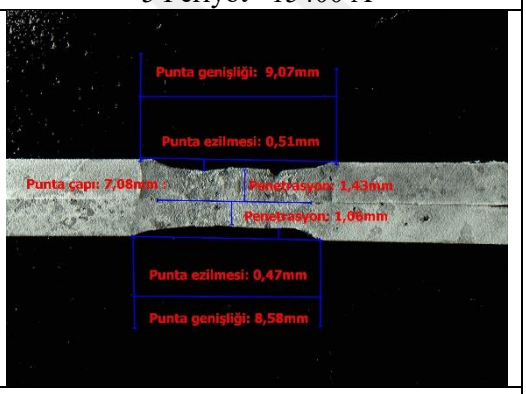
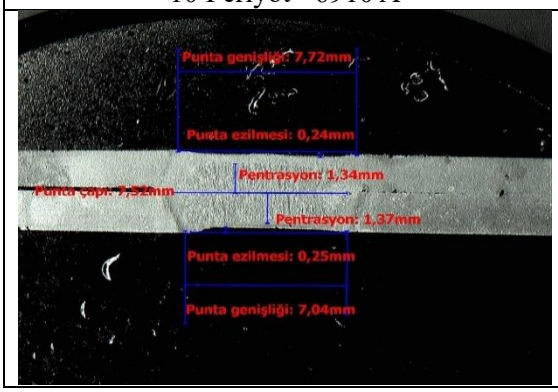
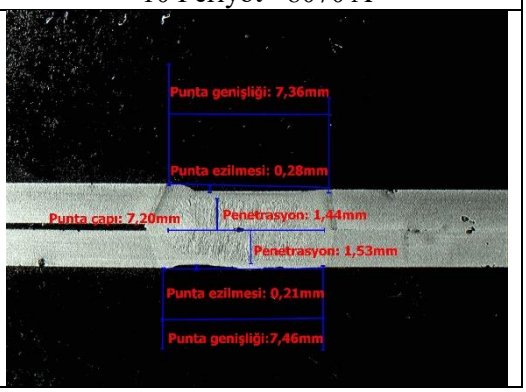
25 Periyot – 8070 A		
50x		
100x		
200x		
25 Periyot – 9400 A		
50x		
100x		

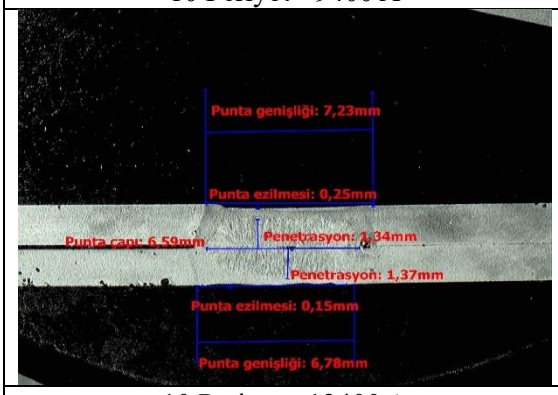
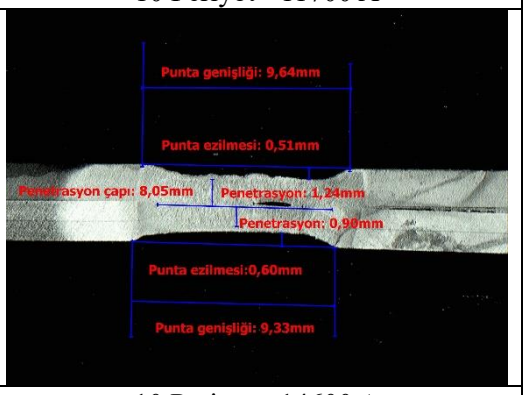
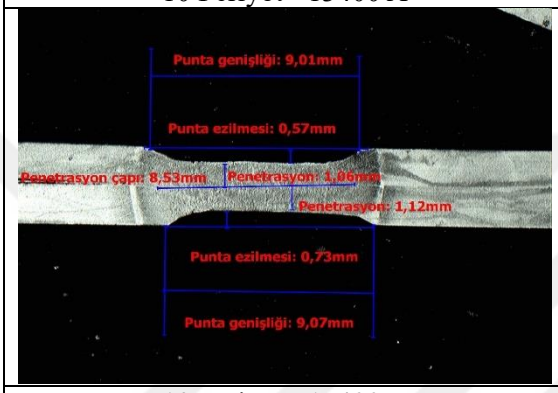
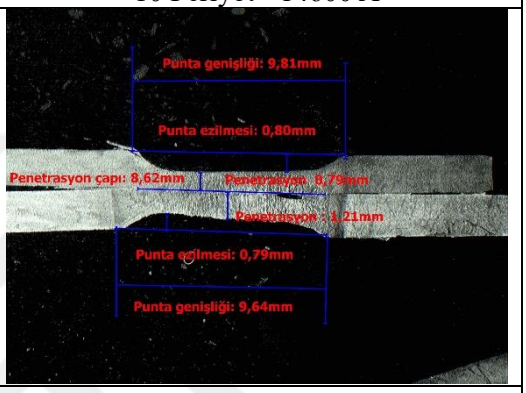
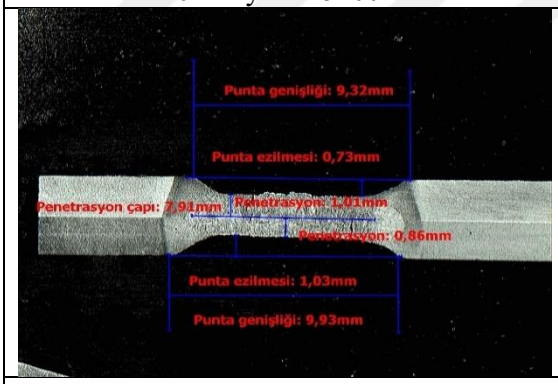
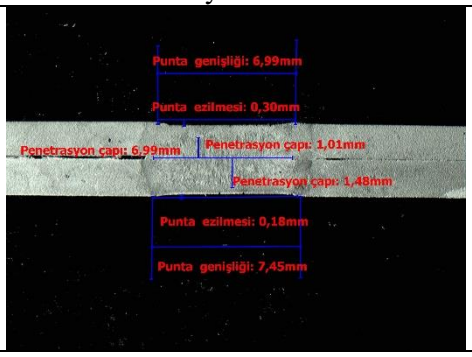
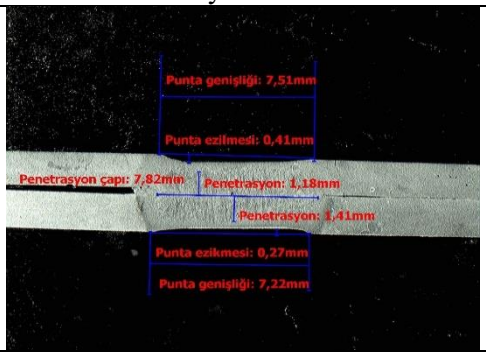
200x		
30 Periyot – 5850 A		
50x		
100x		
200x		
30 Periyot – 6910 A		
50x		

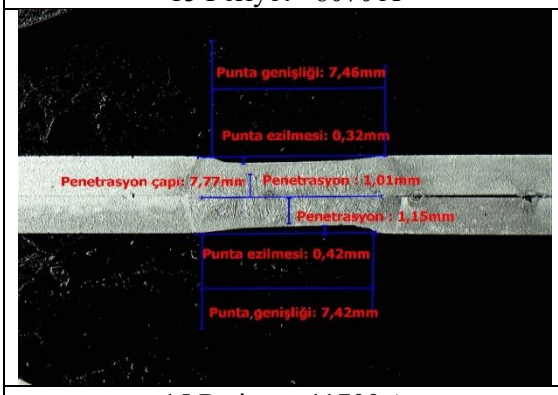
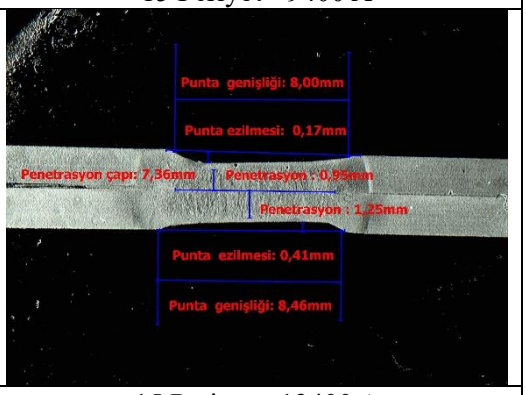
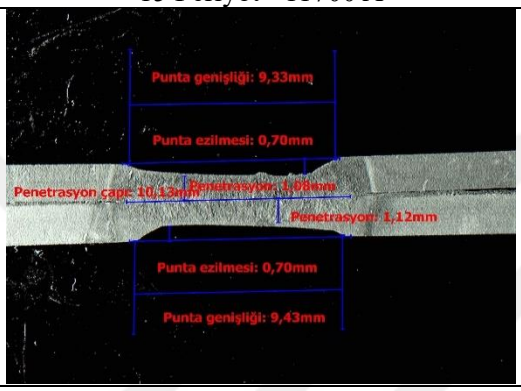
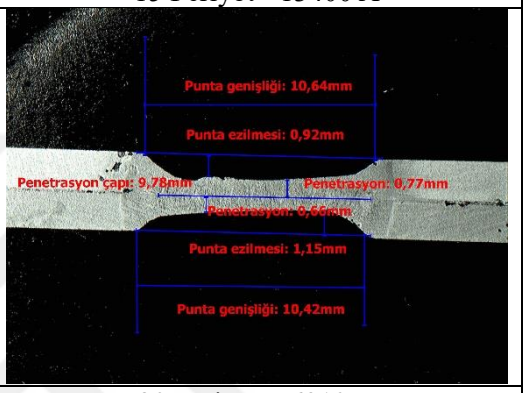
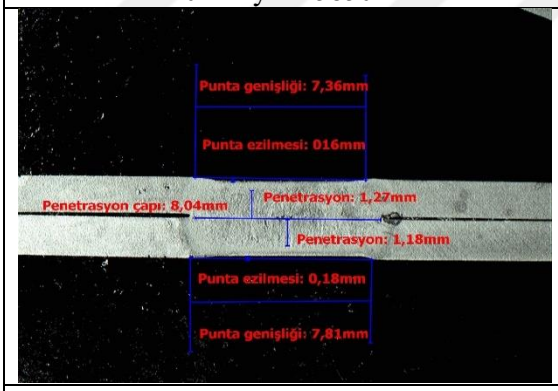
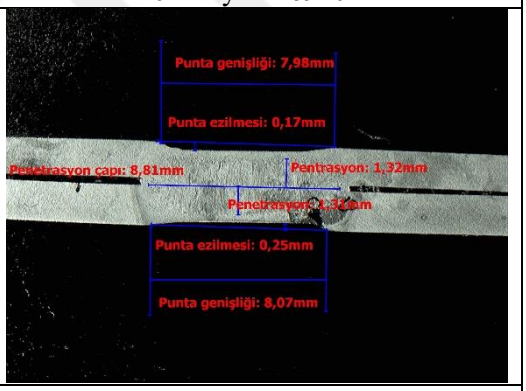
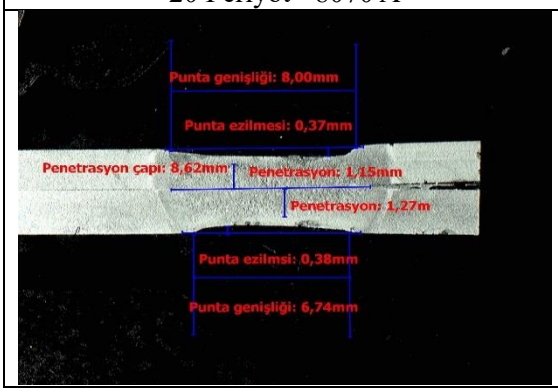
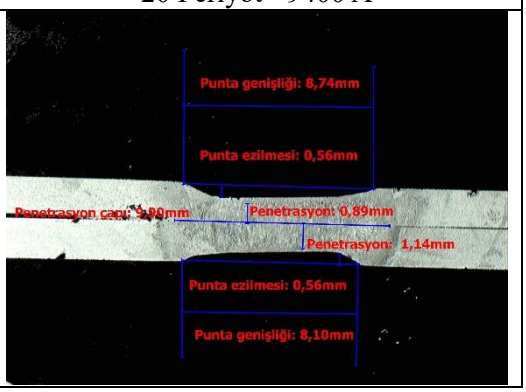
100x		
200x		
30 Periyot – 8070 A		
50x		
100x		
200x		

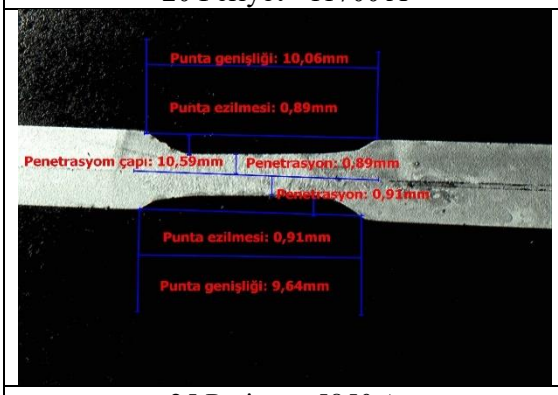
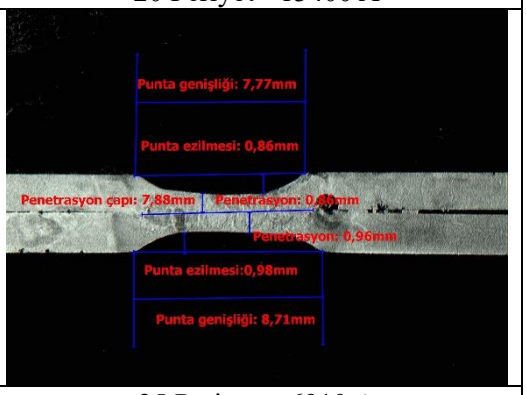
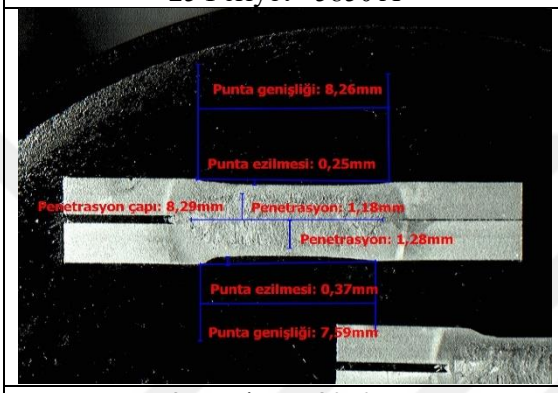
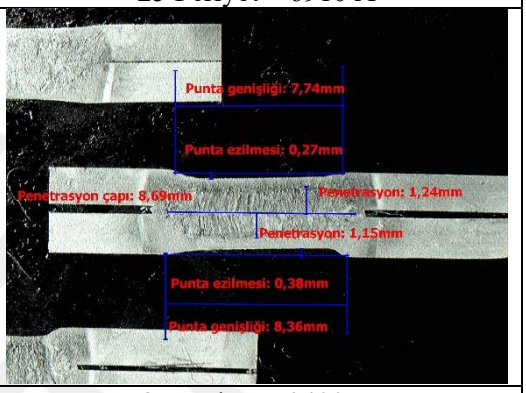
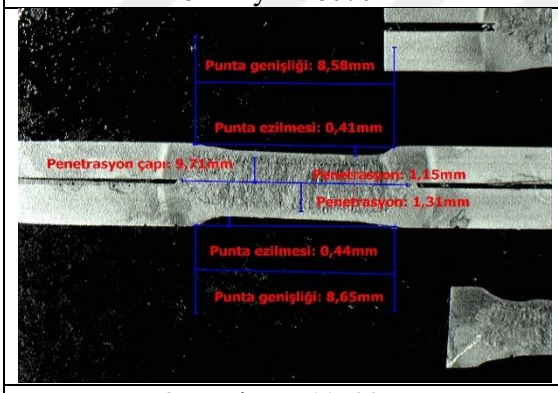
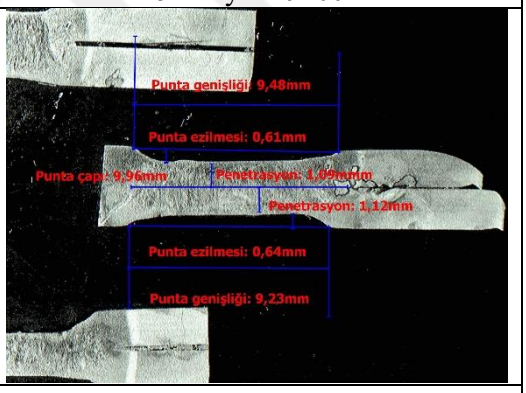
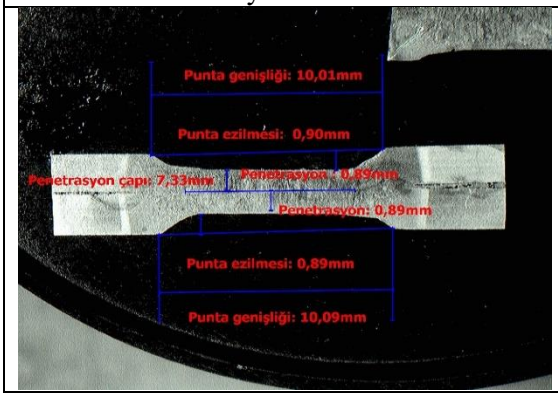
30 Periyot – 9400 A		
50x		
100x		
200x		

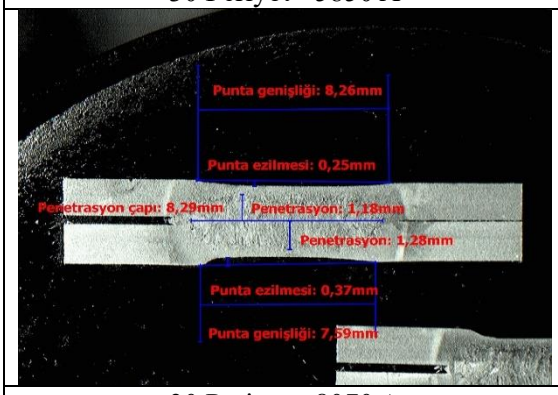
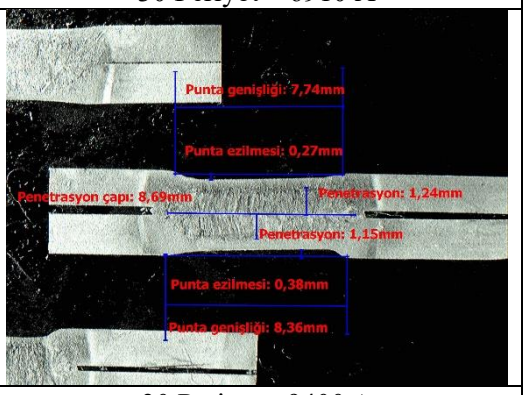
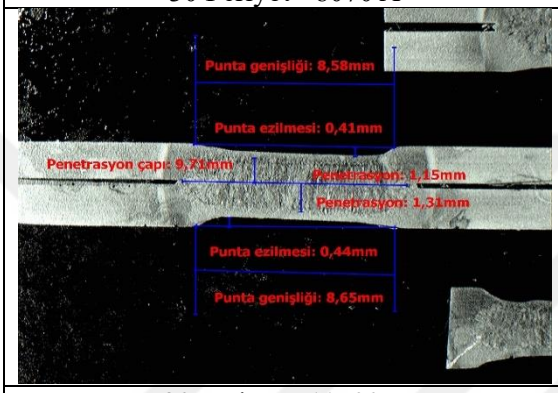
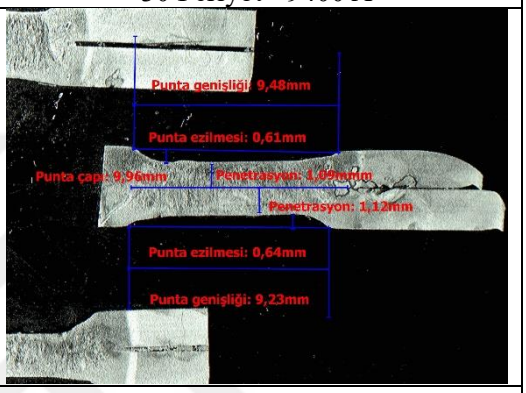
EK B: DP1000HF-CP800 birleştirmelerinin makroyapı görüntüleri

5 Periyot - 8070 A	5 Periyot – 9400 A
	
5 Periyot -11700 A	5 Periyot - 13400 A
	
5 Periyot - 14600 A	5 Periyot –15400 A
	
10 Periyot - 6910 A	10 Periyot - 8070 A
	

10 Periyot - 9400 A	10 Periyot - 11700 A
	
10 Periyot - 13400 A	10 Periyot - 14600 A
	
10 Periyot - 15400 A	
	
15 Periyot - 5850 A	15 Periyot – 6910 A
	

15 Periyot - 8070 A	15 Periyot - 9400 A
	
15 Periyot - 11700 A	15 Periyot - 13400 A
	
20 Periyot - 5850 A	20 Periyot – 6910 A
	
20 Periyot - 8070 A	20 Periyot - 9400 A
	

20 Periyot - 11700 A	20 Periyot - 13400 A
	
25 Periyot - 5850 A	25 Periyot – 6910 A
	
25 Periyot - 8070 A	25 Periyot - 9400 A
	
25 Periyot - 11700 A	
	

30 Periyot - 5850 A	30 Periyot – 6910 A
	
30 Periyot - 8070 A	30 Periyot - 9400 A
	
30 Periyot - 11700 A	
