

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TRIP 800 ÇELİKLERİNİN ELEKTRİK DİRENÇ
NOKTA KAYNAĞINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erman FERİK

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Salim ASLANLAR

Mayıs 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRIP 800 ÇELİKLERİNİN ELEKTRİK DİRENÇ
NOKTA KAYNAĞINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erman FERİK

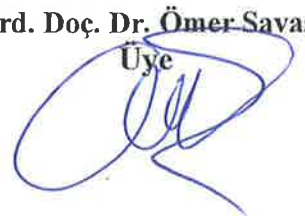
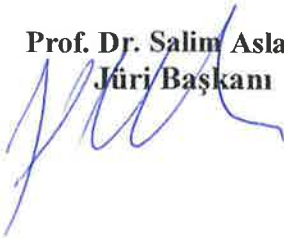
Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 22/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Salim Aslanlar
Jüri Başkanı

Doç. Dr. Uğur Özaraç
Üye

Yrd. Doç. Dr. Ömer Savaş
Üye



BEYAN

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

Erman FERİK

22.05.2017

ÖNSÖZ

800 MPa mukavemete sahip TRIP 800 olarak adlandırılan üç fazlı çelikler otomobil endüstrisinde yeni geliştirilmiş bir çelik türü olup otomobil endüstrisinde hafiflik, yüksek mukavemet, şekillendirilebilirlik, güvenlik, iyi korozyon dayanımı gereksinimlerini karşılamak amacıyla tasarlanmıştır. Otomobil endüstrisinde kullanılan TRIP sacların elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi amaçlanmıştır.

TRIP 800 çelik sacına elektrik direnç nokta kaynağı uygulanması ile ilgili çalışmaların yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında başta tez danışmanım Prof. Dr. Salim ASLANLAR'a, Arş. Gör. Fatih KURTULDU'ya, Çelikform firması ve Taner CANGÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi koruyuculuğumu üstlenen babam Turgut FERİK'e ve annem Halime FERİK'e ithaf ediyorum.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığı'na (Proje No: 2015-50-01-001) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
TRIP ÇELİKLERİ.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. TRIP ve TRIP Takviyeli Çelikler.....	3
2.2.1. TRIP çeliği çeşitleri	3
2.3. Mikroyapı.....	4
2.4. TRIP Çeliklerinin Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	5
2.4.1. TRIP çeliklerinin genel özellikleri.....	5
2.4.2. Kullanım alanları.....	6
2.5. TRIP Takviyeli Çeliklerin Mekanik Özellikleri.....	7
2.5.1. Şekillendirilebilirlik.....	7
2.5.2. Yorulma dayanımı.....	8
2.6. TRIP Çeliklerinde Alaşım Elementleri ve Etkileri.....	9
2.6.1. Karbon.....	10
2.6.2. Mangan.....	10

2.6.3. Silisyum.....	11
2.6.4. Alüminyum.....	12
2.6.5. Niyobyum.....	12
2.7. TRIP Çeliklerinin Isıl İşlemi.....	13
2.8. TRIP Çeliklerinin Galvanizlenmesi.....	15

BÖLÜM 4.

ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI.....	17
3.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağının Esası.....	17
3.2. Direnç Kaynağında Meydana Oluşan Isı.....	19
3.2.1. Kaynak çekirdeğinde oluşan ısı.....	19
3.2.2. Isı kaybı.....	21
3.2.3. Kaynak noktasında oluşan elektriksel direnç.....	22
3.3. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Değişkenleri.....	23
3.3.1. Kaynak akım şiddeti.....	24
3.3.2. Kaynak zamanı.....	24
3.3.3. Elektrot malzemesi	24
3.4. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Bağlantı Kalitesi.....	25
3.4.1. Kaynağın fiziksel / geometrik özellikleri.....	25
3.4.1.1. Çekirdek çapı ve yüksekliği.....	25
3.4.1.2. Çekirdek boyut oranı.....	26
3.4.1.3. Dalma derinliği.....	27
3.4.1.4. Yüzey görünümü.....	27
3.4.1.5. İç süreksizlikler.....	27
3.4.1.6. Fıskırma.....	27
3.4.2. Kaynak performansı / dayanımı.....	28
3.5. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Eğrisi (Weld Lobe)...	28

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
4.1. Genel.....	29
4.2. Kullanılan Malzemeler ve Spektrometrik Analiz.....	29

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Boyutları.....	30
4.4. Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makinesi...	30
4.5. Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Elektrotları	32
4.6. Ön Deneylerin Yapılması.....	32
4.7. Deneylerin Yapılması	33
4.8. Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Deneyleri.....	34
4.9. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskopi ile Yapılan Çalışmalar.....	36
4.10. Çekirdek Boyutlarının Ölçümü	37
4.11. Sertlik Değerlerinin Ölçümü	37

BÖLÜM 5.

DENEYSEL SONUÇLAR.....	39
5.1. Genel.....	39
5.2. TRIP 800 Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Dayanımına Etkisi.....	39
5.2.1. Kaynak akım şiddetinin TRIP bağlantıların çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	40
5.2.2. Kaynak zamanının TRIP bağlantıların çekme makaslama dayanımına etkisi.....	41
5.2.3. Kaynak akım şiddetinin TRIP bağlantıların çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	42
5.2.4. Kaynak zamanının TRIP bağlantıların çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	43
5.3. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Çekirdek Boyutlarına Etkisi.....	45
5.3.1. Kaynak akım şiddetinin ve zamanının TRIP bağlantıların çekirdek çapına etkisi.....	45
5.3.2. Kaynak akım şiddetinin ve zamanının TRIP bağlantıların çekirdek yüksekliğine etkisi.....	46

5.3.3. Kaynak akım şiddetinin ve zamanının TRIP bağlantılarının çekirdek boyut oranına etkisi.....	48
5.4. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Dalma Derinliğine Etkisi.....	49
5.4.1. Kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının TRIP bağlantılarının dalma derinliğine etkisi.....	49
5.5. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Çekirdek Boyutlarının Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Dayanımına Etkisi.....	51
5.5.1. TRIP bağlantılarının çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	51
5.5.2. TRIP bağlantılarının çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	53
5.5.3. TRIP bağlantılarının çekirdek boyut oranının çekme-Makaslama dayanımına etkisi.....	54
5.5.4. TRIP bağlantılarının çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	56
5.5.5. TRIP bağlantılarının çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	57
5.5.6. TRIP bağlantılarının çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	59
5.6. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Dalma Derinliklerinin Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Dayanımına Etkisi.....	60
5.6.1. TRIP bağlantılarının dalma derinliklerinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	60
5.6.2. TRIP bağlantılarının dalma derinliklerinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	62
5.7. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Dalma Genişliklerinin Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Dayanımına Etkisi.....	63

5.7.1. TRIP bağlantıların dalma derinliklerinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	63
5.7.2. TRIP bağlantıların dalma derinliklerinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	64
5.8. TRIP Bağlantıların Kaynak Zamanı ve Kaynak Akım Şiddetinin Dalma Genişliğine Olan Etkisi.....	66
5.9. Kaynak Değişkenlerinin Bağlantıların Sertlik Değerlerine Etkisi....	67
5.9.1. TRIP çelik sac çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak değişkenlerinin sertlik değerlerine etkisi.....	67
5.10. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Bağlantıların Mikro Yapısına Etkisi.....	70
5.11. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında TRIP Çelik Sac Çiftlerine Ait Makro Yapı Fotoğrafları.....	76
5.12. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında TRIP Çelik Sac Çiftlerine Ait SEM Görüntüleri.....	79
5.13. Bağlantıların Kaynak Eğrisi (Weld Lobe).....	80
5.13.1. Elektrik direnç nokta kaynağında TRIP sac çiftlerine ait kaynak Eğrisi (Weld Lobe).....	80
 BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
6.1. Sonuçlar.....	82
6.2. Konuyla İlgili İleride Yapılabilecek Çalışmalar.....	84
 KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	: Ferrit
γ	: Östenit
°	: Derece
A	: Amper
BH	: Bake Hardening
C	: Karbon
CM	: Carbon-Mangan
cm	: Santimetre
CP	: Complex Phase
dk	: Dakika
DP	: Dual Phase
FB	: Ferritic-Bainitic
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HMT	: Hacim Merkezli Tetragonal
HSS	: High Strength Steel
IF	: Interstitial-Free
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
L	: Litre
LSS	: Low Strength Steel
M/Mart/MS	: Martensitic steel
MAG	: Metal Aktif Gaz
Mf	: Martenzit Bitiş Sıcaklığı
MIG	: Metal İnert Gaz
Ms	: Martenzit başlangıç sıcaklığı

TRIP	: Transformation induced plasticity
TWIP	: Twinning-induced plasticity steel
UHSS	: Ultra High Strength Steel
YMK	: Yüzey merkezli kübik



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	TRIP çeliğindeki mikroyapılar, TRIP çeliğindeki kalıntı östenitin EBSD haritası, TRIP etkisinin mekanizması.....	5
Şekil 2.2.	B-ayağı takviyesi, tampon traversi	6
Şekil 2.3.	TRIP 690 ve TRIP 780 için şekillendirme sınır eğrileri.....	7
Şekil 2.4.	TRIP çelikleri için Wöhler/S-N eğrileri.....	8
Şekil 2.5.	TRIP çelikleri için düşük çevrimli yorulma veya E-N eğrileri.....	8
Şekil 2.6.	Alaşım elementleri etkisinin TTT' deki davranışı.....	9
Şekil 2.7.	TRIP çeliği ısıtıl işlemleri ve TRIP çeliğinin soğuk haddeme sıcaklık- zaman grafiği.....	14
Şekil 2.8.	TRIP çeliğinin sıcak haddeme sıcaklık- zaman grafiği.....	14
Şekil 2.9.	Soğuk haddelenmiş TRIP çeliklerin işlemden geçirilmesi sırasında metalurjik özellikleri.....	14
Şekil 2.10.	Soğuk haddelenmiş TRIP çeliklerin işlemden geçirilmesi adımları.....	15
Şekil 3.1.	Elektrik direnç nokta kaynağı çevrimi.....	18
Şekil 3.2.	Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak çevrimi.....	18
Şekil 3.3.	Elektrik direnç nokta kaynağı elektriksel direnç dağılımı ve sıcaklık dağılımı.....	22
Şekil 3.4.	Elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek geometrisinin şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.5.	Bir kaynak eğrisi diyagramı.....	28
Şekil 4.1.	Çekme-makaslama deney numuneleri.....	30
Şekil 4.2.	Çekme-sıyırma deney numuneleri.....	30
Şekil 4.3.	Deneylerde kullanılan elektrik direnç nokta kaynağı makinesi....	31
Şekil 4.4.	Deneylerde kullanılan akım şiddeti ölçüm cihazı	31
Şekil 4.5.	Deneylerde kullanılan elektrotların boyutları.....	32

Şekil 4.6.	Bazı ön deney numuneleri.....	33
Şekil 4.7.	Deney parametreleri.....	33
Şekil 4.8.	Deneylerde kullanılan çekme cihazı.....	36
Şekil 4.9.	Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop.....	36
Şekil 4.10.	Mikroyapı incelemelerinde kullanılan taramalı elektron mikroskopu (SEM).....	37
Şekil 4.11.	Makroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop.....	37
Şekil 4.12.	Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrovickers sertlik ölçme cihazı.....	38
Şekil 5.1.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	40
Şekil 5.2.	TRIP bağlantılarda (5,7 kA-10 kA arası) kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	41
Şekil 5.3.	TRIP bağlantılarda (10,6 kA-17,5 kA arası) kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	42
Şekil 5.4.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	43
Şekil 5.5.	TRIP bağlantılarda (5,7 kA – 10 kA)kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	44
Şekil 5.6.	TRIP bağlantılarda (10,6 kA – 17,5 kA) kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	44
Şekil 5.7.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek çapına etkisi	45
Şekil 5.8.	TRIP bağlantılarda kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi.....	46
Şekil 5.9.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek yüksekliğine etkisi.....	47
Şekil 5.10.	TRIP bağlantılarda kaynak zamanının çekirdek yüksekliğine etkisi.....	47
Şekil 5.11.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi.....	48
Şekil 5.12.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi	48

Şekil 5.13.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin üst elektrot dalma derinliğine etkisi.....	49
Şekil 5.14.	TRIP bağlantılarda kaynak zamanının üst elektrot dalma derinliğine etkisi.....	50
Şekil 5.15.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin alt elektrot dalma derinliğine etkisi.....	50
Şekil 5.16.	TRIP bağlantılarda kaynak zamanının alt elektrot dalma derinliğine etkisi.....	51
Şekil 5.17.	TRIP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	52
Şekil 5.18.	TRIP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	52
Şekil 5.19.	TRIP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	53
Şekil 5.20.	TRIP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	54
Şekil 5.21.	TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	55
Şekil 5.22.	TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	55
Şekil 5.23.	TRIP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	56
Şekil 5.24.	TRIP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	56
Şekil 5.25.	TRIP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	57
Şekil 5.26.	TRIP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	58
Şekil 5.27.	TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	59
Şekil 5.28.	TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	59

Şekil 5.29.	TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	61
Şekil 5.30.	TRIP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	61
Şekil 5.31.	TRIP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	62
Şekil 5.32.	TRIP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	63
Şekil 5.33.	TRIP bağlantılarda dalma genişliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	63
Şekil 5.34.	TRIP bağlantılarda dalma genişliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	64
Şekil 5.35.	TRIP bağlantılarda dalma genişliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	65
Şekil 5.36.	TRIP bağlantılarda dalma genişliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi.....	65
Şekil 5.37.	TRIP bağlantılarda kaynak zamanının dalma genişliğinin kaynak zamanına etkisi.....	66
Şekil 5.38.	TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin dalma genişliğine etkisi.....	66
Şekil 5.39.	Sertlik ölçüm doğrultuları.....	67
Şekil 5.40.	TRIP bağlantıların 5 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.....	68
Şekil 5.41.	TRIP bağlantıların 10 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.....	68
Şekil 5.42.	TRIP bağlantıların 15 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.....	68
Şekil 5.43.	TRIP bağlantıların 20 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.....	69
Şekil 5.44.	TRIP bağlantıların 25 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.....	69

Şekil 5.45.	TRIP bağlantıların 30 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi.....	69
Şekil 5.46.	TRIP bağlantılarda ana malzemeye ait mikro yapı.....	76
Şekil 5.47.	TRIP bağlantılarda esas metale ait SEM görüntüsü.....	79
Şekil 5.48.	TRIP bağlantılarda ITAB'ye ait SEM görüntüsü.....	79
Şekil 5.49.	TRIP bağlantılarda kaynak çekirdeğine ait SEM görüntüsü.....	79
Şekil 5.50.	TRIP bağlantılara ait kaynak eğrisi (weld lobe).....	80
Şekil 5.51.	TRIP bağlantılara ait kaynak eğrisi (weld lobe).....	81



TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	TRIP 800 elik sacının kimyasal kompozisyonu.....	29
Tablo 4.2.	TRIP 800 elięinin mekanik zellikleri.....	30
Tablo 4.3.	Deneylerde kullanılan elektrotların kimyasal bileşimleri ve mekanik zellikleri.....	32
Tablo 5.1.	5 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları.....	70
Tablo 5.2.	10 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları.....	71
Tablo 5.3.	15 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları.....	72
Tablo 5.4.	20 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları.....	73
Tablo 5.5.	25 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları.....	74
Tablo 5.6.	30 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları.....	75
Tablo 5.7.	5 periyot, 10 periyot ve 15 periyot zamanındaki makroyapı fotoğrafları.....	77
Tablo 5.8.	20 periyot, 25 periyot ve 30 periyot zamanındaki makroyapı fotoğrafları.....	78

ÖZET

Anahtar kelimeler: TRIP 800 Çeliği, Elektrik Direnç Nokta Kaynağı

Otomotiv endüstrisinde düşük fiyat, iyi korozyon özellikleri ve mekanik özellikleri birleştiren TRIP 800 çelik sacları, özellikle otomotiv endüstrisinde plastik gerinim altında yüzde uzamasının yüksek olması (yaklaşık %30) nedeniyle kullanılmaktadır.

Elektrik direnç nokta kaynağının otomotiv endüstrisinde belki de en yaygın uygulanması otomobil üretim endüstrisidir ve neredeyse evrensel olarak levha metallerden araç oluşturmak için kaynak yapılması için kullanılır.

Bu çalışmada 1,5 mm kalınlığa sahip TRIP 800 çelik saclar elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Numuneler farklı kaynak zamanları ve farklı akım şiddeti değerleri kullanılarak kaynak edilmiş ve sonuçlar incelenmiştir.

Elektrik direnç nokta kaynağı uygulanmış numunelerin mukavemet özellikleri, mikrosertlik dağılımları incelenmiştir. Makro ve mikroyapı tetkiklerinde optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Bu çalışmada akım şiddeti ve kaynak zamanının kaynak edilmiş bağlantı bölgesi ve TRIP 800 çeliği arasındaki geçiş bölgesinin mikroyapısı ve mikrosertliği üzerindeki dağılımları araştırılmıştır.

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF TRIP800 STEELS IN ELECTRIC RESISTANCE SPOT WELDING

SUMMARY

Keywords: TRIP 800 Steel, Electric Resistance Spot Welding

Combining low price, good corrosion properties and mechanical properties in the automotive industry, TRIP 800 steel sheets are mainly used in the automotive industry due to the high percent elongation (about 30%) under plastic strain.

Perhaps the most common application of electric resistance spot welding is in the automobile manufacturing industry, where it is used almost universally to weld the sheet metal to form a car.

In this study, TRIP 800 steel sheets with a thickness of 1.5 mm were assembled using the electrical resistance spot welding method. Samples were welded using different welding times and different current intensity values and the results were examined.

Strength properties and microhardness distributions of electrical resistance spot welded specimens were investigated. Optical microscope and scanning electron microscope (SEM) were used for macro and microstructure examinations. In this study, the microstructure and distributions of microstructure and current density of the transition zone between welded joint region and TRIP 800 steel were investigated.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde enerjiye olan taleplerin artması ve enerji kaynaklarının azlığı, üreticileri daha ekonomik, yakıt tüketimi daha az olan taşıt üretmeye yöneltmiştir. Taşıtlarda yakıt tasarrufu, motor verimi artırılarak ve/veya taşıt ağırlığını azaltarak mümkün olabilir [1]. Yüksek mukavemetli çelik malzemeler dayanımlarının yüksek olması nedeniyle özellikle otomotiv endüstrisinde taşıt ağırlığının azaltılmasını sağlamaktadır [2, 3]. Bu çelik türlerinden biri olan TRIP çelikleri yüksek mukavemet ve yüksek uzama özelliği gösteren çelik türlerindendir [4].

TRIP çelikleri sahip oldukları yüksek dayanım ve yüksek uzama özellikleriyle son 10-15 yıldır araştırmalara konu olmaktadır [5]. Deneysel çalışmalarda kullanılan 800 MPa çekme mukavemetine sahip TRIP 800 olarak adlandırılan bu üç fazlı çelik türü, otomobil endüstrisinde yeni geliştirilmiş bir çelik olup özellikle otomobil karoserinde hafiflik, yüksek mukavemet, güvenlik ve iyi korozyon dayanımı karakteristiği gereksinimlerini karşılamak amacıyla tasarlanmış ve günümüz otomobillerinde takviye sacı olarak kullanılmaktadır.

Otomobil üretiminde kullanılan kaynak türleri ve yapılan kaynak adetleri şunlardır. yaklaşık 3000 ila 5000 adet arası elektrik direnç nokta kaynağı mevcuttur, 30 metre civarı elektrik ark kaynağı uygulaması vardır, 1 metre kadar elektron ışın kaynağı uygulaması ve 15 tane de sürtünme kaynağı kullanılmaktadır. Otomobil karoseri üretiminde kullanılan sacların birleştirilmesinde, otomasyona uyumu nedeniyle en çok elektrik direnç nokta kaynak yöntemi kullanılır [6,7].

Günümüz otomobillerinde son 10-15 yıldır korozyona yüksek dirençleri sebebiyle galvanizli çelik saclar galvanizle kaplanmamış çelik sacların yerine kullanılmaya başlanmıştır. Deneylerde kullanılan TRIP 800 çinkoyla kaplanmış yüksek

mukavemetli bir çeliktir. Kaplama uygulanmış yüksek mukavemetli çelikler için kaynak metali bölgesinde metal kayıpları, boşluk, gözenek ve porozite gibi süreksizliklerden dolayı kaynak mukavemetinde düşüşler gözlenir. Ayrıca kaynak yüzeyi kolayca korozyona uğrayabilir. Elektrik direnç nokta kaynağı uygulanan malzemeden geçen elektrik akımının oluşturduğu ısıнын dışında herhangi bir ısı malzemeye uygulanmamaktadır. Malzemedeki ısı, malzemenin kaynak edilecek kısımlarında oluşur ve malzemede düşük miktarda çarpılma olur.

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan galvanizlenmiş TRIP 800 çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağı ile farklı akım şiddetleri ve farklı kaynak zamanlarında, birleştirilebilirliği ve mekanik özellikleri incelenecektir. Ayrıca farklı parametrelerde uygulanan kaynaklı parçalarının mukavemet özellikleri incelenecektir.

Kaynak çekirdeği yükseklik ve genişlikleri tespit edilerek en uygun parametre belirlenmeye çalışılacaktır. Belirlenen bu parametrelerle TRIP 800 otomotiv sacının diğer birleştirme yöntemlerine göre avantajlarının ispat edilmesi hedeflenmektedir.

BÖLÜM 2. TRIP ÇELİKLERİ

2.1. Giriş

Son yıllarda özellikle otomotiv endüstrisinde yüksek dayanım, şekil verilebilme buna bağlı olarak çeliklerin sünekliğin arttırılması isteği yeni nesil çeliklerin tasarımını ve üretilmesini zorunlu kılmıştır. Ayrıca diğer çelik türlerine göre yüksek dayanımın beraberinde daha düşük parça kalınlığıyla istenmesi de beraberinde yolcu güvenliği ve yakıt tasarrufunu getireceğinden de önemlidir. Dönüşüm katkılı plastiklik çelikleri (TRIP) otomotiv endüstrisi için (AHSS) Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli çeliklerin üçüncü nesil grubuna giren bir çelik türüdür.

2.2. TRIP ve TRIP Takviyeli Çelikler

İlk olarak 1930'lu yıllarda demir - nikel çeliklerinde östenit - martenit faz dönüşümü sırasındaki plastisite artışı araştırılmıştır. Dönüşüm katkılı süneklik ya da TRIP etkisi tek fazlı östenitik çeliklerde 1970'li yıllarda daha detaylı olarak araştırılmıştır. TRIP çelikleri 1980 yılından beri akademi ve endüstri çevrelerinden ilgi görmekte, araştırılmakta ve kullanılmaktadır.

2.2.1. TRIP çeliği çeşitleri

TRIP çeliklerinin yüksek alaşımlı SUS304 östenitik çeliği gibi (H-TRIP) ile ifade edilen türüyle, düşük alaşımlı ferritik-beynitik (L-TRIP) olarak ifade edilen iki tipi vardır. H-TRIP çeliği üretimi yüksek maliyet gerektirdiğinden genelde endüstride L-TRIP çeliği kullanılmaktadır.

H-TRIP çelikleri alaşım elementi olarak oda sıcaklığında yararlı kararlı östenit oluşumuna yol açan önemli miktarda Ni, Cr ve/veya Mn içerir [9]. H-TRIP çelikleri östenittir. Bu östenitik çeliklerdeki çatlak veya çentiklerin yakınındaki küresel zorlanma ama aynı zamanda yerel zorlanma bir martenzitik dönüşüme sebep olabilir. TRIP etkisi dikkate değer ve çatlak yayılmasına karşı bir engel sunmaktadır fakat, H-TRIP malzemesi pahalıdır ve bu nedenle teknolojik önemi kısıtlıdır.

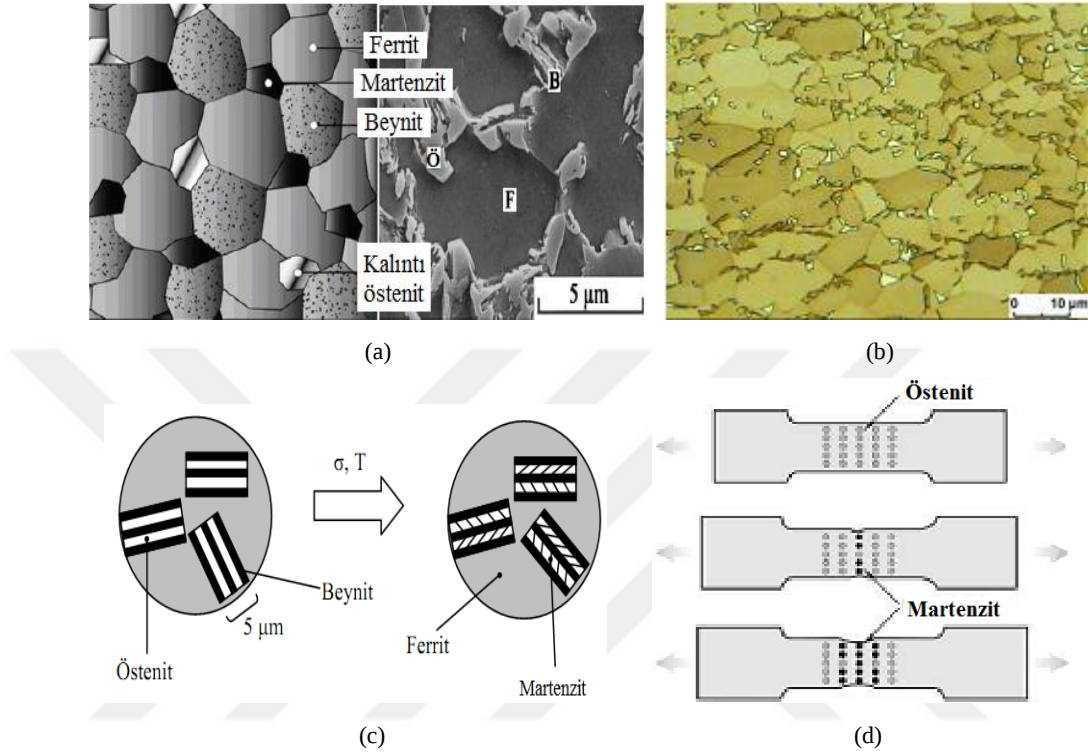
L-TRIP çeliklerinin mikroyapısı, %10-15 kalıntı östenit ile ferritik-martenzitik matristen oluşur. Ve bu çeliklerdeki kalıntı östenitler tane ana faz yapısının formunda inklüzyonlar halinde veya tane sınırlarında katmanlar haline bulunarak H-TRIP çeliklerine göre önemli ölçüde farklılık gösterir. L-TRIP çeliklerinin işleme teknolojileri önemli ölçüde artmaktadır ve kullanımı artmaktadır [10].

2.3. Mikroyapı

TRIP çeliği mikroyapı olarak, yumuşak ferrit matris içinde, beynit ve karbonca zengin kalıntı östenit mikro yapısı çelikte belli oranlarda üstün mekanik özelliklerinin oluşumuna katkı sağlamaktadır [11]. TRIP çeliklerindeki mikroyapı oranları ise, hacimce yaklaşık %50-60 ferrit (α), %25-40 beynit $\alpha_{(B)}$ ve %15 kalıntı östenitten (γ) oluşmaktadır [12]. İçeriğindeki ferrit, çeliğe yüksek süneklik veren sünek matris fazıdır. Beynit/martenzit fazı çeliğe yüksek dayanım verir, kalıntı östenit ise TRIP etkisinin kaynağı ve TRIP çeliklerinin en önemli faz bileşenidir. Mikroyapıda bulunan düşük miktardaki kalıntı östenit TRIP çeliklerinin mekanik özelliklerini kontrol altında tutar. Plastik şekil değiştirme altında gerekli aktivasyon enerjisi sağlandığı zaman, yarı stabil kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi sonucunda TRIP çelikleri, yüksek mukavemet ve süneklik kombinasyonuna sahiptir. Östenitin martenzite dönüşmesi aynı zamanda kalıcı sertleştirmenin artmasına ve mikroskobik daralma başlamasında gecikmeye yol açar [13].

TRIP çeliklerindeki deformasyon mekanizmaları, istifleme hata enerjisi ve östenit stabilitesini etkilediği için, kimyasal kompozisyon ve deformasyon sıcaklığı faktörleri tarafından kontrol edilir. İstifleme hata enerjisi ve östenit stabilitesi artan

sıcaklıkla beraber artar [14]. Östenitin kararlılığını etkileyen önemli faktörlerden bazıları şunlardır: kimyasal kompozisyon, karbon zenginleştirme ve östenitin tane boyutu, etrafını saran matrisin stres durumu ve sıcaklık [15].



Şekil 2.1. (a) TRIP çeliğindeki mikroyapılar, (b) TRIP çeliğindeki kalıntı östenitin EBSD (Elektron Geri Yansıma Difraksiyonu) haritası, (c) ve (d) TRIP etkisinin mekanizması [5, 16]

2.4. TRIP Çeliklerinin Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları

2.4.1. TRIP çeliklerinin genel özellikleri

TRIP işlemi, malzemeye uygulanan şekil değiştirme sonucu, kalıntı östenitin martenzite dönüşümü sırasında şekil değiştirme sertleşme katsayısının artmasıyla, homojen şekil değiştirme bölgesinin genişletilmesidir. Çeliklerde östenit süneklikle birlikte mukavemet artışı da sağlar. TRIP çelik sac malzemeleri yüksek süneklik ve yüksek dayanım gösterdiği için özellikle otomobil endüstrisinin isteklerini karşılamakta ve otomobil endüstrisinde kullanılmaktadır.

TRIP çelikleri, yüksek pekleşme kapasitesine sahiptir. İyi gerilim dağıtımı ve iyi çekilebilirlik özelliği gösterirler. Gerilim sertleşmesinin bir sonucu olarak mamul parçanın, mekanik özellikleri, ve özellikle akma dayanımı ilk haline kıyasla daha üstündür. Yüksek pekleşme kapasitesi ve yüksek mekanik dayanım bu çeliklere mükemmel enerji emme kapasitesi vermektedir. TRIP çeliklerinin ayrıca çarpma performansını daha da arttıran deformasyonu takip eden fırında sertleşme (BH) özelliği güçlüdür.

TRIP çeliklerinin otomotiv endüstrisinde kullanılan türlerinin çekme dayanımları 700-900 MPa, kopmadaki uzamaları ise %15-35 aralığındadır. Bu çeliklerin dayanımlarını ve şekillendirilebilirliğini geliştirmek için özellikle kimyasal bileşimi değiştirme ve ısıtılarda farklı sıcaklık kullanımı gibi son yıllarda birçok araştırma yapılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda dayanımı ve şekillendirilebilirliği arttırmada ferrit dayanımını arttırmak için kimyasal bileşimdeki mangan oranını arttırmak veya NbC gibi çökeltiler ilave etme denenmiştir, fakat bu maliyeti arttırır, ayrıca bu düşük alaşım elementi içeren TRIP çeliklerindeki %4 olan alaşım elementi miktarını aşılır [17].

2.4.2. Kullanım alanları

TRIP çelikleri, yüksek enerji emme kapasitesi ve yorulma dayanımının sonucu olarak özellikle boyuna kirişler, B-sütunu takviyeler, eşikleri ve tampon takviye gibi otomotiv yapısal ve güvenli parçalarının üretimi için uygundur.



Şekil 2.2. (a) B-ayağı takviyesi (elektro galvanizli TRIP780 1,2 mm), (b) tampon traversi (elektro galvanizli TRIP780 1,6 mm).

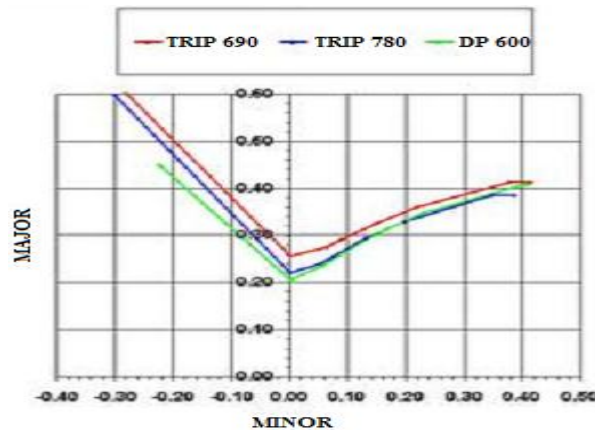
2.5. TRIP Takviyeli Çeliklerin Mekanik Özellikleri

TRIP çelikleri aynı dayanım değerlerine sahip çelikler ile karşılaştırıldığında yüksek süneklilik kabiliyeti ve şekillendirme kabiliyetinden dolayı bu çeliklere üstünlük sağlamaktadır. TRIP çeliğinin içyapısındaki beynitik dönüşüm anında dönüşüme uğramadan kalan kalıntı östenit malzemeye TRIP etkisi oluşturarak şekillendirme kabiliyetine katkı sağlamaktadır. TRIP çelikleri içerisinde bulunan kalıntı östenit artması şekillendirme kabiliyetinde o kadar büyük olmasına neden olur.

TRIP çeliğinin artan uzama oranları ile akma ve çekme dayanımı artar, fakat üniform uzama ve kopma uzaması azalır [18].

2.5.1. Şekillendirilebilirlik

Metalik malzemelerin mukavemeti arttıkça şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinin azaldığı bilinmektedir. Metalik sacların biçimlendirilmesi esnasında meydana gelebilecek çatlamları kontrol etmek amacıyla çizilen biçimlendirme sınır diyagramları yardımıyla çeşitli malzemelerin biçimlenebilme kabiliyetleri yaklaşık olarak karşılaştırılabilir. Şekil 2.3.'de TRIP690, TRIP780 ve DP600 çelikleri için şekillendirme sınır eğrileri görülmektedir. TRIP çeliklerinin şekillendirilebilirlikleri çift fazlı DP600 çeliğine göre daha üstündür.

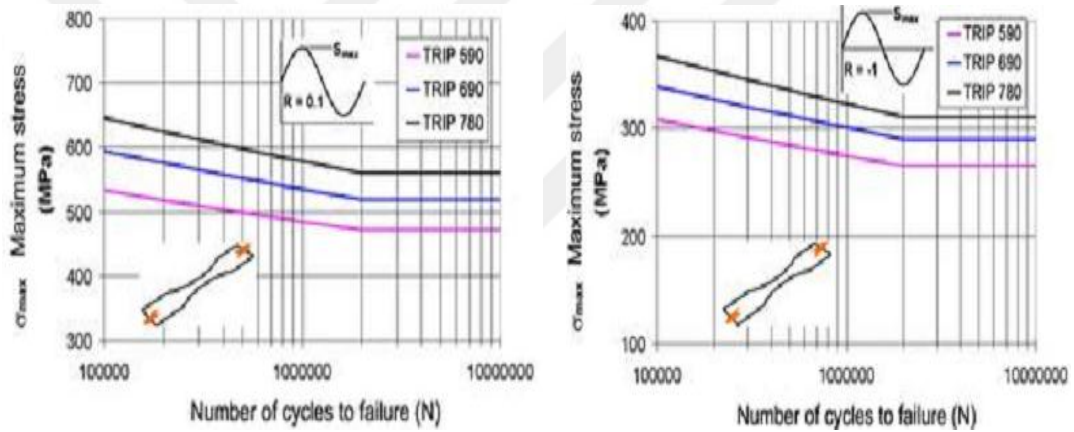


Şekil 2.3. TRIP 690 ve TRIP 780 için şekillendirme sınır eğrileri

TRIP çeliklerinin sıcak deformasyonu germe şekillendirme uygulamaları için çok elverişlidir. Yüksek dayanımlı TRIP destekli çeliklerin sıcak germe-biçimlendirilebilirliği bir çok literatürde belirtilmiştir [19].

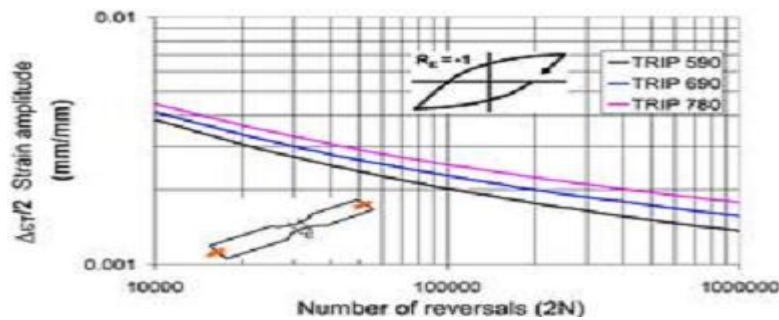
2.5.2. Yorulma dayanımı

Yüksek mekanik dayanımları nedeniyle, TRIP sınıfı çeliklerin geleneksel çeliklere göre daha iyi yorulma dayanımları vardır. Şekil 3.4.'te çeşitli TRIP sınıfları için Wöhler grafikleri gösterilmektedir. Kopmaya kadar olan maksimum stres eğrileri-döngü sayısı da görülmektedir. İki yükleme oranına göre hesapla yapılmıştır: gerilme basınc $R = -1$ ve gerilme-gerilme $R = 0.1$.



Şekil 2.4. TRIP çelikleri için Wöhler/S-N eğrileri

Şekil 2.5.'te TRIP çelikleri için düşük çevrimli yorulma veya E-N eğrileri gösterilmiştir. Gerilme genliği eğri çizgileri-tersine dönüş sayısı grafikte görülmektedir (bir döngü iki tersine dönüşe karşılık gelmektedir).

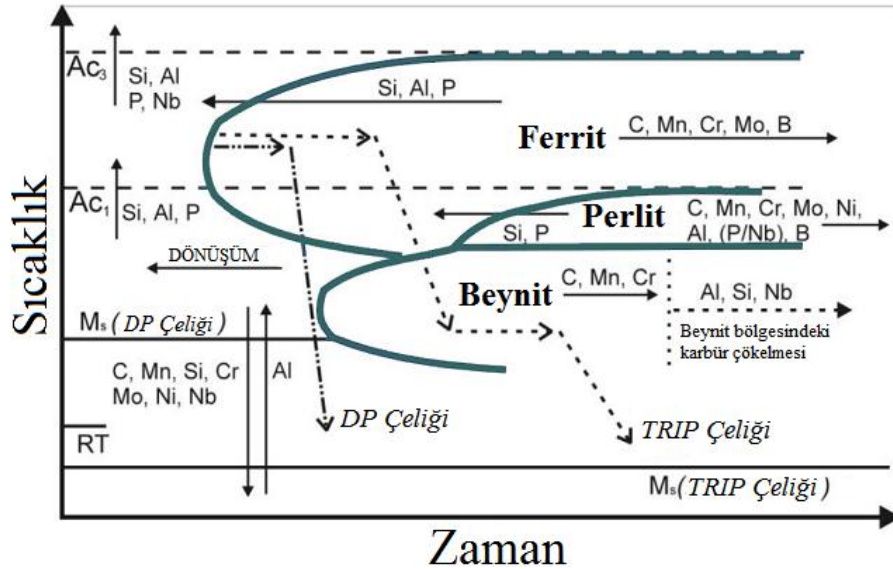


Şekil 2.5. TRIP çelikleri için düşük çevrimli yorulma veya E-N eğrileri [26]

2.6. TRIP Çeliklerinde Alaşım Elementleri ve Etkileri

TRIP çelikleri düşük alaşım elementi miktarıyla karakterize edilirler. Mevcut 800 MPa TRIP çeliklerindeki toplam alaşım elementi oranı %3,5'tur. TRIP çelikleri genelde çok fazlı yapı elde etmek için çift fazlı çelik sınıflarından daha yüksek miktarda karbon ve silisyum ve/veya alüminyum içerirler [21]. TRIP çelikleri normal karbon-mangan çeliklerine göre bileşimce daha fazla silisyum içerirler, bu nedenle sıcak deformasyon sırasındaki dinamik ve statik yeniden kristalleşme davranışı etkilenir [22].

Geleneksel TRIP çeliklerinin bileşimi Matsumura tarafından 0,12-0,55 % C, 0,20-2,5% Mn ve 0,40-1,8 % Si oransal olarak önerilmiştir [23]. Yapılan çalışmalarda, yüksek süneklik ve mukavemet elde etmek için son yirmi yılda %0,2-0,4C, %1,0-2,5 Mn, ve %1,2-2,0 Si içeren TRIP çelikleri yaygın olarak çalışılmıştır [24]. Ancak geleneksel TRIP çeliklerinin kimyasal bileşimi C: %0,1-0,4, Mn: %1,5 ve Si: %1,5'dir olarak belirtilmiştir [25]. Yani TRIP çelikleri için düşük alaşımlı C-Mn-Si çelikleridir de denebilir.



Şekil 2.6. Alaşım elementleri etkisinin TTT diyagramındaki davranışı [26]

2.6.1. Karbon

TRIP çeliğinin bileşimindeki karbon içeriği, ana mikroyapısal bileşenlerin arasındaki dağılımının malzeme özelliklerine temel bir etkisi olduğundan dolayı önemli bir rol oynar. Bu çeliklerin geliştirilme sürecinde optimum şekillendirme oranlarında en az 1 GPa mukavemet ve %18 uzama değerlerine ulaşılması üzerine odaklanılmıştır. Bu özelliklere ulaşmanın bir yolu da karbon miktarının artırılmasıdır. Karbon östenitin kararlılığını artırır ve böylece östenit ortam sıcaklığının altında (yaklaşık 15°C-25°C) kalıntı olarak bulunabilir. Karbon oranı, mevcut TRIP çeliklerinde kaynak kabiliyeti için %0,20-0,25 veya daha az oranda tutulur. TRIP çeliklerindeki karbon miktarının artması malzemenin kaynaklanabilirliğini düşürür. Bu yüzden, uygun kaynaklanabilirlik için karbon içeriğinin %0,25 ile sınırlandırılmalıdır. TRIP çeliklerinde kaynaklanabilirliğinde bozunma olmadan mekanik özelliklerin artırılması için bir diğer yaklaşım Ti, Nb, V gibi mikro alaşım elementlerinin eklenmesidir.

Karbon dışındaki alaşımlandırma elementlerinin TRIP çeliklerine ilave edilme sebepleri incelendiğinde:

1. Mikroyapıdaki kalıntı östenit miktarının uygun hale getirilmesi
2. Sementit çökmesinin kontrol altına alınması
3. Ferrit fazı dayanımının yükseltilmesi için
4. Sertleşebilirliğin yükseltilmesi için

2.6.2. Mangan

TRIP çeliklerinde, mangan içeriği sertleşebilirlik için gereklidir. Mangan, bir östenit stabilizatörü olduğu için, sementitin çökmeye başlama sıcaklığı düşürür. Mangan ayrıca bileşimdeki ferrit ve östenitin içerisindeki karbon aktivite katsayısını azaltır ve ferrit içindeki karbon çözünürlüğünü artırır. Mangan, sementit içinde çözünür. Yapıdaki yüksek mangan içeriği, (%2,5 civarı) mikroyapıda şeritlenme ve aşırı

stabilize kalıntı östenite yol açtığı için elverişli değildir. TRIP çeliklerinde mangan oranı sertleşebilirlik için yaklaşık %1,5 civarındadır.

2.6.3. Silisyum

TRIP çeliklerindeki silisyum içeriği, önemli ölçüde ferrit ve östenitteki karbon aktivite katsayısını artırır ve ferritteki karbon çözünürlüğünü azaltır. Silisyum sementitin belirli bir yaşlanma zamanında ferrit içinde çökelmeye başlama sıcaklığını da artırır. Silisyum östemperleme aşamasında sementit oluşumunu engeller. Bu genellikle silisyum sementit içinde son derece düşük bir çözünürlüğe sahip olması ile açıklanabilir. Silisyumun bu etkisi, sementitin çekirdeklenmesi üzerinde ve ferrit, östenit ve sementitin karbon aktivite katsayısında etkisi olduğu için sınırlandırılmalıdır. Bir sementit çekirdeğinin etrafındaki silisyum birikimi lokal olarak karbon aktivitesini artırabilir ve çekirdeğe karbon difüzyonunu engelleyebilir. Endüstriyel bir açıdan bakıldığında, silisyumun beynitik dönüşümün kinetiğini büyük ölçüde azalttığını anlamak önemlidir; diğer ifadeyle soğuk haddelenmiş C-Mn-Si tipi TRIP çeliklerinin üretimi sadece uzun östemperleme bölümü olan uzun “aşırı yaşlanma” hatlarında gerçekleştirilebilir.

TRIP çeliklerinde silisyum oranı düşük ve hatta silisyum içermeyen kompozisyonlar önerilmiş olmasına rağmen, yapılan çalışmalarda silisyumu tamamen bünyeden çıkarmamak ve en az %0,3-0,8 oranında olması silisyum, östemperleme aşamasında en etkili sementit oluşumunu önüyor gibi görünmektedir. Bu nedenle sadece kısmi olarak %1 silisyumun %1 alüminyumla değiştirilmesi idealdir [27].

TRIP çeliklerindeki yüksek silisyum içeriği sıcak haddelene sırasında yüzeye kolayca haddelenen çok sağlam bir oksit tabakasıyla sonuçlanabilir. Bu istenmeyen tabakanın asitle temizlenmesi zordur ve sıcak haddelenen çelikler için yetersiz yüzey özellikleri meydana getirir [28, 29].

2.6.4. Alüminyum

TRIP çeliklerinde alüminyum temelde üretim sırasında karbür çökmesini engellemek için ilave edilse de önemli ölçüde östenit fazının termodinamik kararlılığını etkileyebilir [30]. Çeliğin galvanizlenmesi sırasında yüzey kalitesi sorunlarını azaltmak amacıyla, sementit oluşumunun önlenmesi için silisyuma benzer fakat daha zayıf bir etkiye sahip ve buna ek olarak beynit formasyonu kinetiğini arttırdığı için yeni nesil TRIP çeliklerine silisyum yerine kısmen alüminyum ilave edilir. Yapılan çalışmalarda silisyum yerine kısmen alüminyum ilave etmekle mukavemetin hemen hemen aynı olduğu görülür. Fakat diğer taraftan alüminyum katı çözelti sertleşmesi silisyumdan önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca yüksek alüminyum içeriği çeliğin sürekli dökümünde sorunlara neden olabilir. Bu nedenle, çeliğe aynı zamanda sementit oluşumunu inhibe eden ferrit üzerine güçlü bir katı çözelti sertleşmesi etkisinde olan fosfor ilave edilir [31]. Fosfor elementinin tane sınırında ayrılma eğilimi vardır [32].

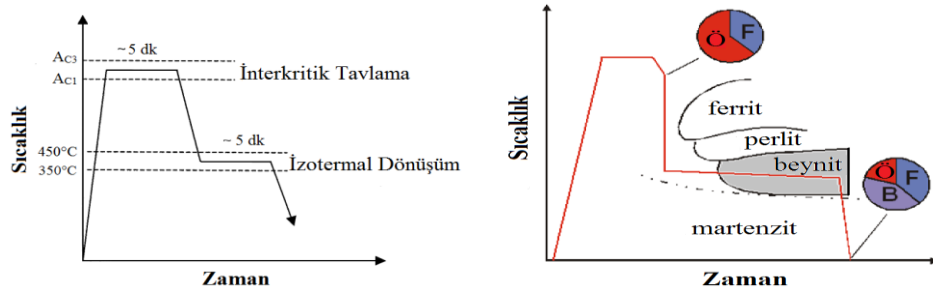
2.6.5. Niyobyum

TRIP çeliğinde katı eriyikte çözünmüş Niyobyum(Nb) sıcak deformasyon sırasında yeniden kristalleşme sürecini ve soğuk haddelenmiş bu çeliklerde östenitten ferrite dönüşümü geciktirir. Bununla birlikte sıcak deformasyon sırasında niyobyum, karbon ve azot gibi ara yer atomları ile birleşerek Nb(C,N) çökeltileri oluşturur. Bu durum yeniden kristalleşme ve tane büyümesini geciktirir ve çökelti sertleşmesine sebep olur. Ayrıca niyobyumun ferrit, östenit tane boyutuna ve beynit formasyonunun oluşumunu geciktirdiği yapılan çalışmalarda görülmüştür [12]. Beynitik dönüşüm sırasında içyapıda karbid(SiC) oluşumunu geciktiren ve martenzit oluşum sıcaklığını düşüren niyobyum elementi üzerine literatürde birçok çalışmaya rastlanmıştır. Sonuç olarak Niyobyumun tane sınırındaki hareketi ve TRIP etkisini etkilediği gözlenmiş buna ek olarak çeliğin akma dayanımını 50 MPa kadar artırırken çekme mukavemetinde etkisinin bulunmadığı da tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda soğuma altındaki östenitin dinamik dönüşümü (DTUA) yöntemiyle yapılan sıcak haddeleme yönteminde niyobyum eklenmesiyle önceden çekme

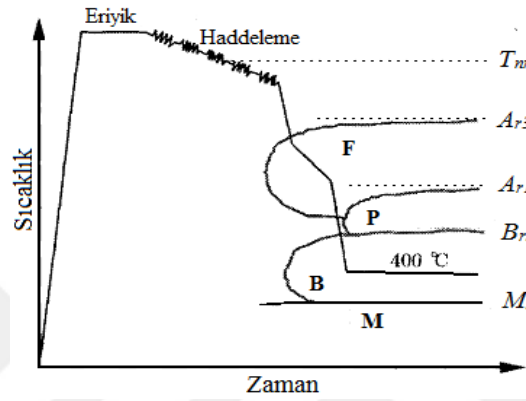
dayanımı 780 MPa olan C-Mn-Al-Si TRIP çeliğinin çekme dayanımı 840 MPa olmuştur [33].

2.7. TRIP Çeliklerinin Isıl İşlemi

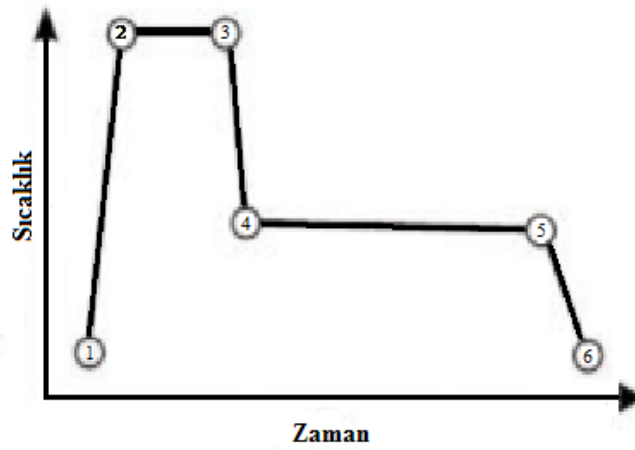
Soğuk haddelenmiş TRIP fazlı çeliklerinin mikroyapıları iki aşamalı ısı işlem ile elde edilmektedir. Çift fazlı çelikler için ilk aşama, başlangıç mikroyapısının östenite dönüştüğü interkritik tavlamaadır. Çift fazlı çeliklere direkt oda sıcaklığına kadar su verilirken, TRIP çeliklerine ilk olarak ferrit ve östenit fazlarının stabil olduğu A_{C1} ve A_{C3} sıcaklıklarının arasında yani 780-880°C aralığında interkritik tavlama yapılır. İnterkritik tavlama esnasında en güçlü östenit stabilizatörlerinden biri olan karbon elementi ilk kez meydana östenit fazına yerleşir. Fakat bu karbonca zenginleştirme kalıntı östenitin oda sıcaklığında kararlılığını sağlamak için yetersizdir. Sonuç olarak, beynitik dönüşüm sürecinde olan ikinci bir karbon zenginleşmesi beklenir. TRIP çeliklerine silisyum ve/veya alüminyum ilavesi ile sementit çökmesi son derece önlenir, böylece dönüşmemiş östenit yeterli karbon atomunu tutabilir [34]. İnterkritik tavlama sonrası TRIP çeliklerinin mikroyapısı neredeyse aynı oranda ferrit ve östenit içermekte olup, sıcak haddelenmiş TRIP çeliklerinin mikroyapısına göre ferrit tavlama öncesi mikroyapıda bulunmaktadır, soğutma sırasında oluşmamaktadır. İkinci aşama izotermal beynitik dönüşümdür (IBT). İnterkritik tavlamadan sonra çelik hızlıca beynitik dönüşme sıcaklık aralığına kadar soğutulur (tipik olarak 350-450°C) ve bu sıcaklıkta yaklaşık beş dakika beklenir. Bu izotermal bekleme sırasında, (östenitin bir kısmının beynite dönüşmesi kalan östenitin oda sıcaklığında kararlı) östenit çoğunlukla beynite dönüşür, fakat bu arada geri kalan östenit oda sıcaklığına kadar su verildiğinde martenzit dönüşüm sıcaklığı (M_s) oda sıcaklığından düşük olduğu için martenzite dönüşmez, stabil kalır ve son mikroyapı hacimce %50-60 ferrit, %25-40 beynit, %5-15 kalıntı östenitten oluşmaktadır [35]. İzotermal beynitli dönüşüm (IBT) süresi ve sıcaklığı TRIP çeliklerinin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.



Şekil 2.7. TRIP çeliği ısıtma işlemi ve TRIP çeliğinin soğuk haddeleme sıcaklık- zaman grafiği



Şekil 2.8. TRIP çeliğinin sıcak haddeleme sıcaklık- zaman grafiği (T_{nr} yeniden kristalleşme sıcaklığı, A_{r3} , A_{r1} , B_{rs} ve M_s ise ferrit, perlit, beynit ve martenzit dönüşüm başlama sıcaklıkları) [36]



Şekil 2.9. Soğuk haddelenmiş TRIP çeliklerin işleminden geçirilmesi sırasında metalurjik özellikleri

<u>Adımlar</u>	<u>Metalurjik özellikler</u>
1 → 2	Yeniden kristalleşme
	Sementitin çözünmesi
2 → 3	Element alaşımlanması ve karbon segregasyonu
	Tane büyümesi
	Karbonitrürlerin çökmesi
	Perlit ve ferlitin östenite dönüşümü
3 → 4	Östenitin ferrite dönüşümü
	Karbon segregasyonu
4 → 5	Östenitin beynite dönüşümü
	Karbon segregasyonu
	Sementitin olası çökmesi
5 → 6	Östenitin martenzite olası dönüşümü

Şekil 2.10. Soğuk haddelenmiş TRIP çeliklerin işlemde geçirilmesi adımları

TRIP çeliklerin üretimi için iki farklı üretim yöntemi vardır. Birincisi sıcak haddeleme prosesidir. Bu yöntem çeliğe kontrollü haddeleme ve beynit dönüşüm sıcaklığına kontrollü soğutmanın uygulandığı yöntemdir. Diğer yöntem ise soğuk haddelenmiş ve sürekli tavlama ile üretim yöntemidir [37]. TRIP çelikleri genelde soğuk haddeleme ile üretilir. TRIP çeliklerini sıcak haddeleme ile üretmek mümkün olsa idi, TRIP çeliklerin üretim maliyetleri azaltılmış ve aynı zamanda enerji tasarrufu ve çevrenin korunması için faydalı olacaktır. TRIP çeliklerinin sıcak haddelenmesindeki genel zorluk sıcak haddeleme sonrası soğutma sürecinin nasıl düzgün kontrol edileceğidir [38]. TRIP çeliklerinin sıcak haddelemeyle geliştirilmesi konusunda birkaç çalışma yapılmıştır. Termomekanik kontrollü işlem (TCMP) bu yöntem bu çeliklerin özelliklerinin geliştirilmesi açısından yararlı olabilir [39]. Bu yöntem ile poligonal ferrit, granüler beynit ve daha büyük miktarda stabilize kalıntı östenit elde edilebilir [40].

2.8. TRIP Çeliklerinin Galvanizlenmesi

TRIP çeliklerinin geniş ölçüde otomobil gövdelerinde kullanılmasının önündeki önemli problemlerden biri sıcak daldırma galvanizlemedeki düşük ıslanabilirliktir. Kütlece %0,5'den daha yüksek silisyumun çeliğin bünyesinde bulunması çok kararlı

ve dayanıklı bir Mn_2SiO_4 film tabakasının TRIP çeliklerinin yüzeyinde üretimin değişik safhalarında oluşmasından dolayı galvanizleme boyunca yüzeyin ıslanmasına mani olur [41].



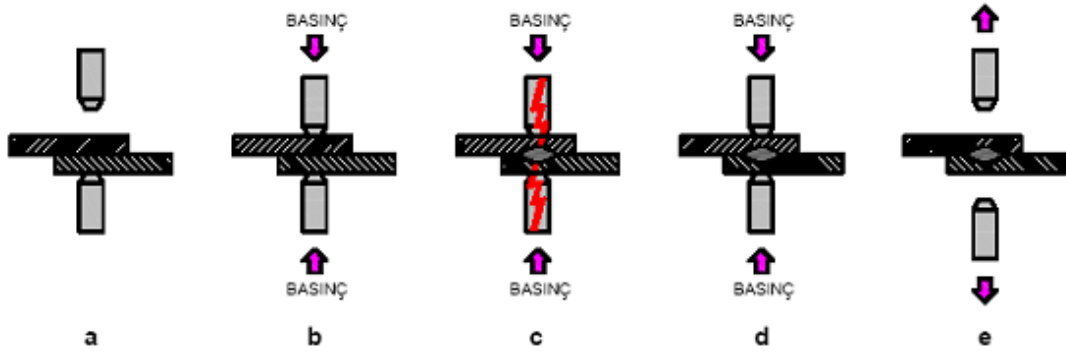
BÖLÜM 3. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

Elektrik direnç nokta kaynağı günümüz endüstrisinde kullanılan en eski kaynak yöntemlerinden biridir. Elektrik direnç nokta kaynağı başta otomotiv olmak üzere taşıt, alet-gereç, mobilya, inşaat gibi pek çok sektördeki metal sacların birleştirilmesi için kullanılan en yaygın yöntemdir. İşlem ısı, basınç ve zamanın bileşiminden meydana gelir. İsminden de anlaşıldığı gibi kaynak edilen iş parçalarının elektrik akımına gösterdikleri direnç yöntemin esasını oluşturur [42, 43].

Elektrik direnç nokta kaynağının avantajları olarak otomasyona uygunluğu, ark kaynağına nazaran operatör hatalarının daha az olması ve tekrar edilebilirliğinin iyi olması sayılabilir [44].

3.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağının Esası

Sürecin ilk aşamasında elektrotlar yüksek basınç altında parçaları sıkıştırır. İkinci aşamada düşük gerilimli ve yüksek akım şiddetli bir elektrik akımının kısa bir süre uygulanmasıyla iş parçalarının temas yüzeyi/yüzeyleri ısınmaya başlar. Üçüncü aşamada iki plaka arasındaki yüzeyde erime başlayınca ve kaynak çekirdeği oluşuncaya kadar akım devam eder. Dördüncü aşamada erimiş çekirdek istenilen boyuta ulaşır ve akım kesilir. Son aşamada elektrik akım şiddeti devreden çıkarılınca, ısınan metal hızla soğumaya başlar ve neticesinde katılaşma tamamlanmış olur. Bu esnada alt ve üst elektrotlar, iş parçalarını tutmayı sürdürürler ve katılaşma tamamlandığı andan itibaren elektrot kuvveti kaldırılarak malzeme serbest kalır. Bu kaynak çevrimleri sonucunda oluşturulan kaynağın şekli ve boyutu kullanılan elektrotların şekli ile belirlenir [45]. Şekil 3.1.'de [46], kaynak çevrimi verilmiştir.

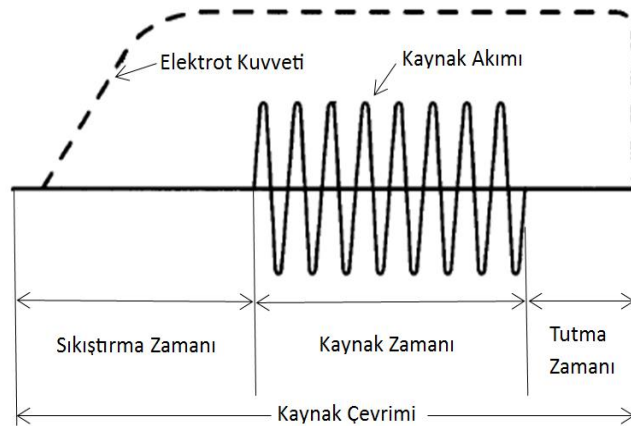


Şekil 3.1. Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak çevrimleri

Bunlar;

1. Elektrotların yanaşma ve sıkma süresi(a-b)
2. Kaynak süresi(c)
3. Elektrotların sıkıştırma süresi(d)
4. Elektrotların uzaklaşma süresi(e)

Yaklaşma ve sıkıştırma zamanında elektrotlar birbirlerine yaklaşıp iş parçalarını sıkıştırır. Kaynak zamanında çekirdek oluşana kadar iş parçalarına akım uygulanır. Tutma zamanında kaynak akımı kesildikten sonra kaynak bölgesinin soğuması için elektrotlar iş parçalarını sıkıştırmaya devam eder. Ayrılma zamanında ise elektrotlar iş parçalarını bırakır.



Şekil 3.2. Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak çevrimi

3.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Oluşan Isı

Elektrik direnç nokta kaynak makinelerinin sekonder devreleri, kaynağı yapılacak malzemeler ile birlikte bir çok dirençten oluşmuştur. Elektrik akım şiddetinin miktarını sistemdeki dirençlerin toplamı belirler. O bölgenin dirençine bağlı olmaksızın devrenin her noktasında elektrik akım şiddeti aynıdır ve o bölgede noktada oluşan ısı, doğrudan o bölgedeki direnç ile orantılıdır. Sekonder devreyi oluşturan elektriksel sistem, talep edilen bölgede ısı oluşturacak ve sistemin artı kalan kısımlarının göreceli olarak soğuk kalmasını sağlayacak şekilde incelenmiştir.

Dönüşüme uğrayan ısıнын hepsi, birleştirme noktasında oluşturulan kaynak çekirdeğinde harcanmaktadır. Elektrotların aşırı ısınmayı, su veya hava yardımı ile soğutulması sağlanabilir, özellikle yüksek zaman aralıklarında yapılan birleştirmelerde ısınan malzeme boyunca yayılması, harcanan bu ısıнын bileşenleri olarak sayılabilir. Meydana gelen kaynak noktalarının büyüklüğü, verilen ve kayıp ısı miktarlarının stabil olması halinde bile aynı olmayabilmektedir.

3.2.1. Kaynak çekirdeğinde oluşan ısı

Kaynak çekirdeğinde birleştirme için lazım olan ısı miktarı, kaynak zamanı (t) toplam direnç (R) ve kaynak akım şiddeti (I)'nin Joule tesirine bağlı olmayıp, aynı zamanda birleştirilecek olan malzemenin kaynağa uygunluk olup olmamasında bağlıdır. İletilen kaynak akım şiddeti ve kaynak akım şiddetinin uygulanma zamanında oluşabilecek ısı miktarı, aşağıdaki şartlara bağlıdır.

1. Alt ve üst elektrotların ve birleştirilecek iş parçalarının ısı iletme kabiliyetleri
2. Temas noktalarının, diğer bir deyişle iş parçalarının ve elektrotlarını yüzey pürüzlülüğü ve kirlilik gibi yüzey şartları.

Elektrik direnç nokta kaynağında bilanço prensibine göre oluşup tüketilen ısı üretimi,

Q_1 : Kaynak esnasında meydana gelen ısı,

Q_2 : Elektrotlarda oluşan ve çekirdeğe iletilen ısı,

Q_3 : Kaynak çekirdeğini oluşturmak için sarfedilen ısı,

Q_4 : Çevreye ve malzemelere iletilen kayıp ısı

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Kaynak noktasında ve elektrotlarda oluşan ısıların toplamı:

$$Q_1 + Q_2 = 0,24 \cdot I_k^2 \cdot R_{top} \cdot t_k \text{ (cal)} \quad (3.2)$$

şeklinde, noktanın oluşumunda kullanılan ısı ise,

$$Q_3 = 0,24 C_1 \cdot G \cdot T + C_2 \cdot G \text{ (cal)} \quad (3.3)$$

Burada:

G: Kaynak çekirdeğinin ağırlığı (g)

T: İş parçalarının erime ısısı ($^{\circ}\text{K}$)

C_1 : İş parçalarının özgül sıcaklığı ($\text{J/g}^{\circ}\text{K}$)

C_2 : İş parçalarının özgül erime sıcaklığı (cal/g)

İş parçalarının içine yayılan ısı;

$$Q_4 = 0,24 T \cdot L_t \cdot t_k \text{ (cal)} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada:

L_t : Deney malzemelerinin uzunluğu (m)

t: Kaynak zamanı (periyod)

T: İş parçalarının erime ısısı (°K)

Kaynak çekirdeğinin ağırlığı ise;

$$G = \frac{4}{3} \gamma \pi \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \left(\frac{d_1}{2} \right) \quad (3.5)$$

γ : Malzemenin özgül ağırlığı (g/cm³)

d_1 : Çekirdek çapı (mm)

d_2 : Çekirdek yüksekliği (mm)

Elektrik direnç kaynak çekirdeğinin oluşturulabilmesi için, birim zamanda üretilecek ısı, birim zamanda iletilecek ısıdan büyük olması diğer bir deyişle ısı, birim zamanda o bölgede yığılabilmesi koşulunun sağlanması gereklidir. Yüksek soğuma hızları, yüksek ısı iletim kabiliyetine bağlı olup, iş parçalarında, sertleşmeye ve çatlak oluşumuna sebep olur. Su ile soğutulan alt ve üst elektrotlardaki yüksek ısı iletim kabiliyeti arzu edilen bir özelliktir ve iş parçası ile elektrot arasındaki temas ısını düşük tutar. Bundan dolayı iş parçası ile elektrotlar arasındaki alaşımlanma düşük tutulmaya çalışılır.

3.2.2. Isı kaybı

Elektrik direnç nokta kaynağında meydana gelen ısı kayıpları iki kademededir;

1. Kaynak akımının uygulandığı süredeki ısı kaybı
2. Kaynak akımının kesildiği andan itibaren oluşan ısı kaybı

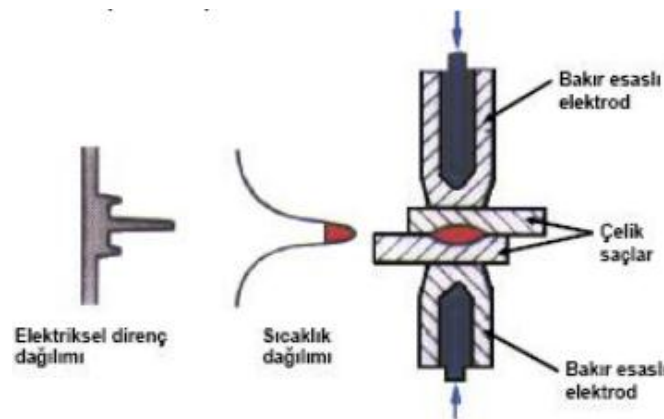
Birinci kademedeki ısı kaybının seviyesi , aşağıdaki etmenlere bağlıdır:

1. Malzemelerin alaşımı
2. Malzemelerin ağırlığı
3. Kaynak zamanı
4. Elektrotları soğutma türü

Aktarılan kaynak akım şiddeti için, ortaya çıkarılan ısı, elektrik iletkenliği ile birbirlerine ters orantılıdır. Isıl iletkenlik, kaynak çekirdeğinden bu oluşan ısıyı iletilme hızını veya kayıp miktarını belirler. Bu iki etmen, malzemelerde aynı doğrultuda paralel gider. Şayet elektrotlar, kaynak akımı devreden çıkarıldıktan sonra malzeme ile kontakt halinde olurlarsa, elektrotlarda kullanılan malzemelerin azami ısı iletme kabiliyeti nedeniyle, kaynak çekirdek bölgesinin soğuma hızı artar. Elektrotların etkin bir şekilde su ile soğutulması neticesinde ısı kaybı hızlanır. Kaynak çekirdek kısmından, malzemeyle doğru soğuma hızı, yüksek kaynak süreleri ayarlanarak minimize edilebilir. Soğutma hızı, uzun kaynak sürelerinin ayarlandığı kalın levhalarda az, kısa kaynak sürelerinin ayarlandığı ince levhalarda çoktur. Elektrotlar kaynak yerinden hemen uzaklaştırılırsa, ısı kaynak çekirdek bölgesini saran metale ve atmosfere iletileceğinden, elektrotları belirli bir zaman yerinde tutmak iyi olur [47].

3.2.3. Kaynak noktasında meydana gelen elektriksel direnç

Kaynak çekirdek oluşum bölgesindeki direnci, bağlantısı yapılacak olan iş parçalarının dirençleri ile temas noktalarının toplam dirençlerinden meydana gelmektedir.



Şekil 3.3. Elektrik direnç nokta kaynağında sıcaklık dağılımı ve direnç dağılımı

Malzemelerin dirençlerini,

1. İş parçalarının birleştirilecek olan bölgelerinin, imalattan ve hazırlanması

esnasında oluşan fiziksel özellikler

2. Kaynak devresine iletilen kaynak akımının büyüklüğü ve türü
3. Kaynak akım devresindeki ısı, belirlenmektedir.

Kontak noktalarında oluşan dirençler,

1. Üst elektrot-üst malzeme
2. Üst malzeme - alt malzeme
3. Alt malzeme -alt elektrot

kontakt noktalarındadır. Uygulamalarda elektrotların kendi dirençleri gözardı edilebilecek boyutlardadır. Karşılaştırma yapılmak istenirse , saf metaller alaşımlara göre kararlı yüksek dayanım göstermelerine rağmen, alaşımların içinde bulunan alaşım elemanlarının yükselmesi ile özgül dirençleri de saf metallere göre yüksek değerlere ulaşabilir.

3.3. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Değişkenleri

Elektrik direnç nokta kaynağında bağlantının kalitesini etkileyen başlıca değişkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Kaynak akım şiddeti
2. Kaynak zamanı
3. Elektrot kuvveti
4. Elektrot malzemesi

3.3.1. Kaynak akım şiddeti

Elektrik direnç nokta kaynağında devrenin her kısmında dirence bağlı olarak ısı oluşur. Oluşan ısıнын bir kısmı elektrotlar ve iş parçalarından radyasyon ve konveksiyon yoluyla kaybolur [48]. Elektrotlar iş parçalarına kıyasla iletkenlikleri daha yüksek ve dirençleri daha düşük malzemelerdir ve su ile soğutulmaktadır. Bu

nedenle ısı birikmesi iş parçalarında ve özellikle iş parçalarının ara yüzünde meydana gelir.

Kaynak akım şiddetinin artmasıyla birlikte kaynak çekirdeğinin boyutu ve bağlantının dayanımı artar. Bununla birlikte aşırı akım şiddeti fışkırmalara, gözenek ve çatlak oluşumuna, bağlantının dayanımının düşmesine, kötü bir yüzey görünümüne ve elektrotların deformasyonuna neden olur.

3.3.2. Kaynak zamanı

Kaynak zamanı üretilen ısı miktarını direkt olarak etkiler. Kaynak zamanının artmasıyla birlikte üretilen ısı miktarı artar. Buna bağlı olarak çekirdeğin çapı ve yüksekliği büyür. Dolayısıyla bağlantının dayanımı da artar. Ancak aşırı kaynak zamanı, akım şiddetinde olduğu gibi fışkırmaya neden olur. Bu ise gözenek, çatlak ve aşırı dalma derinliğine neden olabilir [46].

3.3.3. Elektrot malzemesi

Elektrik direnç nokta kaynağı elektrotlarından beklenen özellikler şöyle sıralanabilir:

1. Yüksek sıcaklıkta sertlik
2. İş parçaları ile minimum seviyede alaşım oluşturma
3. Uygun ısı iletme ve elektrik iletim kabiliyeti
4. Mükemmel dayanım
5. Elektrot uçlarının yeterli soğutulabilmesi

Kullanılacak olan elektrotların sertliğinin artması, elektriksel direnci ve ısı direncide artırır. Bu sebepten, uygulamalarda elektrot alaşımının seçimi, o elektrodun mekaniksel özelliklerine bağlı olarak değişen ısı ve elektriksel özelliklerinin de devreye alınması gerçekleşir. Alüminyum malzemelerin elektrik direnç nokta kaynağında kullanılacak olan elektrotlar, basma mukavemetinin yerine yüksek iletkenliğin yüksek olması ve paslanmaz çeliğin elektrik direnç nokta kaynağında

kullanılacak olan elektrotlar da, iletkenlik yerine yüksek basma kuvveti tercih edilir. [47].

3.4. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Bağlantı Kalitesi

Elektrik direnç nokta kaynağında bağlantının kalitesini belirlemede kaynağın fiziksel/geometrik özellikleri ve performans/dayanımına ait özellikler incelenir. Bir elektrik direnç nokta kaynağını değerlendirmek için gereksinimlere bağlı olarak genellikle birden fazla özellik göz önünde tutulur [49].

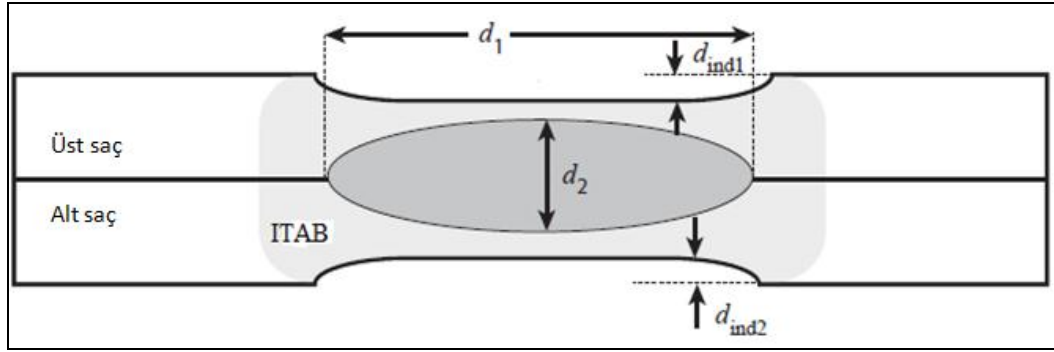
3.4.1. Kaynağın fiziksel/geometrik özellikleri

Genellikle kullanılan fiziksel/geometrik özellikler şunlardır:

1. Çekirdek çapı (d_1)
2. Çekirdek yüksekliği (d_2)
3. Çekirdek boyut oranı (d_2 / d_1)
4. Dalma derinliği ($d_{ind1} + d_{ind2}$)
5. Yüzey görünümü
6. İç süreksizlikler
7. Fıskırma

3.4.1.1. Çekirdek çapı ve yüksekliği

Kaynak çekirdek geometrisi Şekil 3.4.'de [49] şematik olarak verilmiştir. Şekil 3.4.'de de görüldüğü gibi kaynak çekirdeği, çapı ve yüksekliği ile tanımlanır. Bunlardan çekirdek çapı bir nokta kaynağında bağlantının kalitesini değerlendirmede önemli bir ölçüttür ve dayanım üzerinde en fazla etkiye sahip olan özelliktir [49, 50, 51]. Çekirdek yüksekliğinin de dayanım üzerinde önemli bir etkisi vardır [50].



Şekil 3.4. Elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek geometrisinin şematik gösterimi

Normal üretim koşullarında güvenilir bir elektrik direnç nokta kaynağı için minimum çekirdek çapı;

$$d_2 = 4s^{0,5} \quad (3.6)$$

olmalıdır [52]. Burada “s” iş parçasının kalınlığıdır.

Genellikle minimum çekirdek yüksekliği olarak birleştirilecek parçaların kalınlığının %20’si kabul edilir. Maksimum değer olarak da birleştirilecek parçaların ince olanının %80’ini aşmamalıdır. Bu sınırı aşan çekirdek yüksekliği; fışkırma, aşırı dalma derinliği ve elektrotların daha çabuk deformasyonuna neden olur [53].

3.4.1.2. Çekirdek boyut oranı

Elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarına çekirdek boyutlarının etkisini incelerken çekirdek çapı ve çekirdek yüksekliğinin yanı sıra çekirdek boyut oranının da hesaba katılması gereklidir. Çekirdek boyut oranı ise çekirdek yüksekliğinin çekirdek çapına bölümü ile bulunur [54].

3.4.1.3. Dalma derinliği

Kaynak işleminde iş parçalarının sıkıştırılması için elektrotlar tarafından uygulanan basınç nedeniyle malzemelerin yüzeylerinde deformasyon oluşur. Kaynak edilen metallerin yüzeylerinde oluşan bu deformasyon dalma derinliği olarak ifade edilir.

Standartlara göre dalma derinliğinin toplam malzeme kalınlığının %30'unu aşmaması gerekir [55].

3.4.1.4. Yüzey görünümü

Elektrik direnç nokta kaynağında elektrot yüzeyinin aşınması, elektrot kuvvetinin düşük veya yüksek olması, kaynak akım şiddetinin düşük veya yüksek olması ve iş parçalarının yüzeylerinin kirli olması gibi nedenlerle derin elektrot izi, elektrot kalıntısı, biçimsiz bir kaynak formu ile çatlaklar ve derin boşluklar oluşabilir. Elektrot kalıntısı kötü bir görünüme, korozyon direncinin azalmasına, eğer fışkırma olursa dayanımın azalmasına ve elektrot ömrünün kısılmasına neden olur. Biçimsiz bir kaynak formu temas yüzeyinde ki değişime ve fışkırmaya bağlı olarak dayanımın azalmasına neden olur. Çatlaklar ve derin boşluklar kaynak bölgesinin çevresine kadar uzanıyorsa yorulma dayanımını azaltır [50].

3.4.1.5. İç süreksizlikler

İç süreksizlikler genellikle düşük elektrot kuvveti, yüksek akım şiddeti gibi nedenlerle oluşan aşırı kaynak ısısının etkisiyle ortaya çıkar. Akım uygulandıktan hemen sonra elektrot kuvvetinin kalkması iç süreksizliklere neden olur.

3.4.1.6. Fışkırma

Elektrik direnç nokta kaynağında ki başlıca sorunlardan biri olan fışkırma sıklıkla uygun olmayan kaynak parametreleri veya bozulmuş elektrotlar ve temas yüzeyinde ki problemler nedeniyle meydana gelir. Bir yandan kaynak çekirdeğinin boyutunu ve dayanımını maksimize etmeye çalışırken diğer yandan fışkırmamanın oluşmaması sağlanmalıdır. Çünkü fışkırma gözeneklilik, aşırı dalma derinliği ve kötü bir görünüm ile birlikte bağlantının dayanımının düşmesine neden olabilir [49, 56].

3.4.2. Kaynak performansı / dayanımı

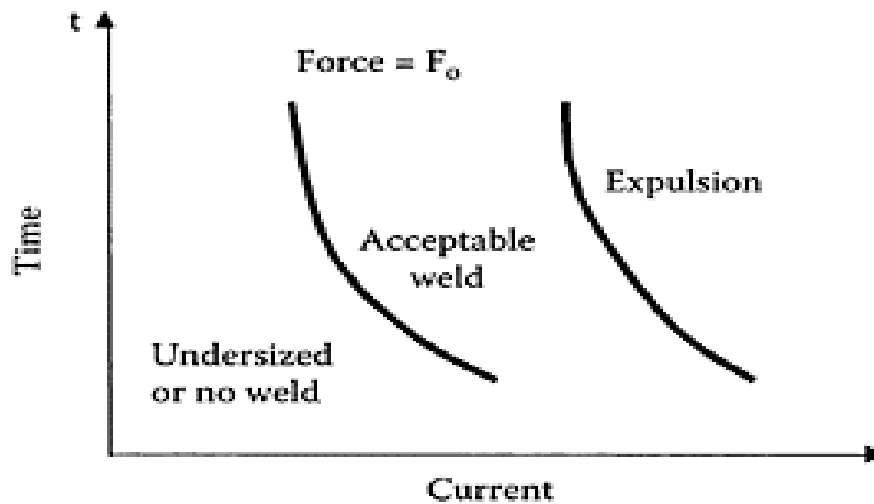
Elektrik direnç nokta kaynağında bağlantının kalitesini belirlemede genellikle kullanılan performans karakteristikleri şunlardır:

1. Çekme-makaslama dayanımı
2. Çekme-sıyırma dayanımı
3. Yorulma dayanımı
4. Korozyon direnci

Bu çalışmada elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların performanslarını değerlendirmek için belirlenen performans karakteristikleri çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımlarıdır.

3.5. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Eğrisi (Weld Lobe)

Elektrik direnç nokta kaynağında en yaygın kaynak parametreleri kaynak akım şiddeti, kaynak zamanı ve elektrot kuvvetidir. Bu parametrelerin seçimi ise genellikle kaynak eğrisi (weld lobe) diyagramları kullanılarak yapılır. Şekil 3.5.'de bir kaynak eğrisi diyagramı görülmektedir [50].



Şekil 3.5. Bir kaynak eğrisi diyagramı

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Genel

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik türlerinden, üç fazlı çelik olarak adlandırılan TRIP 800 sacının elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmek suretiyle nokta kaynak bağlantılı numune serileri elde edilmiştir. Deneylerde kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı değiştirilirken elektrot kuvveti, sıkıştırma ve tutma zamanları sabit bırakılmıştır. Elde edilen bağlantıların dayanım değerlerini belirlemek için her bir seri çekme-makaslama ve çekme-sıyırma testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca sertlik, mikro ve makro yapı incelemesi yapılmıştır.

4.2. Kullanılan Malzemeler ve Spektrometrik Analiz

Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan saclar, otomotiv sektöründe kullanılan çift tarafı galvaniz kaplamalı 1,5 mm kalınlığındaki TRIP serisi saclardır. Tablo 4.1.'de yüksek mukavemet ve şekillendirilme kabiliyeti nedeniyle tamamen otomobil parçaları için kullanılan TRIP 800 çeliğinin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 4.1. TRIP 800 çelik sacının kimyasal bileşimi

Elementler (ağ. %)									
TRIP 800 1,5 mm	C	P	Mo	Co	Ti	Sn	Si	S	Ni
	0,179	0,011	0,025	0,072	0,014	0,01	1,719	0,007	0,074
	Cu	V	Mg	Mn	Cr	Al	Nb	W	Fe
	0,097	0,013	0,001	1,691	0,065	0,027	0,053	0,04	95,902

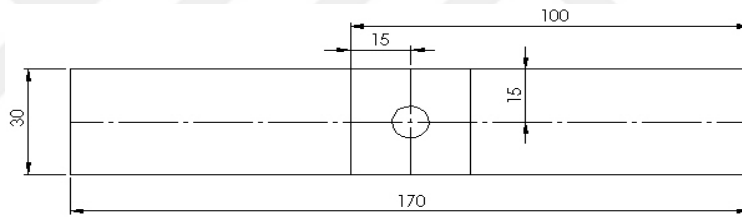
TRIP 800 çeliğinin çekme deneyi ve sertlik deneyleri sonucu elde edilen mekanik özellikleri Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. TRIP 800 çeliğinin mekanik özellikleri

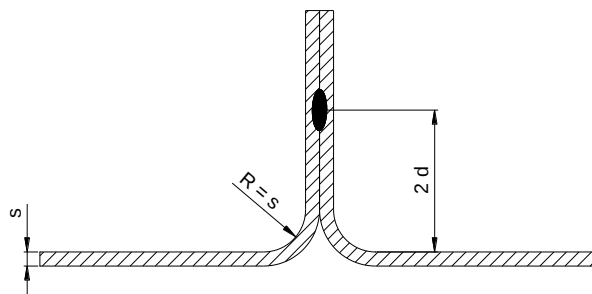
Akma Dayanımı(N/mm ²):	525
Çekme Dayanımı(N/mm ²):	883 (min 780)
Uzama (%):	36
Sertlik(HV):	227

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Boyutları

Deney parçaları, sac plakalar hadde yönleri belirlenerek giyotin makas ile 100x30x1,5 mm boyutlarında kesildikten sonra, aseton ve temiz bir bezle silinerek yüzeyleri yağ, pas ve kir gibi yabancı maddelerden arındırılmıştır. Çekme-makaslama ve çekme sıyrma deney numuneleri EN ISO 14273 [56] ve EN ISO 14270 [57] standartlarına göre hazırlanmıştır.



Şekil 4.1. Çekme-makaslama deney numuneleri



Şekil 4.2. Çekme-sıyrma deney numuneleri

4.4. Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makinesi

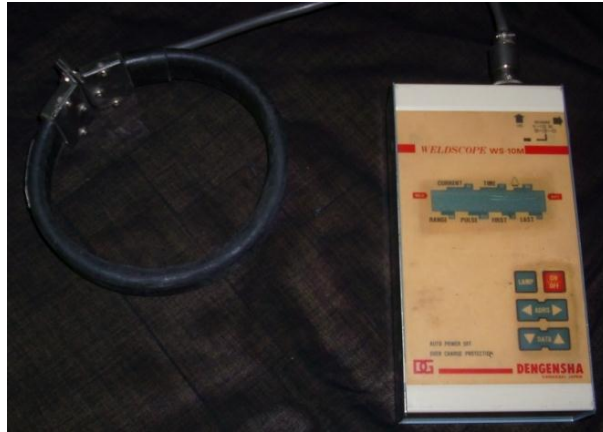
Deneylerde, tek kollu, 120 kVA kuvvetinde zaman kontrollü ve elektronik akım kontrollü, pnömatik basma düzenli elektrik direnç nokta kaynağı makinesi

kullanılmıştır. Sıkıştırma ve tutma süreleri ile kaynak zamanı makinenin kendi elektronik donanımları aracılığıyla ayarlanmıştır. Şekil 4.3.'de, deneylerde kullanılan elektrik direnç nokta kaynak makinesi gösterilmektedir.

Kaynak akım şiddeti değerleri, kaynak makinesinin üst koluna yerleştirilen toroidal bir bobin vasıtasıyla ölçülmüştür. Şekil 4.4.'de akım şiddeti ölçüm cihazı gösterilmektedir.



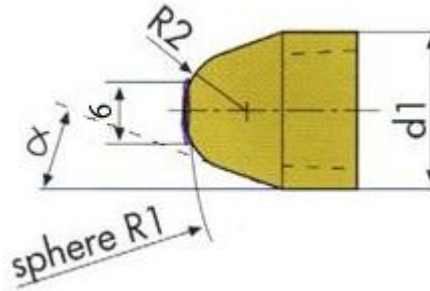
Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan elektrik direnç nokta kaynağı makinesi



Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan akım şiddeti ölçüm cihazı

4.5. Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Elektrotları

Deneylerde, uç çapı 6 mm olan olan bakır-krom-zirkonyum alaşımı elektrotlar kullanılmıştır. Tablo 4.3.'de elektrotların kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri, Elektrotların boyutları Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Deneylerde kullanılan elektrotların boyutları

Tablo 4.3. Deneylerde kullanılan elektrotların kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri

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

4.6. Ön Deneylerin Yapılması

Deney parçaları, çalışma aralığının seçilebilmesi amacıyla üst üste bindirilerek kaynak edilmiştir. Şekil 4.6.'da bazı ön deney numuneleri gösterilmiştir.

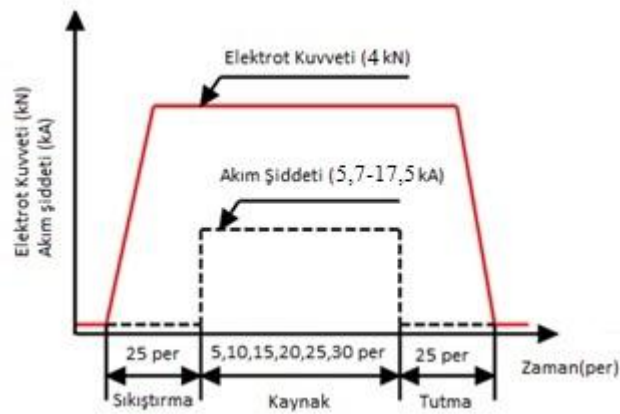


Şekil 4.6. Bazı ön deney numuneleri

Ön deneylerde 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 periyotluk kaynak sürelerinde kaynak işleminin gerçekleştiği en küçük değerden (5,7 kA) malzemelerin delindiği en büyük değere (17,5 kA) kadar kaynak yapılmıştır.

4.7. Deneylerin Yapılması

Deney parçaları, Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de gösterilen boyutlarda hazırlanıp temizlendikten sonra kaynak edilmiştir. Elektrot kuvveti tüm deney boyunca 4 kN değerinde sabit tutulmuş ve sürekli olarak kontrol edilmiştir. Kaynak zamanı 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 periyot olarak değiştirilmiştir. Sıkıştırma ve tutma süreleri 25 periyot olarak sabit tutulmuştur. Şekil 4.7.'de deneylerde uygulanan kaynak parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Deney parametreleri

Her deney koşulunda elektrik direnç nokta kaynak bağlantılı parçalar elde edilmiştir. Bir numune mikro vickers sertlik ölçümleri ile çekirdek boyut ölçümlerinin yapılması, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile mikro yapı fotoğraflarının çekilmesi için kullanılmıştır.

4.8. Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Deneyleri

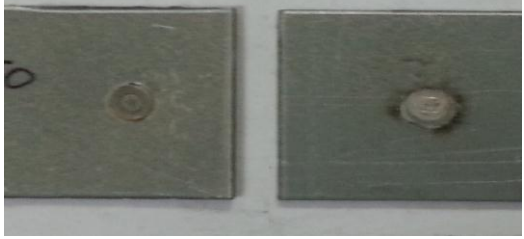
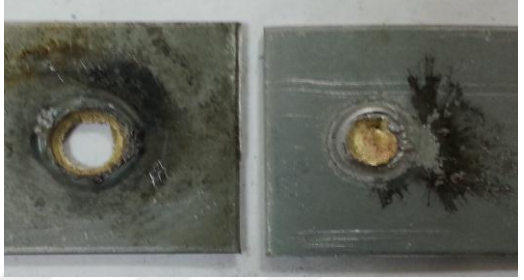
Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'ye göre kaynak edilen parçalar, Şekil 4.8.'de görülen laboratuvar koşullarında 5 ton kapasiteli “Shimadzu” marka çekme makinasında çekme-makaslama ve çekme-sıyırma deneylerine tabi tutulmuştur.

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

1. Ayrılma
2. Döğmelenme
3. Yırtılma

Tablo 4.4.'de ayrılma, döğmelenme ve yırtılma tipi hasar oluşan bazı numuneler gösterilmektedir.

Tablo 4.4. Çekme-makaslama ve çekme-sıyırma deneylerinde oluşan hasar tipleri

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



Şekil 4.8. Deneylerde kullanılan çekme cihazı

4.9. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskopi ile Yapılan Çalışmalar

Deney parçalarının her birinden alınan numuneler, mekanik olarak çekirdek ortasından kesilmiş ve bakalit içine gömülmüştür. Bakalit içerisindeki bu numuneler zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra Marshall reaktifi ile dağlanmıştır. Esas metallerin, kaynak çekirdeğinin ve ısının tesiri altındaki bölgelerin (ITAB) optik ve taramalı elektron mikroskopi (SEM) kullanılarak mikro yapı fotoğrafları çekilmiş ve kaynak sonrası oluşan içyapı değişimleri incelenmiştir. Mikro yapı incelemeleri Şekil 4.9.'da gösterilen Nikon marka optik mikroskopta yapılmıştır.



Şekil 4.9. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop

Taramalı elektron mikroskobu çalışmalarında Şekil 4.10.'da gösterilen JEOL JSM-6060LV cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM)

4.10. Çekirdek Boyutlarının Ölçümü

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



Şekil 4.11. Makroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop

4.11. Sertlik Değerlerinin Ölçümü

Kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının bağlantının sertliğine etkisini incelemek amacıyla, her bir numunenin sertlik değerleri mikrovickers sertlik ölçme

cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümler çekirdek enine ve boyuna kesitinde esas metal, ısının tesiri altındaki bölge ve kaynak çekirdeğini içerisine alacak şekilde yapılmıştır. Sertlik ölçümleri şekil 4.12.'de görülen Wolpert-Wilson marka cihaz ile yapılmıştır. Mikro vickers sertlik ölçümleri laboratuvar koşullarında yapılmış, 100 gr yük kullanılmış ve piramit batıcı uç 10 sn süreyle uygulanmıştır.



Şekil 4.12. Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrovickers sertlik ölçme cihazı

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Genel

Bu çalışmada, 1,5 mm kalınlığında TRIP 800 atmosferik korozyona dayanıklı çelik sacları kendi aralarında eşleştirilmek suretiyle elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinde, kaynak akım şiddeti ile kaynak zamanının ve bu değişkenlere bağlı olarak çekirdek geometrisinin bağlantının çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımına, sertlik dağılımına ve makro-mikro yapısına etkileri araştırılmıştır. Deney malzemeleri otomobil gövdelerinde kullanılan çelik saclardır. Deneyler laboratuvar koşullarında yapılmıştır.

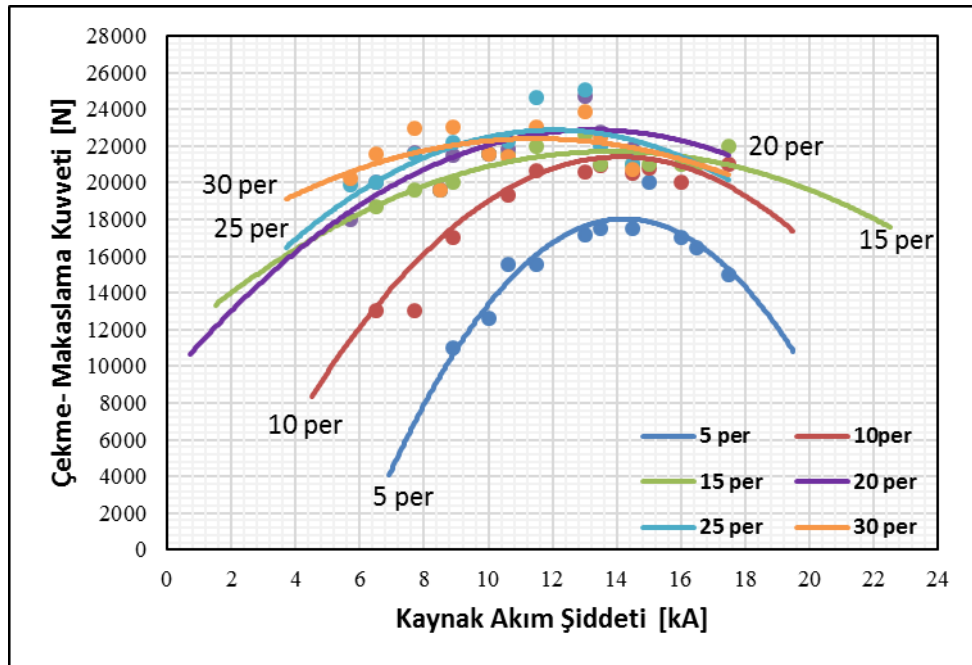
5.2. TRIP 800 Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Dayanımına Etkisi

Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının bağlantıların çekme dayanımı üzerine etkisini incelemek için numunelere çekme-makaslama ve çekme-sıyırma deneyleri yapılmıştır. Çekme-makaslama ve çekme-sıyırma testlerinde her bir parametre için üç numune test edilmiş ve sonuçlar üç numunenin ortalaması alınarak bağlantının çekme-makaslama ve çekme-sıyırma kuvveti olarak verilmiştir.

Bağlantıların çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımlarını belirlemek için 5,7 kA, 6,5 kA, 7,69 kA, 8,5 kA, 8,91 kA, 10,6 kA, 11,5 kA, 13 kA, 13,5 kA, 14,5 kA, 15 kA, 16 kA, 16,5 kA ve 17,5 kA kaynak akım şiddeti 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 periyot kaynak zamanında deney parçalarına uygulanmıştır.

5.2.1. Kaynak akım şiddetinin TRIP bağlantıların çekme-makaslama dayanımına etkisi

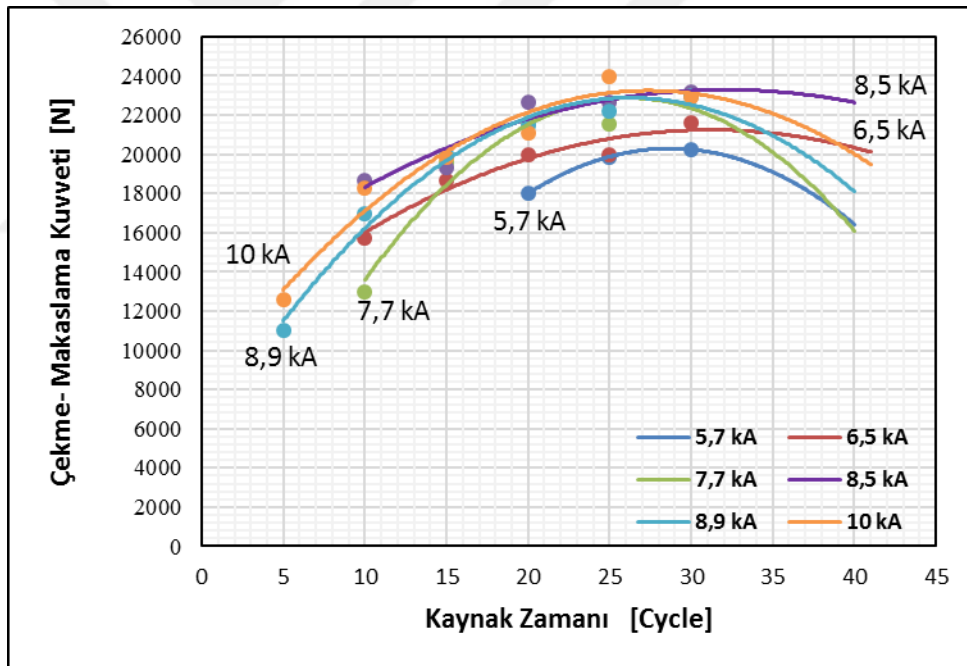
Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin artmasıyla birlikte çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. Maksimum çekme-makaslama kuvvetine 25 periyot (per) kaynak zamanı ve 13 kA kaynak akım şiddetinde ulaşıldığı görülür. 5 periyot kaynak zamanında elde edilen bağlantıların çekme-makaslama dayanımları oldukça düşüktür. İstenen çekme-makaslama dayanımına sahip bağlantılar 10 periyot kaynak zamanında 6,5-10,6 kA arasında; 15 periyot kaynak zamanında 6,5-13,5 kA arasında; 20 periyot kaynak zamanında 5,7-13 kA arasında; 25 periyot kaynak zamanında 5,7-13 kA arasında; 30 periyot kaynak zamanında 5,7-13 kA arasında elde edilmiştir. Bu değerlerden sonra ısı girdisinin oldukça artması nedeniyle dalma derinliği ve fişkırmalar artmıştır. Bu yüzden malzeme ara kesitinde erime artmıştır. Bir diğer ifade ile kesit daralmıştır. Buna bağlı olarak çekme-makaslama kuvveti hızla düşmüştür. Bununla birlikte elektrot yapışması, derin elektrot izleri ve aşırı renklenme görülmüştür.



Şekil 5.1. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-makaslama dayanımına etkisi

5.2.2. Kaynak zamanının TRIP bağlantıların çekme makaslama dayanımına etkisi

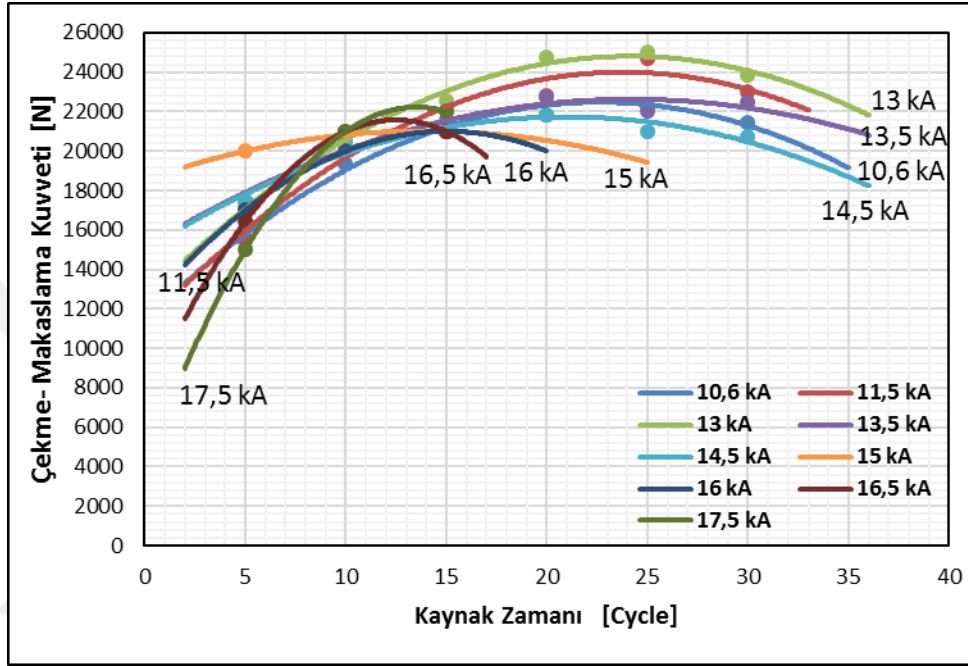
Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi kaynak zamanının artmasıyla kaynak bölgesine verilen ısının artması sebebiyle çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. İstenen çekme-makaslama dayanımına sahip bağlantılar 5,7 kA akım şiddetinde 20-30 periyot arası; 6,5 kA, 7,7 kA ve 8,5 kA akım şiddetlerinde 10-25 periyot arası; 8,9 kA akım şiddetinde 10-25 periyot arası ve 10 kA akım şiddetinde 10-20 periyot arası elde edilmiştir. 5 periyot kaynak zamanında istenen dayanım değerine sahip bağlantı elde edilememiştir. Kaynak zamanının belirli bir değerinden sonra çekirdek kesitinden fişkırmaların ortaya çıkmasıyla birlikte çekme-makaslama dayanımı değerlerinde hızlı bir düşüş görülmektedir.



Şekil 5.2. TRIP bağlantılarda (5,7 kA-10 kA arası) kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi kaynak zamanının artmasıyla kaynak bölgesine verilen ısının artması sebebiyle çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. İstenen çekme-makaslama dayanımına sahip bağlantılar 10,6 kA, 11,5 kA, 13 kA akım şiddetinde 10-25 periyot arası; 13,5 kA, 14,5 kA akım şiddetlerinde 10-20 periyot arası; 8,9 kA akım şiddetinde 10-25 periyot arası ve 10 kA akım şiddetinde 10-20 periyot arası

elde edilmiştir. 15 kA kaynak akım şiddetinde 10-15 periyot kaynak zamanında, 16 kA, 16,5 kA ve 17,5 kA kaynak akım şiddetlerinde 10-15 periyot arasında istenen dayanım değerine sahip bağlantı elde edilmiştir. Kaynak zamanının belirli bir değerinden sonra çekirdek kesitinden fişkırmaların ortaya çıkmasıyla birlikte çekme-makaslama dayanımı değerlerinde hızlı bir düşüş görülmektedir.

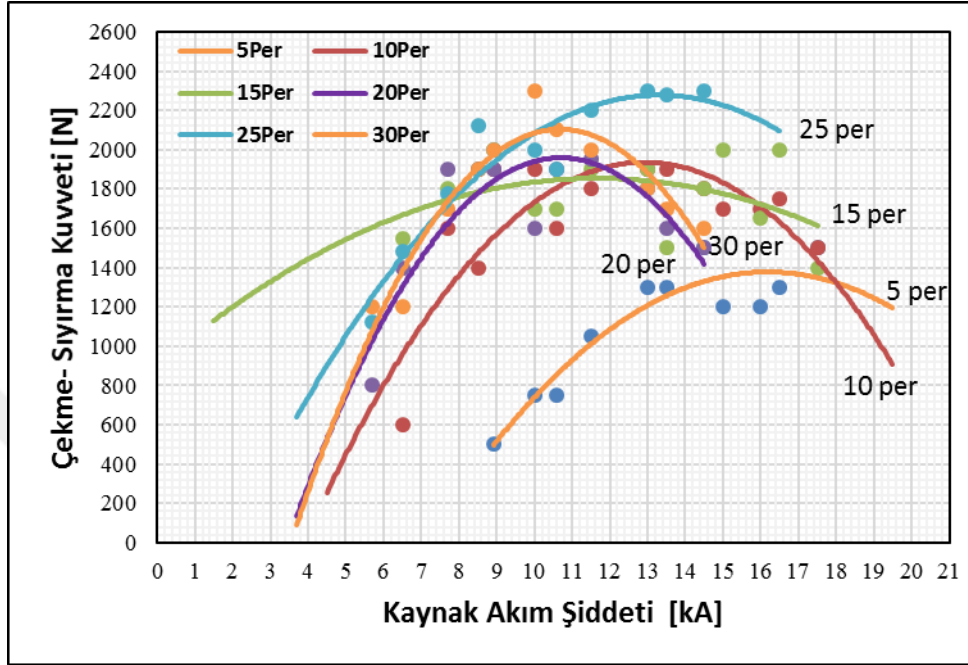


Şekil 5.3. TRIP bağlantılarda (10,6 kA-17,5 kA arası) kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımına etkisi

5.2.3. Kaynak akım şiddetinin TRIP bağlantıların çekme-sıyrma dayanımına etkisi

Şekil 5.4.'de görüldüğü gibi kaynak akım şiddetinin artmasıyla çekme-sıyrma dayanımı da artmaktadır. 5 periyot kaynak zamanında istenen bağlantı elde edilememiştir. 10 periyot kaynak zamanında 5,7 kA-13,5 kA arasında, 15 periyot kaynak zamanında 5,7 kA-13 kA arasında, 20 periyot kaynak zamanında 5,7- kA11,5 kA arasında, 25 periyot kaynak zamanında 5,7 kA-13,5 kA arasında, 30 periyot kaynak zamanında ise 5,7 kA-8,91 kA arasında istenen çekme-sıyrma dayanımına sahip bağlantılar elde edilmiştir. Maksimum çekme-sıyrma dayanımına 25 periyot kaynak zamanı 13 kA ayrıca 30 periyot kaynak zamanı ve 10,6 kA kaynak akım

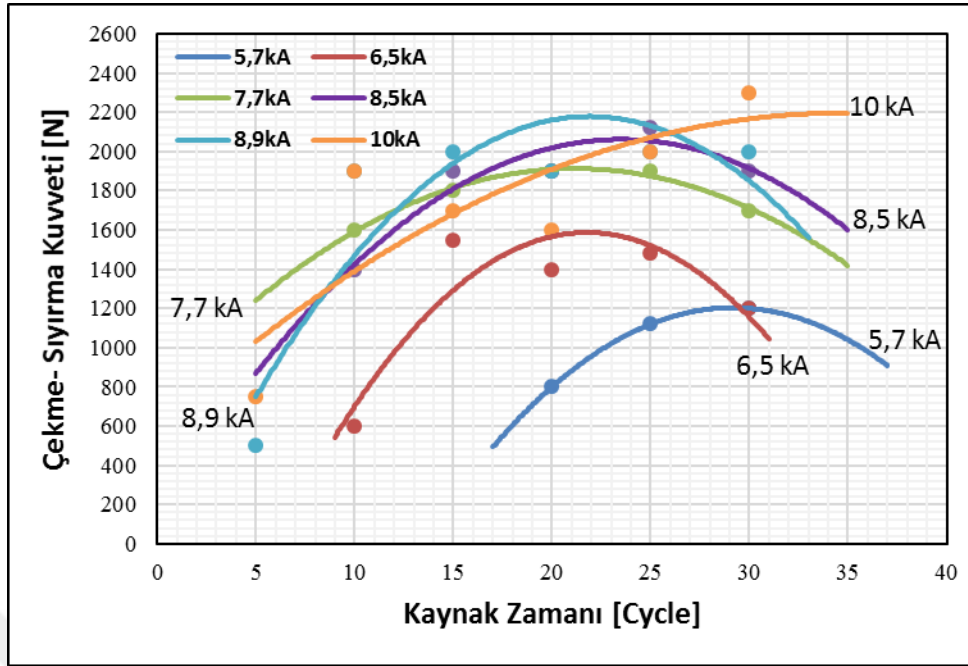
şiddetinde ulaşıldığı görülmektedir. Bu değerlerden sonra ısı girdisinin oldukça artması nedeniyle çekirdek kesitinde fişkırmalar ortaya çıkmış ve çekme-sıyırma dayanımı hızla düşmüştür.



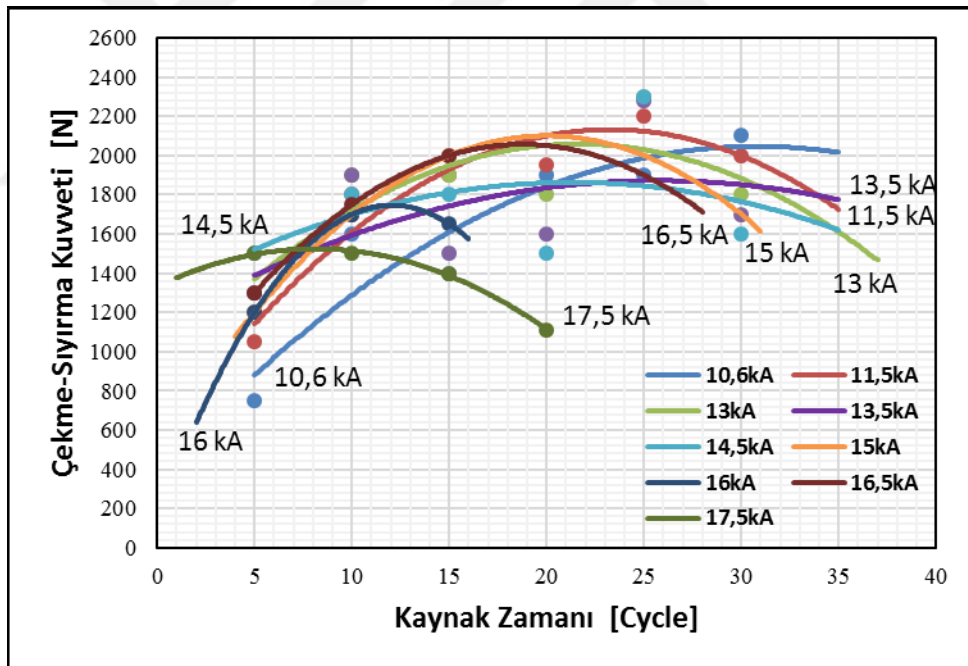
Şekil 5.4. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi

5.2.4. Kaynak zamanının TRIP bağlantıların çekme-sıyırma dayanımına etkisi

Şekil 5.5.'de görüldüğü gibi kaynak zamanının artmasıyla kaynak bölgesine verilen ısıнын artması sebebiyle çekme-sıyırma dayanımı da artar. 5,7 kA kaynak akım şiddetinde elde edilen bağlantıların çekme-sıyırma dayanımları oldukça düşüktür. İstenen çekme-sıyırma dayanımına sahip bağlantılar 6,5 kA akım şiddetinde 10-20 periyot arası; 7,69 kA akım şiddetinde 10-20 periyot arası; 8,5 kA ve 8,9 kA akım şiddetlerinde 10-25 periyot arası; 10 kA akım şiddetinde 10-30 periyot arası elde edilmiştir. 5 periyot kaynak zamanında istenen bağlantı elde edilememiştir. Kaynak zamanının belirli bir değerinden sonra aşırı dalma derinliği ve fişkırmalar ortaya çıkmıştır. Bu durum çekme-sıyırma dayanımının azalmasına yol açmaktadır.



Şekil 5.5. TRIP bağlantılarda (5,7 kA – 10 kA) kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi



Şekil 5.6. TRIP bağlantılarda (10,6 kA – 17,5 kA) kaynak zamanının çekme-sıyırma dayanımına etkisi

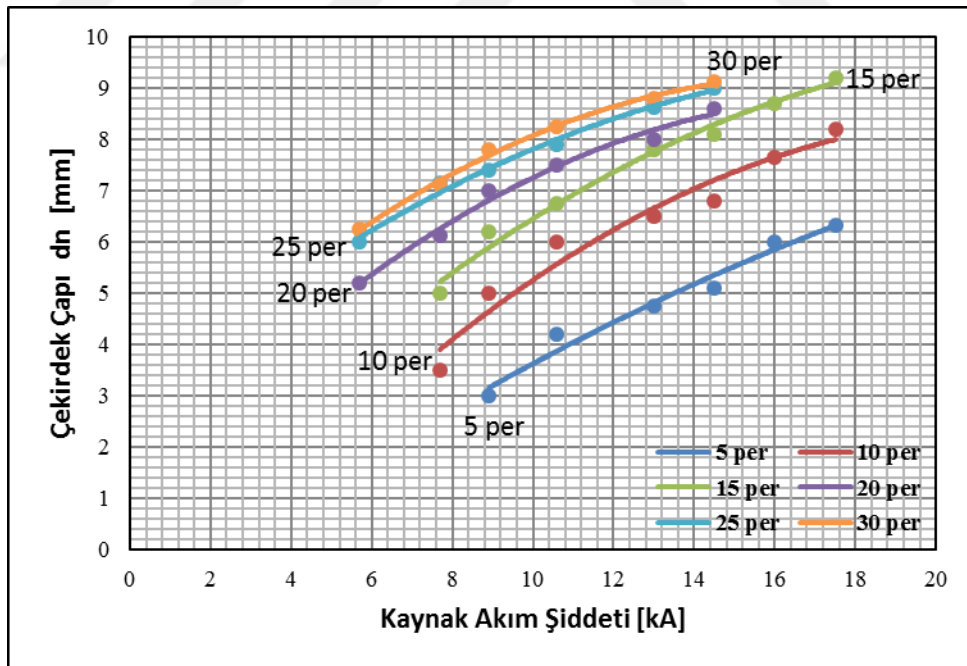
Şekil 5.6.'da görüldüğü gibi istenen çekme-sıyırma dayanımına sahip bağlantılar 10,6 kA akım şiddetinde 10-20 periyot arası; 11,5 kA, 13 kA, 13,5 kA, 14,5 kA ve 15 kA akım şiddetinde 10-25 periyot arası; 16 kA akım şiddetinde 10 periyot; 16,5 kA akım şiddetinde 10-15 periyot arası; 17,5 kA akım şiddetinde 10 periyot kaynak

zamanında elde edilmiştir. 5 periyot kaynak zamanında istenen bağlantı elde edilememiştir. Kaynak zamanının belirli bir değerinden sonra aşırı dalma derinliği ve fişkırmalar ortaya çıkmıştır. Bu durum çekme-sıyırma dayanımının azalmasına yol açmaktadır.

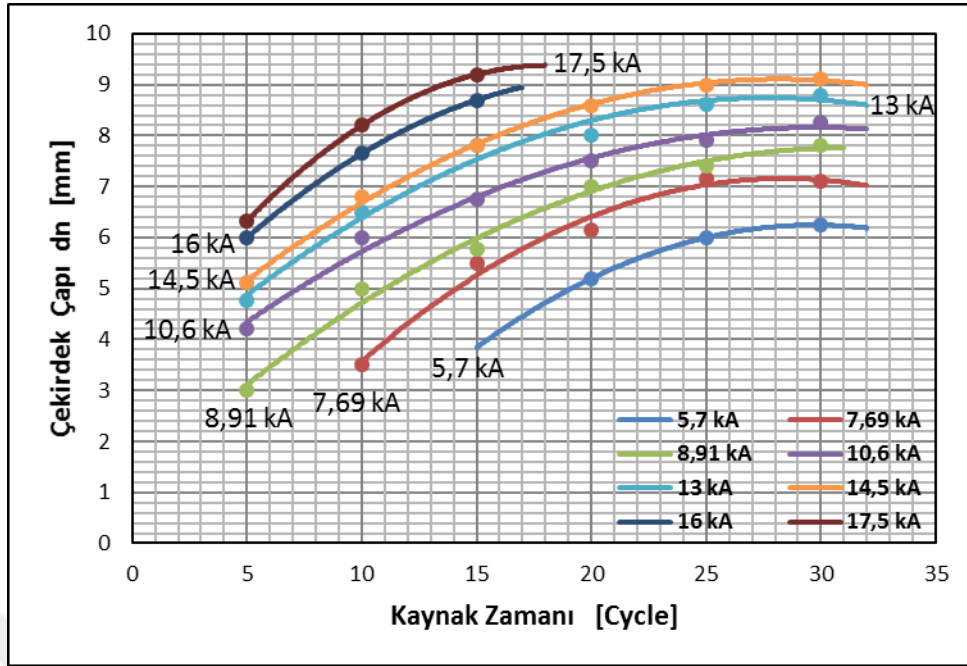
5.3. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Çekirdek Boyutlarına Etkisi

5.3.1. Kaynak akım şiddetinin ve zamanının TRIP bağlantıların çekirdek çapına etkisi

Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'de görülen kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasıyla birlikte ısı girdisi artmakta ve buna bağlı olarak çekirdek çapı da artmaktadır. Ancak kaynak akım şiddetinin ve zamanının belli bir değerinden sonra aşırı ısı girdisi nedeniyle malzeme ara kesitinde eriyen metal miktarı artmaktadır.



Şekil 5.7. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek çapına etkisi

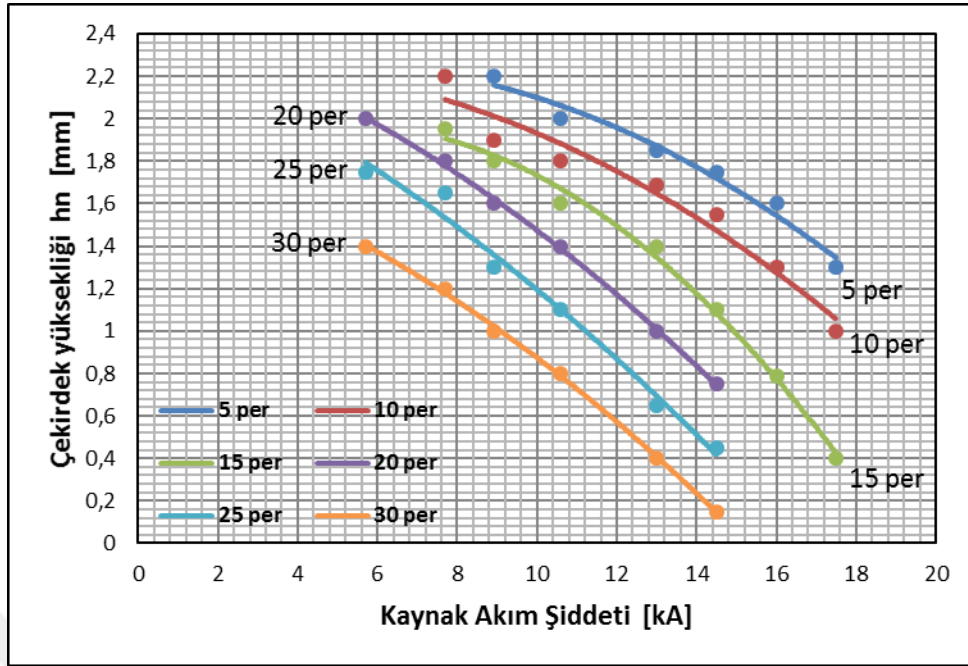


Şekil 5.8. TRIP bağlantılarda kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi

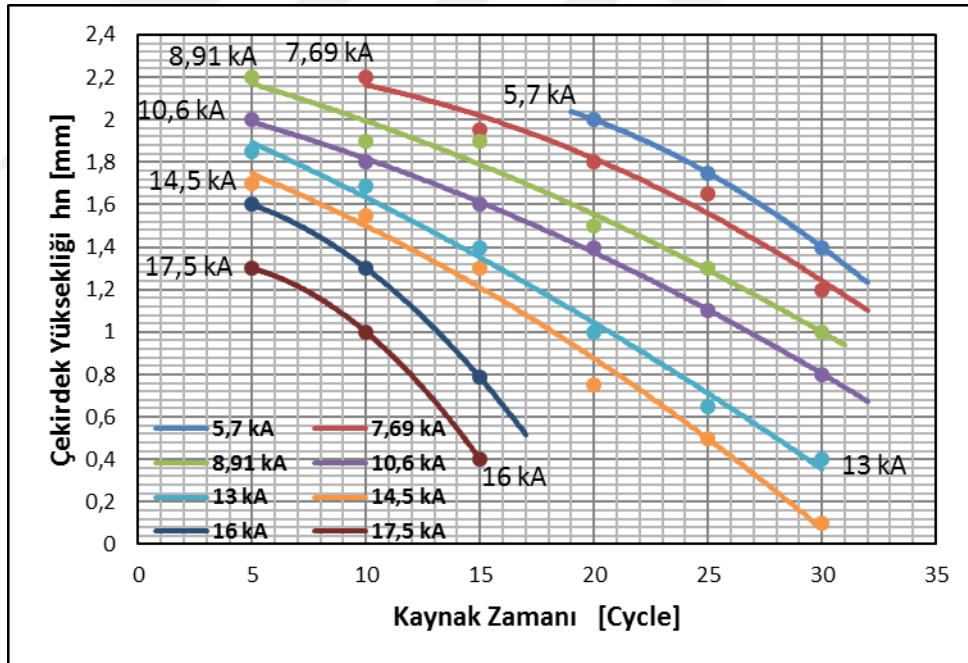
Bu yüzden derin elektrot izleri bir başka ifadeyle aşırı dalma derinliği ve metal fişkırmaları oluşmaktadır. Kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının artması ile çekirdek çapı artmaktadır.

5.3.2. Kaynak akım şiddetinin ve zamanının TRIP bağlantıların çekirdek yüksekliğine etkisi

Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da görüldüğü gibi kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasına rağmen çekirdek yüksekliği azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasıyla birlikte artan ısı girdisi sebebiyle eriyen metal miktarı artmakta ve bununla birlikte aşırı dalma derinliği ile çekirdek kesitinden fişkırmalar oluşmaktadır. Bu yüzden çekirdek yüksekliği azalmaktadır.

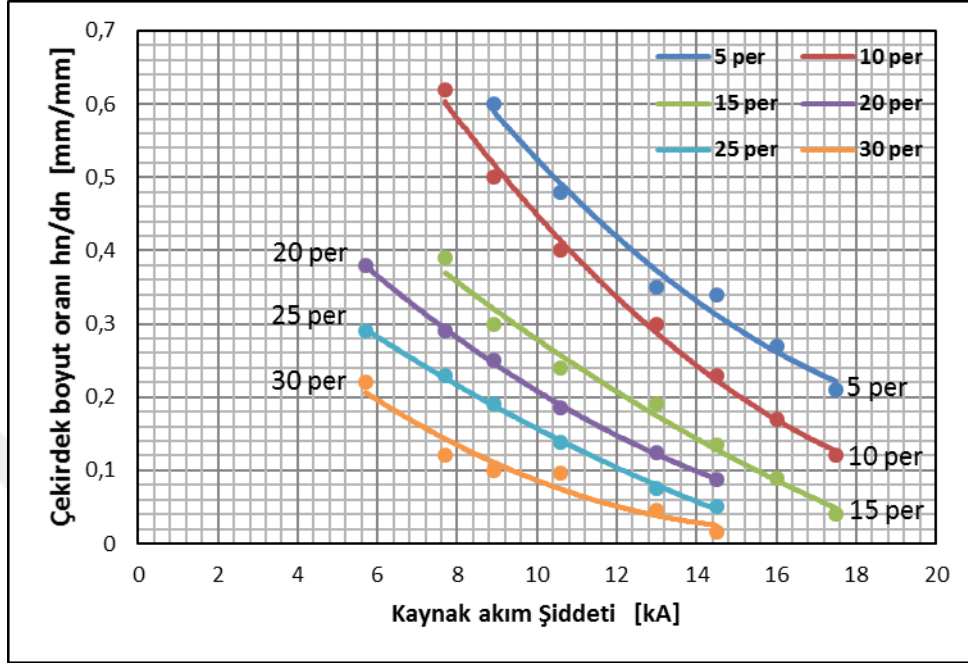


Şekil 5.9. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek yüksekliğine etkisi

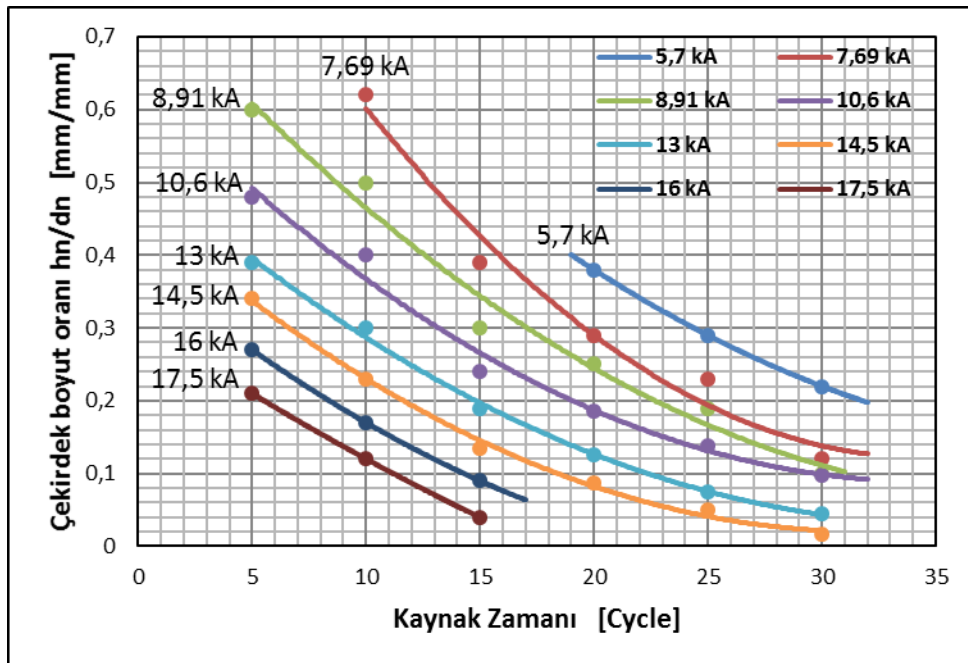


Şekil 5.10. TRIP bağlantılarda kaynak zamanının çekirdek yüksekliğine etkisi

5.3.3. Kaynak akım şiddetinin ve zamanının TRIP bağlantıların çekirdek boyut oranına etkisi



Şekil 5.11. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi

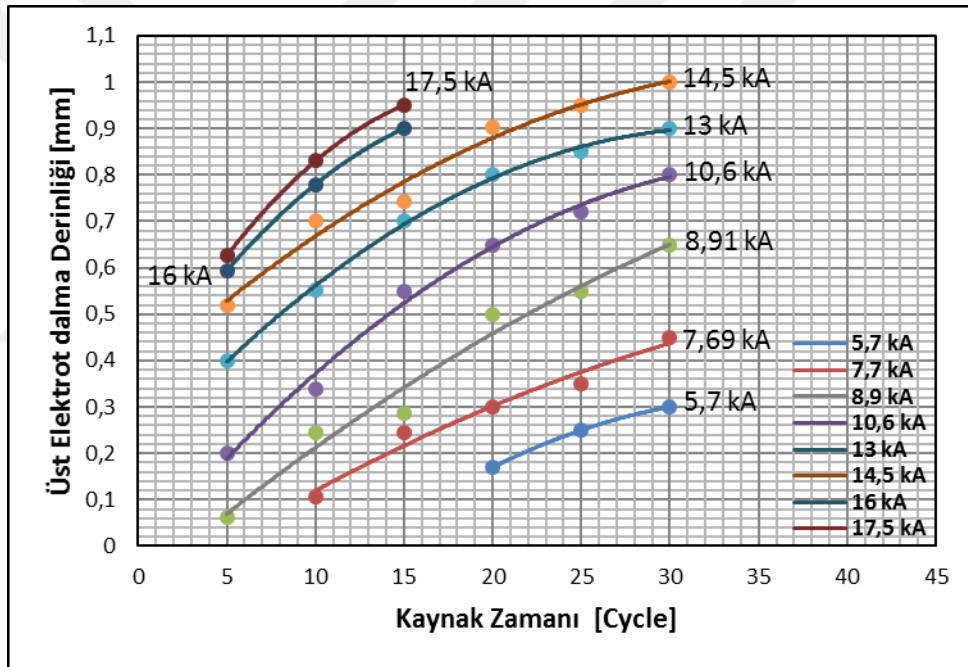


Şekil 5.12. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi

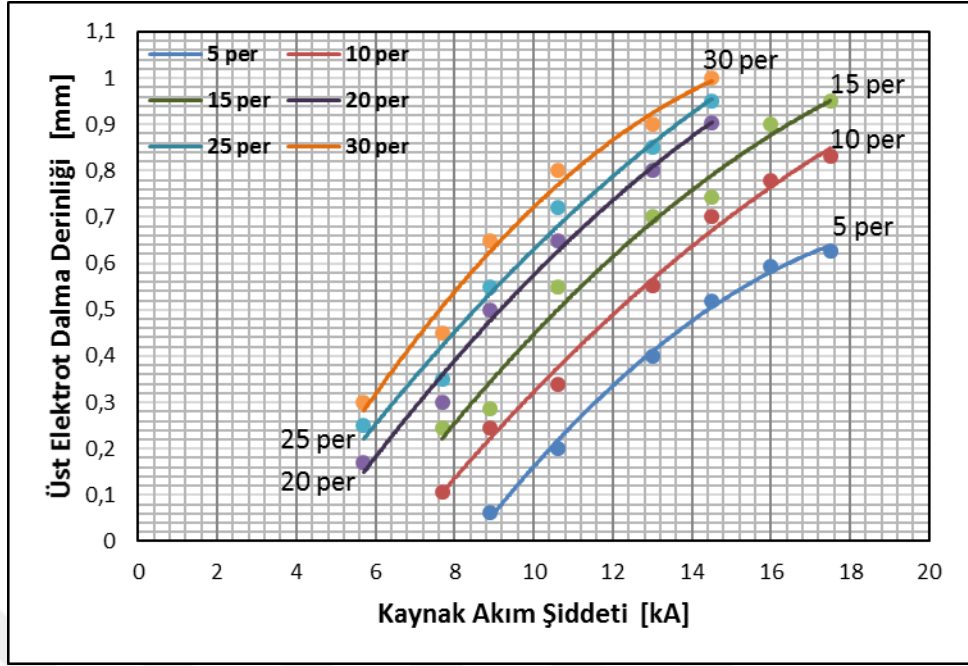
Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'de görüldüğü üzere kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasına rağmen çekirdek boyut oranı azalmaktadır. Bunun nedeni artan ısı girdisi sebebiyle elektrotların dalma derinliklerinin artması ve buna bağlı olarak çekirdek yüksekliğinin azalmasıdır.

5.4. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Dalma Derinliğine Etkisi

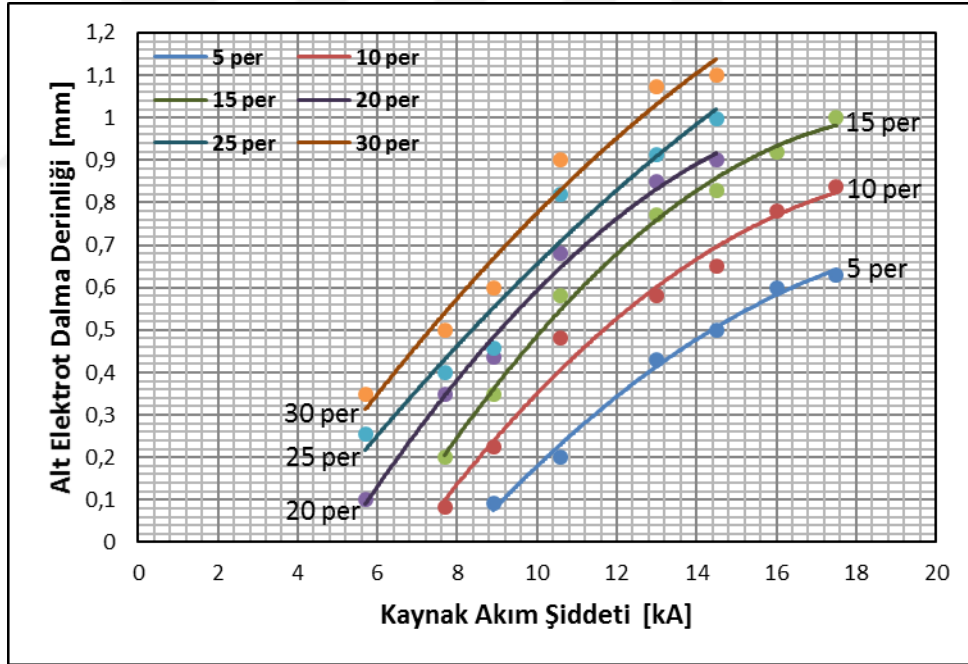
5.4.1. Kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının TRIP bağlantıların dalma derinliğine etkisi



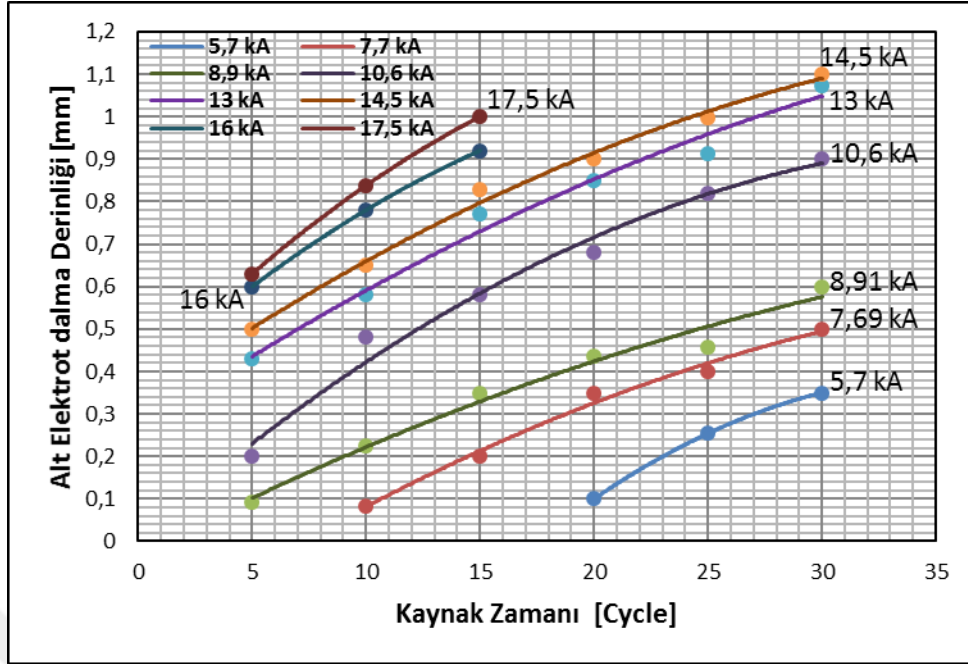
Şekil 5.13. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin üst elektrot dalma derinliğine etkisi



Şekil 5.14. TRIP bağlantılarda kaynak zamanının üst elektrot dalma derinliğine etkisi



Şekil 5.15. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin alt elektrot dalma derinliğine etkisi



Şekil 5.16. TRIP bağlantılarda kaynak zamanının alt elektrot dalma derinliğine etkisi

Şekil 5.13., Şekil 5.14., Şekil 5.15. ve Şekil 5.16.'da görüldüğü gibi akım şiddetinin ve kaynak zamanının artmasıyla birlikte elektrotların dalma derinliği de artmaktadır.

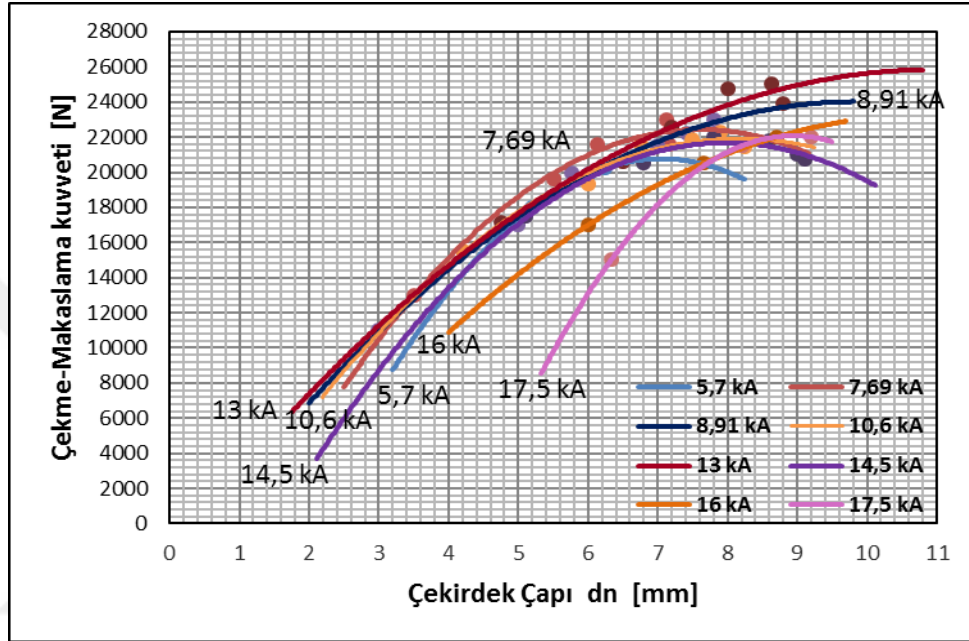
5.5. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Çekirdek Boyutlarının Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Dayanımına Etkisi

5.5.1. TRIP bağlantıların çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi

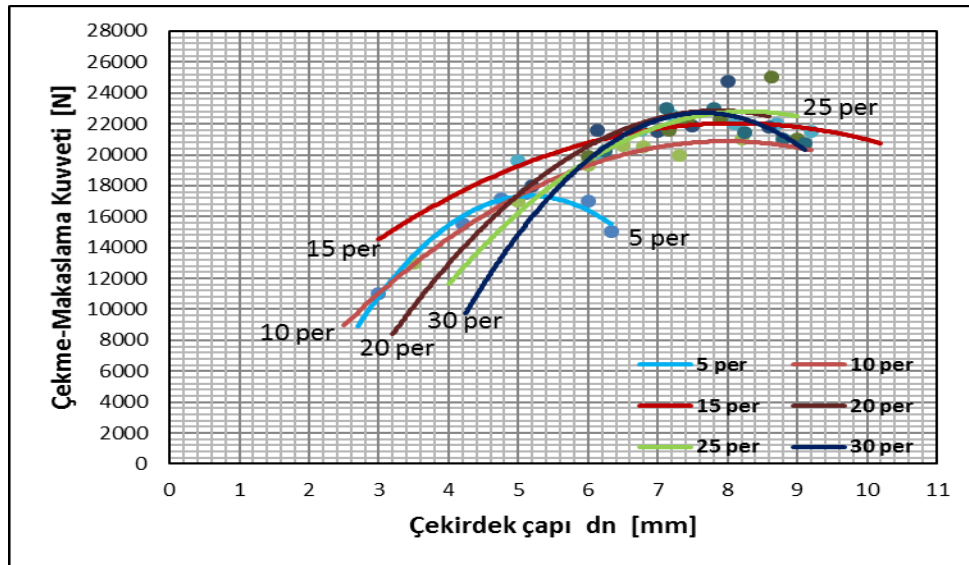
Şekil 5.17. ve Şekil 5.18.'de görüldüğü üzere çekirdek çapı arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. Kaynak çekirdeği büyüdükçe, yük taşıyan kesit artmakta ve o bölgedeki gerilme değeri küçülmektedir. Bunun sonucunda da, kaynaklı bölge daha yüksek kuvvet değerlerinde hasara uğramaktadır.

Maksimum çekme-makaslama dayanımı 10 periyotta 5,5 mm çekirdek çapında; 15 periyotta 7,5 mm çekirdek çapında; 20 periyotta 8 mm çekirdek çapında; 25 periyotta 8,6 mm çekirdek çapında; 30 periyotta 7,8 mm çekirdek çapında elde edilmiştir.

Bu noktalardan sonra çekirdek çapı artmasına rağmen dayanım azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fişkırmaların olmasıdır. Bu yüzden eriyen metal miktarının artması ve elektrot kuvveti nedeniyle çekirdek çapının artmasına rağmen dayanım azalmaktadır.



Şekil 5.17. TRIP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken- kaynak akım şiddeti sabit)

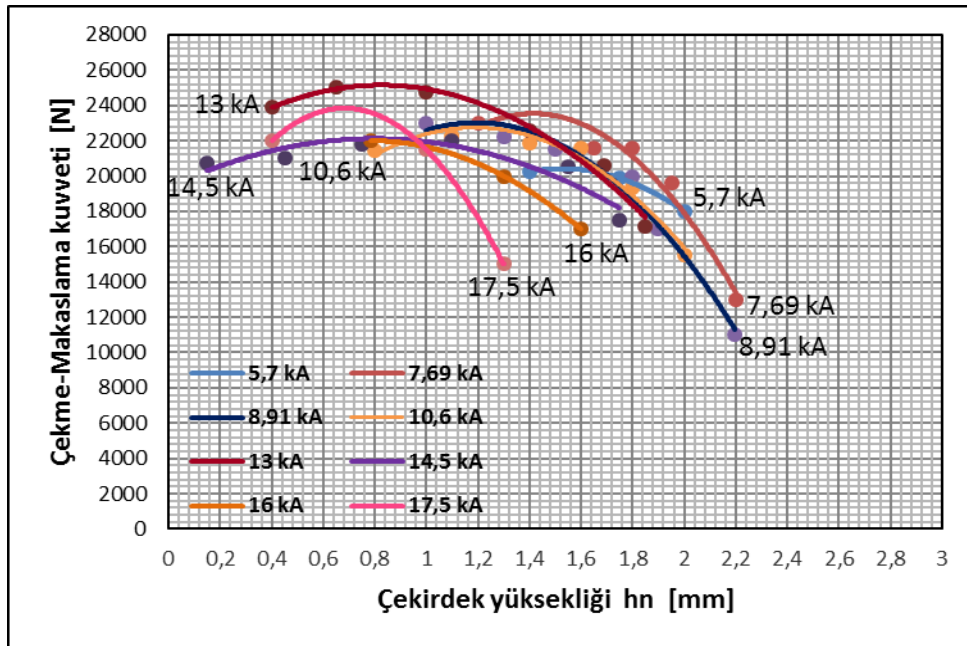


Şekil 5.18. TRIP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak zamanı sabit- kaynak akım şiddeti değişken)

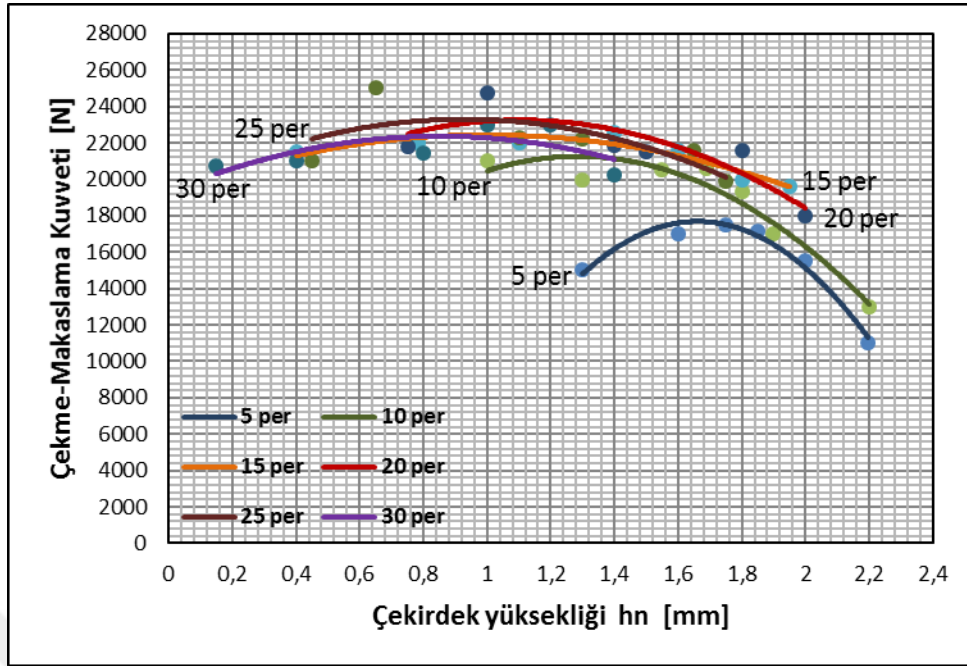
5.5.2. TRIP bağlantıların çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 5.19. ve 5.20.'de görüldüğü gibi çekirdek yüksekliği arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının artmasına rağmen çekirdek yüksekliğinin azalmasıdır. Kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının artmasıyla birlikte artan ısı girdisi sebebiyle elektrotların dalma derinlikleri artar ve buna bağlı olarak çekirdek yüksekliği azalır. Dolayısıyla düşük kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı değerlerinde düşük ısı girişine bağlı olarak çekme-makaslama dayanımı da düşüktür.

Maksimum çekme-makaslama dayanımı 5 periyotta 1,67 mm çekirdek yüksekliğinde; 10 periyotta 1,69 mm çekirdek yüksekliğinde; 15 periyotta 1,4 mm çekirdek yüksekliğinde; 20 periyotta 1 mm çekirdek yüksekliğinde; 25 periyotta 0,72 mm çekirdek yüksekliğinde; 30 periyotta 1 mm çekirdek yüksekliğinde elde edilmiştir. Bu noktalardan sonra çekirdek yüksekliği artmasına rağmen dayanım azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fişkırmaların olmasıdır.



Şekil 5.19. TRIP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken-kaynak akım şiddeti sabit)



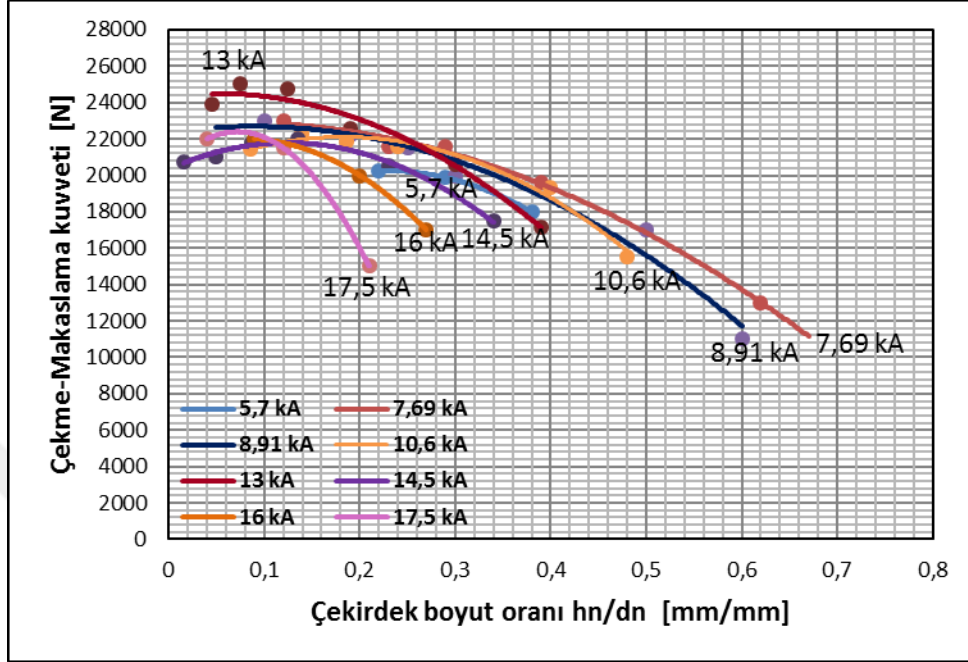
Şekil 5.20. TRIP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken -kaynak zamanı sabit)

5.5.3. TRIP bağlantıların çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi

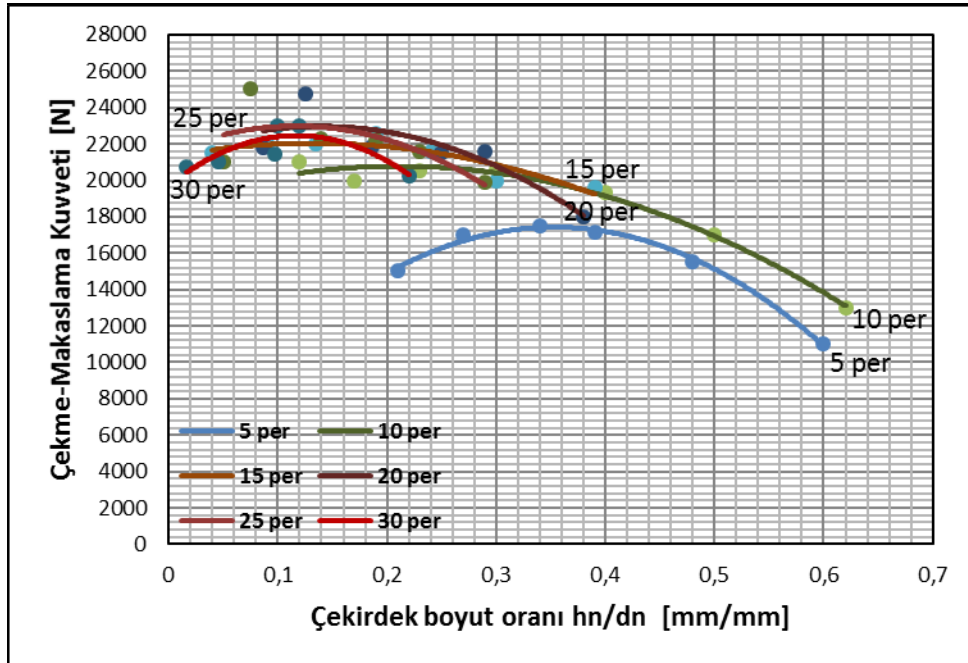
Şekil 5.21. ve Şekil 5.22.'de görüldüğü üzere çekirdek boyut oranı arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımının azaldığı görülmektedir. Kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının artmasıyla birlikte artan ısı girdisi sebebiyle elektrotların dalma derinlikleri artar ve buna bağlı olarak çekirdek yüksekliği azalırken çekirdek çapı artar. Yani çekirdek boyut oranı azalır. Çekirdek boyut oranının yüksek olduğu düşük kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı değerlerinde ise düşük ısı girişine bağlı olarak çekme-makaslama dayanımı da düşüktür.

Maksimum çekme-makaslama dayanımı 5 periyotta 0,34 çekirdek boyut oranında; 10 periyotta 0,3 çekirdek boyut oranında; 15 periyotta 0,19 çekirdek boyut oranında; 20 periyotta 0,13 çekirdek boyut oranında; 25 periyotta 0,07 çekirdek boyut oranında; 30 periyotta 0,19 çekirdek boyut oranında elde edilmiştir. Bu noktalardan sonra çekirdek boyut oranı artmasına rağmen dayanım azalmaktadır. Bunun nedeni

kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fişkırmaların olmasıdır.

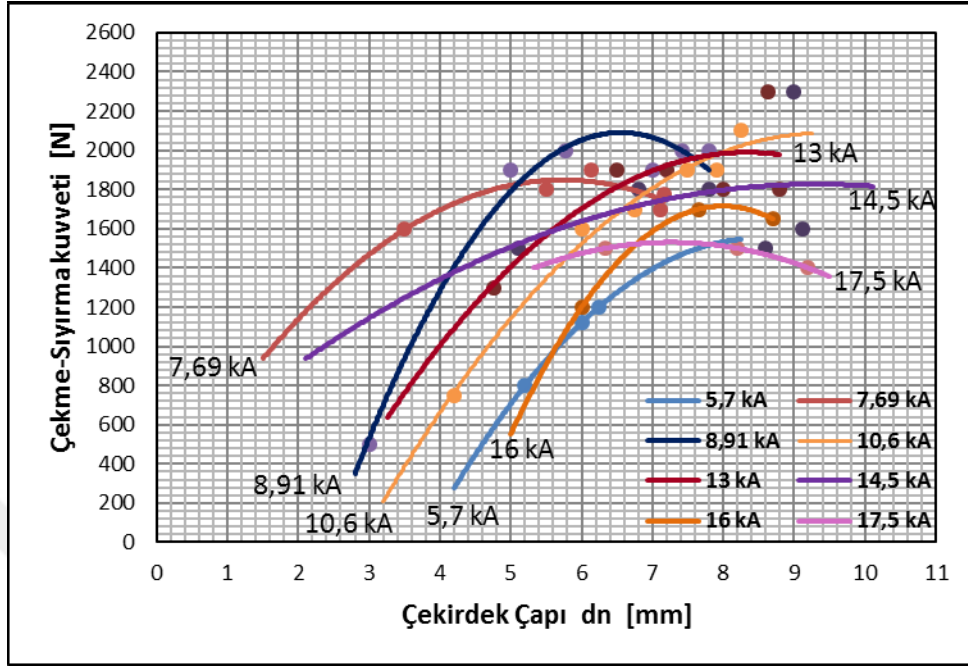


Şekil 5.21. TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti sabit -kaynak zamanı değişken)

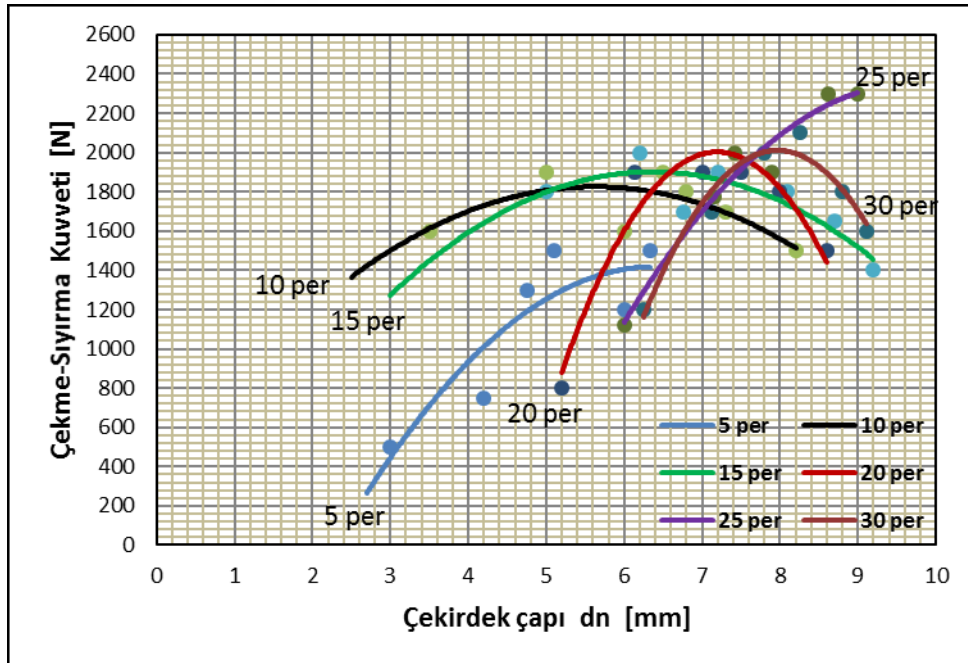


Şekil 5.22. TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken -kaynak zamanı sabit)

5.5.4. TRIP bağlantıların çekirdek çapının çekme-sıyrma dayanımına etkisi



Şekil 5.23. TRIP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyrma dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken-kaynak akım şiddeti sabit)



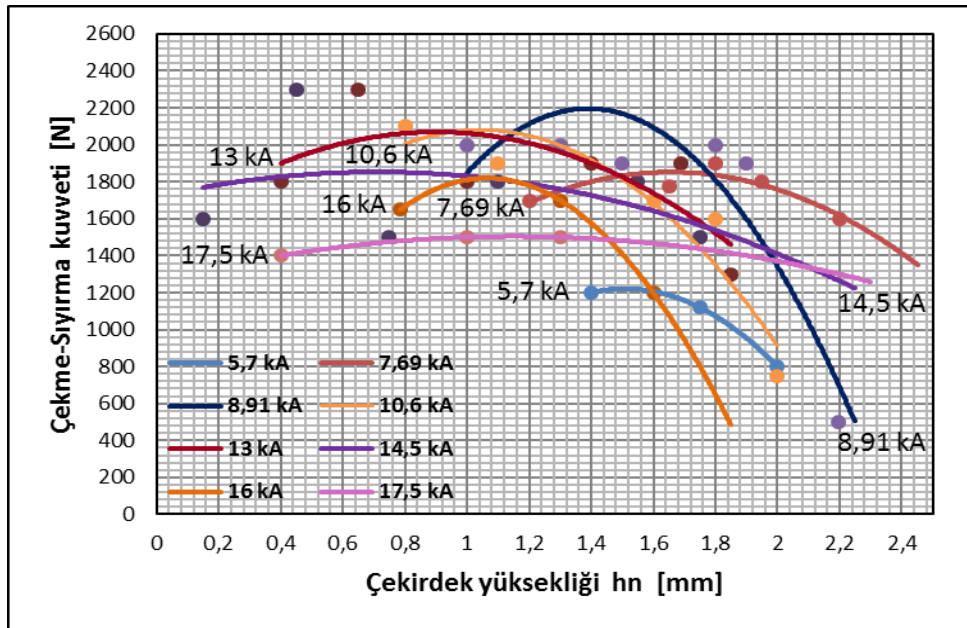
Şekil 5.24. TRIP bağlantılarda çekirdek çapının çekme-sıyrma dayanımına etkisi (kaynak zamanı sabit-kaynak akım şiddeti değişken)

Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'de görüldüğü üzere çekirdek çapı arttıkça, bağlantının çekme-sıyırma dayanımı da artmaktadır. Ancak belirli bir noktadan sonra çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi aşırı dalma derinliği ve fişkırmaya nedeniyle çekme-sıyırma dayanımı azalmaktadır.

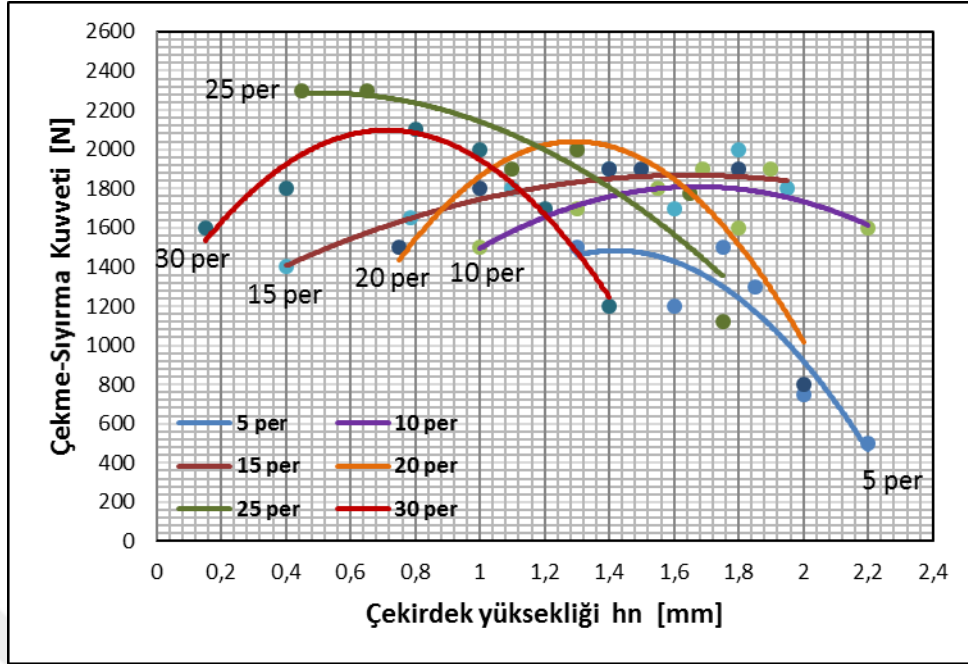
Maksimum çekme-sıyırma dayanımı 5 periyotta 1,76 mm çekirdek çapında; 10 periyotta 1,69 mm çekirdek çapında; 15 periyotta 1,8 mm çekirdek çapında; 20 periyotta 1,5 mm çekirdek çapında; 25 periyotta 0,64 mm çekirdek çapında; 30 periyotta 0,8 mm çekirdek çapında elde edilmiştir. Çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi bu noktalardan sonra çekirdek çapı artmasına rağmen çekme-sıyırma dayanımı azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fişkırmaların olmasıdır.

Bu yüzden eriyen metal miktarının artması ve elektrot kuvveti nedeniyle çekirdek çapının artmasına rağmen çekme-sıyırma dayanımı azalmaktadır.

5.5.5. TRIP bağlantıların çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi



Şekil 5.25. TRIP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken-kaynak akım şiddeti sabit)

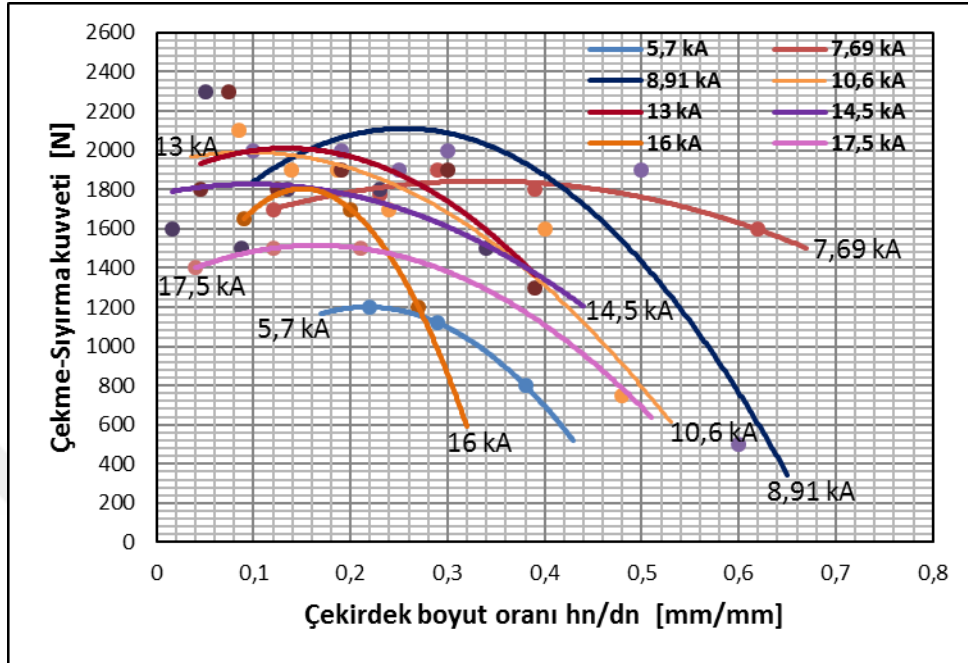


Şekil 5.26. TRIP bağlantılarda çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyrma dayanımına etkisi (kaynak zamanı sabit- kaynak akım şiddeti değişken)

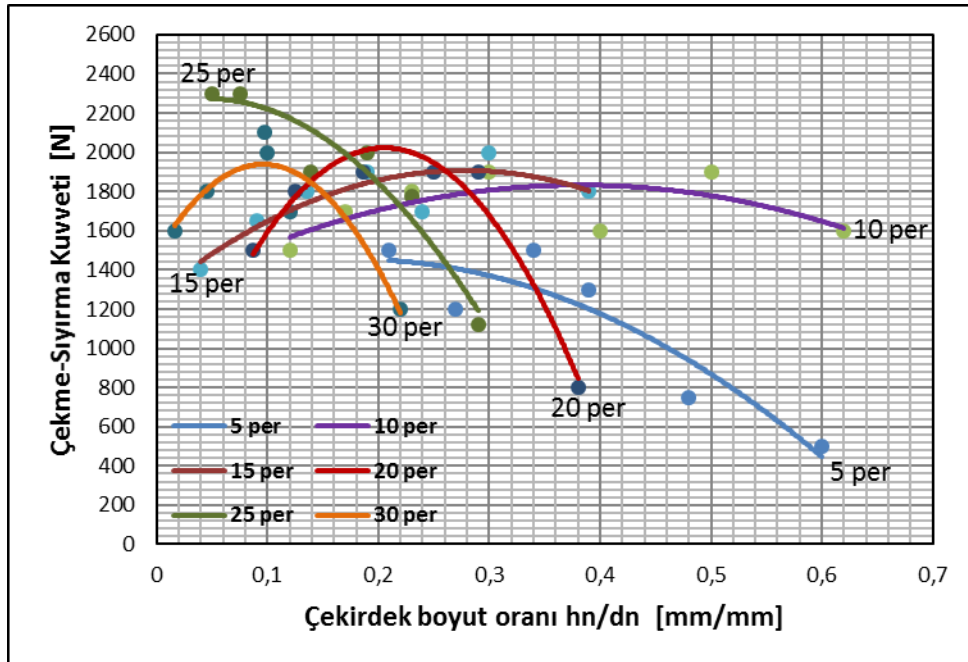
Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'da görüldüğü üzere maksimum çekme-sıyrma dayanımı 5 periyotta 6,3 mm çekirdek çapında; 10 periyotta 6,45 mm çekirdek çapında; 15 periyotta 6,2 mm çekirdek çapında; 20 periyotta 6,8 mm çekirdek çapında; 25 periyotta 9 mm çekirdek çapında; 30 periyotta 8,25 mm çekirdek çapında elde edilmiştir. Çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi bu noktalardan sonra çekirdek çapı artmasına rağmen çekme-sıyrma dayanımı azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fışkırmaların olmasıdır.

Bu yüzden eriyen metal miktarının artması ve elektrot kuvveti nedeniyle çekirdek çapının artmasına rağmen çekme-sıyrma dayanımı azalmaktadır.

5.5.6. TRIP bağlantıların çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi



Şekil 5.27. TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken-kaynak akım şiddeti sabit)



Şekil 5.28. TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak zamanı sabit - kaynak akım şiddeti değişken)

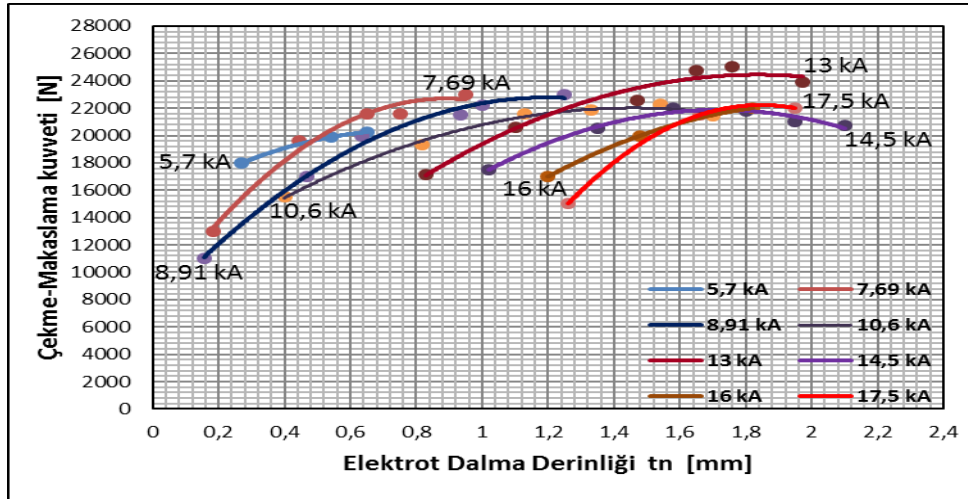
Şekil 5.27. ve Şekil 5.28.'de görüldüğü üzere çekirdek boyut oranı arttıkça, bağlantının çekme-sıyırma dayanımı da azalmaktadır. Kaynak akım şiddetinin ve zamanının artmasıyla birlikte artan ısı girdisi sebebiyle elektrotların dalma derinlikleri artar ve buna bağlı olarak çekirdek yüksekliği azalırken çekirdek çapı artar. Yani çekirdek boyut oranı azalır. Çekirdek boyut oranının yüksek olduğu düşük akım ve zaman değerlerinde ise düşük ısı girişine bağlı olarak çekme-makaslama dayanımı da düşüktür.

Maksimum çekme-sıyırma dayanımı 5 periyotta 0,34 çekirdek boyut oranında; 10 periyotta 0,5 çekirdek boyut oranında; 15 periyotta 0,3 çekirdek boyut oranında; 20 periyotta 0,38 çekirdek boyut oranında; 25 periyotta 0,075 çekirdek boyut oranında; 30 periyotta 0,1 çekirdek boyut oranında elde edilmiştir. Çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi bu noktalardan sonra çekirdek boyut oranı artmasına rağmen çekme-sıyırma dayanımı da azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fişkırmaların olmasıdır.

5.6. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Dalma Derinliklerinin Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Dayanıma Etkisi

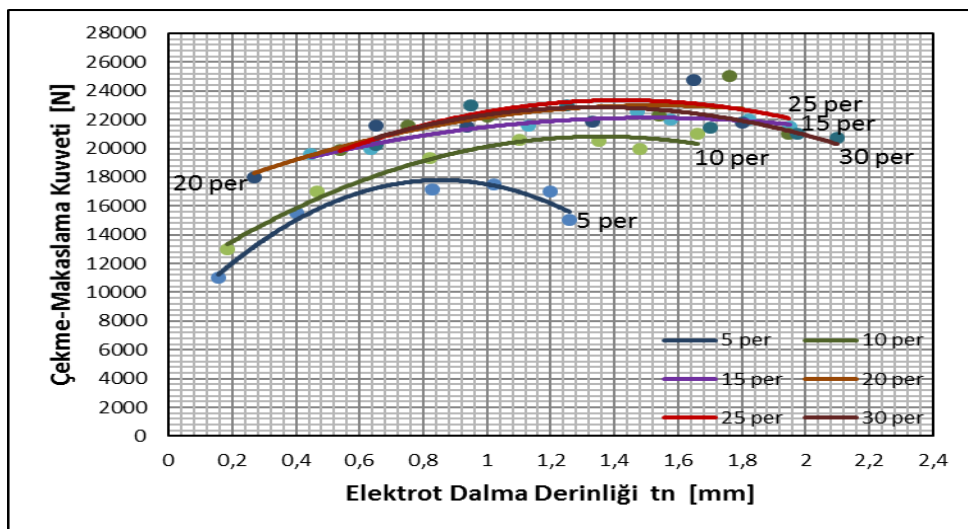
5.6.1. TRIP bağlantıların dalma derinliklerinin çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 5.29. ve Şekil 5.30.'da görüldüğü gibi dalma derinliği arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. Ancak belli bir noktadan sonra kaynak bölgesine giren yüksek ısı nedeniyle malzeme arakesitinde meydana gelen erimeye bağlı olarak fişkıрма oluşur. Bu yüzden dayanım düşmeye başlar.



Şekil 5.29. TRIP bağlantılarda çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken-kaynak akım şiddeti sabit)

Maksimum çekme-makaslama dayanımı 5 periyotta 1,02 mm dalma derinliğinde; 10 periyotta 1,66 mm dalma derinliğinde; 15 periyotta 1,45 mm dalma derinliğinde; 20 periyotta 1,65 mm dalma derinliğinde; 25 periyotta 1,75 mm dalma derinliğinde; 30 periyotta 1,25 mm dalma derinliğinde elde edilmiştir. Bu noktalardan sonra dalma derinliği artmasına rağmen dayanım azalmaktadır. Bunun nedeni kaynak bölgesine giren ısı miktarının oldukça artması ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinden fişkırmaların olmasıdır. Bu yüzden eriyen metal miktarının artması ve elektrot kuvveti nedeniyle dalma derinliğinin artmasına rağmen dayanım azalmaktadır.



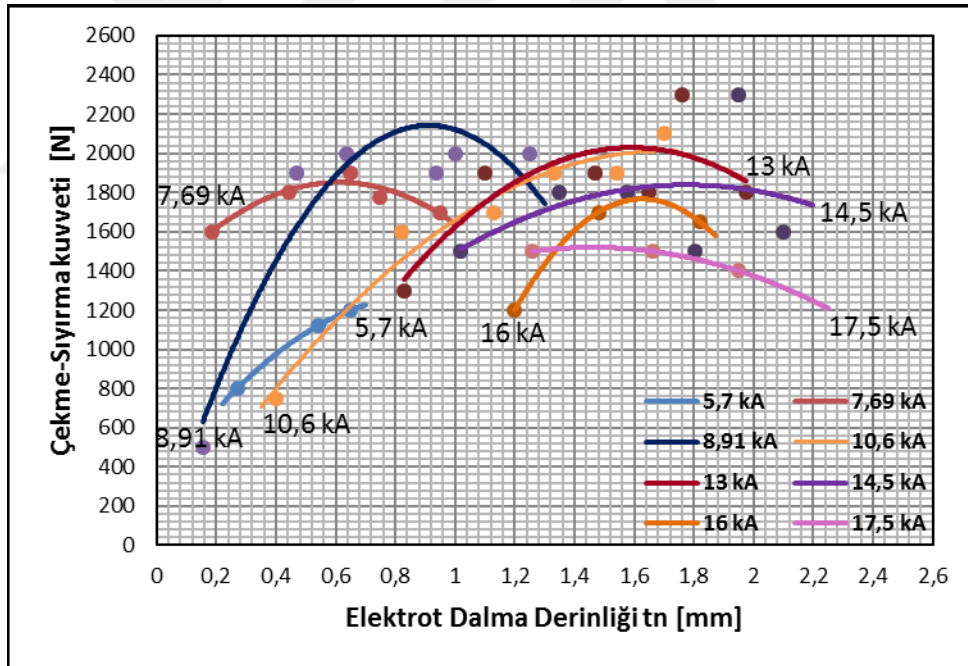
Şekil 5.30. TRIP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak zamanı sabit-kaynak akım şiddeti değişken)

5.6.2. TRIP bağlantılarının dalma derinliklerinin çekme-sıyrma dayanımına etkisi

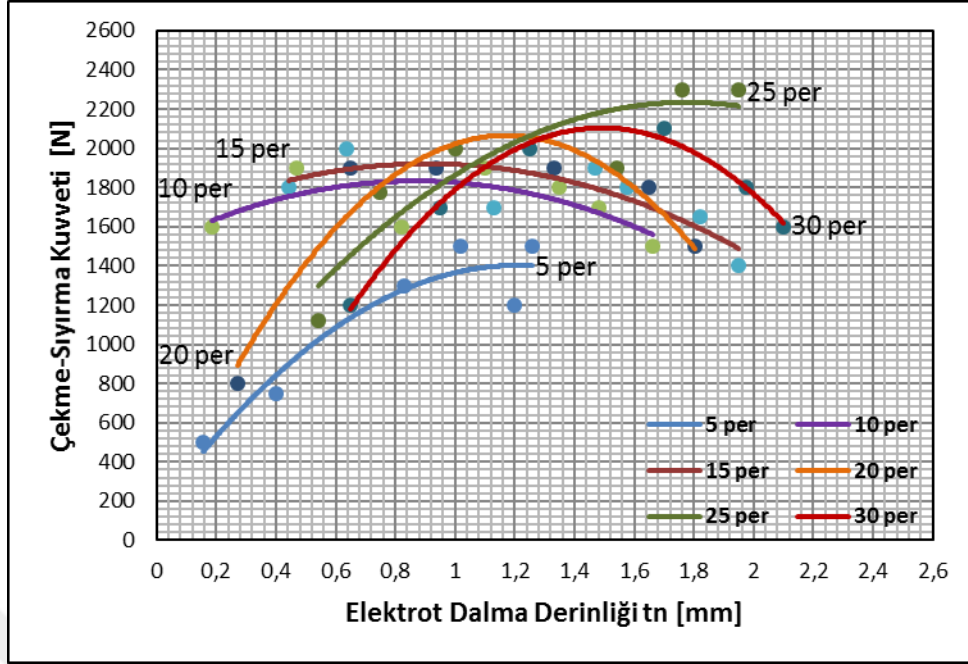
Şekil 5.31. ve Şekil 5.32.'de görüldüğü üzere dalma derinliği arttıkça, bağlantının çekme-sıyrma dayanımı da artmaktadır.

Ancak çekme-makaslama dayanımında olduğu gibi belli bir noktadan sonra fışırma nedeniyle çekme-sıyrma dayanımı da düşmeye başlar.

Maksimum çekme-sıyrma dayanımı 5 periyotta 1,02 mm dalma derinliğinde; 10 periyotta 1,1 mm dalma derinliğinde; 15 periyotta 0,62 mm dalma derinliğinde; 20 periyotta 0,92 mm dalma derinliğinde; 25 periyotta 1,76 mm dalma derinliğinde; 30 periyotta 1,7 mm dalma derinliğinde elde edilmiştir.



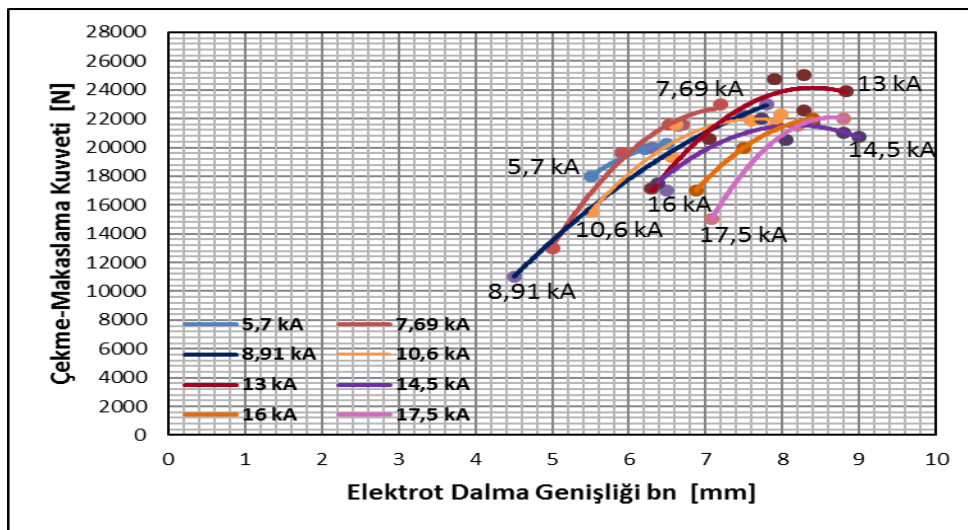
Şekil 5.31. TRIP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-sıyrma dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken-kaynak akım şiddeti sabit)



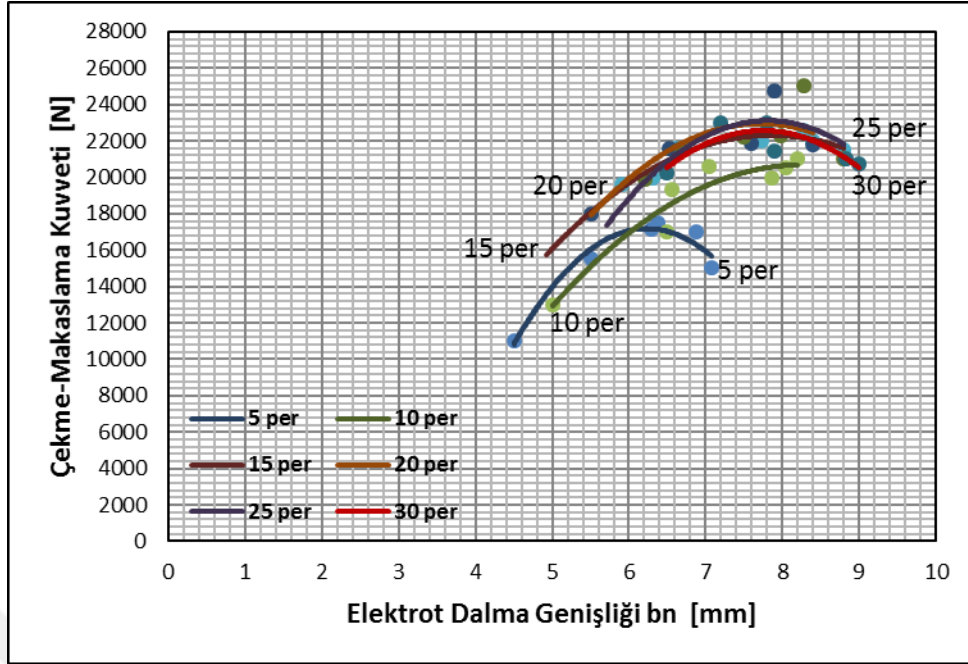
Şekil 5.32. TRIP bağlantılarda dalma derinliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak akım şiddeti değişken-kaynak zamanı sabit)

5.7. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Dalma Genişliklerinin Çekme-Makaslama ve Çekme-Sıyırma Dayanımına Etkisi

5.7.1. TRIP bağlantıların dalma derinliklerinin çekme-makaslama dayanımına etkisi



Şekil 5.33. TRIP bağlantılarda dalma genişliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken-kaynak akım şiddeti sabit)

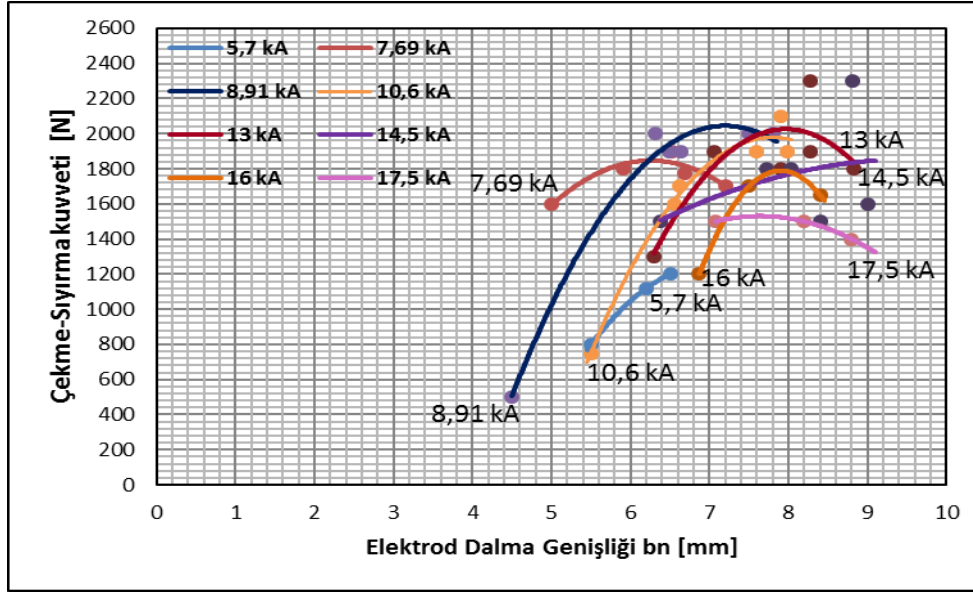


Şekil 5.34. TRIP bağlantılarda dalma genişliğinin çekme-makaslama dayanımına etkisi (kaynak zamanı sabit-kaynak akım şiddeti değişken)

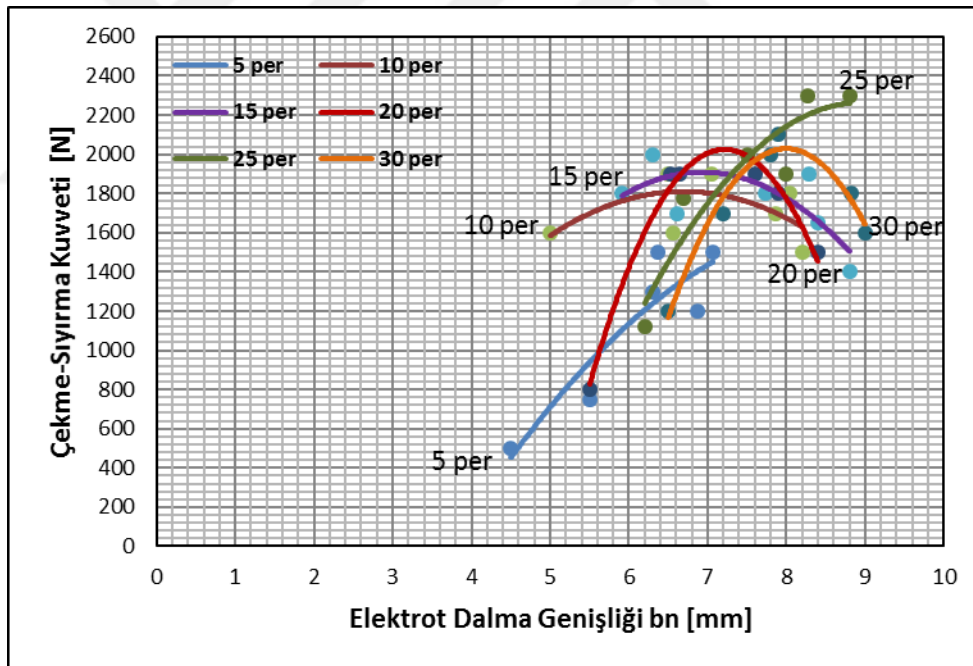
Şekil 5.33. ve Şekil 5.34.'de görüldüğü üzere dalma genişliği arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır. Fakat belli bir noktadan sonra çekme-makaslama dayanımı da düşmeye başlamıştır.

5.7.2. TRIP bağlantıların dalma derinliklerinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi

Şekil 5.35. ve Şekil 5.36.'da görüldüğü üzere dalma genişliği arttıkça, bağlantının çekme-sıyırma dayanımı da artmaktadır. Fakat belli bir noktadan sonra çekme-sıyırma dayanımı da düşmeye başlamıştır.

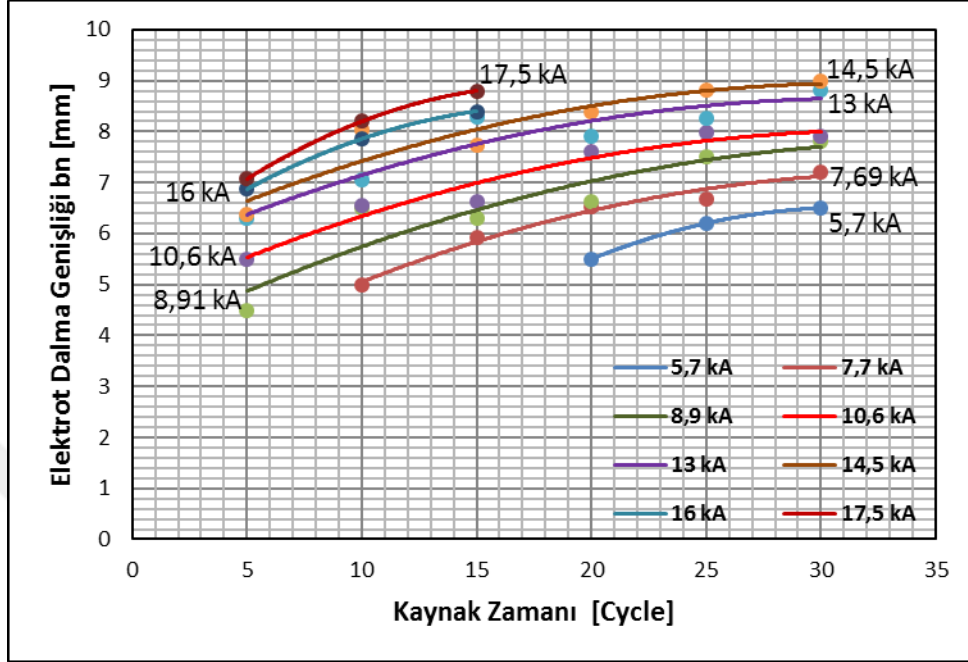


Şekil 5.35. TRIP bağlantılarda dalma genişliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak zamanı değişken- kaynak akım şiddeti sabit)

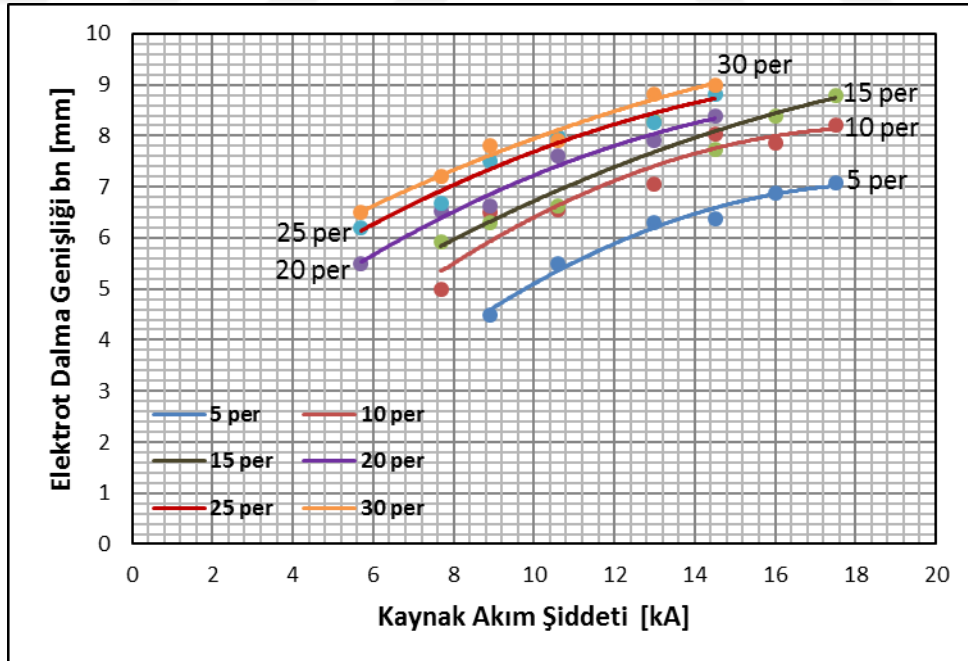


Şekil 5.36. TRIP bağlantılarda dalma genişliğinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi (kaynak zamanı sabit-kaynak akım şiddeti değişken)

5.8. TRIP Bağlantılarının Kaynak Zamanı ve Kaynak Akım Şiddetinin Dalma Genişliğine Olan Etkisi



Şekil 5.37. TRIP bağlantılarda kaynak zamanının dalma genişliğinin kaynak zamanına etkisi

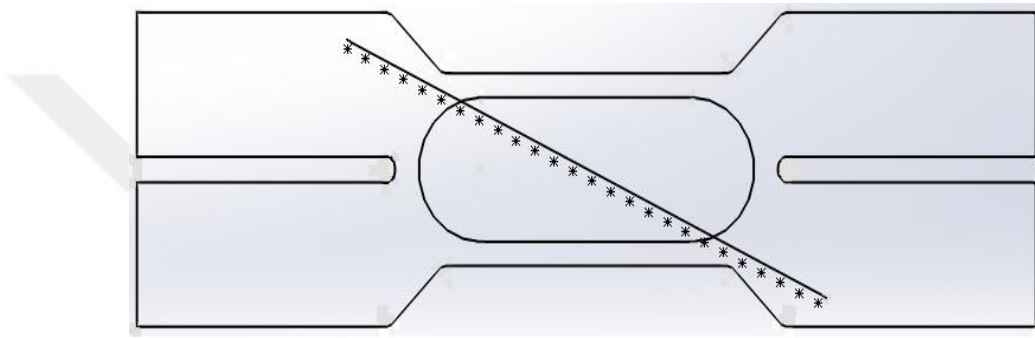


Şekil 5.38. TRIP bağlantılarda kaynak akım şiddetinin dalma genişliğine etkisi

Şekil 5.37. ve 5.38.'de görüldüğü gibi elektrot dalma derinliği artan kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetiyle artmıştır.

5.9. Kaynak Değişkenlerinin Bağlantıların Sertlik Değerlerine Etkisi

Nokta kaynağı yapılmış TRIP bağlantılarda Şekil 5.39.'da şematize edildiği biçimde esas metalden, ITAB bölgesinden ve kaynak çekirdeğinden çapraz doğrultuda mikrovickers sertlik değerleri ölçülmüştür.



Şekil 5.39. Sertlik ölçüm doğrultuları

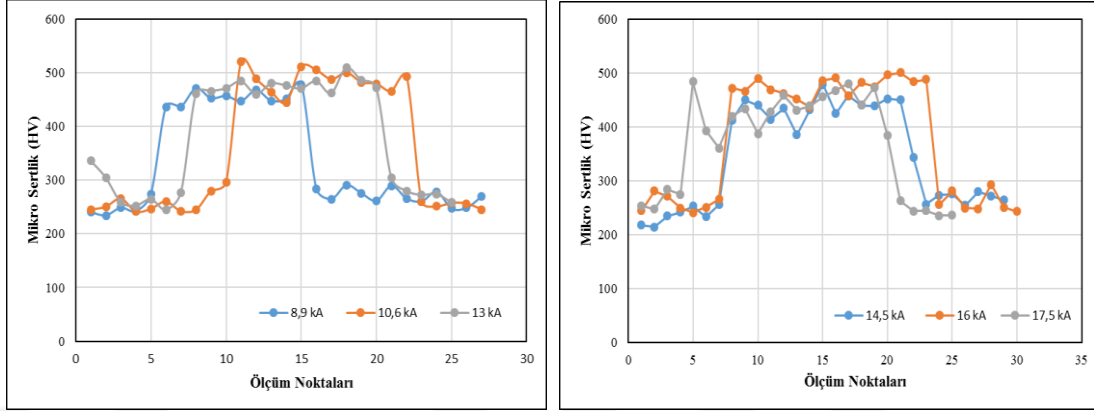
5.9.1. TRIP çelik sac çiflerinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak değişkenlerinin sertlik değerlerine etkisi

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

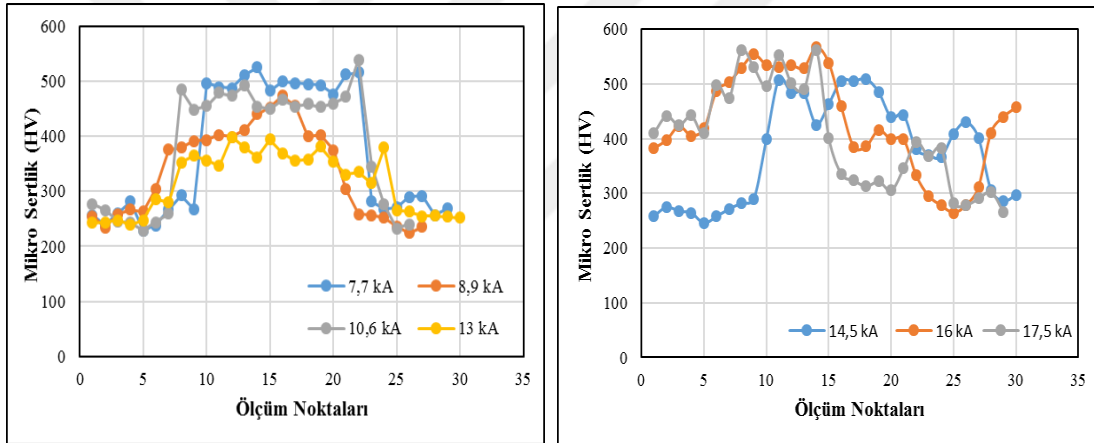
1. Esas metal
2. ITAB
3. Kaynak çekirdeği

Kaynak çekirdeğinden esas metale doğru gidildikçe sertlik değerlerinde bir düşüş olmaktadır. Bağlantıların esas metal bölgesinde ki sertlik değerleri ortalama 240 HV civarında iken kaynak çekirdeğine doğru gittikçe artmış ve kaynak bölgesinde ortalama olarak 450 HV civarı olarak ölçülmüştür. Kaynak çekirdeğinin sertliği esas

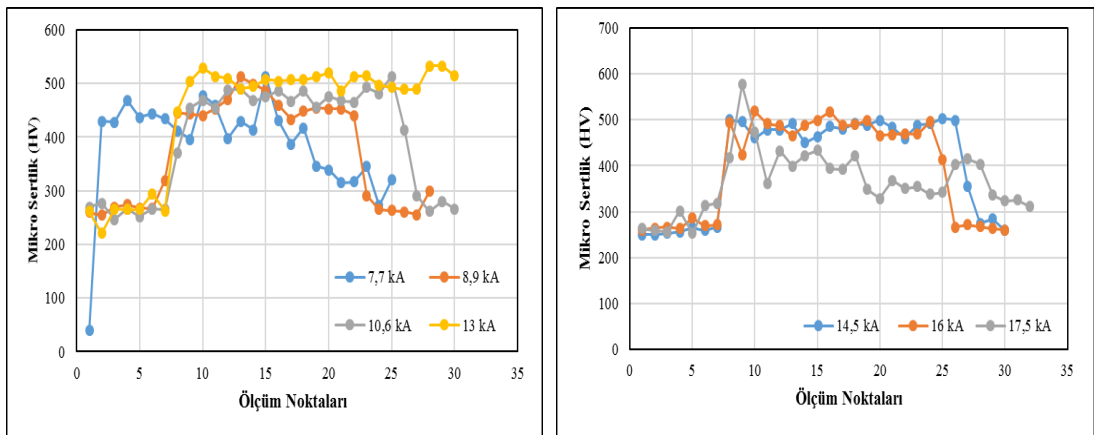
metalin sertliğinin neredeyse 2 katıdır. Bunun nedeni kaynak bölgesinin çok kısa bir zaman içerisinde ısınıp soğumasına bağlı olarak oluşan martenzit yapıdır.



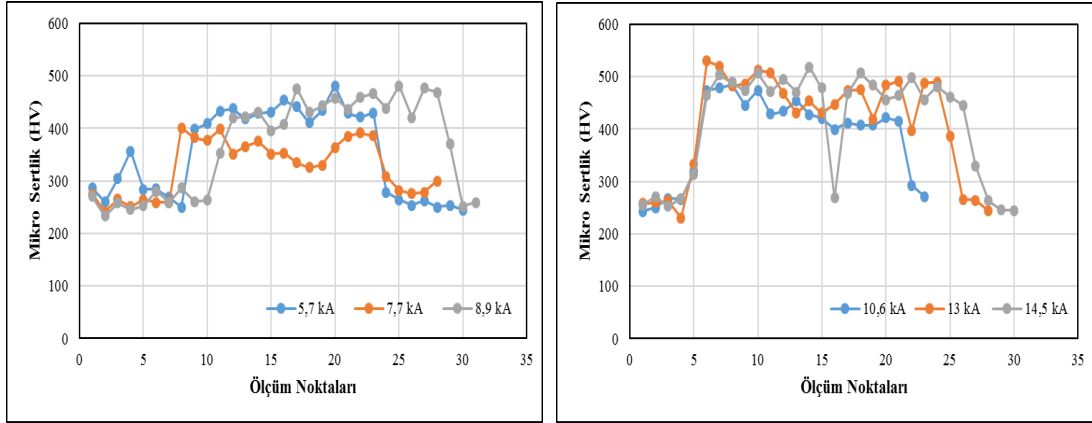
Şekil 5.40. TRIP bağlantılarının 5 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi



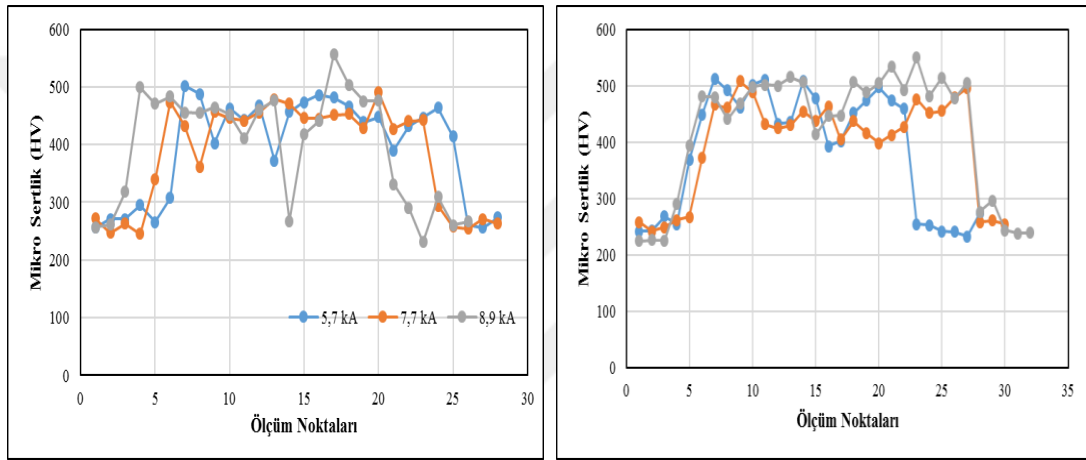
Şekil 5.41. TRIP bağlantılarının 10 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi



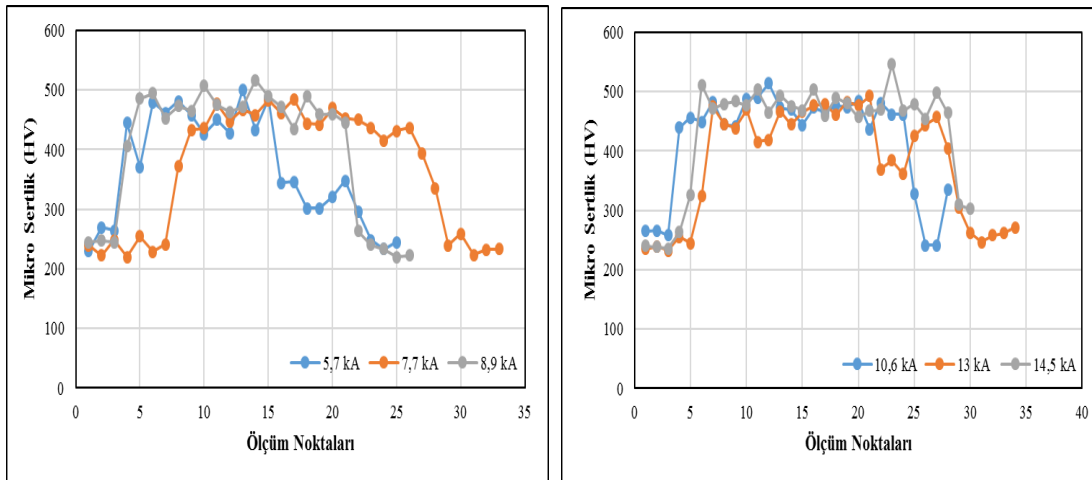
Şekil 5.42. TRIP bağlantılarının 15 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi



Şekil 5.43. TRIP bağlantılarının 20 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi



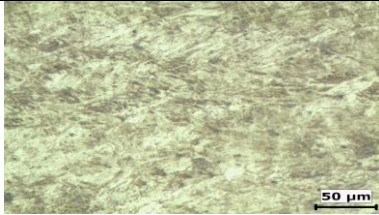
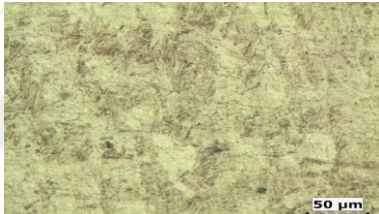
Şekil 5.44. TRIP bağlantılarının 25 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi



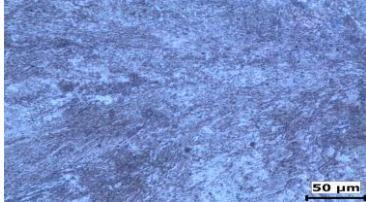
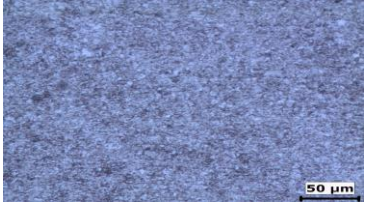
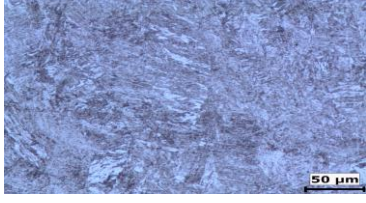
Şekil 5.45. TRIP bağlantılarının 30 periyot kaynak zamanında kaynak akım şiddetinin sertliğe etkisi

5.10. TRIP Çelik Sac Çiftlerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Bağlantıların Mikro Yapısına Etkisi

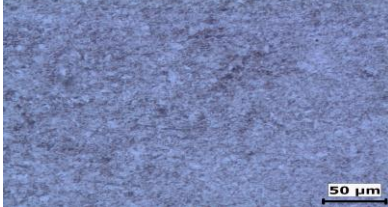
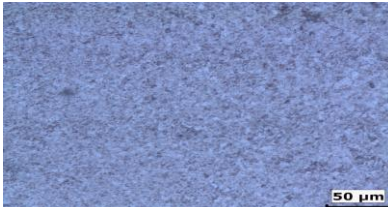
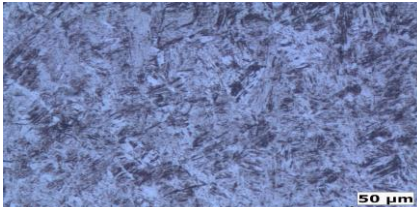
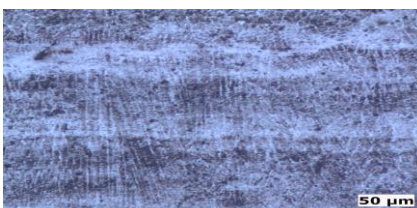
Tablo 5.1. 5 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları

Kaynak Akım Şiddeti	Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	Kaynak Çekirdeği
8,9 kA		
10,6 kA		
13 kA		
14,5 kA		
16 kA		
17,5 kA		

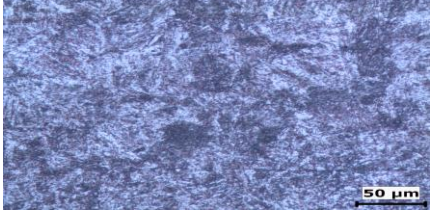
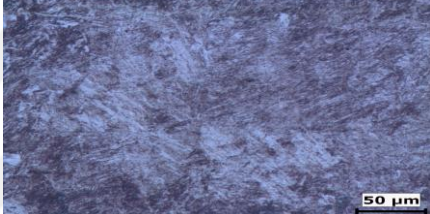
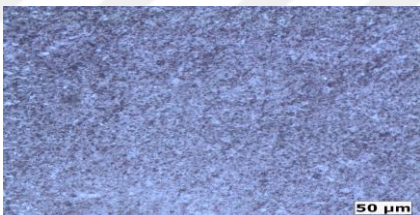
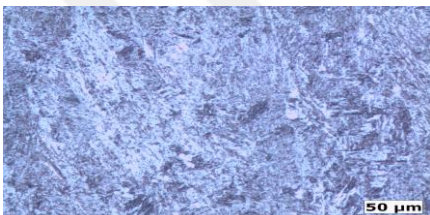
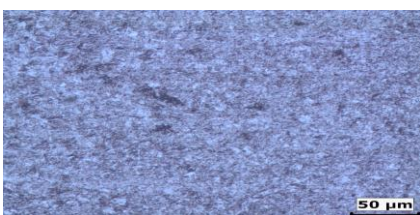
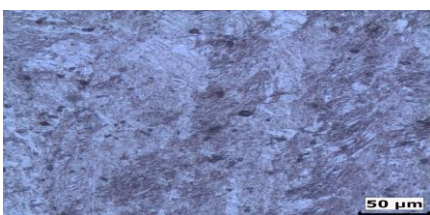
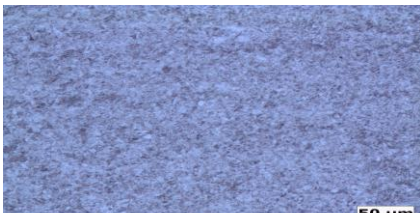
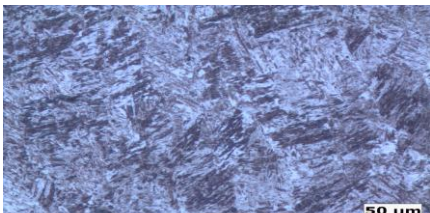
Tablo 5.2. 10 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları

Kaynak Akım Şiddeti	Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	Kaynak Çekirdeği
7,7 kA		
8,9 kA		
10,6 kA		
13 kA		
14,5 kA		
16 kA		
17,5 kA		

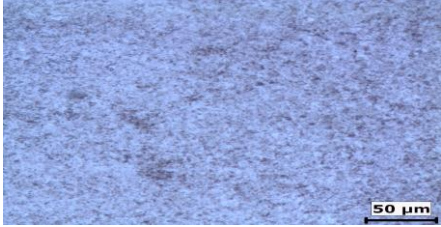
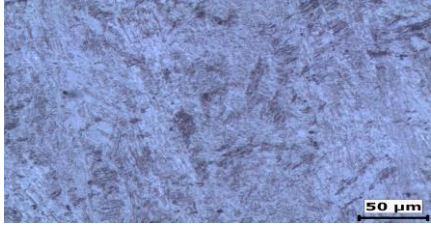
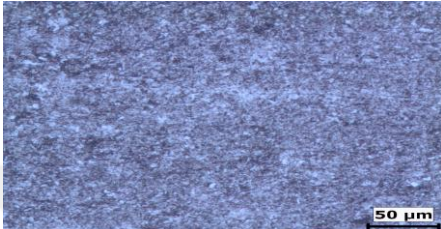
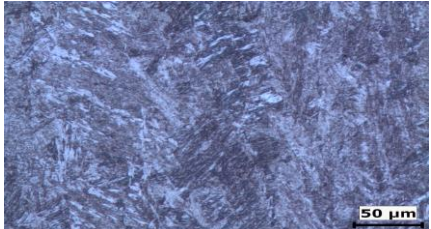
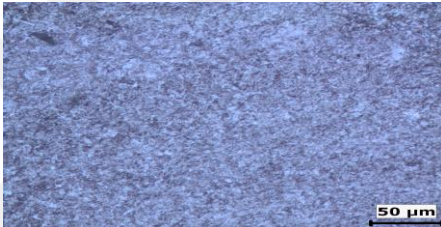
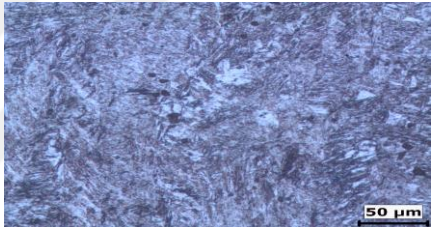
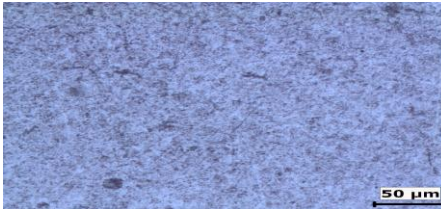
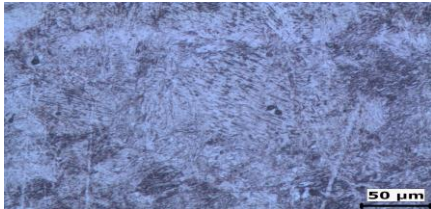
Tablo 5.3. 15 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları

Kaynak Akım Şiddeti	Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	Kaynak Çekirdeği
7,7 kA		
8,9 kA		
10,6 kA		
13 kA		
14,5 kA		
16 kA		
17,5 kA		

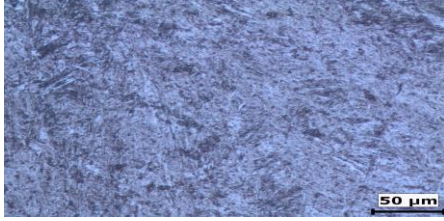
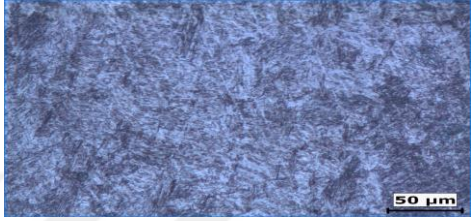
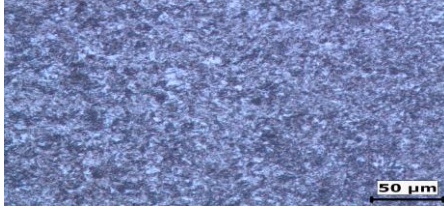
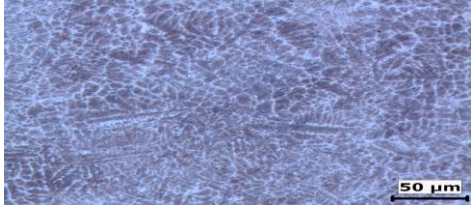
Tablo 5.4. 20 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları

Kaynak Akım Şiddeti	Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	Kaynak Çekirdeği
5,7 kA		
7,7 kA		
8,9 kA		
10,6 kA		
13 kA		
14,5 kA		

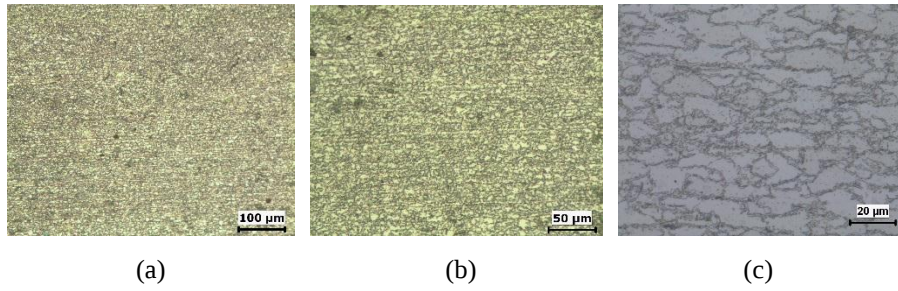
Tablo 5.5. 25 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları

Kaynak Akım Şiddeti	Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	Kaynak Çekirdeği
5,7 kA		
7,7 kA		
8,9 kA		
10,6 kA		
13 kA		
14,5 kA		

Tablo 5.6. 30 periyot kaynak zamanında bağlantının mikroyapı fotoğrafları

Kaynak Akım Şiddeti	Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	Kaynak Çekirdeği
5,7 kA		
7,7 kA		
8,9 kA		
10,6 kA		
13 kA		
14,5 kA		

Şekil 5.46.'da esas metale ait x100, x200 ve x500 büyütmelerde çekilen mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir.



Şekil 5.46. TRIP bağlantılarda ana malzemeye ait mikro yapı. (a) x100 büyütme, (b) x200 büyütme, (c) x500 büyütme

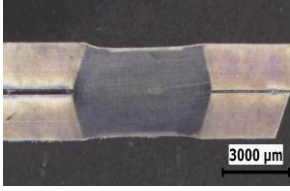
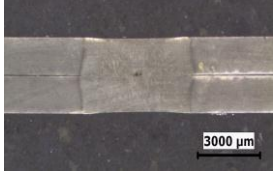
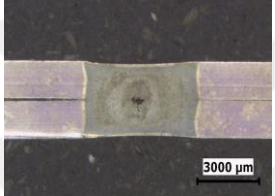
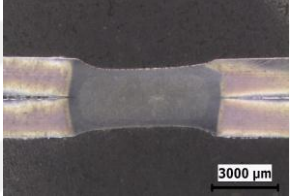
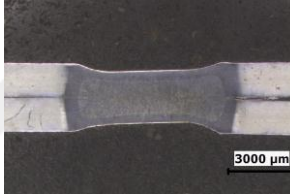
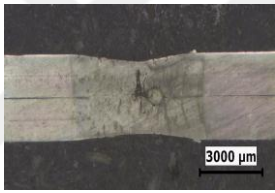
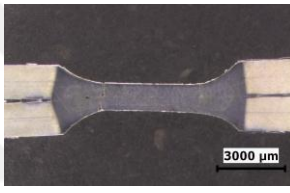
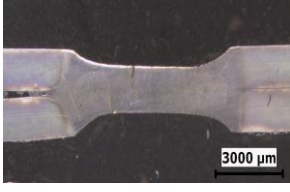
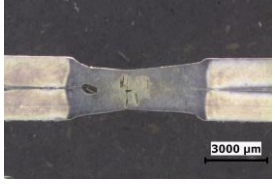
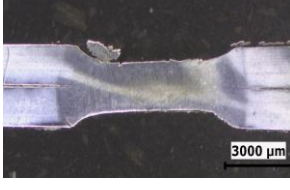
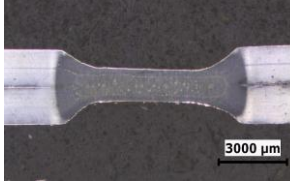
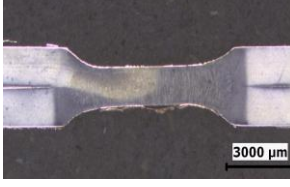
TRIP bağlantıların değişik kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanında ki esas metal, ITAB ve çekirdek bölgelerine ait x200 ve x500 büyütmelelerde çekilen mikro yapı fotoğraflarının bazıları Tablo 5.1., Tablo 5.2., Tablo 5.3., Tablo 5.4., Tablo 5.5. ve Tablo 5.6.'da gösterilmiştir.

TRIP bağlantılara ait mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde bağlı olarak yapının ferrit (açık renk alanlar) ve az bir miktar beynit ve kalıntı östenit (koyu renk alanlar) tanelerinden oluştuğu görülmektedir. Ancak kaynak bölgesine giren ısının etkisiyle koyu renk bölgelerin ve tane boyutlarının artarak tane sınırlarının yavaş yavaş kaybolduğu görülmektedir. Çekirdek bölgesinde malzemenin düşük karbon oranına rağmen hızlı soğuma nedeniyle martenzit bir yapı oluşmuştur.

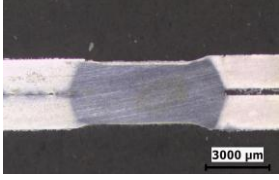
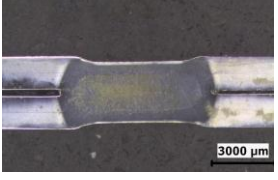
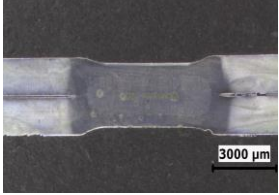
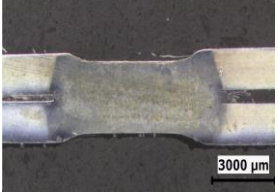
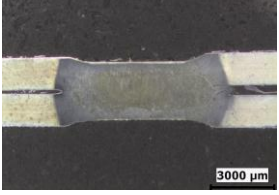
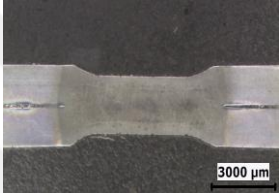
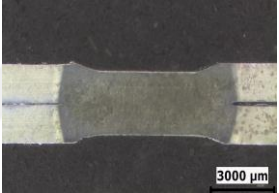
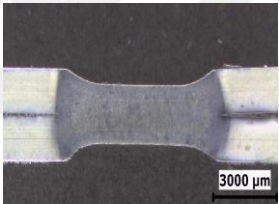
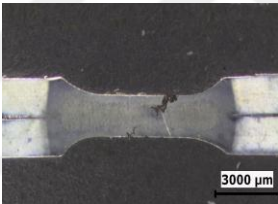
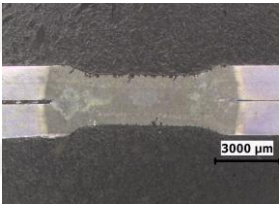
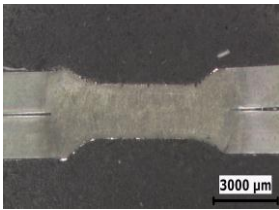
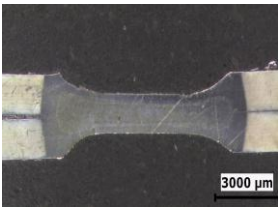
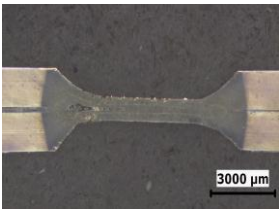
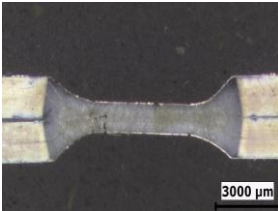
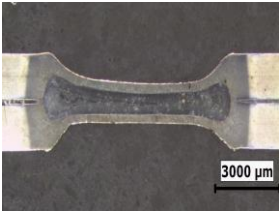
5.11. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında TRIP Çelik Sac Çiftlerine Ait Makro Yapı Fotoğrafları

Tablo 5.7. ve Tablo 5.8.'deki TRIP çelik sac çiftlerine ait makroyapı fotoğrafları incelendiğinde 5 periyotda kaynak çekirdeğinin oluşmadığı görülmektedir. 10, 15, 20, 25 ve 30 periyotta ise akım şiddetinin büyümesiyle birlikte çekirdek boyutlarının da büyüdüğü görülmektedir. 10 periyotta 13 kA'den sonra, 15 periyotta 10,6 kA'den sonra, 20 periyotta 10,6 kA'den sonra, 25 periyotta 8,9 kA'den sonra, 30 periyotta 8,9 kA'den sonra aşırı dalma derinliği ve fişkırmadan dolayı istenmeyen kaynak çekirdekleri oluşmuştur.

Tablo 5.7. 5 periyot, 10 periyot ve 15 periyot zamanındaki makroyapı fotoğrafları

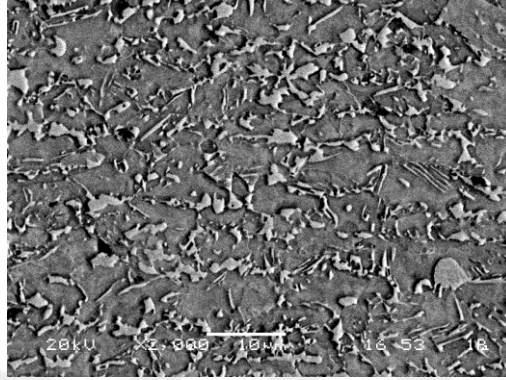
Kaynak Akım Şiddeti	5 Periyot	10 Periyot	15 Periyot
7,7 kA			
8,9 kA			
10,6 kA			
13 kA			
14,5 kA			
16 kA			
17,5 kA			

Tablo 5.8. 20 periyot, 25 periyot ve 30 periyot zamanındaki makroyapı fotoğrafları

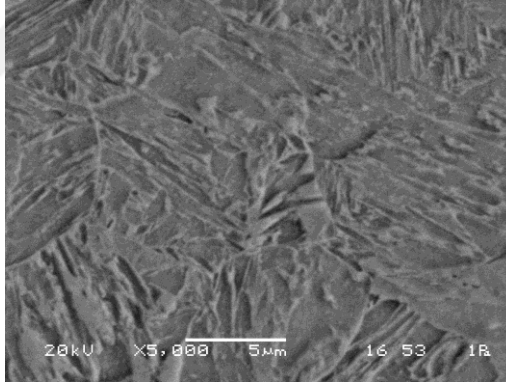
Kaynak Akım Şiddeti	20 Periyot	25 Periyot	30 Periyot
5,7 kA			
7,7 kA			
8,9 kA			
10,6 kA			
13 kA			
14,5 kA			

5.12. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında TRIP Çelik Sac Çiftlerine Ait SEM Görüntüleri

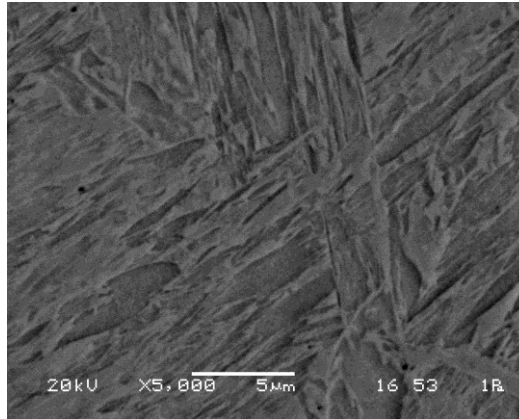
TRIP bağlantıların esas metal, ITAB ve kaynak çekirdeğine ait SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.47., Şekil 5.48. ve Şekil 5.49.'da verilmiştir.



Şekil 5.47. TRIP bağlantılarda esas metale ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme)



Şekil 5.48. TRIP bağlantılarda ITAB'ye ait SEM görüntüsü (x5000 büyütme)



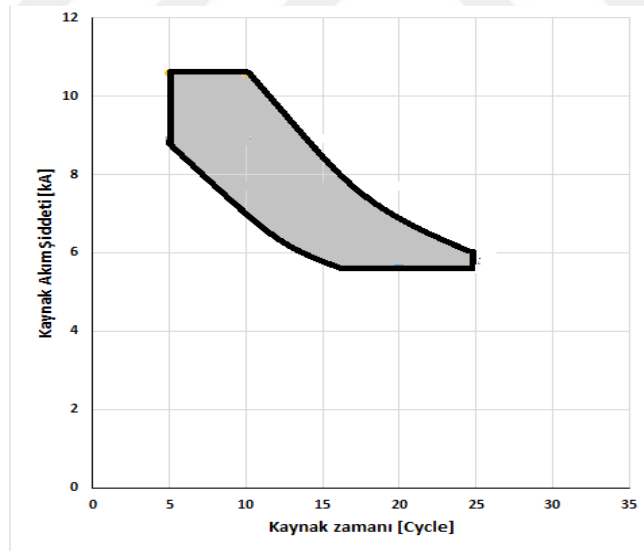
Şekil 5.49. TRIP bağlantılarda kaynak çekirdeğine ait SEM görüntüsü (x5000 büyütme)

5.13. Bağlantıların Kaynak Eğrisi (Weld Lobe)

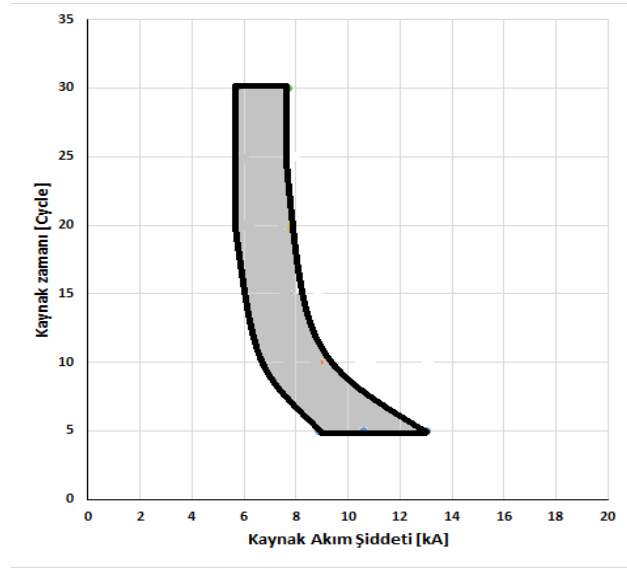
Elektrik direnç nokta kaynak uygulanmış bağlantıların kalitesini tanımlamada kullanılan en önemli özelliklerden biri çekirdek boyutlarıdır. Çekirdek boyutlarını etkileyen başlıca parametreler ise kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanıdır. Diğer değişkenler sabit tutulmak kaydıyla kaynak akım şiddeti ve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

5.13.1. Elektrik direnç nokta kaynağında TRIP sac çiftlerine ait kaynak eğrisi (Weld Lobe)

TRIP çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında kabul edilebilir bağlantıların elde edildiği kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanını gösteren kaynak eğrileri (weld lobe) Şekil 5.50. ve Şekil 5.51.'de verilmiştir.



Şekil 5.50. TRIP bağlantılara ait kaynak eğrisi (weld lobe)



Şekil 5.51. TRIP bağlantılara ait kaynak eğrisi (weld lobe)

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, otomotiv endüstrisinde kullanılan TRIP 800 atmosferik korozyona dayanıklı çelik sac lar elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmek suretiyle nokta kaynak bağlantılı numune serileri elde edilmiştir. Deneylerde kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı değiştirilirken elektrot kuvveti, sıkıştırma ve tutma zamanları sabit bırakılmıştır. Ön deneylerde kaynak akım şiddeti ve zamanı değiştirilerek, kaynak işleminin gerçekleştiği en küçük değerden malzemelerin delindiği en büyük değere kadar kaynak yapılmıştır. Ön deneylerin sonuçlarına göre her deney koşulunda yedi seri olarak elektrik direnç nokta kaynak bağlantılı parçalar elde edilmiştir. İlk üç seri çekme-makaslama dört, beş ve altıncı seriler çekme-sıyırma deneyine tabi tutulmuş, yedinci seri ise mikro vickers sertlik ölçümleri ile çekirdek boyut ölçümlerinin yapılması, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile mikro yapı fotoğraflarının çekilmesi için kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

1. 1,5 mm TRIP 800 atmosferik korozyona dayanıklı çelik sac ların elektrik direnç nokta kaynağında maksimum çekme-makaslama dayanımı 25 periyot kaynak zamanı ve 13 kA kaynak akım şiddetinde elde edilmiştir.

Maksimum çekme-sıyırma dayanımına ise 25 periyot kaynak zamanı ve 13 kA kaynak akım şiddetinde ulaşıldığı görülür. Elde edilen bu değer maksimum çekme-makaslama dayanımının yaklaşık olarak onda biri kadardır.

Maksimum çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımlarına 8,62 mm çekirdek çapı, 0,764 mm çekirdek yüksekliği ve 0,088 çekirdek boyut oranında ulaşılmıştır.

Yüzey kalitesinin önemli olduğu yerlerde uygun bağlantılar 10 periyot kaynak zamanında 10,6 kA'de; 15 periyot kaynak zamanında 10,6 kA'de; 20 periyot kaynak zamanında 8,9 kA'de; 25 periyot kaynak zamanında 8,9 kA'de; 30 periyot kaynak zamanında 8,9 kA'de elde edilmiştir.

2. TRIP bağlantılarda düşük kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanında kaynak bölgesine giren ısı miktarı düşük olduğu için çekirdek boyutları da nispeten küçüktür. Buna bağlı olarak çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımları da düşüktür. Bu yüzden çekme-makaslama ve çekme-sıyırma deneylerinde ayrılma tipi kopma oluşmaktadır.

Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının artmasıyla birlikte çekirdek boyutları da büyümekte ve buna bağlı olarak bağlantıların çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımları da artmaktadır. Bu yüzden çekme-makaslama ve çekme-sıyırma deneylerinde düğmelenme ve yırtılma tipi kopma oluşmaktadır.

Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok yüksek olduğu durumlarda ise ısı girdisinin oldukça artması nedeniyle malzeme ara kesitinde ki erime miktarı artmaktadır. Bununla birlikte elektrotların dalma derinlikleri artar ve kaynak çekirdeğinden fışkırmalar ortaya çıkar. Bu yüzden kaynak çekirdek kesiti azalmaktadır. Buna bağlı olarak çekme-makaslama ve çekme-sıyırma kuvveti hızla düşmektedir. Ayrıca elektrot yapışması, derin elektrot izleri ve aşırı renklenme oluşmaktadır.

3. TRIP bağlantılarda esas malzemeden kaynak çekirdeğine doğru gidildiğinde sertlik değerlerinde artış olmaktadır. Kaynak çekirdeğinin sertliği esas metalin sertliğinin yaklaşık olarak 2 katıdır. Bunun nedeni kaynak bölgesinin çok kısa bir zaman içerisinde ısınıp soğumasına bağlı olarak oluşan martenzit yapısıdır.

4. TRIP bağlantılarda esas metal yapısı büyük oranda ferrit ve düşük oranda beynit ve kalıntı östenit fazından oluşmaktadır. Bununla birlikte kaynak bölgesine giren ısınn etkisiyle ITAB’da tane irileşmesi meydana gelmektedir. Çekirdek bölgesinde ise hızlı soğumanın etkisiyle martenzit bir yapı oluşmuştur.

6.2. Konuyla İlgili İleride Yapılabilecek Çalışmalar

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan TRIP 800 atmosferik korozyona dayanıklı çelik saclar elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Deneylerde kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı değiştirilirken elektrot kuvveti, sıkıştırma ve tutma zamanları sabit bırakılmıştır. Elde edilen bağlantılarda kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımı, çekme-sıyırma dayanımı, sertlik, mikroyapı ve makroyapı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmaların rehberliğinde, aşağıda ana hatlarıyla verilen çalışmalara devam edilmesi düşünülmektedir.

1. TRIP 800 atmosferik korozyona dayanıklı çelik sac malzemelerinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak akım şiddetinin ve kaynak zamanının bağlantıların yorulma dayanımlarına etkisi incelenebilir.
2. TRIP 800 atmosferik korozyona dayanıklı çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi sonucu elde edilen bağlantıların korozyon dayanımları incelenebilir.
3. TRIP 800 atmosferik korozyona dayanıklı çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı ve yapıştırma ile kombine edilerek birleştirilmesi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Arıkan, M., Bağman, G., Otomotiv endüstrisi için yeni çelik ürünler ve özellikleri. I. Demir Çelik Sempozyumu Bildiriler, Cilt I., s.350-356, 2001.
- [2] Çimenoglu, H., kayalı, E.S., Otomotiv endüstrisinde kullanılan çift fazlı çelikler, İ.T.Ü Kimya-Metalurji Fak. Metalurji Mühendisliği Böl., s. 7-14, 1985.
- [3] Demir, B., Ereğli D.Ç., fabrikalarında sürekli tavlama hatlarında çift fazlı çelik üretimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [4] Taşyikan, Y., TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen TRIP 450/800 ve çift-fazlı çeliklerin mekanik ve mikroyapı özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2013.
- [5] Özer, A., Çeliklere uygulanan TRIP işlemiyle mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, Tübvav Bilim Dergisi, Cilt:2, Sayı:3, s.291-301, 2009.
- [6] Anık, S., Kaynak Sempozyumu , İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1997.
- [7] Erdemir Ürün Katoloğu, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası, T.A.Ş., İstanbul, 2000.
- [8] Rodríguez-Martínez J.A., Pesci R., Rusinek A., Arias A., Zaera R., Pedroche D.A., Thermo-mechanical behaviour of TRIP 1000 steel sheets subjected to low velocity perforation by conical projectiles at different temperatures, International Journal of Solids and Structures, 47, s.1268–1284, 2010.
- [9] Fischer F.D., Reisner G., Werner E., Tanaka K., Cailletaud G., Antretter T., A new view on transformation induced plasticity (TRIP), International Journal of Plasticity, 16, s.723-748, 2000.
- [10] Girault E., Jacques P., Ratchev P., Van Humbeeck J., VERLINDEN B., AERNOUDT E., Study of the temperature dependence of the bainitic transformation rate in a multiphase TRIP-assisted steel, Materials Science and Engineering A, 273 – 275, s.471 – 474, 1999.
- [11] Güven G., İkizlenme yoluyla plastisite kazanan (Twinning Induced Plasticity (TWIP) Steel) yüksek mukavemetli yassı çeliklerin üretimi ve geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2012.

- [12] Van Slycken J., Verleysen P., Degrieck J., Bouquerel J., De Cooman B.C., Dynamic response of aluminium containing TRIP steel and its constituent phases, *Materials Science and Engineering A*, 460–461, s.516–524, 2007.
- [13] Linderov M., Segel C., Weidner A., Biermann H., Vinogradov A., Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steels at room and elevated temperature investigated by acoustic emission and scanning electron microscopy, *Materials Science & Engineering A*, 597, s.183–193, 2014.
- [14] Shan T.K., Li S.H., Zhang W.G., Xu Z.G., Prediction of martensitic transformation and deformation behavior in the TRIP steel sheet forming, *Materials and Design*, 29, s.1810–1816, 2008.
- [15] Kuziak R., Kawalla R., Waengler S., Advanced high strength steels for automotive industry, *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, Vol. VIII, No. 2, 2008.
- [16] Zhu R., Li S., Karaman I., Arroyave R., Niendorf T., Maier H.J., Multi-phase microstructure design of a low-alloy TRIP-assisted steel through a combined computational and experimental methodology, *Acta Materialia* 60, s.3022–3033, 2012.
- [17] He Z., He Y., Ling Y., Wu Q., Gao Y., Li L., Effect of strain rate on deformation behavior of TRIP steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, s.2141–2147, 2012.
- [18] Yong T., Zhuang L., Effects of warm deformation on mechanical properties of TRIP aided Fe-C-Mn-Si multiphase steel, *Journal of Iron And Steel Research, International*, 19(6), s.47-52, 2012.
- [19] Toros S., TRIP 800 çeliğinin şekillendirme kabiliyetinin incelenmesi ve modellenmesi, *Doktora Tezi*, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2013.
- [20] Oliver, S., Jones, T.B., Fourlaris G., Dual phase versus TRIP strip steels: microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing, *Materials Characterization*, 58, s.390–400, 2006.
- [21] Zhi Y., Liu X., Yu H., Cellular automaton simulation of hot deformation of TRIP steel, *Computational Materials Science*, 81, s.104–112, 2014.
- [22] Matsuma O., Sakuma Y., Takeuchi H., Trip in its kinetic aspects in austempered 0.4 C–1.5 Si 0.8 Mn steel. *Scripta Metall. Mater.* ,21, 1206–301, 1987.
- [23] Kim S.J., Lee C.G., Lee T.H., Oh C.S., Effect of Cu, Cr and Ni on mechanical properties of 0.15 wt.% C TRIP-aided cold rolled steels, *Scripta Materialia*, 48, s.539–544, 2003.

- [24] Zhang M., Li L., Fu R.Y., Krizan D., Cooman D.C., Continuous cooling transformation diagrams and properties of micro-alloyed TRIP steels, *Mat. Sci. Eng. A – Struct.*, 438–440, 296–9, 2006.
- [25] Lis A.K., Gajda B., Modelling of the DP and TRIP micro structure in the CMnAlSi automotive steel, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 15, Issue 1-2, March-April 2006.
- [26] De Cooman B.C., Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8, s.285–303, 2004.
- [27] Xiao-Ying H., Yun-Bo X., Yan-Feng Z., Di W., Microstructure and mechanical properties of hot rolled low silicon trip steel containing phosphorus and vanadium, *Journal of Iron And Steel Research, International*, 18(11), s.40-45, 2011.
- [28] Hausmann K., Krizan D., Spiradek-Hahn K., Pichler A., Werner E., The influence of Nb on transformation behavior and mechanical properties of TRIP-assisted bainitic–ferritic sheet steels, *Materials Science & Engineering A*, 588, s.142–150, 2013.
- [29] Van Slycken J. , Verleysen P., Degrieck J., BOuquerel J., De Cooman B.C., Dynamic response of aluminium containing TRIP steel and its constituent phases, *Materials Science and Engineering A*, 460–461, s.516–524, 2007.
- [30] Zaefferer S., Ohlert J., Bleck W., A study of microstructure, transformation mechanisms and correlation between microstructure and mechanical properties of a low alloyed TRIP steel, *Acta Materialia*, 52, 2765–2778, 2004.
- [31] Lin L., De Cooman B.C., Ren-Dong L., Vleugels J., Mei Z., Wen S., Design of TRIP steel with high welding and galvanizing performance in light of thermodynamics and kinetics, *Journal of Iron And Steel Research, International*, 14(6), s.37-41, 2007.
- [32] Feng Q., Li L., Yang W., Sun Z., Effect of Nb on the stability of retained austenite in hot-rolled TRIP steels based on dynamic transformation, *Materials Science & Engineering A*, 2014.
- [33] Fu B., Yang W.Y., Li L. F., Sun Z.Q., Effect of bainitic transformation temperature on the mechanical behavior of cold-rolled TRIP steels studied with in-situ high-energy X-ray diffraction, *Materials Science & Engineering A*, kabul edildi, 2014.
- [34] Xiaoyan L., Weldability of dual phase steel and TRIP (transformation-induced-plasticity) steel, Yüksek Lisans Tezi, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2005.
- [35] Li-Juan Z., Di W., Xian-Rning Z., Modeling of austenite decomposition in low Si-Mn TRIP steel during cooling, *Journal of Iron And Steel Research, International*, 15(6), s.68-71, 2008.

- [36] Zi-Liu X., Qing-Wu C., Hai-Tao J., Heredity characteristic from hot rolled microstructure to annealed microstructure in high strength TRIP steels, *Journal of Iron And Steel Research, International*, 17(10), s.38-44, 2010.
- [37] Zi-Cheng Z., Fu-XIAN Z., YAN-MEI L., Effect of thermomechanical control processing on microstructure and mechanical properties of Fe-0.2 C-1.44Si-1.32Mn hot rolled TRIP steel, *Journal of Iron And Steel Research, International*, 17(7), s.44-50, 2010.
- [38] Di W., Zhuang L., Hui-Sheng L., Effect of controlled cooling after hot rolling on mechanical properties of hot rolled TRIP steel, *Journal of Iron And Steel Research, International*, 15(2), s.65-70, 2008.
- [39] Dan W.J., Li S.H., Zhang W.G., Lin Z.Q., The effect of strain-induced martensitic transformation on mechanical properties of TRIP steel, *Materials and Design*, 29, s.604–612, 2008.
- [40] Bhattacharyya T., Singh S.B., Bhattacharyya S., Ray R.K., Bleck W., BHATTACHARJEE D., An assessment on coatability of transformation induced plasticity (TRIP)-aided steel, *Surface & Coatings Technology*, 235, s.226–234, 2013.
- [41] AWS, Safety and health fact sheet no. 21, 1999.
- [42] Campbell, F.C., *Joining: understanding the basics*, ASM International, 2011.
- [43] Groover, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, Third Edition, John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [44] Anık, S., *Kaynak Tekniği El Kitabı*, Gedik Eğitim Vakfı, 1991.
- [45] Khan, M.I., *Spot welding of advanced high strength steels*, Ph.D., University of Waterloo, Ontario, Canada, 2007.
- [46] Aslanlar, S., *Otomotiv sektöründe kullanılan kaynak yöntemleri ders notları*, Şubat 2014.
- [47] Akkuş, A., *Galvanizli ve ostenitik paslanmaz çelik sacların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma dayanımlarının araştırılması*, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [48] Karloff, A.C., *Real-time expulsion detection and characterization in ultrasound M-scans of the resistance spot welding process*, Ph.D., University of Windsor, Ontario, Canada, 2012.
- [49] Zhang, H., Senkara, J., *Resistance welding - fundamentals and applications*, Taylor & Francis Group, 2006.

- [50] Blondeau, R., Metallurgy and mechanics of welding, Lavoisier, Iste Ltd., John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [51] AWS D8.9-97, Recommended practices for test methods and evaluation the resistance spot welding behavior of automotive sheet steels, 1997.
- [52] AWS, Welding Handbook - Welding science and technology, Ninth Edition, Volume 1, 2003.
- [53] Anık, S., Gülbahar, B., %17 kromlu ferritik paslanmaz nokta kaynağında çekme-makaslama kuvveti ile çekirdek boyutları arasındaki ilişki, II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı, 94-105, 13-15 Kasım 1989.
- [54] AWS D8.7M, Recommended practices for automotive weld quality – resistance spot welding, 2005.
- [55] Miller, K.W., Impact strength and failure mechanisms of spot welds in automotive materials, Ph.D., University of South Carolina, 2000.
- [56] TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ, EN ISO 14273, Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds, 2001.
- [57] TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ, EN ISO 14270, Specimen dimensions and procedure for mechanized peel testing resistance spot, seam and embossed projection welds, 2001.

ÖZGEÇMİŞ

Erman FERİK 1987 yılında Bursa'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bursa'nın Yıldırım ilçesinde Şerif Artış İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2005 yılında Bursa Süleyman Çelebi Lisesi'nden mezun oldu. 2007-2011 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 2013 yılında ise İmalat Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı, halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi'nde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2014 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine başladı, halen eğitime devam etmektedir.