

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK KATMANLI ÇELİKLERİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA
KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN TESPİTİ VE ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Dürser Çağatay BÖLÜKBAŞI

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Salim ASLANLAR

Aralık 2023

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATMANLI ÇELİKLERİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA
KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN TESPİTİ VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Dürser Çağatay BÖLÜKBAŞI

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 07/12/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Salim ASLANLAR	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Erdinç İLHAN	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Nuri AKKAŞ	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğt. Üyesi Volkan ONAR	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğt. Üyesi Fatih ÖZEN	BAŞARILI

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.

D. Çağatay BÖLÜKBAŞI

10.12.2023

TEŞEKKÜR

Tezime konu olan araştırma çalışmalarının yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında başta tez danışmanım Prof. Dr. Salim ASLANLAR'a, tez çalışmalarında desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen Sunparadise ailesine ve dönem arkadaşım Murat Konar'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve öğretim hayatımda bu günleri görmeme vesile olan anneme ve babama, bana hayatımın her alanında olduğu gibi doktora eğitimim boyunca da destek olan sevgili eşime, gelişmeye ve geliştirmeye olan motivasyonumda bana her zaman motivasyon sağlayan oğullarıma ve tüm Bölükbaşı ailesi üyelerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
KISALTMALAR	vii
SİMGELER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xiv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Konunun Önemi	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Planlanması	2

BÖLÜM 2.

ÇOK KATMANLI ÇELİKLER.....	6
2.1. Tarihçe.....	9
2.2. Literatürde Çok Katmanlı Çelikler.....	10
2.3. Çok Katmanlı Çeliklerin Endüstriyel Uygulamaları.....	10
2.4. Çok Katmanlı Çeliklerin İmalat Usulleri	13
2.5. Bondal Çok Katmanlı Çelikler	15

BÖLÜM 3.

ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI.....	17
3.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağının Uygulama Esasları	17
3.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Proses Parametreleri.....	20
3.2.1. Kaynak akım şiddeti	22
3.2.2. Kaynak zamanı	23
3.2.3. Elektrot kuvveti	24
3.2.4. Elektrot malzemesi	24

3.3. Kaynak Kabiliyeti Diyagramı	25
3.4. Elektrik Nokta Direnç Kaynağında Bağlantı Kalitesinin Belirlenmesi	27
3.4.1. Kaynak kalitesinde incelenen fiziksel ve geometrik özellikler	27
3.4.1.1. Çekirdek geometrisine ait ölçüler	27
3.4.1.2. Çekirdek boyut oranı	28
3.4.1.3. Dalma derinliği	28
3.4.1.4. Yüzey görünümü	29
3.4.1.5. İç süreksizlikler	29
3.4.1.6. Fıskırma	29

BÖLÜM 4.

MATERYEL VE METOD	30
4.1. Deneysel Çalışmalara Genel Bakış	30
4.2. Kullanılan Deney Malzemeleri	30
4.3. Deneysel Çalışma Kapsamında Malzemelerin Hazırlanması	32
4.4. Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makinesi ve Özellikleri	33
4.5. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	34
4.6. Deneylerin Yapılması ve Numune Üretimi	36
4.7. Çekme Makaslama ve Çekme Sıyırma Testlerinin Yapılması	38
4.8. Çekirdek Boyutlarının Ölçülmesi ve Makro Yapı Görüntüleri	40
4.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	41
4.10. Sertlik Değerlerinin Ölçülmesi	43

BÖLÜM 5.

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	44
5.1. Deneyler Hakkında Genel Bilgilendirme	44
5.2. Çok Katmanlı Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz-çekme Dayanımına Etkisi	44
5.2.1. Kaynak akım şiddetinin çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çekme-makaslama dayanımına etkisi	49
5.2.2. Kaynak zamanının çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çekme-makaslama dayanımına etkisi	51
5.2.3. Kaynak akım şiddetinin çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çekme-sıyırma dayanımına etkisi	52
5.2.4. Kaynak zamanının çok katmanlı Çeliklerin bağlantılarındaki çekme-sıyırma dayanımına etkisi	53
5.2.5. Kaynak akım şiddetinin çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çapraz-çekme dayanımına etkisi	54
5.2.6. Kaynak zamanının şiddetinin çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çapraz-çekme dayanımına etkisi	55

5.3. Çok Katmanlı Çeliklerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Çekirdeği Boyutlarına Etkisi	56
5.3.1. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan kaynak çekirdeğinin çekirdek çapına etkisi 56	
5.3.1.1. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan kaynak çekirdeğinin çekirdek yüksekliğine etkisi	57
5.3.1.2. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan kaynak çekirdeğinin çekirdek boyut oranına etkisi	59
5.3.2. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan elektrot dalma derinliğine etkisi	60
5.3.3. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan elektrot dalma genişliğine etkisi	62
5.4. Çok Katmanlı Çeliklerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Çekirdek Boyutlarının Çekme-Sıyırma, Çekme-Makaslama ve Çapraz-Çekme Kuvvetine Etkisi	63
5.4.1. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi	63
5.4.2. Çok katmanlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi	65
5.4.3. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi	67
5.4.4. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi	68
5.4.5. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi	70
5.4.6. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi	71
5.4.7. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek çapının çapraz-çekme kuvvetine etkisi	73
5.4.8. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi	74
5.4.9. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi	76
5.5. Çok Katmanlı Çeliklerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Sertlik Değerine Etkisi	77
5.6. Çok Katmanlı Çeliklerin Birleştirilmesinde Makro Yapı Görüntülerin Analizi	79
5.7. Kaynak Değişkenlerinin Bağlantıların Mikro Yapısına Etkisi ve Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntü (SEM) Analiz Sonuçları	83
5.8. Kaynak Bölgesi EDS Analizleri	87

BÖLÜM 6.
ÇOK KATMANLI ÇELİKLERİNİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA
KAYNAĞI BİRLEŞTİRMELERİNİN KAYNAK GRAFİĞİ (WELD LOBE). 93

BÖLÜM 7.
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 95
 7.1. Sonuçlar..... 95
 7.2. Öneriler..... 97
KAYNAKLAR 98



KISALTMALAR

ASTM	: The American Society for Testing and Materials
d1	: Çekirdek çap ölçüsü
d2	: Çekirdek yükseklik değeri
dind	: İş parçası kalınlık
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
EN	: European Standard
FEM	: Finite Element Method
G	: Gram
Hz	: Hertz
ISO	: International Organization of Standardization
ITAB	: Isı tesiri altında kalan bölge
kA	: Kilo Amper
kN	: Kilo Newton
kVA	: Kilo Volt Amper
MAG	: Metal aktif gaz kaynağı
MIG	: Metal inert gaz kaynağı
mm	: milimetre
N	: Newton
P	: Basınç Pascal
PSA	: Basınca duyarlı yapıştırıcı
s	: İş parçası kalınlık
Sn	: Saniye
SEM	: Scanning Electron Microscopy
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi

SİMGELER

°C : Santigrat Derece

Hv : Vickers

Mm : Mikrometre



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2. 1. : Metal ve kompozitler için kullanılabilir üretim teknikleri.....	11
Tablo 2. 2. : Endüstriyel olarak kullanılan çok katmanlı sandviç kompozitler.....	13
Tablo 3. 1. : Elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot alaşımları	25
Tablo 4. 1. : Bondal saç spektral analiz sonucu	31
Tablo 4. 2. : Kaynak elektrotlarının kimyasal kompozisyonu ve özellikleri	34



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. : ULSAB ın Şematik Gösterimi	12
Şekil 2. 2. : Hylite isimli alüminyum sandviç panelin Ford E-Ka’da kullanımı.....	12
Şekil 2. 3. : Çok katmanlı metallerde yapışkan katmanlar arası bağlar.	14
Şekil 2. 4. : Çok katmanlı çeliklerin üretim aşamaları.....	15
Şekil 2. 5. : Bondal çelik ses sönümlleme performansı (loss faktör grafiği)	15
Şekil 2. 6. : Bondal çelik katmanları	16
Şekil 3. 1. : Elektrik direnç kaynağı işlem basamakları.....	18
Şekil 3. 2. : Elektrik direnç nokta kaynağı temel bileşenleri	19
Şekil 3. 3. : Elektrik direnç nokta kaynağı makro yapısı	20
Şekil 3. 4. : Kaynak akımının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	23
Şekil 3. 5. : Elektrik direnç nokta kaynak boyutları.....	24
Şekil 3. 6. : İmalat sektöründe kullanılan elektrot uç formları.....	25
Şekil 3. 7. : Weld Lobe, Kaynak kabiliyet diyagramı.....	26
Şekil 3. 8. : Kaynak çekirdek geometrisi	28
Şekil 4. 1. : Mikroskop altında bondal çelik katmanları	31
Şekil 4. 2. : Bondal çelik çekme test diyagramı.....	31
Şekil 4. 3. : Çekme-Makaslama deney numunesi şematik gösterimi.....	32
Şekil 4. 4. : Çekme-Sıyırma deney numunesi şematik gösterimi	32
Şekil 4. 5. : Çapraz-çekme deney numunesi şematik gösterimi.....	33
Şekil 4. 6. : Numune Üretiminde Kullanılan Kaynak Makinesi	33
Şekil 4. 7. : Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Elektrotları.....	34
Şekil 4. 8. : Elektrik direnç nokta kaynağında uygulanan parametreler	35
Şekil 4. 9. : Deneylerde kullanılan proses parametreleri	36
Şekil 4. 10. : Üretilen numune parçalar – çekme-makaslama.....	37
Şekil 4. 11. : Üretilen numune parçalar – çapraz çekme.....	37
Şekil 4. 12. : Üretilen numune parçalar – çekme-sıyırma.....	38
Şekil 4. 13. : Üretilen numune parçalar – sertlik ölçümü.....	38
Şekil 4. 14. : Çekme-makaslama testi	39
Şekil 4. 15. : Çekme-Sıyırma testi şematik gösterimi.....	39
Şekil 4. 16. : Çekme-sıyırma testi	40
Şekil 4. 17. : Çekme-sıyırma testi numunesi.....	40
Şekil 4. 18. : Mikroyapı görüntü elde edilen Zeiss marka optik mikroskop.....	41
Şekil 4. 19. : SEM ve EDS analizinde kullanılan cihazlar.....	42
Şekil 4. 20. : Vakum cihazı	42
Şekil 4. 21. : Hazırlanan Bakalit Numunesi	42
Şekil 4. 22. : Future-Tech FM700 Sertlik Ölçüm Cihazı.....	43
Şekil 5. 1. : 15 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi	45

Şekil 5. 2. : 20 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi	46
Şekil 5. 3. : 25 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi	47
Şekil 5. 4. : 30 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi	48
Şekil 5. 5. : 35 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi	49
Şekil 5. 6. : Kaynak akım şiddetinin Çekme-Makaslama kuvvetine etkisi.....	50
Şekil 5. 7. : Kaynak zamanının Çekme-Makaslama kuvvetine etkisi.....	51
Şekil 5. 8. : Kaynak akım şiddetinin Çekme-Sıyırma kuvvetine etkisi	52
Şekil 5. 9. : Kaynak zamanının Çekme-Sıyırma kuvvetine etkisi.....	53
Şekil 5. 10. : Kaynak akım şiddetinin çapraz çekme kuvvetine etkisi.....	54
Şekil 5. 11. : Kaynak zamanının çapraz çekme kuvvetine etkisi	55
Şekil 5. 12. : Kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi	56
Şekil 5. 13. : Kaynak akım şiddetinin çekirdek	57
Şekil 5. 14. : Kaynak zamanının çekirdek yüksekliğine etkisi	58
Şekil 5. 15. : Kaynak akım şiddetinin çekirdek yüksekliğine etkisi	58
Şekil 5. 16. : Kaynak zamanın çekirdek boyut oranına etkisi.....	59
Şekil 5. 17. : Kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi.....	60
Şekil 5. 18. : Kaynak zamanının elektrot dalma derinliğine etkisi	61
Şekil 5. 19. Kaynak akım şiddetinin elektrot dalma derinliğine etkisi	61
Şekil 5. 20. : Kaynak zamanın elektrot genişliğine etkisi	62
Şekil 5. 21. : Kaynak akım şiddetinin elektrot genişliğine etkisi.....	63
Şekil 5. 22. : Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi	64
Şekil 5. 23. : Kaynak zamanına bağlı çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi.....	65
Şekil 5. 24. : Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi	66
Şekil 5. 25. : Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi	66
Şekil 5. 26. : Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi	67
Şekil 5. 27. : Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi	68
Şekil 5. 28. : Kaynak çekirdek çapının max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-1	69
Şekil 5. 29. : Kaynak çekirdek çapının max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-2	69
Şekil 5. 30. : Kaynak çekirdek yüksekliğinin max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-1	70
Şekil 5. 31. : Kaynak çekirdek yüksekliğinin max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-2	71
Şekil 5. 32. : Kaynak çekirdek boyut oranının max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-1	72
Şekil 5. 33. : Kaynak çekirdek boyut oranının max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-2	72
Şekil 5. 34. : Kaynak çekirdek çapının max. çapraz çekme kuvvetine etkisi-1	73
Şekil 5. 35. : Kaynak çekirdek çapının max. çapraz çekme kuvvetine etkisi-2.....	74

Şekil 5. 36. : Kaynak çekirdek yüksekliğinin max. çapraz çekme kuvvetine etkisi ..	75
Şekil 5. 37. : Kaynak çekirdek yüksekliğinin max. çapraz çekme kuvvetine etkisi ..	75
Şekil 5. 38. : Kaynak çekirdek boyut oranının max. çapraz çekme kuvvetine etkisi.	76
Şekil 5. 39. : Kaynak çekirdek boyut oranının max. çapraz çekme kuvvetine etkisi.	77
Şekil 5. 40. : Sertlik ölçüm gösterimi.....	78
Şekil 5. 41. : 15 periyot sertlik incelemeleri	78
Şekil 5. 42. : 20 periyot sertlik incelemeleri	78
Şekil 5. 43. : 25 periyot sertlik incelemeleri	79
Şekil 5. 44. : 30 periyot sertlik incelemeleri	79
Şekil 5. 45. : 35 periyot sertlik incelemeleri	79
Şekil 5. 46. : 15 periyot makro yapı incelemeleri	80
Şekil 5. 47. : 20 periyot makro yapı incelemeleri	81
Şekil 5. 48. : 25 periyot makro yapı incelemeleri	81
Şekil 5. 49. : 30 periyot makro yapı incelemeleri	82
Şekil 5. 50. : 35 periyot makro yapı incelemeleri	83
Şekil 5. 51. : 15P40 Mikro Yapı Görüntüleri	84
Şekil 5. 52. : 15P99 Mikro Yapı Görüntüleri	84
Şekil 5. 53. : 15P99 Mikro Yapı Çatlak ve Boşluk Görüntüleri	84
Şekil 5. 54. : 20P40 Mikro Yapı Görüntüleri	85
Şekil 5. 55. : 20P80 Mikro Yapı Görüntüleri	85
Şekil 5. 56. : 20P80 Mikro Yapı Görüntüleri	85
Şekil 5. 57. : 25P40 Mikro Yapı Görüntüleri	86
Şekil 5. 58. : 25P80 Mikro Yapı Görüntüleri	86
Şekil 5. 59. : 30P30 Mikro Yapı Görüntüleri	86
Şekil 5. 60. : 30P70 Mikro Yapı Görüntüleri	86
Şekil 5. 61. : 35P40 Mikro Yapı Görüntüleri	87
Şekil 5. 62. : 35P70 Mikro Yapı Görüntüleri	87
Şekil 5. 63. : 25P80 EDS Analizleri	88
Şekil 5. 64. : 30P30 EDS Analizleri	89
Şekil 5. 65. : 35P40 EDS Analizleri	90
Şekil 5. 66. : 35P70 EDS Analizleri	91
Şekil 5. 67. : 30P70 EDS Analizleri	92
Şekil 6. 1. : Çok katmanlı çeliklere ait Kaynak Grafiği (Weld Lobe)	94

ÇOK KATMANLI ÇELİKLERİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA HASAR MODUNUN TESPİTİ VE ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışma ile metal/polimer/metal formundaki çok katmanlı Bondal çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı ile yapılan kaynaklı birleştirme uygulamalarında ortaya çıkan farklı mekanik özellikler hasar modu tespit yöntemleri ile analiz edilmiş ve ortaya çıkan veriler ışığında optimum proses parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma esnasında çok katmanlı Bondal çeliğinin seçilme nedeni, çok katmanlı çeliklerin son zamanlar otomotiv, savunma ve havacılık sanayinde artan kullanım oranları ve bu çeliğe ait kaynak prosesi çalışmalarının tasarımsal çeşitliliği arttırmak konusunda sağlayacağı faydadır. Kaynak yöntemi olarak, ısı girdisinin diğer kaynak yöntemlerine göre daha sağlıklı kontrol edilebildiği, otomasyon çalışmalarına daha fazla olanak tanıyan, verimlilik ve maliyet anlamında göreceli olarak diğer kaynak yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar verebilen elektrik direnç nokta kaynağı tercih edilmiştir. Elektrik direnç kaynağı ile yapılan numune üretimleri sırasında kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti proses parametreleri kontrollü bir şekilde değiştirilmiş olup diğer parametreler sabit tutulmuştur. Böylece değişken iki parametrenin çıktılarına etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

Deneylerde kullanılacak olan numuneler yapılacak olan deney standartlarına uygun boyut ve şekillerde elektrik direnç nokta kaynağı prosesi kullanılarak kontrollü bir şekilde üretilmiştir. Üretilen deney numunelerine ait çekirdek boyutları ve diğer kritik ölçüler makro yapı incelemeleri ile gözlemlenmiştir. Malzeme yapısına ilişkin mikro yapı analizleri ise SEM ve EDS uygulamaları ile incelenmiştir. Bunlara ek olarak mekanik özellikleri belirlemek için çekme-makaslama, çekme-sıyırma, çapraz-çekme ve sertlik ölçümleri tüm numunelere uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar ile proses parametrelerinin mekanik özelliklere, çekirdek boyutlarına, makro ve mikro yapıya etkisi analiz edilmiştir. Farklı proses parametreleri ile üretilen deney numunelerine yapılan sertlik testleri ile değişen proses parametreleri ve sertlik ölçüm sonuçları arasındaki ilişki incelenmeye çalışılmıştır. Üretilen deney numunelerinin hasar modu analizi yapılarak proses parametrelerinin değişmesi ile parça kalitesinde meydana gelen değişiklikler tespit edilmiş, diğer deney sonuçlarının yorumlanmasında elde edilen verilerden faydalanılmıştır. Optimum proses parametrelerinin belirlenmesi için Weld Lobe grafiği çizilmiş, kaynaklı birleştirmelerden beklenen uygulama sonuçlarına göre Weld Lobe grafiği yorumlanarak, farklı endüstriyel uygulamalar için kılavuz bilgiler elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çok katmanlı çelikler, Elektrik direnç nokta kaynağı

FAILURE MODE DETECTION AND ANALYSIS FOR SPOT WELDING OF MULTILAYER STEELS

ABSTRACT

In this study, different mechanical properties of metal/polymer/metal multilayer Bondal steel welded by electric resistance spot welding were analysed by damage mode detection methods and optimum process parameters were determined in the light of the data obtained. The reason for the selection of multilayer Bondal steel during the study is the increasing use of multilayer steels in the automotive, defence and aerospace industries and the benefits that the welding process studies of this steel will provide to increase the design diversity. As a welding method, electric resistance spot welding was preferred, where the heat input can be controlled more accurately than other welding methods, which allows more automation studies, and can give relatively more successful results in terms of efficiency and cost compared to other welding methods. The process parameters of welding time and welding current were varied in a controlled manner during the production of samples by electric resistance spot welding, while the other parameters were kept constant. The effect of such two variable parameters on the outputs was investigated.

The specimens to be used in the experiments were produced using the electric resistance spot welding process in sizes and shapes suitable for the experimental standards to be performed in a controlled manner. Core dimensions and other critical dimensions of the test specimens were observed by macrostructure analysis. Microstructure analysis of the material structure was examined by SEM and EDS experiments. In addition, tensile-shear, pull-peel, cross-pull and hardness measurements were applied to all samples to determine the mechanical properties.

With the results obtained, the effects of process parameters on mechanical properties, core dimensions, macro and microstructure were analysed. Hardness tests were performed on test specimens produced with different process parameters and the relationship between changing process parameters and hardness measurement results was tried to be analysed. Damage mode analysis of the test specimens was performed to determine the changes in part quality with the change in process parameters, and the data obtained were used in the interpretation of other test results. Weld Lobe graph was drawn to determine the optimum process parameters, and the weld lobe graph was interpreted according to the expected application results of the welded joints and guidelines for different industrial applications were obtained.

Keywords: Multi-layer steels, Spot Welding

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Konunun Önemi

Metal/polimer/metal sandviç kompozitlerin de içerisinde yer aldığı çok katmanlı çeliklerin kullanım oranları otomotiv, savunma sanayi ve uçak endüstrisi gibi çeşitli alanlarda yükselen bir eğilim göstermektedir [1]. Çok katmanlı çelikler, yüzey tabakaları olarak çelik veya alüminyum alaşımlı levhalar kullanılarak “rolling bonding” olarak da adlandırılan merdaneli üretim teknikleri ve ısıtma pres işlemleriyle üretilmektedirler. Çok katmanlı çeliklerde genellikle çekirdeği oluşturan termoplastik polimerler takviye ve sönümleme özellikleri için lifsiz veya nadiren lifli olarak kullanılmaktadır [2]. Daha iyi termal özelliklere ek olarak hafif yapılar elde etme motivasyonu ve akustik izolasyon özellikleri ile metal/polimer/metal yapıdaki çok katmanlı çelikler birçok uygulama alanına güçlü bir şekilde katkıda bulunabilirler. Metal/polimer/metal yapıları çok katmanlı çelikler genellikle şu şekilde sınıflandırılabilir [1];

- Çok ince bir çekirdek polimer yapının yeterli olduğu ($\sim 50 \mu\text{m}$) ve genellikle 0,2mm ile 2mm arasında alt ve üst levha şeklindeki tabakaya sahip ses sönümleyici sandviç panel ve laminantlar.
- Kabuk ve çekirdek tabakalarının kalınlığının birbirine daha yakın olduğu düşük yoğunluklu laminatlar, örneğin çekirdek polimer veya takviye kalınlığı 0,2mm - 0,8 mm arasında ve dış yüzeyleri oluşturan alt ve üst yüzeylerin 0,15mm - 0,5 mm kalınlıkta olduğu çok katmanlı metaller.

Üstün termal ve akustik özelliklerinin yanında hafiflikleri ile avantaj sağlayan çok katmanlı çeliklerin üretilebilirliği ile ilgili çalışmalar son zamanlarda artmaktadır. Bu çalışmalar çok katmanlı çeliklerin uygulama alanlarındaki artışı ve üretilebilirlik çalışmalarını olumlu yönde etkilemektedir. Özellikle kaynaklı uygulamalar sayesinde tasarım anlamında çok fazla çeşitliliği de karşılayabilen çok katmanlı çelikler birçok

konvensiyonel komponent ve parçanın yerine kullanılabilir hale gelecek, maliyet ve performans avantajı sağlayacaktır. Bu tür kullanım alanlarının genişleyebilmesi için tek katmanlı malzemelere göre farklı üretim karakteristikleri gösterebilen çok katmanlı çeliklerin olası üretim teknikleri ile uyumunun detaylı olarak incelenmesi, optimum proses parametreleri ve malzeme özellikleri arasındaki ilişkilerinin belirlenmesi sanayi uygulamalarının çeşitlenmesi açısından bir zaruriyet oluşturmaktadır.

Günümüzde ısıl deformasyon anlamında daha verimli sonuçlar sunabilen, verimlilik ve bitmiş ürün maliyetleri bakımından kayda değer fırsatlar sunan elektrik direnç nokta kaynağı ile çok katmanlı çeliklerin birlikte uygulanabilirliği incelenerek tasarım olanakları arttırılabilecektir. Bu kapsamda, birçok proses parametresinin etkisi ile farklı sonuçlar ortaya çıkarabilen nokta direnç kaynağında, çok katmanlı çeliklerin uygulanabilirliği deneysel çalışmalarla incelenerek proses parametrelerinin optimize edilmesi bir çok sanayi alanında önemli avantajlar doğuracaktır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Planlanması

Önerilen tez çalışması ile endüstriyel uygulamalarda son yıllarda öne çıkan bir malzeme olan Bondal çok katmanlı çeliğine elektrik direnç nokta kaynağının uygulanabilirliği incelenerek uygulama alanlarının arttırılması hedeflenmektedir. Elektrik direnç nokta kaynağı sırasında uygulanacak olan farklı proses parametrelerinin Bondal çok katmanlı çeliklerinin mekanik özelliklerine etkisi hasar modu analiz yöntemleri ile incelenerek optimum proses parametrelerinin belirlenmesi sağlanacaktır.

Çok katmanlı çeliklerde metal/polimer/metal uygulamaları, sundukları ek özellikler ile ses sönümleyici, titreşim azaltıcı, ağırlık azaltıcı veya ısı yalıtımı birçok avantajı sağlayabilmektedir. Ancak, malzeme içeriğinde bulunan polimer yapı, alt ve üst katmanlardaki malzemelerin farklı davranışsal özellikleri, bu malzemeleri kaynak teknolojisi ile kullanım konusunda kısıtlamaktadır. Çok katmanlı metal/polimer/metal yapılar da bilinen proses parametrelerinin beklenen sonuçları vermesi çoğunlukla mümkün olmamakta, katmanlarda bulunan malzemelerin tekil kaynaklanabilirliği ile katman halindeki yapı halinde iken kaynaklanabilirliği farklılık gösterebilmektedir. Çok katmanlı çeliklerin kaynaklanabilirliği ile ilgili teknolojilerin malzeme ile uyumunun

incelenmesi ve yenilikçi tasarımlara olanak oluşturulması otomotiv, savunma sanayi ve havacılık gibi alanlarda çok kıymetli fırsatlar oluşturmaktadır.

Havacılık, savunma sistemleri ve otomotiv sanayindeki uygulamaları ile küresel çapta yeni projelere imza atmak isteyen ülkemiz sanayi sektöründe, metal/polimer/metal malzemelerin farklı kaynak teknikleri ile uygulanabilirliğinin artırılması, endüstriyel uygulamalardaki rekabet gücünü arttıracak, yenilikçi ve öncü uygulamalara vesile olacaktır.

Özetle ile çalışmanın gerekçeleri aşağıdaki gibidir;

- Çok katmanlı Bondal metal/polimer/metal çeliklerinin kaynak kabiliyetinin incelenmesi ve farklı kaynak parametreleri ile değişen mekanik özelliklerin hasar modu analiz yöntemi ile tespit edilip optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi.
- Çok katmanlı çeliklerde uygulanan nokta direnç kaynağı işlemleri esnasında malzemenin kaynak çekirdeği bölgesindeki ısı dağılımının incelenmesi ile malzeme kalitesini arttıracak proses çıktılarının sağlanması.
- Yapılan analizler sonucunda elde edilecek olan çıktılar ile sektörün ihtiyaç duyduğu şekillendirilebilir, yüksek mukavemetli, ses sönümleme kabiliyeti yüksek olan çok katmanlı çelik parçaların tasarlanmasına vesile olmak.

Aşağıdaki maddelerde planlanan tez çalışmasında uygulanacak yöntemler sıralanmıştır;

- Taranmış olan literatürden elde edilen veriler, oluşturulacak deney tasarımına rehberlik edecektir. Literatür araştırmalarında dikkat edilecek en önemli parametreler, çok katmanlı çeliklerin malzeme özelliklerinin, kaynak teknikleri ve farklı kaynak parametreleri ile etkileşimi üzerine olacaktır. Farklı elektrik direnç nokta kaynağı proses parametreleri deney tasarımının ana girdilerinden birini oluşturacaktır.
- Çok katmanlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı öncesi mekanik özellikleri literatür araştırması ve hasar modu analiz yöntemi ile incelenecek kaynak sonrası yapılacak ölçümler için referans noktası belirlenecek, karşılaştırma raporlarına temel oluşturulacaktır.

- Uygulanacak olan farklı ve kademeli kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının çok katmanlı çeliklerdeki yapısal özelliklere nasıl etki ettiği belirlenecek, kaynak akım şiddeti ve ısı enerjisinin malzeme üzerindeki davranışı hakkında bilgi toplanacaktır.
- Farklı kaynak akımları ve değişen kaynak zamanı ile kaynak çekirdeğinin yapısal etkileşimi incelenecek, kaynak çekirdeği geometrisinin detaylı incelemesi yapılacaktır.
- Farklı kaynak parametreleri sonucunda değişkenlik gösterecek olan kaynak çekirdeği geometrisinin, malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenecektir.
- Detaylı malzeme karakterizasyonu (mikro-makro inceleme) ile birlikte farklı parametreler kullanılarak üretilen elektrik direnç nokta kaynaklı birleştirmeler, mikro sertlik incelemesi, çekme makaslama testleri, çekme sıyırma testleri, çapraz çekme testlerine tabi tutulacaktır.
- Çekme makaslama test sonucu yardımı ile maksimum çekme kuvvet grafikleri elde edilecektir. Belirlenen maksimum çekme kuvvetleri grafiği kullanılarak her bir farklı kaynak parametresi ve maksimum çekme kuvveti arasındaki ilişki belirlenecektir.
- Yapılan testlerle mekanik ve kırılma davranışlarının detaylandırılması ile birlikte taramalı elektron mikroskobu yardımıyla deneyler yaparak, numune yüzeylerinden yüksek çözünürlüklü görüntü alarak, SEM ve EDS teknikleri ile üretilen deney numunelerinin malzeme yüzeyine ait üç boyutlu görüntüler elde edilerek incelemeler yapılacaktır.
- Planlanan deneyler yardımıyla malzemenin kırılma davranışını değerlendirmek ve sünekliği veya gevrekliği hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla gözlemler ve değerlendirmeler yapılacaktır.
- Tekrarlı yüklere maruz kalan malzemelerde çatlaklar ve kırılmalar ile sonuçlanması muhtemel yapısal değişimlere sebep olan yorulmayı tespit etmek için analizler yapılacaktır.
- Kaynak geometrisinde meydana gelen değişimler ile hasar modu analizleri sonucunda bulunan mekaniksel özelliklerin ilişkisi incelenecektir.

- Çok katmanlı çeliklerin kaynaklı bağlantılarında meydana gelen çatlak, yeterli olmayan nüfuziyet gibi kalite problemlerini tespit etmek için metalografik yapı incelenecek, ITAB bölgesi belirlenecektir. Yapılan çalışmalara ek olarak hazırlanan numuneler optik mikroskop vasıtası ile analiz edilecek olup oluşma ihtimali olan herhangi bir çatlak, boşluk, gözenek gibi kalite problemleri raporlanacaktır.



BÖLÜM 2. ÇOK KATMANLI ÇELİKLER

Bilindiği üzere değişen küresel ekonomik ve çevresel koşullarda enerji harcamalarındaki düşüş önemli bir gelişim başlığı olarak son zamanlarda sıklıkla gündeme gelmektedir. Bu konu ile ilgili olarak hafifliği ile öne plana çıkan malzemelere yüksek seviyede ihtiyaç artmaktadır. Buna bağlı olarak çok katmanlı çeliklerin kullanımına yönelik ilgi son yıllarda artmıştır. Çok katmanlı malzemelerde birden fazla malzemenin farklı özelliklerini bir arada bulundurma ve tek katmanlı malzemelere göre oluşan ağırlık avantajı bu tip malzemelerin kullanımını arttırmaktadır. Bu tarz çok katmanlı çelikleri elde etmek için iki metal sac soğuk haddeleme yöntemi ile basınç uygulamaları, sıcak haddeleme uygulamaları veya yapıştırıcı kullanımı gibi çeşitli metodlar tercih edilmektedir. Bu tip çok katmanlı malzemeler ile geliştirilmiş elektriksel, termal özellikler, ağırlık avantajı, korozyona karşı dayanım ve darbe emici bir tasarım elde edilebilmektedir.

Önemi giderek artan enerji verimliliği başlığı için metal/polimer/metal gibi inovatif yenilikçi ağırlığı azaltılmış malzemelerin geliştirilmesi çok önemli hale gelmiştir. Bu tarz malzemeler özellikle otomotiv sektöründe, inşaatlarda, deniz taşımacılığında kullanılan araçlarda ve hatta savunma sanayi, havacılık gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu duruma emsal olarak havacılık endüstrisinde uçak üretiminde alüminyum katmanlar ile cam elyaf takviyesine sahip bir epoksi katmanının birleşmesi ile oluşan GLARE (Diğer adıyla ARALL), piyada tanınan bir malzemedir[3]. Literatürde bu tip malzemelerin üretilebilirliğine yönelik çok sayıda analize rastlanmaktadır. İncelenen bir kaynakta GLARE sacında katmanlar arası ayrılma incelenmiş ve sertleşen cam elyafların şekillendirilebilirliği olumsuz etkilediği görülmüştür [4]. Ayrıca aynı kaynakta, haddeleme yöntemi ile yapıştırılarak bir araya gelen HYLITE adındaki alüminyum/polipropilen/alüminyum malzemenin mekanik özellikleri incelenmiş ve şekillendirmeye ait sınır eğrisine ek olarak akma karakteristiği ortaya koyulmuştur [4]. Yapılan çalışma sonuçlarında çok katmanlı malzemelerin

yüksek gerinim oranı hassasiyetindeki olumlu sonucun, düşük pekleşme üsteli sonucu oluşan olumsuz duruma bağlı olarak dengelendiği incelenerek analiz çalışması yapılmıştır. Bununla birlikte çok katmanlı malzemelerdeki göreceli olarak fazla olan kalınlık değerinin şekillendirme yeteneğini geliştirdiği görülmüştür. Bir başka çalışmada yapılan deney ve analizlerle alüminyum ve çelik katmanlı saclarda haddeleme işlemine bağlı olarak oluşan yapışma mukavemeti ve kritik kalınlıktaki düşüş üzerine gözlemler yapılmıştır [5]. Yapılan çalışmalara göre katmanlar arasında akma dayanımı ve başlangıç kalınlık değeri yapışma dayanımını ve kritik kalınlıktaki düşüşü ciddi seviyede etkileyebilmektedir.

İnşaat, otomotiv, havacılık, savunma sanayi ve uzay alanındaki teknolojik uygulamalar gibi sanayilerin farklı işlevlere sahip yeni malzemeler için duyduğu güçlü talep farklı türdeki malzemelere önemli bir ilgi uyandırmaktadır. Mono malzemeler olarak metaller, seramikler veya polimerler çeşitli özel uygulamalar için bütün tasarım, maliyet, dayanım ve teknolojik beklentileri yerine getiremezler. Daha farklı özelliklere sahip malzemeler oluşturmanın en önemli yollarından birisi “Hibrit” veya “Melez” malzemeler olarak da adlandırılabilen kompozit malzemeleri oluşturmaktır [6].

Kompozit malzemeler endüstriyel uygulamalar için sunduğu özel matris ile hibrit malzemeler için başarılı bir örnektir. Bu tip ikinci bir tip malzemenin kullanıldığı kompozit malzemelerde, liflerin, parçacıkların, lamellerin veya ağ örgüsünün şekli temel bir malzemeye entegre edilmiştir. Tipik bir örnek olarak , inorganik liflerle mekanik özellikleri güçlendirilmiş bir polimer malzeme örnek gösterilebilir. Bu geliştirilmiş malzemeler hafif yapısı ile özellikle inşaat, otomotiv, havacılık, savunma sanayi ve uzay teknolojileri gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Çok katmanlı çeliklerde benzer şekilde oluşturulan hibrit malzemelere örnek olarak gösterilebilir. Özellikle literatürde “sandviç” olarak adlandırılan üç katmanlı metal/polimer/metal levhalar birden fazla farklı özelliğe sahip malzemenin birleştirilmesi ile oluşturulmuş yeni tip bir malzemeye örnek teşkil edebilir [6].

Çok katmanlı plakalar, titreşim, gürültü engelleme ve ısı izoloasyonu alanlarında iyileştirme sağlamak için kullanılmaktadır. Çok katmanlı çelik plakalar genellikle , viskoelastik (örneğin polimer) sönümlleme malzemesi ile bir veya birden fazla katmanın yer aldığı plakalardan (genellikle metalden) oluşur. Bu sistemler, dayanımın

sağlandığı metal plakalara ek olarak, sesi azaltmak veya termal özellikleri güçlendirmek için sönümleme özelliği gösteren viskoelastik diğer malzemeler eklenerek kompozit bir malzeme oluşturularak kullanılabilirler [7].

Kompozit malzemelerin bir türü olan çok katmanlı çelik sandviç malzemeler en az iki veya daha fazla farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip mono-malzeme katmanından oluşur. Çok katmanlı metal sandviç malzemeler çok sayıda çekirdek ve yüzey malzemesi ile üretilir (Örneğin, çelik, alüminyum alaşımlı levhalar, polimer folyolar veya fiber takviyeli plastikler, polimer tabakası homojen veya yapılandırılmış malzemeler gibi). Laminasyon, pres birleştirme veya rulo yapıştırma işlemleri kullanılarak üretilen sandviç malzemeler çok büyük potansiyel oluşturmaktadır [6].

Çok katmanlı bir ürün olan katmanlı sac metallerin, katmanlı sandviç malzeme olarak da tanımlandığı görülmektedir. Çok katmanlı sac metal üretiminde iki farklı malzemenin özelliklerinden faydalanılmaktadır. En az iki sac veya levha malzeme arasına çeşitli yöntemlerle birleştirilen farklı malzeme veya malzemeler ile oluşturulan ürünlerdir. Ürünün amacı homojen tek katmanlı sac veya levhalara göre daha iyi malzeme özelliklerine sahip bir ürün elde etmektir.

Katmanlı sac malzemeler ile çok daha az ağırlıklara sahip, daha mukavim, aynı zamanda uzun ömürlü ve düşük maliyetli hibrit malzemeler üretilmesi hedeflenmektedir. Genellikle içerisinde barındırdığı malzemelerin özellikleri tüm katmanlı malzemelerde olduğu gibi birbirlerinin eksiklerini tamamlar. Örneğin; inşaat sektöründe daha sık kullanılan ve çok katmanlı sac metal ürünü olan yalıtım katmanı içeren sandviç paneller ısıyı iyi absorbe ettikleri için kullanılmaktadır.

Çok katmanlı sacların uygulamalarında, katmanlar arasında germe, soğuk kaynak gibi işlemler uygulanarak metalurjik bağlar oluşturulur. Çok katmanlı malzemelerde bölgesel kalınlaştırmalar imalatları açısından uygun değildir. Saclar üretim yöntemleri gereği tek bir kalınlıkta çıkmaktadır ve bölgesel kalınlıklar verilmesi özel bir üretim yöntemi ile olmaktadır.

Otomotiv sektörü dinamikleri açısından farklı kalınlıklar veya farklı malzemeler ile oluşturulabilecek çok katmanlı sacların bu açıdan uygun olmadığı görülmektedir. Ancak otomotiv sektöründe genel boyutlar genişlediğinden, emniyet ve konfor konusunda artan talepleri karşılamak amacıyla araçlara ek fonksiyon olarak bazı elektrikli ve

elektronik komponentler, sistemler eklenmiştir. Bunun getirisi olarak otomobillerin ağırlığında artış meydana gelmiştir. Daha yüksek ağırlık yakıt tüketiminde artışa sebep olduğundan, bu ekstra eklentilerin ağırlığını kompanze etmek için araçlarda beyaz gövdenin (body in white) daha hafif olması gerekmektedir. Beyaz gövde sac metallerin fazla bulunduğu bir bölgedir. Bu nedenle araç üretimlerinde beyaz gövdede yalnızca daha mukavim ya da dayanımın ihtiyaç olduğu kısımlarda tailor saclar kullanılmaktadır. SEY analizi ile bölgesel zayıflıkları belirlenen bölgeler için geliştirilen tailor saclar, bölgesel mukavemet sağlamaktadır. Tailor saclarda bütünlük kaynak veya haddeleme ile sağlanır. Genellikle otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. İki sacın birleştirilmesi kaynak ile sağlanıyor ise kaynaklı tailor sac (tailor-welded) olarak adlandırılır. Ancak farklı metal sacı birleştirirken kaynak metalurjisi iyi incelenmelidir. İki sacın birleştirilmesi haddeleme yöntemi ile gerçekleşiyor ise bu ürünler haddeli tailor sac (tailor-rolled) olarak adlandırılır.

2.1. Tarihçe

Metal/polimer/metal sandviç levhalar, 20. yüzyılın başında ilk kez uçak yapımında kullanılmıştır. Ayrıca, 1950 yıllarına kadar sandviç paneller inşaat, otomotiv ve havacılık da dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

Sandviç yapılar kavramı ilk olarak 1910'larda Alman mühendis Hugo Junkers tarafından tanıtıldı. Junkers, uçak tasarımı için sandviç yapıların potansiyelini fark etti ve şirketi Junkers Flugzeugwerke, 1915'te sandviç yapı kullanan ilk uçağı üretti.

Sonraki on yıllarda, sandviç yapılar uçak tasarımında kullanılmaya devam etti, ancak diğer uygulamalarda da kullanılmaya başlandı. Örneğin 1940'larda radar antenlerinin yapımında sandviç paneller kullanıldı. 1950'lerde, yeni malzemelerin ve imalat tekniklerinin geliştirilmesi, inşaatlarda, özellikle yalıtım ve kaplama amaçlı olarak sandviç panellerin daha geniş bir şekilde kullanılmasına yol açtı.

Metal/polimer/metal sandviç levhaların kullanımı özellikle 1960'lara kadar izlenebilir. Bu panellerin ilk uygulamalarından biri, panellerin yalıtım amacıyla kullanıldığı frigorifik kamyonların yapımında olmuştur. 20. Yüzyılın son çeyreğinde, bilhassa enerji verimliliği standartlarının giderek katılaştığı Avrupa'da, bina yapımında sandviç

panellerin kullanımı hızla arttı. Günümüzde metal/polimer/metal çok katmanlı sandviç levhalar, havacılık, ulaşım, inşaat ve endüstriyel ekipmanlar gibi çok farklı alanlarda kullanılmaktadır.

2.2. Literatürde Çok Katmanlı Çelikler

Çok sayıda uluslararası çelik-polimer çok katmanlı malzeme araştırmaları endüstriyel ihtiyaçlara göre yapılmış ve yayınlanmıştır. Bu yayınlar genellikle, çeşitli modeller ve derin çekme için sandviç plakaların simülasyonları, bükülme süreçleri veya bir araç gövdesindeki sandviç malzeme bileşenlerinin çarpışma davranışı olarak karşımıza çıkmaktadır. Örnek olarak gösterilebilecek bazı çalışmalar şunlardır;

- Sandviç plakaların delaminasyon sürecinin sayısal analizi [8].
- Geri esneme etkisi sayısal bir model çalışması [9].
- Farklı polimer çekirdekler, çelik veya alüminyum kullanılarak üretilen sandviç malzemelerin sönümleme, titreşim ve akustik özellikleri ve sonlu bir eleman (FEM) analizi [10].
- Farklı modelleme türlerini kullanarak stres-gerinim koşullarına ait karakteristiğin, yapısal değişikliklerin veya diğer önemli etkilerin analizi ve sandviç malzemelerin davranışı [11].
- Farklı yükleme koşulları altındaki sandviçlerin bükme ve derin çekme şekillendirme davranışı [11,12,13,14,15,16].

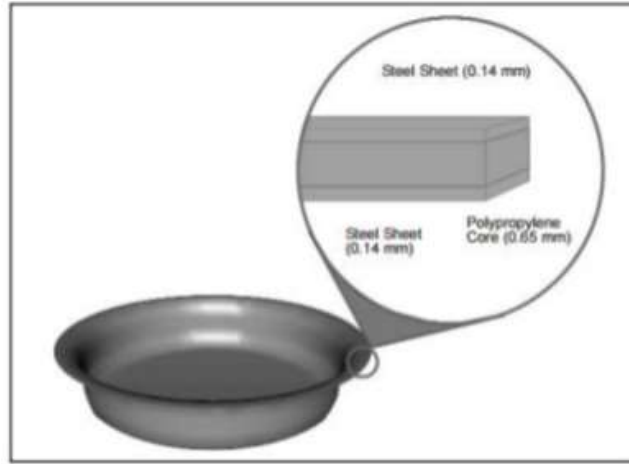
2.3. Çok Katmanlı Çeliklerin Endüstriyel Uygulamaları

Geniş uygulama alanlarına bağlı olarak, çok katmanlı çeliklerin üç boyutlu şekillendirilmesi ve birleştirilmesi çok farklı biçimlerde yapılabilmektedir. Çok katmanlı çelikler için kullanılan farklı üretim teknikleri Tablo 2.1.'de yer almaktadır.

Tablo 2. 1. : Metal ve kompozitler için kullanılabilecek üretim teknikleri

Birleştirme Yöntemi	Nüfuziyet (1 veya 2 yüzey)	Kaynaklanabilir Malzemeler	Isıl Bozulma	Referanslar
Nokta Kaynak Yapıştırıcı bağlama	2, iyi 1, çok iyi	Çoğu metaller Çoğu Malzeme	Var Yok	Michalos et al. (2010) Barnes and Pashby (2000), Huck and Bosshard (2007)
Lazer Dikiş Kaynağı	1, çok iyi	Çoğu Malzeme	Var	Mackwood and Crafer (2005), Sieber and Brunnecker (2009)
Uzaktan Lazer Kaynak	1, çok iyi	Çoğu Malzeme	Var	Tsoukantas et al. (2005), Tsoukantas and Chryssolouris (2006) Olsen (2007)
Sürtünme Karıştırma Perçin	1, iyi 1, iyi	Çoğu Malzeme Metaller ve plastikler	Yok Yok	Grote and Antonsson (2009), Hill (1994), Barnes and Pashby (2000)
Kilinçing Rulo Kaplama (Roll bonding)	2, iyi 1, çok iyi	Metaller ve plastikler Metaller ve plastikler	Yok Yok	Varis (2003) Palkowski and Lange (2007), Sokolova, Carradò, and Palkowski (2011a), Carradò et al. (2011a)

Çok katmanlı malzemelerin kullanımı 1910'lu yıllara kadar dayanmaktadır. Metal-polimer-metal sandviç kompozit çok katmanlı levhalar, 2000 li yıllarda yoğun olarak otomotiv sektöründe kullanılmaya başlamışlardır. Hafifletmek ve ses azaltmak için araç gövdelerinde, vites kutusu kapaklarında, bagaj kapaklarında ve yedek tekerlek boşluklarında kullanılmaktadırlar. Şekil 2.1.'de gösterilen çok katmanlı çelik uygulamalarına iyi bir örnek Ultra Hafif Çelik Otomobil Kaportasıdır. Burada sıradan tek katmanlı malzemeye göre %50 bir hafiflemenin yanında homojen bir levha yapısı ve yeterli mukavemet elde edilmiştir [4].



Şekil 2. 1. : ULSAB ın Şematik Gösterimi

Bir başka örnekte Şekil 2.2.'de gösterilen “Hylite” isimli alüminyum sandviç paneller, Ford E-Ka modeli için 2000 li yıllarda kullanılmıştır [4].



Şekil 2. 2. : Hylite isimli alüminyum sandviç panelin Ford E-Ka’da kullanımı

Genellikle çok katmanlı malzemeler normalde hafif ve daha yüksek mukavemetli iki farklı malzemenin bir kombinasyonu şeklindedir. Genelde daha hafif olan malzeme çekirdek katman olarak kullanılır. Daha mukavim özelliklere sahip kaplamalar ise çekirdek katmanın özelliklerini kaybetmeden görevini yerine getirmesine yardımcı olurlar. Yumuşak çekirdek malzeme, daha sert olan metal malzemeyi çeşitli yükler altında destekler, kesme kuvvetlerini dağıtır ve yüksek sönümlenme malzemesi olarak hizmet eder.

Hafif çekirdek malzemeler polimer folyolar, balsa ağacı, polimer köpükler, kağıt veya polimer peteklerden oluşabilir. Bu malzemeler yüksek çekme ve kesme özelliklerine sahip karbon, cam, aramid elyaf takviyeli polimerlerin yanı sıra alüminyum, titanyum veya çelikler gibi malzemelerle birlikte kullanılabilir. Bu katmanlar genellikle birbirine yapıştırarak, bonding , metal kaplama, ekstrüzyon, veya kalıplama ile birleştirilir. Tablo 2.2.'de günümüzde aktif bir şekilde kullanılmakta olan farklı özelliklerdeki çok katmanlı sandviç paneller gösterilmektedir.

Tablo 2. 2. : Endüstriyel olarak kullanılan çok katmanlı sandviç kompozitler

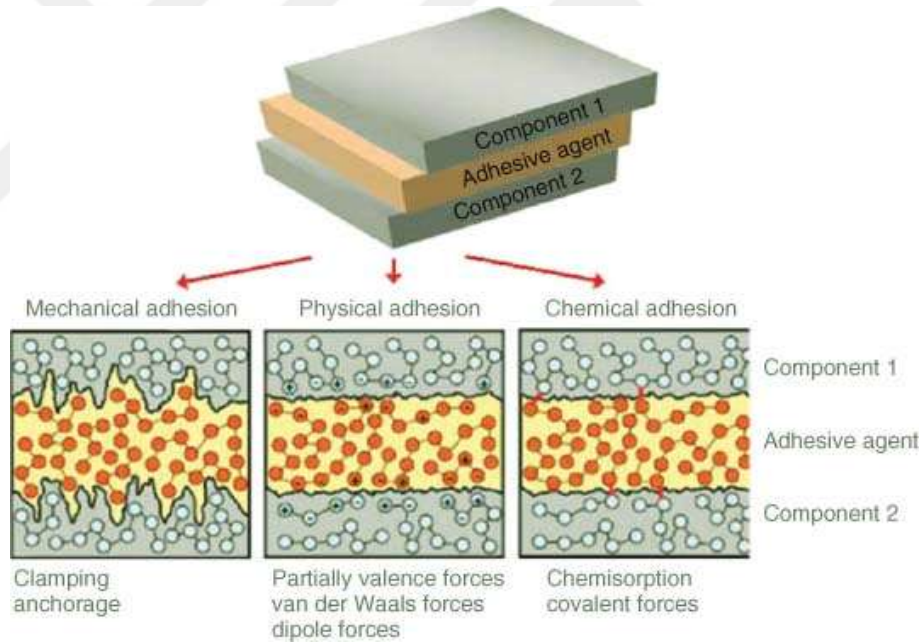
	Malzeme	Referanslar
GLARE©	Al/Polimer içinde cam fiber/Al	Ibarra-Castaneda et al. (2011), van Tooren (2004), Burchitz et al. (2005), Botelho et al. (2006), Vermeren et al. (2003), Kawai and Hachinohe (2002)
Carall©	Al/karbon epoxy/Al	Almeida et al. (2008)
ARALL	Aramid elyaf takviyeli alüminyum laminat	Johnson (1986), Vogelsang (1983)
FML	Fiber metal laminat	Abdullah and Fahrudin (2009)
Hylite©	Al/polipropilen/Al (Al/PP/Al)	Burchitz et al. (2005)
Alukobond©	Al/PVC veya mineral/Al	Alean composite GmbH (2009)
Dibond©	Al/polietilen/Al	Alean composite GmbH (2009)
Bondal©	Çelik/polipropilen/Çelik	ThyssenKrupp Stahl (2003)
TiGr©	β -Ti/Karbon poliyamid(PMC)/ β -Ti	Burianek and Spearing (2001)
Hybrix©	Paslanmaz Çelik/polipropilen/Paslanmaz Çelik	Jackson, Allwood, and Landert (2007)
Sollight©	Orta sert çelik/polipropilen/Orta Sert Çelik	Jackson, Allwood, and Landert (2007), ArcelorMitt (2011)
Alulight©	AL/PVC veya mineral/PVC	Jackson, Allwood, and Landert (2007), ArcelorMitt (2011)

2.4. Çok Katmanlı Çeliklerin İmalat Usulleri

Yapışma, bir arayüz katmanının fiziksel durumudur ve mekanik olarak iki temas fazı arasında oluşan, fiziksel veya kimyasal bağ olarak ifade edilebilir. Bağlayıcı madde veya yapıştırıcı (örn. epoksi), kendiliğinden yapışmanın mümkün olmadığı durumlarda metal ve polimer arasında bağlanmaya olanak sağlar. Yapıştırıcı genellikle bir viskoz veya belirli bir sıcaklıkta sertleştirme ajanı olarak görev yapar. Şekil 2.3.'de görüleceği gibi bir çok katmanlı sandviç panelde yapışma işleminde rol oynayan malzemeler

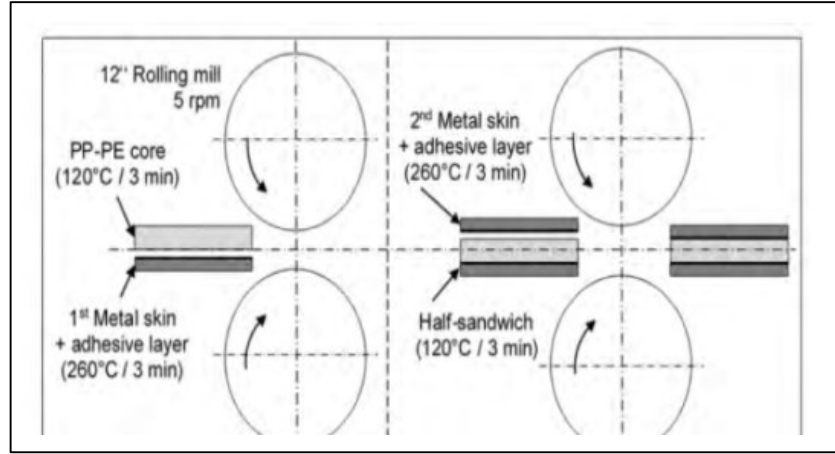
"bileşen-1" (ör. metal kaplama), "bileşen-2" (ör. polimer çekirdek) ve "yapışkan madde" olarak sınıflandırılabilir. Metal-polimer-metal yapılar ile ilgili olarak yapışma ve bağlama mekanizmaları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir;

- Mekanik adhezyon yapışma olarak adlandırılan yapışma, büyük ölçüde yüzeye bağlıdır ve malzemelerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisi önemli rol oynar.
- Kimyasal adhezyon yapışma olarak adlandırılan yapışma, yapıştırıcı madde ve yapışan malzemeler arasında kimyasal reaksiyonlara dayanan yapıştırma tekniklerini kullanır.
- Fiziksel adhezyon olarak adlandırılan ve fiziksel interpoler bağlar arasındaki etkileşim kuvvetlerine (çekim ve itici kuvvetler) dayalı yapıştırma tekniği de kullanılabilmektedir.



Şekil 2. 3. : Çok katmanlı metallerde yapışkan katmanlar arası bağlar.

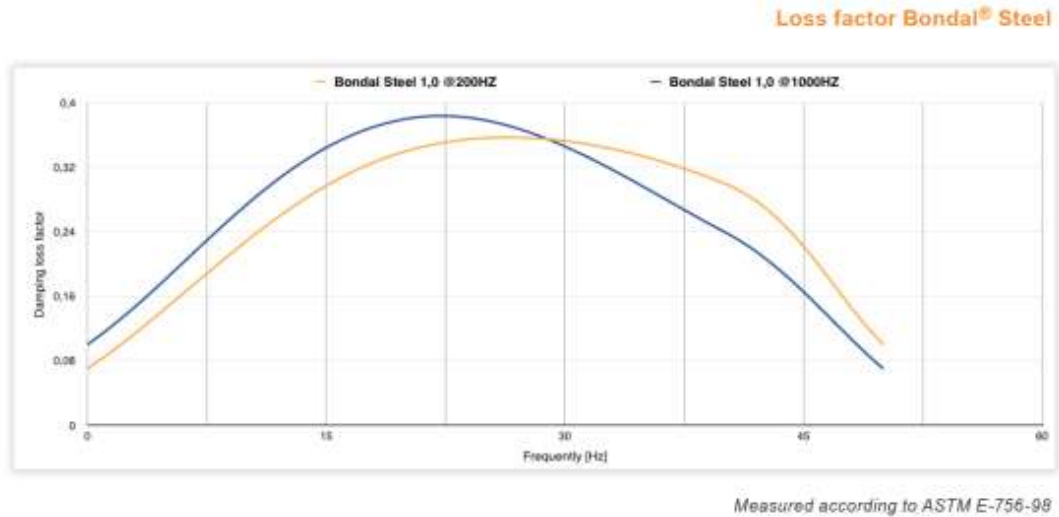
Çelik-Polimer-Çelik olarak üretilen çok katmanlı çelikler aşağıdaki Şekil 2.4.'de gösterilen şemada gösterildiği gibi iki aşamalı bir süreçte üretilirler. İlk olarak yapışkan malzemeye yaklaşık 260 °C de ve 3 dakika boyunca kürlleme işlemi yapılır. Polimer katmanda çekirdeğe yapışmayı iyileştirmek ve üst seviyede kalite seviyesi elde edebilmek için 120 ° C'de önceden ısıtılır [17].



Şekil 2. 4. : Çok katmanlı çeliklerin üretim aşamaları

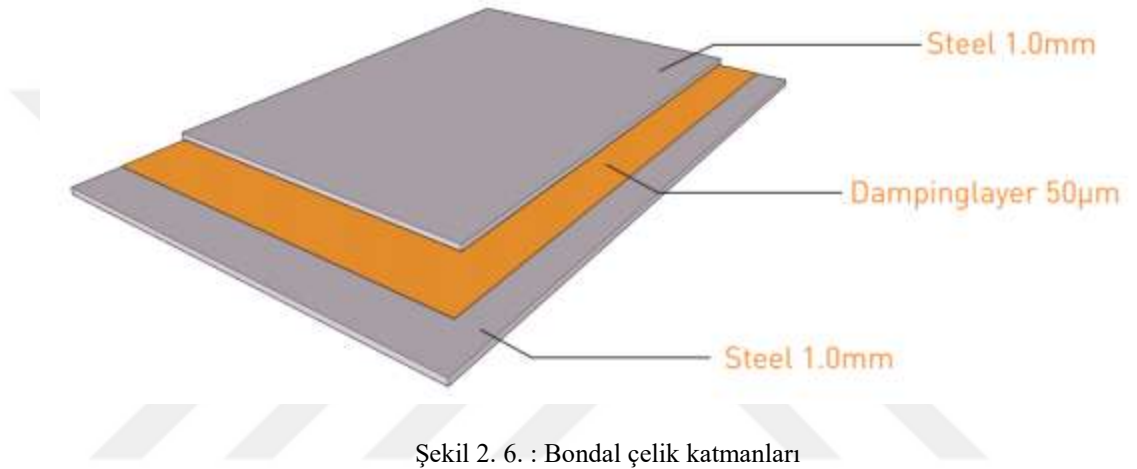
2.5. Bondal Çok Katmanlı Çelikler

Bondal Çelik, yapı kaynaklı gürültü sönümlemesini kaplama malzemesi yardımı ile azaltmak için sunulmuş endüstriyel ve ticari bir çözümdür. Bondal Çelik çevre dostu bir yöntem ile kolay uygulanabilen ve uygulama alanlarında özellikle ses sönümleme özelliği ile daha üst kalitede bir kullanıcı deneyimi oluşturmayı hedefleyen bir malzemedir. Çok ince 0,05mm visko elastik tabakanın sönümleme etkisi ile yapı kaynaklı gürültü sönümlenir ve aşağıda Şekil 2.5 ile gösterilen akustik performans elde edilir. [18]



Şekil 2. 5. : Bondal çelik ses sönümleme performansı (loss faktör grafiği) [18]

İki levha arasındaki sönümleyici katman akrilik ve fiziksel olarak bonding operasyonunda basınca karşı duyarlı olan PSA isimli bir yapıştırıcı içermektedir. Adhezyon prosesi iki levha arasındaki baskı basıncına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Basıncın artmasıyla adhezyon bir seviyeye kadar daha yüksek performans sergilemektedir. Fiziksel olarak iki levha arasındaki yapıştırıcı yüksek viskoziteye sahip, plastik ve elastik olarak şekillenebilen likit bir madde formunu almaktadır. Şekil 2.6'da Bondal Çelik katmanları şematik olarak gösterilmiştir.

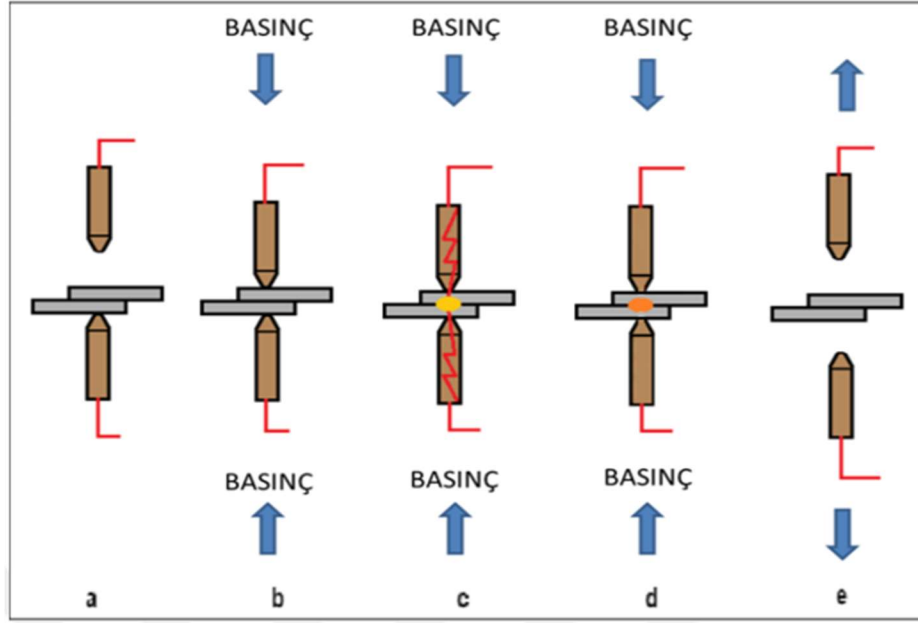


BÖLÜM 3. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

3.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağının Uygulama Esasları

Metal sektöründe kullanılan kaynak türleri, havacılık, otomotiv, savunma sanayi uygulamaları, uzay teknolojileri, çelik eşya uygulamaları, hassas ekipmanların imalatı, elektronik, çok amaçlı boru üretimi ve makine üretim sektörü gibi alanlarda yapılan kaynaklarda, çok ince kesitli malzemelerde yaşanan sorunlar nedeniyle zorunlu olarak genişlemiştir. Yüksek ısı altında kaldıklarında ince kesitli malzemeler kalıcı şekil bozukluklarına maruz kalabilir. Bu durum uygulayıcıları kaynak işlemindeki süreyi düşürüp ısı girdisini kontrol altına almaya zorlamıştır. Operasyon hızının yüksek ve parçalarda minimum deformasyonla kaynak işleminin gerçekleştirilmesi, uygun maliyet ile yüksek kaynak mukavemeti istenen noktalarda, elektrik direnç kaynağı kullanımını zaruri kılmaktadır [19]. Elektrik direnç nokta kaynağı, kaynak prosesine maruz kalan iş parçalarının elektrik akımına direnç göstermesiyle ve ısı, basınç, zaman parametrelerinin ortak etkisiyle gerçekleşen bir prosestir [20,21].

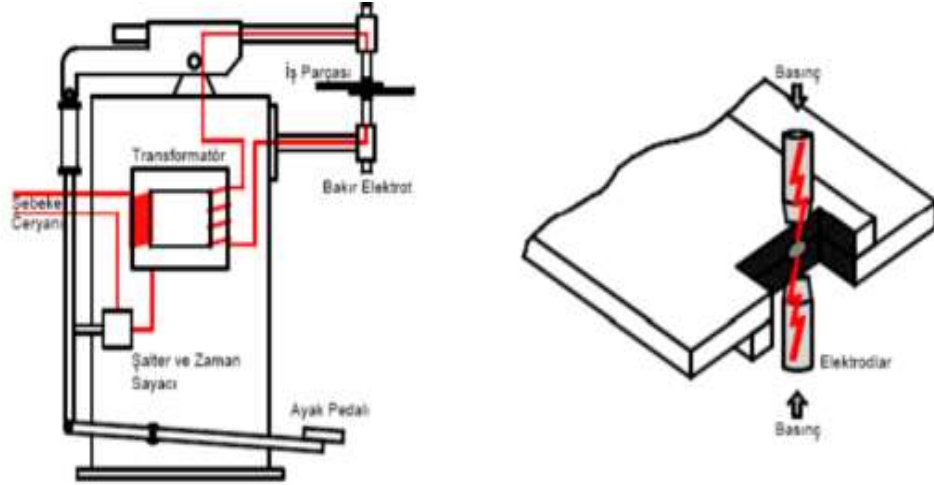
Şekil 3.1’de işlem basamakları gösterilen elektrik direnç kaynağı seri imalat yöntemleri açısından çok uygun bir prosestir. Bir operatör tarafında bir pedal yardımıyla kaynak işlemi çok hızlı gerçekleştirilir. Metal parçaların üzerinden geçirilen elektrik akımına karşı bu parçalarda oluşan direnç ile ısı oluşmakta ve bu ısı basınç yardımıyla birleşince elektrik direnç kaynağını gerçekleştirmektedir. Elektrik akımı kesilerek iş parçalarına kaynak banyosunun oluşumundan itibaren elektrik basınç uygulanır ve soğuma bu basınç altında gerçekleştirilerek çok mukavim bir kaynakla birleşim elde edilmiş olur.



Şekil 3. 1. : Elektrik direnç kaynağı işlem basamakları [22]

Bu yöntem yardımıyla gerçekleşen kaynak işlemine elektrik direnç kaynağı adını vermekteyiz. Elektrik direnç kaynağı sayesinde verimi yüksek ve nispeten daha az kirlilik yaratan bir yöntem ile kaynak işlemi gerçekleştirilmiş olur. Ayrıca otomasyon uygulamalarına fırsat yaratması anlamında diğer kaynak metotlarına göre avantaj sağlayabilir. Tekrar edilebilen işlemlerin olması ve operatör bağlı hataları daha aza indirmesi açısından da bu proses avantaj sağlamaktadır [23]. İşçilik maliyetleri bakımından kıyaslandığı zaman, özellikle diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında bu yöntemde birim işçilik başına harcanan maliyetleri oldukça düşük seviyede tutulabilmektedir. Bunun yanında bir dezavantaj ise elektrik direnç kaynağı ekipmanlarının diğer ekipmanlara göre pahalı olabilmesidir [19].

Direnç kaynağı türleri içinde kullanımı en sık olan kaynak tipi elektrik direnç nokta kaynağıdır. Bu yöntemde kaynatılacak parçalar iki bakır elektrot yardımıyla ve belirli bir baskı uygulanarak elektrik akımı geçişi ile kaynak işlemine tabi tutulur. Şekil 3.2’de elektrik direnç nokta kaynak makinesi temel bileşenleri ve kaynak bölgesi gösterilmektedir [19].

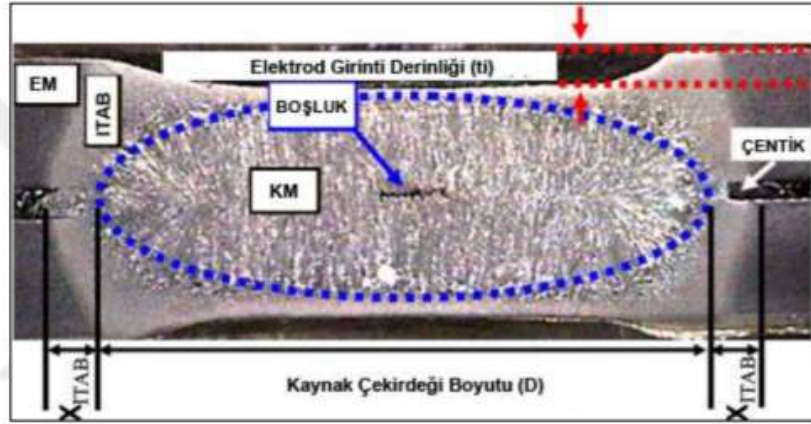


Şekil 3. 2. : Elektrik direnç nokta kaynağı temel bileşenleri

Makine üzerinde bulunan sayaç ve şalter ile belirlenen süre boyunca, elektrik akımı bir elektrottan diğer elektrota akarken (Sac kalınlığına göre değişmekte olup 0,2 sn civarında sürebilmektedir.) bu akıma karşı oluşan karşı direnç, temas noktasında en yüksek seviyeye ulaşır ve bu noktada malzeme ergimesi başlar. Elektrik akımının son bulması ile kaynak banyosu, temas bölgesinde uygulanan basınç altında soğur, katılaşır ve iki levha şeklindeki malzeme sökülmez ve mukavim bir şekilde birleştirilmiş olur. Konvansiyonel olarak kullanılan nokta direnç kaynağı makinesinde temel bileşenler, bakır elektrotlara gerekli yükü uygulamak için kullanılan mekanik bir sistemde, şebeke tarafından sağlanan gerilimi düşüren bir transformatör, bazı makine modellerinde kullanılan akım kontrol cihazları ve zaman kontrolünde kullanılan bir zaman sayacından oluşur. Elektrot ucunun geometrisi elektrik direnç nokta kaynağında ortaya çıkan kaynağın geometrisi ve estetik görüntüsü açısından son derece önemlidir. Kaynak prosesinde istenen kaynak çekirdeği iki parçanın temas yüzeylerinde meydana gelmesi ve dış yüzeylere kadar yayılmamasıdır. Kesit alınarak inceleme yapılması durumunda, uygun proses parametreleri ile yapılmış elektrik direnç nokta kaynağı çekirdek geometrisi dış bükey bir merceğin geometrisine benzer şekilde oluşmaktadır. Üstten görünüşü incelendiğinde ise görülecek olan şeklin elektrot yüzeyinin şeklinde ve yaklaşık aynı boyutta olması beklenir.

Elektrik direnç nokta kaynağındaki uygulanan parametrelere göre kaynağın makro yapı görüntüsü aşağıdaki Şekil 3.3’de gösterildiği şekilde değişmektedir. Bu şekilde “D”

simgesi kaynak çekirdeği boyutunu, “ti” ise elektrot girinti derinliğini ve “XITAB” ITAB’ın genişliğini ifade etmektedir. Kaynak metali, ITAB ve esas metal birleşim noktasındaki üç farklı mikroyapısal alanı göstermektedir. Oluşabilecek her türlü çentik kaynak kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir [24].



Şekil 3. 3. : Elektrik direnç nokta kaynağı makro yapısı

3.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Proses Parametreleri

Elektrik direnç nokta kaynağı proses parametreleri kaynak kalitesi açısından çok önemlidir. Parametrelerin küçük değişimleri proses çıktısını ciddi derecede etkileyebilmektedir. Bu sebeple optimum proses parametrelerini belirlemek zorlu bir süreç haline gelebilmektedir.

Proses parametrelerinden elektrot kuvvetinin amacı, metal saclara yeterli basıncı uygulamaktır. Yeterli kaynak basıncı, büyük bir elektrot kuvveti gerektirir, aksi takdirde kaynak kalitesinde sorunlar görülebilir. Ancak, gereğinden fazla elektrot kuvveti de diğer sorunları doğurabilmektedir. Örneğin, elektrot kuvveti arttığında ısı enerjisinin azalmasına, bu da daha yüksek elektrot kuvvetinin daha yüksek bir kaynak akımı gerektirdiği anlamına gelir. Kaynak akım şiddeti yükseldiğinde ise elektrotlar ve levhalar arasında sıçrama meydana gelebilmektedir. Bu da elektrotların levhaya yapışmasına neden olacaktır. Delik kaynağı işlemi sırasında aynı koşulları korumak için elektrot kuvvetinin kademeli olarak arttırılması gerekir.

Bir diğerk önemli proses parametresi elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot çapıdır. Genel kabullere göre elektrot temas yüzeyinin çapı, külçe çapından biraz daha büyük olmalıdır. Buna ek olarak bir diğerk önemli proses parametresi olan sıkma süresi, elektrot kuvvetinin işe ilk uygulanması ile akımın ilk uygulaması arasındaki zaman aralığıdır. Elektrot kuvveti istenen seviyeye ulaşınca kadar kaynak akımını geciktirmek için sıkıştırma süresi gereklidir. Kaynak süresi ise, metal levhalara kaynak akımının uygulandığı süredir. Kaynak süresi için optimum kaynak süresinin kesin bir değerini vermek oldukça zor olmakla birlikte aşağıdaki kabuller göz önünde bulundurulmalıdır;

- Kaynak süresi olabildiğince kısa olmalıdır.
- Kaynak parametreleri, elektrotların mümkün olduğunca az aşınmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir. (Genellikle bu, kısa bir kaynak süresi anlamına gelir.)
- Kaynak süresi, kalın levhalar kaynak yapılırken kaynak çapının büyük olmasına neden olabileceği için dikkatli olunmalıdır.
- Kaynak süresi kısa tutulabilirse, elektrot nedeniyle oluşan çentik mümkün olduğunca küçük olacaktır.

Diğerk önemli proses parametresi kaynağı soğutmak için elektrotların levhaya uygulandığı zaman olan tutma süresidir. Kaynak teknik açısından ele alındığında, tutma süresi en ilginç kaynak parametresidir. Kaynak parçalarını serbest bırakmadan önce kaynak parçasının katılaşmasına izin vermek için tutma süresi gereklidir, ancak bu, kaynak noktasındaki ısının elektroda yayılmasına ve onu ısıtmasına neden olabileceği için uzun sürmemelidir. Elektrot daha sonra aşınmaya daha fazla maruz kalacaktır. Ayrıca, tutma süresi çok uzunsa ve malzemenin karbon içeriği yüksekse (%0,1'den fazla), kaynağın kırılgan hale gelme riski vardır. Örneğin galvanizli karbon çeliği kaynak yaparken daha uzun bir tutma süresi tavsiye edilir.

Kaynak akım şiddeti, bir kaynak yapılırken kaynak devresindeki akımdır. Kaynak akım şiddeti mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Kullanılacak akımı belirlerken, metal levhalar arasında kaynak sıçraması oluşana kadar akım kademeli olarak arttırılır. Bu, doğru kaynak akım şiddetine ulaşıldığını gösterir.

3.2.1. Kaynak akım şiddeti

Kaynak akım şiddeti, punta kaynağında kritik bir proses parametresidir ve elde edilen kaynağın kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Kaynak akımı, kaynak işlemi sırasında üretilen ısıyı doğrudan etkiler ve bu da kaynak külçesinin boyutunu ve kalitesini, ayrıca ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB) ve birleştirmenin genel mekanik özelliklerini etkiler.

Kaynak akımı şiddetinin punta kaynağı kalitesi üzerindeki en önemli etkilerinden biri, kaynak külçesinin boyutu ve şeklidir. Daha yüksek bir kaynak akımı tipik olarak daha büyük ve daha üniform bir külçe ile sonuçlanır, bu da kaynağın sağlamlığını ve güvenilirliğini artırabilir.

Bununla birlikte, kaynak akımı çok yüksekse, külçe çok büyüyebilir ve erimiş metalin dışarı atılmasına ve daha zayıf bir kaynağa yol açabilir. Kaynak akımının punta kaynağı kalitesi üzerindeki diğer bir etkisi de ısıdan etkilenen bölge (ITAB) boyutudur. ITAB, kaynak işlemi sırasında ısıtılmış ancak erimemiş külçeyi çevreleyen alandır.

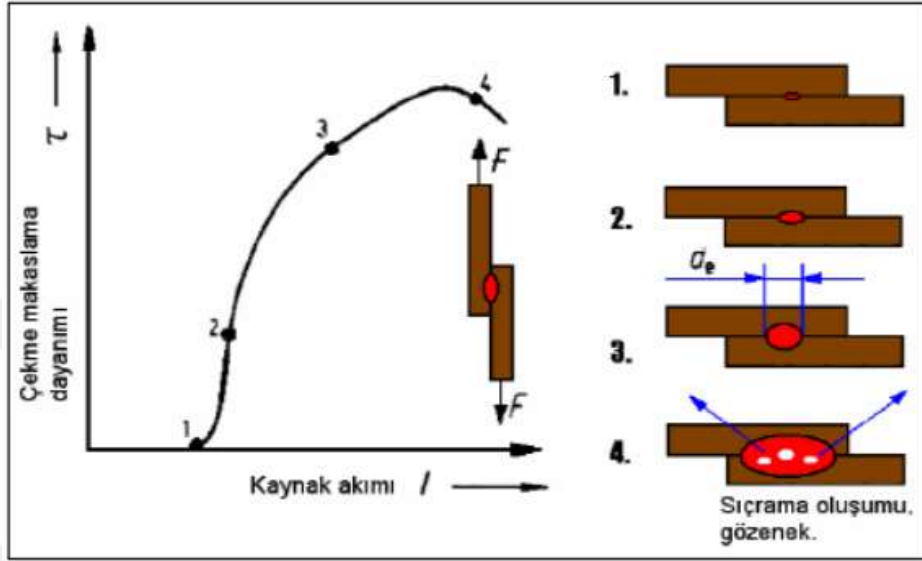
Daha yüksek bir kaynak akım şiddeti, malzemenin daha fazla yumuşamasına ve bağlantının mukavemetinin azalmasına yol açabilen daha büyük bir ITAB ile sonuçlanabilir. Buna karşılık, daha düşük bir kaynak akımı daha küçük bir ITAB'a ve daha güçlü bir bağlantıya neden olabilir, ancak aynı zamanda eksik erime ve füzyona da yol açabilir.

Kaynak akım şiddeti ayrıca birleştirmenin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini de etkiler. Daha yüksek bir kaynak akımı, daha fazla tane büyümesine ve metalin mikro yapısında bağlantının sağlamlığını ve tokluğunu etkileyebilecek değişikliklere neden olabilir.

Tersine, daha düşük bir kaynak akımı daha rafine bir mikro yapı ve geliştirilmiş mekanik özellikler ile sonuçlanabilir, ancak aynı zamanda eksik erime ve zayıf füzyonla da sonuçlanabilir. Son olarak, kaynak akımı da kaynağın görünümünü etkileyebilir.

Daha yüksek bir kaynak akım şiddeti daha pürüzlü ve daha pürüzlü bir yüzeyle sonuçlanabilirken, daha düşük bir kaynak akımı daha pürüzsüz bir yüzeyle sonuçlanabilir. Bununla birlikte, kaynağın görünümü genellikle mekanik özelliklerinden ve güvenilirliğinden daha az önemlidir.

Elektrik direnç nokta kaynağında oluşan ısı, kaynak zamanı ile kaynak akım şiddetinin karesiyle doğrudan orantılı olarak gerçekleşmektedir [25]. Akım ve zaman değişkenlerinin ısı oluşumunu etkilemesinin yanında, ısıнын oluşma hızı kaynak akımına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır [26,27]. Isı (enerji) formülü $Q=K.I^2R.t$ şeklindedir [28, 29, 30]. Kaynak akımının değişmesi, çekme-makaslama dayanımı (Şekil 3.4), çekirdek çapı ve sertlik gibi özellikleri önemli derecede etkilemektedir [31].



Şekil 3. 4. : Kaynak akımının çekme-makaslama dayanımına etkisi [32]

3.2.2. Kaynak zamanı

Kaynak işleminde zaman, üretilen ısıyı etkilemekte ve zaman artışıyla ısı paralellik göstermektedir. Bu nedenle kaynaklı bağlantının çekirdek çapı ve çekirdeğin h yüksekliği artar. Böylelikle kaynak yapılan bağlantının dayanımı artmış olur. Fakat kaynak süresinin fazla olmasıyla birlikte, kaynak akım şiddetinde olduğu gibi kaynak bölgesinde fişkırmalara neden olarak gözenek, çatlak ve dalma derinliği gibi kaynak hataların oluşmasına neden olur [33].

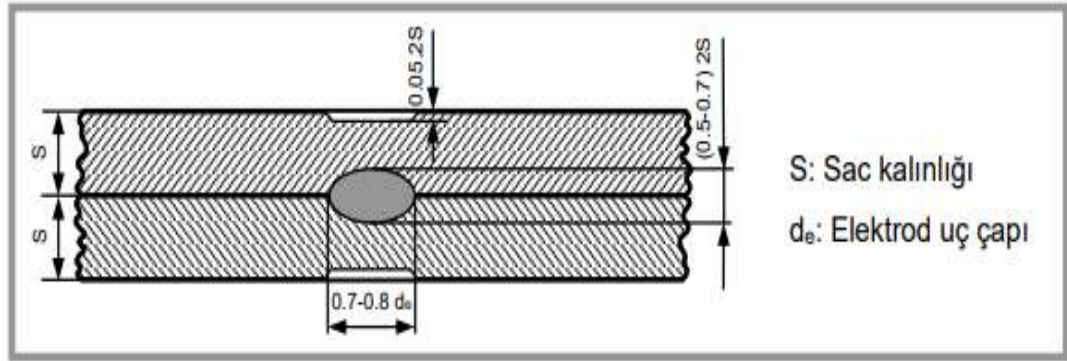
Kaynak süresinin azaltılabilmesi için akım şiddeti ve elektrot basıncının artırılması gereklidir. Kaynak bölgesinde akım şiddetinden dolayı oluşabilen fişkırmaların önüne geçebilmek için de yüksek basınç kuvvetine ihtiyaç duyulur. Aynı nokta çapının elde edilebilmesi için, kısa süre-yüksek akım veya uzun süre-düşük akım şiddeti kullanılmalıdır [34].

3.2.3. Elektrot kuvveti

Kaynak işleminin başlaması için elektrotlar yaklaştırılır, iş parçaları baskı ile sıkıştırılır ve uygulanan kuvvet stabil hale getirilir. Uygulanan kuvvet ile kaynak prosesi sırasında gereken temas direnci ters orantılıdır. Kuvvet artarsa, temas direncinde düşüş görülür ve bu değişim karakteristiği malzeme cinsine göre değişir. Şayet direncin oluşmadığı durumda gerekli ısı da üretilemez ve parçalar kaynaklanamaz.

Kaynak prosesinde elektrot kuvvet üç ana başlıkta önem arz eder. Elektrot kuvveti basma süresince iş parçaları arasında temas direnci oluşturur ve bununla birlikte elektrot ile iş parçası arasındaki temas direnci kontrol altında tutularak düşük değerlerde olması sağlanır. Elektrot kuvveti ayrıca sıvı metali baskı altında tutarak fışkırmayı önler ve kaynak kalitesine olumlu etki eder. Dövme aşamasını ele aldığımızda ise kaynak bölgesinin soğuması ve katı faza geçişinde meydana gelebilecek çatlak ve boşluk gibi kalite problemlerinin olmamasını sağlar [35].

Akım uygulamasına ek olarak elektrot kuvveti artırılarak elektrik direnç nokta kaynağı prosesinde kaynak dikişlerindeki kalite problemleri önlenabilir. Kaynak noktasına ait boyutlar ve alabilecekleri en büyük değerler Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3. 5. : Elektrik direnç nokta kaynak boyutları [36].

3.2.4. Elektrot malzemesi

Elektrotların ısınması önleyebilmek için, elektrotlara ait elektrik iletkenlikleri ve temas direnç seviyesi olası en asgari seviyede tutulmaya çalışılır. Bununla birlikte elektrotun ucu ile iş parçasının temas ettiği alanlarda yer alan ısı miktarının uzaklaştırılması için ısı

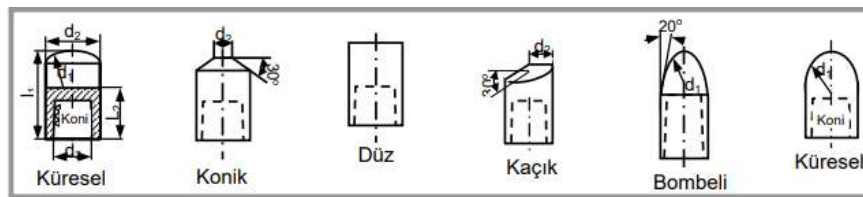
iletkenliklerinin yüksek olması tercih edilmektedir. Ayrıca, elektrotlar yüksek kuvvet yüklerine maruz kaldıkları için deformasyona karşı direnç gösterebilmelidirler. Kaynak işlemi yapılırken ısınmadan dolayı oluşabilecek alaşımlandırma eğiliminin düşük olması gerekmektedir.

Elektrolit bakırın yukarıda belirtilen ve istenen özelliklerden bazılarına sahip olduğundan, iletkenlik değerleri saf bakırdan daha düşük olmasına rağmen, bakır alaşımları veya tungsten-molibden elektrot malzemeler tercih edilir. Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşım ve özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir

Tablo 3. 1. : Elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot alaşımları

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

Elektrotların boyut ve şekilleri, kaynak işleminin tatbik edilecek iş parçalarının cins, şekil ve boyutlarına göre belirlenir. En çok kullanılan elektrotlar incelendiğinde, küresel ve kesik koni uç formuna sahip olan elektrotların tercih edildiği görülmektedir [35]. Şekil 3.6’da imalat sektöründe kullanılan elektrotların uç formları gösterilmiştir.



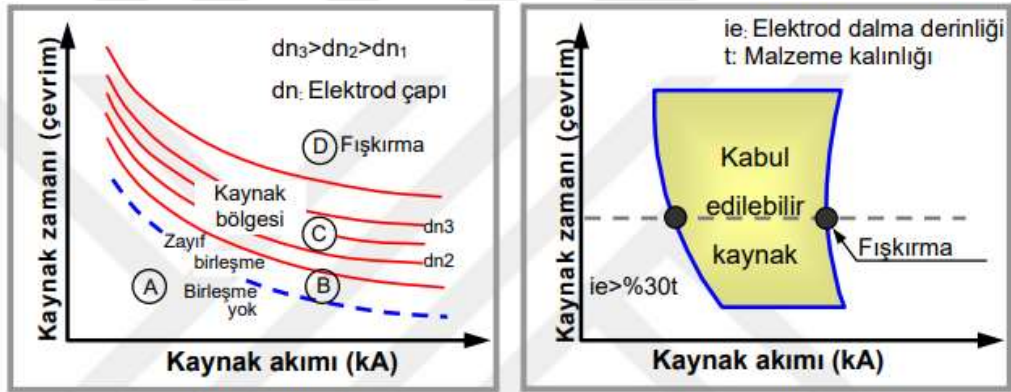
Şekil 3. 6. : İmalat sektöründe kullanılan elektrot uç formları [36].

3.3. Kaynak Kabiliyeti Diyagramı

Elektrot kuvveti, kaynak zamanı ve akım şiddeti elektrik nokta direnç kaynağı prosesinde en önemli parametrelerdendir [37,38]. Kaynak sırasında elektrot kuvvetini değiştirmek zorlayıcıdır ve elektrotlarda mantarlaşıma oluşabilir. Bundan dolayı genellikle kaynak işlemlerinde sabit bir elektrot kuvveti tercih edilmektedir [39,40].

Elektrot kuvvetini sabit tutarak, değişken olan kaynak parametre değerlerinde optimum noktaları grafiksel olarak gösteren açıklamaya ‘kaynak kabiliyeti diyagramı’ adı verilir [41]. Belirlenen çok katmanlı çelik malzemeleri için, elektrot dalma derinliği, elektrot çapı, kaynak çekirdek çapı ve elektrot kuvvetine bağlı olarak elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların dayanımını gösteren kaynak kabiliyeti diyagramı oluşturmak mümkündür.

Bu grafik kaynak çekirdek çapının kabul edilebilir değerler arasında olması için ancak kaynak zamanının akım şiddetine göre değişebilmesiyle elde edilir. Kaynak kabiliyeti diyagram genişliği, proses parametreleri açısından uygun kaynak aralığının elde edilmesine olanak sağlar. Elektrik direnç nokta kaynağı elektrot uç çapı ve kaynaklı birleştirmede kullanılan belirli bir elektrot baskı kuvveti için oluşturulan kaynak kabiliyet diyagramı Şekil 3.7’de gösterilmiştir [42].



Şekil 3. 7. : Weld Lobe, Kaynak kabiliyet diyagramı [42,43]

Elektrik direnç nokta kaynak işlemi sonrasında meydana gelen kaynak çekirdeğinin çapı ‘dn’ olarak Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Diyagram dört bölümden oluşmaktadır. A bölgesinde ergime durumu ile birleşme görülmez. B bölgesinde ise, basınca bağlı olarak ergimesiz zayıf derece bir birleşme meydana gelir. C bölgesi ise ergime ve kaynak bölgesi olarak ifade edilir. C ve B bölgelerinin sınır eğrileri ile başlar ve ergiyen kaynak bölgesinin boyutları, bu bölge içinde ilerleyerek artar. C bölge sınırları malzemenin tipine göre değişir. Bazı metalik malzemelerde bu bölge dardır ve kaynak zamanı ile kaynak akım şiddeti dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır. Uygulama esnasında zaman ve akım değerleri C bölgesine ait üst sınır değerine yakın olacak şekilde tercih edilmelidir.

D bölgesi ise fişkırmaman gözlemlendiği bölge olup, C bölgesinin üst sınırı akabinde fişkırmama görülür [44]. Şekil 4.7’de gösterilen ve optimum olarak değerlendirilen kaynak aralığı grafiğinin sol tarafında, kaynak zamanı ve akım şiddeti ile elektrotun dalma derinliğinin işlem sırasında kullanılan iş parça kalınlığının %30’unu geçmeyecek şekilde seçilmesiyle ölçülür. Bu değerlerin üzerinde bir tercih uygulanması durumunda fişkırmalar oluşabilir [45]. Elektrot dalma derinliğinin, kesit kalınlığının %30 altında olması halinde elektrik direnç nokta kaynağı tercih edilen kalite seviyesini yakalayabilir. Tam tersine bu değerler aşılsa, kaynak kesit kalınlığı inceler ve bu yüzey kalitesine etki eder. Bununla birlikte yüzey kalitesinin bozulması ile boyama esnasında iyi bir görünüm elde edilemez. Grafiğin sağ tarafı ise en yüksek çekme-makaslama dayanımını veren değerler ile ortaya çıkarılır [36].

3.4. Elektrik Nokta Direnç Kaynağında Bağlantı Kalitesinin Belirlenmesi

Kaynağa ait olan fiziksel özellikler, geometrik ölçüm sonuçları, performans sonuçları ve dayanımı gösteren raporlar sayesinde elektrik nokta direnç kaynağında bağlantı kalitesi belirlenebilir. Bağlantı kalitesi birçok etkene bağlı olarak değerlendirilerek sonuç raporlanır. [46]

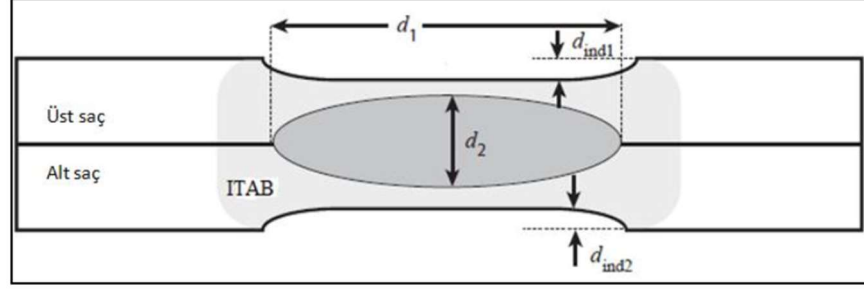
3.4.1. Kaynak kalitesinde incelenen fiziksek ve geometrik özellikler

Kaynak kalitesini belirlemek üzere aşağıda sıralanan fiziksel ve geometrik özellikleri kullanabiliriz:

1. Çekirdek çap ölçüsü (d_1)
2. Çekirdek yükseklik değeri (d_2)
3. Çekirdek boyut oranı (d_2 / d_1)
4. Dalma derinlik ölçüsü ($d_{ind1} + d_{ind2}$)
5. Yüzey görünümü
6. İç süreksizlikler
7. Fişkırmama

3.4.1.1. Çekirdek geometrisine ait ölçüler

Şekil 3.8. 'de kaynak sonucu oluşan çekirdeğe ait geometrik ölçümler gösterilmiştir [46]. Şekil 3.8'de gösterilen kaynak çekirdek çapı (d_1) ve yüksekliği (d_2) kaynak kalitesini değerlendirmek için en önemli ölçülerden kabul edilir ve kaynak dayanımı üzerinde doğrudan bir etkisi vardır [46,47,48].



Şekil 3. 8. : Kaynak çekirdek geometrisi

Elektrik nokta direnç kaynağında yapılan üretim sırasında üst düzey kalite sağlanması isteniyorsa çekirdek çapının olması gereken asgari düzey şöyle hesaplanır.

$$d_2 = 4s^{0,5} \quad (3.1)$$

Bu denklemde “s” iş parçasının kalınlığını ifade etmektedir. Yapılan çalışmalarda asgari çekirdek yüksekliğinin birleştirilecek parçalara ait kalınlık değerlerinin 1/5'i olarak kabul edilmektedir. Azami yükseklik değeri olarak ise ince olan iş parçasının 8/10 unu geçmemelidir. Bu azami değeri aşan çekirdek olması durumunda fışkırma, aşırı dalma derinliği ve elektrot ömrünün azalması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır [49].

3.4.1.2. Çekirdek boyut oranı

Çekirdek boyut oranı, elektrik direnç nokta kaynağı bağlantılarının mekanik özellikleri incelenirken diğer çekirdek ölçüleri ile birlikte mutlaka ele alınmalıdır [50]. Çekirdek boyut oranını hesaplamak için çekirdek yüksekliği çekirdek çapına bölünmelidir [51].

3.4.1.3. Dalma derinliği

Kaynak işlemi uygulanan iş parçalarının yüzeylerinde elektrotların uyguladığı basınç sebebiyle oluşan deformasyon dalma derinliği olarak adlandırılır. Bu derinliğin kaynaklarda yer alan bilgilere göre 30% u aşmaması beklenir [52].

3.4.1.4. Yüzey görünümü

Elektrik direnç nokta kaynağında, düşük veya yüksek aşınma seviyeleri sergileyen elektrot yüzeyinin durumu ve düşük veya yüksek değerlerde ayarlanan kaynak akımının yoğunluğu, derin elektrot izlerinin oluşmasına neden olabilir. Aşırı izler çatlaklara ve derin boşluklara neden olabilir ve sonuçta kötü şekillendirilmiş bir kaynak ortaya çıkar. Ayrıca, elektrot kalıntısının varlığı bu sorunları daha da kötüleştirerek istenmeyen görsel estetiğe, korozyon direncinde azalmaya ve püskürtme durumunda mukavemette düşüşe ve elektrot ömrünün kısalmasına neden olabilir. Uygun olmayan şekilli bir kaynak, temas yüzeyindeki değişikliklerden ve sıçramalardan kaynaklanabilir ve her ikisi de genel mukavemetin azalmasına katkıda bulunur. Kaynak bölgesinde çatlakların ve geniş boşlukların oluşması, özellikle çevreye uzanmaları halinde, yorulma mukavemetini daha da azaltır [47].

3.4.1.5. İç süreksizlikler

Düşük elektrot kuvveti, yüksek akım yoğunluğu ve diğer faktörler, öncelikle aşırı kaynak ısısının etkisi nedeniyle iç süreksizliklerin oluşmasına katkıda bulunur. Bu süreksizlikler akım uygulamasından hemen sonra ortaya çıkar ve elektrot kuvveti hızla kaldırıldığında olasılıkları artar.

3.4.1.6. Fıskırma

Elektrik direnç nokta kaynağında önemli bir sorun olan fıskırma, genellikle yanlış kaynak parametrelerinden, bozulmuş elektrotlardan ve temas yüzeyindeki zorluklardan kaynaklanır. Kaynak kordonunun boyutunu ve sağlamlığını optimize etmek için çabalarken fıskırmayı önlemek zorunludur. Fıskırma gözenekliliğe, aşırı derin nüfuziyete, tatmin edici olmayan görsel estetiğe ve zayıflamış bağlantı mukavemetine neden olabileceğinden çok önemlidir [53].

BÖLÜM 4. MATERYAL VE METOT

4.1. Deneyisel Çalışmalara Genel Bakış

Deneyisel çalışmaları esnasında, otomotiv sanayisinde son zamanda uygulama sayısı artan Bondal saçları elektrik direnç nokta kaynağı ile birçok farklı şekilde birleştirilmiştir. Yapılan kaynak işlemleri esnasında deney değişkeni olarak kaynak akım şiddeti ve zamanı kullanılmıştır. Elde edilen tüm kaynaklı numunelerin mikro ve makro yapıları incelenmiş, ek olarak mikro-vickers sertliği ölçülmüş, mekanik dayanımını ölçmek için ise çekme makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz-çekme deneyleri uygulanmıştır.

4.2. Kullanılan Deney Malzemeleri

Deneyisel çalışmalar kapsamında Bondal çok katmanlı sacı kullanılmıştır. Sektör bu sacın yeni kullanılıyor olması beraberinde bir çok bilinmezliği de getirmektedir. Bu sebepten dolayı deneyisel çalışmalarda kullanılan malzemelerin alaşımlarının belirlenmesi ve sacın imalat tekniğinin daha iyi anlaşılması için malzeme kesitinden numune hazırlanarak levha kalınlıkları, yapışkan kalınlıkları ve malzeme spektral analizleri yapılmıştır.

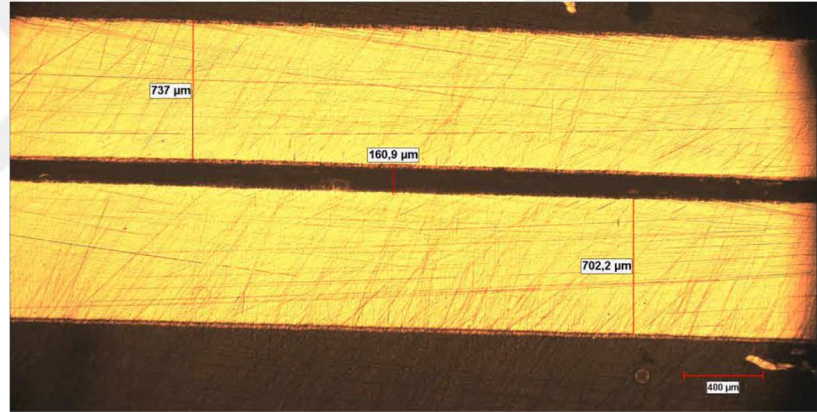
Bondal çok katmanlı çelikleri arasındaki yapıştırıcı polimer, akrilat içeren, fiziksel olarak bağlanan, basınca duyarlı yapışkan (PSA) dan oluşan bir sönümlleme katmanı ile kaplanmıştır [54]. Bu tür yapıştırıcılarda temas basıncı arttıkça yapışma belli bir dereceye kadar iyileşir. Fiziksel bir perspektiften bakıldığında, kapak tabakaları arasındaki yapıştırıcı, oldukça viskoz, plastik ve elastik olarak şekillendirilebilen bir sıvı gibi davranır.

Bondal çelikten numune alınarak spektral analiz yapılmış ve sonuçlar DX53D+ZA255-B-S alaşımlı çelik levha olduğu görülmüştür. Spektral analiz Tablo 4.1’de görülmektedir.

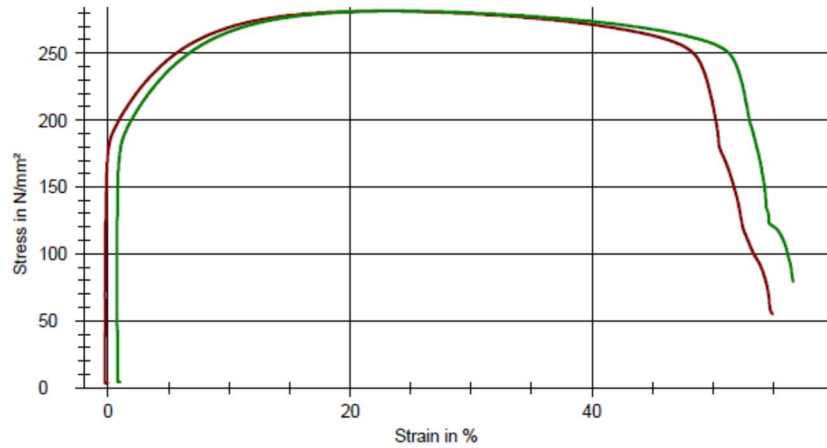
Tablo 4. 1. : Bondal saç spektral analiz sonucu

Karbon	Manganez	Fosfor	Silikon	Kükürt	Titanyum
0,12	0,55	0,1	0,48	0,045	0,27

Bondal çelik geliştirmiş olduğu imalat teknolojisi ile birlikte 0.737 mm kalınlığında bondal çelik (DX53SD+ZA255-B-S) üst levha, 0.16 mm kalınlığında yapıştırıcı ve 0.702 mm kalınlığında (DX53SD+ZA255-B-S) çelik üst levha ile yüksek mekanik özellik avantajı sağlamaktadır. Ayrıca Bondal çok katmanlı çeliğine ait mikro yapı görüntüleri Şekil 4.1’de ve çekme test diyagramı ise Şekil 4.2’de yer almaktadır.



Şekil 4. 1. : Mikroskop altında bondal çelik katmanları

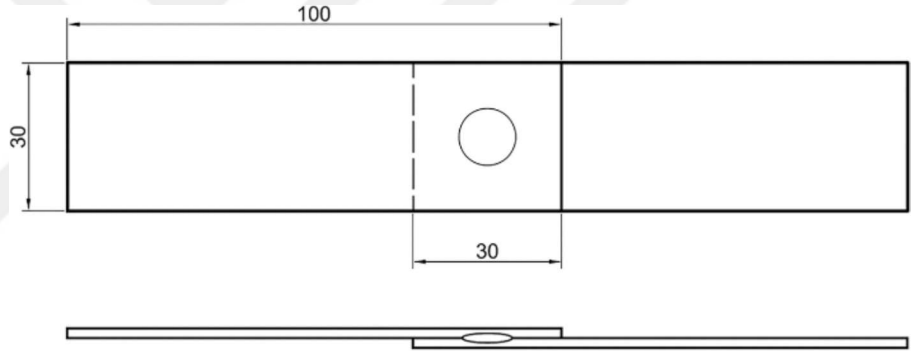


Şekil 4. 2. : Bondal çelik çekme test diyagramı.

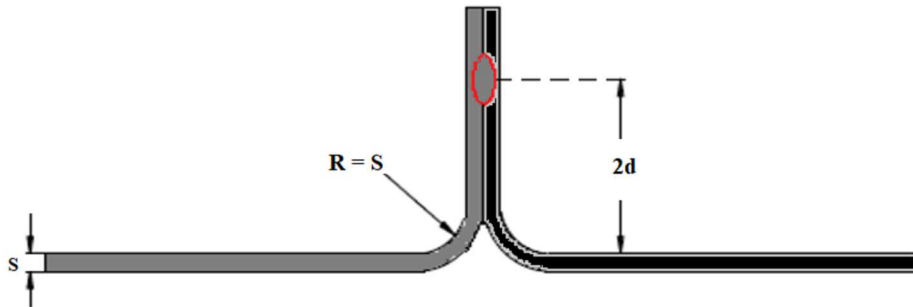
4.3. Deneysel Çalışma Kapsamında Malzemelerin Hazırlanması

Deney çalışmalarında kullanılacak olan numuneleri hazırlamak için ilk olarak sac levhadan 30x100mm ölçülerinde levhalar kesilmiştir. Deney sırasında oluşabilecek herhangi bir olumsuz etkiyi önlemek için malzemelerin yüzeylerinde bulunan tüm yabancı maddeler, yağ, pas , toz vb. bütün kirlilik kaynakları uygun içeriğe sahip aseton ile temizlenmiştir.

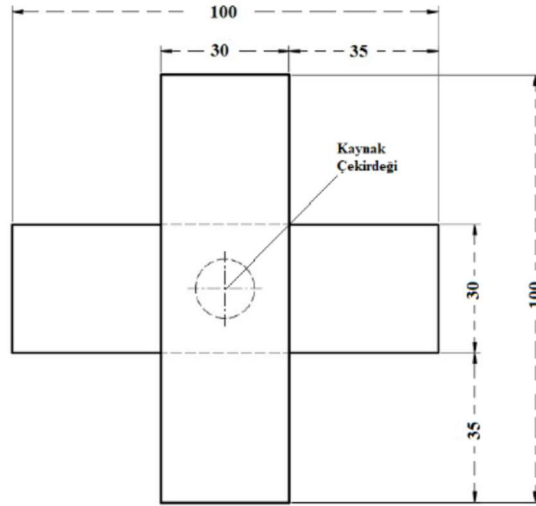
Çekme-makaslama dayanımını ölçmek için yapılacak olan deney esnasında incelenecek numuneler ise EN ISO 14270 normlarına bağlı kalarak üretilmiştir [55,56,57]. Çekme-sıyırma dayanımını ölçmek için yapılacak olan deney esnasında incelenecek numuneler ise EN ISO 14273, çapraz-çekme deneylerinde kullanılacak parçalar ise EN ISO 14272 normlarına bağlı kalınarak üretilmiştir [58,59]. Elde edilecek olan numunelerin şematik gösterimi Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5’da verilmektedir.



Şekil 4. 3. : Çekme-Makaslama deney numunesi şematik gösterimi



Şekil 4. 4. : Çekme-Sıyırma deney numunesi şematik gösterimi



Şekil 4. 5. : Çapraz-çekme deney numunesi şematik gösterimi

4.4. Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makinesi ve Özellikleri

Numune üretimi esnasında tek kollu elektrik direnç nokta kaynağı makinesi tercih edilmiştir. Makine 120 kVA gücündedir. Proses parametreleri elektronik akım ve zaman kontrollü olup, pnömatik basma tertibatına sahiptir. Kaynak zamanı, sıkıştırma ve tutma süreleri, makine üzerinde bulunan kontrol panelleri vasıtası ile ayarlanmıştır. Şekil 4.6'da kaynaklı malzeme üretiminde kullanılan makine gösterilmiştir.



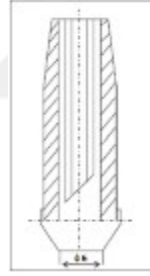
Şekil 4. 6. : Numune Üretiminde Kullanılan Kaynak Makinesi

Deneyler sırasında elektrot tipi sabit tutulmuştur. Deneylerde kullanılan elektrot tipi konik uçlu küresel sıkı geçmeli tip elektrotlardır. Soğutucu su sistemi ile ısıнын uzaklaştırılması sağlanarak sıkı geçme elektrotların kullanım süresi uzamış ve kaynak kalitesi bu durumdan olumlu şekilde etkilenmiştir. Soğutma sisteminde kullanılan suyun debisi 4 lt/dk. değerinde ayarlanmıştır. Temas yüzey alanı olarak ise 6mm değerinde elektrot yüzey alanı tercih edilmiştir. Bakır, krom ve zirkonyum alaşımlı kaynak elektrotlarının kimyasal bileşenleri ve teknik özellikleri Tablo 4.2’de listelenmiştir.

Tablo 4. 2. : Kaynak elektrotlarının kimyasal kompozisyonu ve özellikleri

Alaşım	Kimyasal Bileşim (%)	Isıl İletkenlik (J/Cms°K)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Elektrik İletkenliği (m/Ωmm2)
Cu-Cr-Zr (RWMA/ DIN 44759 2. Grup	Cr=4 Zr=0,03 Cu=95,97	320	590	48

Deneylerde, uç çapı 6 mm. olan bakır – krom – zirkonyum alaşımı elektrotlar kullanılmıştır. Şekil 4.7’de elektrotların boyutları verilmiştir.



Şekil 4. 7. : Deneylerde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Elektrotları

4.5. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

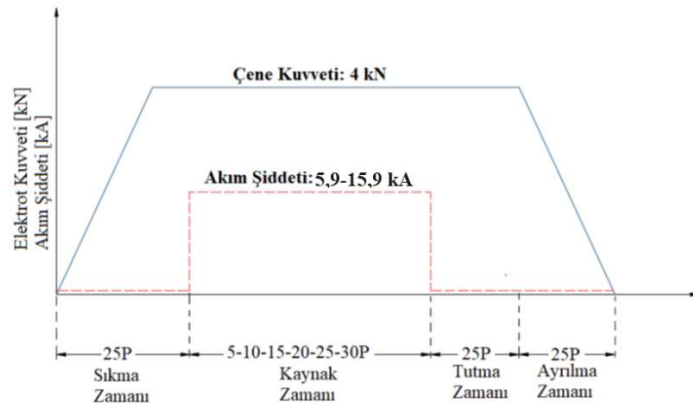
Çalışma sırasında aşağıdaki kaynak parametrelerinin malzeme çıktısına etkisi farklı yöntemlerle araştırılacaktır;

- Kaynak akım şiddeti
- Kaynak zamanı
- Baskı kuvveti
- Direnç
- Elektrot şekli

Bu proses parametreleri içerisinde elektrot şekli, direnç baskı kuvveti ilk etapta sabit tutulmuştur. Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı deneyler esnasında kontrollü bir şekilde değiştirilen değişkenler olarak kullanılmıştır. Uygulanan değişken kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı parametreleri ile hazırlanan numuneler için proses parametre formları hazırlanmış ve deney değişkenleri kontrol altında tutulmuştur.

Optimum parametreleri yapılan ön deneylerle belirlenen numuneler belirli ebatlarda hazırlanmıştır. Akabinde ise yüzey temizlikleri yapıp elektrik direnç nokta kaynağı ile diğer deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün testlerde kaynak işleminden önce regülatör kontrol edilmiş, elektrot çene kuvveti olarak sabit 4 kN seçilmiş ve deneylerin sabit çene kuvveti ile uygulanması sağlanmıştır. İşlem aşamaları Şekil 4.8 de gösterilmiştir. Yapılan ön test sonucunda yapılacak olan ana deneylerde kullanılan değişken proses parametreleri şunlardır;

- Uygulanan kaynak zamanları : 5 / 10 / 15 / 20 / 25 / 30 periyot
(1periyot: 0,02sn [50Hz])
- Uygulanan kaynak akım şiddeti değerleri : 5,9 kA / 7,3 kA / 8,4 kA / 9,4 kA / 11,7 kA / 13,8 kA / 15 kA ve 15,9 kA
- Sıkma, tutma ve ayrılma zamanları ise 25 periyot olarak ayarlanmıştır



Şekil 4. 8. : Elektrik direnç nokta kaynağında uygulanan parametreler

Mekanik özelliklerin tespitinde kullanılan testlerde kullanılan numunelere ek olarak mikroyapı, mikrosertlik ve SEM analizlerinde test edilmek üzere tüm parametrelerde gerekli numuneler üretilip, ilgili deneylerde bu numuneler kullanılmıştır.

4.6. Deneylerin Yapılması ve Numune Üretimi

Deneylerde kullanılacak olan numuneler belirlenen boyutlara göre imal edildikten sonra kaynak edilmiştir. Elektrot kuvveti tüm deney boyunca sabit tutulmuş ve deney boyunca gerekli kontroller yapılmıştır. Kaynak zamanı 15, 20, 25, 30 ve 35 periyot olarak değiştirilmiştir. Kaynak akım şiddeti 5,9 kA'den 15,9 kA'e kadar ayarlanmıştır. Yapılan deneylerde kullanılan proses parametreleri belirlenmiş ve deneyler EN ISO 14373 [60] standartlarına göre yapılmıştır. Deneyde kullanılan makine Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 9. : Deneylerde kullanılan proses parametreleri

Numuneler üretildikten sonra kalite kontrol prosesine tabi tutulmuştur. Üretilen parçaların istenilen özelliklere uygunluğu teyit edilmiştir.

Deneyler esnasında incelenecek olan proses parametreleri için onar adet kaynak işlemi uygulanmış numuneler üretilmiştir. Elde edilen numunelerin üçer adeti mekanik özelliklerin belirleneceği deneyler için kullanılmış olup, geriye kalan numuneler ise yüzey özelliklerini incelemek üzere optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapı, makroyapı ve mikrosertlik ölçümlerinde değerlendirilmiştir.



Şekil 4. 10. : Üretilen numune parçalar – çekme-makaslama



Şekil 4. 11. : Üretilen numune parçalar – çapraz çekme



Şekil 4. 12. : Üretilen numune parçalar – çekme-sıyrma



Şekil 4. 13. : Üretilen numune parçalar – sertlik ölçümü

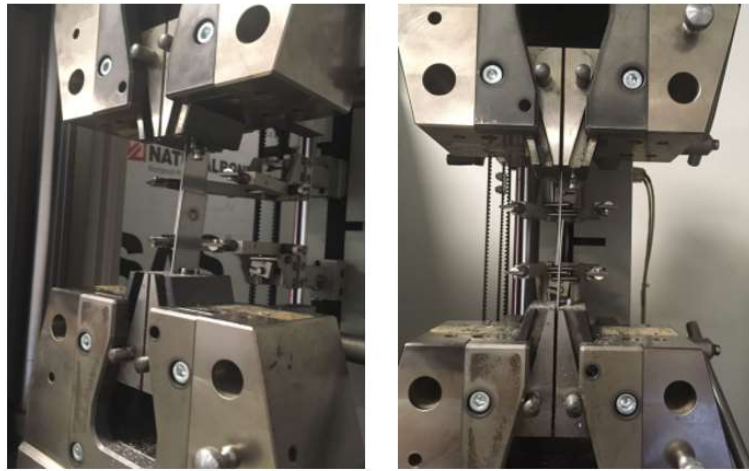
4.7. Çekme Makaslama ve Çekme Sıyrma Testlerinin Yapılması

Numune kaynak üretimi ile elde edilen parçalar, uygun laboratuvar şartlarında çekme-makaslama dayanımı ve çekme-sıyrma dayanımı deneylerinde kullanılmıştır. Çekme testleri sırasında aşağıdaki konulara dikkat edilmiştir;

- Çekme deneyleri sırasında kullanılan çekme hızı bildirilmiş ve tüm deneyler sırasında sabit çekme hızı ve proses parametreleri kullanılacaktır.
- Deneylere ait tüm sonuçlar, çekme Kuvvet-zaman grafiği sonuçları, maksimum çekme kuvveti değeri vs. numunelerin üzerinde bulunan markalamalara göre raporlanmıştır.

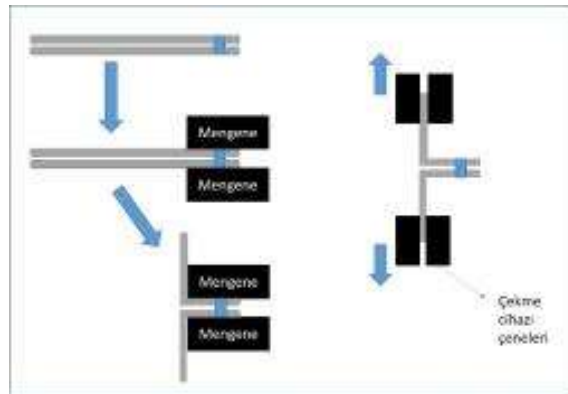
- Numuneler deney sonrasında oluşan hasar tipine göre detaylı inceleneceği için , deney sonrası numuneler saklanmıştır.
- Kuvvet zaman grafiği ölçü birimi Newton olarak kullanılmıştır.

Deney işlemine ait birkaç adet deney yapılma anında çekilen fotoğraf raporda kullanılması açısından kayıt edilmiştir. Şekil 4.14.'de gösterilen şekilde numuneler hazırlandıktan sonra markalanmıştır. Yapılan testlere ait sonuçlar analiz edilmek üzere saklanmıştır. Deneyler sırasında ayrılma, düğmeleme ve yırtılma gibi hasar tipleri tespit edilmiştir.



Şekil 4. 14. : Çekme-makaslama testi

Çekme-sıyırma testi için de numuneler markalanmıştır ve testlere ait sonuçlar analiz edilmek üzere saklanmıştır. Test esnasında ayrılma, düğmeleme ve yırtılma gibi hasar tipleri tespit edilmiştir. Sıyırma testine ait şematik gösterim, deney fotoğrafı ve numuneye ait gösterim Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 15. : Çekme-Sıyırma testi şematik gösterimi



Şekil 4. 16. : Çekme-sıyırma testi



Şekil 4. 17. : Çekme-sıyırma testi numunesi

4.8. Çekirdek Boyutlarının Ölçülmesi ve Makro Yapı Görüntüleri

Nokta direnç kaynağı yapılan numunelerin makro yapı incelemeleri için hazırlanan numunelerden 1.5x büyütme ile optik mikroskopta görüntüler alınmıştır. Alınan görüntülerde kaynak yükseklikleri belirlenmiştir. Kullanılan cihaz Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 18. : Mikroyapı görüntü elde edilen Zeiss marka optik mikroskop

4.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Nokta direnç kaynağı yapılan parçalardan hazırlanan numuneler taramalı elektron mikroskopunda görüntüleri alınmıştır. Ölçümü yapılan bölgelerden ayrıca EDS analizleri de yapılmıştır. Bunu için QUANTA FEG 250 marka SEM cihazı kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalar esnasında uygulanan önemli testlerden diğerleri ise optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskop kullanılarak yapılan çalışmalardır. Numunelere ait en optimum görüntüyü elde etmek için çekirdekler tam ortadan kesilerek bu işleme ek olarak numuneler bakalite alınmıştır. Bakalite alma prosesi akabinde zımpara ile yüzey işleme maruz kalan numuneler 1 mikron değerine kadar parlatılmıştır. Dağlama işlemi ise %2 nital çözeltisi yardımıyla 30 saniyede süresinde gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi ardından ana metal, geçiş bölgeleri ve çekirdek yapısı optik mikroskop ile incelenerek her bir farklı alandan kullanılan çeşitli büyütmelerde görüntüler elde edilmiştir. Görüntülerin oluşturulması için Şekil 4.19’da gösterilen Zeiss Imager marka optik mikroskop kullanılmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan vakum cihazı Şekil 4.20 ve bakalit numuneleri Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 19. : SEM ve EDS analizinde kullanılan cihazlar



Şekil 4. 20. : Vakum cihazı



Şekil 4. 21. : Hazırlanan Bakalit Numunesi

4.10. Sertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Elektrik nokta direnç kaynağı uygulanan numunelere ait birçok noktadan mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. Belirlenen noktalar ısı tesiri altında kalan bölgeden başlayarak çekirdeği de içine alıp esas metale kadar uzanmıştır. Metalden kaynak bölgesine yaklaşıırken sertlik ölçüm aralıkları sıklaşmıştır.

Mikro sertlik ölçümleri laboratuvar ortamında uygun koşullar altında yapılmış olup, Vickers sertlik ölçüm test metodu ile deneyler yürütülmüştür. Ölçümlerde kullanılan cihaz Future-Tech FM700 modelidir ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Ölçümler 100g yükte yapılmış olup, 5s ve piramit batıcı uç kullanılmıştır.



Şekil 4. 22. : Future-Tech FM700 Sertlik Ölçüm Cihazı

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

5.1. Deneyler Hakkında Genel Bilgilendirme

Yukarı bölümlerde anlatıldığı gibi bu uygulamalarda otomotiv sektöründe yaygın kullanılan çok katmanlı çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı ile bir araya getirilmiştir. Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı deney değişkenleri olarak belirlenmiş, yapılan tüm kaynak işlemlerine ait çekirdek geometrisinin mekanik özelliklere olan etkilerinin yanında, mikroyapıda meydana gelen değişimler de deneyler sırasında incelenmiştir.

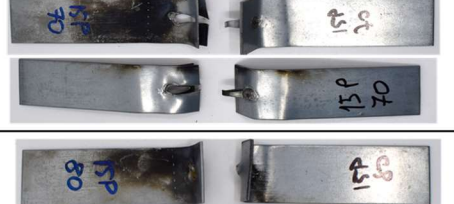
5.2. Çok Katmanlı Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Çekme-Makaslama, Çekme-Sıyırma ve Çapraz-çekme Dayanımına Etkisi

Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanını diğer tüm parametreler sabit tutulurken planlı bir şekilde değiştirilmesi ile bu parametrelerin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. İnceleme esnasında çekme-makaslama, çekme-sıyırma ve çapraz-çekme testleri uygulanmıştır. Yapılan deneylerin sonucunu en hassas ve doğru biçimde ortaya koyabilmek için hazırlanan her parametre değerine ait durum için üçer adet test numunesi elde edilmiş ve ortalama değer yardımıyla grafikler oluşturulmuştur.

Yapılan mekanik özellik testlerinden sonra, numunelere SEM ve EDS testleri uygulanarak, numuneler mikroyapı analizlerinde de kullanılmıştır.

Yapılan tüm birleştirmeler öncesinde fotoğraflar çekilerek kaynağın yüzeyde oluşturduğu efektler incelenmiştir. Çekme testlerinden sonra hasar analizin tespiti için fotoğraflar çekilmiş ve deneysel sonuçların yorumlanmasında katkı sağlamıştır.

Kaynağın yüzeyde oluşturduğu efektler yapılan tüm deneyler sonucunda oluşan numunelerin fotoğrafları çekilerek incelenmiştir. Çekme testlerinden sonra hasar analizin tespiti için fotoğraflar kullanılmış ve deneysel sonuçların farklı bir şekilde yorumlanmasına katkı sağlanmıştır. Çekilen fotoğraflar ve yorumları Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 , Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

Numune Kodu	Kaynak Zamanı (periyot)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Numune Durumu Açıklama	Fotoğraf
15P-40	15	7,3	* Yapışma * Yüzeyde bozunmaya rastlanmamıştır	
15P-50	15	8,2	* Düğmelenme * Yüzeyde bozunmaya rastlanmamıştır	
15P-60	15	9,2	* Fıskırma * Yırtılma	
15p-70	15	12,2	* Fıskırma * Yırtılma * Renk değişimi	
15p-80	15	13,8	* Fıskırma * Düğmelenme * Renk değişimi	
15p-90	15	15	* Fıskırma * Yırtılma * Renk değişimi	

Şekil 5. 1. : 15 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi

Numune Kodu	Kaynak Zamanı (periyot)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Numune Durumu Açıklama	Fotoğraf
20P-40	20	7,3	* Yapışma * Yüzeyde bozunmaya rastlanmamıştır	
20P-50	20	8,2	* Düğmelenme	
20P-60	20	9,2	* Yırtılma	
20p-70	20	12,2	* Fıskırma * Yırtılma	
20p-80	20	13,8	* Düğmelenme * Renk değişimi	

Şekil 5. 2. : 20 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi

Numune Kodu	Kaynak Zamanı (periyot)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Numune Durumu Açıklama	Fotoğraf
25P-30	25	7	* Yapışma	
25P-40	25	7,3	* Düğmelenme	
25P-50	25	8,2	* Düğmelenme * Fıskırma	
25P-60	25	9,2	* Renk değişimi * Düğmelenme	
25p-70	25	12,2	* Fıskırma * Düğmelenme * Renk değişimi	
25p-80	25	13,8	* Düğmelenme * Renk değişimi	

Şekil 5. 3. : 25 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi

Numune Kodu	Kaynak Zamanı (periyot)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Numune Durumu Açıklama	Fotoğraf
30P-30	30	7	* Yüzeyde bozunmaya rastlanmamıştır * Yapışma	
30P-40	30	7,3	* Düğmelenme	
30P-50	30	8,2	* Yırtılma	
30P-60	30	9,2	* Fıskırma * Yırtılma * Renk değişimi	
30p-70	30	12,2	* Fıskırma * Yırtılma * Renk değişimi	

Şekil 5. 4. : 30 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi

Numune Kodu	Kaynak Zamanı (periyot)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Numune Durumu Açıklama	Fotoğraf
35P-30	35	7	* Fıskırma * Yırtılma	
35P-40	35	7,3	* Yırtılma	
35P-50	35	8,2	* Fıskırma * Düğmelenme	
35P-60	35	9,2	* Fıskırma * Yırtılma	
35p-70	35	12,2	* Renk değişimi * Fıskırma * Düğmelenme	

Şekil 5. 5. : 35 Periyot çekme-makaslama ve çekme-sıyırma test sonrası hasar analizi

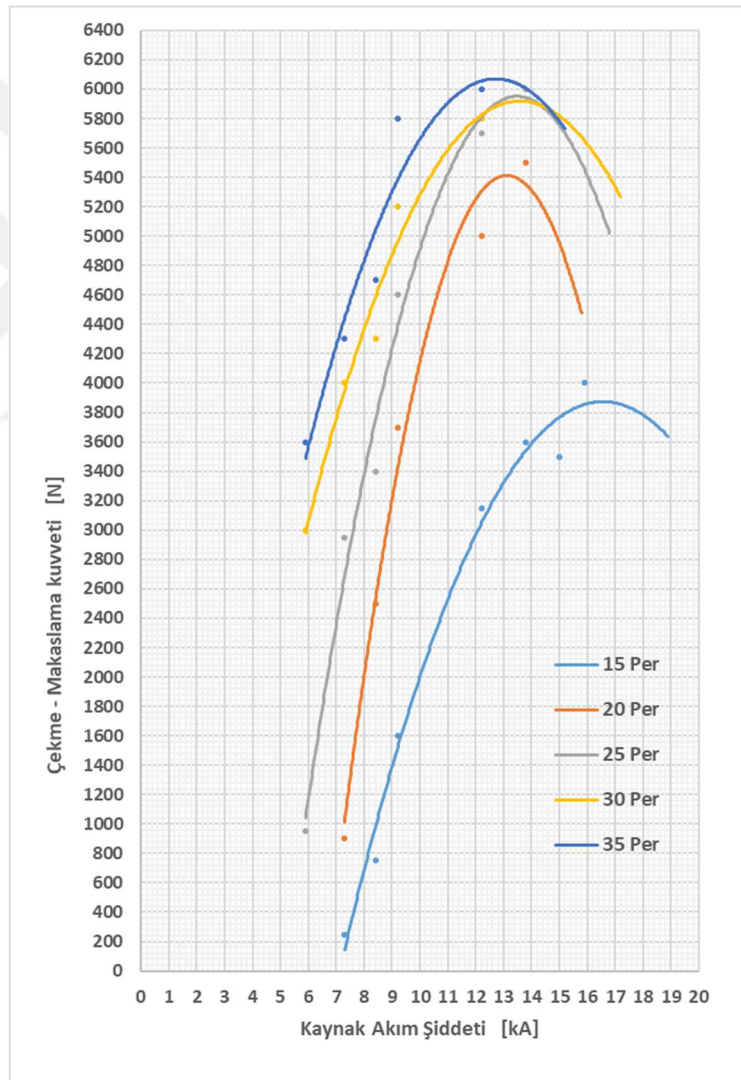
5.2.1. Kaynak akım şiddetinin çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çekme-makaslama dayanımına etkisi

Elektrik direnç nokta kaynağında yapılan birleştirmelerde çekme-makaslama dayanımı yüzeylere paralel kuvvetlerin etkisini ve mukavemetini ölçmede sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir [61].

Aşağıda yer alan Şekil 5.6'da yer alan grafikte görüleceği üzere çekme dayanımı artan akım şiddeti ile bir noktaya kadar artmaktadır. Bu durumda bazı çeliklerin kaynaklanabilirliğinde gözlemlenen bir durumdur [63,64]. Fıskırmalar ile ortamdan

uzaklaşan ana metaller ve elektrot dalma derinliğindeki artışa paralel olarak meydana gelen kesit alanındaki daralma, dayanımdaki artışa sebep olmaktadır [62]. En yüksek Çekme-Makaslama dayanımına 35 Periyot kaynak süresinde 12000A kaynak akım şiddetinde 6100N olarak gerçekleşmiştir. Tüm örneklerde 13000A üzerindeki akım değerlerinde çekme-makaslama dayanımında azalmalar gözlenmiştir. Yine bu da literatürde karşımıza çıkan bir durumdur [65,66].

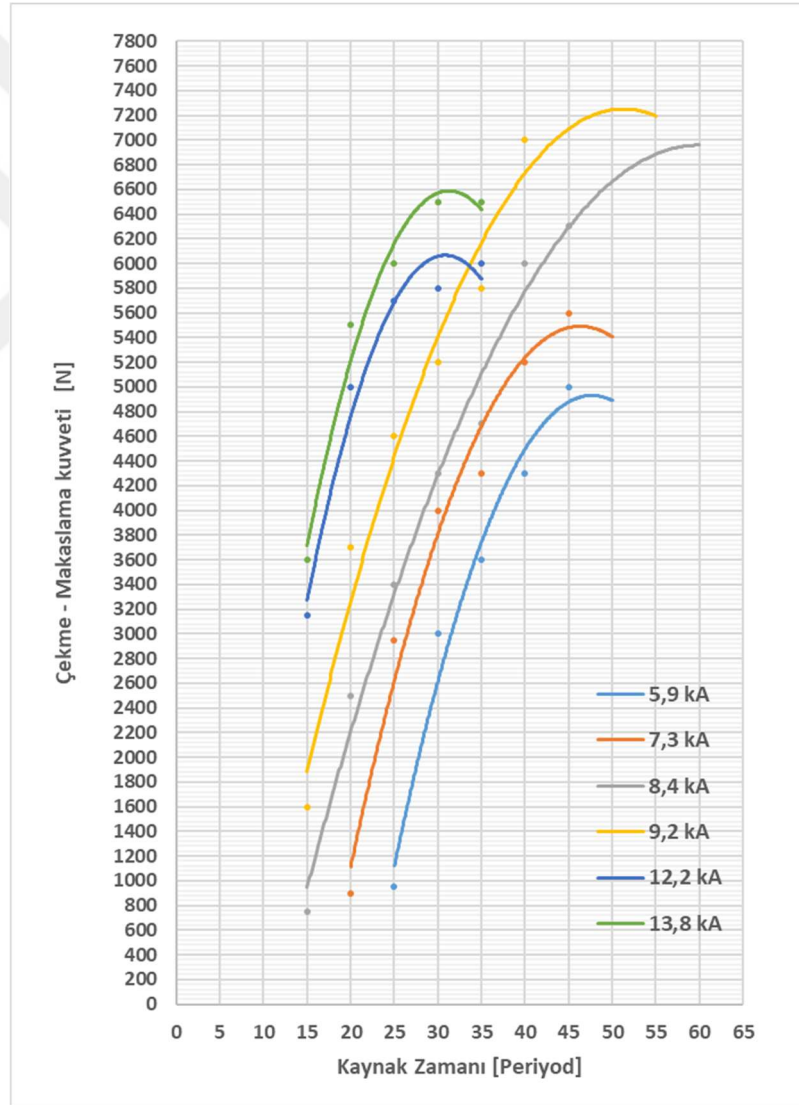
Buna ek olarak 15 Periyot kaynak zamanı esnasında çekme-makaslama dayanımının en yüksek değeri olarak 3800N, 20 Periyot için 5400N, 25 Periyot ve 30 Periyot değerlerinde ise yaklaşık 5900N çekme-makaslama dayanımları olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. 6. : Kaynak akım şiddetinin Çekme-Makaslama kuvvetine etkisi

5.2.2. Kaynak zamanının çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çekme-makaslama dayanımına etkisi

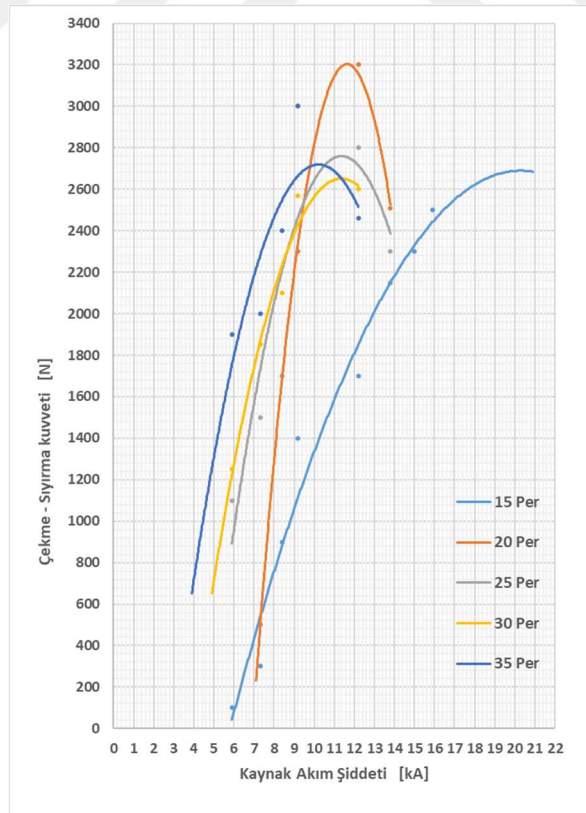
Kaynak zamanının çekme-makaslama dayanımı üzerinde etkilerini Bondal çok katmanlı çelik elektrik direnç nokta kaynağı numuneleri için incelediğimizde kaynak zamanı arttıkça ısı girdisi artmakta ve çekme-makaslama kuvvetlerinde de bunun sonunda artış bir değere kadar görülmektedir. Kaynak süresi yükseldikçe, belirli bir noktadan sonra kaynak çekirdeğinden meydana gelen fişkırımlara bağlı olarak çekme-makaslama dayanımı da düşüş göstermektedir. Literatürü incelediğimizde buna benzer sonuçları görebilmekteyiz [62,67,68]. İlgili grafik Şekil 5.7' de yer almaktadır.



Şekil 5. 7. : Kaynak zamanının Çekme-Makaslama kuvvetine etkisi

5.2.3. Kaynak akım şiddetinin çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çekme-sıyırma dayanımına etkisi

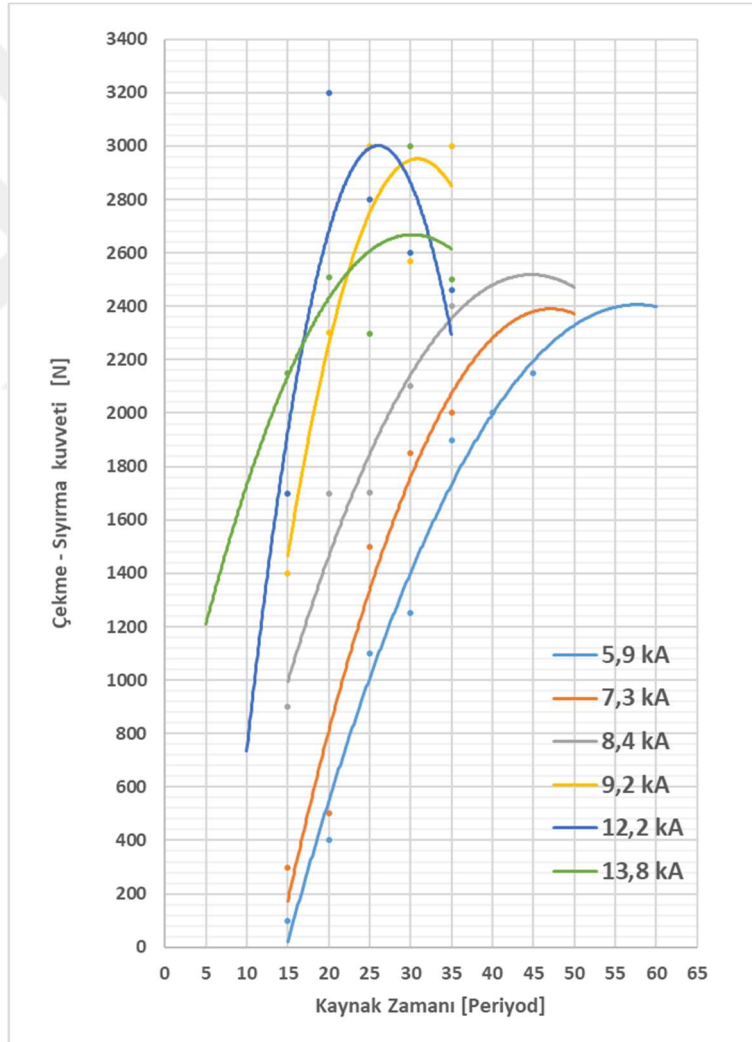
Çok katmanlı Bondal çeliklerinde elektrik direnç nokta kaynağı esnasında kaynak akım süresini arttırdıkça bir noktaya kadar çekme-sıyırma dayanımı da artmaktadır. Ancak belirli bir noktadan sonra meydana gelen fişkırımlar sonucunda bu dayanım düşüşe doğru geçmektedir. Maksimum çekme-sıyırma kuvvetine sahip numunenin 12000 A akım şiddetinde 20 periyotta üretildiği görülmüştür. En düşük çekme-sıyırma kuvveti tepe noktasının ise 30 periyot kaynak zamanında ve 10200 A kaynak akım şiddetinde 2600 N olarak meydana geldiği görülmektedir. Yeterli büyüklükte oluşmayan çekirdeğin bu sonuçta etkili olabileceği görülmüştür. Akım yükseldikçe çekirdek büyür ve elektrot dalma derinliği artıp çekme-sıyırma dayanımı düşüşe geçer [62]. Literatürde yer alan bazı kaynaklarda çekme-sıyırma dayanımının akımın artmasıyla oluşan yüksek ısıya bağlı olabileceği de belirtilmiştir [69,70,71]. İlgili grafik Şekil 5.8’ de yer almaktadır.



Şekil 5. 8. : Kaynak akım şiddetinin Çekme-Sıyırma kuvvetine etkisi

5.2.4. Kaynak zamanının çok katmanlı Çeliklerin bağlantılarındaki çekme-sıyrma dayanımına etkisi

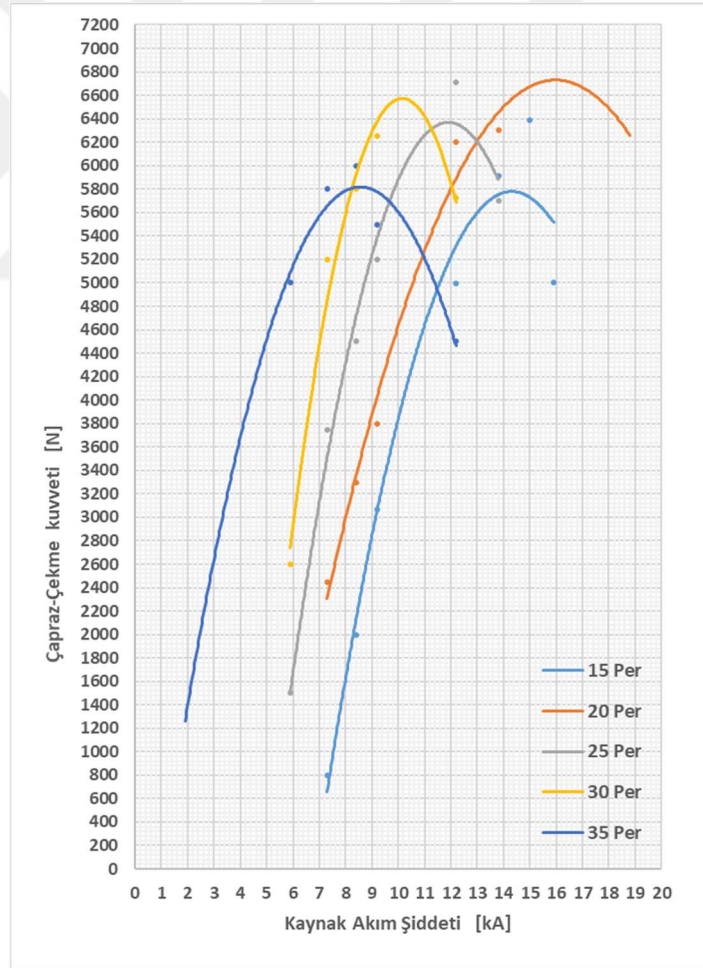
Çok katmanlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak zamanı artarken çekme-sıyrma dayanımı da bir noktaya kadar artıp, sonrasında ise düşüş göstermektedir. Bu sonuç Şekil 5.9'da görülmektedir. Kaynak zamanı arttıkça çekirdek ısı girdisi artıp, akabinde ise çekirdek geometrisinde bozulma gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sırasında 12200 A kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında üretilmiş olan numunede en yüksek çekme sıyrma dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 5. 9. : Kaynak zamanının Çekme-Sıyrma kuvvetine etkisi

5.2.5. Kaynak akım şiddetinin çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çapraz-çekme dayanımına etkisi

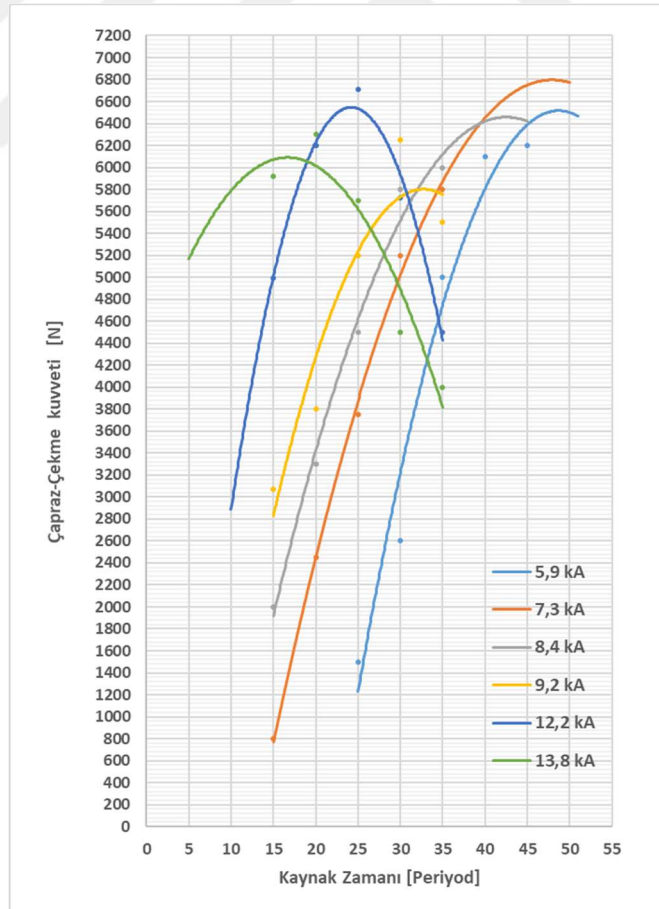
Çapraz çekme dayanımı kaynak çekirdeğinin merkez eksenı yönünde dayanımı ifade etmektedir. Kaynak akım şiddeti ısı girdisini arttırmaktadır. Bu da belli bir değere kadar çapraz çekme dayanımını arttırmaktadır. En yüksek çapraz-çekme dayanımı 20 periyotta 16000A akım değerinde ortaya çıkmaktadır. Çapraz-çekme dayanımının en üst seviyeye geldiği akım değerlerinden sonra akım değeri artmaya devam ederse, ısı girdisi oldukça arttığı için dalma derinliği ve fişkırmalar artar. Buna bağlı olarak ara kesitte erime artar ve çapraz-çekme dayanımı düşer. Benzer durumlara literatürde de rastlanmaktadır [66,69,70,71,72]. İlgili grafik Şekil 5.10' da yer almaktadır.



Şekil 5. 10. : Kaynak akım şiddetinin çapraz çekme kuvvetine etkisi

5.2.6. Kaynak zamanının şiddetinin çok katmanlı çeliklerin bağlantılarındaki çapraz-çekme dayanımına etkisi

Kaynak akımına benzer şekilde kaynak zamanı da çapraz-çekme dayanımını artırması durumunda belirli değere kadar arttırıp, sonrasında ise bu artış beraberinde düşüş getirmektedir. Bu sonuca etki eden en önemli etken ısı girdisindeki değişimdir. Kaynak zamanının sabit tutulduğu birleştirmelerdeki farklı kaynak akım şiddetlerini Şekil 5.11'i kullanarak değerlendirebilirsek, en yüksek çapraz-çekme dayanımı olan 6800 N dayanım, 7300 A akım şiddeti ve 45 periyot kaynak zamanı uygulanan numuneler ile elde edilmiştir. Şayet doğru çekirdek yapısı elde edilmek isteniyorsa, düşük akımlarda yüksek kaynak zamanı, düşük kaynak zamanlarında ise yüksek kaynak akımı uygulanarak çapraz-çekme dayanımı arttırılabilir. Ayrıca literatürden elde edilen bilgiye göre ısı girdisi artışı ile elektrot dalma derinliği toplam kesitin 1/5 ini geçmeye başladıktan sonra kaynak kalitesi düşmektedir [73].

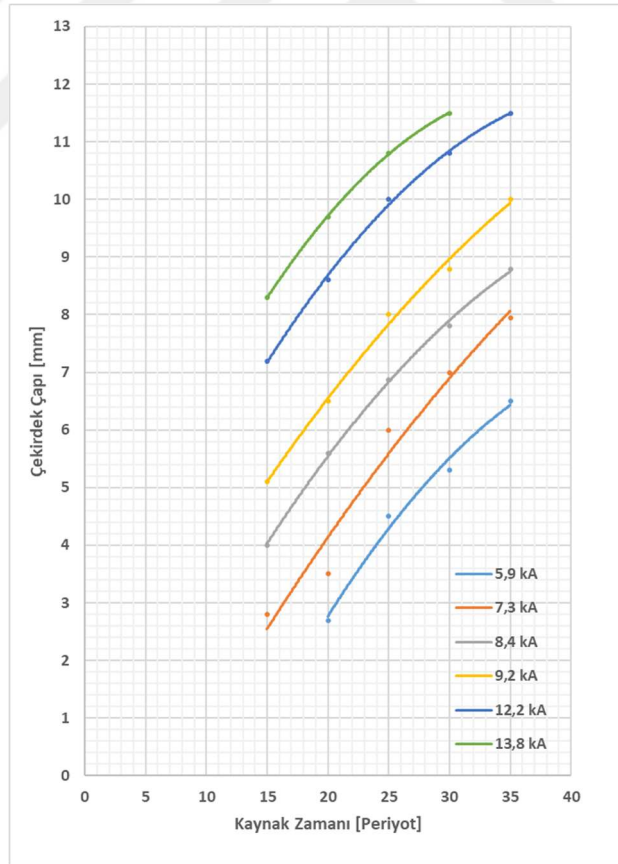


Şekil 5. 11. : Kaynak zamanının çapraz çekme kuvvetine etkisi

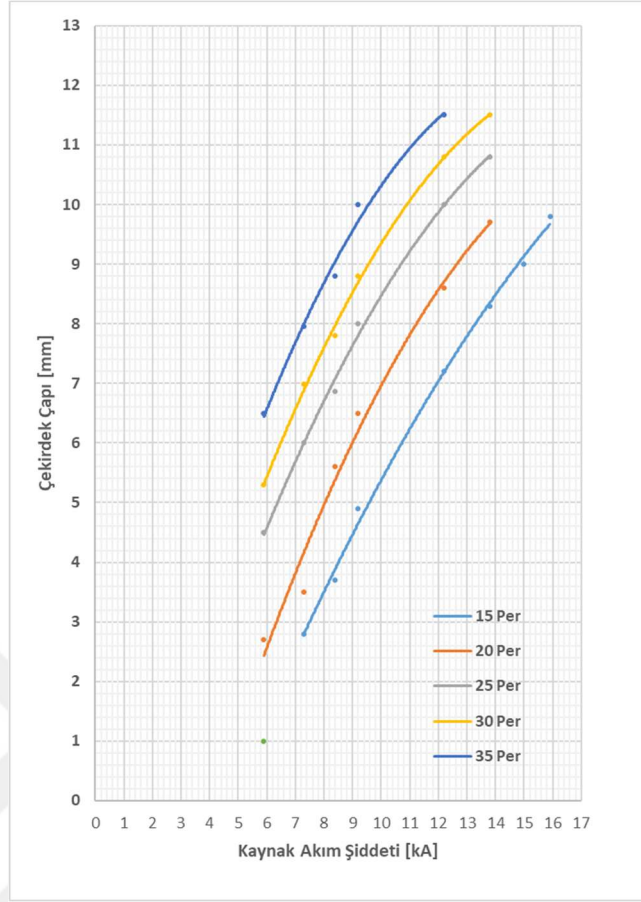
5.3. Çok Katmanlı Çeliklerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Çekirdeği Boyutlarına Etkisi

5.3.1. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan kaynak çekirdeğinin çekirdek çapına etkisi

Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti parametrelerinde yapacağımız değişiklikler Bondal çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirmelerinde meydana gelen çekirdek boyutlarında değişimleri tetiklemektedir. Çekirdek çapı buradaki en önemli geometrik ölçülerden biridir. Yapılan kaynaklı birleştirmelerde en yüksek çekirdek çapı 11.5 mm olarak, 12200 A kaynak akım şiddeti ve 35 periyot kaynak zamanında ortaya çıkmıştır. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13.'de oluşan çekirdek çapının değişken parametreler ile değişimi görülmektedir. Kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti ile birlikte çekirdek çapının büyüdüğü incelenen diğer literatürde de görülmüştür [73,74].



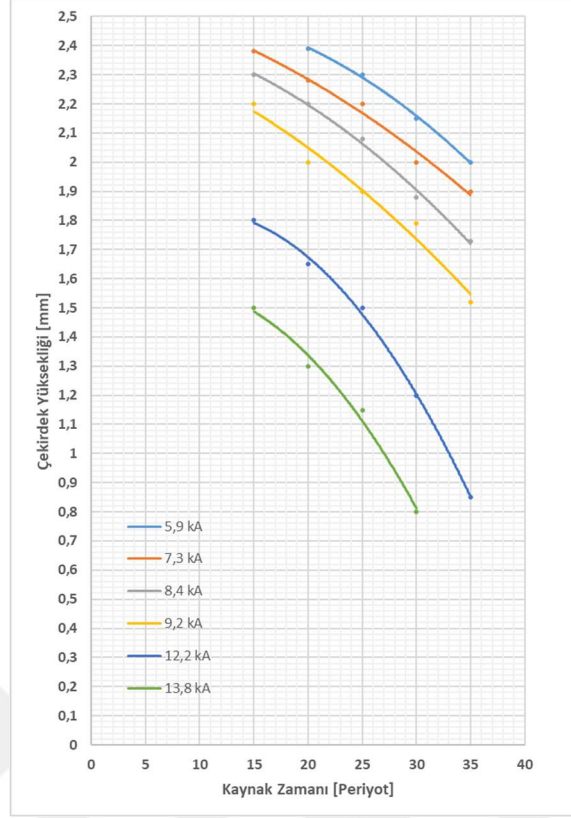
Şekil 5. 12. : Kaynak zamanının çekirdek çapına etkisi



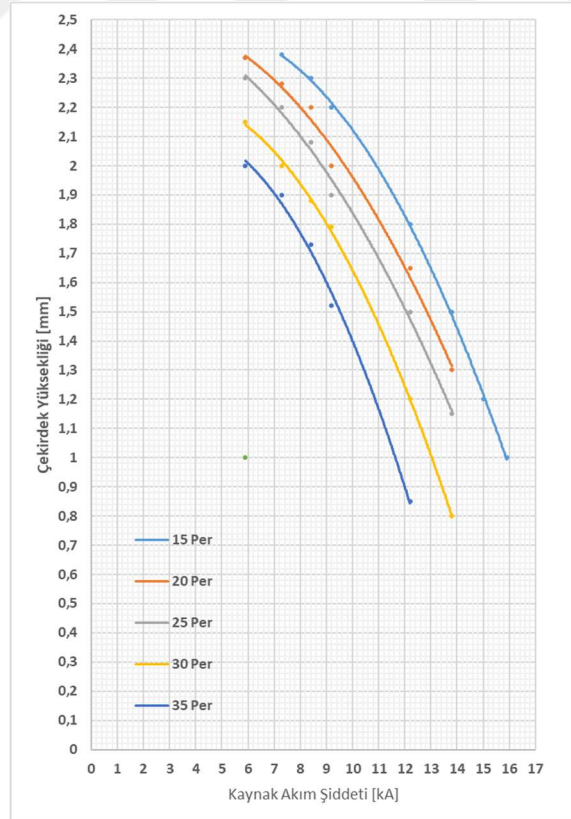
Şekil 5. 13. : Kaynak akım şiddetinin çekirdek

5.3.1.1. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan kaynak çekirdeğinin çekirdek yüksekliğine etkisi

Çekirdek yüksekliği kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının artmasıyla birlikte ters orantılı olarak düşüş göstermektedir. Sonuçlar Şekil 5.14. ve Şekil 5.15.'de görülmektedir. Çekirdek yüksekliğinin büyük olması kaynak kalitesinde her zaman iyi sonuçlar vermemektedir. Kaynak akım ve zamanındaki artış ısı girdisini arttırmakta bu da eriyen metali artırarak aşırı dalma derinliği ve fişkırmalara sebep olmaktadır. Çekirdek yüksekliği azalma sebebi budur. Literatürde de benzer durumlar görülmektedir [75].



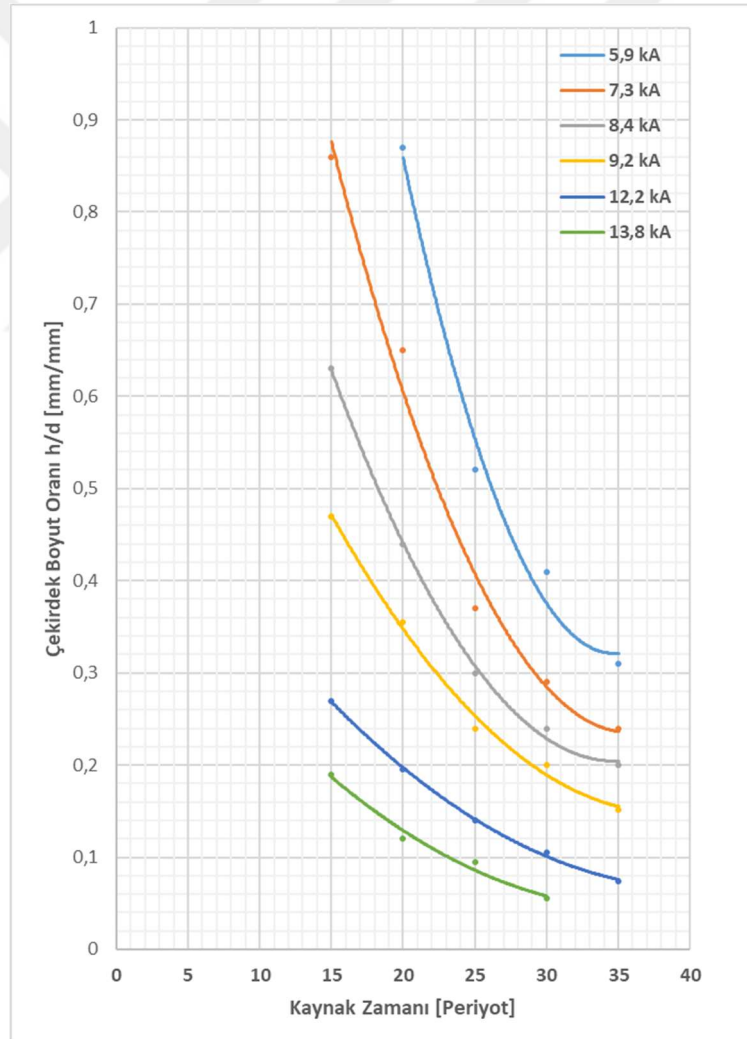
Şekil 5. 14. : Kaynak zamanının çekirdek yüksekliğine etkisi



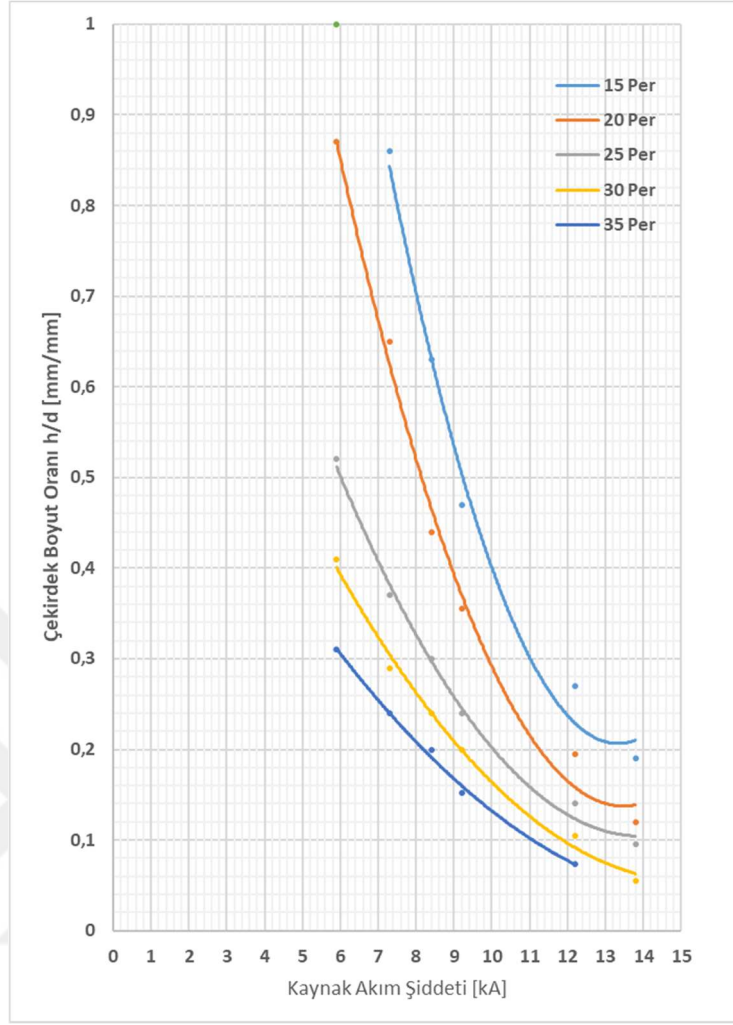
Şekil 5. 15. : Kaynak akım şiddetinin çekirdek yüksekliğine etkisi

5.3.1.2. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan kaynak çekirdeğinin çekirdek boyut oranına etkisi

Çekirdek boyut oranı, çekirdek yüksekliğinin çekirdeğin çapına bölümünden ortaya çıkan sonucu ifade etmek için kullanılan tanımdır. Bu terime şekil boyut oranı da denilmektedir. Çekirdek yüksekliğinin kaynak akım ve zamanı ile düşmesi ve aynı zaman çekirdek çapının bu değerlerle yükselmesi çekirdek boyut oranında hızlı düşüşe sebep olmaktadır. Bu durum Şekil 5.16. ve Şekil 5.17.'de görülmektedir. Benzer bulgulara incelenen diğer literatürlerde de rastlanmıştır [75,76].



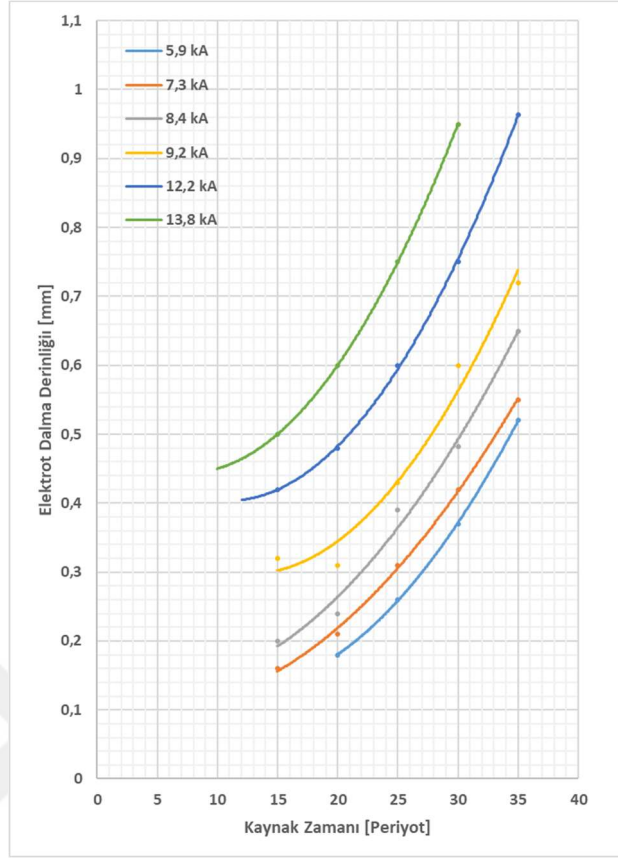
Şekil 5. 16. : Kaynak zamanının çekirdek boyut oranına etkisi



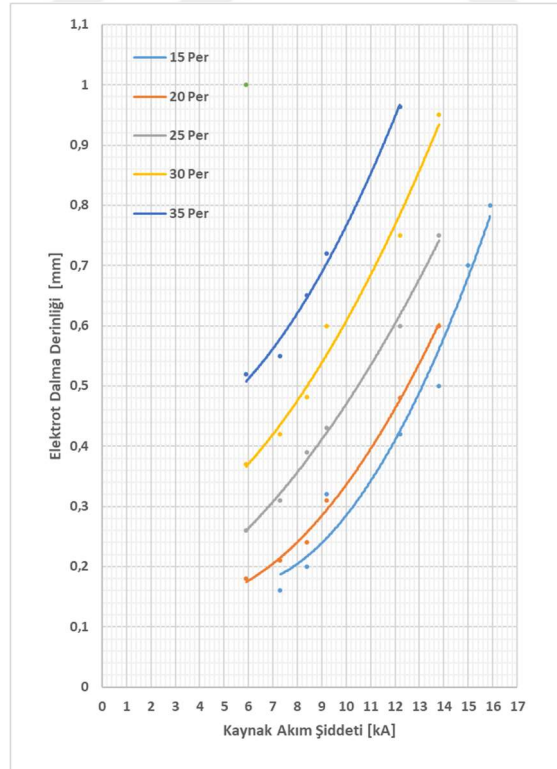
Şekil 5. 17. : Kaynak akım şiddetinin çekirdek boyut oranına etkisi

5.3.2. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan elektrot dalma derinliğine etkisi

Dalma derinliğinin yüksek değerde olması elektrot izinin belirgin olmasına bağlıdır. Bu durumu oluşturan etkenlerden birisi de elektron baskı kuvvetinin kaynak zamanının artmasıyla yükselmesidir. Bu durum Şekil 5.18. ve Şekil 5.19.'da görülmektedir. En yüksek elektrot dalma derinliği 0,98 mm olarak tespit edilmiştir. Bu değer 12200 A kaynak akım şiddetinde oluşmuştur. Benzer değerlere 35 periyot kaynak zamanında da ulaşılmıştır. Elektrotun dalma derinliğinde artış olması ısı girdisinin artmasının göstergesidir. Bu durum da kaynak zamanları ve yüksek akım şiddetlerinde aşırı sıçrantılar ortaya çıkarmaktadır.



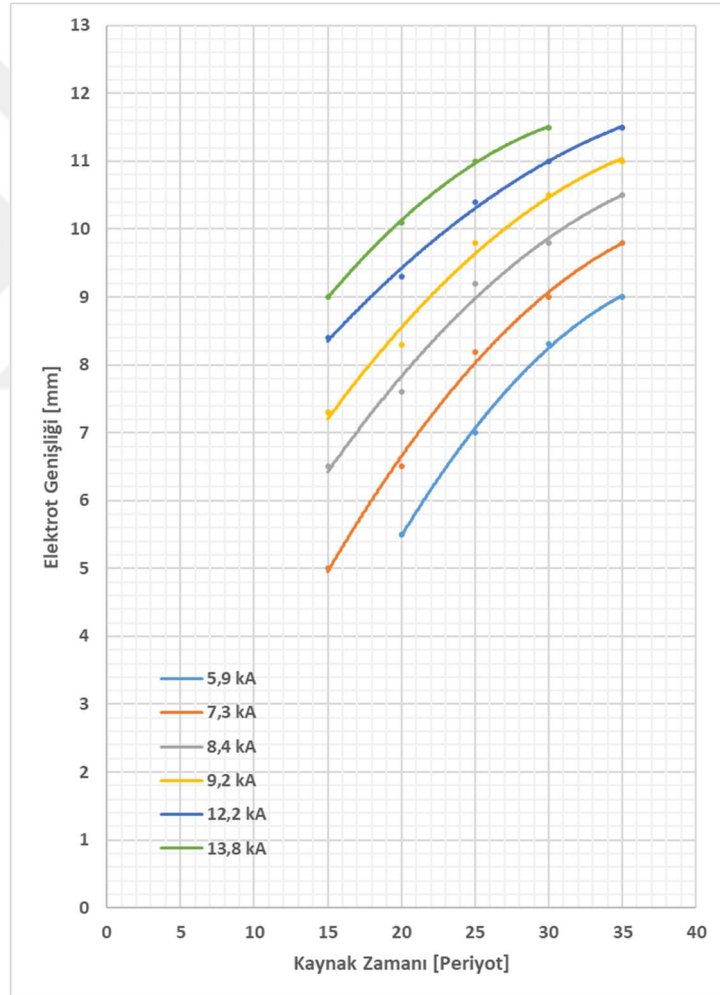
Şekil 5. 18. : Kaynak zamanının elektrot dalma derinliğine etkisi



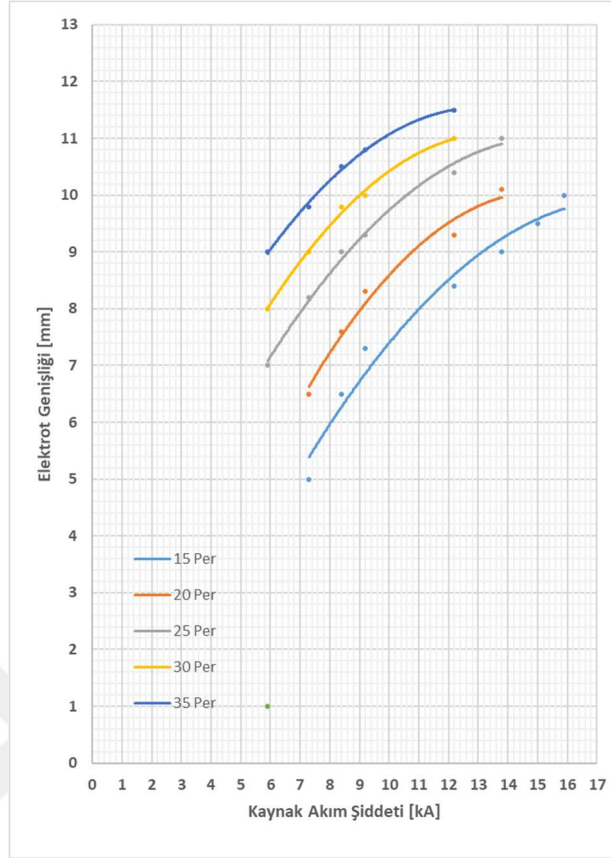
Şekil 5. 19. Kaynak akım şiddetinin elektrot dalma derinliğine etkisi

5.3.3. Kaynak akım şiddeti ve zamanının çok katmanlı çeliklerin birleştirmelerinde oluşan elektrot dalma genişliğine etkisi

Bu değer elektron dalma derinliğine paralel bir yapı göstermektedir. Elektrot genişliğini arttıran etkenler artan kaynak akım şiddetleri ve kaynak zamanlarıdır. Ergiyen metal uzun süren kaynak zamanı ve akım değerinin yükselmesi ile çekirdek dışına sıçrantılar oluşturur. En yüksek elektrot genişliğine 12200 A akım şiddeti ve 35 Periyot kaynak zamanında 11,8 mm olarak ulaşılmıştır. Şekil 5.20. ve Şekil 5.21.'de elektrot genişliğinin kaynak zamanı ve akım şiddeti ile birlikte yükselmesi görülmektedir.



Şekil 5. 20. : Kaynak zamanının elektrot genişliğine etkisi



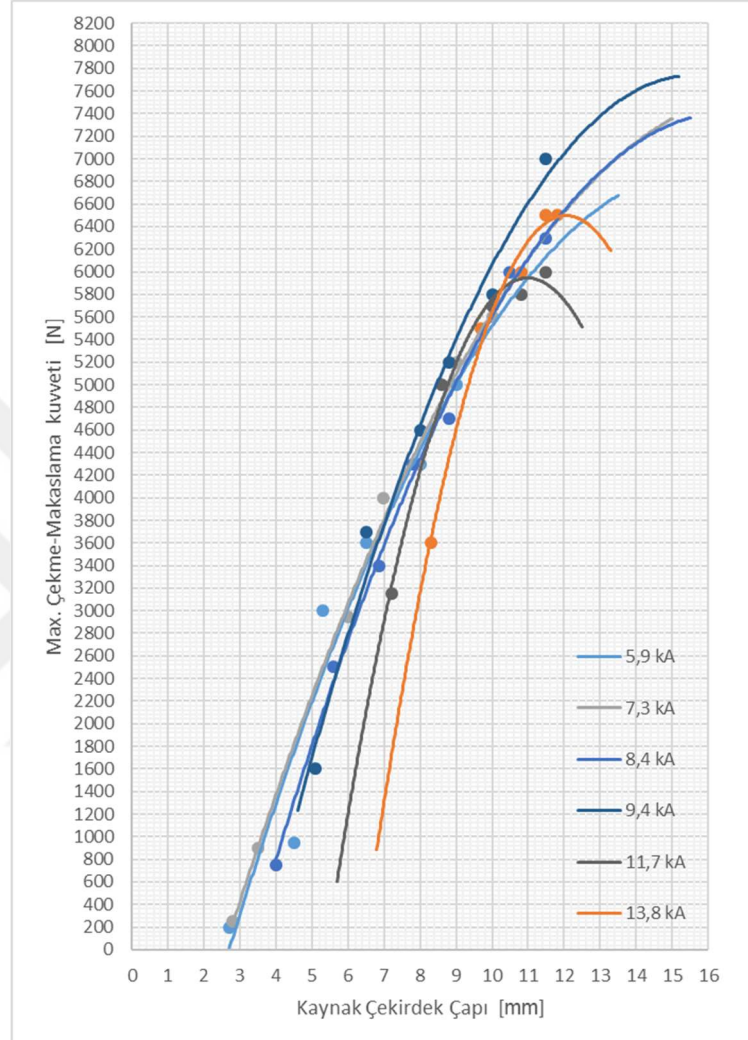
Şekil 5. 21. : Kaynak akım şiddetinin elektrot genişliğine etkisi

5.4. Çok Katmanlı Çeliklerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Çekirdek Boyutlarının Çekme-Sıyırma, Çekme-Makaslama ve Çapraz-Çekme Kuvvetine Etkisi

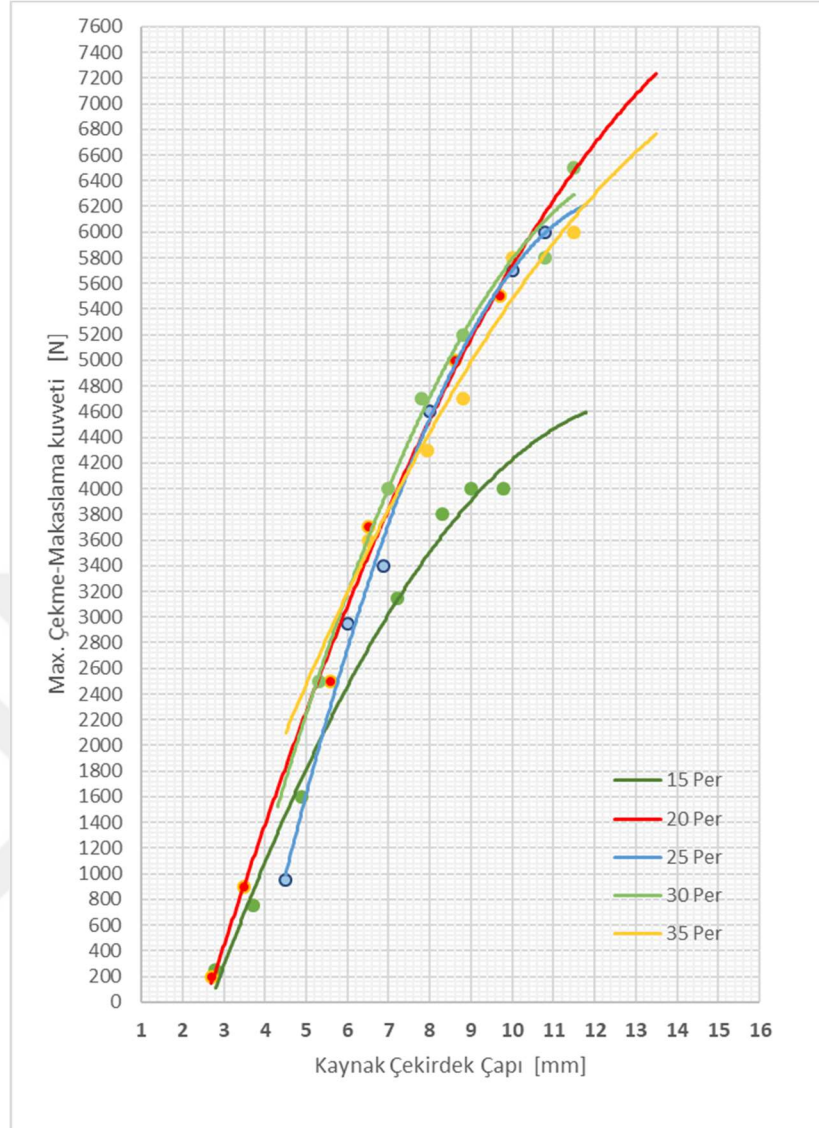
5.4.1. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

Yapılan çalışmalar çekirdek çapı arttıkça çekme-makaslama kuvvetinin de yükseldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çekirdek çapı 7 mm ölçüsünü aştıkça bu kuvvet artışı gözlemlenmemiştir. Buna çekirdek genişlemesiyle ortaya çıkan sıçrantılar ve bununla birlikte meydana gelen metaldeki yüksek kayıplar sebep olmaktadır. Çekirdek çapının 15,3 mm olduğu noktada en yüksek çekme-makaslama kuvveti 7850 N olarak görülmüştür. Bu değer 15 periyot kaynak süresinde gerçekleşmiş olup derin elektrot izine sahiptir. Bu sonuca ek olarak çekirdek çapının büyümeye devam ettikçe çekme-makaslama kuvveti sürekli olarak artmamakta ve düşüşe geçebilmektedir. Benzer

sonuçlara literatürde de rastlamaktayız [72,77,78]. İlgili grafikler Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de yer almaktadır.



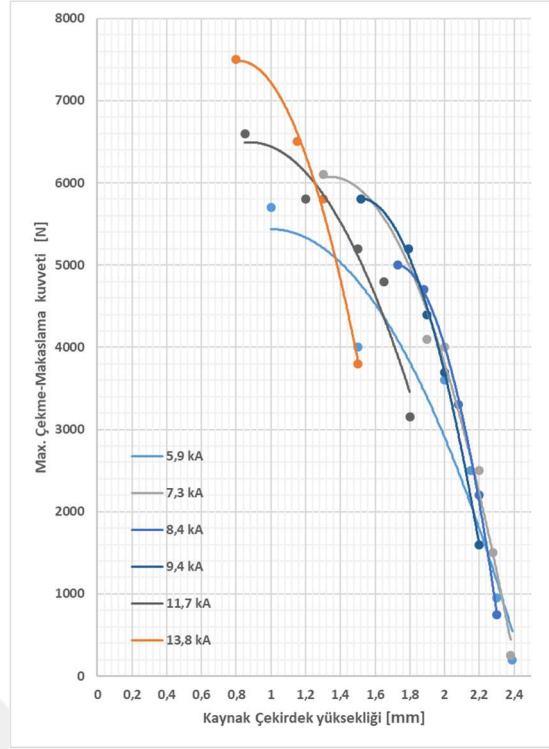
Şekil 5. 22. : Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi



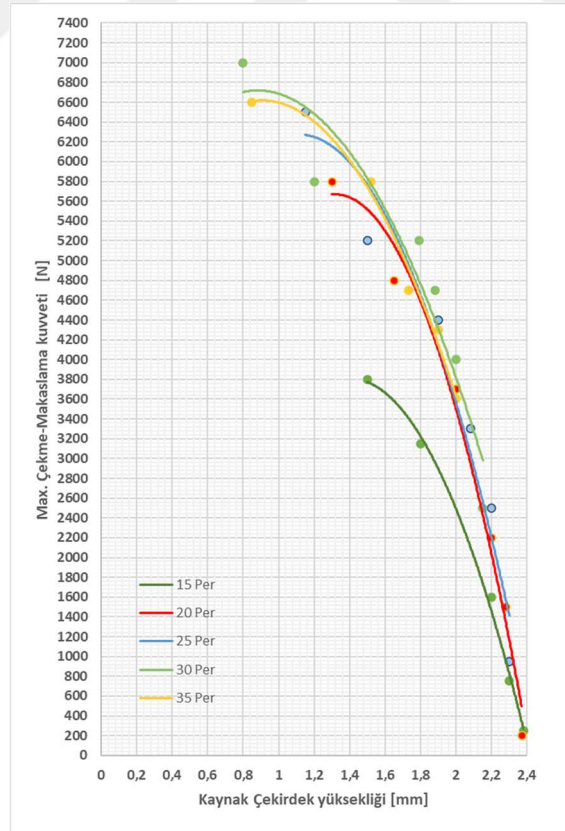
Şekil 5. 23. : Kaynak zamanına bağlı çekirdek çapının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

5.4.2. Çok katmanlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi

Şekil 24. ve Şekil 25.'de elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek yüksekliğinin farklı kaynak akımı ve kaynak sürelerinde çekme-makaslama dayanımında yol açtığı değişimler görülmektedir. Çekirdek yüksekliğinin belirli değerlerden sonra artışı çekme-makaslama değerinde düşüşe yol açmaktadır. Buna sebep olan etkinin kaynak bölgesine giren ısı girdisinin çekirdek yüksekliğini arttırması ve bunun da fişkırmalara sebep olmasıdır.



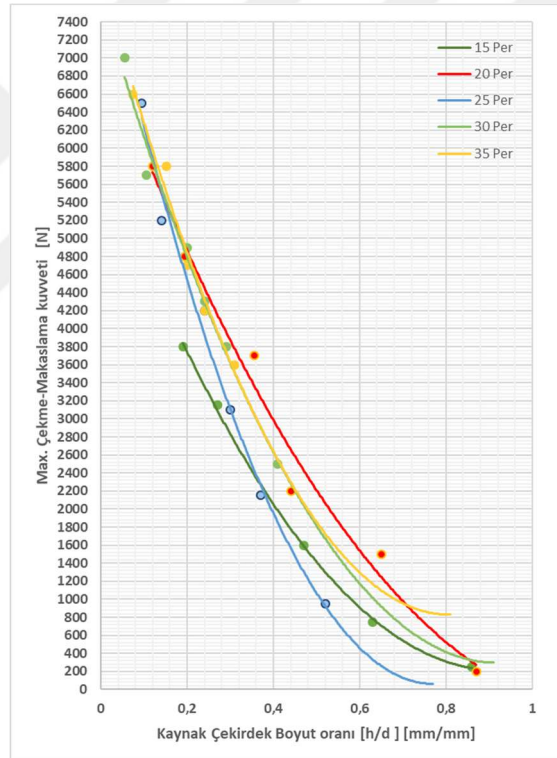
Şekil 5. 24. : Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi



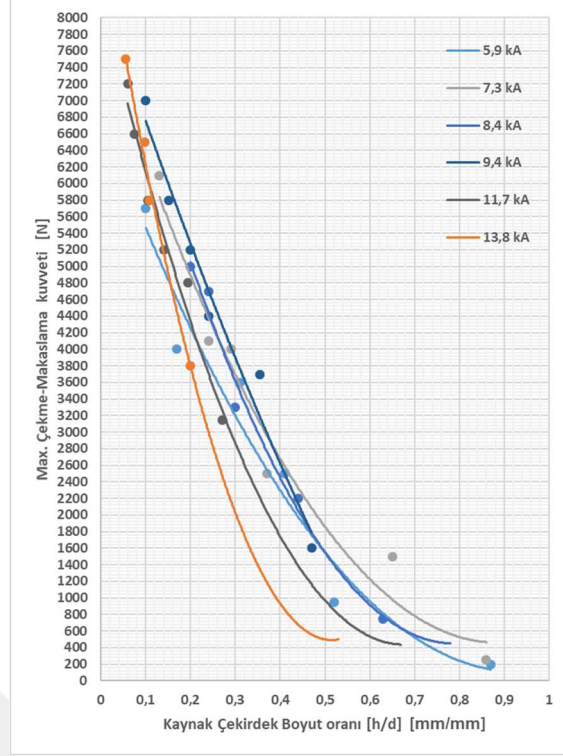
Şekil 5. 25. : Kaynak zamanına bağlı çekirdek yüksekliğinin çekme-makaslama kuvvetine etkisi

5.4.3. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

Yapılan çalışmalarda çekirdek boyut oranının artmasıyla çekme-makaslama dayanımında düşüş gözlenmiştir. Buna sebep olan durumun, uzun kaynak zamanına bağlı olarak oluşan çok yüksek ısı girdisi sonucu olarak çekirdek boyut oranı paydasındaki çekirdek çap değerinin çok yüksek seviyede artışıdır. Çekirdek çapının geniş olduğu durumlarda çekirdek yüksekliği az olduğu zaman çekirdek boyut oranı düşük ve buna bağlı olarak çekme-makaslama kuvveti de yüksek olarak gerçekleşmektedir. İlgili grafikler Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’ de yer almaktadır.



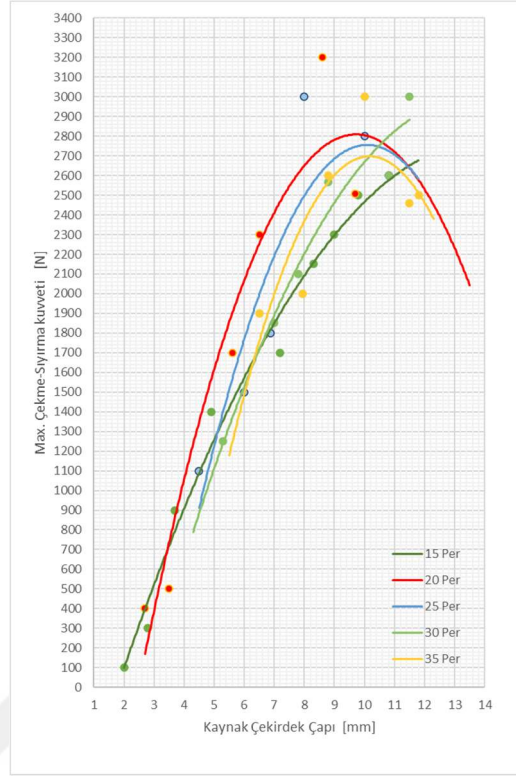
Şekil 5. 26. : Kaynak zamanına bağlı çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi



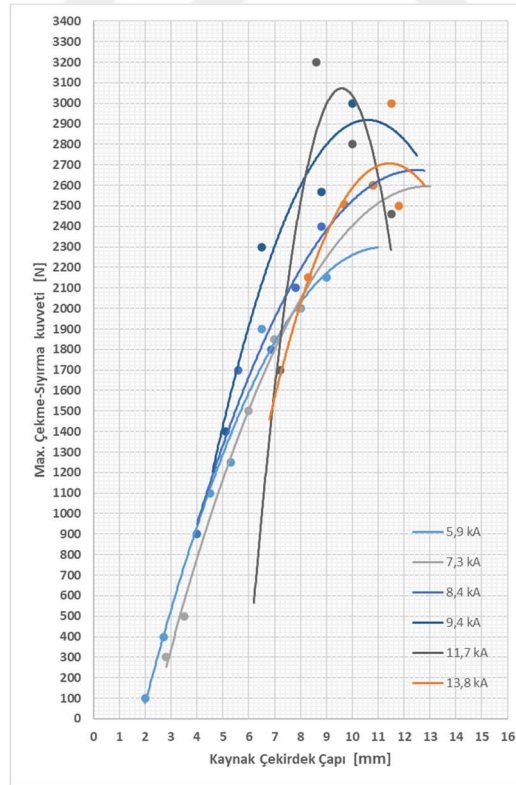
Şekil 5. 27. : Kaynak akım şiddetine bağlı çekirdek boyut oranının çekme-makaslama kuvvetine etkisi

5.4.4. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

Çekirdek çapının çekme-sıyırma kuvvetine olan etkisi çekme-makaslama kuvvetine olan etkisine benzemektedir. Çekirdek çapının belirli bir noktaya kadar artarken 9 mm üzerindeki çap boyutlarında çekme-sıyırma dayanımında mukavemet düşüşü Şekil 5.28. ve Şekil 5.29.'da görülmektedir. Belirli bir noktadan sonra çekme-sıyırma dayanımındaki düşüşün sebebi belirli bir noktadan sonra ulaşılan aşırı dalma derinliği ve fişkırmamanın etkileridir.



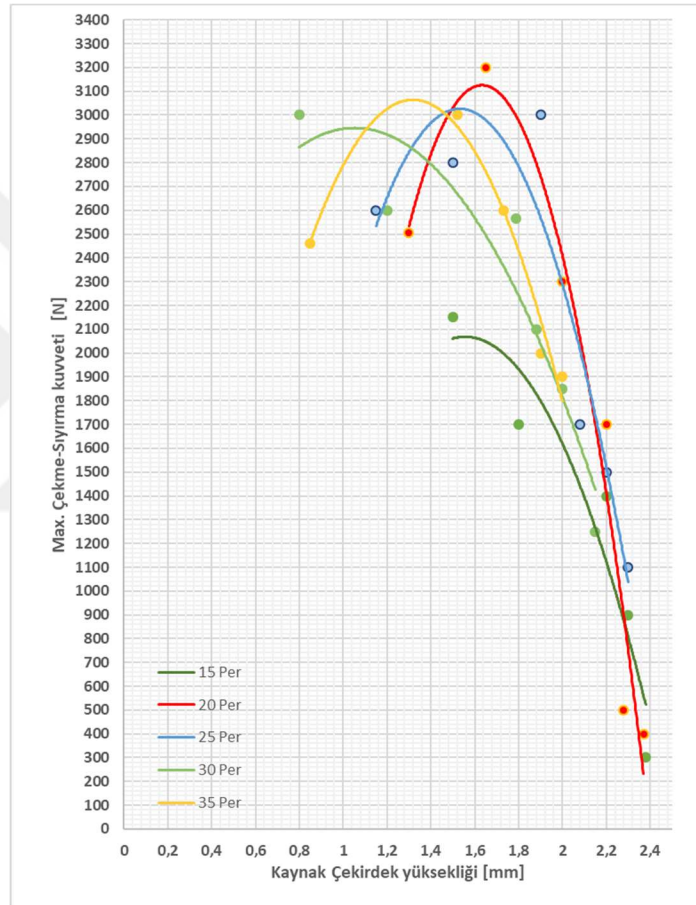
Şekil 5. 28. : Kaynak çekirdek çapının max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-1



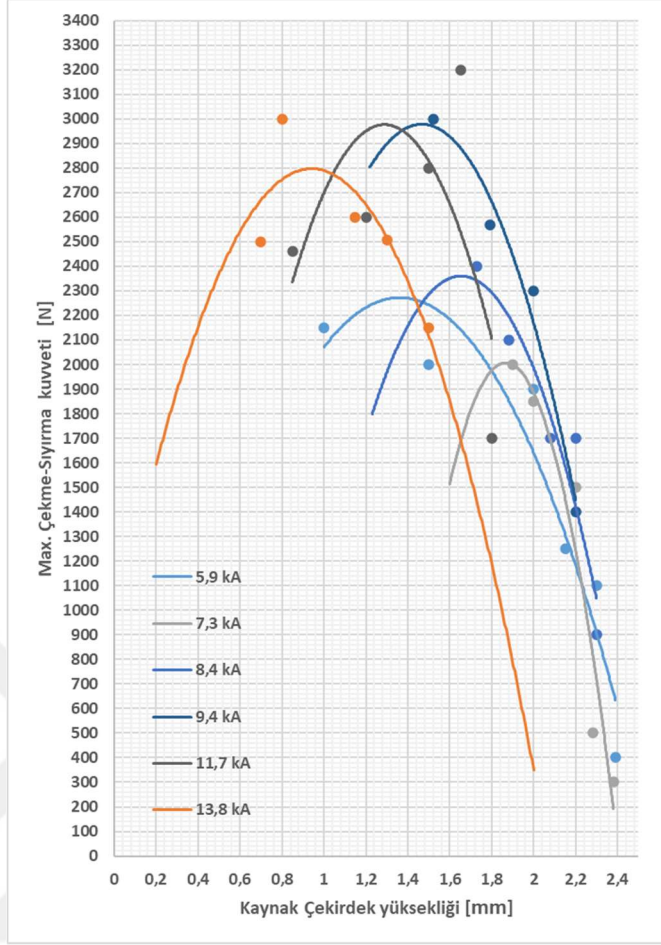
Şekil 5. 29. : Kaynak çekirdek çapının max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-2

5.4.5. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

Farklı kaynak zamanı ve kaynak akımı etkisiyle değişen çekirdek yüksekliğinin çekme-sıyırma kuvvetine etkisi aşağıdaki Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Çekirdek yüksekliğinin belirli bir değere kadar artışı ile çekme-sıyırma kuvveti arttarken belirli bir değerden sonra ise çekme-sıyırma kuvveti düşüşe geçmiştir.



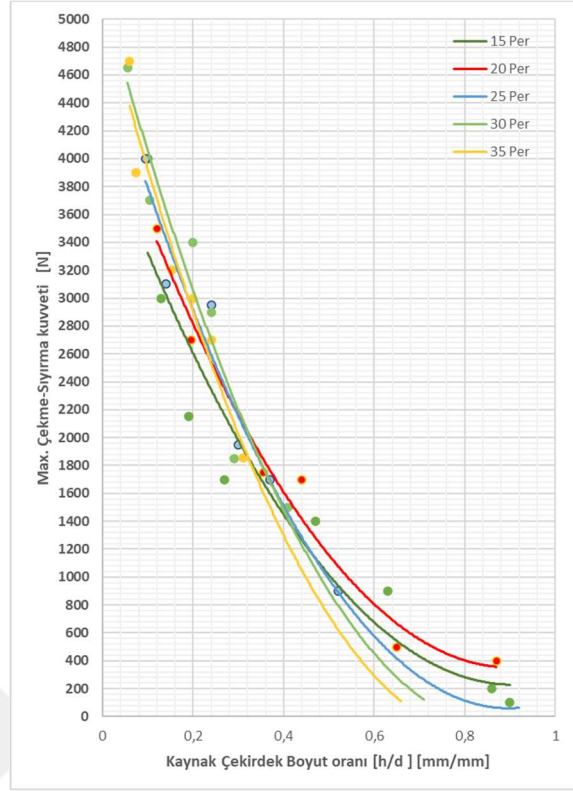
Şekil 5. 30. : Kaynak çekirdek yüksekliğinin max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-1



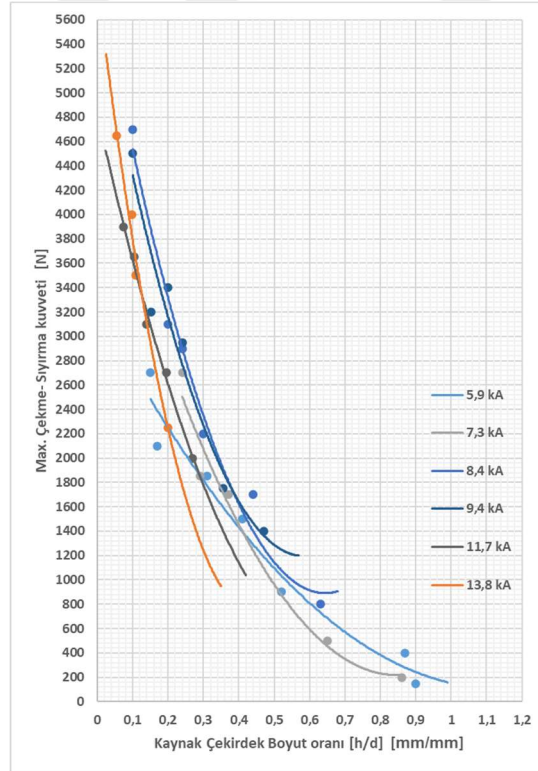
Şekil 5. 31. : Kaynak çekirdek yüksekliğinin max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-2

5.4.6. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta çekirdek boyut oranının çekme-sıyırma kuvvetine etkisi

Yüksek ısı girdisi ile oluşan büyük çap ve düşük yüksekliğe sahip çekirdeğe bağlı olarak en uzun kaynak zamanı ve en yüksek kaynak akımı şiddetlerinde en düşük çekirdek boyut oranları gerçekleşmektedir. Çekme-sıyırma kuvvetleri en yüksek değere çekirdek boyut oranının 0,15 ve 0,18 olduğu noktalarda erişmiştir. Bu noktalarda kaynak akım süreleri 30 ve 35 periyot olarak gerçekleşmiştir. İlgili grafikler Şekil 5.32 ve Şekil 5.33’de yer almaktadır.



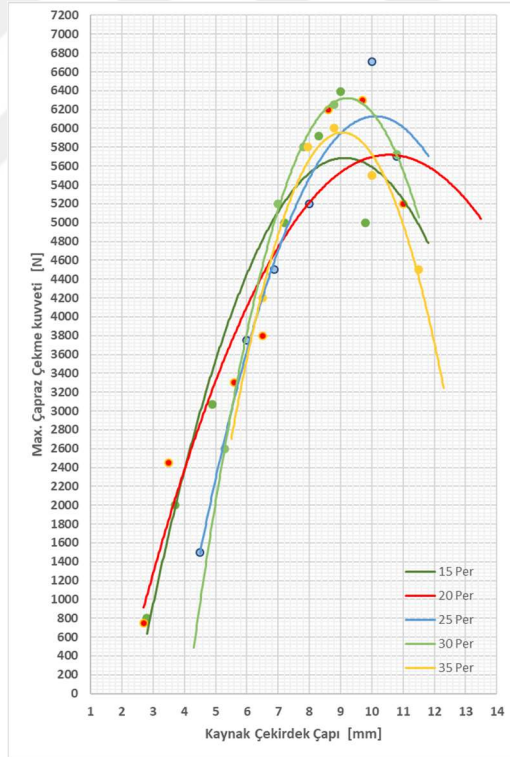
Şekil 5. 32. : Kaynak çekirdek boyut oranının max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-1



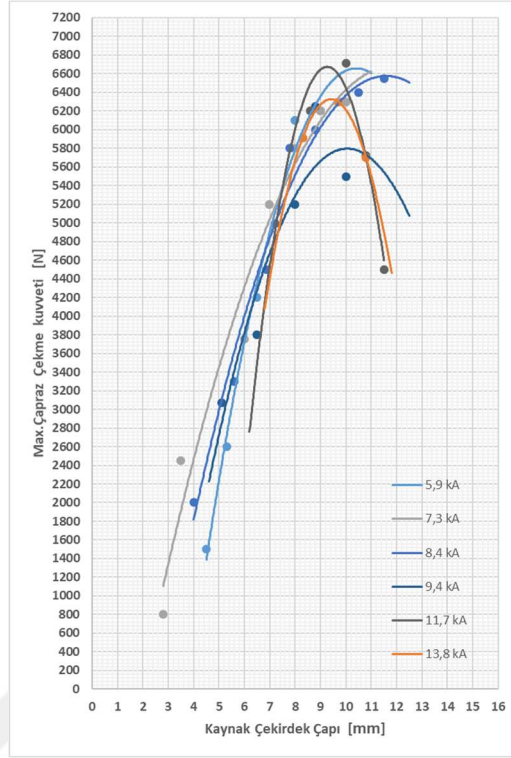
Şekil 5. 33. : Kaynak çekirdek boyut oranının max. çekme-sıyırma kuvvetine etkisi-2

5.4.7. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek çapının çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Çekirdek çapı ölçüsü 9 mm değerini geçtikten sonra, diğer çekirdek çapı boyutlarında çapraz-çekme dayanımında bir düşüş yaşandığı Şekil 5.34. ve 5.35.'de görülmektedir. Çekirdek çapının artarken yüksekliğinde meydana gelen düşüş çapraz-çekme dayanımını da düşürmektedir. Çekirdek yüksekliğinin azalması aşırı ergimeş metalde şıçrantı oluşmakta ve bu da kesiti daraltıp bağlantı zayıflamasına ve çapraz-çekme kuvvetinde düşüşe yol açmaktadır. Çapraz-çekme kuvvetinde en yüksek değere 9 mm çapında çekirdek çapına sahip ve kaynak zamanı 30 periyot olan numunede ulaşılmıştır. Kaynak akım şiddeti ele alındığında ise, çapraz-çekme kuvveti en yüksek seviyeye 6350 A değerinde ulaşmıştır.



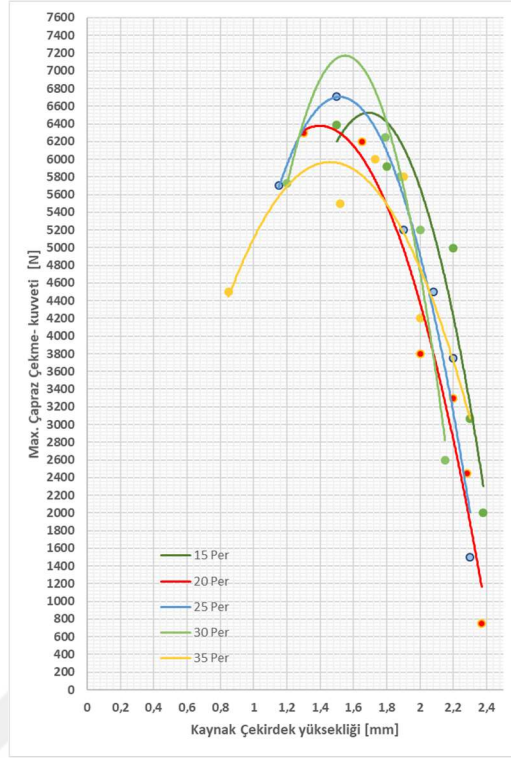
Şekil 5. 34. : Kaynak çekirdek çapının max. çapraz çekme kuvvetine etkisi-1



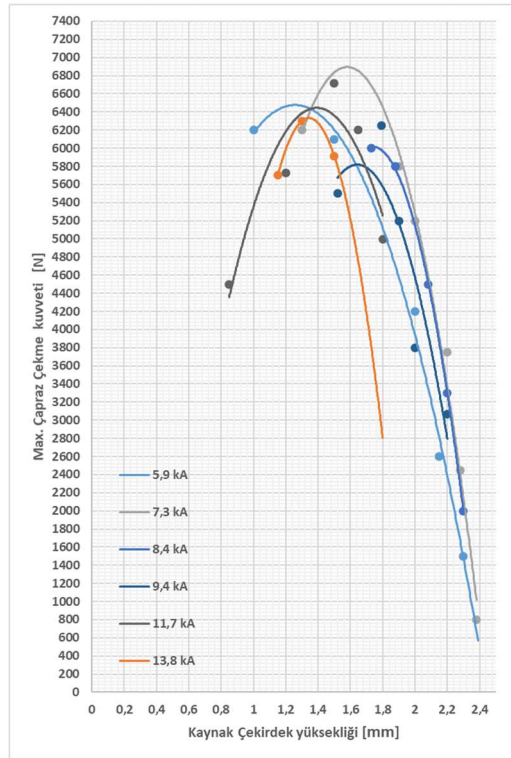
Şekil 5. 35. : Kaynak çekirdek çapının max. çapraz çekme kuvvetine etkisi-2

5.4.8. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek yüksekliğinin çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Kaynak zamanının yükselmesiyle birlikte uygulanan sabit çene kuvveti ergiyen metali artırmış, bu da elektrotun daha fazla dalmasına ve nihayetinde çekirdek yüksekliğinde düşüşe sebep olmuştur. Çapraz-çekme kuvveti en yüksek değerine 30 periyot kaynak zamanında ve 1,6 mm çekirdek yüksekliğinde ulaşmıştır. En yüksek çapraz-çekme kuvveti kaynak akım şiddetine göre ise 7300 A akım şiddetinde tespit edilmiştir. Isı girdisi bir noktaya kadar artarken belirli bir noktadan sonra çekirdek optimum geometrisini kaybetmekte, çap büyüyüp yükseklik azalmaktadır. Bu durumda bir yere kadar çapraz-çekme kuvvetini artırmakta bir noktadan sonra ise düşüşe sebep olmaktadır. Literatürde elde edilen sonuçlara paralel bulgulara rastlanmıştır [77,78,79]. İlgili grafikler Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de yer almaktadır.



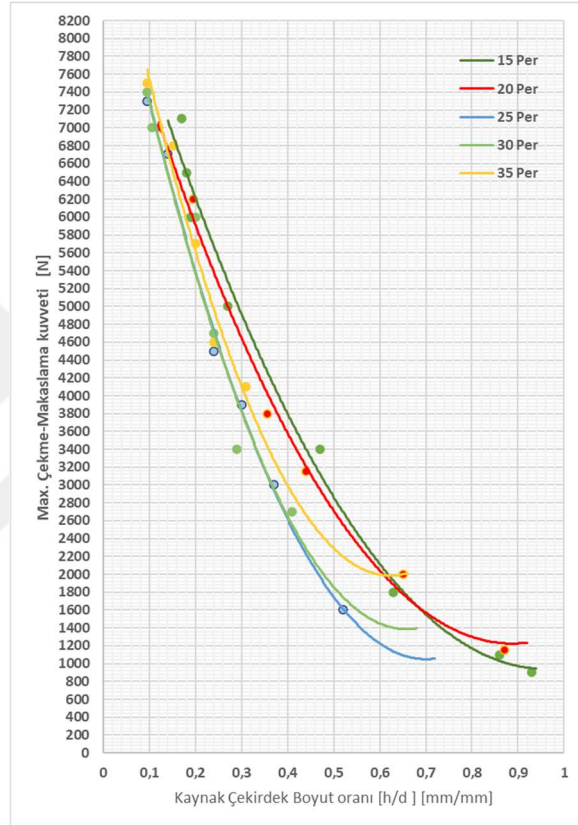
Şekil 5. 36. : Kaynak çekirdek yüksekliğinin max. çapraz çekme kuvvetine etkisi



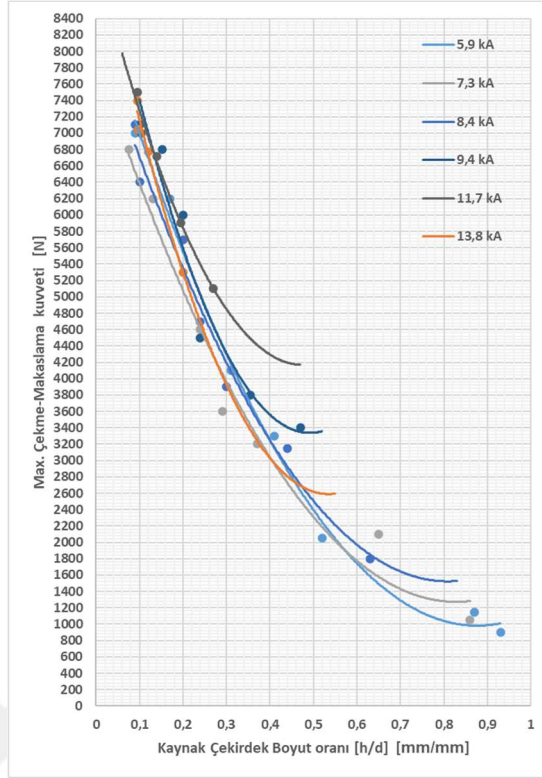
Şekil 5. 37. : Kaynak çekirdek yüksekliğinin max. çapraz çekme kuvvetine etkisi

5.4.9. Çok katmanlı çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi

Çekirdek yüksekliğinin çekirdek çapına bölünerek elde edilen çekirdek oranının çapraz-çekme kuvvetine etkisi Şekil 5.38 ve Şekil 5.39’da gösterilmiştir. Çekirdek boyut oranı arttıkça çapraz-çekme kuvvetlerinde düşüş gözlemlenmektedir. En düşük çapraz-çekme kuvvetlerine 15 periyot kaynak zamanı ve 5900A kaynak akımında rastlanmıştır.



Şekil 5. 38. : Kaynak çekirdek boyut oranının max. çapraz çekme kuvvetine etkisi



Şekil 5. 39. : Kaynak çekirdek boyut oranının max. çapraz çekme kuvvetine etkisi

5.5. Çok Katmanlı Çeliklerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Sertlik Değerine Etkisi

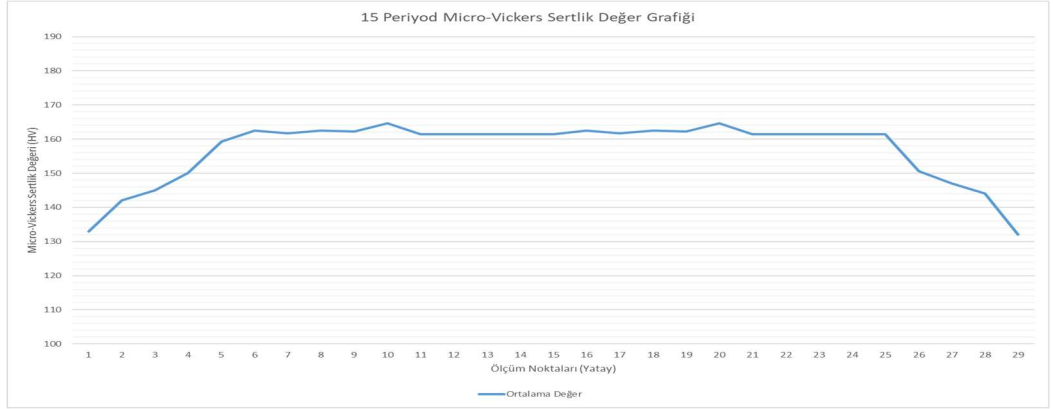
Çok katmanlı çelik birleştirmelerindeki sertlik değerlerini ölçmek için öncelikle sacın kesiti alınacak. Alınan kesitte kaynak çekirdeğini çapraz kesecek bir çizgi üzerinde 0,2mm aralıklarla ölçümler aşağıdaki şekil 5.40.'da gösterildiği gibi alınacaktır. İlk ölçüm noktası kaynak çekirdeğinin başlamadığı ısıdan etkilenmemiş sac kısmından başlayacak ve çapraz çizgi boyunca kaynak çekirdeğine ulaşıncaya kadar aralıklar ilerleyecek. Yapılan bütün sertlik ölçümleri Avrupa'da yaygın olarak kullanılan EN ISO 14271 standartına uyumlu şekilde hazırlanmıştır.

Sertlik değerlerini incelediğimiz göze çarpan en önemli durumlardan bir tanesi zaman zaman noktasal olarak meydana gelen ani sertlik düşüşleridir. Beklenen eğrinin aksine noktasal veya kısa süreli bölgesel olarak yaşanan bu sertlik düşüşleri yapıştırıcı polimer malzemenin etkisinden dolayı oluşmaktadır. Buna ek olarak sertlik eğrisinin değişimine baktığımızda ısı tesiri altında kalan ITAB bölgesinde sertlerin göreceli olarak düşük seyrederken, çekirdek noktasına doğru arttığı görülmüştür. Deneyler sırasında görülen en büyük sert değeri 205 HV ile 15P kaynak zamanı ve 9,4kA kaynak akım şiddetinin

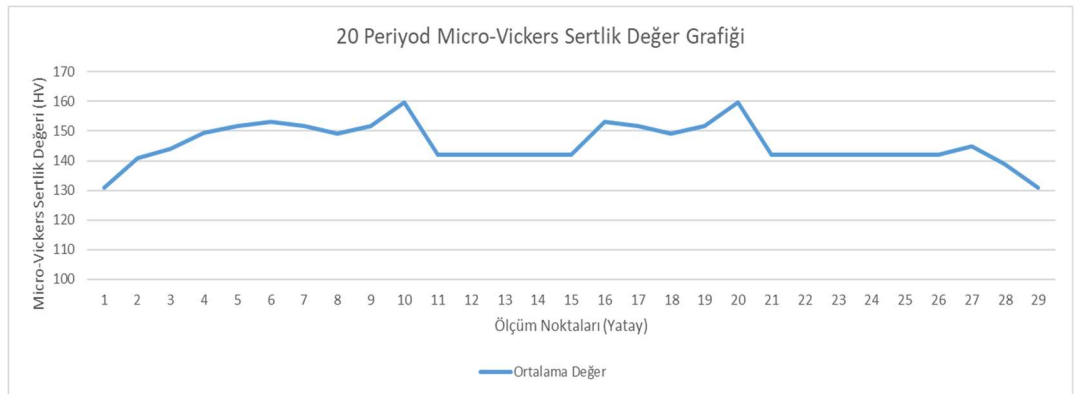
uygulandığı numunedir. Numuneleri incelediğimiz kritik sertlik değeri olan 350HV nin altında sertlik değerlerinin çıkması olumlu bir durumdur. Aksi halde 350HV üzeri sertlikler elektrik direnç nokta kaynağında istenmeyen seviyelerdir. Şekil 5.41. , Şekil 5.42., Şekil 5.43, Şekil 5.44 ve Şekil 5.45 de alınan ölçümlerin grafiksel gösterimi yer almaktadır.



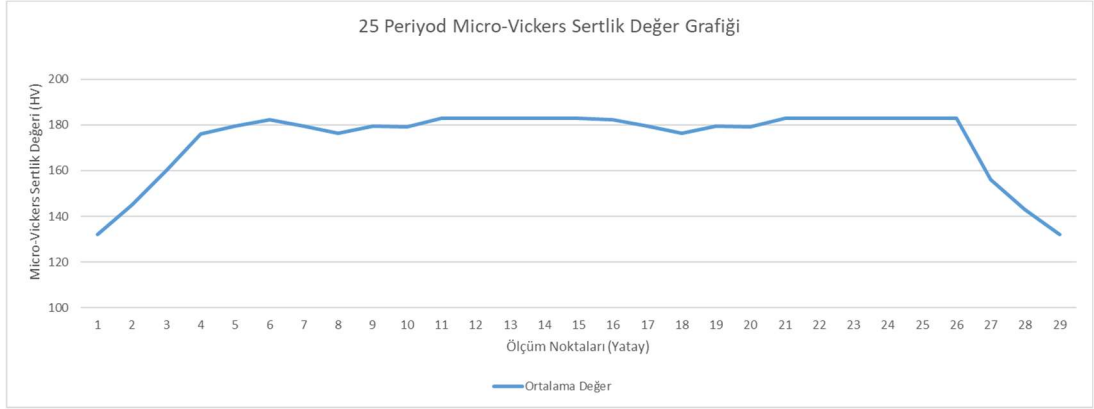
Şekil 5. 40. : Sertlik ölçüm gösterimi



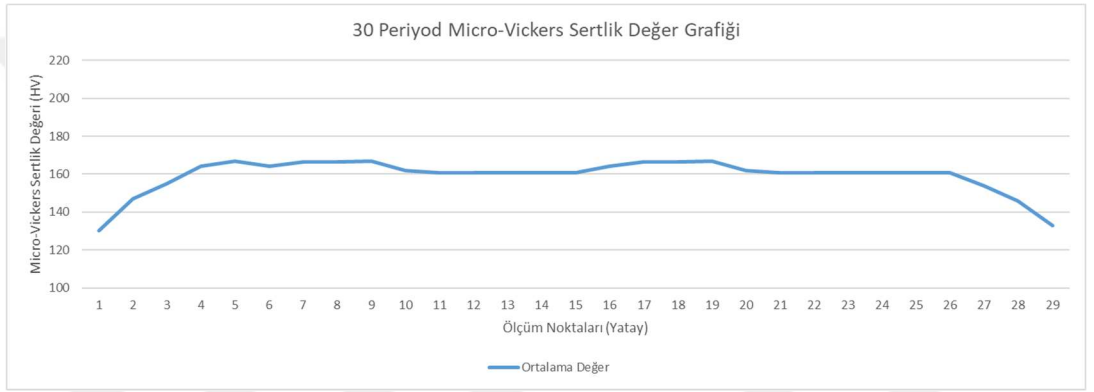
Şekil 5. 41. : 15 periyot sertlik incelemeleri



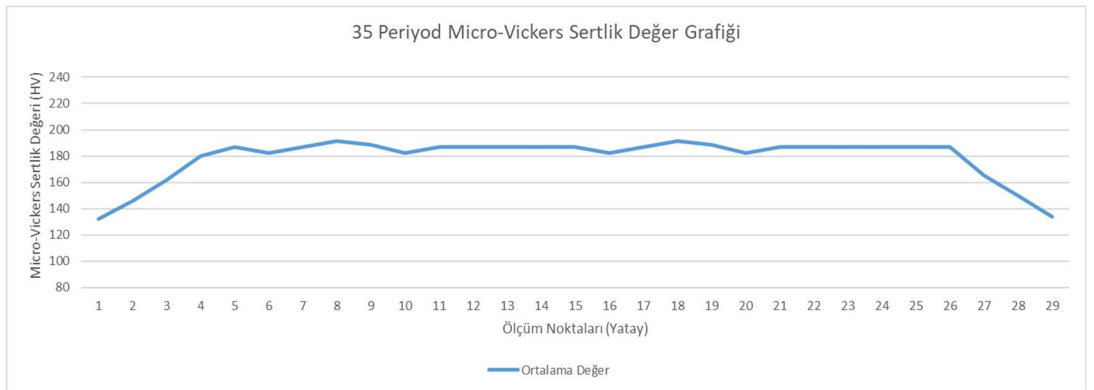
Şekil 5. 42. : 20 periyot sertlik incelemeleri



Şekil 5. 43. : 25 periyot sertlik incelemeleri



Şekil 5. 44. : 30 periyot sertlik incelemeleri



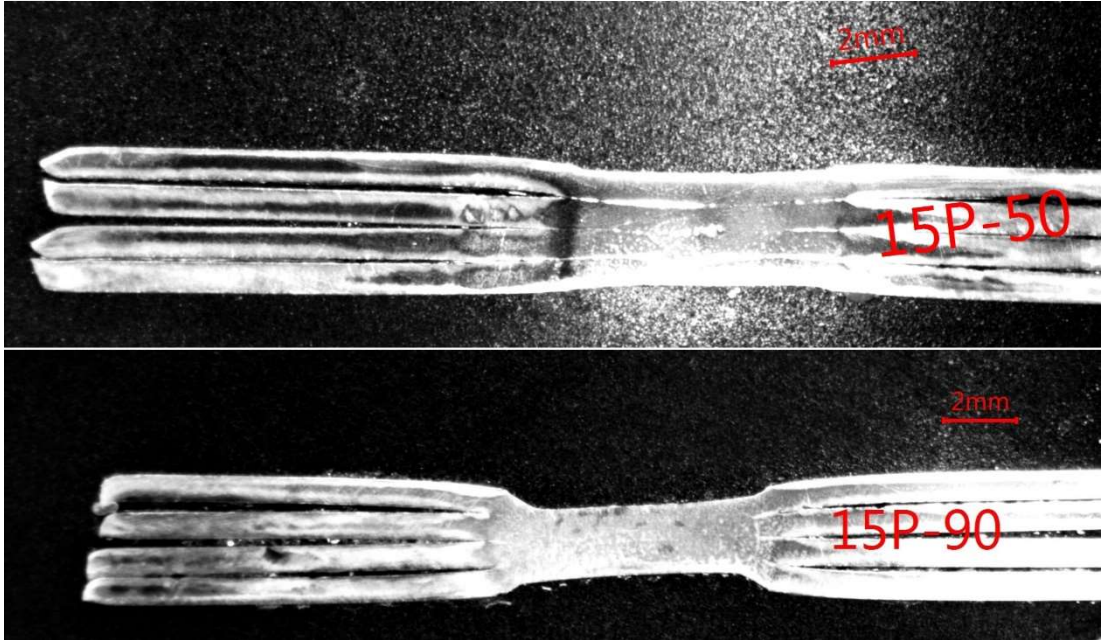
Şekil 5. 45. : 35 periyot sertlik incelemeleri

5.6. Çok Katmanlı Çeliklerin Birleştirilmesinde Makro Yapı Görüntülerin Analizi

Çok katmanlı çeliklerin birleştirilmesinin akabinde makro inceleme için numuneler alınmış ve mikroskop altında incelemeler sağlanmıştır. Tüm numunelerin çekirdek çapı,

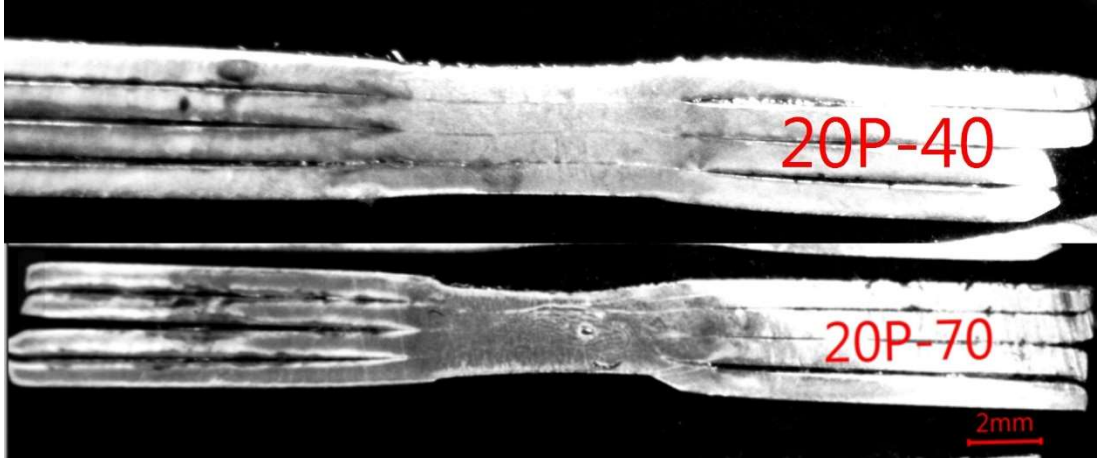
çekirdek yüksekliği, dalma genişliği ve dalma derinlikleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda kaynak diyagramları oluşturulmuştur.

15 periyot kaynak ile yapılan birleştirilmelerde en yüksek kaynak çekirdek çapı 15,9 kA'de en düşük kaynak çapı ise 8,4 kA'de meydana gelmiştir. Çekirdek yüksekliği incelendiğinde en yüksek 7,3 kA'de, en düşük ise 15,9 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma genişliğine bakıldığında en yüksek 15,9 kA'de, en düşük 7,3 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma derinliği incelendiğinde dalma genişliğinde benzer şekilde en yüksek 15,9 kA'de, en düşük ise 7,3 kA'de olduğu görülmüştür. Makro yapı görüntüleri şekil 5.46'da gösterilmiştir.



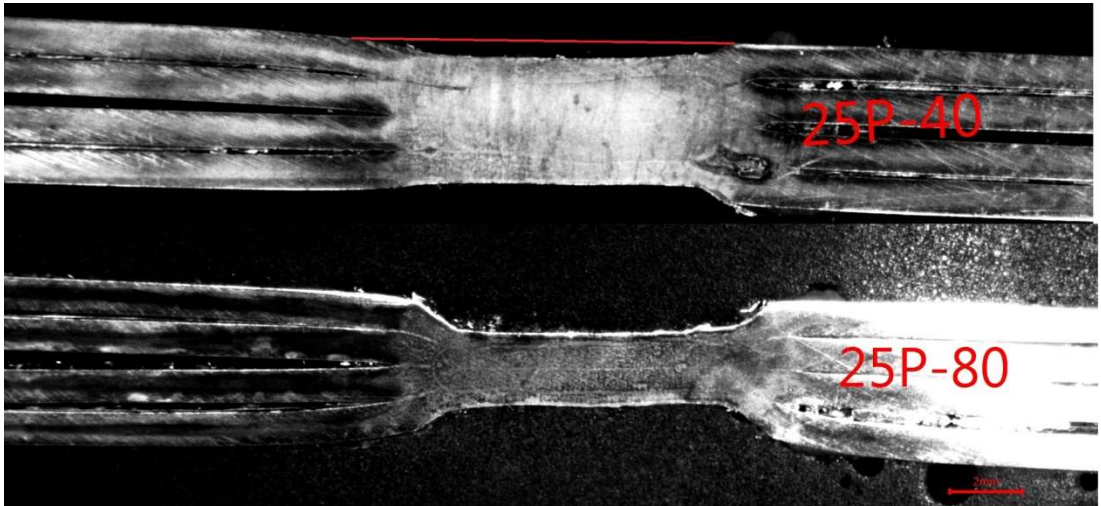
Şekil 5. 46. : 15 periyot makro yapı incelemeleri

20 periyot kaynak ile yapılan birleştirilmelerde en yüksek kaynak çekirdek çapı 8,4 kA'de, en düşük kaynak çapı ise 13,8 kA'de meydana gelmiştir. Çekirdek yüksekliği incelendiğinde en yüksek 13,8 kA'de, en düşük ise 7,3 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma genişliğine bakıldığında en yüksek 13,8 kA'de, en düşük 7,3 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma derinliği incelendiğinde dalma genişliğinde benzer şekilde en yüksek 13,8 kA'de, en düşük 7,3 kA'de olduğu görülmüştür. Makro yapı görüntüleri şekil 5.47'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 47. : 20 periyot makro yapı incelemeleri

25 periyot kaynak ile yapılan birleştirilmelerde en yüksek kaynak çekirdek çapı 13,8 kA'de, en düşük kaynak çapı ise 5,9 kA'de meydana gelmiştir. Çekirdek yüksekliği incelendiğinde en yüksek 7,3 kA'de, en düşük ise 13,8 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma genişliğine bakıldığında en yüksek 13,8 kA'de, en düşük 5,9 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma derinliği incelendiğinde dalma genişliğinde benzer şekilde en yüksek 13,8 kA'de, en düşük 5,9 kA'de olduğu görülmüştür. Makro yapı görüntüleri şekil 5.48'de gösterilmiştir.



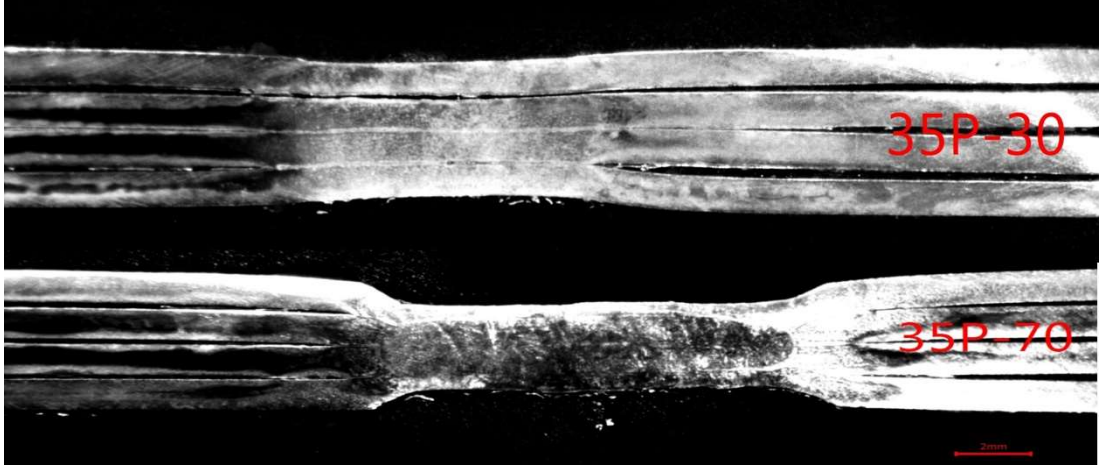
Şekil 5. 48. : 25 periyot makro yapı incelemeleri

30 periyot kaynak ile yapılan birleştirilmelerde en yüksek kaynak çekirdek çapı 9,4 kA'de, en düşük kaynak çapı ise 5,9 kA'de meydana gelmiştir. Çekirdek yüksekliği incelendiğinde en yüksek 7,3 kA'de, en düşük ise 11,7 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma genişliğine bakıldığında en yüksek 11,7 kA'de, en düşük 5,9 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma derinliği incelendiğinde dalma genişliğinde benzer şekilde en yüksek 11,7 kA'de, en düşük 5,9 kA'de olduğu grlmştir. Makro yapı görüntüleri şekil 5.49'da gösterilmiştir.



şekil 5. 49. : 30 periyot makro yapı incelemeleri

35 periyot kaynak ile yapılan birleştirilmelerde en yüksek kaynak çekirdek çapı 11,7 kA'de, en düşük kaynak çapı ise 5,9 kA'de meydana gelmiştir. Çekirdek yüksekliği incelendiğinde en yüksek 7,3 kA'de, en düşük ise 11,7 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma genişliğine bakıldığında en yüksek 11,7 kA'de, en düşük 7,3 kA'de meydana gelmiştir. Elektrot dalma derinliği incelendiğinde dalma genişliğinde benzer şekilde en yüksek 11,7 kA'de, en düşük 7,3 kA'de olduğu grlmştir. Makro yapı görüntüleri şekil 5.50'de gösterilmiştir.



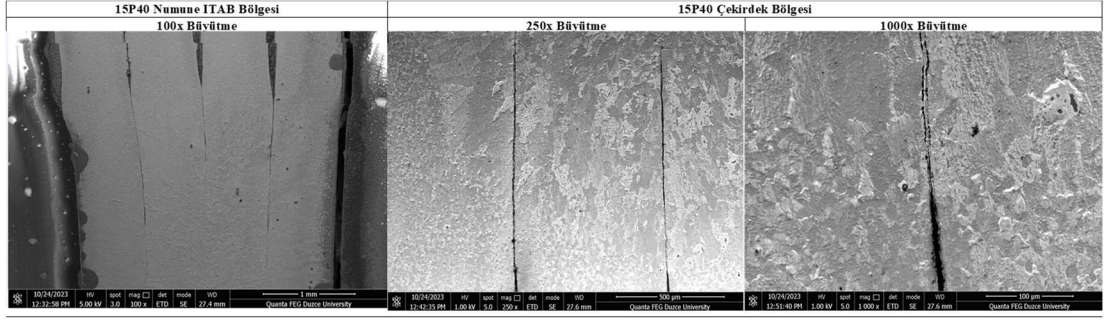
Şekil 5. 50. : 35 periyot makro yapı incelemeleri

5.7. Kaynak Değişkenlerinin Bağlantıların Mikro Yapısına Etkisi ve Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntü (SEM) Analiz Sonuçları

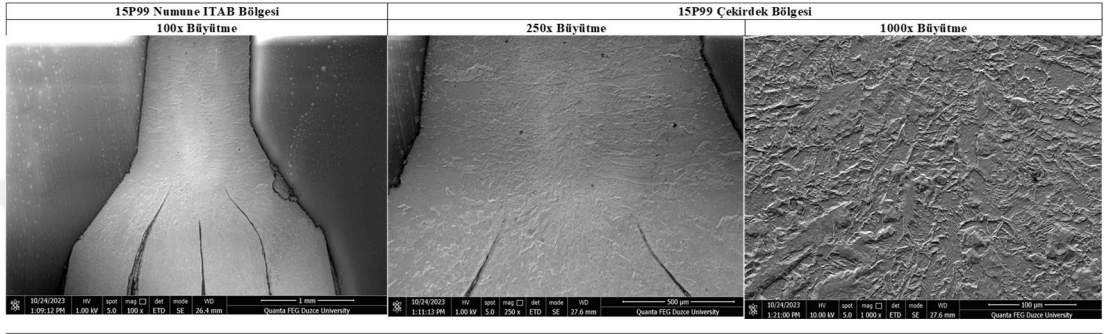
Kaynak değişkenlerinin bağlantıların mikroyapısına etkisi ana metal, ITAB ve kaynak çekirdeğinin 100x, 200x, 250x, 500x ve 1000x büyütmelemlerde çekilen görüntülerle incelenmiştir. Şekil 5.45, Şekil 5.46, Şekil 5.47 , Şekil 5.48 ve Şekil 5.49 de görüntüler yer almaktadır.

Çok katmanlı Bondal çeliğinin SEM ve mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, açık renkli bölgelerde ferrit yapılar rastlanmıştır. Rengi koyu olan alanların ise kalıntı östenit içerdiği görülmektedir. Kaynak esnasında ısı girdisinin artmasıyla koyu renge sahip olan östenit tanelerin boyutlarında artış görülmektedir. Ayrı tane sınırların kaybolduğu tanelerin kaynak çekirdeğine doğru yönelerek uzayıp geometrisinde değişiklikler görüldüğünü analiz etmekteyiz. Kaynak çekirdeğinde hızlı soğuma olduğu zaman martenzit yapıda kalınlaşma görülebilir. Buna benzer örneklerle de rastlanmaktadır.

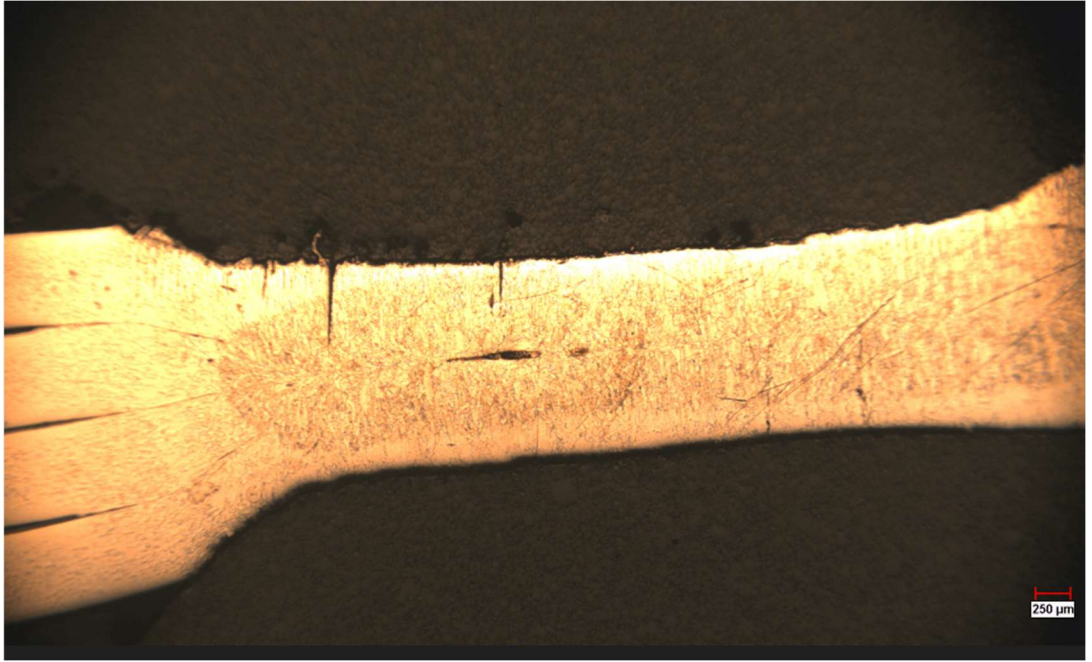
Mikroyapılarda görülen bir diğer husus kaynak akım şiddetinin çok fazla arttığı durumlarda oluşan çatlak ve boşlukların artmasıdır. Buna bağlı örneklerle de Şekil 5.53'de rastlanmıştır. Ayrıca Şekil 5.51, Şekil 5.52, Şekil 5.54, Şekil 5.55, Şekil 5.56, Şekil 5.57, Şekil 5.58, Şekil 5.59, Şekil 5.60, Şekil 5.61 ve Şekil 5.62 de mikro yapılara ait SEM görüntüleri yer almaktadır.



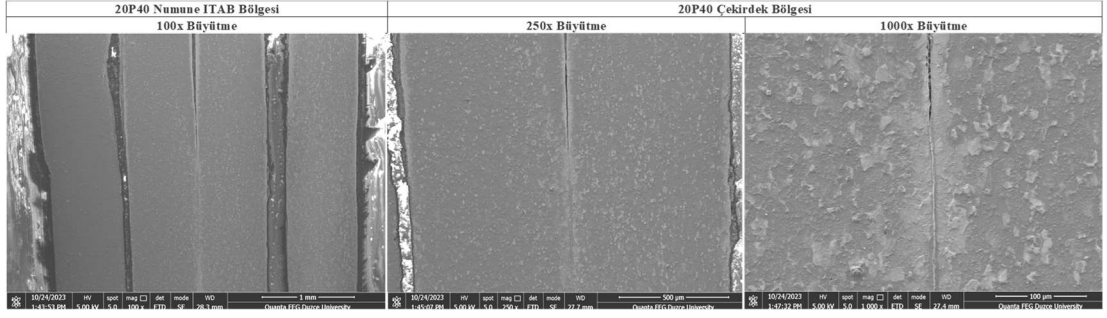
Şekil 5. 51. : 15P40 Mikro Yapı Görüntüleri



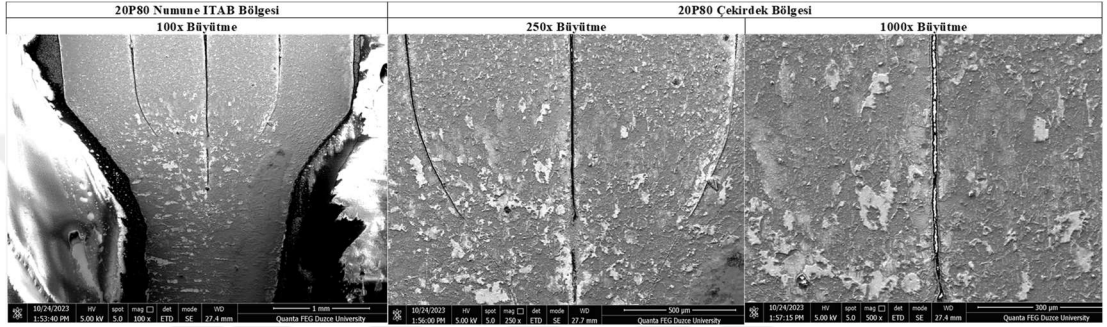
Şekil 5. 52. : 15P99 Mikro Yapı Görüntüleri



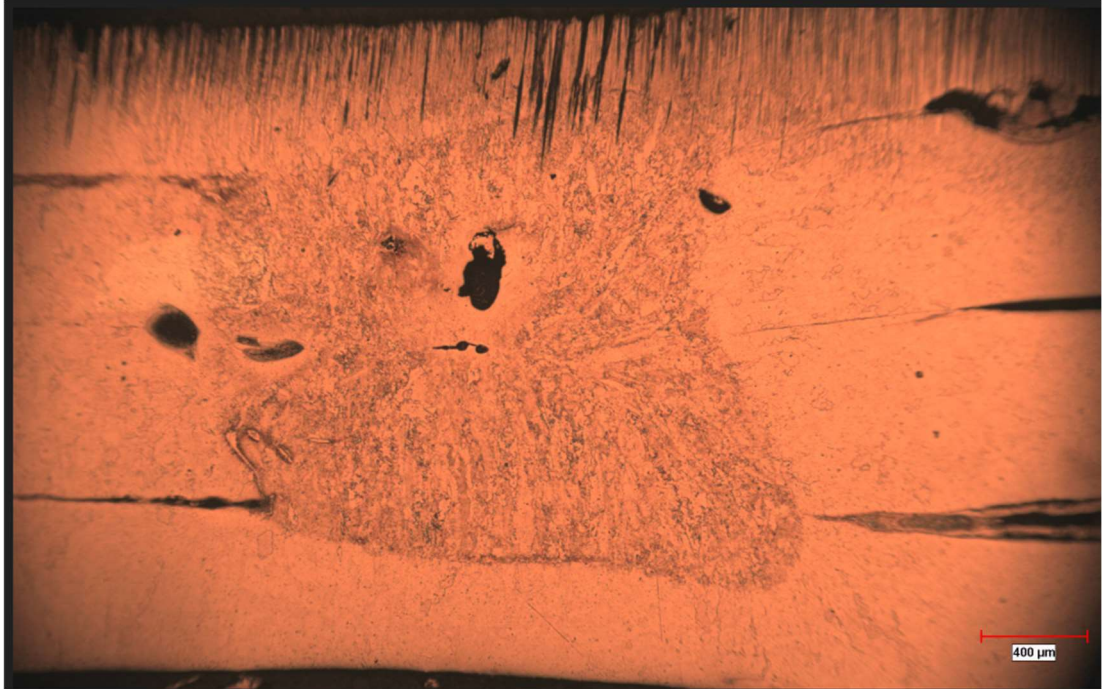
Şekil 5. 53. : 15P99 Mikro Yapı Çatlak ve Boşluk Görüntüleri



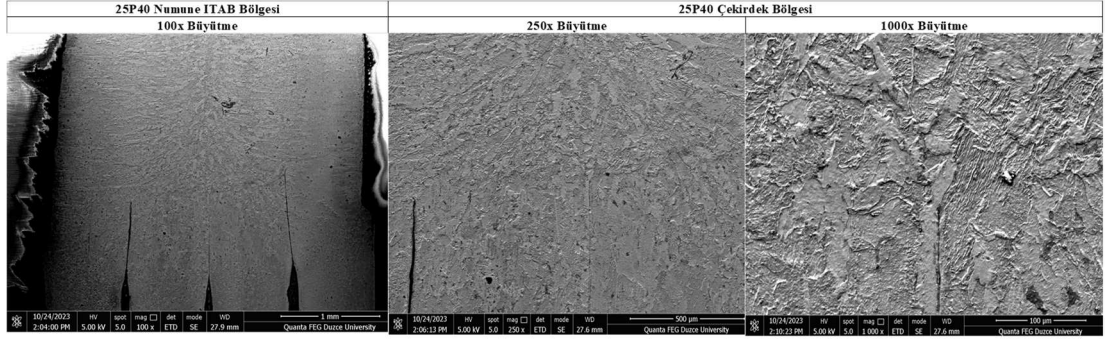
Şekil 5. 54. : 20P40 Mikro Yapı Görüntüleri



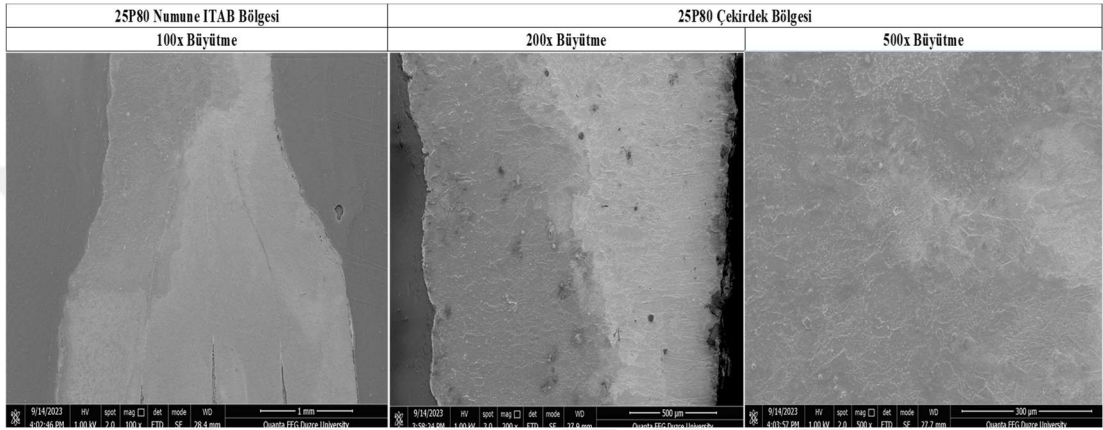
Şekil 5. 55. : 20P80 Mikro Yapı Görüntüleri



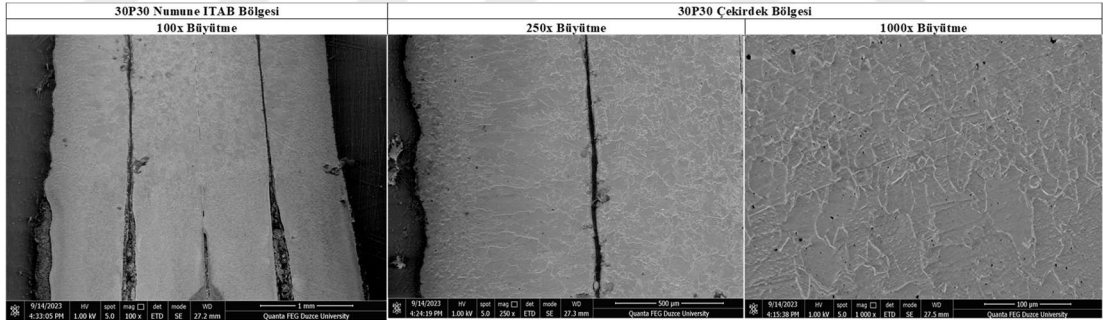
Şekil 5. 56. : 20P80 Mikro Yapı Görüntüleri



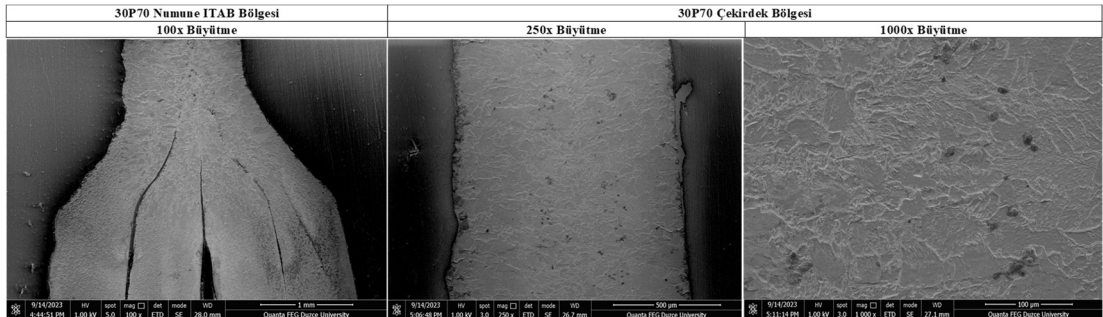
Şekil 5. 57. : 25P40 Mikro Yapı Görüntüleri



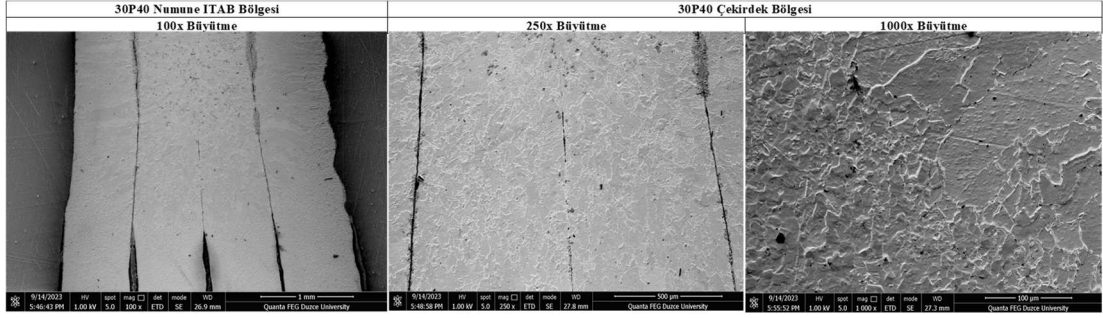
Şekil 5. 58. : 25P80 Mikro Yapı Görüntüleri



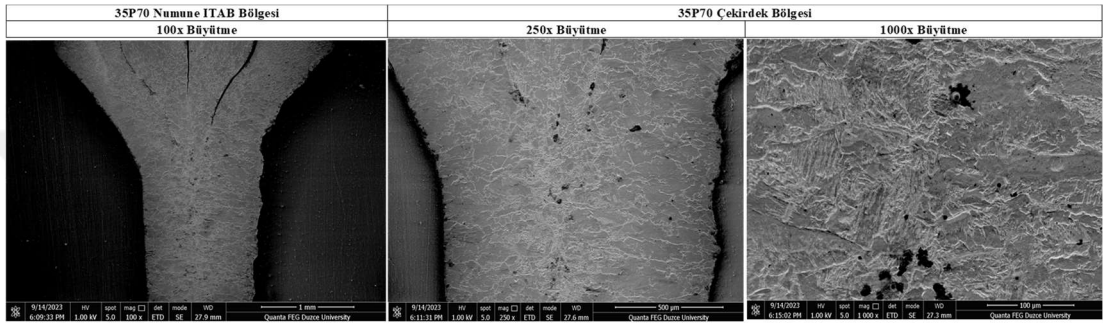
Şekil 5. 59. : 30P30 Mikro Yapı Görüntüleri



Şekil 5. 60. : 30P70 Mikro Yapı Görüntüleri



Şekil 5. 61. : 35P40 Mikro Yapı Görüntüleri



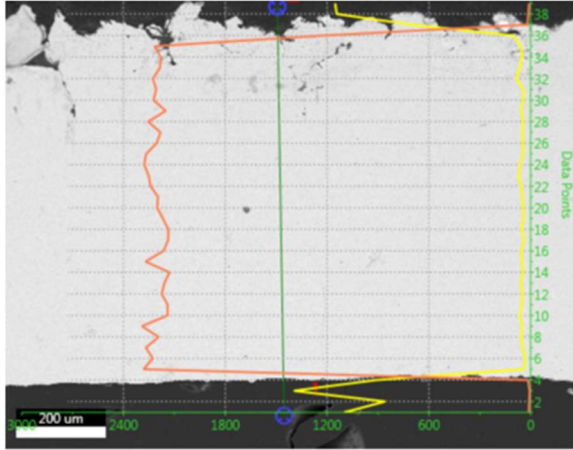
Şekil 5. 62. : 35P70 Mikro Yapı Görüntüleri

5.8. Kaynak Bölgesi EDS Analizleri

Çok katmanlı çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinden alınan numunelere boyuna EDS analizi yapılmıştır. Dik biçimde çizgisel olarak uygulanan EDS analiz sonuçları Şekil 5.63., Şekil 5.64. , Şekil 5.65, Şekil 5.66, ve Şekil 5.67’de görülmektedir.

EDS analizi sonucunda herhangi yabancı bir elemente rastlanmamıştır. Bu durum birleştirmenin sağlıklı bir şekilde olduğunu ve çekirdek mukavemetinde düşüş gösterecek bir sebebin olmadığını göstermektedir.

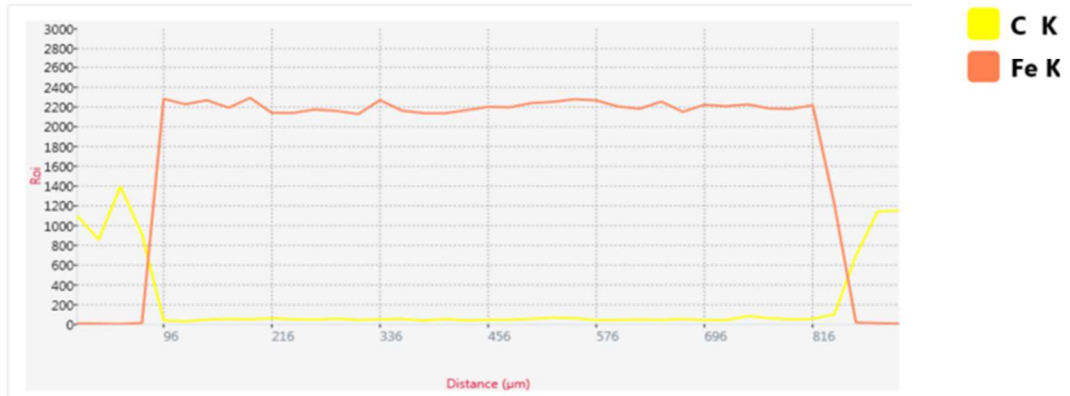
Area 175



Notes:

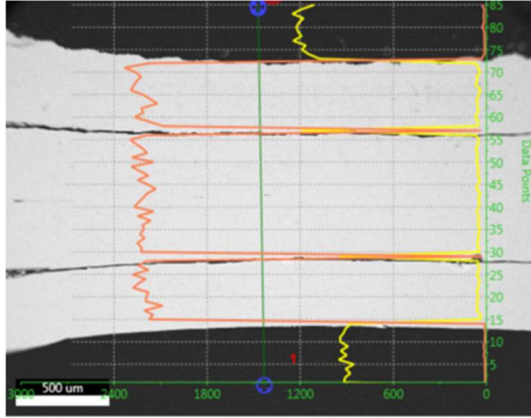
LineScan 1

Element profile plot



Şekil 5. 63. : 25P80 EDS Analizleri

Area 174



Notes:

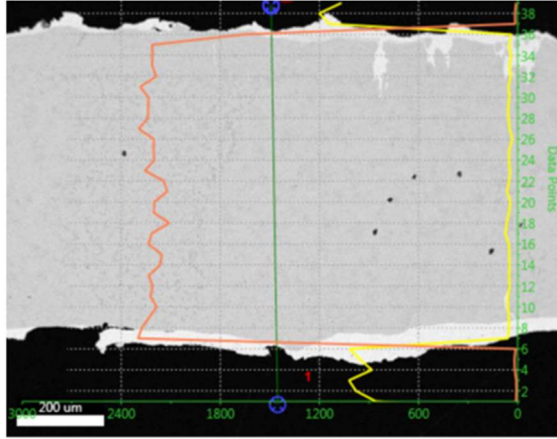
LineScan 1

Element profile plot



Şekil 5. 64. : 30P30 EDS Analizleri

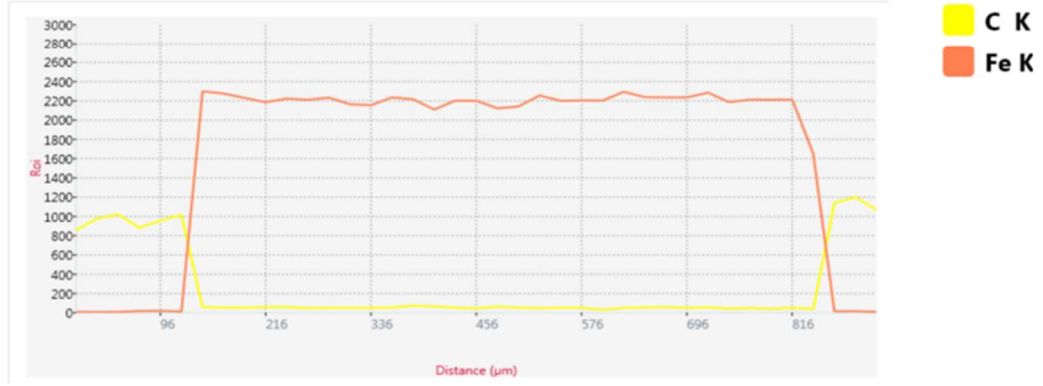
Area 171



Notes:

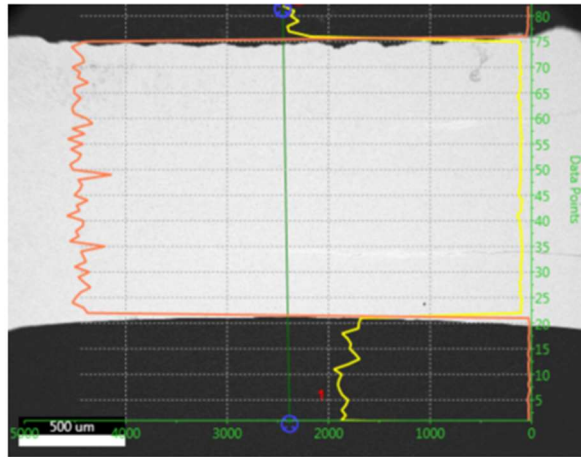
LineScan 1

Element profile plot



Şekil 5. 65. : 35P40 EDS Analizleri

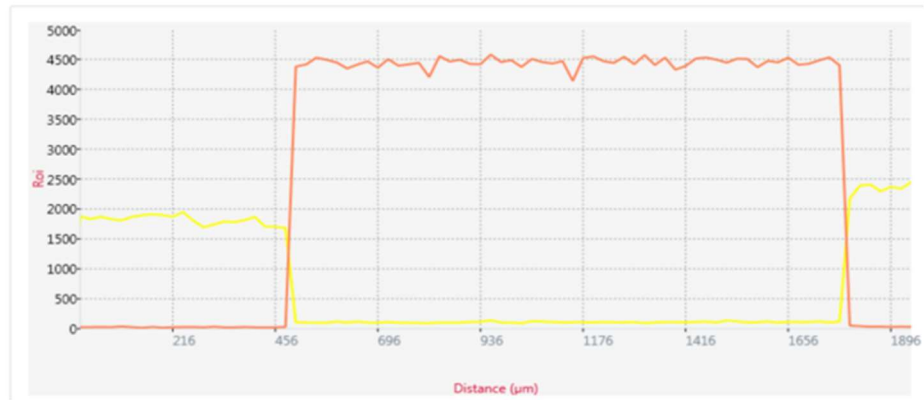
Area 172



Notes:

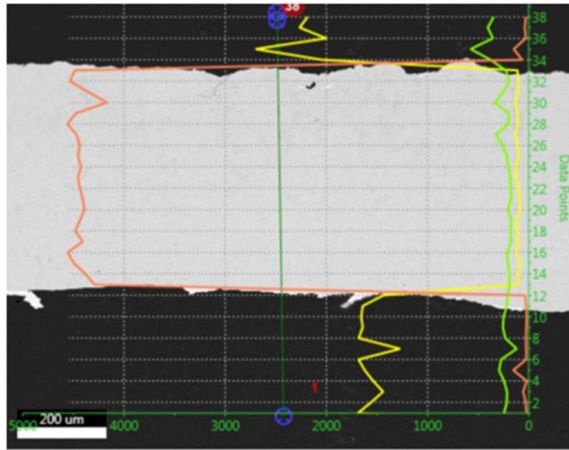
LineScan 1

Element profile plot



Şekil 5. 66. : 35P70 EDS Analizleri

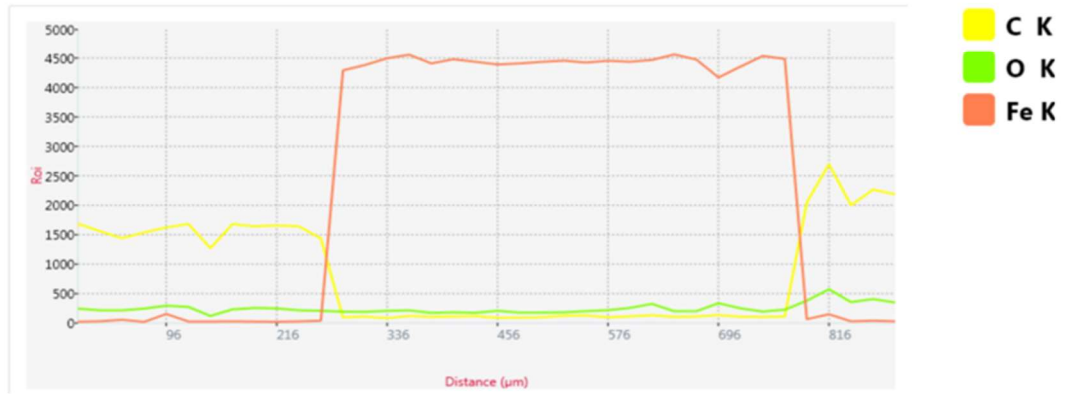
Area 173



Notes:

LineScan 1

Element profile plot

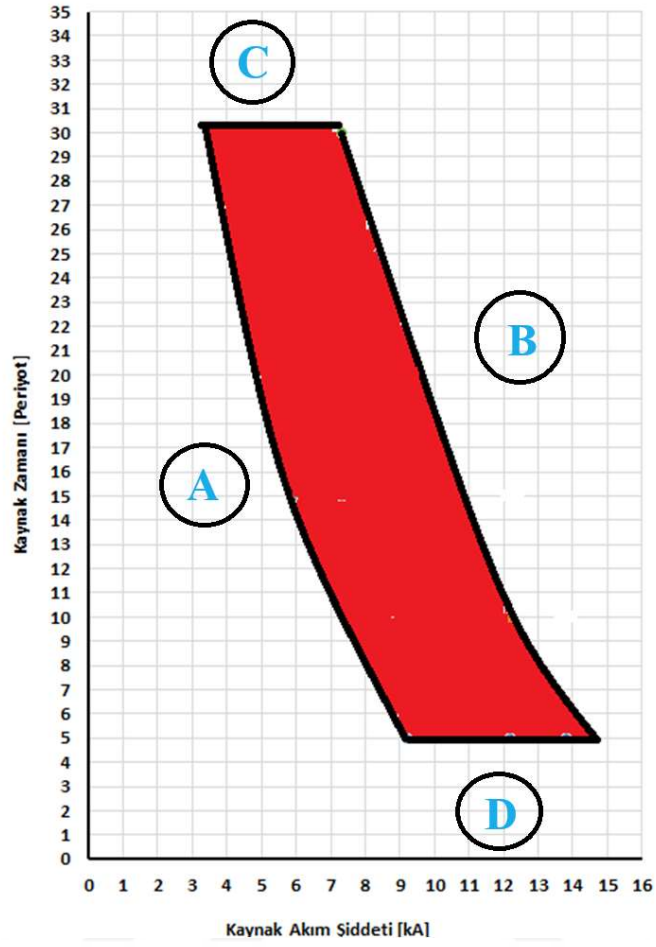


Şekil 5. 67. : 30P70 EDS Analizleri

BÖLÜM 6. ÇOK KATMANLI ÇELİKLERİNİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI BİRLEŞTİRMELERİNİN KAYNAK GRAFİĞİ (WELD LOBE)

Kaynak grafiği, bir başkadeyişle “Weld Lobe” grafiği veya “Kaynak Penceresi” yapılan kontrollü testler ve gözlemler sonucu elde edilen tüm verilerin yardımıyla oluşturulan özet bir grafikdir. Kaynak grafiği kabul edilebilir kaynak parametreleri için optimum aralıkları göstermektedir. Çok katmanlı bondal çeliklerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile yapılan kaynaklı parçalar için yapılan tüm deneylerin ve gözlemlerin çıktıları birleştirilip analiz edilerek oluşturulmuş Kaynak Grafiği (Weld Lobe) Şekil 6.1.’de görülmektedir. Weld lobe grafiği sadece bir aralık bilgisi vermez, aynı zamanda mukavemet ve estetik açısından bir ilişkiyi de gösterir. Kaynak grafiği oluşturulurken mekanik deney sonuçlarına ait çıktıların 80% - 100% aralığı kabul edilerek %20 tolerans verilir, elektrot dalma derinliği için ise %25’e kadar olan miktar ve porozite sonuçlarının ise 15% i kadar olan miktar esas alınır.

Weld Lobe grafiği yorumlanırken kaynaklı birleştirmeden beklenen özelliklere çok dikkat etmek gereklidir. Bazı kaynaklı parçalarda görsellik ve estetik kaygılar mukavemet ve dayanım beklentilerinin önüne geçebilirken, bazı kaynaklı birleştirmelerin kullanıldığı yer ve fonksiyon sebebiyle öne çıkan tek özellik mukavemet ve dayanıklılıktır. Bu duruma binaen Weld Lobe grafiğinin üzerinde A,B,C ve D olmak üzere 4 farklı bölge için yorum yapmak doğru olacaktır. Grafiğin A kısmına doğru giden değerlerde estetik özelliklerin daha fazla geliştiğini , bununla birlikte mukavemet değerlerinin düştüğünü söyleyebiliriz. B kısmı ise yüksek mukavemet beklentilerine cevap verme kabiliyeti daha yüksek bir alanı göstermektedir. Kırmızı ile taralı alan içinde B kısmına doğru yer alan değerler mukavemet özellikleri açısından tercih edilmesi gereken değerlerdir. Grafiğin C ile işaretli yönünde yer alan kaynak parametrelerinde sıçrıntı, fışkıрма ve renk değişikliği görme olasılığımız artmaktadır. D ile işaretli olan bölge ise kaynaklı birleşim yerine yapışma gözlemlenebilecek, kaynaklı bağlantının sağlıklı sağlanamayacağı alanı işaret etmektedir.



Şekil 6. 1. : Çok katmanlı çeliklere ait Kaynak Grafiği (Weld Lobe)

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan değerlendirmeler sonucunda çok katmanlı bondal çeliği için elektrik direnç nokta kaynağında optimum proses parametreleri yapılan deneyler ve analizlerle incelenmiş olup hasar modu tespit edilmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildikten sonra kaynak grafiği (weld lobe) ortaya çıkarılmış ve uygulamacılar için proses parametre seçiminde bir kılavuz niteliğinde bilgiler ortaya koyulmuştur.

7.1. Sonuçlar

Elde edilen bu bulgular değerlendirildiğinde Bondal çok katmanlı çeliğinin elektrik nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilir olduğu tespit edilmiştir. Yapılan denemelerde kaynak akım şiddetinin artması ve kaynak zamanının artması belirli noktaya kadar mekanik özellikleri iyileştirse de belirli değerlerden sonra meydana gelen fişkırmalar, sıçranmalar gibi problemler mekanik özellikleri de düşürmektedir. Kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının birlikte düşük olduğu örneklerde ise mekanik özelliklerin düşmesine ek olarak yapışma gibi kaynak problemleri tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler, mikro yapı incelemeleri, makro yapı incelemeleri, SEM analizleri, sertlik değeri ölçümleri ve EDS analizleri sonucunda elde edilen detay sonuçlar ve bulgular şu şekilde sıralanabilir;

- Akım şiddetinin artırılması sonucunda çekme makaslama dayanımı bir değere kadar artmakta, sonrasında ise belirli bir eşik değerinden sonra düşüş başlamaktadır.
- Kaynak zamanının artması ısı girdisinin artmasına yol açmakta ve bu durum çekme-makaslama dayanımında artışa sebep olmaktadır. Bu noktada en önemli kritik değer fişkırmalar ve sıçramaların başlayacağı yüksek ısı girdilerine malzemeyi çıkartmamaktır. Aksi durumda mekanik değerlerde düşüş görülebilir.
- Kaynak akım süresinin artması çekme-sıyırma dayanımında da çekme-makaslama sonuçlarına benzer çıktılar vermektedir. Belirli bir noktaya kadar

kaynak akım süresi ile artan çekme sıyırma dayanımı belirli noktadan sonra düşmektedir.

- Kaynak akım şiddetinin artmasıyla artan ısı girdisi çapraz çekme dayanımını arttırmaktadır.
- Kaynak akım ve kaynak şiddeti parametrelerinin değişimi çekirdek geometrisinin ölçülerinde de değişikliklere yol açmaktadır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre en yüksek çekirdek çapı 12200 A akım şiddeti ve 35 periyot kaynak zamanında 11.5 mm olarak meydana gelmiştir.
- Çekirdek yüksekliği ile kaynak akım ve kaynak zamanı arasında ters orantı vardır. Kaynak akım ve kaynak zamanı arttıkça çekirdek yüksekliği düşmektedir.
- Kaynak zamanı arttıkça elektrot baskı kuvveti de artmakta ve oluşan elektrot izi daha belirgin olmaktadır.
- Kaynak akımı ve kaynak zamanı arttıkça elektrot genişliği de artmaktadır.
- Çekirdek çapının artmasıyla çekme-makaslama dayanımı da artmaktadır.
- Çekirdek yüksekliği belirli bir değeri aştıktan sonra çekme-makaslama değerinde düşüşe yol açmaktadır.
- Çekirdek çapının artmasıyla çekirdek yüksekliğinde meydana gelen düşüş çapraz-çekme dayanımını da düşürmektedir. Çekirdek boyut oranının artması da çapraz-çekme dayanımını düşürmektedir.
- Uzun kaynak zamanı ve yüksek akım çekirdek boyut oranının düşüşüne sebep olmaktadır.
- Çekirdek yüksekliği ile artan çekme-sıyırma dayanımı belirli bir eşik değerinden sonra düşüşe geçmektedir. Bu düşüşün sebebi oluşan fişkırtma ve aşırı dalma derinliğidir.
- Sertlik değerleri incelendiğinde kritik sertlik seviyesi olan 350HV üzerinde numuneye rastlanmazken, yapıştırıcı polimer tabaka etkisi ile geçiş bölgelerinde sertliğin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Mikroyapı analizleri incelendiğinde çok kaynak akım şiddetinin olduğu numunelerde çatlak ve boşluk gibi kalite problemlerin görüldüğü tespit edilmiştir.

- SEM analizleri dikkate alındığında kaynak çekirdeğine doğru hızlı soğumanın olduğu bölgelerde martenzit yapıda artış görülmüştür.
- EDS analiz sonuçlarına göre çekirdek mukavemetinden düşüşe sebep olacak kırılmalığa etken oluşturacak herhangi bir beklenmedik elemente rastlanmamıştır.

7.2. Öneriler

Yapılan çalışmalar ek bilgi sağlaması ve farklı alanlara ışık tutması için aşağıdaki konular incelenebilir;

- Farklı elektrot kalınlıkları kullanılarak yapılacak deneyler ile oluşabilecek farklı ısı dengeler gözlemlenebilir ve oluşan yeni durumların farklı çıktılarına etkileri incelenebilir. Ayrıca elektrot baskı kuvveti de değiştirilerek performans çıktıları gözden geçirilebilir.
- Numunelerin su, nem gibi dış koşullara maruz kalması durumunda oluşabilecek kalite problemlerini gözlemlemek adına korozyon testleri uygulanabilir.
- Numunelerin ömür performansını değerlendirmek üzere yorulma, burulma veya çentik darbe testi gibi testler yapılarak performans değerleri değerlendirilebilir.
- Adaptif kontrol sistemlerinin veya yüksek frekanslı inventör teknolojisinin uygulandığı yeni teknoloji elektrik direnç nokta kaynağı yöntemleri kullanarak parametrelerin dinamik bir şekilde proses sırasında gelen geri bildirimlerle yönetildiği deneyler yapılarak daha yüksek mukavemetli numuneler elde edilebilir.
- Ön ısıtma işlemine tabi tutulan numuneler hazırlanarak kaynak performansı farklı proses parametreleri ile incelenebilir. Bu yöntem sayesinde daha iyi performansa sahip numuneler elde edilmeye çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Harhash, M., Palkowski, H., & Carradò, A., (2016), Forming potential of low-density laminates. *Proceedings of Euro Hybrid Materials and Structures*, Hausmann, JM, Siebert, M.(eds.). DGM: Stade, 53-60.
- [2] Carradò, A., Faerber, J., Niemeyer, S., Ziegmann, G., & Palkowski, H., (2011), Metal/polymer/metal hybrid systems: Towards potential formability applications. *Composite Structures*, 93 (2), 715-721.
- [3] Liu, L., & Wang, J. (2004). Modeling springback of metal-polymer-metal laminates. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 126 (3), 599-604.
- [4] Mousa, S. (2017). *Roll bonding of metal-polymer-metal sandwich composites* (Ph.D Thesis), Iowa State University, Ames.
- [5] Oh, J., Cho, M., & Kim, J. S., (2005), Dynamic analysis of composite plate with multiple delaminations based on higher-order zigzag theory. *International Journal of Solids and Structures*, 42 (23), 6122-6140.
- [6] Palkowski, H., Sokolova, O. A., & Carradò, A., (2014), *Sandwich materials*. Encyclopedia of automotive engineering, 1-17.
- [7] Yılmaz, İ., (2020), *Galvaniz kaplamalı düşük karbonlu çelik plakalarda titreşim sönümleme malzemesi kullanılarak sönümün yapısal kaynaklı gürültüye etkisinin araştırılması*, (Doktora Tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [8] Oh, K., Lee, S., Jeong, J., Cho, S., & Kim, J., (2005), Properties of Mechanical Joint by Carbon Fiber/Epoxy Sandwich Composite Panels, *In Proceedings of the Korean Society For Composite Materials Conference* (pp. 121-124). *The Korean Society for Composite Materials*.
- [9] Liu, L., & Wang, J., (2004), Modeling springback of metal-polymer-metal laminates. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 126(3), 599-604.
- [10] Engel, B., & Buhl, J., (2011, August), Roll Forming of Vibration-Damping Composite Sheets. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1383, No. 1, pp. 733-741). American Institute of Physics.

- [11] Roque, C. M., & Thomson, O. T., (2006), Modelling of composite and sandwich plates by a trigonometric layerwise theory and multiquadrics. *Sandwich structures*, 7, 231-240.
- [12] Palkowski, H., & Lange, G., (2007), Creation of tailored high-strength, hybrid sandwich structures. *Advanced Materials Research*, 22, 27-36.
- [13] Palkowski, H., & Lange, G., (2008), Production of tailored high strength hybrid sandwich structures. *Steel research international*, 79(3), 178-185.
- [14] Sokolova, O. A., Carradó, A., & Palkowski, H., (2011), Metal-polymer-metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending. *Composite Structures*, 94 (1), 1-7.
- [15] Sokolova, O., Carrado, A., & Palkowski, H., (2011), Adhesion and formability of thin steel/polymer/steel hybrid sandwich composites. In *The 10th international conference on technology of plasticity*, ICTP.
- [16] Sokolova, O., Carradó, A., & Palkowski, H., (2010), Production of customized high-strength hybrid sandwich structures. *Advanced materials research*, 137, 81-128.
- [17] Harhash, M., Carrado, A., & Palkowski, H. (2016, April). Deep-and stretch-forming of steel/polymer/steel laminates. In *2. International Conference. "Euro Hybrid Materials & Structures"*, Hausmann, J., Siebert, M.(eds.) (pp. 69-74).
- [18] Pull Nautic Bondal Steel Product Specifications. (2014). *Bondal® Steel properties*. <http://www.pullnautic.com/pdf/productblad-Bondal-Steel-web.pdf>
- [19] Esendir, E., (2009), *Farklı metallerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] Campbell, F. C. (Ed.). (2011). *Joining: understanding the basics*. ASM International.
- [21] Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- [22] Lui, A., (2012), *Development of an Ultrasonic Linear Phased Array System for RealTime Quality Monitoring of Resistance Spot Welds*, (Ph.D Thesis), University of Windsor, Ontario, Canada.
- [23] Anık, S., (1991), *Kaynak Tekniği El Kitabı*, Gedik Eğitim Vakfı.
- [24] Elitaş, M., (2018), *Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen ileri dayanımlı otomotiv sac çeliklerinin yorulma davranışlarının incelenmesi*, (Doktora Tezi), Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- [25] Aydın, K. (2023), *Otomotiv Sektöründe Kullanılan Yeni Nesil Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Direnç Nokta Kaynağı Uygulamaları Ve Kaynak Bölgesi Karakterizasyonu*, (Doktora Tezi), Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [26] Miller, C. C. E., (2008)., *The Joining of Advanced High Strength Steels using Resistance Spot Welding*, (Ph.D Thesis), Swansea University, Swansea.
- [27] Aslanlar, S., Ogur, A., Ozsarac, U., İlhan, E., & Demir, Z., (2007), Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding, *Materials & Design*, 28(1), 2-7.
- [28] Aydın, M., & Gülenç, B., (2003), Elektro ve sıcak daldırma metodlarıyla galvaniz kaplanmış çelik sacların paslanmaz çeliğe direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliği. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1), 179-187.
- [29] Ertek Emre, H., & Kaçar, R., (2016), Resistance spot weldability of galvanize coated and uncoated TRIP steels. *Metals*, 6 (12), 299.
- [30] Wan, X., Wang, Y., & Zhang, P., (2014), Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2723-2729.
- [31] Aydın, K., Hidiroglu, M., & Kahraman, N., (2022), Characterization of the Welding Zone of Automotive Sheets of Different Thickness (DP600 and DP800) Joined by Resistance Spot Welding. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(5), 1279-1291.
- [32] Çalışoğlu, İ., (2009), *Ticari Olarak Temin Edilen ve %10 Soğuk Deforme Edilen Erdemir 7660 Kalite Dual Fazlı Çeliğin Nokta Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [33] Ferik, E., (2019), *TWIP-DP Yeni Nesil Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Hasar Modunun Belirlenmesi*, (Doktora Tezi), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- [34] Ertek Emre, H., (2016), *TRIP800 Çeliğinin Nokta Direnç Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması*, (Doktora Tezi), Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [35] Kaya, Y., (2010), *Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı İle Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [36] Kahraman, N. and Gülenç, B., (2020), *Modern Kaynak Teknolojisi*, Epa-Mat Basımevi, Ankara, 160–184

- [37] Zhang, Y. S., Zhang, X. Y., Lai, X. M., and Chen, G. L., (2007), Online quality inspection of resistance spot welded joint based on electrode indentation using servo gun, *Science And Technology Of Welding And Joining*, 12(5):449–454.
- [38] Muhammad, N., Manurung, Y. H. P., Hafidzi, M., Abas, S. K., Tham, G., and Haruman, E., (2012), Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM, *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 26 (8), 2365–2370
- [39] Aslanlar, S., (2006), The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry, *Materials & Design*, 27 (2): 125–131.
- [40] Xing, B., (2018), *Monitoring and characterization of abnormal process conditions in resistance spot welding*, (Ph.D Thesis), Australian National University, Canberra.
- [41] Zhang, X. Q., Chen, G. L., and Zhang, Y. S., (2008), Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels, *Materials & Design*, 29(1):279–283.
- [42] Emre, H. E. and Kaçar, R., (2016), Development of weld lobe for resistance spotwelded TRIP800 steel and evaluation of fracture mode of its weldment, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (9–12):1737–1747.
- [43] Zhang, X., Chen, G., Zhang, Y., and Lai, X., (2009), Improvement of resistance spot weldability for dual-phase (DP600) steels using servo gun, *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (5): 2671–2675.
- [44] Hayat, F., (2005), *Çift-Fazlı Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağında MHO ile Kaynak Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi*, (Yüksek Lisans Tezi), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1-86.
- [45] Xinmin, L., Xiaoyun, Z., Yansong, Z., and Guanlong, C., (2007), Weld Quality Inspection Based on Online Measured Indentation From Servo Encoder in Resistance Spot Welding, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 56 (4): 1501–1505.
- [46] Zhang, H., & Senkara, J. (2011). *Resistance welding: fundamentals and applications*. CRC press.
- [47] Blondeau, R. (2001). *Metallurgy and mechanics of welding*, Lavoisier, Istec Ltd.
- [48] AWS D8 Committee on Automotive Welding, (1997), *Recommended practices for test methods and evaluation the resistance spot welding behavior of automotive sheet steels*, American Welding Society.

- [49] Anık, S., Gülbahar, B., (1989). %17 kromlu ferritik paslanmaz nokta kaynağında çekmemakaslama kuvveti ile çekirdek boyutları arasındaki ilişki, *II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı*, 94-105.
- [50] Ferik, E. (2017). *Triç 800 Çeliklerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [51] AWS D8 Committee on Automotive Welding, (2005), *Recommended practices for automotive weld quality – resistance spot welding*, American Welding Society.
- [52] Miller, K. W., (2000), *Impact strength and failure mechanisms of spot welds in automotive materials*. (Doktora Tezi), University of South Carolina, Columbia.
- [53] TSE & ISO (2001). *Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds*. 14273.
- [54] Thyssenkrupp Bondal CL Product Information for steel sandwich material with a viscoelastic polymer core layer. (2020). *Product information bondal® CL*. https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/produktinformationen/bondal/thyssenkrupp_bondal_cl_product_information_steel_en.pdf
- [55] Fidaner, O., Kurtulmuş, M., Yükler, A. İ., (2010), Galvanize Çeliklerin Nokta Kaynağında Elektrodların Deformasyonu, *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, 202–210.
- [56] Defourny, J., Leroy, V., (1989), Compared Possibilities and Limitations of resistance Spot Welding and Adhesive Bonding for Structural Joints in Coated Steel Sheets, *DVS*, 124, 26–31.
- [57] EN ISO 14270. (n.d.). Retrieved November 27, 2019, from <https://www.sis.se/api/document/preview/920216/>
- [58] EN ISO 14272. (n.d.). Retrieved November 27, 2019, from <https://www.sis.se/api/document/preview/920217/>
- [59] EN ISO 14273. (n.d.). Retrieved November 27, 2019, from <https://www.sis.se/api/document/preview/8019745/>
- [60] Sawhill Jr, J. M., Watanabe, H., & Mitchell, J. W., (1977), Spot Weldability of Mn-Mo-Nb, V-N and SAE 1008 Steels. *Welding Journal*, 56(7), 217.
- [61] Özen, F., (2020), *Martenzitik Yapılı Çelikler İle Triç Yapılı Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi*, (Doktora Tezi), SUBÜ, Sakarya.

- [62] Kekik, M., (2021), *Yeni Nesil Araçlarda Kullanılan Dp1000hf-Cp800 Çelik Sacların Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Hasar Modunun Tespiti*, (Doktora Tezi), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- [63] Hamada, A. S., & Karjalainen, L. P., (2011), Hot ductility behaviour of high-Mn TWIP steels, *Materials Science and Engineering A*. 528 (3), 1819–1827. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.030>
- [64] Madivala, M., Schwedt, A., Prahl, U., & Bleck, W., (2019), Anisotropy and strain rate effects on the failure behavior of TWIP steel: A multiscale experimental study, *International Journal of Plasticity*. 115, 178–199. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.11>
- [65] Akkaş, N., İlhan, E., Aslanlar, S., Varol, F., (2014), Welding Time Effect on Mechanical Properties in Resistance Spot Welding of SPA-C Steel Sheets Used in Rail Vehicles, *7th Automotive Technologies Congress (OTEKON 2014)*, Bursa, May 26 – 27, 2014.
- [66] Sawhill, J. M., Watanabe, H., Mitchell, J. W., (1977), Spot Weldability of Mn-Mo-Cb, V-N, and SAE 1008 Steels, *AWS Welding Research Supplement*, July 1977:217-224.
- [67] S. Aktas, U. Ozsarac, and S. Aslanlar, (2012), Effect of spot welding parameters on tensile properties of DP 600 steel sheet joints, *Mater. Manuf. Process.*, vol. 27, no. 7, pp. 756–764, doi: 10.1080/10426914.2011.647940.
- [68] V. Onar and S. Aslanlar, (2017), Welding time effect of welding joints in micro alloyed and TRIP 800 steels in resistance spot welding, *Acta Phys. Pol. A*, vol. 131, no. 3, pp. 389–391, doi: 10.12693/APhysPolA.131.389.
- [69] Kaluç, E., (1988), *Ferritik-Ostenitik paslanmaz çelik çiftinin nokta kaynağında kaynak parametrelerinin çekme-makaslama mukavemetine ve taneler arası korozyona etkisi*, (Doktora Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [70] Aslanlar, S., (1999), *Galvanizli kromatlı mikro alaşımlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında uygun hasar modunun tespiti*, (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [71] Aslanlar, S., Oğur, A., Özaraç, U., İlhan, E., Demir, Z., (2007), Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding, *Materials and Design*, 28: 2–7, 2007.
- [72] Pollard, B., (1974), Spot welding characteristics of HSLA steel for automotive applications. *Welding Journal*, 53(8), 343.

- [73] Onar, V., (2017), *Trip çelikler ile mikroalaşımli çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında birleştirilebilirliğinin incelenmesi*, (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [74] Kekik, M., (2018), 1200m-Dp800hf Saclarının Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesinde Hasar Modunun Tespiti, *(Yüksek Lisans Tezi)*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [75] NIETO, J., GUERRERO-MATA, M.P., COLAS, R., MANİ, A., (2006), Experimental investigation on resistance spot welding of galvanized HSLA steel, *Science and Technology of Welding and Joining, Volume 11, No 6*: 717-722.
- [76] Akkaş, N., Varol, F., Ferik, E., İlhan, E., Özaraç, U., Aslanlar, S., (2014), Effect of Welding Current on Mechanical Properties of Welding Joints in S235Jr(Cu) Steel Sheets in Resistance Spot Welding, *Acta Physica Polonica A, Volume 125, No 2*: 500-502.
- [77] ASLANLAR, S., (1999), Galvanizli kromatli mikro alaşımlı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağında uygun hasar modunun tespiti, *(Doktora Tezi)*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [78] ASLANLAR, S., (2006), The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry, *Materials and Design 27*:125–131.
- [79] Akkaş, N., İlhan, E., Aslanlar, S., Varol, F., (2014), The Effect of Nugget Sizes on Mechanical Properties in Resistance Spot Welding of SPA-C Steel Sheets Used in Rail Vehicles, *Materials Testing, Volume 56, No 10*: 879-883.