T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PROJEKSİYON KAYNAĞINDA FIŞKIRMA VE ÇAPAKLANMA DÜZEYİ İÇİN BİR SAYISAL GÖSTERGENİN ARAŞTIRILMASI VE KAYNAK PARAMETRELERİ İLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

FATİH ATEŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2016

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PROJEKSİYON KAYNAĞINDA FIŞKIRMA VE ÇAPAKLANMA DÜZEYİ İÇİN BİR SAYISAL GÖSTERGENİN ARAŞTIRILMASI VE KAYNAK PARAMETRELERİ İLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

FATİH ATEŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. HASAN KURTARAN

GEBZE
2016

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

INVESTIGATION OF A NUMERICAL INDICATOR OF SPLASHING AND BURR LEVEL ON PROJECTION WELDING AND ITS VARIANCE WITH WELDING PARAMETERS

FATİH ATES

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. HASAN KURTARAN

GEBZE

2016

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/06/2016 tarih ve 2016/43 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/06/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fatih ATEŞ' in tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Hasan KURTARAN

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Fazıl SERİNCAN

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Sedat SÜSLER

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Tezin ilk bölümünde, üretimin ve kalite anlayışının hızla yükseldiği günümüzde özellikle otomotiv ve beyaz eşya sektöründe kullanılan birleştirme yöntemlerinden biri olan elektrik direnç kaynağı hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Elektrik direnç kaynağının temel prensipleri ortaya konmuş, elektrik direnç kaynağını etkileyen unsurlar tek tek açıklanmıştır.

Bir sonraki bölümde elektrik direnç kaynağının çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümde teze konu olan kabartı veya diğer tabirle projeksiyon kaynağı hakkında temel seviyede bilgi verilmiş olup, daha sonraki bölümde bütün unsurlarıyla ele alınmıştır.

Kabartı/Projeksiyon kaynağı sırasında oluşan çapak ve fışkırma problemi tanımlandıktan sonra literatür ve literatürdeki uygulamalar derlenmiştir. Problemin çözümüne yönelik yapılacak deneylerde kullanılacak malzeme, makine ve izlenecek metot ve yaklaşımlar detaylandırıldıktan sonra deney çalışmalarına geçilmiştir.

Çapaklanma ve fışkırmayı sayısallaştıracak bir metodoloji gelişmek üzere iki grup deney düzenlenmiştir. Grup-1 deneylerde çapaklanma ve fışkırmayı sayısallaştıracak bir metodoloji geliştirilmiştir. Grup-2 deneyleri de geliştirilen metodolojinin doğrulanması için düzenlenmiştir.

Tezin son bölümünde deney gruplarından elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Çapaklanma ve fışkırmanın birlikte ele alınması gerekliliğini öne sürülen tezde, her iki grubun çapaklanma ve fışkırma bileşik endekslerinin kaynak parametreleriyle olan bağıntıları arasında ortaya çıkan yüksek seviyede örtüşmeyle, geliştirilen metodolojinin doğruluğu ve tekrarlanabilirliği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Direnç Kaynağı, Kabartı, Projeksiyon, Çapaklanma Ve Fışkırma Endeksi.

SUMMARY

Production mass and quality level rapidly increased in recent days, detailed information about resistance welding which is one of the joint methods by using automotive and white goods manufacturers is explored in the first section. Fundamentals of electrical resistance welding is introduced, effects on electrical resistance welding is clarified.

Next section, information about the kinds of electric resistance welding is given. In this section, There is basic information is given about resistance projection welding the subject of the thesis, in other section this topic is explained with all elements.

During resistance projection welding, occurred the problem burr and splashing is defined, then literature and applications on literature is compiled. After using material, machine as well as methods and approaches to be followed are detailed, proceed to section of experimental works.

Two experimental works' group is designed for developing a methodology to quantify burring and splashing. Methodology is developed to quantify burring and splashing in Group-1 experimental works. Group-2 experimental works is designed for validation of developed methodology.

Last section of the thesis, the results obtained from groups is scrutinized. On the thesis recommended necessity of discussing burring and splashing together, relationship of two groups' burring and splashing combined index between welding parameters is found so closed. As a result, accuracy and repeatability of developed methodology is showed by that.

Key Words: Electrical Resistance Welding, Embossment, Projection, Burring, Splashing Index.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında katkıda bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan KURTARAN'a, 3130849 no.lu Teydeb projesine destek sunan TÜBİTAK'a, destek ve yardımlarından dolayı Sayın Dr. Cemil Günhan ERHUY'a ve ERMETAL A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmam süresince desteği hiçbir zaman esirgemeyen eşime ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI	2
2.1. Elektrik Direnç Kaynağı Prensibi ve Özellikleri	2
2.2. Elektrik Direnç Kaynağında Çevrim Zamanları	4
2.2.1. Yaklaşma zamanı	4
2.2.2. Sıkma Zamanı	5
2.2.3. Kaynak Zamanı	5
2.2.4. Tutma Zamanı	5
2.2.5. Uzaklaşma Zamanı	6
2.2.6. Bekleme Zamanı	6
2.3. Isı Oluşumu	6
2.4. Elektrik Direnç Kaynağına Etki Eden Başlıca Değişkenler	10
2.4.1. Akım	11
2.4.2. Kaynak Süresi	14
2.4.3. Elektrot ve Elektrot Kuvveti	18
2.4.4. Yüzey Durumu	20
2.4.5. Malzeme	21
2.4.6. Kaynak Makinesi	23
3. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAK ÇEŞİTLERİ	25
3.1. Nokta Direnç Kaynağı	25
3.1.1. Nokta kaynağı Usulleri	27

3.1.2. Nokta Kaynağı İşleminin Esasları 30
3.1.3. Kabartılı Direnç Kaynağı 32
3.1.4. Direnç Dikiş Kaynağı 33
3.1.5. Basınçlı Alın Kaynağı 38
3.1.6. Yakma Alın Kaynağı 39
4. PROBLEMİN TANIMLANMASI VE YÖNTEM GELİŞTİRME 41
4.1. Kabartılı/Projeksiyon Direnç Kaynağı Üzerine Detaylı İnceleme 42
4.2. Kabartı Direnç Kaynağının Özellikleri 43
4.3. Kabartının Deformasyonu (Yeniden Düzleşmesi) 43
4.4. Dayanım 43
4.5. Parametreler 44
4.5.1. Elektrot Kuvveti 45
4.5.2. Kaynak Akımı 45
4.5.3. Akım Süresi 45
4.6. Kabartı Kaynağında Görülen Kabartı Çeşitleri 45
4.6.1. Metal Saclarda Oluşturulan Kabartılar 46
4.6.2. Doğal olmayan Kabartılar 47
4.6.3. Doğal Kabartılar 49
4.6.4. Kaynak Makinaları 49
4.7. Literatür Taraması 50
4.7.1. Yapılan Araştırmalara Literatürden Örnekler 55
4.8. Metot 74
4.9. Makine ve Malzeme 77
5. DENEY ÇALIŞMALARI 79
5.1. Grup-1 Deneyleri 79
5.2. Fışkırma Yoğunluğu ve Çapak Ölçme/Değerlendirme Metodolojisinin Oluşturulması 80
5.3. Grup-2 Deneyleri 87
6. SONUÇLAR 95

KAYNAKLAR 97
ÖZGEÇMİŞ 101

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
Δm	:	Kütle Farkı
λ	:	Üçgen Tip Çapak Alan Katsayısı
ξ	:	Dentrit Tip Çapak Alan Katsayısı
φ	:	Dikdörtgen Tip Çapak Alan Katsayısı
Ψ	:	Sarkıt Tip Çapak Alan Katsayısı
b	:	Çapak Taban Genişliği
C	:	Karbon
C_{den}	:	Dentrit Çapak Seviyesi
C_{drg}	:	Dikdörtgen Çapak Seviyesi
C_{srk}	:	Sarkıt Çapak Seviyesi
$C_{üçg}$	:	Üçgen Çapak Seviyesi
Dc	:	Difüzyon Bağlantı Çapı
de	:	Elektrot Çapı
De	:	Batma Çapı
dn, d	:	Kaynak Noktası Çapı
e	:	Levha Kalınlığı
E	:	Çapaklanma ve Fışkırma Bileşik Endeksi
$E_{ÇPK}$	:	Çapaklanma Endeksi
$E_{FŞK}$	:	Fışkırma Endeksi
F	:	Kuvvet
H	:	Batma Derinliği
h	:	Çapak Yüksekliği
ITAP	:	Isı Tesiri Altında
i	:	Kaynak Akımı
k	:	Levha kalınlığı
L	:	Şerit Genişliği
LuG255	:	Luminosity (Gri) Endeksi-255
m0	:	Kaynak Öncesi Ağırlık
m1	:	Kaynak Sonrası Ağırlık

Ø	:	Çap
Q	:	Isı
R	:	Toplam Direnç
R1, R7	:	Elektrot Malzeme Direnci
R2, R5	:	Elektrotla İş Parçası Arasındaki Temas Direnci
R3, R5	:	İş Parçası Malzeme Direnci
R4	:	İş parçaları arasındaki temas Direnci
s	:	Saniye
T	:	Kaynak Çekirdek Yüksekliği
t, tç, s	:	Kaynak Süresi
X	:	Saclar Arası Boşluk

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa:
2.1:	Nokta Kaynak Makinesi Temel Bileşenleri ve Kaynak Bölgesi.	2
2.2:	Akım Zamanının Hemen Sonrasında Oluşan Kaynak Havuzu Kesit Görünüşü.	3
2.3:	Kaynak Çevrim Diyagramı.	4
2.4:	Tek Puls için Kaynak Çevrimi.	5
2.5:	Sıkma Zamanında Görülen Dirençle.	7
2.6:	Yüzey Pürüzlülük Durumları.	8
2.7:	Sarkıt-Dikitler.	8
2.8:	İş Parçaları Arasındaki Kaynak Temas Yüzeyleri.	9
2.9:	Kaynak Zamanındaki Dirençlerin Değişim Durumları.	10
2.10:	Kaynak Sınır Diyagram Şeması.	12
2.11:	Kaynak Ara Yüzeyinde Meydana Gelen Fışkırma.	13
2.12:	Kaynak Sırasında Kaynak Akımının Çekirdek Çapı, Çekme-Makaslama Dayanımı ve Elektrot Dalma Derinliği Üzerindeki Etkileri.	14
2.13:	Kaynak Kabiliyeti Diyagramı.	15
2.14:	Nokta Direnç Kaynağı Kesiti.	16
2.15:	Çekme Kuvveti ile Zaman Arasındaki İlişki.	17
2.16:	a)Kaynak Süresi-Çekme-Koparma Testi Grafiği, b)Kaynak Süresi-Sıyırma Testi Grafiği.	17
2.17:	İki Yüzey Arasındaki Temas Direnci Değerinin Değişimi.	19
2.18:	Elektrot Tipleri.	20
2.19:	Elektrot Ucu Bakımı.	21
2.20:	Kaynak Akım Tipleri.	23
2.21:	Soğumaya Bağlı Elektrot Isısının Değişimi.	24
3.1:	Nokta Kaynağında Dirençler ve Sıcaklık Gradyanı.	26
3.2:	Kaynak Programları.	27
3.3:	Tek Noktalı Direkt Kaynak için Çeşitli Düzenlemeler.	28

3.4: Çok Noktalı Direkt ve Seri Kaynak için Çeşitli Düzenlemeler. 29
3.5: Nokta Direnç Kaynağında Isı Dağılımı. 30
3.6: Nokta ve Kabartı Direnç Kaynaklarının Karşılaştırması. 31
3.7: Kabartılı Nokta Kaynak Makinesi ve Kaynak Bölgesi Detayı. 32
3.8: Elektrik Direnç Dikiş Kaynağı Uygulamaları. 33
3.9: a) Alın Dikişi, b) Bindirme Dikiş, c) Kısa Bindirmeli Dikiş, d) Çapraz Alın Dikişi, e) Folyo İlaveli Alın Dikişi, f) Tel İlaveli Alın Dikiş. 37
3.10: Basınçlı Alın Kaynağı Makinesinin Prensibi ve Akım Yoğunluğu ile Kuvvetin Zamanla Değişimi. 38
3.11: Yakma Alın Kaynağı Safhaları ve Kaynak Parametrelerinin Zamanla Değişimi. 39
3.12: Yakmanın safhaları. a) Hareketli Tablanın İlk Hamlesi, b) İki Pürüzün Teması, c) Fışkırma Ve Krater Oluşumu, d) Yeni Kraterlerin Teması, e) Yeni Kraterlerin Oluşumu, f) Yanmanın Bütün Kesite Yayılması. 40
4.1: Kabartı Kaynağında Kısmi Dirençler. 42
4.2: Çoklu Kabartı Kaynağının Şematik Görünüşü ve Prensip Şeması. 43
4.3: Kabartı Direnç Kaynağında Kaynak Çekirdeğinin Oluşumu. 44
4.4: Sac Çelikler İçin Dairesel Kabartı Ebatları ve Kalıp Ölçüleri. 46
4.5: Sac Çelikler İçin Uzun Kabartı Ebatları ve Kalıp Ölçüleri. 47
4.6: Sac Çelikler İçin Halka Kabartı Ebatları ve Kalıp Ölçüleri. 47
4.7: Kaynak Bağlantı Elemanları. 48
4.8: Talaşlı İmalat ile Üretilen Kabartı Örnekleri. 49
4.9: Darbe ile Kabartı Oluşturma. 49
4.10: Doğal Kabartılara Örnek. 50
4.11: a) C-Çerçeve Presinde Kuvvet Dağılımı, b)Yandan Görünüş AC Akım dağılımı, c)Önden Görünüş AC Akım Dağılımı. 50
4.12: Projeksiyon Kaynağı ile Cıvata–Sac Parça Birleştirmesi. 51
4.13: Temas Direncinin Elektrot Basıncı ve Sıcaklık ile Dinamik Etkileşimi. 53
4.14: a) Projeksiyon Yükseklikleri, b) Kaynak Parametreleri, c) Kaynak

İşleminde Projeksiyon Yüksekliğinin İkinci Kaynak Çevrimi Sonrasındaki Sıcaklık Dağılımına Etkisi. 57
4.15: Nokta Direnç Kaynağında Çekirdek Çapının Çeşitli Parametrelerle Değişimi ve Etkin Kaynak Bölgesi. 58
4.16: Nokta Direnç Kaynağında Dinamik Direnç, Kaynak Kuvveti ve Elektrot Göstergelerinde Fışkırma Anında Saptanan Değişimler. 59
4.17: Endirekt Nokta Direnç Kaynak İşleminin Şematik Gösterimi. b) Endirekt Katlamalı Projeksiyon Kaynak İşleminin SORPAS Yazılımı ile Modellenmesi ve Kabartıların Boyutları. 60
4.18: TİP-C Kabartı Boyutları ve Düşük a), Orta b) ve Yüksek c) Elektrot Kuvvetleri Altında Gerçekleştirilen Endirekt Projeksiyon Kaynak İşlemlerinin Sonlu Eleman Analizlerinden. 60
4.19: a) 14 kA Akımda Tek Kaynak Sonrası Elektrot Ucu Çifti, b) Deforme Olmuş Elektrot Ucu Çifti c) Yeni ve 1995 Kaynak Sonrası Elektrot Ucu SEM Görüntüleri, d) Galvanizli Sacda Nokta Direnç Kaynağı Sonrası Oluşan Pirinç. 61
4.20: Nokta Direnç Kaynağı Elektrot Başlığı Ucunun Kantitatif X-Işını Analizi. 62
4.21: Kalınlığı 8 mm Olan Kaplamalı Sacın 3 Bar'lık Elektrot Basıncıyla Nokta Direnç Kaynağında Elektrot Ucu Aşınmaya Başladıkça Gereken Minimum Akım Değerleri. 63
4.22: SORPAS Yazılımının Fışkırma Öngörüleri. a) Saclar Arası, b) Elektrot Sac Arası. 64
4.23: SORPAS Yazılımı ile Öngörülen Kaynak Büyüme Eğrilerinin Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması. 64
4.24: HPM6 ve HPM8 Tipi Kaynak Somunları. 65
4.25: Tolf ve Hedegard Tarafından Gerçekleştirilen Kabartı Kaynaklarının Simülasyon Karşılaştırmaları. 65
4.26: Tolf ve Hedegard tarafından Yapılan Çalışmada DP600 Çelik Sac ile Somun Kaynağında. 66

4.27: HyTens 1000 Çeliği ile HPM8 Somununun Projeksiyon Kaynağında SORPAS Simülasyon Çıktısı ile Tolf ve Hedegard Tarafından Yapılan Kaynağın Yapısının Karşılaştırması Ve Fışkırma Öngörüsü Çapak Oluşumu Uyumsuzluğu. 67
4.28: Somun-Sac Projeksiyon Çekme-Koparma Testinden Sonra Oluşan Hasar Tipleri. 67
4.29: Taramalı Akustik Mikroskobu Görüntüleri. 68
4.30: Karbon Taramaları. 68
4.31: RSWA Göstergelerinin Montajı ile Elde Edilen Somun Kaynağının Karbon Taramaları. 68
4.32: Sayısal Model, Projeksiyon Ölçüleri. 69
4.33: Elektrot Hareket Profili Değişimiyle ilişkili Kaynak Optimizasyon Diyagramı. 69
4.34: Delik Elektrot Ucu. a) Ön Bakış, b) Üst Bakış, c) Resim. 70
4.35: Kaynak Çekirdek Kesit Resimleri. 71
4.36: Kaynak Edilebilirlik Diyagramı. a)Klasik Elektrot Ucu, b)Önerilen Delikli Elektrot Ucu. 72
4.37: Deneysel ve Eşitlik Sonuçlarının Karşılaştırılması. 74
4.38: Kabartı/Projeksiyon Direnç Kaynağında Fışkırma ve Çapak Oluşumu. 75
4.39: Kaynak Sonrası Çapak Oluşmuş Cıvata Örnekleri. 76
4.40: Muz/Yay Tipinde Üçgen Kesite Sahip Üç Adet Kabartıya Sahip M8 Norm Cıvata Üretimi Kaynak Cıvatası. 77
4.41: a) Sac Plakalara Ø 9 mm'lik Delik Açma Amacıyla İmal Edilen Delme Kalıbı, b) İki Yüzeyi Galvaniz Kaplı 1,50 mm'lik Kalınlıkta DP600 Çeliğinden Sac Plakalar. 77
4.42: Deneyler Sırasında Kullanılan Elektrot Grubu. 78
4.43: Deneylerde Kullanılan Coşkunöz Yapımı Maksima CPP 180Kva Kaynak Makinesi. 78
5.1: Kütle Eksilmesi ile Kaynak Parlaması arasındaki ilişki. 81
5.2: Çapakların Sınıflandırması 82

5.3: Ölçülebilen Çapak Tiplerine Örnekler 82
5.4: Çapak Tipleri ve Ölçümleri 82
5.5: Grup-1'de Birim Direnç için Teorik Olarak Hesaplanan Enerji ile a) Çapaklanma Endeksi Arasında Saptanan Bağıntı, b)Toplam Çapak Sayısı Arasında Saptanan Bağıntı. 86
5.6: Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Birim Direnç için Teorik Olarak Hesaplanan Enerji ile Fışkırma ve Çapaklanma (Bileşik) Endeksi Arasında Saptanan Bağıntı. 87
5.7: Grup-2'de Yürütülen 25 Adet Projeksiyon Kaynağında Fışkırmaya Bağlı Parlamanın En Fazla Olduğu Karelerde Belirlenen Luminosity (Gri) Endeksi-255 Parlaklık Artımları. 88
5.8: Grup-2'de Kütle Kayıp Miktarlarıyla Maksimum Parlaklık Artımı Arasında Bağıntı. 89
5.9: Grup-2 Deneylerinde a) Ölçülen Akım Değerleriyle Fışkırma Endeksinin, b)Birim Direnç Başına Enerjiyle ile Fışkırma Endeksinin İlişki Grafiği. 91
5.10: Akım ve Birim Direnç Başına Enerji Miktarıyla a) Çapaklanma Endeksi, b) Bileşik Endeks ve b) Toplam Çapak Sayısı Arasındaki Bağıntı Grafikleri. 94
6.1: Fışkırma ve Çapaklanma Düzeyine Yönelik Tanımlanan ve Önerilen Göstergelere Dair Grup-1 ve Grup-2'den Elde Edilen Bağıntıların Karşılaştırılması. 95

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa:
2.1:	Kaynak Parametreleri.	11
2.2:	RMWA-A Grubu Bakır Sınıfları.	22
3.1:	Dikiş Kaynak Parametreleri.	34
4.1:	Kimyasal Kompozisyon ve Mukavemet Özellikleri (1,2 mm)	72
4.2:	Kaynak Parametreleri (Tek faz AC, 60 Hz).	73
4.3:	Fışkırma Limit Akımı, Fiziksel ve Kimyasal Özellikler.	73
5.1:	Grup-1 Deneyleri için Seçilen Kaynak Programı.	79
5.2:	Grup-1 Deney Sonuçları Tablosu.	81
5.3:	Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Oluşan Çapak Sayıları.	83
5.4:	Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Oluşan Noktasal Tip Çapak Çeşitlerinin Stereo Mikroskop ile Ölçülen Karakteristik Boyutları.	84
5.5:	Çapak Tipine Göre Alan Katsayıları.	85
5.6:	Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Noktasal ve Sarkıt Tipi Çapaklanma Faktörleri ve Alan Katsayıları ile Hesaplanan Çapaklanma Endeksi Değerleri.	86
5.7:	Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Hesaplanan Fışkırma Endeksi ve Çapaklanma Endeksi Değerleri İle Bunların Toplamı Olan Fışkırma ve Çapaklanma (Bileşik) Endeksi.	87
5.8:	Grup-2'de Yürütülen 25 Adet Projeksiyon Kaynağında Seçilen Kaynak Parametrelerine Karşılık Fışkırmanın Birer Göstergesi Olarak Parçalarda Kütle Kaybı İle Maksimum Parlaklık Artımları.	89
5.9	Grup-2'de Yürütülen 25 Adet Projeksiyon Kaynağında Akım ve Birim Direnç İçin Teorik Olarak Hesaplanan Enerji Değerlerine Karşılık Fışkırma Endeksi Değerleri.	90
5.10:	Grup-2'de Yürütülen 25 Adet Projeksiyon Kaynağında	

Oluşan Çapak Sayıları. 91
5.11: Grup-2 Kapsamında Yapılan Cıvata Kaynaklarında Tespit Edilen Sarkıt Tipi Çapakların Ebatları. 92
5.12: Grup-2 Deneylerinde Yapılan 25 Cıvata Kaynağı Sonrası Noktasal Tip Çapaklara Ait Çapak Ölçüm Tablosu. 93
5.13: Grup-2 Kaynak Deneyleri Sonucu Noktasal ve Sarkıt Tipi Çapaklanma Faktörleri ve Alan Katsayıları İle Hesaplanan Çapaklanma Endeksi, Fışkırma Endeksi ve Bileşik Endeks Sonuçları. 94

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Özellikle otomotiv sektöründe ekonomiklik, otomasyona yatkınlık, üretim hızındaki yükseklik gibi sebeplerden dolayı elektrik direnç kaynağı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Elektrik direnç kaynağı basit bir operasyon olarak görülse de elektro-mekanik-termal-malzeme disiplinlerini içinde barından, etkileyen parametrelerin fazla olduğu bir işlemdir.

Elektrik direnç kaynağı çeşitlerinden olan kabartı direnç kaynağı ya da projeksiyon kaynağı olarak geçen bağlantı yöntemi de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir otomobilde en az 300 adet projeksiyon kaynağı yapıldığı ve yılda dünya genelinde elli milyon araç üretildiği düşünülürse işlemdeki her türlü kaybın etkisi büyüktür.

Projeksiyon kaynağının en büyük problemlerinden biri kaynak sırasında fışkırma riskinin yüksek olmasıdır. Kaynak havuzundan fışkıran metal eğer projeksiyon kaynağıyla birleştirilen parçalara yapışırsa çapak oluşmaktadır. Fışkırma kaynak havuzundan ergimiş metal uzaklaştırması sebebiyle kaynak dayanımını azaltmaktadır. Ayrıca neden olduğu çapak montaj sırasında problemlere neden olmaktadır. Montaj gerçekleştirilse dahi bağlantı elemanlarına zarar vererek montaj kuvvetini düşürmektedir. Montaj edilen parça emniyet parçası ise hayati riskler taşıyan sorunlara sebep olabilir.

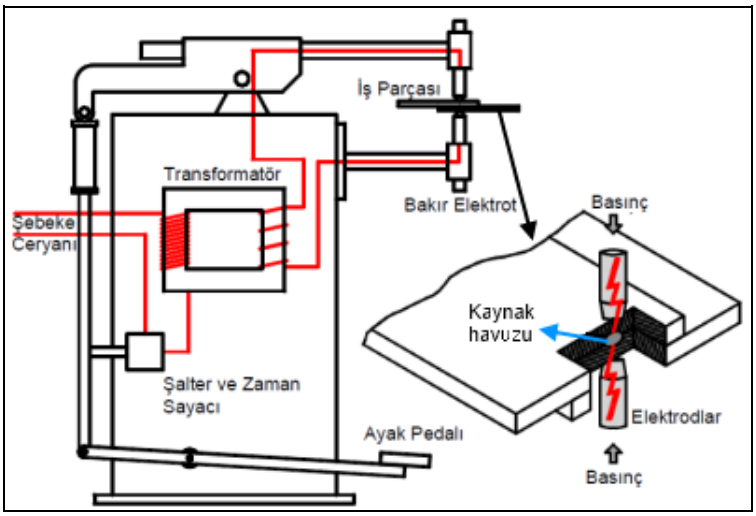
Bu sorunu ortadan kaldır veya azaltmak amacıyla başlatılan 3130849 no.lu Teydeb 1501 projesinde iyileştirmek istenen problemin ölçülmesi için bir yaklaşım veya alet, uygulamada ve literatürde yoktur.

Tez çapaklanma ve fışkırmayı sayısallaştırabilmek adına bir metedoloji oluşturmak adına çalışmalar içermektedir. Çapaklanma ve fışkırmanın dünya genelinde yaşattığı kaybı azaltmak adına ve 3130849 no.lu Teydeb 1501 projesine girdi teşkil etmek adına elzem bir çalışmadır.

2. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI

2.1. Elektrik Direnç Kaynağı Prensibi ve Özellikleri

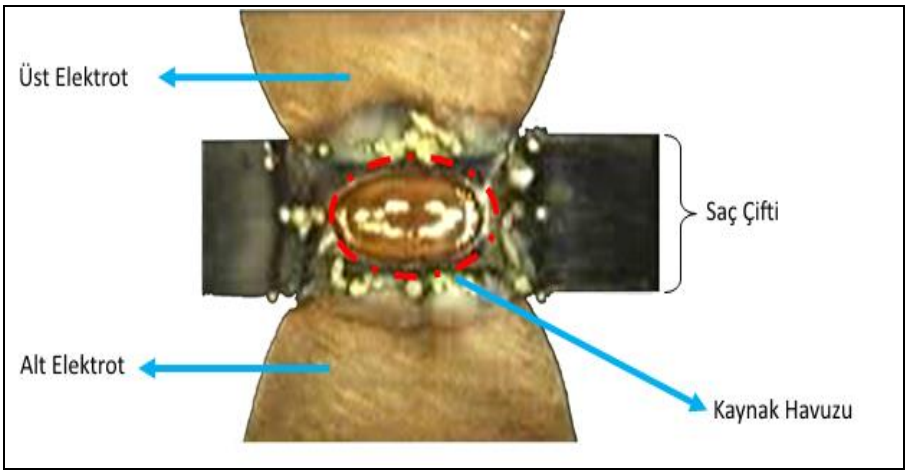
Elektrik direnç kaynağı prensibi, elektrotlar arasında kontrolü bir basınç ve süre zarfında bir arada tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı, iş parçalarının gösterdiği direnç nedeniyle meydana gelen ısı ile iş parçalarının bölgesel ergitilip, oluşturulan kaynak havuzunun soğutulması ile iş parçalarının birleştirilmesine dayanan bir kaynak yöntemidir [1], [2]. Elektrik direnç kaynağı basit gibi görünen bir yöntem olsa da iç yapısında elektro-termal-mekanik-malzeme disiplinlerinin bir arada cereyan ettiği karmaşık bir yapısı vardır. Elektrik direnç kaynağında ek malzeme ve ısı girdisi yoktur. Elektrik direnç kaynağının türlerinden olan nokta direnç kaynağında iki veya daha fazla metal üst üstte getirilerek, kaynak makinesinin elektrot uçlarının arasına yerleştirilir. Kullanılan bu elektrotlar elektrik iletkenlikleri ve ısıl iletkenlikleri yüksek ve ekonomik oldukları için bakır olarak seçilmektedir. Sonrasında sistem çalıştırıldığında Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bakır elektrotlar parçaları sıkıştırır ve saçlar üzerinden elektrotlar aracılığıyla yüksek bir akım geçişi sağlanır [3].



Şekil 2.1: Nokta Kaynak Makinesi Temel Bileşenleri ve Kaynak Bölgesi.

Geçen akım ise parçalar arasındaki temas direnci ve parçaların malzeme direnciyle yüksek sıcaklık oluşturur ve bu sıcaklıkla parçalar birbirlerine temas yüzeylerinde ergir ve bir kaynak havuzu oluşur. Ergime sonrası akım kesilir ve kaynak havuzunun katılaşma için belli bir süre beklenir ve elektrotlar açılarak kaynak tamamlanır.

Elektrik direnç kaynağında kaynak, basit olarak iş parçalarının üzerlerinden akan akıma gösterilen direnç sonrası oluşan ısıyla gerçekleşmektedir. Fakat ısı oluşumunda malzeme ve yüzey temas direnci önemli rol oynamaktadır. Malzeme direnci tamamen malzemenin fiziksel özellikleriyle ilgili olup, yüzey temas direnciyle ilgilidir. Bu direnci ise kaynak tutma kuvvet değeri, yüzey pürüzlülük değeri, yüzeyde oksit tabaka varlığı, kaplama durumu ve yüzey temizliği etkilemektedir.



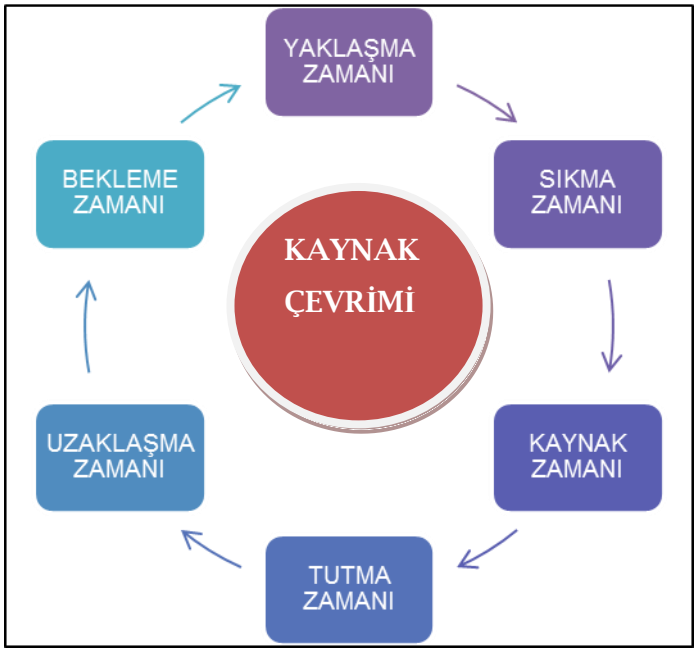
Şekil 2.2: Akım Zamanının Hemen Sonrasında Oluşan Kaynak Havuzu Kesit Görünüşü.

Elektrik direnç kaynağı yaygın olarak kullanılan ve en eski elektrik direnç kaynak yöntemidir. Bu kadar yaygın olarak kullanılmasının temel nedenleri:

-otomasyona uygun olması
-uygulama süresinin kısa olması
- düşük voltajlarda güvenli bir şekilde uygulanabilmesi
- temiz ve çevre dostu olması
- bakımının kolay olması
-ilave birleştirme malzemesi gerekmemesi
-ekonomik olması
-uygulamada özel bir beceri gerektirmemesi
-kuvvetli bir bağ sağlaması

2.2. Elektrik Direnç Kaynağında Çevrim Zamanları

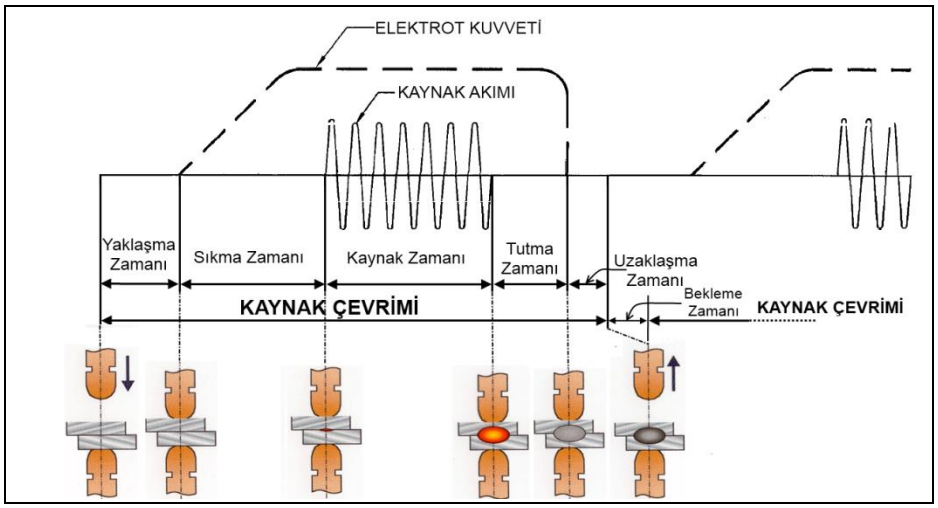
Elektrik direnç kaynağında kaynak çevrimi kaynak makinesinin kollarının sac parçaya hareketiyle başlayıp, tekrar başladığı yere dönmesiyle son bulup, toplamda 5 aşamadan meydana gelmektedir. Bu aşamaların ikisi boş zamanlar olup kaynağa direk olarak katkısı yoktur. Diğer üç aşamada kaynak işlemi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.3: Kaynak Çevrim Diyagramı.

2.2.1. Yaklaşma zamanı

İş parçası kaynak makinesine beslendikten sonra kaynak makinesinin çalıştırılmasıyla elektrotların iş parçasını yakalayıncaya kadar geçen süredir. Yaklaşma süresinin direk olarak ayarlanabilir değildir. Kaynak makinelerinde üst elektrot hareketli alt elektrot ise sabittir. Üst elektroda hareket veren sistemin cinsine, gücüne, basınç ayarına, bakım durumu gibi özelliklere değişim göstermektedir. Yaklaşma zamanı iyi ayarlanmalıdır. Yaklaşma zamanı tamamlanmadan sıkma zamanına geçilirse sıkma zamanı tamamlanmadan kaynağa geçileceğinden çapak oluşum riski vardır ve kaynak kalitesi düşer.



Şekil 2.4: Tek Puls için Kaynak Çevrimi.

2.2.2. Sıkma Zamanı

Elektrotlar iş parçasıyla buluştuktan sonra elektrotların akım zamanına kadar beklediği periyoddur. Bu zaman diliminin belirlenmesinde dikkat edilecek husus kaynak makinesinin belirlenmiş sıkma kuvvetine ulaşabilmesi için gerekli sürenin yeterince verilmesidir. Şekil 2.4'te gösterildiği gibi sıkma zamanında elektrotun belirlenen sıkma kuvvetine ulaşmak için rampa şeklinde artan kuvveti sıkma süresinin kısa tutulmasıyla erken kaynak zamanına geçişe neden olur ve kaynak kalitesinin bu durumdan etkilenme riski vardır.

2.2.3. Kaynak Zamanı

Kaynak makinesinin ürettiği yüksek akımı, elektrotlar aracılığıyla iş parçasına tatbik edildiği zaman dilimidir. Bu zaman dilimi kaynak işleminin gerçekleştiği ve ayarının iyi yapılması gerektiği bir evredir. Kaynak işlemi Joule Kanunu üzerine oluşmaktadır ve akım(i), karesi ile ısı oluşumuna etki etmekte dolayısıyla kaynak havuzunun oluşumuna etkisinde en büyük etmendir.

2.2.4. Tutma Zamanı

Kaynak akımının kesilmesinden sonra, elektrot kuvvetinin etkisinin devam ettiği süredir [1]. Bu süre zarfında ergimiş halde bulunan kaynak havuzunun katılaşması için elektrotların baskısını sürdürerek havuzu bir arada tuttuğu ve katılaşmasını sağladığı evredir. Elektrik direnç kaynak türlerinden biri olan nokta

direnç kaynağında olduğu gibi elektrot içinden geçen soğutma suyu varsa bu su havuzun katılaşmasına katkıda bulunur. Kaynak havuzundaki ısı yoğunlukla ilişkili oluğu metaller üzerinden çeşitli ısı transfer yollarıyla uzaklaştırılmaktadır. Bu safhada elektrot tutma kuvveti arttırılarak kaynak havuzu dövme işlemine tabi tutulabilir. Ayrıca hızlı soğuma sonrası oluşacak gevrek yapının giderilmesi için temperleme işlemi yine bu aşamada gerçekleştirilebilir.

2.2.5. Uzaklaşma Zamanı

Tutma süresinin bitmesiyle elektrotların iş parçası üzerinden ayrılıp, başlangıç konumuna gelmesi için geçen süredir. Bu süre sonunda kaynak makinesinden iş parçası alınır ve kaynak makinesi tekrar kaynak makinesinin tekrar kaynak yapmaya hazır hale gelir.

2.2.6. Bekleme Zamanı

Uzaklaşma zamanı ile yaklaşama zamanı arasında geçen kaynak edilmiş iş parçasının kaynak makinesinden alınıp, kaynak edilecek iş parçasının makineye yüklenmesinde geçen süredir. İş parçasının makineye yüklenmesi ve makineden alınması robotize edilmiş sistemlerde bu zamanın ayarlanması mümkündür. Fakat operatör aracılığıyla gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde bu süre operatörün çalışma hızına bağlı olup, ayarlanamamaktadır.

2.3. Isı Oluşumu

Elektrik direnç kaynağında ısı üretimi akıma karşı gösterilen direnç neticesinde meydana gelmektedir. Bu ısı oluşumu “Ohm Kanunu”na dayanarak hesaplanmaktadır.

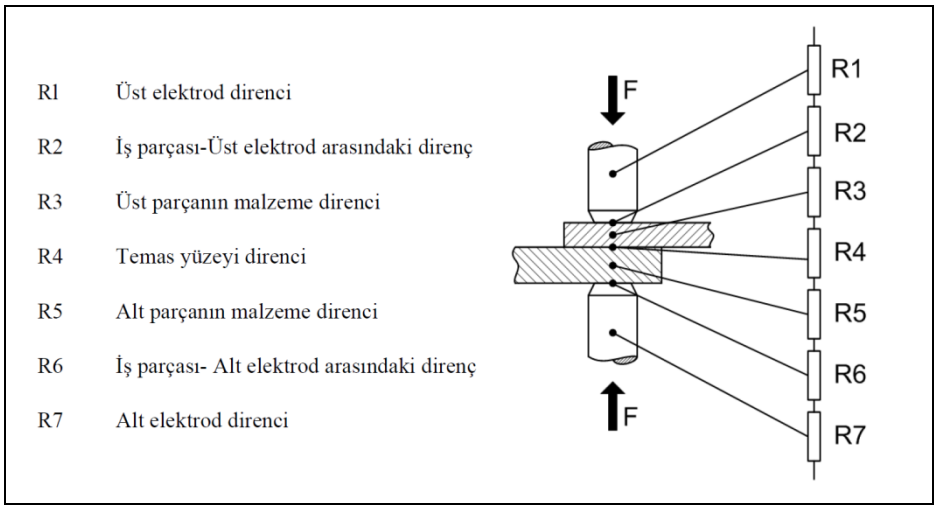
$$Q=i^2*R*t \qquad (2.1)$$

“***i***” olarak gösterilen kaynak akımı ısı oluşumuna karesiyle etki etmektedir. Isı oluşumunda en önemli unsur olup, kaynak programı hazırlanırken çok üyü belirlenmesi gerekir. Formülde “***R***” olarak gösterilen ifade toplam direnci

göstermektir. Toplam dirence katılan unsurlar akımın geçtiği bütün dirençleri kapsamaktadır. Bu dirençler temelde malzeme dirençleri ve temas dirençleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

- Malzeme direnci
  - Elektrot direnci: R1, R7
  - İş parçası direnci: R3, R5

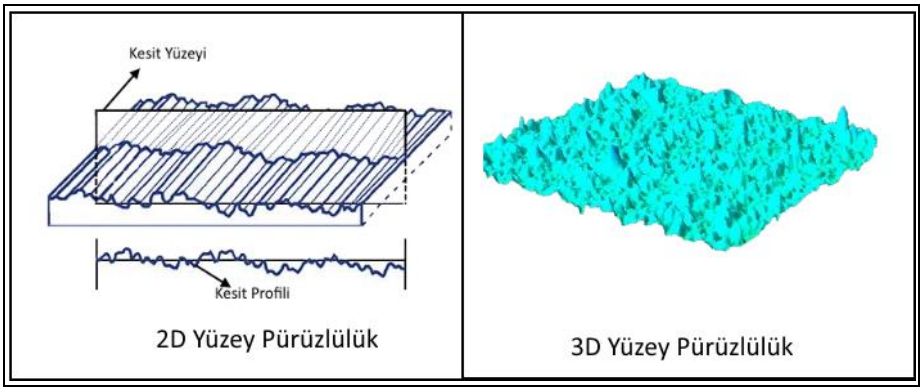
- Temas direnci
  - Elektrotla iş parçası arasındaki : R2, R5
  - İş parçaları arasındaki : R4



Şekil 2.5: Sıkma Zamanında Görülen Dirençler.

Şekil 2.5'te gösterilen temsili şema nokta direnç kaynağına ait olmakla birlikte, kabartı direnç kaynağı, dikiş kaynağı, alın direnç kaynağı vb. elektrik direnç kaynağı yöntemlerinde dirençler benzer durumdadırlar [4]. Kaynak edilecek parçalar arasındaki direnç miktarı sıkma anında diğer dirençlerden çok daha fazladır. İş parçaları arası direncin çok daha yüksek olması daha fazla ısının parçalar arasında oluşmasına olanak sağlamaktadır. Böylece hızlı bir ısı üretimini kaynak edilecek parçalar arasında sağlayıp, parçalar arası birleşmede en önemli adımı gerçekleştirir. Diğer dirençlerden de iş parçalarına oranla az olmakla birlikte ısı üretilmektedir. Ancak daha az olsa da elektrotlarda ısı oluşumu istenmemektedir. Isınma elektrotun

kullanım ömrüne negatif etki ettiğinden elektrotlarda oluşan bu ısı havayla veya suyla elektrotlardan uzaklaştırılmaktadır.

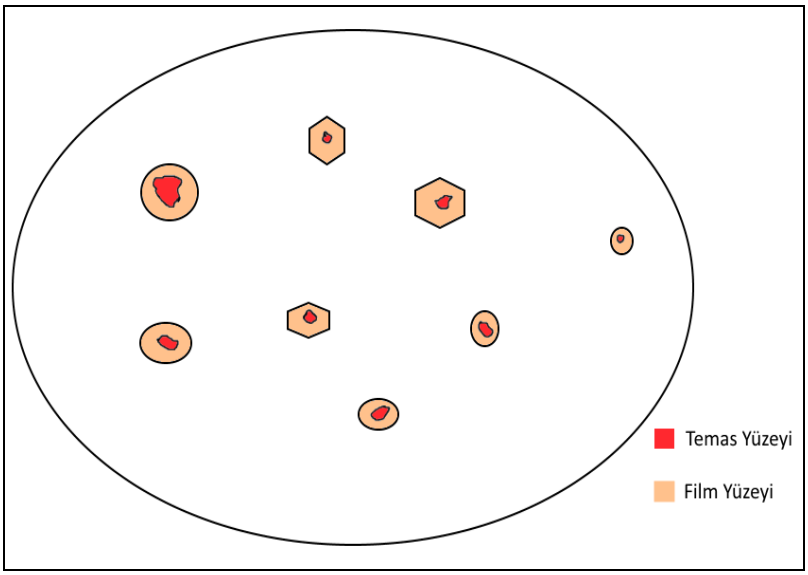


Şekil 2 6: Yüzey Pürüzlülük Durumları.

Şekil 2 7: Sarkıt- Dikitler.

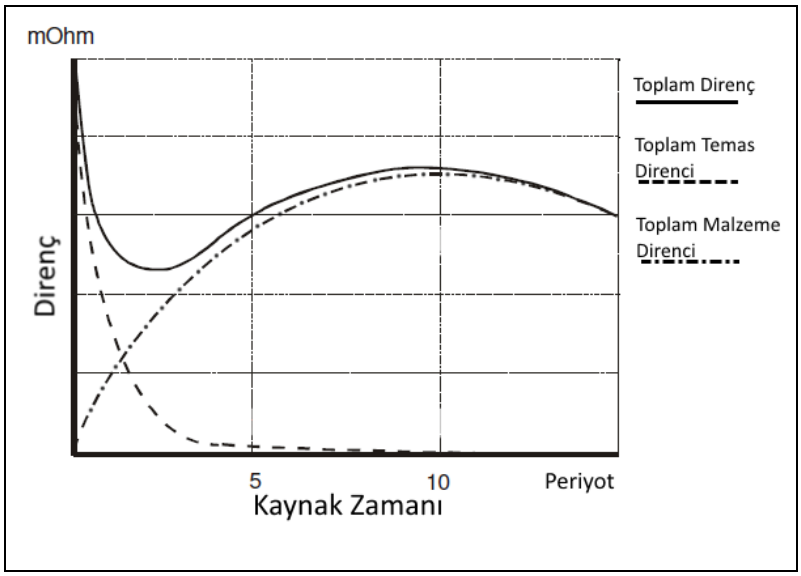
Kaynak edilecek malzemelerin yüzeyleri el yordamıyla kontrol edildiğinde ne kadar pürüzsüz görünse de iş parçalarının yüzeylerine mikroskop veya uygun bir yöntemle bakıldığında üretim tekniğine de bağlı olarak pürüzlülükler tespit edilebilmektedir. Bu inceleme sonucunda parça yüzeylerinde çeşitli ebatlarda girinti ve çıkıntılar bulunduğu görünür. Sıkma zamanında birbirine F kuvvetiyle tutturulan iş parçaları, kuvvetin baskı uygulandığı alanda birbirine tamamen temas ettiği düşünülebilir. Ama yüzey pürüzlülüğü sebebiyle iş parçalarının yüzeyleri tamamen temas etmemektedir. Bu durum bazı mağaralarda oluşan sakıt-dikitlerin durumuna benzemektedir. Sakıt-dikitler bir kısmı birbirine temas eder bir kısmı temas etmemekte, bir kısmı uzunken bir kısmı da kısa şekilde yayılım göstermektedir. Şekil 2.6'daki parçaların yüzey durumlarında görüleceği gibi benzer bir durum vardır [5], [6]. Kaynak zamanına geçildiğinde akım, ilk olarak birleşik sarkıt-dikitlerdeki gibi iş parçaların temas halinde olan kısımlardan akım geçer. Geçen akımla birlikte temas halindeki bu

kısımlar ergir ve kuvvet altında olduğundan bu ergiyen bölgeler çöker. Çökmeyle birlikte temas halinde olmayan diğer yükseltiler temas halini alır. Aynı şekilde oluşan bu yeni temas noktaları geçen akım etkisiyle ergir. Bu durum bütün yükseltilerin tekraren çökelmesiyle ara yüz tamamen birleşinceye kadar sürer [2].



Şekil 2 8: İş Parçaları Arasındaki Kaynak Temas Yüzeyleri.

Bir baskı kuvveti altında temas halinde olan bu yüzeylerde mili saniyeler mertebesinde erimesiyle temas direnci yok olmaktadır. Bunun sebebi süreç sırasında temas direncini oluşturan unsurların ortadan kalkmasıdır. Temas direncini oluşturan unsurlar daralma direnci ve yüzey film dirençleridir. Bütün bir malzeme boyunca serbest bir şekilde gelen akım Şekil 2.8'de kırmızı alan olarak gösterilen farkı şekil ve büyüklüklülerdeki mikro düzeydeki temas yüzeylerine daralan alanlardan geçmektedir. Akımın ilerlediği alandaki bu büyük küçülmeyle gelen dirence daralma direnci ara yüzey birleşimiyle ortadan kalmaktadır. Yüzeydeki oksit tabaka, yağ filmi, kir vb. etkenlerin oluşturduğu film direnci de uygulanan kuvvetle kırılan oksit tabaka ve hızla yükselen ısı sonucu yanmalar neticesinde ortadan kalkan kirletici unsurlarında temas yüzeyinden uzaklaşmasıyla film direnci de hızla azalmaktadır. Temas direnci, kendisini teşkil eden daralma ve film dirençlerinin azalmasıyla hızla düşmekte ve ortaya çıkan ısı ile sıcaklık belli bir noktaya kadar ulaşmaktadır.



Şekil 2.9: Kaynak Zamanındaki Dirençlerin Değişim Durumları.

Kaynağın gerçekleşmesinde diğer önemli direnç olan malzeme direncine etki eden unsurlar sıcaklık ve malzemenin karakteristik özelliğine bağlı öz direncidir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi temas direncinin hızla azalmasıyla toplam direnç belli bir süre azalırken malzeme direnci ve temas direncinin denge noktasından sonra artış göstermektedir [7]. Burada malzeme direncinin artmasını sağlayan ağırlıklı temas direnci ve az da olsa malzemenin kendi öz direnciyle ortaya çıkan sıcaklık artışıdır. Bu sıcaklık artışına malzeme öz direncini arttırmakta ve artan öz dirençle birlikte akıma karşı direnç artarak sıcaklık artmaktadır. Akım istenilen kalite değerlerini sağlayan yani kaynak sıcaklık ve birleşme koşullar sağlanınca kesilir. Sonrasında tutma zamanı süresince elektrotlar ve malzeme üzerinden ısı transfer ile kaynak bölgesinde soğuma sağlanır. Böylece ergimiş kaynak havuzunun katılaşması gerçekleşir ve kaynak tamamlanmış olur.

2.4. Elektrik Direnç Kaynağına Etki Eden Başlıca Değişkenler

Elektrik direnç kaynağına etken birçok parametre vardır. Kaynak edilecek malzemenin kendisi, şekli, yüzey kalitesi, yüzey temizliği, kullanılan elektrotların malzemesi, şekli, soğutulması, bakımı vb. birçok etken kaynak kalitesine direk ve dolaylı olarak etki etmektedir. Bu etkenlerin bir kısmını ayarlanabilirken bir kısmı da ayarlanamazdır.

2.4.1. Akım

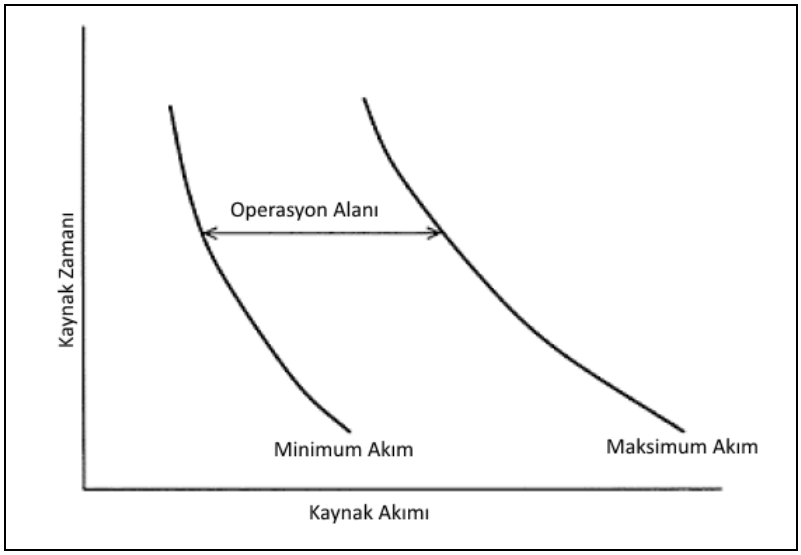
(2.1) eşitliğinde görüldüğü gibi ısı üretimine karesiyle katkıda bulunarak, formüldeki diğer etkenler olan direnç ve süreden daha büyük etkiye sahiptir. Bu sebeple en önemli kontrol edilen değişkendir [8].

Aslanlar'ın yaptığı çalışmada kaynak çekirdeğinin büyümesiyle birlikte çekme, sıyırma testleri gibi kaynağın kalitesinin ölçüldüğü testlerde kalitenin arttığı gözlenmiştir [9]. Durgut ve Kaçar'ın yapmış olduğu çalışmada, akım şiddeti ve kaynak zamanının parametre olarak belirlenen 2 adet deney numunesinin üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu kaynak çekirdeğinin gelişimi her bir şart için 2 adet boyut ölçümü ortalaması olarak Tablo 2.1'te gösterilmiştir. Tablo 2.1'den görüldüğü gibi artan kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanına bağlı olarak ısı girdisinin artması sebebiyle kaynak çekirdek boyutunun arttığı görülmektedir [10]. Aslanlar ve arkadaşlarının yaptığı bir diğer çalışmada akımın kaynak kalitesi üzerine etkisi araştırılmış ve artan akım şiddetiyle belli bir değere kadar kaynak kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum kaynak kalitesinin yakalandığı akım değerinin üstüne çıkılması kaynak havuzuna yüksek ısı girdisi sağlanmakta ve bu ısı soğutma sıvısının karşılayamayacağı bir seviyeye ulaşmaktadır. Aynı zamanda bu yüksek ısı girdisiyle kaynak havuzundan fışkırmalar neticesinde kaynak kalitesi düşmektedir [11].

Tablo 2.1: Kaynak Parametreleri.

AISI 2205 BİRLEŞTİRMELERİNİN ORTALAMA ÇEKİRDEK ÇAP BOYUTU ÖLÇÜMÜ			
Akım Şiddeti (kA)	**Kaynak Süresi (çevrim)**	**Soğuma Ortamı**	**Kaynak çekirdek çap ortalamaları (mm)**
5	10	Atmosfer	5,80
7	10	Atmosfer	5,85
9	10	Atmosfer	6,65
5	20	Atmosfer	6,90
7	20	Atmosfer	6,95
9	20	Atmosfer	7,07

Elektrik direnç kaynağında kaynak edilen parçalar arasında kaynak havuzu özelinde birleşmenin yani ergimenin gerçekleştiği minimum ve etkin bir şekilde kaynağın gerçekleştirildiği maksimum akım değerleri vardır. Şekil 2.10'da zamana bağlı maksimum ve minimum akım değerlerinin teşkil ettiği kaynak sınır diyagramı yer almaktadır [12].

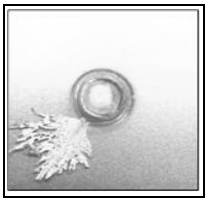


Şekil 2.10: Kaynak Sınır Diyagram Şeması.

Akım yoğunluğu için erimenin meydana gelmediği bir alt sınır mevcuttur [13]. Akımın bir minimum şiddetinden küçük değerlerinde kaynak bölgesinde herhangi bir erime meydana gelmez. Bu minimum şiddet, malzemenin cinsine, kalınlığına, elektrot uçlarının boyutlarına ve elektrot kuvvetine bağlıdır. Bir başka deyimle erimenin meydana gelebilmesi için bir minimum akım yoğunluğu mevcut olup, bu değer malzemenin cinsine, kalınlığına ve kaynak bölgesine etki yapan elektrot basıncına bağlıdır [14].

Kaynak akımı için bir de üst sınır mevcuttur. Kaynak akımı çok yüksek ise, elektrotlar arasındaki metalin tamamı, kaynak bölgesinin erime sıcaklığına ulaşmasıyla, plastik bölgeye kadar ısınmış olur ve elektrotlar derinlemesine metale gömülür. Elektrotların dış yüzeyleri aşırı ısınabilir ya da yanabilir. Bu özellikle, akım fışkırmaya sebep olacak kadar yüksekse gerçekleşir [13]. Verilmiş bir elektrot basıncı için, akım yoğunluğunun bir üst sınırı da mevcuttur. Bunun üzerindeki değerlerde kaynak bölgesindeki erimiş metal, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi levha-elektrot veya levhalar arasından fışkırır [13]. Bu olay kaynak dikişinde dayanıklılık azalmasına neden olur. Elektrotlarla levhalar arasındaki temas yüzeylerinde erime

meydana gelir, elektrotlar levhalara yapışarak tahrip olurlar [14]. Bunun sonucunda elektrotların ömrü azalır [13].

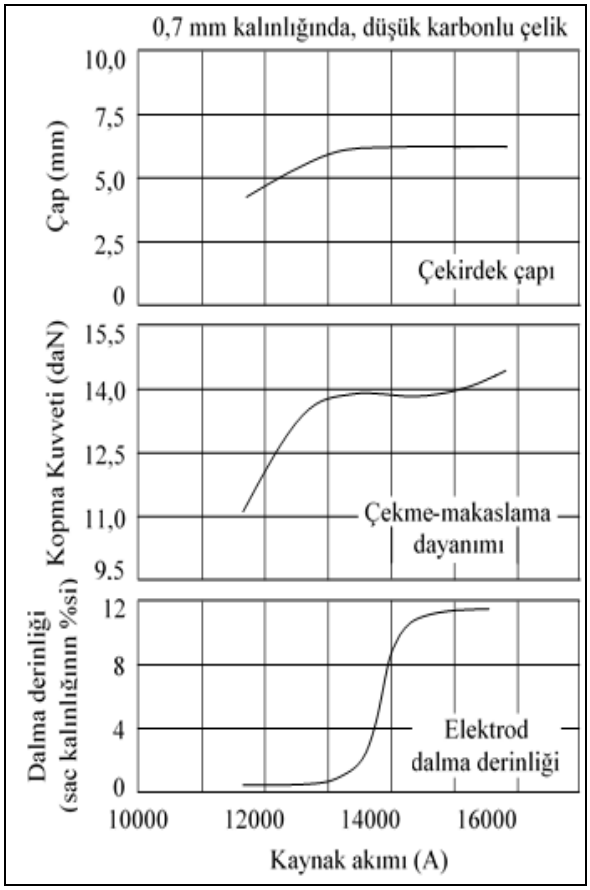


Şekil 2.11: Kaynak Ara Yüzeyinde Meydana Gelen Fışkırma.

Belli bir elektrot için, düşük kalitede kaynaklara sebep olan, bir veya daha fazla iş parçasında sıcak metalin yapıştığı ya da fışkırdığı, akımın bir üst sınırı vardır. Maksimum nokta dayanımı, fışkırmanın meydana geldiği değerin biraz altındaki akım yoğunluğunda kaynakla elde edilir. Bu akım, imalatta bu sınır göz önünde bulundurularak ayarlanmaktadır. Maksimum nokta dayanımı, fışkırmanın meydana geldiği değerin biraz altındaki akım yoğunluğunda kaynakla elde edilir. Bu akım, imalatta bu sınır göz önünde bulundurularak ayarlanmaktadır. Kaynak akımı, bağlantı çekme-makaslama dayanımı ve elektrot daima derinliğinin çekirdek çapı üzerindeki etkisi Şekil 2.12 ‘de gösterilmiştir. Akım 13500 A’in üzerine çıktığında 6 mm’lik çekirdek çapında önemli bir artış olmamıştır fakat elektrot dalma derinliğinde bir artış meydana gelmiştir. Optimum akıma ulaşılana kadar çekme makaslama dayanımı hızlı bir şekilde artmakta, fakat akım 14000 A’in biraz üzerine çıktığında dayanım biraz düşmektedir. Dalma derinliği, 13500 A’lık kaynak akımında sac kalınlığının %2’sinden, 14000 A’in biraz üstünde %10 civarına kadar çıkmaktadır [13].

Belirli bir levha malzemesi ve kalınlığı, elektrot uç çapı ve verilmiş bir elektrot kuvveti için bir kaynak kabiliyeti diyagramı (akım-zaman diyagramı) elde etmek mümkündür. Şekil 2.13’te böyle bir diyagram şematik olarak verilmiştir. Bu diyagram dört bölgeye ayrılmaktadır. A bölgesinde herhangi bir erime ve birleşme yoktur. B bölgesinde basınç kaynağı ile oluşan ve erime olmadan zayıf bir birleşme meydana gelir. C bölgesi erime veya kaynak bölgesidir. C ve B bölgesinin sınır eğrisinden itibaren erime başlar ve erimiş kaynak bölgesinin boyutları, bu bölge içine girdikçe artar. Sonuçta nokta çapı d_e elektrot çapı d_n yaklaşık olarak eşit olur. C bölgesi malzemenin cinsine bağlıdır. Bazı metallerde bu bölge dar olduğundan kaynak akım ve zamanının has bir şekilde ayarlanması gerekir. Uygulamada, akım ve

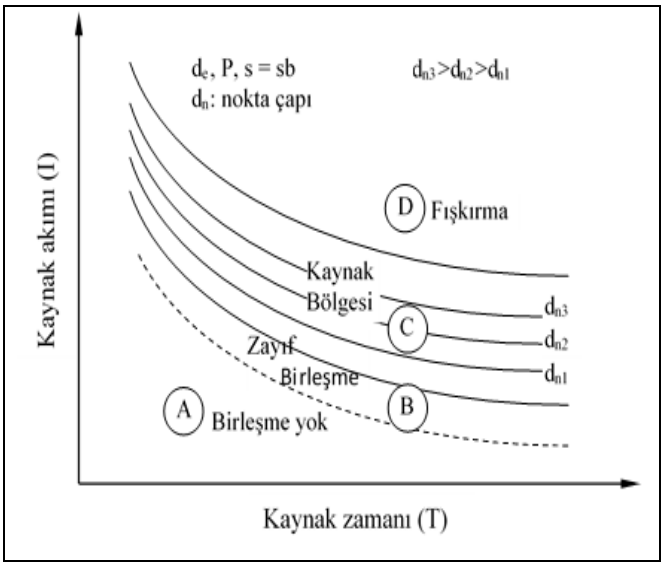
zaman değerleri C bölgesinin üst sınırına yakın kalacak şekilde seçilir. D bölgesi fışkırma bölgesi olup, C bölgesinin üst sınırından itibaren fışkırma başlar [14].



Şekil 2.12: Kaynak Sırasında Kaynak Akımının Çekirdek Çapı, Çekme-Makaslama Dayanımı ve Elektrot Dalma Derinliği Üzerindeki Etkileri.

2.4.2. Kaynak Süresi

(2.1) eşitliği gereğince kaynak için önemli bir diğer parametre zamandır. Geçen zaman itibariyle belli direnç ve akım değerinde kaynak bölgesine ısı girdisi artmaktadır. Şekil 2.13'te gösterilen kısa kaynak zamanı ve yüksek akım şiddeti kullanarak veya uzun kaynak zamanı, düşük akım şiddeti kullanarak, Şekil 2.14'de gösterilen kaynak çekirdeğinin nokta çapını d) aynı elde etmek mümkündür. Bunlardan ilkine kısa süreli kaynak, ikincisine uzun süreli kaynak adı verilir [14], [15].



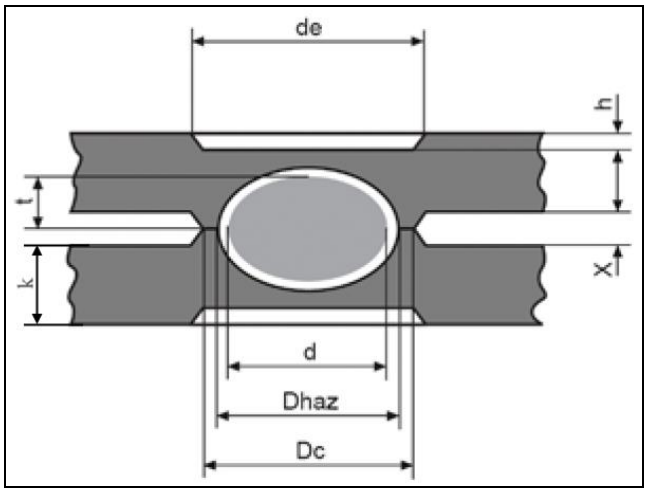
Şekil 2.13: Kaynak Kabiliyeti Diyagramı.

Günümüzde rekabet çok yüksek ve üretim miktarları çok yüksek olduğundan birim zamanda üretilen parça sayısı arttırmak önem arz etmektedir. Üreticiler üretim zamanlarını azaltma çabasındadır. Direnç kaynağı çeşitlerinden nokta direnç kaynağının bir araçta minimum 3000 adet kabartı kaynağının minimum 600 adet olduğu otomobil üreticileri şimdilerde bir dakikadan daha az sürede bantlardan araç indirmektedir.

Bu koşullarda kısa süreli kaynak tekniği çok gelişmiş olup, büyük ölçüde kullanılmaktadır. Önceleri, çok ince levhalar için bile birkaç saniye olan kaynak zamanı, kontrol organları ve akım devrelerindeki büyük gelişmelerden sonra birkaç periyoda kadar düşürülmüştür. Kaynak zamanı azaldıkça ısı kayıpları da azaldığından işlemin ısıl verimi artmaktadır. Düşük karbonlu alaşımsız çeliklerin kaynağında, kısa süreli kaynak için gerekli kaynak zamanı aşağıdaki eşitlik yardımıyla seçilebilir [14].

$$t=8*k \tag{2.2}$$

Yukarıdaki bağıntıda, t (periyod) kaynak süresi, k (mm) levha kalınlığıdır. 50 Hz frekanslı bir şebekede 1 periyod 1/50 saniyedir [14]. Periyot zaman birimi alternatif akımla çalışan kaynak makinelerinde kullanılmaktadır. Şebekenin frekansına göre değişim göstermektedir. Doğru akımla ve kapasitif çalışan kaynak makinelerinde milisaniye birimi kullanılmaktadır.

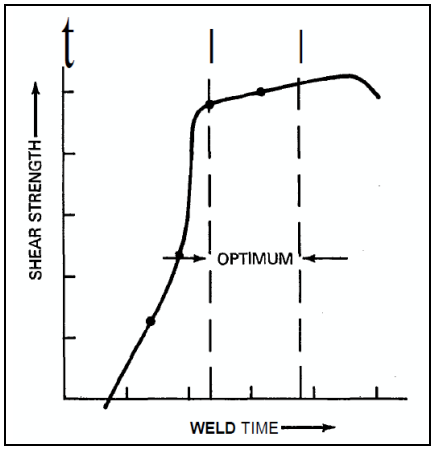


Şekil 2.14: Nokta Direnç Kaynağı Kesiti. Kaynak Çekirdek Çapı (d), Batma Derinliği (H), Batma Çapı (De) Kaynak Çekirdek Yüksekliği (T), Saclar Arası Boşluk (X), Difüzyon Bağlantı Çapı (Dc), ITAP Çapı (Dhaz).

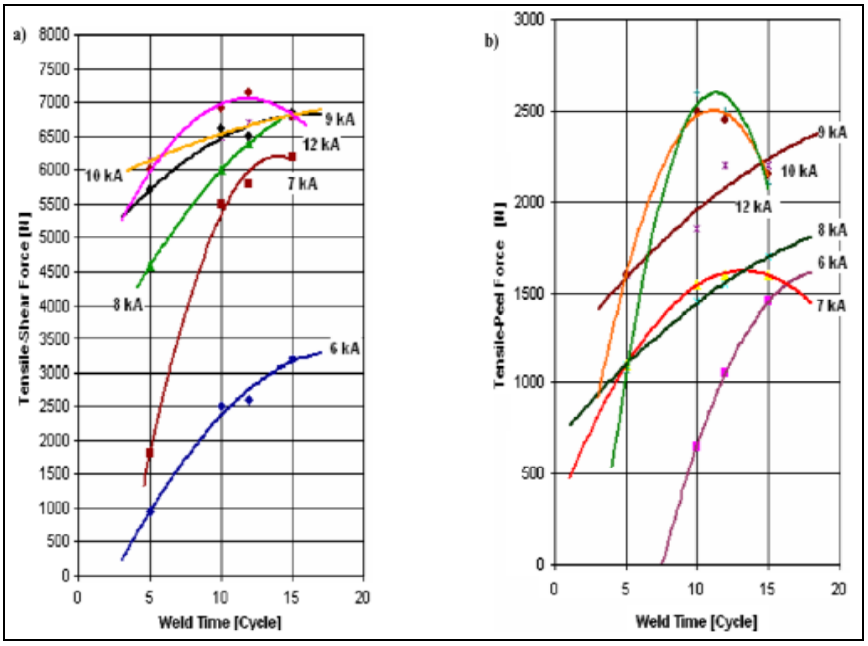
Kısa süreli kaynakta işlemin hızlı olması nedeniyle sadece kaynak bölgesi erime sıcaklığına ulaşır ve levhaların dış yüzeyinde aşırı ısınma olmadan kaynak işlemi sona erer. Bu nedenle elektrotların dokunma yüzeyleri bozulmaz. Isıtmanın yavaş olması, yani uzun süreli kaynak halinde, levhaların diğer bölgelerinde sıcaklık önemli ölçüde artar. Bu ise levhaların dış yüzeylerinin yumuşamasına ve elektrotların levha içine gömülerek derin izler bırakmasına neden olur. Kısa süreli kaynak, ısının çok sınırlı bir yerde yoğunlaşmasının gerektiği özel şekilli parçaların kaynağında ve alüminyum gibi ısıl iletkenliği çok yüksek olan malzemelerin kaynağında özellikle tercih edilir. Uzun süreli kaynağın uygulanması gerekli olan haller de mevcuttur. Kaynak süresi, kaynak akımının kesilmesinden sonra kaynak bölgesinin soğuma hızını etkiler. Uzun süreli kaynakta, kaynak bölgesine komşu bölgelerin sıcaklığı yükseldiğinden, sıcaklık farkı, dolayısıyla da kaynak sonrası soğuma hızı düşüktür. Bu nedenle, % 0,3 karbonlu çeliklerde ve bazı alaşımlı çeliklerde sertleşmeyi önlemek için uzun süreli kaynak kullanılır. Diğer taraftan, elektrotlar tarafından sıkıştırılması zor olan parçalar için de uzun süreli kaynak tercih edilir.

Sabit bir akım altında sürenin arttırılmasıyla kaynak kuvveti artmaktadır. Şekil 2.15'te kaynak zamanın minimum ve maksimum değerlerinde kaynak kuvveti optimum görülmektedir. Maksimum kaynak süresi aşıldığında kaynak kuvveti belli bir süre sonra hızlıca azaldığı görülmektedir. Arslanlar ve arkadaşları yaptığı çalışmada raporladığı Şekil 2.16 a'daki grafikte farklı akımlarla sürenin kaynak kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir [17]. Kaynak çekme-koparma testi işleminde

8kA kadar kaynak kuvveti hızlı bir şekilde artmıştır. Bütün akım değerlerinde maksimum çekme-koparma değerlerine 10-12 periyod(cycle=1/50sn) civarında ulaşılmıştır. Çekme-koparma testinde maksimum değer olan yaklaşık 7,1kN değere 12 kA değerde ulaşılmıştır. Benzer sonular Şekil 2.16 b'de gösterilen sıyırma testi içinde raporlanmıştır. Bu durum kaynak işlemi için optimum noktanın bulunması bir optimizasyon problemi olup, Şekil 2.15'teki grafiği ulaşabilmek için Aslanlar ve arkadaşları'nin yaptığı çalışmada görüldüğü gibi maksimum akım değerinde elde edilmektedir [8].



Şekil 2.15: Çekme Kuvveti ile Zaman Arasındaki İlişki.



Şekil 2.16: a)Kaynak Süresi-Çekme-Koparma Testi Grafiği, b)Kaynak Süresi-Sıyırma Testi Grafiği.

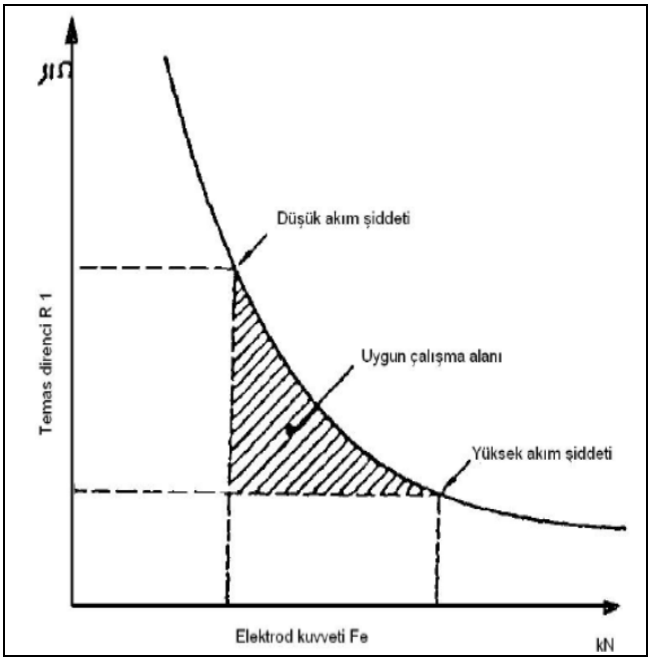
2.4.3. Elektrot ve Elektrot Kuvveti

Elektrot kuvveti, kaynak sıkma kuvveti, elektrot tutma kuvveti, kaynak basıncı veya kaynağın mukavemeti ile karışıklığa sebebiyet vermesiyle birlikte kaynak kuvveti olarak söylenen kuvvet kaynak edilecek iş parçalarının kaynak boyunca bir arada tutmak için tatbik edilen kuvvettir. Elektrot ve elektrot kuvvetinin yerine getirdiği 6 önemli görevi vardır:

- Kaynak edilecek parçaların bir arada tutulup, kaynağın belli bir noktada olmasını sağlar
- Kaynak akımının parçalara taşınmasında aracılık eder
- Basma safhasında, elektrot kuvveti, levhalar arasındaki temas direncinin uygun bir değerde, buna karşılık elektrot-levha temas direncinin düşük bir değerde olmasını sağlar[14].
- İş parçaları arasında ergime neticesinde oluşan kaynak havuzunu basınç altında tutarak bütünlüğünü korur.
- Kaynak zamanı geçildikten sonra kaynak havuzunun hızlı bir şekilde katılaşmasını sağlar
- Eğer tutma zamanında döveme uygulanırsa, kaynak dikişinin sıvı halden itibaren soğuması ve katılaşması sırasında, büzülme nedeniyle ortaya çıkabilecek boşluk, çatlak gibi kusurların oluşumunu önlemektir.

Kaynak işleminde en düşük ısı, oldukça düşük özgül dirençleri ve suyla soğutulmaları nedeniyle elektrotlarda oluşmaktadır. Malzemelerin kendilerinde oluşan ısı biraz daha fazla olmasına karşın, bu ısı, malzemelerin yüzeyinden suyla soğutulan elektrotlar aracılığıyla transfer olur. Malzeme-elektrot çiftlerinin temas noktalarında oluşan ısı da yüksektir. Ancak yüksek elektrot basınç kuvveti temas direncini azalttığından, ayrıca oluşan ısının bir kısmı da soğutma suyuna aktarıldığından, bu ısı miktarı sınırlı kalmaktadır. Kaynak işleminde en yüksek ısı malzeme çifti arasındaki temas direncinde oluşmakta ve kaynak çekirdeğinin oluşması için gerekli ilk sıcaklığı vermektedir [17]. Bu temas direncinin en önemli kontrol unsuru olan elektrot kuvveti arttırıldıkça Şekil 2.17'de görüldüğü gibi temas direnci azalma göstermektedir. Düşük elektrot kuvvetiyle kaynak yapılması akım değerinin düşük tutulmasını sağlayarak kaynak maliyeti düşürülüş olur [18]. Fakat

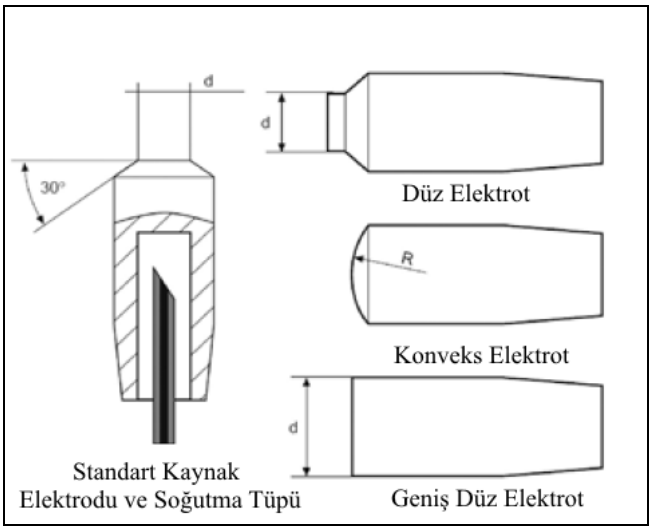
düşük elektrot kuvvetiyle kaynak yapılması iş parçasıyla elektrot arası ani ve kontrolsüz sıcaklık yükselmelerine neden olabilir. Bu durumda yerel ergimelerle elektrodun iş parçasına yapışması, sıçrama ve çapaklanma oluşumu, elektrot ömrünün kısalması ve temas direncinin kontrolü azaldığından elektrot iş parçası arası ani enerji değişiminden kaynaklı patlamalar meydana gelebilir. Elektrot kuvvetinin yüksek olması temas direnci azaltacağından kaynağın gerçekleşmesi için gerekli ergime sıcaklığına ulaşmada daha yüksek akım değerleri ihtiyacı doğacaktır (Şekil 2.17). Akım değerinin arttırılması işlem maliyetini arttırmakta, görsel olarak kaynak kalitesini etkilemekte, elektrot kullanım ömrünü kısaltmakta ve elektrot batma derinliğini arttırmakta bunun sonucu olarak da kaynak mukavemet değerleri düşmektedir.



Şekil 2.17: İki Yüzey Arasındaki Temas Direnci Değerinin Değişimi.

Nokta direnç kaynağı ve dikiş kaynağında elektrot geometrisi ve elektrot çapı kaynak işlemi ve kaynak özelliklerinde büyük etkisi vardır. Elektrot çapı ve iş parçalarının kalınlıkları arasındaki oran uygun olmalıdır. Nokta direnç kaynağı ve dikiş kaynağında elektrot çapı iş parçasının kalınlığının karekökünün beş katıdır. Elektrot geometrisi ve çapı iş parçaları arasında kaynak elektrot kuvvetinin ve akım yoğunluğunun odaklanmasında ve bu sebeple aynı derecede kaynak çekirdeğinin konumunda da etkilidir. İş parçasının konumlandırılması veya elektrodun iş parçası üzerine dengeli basma problemleri Şekil 2.18'de gösterilen konveks elektrot

yüzeyiyle giderilmiştir. Elektrot malzemesi soğutma kabiliyeti ve iş parçaları arası kaynak yüzeylerinin ısıl dengesinde belli bir noktaya kadar etkilidir. Şekil 2.18'de bulunan elektrot tipleri dışarıdan elektrik direnç kaynak tipine ve amacın yönelik birçok tipte elektrot vardır [15].



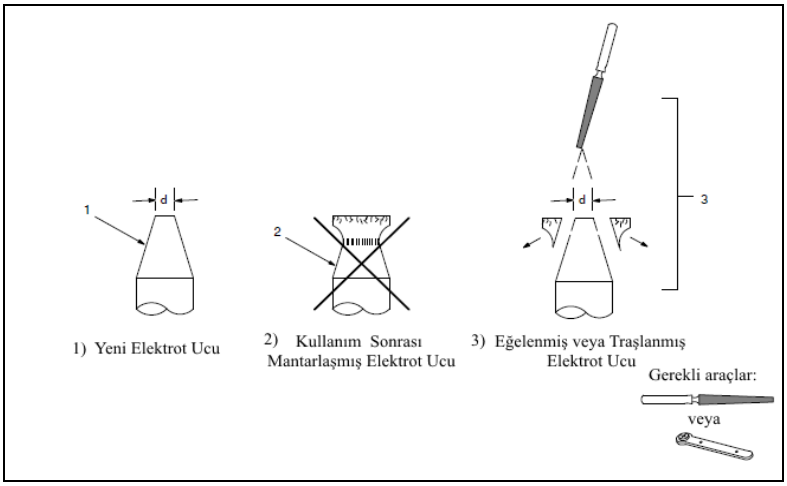
Şekil 2.18: Elektrot Tipleri.

2.4.4. Yüzey Durumu

İş parçalarının yüzey durumu ısı üretimini etkiler. Çünkü temas direnci yüzeylerdeki kirlilik, oksit tabaka, yağ ve diğer yabancı maddeler tarafından etkilenir. Yüzeyler temiz olduğu zaman en dağılımlı kaynak kalitesini sağlanır. Oksit, tufal ve diğer yabancı maddelerle kaplı iş parçalarının yüzeylerinde değişken temas direnci meydana gelir. Bu tutarsız ısı üretimine neden olur. İş parçası üzerindeki ağır tufal elektrotların yüzeyine gömülür, elektrotların hızlıca deforme olmasına neden olur. Yağ ve gres yağı kirleri toplar ve bu da elektrodun deformasyonuna neden olur [7].

Elektrotların yüzey durumları da kaynak kalitesi ve sürekliliği açısından önemlidir. Tekrarlı yükler ve yüksek sıcaklık altında çalışan elektrotlar zamanla deforme olur. Bu deformasyon olayına mantarlaşma denir. Mantarlaşma sonucu elektrotların iş parçasıyla olan temas yüzeyi artmaktadır (Şekil 2.19). Artan yüzeyle birlikte kaynağın akım yoğunluğu düşmekte ve kaynak basıncı azalmaktadır. Bununla birlikte kaplamalı sacların özellikle nokta direnç ve dikiş kaynağında elektroda çinko difüzyonu gerçekleşmektedir. Difüze olan çinko elektrot yüzeyinde

bir katman oluşturmaktadır. Oluşan bu katmanın sertliği ve elektriksel direnci daha yüksek olduğundan ısıl dengeye, elektrtodun batma derinliğine ve akım yoğunluğuna etki etmektedir. Bu koşullarla sürekli ve aynı kalitede kaynak elde etmek mümkün değildir. Şekil 2.19'da temsil edilen elektrot yüzey temizliği, iyi yapılması ve frekansının belirlenmesi önem teşkil etmektedir [19].



Şekil 2.19: Elektrot Ucu Bakımı.

2.4.5. Malzeme

Metallerin bileşimi, onların özgül ısılarını, erime sıcaklıklarını, gizli erime ısılarını, ısı ve elektrik iletkenliklerini ve yoğunluklarını etkiler. Elektrik iletkenliği joule kanunundaki R değeri yoluyla verilmiş bir akım şiddetinde, ısı üretim hızını saptayan bir faktördür. Metallerde elektrik ve ısıl iletkenlik, genelde aynı yönde paralel olarak değişir. Bu nedenle, yüksek elektrik iletkenliği ve dolayısıyla yüksek ısı iletkenliğine sahip bakır, gümüş, alüminyum gibi metallerde yüksek akım yoğunluğunda dahi, üretilen çok az ısı çevreye hızla yayılır ve erime için gerekli ısı birikimini engeller. Bu ise, kaynak işlemini imkansız veya zor hale getirir. Diğer taraftan, mevcut ticari birçok Metalin birikim kütlelerini erime sıcaklıklarına yükseltmek için gerekli ısı miktarı aynı mertebededir. Örneğin, alüminyum ve paslanmaz çelik gibi oldukça farklı nokta kaynağı özelliklerine sahip iki metali erime sıcaklıklarına getirebilmek için birim kütleleri başına yaklaşık aynı miktarda ısı gerekir. Bununla beraber, alüminyumun ısıl ve elektrik iletkenliği, paslanmaz çeliğe nazaran büyüktür. Bu nedenle, alüminyum için gerekli kaynak akımı, paslanmaz çelik için gerekli olan akımdan oldukça fazladır [20].

Tablo 2.2: RMWA-A Grubu Bakır Sınıfları.

RWMA Klass #	İçerik (%)	Elektrik İletkenliği	Kopma Kuvveti (ksi)	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Termal İletkenlik (Cal/cm-sec-°C)
-	100-Cu	90	30	-	-
1	99-Cu, 1-Cd	92	60 (Dv)	660	0,82
2	99.2-Cu, 0.8-Cr	80 (D) 82 (Dv)	30 (D) 62 (Dv)	930 (D) 900 (Dv)	0,77 (D) 0,75 (Dv)
3	97-Cu, 2.5-Co, 0.5-Be	48 (D) 52 (Dv)	95 (D) 105 (Dv)	1020 (D) 900 (Dv)	0,43 (D) 0,45 (Dv)
4	Cu & Be	20 (D) 23 (Dv)	110 (D) 170 (Dv)	710	0,18 (D) 0,19 (Dv)
5	Cu & Al	18	70	-	0,16

* D = Döküm,
Dv = Dövme

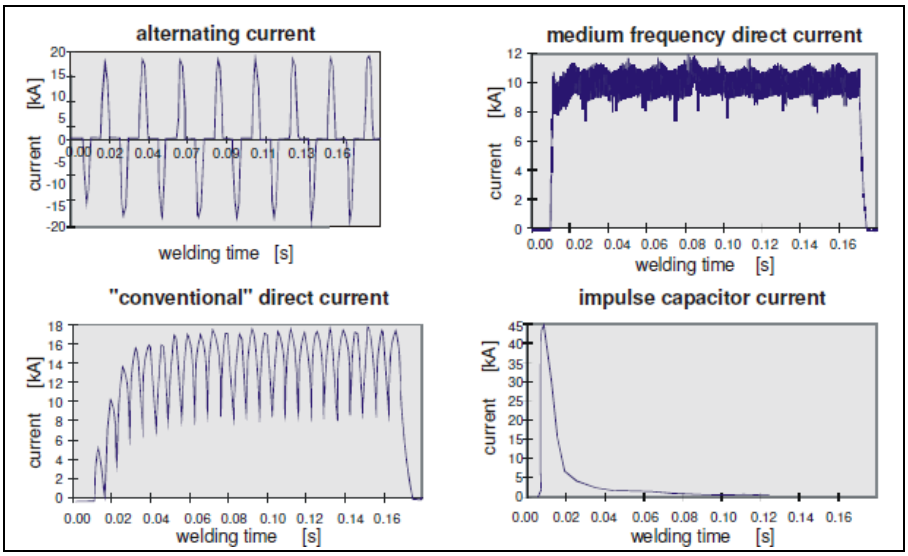
Elektrot malzemelerinden beklenen en önemli özelliklerin başında elektriği iyi iletmeleri yani elektriğe karşı düşük direnç göstermeleri ve iyi ısı iletmeleri beklenir. Bu noktada ticari noktada kullanılabilirliği en yüksek ve yaygınlaşmış malzeme bakırdır. Tablo 2.2'de görüldüğü gibi saf bakır bu istenilen özellikleri karşılamaktadır. Fakat bunu yanında elektrot malzemesinden mukavim, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme ve diğer elementlerle tepkimeye girme eğiliminin az olması beklenir. Saf bakır bütün özellikleri kendisi karışlayamadığından alaşımlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. RMWA standartlarına göre elektrot malzemeleri A ve B olmak üzere ikiye ayrılmaktadır:

- A Grubu-Bakır alaşımlar
- B Grubu-Refrakter Metal Bileşimleridir.

Tablo 2.2 yaygın olarak kullanılan grup olup, sınıf yükseldikçe malzemenin elektrik iletkenliği düşmekte mukavemet değerleri yükselmektedir. Eğer bakır direkt kaynak işlemini gerçekleştirecek eleman olarak kullanıldığında düşük klas bakırlar seçilirken, hem akım iletme hem de yük altında çalışma durumlarında yüksek klas bakırlar tercih edilmektedir.

2.4.6. Kaynak Makinesi

Direnç kaynağı işleminde kaynak makinesinin mekanik ve elektriksel karakteristiğinin önemli etkisi vardır. Elektriksel karakteristikleri, kaynak akımının dinamik reaksiyon süresi ve kaynak iletim elemanlarının ebatları ve bu elemanların arasındaki pencere olarak ifade edilen boşluktaki manyetik özelliğe sahip malzemenin miktarı nedeniyle olan manyetik/indüktif kayıplar oluşturmaktadır. Toplam kaynak süresi genelde çok kısa olurken, istenilen kaynak akım değerine ulaşma süresini(up-slope time) çok kritik olabilmektedir. İşlem kontrolü göz önüne alındığında, manyetik kayıplar nokta direnç kaynağında önemli bir faktördür [21].

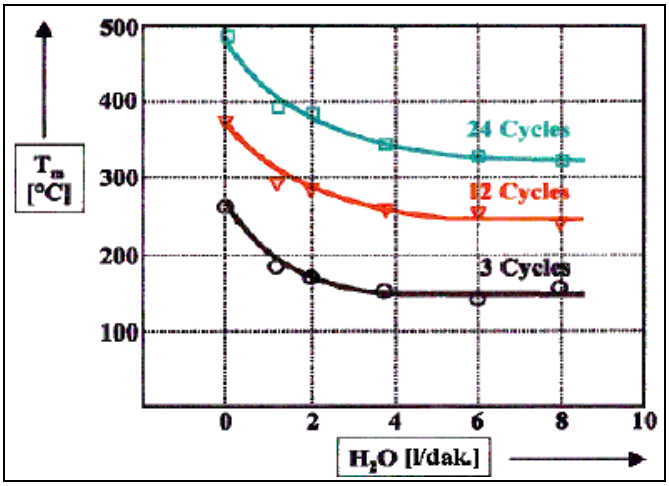


Şekil 2.20: Kaynak Akım Tipleri.

Kaynak makinelerinin elektriksel noktada önemli diğer etmeni akım üretim ve kontrolünü sağlayan güç kaynaklarının çeşitliliğidir. Güç kaynakları temelde alternatif(AC) ve doğru(DC) olmak üzere iki çeşit akım üretmektedirler.

DC akım üreten güç kaynaklarının yapısal tasarımı daha karışık olması nedeniyle AC güç kaynaklarından daha pahalıdır ve güvenilirlik problemleri vardır [7], [22]. Fakat verimliliği daha iyidir. AC akım üreten ve şebeke frekansı 50 Hz güç kaynağına sahip geleneksel kaynak makineleri kaynak akımları 20ms(1periyod) ile kontrol edilebilirken, DC akım tekniğinin ve ardından orta frekans tekniğinin kullanılmasıyla kaynak süreleri daha iyi ayarlanabilir ve kaynak akımının kontrolü daha hassas hale gelmiştir. Daha yüksek akım ve daha kısa kaynak süresi kapasitör

direnç kaynağı ile uygulanmıştır. Şekil 2.20'de kapsitör direnç kaynağı ile yüksek akım değerlerine kısa sürelerde ulaşıldığı görülmektedir [7].



Şekil 2.21: Soğumaya Bağlı Elektrot Isısının Değişimi.

Elektrot çenelerinin takip hızı ve ivmelenmesi bunula birlikte elektrot çenelerinin rijitliği kaynak makinelerin mekanik karakteristiklerindendir. Eğer kabartı kaynağında elektrot takip hızı yavaş olursa kolayca fışkırma gerçekleşebilir [21]. Bununla birlikte özellikle nokta direnç ve dikiş kaynağında kaynak makinelerinin soğutma kapasite ve etkinliğinin yüksek olması önemlidir. Şekil 2.21'de gösterildiği gibi kaynak süresi arttıkça elektrot sıcaklığı artmaktadır [23]. Sıcaklığın artması difüzyon hızını arttıracağından elektrodun ömrü hızlıca kısalacaktır. Bu nedenle kaynak makinesinin soğutma kapasitesi yapılan kaynağın elektrotlarda oluşturduğu ısıyı hızlıca uzaklaştırabilecek etkinlikte olmalıdır.

3. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAK ÇEŞİTLERİ

Direnç kaynağı; iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda, basıncın tatbikiyle yapılan bir kaynak usulüdür. Malzemeden geçen elektrik akımının meydana getirdiği ısının dışında, herhangi bir ısı tatbik edilmemektedir. Isı, kaynak edilecek kısımlarda meydana gelir ve basınç kaynak makinasındaki elektrotlar veya çeneler vasıtasıyla uygulanır [1].

Elektrik direnç kaynağı için gerekli alçak gerilim ve yüksek akım şiddetindeki elektrik gücü, kaynak transformatörlerinden sağlanır. Basınç ise; hidrolik veya mekanik donanımlarla temin edilir [1].

3.1. Nokta Direnç Kaynağı

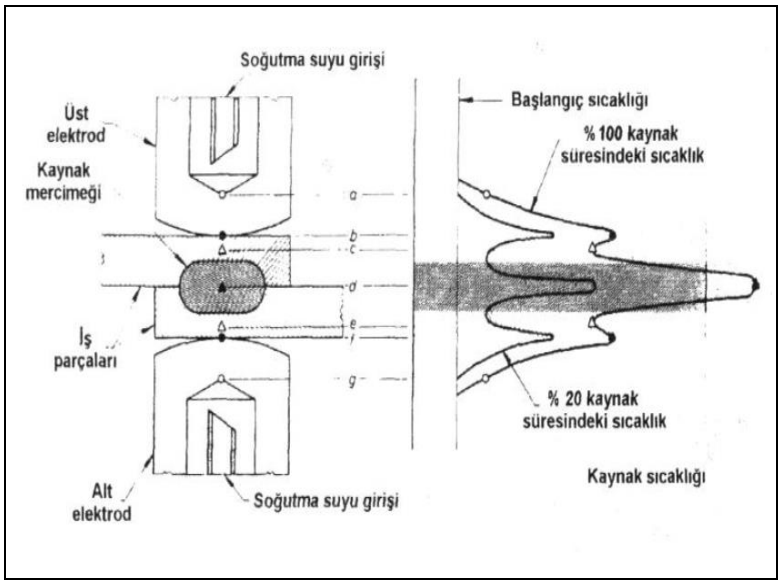
Nokta direnç kaynağı 3,2 mm kalınlığa kadar olan üst üste konumlandırılmış ve sızdırmazlık gerektirmeyen tasarıma sahip çelik sacların birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem bazen 6,35 mm ve daha kalın plakaların kaynağında kullanılmıştır. Fakat yöntem gereği sacların üst üste bindirilmesi ağırlığı arttırmaktadır ve ark alın kaynağıyla karşılaştırıldığında maliyetlidir [8].

Bu işlem mekanik perçinleme, vidalama gibi mekanik bağlantılara tercihen bakım için demontaj gerekmediği zamanlarda kullanılmaktadır. Bu yöntem çok hızlı ve ekonomiktir çünkü montaj için cıvata somun gibi parçalı bağlantı elemanlarına ihtiyaç yoktur [8].

Otomobiller, dolaplar, mobilyalar ve benzeri ürünlerdeki düşük karbonlu çelik saclı parçaların birleştirilmesinde yaygın olarak nokta direnç kaynağı kullanılmaktadır. Ticari olarak paslanmaz çelik, alüminyum ve bakıra çoğunlukla nokta direnç kaynağı yapılmaktadır [8].

Nokta kaynağı, direnç kaynağı türleri içerisinde en çok kullanılan türdür. Kaynatılacak parçalar iki bakır elektrot arasına alınır ve belirli bir baskı uygulanmasıyla elektrik akımının geçişi sağlanır. Şekil 3.1'de nokta kaynak makinesi temel bileşenlerini ve kaynak bölgesi kesiti verilmiştir [1]. Makine üzerindeki şalter ve zaman sayacı ile belirlenen süre boyunca, akım bir elektrottan diğerine akarken (1mm sac için bu süre yaklaşık 0,2 saniyedir) bu akıma karşı direnç, iki sac arasındaki temas noktasında en yükseğe ulaşır ve malzeme bu noktada ergimeye

başlar (Şekil 3.1). Elektrik akımının otomatik olarak kesilmesinden sonra kaynak banyosu, uygulanan basınç altında soğuyarak katılaşır ve iki sac malzeme sökülemez bir şekilde birleştirilmiş olur. Standart bir nokta kaynak makinesinin temel bileşenleri, bakır elektrotlara yük uygulamak için kullanılan mekanik bir sistem, şebekeden gelen gerilimi düşüren transformatör, bazı makinelerde akım kontrol cihazları ve bir zaman sayacından oluşur [3].

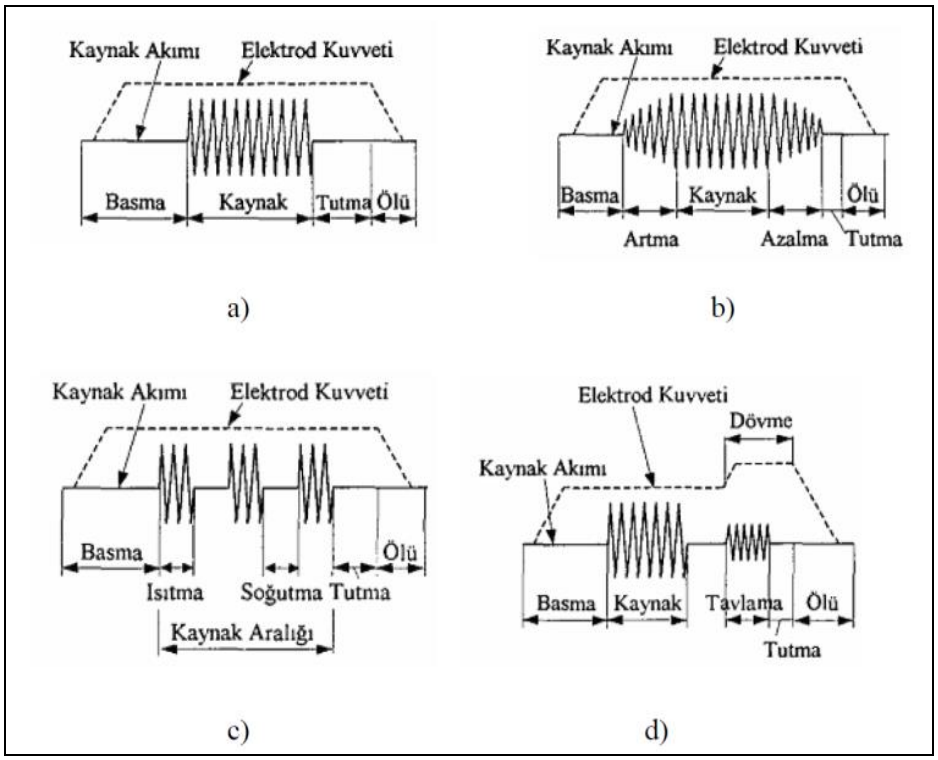


Şekil 3.1: Nokta Kaynağında Dirençler ve Sıcaklık Gradyanı.

Genel olarak nokta kaynağı, dört aşamadan meydana gelir:

i) Basma süresi: Elektrot kuvvetinin ilk uygulandığı an ile kaynak akımının verildiği ilk an arasında geçen süredir.
ii) Kaynak süresi: Kaynak akımının geçtiği zaman aralığıdır.
iii) Tutma süresi: Kaynak akımının kesilmesinden sonra, elektrot kuvvetinin etkisinin devam ettiği süredir.
iv) Ölü süre: Elektrotların iş parçası ile temasta olmadığı, zaman aralığıdır.

Şekil 3.2'de bu süreler ve bu sürelerde elektrot kuvvetinin değişim kombinasyonlarından oluşan kaynak programları şematik olarak görülmektedir [1].



Şekil 3.2: Kaynak Programları. a) Tek İmpulslı, b)Artan ve Azalan Akımla Isı Kontrollü Tek İmpulslı, c) Çok İmpulslı, d) Dövme İşlemiyle Tavlamalı Tek İmpulslı.

3.1.1. Nokta kaynağı Usulleri

Nokta kaynağı usulleri tek noktalı ve çok noktalı olmak üzere iki temel grupta toplanırlar. **Tek noktalı** kaynak, akımın uygulama periyodu boyunca bir kaynak noktası meydana gelecek şekilde yapılan nokta kaynağıdır. **Çok noktalı** kaynakta ise, akımın tatbik periyodu süresinde aynı anda iki veya daha fazla kaynak noktası meydana gelir. Çok noktalı kaynakta noktalar seri veya paralel olabilir [1].

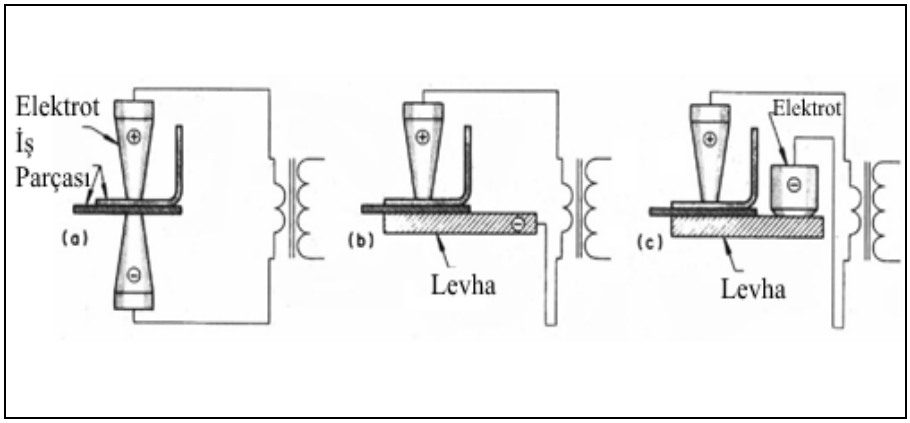
Bununla birlikte kaynak işleminin karşılıklı elektrotlar arasında yapılarak şöntleme etkisine yani akım kaçağına izin verilmeden bütün akımın kaynak havuzundan geçirildiği kaynak tipine **direkt** kaynak denir. Akımın bir kısmını iş parçasının üzerinden geçmesine izin veren yardımcı bir iletim elemanı kullanılarak yapılan kaynağa da **endirekt** kaynak denir.

3.1.1.1. Tek Noktalı Direkt Kaynak

Tek nokta kaynakları çoğunlukla direkt kaynakla yapılır. Şekil 3.3 bu tip kaynakta kullanılan düzenlemeleri şematik olarak göstermektedir [20]. Gösterilen

düzenlemelerin tümünde bir transformatör sekonder devresi bir nokta kaynağı yapmaktadır [24].

İki iş parçasının üst ve alt elektrotlar arasına sıkıştırıldığı en basit ve en yaygın düzenleme Şekil 3.3a)'da gösterilmiştir. Şekil 3.3b)'de, alt elektrot olarak geniş temas yüzeyine sahip iletken bir levha veya mandrel kullanılmaktadır; bu da alttaki iş parçasında yüzey işaretlemesini azaltmakta ve kaynaktan ısıyı çabukça uzaklaştırmaktadır ve iş parçasının şekli dolayısıyla da gerekebilmektedir. Şekil 3.3 c)'deki düzenlemede, alttaki iş parçasının altına iletken bir levha ya da mandrel aynı amaçla ancak ikinci bir üst elektrotla beraber kullanılmaktadır. Bu ikinci elektrodun görevinin yalnızca temas olup, kaynak olmamasından dolayı, aşırı ısınmayı önlemek üzere daha geniş olabilmektedir [24].



Şekil 3.3: Tek Noktalı Direkt Kaynak için Çeşitli Düzenlemeler. a) Direkt Kaynak , b) Direkt Kaynak, c) Endirekt Kaynak.

3.1.1.2. Çok Noktalı Direkt Kaynak

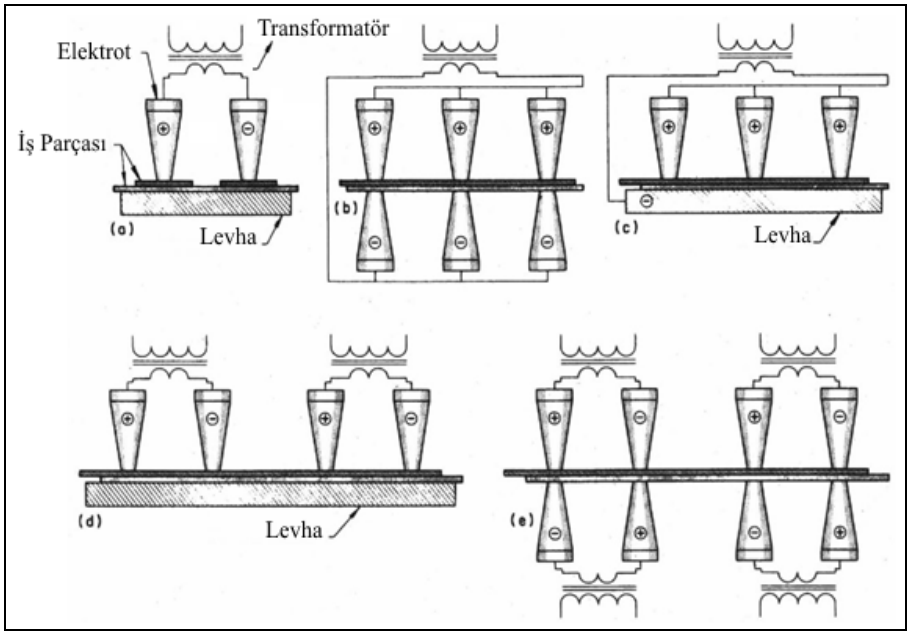
İki veya daha fazla nokta kaynağının aynı anda direkt olarak yapılmasında kullanılan sekonder devrenin üç düzenlemesi Şekil 3.4 a, b ve cde gösterilmiştir [20]. Şekil 3.4 a'da görüldüğü gibi bir transformatör sekonder devresi, iki üst iş parçasını bir alt parçaya bağlayarak iki nokta kaynağı yapacak şekilde düzenlenebilir. Bu uygulamada, levha ya da mandrel elektrik iletkenliğine sahip olmak zorunda değildir [24].

Bir tek transformatörün sekonder devresi, Şekil 3.4 b ve c'de görüldüğü gibi, iki iş parçasını birleştirerek iki, üç veya daha fazla nokta kaynağını aynı anda yapmak için düzenlenebilir. Devredeki her nokta kaynağında direncin aynı olmasını sağlamak için özel önlem alınmalıdır. Aksi takdirde, akım her kaynak için düzgün

olamaz. Uç şekli ve yüzey şartları her elektrot için aynı olmalıdır. Ayrıca, tüm elektrotların iş parçası üzerine uyguladığı kuvvet, iş metali kalınlığındaki eşitsizlikler ne olursa olsun, aynı olmalıdır. Kuvvet, yayla yüklenmiş elektrot tutucusu veya hidrolik eşitleyici sistem kullanılarak eşitlenebilir. Şekil 3.4 c'de görüldüğü gibi, iletken levha ya da mandrelin kullanımı alt iş parçası üzerindeki kaynak izlerini azaltır [24].

3.1.1.2. Çok Noktalı Endirekt Kaynak

Çok sayıda nokta kaynağının aynı zamanda yapılabilmesine olanak sağlayan iki düzenleme Şekil 3.4 d ve e'de gösterilmektedir. Şekil 3.4 d'de iki transformatör sekonder devresinin her biri iki nokta kaynağı yapmaktadır. Akımın bir bölümü, üst iş parçası boyunca, kaynak çekirdeklerini atlamaktadır. Dört nokta kaynağı, bu yolla, bir standart direnç kaynağı transformatörünün iki ayrı sekonder devresi kullanılarak, kolayca aynı anda yapılmaktadır. Bu tip birkaç transformatör aynı anda daha fazla sayıda nokta kaynağı yapabilmek için birleştirilebilir ya da iki sekonder akımdan biri aynı anda yalnızca iki kaynak yapmak için kullanılabilir [24].



Şekil 3.4: Çok Noktalı Direkt ve Seri Kaynak için Çeşitli Düzenlemeler.

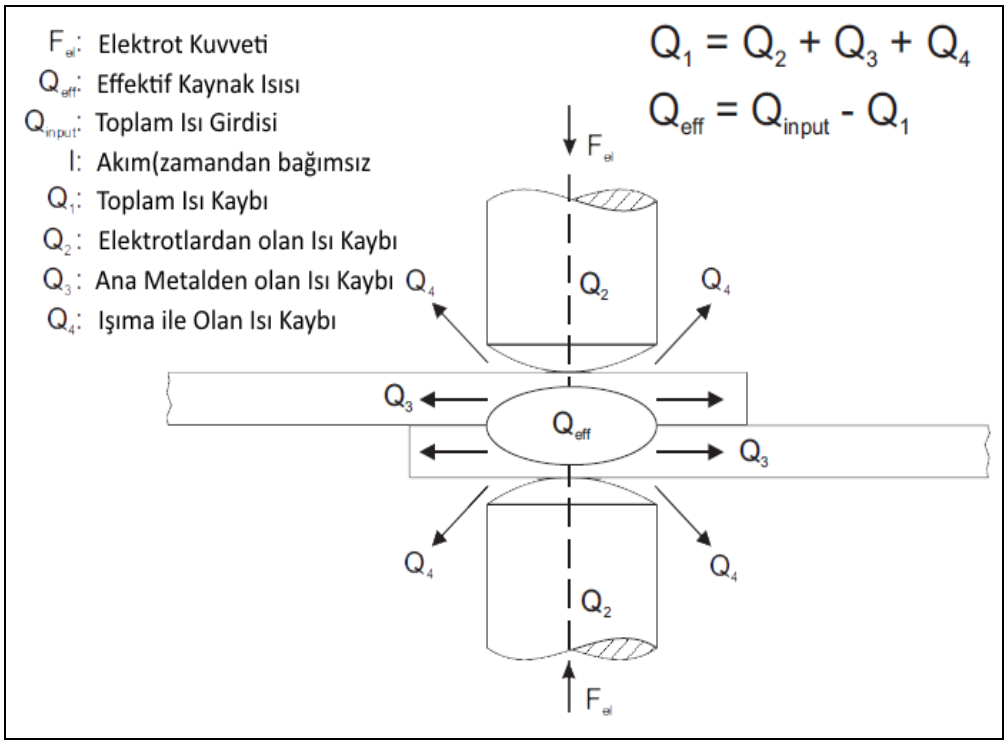
Şekil 3.4 e, çok noktalı endirekt kaynakta kullanılan diğer bir düzenlemeyi göstermektedir. Bu düzenlemede, her kaynak, her biri ayrı transformatör sekonder bobinine bağlı, zıt kutuplu karşıt bir çift elektrot arasında yapılmaktadır ve her

sekonder devre için sadece bir kaynak elde edilmektedir. Bu düzenleme, her nokta kaynağı çifti için iki sekonder bobinin gerilimlerinin birbirini takviye etmesinden dolayı, kaynaklarda yüksek gerilim sağlar. Bu düzenleme, ayrıca, Şekil 3.4 d'de gösterilen düzenlemede kullanılabilenden daha düşük kVA değerlerine sahip transformatörlerin kullanımına müsaade eder, fakat atlamayı kabul edilebilir bir değerde sınırlamak için tedbir alınmalıdır [24].

3.1.2. Nokta Kaynağı İşleminin Esasları

Direnç kaynağında gerekli ısı, yüksek kaynak akımları ile sağlanmaktadır. Isı üretim hızı, malzemenin direnci ve akım şiddetine bağlıdır ve (2.1)'deki eşitlik gereği ısı miktarı hesaplanır [1].

Kaynak esnasında elektrotlar iş parçalarına, önceden ayarlanmış zamanlarda ve hızlarda yaklaşır ve uzaklaşır. Elektrotların yaklaşma hızı yüksek olmalı, fakat elektrod yüzeylerinin deformasyonuna sebep olmamalıdır. Bölgesel olarak ısıtılan iş parçaları, kaynak işlemi esnasında hem genişler hem de büzülürler [1].



Şekil 3.5: Nokta Direnç Kaynağında Isı Dağılımı.

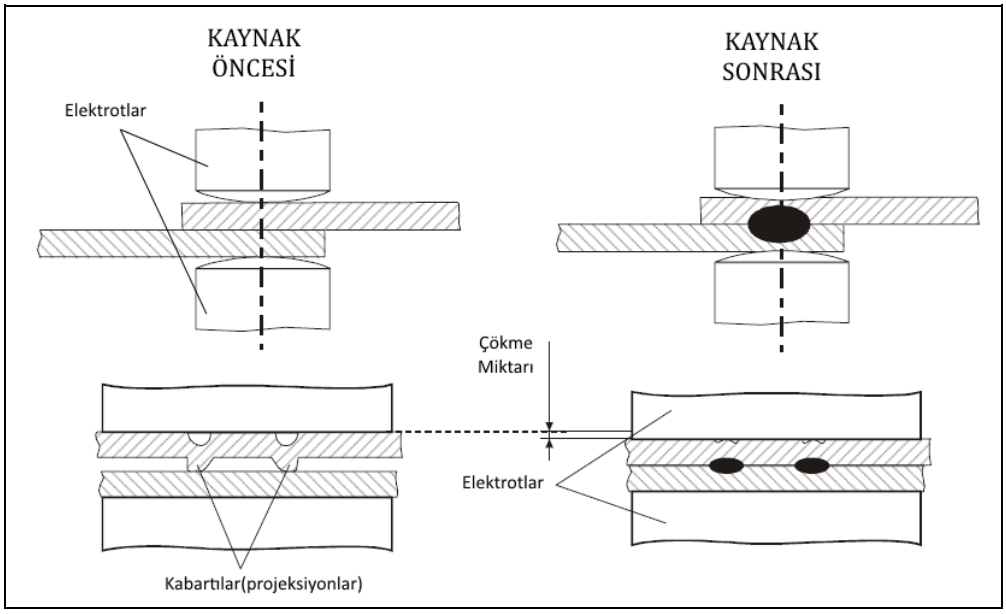
Kaynak makinasının sekonder devresi; kaynak edilecek iş parçaları da dahil olmak üzere, akımın akışını etkileyen bir seri dirençtir. Bu devre üzerinde herhangi

bir noktada üretilen ısı, o noktadaki dirençle doğru orantılıdır. Bu sebepten; sekonder devredeki elektriksel sistemler, ısıyı istenilen yerde üretecek ve diğer bölgeleri izafi olarak soğuk tutacak biçimde tasarlanmalıdır. Verilen bir akım değeri için, birim zamanda kaynak yerinde meydana gelen ısı miktarına şu faktörler tesir eder [1]:

i) Kaynak edilecek malzemenin direnci
ii) Elektrot malzemesinin direnci
iii) İş parçaları arasındaki temas direnci
iv) İş parçaları ile elektrotlar arasındaki temas dirençleri

Kaynak esnasında üretilen ısı dağılımı Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, iş parçalarına, elektrotlara, kaynak havuzuna ve çevreye gider [7].

Bu ısının bir kısmı parçaların kaynaklanacak yerlerinin eritilmesine harcanırken, bir kısmı da kayıp olarak yayılmaktadır. Isı kayıpları, kaynak zamanının artmasıyla artmaktadır [1].



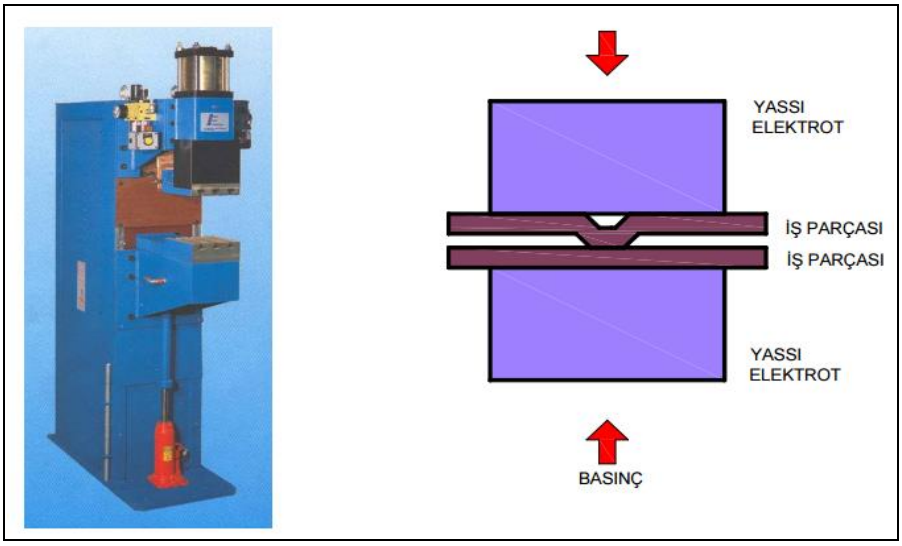
Şekil 3.6: Nokta ve Kabartı Direnç Kaynaklarının Karşılaştırması.

Kaynak esnasında geçen akım üzerinde, tatbik edilen basıncın ve parçaların yüzey düzgünlüklerinin de tesiri vardır. Kullanılan kaynak elektrodları saf bakır olduğunda iyi bir iletkendir. Fakat sertlikleri ve yumuşama sıcaklıkları düşüktür. Yüksek akım şiddeti, yüksek basınç ve yüksek kaynak hızlarında bakır alaşımları kullanılmaktadır. Bakır-Tellur, Bakır kadmiyum, bakır krom ve bakır tungsten gibi.

Genel olarak alaşımın sertliğinin artması, elektriksel ve direncini de arttırır. Bu nedenle herhangi bir uygulama için belirli bir alaşımın seçimi; onun mekanik özelliklerine göre değişen ısıl ve elektriksel özelliklerin esas alınması ile gerçekleştirilir [1].

3.1.3. Kabartılı Direnç Kaynağı

Kabartılı direnç nokta kaynağı, yöntem olarak nokta direnç kaynağına benzer. Nokta kaynağında kaynatılacak sac malzemeler üst üste bindirilip, elektrotlar arasında sıkıştırılıyor ve elektrik akımı geçirilmektedir. Bu yöntemle elektrot başlıklarının boyut ve şekilleri geçen akımı sınırlandırırken kabartılı nokta kaynağında akım kaynatılacak malzemelerin en az birinde bulunan kabartılarla sınırlıdır [3]. Şekil 3.6'da nokta direnç kaynağı sırasında oluşan kaynak havuzu iki sac arasında basınçla kontrol altında tutulurken kabartılı direnç kaynağında kabartı ergiyerek, çöker ve birleşme sağlandığı görülebilmektedir [7].



Şekil 3.7: Kabartılı Nokta Kaynak Makinesi ve Kaynak Bölgesi Detayı.

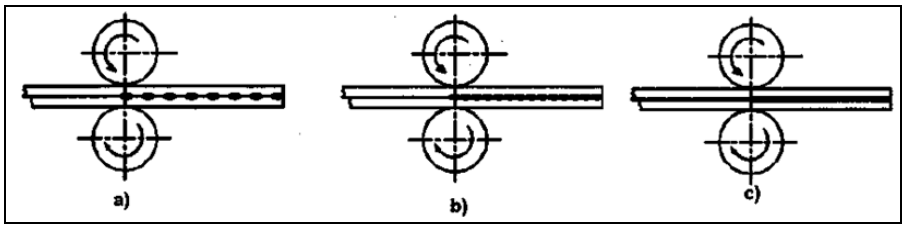
Kabartılı kaynak yönteminde kaynak bölgesi, kaynak yapılacak saclardan birinde bulunan kabartının olduğu bölgedir. Saclar üst üste bindirildiğinde Şekil 37'de gösterildiği gibi sadece kabartının olduğu noktadan birbirlerine temas eder. Bu noktadan geçen elektrik akımı kabartı üzerinde yoğunlaşır ve bu nedenle kabartı hızla ısınır. Isınmadan dolayı kabartı ergiyerek çöker ve iki sac arasında erimiş bir

bölge oluşur. Elektrik akımı kesilerek basınç uygulamaya bir müddet daha devam edilir ve kaynak tamamlanır [3].

Kabartılı nokta kaynak makineleri, temelde nokta kaynak makineleri ile aynıdır. Ancak bu yöntemde nokta kaynağında kullanılan elektrot tipleri yerine eşit basınç uygulanabilen yassı elektrotlar kullanılır. Kabartılı nokta kaynağı, saç yapılara küçük bağlantı parçalarının birleştirilmesinde kullanılır. Bu yöntem özellikle otomotiv sektöründe, sabit somunların şasiye bağlantılarında, ev aletlerinin vida bağlantılarında, büro mobilyalarında, makine parçalarının imalatında, dişli saplamalarda vb. pek çok alanda kullanılmaktadır. Kabartılı kaynak yöntemi inşaat sektöründe takviyeli beton uygulamalarındaki çelik hasırların üretiminde de kullanılmaktadır [3].

3.1.4. Direnç Dikiş Kaynağı

Direnç dikiş kaynağı, dönen elektrotlarla gerçekleştirilen, seri bir nokta kaynağı olarak tanımlanabilir. Birbirinin üzerine bindirilen parçalar temas yüzeylerinde elektrik akımı ve malzemenin bu akıma gösterdiği direnç nedeniyle oluşan ısı yardımıyla ergitilerek birleştirilir. Bu yöntem prensip olarak, nokta kaynağına benzer. Bu yöntemin diğer direnç kaynak yöntemlerine göre üstünlüğü, sürekli dikişler elde edilmesi ve bazı uygulamalarında sızdırmazlığın sağlanmasıdır. Donanım açısından farkı Şekil 3.8'de gösterilen yuvarlak elektrot formlarıdır. Tüm dünyada kullanılan standart direnç dikiş kaynak makinelerinin yanı sıra, özel ihtiyaçlardan doğan tasarımlara uygun kaynak makineleri de imal edilmiş ve bu tekniğin yararlılığı anlaşılmıştır [25].



Şekil 3.8: Elektrik Direnç Dikiş Kaynağı Uygulamaları. a) Süreksiz Dikiş b) Kısa Dinlenme Süreli Sürekli Dikiş c) Sürekli Dikiş.

Kaynaklanacak parçaların biçimlerine göre, özel elektrot tipleri de vardır. Dikiş kaynağında sızdırmaz bir bağlantı elde edilebilmesi, kaynak şeridinin genişliğine

bağlıdır. Kaynak şeridinin ideal genişliği, levha kalınlığına bağlı olarak şu formülle bulunur [3]

$$L=2(e+1) \tag{3.1}$$

- L: Şerit genişliği (mm) , e: Levha kalınlığı (mm)

İdeal kaynak dikişi elde edebilmek, kaynak akım şiddeti ve kaynak hızına da bağlıdır. Levha kalınlığına bağlı olarak, akım şiddeti ve kaynak hızı arasındaki bağıntı Tablo 3.1'de gösterilmiştir [1].

Tablo 3.1: Dikiş Kaynak Parametreleri.

Levha kalınlığı (mm)	Akım Şiddeti (amper)	Kaynak Hızı (m/dak) (v)
0,5	9250-9 75. v	9,5
1,0	10600-2260. v	4,7
1,5	11850-3800.V	3,10
2,0	12850-5550.V	2,30
3,0	15000-9600.V	1,55

3.1.4.1. Dikiş Direnç Kaynağı Uygulanışı ve Uygulama Alanları

Elektrik direnç dikiş kaynağının en önemli uygulamalarından biri benzin tanklarının imalatıdır. Otomobil endüstrisinde yakıt tanklarının sızdırmazlık özelliğim sağlamak emniyet açısından birinci derecede önemlidir. Direnç dikiş kaynağı, parçalar birbirine tek bir parçaymış gibi kaynadığı için ve seri imalatta otomatikleştiği zaman büyük kolaylıklar sağlaması nedeniyle otomobil sanayiinde tercih edilmektedir. Yöntemin uygulama alanları çok geniştir. Uygulama konusunda etkili tekniğinden ve alınan sonuçlar sayesinde bu imal usulü genelde tercih edilmektedir. Kaynak dikişinin sürekliliği ise akımın uygulama süresine bağlıdır. Birleştirilecek parçalar, bindirilmiş şekilde iki bakır elektrot arasına alınır. Elektrotlarının belirli bir kuvvetle bastırmasından sonra kaynak akımı geçerlidir. Ayarlanan süre boyunca bu akım bir elektrotların diğerine geçer, iki saç arasındaki

temas noktası, en yüksek dirence sahiptir ve ısınan malzeme bu noktada ergir. Elektrik akımının uygulanış süresine göre farklı dikişler elde edilir. Şekil 3.8'de farklı impulslarda yapılmış elektrik direnç dikiş kaynak uygulamaları görülmektedir [25].

Kullanılan elektrot çaplan 50-600 mm arasında değişmektedir. Kullanılan elektrot malzemesi ise, soğuk çekilmiş bakır veya ısıl işlem görmüş sert nitelikteki bakır alaşımlarıdır (bakır-kadmiyum, bakır-krom, bakır-tellür). Kaynak genişliği temel olarak ince metal kalınlığından daha büyüktür. Bu da elektrotun kaynak sırasında yıpranma değerini minimuma indirmektedir. Elektrotların soğutulması ya merkezi kanallardan su dolaştırılarak veya elektrot tekerlerinin yüzeylerine su püskürtülmesi ile yapılmaktadır. Çeliklerin kaynatılmasında da soğutma sıvısı olarak %5 oranında bor yağı, %95 oranında su kullanılır.

Dikiş kaynağının kalitesinde elektrot biçim ve özelliklerinin büyük bir etkisi vardır. Elektrotların görevi genel olarak şunlardır:

- Kaynak akımını iş parçası üzerine yönelterek elektrot değme yüzeyinin çapına göre akım geçişini ayarlar.
- Baskı kuvvetini kaynak bölgesine ileterek elektrot basıncını oluşturur.
- Kaynak bölgesinde oluşan ısıyı soğutarak parça dış yüzeyinin erimesine engel olur.
- Kaynak yapılacak parçaları kaynaktan evvel birbirine sabitleyip düzgün olmalarını sağlar.

Uygulamalarda uygun elektrot seçilmeme koşullarında hata oluşum eğilimi de yükselmektedir. Elektrot biçim ve boyutları, ısı iletkenliği, akım yoğunluğu, kontak direnci ve kaynak noktası için ön görülen boyutlara göre seçilmektedir. Elektrotlardan beklenen özellikle şöyle sıralanabilir:

- Yüksek elektrik ve termik iletkenlik
- Yüksek mekanik dayanım
- Yüksek sıcaklıkta sertlik
- Kaynak noktasında yapışma eğilimi olmaması
- Uygun bir uç biçimi ve bu kısmın mutlak soğutulması

Kaynak süreci içinde elektrotların uç biçimlerinin şekil değiştirmeden koruması gereklidir. Yetersiz veya hatalı soğutma, elektrotların yüksek sıcaklıklara kadar tavlanmasına neden olabilir. Bu durumda elektrot kuvvetinin de etkisi ile uç biçimini yassılaşma süresi kısalmaktadır.

Direnç kaynağında en önemli unsurlardan biri elektrotların kaynak yapılacak parçaların üzerine uyguladığı basınçtır. Bu basınç:

- Kaynatılacak parçaların birbirine sıkı olarak bastırılmasını sağlar.
- Yüzeyde bulunan tabakaların elektrot ile bastırılarak delinip geçilmesini sağlar.
- Parçaları bir arada tutup akımın elektrotlar arasındaki bölgeye naklini sağlar.
- Kaynakta çıkabilecek süngerleşme ve çatlama ihtimalini azaltır.
- Düşük temas direnci yaratarak elektrotlar ile malzemenin yapışmasını önler.
- Malzemede kaynak sırasında billur şeklinde meydana gelen değişiklikleri kaynaktan sonra birleşik yüzeyde yeniden oluşturmayı sağlar.
- Elektrotların bakımı ve kullanımı sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır:
- Elektrot uçlarının sık sık temizlenip bu şekilde kullanılmasına dikkat edilmeli.
- Elektrotların düzeltilmesinde eğe kullanılmamalıdır.
- Elektrodun kullanım zamanını uzatmak açısından parça yüzeyleri temiz olmalıdır.
- Elektrotların takılmasında çekiç ve benzeri takımlar kullanılmamalıdır.
- Dikiş kaynak makinası disklerini düzeltilmesi makine üzerinde yapılmamalıdır.

3.1.4.2. Dikiş Kaynağının Farklı Uygulamaları

3.1.4.3. Sürekli Akımla Dikiş Kaynağı

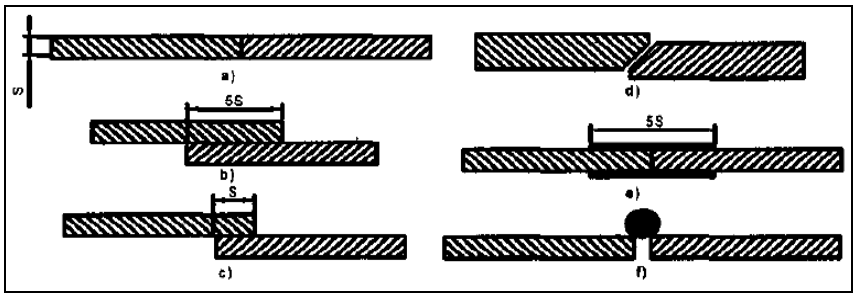
Akım kesilmesi olmadan ve sabit akım şiddeti ile dikiş kaynağı, sadece temiz saçların, 1 mm'ye kadar toplam kalınlıklarında uygulanır. Eşit olmayan malzeme kalınlıklarında, akım kesilmesi tehlikesi oluşacağından, dikişlerde kavrulma delinmeler ortaya çıkabilmektedir [25].

3.1.4.4. Kesintili Akımla Dikiş Kaynağı

Kesintili akımla direnç kaynağı ile çeşitli malzemeler birleştirilmekte, uygulamada elektrotlar sabit çevre hızına sahip bulunmaktadırlar. Temiz olmayan yüzeylerin kaynağında da iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu tür işlemde akım devreden periyodik olarak geçirilmektedir [25].

3.1.4.5. Kademeli, Gidiş-Dönüş Esasına Göre Dikiş Kaynağı

Kademeli gidiş dönüş esasına göre dikiş direnç kaynağı, kesintili dikiş kaynağı ile karşılaştırılabilir. Bu uygulamada elektrotlar, kaynaktan sonra her bir nokta için, küçük bir geri hareketi yapar ve o nokta tekrar haddelenerek geçilir. Günümüzdeki uygulamalarda yönteme fazlaca rastlanmaktadır [25].



Şekil 3.9: a) Alın Dikişi, b) Bindirme Dikiş, c) Kısa Bindirmeli Dikiş, d) Çapraz Alın Dikişi, e) Folyo İlaveli Alın Dikişi, f) Tel İlaveli Alın Dikiş.

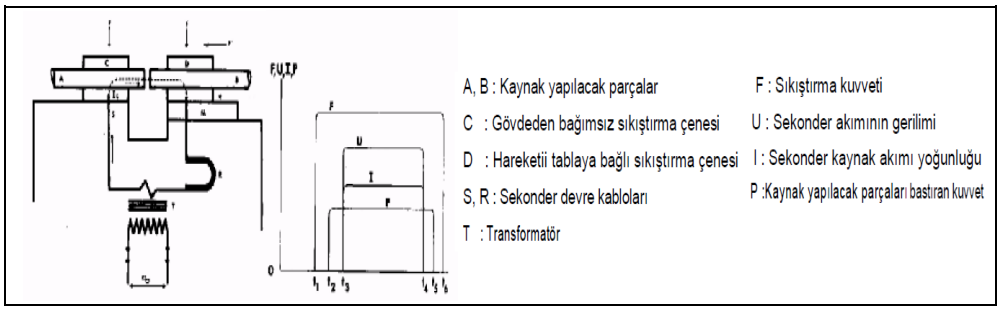
3.1.4.6. Dikiş Direnç Kaynağında Dikiş Biçimleri

Uygulamalarda, dikiş güveni yönünden değişik bindirme biçimlerinden yararlanılmaktadır. Bindirme boyu 5 S (Şekil 3.9) olduğunda malzeme dayanımının % 90 - 100'üne ulaşılabilmektedir. Daha az güven gereken uygulamalarda, bindirme aralıktan daha kısa tutulabilirse de, kaynak hatası oluşum ihtimalini azaltmak için "s" kalınlığının altına inilmemesi gerekir. Bu biçim (Şekil 3.9 c), elektrot kalınlığı da dikkate alınarak, toplam kalınlık 1,2 mm'ye kadar uygulanır. Bu oluşturulan dikişlerde dayanım, ana malzemeden yaklaşık %5 - 15 daha az olarak ortaya çıkmaktadır. Alın birleştirmelerinde (Şekil 3.9 a), alın yüzeylerinin çok iyi bir ön hazırlama işlemine tabi tutulmuş olması gerekmektedir. En iyi şartlarda ana malzemenin % 6O'ı kadar bir dayanıma ulaşılmaktadır. İlave telle yapılan birleştirmeli dikişlerde (Şekil 3.9 f), sonuç ve işlemin yapılışı açısından her duruda

önerilmez. İşlem sonu saçlar kısmen kaynak edilmiş olmaktadır. Kaçık alın birleştirmeli dikişlerde (Şekil 3.9 d) her ne kadar iyi dayanım değerlerine ulaşırsa da ön hazırlama işlemlerinin fazlalığının maliyete yansıması nedeniyle her durumda başvurulmamaktadır. Folyo ilave malzemesi ile yapılan alın dikişlerinde ise (Şekil 3.9 e), yüksek dayanım ve iyi bir dış görünüm elde edilmektedir. Uygulama genellikle alaşımsız ve alaşımlı çeliklerin birleştirilmelerinde başvurulmaktadır. İşlemde alın alına getirilen ana malzemelerin eş kalınlıkta olmaları ön şart olarak gerekli bulunmaktadır [25].

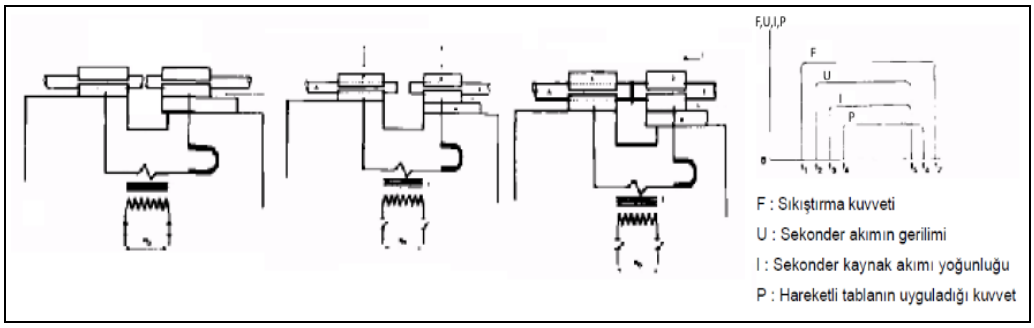
3.1.5. Basınçlı Alın Kaynağı

Kaynak edilecek parçalar, kaynak transformatörünün kutuplarına elektriksel olarak bağlanmış çeneler vasıtasıyla sıkıştırılır (Şekil 3.10). Sıkıştırma çeneleri, sabit tezgahtan bağımsızdır [1].



Şekil 3.10: Basınçlı Alın Kaynağı Makinesinin Prensibi ve Akım Yoğunluğu ile Kuvvetin Zamanla Değişimi.

Kaynak işlemi esnasında; kuvvetli bir şekilde parçalar birbirine bastırılır. Bu esnada parçalara sekonder akım uygulanmamıştır. Sekonder devre akımı, parçaların sıkıştırma çenelerinin dışında kalan kısımları üzerinde kapanır. Parçaların temas yüzeylerinde direnç yüksek olduğundan, bu bölgelerde erime başlar. Aynı anda parçaların, sıkıştırma kuvvetine karşı mukavemetleri azalır. Böylece plâstik hale gelen ve eriyen uçlar birbirine kaynar. Uygulanan basınçlar 0,5 ilâ 1,2 kg/mm2 arasındadır. Parçaların alınları, oldukça düzgün olmalıdır [1].



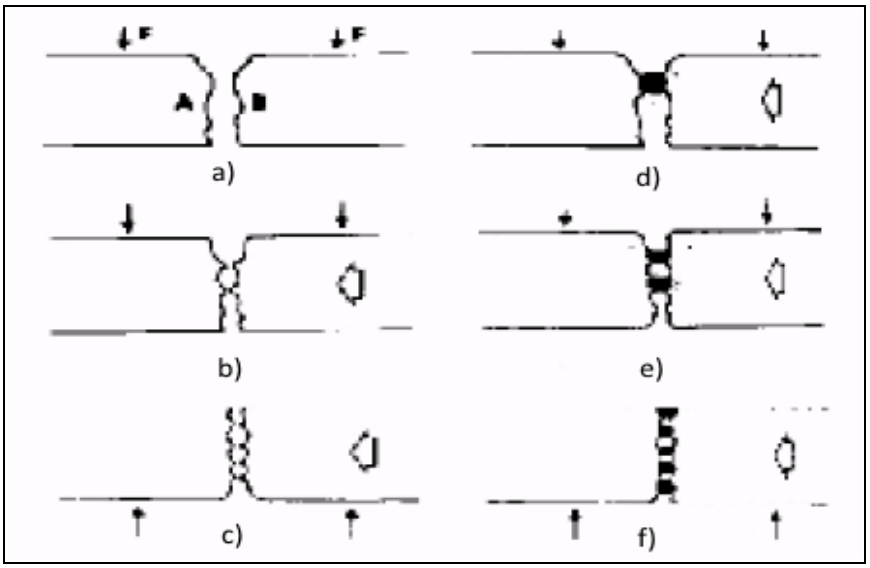
Şekil 3.11: Yakma Alın Kaynağı Safhaları ve Kaynak Parametrelerinin Zamanla Değişimi.

3.1.6. Yakma Alın Kaynağı

Kaynak edilecek parçalar, çeneler vasıtasıyla sıkıştırılır. Bu çeneler kaynak makinasının sekonderiyle bağlantılı olup, kaynak akımının sürekliliğini sağlarlar [1]. Kaynak işlemi, şu şekilde yapılır [3]:

- Parçalar birbiri ile temas etmeden, çeneler arasına sıkıştırılır.
- Transformatöre, dolayısıyla parçalara akım tatbik edilir.
- Hareketli tabla yavaş yavaş hareket eder.
- Tabla hareketinin devamıyla, parçalar birbiriyle temas eder ve sekonder elektrik devresi kapanır.
- Parçaların temas noktalarında kıvılcımlar çıkarak, erime başlar. Böylece parçaların alınları kaynak sıcaklığına ulaşır.
- Tablanın ani hareketiyle birbirlerine temas eden alınlarda kaynama meydana gelir. Bütün bu safhalar, Şekil 3.11'de görülmektedir.

Yakma alın kaynağında kaynak sıcaklığına ısıtma, dirençle ısıtmadan farklıdır. Parçaların alın yüzeylerinde bulunan pürüzler, iki yüzey arasında yanmaların (kıvılcımların) oluşmasına sebep olur. Pürüzlerin temasından doğan basma çok zayıf olduğundan, temas noktalarının direnci çok yüksektir [1].



Şekil 3.12: Yakmanın safhaları. a) Hareketli Tablanın İlk Hamlesi, b) İki Pürüzün Teması, c) Fışkırma Ve Krater Oluşumu, d) Yeni Kraterlerin Teması, e) Yeni Kraterlerin Oluşumu, f) Yanmanın Bütün Kesite Yayılması.

Çok yoğun akım geçirildiğinde, pürüzler kuvvetli olarak ısınır ve erimeye başlarlar. Erime halindeki parçacıklar patlar ve yanan zerrecikler dışarı fırlar. Fırlayan bu zerreciklerin yerlerinde kraterler (çukurcuklar) ve yeni pürüzler meydana gelir. Bu pürüzler üzerinde de benzer yanma ve patlamalar olur. Böylece, kıvılcım bütün yüzeye yayılır (Şekil 3.12). Erime ve patlamalar sebebiyle meydana gelen malzeme kaybı, hareketli tablaların yaklaşmasıyla karşılanır [1].

Yanmanın bütün yüzeyi kaplaması ve birleştirilecek yüzeyin tamamının erimesinden sonra, tablanın ani hareketiyle yüksek sıcaklıktaki yüzeyler birbirine bastırılır. Böylece pürüzlerin temas dirençleri ortadan kalkar ve kıvılcımlanma da biter. Kıvılcımlanma süresi; malzemenin ısıl iletkenliğine, parçaların kesitine, kıvılcımlanma çevrimine ve sekonder devre gücüne bağlıdır [1].

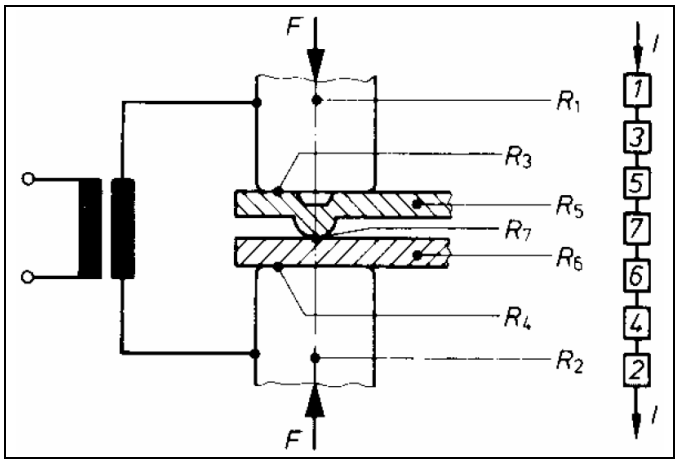
4. PROBLEMİN TANIMLANMASI VE YÖNTEM GELİŞTİRME

Bu tez çalışması 3130849 no.lu Teydeb 1501 projesinin 1. paketini kapsamaktadır. Proje, kabartılı direnç kaynağı ya da projeksiyon kaynağı olarak anılan bağlantı elemanlarının ya da sacların üzerlerindeki bir kabartı yardımıyla elektrik direnç kaynağı kullanılarak birleştirilmesi sırasında meydana gelen çapakları ve fışkırmayı azaltmaya yöneliktir. 1. Paketinin kapsamı ise kabartı/projeksiyon kaynağı sırasında oluşan fışkırma ve çapaklanmanın literatürde ve uygulamada ölçen bir cihaz yada cihazlar yardımıyla toplanan veriler neticesinde elde edilen verileri/sonuçları değerlendirmeye yönelik bir yaklaşıma rastlanmamıştır.

Kabartılı/Projeksiyon kaynağı bağlantıyı sağlayan kaynak kabartıları ergimesi diğer direnç kaynakları gibi kapalı ve kontrol altında bir durumu yoktur. Bu sebeple kabartı/projeksiyon kaynağında fışkırma ve çapaklanma riski yüksek olup, uygulamada da karşılaşılan ciddi bir sorundur. Kaynak bölgesinde ergiyen metalin fışkırarak uzaklaşması sonucu kaynak kuvvetinde azalma görülmesi başlıca sorunlardan biridir. Kabartı/Projeksiyon kaynağı cıvata, somun, vb. bağlantı elemanlarının çelik saclar üzerine montajında kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu bağlantı elemanlarını kaynağında oluşan bu fışkırma bağlantı elemanlarına yapışıp çapak oluşturabilmektedir. Eğer bu çapağın bu bağlantı elemanlarının işlev gördüğü diş gibi unsurlarda oluşması durumunda bağlantı elemanı montajı gerçekleştirilemeyebilir. Dişlerinde çapak olan cıvata/somun montaja zorlandığında dişler sıyrılma suretiyle zarar görecek; cıvata veya somun işlevini yerine getiremez hale gelecektir. Özellikle otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılan bu yöntemle kaynatılmış cıvata veya somunlar bir emniyet parçası olarak hizmet veriyorsa, can kayıplarına kadar giden ölümcül sonuçlar doğurma riskini taşmaktadır. Bu ciddi sorunlara çözüm arayan 3130849 no.lu Teydeb 1501 projesinde fışkırma ve çapaklanmayı sayısal hale getirip, bir skala veya endeks tanımlamak projenin ilerlemesi için kritik bir aşamadır.

4.1. Kabartılı/Projeksiyon Direnç Kaynağı Üzerine Detaylı İnceleme

Kabartı kaynağı, elektrik akımının ve kuvvetin, birleştirilecek parçalara düz ve büyük ölçülü elektrotlarla taşındığı bir direnç basınç kaynağı yöntemidir. Kabartı şekli, birleştirme bölgesinde bir akım yoğunlaşması etkisi yapar. Kabartı, kaynak sırasında elektrot kuvveti ve akım sayesinde ısınarak büyük ölçüde yeniden düzleşir ve kaynak bölgesinde çözülmez bir bağlantı oluşturur. Şekil 4.1'de kabartı/projeksiyon kaynağı sırasında olan dirençler gösterilmektedir [26]. Isı etkisi, kısmi dirençlerin (R1 ila R7) toplamıyla ve akımın karesiyle orantılıdır (2.1).



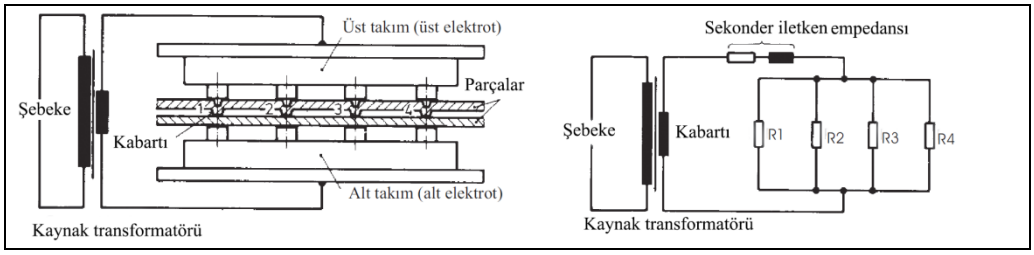
Şekil 4.1: Kabartı Kaynağında Kısmi Dirençler. R_1 ve R_2 Elektrot Dirençleri, R_3 ve R_4 Elektrot-Çelik Sac Temas Direnci, R_5 ve R_6 Çelik Sac Malzeme Direnci, R_7 Çelik-Çelik Temas Direnci.

Kaynak çekirdeğinin oluşumunda sadece R5, R6 ve R7 dirençleri gerekli ısı miktarını üretir. Kaynak yapılacak parçalar arasındaki R temas direnci, kabartı formundan, baskı kuvvetinden ve parçaların yüzey durumundan etkilenir. Kaynağın başlangıcında R5 ve R6 malzeme dirençleri nispeten küçük olduğundan temas bölgesinde aşırı ısınmanın yol açtığı sıçramadan kaçınmak için, R7 direncinin temiz sac yüzeyi ve yüksek baskı kuvveti ile uygun sınırda tutulması gerekir. Diğer kısmi dirençlerin, ısı kaybına ve aşınmaya yol açmaması için mümkün olduğu kadar düşük tutulmaları gerekir. Elektrotların soğutulması gerekir. Elektrotların ve parça yüzeylerinin temiz olmasına da dikkat edilmelidir. Oluşan ısının bir kısmı, ısı iletimi yoluyla kaybolur. Büyük kısmı ise soğutulan elektrotlara iletilir. Artan sac kalınlığıyla bir kısmı da parçaya yayılır. Isı kaybı özellikle uzun kaynak sürelerinde önemli hale

gelir. Yetersiz kaynak akımları sadece kaynak süresinin uzatılmasıyla dengelenebilir. Bu nedenle doğru ayar parametreleri (akım, kaynak süresi, elektrot kuvveti), tatminkâr bir kabartı kaynağı birleştirmesini gerçekleştirmek için en önemli faktörlerdir. Kaynak yapılan kabartı, mercek şeklinde bir kaynak çekirdeği oluşturur. Kaynak işlemine bağlı olarak değişen bir ITAB (Isının Tesiri Altındaki Bölge = Heat Affected Zone (HAZ) = Wärme einflusszone (WEZ) oluşur. Bu bölgede malzeme özellikleri değişmiş ancak kaynak olmamıştır [26].

4.2. Kabartı Direnç Kaynağının Özellikleri

Kabartı kaynağı, tipik bir seri üretim yöntemidir. Kaynak ekipmanın yapısına ve gücüne göre elektrotların bir açılıp kapanmasında Şekil 4.2'de gösterildiği üzere bir veya birkaç kabartı aynı anda kaynak yapılabilir [26]. Kabartılara akım iletimi, iki veya tek taraflı olabilir. Kabartı kaynağı kabartı sayısına bağlı olarak tek ve çoklu kabartı kaynağı olarak ikiye ayrılmaktadır [26].



Şekil 4.2: Çoklu Kabartı Kaynağının Şematik Görünüşü ve Prensip Şeması.

4.3. Kabartının Deformasyonu (Yeniden Düzleşmesi)

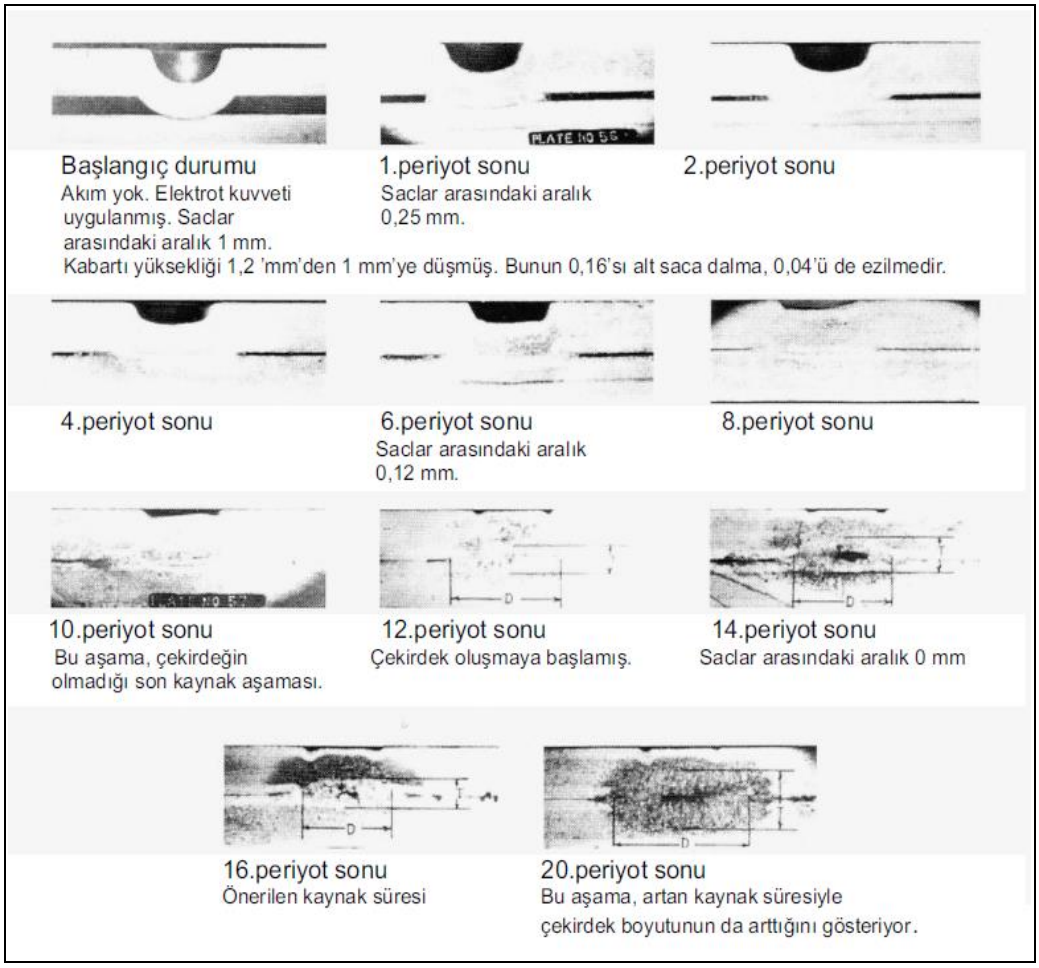
Bir malzeme kısmının deformasyonuyla oluşturulan kabartı, kaynak işlemiyle yeniden düzleştirilir. Bu deformasyon, sacın tek tarafında yani kabartının oluşturulduğu tarafta meydana gelir. Diğer parça tarafındaki yüzey çok az miktarda değişir. Sacların bu bölgede değişimi, örneğin sonradan yapılan bir laklama işleminin bozulmasına yol açar [26].

4.4. Dayanım

Bir kaynaklı bağlantının taşıma davranışının ölçümü, kırılmayla sonuçlanan zorlama ile anlaşılabilir. Çekme-makaslama deneyi, titreşim deneyi, ayırma deneyi,

burulma deneyi, içyapı incelemesi gibi tüm tahribatlı deneyler uygulanabilir. Kabartılı kaynak bağlantısının hesaplanmasında genellikle çekme-makaslama deneyinin sonuçları kullanılır. Ayrıca kaynak çekirdeğinin aşağıdaki değerlerine de bakılmaktadır. Şekil 4.3'te periyod periyod kabartının durumu gösterilmiştir [26]:

- Çekirdek çapı D (tahribatlı muayene ile elde dilen, ortalama nokta çapı)
- Çekirdek kalınlığı T (birleşme düzlemine dik ölçülen kaynak çekirdeğinin en büyük kalınlığıdır.



Şekil 4.3: Kabartı Direnç Kaynağında Kaynak Çekirdeğinin Oluşumu.

4.5. Parametreler

Kaynak makinasında en az üç parametre olan elektrot kuvveti, kaynak akımı ve akım süresi değerleri ayarlanır. Belirli malzemeler, parça kalınlıkları ve yüzeyleri, ilave ayarlar gerektirir. Bunlar arasında akım yükselmesi, akım aralık süresi, akım

impuls sayısı, ön ve son tavlama ve akım-kuvvet programının değerleri sayılabilir. Diğer parametreler şunlardır: Kabartının geometrisi, kabartı sayısı, kabartıların düzeni, makinanın elektriksel işletme davranışı [26].

4.5.1. Elektrot Kuvveti

Elektrot kuvveti temas direncini ve dolayısıyla kabartı kaynağında ısı üretimini etkiler. Kabartının geometrik şekline, malzeme kalınlığına, kaynak yapılacak kabartı yüzeyine ve sayısına göre belirlenir. Gerekenden daha büyük bir elektrot kuvveti veya elektrodun gerekenden daha sert inişi kaynak akımı etkimeden önce kabartıyı düzleştirebilir [26].

4.5.2. Kaynak Akımı

Kaynak akımı, kaynaklı bağlantının oluşumunda en önemli parametredir. Isı üretimi, kaynak akımının karesiyle orantılı olarak artar (Denklem 2.1). Akım şiddeti olarak elektrik akımının efektif değeri geçerlidir. Kaynak akımının belirlenmesinde, kabartının şekli, parça kalınlığı, yüzey durumu ve aynı anda kaynak yapılacak kabartı sayısı göz önüne alınır. Gerekli dayanım değerine ulaşabilmek için, kaynak akımı, elektrot kuvvetine ve kaynak süresine bağlı olarak optimize edilir [26].

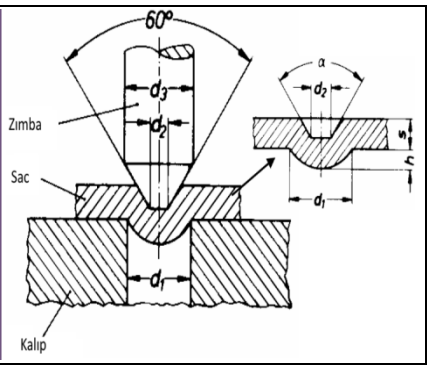
4.5.3. Akım Süresi

Akım süresi, kaynak akımının parçadan aktığı süredir. Genel olarak periyod cinsinden ölçülür (50 Hz'lik bir şebeke frekansında 1 Periyot 0,02 saniyedir) [26].

4.6. Kabartı Kaynağında Görülen Kabartı Çeşitleri

Kabartı tipleri temelde üçe ayrılmaktadır: Metal saclara çeşitli formlarla oluşturulan kabartılar, kaynak için üretilen cıvata, somun, saplama vb. elemanların üzerinde üretilen dolgu kabartılar ve silindir çubuk, boru vb. malzemelerin kendi yapısından gelen doğal kabartılar.

Sac kalınlığı S		Kabartı çapı	Kabartı yüksekliği	Istampa çapı	Açı
1. Sıra	2. Sıra	d_1 +0.1 0	h 0 - 0.1	d_2	α
≤ 0.5	-	1,6	0,4	0,5	60°
> 0,5 ≤ 0,63	-	2,0	0,5	0,63	
> 0,63 ≤ 1,0	-	2,5	0,63	0,8	
> 1,0 ≤ 1,6	> 0,63 ≤ 1,0	3,2	0,8	1,0	
> 1,6 ≤ 2,5	> 1,0 ≤ 1,6	4,0	1,0	1,25	
-	> 1,0 ≤ 2,5	5,0	1,25	1,6	
-	> 2,5 ≤ 3,2	5,6	1,4	1,8	



Şekil 4.4: Sac Çelikler İçin Dairesel Kabartı Ebatları ve Kalıp Ölçüleri.

4.6.1. Metal Saclarda Oluşturulan Kabartılar

Metal saclara oluşturulan kabartı dairesel, uzun ve halka olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

4.6.1.1. Dairesel Kabartı

Dairesel kabartıya ait kabartı ölçüleri ve sacda kabartıyı oluşturmak için kullanılacak kalıp bilgileri Şekil 4.4'teki gibidir [27]. Kalıbın ve kabartının anma çapı aynıdır. Zımba çapı (d3), kalıp delik çapı (d1) ile aynı veya biraz daha büyüktür [26].

4.6.1.2. Uzun Kabartı

Uzun kabartıya ait kabartı ölçüleri ve sacda kabartıyı oluşturmak için kullanılacak kalıp bilgileri Şekil 4.5'teki gibidir [27].

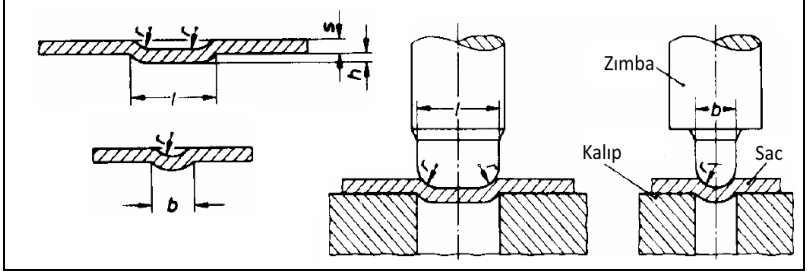
Kabartının, zımbanın ve kalıbın anma ölçüleri l ve b aynıdır. Zımbanın ölçüleri, biraz daha küçük ve kalıbın ölçüleri biraz daha büyüktür [26].

4.6.1.3. Halka Kabartı

Halka kabartıya ait kabartı ölçüleri ve sacda kabartıyı oluşturmak için kullanılacak kalıp bilgileri Şekil 4.6'teki gibidir [27].

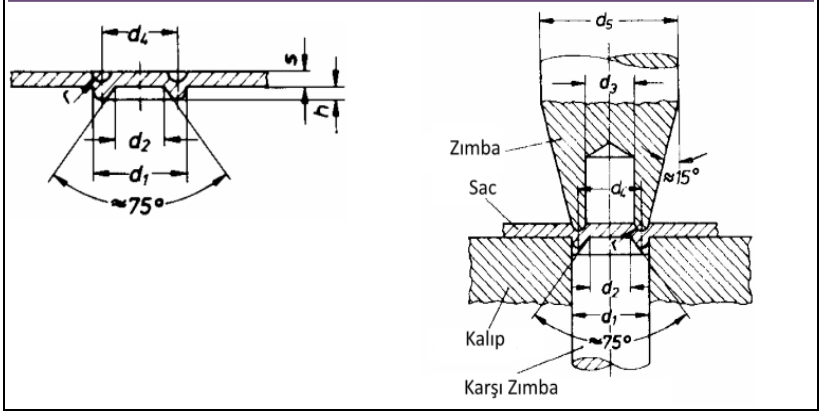
Kalıbın ve halka kabartının anma çapları aynıdır. Zımba çapı (d_5), kalıbın delik çapı (d_1) ile aynı veya biraz daha büyüktür [26].

Sac kalınlığı s	Kabartı boyu l_{min}	Kabartı genişliği b	Kabartı yüksekliği h 0 -0.1	r
≤ 0.5	3,2	1,6	0,4	0,5. b
> 0,5 ≤ 0,63			0,5	
> 0,63 ≤ 1,0			0,63	
> 1,0 ≤ 1,6	6,3	2,5	0,8	
> 1,6 ≤ 2,5	8,0	3,2	1,0	
> 2,5 ≤ 3,2	10,0	4,0	1,25	



Şekil 4.5: Sac Çelikler İçin Uzun Kabartı Ebatları ve Kalıp Ölçüleri.

Sac Kalınlığı s	kabartı çapı d_1 +0,1 0	d_2	d_3 2)	d_4	r 2)	h 0 - 0,1
0,5 ≤ 0,8	3,0	1,6	1,7	2,3	0,3	0,4
>0,8 <1,0	4,0	2,0	2,2	3,0	0,4	0,5
1	4,5	2,0	2,25	3,25	0,5	0,5



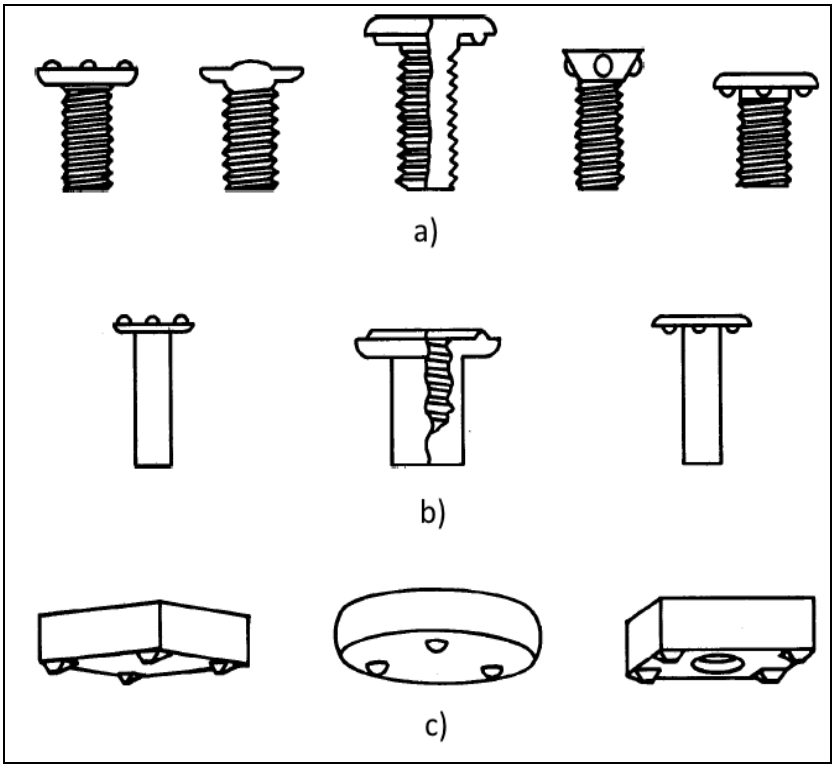
Şekil 4.6: Sac Çelikler İçin Halka Kabartı Ebatları ve Kalıp Ölçüleri.

4.6.2. Doğal olmayan Kabartılar

Sac metallere kaynatılmak üzere üretilen kaynak cıvata, somun, pim, saplama, boru vb. bağlantı elemanlarına dövme, talaşlı imalat, kesme ve darbeyle yoluyla oluşturulan kabartılardır.

4.6.2.1. Dövmeyle Üretilen Kabartılar

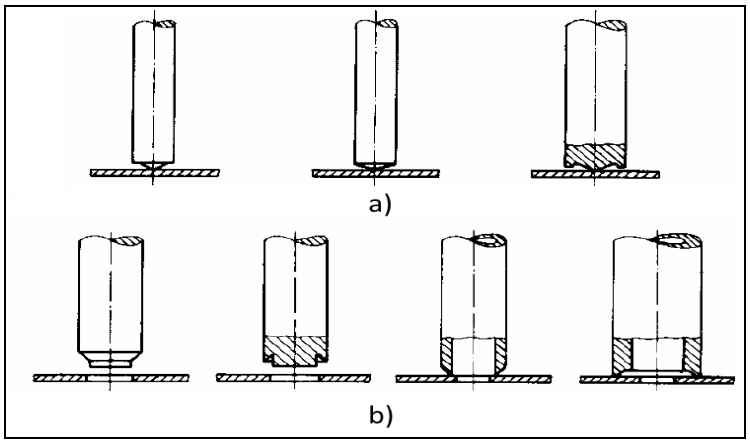
Çeşitleri Şekil 4.7'de gösterilmiş cıvata, somun ve pim gibi dövme işlemiyle ile üretilen bağlantı elemanlarına kabartı direnç kaynağı için üretim sırasında kabartı oluşturulmaktadır [8]. Bu sayede üretilen cıvata ve somunlar kaynak cıvatası ve somunu halini almış olurlar.



Şekil 4.7: Kaynak Bağlantı Elemanları. a) Cıvata, b) Pim, c) Somun ve Braket.

4.6.2.2. Talaşlı İmalatla Üretilen Kabartılar

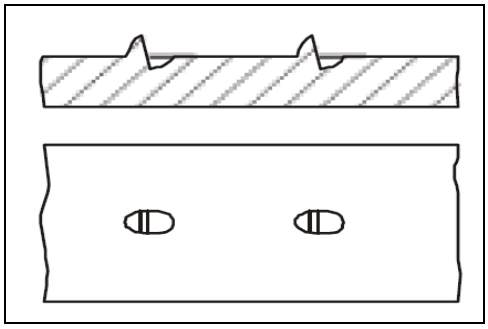
Şekil 4.8'de örnek çizimleri bulunan saplama, çubuk ve boru gibi silindirik forma sahip parçaların kabartı direnç kaynağıyla kaynatıla bilmesi için talaşlı imalat ile kabartılar oluşturulmaktadır [27].



Şekil 4.8: Talaşlı İmalat ile Üretilen Kabartı Örnekleri. a) Yuvarlak, b) Halka.

4.6.2.3. Darbe ile Oluşturulan

Sac veya parçaya darbe ile çentik oluşturarak kabartı elde edilmektedir. Bununla ilgili örnek Şekil 4.9'da gösterilmektedir [7].



Şekil 4.9: Darbe ile Kabartı Oluşturma.

4.6.3. Doğal Kabartılar

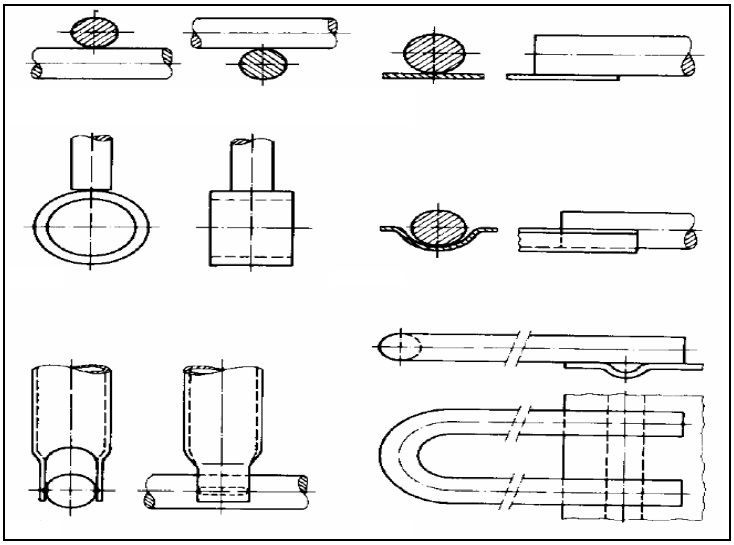
Şekil 4.10'da örnekleri mevcut olan Yuvarlak parçaların birbiriyle veya saclarla birleştirilmelerinde, akımın yoğunlaşmasına yol açan nokta veya çizgi şeklinde temas bölgeleri oluşur. Kabartı formları genellikle yuvarlak ve uzun kabartı türündedir [26].

4.6.4. Kaynak Makinaları

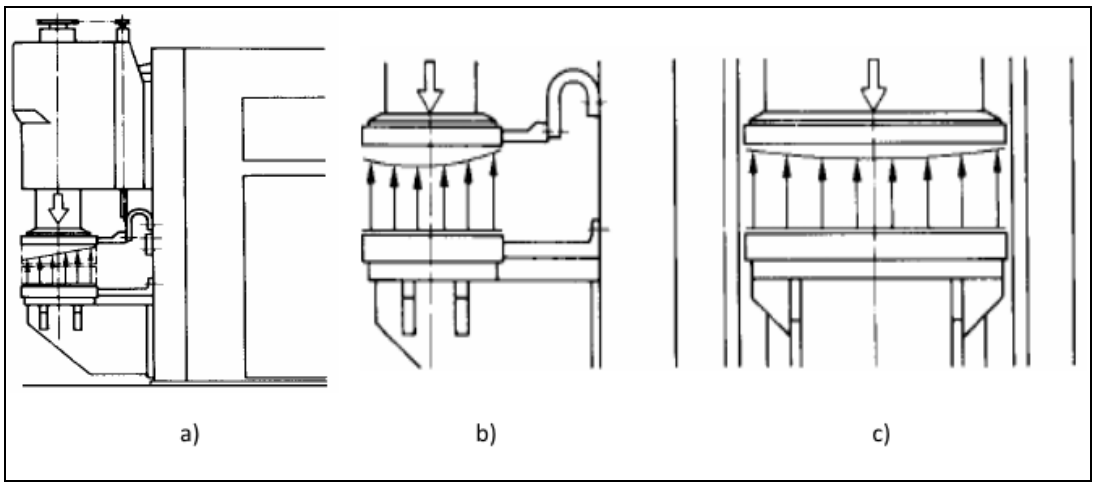
Kabartı kaynağında sadece tek fazlı alternatif akım makinaları kullanılmalıdır. Zira bu tür makinaların şebekeye bağlanma ihtimalleri, yerel şebekenin davranışına bağlıdır. Yüksek şebeke yüklenmelerinde ise ya doğru akım ya da frekans

dönüştürücülü çok fazlı bağlantı gerekir. Mikroteknikteki kaynak uygulamalarında ise kondansatör boşalmalı impulslu doğru akım makinaları kullanılmaktadır [26].

Şekil 4.11 b ve Şekil 4.11 c'de görüldüğü üzere akım dağılımı elektrot dışına doğru yoğunlaştığından kabartıları cıvata somun gibi çevresel düzenli bağlantı elemanlarında kullanımı etkin olmaktadır [26].



Şekil 4.10: Doğal Kabartılara Örnek.



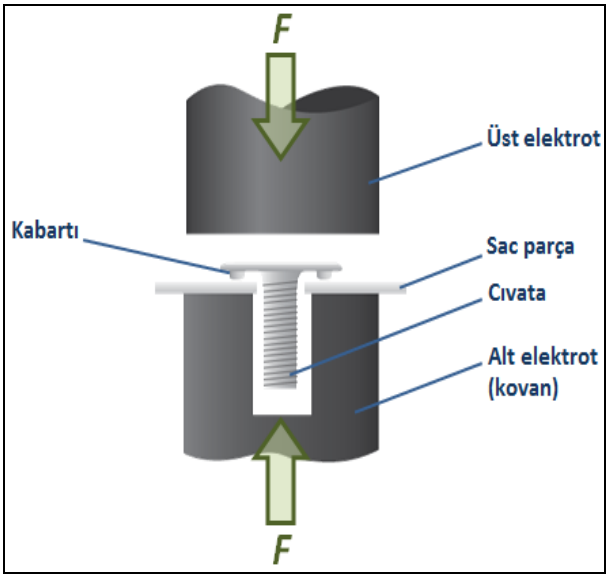
Şekil 4.11: a) C-Çerçeve Presinde Kuvvet Dağılımı, b)Yandan Görünüş AC Akım dağılımı, c) Önden Görünüş AC Akım Dağılımı.

4.7. Literatür Taraması

Projeksiyon (kabartılı direnç) kaynağı, elektrik akımı ve kuvvetin, birleştirilecek parçalara düz ve büyük elektrotlarla taşındığı bir direnç basınç kaynağı yöntemidir. Projeksiyon kaynak yönteminde kabartının (projeksiyonun) şekli, kaynak

bölgesinde bir akım yoğunlaşma etkisi meydana getirmektedir. Kabartı, kaynak sırasında elektrot kuvveti ve akım etkisiyle büyük ölçüde düzleşir ve kaynak bölgesinde çözülmez bir bağlantı oluşmaktadır. [26]

Projeksiyon kaynağı, otomotiv sac parçalarıyla somun ve cıvataların birleştirilmesini gösteren Şekil 4.12'de sistem uygulaması kolay olup, yaygın olarak başvurulan bir yöntemdir [28]. Bir araç üzerinde ortalama 450 adet kaynaklı cıvata ve somun bağlantısı olduğu ve Otomotiv Sanayii Derneği 2012 verilerinin yılda 800 bin adetlik araç üretimini işaret ettiği göz önünde bulundurulursa, basit bir hesaplamayla, yalnız otomotivde yıllık 360 milyon projeksiyon kaynaklı birleştirmenin yapıldığı anlaşılabilir. Yelpazenin sadece otomotiv ile sınırlı olmayıp; beyaz eşya, makine imalat, savunma gibi sektörlerin ana ve yan sanayilerini de kapsadığı düşünülürse, projeksiyon kaynağı ile üretim hacminin esasen ne düzeyde bulunduğu kolaylıkla değerlendirilebilir.



Şekil 4.12: Projeksiyon Kaynağı ile Cıvata–Sac Parça Birleştirmesi.

Kaynak yöntemlerinde esas olan, uygun parametrelerle, en az enerjiye / en az ısı girdisine başvurarak, mümkün olan en az distorsiyon (çarpılma) ve içyapı dönüşümleriyle, öngörülen mukavemet ve/veya sızdırmazlık koşullarının sağlanabilmesidir. Buna ek olarak, fışkırma ve çapaklanmanın en aza indirgenmesiyle elde edilecek temiz yüzeyler, işlevsellikten ödün vermeden birleştirmelerin verimli bir şekilde yapılabilmesi açısından önem arz etmektedir.

Tüm elektrik direnç esaslı kaynak yöntemlerinde olduğu gibi projeksiyon kaynağında da ısı enerjisi için eşitlik (2.1) ile verilen bağıntı geçerlidir. Söz konusu denklemde I elektrik akımını, R toplam elektriksel direnci, t akımın uygulandığı süreyi ifade etmektedir [21], [29].

Kaynak akımı, eşitlik (2.1)'den görüldüğü üzere ısı oluşumuna etkisi itibariyle en önemli parametredir. Isı etkisi, akımın karesiyle, süreyle ve dirençlerin toplamıyla (Şekil 4.1'de belirtilen R_1 ila R_7) orantılıdır [26].

Kaynak çekirdeğinin oluşumunda sadece R_5, R_6 ve R_7 dirençleri gerekli olan ısı miktarını üretmektedir. Kaynak yapılacak olan, R_5 ve R_6 dirençlerine sahip parçaların arasındaki temas direnci R_7, kabartı formundan, baskı kuvvetinden ve parçaların yüzey durumundan etkilenir. Kaynağın başlangıcında malzeme dirençleri R_5 ve R_6 nispeten küçük olduğundan, temas bölgesinden aşırı ısınmanın yol açtığı sıçramadan kaçınmak için, R_7 direncinin temiz sac yüzeyi ve yüksek baskı kuvvetiyle uygun sınırda tutulması gerekir. Diğer kısmi dirençlerin de, ısı kaybına ve aşınmaya yol açmaması için mümkün olduğunda düşük tutulması gerekir. Elektrotların soğutulmalı; elektrot ve parça yüzeylerinin mümkün olduğunda temiz olmasına dikkat edilmelidir [26].

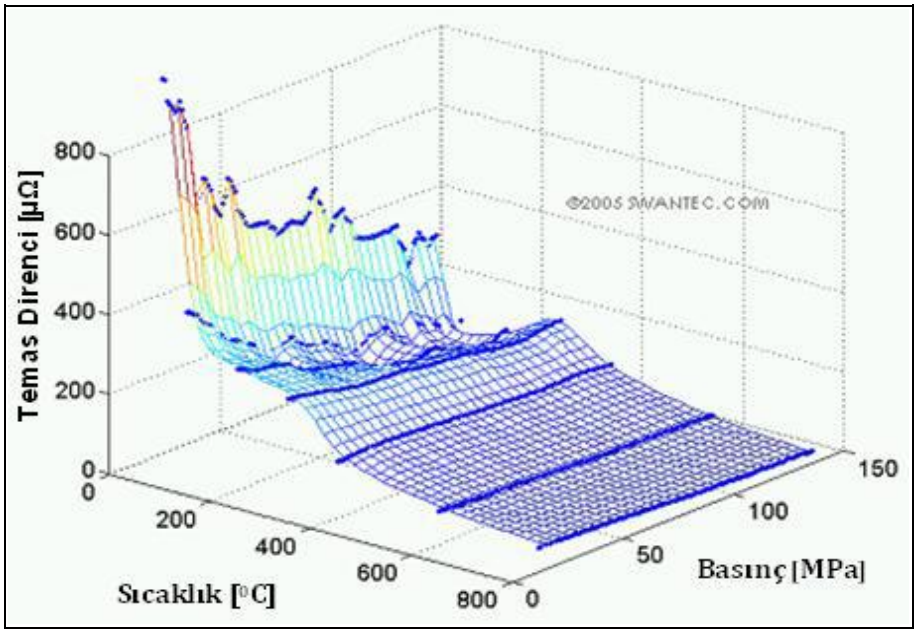
Oluşan ısının bir kısmı, ısı iletimi yoluyla kaybolmakta; büyük kısmı ise soğutulan elektrotlara iletilmektedir. Artan sac kalınlığı ile bir kısmı da parçaya yayılmaktadır. Isı kaybı, özellikle uzun kaynak sürelerinde önemli hale gelmektedir. Yetersiz kaynak akımları, sadece kaynak süresinin uzatılması ile dengelenebilir [26].

Akım tatbik süresi de oluşan ısının tayininde önemli bileşendir. Akımın bir program dahilinde uygulanması gerekmektedir. Çok uzun kaynak süresi fışkırma ve çapak oluşumunu; daha da kötüsü elektrotların parçalara yapışmasını teşvik etmektedir. Kaynak akımı çok küçük olduğu durumda ise, bunu kaynak süresi ile artırarak telafiye gitmek mümkün olmamakta ve kaynak meydana gelmemektedir [21]. Temel bir kaynak programı Şekil 2.4'te örnek olarak verilmiştir [8]. Bu programda kaynak boyunca kuvvet ve akım değişimleri gösterilmektedir.

Elektrik direnç kaynak türlerinde kullanılan akım tipleri Şekil 2.20'de gösterilmektedir. Projeksiyon kaynağında özellikle cıvata, somun, boru vb. çevresel kabartıya sahip parçalarda akım dağılımı elektrotların dışına doğru yoğunlaştığından(Şekil 4.11) alternatif akım (AC) yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeni geliştirilen orta frekans (inverter tipi) doğru akım (MFDC), doğru akım (DC) ve

kapasitif deşarj akımla kaynak durumlara göre uygunluk gösterdiği yanlarıyla yaygınlaşmaktadır.

Kaynak kuvveti ve kuvvetin kontrolü de kaynak enerjisi ve süre kontrolü kadar önemli bir parametre durumundadır [2]. Kaynak kuvveti, elektrik direnç esaslı kaynak işlemlerinde, ara yüzeylerdeki temas direncine ve malzemenin deformasyonundan ötürü temas alanına etkisi bulunan bir faktördür. İş parçalarının, kaynak bölgesinde akım geçişini mümkün kılabilmek için belli bir değerle sıkıştırılması gerekmektedir. Kaynak kuvveti çok düşük olduğu takdirde, temas direnci çok yüksek olacağından ve bu da hızlı bir ısı oluşumu ile sonuçlanacağından, kaynak akımının uygulanmasından hemen sonra fışkırma ortaya çıkabilmektedir. Kaynak kuvveti çok yüksek olduğunda ise temas alanı artacak; bu da düşük akım yoğunluğu ve düşük temas direnci nedeniyle ısı oluşumu ve kaynak çekirdeği (merceği) ebadının azalmasına yol açacaktır. Projeksiyon kaynağında kaynak kuvveti kabartının çökmesine yol açmaktadır. Söz konusu çökme de temas alanının; dolayısıyla da temas direncinin ve akım yoğunluğunun değişmesine neden olmaktadır. Bu da ısı gelişimine ve kaynak sonuçlarına etki etmektedir. Temas direncinin elektrot basıncı ve sıcaklıkla dinamik etkileşimi Şekil 4.13'te görülmektedir [21]. Sonuç itibariyle, projeksiyon kaynak işlemlerinde doğru parametrelerin (akım, süre, kuvvet) seçilip ayarlanması, tatmin edici bir kaynak birleştirmesinin gerçekleştirilebilmesi için en önemli faktördür [26].



Şekil 4.13: Temas Direncinin Elektrot Basıncı ve Sıcaklık ile Dinamik Etkileşimi.

Kaynak işleminde ortaya çıkan ısı enerjisi için verilen (2.1) eşitliğindeki bağıntı ile daha genel bir şekilde değerlendirilebilir. Söz konusu eşitlikte yer alan ısıl sabit K, parça geometrisi, fikstür ve kaynak kuvveti ile değişen bir katsayı durumundadır. İyi bir elektrik direnç kaynağı için, istenen kaynak noktasına yakın yerde oluşan ısıya odaklanmak gerekir. Bununla beraber, kaynak sürecinde kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon yoluyla ısı transferi söz konusu olduğundan malzeme ısı iletkenliği önemli bir parametre durumuna gelmekte; düşük ısıl iletkenlik bir avantaj teşkil etmektedir. Daha geniş bir açıdan bakıldığında, süreçteki ısı dengesi, parça malzemesi ve geometrisi, elektrot malzemesi ve geometrisi, kutuplama ve kaynak planının bir fonksiyonu durumundadır. Bunlara ilaveten, kalıntı gerilmelere etki eden malzeme ısıl genleşme özelliği; sıkma kuvvetine etki eden parça ve elektrot malzemelerinin sertlik ve dayanımı; parça malzemelerinin plastik sıcaklık aralığı da birer parametre olarak sıralanabilir. [2]

Kaynak cıvata ve somunu gibi bağlantı elemanlarının sac parçalara projeksiyon kaynağı ile birleştirilmesi işleminde parçaların üzerinde oluşan çapaklanma montajı zorlaştırmakta; montaj gerçekleşse dahi cıvata/somun dişlerine yapışan çapaklar, dişlerde sıyırmaya yol açtığından parçalarda işlev kaybına neden olmaktadır. Bunun yanısıra çapaklanma, özellikle kaplamalı parçalarda zamanla kaplamayı yüzeyden kaldırıp, en tehlikeli korozyon tiplerinden biri olan çukurcuk korozyonunun oluşumuna dahi sebebiyet verebilmektedir. Çukurcuk korozyonunun hızı, homojen korozyon hızından çok daha fazladır. Zaman içerisinde ilerleyen çukurcuk korozyonu, bağlantı elemanı üzerinde gerilme yoğun bölgelerin oluşmasına ve nihayetinde çatlağın başlamasına; sonuç olarak da bağlantı elemanının kırılması ve montajın boşalmasına yol açabilmektedir. Bu durum, araç arızalarının yanısıra, bağlantı elemanının kullanıldığı yere göre hasarlı ve/veya ölümlü trafik kazalarına bile neden olabilmektedir. Kaynaklı parçalarda çapak oluşumu, hem bahsedilen kritik nedenlerden dolayı; hem de tespit edilmesi ve temizlenmesi için ek işçilik, hurda ve kalitesizlik gibi ek maliyetler doğurması sebebiyle istenmemektedir. İdeal olanı, geometrik toleranslar ve kaynak dayanımından ödün vermeksizin, fışkırmanın yoğun olmadığı, çapaksız bir imalatı gerçekleştirebilmektir.

4.7.1. Yapılan Araştırmalara Literatürden Örnekler

Sun, projeksiyon kaynak işlemini sonlu eleman modeliyle kantitatif olarak simüle etmek üzere kapsamlı ve artımlı birleştirilmiş termal-elektrik-mekanik analizler yürütmüştür [30]. Direnç esaslı kaynağın bir varyasyonu olan projeksiyon kaynağında akımın ve ortaya çıkan ısının kabartının temas noktasında yoğunlaştığı; bu nedenle kabartının bulunmadığı nokta direnç kaynağına göre daha düşük akım değerleri, daha düşük elektrot kuvvetleri ve daha kısa kaynak süreleri söz konusu olduğu; ancak, akım ve ısı akış yolunun dinamik değişimi ve malzeme özelliklerinin sıcaklıkla değişimi nedeniyle projeksiyon kaynak işleminin analizinin daha zor olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, kabartının çökme mekanizması, kaynak çekirdeği oluşum işlemi ve farklı kaynak parametreleri ile farklı ana metal özellikleri gibi projeksiyon kaynağının ısıl, elektriksel ve mekanik yönlerine uyumlu; kaynak makinesi karakteristikleri ve çekirdek büyümesine etkisi, temas alanı değişimleri, dinamik direnç ve elektrot hareketi gibi önemli birçok parametreyi daha çalışabilecek şekilde geliştirilmeye açık bir analizi prosedürü tanımlanmıştır. Sonlu eleman yazılımı olarak ABAQUS; sac olarak da oda sıcaklığındaki akma dayanımları sırasıyla 270 MPa, 150 MPa ve 440 MPa olan SAE 1010, IF ve HSLA çeliklerinin kullanıldığı çalışmada fışkırma oluşumuna dair belirtilen noktalar şöyle özetlenebilir:

İnce sacların kaynağında kaynak makinasının mekanik takip etme kapasitesi, kaynağın oluşumu ve kaynak kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bazen yay kuvveti ile yüklenmiş bir elektrot, yeteri hızla takip sağlayarak kaynak esnasında fışkırmayı önlemek üzere gerekli olmaktadır.

Kaynakta ilk çevrim sonunda kabartı tamamen çökmekte ve baskı işleminden gelen hafif bir batma halkası sacın üst yüzeyinde hala izlenebilir durumdadır. Ergime ilk çevrim sonunda, yüksek akım yoğunluğunun bir sonucu olarak, birleşme yüzeyi üzerinde küçük bir halka formunda başlamaktadır. Bu süreç, literatürde projeksiyonun çökme süreciyle ilgili olarak geçen “kabartının hemen hiç metal füzyonu oluşmadan önce tamamen çöktüğü” yönündeki çoğu gözlemle de uyumludur. Bu zaman artımında, uygulanan elektrot kuvveti ile ergimiş bölgenin ısıl genleşme kuvveti arasındaki iyi bir denge kritiktir. Makinenin takip yeteneği zayıf ve çok az bir elektrot kuvveti uygulanırsa, sıvı metal ergimiş bölgeden fışkıracaktır. Aşırı metal fışkırması genelde kararsız ve zayıf bir kaynakla sonuçlanmakta ve kaynağın mühendislik performansına zarar vermektedir. Çalışmada tanıtılmış olan

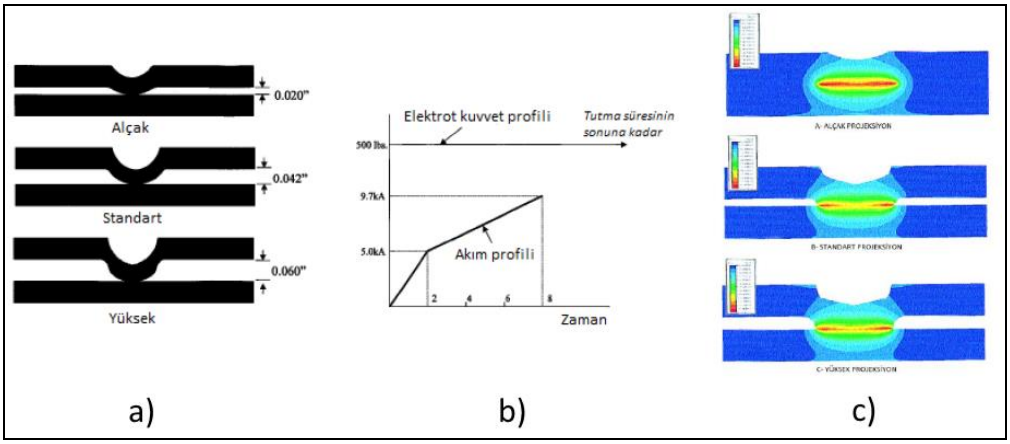
model, kaynak fışkırmasını tam bir açılımla değil; onun yerine fışkırma başlangıcını, temasın çevresinde ergiyik oluşumu anlamında tahmin etmekte ve sonrasında sayısal zorluktan ötürü sapma ortaya çıkmaktadır.

Kaynak akım şiddetinin, kabartı yıkılmasından önce füzyona yol açacak ve mühendislik amacına yönelik olarak istenen nihai çekirdek ebadını oluşturacak yeterlilikte seçilmesi önemlidir. Diğer yandan, kaynak akımı çok yüksek seçildiğinde, metal fışkırma eğilimi de artmaktadır. Aşırı bir akım düzeyi söz konusu olduğunda, kabartının çökmesi ısı oluşum hızını yakalayamamakta ve sonuçta fışkırmanın başlaması tahmin edilmektedir.

Projeksiyon kaynağında elektrot kuvvetinin çok etkin bir faktör olduğunu, çalışmada sunulan model göstermiştir. Elektrot kuvveti çok küçük olduğunda, yeterli ara yüz temas çapı ve ergiyik metali zapt edecek düzeyde basınç sağlayamamakta ve sonuçta fışkırma meydana oluşmaktadır. Bundan da öte, ilk çevrimin sonunda projeksiyon tam olarak çökmemekte ve sac ayrımı hala gözlenebilir kalmaktadır. Diğer yandan, çok yüksek bir elektrot kuvveti uygulandığında aşırı soğuk yığma meydana gelmekte ve projeksiyonun erken mekanik yıkılması söz konusu olmaktadır. Temas alanı, nominal duruma göre her zaman daha büyüktür. Büyük temas alanı ile akım yoğunluğu azaldığından, çekirdek oluşum süreci gecikmektedir. Dolayısıyla, projeksiyon kaynak işleminde teknik anlamda maharet gerektiren husus, kısa bir periyodda, çekirdek oluşumunu garanti edecek şekilde, hızlı ısı oluşumu ile temas alanı değişimi arasında dinamik dengeyi oluşturabilmek; bu arada da fışkırmayı önlemek üzere, ergimiş metali zapt edecek yeterlilikte temas alanı ve basıncı sağlayabilmektir.

Çelik sacın sınıfı ve akma dayanım düzeyi, ağır bir plastik deformasyonun ortaya çıktığı kabartının (projeksiyonun) tasarımında ve kaynak parametrelerinin seçiminde kritiklik arz etmektedir. IF çeliğinde akma dayanımı değeri çok düşük olduğundan, kabartının soğuk yıkımının ciddi bir düzeye (kabartı yüksekliğinin %70'inden fazla) eriştiği ve birleşen yüzeylerdeki temas kavisinin, SAE 1010 çeliği için esas alınan nominal şarta göre dikkat çekici biçimde daha fazla olduğu gözlenmiştir. Söz konusu çeliğin projeksiyon kaynak işlemi, projeksiyonun erken yıkılması ve 5 kA gibi bir akım şiddetinde, üçüncü çevrim sonunda dahi bir ergimenin meydana gelmemesi nedeniyle nokta direnç kaynağına epey benzerlik göstermektedir. Diğer yandan, HSLA çeliğinin projeksiyon kaynağında birleşme ara yüzü temas kavisi, nominal duruma (SAE 1010) kıyasla anlamlı düzeyde daha azdır.

Böyle küçük bir temas kavisi akımın geçişini küçük bir alana kısıtlamakta; aşırı ısınma ve fışkırma başlangıcını, ilk 1/2 çevrim süresi gibi erken bir zamana çekmektedir.

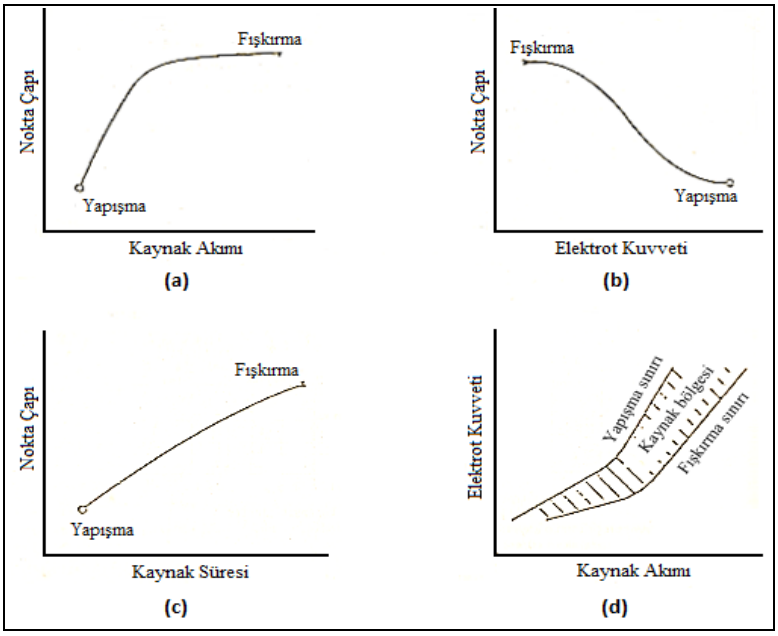


Şekil 4.14: a) Projeksiyon Yükseklikleri, b) Kaynak Parametreleri, c) Kaynak İşleminde Projeksiyon Yüksekliğinin İkinci Kaynak Çevrimi Sonrasındaki Sıcaklık Dağılımına Etkisi.

Sun tarafından yapılan, öncekinin devamı niteliğini taşıyan çalışmada ise, kabartı (projeksiyon) yüksekliğinin kabartının çökmesi (yıkılması) ve çekirdek oluşumuna etkisi incelenmiştir. Düşük karbonlu çelik (SAE 1010) sacın projeksiyon kaynağında, artımsal olarak birleştirilmiş ısıl-elektrik-mekanik modelleme prosedürünün ve bunun için ABAQUS sonlu eleman ticari yazılımının kullanıldığı çalışmada Şekil 4.14.a'da görülen üç farklı projeksiyon yüksekliği ve Şekil 4.14.b'deki kaynak parametreleri esas alınmıştır [31]. Model ile tahmin edilen ısıtma desenleri, 6000 kare/saniye'ye kadar yüksek hızlı hareket fotografisinin kullanıldığı önceki deneysel yaklaşımdan elde edilen kaynak kesitleri ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizle tahmin edilen sıcaklık dağılımlarının ve kabartı çökme desenlerinin (Şekil 4.14 c), deneylerden alınan yüksek hızlı görüntüleme sonuçları ile çok iyi örtüştüğü değerlendirilmiştir.

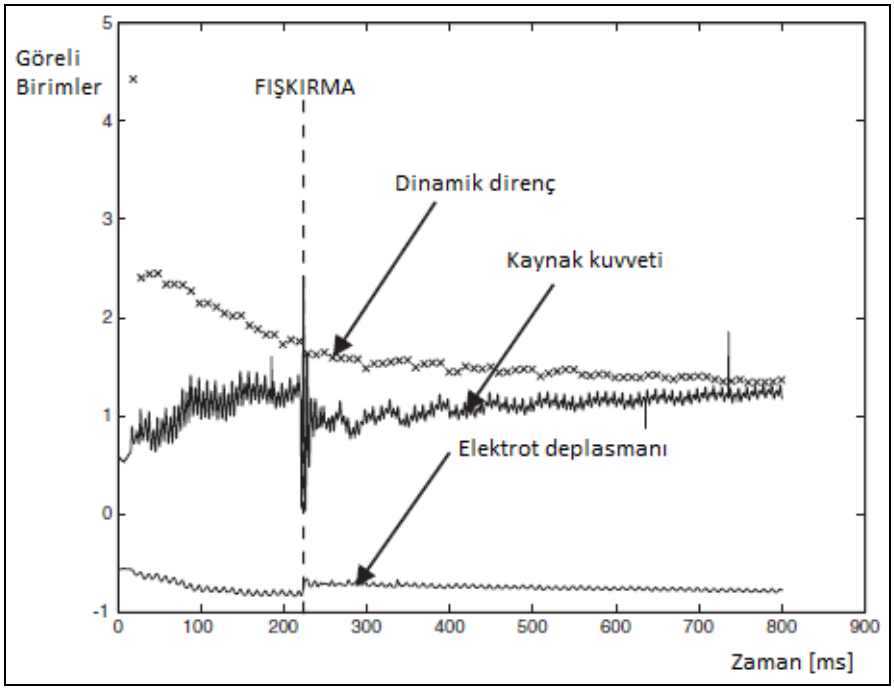
Sun tarafından gerçekleştirilen ve kabartı tasarımının projeksiyon kaynağının erken aşamalarında kabartı çökmesi ve ısı oluşum desenine etkisini irdelemede artımsal olarak birleştirilmiş sonlu eleman analiz prosedürünün bir modelleme aracı olarak kullanıldığı çalışma, projeksiyon kaynağı başlangıcındaki ısıtma sürecinde ara yüz temas davranışının (projeksiyonun çökmesine bağlı olarak temas alanının değişiminin) kritik rol oynadığını göstermiştir [31]. Aşırı yüksek bir kabartı

kullanıldığında, birleşme ara yüzü etrafında lokalleşen ısınma hızının kabartının çökme hızından çok daha yüksek olacağı ve sonuçta erken çevrimlerde kaynak yakası oluşumu, projeksiyon kazıntıları ve fışkırmaların ortaya çıkacağı belirtilmiştir. Projeksiyon yüksekliği az olduğunda ise projeksiyonun erken çöküşü ile temas alanının arttığı ve bunun akım yoğunluğunun düşmesine yol açtığı; çekirdek oluşumunun da geciktiği bildirilmiştir. Sonuç itibariyle, kabartının çökmesi ve ısı oluşumu arasında dinamik bir dengenin, kaynak kalitesi ve tutarlılığı açısından önemi bu çalışmada da vurgulanmıştır. Anık ve arkadaşları tarafından yayınlanan eserde, bir nokta direnç kaynak işleminde kaynak parametrelerinin fışkırma oluşumuna etkisi Şekil 4.15'de gösterilmiştir [29]. Kaynak akımının çok yüksek; kaynak süresinin çok kısa; elektrot kuvvetinin ise çok düşük tutulduğu durumlarda fışkırmanın kaçınılmaz olacağı buradan da anlaşılmaktadır. Tam tersi durumda ise kaynak noktasının (çekirdeğinin) çapı azalmakta; metal füzyonu yerine "yapışma" ortaya çıkarak, arzu edilen kaynak dayanımından uzaklaşılmaktadır. Kararlı kaynak ve kaliteli kaynak bağlantıları için, kaynak parametrelerinin, yapışma ve fışkırma oluşumlarına yol açmayacak aralıkta seçilmesinin gerekliliği burada da görülmektedir.



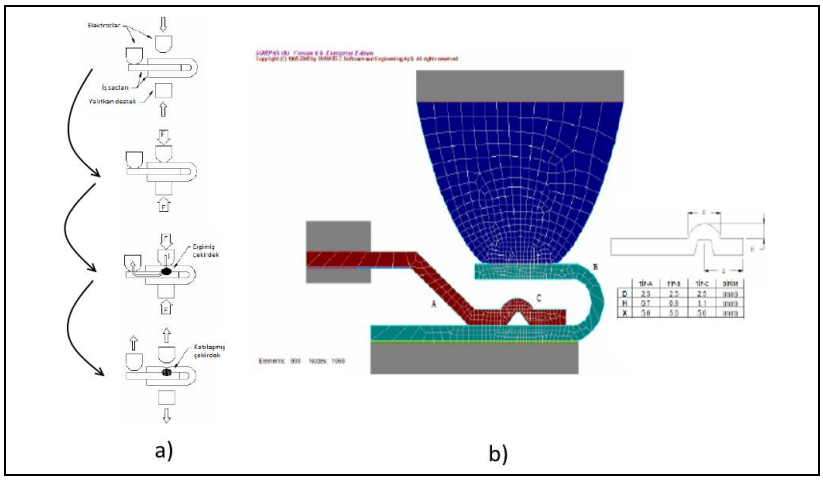
Şekil 4.15: Nokta Direnç Kaynağında Çekirdek Çapının Çeşitli Parametrelerle Değişimi ve Etkin Kaynak Bölgesi. a) Kaynak Akımıyla, b)Elektrot Kuvvetiyle, c) Kaynak Süresiyle, d) Değişimi ve Yapışma-Fışkırma Oluşum Sınırlarına Göre Elektrot Kuvveti ve Kaynak Akımı için Tavsiye Edilen Kaynak Bölgesi.

Nokta direnç kaynağında fışkırma zamanını tespit edebilmek amacıyla Podrzaj ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada kaplamasız ve kaplamalı yumuşak çelik ve düşük karbonlu çelik saclar üzerinde yapılan kaynak işlemlerinde uygulanan gerilim kaynak geriliminin ölçümünden, reaktansın sıfıra eşitlendiği an için hesaplanan dinamik direnç, kaynak kuvveti ve elektrot deplasmanı verileri birer sinyal olarak öğrenme vektör nicelendirmesi (LVQ, Learning Vector Quantization) kuralına sahip bir yapay sinir ağına girdi teşkil ettirilmek suretiyle fışkırma zamanı modellenmiştir. Çalışmada, kaynak bölgesine sağlanan enerjinin fazlaca başıboş bırakılması sonucu ergiyik metalin ani püskürmesi ile meydana gelen ve kaynaklı bağlantının kalitesini bozan fışkırmayı saptamada en önemli göstergenin kaynak kuvveti olduğu görülmüştür. Şekil 4.16'da da nokta direnç kaynağı sırasındaki kaynak kuvveti, deplasman ve dinamik direncin seyri zamana bağlı olarak verilmiştir [32]. Kurulan sinir ağının, sadece kuvvet değişim sinyalinin girdi olması durumunda dahi yumuşak çeliklerde fışkırmayı saptama yönünden başarılı bulunmuş; alüminyum gibi farklı malzemelerin kaynağında ise tek bir kuvvet sinyali ile ağın başarısız olabileceği fakat aynı metodolojiyle uygun girdi sinyallerinin saptanabileceği ifade edilmiştir.



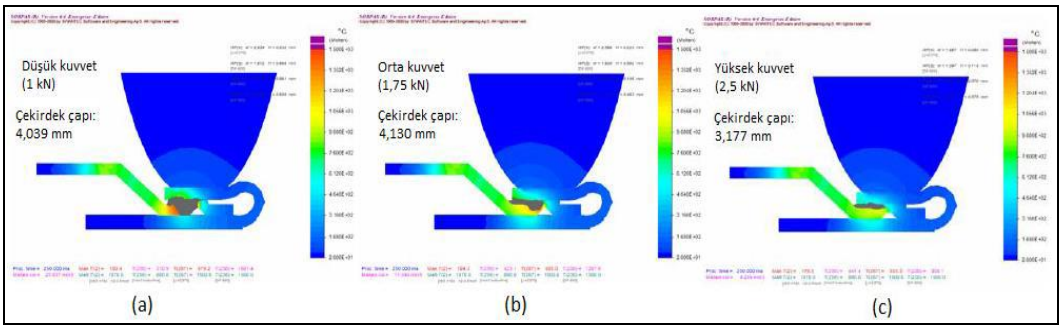
Şekil 4.16: Nokta Direnç Kaynağında Dinamik Direnç, Kaynak Kuvveti ve Elektrot Deplasmanı Göstergelerinde Fışkırma Anında Saptanan Değişimler.

Chan ve Edwards, ileri yüksek dayanımlı çelik sacların çökme meydana gelmeksizin katlamalı endirekt projeksiyon kaynağı ile birleştirilmesini sonlu eleman analizleri ile simüle etmişlerdir. Katlanmış saclarda endirekt nokta direnç kaynağının prensibi, şematik olarak Şekil 4.17 a'da görülmektedir [33].



Şekil 4.17: a) Endirekt Nokta Direnç Kaynak İşleminin Şematik Gösterimi, b) Endirekt Katlamalı Projeksiyon Kaynak İşleminin SORPAS Yazılımı İle Modellenmesi ve Kabartıların Boyutları.

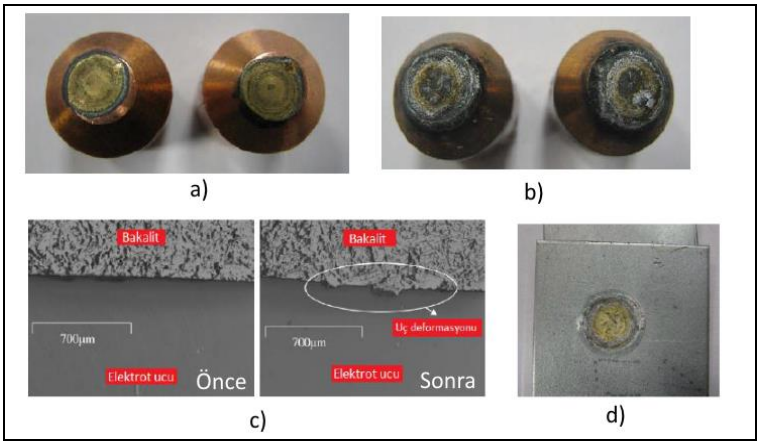
Chan ve Edwards tarafından yapılan çalışmada, üç farklı ebatta kabartı ile yürütülen projeksiyon kaynak işlemlerinin sonlu eleman analizi SORPAS direnç kaynağı simülasyon yazılımıyla yürütülmüştür (Şekil 4.17 b) [33]. Yazılımla, kaynaktaki fiziksel deformasyonun yanısıra, ısı ve çekirdek oluşumu modellenmiştir. Gerçekleştirilen kaynak simülasyonları ile projeksiyon tasarımı, kaynak çekirdeği ebadını maksimize ederken, dış yüzeyde oluşan deformasyonu minimize edecek şekilde birbirleriyle karşılaştırılmış ve geometrisi optimize edilmiştir.



Şekil 4.18: TİP-C Kabartı Boyutları ve Düşük a), Orta b) ve Yüksek c) Elektrot Kuvvetleri Altında Gerçekleştirilen Endirekt Projeksiyon Kaynak İşlemlerinin Sonlu Eleman Analizlerinden.

Analizler, TİP-C kabartısıyla yapılan endirekt projeksiyon kaynağının en iyi sonucu verdiğini göstermiştir [33]. Bu tip kabartının kullanıldığı sonlu eleman analizlerinden öngörülen kaynak çekirdeği boyutları Şekil 4.18'deki gibidir [33].

Athi ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, nokta direnç kaynağındaki fışkırmanın ve sac malzemedeki çinko kaplamanın elektrot başlığı ve kaynaklı bağlantının kalitesine etkisi incelemiştir [34]. Gres ve kum gibi yüzeydeki yabancı cisimlerin, temas direncinde düzenli olmayan bir dağılıma yol açtığı; bunun ise sac ve elektrot yüzeyinde eş dağılım göstermeyen, lokal ısınmaları doğurduğu ve lokal ısınmaların da elektrot uç yüzeylerinde deformasyona neden olduğu ifade edilmiştir. Söz konusu çalışmada, ilgili literatüre yapılan atıflar da dikkate alındığında şu tespitler öne çıkmaktadır:

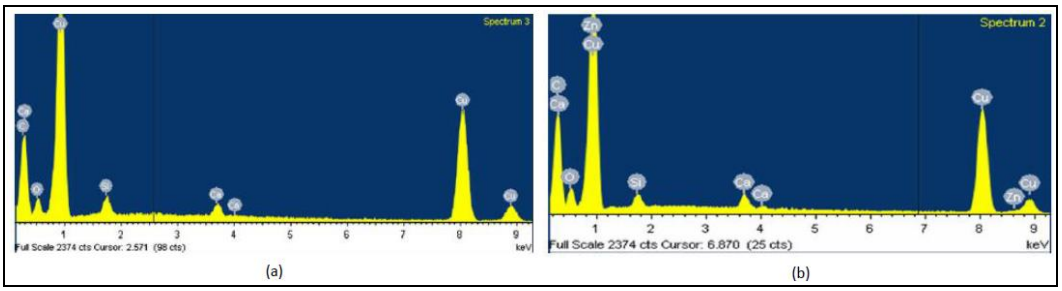


Şekil 4.19: a) 14 kA Akımda Tek Kaynak Sonrası Elektrot Ucu Çifti, b) Deforme Olmuş Elektrot Ucu Çifti c) Yeni ve 1995 Kaynak Sonrası Elektrot Ucu SEM Görüntüleri, d) Galvanizli Sacda Nokta Direnç Kaynağı Sonrası Oluşan Pirinç.

Korozyonu engellemek amacıyla çinko kaplamanın artan kullanım miktarı, kaplamasız sacların kaynağıyla kıyaslandığında, galvanizli sacların kaynağında elektrot başlıklarının ömür sürelerini belirgin şekilde azaltmaktadır (Kimchi ve arkadaşları [35]'den aktaran Athi ve arkadaşları [34]).

Taşıtlarda hafiflik sağlamak amacıyla kullanımı artan ince fakat yüksek dayanımlı çelik sacların çoğu başarılı bir şekilde kaynak edilebilmekle birlikte; farklı çelik firmaları, aynı mekanik özelliklere ulaşmak için değişen kimyasal bileşim ve işlemler kullanmaktadır. Sonuçta bu firmalar, aynı dayanıma fakat farklı kaynak karakteristiklerine sahip alaşımlar üretmektedir. Söz konusu çeliklerin yumuşak çeliklerden daha yüksek elektriksel dirence sahip olması, fışkırmayı en aza

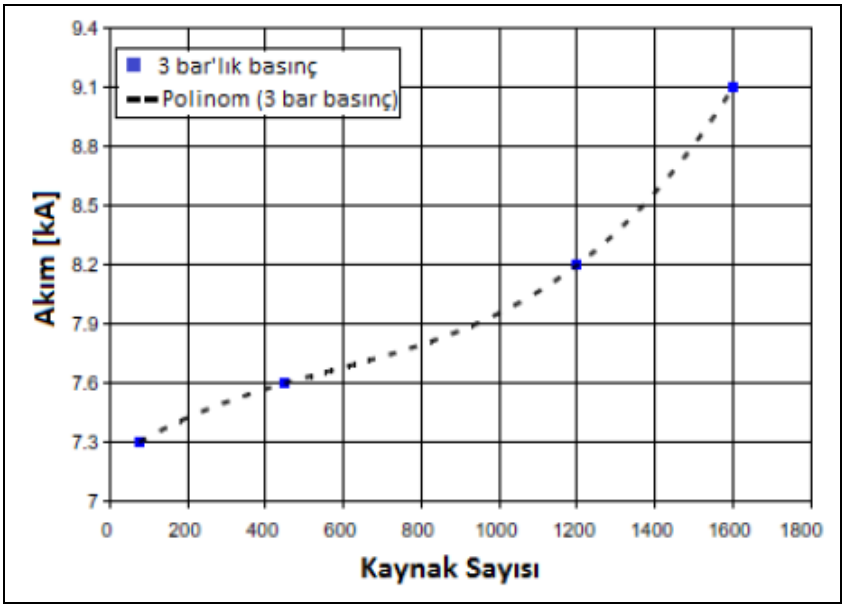
indirgemek için yüksek dayanımlı çeliklerin kaynağında daha yüksek elektrot kuvvetleri ve daha düşük kaynak akımlarının kullanabilmesi anlamına gelmektedir. Bu da elektrot başlığı aşınmasının daha yüksek olmasına ve aynı zamanda elektrottan hızlı soğuma sonucunda kaynak çekirdeğinde martenzit nedeniyle kaynağın gevrek kırılmasına yol açmaktadır (Shi ve Westgate [36]'ten aktaran Athi ve arkadaşları [34].



Şekil 4.20: Nokta Direnç Kaynağı Elektrot Başlığı Ucunun Kantitatif X-Işını Analizi. a) Galvanizli Sacların Kaynağında Kullanılmamış, b) Galvanizli Sacların Kaynağında Kullanılmış.

Kaynak çevrimi esnasında, öncelikle ergime noktası daha düşük olan galvanizli çelik sac yüzeyindeki çinko ergimektedir. Sonrasında elektrot kuvveti, çeliğe kıyasla daha yüksek bir iletkenliğe sahip olan ergimiş çinkonun bir kısmını, saclar arasında katı-katı teması yeniden kurulana kadar, mekanik temas alanının kenarına doğru itmektedir. Deplase olan çinkonun temas direncini azaltarak elektriksel temas alanını artırması, akım yoğunluğunda azalmayla sonuçlanan, elektrot ucunda daha fazla ısı oluşturması anlamına gelmektedir. Aşınma oluşumu nedeniyle, elektrot ucu ile çinko arasındaki etkileşim, elektrot uç çapının, dolayısıyla da yüzey alanın artışıyla sonuçlanmaktadır (Zhang ve Senkara [12]'ten aktaran Athi ve arkadaşları [34]). Telafi için çoğunlukla akım, kaplamasız çeliklerdekine kıyasla artırılmakta; bu da istenen kaynak çekirdeği boyutlarının sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Kaplama alaşımından gelen çinko ile elektrot başlığı metali, elektrotun ucunda üniform nitelikte bulunmayan çukurcuk oluşumuna yol açmakta (Zhang ve arkadaşları [37]'ten aktaran Athi ve arkadaşları [34]); bu da Şekil 4.19 c'te açıkça görüldüğü üzere, elektrotta uç bozulmasına neden olmaktadır (Holliday ve arkadaşları [38]'dan aktaran Athi ve arkadaşları [34]). Kaynak uç profilindeki değişimin kaynağın bütünlüğüne etkisi büyüktür. Galvanizli bir çeliğin 14 kA akım şiddeti ile tek çevrim kullanılmış bir elektrot başlık çifti Şekil 4.19 a'te görülmektedir. Yüksek akım

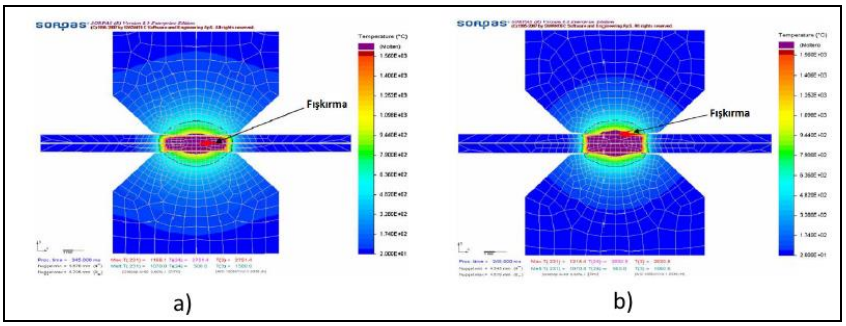
nedeniyle alaşımlanma hemen başlamıştır (Johnson [39]'den aktaran Athi ve arkadaşları [34]). Uç yüzeyinde pirinç açıkça gözlenebilmektedir (Müftüoğlu ve Keskinel [40]'den aktaran Athi ve arkadaşları [34]). Kullanılmış bir elektrot başlığı çiftinde çukurcuk oluşumu ve bozulma ise Şekil 4.19 b'te açıktır. Çinko ve bakırın alaşımlanmasının işareti, kaynaktaki çökme izi etrafında meydana gelen pirinçten anlaşılabilir (Şekil 4.19 d). Elektrot başlığı ucunda yapılan ve tarama sonuç grafikleri Şekil 4.20'de gösterilen kantitatif taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi de bu oluşumu teyit etmiştir [34]. Yeni elektrot başlığının uç yüzeyinde çinko gözlenmemişken; kullanılmış elektrotun uç yüzeyinde belli düzeyde çinko görülmüştür. Bu çalışmada, 8 mm kalınlığındaki kaplamalı saca 3 bar'lık elektrot basıncıyla kabul edilebilir bir nokta direnç kaynağı yapabilme amacıyla, elektrottaki uç bozulmasını telafi için akımda gerekli görülen artışlar Şekil 4.21'de verilmiştir [34].



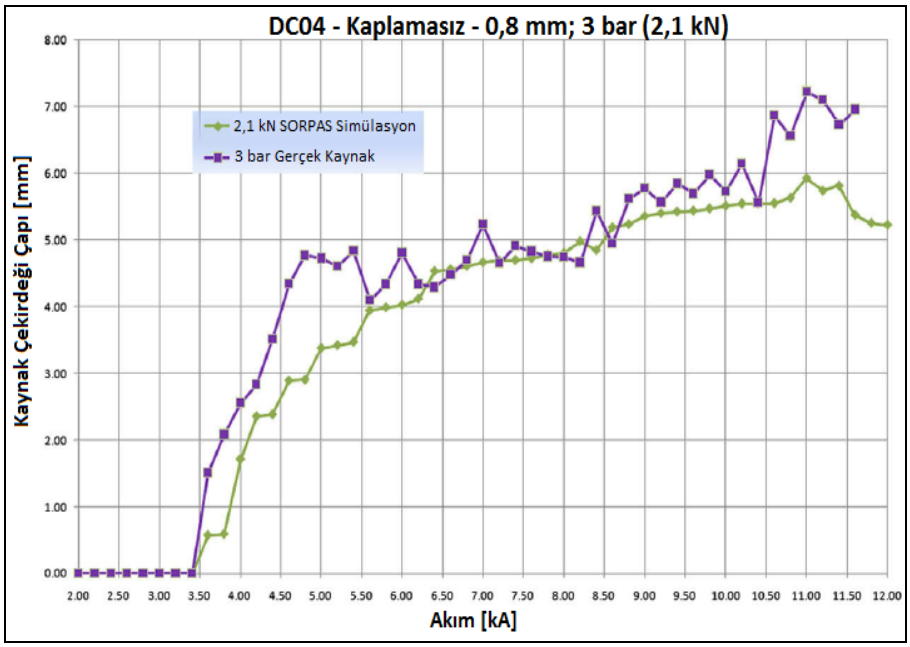
Şekil 4.21: Kalınlığı 8 mm Olan Kaplamalı Sacın 3 Bar'lık Elektrot Basıncıyla Nokta Direnç Kaynağında Elektrot Ucu Aşınmaya Başladıkça Gereken Minimum Akım Değerleri.

Zayıf kaynakların bir göstergesi olan elektrot başlığı uç aşınması dışında, kaynak çevrimi esnasında oluşan fışkırma da yetersiz kalitede kaynaklar için bir uyarı teşkil etmektedir. Fışkırma elektrot ömrünü kısaltan bir faktördür. Belli bir akım düzeyinde kaynak çapı, ilgili standarda göre gözetilen, kabul edilebilir minimum ebada ulaşacaktır. Akım, bu kritik seviyenin ötesine geçtiğinde çekirdeğin

boyutları, elektrotların artık ergimiş metali zapt edemeyeceği bir noktaya erişinceye kadar artacaktır. Bu, fışkırmanın meydana geldiği zamandır. Metalin fışkırması, elektrotun metale daha da fazla çökmesine yol açmakta; bu da kabul edilebilir boyutlarda olmayan, daha ince bir kaynakla sonuçlanmakta ve kaynağın süreksizlikler içerme potansiyelini artırmaktadır (Cullen ve arkadaşları [41]'dan aktaran Athi ve arkadaşları [34]). Aşırı fışkırma, kaynakta, sıcaklık değişimleri ve titreşimlerle hasara yol açabilecek çatlaklar ve boşluklar için bir gösterge olabilir.



Şekil 4.22: SORPAS Yazılımının Fışkırma Öngörüleri. a) Saclar Arası, b) Elektrot Sac Arası.



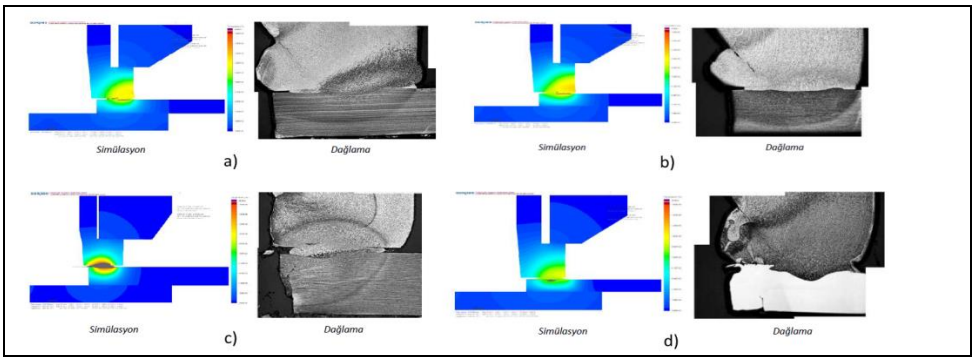
Şekil 4.23: SORPAS Yazılımı ile Öngörülen Kaynak Büyüme Eğrilerinin Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması.

Direnç kaynağı simülasyon ve optimizasyon yazılımı SORPAS, minimum boyut gereğini karşılayan değerden fışkırmaya yol açacak değere kadarki aralıkta kaynak akımlarını öngörmede kullanılabilir. Yazılımın, nokta direnç kaynak

işleminde şekillenen kaynak çekirdeğinde öngördüğü fışkırmaya dair örnek Şekil 4.22 a'da verilmiştir. Böyle bir oluşum, katılaşan kaynak çekirdeğinin çatlak ve boşluk içereceğini işaret etmektedir. Sonrasında söz konusu oluşum, sac ve elektrot ucu ara yüzeyine taşınmaktadır (Şekil 4.22 b). Bu, fışkıran metalin sac ve elektrot malzemeleri kombinasyonunu içereceğini göstermektedir [34].

Şekil 4.24: HPM6 ve HPM8 Tipi Kaynak Somunları.

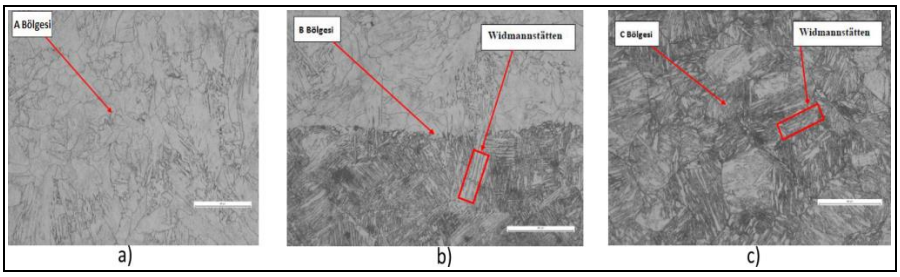
Kalınlığı 0,8 mm olan kaplamasız DC04 kalitesinde çelik sacda, kaynak akımının 2.12 kA aralığında 0,2 kA'lik düzeylerde artırıldığı; yaklaşık olarak 2,1 kN'a karşılık gelen 3 bar'lık bir elektrot basıncının kullanıldığı nokta direnç kaynak işlemleri için, SORPAS yazılımı ile öngörülen kaynak büyüme eğrileri, deneysel sonuçlarla Şekil 4.23'te karşılaştırılmıştır. [34]



Şekil 4.25: Tolf ve Hedegard Tarafından Gerçekleştirilen Kabartı Kaynaklarının Simülasyon Karşılaştırmaları: a) Dogal 350 YP Çelik Sac ile HPM8 Somun Kaynağı, b) Dogal 600 DP Çelik Sac ile HPM8 Somun Kaynağı, c) Dogal 800 DP Çelik Sac ile HPM6 Somun Kaynağı, d) HyTens 1000 Çelik Sac ile HPM8 Somun Kaynağı.

Linden, yapmış olduğu (diploma) tez çalışmasında, Şekil 4.24'de görülen halka (yüzük) tipi kabartılı HPM6 ve HPM8 tipi (M6 ve M8) kaynak somunlarının Dogal 350 YP, Dogal 600 DP, Dogal 800 DP ve HyTens 1000 kalitesindeki çelik saclara projeksiyon kaynağında, kabartı geometrisinin SORPAS yazılımı ile optimizasyonu üzerinde çalışmıştır [42]. Bu çalışmada elde ettiği simülasyon çıktılarını, Tolf ve

Hedegard tarafından orta frekans doğru akım (MFDC) kaynak makinası ile yürütülen kaynakların dağlanmış kesitleri ile karşılaştırmıştır [43]. Yapılan karşılaştırmalara dair örnekler Şekil 4.25'te görülmektedir [42]. Tolf ve Hedegard tarafından yapılan çalışmada, Dogal 600 DP sacın somunla projeksiyon kaynağındaki söz konusu olan mikro yapılar Şekil 4.26'da verilmiştir [42], [43]. Linden'in yaptığı karşılaştırmalar, genel itibariyle, M8 somun ile yürütülen kaynak simülasyonlarının gerçeğe daha yakın sonuçlar sunduğunu göstermiştir [42].

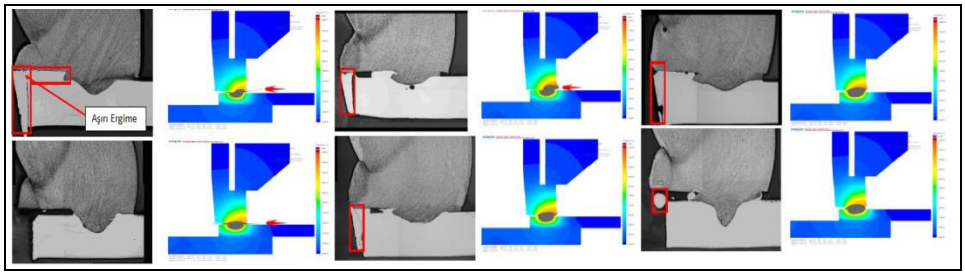


Şekil 4.26: Tolf ve Hedegard tarafından Yapılan Çalışmada DP600 Çelik Sac ile Somun Kaynağında. a) Isı Tesiri Altındaki Bölgede Gözlenen Ferritik Yapı, b) Somun ve Sac Arasındaki Temas Bölgesinde Sac Malzemede Koyu Alanların Gösterdiği Ostenit Taneleri ve Açık Alanların Gösterdiği Widmannstatten-Ferit Yapısı, c) Sacın Isı Tesiri Altındaki Bölgesinde Gözlenen İri Ostenit Taneleri ve Az Miktardaki Widmannstatten-Ferit Yapısı.

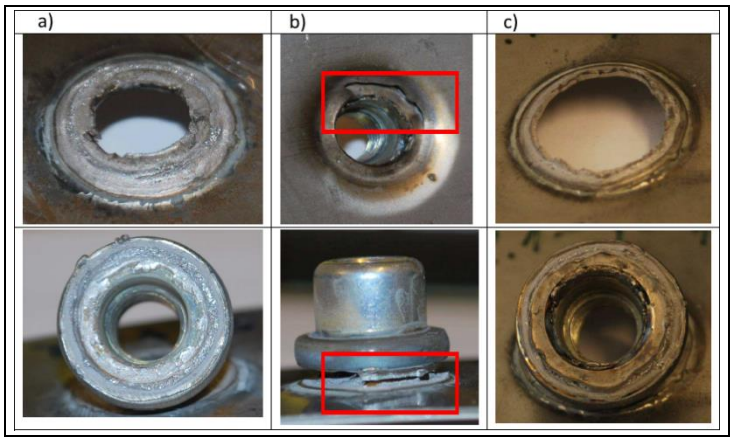
Linden tarafından yapılan çalışmada, SORPAS yazılımının kullanıldığı projeksiyon kaynak işlemlerinin simülasyonlarında öngörülen fışkırmalar Şekil 4.27'de gösterilmektedir [42]. Bazı kesitlerde aşırı ergitme gözlenen taşma (çapaklanma) ile bağdaştırılabilir. Ancak, bazı simülasyonlarda fışkırma öngörülmesine karşılık çapaklanmanın gözlenmemesi; ya da analizin herhangi bir fışkırma öngörmemesine karşılık gerçek kaynakta aşırı ergime ve çapaklanma oluşması (Şekil 4.27), SORPAS yazılımının fışkırma öngörüsüne yönelik kabiliyetini sorgulatmıştır.

Linden tarafından yürütülen çalışmada, projeksiyon kaynağıyla birleştirilmiş sac-somun, çekme-koparma (pull-out) ve burulma testlerine tabi tutulmuştur. Bu mekanik testlerle kaynak kalitesi ve projeksiyon geometrisine dair yapılan optimizasyon değerlendirilmiştir. Uygulanan çekme-koparma testinde ortaya çıkan hasar tipleri Şekil 4.28'de verilmiştir [42]. Dogal 600 DP çelik sac ile birleştirilen standart kaynak somunları için daha yüksek maksimum ayırma kuvveti sağlandığı görülmüştür. Bu tip sac ile yapılan tüm bağlantılarda ara yüzey hasarı meydana

gelmiştir. Diğer yandan, somun kaynaklı bağlantılarda burulma testi ile değerlendirmede kayda değer bir sonuç alınamamış; özel cihazların kullanım gerekliliği belirtilmiştir.

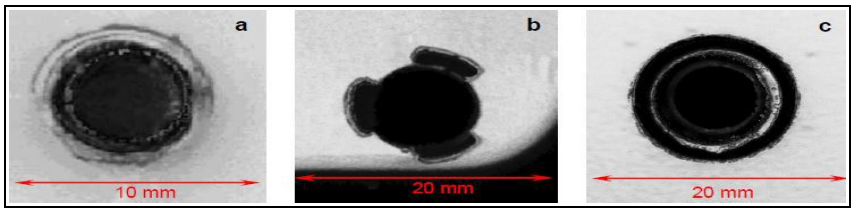


Şekil 4.27: HyTens 1000 Çeliği ile HPM8 Somununun Projeksiyon Kaynağında SORPAS Simülasyon Çıktısı ile Tolf ve Hedegard Tarafından Yapılan Kaynağın Yapısının Karşılaştırması Ve Fışkırma Öngörüsü Çapak Oluşumu Uyumsuzluğu.

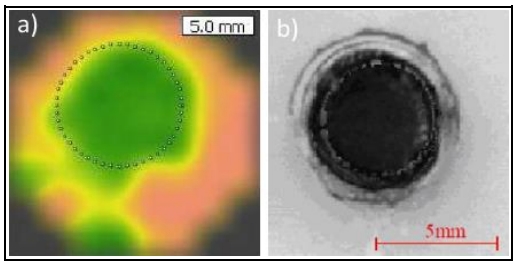


Şekil 4.28: Somun-Sac Projeksiyon Çekme-Koparma Testinden Sonra Oluşan Hasar Tipleri. a)Sacdan Kopan Bir Parça Olmadığı Durum, b) Sacdan Kısmi Parça Kopması Olduğu Durum, c) Kabart Boyunca Tam Bir Kopma Olduğu Durum.

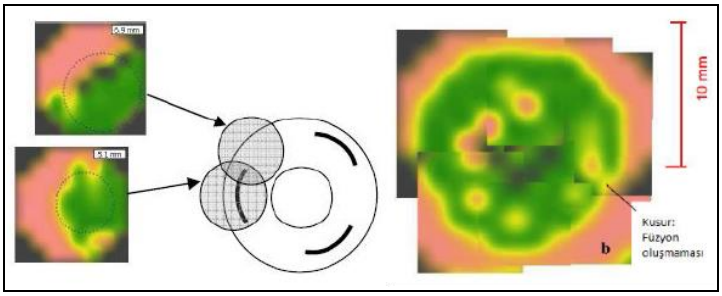
Maev ve Seviaryn tarafından yapılan çalışmada ise, somun-sac projeksiyon kaynağı bağlantılarının tahribatsız muayenesi olarak, ultrasonik görüntüleme üzerinde durulmuştur. Şekil 4.29'da elde edilen görüntüler gösterilmektedir. Çalışmada, kaynakla işlem görmüş galvanizli saclarda taramalı akustik mikroskobi tekniği ile görüntülemeler yapılmıştır . Nokta direnç kaynağı için elde edilen görüntü RSWA (Resistant Spot Weld Analyzer) cihazından alınan sonuçla Şekil 4.30'da karşılaştırılmıştır [44].



Şekil 4.29: Taramalı Akustik Mikroskobu Görüntüleri. a)Nokta Direnç Kaynağı, b) Üç Kabartılı Somun Kaynağı, c) Halka Tipi Kabartılı Somun Kaynağı.

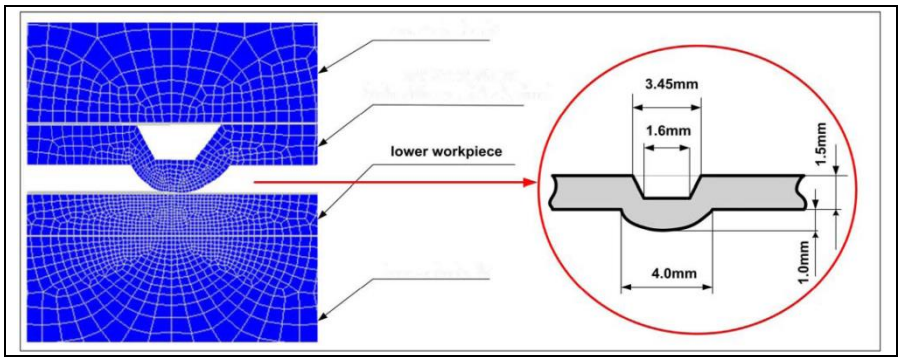


Şekil 4.30: Karbon Taramaları. a) RSWA Cihazıyla, b) taramalı akustik mikroskobuyla.

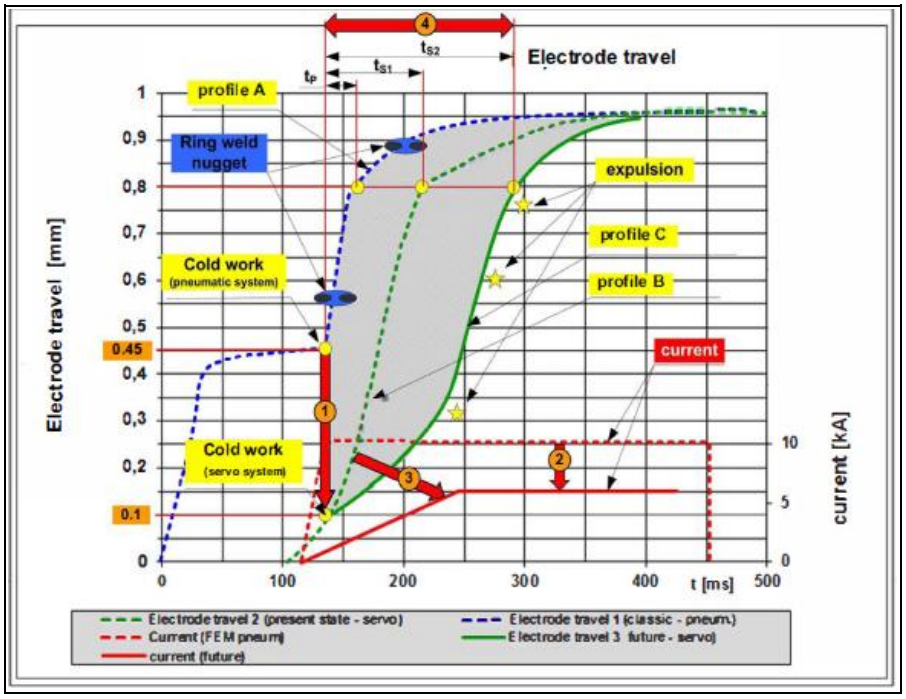


Şekil 4.31: RSWA Göstergelerinin Montajı ile Elde Edilen Somun Kaynağının Karbon Taramaları.

Söz konusu çalışmada, yay tipi kabartıya sahip kaynak somununun galvanizli saca kaynağı da standart RSWA işlemi ile incelenmiştir. Standart RSWA, 10 mm'den daha küçük bir bölge üzerinde inceleme olanağı tanıdığından, karbon taramaları ile elde edilen kısmi akustik görüntüler dijital anlamda üst üste eklenerek birleştirilmiş ve nihai görüntü ortaya çıkmıştır. Bu görüntü Şekil 4.31'de verilmiş olup; kaynakta füzyonun oluşmama hatası görüntüden izlenebilmektedir [44].



Şekil 4.32: Sayısal Model, Projeksiyon Ölçüleri.



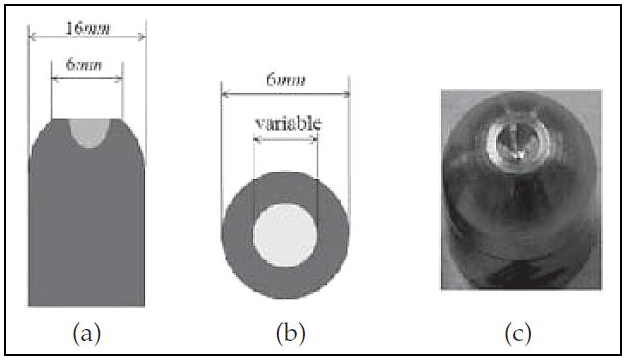
Şekil 4.33: Elektrot Hareket Profili Değişimiyle ilişkili Kaynak Optimizasyon Diyagramı.

Mikno ve Stepien tarafından ebatları Şekil 4.32'de gösterilmiş kabartıya/projeksiyona sahip 1,5 mm kalınlığındaki DX35 çelik sacın projeksiyon kaynağında, servo-mekanik ve klasik sistem olan pnömatik sistemlerle kaynak sıkma kuvvetinin uygulanmasının kaynak kalitesi üzerine etkisi ve bu operasyonun servo-mekanik sistemlerle optimizasyonu araştırılmıştır [45]. Çalışma ticari bir yazlım olan SORPAS'ta oluşturulan modellerin sonlu elemanlar analizi ve doğrulama amaçlı yapılan deneysel çalışmalarla gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar öncesinde kaynak parametrelerin optimizasyonuna yönelik öncül çalışmalar yapılmıştır. Kaynak zamanı öncesi kaynak kuvvetinin uygulanmasıyla oluşan projeksiyonun çökmesinin projeksiyon yüksekliğinin %10'unu aşmayacak şekilde tespiti, pnömatik ve servo-

mekanik sistem için sağlanmıştır. Sonrasında kaynak zamanında, elektrot hareketlerinin optimizasyonu üzerinde durulmuş, kaynak havuzunda ergimiş metalin fışkırma seviyesine kadar olan parametrelerin seçildiği kaynakta, kaynak elektrodunun hareket profili "B" olarak tespit edilmiştir. Klasik sistem olan pnömatik sistemlerde kabartı yüksekliğinin çökme hızı 20 ms civarlarındayken böyle bir kaynağın gerçekleştiği durum profil Şekil 4.33'te gösterilen A elektrot hareketi olarak tanımlanmıştır [45]. Profil B tipi kaynakta kabartı yüksekliği çökme süresi 120 ms kadardır. Kabartı çökme hızı azaltılmasıyla kabartı malzemesinde enerji üretimi artmaktadır Böylece daha az akımla kaynak yapılabilmektedir. Mikno ve Stepien bu noktada yapılan optimizasyonla enerji üretimi iki katına çıkarılabildiklerini belirtmişlerdir.

Son optimizasyon aşamasında kaynak akımını düşürmek için kaynak akımının yükselme zamanı uzun tutularak daha uzun projeksiyon çökme süresi sağlanmaktadır. Bu işlem fışkırmanın gerçekleşmesinin hemen öncesinde pnömatik sistemlerle yapılan projeksiyon kaynağında elde edilen kaynak çekirdek çapı ve kaynak mukavemetini sağlayacak şekilde optimizasyon yapılmıştır. Çalışmaları devam etmekte olan Mikno ve Stepien servo-mekanik sistemin elektrot hareket profilini takibinin optimizasyonuna yönelik hibrid bir algoritma oluşturma üzerine çalışmaktadırlar.

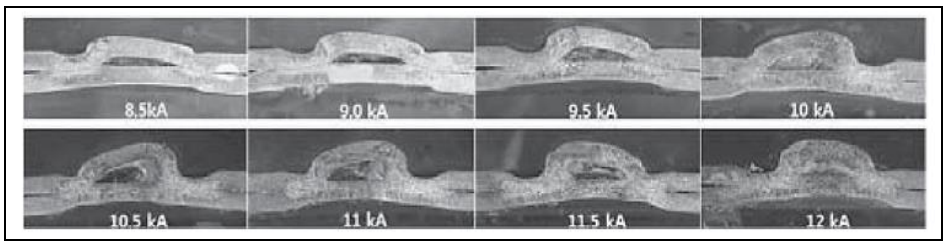
Nokta direnç kaynağında fışkırma olmaksızın kaynak yapabilmek amacıyla ucu delik kaynak elektroduyla kaynak yapılmasının etkisi Yoem ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [46].



Şekil 4.34: Delik Elektrot Ucu. a) Ön Bakış, b) Üst Bakış, c) Görüntü.

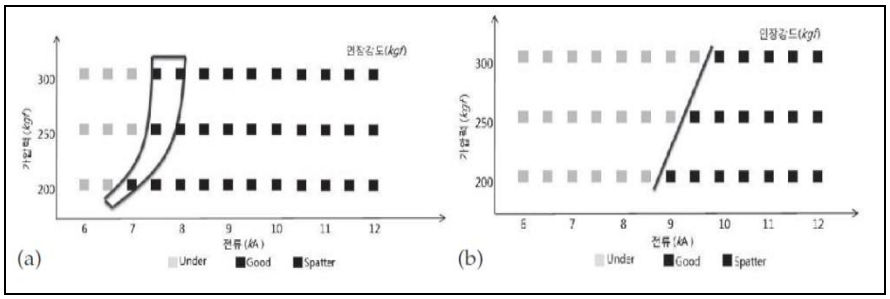
Şekilde 4.34'de görüntüsü ve çizimleri verilmiş olan elektrot, 16 mm çapta 6 mm etkin kaynak alanına sahip D tipi A sınıfı bakır elektrot ucuna delik açılarak bir

elektrot oluşturulmuştur [46]. Elektrik nokta direnç kaynağında kullanılan kaynak makinelerinin sahip olduğu alt ve üst bakır kollara düz-düz, düz-delik ve delik-delik elektrot uçları takılarak, üç farklı kaynak kombinasyonu elde edilmiştir. Bu üç farklı kombinasyonla üç kez tekrar edilerek gerçekleştirilen kaynaklarda; kaynak edilebilirlik, kaynak kuvveti ve fışkırma oluşup oluşmamasıyla değerlendirilmiştir. Düz-düz elektrot ucuyla 7,5 ila 8 kA, üst elektrot delik alt elektrot düz kaynak 10 kA ve üst-alt delik elektrotla yapılan kaynak 9,5 kA ve üstü akımlarda fışkırma gerçekleşmeksizin kaynak gerçekleştirilmiştir. Delikli yapıya sahip elektrot uçlarında açılan delikler, 3 mm, 3,5 mm ve 4 mm olarak çeşitlendirilmiştir. Üst-alt delik ve sadece üst delik elektrotlarla yapılan kaynaklarda delik çapının 3mm'den 4 mm çıkarılmasıyla, kaynak kopma mukavemeti arttığı bulgusuna ulaşılmıştır. Kaynakların görsel olarak değerlendirilmesinde üst 4 mm delikli alt düz olan elektrot ucu çiftiyle yapılan kaynak optimum görünüme sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.35: Kaynak Çekirdek Kesit Resimleri.

Üst 4 mm delikli alt düz olan elektrot çiftiyle yapılan kaynaklarda sac termal genleşmeyle elektrodun içine doğru genleşerek, Şekil 4.35'te görüldüğü gibi boşluk oluşmaktadır. Bu boşluğun kaynak akımının artmasıyla azaldığı raporlanıp, bu durum oluşan boşluğun teşkil ettiği vakum etkisiyle ergimiş metalin boşluğa daha fazla dolmasıyla açıklanmıştır. Ergimiş metalin vakum etkisiyle oluşan boşluğa dolması sonucu fışkırmanın engellendiği açıklanmaktadır. Delikli yapıya sahip elektrotla yapılan kaynakta akımın artmasıyla daha fazla ergimiş metalin boşluğa dolarak fışkırmanın engellenmesi neticesinde daha yüksek akımlarda kaynak yapılabilmektedir. Şekil 4.36'ya bakıldığında delikli yapıya sahip elektrodun kaynak yapılabilirlik alanın oluşmadığı ve akım arttıkça karşılığında seçilen kaynak süresi için kaynak yapılabildiği gösterilmiştir [46].



Şekil 4.36: Kaynak Edilebilirlik Diyagramı. a)Klasik Elektrot Ucu, b)Önerilen Delikli Elektrot Ucu.

Tablo 4.1: Kimyasal Kompozisyon ve Mukavemet Özellikleri (1,2 mm).

	Chemical composition/wt-%							Tensile properties		
Steels	C	Mn	Si	Cr	Al	P	S	TS/MPa	YS/MPa	EL/%
Base	0.07	2.30	0.10	0.00	0.00	0.01	0.003	805	480	26.1
1Cr	0.07	2.30	0.10	1.00	0.00	0.01	0.003	1030	627	19.0
2Cr	0.07	2.30	0.10	2.00	0.00	0.01	0.003	1140	650	15.9
3Cr	0.07	2.30	0.10	3.00	0.00	0.01	0.003	1232	720	13.5
0.5Si	0.07	2.30	0.50	1.00	0.00	0.01	0.003	1007	559	20.3
1.0Si	0.07	2.30	1.00	1.00	0.00	0.01	0.003	976	530	26.9
1.5Si	0.07	2.30	1.50	1.00	0.00	0.01	0.003	923	475	31.2
2.0Si	0.07	2.30	2.00	1.00	0.00	0.01	0.003	895	435	34.1
0Al	0.15	1.90	1.50	0.00	0.00	0.02	0.007	946	489	22.6
0.5Al	0.15	1.90	1.50	0.00	0.50	0.02	0.007	902	468	25.3
1.0Al	0.15	1.90	1.50	0.00	1.00	0.02	0.007	870	456	29.2
1.5Al	0.15	1.90	1.50	0.00	1.50	0.02	0.007	845	407	32.0
0.18C	0.18	1.80	1.50	0.00	0.00	0.02	0.007	861	343	32.0
0.24C	0.24	1.80	1.50	0.00	0.00	0.02	0.007	945	385	27.0
0.28C	0.28	1.80	1.50	0.00	0.00	0.02	0.007	1063	460	22.0
0.34C	0.34	1.80	1.50	0.00	0.00	0.02	0.007	1189	530	17.0

Kong ve Kang tarafından yapılan çalışmada AHSS çeliklerinin içeriğini bulunan Cr, Al, Si, Mn ve B alaşım elementlerinin Tablo 4.1'de gösterilen kombinasyonlarıyla üretilen 1,2mm kalınlığındaki sacların elektrik nokta direnç kaynağıyla birleştirilmesinde alaşım elementlerinin etkisi araştırılmıştır. Tablo 4.2'de gösterilen kaynak parametreleri kullanılarak sac malzemelerin nokta direnç kaynağı gerçekleştirilmiştir [47]. Yapılan deneyler sonrası elde edilen verilerden korelasyon sonucu fışkırma limit akımını veren bir eşitliğe (4.1) ulaşılmıştır.

$$ELC(kA)=9,85.0,74Si-0,67Al-0,28C-0,20Mn-0,18Cr \quad (4.1)$$

Alaşım elementlerinin çekirdek oluşumuna etkisi ,incelenmesi suretiyle" diş macunu"(TP) ve "sprey"(ST) tipi olarak belirtilen çapak çeşitleri tanımlanmıştır. Cr, Si, Al ve C oranlarının değişiminin kaynak çekirdeğinin ve fışkırmanın şekline etkileri tek tek incelenmiştir. Cr ile alaşımlandırılmış çelik sacların kaynağında fışkırmayla birlikte az miktarda kaynak çekirdek alanının azaldığı ve elektrot batma miktarının da az arttığı ayrıca kaynak çekirdek genişliğinin az miktarda arttığı

gözlemlenmiştir. Cr ile birlikte Si eklenmiş sacların nokta direnç kaynağında Cr eklenmemiş (0,1 Si) ve sadece Cr eklenmiş ((1 Cr + 0,1 Si) kaynak numunelerinde fışkırma öncesi kaynak havuzu iki sac arasından bir tepecik oluşturarak taşmış fakat fışkırma olmamıştır. Bu tepecik yüksek sıcaklıkta mukavemetli bir yapıya sahip olduğundan ergimiş metalin fışkırmasını engellemiştir. Bu tepecik oluşumunun fışkırmada önemli bir etken olduğu aktarılmıştır. Fışkırma sonrası Cr eklenmemiş ve Cr ekli sac malzeme TP tipi; Cr ile 0,5 Si eklenmiş sacların kaynağında ise ST tipi fışkırma olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.2: Kaynak Parametreleri (Tek faz AC, 60 Hz).

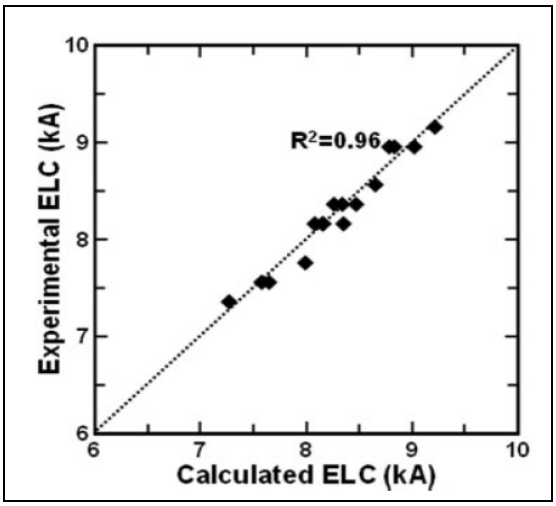
Welding parameters	Values
Electrode force/kN	4
Weld time/cycle	17
Hold time/cycle	17
Squeeze time/cycle	40
Weld current/kA	5–10
Water flowrate/L min^{-1}	4

Alüminyumun belli oranlarda katıldığı çelik sacların kaynağı incelendiğinde fışkırma öncesi tepecik uzunluğu Al içeriğinin artmasıyla arttığı; ST tipinde tespit edilen fışkırmanın miktarı yine Al içeriğinin artmasıyla arttığı gösterilmiştir. Karbon içerikli çeliklerin nokta direnç kaynağıyla fışkırma olması sonucunda fışkırma öncesine göre kaynak çekirdek alanı, yüksekliği ve genişliğinde çok az miktarda azalma gözlenmiştir. Değişik oranlarda Cr ve Si içeriğine sahip çeliklerin kaynağı sonrası Cr'mun miktarının artması fışkırma çeşidini (PT) etkilemezken, Si oranının 0,5 arttırılmasıyla fışkırma tipi ST'ye dönüşmüştür. Bu durum Si'nin fışkırma çeşidi üzerine etkisinin üzerinde önemli bir parametre olduğunu gösterdiği belirtilmiştir.

Tablo 4.3: Fışkırma Limit Akımı, Fiziksel ve Kimyasal Özellikler.

					YS/MPa	Viscosity/mP S
Steels	ELC/kA	$R/\mu\Omega$ cm	$T_{M.P}$/°C	$\alpha_L/\times10^{-6}$ °C^{-1}	1200°C	$T_{M.P}$+50°C
Base	9.2	16.2	1517.0	27.4	9.04	5.99
1Cr	9.0	21.3	1515.3	27.1	9.16	6.02
2Cr	9.0	26.4	1514.2	26.8	9.31	6.05
3Cr	8.6	30.3	1512.6	26.5	9.44	6.12
0.5Si	9.0	25.4	1508.3	27.6	8.97	5.90
1.0Si	8.4	30.3	1500.3	28.0	8.89	5.87
1.5Si	8.2	36.1	1491.4	28.5	8.75	5.80
2.0Si	7.6	42.5	1482.1	29.8	8.60	5.75
0Al	8.2	31.0	1489.9	28.6	8.60	5.96
0.5Al	7.8	36.2	1491.2	30.0	8.54	5.83
1.0Al	7.6	40.3	1491.5	31.4	8.47	5.69
1.5Al	7.4	45.1	1492.0	32.8	8.00	5.55
0.18C	8.4	31.3	1485.6	28.5	8.63	5.97
0.24C	8.4	32.7	1480.4	28.6	8.65	5.96
0.28C	8.2	35.5	1476.9	28.7	8.67	5.94
0.34C	8.2	36.2	1470.8	28.7	8.72	5.93

Kong ve Kang fışkırma limit akım değerinin belirlenmesinde alaşımlandırılan çeliğin değişen özellikleriyle arasında bir korelasyon üzerine çalışmalarını genişletmişlerdir. Alaşımlandırılmış malzemelerin özdirencini ölçerek, termal genleşme katsayısı, yüksek sıcaklıktaki mukavemet değeri ve viskozite değerleri ölçülmesi zor olduğundan JMatPro (version 5) programıyla, yüksek sıcaklıkta oluşan tepeciğin sıcaklığı tespiti yine çok zor olduğundan Sysweld programından yararlanılarak tepit edilmiştir. Bütün bu değerler Tablo 4.3'de gösterilmektedir [47]. Gerçekleştirilen korelasyon çalışmaları sonrası katkısı yüksek bulunan ve eşitlik (4.1)'de gösterildiği gibi bir bağıntıya ulaşılmıştır. Ulaşılan bu denklerin R2 değeri 0,96 olup, Şekil 4.37'de görüldüğü gibi deneysel sonuçları çok iyi temsil etmektedir [47].



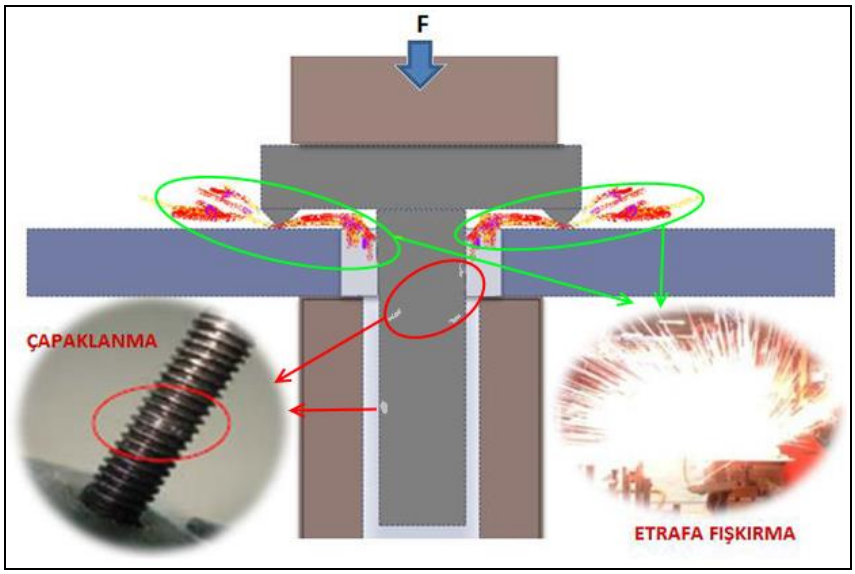
Şekil 4.37: Deneysel ve Eşitlik Sonuçlarının Karşılaştırılması.

4.8. Metot

Kabartı/Projeksiyon kaynağının diğer elektrik direnç kaynaklarından olan nokta direnç veya dikiş kaynağından önemli bir farkı vardır. Nokta direnç/dikiş kaynağında kaynak havuzu kontrol halinde ve atmosfere açık olmayan bir durumdayken, kabartı kaynağında oluşan kaynak havuzu kontrolsüz ve atmosfere açık bir yapıdadır. Bu durum direnç kaynağı için problem olan fışkırma ve özellikle çapak oluşma riskini katlamaktadır.

Fışkırma direnç kaynağı sırasında kaynak havuzundan yüksek enerjiye sahip ergimiş metalin hızlıca uzaklaşıp, etrafa saçılmasıdır. Şekil 4.38'de sağ alt kısımda

görülen kıvılcım veya sıçrantı olarak da adlandırılan parlaklık fışkırmayı göstermektedir. Kaynak havuzundan hızlı bir şekilde fışkıran ergimiş metal ışık saçarak yayılmaktadır. Eğer bu fışkırma kaynak havuzundan koptuktan sonra çevreye saçılmayıp, iş parçası ya da kaynak edilen bağlantı elemanına yapışırsa, katılaşır ve çapak dediğimiz belirli bir şekli olmayan forma dönüşmektedir.



Şekil 4.38: Kabartı/Projeksiyon Direnç Kaynağında Fışkırma ve Çapak Oluşumu.

Uygulamada çapaklanma mikroskop altında tespit edilir. Çapak dediğimiz (Şekil 4.38) yapı boy ve en ölçümü yapılarak raporlanmaktadır. Ölçülen değerler belirlenmiş şartlara uygunluğuyla karşılaştırılır ya da var/yok kıstasına tabi tutularak çapak değerlendirilmektedir.

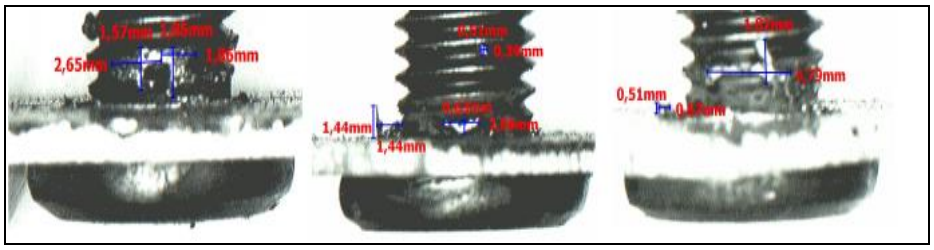
Uygulamada çapağın sayısallaştırılması sadece boyut ölçümüyle yapılmaktadır. Çapak oluşumuna sebep olan fışkırma değerlendirmeye alınmamaktadır. Fışkırma bir çapak olamamakla birlikte çapak olma potansiyelini taşıyan bir risk unsurudur. Bu sebeple çapak ve fışkırmayı bir potada ele alan bir metodoloji geliştirilmesi benimsenmiştir.

Çapaklanma mikroskop yardımıyla yapılan ölçümler sonucu nicel değerler elde edilmektedir. Fakat fışkırma için hiçbir yöntem uygulamada ya da literatürde rastlanmamıştır.

Fışkırma kaynak havuzundan yüksek enerjiyle ayrılan ergimiş metin etrafa yanarak saçılmasıyla oluşmaktadır. Sac-cıvata kaynak ikilisini bir bütün değerlendirdiğimizde kaynak havuzunda bir kütle uzaklaşmaktadır. Yani sac-cıvata ikilisinin kütlesinde başa göre bir azalma olması beklenmektedir. Bu durum

değerlendirilerek fışkırmanın sayısallaştırılmasında sac-cıvata ikilisinin kaynak öncesi toplam ağırlığıyla kaynak sonrası toplam ağırlıkları arasındaki fark kullanılacaktır. Bu fark kaynak sırasında eser miktarda yanma sonucu atmosfere karışan maddelerde vardır. Ama miktarı ergimiş metalin kütlesiyle kartlaştırıldığında ihmal edilecek düzeydedir. Sonuç olarak fışkırmanın nicel olarak sac-cıvata ikilisinin toplam ağırlıklarının kaynak öncesi ve sonrası farkı benimsenmiştir.

Fışkırma esnasında yanarak dağılan ergimiş metal etrafa bir ışık saçmaktadır. Oluşan bu ışıkla sistemin kaynak öncesi ve sonrası kütle farkı arasındaki ilişkisi durumu da incelenecektir.



Şekil 4.39: Kaynak Sonrası Çapak Oluşmuş Cıvata Örnekleri.

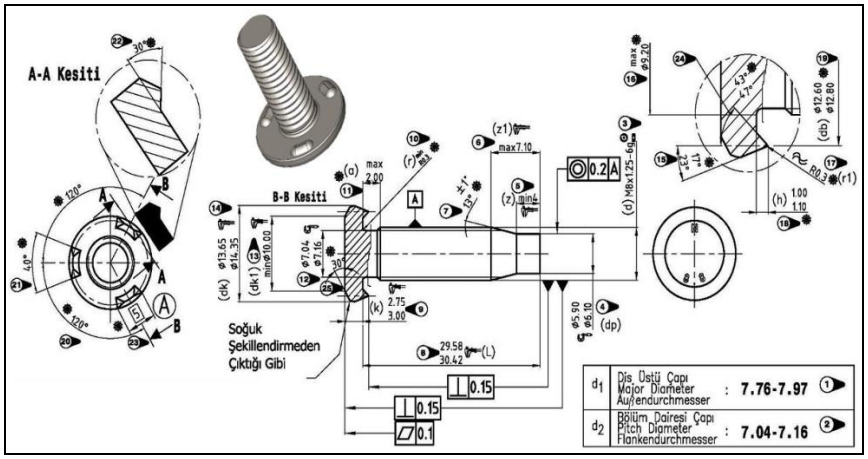
Kabartı kaynağı sonrası oluşan çapaklar her zaman farklı şekillerde oluşmaktadırlar. Oluşan bu çapakların ölçümleri en büyük yükseklik ve genişlik değerlerine ulaşılacak şekilde yapılmaktadır. Fakat yüzey genişlikleri değerlendirildiğinde birbirinden farklı değerlere sahiptirler (Şekil 4.39).

Çapaklar sadece maksimum yükseklik ve genişlik değerleri bir ön değerlendirmeye tabi tutulmadan kullanılacak olursa yanıltıcı sonuçlar elde edilebilir. Oluşan çapakların yüzey alanları birbirinden farklı olup, yüzey alanlarının tespitiyle çapaklar arasındaki fark ortaya konabilir. Çapağın hacimsel bir yapısı olması bir sapma sebebiyet verebilir. Fakat hesaba katılmayan üçüncü boyut olan kalınlığın yüzeye oranı çok küçük olduğundan kalınlık ihmal edilebilir olarak görülmüştür. Bu durum çapakların cıvataların üzerinden temizlenip, temizlenen çapak parçalarının değerlendirilmesiyle aşılabilir. Ancak bu temizleme işlemi çok zahmetli ve cıvatadan malzeme koparma riski olduğundan uygulanabilir ve ekonomik bulunmamıştır.

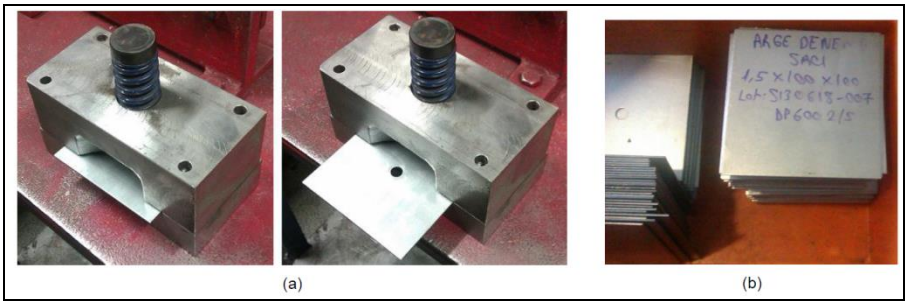
4.9. Makine ve Malzeme

Deneylerde M8 diş açılmış 20MnB4 çeliğinden imal edilen, 8,8 kalitede cıvatalar kullanılmıştır. Cıvatalar üç adet üçgen kesite sahip muz/yay tipi kabartıya sahip ve kaplamasızdır (Şekil 4.40).

Cıvataların kaynatıldığı saclar 1,5 mm DP600 kalite çelik olup, iki yüzeyi galvaniz kaplıdır (kaplama kalınlığı:10 µm). Bu çelik saclar 100x100 mm ebatlarında dilimlenmiştir. Dilimlenen 100x100 mm ebatındaki sac plakalara kalıp yardımıyla tam ortalarından Ø 9 mm'lik delik açılmıştır (Şekil 4.41). Kalıp yardımıyla bu işlemin gerçekleştirilmesi hem hızlı numune hazırlama, hem standart çapta ve konumda delik elde etme hem de matkapla delmeye göre çapaksız delik elde etme avantajları sağlamıştır.



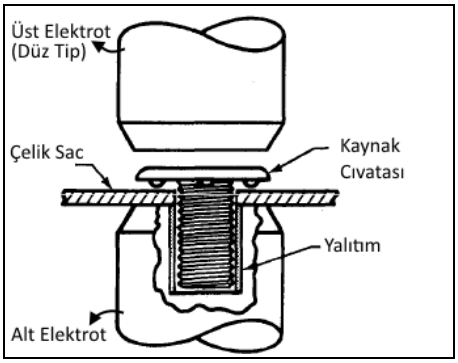
Şekil 4.40: Muz/Yay Tipinde Üçgen Kesite Sahip Üç Adet Kabartıya Sahip M8 Norm Cıvata Üretimi Kaynak Cıvatası.



Şekil 4.41: a) Sac Plakalara Ø 9 mm'lik Delik Açma Amacıyla İmal Edilen Delme Kalıbı, b) İki Yüzeyi Galvaniz Kaplı 1,50 mm'lik Kalınlıkta DP600 Çeliğinden Sac Plakalar.

Kaynak öncesi ve sonrası fışkırmanın sayısallaştırılmasında kullanılacak kütle ölçümleri 0,1 mg hassasiyete sahip terazide gerçekleştirilmiştir.

Kaynak elektrotları, Şekil 4.42'de temsil edilen çizimdeki gibi üst elektrot düz tip, alt elektrot ortasında cıvata şaftını yerleştirecek şekilde boşluklu ve bu boşluk akım atlamalarına karşı izole edilmiş bir elektrot grubu seçilmiştir [8].



Şekil 4.42: Deneyler Sırasında Kullanılan Elektrot Grubu.

Kaynak işlemleri Şekil 4.43'te olan Coşkunöz yapımı Maksima CPP projeksiyon kaynak makinası (pres tipi, anma gücü 180 kVA - %50 DT, su soğutmalı) ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinde kaynak kuvveti kaynak makinesi üzerindeki oransal valf ile ayarlanmaktadır. Kaynak akımı ise kaynak makinesi kontrol ünitesi çıktı değerlerinden ve akım ölçerle tespit edilmiştir. Kaynak işlemleri resim analizi için 50 fps görüntüleme hızına sahip, manuel odaklanma kontrolü ile sabit odak çekimi sağlayan Panasonic marka bir video kamera kullanılmıştır. Kaynak sonrası kaynatılan numunelerin çapak analizi için stereo mikroskop kullanılmıştır.

Şekil 4.43: Deneylerde Kullanılan Coşkunöz Yapımı Maksima CPP 180kVA Kaynak Makinesi.

5. DENEY ÇALIŞMALARI

Fışkırma ve çapaklanma endeksinin oluşturulmasında önemli noktalardan biri önerilen endeks hesaplama yaklaşımının doğruluğunu sağlayacak deneylerin gerçekleştirilmesidir. Bunu sağlamak için deney sayıları ve kaynak parametrelerinin farklılığını gözeten birbirinden farklı iki deney grubu oluşturulmuştur. Grup-1 deneyleriyle fışkırma ve çapaklanma için metot geliştirilecektir. Grup-2'de ise ulaşılan metodolojinin doğruluğu değerlendirilecektir.

5.1. Grup-1 Deneyleri

Birinci deney grubu Tablo 5.1'de görüldüğü gibi kaynak akımının, kaynak süresinin birlikte değiştirildiği beş farklı deney seti 4'er tekrar ile toplamda 20 adet cıvata kaynak edileceği bir plan benimsenmiştir.

Tablo 5.1: Grup-1 Deneyleri için Seçilen Kaynak Programı.

KAYNAK NO	KAYNAK PARAMETRELERİ					BİRİM DİRENÇ İÇİN ENERJİ $Q/R = I^2t$ [MJ/Ω]
	Akım, I [kA]	Çevrim Süresi, $t_ç$	Puls	Elektrot Basıncı [bar]	Süre, t [ms]	
1, 2, 3, 4	26	3	1	0,3	60	40,56
5, 6, 7, 8	24	3	1	0,3	60	34,56
9, 10, 11, 12	22	4	1	0,3	80	38,72
13, 14, 15, 16	20	4	1	0,3	80	32,00
17, 18, 19, 20	18	4	1	0,3	80	25,92

Fışkırma endeksinin tanımlanmasına girdi oluşturması için Grup-1 deneylerinin kaynak edilecek sac-cıvata çiftleri kaynak planında kullanılacağı deney setine göre numaralandırılıp, kaynak öncesi kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Cıvataların saclara plana uygun kaynakları sırasında kaynak işlemi kayıt altına alınmıştır. Kayda alınan video fışkırma neticesinde eksilen kütleyle oluşan ışığın arasında bir korelasyonu değerlendirmek için analiz edilecektir.

Kaynak işlemleri sırasında kaynak makinesine tanımlanan akım değerleri anlık şebeke dalgalanmaları, empedans etkisi ve kaynak makinesinin toleranslarından dolayı farklık gösterebilmektedir. Kaynak anındaki akım değerleri kaynak makinesinin çıkış göstergelerinden kayda alınmıştır.

Kaynak işleminden sonra tekrar kaynatılmış sac-cıvata ikilisinin ağırlıkları ölçülmüştür.

5.2. Fışkırma Yoğunluğu ve Çapak Ölçme/Değerlendirme Metodolojisinin Oluşturulması

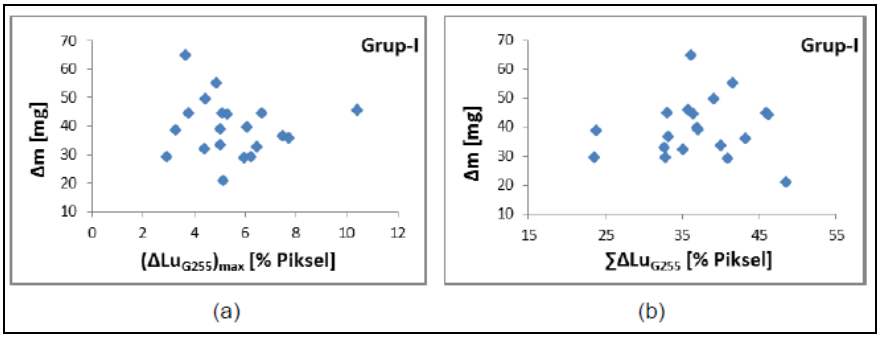
Grup-1 deneyinden alının sonuçlar Tablo 5.2'de derlenmiştir. Kameranın elverdiği görüntüleme hızı mertebesinde resimlere (karelere) ayırıp, fışkırma sonucu meydana gelen parlama, Luminosity (Gri) Endeksi-255 (LuG255) değeri ile belirlemiştir. Fışkırma öncesinde ortamın da bir LuG255 değeri olduğundan, fışkırma sonucu parlaklıktaki artış ΔLuG255, başlangıçtaki değerle fark alınarak her bir kare için hesaplanmıştır. Parlama artımları kaynak sırasında maksimum artımın yakalandığı anındaki ΔLuG255 değeri ve kaynak süresini temsil eden bütün karelerin Parlama artımlarının toplamı olarak değerlendirilip, sonuçlar Tablo 5.2'ye yansıtılmıştır.

Deneyler farklı kaynak akım ve süresi birlikte değiştirilmiştir. Kaynakta verilen enerjinin değeri sonuçları değerlendirme de önem arz etmektedir. (2.1) eşitliğindeki direnç değeri ölçülemediğinden eşitlik $Q/R=i^2*t$ olarak düzenlenerek birim direnç başına enerji miktarı hesaplanmıştır (Tablo 5.2).

Deney öncesi ve sonrası kütle farklarına bakıldığında fışkırma endeksinin temelini oluşturacak kütle azalması öngörüleri doğruladığı görülmektedir. Fakat kaynak havuzundan parlayarak etrafa saçılan fışkırmanın neden olduğu kütle kaybıyla hem maksimum parlama hem de parlama artımlarının toplamı arasında bir korelasyon olmadığı Şekil 5.1'de görülmektedir. Fışkırma endeksi için hesaplanan kütle değerleri çok küçük olduğundan bir eşitlik, skala veya göstergede anlamlı olmayacağından değerler binle genişletilip, fışkırma endeksi hesaplanmış oldu.

Tablo 5.2: Grup-1 Deney Sonuçları Tablosu.

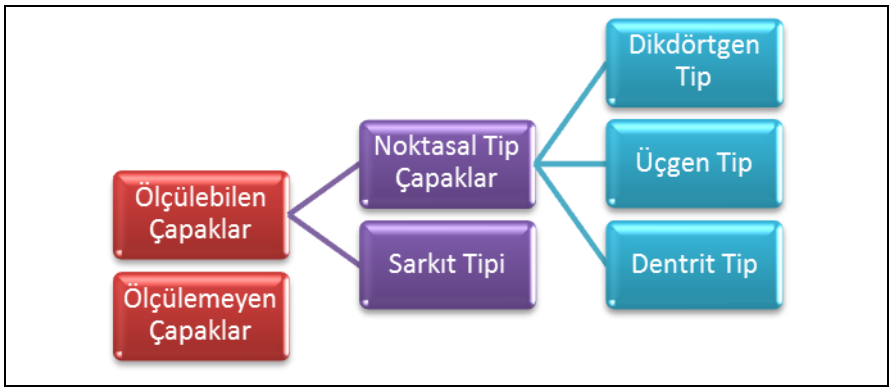
KAYNAK NO	KAYNAK PARAMETRELERİ					BİRİM DİRENÇ İÇİN ENERJİ $Q/R = I^2t$ [MJ/Ω]	KÜTLE			FIŞKIRMA ENDEKSİ $E_{FŞK}$	PARLAKLIK	
	Akım, I [kA]	Çevrim Süresi, $t_ç$	Puls	Elektrot Basıncı [bar]	Süre, t [ms]		Kaynak Öncesi m_0 [g]	Kaynak Sonrası m_1 [g]	Kayıp Δm [g]		Maksimum Parlaklık Artımı $(\Delta Lu_{G255})_{max}$ [% Piksel]	Toplam Parlaklık Atımı $\sum\Delta LuG_{255}$ [% Piksel]
1	26	3	1	0,3	60	40,56	125,2386	125,1930	0,0456	45,57	10,43	35,85
2							122,9675	122,9029	0,0646	64,60	3,72	36,23
3							125,3949	125,3583	0,0366	36,57	7,51	33,25
4							125,0359	124,9975	0,0384	38,40	3,32	23,89
5	24	3	1	0,3	60	34,56	125,5663	125,5329	0,0334	33,43	5,08	40,10
6							123,2374	123,1879	0,0495	49,47	4,47	39,19
7							124,2520	124,2227	0,0293	29,30	2,97	23,58
8							123,2471	123,2026	0,0445	44,50	3,83	33,11
9	22	4	1	0,3	80	38,72	124,5464	124,5018	0,0446	44,57	6,68	45,94
10							125,0160	124,9871	0,0289	28,90	6,01	40,99
11							124,6881	124,6484	0,0397	39,67	6,13	36,95
12							123,7471	123,7179	0,0292	29,23	6,27	32,78
13	20	4	1	0,3	80	32,00	125,0672	125,0315	0,0357	35,73	7,74	43,22
14							125,3539	125,3149	0,0390	38,97	5,06	37,06
15							124,3860	124,3310	0,0550	55,03	4,90	41,64
16							124,9766	124,9447	0,0319	31,87	4,42	35,18
17	18	4	1	0,3	80	25,92	125,2060	125,1615	0,0445	44,47	5,14	36,42
18							124,9536	124,9209	0,0327	32,70	6,52	32,73
19							124,6156	124,5949	0,0207	20,67	5,18	48,54
20							124,2527	124,2087	0,0440	44,00	5,34	46,15



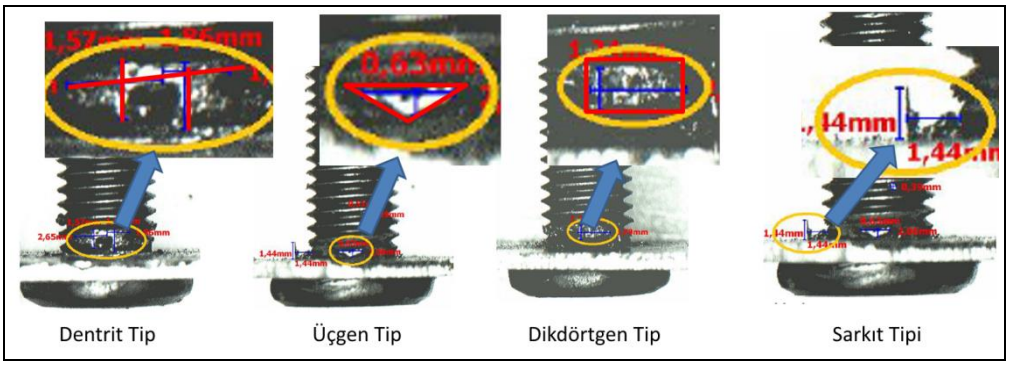
Şekil 5.1: Kütle Eksilmesi ile Kaynak Parlaması arasındaki ilişki: a)Kütle Farkı ile Maksimum Parlaklık Artımı, b) Kütle Farkı ile Parlaklık Artımı Toplamı.

$$E_{FŞK}=\Delta m\ 1000 \qquad (5.1)$$

Çapakların yüzey alanlarının ölçümüyle çapaklar arası farkın ve çapağın nicel değerinin tam olarak ortaya konması önemlidir. Ancak bu ölçümün eldeki imkanlarla olabilirliği yoktur. Olsa bile ölçümler uzun zaman alacağından uygulanabilir değildir. Bu noktada çapaklar arası benzerlikler ortaya konup, sınıflandırma yolu benimsenmiştir.

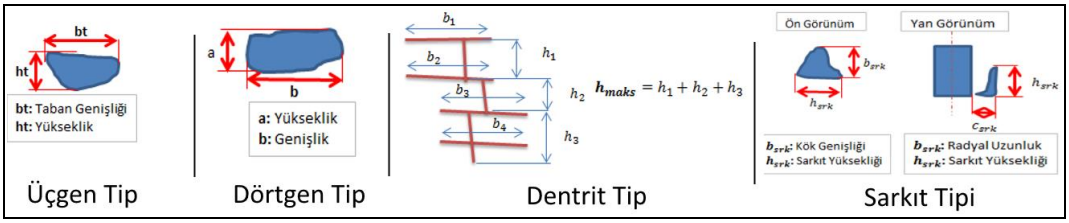


Şekil 5.2: Çapakların Sınıflandırması.



Şekil 5.3: Ölçülebilen Çapak Tiplerine Örnekler.

Grup-1 deneyleri sonrası kütle ölçümü yapıldıktan stereo mikroskop altında çapak ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada mikroskop altında tespit edilebilen çapaklar; ölçülüp, ölçülmemesine göre ikiye ayrılmıştır. Daha sonra çapaklar incelendiğinde da *noktasal tip* ve *sarkıt tipi* olarak adlandırması uygun bulunan iki tipte olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.2). *Noktasal tip* ise *üçgen, dikdörtgen* ve *dentrit* olmak üzere üçe ayrılmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.4: Çapak Tipleri ve Ölçümleri.

Noktasal tip çapaklar için ölçülen yükseklik ve genişlik değerleri çarpılarak çapaklanma değerleri elde edilmiştir (5.2)-(5.4). Sarkıt tipi çapaklarda ise çapağın yükseklik ile genişlik değeri çarpılıp, cıvata şaftına uzaklığın yükseklikle çarpının

yarısıyla toplanarak çapaklanma değeri hesaplanması benimsenmiştir (5.5), (Şekil 5.4).

$$C_{den} = \Sigma\{[(b_{den})_1 + (b_{den})_2 + (b_{den})_3 + ...]\ (h_{den})max\} \quad (5.2)$$

$$C_{üçg} = \Sigma(b_{üçg}\ h_{üçg}) \quad (5.3)$$

$$C_{drg} = \Sigma(a_{drg}\ b_{drg}) \quad (5.4)$$

$$C_{srk} = \Sigma(b_{srk}\ h_{srk}) + 1/2\Sigma(c_{srk}\ h_{srk}) \quad (5.5)$$

Grup-1 deneyleri sonrası ulaşılan yukarıdaki yaklaşımlara dayanarak ölçümler derlenmiş ve çapak tipleri için çapaklanma değerleri tespit edilmiştir.

Tablo 5.3: Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Oluşan Çapak Sayıları.

KAYNAK NO	ÇAPAK SAYISI				
	Ölçülebilen n	Ölçülemeyen n'	**Toplam N**	Noktasal Tip N_{nkt}	Sarkıt Tipi N_{srk}
1	2	2	**4**	4	
2	1	1	**2**	2	
3	7	4	**11**	8	3
4	6	3	**9**	5	4
5	2	3	**5**	5	
6	4	2	**6**	6	
7	6	2	**8**	5	3
8	8	4	**12**	7	5
9	3	3	**6**	5	1
10	6	2	**8**	4	4
11	5	2	**7**	4	3
12	11	2	**13**	7	6
13	7	3	**10**	8	2
14	1	1	**2**	1	1
15	1	2	**3**	3	
16	3	6	**9**	8	1
17	2	1	**3**	2	1
18	1	1	**2**	2	
19	1	3	**4**	4	
20	1	1	**2**	2	

Tablo 5.4: Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Oluşan Noktasal Tip Çapak Çeşitlerinin Stereo Mikroskop ile Ölçülen Karakteristik Boyutları.

Dentrit Görünümlü Çapak Ebadı															Üçgen Tipi Çapak Ebadı						Dörtgen Tipi Çapak Ebadı					
I					II					III					I		II		III		I		II		III	
Taban Genişliği b_1 [mm]	Taban Genişliği b_2 [mm]	Taban Genişliği b_3 [mm]	Taban Genişliği b_4 [mm]	Max. Yüksekliik h_{max} [mm]	Taban Genişliği b_1 [mm]	Taban Genişliği b_2 [mm]	Taban Genişliği b_3 [mm]	Taban Genişliği b_4 [mm]	Max. Yüksekliik h_{max} [mm]	Taban Genişliği b_1 [mm]	Taban Genişliği b_2 [mm]	Taban Genişliği b_3 [mm]	Taban Genişliği b_4 [mm]	Max. Yüksekliik h_{max} [mm]	Taban Genişliği b_1 [mm]	Yüksekliik h_1 [mm]	Taban Genişliği b_1 [mm]	Yüksekliik h_1 [mm]	Taban Genişliği b_1 [mm]	Yüksekliik h_1 [mm]	Genişlik b [mm]	Yüksekliik a [mm]	Genişlik b [mm]	Yüksekliik a [mm]	Genişlik b [mm]	Yüksekliik a [mm]
2,34	3,81			2,23	5,94	3,81			2,40																	
																					1,53	3,13				
3,69	5,13	3,38		3,73	2,21				1,16						2,47	0,77					5,31	1,16				
3,97	4,26			1,78																	6,31	0,94				
3,43	4,26			1,44																	2,79	1,24				
2,06				0,91																	0,39	0,87	2,65	1,57	1,86	1,86
2,91	3,31			2,30																	3,24	0,61	1,81	0,46		
2,92	3,11			1,37																	0,99	1,29	1,99	1,36		
															2,06	0,63					0,39	0,51				
																					2,01	0,87	4,34	2,10		
4,79				1,82																	2,31	0,74				
2,30	3,25			1,81	5,46	3,20			1,94						0,52	1,07					4,21	1,00	2,91	0,46		
0,96	3,36			1,49											1,57	0,63					0,51	0,83	0,76	0,47	1,24	0,79
																					2,30	0,54				
																					0,59	0,39	2,06	0,47		
																					1,73	0,54				
																					2,01	0,83				
															1,067	0,63										
																					1,78	1,16				

Tablo 5.3'teki çapak ölçüm değerleri (5.2.5.5) eşitliklerinden yararlanılarak her deney seti için oluşan her çapak tipine göre çapaklanma değeri elde edilmiştir. Elde edilmelerinde ki temel unsur alan hesabıdır. Fakat ebat ölçüleri aynı olan iki farklı çapak tipinin endekse katkıları aynı olmamalıdır. Bu nokta çapaklanma endeksine katkıları rafine edebilmek için her tip çapak için alan katsayısı belirlenmiştir.

Tablo 5.5: Çapak Tipine Göre Alan Katsayıları.

Çapak Tiplerine Göre Alan Katsayıları				
Çapak Tipi	*Dentrit*	*Üçgen*	*Dikdörtgen*	*Sarkıt*
Sembol	ξ	λ	ϕ	Ψ
Değer	3/5	1/2	1	1/4

Stereo mikroskopla yapılan çapak incelemelerinde tespit edilen fakat ölçümü yapılamayan çapakları (n') da dikkate alan (5.6) eşitliği çapaklanma endeksinin hesabı olarak belirlenmiştir.

$$E_{ÇPK} = (n'2 / 100) + (\xi\ C+/I + \lambda\ Cüçg + \varphi\ Cdrg + \Psi\ Csrk) \tag{5.6}$$

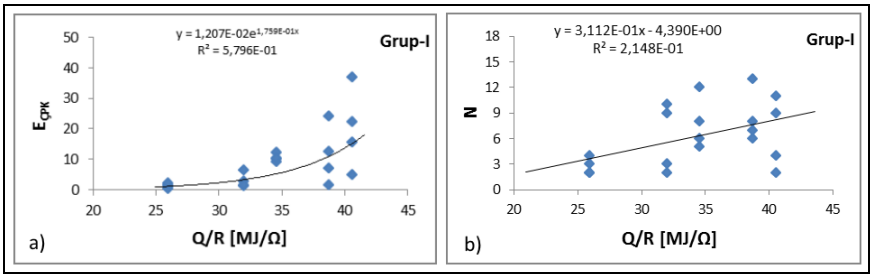
Çapaklanma endeksini baz alınarak yapılan çapaklanma endeks değerleri Tablo 5.6'da derlenmiştir.

Birim direnç için enerji değeriyle çapaklanma endeksi arasında bir ilişki olduğu Şekil 5.5'te görülmektedir. Fakat toplam çapak sayısıyla birim direnç için enerji değeri arasında bir ilişki veya eğilime rastlanmamıştır. Ayrıca çapak sayısının çok olması çapaklanma endeksinin yani çapaklanmanın da yüksek olduğu çıkarımına ufak bir değerlendirmeyle de ulaşılabilir. Tek çapak olur ama çapak büyüktür. Bu durumda çapaklanma yüksek çıkacaktır. Bu sebeple çapak sayısıyla çapaklanma arasında bir korelasyon aranması sağlıklı görülmemekle birlikte Grup-2 sağlama deneylerinde durum netleşecektir.

$$E = E_{FŞK} + E_{ÇPK} \tag{5.7}$$

Tablo 5.6: Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Noktasal ve Sarkıt Tipi Çapaklanma Faktörleri ve Alan Katsayıları ile Hesaplanan Çapaklanma Endeksi Değerleri.

KAYNAK NO	NOKTASAL TİP ÇAPAKLANMA FAKTÖRLERİ				ALAN KATSAYILARI				ÇAPAKLANMA ENDEKSİ
	Dentrit Görünümlü Çapaklanma Faktörü C_{den} [mm^2]	Üçgen Görünümlü Çapaklanma Faktörü $C_{üçg}$ [mm^2]	Dörtgen Görünümlü Çapaklanma Faktörü C_{drg} [mm^2]	Sarkıt Tipi Çapaklanma Faktörü C_{srk} [mm^2]	ξ	λ	φ	ψ	$E_{ÇPK}$
1	37,11	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	22,31
2	0,00	0,00	4,79	0,00	3/5	1/2	1	1/4	4,80
3	48,07	1,90	6,16	3,13	3/5	1/2	1	1/4	36,90
4	14,65	0,00	5,93	3,46	3/5	1/2	1	1/4	15,68
5	11,07	0,00	3,46	0,00	3/5	1/2	1	1/4	10,19
6	1,87	0,00	7,96	0,00	3/5	1/2	1	1/4	9,12
7	14,31	0,00	2,81	2,83	3/5	1/2	1	1/4	12,14
8	8,26	0,00	3,98	4,94	3/5	1/2	1	1/4	10,33
9	0,00	1,30	0,20	2,68	3/5	1/2	1	1/4	1,61
10	0,00	0,00	10,86	6,17	3/5	1/2	1	1/4	12,45
11	8,72	0,00	1,71	0,90	3/5	1/2	1	1/4	7,21
12	26,85	0,56	5,55	8,93	3/5	1/2	1	1/4	24,21
13	6,44	0,99	1,76	0,98	3/5	1/2	1	1/4	6,45
14	0,00	0,00	0,00	10,65	3/5	1/2	1	1/4	2,67
15	0,00	0,00	1,24	0,00	3/5	1/2	1	1/4	1,28
16	0,00	0,00	1,20	0,39	3/5	1/2	1	1/4	1,66
17	0,00	0,00	0,93	0,11	3/5	1/2	1	1/4	0,97
18	0,00	0,00	1,67	0,00	3/5	1/2	1	1/4	1,68
19	0,00	0,67	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,43
20	0,00	0,00	2,06	0,00	3/5	1/2	1	1/4	2,07

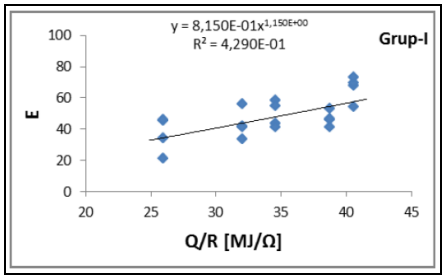


Şekil 5.5: Grup-1'de Birim Direnç için Teorik Olarak Hesaplanan Enerji ile a) Çapaklanma Endeksi Arasında Saptanan Bağıntı, b)Toplam Çapak Sayısı Arasında Saptanan Bağıntı.

Çapaklanmanın sebebi kaynak havuzundan ayrılan fışkırmaların saca veya cıvataya yapışması sonucu gerçekleşen bir hadiseydi. Fışkırma ve çapaklanmanın bu sebeple ayrı düşünülmeden tek yapı altında değerlendirilmesi benimsenmişti. Dolayısıyla, her iki endeksin birbiriyle toplanması suretiyle fışkırma ve çapaklanma endeksi E tanımlanmış; Grup-1'deki kaynak işleminde hesaplanan bu bileşik endeks değerleri Tablo 5.7 verilmiştir. Fışkırma ve çapaklanma endeksi ile $Q/R = i^{2*}t$ arasında belirlenen bağıntı Şekil 5.6'da sunulmuştur.

Tablo 5.7: Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Hesaplanan Fışkırma Endeksi ve Çapaklanma Endeksi Değerleri İle Bunların Toplamı Olan Fışkırma ve Çapaklanma (Bileşik) Endeksi Değerleri.

KAYNAK NO	BİRİM DİRENÇ İÇİN ENERJİ $Q/R = I^2t$ [MJ/Ω]	FIŞKIRMA ENDEKSİ $E_{FŞK}$	ÇAPAKLANMA ENDEKSİ $E_{ÇPK}$	FIŞKIRMA ve ÇAPAKLANMA (BİLEŞİK) ENDEKSİ E
1	40,56	45,57	22,31	**67,88**
2		64,60	4,80	**69,40**
3		36,57	36,90	**73,46**
4		38,40	15,68	**54,08**
5	34,56	33,43	10,19	**43,63**
6		49,47	9,12	**58,59**
7		29,30	12,14	**41,44**
8		44,50	10,33	**54,83**
9	38,72	44,57	1,61	**46,17**
10		28,90	12,45	**41,35**
11		39,67	7,21	**46,87**
12		29,23	24,21	**53,44**
13	32,00	35,73	6,45	**42,19**
14		38,97	2,67	**41,64**
15		55,03	1,28	**56,32**
16		31,87	1,66	**33,52**
17	25,92	44,47	0,97	**45,44**
18		32,70	1,68	**34,38**
19		20,67	0,43	**21,09**
20		44,00	2,07	**46,07**

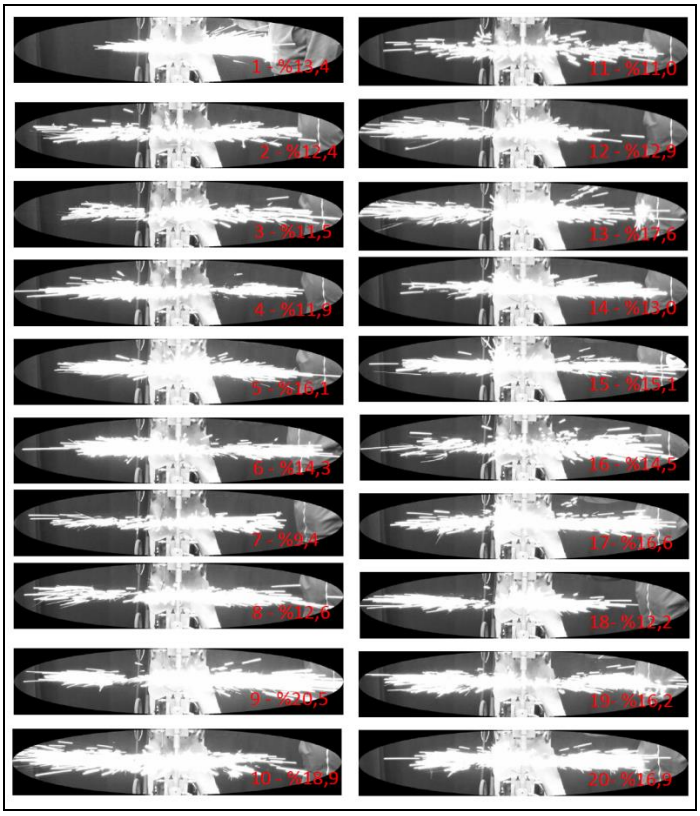


Şekil 5.6: Grup-1'de Yürütülen 20 Adet Projeksiyon Kaynağında Birim Direnç için Teorik Olarak Hesaplanan Enerji ile Fışkırma ve Çapaklanma (Bileşik) Endeksi Arasında Saptanan Bağıntı.

5.3. Grup-2 Deneyleri

Grup-2 deneyleri doğrulama deneyi olarak hizmet edecek olup, Grup-1 deneylerinden bazı farklılıkları vardır. Grup-2 deneyleri 5 tekrardan 5 deney setinden oluşmuştur. Toplamda 25 adet cıvata kaynağı yapılacaktır. Grup-1 deneylerinde kaynak akım ve süre değerleri birlikte değiştirilirken Grup-2 deneylerinde sadece

kaynak akım değeri değiştirilmişidir. Grup-1 deneylerinde kaynak akım değeri olarak kaynak makinesinin kontrol ünitesine tanımlanan değerler dikkatte alınmıştır. Grup-2 deneylerinde empedans değişimi, şebeke güç değişimleri ve makinenin verimliliğinden kaynaklanabilecek kaynak anındaki akım değişimlerine önlem olarak kaynak anında akım ölçer yardımıyla akım değerleri tespit edilmiştir. İki grup arasında bu farklılaşmanın ve değişim unsurlarının etkisinin azaltılması adına önlemler alınması, korelasyonlarda daha hassas sonuçlar elde etmek ve her koşulda önerilen çapaklanma ve fışkırma endeksinin doğru sonuçlar verdiğini göstermektir.



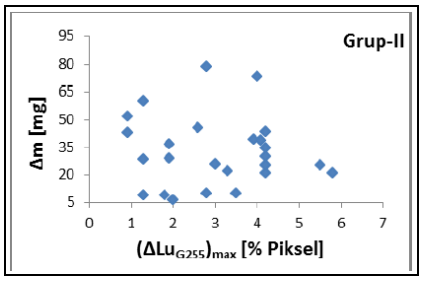
Şekil 5.7: Grup-2'de Yürütülen 25 Adet Projeksiyon Kaynağında Fışkırmaya Bağlı Parlamanın En Fazla Olduğu Karelerde Belirlenen Luminosity (Gri) Endeksi- 255 Parlaklık Artımları.

Grup-1'de uygulanan bütün aşamalar(kaynak öncesi ve sonrası ağırlık ölçümü, kaynak işleminin video kamerayla kaydedilmesi, stereo mikroskop ile çapakların tespiti ve ölçümü) Grup-2 için de belirlenen deney planı özelinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.8: Grup-2'de Yürütülen 25 Adet Projeksiyon Kaynağında Seçilen Kaynak Parametrelerine Karşılık Fışkırmanın Birer Göstergesi Olarak Parçalarda Kütle Kaybı İle Maksimum Parlaklık Artımları.

KAYNAK NO	KAYNAK PARAMETRELERİ						BİRİM DİRENÇ İÇİN ENERJİ $Q/R = I^2t$ [MJ/Ω]	KÜTLE			PARLAKLIK
	Akım, I [kA]		Çevrim Süresi, $t_ç$	Puls	Elektrot Basıncı [bar]	Süre, t [ms]		Kaynak Öncesi m_0 [g]	Kaynak Sonrası m_1 [g]	Kayıp Δm [g]	Maksimum Parlaklık Artımı $(\Delta Lu_{G255})_{max}$ [% Piksel]
	Ayarlanan (Anma)	Ölçülen									
1	10	11,4	3	1	3	60	7,80	124,7001	124,6911	0,0090	1,8
2		11,3					7,66	124,3534	124,3434	0,0100	2,8
3		11,1					7,39	124,8830	124,8763	0,0067	2,0
4		11,5					7,94	124,7187	124,7097	0,0090	1,3
5		11,5					7,94	125,0380	125,0278	0,0102	3,5
6	14	15,6	3	1	3	60	14,60	125,3218	125,3005	0,0213	5,8
7		16,2					15,75	123,7815	123,7592	0,0223	3,3
8		15,6					14,60	125,3240	125,3027	0,0213	4,2
9		16,3					15,94	125,6052	125,5793	0,0259	3,0
10		16,3					15,94	123,8162	123,7910	0,0252	5,5
11	18	18,7	3	1	3	60	20,98	124,3657	124,3370	0,0287	1,3
12		20,4					24,97	124,9269	124,8839	0,0430	0,9
13		20,7					25,71	123,4499	123,4103	0,0396	3,9
14		20,7					25,71	124,7195	124,6942	0,0253	4,2
15		20,7					25,71	124,8213	124,7913	0,0300	4,2
16	22	22,7	3	1	3	60	30,92	124,7632	124,7286	0,0346	4,2
17		22,9					31,46	125,0171	124,9782	0,0389	4,1
18		22,9					31,46	124,4866	124,4261	0,0605	1,3
19		23,2					32,29	123,7990	123,7555	0,0435	4,2
20		23,3					32,57	124,2840	124,2552	0,0288	1,9
21	26	24,8	3	1	3	60	36,90	123,9271	123,8901	0,0370	1,9
22		25,8					39,94	124,9235	124,8713	0,0522	0,9
23		25,7					39,63	124,7001	124,6215	0,0786	2,8
24		25,3					38,41	123,9624	123,9168	0,0456	2,6
25		26,1					40,87	124,6537	124,5800	0,0737	4,0

Deneyler sırasında alınmış video kayıtlarının deney seti için görüntüleri Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Video kaydından alınmış bu resimlerin parlaklık analiz sonuçları da Tablo 5.8'deki gibidir.

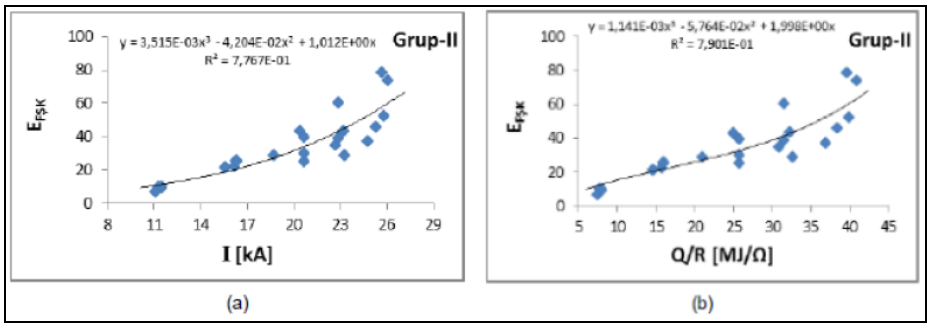


Şekil 5.8: Grup-2'de Kütle Kayıp Miktarlarıyla Maksimum Parlaklık Artımı Arasındaki Bağıntı.

Grup-1 deneylerinde kütle azalmasıyla parlaklık arası bir korelasyon görülmediği tespit edilmişti. Fakat kesin bir hüküm koymadan Grup-2 deneylerinin sonuçları beklenmişti. Şekil 5.8 incelendiğinde kütle azalması-maksimum parlama arasında Grup-2 deneylerinde de bir ilişki tespit edilmemiştir. Bu yaklaşımın başarısız olmasının en önemli sebeplerinden biri kaynak işlemi tam makineyi karşıdan görecek şekilde tek açıdan kayda alınmıştır. Fakat fışkırma üç boyutta gerçekleşmekte olup, sadece tek kamerayla sağlıklı sonuç alınamayacağı, bir birine senkronize en az üç kameranın kullanımıyla bu durumun aşılabileceği değerlendirildi. Ayrıca kameranın saniyedeki kare (fps) sayısının yetersiz kalması ve kaynak çevriminde oluşan fışkırmanın tümünü kayıt altına almaması diğer bir faktör olarak söylenebilir.

Tablo 5.9: Grup-2'de Yürütülen 25 Adet Projeksiyon Kaynağında Akım ve Birim Direnç İçin Teorik Olarak Hesaplanan Enerji Değerlerine Karşılık Fışkırma Endeksi Değerleri.

KAYNAK NO	Ölçülen Kaynak Akımı, I [kA]	Birim Direnç İçin Enerji $Q/R = I^2t$ [MJ/Ω]	FIŞKIRMA ENDEKSİ $E_{FŞK}$
1	11,4	7,80	9,00
2	11,3	7,66	10,00
3	11,1	7,39	6,70
4	11,5	7,94	9,00
5	11,5	7,94	10,20
6	15,6	14,60	21,30
7	16,2	15,75	22,30
8	15,6	14,60	21,30
9	16,3	15,94	25,90
10	16,3	15,94	25,20
11	18,7	20,98	28,70
12	20,4	24,97	43,00
13	20,7	25,71	39,60
14	20,7	25,71	25,30
15	20,7	25,71	30,00
16	22,7	30,92	34,60
17	22,9	31,46	38,90
18	22,9	31,46	60,50
19	23,2	32,29	43,50
20	23,3	32,57	28,80
21	24,8	36,90	37,00
22	25,8	39,94	52,20
23	25,7	39,63	78,60
24	25,3	38,41	45,60
25	26,1	40,87	73,70



Şekil 5.9: Grup-2 Deneylerinde a) Ölçülen Akım Değerleriyle Fışkırma Endeksinin, b)Birim Direnç Başına Enerjiyle ile Fışkırma Endeksinin İlişki Grafiği.

Tablo 5.9'da kütle farklarından yararlanılarak fışkırma endeksinin ve ölçülen akımdan yararlanarak birim direnç başına düşen enerjinin hesaplanıp, derlendiği veriler sunulmuştur. Verilerin daha iyi yorumlanabilmesi adına Şekil 5.9'da sunulmuş fışkırma endeksinin ölçülen akım değerleriyle ve birim direnç başına enerji miktarı arasındaki ilişki grafikleri ciddi bir örtüşme ve bağıntı sergilemektedir. Artan akım ve enerjiyle fışkırma endeksinin yani fışkırma oluşma riskinin arttığı görülmektedir. Ayrıca kaynak akımının akım ölçer vasıtasıyla tespit edilmesi grafikteki saçılmayı azalttığı görülmektedir.

Tablo 5.10: Grup-2'de Yürütülen 25 Adet Projeksiyon Kaynağında Oluşan Çapak Sayıları.

KAYNAK NO	ÇAPAK SAYISI				
	Ölçülebilen n	Ölçülemeyen n'	Toplam N	Noktasal Tip N_{nkt}	Sarkıt Tipi N_{srk}
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15		6	6	6	
16	1		1		1
17	1	4	5	5	
18	2	1	3	2	1
19	3	3	6	4	2
20	2	2	4	2	2
21	3	4	7	6	1
22	6	4	10	7	3
23	5	5	10	5	5
24	5	6	11	7	4
25	7	2	9	5	4

Tablo 5.11: Grup-2 Kapsamında Yapılan Cıvata Kaynaklarında Tespit Edilen Sarkıt Tipi Çapakların Ebatları.

NO	Sarkıt Ebadı [mm]																	
	ÖNDEN GÖRÜNÜŞ										YANDAN GÖRÜNÜŞ							
	I		II		III		IV		V		I		II		III		IV	
	Kök Genişliği b_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]	Kök Genişliği b_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]	Kök Genişliği b_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]	Kök Genişliği b_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]	Kök Genişliği b_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]	Radyal Uzunluk c_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]	Radyal Uzunluk c_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]	Radyal Uzunluk c_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]	Radyal Uzunluk c_{sk} [mm]	Sarkıt Yüksekliği h_{sk} [mm]
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16	1,64	1,03																
17																		
18	1,77	0,66									0,34	0,66						
19	0,27	0,54																
20	2,39	1,07	1,90	0,86							0,39	1,07	0,26	0,86				
21																		
22	1,49	0,71	4,39	0,89	0,96	0,32					1,31	0,89						
23	0,84	0,52	2,54	0,96							0,43	0,96						
24	2,84	1,20	2,84	0,81	2,39	0,69					1,27	1,20	0,56	0,72				
25	1,20	1,29	4,01	0,77	1,16	1,05					1,31	0,77	0,65	1,05				

Grup-2 deneylerinde stereo mikroskop incelemelerinde tespit edilen çapakların sayısı ölçülebilmeye göre, sarkıt ve noktasal tipe göre tasnif edilmiş vaziyette Tablo 5.10'da görülmektedir. Grup-2 deneylerinde tespit edilmiş sarkıt tipi çapakların ebatları Tablo 5.11'de derlenmiştir.

Noktasal tipe ait olan üçgen, dikdörtgen ve dentrit görünümlü çapakların tespit edilmiş çapak ebatları Tablo 5.12'de sunulmuştur. Tablo 5.11 ile Tablo 5.12 derlenmiş veriler (5.2)-(5.5) eşitliklerinden yararlanarak üçgen, dikdörtgen, dentrit ve sarkıt tipi için çapaklanma seviyeleri hesaplanmıştır. Hesaplanan çapak değerleri (5.6) eşitliğinde alan katsayılarıyla çarpılıp, çapaklanma endeksi hesaplanmıştır. Tablo 5.13'te fışkırma ve çapaklanma endeks sonuçları derlenmiş, (5.7) eşitliğine göre çapaklanma ve fışkırma bileşik endeksi hesaplanıp yine Tablo 5.13'e yansıtılmıştır.

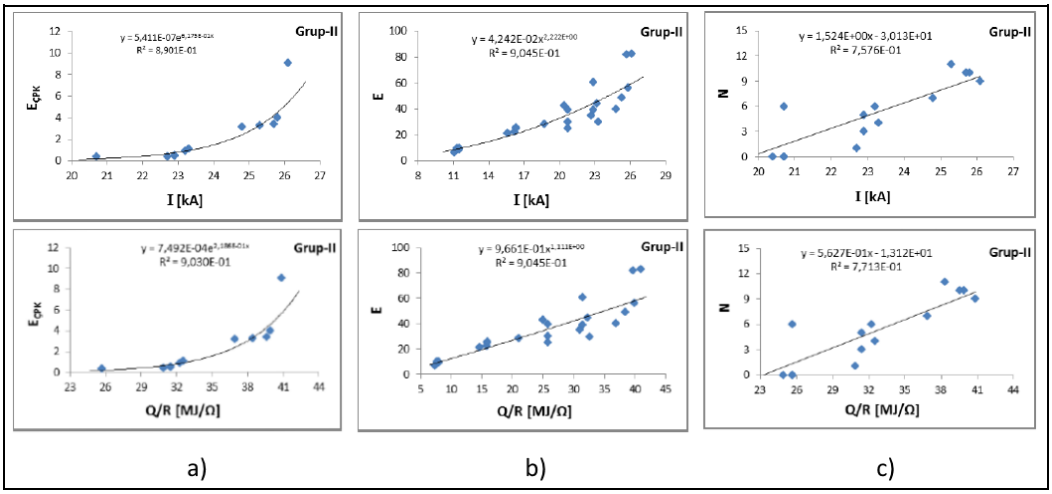
Tablo 5.12: Grup-2 Deneylerinde Yapılan 25 Cıvata Kaynağı Sonrası Noktasal Tip Çapaklara Ait Çapak Ölçüm Tablosu.

NO	Noktasal Tip Çapaklar																											
	Dentrit Görünümlü Çapak Ebadı															Üçgen Tipi Çapak Ebadı						Dörtgen Tipi Çapak Ebadı					
	I					II					III					I		II		III		I		II		III	
	Taban Genişliği b_1 [mm]	Taban Genişliği b_2 [mm]	Taban Genişliği b_3 [mm]	Taban Genişliği b_4 [mm]	Max. Yükseklik h_{max} [mm]	Taban Genişliği b_1 [mm]	Taban Genişliği b_2 [mm]	Taban Genişliği b_3 [mm]	Taban Genişliği b_4 [mm]	Max. Yükseklik h_{max} [mm]	Taban Genişliği b_1 [mm]	Taban Genişliği b_2 [mm]	Taban Genişliği b_3 [mm]	Taban Genişliği b_4 [mm]	Max. Yükseklik h_{max} [mm]	Taban Genişliği b_1 [mm]	Yükseklik h_1 [mm]	Taban Genişliği b_2 [mm]	Yükseklik h_2 [mm]	Taban Genişliği b_3 [mm]	Yükseklik h_3 [mm]	Genişlik b [mm]	Yükseklik a [mm]	Genişlik b [mm]	Yükseklik a [mm]	Genişlik b [mm]	Yükseklik a [mm]
1																												
2																												
3																												
4																												
5																												
6																												
7																												
8																												
9																												
10																												
11																												
12																												
13																												
14																												
15																												
16																												
17																						0,51	0,59					
18																						0,17	1,33					
19	1,53				0,43																	0,67	0,60					
20																												
21	0,80				0,76											1,11	0,34					3,57	0,69					
22	1,77				1,16											0,82	0,93					2,01	0,42					
23																1,16	0,91					0,41	0,34	1,16	0,91	1,36	0,51
24																						0,46	0,36	0,91	0,84		
25																4,10	1,75					1,27	1,20	2,06	0,89	0,46	1,16

Tablo 5.13: Grup-2 Kaynak Deneyleri Sonucu Noktasal ve Sarkıt Tipi Çapaklanma Faktörleri ve Alan Katsayıları İle Hesaplanan Çapaklanma Endeksi, Fışkırma Endeksi ve Bileşik Endeks Sonuçları.

KAYNAK NO	NOKTASAL TİP ÇAPAKLANMA FAKTÖRLERİ			Sarkıt Tipi Çapaklanma Faktörü C_{srk} [mm²]	ALAN KATSAYILARI				ÇAPAKLANMA ENDEKSİ $E_{ÇPK}$	FIŞKIRMA ENDEKSİ $E_{FŞK}$	FIŞKIRMA ve ÇAPAKLANMA (BİLEŞİK) ENDEKSİ $E(E_{ÇPK}+E_{FŞK})$
	Dentrit Görünümlü Çapaklanma Faktörü C_{den} [mm²]	Üçgen Görünümlü Çapaklanma Faktörü $C_{üçg}$ [mm²]	Dörtgen Görünümlü Çapaklanma Faktörü $C_{dörg}$ [mm²]		ξ	λ	φ	ψ			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	9,00	**9,00**
2	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	10,00	**10,00**
3	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	6,70	**6,70**
4	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	9,00	**9,00**
5	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	10,20	**10,20**
6	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	21,30	**21,30**
7	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	22,30	**22,30**
8	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	21,30	**21,30**
9	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	25,90	**25,90**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	25,20	**25,20**
11	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	28,70	**28,70**
12	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	43,00	**43,00**
13	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	39,60	**39,60**
14	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,00	25,30	**25,30**
15	0,00	0,00	0,00	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,36	30,00	**30,36**
16	0,00	0,00	0,00	1,69	3/5	1/2	1	1/4	0,42	34,60	**35,02**
17	0,00	0,00	0,30	0,00	3/5	1/2	1	1/4	0,46	38,90	**39,36**
18	0,00	0,00	0,23	1,22	3/5	1/2	1	1/4	0,54	60,50	**61,04**
19	0,66	0,00	0,40	0,15	3/5	1/2	1	1/4	0,92	43,50	**44,42**
20	0,00	0,00	0,00	4,35	3/5	1/2	1	1/4	1,13	28,80	**29,93**
21	0,61	0,38	2,46	0,00	3/5	1/2	1	1/4	3,18	37,00	**40,18**
22	2,05	0,76	0,84	5,56	3/5	1/2	1	1/4	4,01	52,20	**56,21**
23	0,00	1,06	1,89	2,98	3/5	1/2	1	1/4	3,41	78,60	**82,01**
24	0,00	0,00	0,93	7,84	3/5	1/2	1	1/4	3,25	45,60	**48,85**
25	0,00	7,18	3,89	6,28	3/5	1/2	1	1/4	9,09	73,70	**82,79**

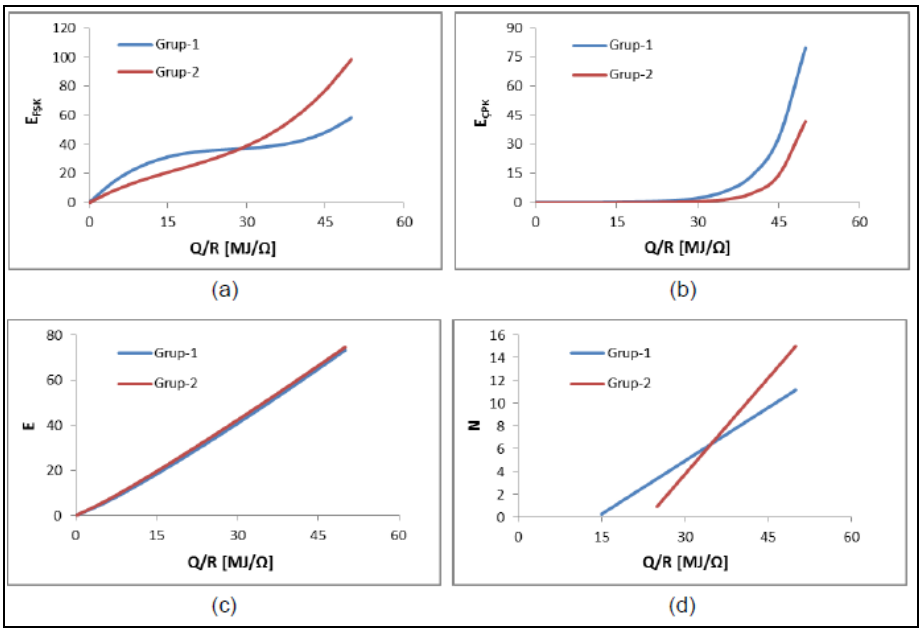
Kaynağın oluşumuna etken önemli sebep olan enerjinin ve enerji üzerinde önemli etken dolayısıyla kaynak üzerinde önemli etken olan akım; çapaklanma üzerine etkisi arasında bir bağlantı olduğu Şekil 5.10'da grafiklerden aşikardır. Fakat toplam çapak sayısının akım ve teorik enerji girdisiyle oluşturduğu grafikte saçılma mevcuttur. Bir bağıntı veya eğilimden bahsetmek söz konusu değildir.



Şekil 5.10: Akım ve Birim Direnç Başına Enerji Miktarıyla a) Çapaklanma Endeksi, b) Bileşik Endeks ve c) Toplam Çapak Sayısı Arasındaki Bağıntı Grafikleri.

6. SONUÇLAR

Kabartı/Projeksiyon kaynağında oluşan çapaklanma ve fışkırmayı sayısallaştırma ve bu iki durum arasındaki ilişkiyi ortaya koymak üzere; 20MnB4 malzemeden imal edilmiş, 8.8 kaliteye sahip kaplamasız M8 bir cıvatanın 1,5 mm kalınlığındaki galvaniz kaplı DP600 kalite saca kaynatıldığı iki grup deneyle fışkırma ve çapaklanma üzerine kaynak akım şiddetinin ve teorik hesap üzerine belirlenen ısı girdisinin etkisi olduğu ve iki parametrenin de benzer eğilimler gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 6.1: Fışkırma ve Çapaklanma Düzeyine Yönelik Tanımlanan ve Önerilen Göstergelere Dair Grup-1 ve Grup-2'den Elde Edilen Bağıntıların Karşılaştırılması: a) Fışkırma Endeksi, b) Çapaklanma Endeksi, c) Fışkırma ve Çapaklanma (Bileşik) Endeksi, d)Toplam Çapak Sayısı ile Birim Direnç için Teorik Olarak Hesaplanan Enerji Arasındaki Değişimi.

Grup-1 ve Grup-2 deneylerinden alınan çapaklanma endeksi, fışkırma endeksi, çapaklanma ve fışkırma bileşik endeksi ayrıca toplam çapak sayısının direnç başına teorik hesaplanan ısı girdisiyle olan bağıntılar Şekil 6.1'de derlenmiştir. Tezin metot kısmında öne sürülen çapaklanma ve fışkırmanın münferit kullanımlarının çapaklanma derecesini ortaya koymada yetersiz kalacağını Şekil 6.1deki grafiklerde görülmektedir. Isı girdisinin toplam çapak sayısıyla (N=n'+n) olan ilişkisi iki farklı grupta benzer eğilim göstermekle birlikte, Grup-2'nin ısı girdisi arttıkça gösterdiği toplam çapak sayısındaki artış eğilimi daha yüksektir. Fışkırma endeksiyle ısı

girdisinin ilişkilendirildiği grafik değerlendirildiğinde Grup-1 30 MJ/Ω'a kadar daha fazla fışkırma gösterirken, bu noktadan sonra Grup-2'nin fışkırma yoğunluğunda daha fazla artış görülmektedir (Şekil 6.1). Isı girdisinin artmasıyla çapaklanma endeksi belli bir seviyeye kadar her iki grupta da değişim göstermezken sonrasında Grup-1'in çapaklanma seviyesinde daha hızlı artış görülmektedir.

Çapaklanma ve fışkırma bileşik endeksinin ısı girdisiyle olan her iki gruptaki bağıntının eğilimi ise nerdeyse tamamen örtüşmektedir. Fışkırma kaynak havuzundan saçılan ergimiş metaldir ve iş parçasına tutunmasıyla çapak oluşmaktadır. Bu durum fışkırmanın çapak oluşumuna potansiyel risk teşkil ettiği açıktır. Potansiyel çapak olan her fışkırmanın çapaklanma endeksinden ayrı değerlendirilmesi hatalı sonuçlara sebebiyet vereceği çapaklanma ve fışkırma endekslerinin ayrı ayrı değerlendirmelerinde farklı eğilim göstermesinden dolayı açık olup, bileşik endeksin her iki grupta tamamen örtüşür derecede uyum göstermesi bu yaklaşımın doğruluğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

[1] Anık S., (1991), "Kaynak Tekniği El Kitabı, Yöntemler ve Donanımlar", 1. Baskı, Kansu Matbaacılık.

[2] Web 1 (2015), http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_fundamentals&file=01530000000Jybm (Erişim Tarihi: 28/09/2015).

[3] Web 2 (2015), http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/metal/moduller/elektrik_direnc_kaynagi.pdf (Erişim Tarihi: 28/09/2015).

[4] Sarı H., (2002), "Alüminyum Alaşımlarının Nokta Direnç Kaynağında Direnç Bileşenleri ve Nokta Boyutları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

[5] ASME (1996), Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay): An American National Standard, American Society of Mechanical Engineers B46.1-1995.

[6] Web 3 (2015), http://www.novacam.com/applications/roughness/ (Erişim Tarihi: 28/09/2015).

[7] Web 4 (2015), http://mercury.kau.ac.kr/welding/Welding%20Technology%20I%20-%20Welding%20Processes/Chapter%208%20-20Resistance%20Spot%20Welding,%20Resistance%20Projection%20Welding%20and%20Resistance%20Seam%20Welding.pdf (Erişim Tarihi: 28/09/2015).

[8] Dent P., Bohr J. C., Gasser R. G., Gerken J. M., Hallum D. L., Lee J. W., McCauley R. B., Orts D. H., Oyler G. W., Shieh W. T., Wu K. C., Manz A. F., (1997), "Spot, Seam, and Projection Welding", Editör: O'Brien R. L., "Welding Handbook 8th Edition Vol. 2: Welding Processes", American Welding Society Inc..

[9] 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.

[10] Durgut E, Kaçar R., (2011), "Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağına Akım Şiddeti Ve Kaynak Zamanının Etkisi", Gazi Üniversitesi. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(2), 341-348.

[11] Aslanlar S., Ogur A., Ozsarac U., Ilhan E., Demir Z., (2007), "Effect Of Welding Current On Mechanical Properties Of Galvanized Chromided Steel Sheets İn Electrical Resistance Spot Welding", Materials and Design, 28(1), 2-7.

[12] Zhang H., Senkara J., (2006), "Resistance Welding: Fundamentals and Applications", 2nd Edition, Taylor & Francis Group.

[13] Akyol M., (2001), “Otomotiv Sanayiinde Kullanılan Nokta Direnç Kaynağı Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[14] Eryürek B., (1982), “Elektrik Direnç Kaynağı”, Mühendis Makine Dergisi, 24, Sayı 279.

[15] Web 5 (2016), http://www.ruukki.co.uk/~/media/Files/Steel-products/Cold-rolled-metal-colour-coated-instructions/Ruukki-Resistance-welding-manual.pdf (Erişim Tarihi: 12/04/2016).

[16] Aslanlar S., Ogur A., Ozsarac U., Ilhan E., (2007), “Welding Time Effect on Mechanical Properties of Automotive Sheets in Electrical Resistance Spot Welding”, Materials and Design, 29(7), 1427-1431.

[17] Almus Z., (2006), ‘’Nokta Direnç Kaynağında Ara Bağlayıcının Birleşme özelliklerine Etkisinin Araştırılması’’, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

[18] Eryürek B., (1976),‘’Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Temas Direncinin Etüdü’’ Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[19] Miller Electric Mfg. Company, (2012), “Handbook for resistance spot welding”, 1st Edition, Miller Electric Manufacturing Company., Appleton, WI.

[20] Metals Handbook, (1983), ‘’Welding Brazing and Soldering Resistance Spot Welding’’, 9th Edition, American Society for Metals.

[21] Web 6 (2016), http://www.swantec.com/technology/resistance-welding/#parameters (Erişim Tarihi: 12/04/2016).

[22] Li W., Cerjanec D., Grzadzinski G. A., (2005), “A comparative study of single-phase AC and multiphase DC resistance spot welding”. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 127, 583-589.

[23] Ünlükal E., (2007), “Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Kalitesinin Artırılması’’, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[24] Akyol M., (2001), “Otomotiv Sanayiinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[25] Anık S., Oğur A., Vural M., Karakaya Ç., (2003), “Farklı Kalınlıktaki Malzemelerin Elektrik Direnç Dikiş Kaynağı Uygulamaları”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, 215-222, , 24-25 Ekim 2003.

[26] Anık S. Vural M., (2007), “Alaşımsız Çeliklerin Kabartı (Projeksiyon) Kaynağı”, Mühendis ve Makine, 48(573), 46.51.

[27] DIN 8519, (1996), Annular and Elongated Projections for Resistance Welding of Sheet Steel, Deutsches Institut für Normung 8519.

[28] Web 7, (2016), http://www.thefabricator.com/article/shopmanagement/welding-fasteners-spot-or-projectionr (Erişim Tarihi: 12/04/2016).

[29] Anık S., Anık E. S., Vural M., (1993), "1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı – Cilt 1: Kaynak Yöntemleri ve Donanımları", Birsen Yayınevi.

[30] Sun X., (2000), "Modeling of Projection Welding Processes Using Coupled Finite Element Analyses", Supplement to the Welding Journal, 2000, 244.251.

[31] Sun X., (2001), "Effect of Projection Height on Projection Collapse and Nugget Formation- A Finite Element Study", Supplement to the Welding Journal, 2001, 211-216.

[32] Podrzaj P., Polajnar I., Diaci J., Kariz Z., (2004), "Expulsion Detection System for Resistance Spot Welding Based on A Neural Network", Measurement Science and Technology, 15, 592.598.

[33] Chan K. R., Edwards P., (2006), "Lowering Costs by Simulating Design of Complex Welds", The 4th International Seminar on Advances in Resistance Welding, Austria., 14-16 November 2006.

[34] Athi N., Cullen J. D., Al-Jader M., Wylie S. R., Al-Shamma'a A. I., Shaw A., Hyde M., (2009), "Experimental and Theoretical Investigations to the Effects of Zinc Coatings and Splash on Electrode Cap Wear", Measurement, 42(6): 944.953.

[35] Kimchi M., Gugel M. D., White C. L., (2000), "Mechanisms of Electrode Wear During Resistance Spot Welding Hot-Dipped Galvanized Steel", Cooperative Research Program Summary Report SR0009, EWI, Ohio.

[36] Shi G., Westgate S. A., (2003), "Resistance Spot Welding of High Strength Steels", The International Conferences on Joining of Materials JOM'11, Denmark, 25-28 Mayıs 2003.

[37] Zhang X. Q., Chen G. L., Zhang Y. S., (2008), "Characteristics of Electrode Wear in Resistance Spot Welding of Dual-Phase Steels", Materials & Design, 29(1): 279-283.

[38] Holliday R. J., Parker J. D., Williams N. T., (1995), "Electrode Deformation when Spot Welding Coated Steels", Welding in the World, 35(3): 160-164.

[39] Johnson K. I., (1975), "Spot Welding Electrode Life Tests on Galvanized Steel Sheet", The Welding Institute Research Report, P/74/75.

[40] Müftüoğlu F., Keskinel T., (2007). "Effect of Coating Thickness on Electrode Life in the Spot Welding of Galvanized Steel", Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 31: 183.187.

[41] Cullen J. D., Athi N., Al-Jader M., Johnson P., Al-Shamma'a A. I., Shaw A., El-Rasheed A. M. A., (2008). "Multisensor Fusion for on Line Monitoring of the Quality of Spot Welding in Automotive Industry", Measurement, 41(4): 412–423.

[42] Linden M. J., (2010). Optimization of Weld Nut Geometry by Simulation, Diploma Work for Civilingenjörsexamen (MSC.), Kungliga Tekniska Högskolan (KTH).

[43] Tolf E., Hedegard J., (2006), “Resistance Nut Welding of High Strength Steel, Swerea KIMAB Report”, IM-2006, 513, Stockholm, ,.

[44] Maev R. G., Seviaryn F., (2011). “Ultrasonic Imaging Inspection of Projection Welds”, 5th Pan American Conference for NDT, Mexico, 2-6 Ekim 2011.

[45] Mikno Z., Stepien M., (2015). “Optimising the Operation of Servomechanical Force Systems used in the Joining of Thin-walled Metal Elements in the Automotive Industry”, 2015 International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART 2015),1-8, Kuwait.

[46] Yeom J., Yu J., Jun J., Rhee S., (2016). “Study on Spatterless Resistance Spot Welding with a Hollow Cap Tip”, Australian Journal of Mechanical Engineering, 7(1), 19-23.

[47] Kong J. P., Kang C. Y., (2016). “Effect of Alloying Elements on Expulsion in Electric Resistance Spot Welding of Advanced High Strength Steels”, Science and Technology of Welding and Joining, 21(1), 32-42.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılı Bursa doğumludur. 2009 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2011 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenime devam etmektedir. 2015 yılında ise Bursa Teknik Üniversitesi'nde doktora programına kaydolmuştur. İş hayatına 2011 yılında Ermetal A.Ş'de başlamış; aynı yıl içinde Ermetal Ar-Ge Merkezi'nde Araştırma ve Proje Mühendisi olarak üstlendiği görevini 2013 yılına kadar sürdürmüştür. 2013 yılından bu yana Ermetal Ar-Ge Merkezi bünyesindeki Teknolojik Araştırmalar biriminde Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.