

**TİTANYUM SAÇLARIN NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI  
İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**2010  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ**

**Yakup KAYA**

**TİTANYUM SAÇLARIN NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İLE  
KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Yakup KAYA**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Ocak 2010**

Yakup KAYA tarafından hazırlanan “TİTANYUM SAÇLARIN NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN  
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 22/ 01/ 2010

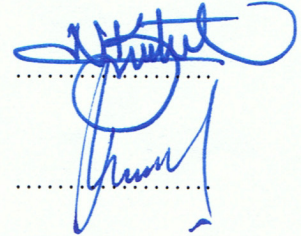
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

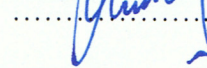
Başkan : Doç. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)



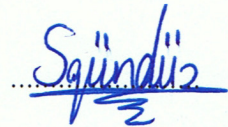
Üye : Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENC (GÜ)



.... / .... / 2010

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Yakup KAYA

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **TİTANYUM SACLARIN NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Yakup KAYA**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**Ocak 2010, 112 sayfa**

Bu çalışmada, 1,5 mm kalınlıkta ve 100x30 mm boyutlarında ticari saflıktaki (Grade 2) titanyum saclar nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri; 3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5 ve 7 kA kaynak akımı ve 10, 20 ve 30 çevrim kaynak zamanı olmak üzere 18 farklı parametrede gerçekleştirilmiş ve kaynaklı bağlantılar üzerinde kaynak parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerin dayanımlarını belirlemek için kaynaklı numunelere çekme-makaslama testi uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin kaynak çekirdeği çapları dijital kumpasla, elektrod dalma derinlikleri ise mikrometreyle ölçülmüştür. Ayrıca, kaynaklı numunelerin, kaynak bölgelerinde sertlik ve optik mikroskop çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı ile kaynak çekirdeği çapı ve elektrod dalma derinliği artmış, buna

bağlı olarak da çekme-makaslama mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinden ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, kaynak çekirdeğinde oluşan tanelerin ısı girdisinden dolayı irileştiği gözlenmiştir. Ayrıca, kaynak esnasındaki plastik deformasyondan dolayı ikizlerin oluştuğu, aynı zamanda elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı artışıyla ikizlenmelerin arttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Titanyum, nokta direnç kaynağı, çekme-makaslama dayanımı, kaynak çekirdek çapı ve mikroyapı

**Bilim Kodu :** 626.18.01

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **AN INVESTIGATION INTO THE WELDABILITY OF TITANIUM SHEETS WITH RESISTANCE SPOT WELDING**

**Yakup KAYA**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Metallurgy Education**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**January 2010, 112 pages**

In this study, commercial pure titanium sheets, 1,5 mm in thickness and 100x30 mm in sizes, were joined by resistance spot welding method by using different parameters. The welding process were carried out at 3 and 6 kN electrode forces, 3, 5 and 7 kA welding currents and 10, 20 and 30 cycle welding times, a total of 18 different parameters were carried out. The effects of different parameters on the welded joints were investigated. In order to determine the strength of the welded joints, tensile-shearing tests were applied to the welded specimens. The weld nugget diameter and electrode dept intensity of the welded samples were measured. Also, microhardness and microstructural examinations were done on the welded regions of the welded samples.

The experimental results showed that increasing electrode force, welding current and welding time increased the weld nugget diameter and electrode dept intensity. These,

in turn, increased the tensile-shearing of the welded specimens. Hardness measurement result indicated that weld nugget had the highest hardness and the heat effected zone (HAZ) and the base metal followed this. Microstructural examinations showed the growth of the weld nugget grains with increasing heat input. Besides, due to plastic deformation during the welding process, twins was formed and at the same time twins increased with increasing electrode force, welding current and welding time.

**Key Words** : Titanium, resistance spot welding, tensile-shearing strength, weld nugget diameter and microstructure

**Science Code** : 626.18.01



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren Hocam Sayın Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Öğretim Üyesi, kıymetli Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ ve Yrd. Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bana sunduğu imkanlardan dolayı KBÜ TEF Metal Eğitimi Bölüm Başkanı Hocam Sayın Doç. Dr. Ramazan KAÇAR ve tüm Bölüm hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca, Yüksek Lisans eğitimim süresince yardımlarını esirgemeyen Fen Bilimleri Enstitüsü Sekreteri Sayın Ümran ÇELİK ve Enstitü Personeline teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda emeği geçen arkadaşlarım, ArŐ. Gör. Murat AYDIN, ArŐ. Gör. Harun UĞ, ArŐ. Gör. Hüseyin DEMİRTAŐ, Zafer AKINCI, Onur BİÇEN ve Gökhan YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Ve son olarak maddi ve manevi yardımını esirgemedен yanımda oldukları için Aileme teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
TİTANYUM VE ALAŞIMLARI .....	4
2.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	6
2.1.1. Ticari Saf Titanyum.....	6
2.1.2. Yakın $\alpha$ Titanyum Alaşimleri.....	7
2.1.3. $\alpha$ - $\beta$ Titanyum Alaşimleri.....	8
2.1.4. $\beta$ Titanyum Alaşimleri.....	10
BÖLÜM 3 .....	12
TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ .....	12
3.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ ERGİTMELİ KAYNAK YÖNTEMLERİ. ....	15
3.1.1. TIG Kaynağı .....	15
3.1.2. MIG Kaynağı .....	17
3.1.3. Plazma Ark Kaynağı.....	18
3.1.4. Lazer Işın Kaynağı.....	19

	<u>Sayfa</u>
3.1.5. Elektron Işın Kaynağı .....	20
3.1.6. Nokta Direnç Kaynağı .....	20
3.2. TİTANYUM ALAŞIMLARININ KATI HAL KAYNAK YÖNTEMLERİ .....	21
3.2.1. Sürtünme Kaynağı .....	22
3.2.2. Patlama Kaynağı .....	23
3.2.3. Difüzyon Kaynağı.....	24
BÖLÜM 4 .....	25
NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI .....	25
4.1. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI PRENSİBİ.....	25
4.2. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI YÖNTEMLERİ .....	27
4.2.1. Nokta Kaynağı .....	28
4.2.2. Dikiş Kaynağı .....	30
4.2.3. Kabartı Kaynağı.....	31
4.3. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI OLUŞUMU .....	33
4.4. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI KABİLİYETİ .....	34
4.5. KAYNAK SIRASINDA SICAKLIK DAĞILIMI VE KAYNAK ÇEKİRDEĞİ OLUŞUMU .....	35
4.6. KAYNAK ÇEVİRİMİ.....	37
4.7. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI DEĞİŞKENLERİNİN İNCELENMESİ.....	39
4.7.1. Elektrot Bileşimi ve Şeklinin Isınma Üzerine Etkisi.....	39
4.7.1.1. Elektrot Bileşiminin Etkisi.....	40
4.7.1.2. Elektrot Şeklinin Etkisi .....	40
4.7.1.3. Elektrotların Malzemesi ve Boyutları.....	40
4.7.2. Kaynak Akımının Etkisi .....	42
4.7.3. Kaynak Zamanının Etkisi .....	45
4.7.4. Kaynak Kuvvetinin Etkisi.....	47
4.7.5. Esas Metalin Kimyasal Bileşimi.....	49
4.7.6. Kaynak Edilecek Parçaların Yüzeylerinin Etkisi .....	50
4.7.6.1. Yüzey Hazırlama .....	50
4.7.6.2. Yağ Kaplamalarının Etkisi.....	51
4.7.6.3. Pas, Hadde Cürufu veya Oksidin Etkisi.....	51

	<u>Sayfa</u>
4.7.7. Esas Metalin Gördüğü Isıl ve Mekanik İşlemler .....	52
4.7.8. Kaynaklı Noktalar Arasındaki Mesafenin Etkisi.....	53
4.7.9. Elektrot ve İş Parçasının Temas Durumları.....	54
4.8. ISI KAYBI .....	55
BÖLÜM 5 .....	57
ÖNCEDEDEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	57
5.1. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI YÖNTEMİ ÇALIŞMALAR.....	57
5.2. TİTANYUM MALZEME ÇALIŞMALAR.....	61
5.3. TİTANYUM VE NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI ÇALIŞMALAR .....	64
BÖLÜM 6 .....	66
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	66
6.1. KULLANILAN MALZEMELER.....	66
6.2. MALZEMELERİN KAYNAĞA HAZIRLANMASI.....	67
6.3. MALZEMELERİN KAYNAĞININ YAPILIŞI .....	68
6.4. NUMUNE HAZIRLAMA .....	70
6.5. MEKANİK ÖZELLİKLERİN TESPİTİ .....	71
6.5.1. Çekme-Makaslama Deneyi.....	71
6.5.2. Kaynak Çekirdek Çapı ve Elektrod Dalma Derinliği Ölçümü .....	72
6.5.3. Sertlik Testi.....	72
6.5.4. Metalografik Muayene.....	74
BÖLÜM 7 .....	76
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	76
7.1. ÇEKME-MAKASLAMA DENEYİ.....	76
7.2. KAYNAK ÇEKİRDEĞİ ÇAPI VE ELEKTROD DALMA DERİNLİĞİ ÖLÇÜMÜ .....	87
7.3. SERTLİK TESTİ.....	90
7.4. MİKROYAPI ÇALIŞMALAR.....	95

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 8 .....	102
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	102
KAYNAKLAR .....	104
ÖZGEÇMİŞ .....	112

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. TIG kaynağının prensip resmi.....	16
Şekil 3.2. MIG-MAG kaynağının prensip resmi.....	17
Şekil 3.3. TIG ve plazma ark kaynağı prensip resmi .....	19
Şekil 3.4. Lazer ışını kaynak donanımı prensip resmi .....	20
Şekil 3.5. Hidrolik basınç silindirli, su soğutmalı nokta kaynağı makinesi resmi ...	21
Şekil 3.6. Sürtünme kaynağı mekanizması .....	22
Şekil 3.7. Patlamalı kaynağın şematik resmi.....	23
Şekil 4.1. Nokta direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi.....	26
Şekil 4.2. Nokta direnç kaynağı yapısı.....	26
Şekil 4.3. Nokta direnç kaynağının prensip resmi .....	28
Şekil 4.4. Nokta direnç kaynağının boyutları.....	30
Şekil 4.5. Dikiş kaynağı uygulamaları .....	31
Şekil 4.6. Kabartılı kaynak şematik resmi.....	32
Şekil 4.7. Nokta direnç kaynak yönteminin şematik gösterimi .....	33
Şekil 4.8. Nokta direnç kaynağında bölgeler, dirençler ve sıcaklık dağılımı .....	36
Şekil 4.9. Nokta direnç kaynağının çevrimi.....	38
Şekil 4.10. Standart elektrot uç şekilleri .....	42
Şekil 4.11. Kaynak sırasında kaynak akımının çekirdek çapı, çekme-makaslama dayanımı ve elektrod dalma derinliği üzerindeki etkileri .....	44
Şekil 4.12. Kaynak kabiliyeti diyagramı.....	45
Şekil 4.13. Elektrotların temas durumuna göre oluşan kaynak çekirdekleri.....	54
Şekil 4.14. Yetersiz bindirme ve kenar mesafesi sonucu oluşan hatalar .....	55
Şekil 6.1. Nokta direnç kaynak numune ölçüleri .....	67
Şekil 6.2. Kaynak esnasında kullanılan kalıp resmi.....	67
Şekil 6.3. Kullanılan SPP 60 tipi nokta direnç kaynak makinesi.....	69
Şekil 6.4. Kaynak işlemi sonucunda elde edilen numune.....	70
Şekil 6.5. Mikrosertlik ve mikroyapı numuneleri.....	71
Şekil 6.6. Çekme deneyi cihazı ve donanımı resmi .....	72

## **Sayfa**

Şekil 6.7. Mikrosertlik değeri ölçüm noktaları.....	73
Şekil 6.8. Mikrosertlik ölçüm cihazı resmi .....	73
Şekil 6.9. Parlatma cihazı resmi.....	75
Şekil 6.10. Optik mikroskop resmi.....	75
Şekil 7.1. Çekme-makaslama numunesi resmi .....	76
Şekil 7.2. 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama grafikleri.....	78
Şekil 7.3. 6 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama grafikleri .....	79
Şekil 7.4. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen saf titanyum numunelerin çekme-makaslama grafikleri.....	80
Şekil 7.5. Kaynaklı numunelerin çekme-makaslama testi sonrası kopma görüntüleri.....	85
Şekil 7.6. Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilen numunelerin kaynak çekirdeği çapı ve elektrod dalma derinliği ölçümleri.....	88
Şekil 7.7. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen saf titanyum numunelerin kaynak çekirdeği çapı grafikleri.....	89
Şekil 7.8. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen saf titanyum numunelerin elektrod dalma derinliği grafikleri .....	89
Şekil 7.9. 3 kN ve 3 kA’de elde edilen sertlik grafikleri.....	91
Şekil 7.10. 3 kN ve 5 kA’de elde edilen sertlik grafikleri.....	91
Şekil 7.11. 3 kN ve 7 kA’de elde edilen sertlik grafikleri.....	91
Şekil 7.12. 6 kN ve 3 kA’de elde edilen sertlik grafikleri.....	92
Şekil 7.13. 6 kN ve 5 kA’de elde edilen sertlik grafikleri.....	92
Şekil 7.14. 6 kN ve 7 kA’de elde edilen sertlik grafikleri.....	92
Şekil 7.15. Deneysel çalışmalarda kullanılan titanyum malzemenin mikroyapısı.....	95
Şekil 7.16. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş saf titanyum malzemenin kaynak arayüzeyi mikroyapısı.....	96
Şekil 7.17. 3 kN elektrod kuvveti ve 20 çevrim kaynak zamanında birleştirilmiş numunenin kaynak çekirdeği mikroyapısı .....	97
Şekil 7.18. 6 kN elektrod kuvveti ve 20 çevrim kaynak zamanında birleştirilmiş numunenin kaynak çekirdeği mikroyapısı .....	98
Şekil 7.19. 3 kN elektrod kuvveti ve 20 çevrim kaynak zamanında birleştirilmiş numunenin kaynak çekirdeği mikroyapısındaki ikizlenmeler .....	100
Şekil 7.20. 6 kN elektrod kuvveti ve 20 çevrim kaynak zamanında birleştirilmiş numunenin kaynak çekirdeği mikroyapısındaki ikizlenmeler.....	100

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı titanyum ve alaşımları için mekanik özellikler.....	5
Çizelge 2.2. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri .....	7
Çizelge 2.3. Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri .....	8
Çizelge 2.4. $\alpha$ ve $\beta$ dengeleyici elementler.....	9
Çizelge 2.5. Bazı $\beta$ alaşımlarının mekanik özellikleri .....	11
Çizelge 3.1. Bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri.....	13
Çizelge 3.2. Kaynaklı ve kaynaklı olmayan bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri...	14
Çizelge 4.1. Değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları .....	37
Çizelge 4.2. Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımları .....	41
Çizelge 4.3. Direnç nokta kaynağı için istenmeyen yüzey koşulları .....	52
Çizelge 6.1. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi.....	66
Çizelge 6.2. Kullanılan malzemenin fiziksel özellikleri .....	66
Çizelge 6.3. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri .....	66
Çizelge 6.4. Nokta direnç kaynak makinesinin özellikleri .....	68
Çizelge 6.5. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri.....	69
Çizelge 7.1. Farklı kaynak parametrelerinden elde edilen çekme-makaslama deneyi sonuçları .....	77



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Cb	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Azot
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
Pd	: Palladyum
Pt	: Platin
SiC	: Silisyum Karbür
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
Ta	: Tantalum
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
Zr	: Zirkonyum
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta

## KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
ANN	: Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağı)
ASTM	: American Society for Testing and Materials
AWS	: American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu )
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EBSP	: Electron Backscattering Difracture Patterns
EBW	: Electron Beam Welding (Elektron Işın Kaynağı)
EDS	: Energy Dispersive Spectrum (Enerji Dağıtıcı Spektrum)
ELI	: Elimination (Eliminasyon)
EN	: Europa Norm (Avrupa Normu)
EPMA	: Electron Probe Micro-Analyzer (Elektron Prob Mikro-Analizatörü)
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
GMAW	: Gas Metal Arc Welding (Gaz Metal Ark Kaynağı)
GTAW	: Gas Tungsten Arc Welding (Gaz Tungsten Ark Kaynağı)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket
LBW	: Laser Beam Welding (Lazer Işın Kaynağı)
IF	: Interstitial Free (Arayer Atomsuz)
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
MAG	: Metal Active Gas (Metal Aktif Gaz)
MIG	: Metal Inert Gas (Metal Inert Gaz)
PAW	: Plasma Arc Welding (Plazma Ark Kaynağı)
RSW	: Resistance Spot Welding (Nokta Direnç Kaynağı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Elektron Tarayıcı Mikroskop)
TIG	: Tungsten Inert Gas (Tungsten Inert Gaz)
TSLBC	: Tensile Shear Load Bearing Capacity (Çekme Makaslama Kapasitesi)
XRD	: X-Ray Diffraction (X-R Yayınımı)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

1791 yılında İngiliz malzeme bilimcisi Wilhelm Gregor Madakaskar'da çalışırken esasını belirleyemediği bir metal olan titanyumu bulmuş ve Menachon şehrinden esinlenerek Menakirit adını vermiştir. Bundan dört yıl sonra Alman kimyacı Martin Heinrich Klaproth yaptığı çalışma sonucunda, bu metalin yeni bir element olduğunu keşfetmiş ve Yunan mitolojisinde toprağın ilk oğulları anlamına gelen "Titan" isminden esinlenerek bu yeni elemente "Titanyum" ismini vermiştir [1-4].

Titanyum özgül ağırlığı bakımından alüminyumdan yüksek fakat çeliğin % 60'ı kadardır. Ergime sıcaklığı çelik ve alüminyumdan daha yüksektir. Endüstriyel uygulamalarda dayanım ağırlık oranı önemlidir. Bu açıdan bakıldığında en yüksek dayanımlı titanyum alaşımları yine en yüksek dayanımlı çeliklerle kıyaslanır. Bu karakteristikler ve iyi korozyon direnci titanyum alaşımlarının uygulama alanlarını arttırmaktadır. Halen kullanımında yaklaşık otuz farklı titanyum alaşımı mevcuttur.

Günümüzdeki konstrüksiyonlar iş verimi ve güvenliğini arttırmaya, boyutları ve ağırlığı küçültmeye, aynı zamanda malzeme ve üretim masraflarını azaltmaya yöneliktir. Buna paralel olarak birleştirme teknolojisi de gelişmesine rağmen sürekli bir şekilde yeni problemlerle karşı karşıya kalmaktadır [5].

Endüstride kullanılan imalat yöntemleri arasında kaynak, en çok kullanılan birleştirme tekniklerinden birisidir. Teknolojinin ilerlemesiyle yeni kaynak yöntemleri geliştirilmiş ve klasik kaynak yöntemleri ilerletilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu elde edilen malzeme gruplarını işleme ve birleştirmeye yönelik çalışmalarda buna paralel olarak gelişmiş ve bu doğrultuda metallerin özelliklerini kaybetmeden birbirleriyle birleştirme gereksinimi ortaya çıkmıştır [6].

Direnç kaynağı gerçekte oldukça eski bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem 1867 yılında ABD’de bir rastlantı sonucu bulunmuş ve birinci dünya savaşına kadar endüstride çok az kullanılmıştır. İkinci dünya savaşından sonra günümüze kadar direnç kaynağı yöntemlerinde ve özellikle elektrik devreleri ve zaman kontrol cihazlarındaki büyük gelişmelerle otomatik hale dönüştürülmesi günümüzde devam etmektedir.

Elektrik direnç kaynağı; iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı, iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın tatbiki ile yapılan bir kaynak yöntemidir. Kaynak işlemi için iki elektrot arasına yerleştirilen malzeme, devreden geçirilen yüksek akım şiddetine gösterdiği dirençle ısınmaktadır. İşlemden, temas noktalarındaki kontak direnci nedeni ile açığa çıkan ısıdan da yararlanılmaktadır. Yöntemde uygulanan akım şiddeti ve basma kuvveti, işlemin ana etkenleridir.

Elektrik direnç kaynağı, seri imalata uygun ve oldukça yaygın kullanılan bir kaynak yöntemidir. Kaynak işlemi bir düğmeye veya bir ayak pedalına basarak makineyi devreye sokma ve devreden çıkarma yeteneğine sahip operatörler tarafından büyük bir hızla gerçekleştirilir. Bu nedenle, özellikle ark kaynağı, gaz kaynağı, sert ve yumuşak lehimleme gibi diğer termik birleştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, kaynak başına düşen işçilik masrafı bu yöntemde oldukça düşüktür. Öte yandan, direnç kaynağı makineleri, diğer kaynak yöntemleri için gerekli teçhizatın maliyetleri ile karşılaştırıldığında, daha pahalıdır. Direnç kaynağını uygulamada ekonomik hale getirmek, yani, düşük birim-işçilik masrafı ile birlikte uygun birim-makine maliyeti elde etmek için çok sayıda aynı veya benzer birleştirme gerekmektedir. İnce malzemelerin kaynağı diğer kaynak teknikleri ile zordur. Bu kaynak yöntemi, ilave malzeme kullanılmadığından sağladığı hafiflik, yüksek kaynak mukavemeti, estetik, özel beceri gerekmemesi ve kaynak hızının yüksek oluşu gibi nedenlerle, günümüzde uçak ve otomotiv endüstrisinde ve metal eşya imalatında büyük ölçüde kullanılmaktadır [7-9].

Bu çalışmanın amacı; mükemmel korozyon direnci, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda büyük bir öneme sahip

ticari saflıktaki (Grade 2) titanyum malzemeleri, nokta direnç kaynağı yöntemi ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilerek, kaynaklı birleştirmelerin, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması ve incelenmesidir.

Hazırlanan bu çalışma, genel itibarıyla literatür taraması ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Ancak, literatür taraması ve deneysel çalışmalar kendi içinde sekiz konu başlığı altında oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunlardan birinci bölüm “Giriş” olup burada çalışmanın kısa özeti verilmiştir. İkinci bölümde, bu çalışmada kullanılan ticari saflıktaki (Grade 2) titanyum malzemeleri de içine alan titanyum ve alaşımları, üçüncü bölümde titanyum ve alaşımlarının kaynak kabiliyeti geniş bir literatür taramasıyla anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, bu çalışmada kullanılan titanyum sacların kaynağında kullanılan nokta direnç kaynak yöntemi detaylı bir biçimde tanıtılmıştır. Literatür taramasının yapıldığı son bölüm olan beşinci bölümde ise nokta direnç kaynağı ve titanyum malzemelerle ilgili önceden yapılmış çalışmalar anlatılmıştır.

Altıncı bölümde, çalışmanın amacının belirlenmesinin yanında, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, kaynak makinesi, kaynak parametreleri, kaynaklı numunelerden deney numunelerinin çıkartılması, kaynaklı bağlantılara uygulanan mekanik testler ve testlerin uygulanış parametreleri tanıtılmıştır.

Çalışmanın yedinci bölümünde, kaynaklı numunelere uygulanan mekanik testlerden elde edilen veriler, kolay değerlendirilebilmesi için grafik olarak çizilmiş ve elde edilen grafikler değerlendirilmiştir. Ayrıca, optik mikroskop çalışmaları sonucu elde edilen görüntüler yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, daha önceden yapılmış benzer çalışmalarla sebep-sonuç ilişkisi ile kıyaslanmıştır.

Deneysel çalışmaların nihai sonuçlarının açıklandığı sekizinci ve son bölümde, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, deneysel çalışmanın amacına uygun bir biçimde yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.

## BÖLÜM 2

### TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

Titanyum ve alaşımları sadece 1952 yılından beri yapısal malzemeler olarak kullanımda olduğu için nispeten yeni mühendislik malzemeleridir. Titanyum alaşımları, yüksek bir dayanımın ağırlığa oranına, yaklaşık 550 °C'ye kadar yüksek sıcaklık özelliklerine ve özellikle oksitleyici asitlerde ve klorit maddelerinde ve de çoğu tabii ortamlarda mükemmel korozyon dirençlerine sahiptirler [10,11].

Titanyum 4,5 g/cm<sup>3</sup> özgül ağırlığı, 126 kg/mm<sup>2</sup>'ye varan yüksek akma dayanımı, 253 °C'den yaklaşık 500 °C'ye kadar bir ısı aralığında yüklenebilme kabiliyeti, bakır ve krom-nikelli çeliklerden daha fazla korozyon direnci titanyumu diğer metallerden ayıran en belirgin özelliklerdendir [1]. Titanyum ve alaşımları uzay araçları, kimyasal endüstri, bazı spor aletleri yapımında [12], uçak, otomotiv, enerji, sağlık, nükleer güç santrallerinde [13], denizcilikte ve yiyecek endüstrisinde yaygın kullanım alanı olan malzemelerdir [14,15]. Titanyum malzemelerinin, yapışkan koruyucu titanyum oksit filmi 535 °C'nin altında ki sıcaklıklarda korozyona karşı mükemmel direnç ve birikinti sağlar. Ancak, yapışkan koruyucu titanyum oksit filmi 535 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kırılır ve karbon, oksijen, azot ve hidrojen gibi küçük atomlar titanyumu kırılğanlaştırır [16].

Saf titanyum mükemmel biyolojik uyumluluğu ve uygun mekanik özelliklerinden dolayı medikal alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Titanyum alaşımlar yüksek korozyon dayanımı özellikleri nedeniyle insan vücudunda implant olarak kullanılan en önemli metallerdir. Ayrıca fiziksel ortamlarda mükemmel korozyon direnci göstermesi, düşük yoğunluğu, kimyasal durgunluğu, kimyasal tepkimeye girmemesi, zehirli olmaması ve mekanik dayanımının iyi olması bu metali daha cazip hale getirmektedir [17-19]. Titanyum, yüksek yorulma ömrü, tokluğunun iyi olması, kaynak yapılabilme imkanının olması ve yoğunluğunun düşük olması nedeniyle

askeri alanda, deniz ile temas eden yapılarda ve kimyasal etkilerin olduğu ortamlarda kullanılan en iyi mühendislik malzemesidir [20]. Titanyum ve alaşımları için mevcut pek çok sınıf ve alaşımların bazıları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Bazı titanyum ve alaşımları için mekanik özellikler [21,22].

Malzeme		Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Ticari saflıkta Ti	% 99,5 Ti	241	172	24
	% 99 Ti	552	483	15
$\alpha$ Ti alaşımları	% 5 Al-% 2,5 Sn	862	779	15
$\beta$ Ti alaşımları	% 13V-% 11Cr-% 3Al	1290	1214	5
$\alpha$ 'ya yakın Ti alaşımları	% 8Al-% 1Mo-% 1V	966	828	14
	% 6Al-% 4Zr-% 2Sn-% 2Mo	1007	993	3
$\alpha$ - $\beta$ Ti alaşımları	% 8Mn	996	862	15
	% 6Al-% 4V	1034	966	8
	% 7Al-% 4Mo	1172	1034	10
	% 6Al-% 6V-% 2Sn	1103	1034	12

Titanyum düşük sıcaklıklarda HSP (Hegzogonal sıkı paket) yapılı  $\alpha$  ve 882 °C’ın üzerinde HMK (Hacim merkezli kübik)  $\beta$  allotropik bir metaldir [23]. Alaşım elementleri katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar ve allotropik dönüşüm sıcaklığını düşürürler [21,24,25]. Alaşım elementleri titanyum-kalay, titanyum-alüminyum, titanyum-mangan ve titanyum-molibden olarak dört gruba ayrılabilir [16,23]. Kalay gibi ilaveler, dönüşüm sıcaklığını etkilemeksizin katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar. Alüminyum, oksijen, hidrojen ve diğer alfa dengeleyicileri (kararlaştırıcı) elementler  $\alpha$ ’dan  $\beta$ ’ya dönüştüğü sıcaklığı yükseltir. Vanadyum, tantalyum, molibden ve niyobyum gibi  $\beta$  dengeleyici elementler dönüşüm sıcaklığını düşürür, hatta  $\beta$ ’nın oda sıcaklığında dengeli kalmasına neden olur. Son olarak mangan, krom ve demir ötektoid reaksiyon sağlar,  $\alpha$ - $\beta$  dönüşüm sıcaklığını düşürür ve oda sıcaklığında iki faz oluştururlar [21,26].

## 2.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Titanyum alaşımları yapılarındaki faz varlıklarına göre,  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  alaşımları ve  $\beta$  alaşımları olmak üzere başlıca 3 gruba ayrılmaktadırlar [22]. Esas olarak başlıca  $\alpha$  fazından oluşan alaşımlar  $\alpha$  alaşımı olarak adlandırılırken, küçük miktarlardaki  $\beta$  kararlaştırıcı elementlerle birlikte prensip olarak  $\alpha$  fazı içerenler yakın  $\beta$  titanyum alaşımları olarak adlandırılırlar.  $\alpha+\beta$  karışımından oluşan alaşımlar  $\alpha+\beta$  alaşımlar olarak sınıflandırılırlar. Son olarak çözündürme ısı işleminden soğutmadan sonra oda sıcaklığında  $\beta$  fazının kararlı hale getirildiği titanyum alaşımları  $\beta$  alaşımları olarak sınıflandırılırlar [10,11].

### 2.1.1. Ticari Saf Titanyum

Ticari saf titanyum; titanyumun oksijen, azot, hidrojen, karbon ve demir ile birlikteki çok seyreltik alaşımı olarak görülür. Oksijen, azot ve karbon sünekliği azaltırken aynı zamanda malzemeyi kuvvetlendirir. Bu malzemenin mikroyapısı tamamen alfa fazından ibarettir. Saf titanyumun 650-700 °C'de tavlansak kullanılması çok yaygındır. Böyle bir ısı işleminden sonra mikroyapı ince eş eksenli  $\alpha$  taneciklerinden oluşmaktadır. Şayet saf titanyum  $\beta$  alanı içinde ısıtılırsa (900-950 °C) hızlı bir tane büyümesi meydana gelir ve soğumayla birlikte kaba tırtıllı alfa şekillendirilir [27].

Alaşımlandırılmamış titanyumun kullanım nedeni üstün korozyon direncine sahip olmasıdır. Ticari saflıktaki titanyum nispeten zayıftır ve yüksek sıcaklıklarda dayanımını kaybeder. Fakat çok iyi korozyon direncine sahiptir. Bu sınıftaki alaşımlar çok düşük sıcaklık uygulamaları içinde gereklidir. Uygulamaları; ısı eşanjörleri, boru donanımları, reaktörler, pompalar ile kimya ve petrol endüstrileri için valfleri içerir [16,23]. Ayrıca titanyum rafinerilerde kullanılır; çünkü sülfidler, kloritler ve petrol rafine etmede karşılaşılan pek çok diğer kimyasallara karşı dirençlidirler [11]. Çizelge 2.2'de ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri verilmiştir.



Çizelge 2. 2. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri [1].

ASTM Standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm sıcaklıkları (°C)		Alaşım elementleri				
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40

### 2.1.2. Yakın $\alpha$ Titanyum Alaşımları

Yakın  $\alpha$  titanyum alaşımları bir başka tüm  $\alpha$  faz yapısında bir miktar  $\beta$  fazı dağılımını içeren alaşımlardır.  $\beta$  kararlaştırıcı elementler olan küçük miktarlardaki molibden ve vanadyum (yaklaşık % 1-2) oda sıcaklığında bu alaşımların bir miktar  $\beta$  fazı bırakması için ilave edilir. Kalay ve zirkonyum bu alaşımların pek çoğuna ilave edilir böylece alüminyum içerikleri azaltılabilirken dayanımları hala korunabilir [11,28].

Yakın  $\alpha$  alaşımlarının yapısındaki  $\alpha$  fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda  $\beta$  fazını kararlaştıran elementler içerebilir. Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si gibi malzemeler yakın-alfa alaşımlarına birer örnektir. Bu alaşımlar  $\alpha$  alaşımlarına benzer özellikler göstermekle birlikte 400-500 °C sıcaklık aralığında yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar [1,4,23]. 8Al-1Mo-1V alaşımı orijinal olarak jet motorlarının kompresör kısmında orta yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş ve uçak dış kaplama parçaları için kullanılmıştır. Bu alaşım iyi kaynaklanabilirlik, iyi sürünme direnci, tokluk, yüksek dayanım ve düşük süneklik gibi istenen özelliklere sahiptir. Bu alaşımın bir dezavantajı tuz ortamında gerilim korozyonuna karşı hassas olmasıdır [11]. Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 2. 3'de verildiği gibidir.

Çizelge 2.3. Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri [11].

Oda sıcaklığı						Fazla sıcaklıklar				
Kompozisyon (%)	Şartlar	Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)	Kesit Daral (%)	Deney Sıcaklığı (°F)	Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)	Kesit Daral (%)
8Al-1Mo-1V	Çift tavllanmış	145.000	138.000	15	28	600	115.000	90.000	20	38
6Al-2Sn - 4Zr-2Mo	-	142.000	130.000	15	35	600	112.000	85.000	16	42
						800	102.000	75.000	21	55
						1000	94.000	71.000	26	60
5Al-5Sn	975 °C 1/2saat havada soğutulmuş	152.000	140.000	13	-	600	115.000	82.000	15	-
2Zr-2Mo - 0,25Si	600 °C 2 saat havada soğutulmuş	-	-	-	-	800	113.000	77.000	17	-
6Al-1Mo - 2Cb-1Ta	-	-	-	-	-	1000	100.000	73.000	19	-

### 2.1.3. $\alpha$ - $\beta$ Titanyum Alaşımları

$\alpha$  ve  $\beta$  dengeleyicilerin uygun dengesi ile oda sıcaklığında  $\alpha$  ve  $\beta$ 'nin bir karışımı üretilir. Tavlama, yüksek süneklik üniform özellikler ve iyi dayanım kombinasyonunu oluşturur [16,29].  $\beta$  dönüşüm sıcaklığının hemen altına alaşımı ısıtma, küçük bir miktar  $\alpha$ 'nın kalmasını ve tane büyümesini önlemeyi sağlar. Yavaş soğutma, küçük  $\beta$  faz adalarını kuşatan eş eksenli  $\alpha$  taneleri, hızlı soğutma ise iğne şeklinde bir  $\alpha$  fazı oluşturur [21].

$\alpha$ - $\beta$  titanyum alaşımlarına çözündürme ısıl işlemi uygulanabilir, su verilebilir ve dayanımı arttırmak için yaşlandırma yapılabilirler. Bu alaşımların mikroyapıları öncelikle kimyasal kompozisyona, işlem geçmişine ve ısıl uygulamalara bağlıdır. Alaşımların mikroyapıları genelde çifttir. Farklı mikroyapısal oluşumlardan meydana gelmektedir [10,22]. Çizelge 2. 4'de  $\alpha$  ve  $\beta$  dengeleyici elementler görülmektedir [22].

Çizelge 2. 4.  $\alpha$  ve  $\beta$  dengeleyici elementler [30,31].

Alaşım elementi	Alaşım elementi miktarı (Ağırlıkça %)	Yapı hatası
Alüminyum	2-7	Alfa dengeleyici
Kalay	2-6	Alfa dengeleyici
Vanadyum	2-15	Alfa dengeleyici
Molibden	2-13	Alfa dengeleyici
Krom	2-12	Alfa dengeleyici
Bakır	1-3	Alfa dengeleyici
Zirkonyum	2-8	Sürünme dayanımını artırır
Silisyum	0,05-1	Sürünme dayanımını artırır

Uygulamada kullanılan titanyum alaşımlarının % 70'i  $\alpha$ - $\beta$  alaşımlarından oluşmaktadır.  $\alpha$ - $\beta$  alaşımlarının en yaygın olarak kullanılan türü Ti6Al4V sembolleri ile anılan % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren alfa-beta alaşımıdır ve bu alaşım sahip olduğu üstün özellikler sebebi ile yaygın olarak kullanılmaktadır [1,4,16]. Ti6Al4V alaşımı mükemmel çekme, yorulma dayanımı ve korozyon direncine sahiptir. Bunların yanı sıra bu alaşımlar işlenebilirlik, fabrikasyon, üretim deneyimi ve ticari olarak elde edilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı ekonomik olarak kullanışlı bir hale gelmişlerdir [32]. Bu özelliklerinden dolayı alaşım genellikle uçak sanayi, makine parçaları, petrokimyasal fabrikalar için malzemeler ve tıbbi implant endüstride kullanılmaktadır. Ayrıca, uçak iskeleti, roketler, jet motorları ve iniş takım dişlileri için parçalar, ısıl işlem görmüş alfa-beta alaşımları için tipik uygulamalardır [16,29]. Ekstrüze edilmiş veya haddelenmiş işlem ürünleri geniş çapta uçak parçalarında kullanılırken hassas döküm daha düşük maliyet ve yüksek hasar toleransı özelliğinden dolayı karmaşık (komplike) parçaların üretimi için mükemmel bir teknolojidir. Bu alaşımdaki birçok döküm hataları sıcak izostatik presleme işlemi ile giderilebilir. Bu malzemenin birleştirilmesi için kaynak teknolojisine ihtiyaç vardır [33,34].

Ti6Al4V alaşımı kolaylıkla kaynaklanabilir ve işlenebilir. Levha, ekstrüzyon, tel ve çubuk şeklinde çok çeşitli fabrika ürünleri bulunur. Bu alaşıma 1138 MPa bir çekme dayanımı için ısıl işlem uygulanabilir ve 482 °C'ye kadar iyi bir metalurjik

kırılganlığa sahiptir. Bunun dezavantajlarından birisi düşük sertleşebilirliğe sahip olması ve bu nedenle 25,4 mm kadar olan kısmının sertleşebilir olmasıdır [11].

$\alpha$  -  $\beta$  titanyum alaşımları içerisinde çok iyi şekil verilebilme özelliğine sahip Ti-6Al-4V alaşımının çok iyi mekanik özellikler verdiği bilinmektedir. Bunun sebebi alüminyum güçlü bir katı çözeltili sertleşme etkisi gösterirken, vanadyum oda sıcaklığında  $\beta$  fazını stabilize ederek yüksek sıcaklıklarda sünekliği iyileştirmesindedir [26,35].

#### **2.1.4. $\beta$ Titanyum Alaşımları**

Bu alaşımlar önemli miktarda  $\beta$  fazı kararlaştırıcı elementler olan vanadyum ve molibden içerirler. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekil verebilme ve de yüksek yoğunluk gibi özelliklere sahiptirler [4,16]. Beta alaşımları  $\beta$  dengeleyicilerle zenginleştirilmişlerdir. Bu nedenle hızlı soğuma ile hepsi  $\beta$ 'dan oluşan dengesiz bir faz oluşur. Tavlanmış şartlarda mikroyapıda sadece  $\beta$  fazı vardır.  $\beta$  matrisi içinde  $\alpha$  fazının çökmesi ile sertleştirilebilirler. Asıl dayanım katı eriyik mukavemetlenmesi ile sağlanır [4,22,36]. Uygulamaları yüksek dayanımlı bağlama elemanları, kirişleri ve uzay uygulamalarında bağlantıları içerir [16,29].

$\beta$  titanyum alaşımları yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler ve molibden içeren  $\beta$  alaşımlarının korozyona karşı dirençleri yüksektir. Şartlı olarak kaynak edilebilen  $\beta$  alaşımları  $\alpha$  -  $\beta$  alaşımlarına göre ısıtılma işlemine yatkın olup, iyi işlenebilmektedirler [16,30,37]. Şu anda büyük miktarlarda üretilen sadece bir tane  $\beta$  titanyum alaşımı (Ti-%13V-%11Cr-%3Al) vardır. Bu alaşımlar genellikle en yüksek dayanımlarını elde etmek için çözüldürme ısıtılma işlemi uygulanmış ve yaşlandırılmış şartlarda kullanılırlar. Bu alaşımlar 1448 MPa kadar ulaşan bütün titanyum alaşımlarının en yüksek dayanımlarına sahiptirler [11]. Bazı  $\beta$  titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 2. 5'de verilmiştir.

Çizelge 2. 5. Bazı  $\beta$  alaşımlarının mekanik özellikleri [11].

Oda sıcaklığı					Fazla sıcaklıklar			
Kompozisyon (%)	Şartlar	Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)	Deneysel Sıcaklığı (°F)	Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)
13V-11Cr-3Al	Çözündürme + Yaşlandırma	177.000	170.000	8	600	128.000	115.000	19
8 Mo-8V	Çözündürme + yaşlandırma	185.000	175.000	8	800	160.000	120.000	12
2Fe-1Al	Çözündürme + yaşlandırma	190.000	180.000	8	600	164.000	142.000	15
3Al-8V-6Cr	Çözündürme + yaşlandırma	210.000	200.000	7	600	150.000	130.000	20
					800	136.000	110.000	17
11,5Mo -6Zr-4,5Sn	Tavlanmış	128.000	121.000	15	600	105.000	95.000	22
	Çözündürme + yaşlandırma	201.000	191.000	11	600	131.000	123.000	16

## BÖLÜM 3

### TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ

Titanyum ve titanyum alaşımlarının gazlara karşı duyarlılığı çeşitli kaynak yöntemlerinin kullanılmasını sınırlamakta ve bir dizi ek önlemin alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu sınırlamalar bir yana titanyum ve titanyum alaşımlarının büyük bir kısmının iyi bir kaynak kabiliyeti olduğu söylenebilir [38,39]. Titanyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta hava da bulunan gazları bünyesine almasından dolayı yapıda gevrekleşme meydana gelmektedir. Bundan dolayı kaynak işlemi koruyucu gaz altında yapılmalıdır. Ana metal ve ilave metal kaynak sırasında kirlenmeyi önlemek için temiz olmalıdır [39-42]. Titanyum ve titanyum alaşımlarının çoğu alüminyum veya östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan aletler ile ve benzer şekilde gaz metal ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağı, plazma ark kaynağı ile kaynaklanabilmektedirler [40].

Alaşımsız titanyum ve bütün  $\alpha$  alaşımları kaynak edilebilirler. Ti 6Al 4V  $\alpha$ - $\beta$  alaşımı ile diğer hafifçe  $\beta$  kararlılaştırılmış alaşımlar da kaynak edilebilirler. Ancak, kuvvetli  $\beta$  kararlılaştırılmış  $\alpha$ - $\beta$  alaşımları kaynak esnasında gevrekleşirler.  $\beta$  alaşımlarının çoğu başarıyla kaynak edilebilirler. Bununla birlikte kaynağın yaşlandırma sertleşmesiyle kuvvetlendirme işlemi dikkatle uygulanmalıdır, aksi halde bazı  $\beta$  alaşımlarında yaşlandırılmış kaynaklar tamamen gevrek hale gelebilir [38,39].

Alaşımsız titanyumlar % 98,5 ila % 99,5 oranında saflıktadırlar. Saf titanyumun bütün türleri genellikle tavlanmış şartlarda soğuk işlem görmüş olanlardan daha iyi kaynak edilebilirler.  $\alpha$  alaşımları Ti-5Al-20Sn, Ti-5Al-5Sn-5Zr, Ti-7Al-12Zr, Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo ve Ti-8Al-1Mo-1V daima tavlanmış şartlarda kaynak edilebilirler.  $\alpha$ - $\beta$  alaşımlarından Ti-6Al-4V alaşımı özellikle tavlanmış şartlarda veya eriyik işlem ve kısmi yaşlanma koşulunda kaynak edilebilir. Yaşlandırma kaynak sonrası gerilim giderme işlemi sırasında tamamlanır [38-40].

Yakın  $\alpha$  titanyum alaşımları genel olarak kaynak edilebilirler. Ancak bazı alaşımlar iyi derecede kaynak kabiliyetine sahipken bazılarının kaynak kabiliyeti biraz daha düşüktür [37]. Yakın  $\alpha$  titanyum alaşımlarından Ti-8Al-1Mo-1V iyi bir kaynak kabiliyetine sahiptir [11]. Çizelge 3.1’de bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri [1].

<b>Alaşım Türü</b>	<b>Alaşım Sembolü</b>	<b>Kaynak Edilebilirlik</b>
Ticari saflıktaki Titanyum	-	Çok iyi
$\alpha$ Alaşımları	Ti-0,2Pd	Çok iyi
	Ti-5Al-2,5Sn	İyi
	Ti-5Al-2,5Sn-ELI	Çok iyi
$\alpha$ 'ya yakın Ti Alaşımları	Ti-8Al-1Mo-1V	Çok iyi
	Ti-66Al-2Cb-1Ta-0,8Mo	Çok iyi
	Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	İyi
$\alpha$ - $\beta$ Ti Alaşımları	Ti-6Al-4V	İyi
	Ti-6Al-4V-ELI	Çok iyi
	Ti-7Al-4Mo	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-6Al-4V-2Sn	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-8Mn	Kaynak yapılması önerilmez
$\beta$ Alaşımları	Ti-13V-11Cr-3Al	İyi

$\alpha$ - $\beta$  alaşımlarının çoğunun düşük kaynak sünekliğine sahip olması, kaynak bölgesi veya ısının tesiri altında kalan bölgede meydana gelen faz dönüşümlerinden ileri gelmektedir. Bu nedenle  $\alpha$ - $\beta$  alaşımları, ergime bölgesinin  $\beta$  içeriğini düşürüp kaynağın sünekliğini arttırmak üzere alaşımsız Ti veya  $\alpha$  Ti alaşımı ilave metalleriyle kaynak edilirler. Ancak hassas alaşımlarda bu tür ilave metallerin kullanılması, ısının tesiri altında kalan bölgenin gevrekleşmesini önlemez [39]. Çizelge 3.2’de kaynaklı ve kaynaklı olmayan bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri verilmiştir [37].

Çizelge 3.2. Kaynaklı ve kaynaklı bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri

Malzeme Durumu	Çekme Mukavemeti		Gerilme Mukavemeti		Uzama (%)	Minimum Yarıçap Eğilme	Sertlik	
	MPa	ksi	MPa	ksi			Knoop	Rockwell
<b>Ti Grade 1</b>								
Kaynaklı	315	46	215	31	50.4	0.7 t	140	63.5 HRB
Tek Pasolu Kaynak	345	50	225	37	37.5	1.0 t	140	55.8 HRB
Çok Pasolu Kaynak	365	53	270	39	37.7	-	-	-
Enine Kaynak	325	47 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti Grade 2</b>								
Kaynaklı	460	67	325	47	26.2	2.9 t	165	80.6 HRB
Tek Pasolu Kaynak	505	73	380	55	18.3	2.9 t	175	83.1 HRB
Çok Pasolu Kaynak	510	74	385	56	13.3	-	-	-
Enine Kaynak	475	69 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti Grade 3</b>								
Kaynaklı	545	79	395	57	25.9	1.9 t	175	94.4 HRB
Tek Pasolu Kaynak	605	88	475	69	15.5	4.7 t	220	92.4 HRB
Çok Pasolu Kaynak	615	89	480	70	14.7	-	-	-
Enine Kaynak	560	81 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti Grade 4</b>								
Kaynaklı	660	96	530	77	22.3	3.2 t	215	23.4 HRC
Tek Pasolu Kaynak	695	101	580	84	16.4	5.6 t	240	21.2 HRC
Çok Pasolu Kaynak	710	103	585	85	16.0	-	-	-
Enine Kaynak	660	96 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti-5Al-2.5Sn-Eli</b>								
Kaynaklı	850	123	805	117	15.7	3.8 t	265	33.2 HRC
Tek Pasolu Kaynak	920	133	770	112	9.8	5.9 t	310	28.0 HRC
Çok Pasolu Kaynak	935	136	820	119	7.5	-	-	-
Enine Kaynak	850	123 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo</b>								
Kaynaklı	895	130	855	124	9.7	2.8 t	275	29.6 HRC
Tek Pasolu Kaynak	930	135	800	116	5.9	7.7 t	300	27.7 HRC
Çok Pasolu Kaynak	945	137	815	118	5.7	-	-	-
Enine Kaynak	890	129 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti-3Al-2.5V</b>								
Kaynaklı	705	102	670	97	15.2	4.0 t	230	23.6 HRC
Tek Pasolu Kaynak	705	102	600	87	12.7	5.4 t	250	19.6 HRC
Çok Pasolu Kaynak	745	108	625	91	11.2	-	-	-
Enine Kaynak	710	103 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti-6Al-4V</b>								
Kaynaklı	1000	145	945	137	11.0	2.6 t	320	32.2 HRC
Tek Pasolu Kaynak	1060	154	920	133	3.5	10.5 t	350	35.9 HRC
Çok Pasolu Kaynak	1090	158	945	137	3.2	-	-	-
Enine Kaynak	1015	147 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti-8Al-1Mo-1V</b>								
Kaynaklı	1060	154	1020	148	15.0	2.9 t	325	36.0 HRC
Tek Pasolu Kaynak	1085	157	930	135	5.5	7.0 t	345	35.2 HRC
Çok Pasolu Kaynak	1115	162	960	139	3.2	-	-	-
Enine Kaynak	1060	154 (a)	-	-	-	-	-	-
<b>Ti-6Al-6V-2Sn</b>								
Kaynaklı	1060	154	1005	146	9.8	2.8 t	350	34.0 HRC
Tek Pasolu Kaynak	1295	188	1255	182	0.3	26.6 t	420	46.8 HRC
Çok pasolu Kaynak	1280	186	-	-	0.1	-	-	-
Tek Pasolu Kaynaktan Sonra Fırında Soğutma 830°C	1050	152	990	144	3.7	15.5 t	-	-
<b>Ti-13V-11Cr-3Al</b>								
Kaynaklı	965	140	910	132	13.9	2.7 t	300	30.6 HRC
Tek Pasolu Kaynak	950	138	925	134	11.6	2.7 t	320	30.1 HRC
Çok Pasolu Kaynak	925	134	875	127	9.1	-	-	-
Enine Kaynak	950	138 (a)	-	-	-	-	-	-

(a) Ana metalde oluşan çatlak



Titanyum ve alaşımlarının kaynağında kaynak kabiliyetini iyileştirmek ve daha iyi sonuçlar alabilmek için uygun bir alaşım türü seçmek kadar çevre şartlarını ve kaynak yöntemini seçmek de önemlidir. Titanyumun ısı iletkenliği düşük olduğundan, kaynak dikişi uzun süre yüksek sıcaklıkta kalmakta, dolayısıyla havanın etkisinden korunması gereken dikiş uzunluğu artmakta ve ITAB daralmaktadır. Yavaş soğuma tane büyüklüğü üzerinde etkili olduğundan soğuma süresinin artması tane irileşmesine neden olmaktadır. Titanyumun kaynağında soğuma hızını arttırmak için kaynak bölgesinde ısı yoğunluğu dar bir alanda arttırılmalı ve kaynak hızı da yükseltilmelidir. Bu yüzden titanyumun kaynağında ITAB'ın dar bir alanda tutulabildiği kaynak yöntemleri uygulanır [43].

### **3.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ ERGİTMELİ KAYNAK YÖNTEMLERİ**

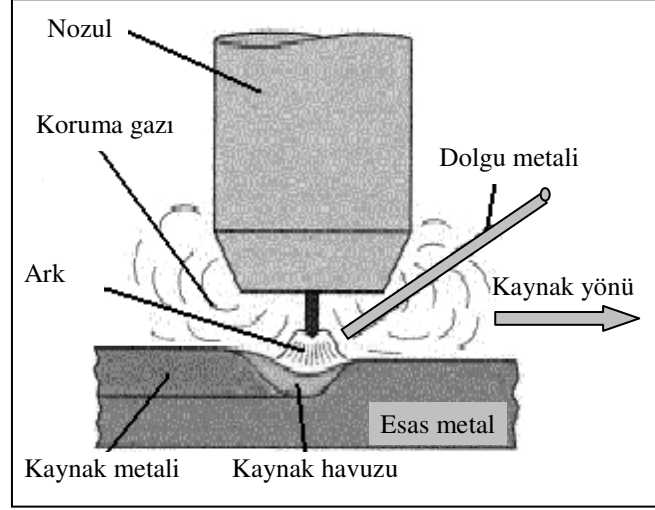
Titanyum ve alaşımları ergitmeli kaynak yöntemlerinden; gaz tungsten ark kaynağı (GTAW), gaz metal ark kaynağı (GMAW), plazma ark kaynağı (PAW), lazer ışın kaynağı (LBW), elektron ışın kaynağı (EBW) ve nokta direnç kaynağı (RSW) ile kaynaklanabilmektedir [44].

#### **3.1.1. TIG Kaynağı**

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında en ekonomik ve en çok kullanılan kaynak yöntemidir. Bu yöntemle dar bir alanda yüksek ısı yoğunluğu sağlanarak kaynak hızı arttırılır ve deformasyon minimuma indirilir [40].

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında en çok kullanılan ve ergitmeli kaynak yöntemlerinden olan TIG kaynağı, tükenmeyen bir elektrod, gerektiğinde ilave bir metal ve koruyucu gaz olarak argon veya helyum gazının kullanıldığı bir kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde kaynak akımının artmasıyla malzemeye verilen ısı artacağından bu artış da ITAB'ın genişlemesine sebep olacaktır [45]. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında en büyük problem, yükseltile sıcaklıklarda titanyumun içerisindeki oksijen, azot ve hidrojenin çözülmesidir. Küçük miktarlardaki oksijen ve azot artışı sertliği attırır. Yüksek miktarlardaki yağ ve rutubet gibi istenmeyen

artıklar veya elementler titanyumun kırılğan olmasına neden olurlar [46]. Şekil 3.1’de TIG kaynağı prensip resmi görülmektedir [47].



Şekil 3.1. TIG kaynağının prensip resmi

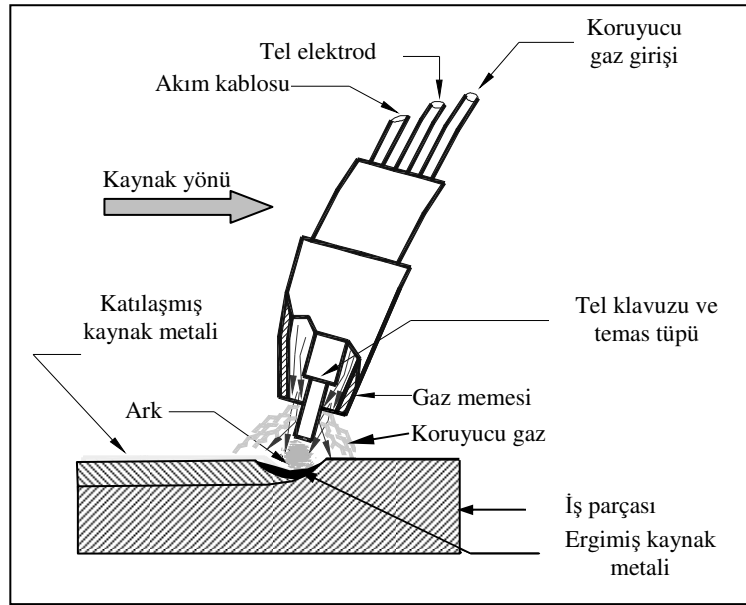
Titanyum ve alaşımlarının TIG kaynağında ilave önlemlerle havanın sadece kaynak yerine girişini değil, ITAB’a da girişi önlenmelidir. Kaynak koruyucu gazı ve kök koruyucu gazı olarak normal argon gazı değil, yüksek saflıktaki argon gazı kullanılmalıdır. Titanyum’un oksijen, azot ve hidrojene ilgisi özellikle çok yüksektir. Kaynak banyosuna gaz girişi, tam bir gevrekleşmeye yol açabilir. Bundan başka, titanyum katı halde yaklaşık 250 °C’nin üzerine kadar oksijenle reaksiyona girer. Bunun için kaynak dikişinin yanında uzanan bölgenin de gerekli önlemler alınarak korunması gerekir [48].

Titanyum ve alaşımlarının TIG kaynağında sadece argon, helyum ve bunların karışımı kullanılmalıdır. Argon ince sacların kaynağında etkili olurken, helyum derin nüfuziyet kabiliyetinden dolayı kalın parçaların kaynağında kullanılır. Bu özelliğinin bir sonucu olarak helyum gazı kullanımında kaynak hızı daha büyük olmalıdır [41]. Koruyucu gaz olarak helyumun kullanıldığı durumlarda, ark kararlılığını sağlamak için % 2-5 argon ilave edilir. Böylece kararlı bir ark elde edilir. Argon gazının havadan ağır olması yatay pozisyonda daha iyi kaynak koruması sağlar. Helyum gazının da havadan hafif olması nedeniyle tavan ve dik kaynak pozisyonlarında daha verimli koruma sağlar [39]. Titanyum ve alaşımlarının TIG kaynak işleminde iyi bir

kaynak kalitesi elde etmek için kaynak işlemi mümkünse, argonla doldurulmuş kaynak odalarında yapılmalıdır [1].

### 3.1.2. MIG Kaynağı

Gaz metal ark kaynağı (MIG), 1,3 mm'den daha kalın titanyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılır. Yüksek dolgu oranına sahip olduğundan TIG kaynağına göre daha ekonomiktir. Bu yöntemde ark tüketilebilir bir elektrod ile iş parçası arasında meydana gelir [41]. Şekil 3.2'de MIG-MAG kaynağının prensip resmi görülmektedir [47].



Şekil 3.2. MIG-MAG kaynağının prensip resmi

MIG kaynağında yüksek ısı girdisi ve ince damla geçişi dolgu metalinin kirlenmesine neden olacağından bu olumsuzlukları gidermek amacı ile kaynak bölgesini bir asal gaz ile koruma gereklidir. MIG kaynağında kaynak dikişinin daha geniş olması ve daha yavaş soğumasından dolayı TIG kaynağına oranla daha geniş ve uzun koruma aparatları kullanılmalıdır [43,49]. Koruyucu gaz olarak helyum, argon veya bunların karışımı kullanılır. Ayrıca titanyumun gevrekleşmesine neden olan oksijen, hidrojen ve azot'un gaz içinde bulunmamasına dikkat edilmelidir [1].

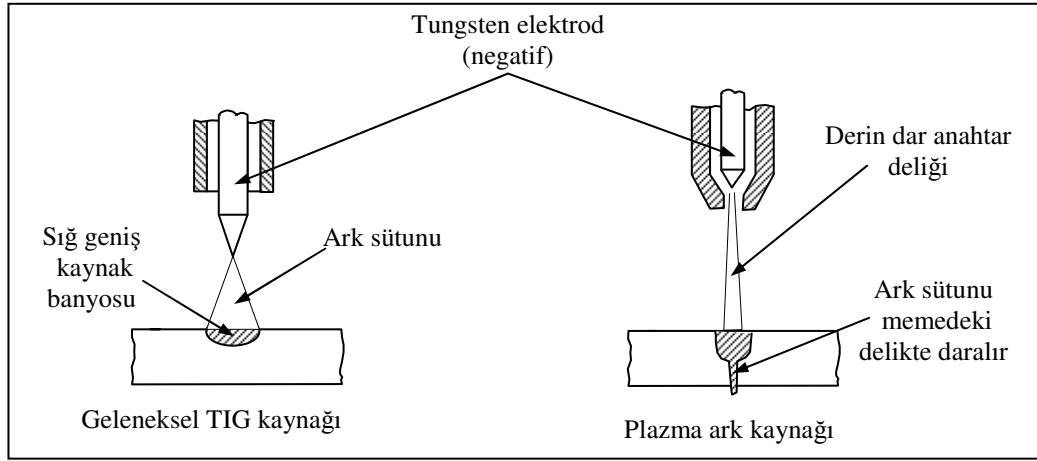
Titanyum ve alaşımlarının MIG kaynağında dolgu metalinin kaynak bölgesine geçişi kısa ark, damla ark ve sprey ark olarak üç şekilde olmaktadır. Damla ark geçişi yetersiz ergime ve sıçramaya neden olduğundan genellikle önerilmez. Kısa ark, ince parçaların kaynağında her pozisyonda uygulanırken kalın parçaların oluk pozisyonunda kullanılmaz. Ayrıca kısa ark düşük ısı girdisine neden olduğundan yetersiz ergimeye neden olur. Sprey ark ise sağladığı yüksek ısı girdisi ve dolgu oranlarına sahip olduğundan kalın parçaların yatay kaynağında oldukça uygundur. Ayrıca sprey ark darbeli ark geçişi sağladığından ince parçaların kaynağında tercih edilir [43].

MIG kaynağı için elektrot telleri alaşımsız Ti ve ilave metal bileşimi kaynak edilen malzemenin özelliklerine yakın olmalıdır. Alaşımsız titanyumun yüksek mukavemetli alaşımlarının kaynağında artırılmış birleştirme sünekliği elde etmek için bazen ana metalinkinden daha alçak akma sınırlı bir ilave metal kullanılır [39].

### **3.1.3. Plazma Ark Kaynağı**

Plazma ark kaynağı endüstriyel uygulamalarda TIG kaynağının yerine kullanılan yeni bir kaynak yöntemidir. Bu kaynak yöntemi daha yüksek kaynak hızı, daha iyi kaynak kalitesi ve dışarıdan meydana gelebilecek işlem parametrelerine daha az duyarlı olması sebebiyle tercih edilmektedir. Plazma ark kaynağı, plazmanın yüksek enerji yoğunluğundan faydalanılarak gerçekleştirilen bir yöntem olması nedeniyle, kaynak için kaynak yerine verilen enerji dar bir bölgeye verilmektedir. Bu sayede kaynak için verilen enerji küçük tutulabilmektedir ve neticede kaynak işlemi esnasında iş parçasına yapılan olumsuz etki azalmakta, dolayısıyla kaynak dikişi kalitesi artmaktadır [50,51].

Plazma ark kaynağının başlıca uygulamalarından biri, titanyum ve alaşımlarının birleştirilmesidir. Anahtar deliği kaynağı, paslanmaz ve düşük alaşımlı çeliklere göre titanyumda daha kalın küt alın birleştirmelere uygulanabilir. TIG kaynağında olduğu gibi plazma ark kaynağı da alt destek ve sürekli gaz koruması gerekir [39]. Şekil 3.3'de TIG ve plazma ark kaynağı prensip resmi görülmektedir [47].



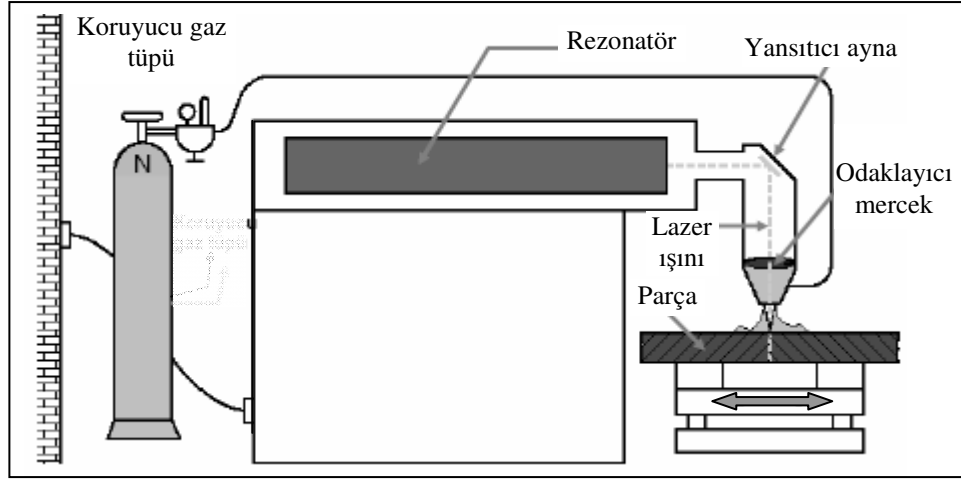
Şekil 3.3. TIG ve plazma ark kaynağı prensip resmi

Plazma ark kaynağı yardımıyla birleştirilen  $\alpha$  fazlı titanyum alaşımlarının mukavemet ve yorulma özellikleri son derece iyidir.  $\beta$  alaşımlarında gevrekleşme görülür, bu olumsuzluğu gidermek için kaynak işleminden sonra ısıtma işlemi uygulanır [52].

### 3.1.4. Lazer Işın Kaynağı

Bu kaynak türünde kaynak anında ısınma alanı çok küçük olduğundan kaynak esnasında oluşan deformasyon çok azdır. Bundan dolayı ısıtma işlemi görmüş alaşımların genel özellikleri bozulmaksızın kaynak edilebilirler [40,41]. Lazer ile kaynak işlemlerinde ana metal ek bir malzeme olmadan kaynak edilebilir veya aynı malzeme ek malzeme olarak kullanılabilir. Böylece titanyum alaşımının paslanmazlık özelliği ve mekanik sertliği düşürülmemiş olur [53]. Bu nedenle lazer ile birleştirme titanyum alaşımlar için en uygun yöntemdir [54].

Lazer ışın kaynağı, ince titanyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Kaynak sürecinde vakum odalarının kullanımı gerekmezken gaz koruması gerekir. Maliyetinin yüksek olması sebebiyle hava ve uzay sanayi dışındaki diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha az kullanılır. Bu yöntemde yüksek kalitede kaynak dikişi elde edilir ancak, diğer yöntemlere nazaran daha pahalıdır [1]. Şekil 3.4'de lazer ışını kaynak donanımı prensip resmi görülmektedir [47].



Şekil 3.4. Lazer ışını kaynak donanımı prensip resmi

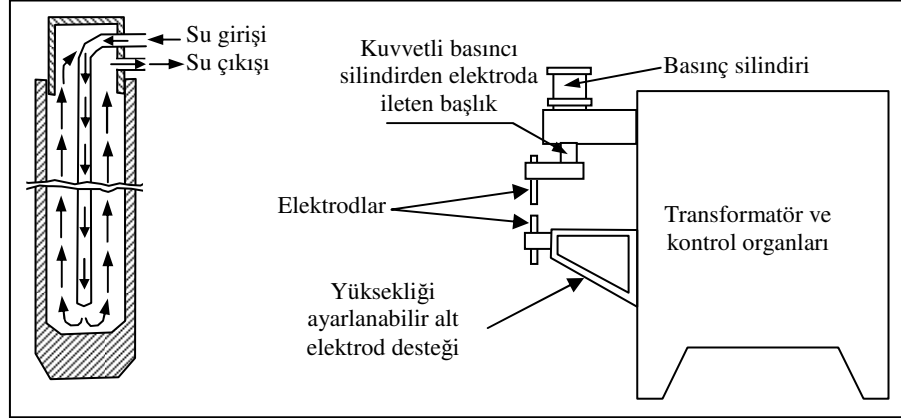
### 3.1.5. Elektron Işın Kaynağı

Elektron ışın kaynağı, yüksek değerdeki elektron ışınlarının kaynak alanına mercek yöntemi ile yönlendirilmesinden oluşur. Yüksek hıza sahip elektronlar metal yüzeyine çarparak kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesini sağlarlar. Böylece metale etki ederek eriyik ortamı oluşur. Bu kaynak yöntemi 6 ila 75 mm kalınlığındaki titanyum levhaların kaynağında çok sık kullanılmaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı minimum kaynak hazırlığı, düşük çarpılma, yüksek nüfuziyet kalitesi ve dar bir ITAB oluşumudur. En büyük dezavantajı ise yüksek kaynak soğuma hızı ve işlem aletlerinin pahalı oluşudur [41].

### 3.1.6. Nokta Direnç Kaynağı

Elektrik direnç kaynağı; iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı, iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın tatbiki ile yapılan bir kaynak yöntemidir. Kaynak işlemi için iki elektrot arasına yerleştirilen malzeme, devreden geçirilen yüksek akım şiddetine gösterdiği dirençle ısınmaktadır. İşlemden, temas noktalarındaki kontak direnci nedeni ile açığa çıkan ısıdan da yararlanılmaktadır. Yöntemde uygulanan akım şiddeti ve basma kuvveti, işlemin ana etkenleridir [1].

Elektrik direnç kaynağı seri imalata uygun ve oldukça yaygın kullanılan bir kaynak yöntemidir. Kaynak işlemi bir düğmeye veya bir ayak pedalına basarak makineyi devreye sokma ve devreden çıkarma yeteneğine sahip operatörler tarafından büyük bir hızla gerçekleştirilir. Bu nedenle, özellikle ark kaynağı, gaz kaynağı, sert ve yumuşak lehimleme gibi diğer termik birleştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, kaynak başına düşen işçilik masrafı bu yöntemde oldukça düşüktür. Direnç kaynağını uygulamada ekonomik hale getirmek, yani, düşük birim-işçilik masrafı ile birlikte uygun birim-makine maliyeti elde etmek için çok sayıda aynı veya benzer birleştirme gerekmektedir. İnce malzemelerin kaynağı diğer kaynak teknikleri ile zordur. Bu kaynak yöntemi, ilave malzeme kullanılmadığından sağladığı hafiflik, yüksek kaynak mukavemeti, estetik, özel beceri gerekmemesi ve kaynak hızının yüksek oluşu gibi nedenlerle, günümüzde uçak ve otomotiv endüstrisinde ve metal eşya imalatında büyük ölçüde kullanılmaktadır [7-9]. Şekil 3.5'te hidrolik basınç silindirli, su soğutmalı nokta kaynağı makinası resmi görülmektedir [47].



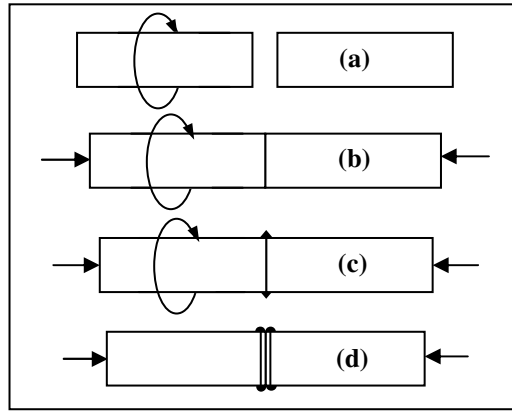
Şekil 3.5. Hidrolik basınç silindirli, su soğutmalı nokta kaynağı makinesi resmi

### 3.2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KATI HAL KAYNAK YÖNTEMLERİ

Titanyum ve alaşımları ergitmeli kaynakların yanı sıra katı hal kaynak yöntemleri ile de kolayca birleştirilebilmektedirler. Titanyum ve alaşımlarının birleştirilebildiği katı hal kaynak yöntemleri, sürtünme kaynağı, patlamalı kaynak ve difüzyon kaynağıdır [1].

### 3.2.1. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı, elektrik enerjisi veya diğer kaynaklardan ısı enerjisi uygulamadan malzeme yüzeyleri arasındaki mekanik dönme hareketinin ısı enerjisine dönüşmesi ile kaynak için gerekli ısının elde edilerek yapıldığı bir katı hal kaynak yöntemidir [47]. Sürtünme kaynağında kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler aksel basınç altındadır. Bu süreç birleşme bölgesinde plastik deformasyon sıcaklığına ulaşınca kadar devam eder. Bu sıcaklıkta dönme hareketi ani frenleme yapılarak durdurulur ve aksel basınç iki kat artırılarak yığıma oluşturulur. Bu kaynak yönteminde ilave metal ve koruyucu gaza gerek yoktur. Yöntem dairesel kesitli parçaların kaynağında büyük öneme sahiptir ve otomatik olarak uygulanan bir işlemdir [55]. Şekil 3. 6'de sürtünme kaynağı mekanizması görülmektedir.



Şekil 3.6. Sürtünme kaynağı mekanizması [47].

Sürtünme kaynağında kaliteli bir bağlantı oluşması için;

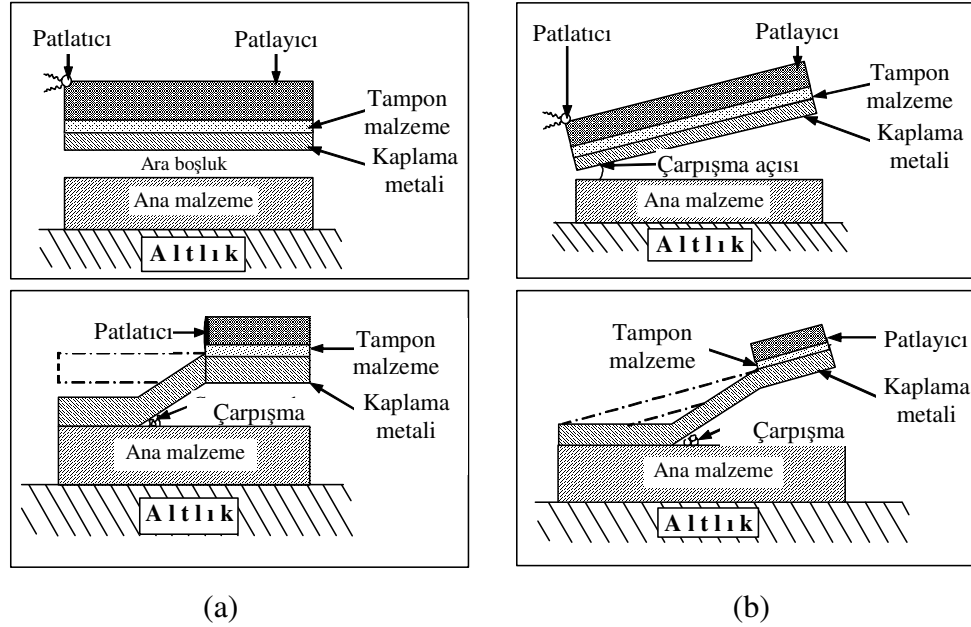
- (a) Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğer tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır ve sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını engeller.
- (b) Sürtünme kaynağı sırasında inklizyonların büyük bir kısmı elimine edilir.
- (c) Bağlantı bölgesi, hızlı bölgesel ısıtma ve soğutma sonrası uygulanan yüksek basınç nedeni ile ince taneli bir yapıya sahiptir.
- (d) Hızlı bölgesel ısıtma ve ayrıca bağlantıya bitişik relatif olarak geniş ısıtılmamış alanların ısıyı bölgesel ısınmış alanlardan hızlı çekmesi sonucunda çok dar bir ITAB oluşur [56].



Genellikle tüpleri, boruları ve çubuk malzemeleri kaynatmada kullanılan bu kaynak yönteminin ITAB'ı dar olduğundan titanyum ve alaşımlarının kaynağında büyük avantajlar sağlar. Bu yöntemde gaz koruması gerekmezken titanyumun kaynağında düşük temas basıncı ve yüksek dönme hızı tavsiye edilir [1,52].

### 3.2.2. Patlama Kaynağı

Titanyum ve alaşımları patlamalı kaynak yöntemi ile birçok metal ve alaşımına kolaylıkla kaynatılabilmektedir. Patlamalı kaynak, patlayıcıların patlama etkisinden yararlanılarak iki veya daha fazla metalin kompozit bir malzeme üretmek üzere, yüksek kalitede metalurjik bir bağ ile birleştirildiği bir katı hal kaynak yöntemidir. Kaynak sonrasında metal çiftleri arasında dalgalı bir arayüzey meydana gelir. Bu yöntemin en belirgin özelliği alışımlı kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen farklı özellikteki metallerin (titanyumun alüminyuma kaynağı) kolaylıkla birleştirilebilmesidir [4,57]. Şekil 3.7.(a)'da paralel düzlem ve Şekil 3.7.(b)'de eğik düzlemde patlamalı kaynağın şematik resmi görülmektedir [47].



Şekil 3.7. Patlamalı kaynağın şematik resmi; (a) paralel düzlemde, (b) eğik düzlemde

### 3.2.3. Difüzyon Kaynağı

Günümüz endüstrisinde kullanılan malzeme çeşitlerinin artması, farklı özellikler gerektiren yerlerde farklı metal bağlantılarının gerekliliği ve özellikle son yıllarda ekonomik faktörlerin giderek önem kazanması farklı özelliklere sahip malzemelerin birbirleriyle birleştirilmesi zorunluluğunu doğurmaktadır. Daha çok uzay ve uçak sanayinde kullanılan gelişmiş malzemelerin birleştirilmeleri katı hal kaynak teknikleri olarak bilinen ve de difüzyon kaynağını da kapsayan yöntemlerle mümkündür. Bugün farklı metallerin birleştirilmesinde % 40 bu yöntem kullanılırken, bu yöntemle birleştirilmiş malzemelerin yaklaşık % 20'sini de titanyum ve alaşımları oluşturmaktadır.

Difüzyon kaynağında en önemli kaynak parametreleri; kaynak sıcaklığı, kaynak ve basınç süresi, şekil değiştirme miktarı, yüzey kalitesi ve koruyucu atmosferdir. Difüzyon kaynağının uygulanmasında, özellikle farklı metal ve alaşımlarının birleştirilmesinde genellikle bir ara tabaka kullanılır. Ara tabakalar kaynak alanındaki heterojenliği minimuma indirir ve birleştirmenin oluşumunu kolaylaştırır [47].

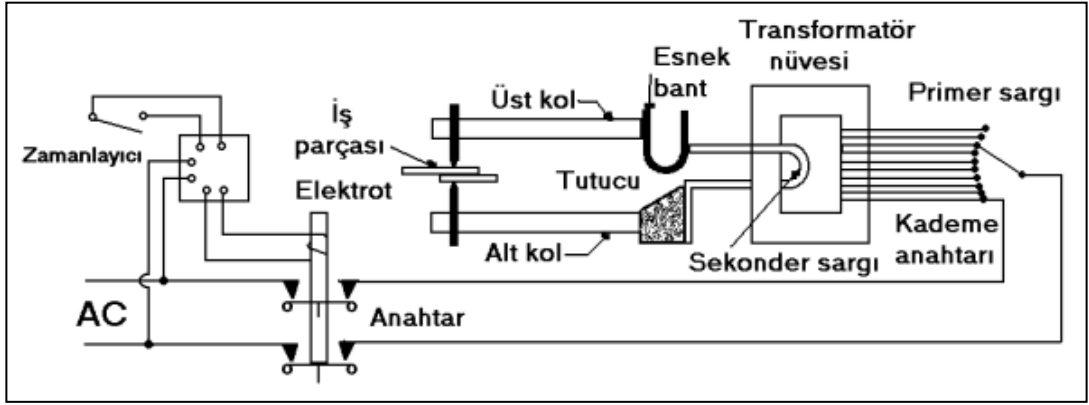
## BÖLÜM 4

### NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI

Nokta direnç kaynağı, elektrotlar arasında basınç altında bir arada tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı, iş parçalarının gösterdiği direnç nedeniyle meydana gelen ısı ile yapılan kaynak yöntemidir. Kaynak için gerekli akım, yüksek gerilim ve düşük akım şiddetindeki şebeke elektrik akımını, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetinde kaynak akımına çeviren kaynak makinasından sağlanır. Gerekli basınç veya elektrod kuvveti, pnömatik veya mekanik donanımlar ile gerçekleştirilir [47].

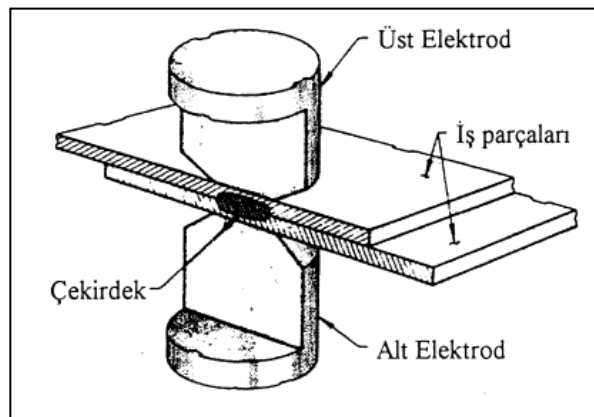
#### 4.1. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI PRENSİBİ

Nokta direnç kaynağında ısı transformatörler yardımı ile elde edilir. Transformatörler şebeke elektriğinin voltajını düşürür ve akımını arttırlar. Nokta direnç kaynağı, elektrotlar tarafından uygulanan kuvvet altında bir arada tutulan iş parçalarında, geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdikleri dirençten elde edilen ısı ile parçaların tek ya da daha çok noktada bölgesel olarak ergitilip basınç altında birleştirilmesine dayanan bir yöntemdir. Bir direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Akım yoğunlaşması ile ısıtılan kaynak metalinde erimiş çekirdek meydana gelir. Akım kesildiğinde, kaynak metali hızlı bir şekilde soğuyup katılaştıkça elektrot kuvveti uygulanmaya devam etmektedir.



Şekil 4.1. Nokta direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi [58].

Saniyenin bir diliminde tamamlanan her kaynaktan sonra elektrotlar geri çekilmektedir. Kaynak dikişinin boyut ve şekli, ilk olarak elektrot uçlarının boyut ve şekliyle sınırlıdır. İç yüzeylerde kaynak çekirdeği oluşur fakat tamamen dış yüzeylere doğru genişlemez (Şekil 4.2). Düzgün bir nokta kaynağındaki çekirdeğin kesiti oval şekilde, üstten görünüşü ise elektrot ucu şeklinin aynı olup (çoğunlukla yuvarlak), yaklaşık olarak aynı boyuttadır. Elektrot gücüne dayanabilecek yeterli esas metal olmasını ve kaynak sırasında yerel distorsiyonun kaynaktan metal fişkırmasına neden olmamasını sağlamak için, noktalar iş parçasının kenarından yeterli uzaklıkta olmalıdır [58-60].



Şekil 4.2. Nokta direnç kaynağı [60].

Kaynak işlemi, bir düğmeye ya da pedala basarak makineyi devreye sokan ve devreden çıkaran operatörler tarafından hızla gerçekleştirilir. Bu nedenle, özellikle

ark kaynağı, gaz kaynağı, sert ve yumuşak lehimleme gibi diğer termik birleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, kaynak başına düşen işçilik masrafı bu yöntemde oldukça düşüktür. Diğer yandan, direnç kaynağı makineleri, diğer kaynak yöntemleri için gerekli teçhizatın maliyetleri ile karşılaştırıldığında daha pahalıdır. Bu kaynak yöntemi, ilave malzeme kullanılmadığından, sağladığı hafiflik, yüksek kaynak mukavemeti, estetik, özel kaynak beceri gerektirmemesi ve kaynak hızının yüksek oluşu gibi nedenlerle, günümüzde otomotiv ve uçak endüstrisinde ve metal eşya imalatında büyük ölçüde kullanılmaktadır [61,62].

Direnç kaynağı, ısı işlem uygulanan tüm metal ve alaşımlarına uygulanır. Çoğunlukla aynı metallerin kaynağında kullanılır. Millerin alın kaynakları, çeşitli boru imalatları, ince sac kaynakları, bağlantı elemanları bu yöntemle kaynak olabilmektedir. Günümüzde kara ve hava taşıtlarında ince sac nokta kaynak robotları geliştirilip kullanılmaktadır [63].

#### **4.2. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI YÖNTEMLERİ**

Elektrik direnç kaynağı metotlarının çok çeşitli türleri vardır. Bu yöntemlerde lokal olarak yüksek bir direnç meydana getirmek ve böylece de bağlantı noktalarında ısıyı yoğunlaştırabilmek için farklı teknikler kullanılır. Direnç, iletkenin öz direncine ve geometrisine bağlıdır. İşlem sırasında birleştirilecek parçalar arasında sınırlı bir akım yolu meydana getirilerek, lokal yüksek bir direnç oluşturma yoluna gidilir (kabartılı nokta kaynağı). Bu yöntem akım yoğunlaştırılması olarak bilinir. Tüm direnç kaynağı metotlarında, akım taşıyan elektrotlar ve birleştirilecek parçalar arasında fiziksel bir temasın olması gerekir.

Bütün elektrik direnç kaynağı yöntemleri, uygun bir akım şiddeti-kaynak zamanı düzenlemesi gerektirir. Akım kapalı bir devre boyunca geçer. Akımın sürekliliği, kullanılan yönteme uygun olarak şekillendirilmiş elektrotların uyguladığı basma kuvveti sayesinde gerçekleşir. Kaynak sırasında çeşitli işlemlerin sırası en genel halde şöyle ifade edilebilir: Önce sınırlı bir metal hacminin ergimesi için gerekli ısı miktarını elde etmek ve bu metalin basınç altında yeniden katılaşmasıyla soğumasına olanak sağlamaktır. İş parçasının ısınma ve soğuma hızları, zaman tasarrufu ve ısı

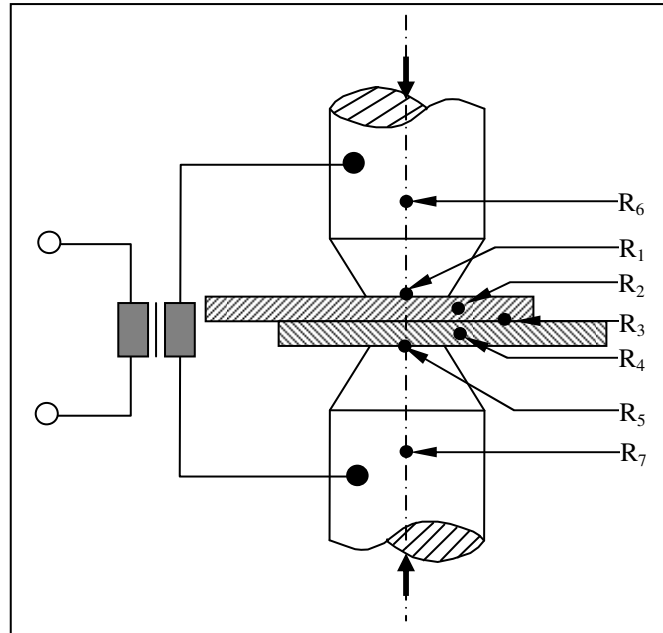
kayıplarının azaltılması bakımından mümkün olduğunca yüksek olmalıdır. Eğer soğuma hızı gevrek bir kaynak dikişi meydana getirecek kadar yüksekse, kaynak makinesinde gerçekleştirilen bir ısıtma işlemi gerekmektedir [8,61].

Elektrik direnç kaynağı yöntemleri üç gruba ayrılmaktadır [47]:

- 1- Nokta Kaynağı
- 2- Dikiş Kaynağı
- 3- Kabartılı Kaynak.

#### 4.2.1. Nokta Kaynağı

Nokta kaynağının prensibi, elektrotlar arasında basınç altında bir arada tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı, iş parçalarının gösterdiği direnç nedeniyle meydana gelen ısı ile yapılan kaynak yöntemidir (Şekil 4.3). Kaynak için gerekli akım, yüksek gerilim ve düşük akım şiddetindeki şebeke elektrik akımını, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetinde kaynak akımına çeviren kaynak makinasından sağlanır. Gerekli basınç veya elektrod kuvveti, pnömomatik veya mekanik donanımlar ile gerçekleştirilir [47].



Şekil 4.3. Nokta direnç kaynağının prensip resmi

J akımı, R ohmik direncinden, t süresince geçtiğinde, Joule kanununa bağlı olarak, J birim ısı açığa çıkar.

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

$$\text{Burada, } R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7' \text{ dir.} \quad (4.2)$$

Yani sekonder devredeki toplam dirençtir. Bu dirençler (Şekil 4.3)

#### - Malzeme dirençleri

$R_6, R_7$  : Elektrotların direnci

$R_2, R_4$  : İş parçalarının dirençleri

#### - Temas dirençleri

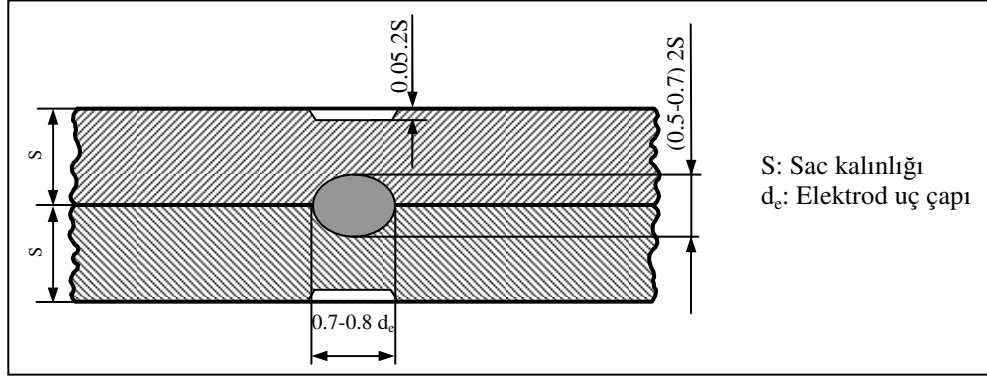
$R_1, R_5$  : Elektrod - malzeme temas direnci

$R_3$  : Malzeme - malzeme temas direnci

Malzeme direnci, malzemenin fiziksel özelliklerinden kaynaklanır ve değişken değildir. Temas dirençleri ise malzemenin ve elektrotların uç durumlarına bağlı olarak değişir. Kaynak sırasında  $R_3$ , en büyük ısının gerçekleşeceği direnç olarak seçilir. Diğer dirençlerdeki ısınmaların mümkün olduğunca küçük olması gerekir. Bu ise,  $I_k$  kaynak akımının,  $t_k$  kaynak süresinin ve F elektrot kuvvetinin seçimiyle sağlanır.  $R_1, R_3$  ve  $R_5$  temas dirençleri bağlantının kalitesine etki ederler.  $R_3$  kaynak bölgesindeki sıcaklık, malzemenin  $t_c$  ergime sıcaklığının üzerine çıkar. Burada sıvılaştıran malzeme, kaynak sonrasında kaynak çekirdeğini oluşturur.  $R_1$  ve  $R_5$  temas bölgelerindeki ısınma, mümkün olduğunca düşük tutulur. Bu ise, iyi ısı ileten elektrod ve malzeme yüzeyleriyle sağlanır. Yüzeylerdeki pas, yağ ve boya gibi iyi ısı iletmeyen tabakaların olmaması gerekir. Temas dirençleri, farklı büyüklükte ısı miktarlarına ve bağlantı dayanım özelliklerinin farklılaşmasına yol açar.

Nokta direnç kaynağında, hatalı kaynak dikişlerinden kaçınmak için, elektrod kuvveti, akım uygulaması sonu arttırılmaktadır. Nokta çapının büyüklüğü kullanılan elektrodun çapına bağlı olarak ortaya çıkar. Kusursuz kabul edilen bir birleşmede bu

çap (0.7-0.8)  $d_e$  olarak verilmektedir. İdeal olarak bu çapın, elektrod çapına eşit olması gerekmektedir. Kaynak noktasının diğer boyutları, alabilecekleri en büyük değerler olarak Şekil 4.4’de verilmiştir [47].



Şekil 4.4. Nokta direnç kaynağının boyutları

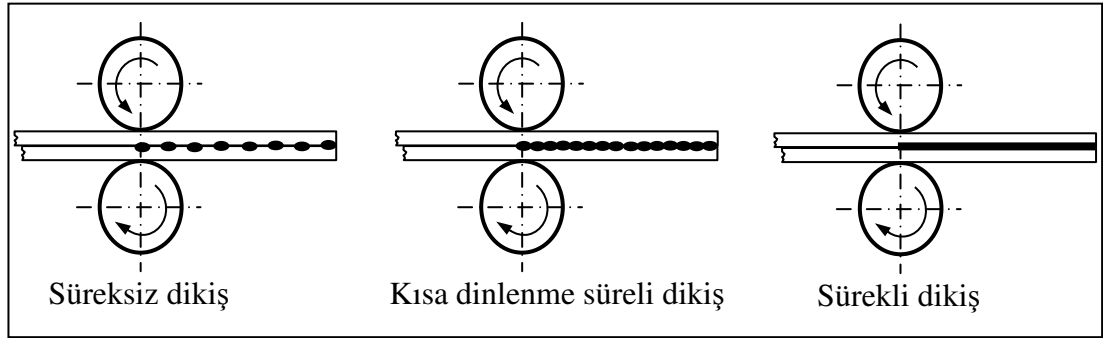
#### 4.2.2. Dikiş Kaynağı

Dikiş kaynağı, dönel elektrodlarla 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 ise 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 arttırılmıştır.

Dikiş kaynağının en önemli uygulamalarından biri, benzin tanklarının imalatıdır. Otomobil endüstrisinde yakıt tanklarının sızdırmazlık özelliğini sağlamak, emniyet açısından birinci derecede önemlidir. Dikiş kaynağı, parçalar birbirine tek bir parçaymış gibi kaydığı 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 elektrod arasına alınır. Elektrodların belirli bir kuvvetle bastırmasından sonra kaynak akımı geçirilir. Ayarlanan süre boyunca bu akım bir elektroddan diğerine geçer, iki sac arasındaki temas noktası, en yüksek dirence sahiptir ve ısınan malzeme bu noktada ergir. Elektrik akımının uygulanış süresine göre farklı dikişler elde edilir. Şekil 4.5’de de farklı impulslar da yapılmış elektrik direnç dikiş kaynak uygulamaları görülmektedir [47].



Şekil 4.5. Dikiş kaynağı uygulamaları

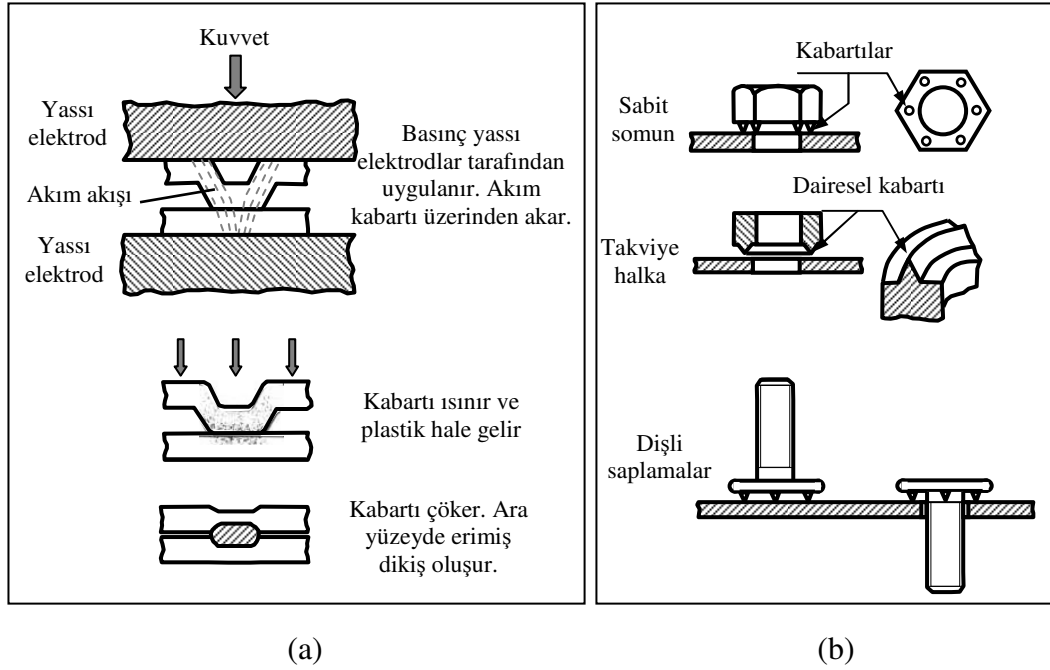
Kullanılan elektrod çapları 50-600 mm arasında değişmektedir. Elektrod malzemesi ise, soğuk çekilmiş bakır veya ısıl işlem görmüş sert nitelikteki bakır alaşımlarıdır (bakır-kadmiyum, bakır-krom, bakır-tellür). Elektrotların (kaynak işlemi sırasında) malzemelere temas eden yüzeylerin genişliği, kaynatılacak malzemenin kalınlığına göre değişmektedir. Normal olarak kaynak genişliği, kaynatılan gereçlerin en incisinin kalınlığının 1,5-3 katı kadar olmalıdır. Kaynak genişliği temel olarak ince metal kalınlığından daha büyüktür. Bu da elektrodun kaynak sırasında yıpranma değerini minimuma indirmektedir. Elektrodların soğutulması ya merkezi kanallardan su dolaştırılarak ya da elektrod tekerlerinin yüzeylerine su püskürtülmesi ile yapılmaktadır. Çeliklerin kaynatılmasında da soğutma sıvısı olarak % 5 oranında bor yağı, % 95 oranında su kullanılır [47].

#### 4.2.3. Kabartı Kaynağı

Elektrik direnç nokta ve dikiş kaynağının her ikisinde de arayüzeydeki akım yoğunlaşması elektrodları şekillendirerek ve temas halindeki yüzey alanını

sınırlandırarak gerçekleştirilir. Kabartılı kaynakta, kaynağın yeri, saclardan birinin yüzeyinde yükselen bir kabartı yoluyla belirlenir (Şekil 4.6.a). Bir araya getirildiklerinde saclar, sadece kabartının bulunduğu noktadan birbirlerine temas ederler. Arayüzeyi boyunca geçen akım kabartı boyunca yoğunlaşır ve bu nedenle kabartı hızla ısınır. Kabartı plastik hale gelir ve sonuçta da ergidiğinden çöker ve arayüzeyde ergimiş bir bölge oluşur. Elde edilen sonuç nokta kaynağına benzerdir.

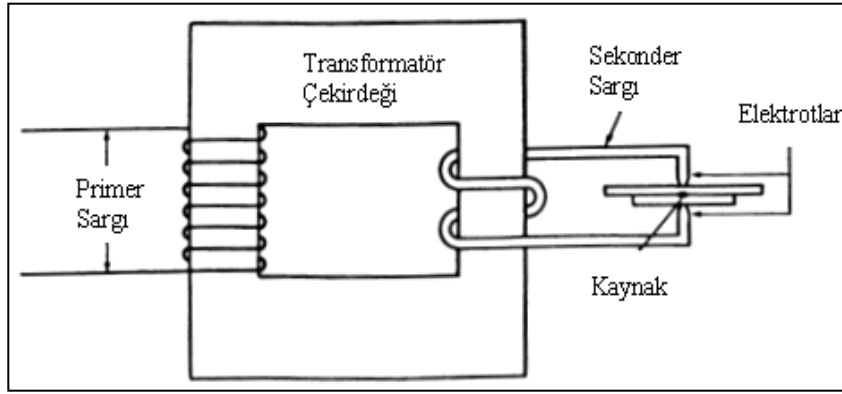
Genellikle iki veya üç kabartı aynı anda kaynatılır. Kaynak makinaları temelde nokta kaynağı için kullanılan makinalara benzer. Ancak elektrodların yerine bağlantı bölgesine üniform bir basınç uygulayan, düz, bakır tablalar yerleştirilmiştir. Kabartıların şekil ve boyutları önceki deneyimlere bağlı olarak veya denemeyle seçilir. Kabartılı kaynak, uzun bindirme bağlantıları için çok sık kullanılmaz. Bu yöntem küçük bağlantı parçalarının sac yapılarına birleştirilmesi sırasında çok daha fazla kullanışlıdır. Yöntem otomobil gövdelerinin, ev cihazlarının, büro mobilyalarının ve makina parçalarının üretiminde geniş ölçüde kullanılmaktadır. Örneğin; sabit somunların araba şasisine kaynatılabilmesi, bir yüzeyde oluşturulmuş küçük kabartıların üretilmesiyle gerçekleştirilir (Şekil 4.6.b).



Şekil 4.6. Kabartılı kaynak şematik resmi; a) tekli kabartılı kaynak, b) çoklu kabartılı kaynak

### 4.3. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI OLUŞUMU

Nokta direnç kaynağı, elektrotlar tarafından uygulanan kuvvet altında bir arada tutulan iş parçalarında, geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdikleri dirençten elde edilen ısı ile, parçaların tek yada daha çok noktada bölgesel olarak ergitilip basınç altında birleştirilmesine dayanan bir yöntemdir. Akım konsantrasyonu ile ısıtılarak kaynak metalinde ergimiş çekirdek meydana gelir. Elektrik akımı kesildiğinde, kaynak metali hızlı bir şekilde soğuyup katılaştırken elektrot kuvveti uygulanmaya devam etmektedir, daha sonra elektrotlar geri çekilerek iş parçasını serbest bırakırlar. Kaynak işlemi genellikle 1sn'den daha kısa bir sürede tamamlanır. Şekil 4.7'de nokta direnç kaynak makinesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Nokta direnç kaynak yönteminin şematik gösterimi [62].

Nokta kaynağında kullanılan makineler, şebeke elektriğini bünyesinde mevcut olan transformatörden geçirerek voltajını düşürür ve akım şiddetini artırır. Makinenin kapasitesine göre akım, 2000 ile 120.000 amper arasında değişebilir. Elektrotlar iş parçalarına önceden ayarlanmış zaman aralıklarında yaklaşır ve uzaklaşır. İş parçasını sıkan elektrotlar pnömomatik, hidrolik veya mekanik cihazlar yardımıyla hareket eder [64].

#### 4.4. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI KABİLİYETİ

Kaynak kabiliyeti kesin ve belirgin ifade edilebilen bir özellik değilse de metalik malzemelerin birleşebilme kabiliyetini gösterir. Metaller yüksek derecede kaynak kabiliyetine sahiptir denildiği zaman; kaynak esnasında hiçbir tedbire başvurmadan kaynak şartları geniş bir aralıkta tatminkar bir kaynak kalitesinin elde edileceği anlamına gelir. Düşük dereceli kaynak kabiliyeti de kaynakta iyi bir netice alabilmek için özel tedbirlere ihtiyaç olduğu ve kaynak şartlarının çok dar limitler arasında tutulması gerektiği manasına gelmektedir.

Metallerin nokta direnç kaynak kabiliyeti üç faktör ile kontrol altına alınmıştır.

- 1- Metalin ısı iletkenlik katsayısı
- 2- Metalin ısı direnci
- 3- Metalin ergime sıcaklığı

Metalik malzemelerin nokta direnç kaynak kabiliyetleri arttıkça kaynak hataları azalır kaynak kalitesi ve mukavemeti yükselmektedir. Bir metal ne kadar safsa o metalin kaynak kabiliyeti o kadar yüksektir. Fakat saf metaller endüstride nadir kullanılırlar. Bir metalin kaynak kabiliyetinin yüksek olması onun kaynak makine ve teçhizatını sadeleştirmektedir. Bu durum kaynağın ekonomik olmasını da sağlamaktadır. Metallerde alaşım eleman sayısı ve % miktarı arttıkça nokta kaynak kabiliyeti azalır [61].

Metalin akıma karşı gösterdiği direnç yüksek, ısı iletme yeteneği ve ergime sıcaklığı düşük ise bu metal bir dereceye kadar kaynak edilebilmektedir. Çelikler bu tanıma girmektedir. Isıl direnci düşük olan fakat ısı iletme katsayısı fazla olan düşük sıcaklıkta ergiyen metaller güç kaynak yapılmaktadır. Bunlarda demir dışı hafif metallerdir. Kaynak kabiliyeti faktörünün hesaplanması aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$S = \frac{\alpha_t}{T_{em} \times K_t} \times 100 \quad (4.3.)$$

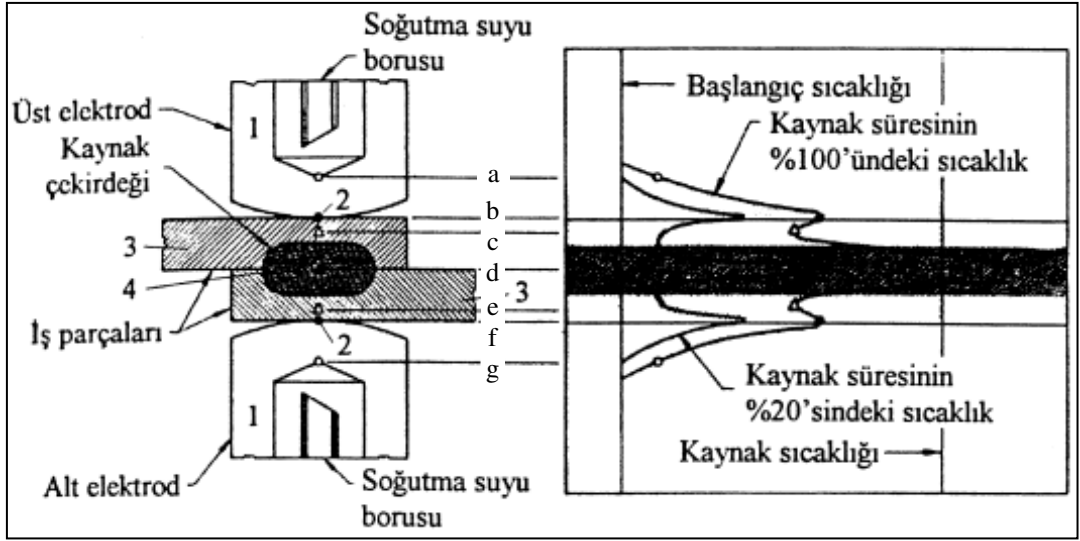
- S : Kaynak kabiliyeti  
 $\alpha_t$  : Isı iletkenliği  
 $T_{em}$  : Metalin ergime sıcaklığı  
 $K_t$  : Isı iletme katsayısı

Nokta direnç kaynağı, birleştirilen malzemeler bakımından diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha fazla serbestliğe sahiptir. Nokta direnç kaynağı yöntemiyle bir çok metal ve metal çiftlerini değişik biçim ve boyutlarda kusursuz olarak birleştirmek mümkündür. Kaplamalı malzemeleri de nokta direnç kaynağı ile birleştirmek mümkündür [61].

#### **4.5. KAYNAK SIRASINDA SICAKLIK DAĞILIMI VE KAYNAK ÇEKİRDEĞİNİN OLUŞUMU**

Nokta direnç kaynağı makinelerinin sekonder devreleri, kaynak edilecek parçalar dahil bir seri dirençten meydana gelmiştir. Bu dirençlerin toplamı elektrik akım şiddetini tayin eder. Elektrik akımı (A) devrenin her noktasında, o noktanın direncinden bağımsız olarak, aynıdır. Bununla beraber herhangi bir noktada meydana gelen ısı, doğrudan o noktadaki direnç ile orantılıdır. Sekonder devreyi meydana getiren elektriksel sistem, istenilen noktada ısı meydana getirecek ve sistemin geri kalan elemanlarının nispi olarak soğuk kalmasını sağlayacak şekilde etüt edilmiştir. şekil 4.8'da elektrotlar arasındaki iş parçasında bulunan çeşitli bölgelerinin direnç noktaları gösterilmiştir [63].

Uygulanan akımla birlikte ısı bir noktada oluşmaz. şekil 4.8'da görüldüğu gibi 7 bölgenin dirençleri doğrutusunda ısı üretilir. İstenilen ısı bölgesi 4 nolu bölgedir. Bunun dışındaki noktalarda oluşan ısıların engellenmesi istenir. Başlangıç sıcaklığı düşey çizgiyle belirtilmiştir. En büyük direnç 4 düzlemindeyir. Bu nedenle en yüksek ısı bu bölgede oluşur ve 2 ve 6 noktalarında ikinci derece etkili olan dirençler mevcuttur. Buna paralel olarak 2 ve 6 bölgelerinde ısı hızla artar.



Şekil 4.8. Nokta direnç kaynağında bölgeler, dirençler ve sıcaklık dağılımı [61,65,66]

Bu dirençler;

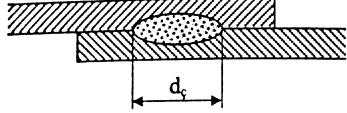
- 1- Elektrot direnci,
- 2- Elektrot-levha arası temas direnci,
- 3- Levha direnci,
- 4- Levhalar arası temas direncidir.
  - a) Üst elektrot direnci
  - b) Üst elektrot ile üst levha arasındaki temas direnci
  - c) Üst levhanın direnci
  - d) Üst levha ile alt levha arasındaki temas direnci
  - e) Alt levhanın direnci
  - f) Alt levha ile alt elektrot arasındaki temas direnci
  - g) Alt elektrot direnci

Kaynak süresindeki % 20'ye karşılık gelen çizgi, kaynak akımının uygulandığı ilk anlarda oluşmaktadır. Kaynak süresinin % 100'ündeki sıcaklık çizgisi maksimum noktadaki ısıyı görmektedir. Bu nedenle 2 ve 6 düzlemlerindeki ısı bu düzlemlere temas eden 1 ve 7 düzlemindeki su soğutmalı elektrotlara doğru hızla iletir. Diğer bölgelerdeki ısılardan 4 düzleminde oluşan ısı her zaman yüksektir. Parçaların

birleşmesi 4 bölgesinde oluşacak ve sonuçta ergimeyle birlikte kaynak çekirdeği oluşturacaktır [61].

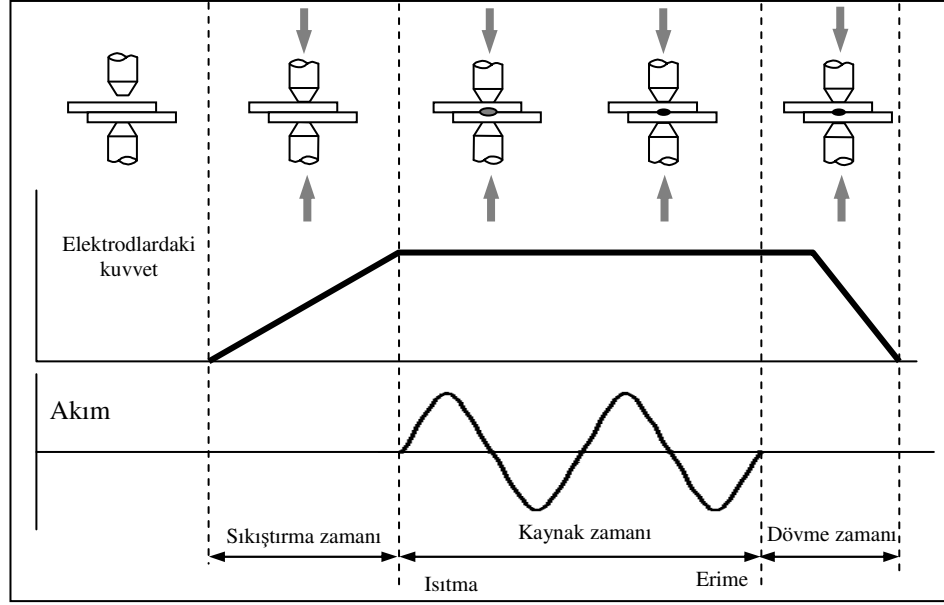
Kaynak noktaları, parçaların elektrot kuvveti ile çarpılması sonucu kaynak edilen noktadan ergiyik metalin kıvılcım şeklinde sıçrama önlemek için kenarlardan yeterince uzak olmalıdır. Ayrıca, parça üzerinde kaynak edilen noktanın haricinde paralel akım geçişlerini önlemek için ardışık kaynak noktaları arasındaki mesafe yeteri kadar büyük olmalıdır [64]. Kaynak çekirdeklerinin, kaynağın yapıldığı sac kalınlığına bağlı olarak boyutları değişmektedir. Çizelge 4.1’de değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları verilmektedir.

Çizelge 4.1 Değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları [58,67].

Tek sacın kalınlığı	mm				
	0,5	1,0	1,5	2,0	
	<b>Çekirdek Çapı (d<sub>c</sub>)</b>				
	<b>En Büyük</b>	6,0	9,0	10,0	13,0
	<b>En Küçük</b>	2,5	4,0	5,0	7,0

#### 4.6. KAYNAK ÇEVİRİMİ

Bütün direnç kaynağı metotları, uygun bir akım şiddeti-kaynak zamanı düzenlemesini gerektirir. Kaynak bölgesinin ısınma ve soğuma hızları, zaman ekonomisi bakımından mümkün olduğunca yüksek olmalıdır. Genel olarak nokta kaynağı, üç periyottan meydana gelir; sıkıştırma, kaynak ve dövme zamanlarıdır. Bu sürelerle ilgili olarak direnç nokta kaynağı aşamaları Şekil 4.9’da gösterilmiştir [58,68].



Şekil 4.9. Nokta direnç kaynağının çevrimi [47].

- 1- Birleştirilecek parçalar elektrodlar arasına yerleştirilir. Kaynağın doğru pozisyonda olduğundan emin olmak için iş parçasını elektrodlarla hizalarken dikkat edilmelidir. Kaynak çevrimi, genellikle bir ayak anahtarı veya pedalı yoluyla başlatılır.
- 2- Elektrodlar birbirine yaklaşır, iş parçasını sıkıştırır ve sacları temas haline getirir.
- 3- Sıkıştırma zamanı olarak adlandırılan belirli bir süre içinde basınç optimum bir değere yükseltilir.
- 4- Akım verilir ve ergimenin olduğu önceden ayarlanmış bir süre devrede kalır ve kaynak dikişi gerekli boyuta gelinceye kadar büyür. Genel olarak kaynak zamanları bir saniyeden önemli ölçüde kısadır ve periyotlarla (cycle) belirtilir. Bir periyot 1/50 saniyeye eşittir.
- 5- Elektrodlar üzerindeki basınç, kaynak katılaşırken dövme veya tutma zamanı adı verilen süre boyunca uygulanır.
- 6- Basınç sonuçta kaldırılır, elektrodlar birbirinden uzaklaşır ve iş parçası makineden alınır [47].



## 4.7. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI DEĞİŞKENLERİNİN İNCELENMESİ

Kaynak işlemi sırasındaki akım ve zamanlama çok önemlidir. En iyi kaynak, bu üç değişken arasında en iyi uyumun sağlanması ile elde edilecektir. Kaynak makinelerinde değişkenlerin kontrolü ve makinenin otomasyonu için elektronik kontrol ünitesi kullanılır. İstenilen kaynak çekirdeği çapı; akım şiddeti ve zamanın uygun bir şekilde ayarlanmasıyla elde edilir. Zaman kısa tutulursa kaynak çapı küçülür; aksine uzun tutulursa ergiyen hacim fazlalaşır ve ergiyik dışarı çıkar.

Bu parametreler yavaş ve hızlı kaynak diye iki grup kaynak anlayışını ortaya çıkarmıştır. İlk zamanlarda yüksek güçte elektrik enerjisi olmadığı için uzun süreli düşük akım, düşük kuvvetli kaynaklar yapılmıştır. Bu tür kaynakta düşük kuvvet uygulanmasına rağmen elektrot fazla batar ve kaynak civarındaki renk değişim bölgesi çok geniştir. Nokta başına enerji de daha çoktur. Teknolojinin ilerlemesi ile yüksek kuvvet ve akım uygulanmasıyla kaynak teknikleri gelişmiştir. Puntalar daha sağlam, daha kısa sürede ve daha az enerji ile yapılabilir olmuştur. Direnç nokta kaynağında, yapılacak kaynağın sağlamlığı için kaynak değişkenleri her zaman birleştirilecek sac parçaların ince kalınlıkta olmasına göre ayarlanır [69].

Kaynak kalitesini etkileyen başlıca kaynak değişkenleri şu şekilde sıralanır;

- 1- Elektrot bileşimi ve şeklinin ısınma üzerine etkisi
- 2- Kaynak akımının etkisi
- 3- Kaynak zamanının etkisi
- 4- Kaynak kuvvetinin etkisi
- 5- İş parçasının malzemesi
- 6- Kaynak edilecek parçaların yüzeylerinin etkisi
- 7- Kaynaklı noktalar arasındaki mesafenin ısınma üzerine etkisi [63].

### 4.7.1. Elektrot Bileşimi ve Şeklinin Isınma Üzerine Etkisi

Elektrodun ısınmasını minimumda tutabilmek için, elektrotlar yüksek elektrik iletkenliği ve düşük temas direncine sahip olmalıdır. Aynı zamanda, elektrot ucu ile

metalin temas ettiği alanlardaki (b ve f bölgeleri, Şekil 4.8) ısının uzaklaştırılabilmesi için, yüksek ısı iletkenliğine sahip olmalıdırlar. Elektrotlar ayrıca, tekrarlanan yüksek kaynak kuvvetlerinin sebep olduğu deformasyonlara direnebilecek kadar kuvvetli olmalıdır [61].

#### **4.7.1.1. Elektrot Bileşiminin Etkisi**

Genellikle alaşımın sertliği arttıkça ısı ve elektrik iletkenliği azalmaktadır. Dolayısıyla en uygun alaşımın seçiminde, elektriksel, ısısız ve mekaniksel özelliklerin uygun bir kombinasyonu bulunmalıdır [61].

#### **4.7.1.2. Elektrot Şeklinin Etkisi**

Aynı bileşimde ve kalınlıktaki parçalar kaynak edildiğinde, elektrotların uç çapları aynı olmalıdır. Bununla beraber, eğer kaynak edilecek parçaların kalınlıkları farklı ise, kalın parçalarla temas eden elektrotun çapının, uygun ısı dengesinin sağlanabilmesi için daha büyük olması gerekebilir.

Farklı metallerin kaynağında, eğer metallerden birisinin elektriksel direnci diğerinden büyükse aynı durum geçerlidir. Bu farklılık, yüksek dirençli parça ile temasta olan elektrotun ucunun çapı büyütülerek veya düşük dirençli parça ile temasta olan elektrot için yüksek dirençli malzeme kullanarak telafi edilebilir.

Kaynak çekirdeğinin çapı, elektrotun temas yüzeyinden hafifçe küçüktür. Elektrotun ucu aşındıkça veya mantarlaşma nedeniyle büyüdükçe, kaynak çekirdeğinin çapı artar. Uç çapının büyümesi, akım yoğunluğunu azaltacağı ve açığa çıkan ısı iyi bir kaynak meydana getirmeye yeterli olmayacağı için, kaynak kalitesini etkileyecektir [62].

#### **4.7.1.3. Elektrotların Malzemesi ve Boyutları**

Ticari saf bakır, en iyi iletkendir. Saf bakır elektrotlar, üstün mekanik özellikleriyle beraber, yeterli elektrik iletkenliğine sahip malzemeler elde edilene kadar, direnç

kaynağı elektrotu olarak kullanılmıştır. Daha yüksek akım şiddeti, elektrot kuvveti ve kaynak hızına sahip yöntemlerin gelişmesi, saf bakırın elektrot malzemesi olarak kullanımını engellemiştir.

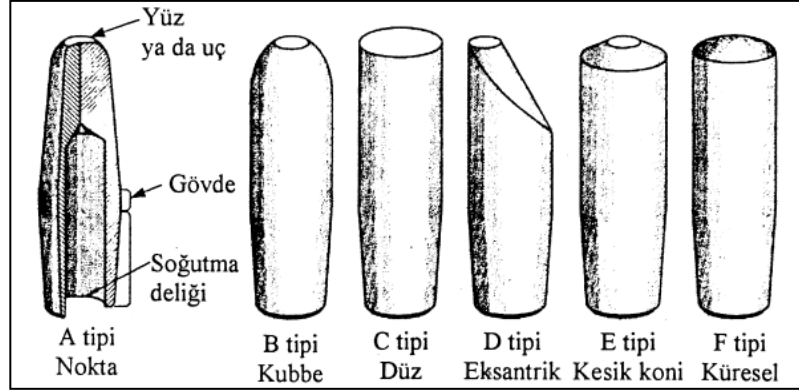
Soğuk çekilmiş bakır, statik ve dinamik basma kuvvetlerine karşı düşük mukavemete ve düşük yumuşama sıcaklığına sahiptir. Ticari saf bakırın istenmeyen özelliklerini ortadan kaldırmak için daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklerine sahip bir seri bakır alaşımı geliştirilmiştir. Direnç kaynağında kullanılan başlıca elektrot alaşımları ve özellikleri aşağıdaki Çizelge 4.2’de verilmiştir [58,69].

Çizelge 4.2. Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımları [61,69].

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

Genellikle, alaşımın sertliğinin artması, elektriksel ve ısı direnci artırır. Bu yüzden, herhangi bir uygulama için belli bir elektrot alaşımının seçimi, onun mekanik özelliklerine göre değişen ısı ve elektriksel özelliklerinin de göz önüne alınmasıyla gerçekleşir. Örneğin, alüminyumun kaynağında kullanılan elektrotlar, yüksek basma mukavemeti yerine yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır. Buna karşılık, paslanmaz çeliğin kaynağı için kullanılan elektrotlarda, maksimum basma mukavemeti elde etmek için iletkenlikten fedakarlık edilmelidir [64,69].

Elektrotların şekil ve boyutları, kaynak yapılacak iş parçalarının cinsine, şekil ve boyutlarına göre saptanır. Standart elektrotlar içinde en çok kullanılanlar, kesik koni uçlu ve küresel olanlardır. Şekil 4.10’da standart elektrotların uç şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.10. Standart elektrot uç şekilleri [61].

Küresel uçlu elektrotlar kullanıldığında, elektrot temas yüzeyinin iş parçası yüzeylerine paralel olarak, hassas bir biçimde ayarlanması gerekmemektedir. Bu nedenle, küresel uçlu elektrot, üst elektrotun dairesel hareket yaparak iş parçasına yaklaştığı kaynak makinelerinde rahatlıkla kullanılabilen bir elektrottur. Bu elektrot mükemmel bir sıkıştırma ve iş parçası yüzeylerinde kaynak sonrası daha iyi bir görünüm sağlar. Soğuma hızları daha yüksek olduğundan alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılır.

Elektrotlardaki soğutma delikleri, yuvarlak yada dişlidir. Dişli delikler yuvarlak olanlardan daha fazla soğutma yüzeyi sunar. Soğutma delikleri, elektrot dayanımını tehlikeye sokmayacak şekilde, mümkün olduğunca elektrot yüzüne kadar uzamalıdır. Elektrot ucunun veya temas yüzeyinin çapı kaynak düğmesinin boyutunu kontrol eder. Ucu çapı çok küçükse, elde edilen kaynak sağlam görünebilmekle birlikte zayıf olabilir. Küçük çaplı uçlar ayrıca şiddeti yüksek ısı konsantrasyonu ve yüzey işaretlenmesine veya düzgün olmayan elektrot izine sebep olabilir. Büyük çaplı uca sahip elektrotlar özellikle yüksek kaynak akımında yetersiz elektrot basıncı yüzünden aşırı ısınabilir ve boşluklara veya zayıf yüzey görünümüne sebep olurlar [58,61,64,69].

#### 4.7.2. Kaynak Akımının Etkisi

Kaynak için ısı gerekir. Isının oluşmasında dirençten sonra etkili olan etmen ise akımdır. Isı formülünde gösterildiği üzere akımın karesi kadar bir çarpan

oluşturmaktadır. Bu nedenle istenen kriterlere uygun bir kaynak elde etmek için akım değerini iyi seçmek gerekir [58].

Kaynak akımı, transformatör sekonder sargısı, sargıyı kollara bağlayan esnek bantlar, kollar, elektrotlar ve iş parçasından oluşan sekonder devreden akar. Isı, devrenin her kısmında Eşitlik 4.4'deki formüle göre oluşmaktadır [65].

$$Q = K \cdot I^2 \cdot R \cdot t \quad (4.4.)$$

Burada;

Q : Üretilen ısı miktarı (joule),

K : Sabit bir sayı,

I : Kaynak akım şiddeti (Amper),

R : Devredeki elektrik dirençlerinin toplamı (Ohm),

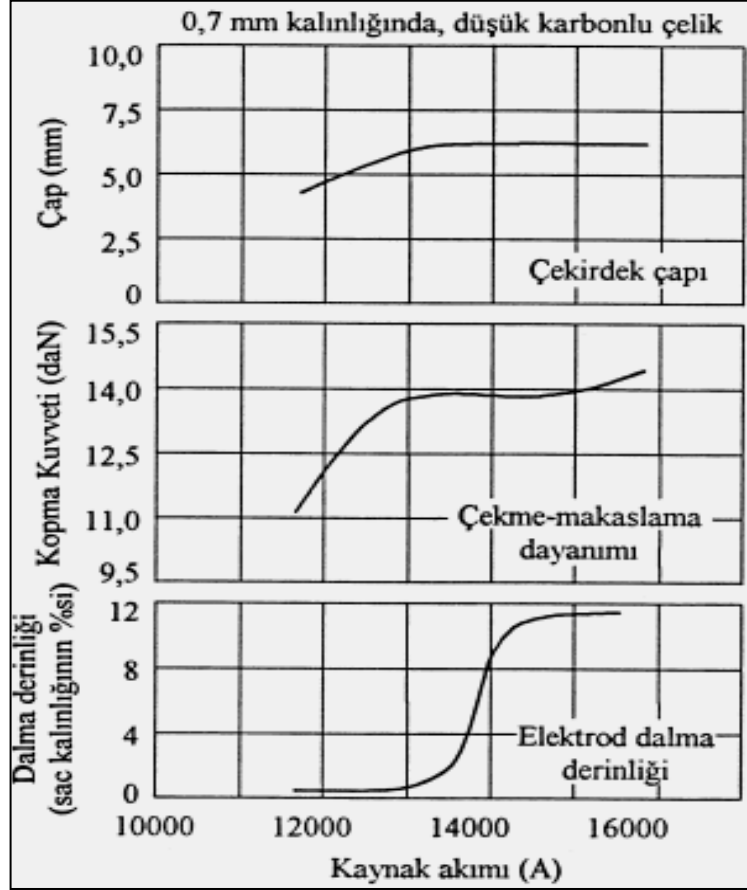
t : Kaynak akımının devrede kalma süresidir (saniye)

Isının bir bölümü elektrotlardan ve iş parçalarından iletim, taşınım ve ışıyım yoluyla kaybolur. Bu kayıpların büyüklüğü genelde bilinmemektedir.

Çeliğin ısı iletimi yaklaşık olarak bakırinkinin % 12'si kadardır. Bu yüzden, çeliğin bakır esaslı elektrotlarla kaynağında, yeterli kaynak akımı kullanıldığında, iş parçalarının ara yüzeyinde oluşan ısı, kaynak bölgesinden, elektrot uçlarında oluşan ısının su soğutmalı elektrotlara iletilmesine oranla, daha yavaş uzaklaşmaktadır. Böylece, önce iş parçalarının ara yüzeyi ergime sıcaklığına ulaşmakta ve kaynak bu ara yüzeyde oluşmaktadır [58].

Kaynak akımı, bağlantının çekme-makaslama dayanımı ve elektrot dalma derinliğinin çekirdek çapı üzerindeki etkisi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Akım 13500 A'nın üzerine çıktığında 6 mm'lik çekirdek çapında önemli bir artış olmamıştır, fakat elektrot dalma derinliğinde bir artış meydana gelmiştir. Optimum akıma ulaşılan kadar çekme-makaslama dayanımı hızlı bir şekilde artmakta, fakat akım 14000 A'nın biraz üzerine çıktığında dayanım biraz düşmektedir. Dalma derinliği, 13500 A'lık

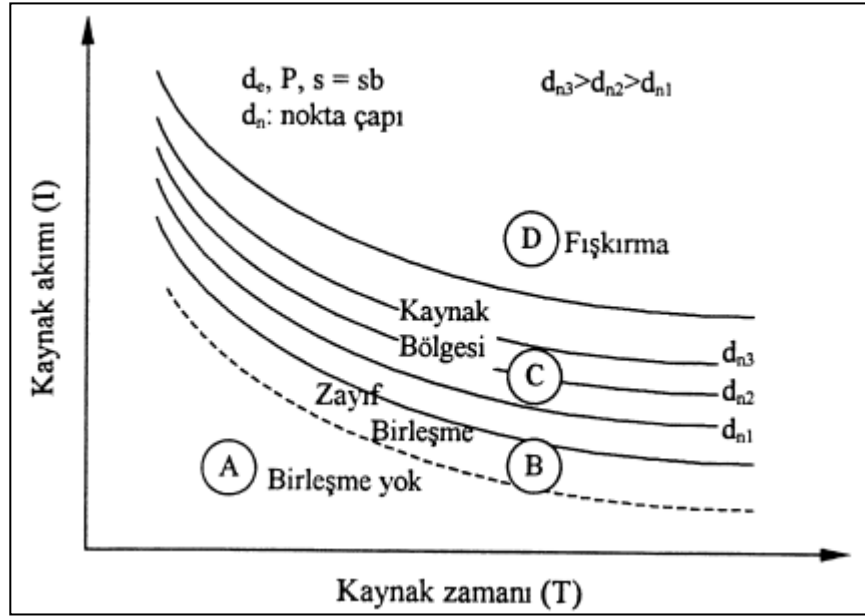
kaynak akımında sac kalınlığının % 2'sinden, 14000 A'nın biraz üstünde % 10 civarına kadar çıkmaktadır [58].



Şekil 4.11. Kaynak sırasında kaynak akımının çekirdek çapı, çekme-makaslama dayanımı ve elektrod dalma derinliği üzerindeki etkileri

Kaynak akımının ısı üretiminde önemli bir değişken olması, dikkatlice kontrolünü gerektirmektedir. Akım değişimlerine şebeke gerilimindeki değişimler ve kaynak makinesinin sekonder devresinde yapılan çeşitli değişiklikler neden olabilir. Diğer yandan, kaynak sırasında, kaynak bölgesindeki akım yoğunluğunda da azalma meydana gelebilir. Bu olay, akımın bir önceki kaynak noktasından ve elektrotların etki alanı dışındaki metalik temas noktalarından kısa devre olması sonucunda ortaya çıkar. Kısa devre nedeniyle nokta çapı yeterli bir değere erişemez. Ayrıca, kullanım sırasında, uç çapı çeşitli sebeplerden dolayı büyümüş elektrotlar, akım yoğunluğunda azalmaya neden olur [58,64].

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 4.12).



Şekil 4.12. Kaynak kabiliyeti diyagramı [58,69].

Bu diyagram dört bölgeye ayrılmaktadır. A bölgesinde herhangi bir ergime ve birleşme yoktur. B bölgesinde basınç kaynağı ile oluşan ve ergime olmadan zayıf bir birleşme meydana gelir. C bölgesi ergime veya kaynak bölgesidir. C ve B bölgesinin sınır eğrisinden itibaren ergime başlar ve ergimiş kaynak bölgesinin boyutları, bu bölge içine girdikçe artar. Sonuçta nokta çapı  $d_n$ , elektrod çapı  $d_e$ 'ye yaklaşık olarak eşit olur. C bölgesi malzemenin cinsine bağlıdır. Bazı metallerde bu bölge dar olduğundan kaynak akım ve zamanının hassas bir şekilde ayarlanması gerekir. Uygulamada, akım ve zaman değerleri C bölgesinin üst sınırına yakın kalacak şekilde seçilir. D bölgesi fışkıрма bölgesi olup, C bölgesinin üst sınırından itibaren fışkıрма başlar [58].

#### 4.7.3. Kaynak Zamanının Etkisi

Kaynak süresi çok kısa olursa kaynak tutmayabilir veya kaynak çekirdeğinin çapı çok küçük kalabilir. Kaynak süresi uzun olunca da ergimiş bölge fazla büyüyeceği

için baskı altında patlar, aradan malzeme fışkırır ve çok derin izler oluşur. Kaynak esnasında lokal bir bölgenin ergitilmesi söz konusu olduğundan, ergiyik civarında malzeme kristal yapısında önemli değişiklikler olur. Kaynak işleminden sonra elektrotlar hemen kaldırılırsa kaynak bölgesindeki ısı alınmadığı için geniş bir halka şeklinde etrafa yayılır ve elektrot temas yüzeyi siyah veya menevişli olabilir. Kaynaktan sonra elektrot bir süre bekletilirse (tutma zamanı), malzemedeki ısı, su ile soğur elektrotlar tarafından uzaklaştırılacağı için kaynak izi küçük ve beyaz olur.

Isı (enerji) formülü  $Q = K.I^2.R.t$  (4.4), toplam direnç sabit kalmak üzere, devrenin herhangi parçasında oluşan ısının hem kaynak süresi (akımın geçtiği süre) hem de kaynak akımının karesiyle doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Isı geçişinin zamanın fonksiyonu olmasından dolayı, uygun çekirdek çapının gelişmesi için gereken süre, akım ne kadar yükseltirse yükseltilsin, sınırlı ölçüde kısaltılabilir. Temas yüzeylerinde ısı oluşumu çok hızlı olduğunda, özellikle elektrot temas yüzeylerinde, oyuklar ve fışkırma meydana gelir [58].

Kaynak akımı ve basınç artırılarak kaynak süresinde biraz azalma sağlanabilir. Akımdaki yükselmeden dolayı oluşan fışkırmayı önlemek için yüksek basınç gereklidir. Kısa kaynak süresi ve yüksek akım şiddeti yada uzun kaynak süresi ve düşük akım şiddeti kullanarak, aynı nokta çapını elde etmek mümkündür. Bunlardan birincisi kısa süreli kaynak, ikincisi uzun süreli kaynak adını alır.

Getirdiği büyük faydalar yüzünden, kısa süreli kaynak tekniği çok gelişmiş olup büyük ölçüde kullanılmaktadır. Önceleri, çok ince levhalar için bile birkaç saniye olan kaynak süresi, kontrol organları ve akım devrelerindeki büyük gelişmelerden sonra birkaç periyoda kadar düşürülmüştür. Kaynak zamanı azaldıkça ısı kayıpları da azaldığından işlemin ısı verimi artmaktadır. Düşük karbonlu alaşımsız çeliklerin kaynağında, kısa süreli kaynak için gerekli kaynak süresi aşağıdaki bağıntıyla belirlenebilir [61]:

$$T = 8.s \quad (4.5.)$$



Bir önceki sayfadaki bağıntıda, T (periyot) kaynak süresi, s (mm) levha kalınlığıdır. 50 Hz frekanslı bir şebekede 1 periyot 1/50 saniyedir.

Kısa süreli kaynakta işlemin hızlı olması sebebiyle sadece kaynak bölgesi ergime sıcaklığına ulaşır ve levhaların dış yüzeyinde aşırı ısınma olmadan kaynak işlemi sona erer. Bu nedenle, elektrotların dokunma yüzeyleri bozulmaz. Uzun süreli kaynakta ise, levhaların diğer bölgelerinde sıcaklık önemli ölçüde artar. Bunun sonucunda, levhaların dış yüzeyleri yumuşar ve elektrotlar levha içine gömülerek derin izler bırakır.

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 karbon içeren çeliklerde sertleşmeyi önlemek için uzun süreli kaynak kullanılır. Diğer yandan, elektrotlar tarafından sıkıştırılması zor olan parçalar için de uzun süreli kaynak tercih edilir [58,61,69].

#### **4.7.4. Kaynak Kuvvetinin Etkisi**

Elektrotlar birbirine yaklaşır ve sıkıştırma sağlandıktan sonra kuvvetin statik hale gelmesiyle kaynak işlemi başlatılır. Kaynak için gerekli temas direnci genellikle kuvvetle ters orantılıdır. Baskı kuvveti arttırılınca, temas direnci düşer. Düşme eğilimi malzemeye göre değişir. Bu nedenle direnç çok küçülürse, gerekli ısı oluşmamaktadır. Kaynak türüne göre (hızlı, orta, yavaş) optimum kuvvet değeri uygulanır.

Çekirdek tamamen katı metalle çevrili olduğundan, hemen basıncın kalkacağı düşünülürse, o anda kaynakta boşluk ve çatlama tehlikesi oluşur. Bundan dolayı ergimiş malzeme üzerinde elektrotların basıncı soğuma sırasında devam ettirilir veya arttırılarak ısının çabuk dağılmasına ve aynı zamanda kaynağın dövülmesine imkan tanınır. Elektrot uç alanına en az 700 kg/cm basınç uygulanmalıdır, istenilenden fazla olması durumunda, elektrot ucu aşınması ve malzemenin ezilmesi istenilenden fazla olur [69].

Kaynak yapılması için, akımın iletilmesi gerekir ve malzemenin bir arada tutulması şarttır. Kaynak bölgesinde kalan malzemeyi tutmak elektrot baskısıyla olur. Kaynak kuvveti veya elektrot kuvveti, kaynak çevrimi boyunca elektrotlar tarafından iş parçalarına uygulanan kuvvettir. Nokta kaynağı yapılacak iş parçaları kaynak noktasında akımın geçişini sağlayacak şekilde sıkıca tutulmalıdır. Elektrot kuvvetinin arttırılması iş metalinin temas direncini azaltacağı ve böylece kaynak akımı tarafından iş parçalarının kaynak bölgesindeki yüzeyleri arasında açığa çıkan toplam ısıyı düşüreceği için, elektrot kuvveti çok yüksek olmamalıdır. Ayrıca, çok yüksek elektrot kuvveti, levhalarda istenmeyen distorsiyonlara neden olur.

Elektrot kuvveti, cihazın kapasitesi dahilindeki bir kaynak akım ile uyumlu olmalı ve tekrar oluşmasına yetecek kadar uzun kaynak zamanının kullanımına müsaade etmelidir. Ayrıca, iş parçaları kaynak alanında aşırı elektrot kuvvetine maruz kalmadan oldukça yakın temasta olmalıdır. İş parçaları, kaynak bölgesindeki temas çok yakın olmayacak şekilde deforme olmuşsa, deformasyonu yenebilmek için çok yüksek kuvvet gerekebilir. Özellikle pres parçaların, şekilli iş parçalarının veya iş metalinin kalın kesitlerinin nokta kaynağında, kaynak dayanımı ve kalitesindeki farklılıklar, iş parçalarını uygun bir şekilde bir araya getirmek için gereken elektrot kuvvetindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bu, özellikle ince taneli yapı çeliklerinin kaynağında geçerlidir. Bu malzemelerin yüksek dayanımından dolayı, oldukça yüksek geri yaylanmaya sahiptirler ve bu yüzden düşük karbonlu çeliğe oranla daha yüksek elektrot kuvveti gerektirirler [58].

Bazen, iş parçalarını bir arada tutabilmek için normalde kullanılan daha uzun bir sıkma süresi gerekmektedir. Ayrıca, geri yaylanma olasılığından dolayı, tutma süresi kaynak metalinin katılaşmasına imkan tanıyacak kadar uzun olmalıdır. Elektrot kuvvetindeki farklılıkların direnç ve ısınmada değişikliklere sebep olmasından dolayı, bu kuvvet kaynak kabiliyeti diyagramındaki eğrilerin boyut ve lokasyonunda ve akım seviyesinde değişikliklere neden olabilir. Artan elektrot kuvvetleri, eğrileri daha yüksek akım seviyelerine kaydırır. Eğrilerdeki bu atlama, bir elektrot kuvvetinde kabul edilebilir kaynak çekirdekleri sağlamış kaynak akımı ve kaynak süresi kombinasyonlarının, yeni elektrot kuvvetinde daha fazla kabul edilebilir kaynak çekirdekleri üretmeyebileceğini belirtmektedir. Bu yüzden, özellikle, akma

dayanımları 700 MPa'nın üzerindeki ince taneli yapı çeliklerinin bazıları gibi, kısmen kabul edilebilir kaynak akımı sınırına sahip alaşımlarda, elektrot kuvvetinde değişiklik yaparken dikkat edilmelidir.

Elektrot kuvveti, kaynak işleminin üç safhasında da önemli bir rol oynamaktadır. Basma safhasında, elektrot kuvveti, levhalar arasındaki temas direncinin uygun bir değerde, buna karşılık elektrot-levha temas direncinin düşük bir değerde olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, levhaların, elektrotlar altında belli bir alanda temas etmesini sağlayarak kaynak noktasının kesin yerini belirlemektedir. Elektrot kuvveti, kaynak safhasında, levhalar arasından fışkırmaya çalışan sıvı metali katı haldeki metal çukuru içinde basınç altında tutarak, bu fışkırmayı engellemektedir. Dövme safhasında ise, kaynak dikişinin sıvı halden itibaren soğuması ve katılaşması sırasında, büzülme nedeniyle ortaya çıkabilecek boşluk, çatlak gibi kusurların oluşumunu dövme kuvveti yoluyla önlemektedir [58,61].

#### **4.7.5. Esas Metalin Kimyasal Bileşimi**

Metallerin bileşimi, onların özgül ısılarını, ergime sıcaklıklarını, gizli ergime ısılarını, ısı ve elektrik iletkenliklerini ve yoğunluklarını etkiler. Gümüş ve bakır gibi yüksek iletkenliğe sahip metallerde yüksek akım yoğunluğunda dahi çok az ısı meydana gelir. Bu metallerin ısı iletkenliği de yüksek olduğundan, az miktarda ısı, hızla iş parçasına ve elektrotlara doğru iletilir. Metallerin bileşimi; özgül ısı, ergime noktası, gizli ergime ısı ve yoğunluk gibi özellikleri etkiler [63].

Metalin bileşimindeki diğer maddelerin de kaynak kabiliyetine etkisi vardır. Fosfor ve kükürt genellikle çekirdek ara yüzeyinde yırtılmayı iletici rol oynamaktadır. Titanyum içeriğini arttırmak çoğunlukla çekirdek çapını, çekme-makaslama dayanımını ve kaynak akım sınırını düşürmektedir. Azot, ara yüzeysel hasar iletici rol oynamaktadır. Yüksek oksijen seviyeleri, ara yüzeysel hasara neden olmaktadır. Bunların dışında, yüzey yağlarından yayılan hidrojen de kaynak metali hasarına yardımcı olmaktadır [58,64].

#### **4.7.6. Kaynak Edilecek Parçaların Yüzeylerinin Etkisi**

Yüksek kalitede nokta kaynakları elde etmek için, elektrotlarla temas eden iş parçası yüzeyindeki direnç minimumda tutulmalıdır. Bu düzgün ve temiz iş metali yüzeylerine sahip olarak ve elektrot kuvveti kontrol edilerek yapılabilir. Elektrotlarla temas halindeki iş parçası yüzeyleri çok yüksek temas direncine sahipse, bu yüzeylerdeki sıcaklık artışı kaynak bölgesindeki yüzeylerdeki kadar hızlıdır. Ayrıca, temas direncindeki değişimler ve buna bağlı olarak kaynak akımının oluşması için geçen süredeki değişimlerden dolayı tutarsız sonuçlar elde edilebilir.

Metal levhaların yüzeyleri mikro ölçekte düzgün değildir ve düşük elektrot basınçları kullanıldığında, gerçek metal-metale temas bölgesi tüm temas bölgesinin sadece küçük bir yüzdesi olabilir. Elektrot kuvveti arttırıldıkça, yüksek noktalar bastırılarak gerçek metal-metale temas bölgesi artar ve böylece elektrik direnci düşer. Artan elektrot kuvveti iş parçalarının arayüzeyindeki direnci düşürür. Elektrot malzemesinin iş metalinden daha yumuşak olduğu durumlarda, belli bir elektrot kuvvetinin uygulanması elektrotlar ve iş parçaları arasındaki temas yüzeylerinde, iki iş parçasının ara yüzeyine oranla daha iyi bir temas sağlar.

Elektrot kuvveti, ısı formülünde direkt olarak yer almamasına rağmen elektrik direnci üzerindeki etkisi kaynak akımı üzerinde direkt olarak etkilidir. Yüzey direnci elektrot kuvvetiyle ters orantılıdır.

##### **4.7.6.1. Yüzey Hazırlama**

Çeliğin nokta kaynağı için önerilen parametre değerleri iş metalinin hadde cürufu, oksit, boya ve yağdan arınmış olması durumunda geçerlidir. Kaynak yapılacak iş metali ya da en azından kaynak bölgesindeki yüzeyler kaynakların inklüzyonsuz olmasını sağlayacak şekilde temizlenmelidir. Kaynakların iyi yüzey görünümüne sahip olmalarını sağlamak için elektrotla temas edebilecek kir, cüruf, pas ve oksit filmi temizlenmeli yada azaltılmalıdır. İş parçası yüzeylerinden yabancı maddelerin temizlenmesi elektrot alaşımlaşmasını azaltır ve bunun neticesinde elektrot ömrünü arttırır. İş parçalarının yüzeylerinden kir yada yağ tabakası buharlı yağ gidericiler ve

kimyasal banyolar ile temizlenebilir; yine de, nokta kaynağı yapılacak yüzeylerin dikkatlice elle temizlenmesi de yeterli olabilir. Oksit tabakaları mekanik yöntemlerle temizlenebilir. İşlem, tabakayı kesecek kadar fakat bozuk yada çizilmiş bir yüzey oluşumuna neden olmayacak kadar şiddetli olmalıdır. Kum, kumtaşı veya bilye gibi aşındırıcı partiküller püskürtülerek temizleme yöntemleri genellikle tatmin edici değildir çünkü yüzeyde kum veya cüruf parçacıkları kalabilir. Ufak taneli, ince çelik tozu bazı uygulamalarda tatmin edicidir.

#### **4.7.6.2. Yağ Kaplamalarının Etkisi**

Yüzeydeki ince yağ kaplamalarının, nokta kaynaklarının kalitesinde az miktarda etkisi vardır. Fazla miktardaki yağ silinmeli veya yağ giderici ile temizlenmelidir.

#### **4.7.6.3. Pas, Hadde Cürufu veya Oksidin Etkisi**

Düşük ve düzgün elektrik direncine sahip ince filmler kaynakta en az etkiye sahiptir. Fazla miktarda cüruf veya oksit kaplamalarına sahip metal kaynak edildiğinde kaynak bölgesindeki yüzeyde bulunanların çoğu yada hepsi, akım, yüzey dirençleri veya elektrot basıncı ne olursa olsun, kaynakların içinde kalır. Kaynak metalindeki bu inklüzyonlar, bazen belirlenmesi zor olan boşluklar veya diğer iç kusurlara neden olabilir [58,61,64].

Nokta direnç kaynağının sonrasında istenmeyen yüzey durumları ortaya çıkabilmektedir. Bu yüzey durumları, derin elektrot izi, yüzeyin erimesi, çatlaklar vb. şekillerde olabilmektedir. İstenmeyen yüzey koşulları, bunların neden ve sonuçları Çizelge 4.3'te belirtilmiştir [58].

Çizelge 4.3. Direnç nokta kaynağı için istenmeyen yüzey koşulları [58].

Yüzey Koşulu Tipi	Sebeup	Sonuç
<b>Derin elektrod izi</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Uygun seçilmemiş elektrod yüzeyi</li> <li>2. Elektrod kuvvetinin kontrol edilememesi</li> <li>3. Yüksek temas direnci (düşük elektrod kuvveti) nedeniyle çok hızlı ısı üretimi</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kaynak alanı çevresindeki metal kalınlığının azalması nedeniyle kaynak mukavemetinin düşmesi</li> <li>2. Kötü görünüş</li> </ol>
<b>Yüzey ergimesi</b> (genellikle derin elektrod izi ile birlikte)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Curuflu veya kirli yüzey</li> <li>2. Düşük elektrod kuvveti</li> <li>3. Parçaların kaymış olması</li> <li>4. Yüksek kaynak akımı</li> <li>5. Elektrodların düzgün şekilli olmaması</li> <li>6. Basınç ve akım sırasının uygun olmaması</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ergimiş metalin fışkırması nedeniyle çekirdek boyutlarının küçülmesi</li> <li>2. Kaynak bölgesinde büyük boşluklar</li> <li>3. Parçanın dış yüzeyinden yanıkların temizlenmesi nedeniyle maliyet artması</li> <li>4. Elektrodların sık sık düzeltilmesi nedeniyle üretim zamanının harcanması</li> </ol>
<b>Kötü şekilli kaynak</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Parçaların ayarsızlığı</li> <li>2. Elektrodların aşırı aşınmış olması veya düzgün olmayan elektrod formu, elektrodların kayması</li> <li>3. Elektrodların yüzey temizliğinin kötü olması</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ara temas yüzeyinin değişmesi nedeniyle kaynak mukavemetinin düşmesi</li> <li>2. Ergimiş metalin fışkırması</li> </ol>
<b>Parça üzerinde elektrod kopması</b> (genellikle yüzey ergimesi ile birlikte)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Curuflu veya kirli olması</li> <li>2. Düşük elektrod kuvveti veya yüksek kaynak akımı,</li> <li>3. Elektrod temas yüzeylerinin bakımının yetersiz olması</li> <li>4. Elektrod kuvveti ve kaynak akımının sırasının bozuk olması</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kötü görünüş</li> <li>2. Korozyon direncinin düşmesi</li> <li>3. Ergimiş metal fışkırması varsa, kaynak mukavemetinin düşmesi</li> <li>4. Elektrod ömrünün kısalması</li> </ol>
<b>Çatlaklar, derin boşluklar veya küçük delikler</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kaynak çekirdeği katılaşmadan önce elektrod kuvvetinin kaldırılması</li> <li>2. Ergimiş metalin fışkırmasına neden olacak şekilde aşırı ısı üretimi</li> <li>3. Parça yüzeylerinin birbirine yaklaşmaması ve dolayısıyla elektrod kuvvetinin arttırılması</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Çatlak veya süreksizliğinin kaynak alanının dışına uzaması sonucu veya gerilme altında yorulma dayanımının düşmesi</li> <li>2. Çatlak veya boşluklarda korozif maddelerin birikmesi nedeniyle korozyonun artması</li> </ol>

#### 4.7.7. Esas Metalin Gördüğü Isıl ve Mekanik İşlemler

Bir malzemenin mukavemetini arttırmanın bir yöntemi soğuk haddelenedir. Genellikle soğuk haddelenmiş malzeme sünek değildir. Normalde, sünekliği

sağlamak için tavlayıcı ısıtma işlemleri uygulanmaktadır, ancak bu aynı zamanda dayanımını düşürmektedir. Soğuk işlenmiş yapının yeniden kristalleşmeyi tamamlamadan toparlanması için tasarlanan ısıtma işleme toparlanma tavlama adı verilmektedir. Bu işlem, oldukça yüksek dayanım seviyeleri sağlamakla birlikte bir miktar süneklik kazandırmaktadır [58].

#### **4.7.8. Kaynaklı Noktalar Arasındaki Mesafenin Etkisi**

İkinci nokta kaynağı, kaynak akımının birinci kaynaktan yada ikinci kaynak noktasında elektrotlar arasındaki metalden akmasına neden olacak kadar, birinciye yakın yapılırsa şönt akımı (atlama) meydana gelir. Kaynak akımı iki yolun direnciyle ters orantılı olarak akar. Akım bölünmesi, ikinci kaynak noktasında, esas metal direncinin ara yüzey direncine oranına bağlıdır.

İkinci ve bunu takip eden kaynaklar yapıldığında, elektrotlar arasındaki metal bölünmüş devre olur; akımın bir bölümü metalden bir önceki kaynağa doğru hareket ederken, kalanı ikinci kaynak noktasındaki elektrot uçları arasındaki metalden akar. İlk nokta kaynağına olan mesafe yeterince büyükse, metalden direkt olarak akanla karşılaştırıldığında ilk nokta kaynağı boyunca olan yolun direnci yüksektir ve şöntlenme etkisi ihmal edilebilir. İlk nokta kaynağına olan mesafe kısa ise akımın önemli bir kısmı ilk nokta kaynağına atlar. Bu atlama (kısa devre) nedeniyle, nokta çapı yeterli bir değere erişmez. Bunu önlemek için,  $d_n$  nokta çapı olmak üzere, nokta merkezleri arasındaki uzaklık  $3d_n$ 'den büyük olmalıdır.

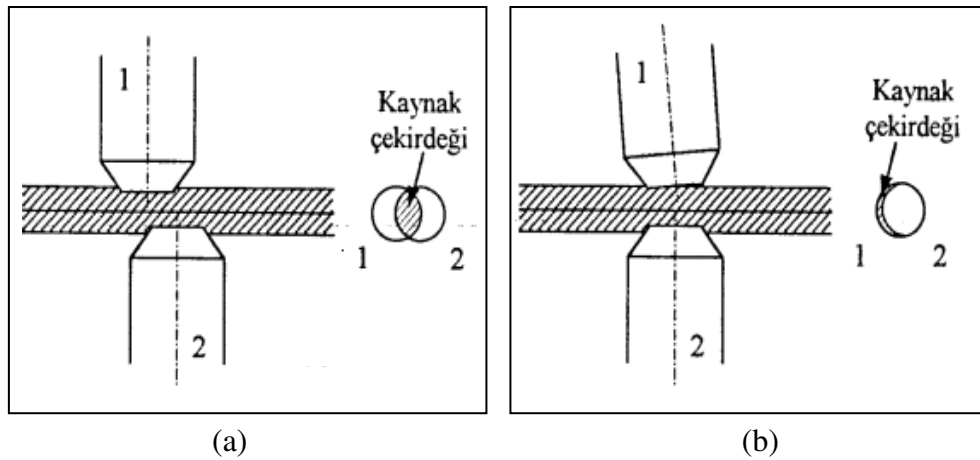
Elektrot uçları arasındaki metalin sıcaklığı artınca o noktadaki direnç artar ve böylece şöntlenme etkisine eklenir. Yüksek elektrik direncine sahip metaller düşük dirençli metallere oranla şöntlenme etkisinden daha az etkilenirler [58].

Düşük karbonlu çelik parçaların kaynağında minimum aralık, metalin kalınlığı, ergimiş bölgenin çapı ve kaynak bölgesindeki yüzeylerin temizliğine bağlıdır. Daha yüksek akım ve elektrot kuvveti, daha kısa kaynak süresi ve hızlı takip ile kaynaklar, önemli bir atlama olmadan, çeşitli çizelgelerde tavsiye edilen kaynak aralığından daha düşük bir değerde yapılabilir [61,64,69].

Kaynaklar levhanın kenarına yada flanşa çok yakın yapılırsa, elektrot basıncı ve ısıya dayanabilecek esas metal hacmi yetersiz kalır. Bu, kaynaktan sıcak metalin uzaklaştırılmasına sebep olacak şekilde, kenar boyunca etkili kuvvette düşüşe ve eşit olmayan ısınmayla sonuçlanır. Nokta kaynakları dikey flanşa veya yan duvara çok yakın yapıldığında, elektrot ve iş parçası arasında arklanma meydana gelebilir yada kıvrılma açısından dolayı kaynak bölgesindeki yüzeylerde zayıf bir oturma meydana gelebilir [58].

#### 4.7.9. Elektrot ve İş Parçasının Temas Durumları

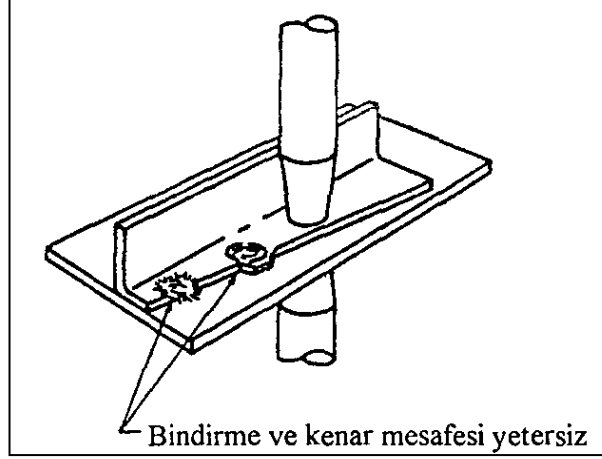
Kaynak kalitesi ve kabiliyetini etkileyen bir diğer faktör elektrotların ve iş metalinin birbiriyle temas etme durumudur. Elektrotlar, iş metalinde kaynağın yapılacağı bölgeye dik, dolayısıyla birbirine paralel olmalıdır. Ancak iyi bir kaynak için bu koşul yeterli değildir. Birbirine paralel olan alt ve üst elektrotun aynı ekseninde olması gerekmektedir. Birbirine paralel ancak aynı ekseninden geçmeyen alt ve üst elektrotlarla yapılan kasnaklarda tek bir dairesel bölge yerine iki dairenin kesişim bölgesi şeklinde gölgeli bir alan gözlenmektedir. Bunun sebebi, kaynağın, basıncın etkin olduğu bölgede gerçekleşmesidir. Şekil 4.13.(a)'da görülen kaynak bölgesi, gerekli alanın yaklaşık olarak üçte biri olup gerekli basıncın üç katına çıkmasına sebep olmaktadır. Şekil 4.14.(b)'de ise birbirine paralel olmayan iki ucun meydana getirdiği kaynak görülmektedir.



Şekil 4.13. Elektrotların temas durumuna göre oluşan kaynak çekirdekleri; a) aynı ekseninde olmayan, b) paralel olmayan elektrotlar



Bir önceki sayfada belirtilen durumların yanı sıra bindirme ve kenar mesafelerinin de kaynak kalitesinde önemi vardır. İyi bir kaynak elde edebilmek için nokta kaynağının kenara uzaklığı en az çekirdek çapının yarısı kadar olmalıdır. Şekil 4.14’de yetersiz bindirme ve kenar mesafesi sonucu oluşan kaynak hataları görülmektedir [68].



Şekil 4.14. Yetersiz bindirme ve kenar mesafesi sonucu oluşan hatalar [69].

#### 4.8. ISI KAYBI

Kaynak işleminde ısı kaybı, akımın uygulandığı andan, kaynağın oda sıcaklığına soğumasına kadar geçen zaman aralığında değişen hızlarla devam eder. Isı kaybı 2 aşamada irdelenmelidir:

- 1- Akımın uygulama zamanı sırasındaki ısı kaybı
- 2- Akımın kesilmesinden sonraki ısı kaybı

Birinci safhadaki ısı kaybının derecesi aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- 1- Metalin bileşimi
- 2- Parçaların kütlesi
- 3- Kaynak süresi
- 4- Dış soğutma aracı

Bunlardan iş parçasının bileşimi ve kütlesi kontrol edilemez. Verilen bir akım şiddeti için, üretilen ısı, elektrik iletkenliği ile ters orantılıdır. Isıl iletkenlik, bu ısının kaynak bölgesinden kayıp veya iletilme hızını tayin eder. Bu iki faktör metallerde aynı yönde paralel olarak gider. Örneğin, bakır gibi yüksek iletken bir metalde üretilen düşük miktardaki ısı yüksek bir hızla çevre metale ve elektrotlara doğru kaybolur. Eğer elektrotlar, akım kesildikten sonra iş parçaları ile temasta kalırsa, elektrot malzemesinin yüksek ısı iletimi sebebiyle, kaynak bölgesi hızla soğur.

Elektrotları etkili bir biçimde su ile soğutulması ısı kaybını hızlandırır. Kaynak bölgesinden iş parçalarına doğru soğuma hızı, uzun kaynak zamanı kullanılarak azaltılabilir. Bu usul, çevre metale daha fazla ısı iletimine izin verir ve çevre metalin sıcaklığını artırarak kaynak bölgesi ile çevre metal arasındaki sıcaklık farkını azaltır. Sıcaklık farkı soğuma hızlarını kontrol etmede çok önemlidir. Genellikle uzun kaynak zamanının kullanıldığı kalın levhalarda soğuma hızı düşük, kısa kaynak zamanının kullanıldığı ince levhalarda soğuma hızı büyüktür.

Elektrotlar kaynak yerinden hemen kaldırılacak olursa, ısı, kaynak bölgesini saran metale ve atmosfere geçecektir. Bu durumda soğuma hızı bir miktar azalır, ince parçalar göz önüne alındığında, distorsiyon sebebiyle bu yöntem sakıncalı olabilir. Kalın parçalarda, mukavemet nedeniyle, daha büyük olan kaynak bölgesinin, ergimiş halden itibaren soğumasına imkan vermek için ilave zaman gereklidir. Bu sebeple, ısının büyük bir kısmının çevre metale iletilmesine müsaade etmeksizin, elektrotları, kaynağın soğumasına imkan verecek kadar yeterli bir zaman yerinde tutmak uygundur.

Kaynağı her zaman soğutmak uygun değildir. Su almaya karşı hassas malzemeler ele alındığında, elektrotları kaynak akımının kesilmesini takiben mümkün olduğu kadar çabuk kaldırmak gerekir. böylece ısının çevre metale yayılması mümkün olur ve dik soğuma gradyanı oluşmaz [63].

## BÖLÜM 5

### ÖNCE DEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

#### 5.1. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI YÖNTEMİ ÇALIŞMALARI

Marashi et al. [70], 1,1 mm kalınlığında düşük karbonlu galvanizli çelik ile 1,2 mm kalınlığında östenitik paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş, mikrosertlik ve optik mikroskop incelemeleri yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, düşük kaynak akımlarında nokta direnç kaynak yapımının, düşük ergime bölgesi sertliği, küçük ergime bölgesi boyutu ve ara yüzey boyunca düşük çekme-makaslama mukavemetine sebep olduğunu, yüksek kaynak akımlarında nokta direnç kaynak yapımının, daha geniş ergime bölgesi, martenzit oluşumundan dolayı ergime bölgesinin daha yüksek sertliği ve ara yüzey boyunca düşük çekme-makaslama mukavemetine sebep olduğunu bildirmişlerdir.

Fukumoto et al. [71], 200 µm kalınlığında, 25 mm uzunluğunda ve 8 mm genişliğinde çeşitli östenitik paslanmaz çelik levhaları, (302, 304, 310S, 316L ve 347) nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş, kaynak akımı ve kaynak zamanının, çekirdek boyutu ve bağlantı mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Birleştirilen parçalarda çekme-makaslama, optik mikroskop, SEM ve EBSP incelemesi yapmışlardır. Kaynak bölgelerinin mikro yapıları, hızlı soğuma oranı dolayısıyla neredeyse tamamı östenitik olduğu, tamamen östenitik mikro yapıya rağmen, nokta direnç kaynağı ile birleştirilen 302, 304, 316L, 310S ve 347 tipi östenitik paslanmaz çeliklerde, sıcak çatlama görülmediği bildirilmiştir. Nokta direnç kaynağında hızlı soğuma oranı ile oluşan mikro yapılar, geleneksel Schaeffler diyagramıyla zor tahmin edilir. Çekme-makaslama testi sonucunda, 304 paslanmaz çeliğin nokta direnç kaynağında, kaynak akımı artışıyla çekirdek gelişmesinden dolayı makaslama gücü arttığı, kaynak çekirdeğinde çok az delta ferrite rağmen sıcak çatlak ve ITAB'da herhangi bir koşul altında hassaslık gözlenmediği rapor edilmiştir.

Martin et al. [72], 0,8 mm kalınlığında 304 östenitik paslanmaz çelik sacları, 1,5 - 6,5 kA (0,5 kA artışla) kaynak akımlarında, 1000 ve 1500 N elektrod güçleri kullanılarak nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Östenitik paslanmaz çeliğin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde çekme-makaslama kapasitesinin tahmini için, kaynak parametrelerinden (kaynak zamanı, kaynak akımı ve elektrod gücü) oluşan bir yapay sinirsel iletişim ağı (ANN) tasarlanmış ve kalite seviyeleri ultrasonik tahribatsız test tarafından kontrol edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kaynak zamanı ve kaynak akımı artışı ile ısı girdisi ve kaynak çekirdeği artmıştır. Bu sebepten dolayı kaynak zamanı ve kaynak akımı artışıyla başlangıçta tahmin edilebilir çekme-makaslama mukavemeti artmış, fakat kaynak zamanı ve kaynak akımını değerlerinin aşırı artışı, sıralı TSLBC artması ve akmaya neden olduğu bildirilmiştir. Kaynak çekirdeğinin sertlik değeri, tutma zamanı boyunca elektrod gücünün sebep olduğu deformasyon sertleşmesinden dolayı esas metal ve ITAB'a eşit veya daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Özyürek [73], 1 mm kalınlıklı ve 100x30 mm boyutlu 304L östenitik paslanmaz çelik sacları, 4, 7 ve 9 kA kaynak akımlarında, 8 Atm elektrod gücünde, atmosfer ve nitrojen atmosferde nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynaklı numuneler, optik mikroskop, mikrosertlik ve çekme-makaslama testleri ile incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, en yüksek bağlantı mukavemeti, 9 kA kaynak akımında nitrojen atmosferde elde edildiği, kaynak akımı ile artan ısı girdisinden dolayı çekirdek boyutunun büyümesinden, kaynaklı numunelerin çekme-makaslama mukavemetinin artışına sebep olduğu bildirildi. Kaynaklı malzemelerin çekme-makaslama mukavemetinin 7 ve 9 kA kaynak akımları için nitrojen atmosferinde, normal atmosferden daha yüksek bulunduğu tespit edilmiştir. Kaynakların çekme-makaslama mukavemeti zayıflığının başlıca nedeni, ITAB bölgesinde aşırı tane büyümesi olarak tanımlandığı, kaynak akımı ile ısı girdisi artışı, ITAB'ın ve kaynak çekirdeğinin mikro yapısının iri taneli olmasına sebep olduğu bildirildi. Kaynaklar atmosferde soğutulduğu zaman, kaynak çekirdeği merkezinde boşluk gözlendiği, nokta direnç kaynağında bu iç kayıplara düşük elektrod gücünün sebep olduğu rapor edilmiştir.

Sun et al. [74], 1,2 mm kalınlığında ve 100x25 mm boyutlarındaki Mg alaşımlı sacları, 15 ve 23 kA kaynak akımlarında, 8 çevrim kaynak zamanında ve 2,5 kN elektrod gücünde nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynaklı numunelerde çekme-makaslama, optik mikroskop ve SEM inceleme çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalarda, kaynak akımı 15 kA'den 23 kA'e arttırıldığında, birleştirme çekme-makaslama mukavemetinin 1460 N'dan 3000 N'a yükseldiği ve çekirdek çapının 4,2 mm'den 6,5 mm'ye arttığı tespit edilmiştir. Birleştirme gücünün artışı, büyük oranda çekirdek çapı artışıyla ilgili olduğu ve magnezyum alaşımın nokta direnç kaynaklı birleştirmesinde mekanik özelliklerin gelişimi için kaynak akımının yüksek seçilmesinin faydalı olacağı rapor edilmiştir.

Hasanbaşıoğlu and Kaçar [75], 2 mm kalınlığında ve 100x30 mm boyutlarında 7114 tip IF çeliği ve 316L tip östenitik paslanmaz çelik sacları, 4, 7 ve 9 kA kaynak akımlarında nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Birleştirmelerde farklı ısıl iletkenlikten dolayı, elektrod çapı östenitik paslanmaz çelik yüzeyde 8 mm, IF çeliğinde ise 9 mm olarak kullanılmıştır ve kaynaklı birleştirmeler çekme-makaslama, mikrosertlik ve optik mikroskop çalışmaları ile incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, 7 kA kaynak akımında kabul edilebilir çekme-makaslama mukavemeti olmasına rağmen, optimum kaynak kalitesi 9 kA kaynak akımı, 17 çevrim kaynak süresi ve 6 bar elektrod gücünde elde edilmiştir. Birleştirmenin çekme-makaslama mukavemetinin zayıflamasının sebebi, 7114 tipi IF çeliği ITAB'ında aşırı tane büyümesinden dolayı oluşan çatlak olarak tespit edilmiştir. Birleştirilen metallerin kimyasal bileşiminden dolayı bütün kaynak akımlarında, (4, 7 ve 9 kA) kaynağın iki kenarında sertlik değerlerinde herhangi bir dalgalanma gözlenmediği rapor edilmiştir.

Vural and Akkuş [76], 1,03 mm kalınlıklı galvanizli çelik ve 0,93 mm kalınlıklı östenitik paslanmaz çelik sacları, 5,5 - 13 kA (0,5 kA artışla) kaynak akımlarında ve 3400 N elektrod gücünde nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynaklı numuneler mikrosertlik, çekme-makaslama ve yorulma testleri ile incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kaynak akımı arttırıldığında kritik akım değerine kadar kaynak çekirdeği çapı arttığı, kaynak çekirdeği çapı arttıkça çekme-makaslama mukavemetinin arttığı, fakat kritik akım değeri geçildikten sonra, ara yüzeyde aşırı

metal ergimesi ve sıçramasından dolayı, kaynak çekirdeği çapı azaldığı tespit edilmiştir. Malzemeler farklı özelliklere sahip olduğundan kaynak çekirdeğinde ısı dengesizliği görülmüş ve paslanmaz çelik saclar daha yüksek elektrik direncine sahip olduğundan kaynak çekirdeği çapının daha büyük olduğu ve galvanizli çelik saclarda çinko tabakanın, asimetrik kaynak çekirdeği oluşumuna neden olduğu, elde edilen simetrik kaynak çekirdeğinin kaynak akımı artışından olabileceği bildirilmiştir. Mikrosertlik ölçümlerinde, en büyük sertlik değerleri kaynak külçesinin ortasında (350 HV) tespit edilmiştir.

Aslanlar et al. [77], 1,2 mm kalınlıklı galvanizli kromatlı (mikro alaşımlı) çelik saclar, 4 - 12 kA (1 kA artışla) kaynak akımlarında, 5, 10, 12 ve 15 çevrim kaynak zamanlarında ve 6 kN sabit elektrod gücünde, nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve kaynaklı numuneler çekme-makaslama ve çekme-sıyırma testleri uygulanarak incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda, en yüksek çekme-makaslama mukavemetinin 10 kA kaynak akımında ve 15 çevrim kaynak zamanında elde edildiği bildirilmiştir. Kaynaklı sacların yüzey kalitesi elektrodun malzemeye çentik derinliği sac kalınlığının % 8-20'si geçmeyecek şekilde kabul edildiğinde, 10 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak zamanı veya 9 kA kaynak akımı ve 12 çevrim kaynak zamanı yeterli olacağı rapor edilmiştir. Kaynaklı sacların çekme-sıyırma testlerinde en yüksek değer 11 kA kaynak akımında ve 10 çevrim kaynak zamanında elde edildiği rapor edilmiştir.

Aslanlar et al. [78], 1,2 mm kalınlıklı galvanizli kromatlı (mikro alaşımlı) çelik sacları, 5, 10 ve 12 kA kaynak akımlarında, 5, 10 ve 15 çevrim kaynak zamanlarında ve 6 kN sabit elektrod gücünde nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve kaynaklı numuneler çekme-makaslama ve çekme-sıyırma testleri uygulanarak incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda, en yüksek çekme-makaslama mukavemetinin 10 kA kaynak akımı ve 15 çevrim kaynak zamanında elde edildiği bildirilmiştir. 12 kA kaynak akımı ve 15 çevrim kaynak zamanında elektrodun malzemeye çentik derinliğinin sac kalınlığının yaklaşık % 15'i olduğunu ve kaynaklı sacların yüzey kalitesi elektrodun malzemeye çentik derinliği sac kalınlığının % 8-20'si geçmeyecek şekilde kabul edildiğinde 10 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak zamanında elde edildiği rapor edilmiştir.

Hasanbaşıoğlu ve arkadaşları [79], 2 mm kalınlıklı ve 100x30 mm boyutlarında AISI 304 tip östenitik paslanmaz çelik ile 7114 tip IF (arayer atomsuz) çelik sacları, 4, 7 ve 9 kA kaynak akımlarında, 18 çevrim kaynak zamanında ve 6 bar sabit elektrod gücünde nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde ısı girdisine başlıca etkisi olan kaynak parametrelerinden, akım şiddetinin, mikroyapı, mikrosertlik ve çekme-makaslama gücüne etkisini incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda, en yüksek dayanım 9 kA kaynak akımında, 18 çevrim kaynak süresinde ve 6 bar elektrod gücünde elde edildiği, bağlantıların en zayıf yerinin sebebi olarak IF 7114 tip çeliğin ITAB'ındaki aşırı tane büyümesi olduğunu rapor etmişlerdir.

Anık ve Gülbahar [80], 1,5 mm kalınlığında ve 100x30 mm boyutlarındaki ferritik paslanmaz çelik sacları, 5 kN elektrod gücü, 5, 15, 25 ve 50 periyot kaynak zamanları ve 5,5 - 14,5 kA (1 kA artışla) kaynak akımlarında nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynaklı numuneler optik mikroskop, çekme-makaslama ve kaynak çekirdek çapları ölçülerek incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, bütün kaynak zamanlarında akım şiddeti arttıkça kaynak çekirdek çapı arttığı ve yassılaştığı, yassılaşıma arttıkça çekme-makaslama mukavemetinin arttığını bildirilmiştir. Fakat belirli bir yassılaşımadan sonra nufuziyetin azaldığı ve çekme-makaslama mukavemetinin düştüğü, en yüksek çekme-makaslama mukavemetinin 5 kN elektrod gücü, 25 çevrim kaynak zamanı ve 7,5 ve 10,5 kA kaynak akımlarında elde edildiği bildirilmiştir.

## **5.2. TİTANYUM MALZEME ÇALIŞMALARI**

Atasoy [81], Atasoy and Kahraman [82], 40x10x1,5 mm boyutlarında ticari saf (Grade 2) titanyum ve düşük karbonlu (% 0,01 C) çelik sacları, gümüş (A 1306) ara bağlayıcı kullanarak; 3 MPa basınç, 700, 750, 800 ve 850 °C sıcaklıklarda ve 30, 60, 90 ve 120 dk bekleme sürelerinde difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Kaynaklı numuneler, çekme-makaslama, mikroyapı, mikrosertlik, SEM ve EDS çalışmalarıyla incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, en yüksek ara yüzey mukavemetinin 850 °C sıcaklık ve 90 dk bekleme süresi ile birleştirilen numunelerde elde edildiği, mukavemetin artan sıcaklık ile sürekli arttığı bildirilmiştir. Fakat artan süre ile birlikte bir noktaya kadar arttığı, ancak bu noktadan sonra mukavemetin

azaldığı, yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerinin ara bağlayıcı malzemede olduğu ve ara bağlayıcının her iki tarafındaki sertlik değerlerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir. EDS analiz çalışmalarında, sıcaklığın artışına bağlı olarak, ara bağlayıcıdaki gümüş miktarının % ağırlık olarak belirgin şekilde azaldığı, ancak difüzyon sürenin artışına bağlı olarak, çok az miktarda azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kaynak ara yüzeyinden uzaklaştıkça yayılım miktarının giderek azaldığı rapor edilmiştir.

Gülenç [83], yaptığı bir çalışmada titanyum malzemeleri düşük karbonlu çelik malzemelere ara bağlayıcı gümüş levha kullanarak 700 °C sıcaklıkta birleştirmiş ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Mekanik incelemeler sonucunda kaynak süresinin artmasıyla çekme-makaslama mukavemetinin arttığı ve hem kaynaklı numunelerde hem de kaynak ara yüzeyinde sertliğin düştüğü tespit edilmiştir. Optik mikroskop görüntülerine göre bekleme süresinin artmasıyla ara bağlayıcı folyo kalınlığının azaldığını rapor etmiştir.

Doğan [4], 3 mm kalınlığında ve 110x210 mm boyutlarında titanyum (Kalite 265-2) sacları, 80, 90 ve 100 A kaynak akımında, ilave malzeme olarak AWS ERTİ-1 standardında 1,6 mm çapında ve 1000 mm boyunda saf titanyum kullanılarak TIG kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Kaynaklı numuneler, çekme-makaslama, eğme, mikrosertlik ve optik mikroskop çalışmalarıyla incelenmiştir. Çekme deneyi sonucunda, kopma ve kesit daralmasının kaynak metalinde değil ana malzeme tarafında gerçekleştiği, eğme deneyinde çatlamların geçiş bölgesinde gerçekleştiği ve kaynak dikişinde yüksek amperden dolayı oluşan yanma oluklarının çatlak oluşumunu tetiklediği tespit edilmiştir. Yüksek ısı girdisi kaynak dikişinde gerilim giderme ısı işlemi gerçekleştirilerek kaynak dikişinin sertliğinin azalmasına sebep olduğu rapor edilmiştir.

Li et al. [84], 200x50x1,5 mm boyutlarındaki ticari saf titanyumu, 1,2 mm çapında AWS ERTİ-2 ilave metal ve Fiber Laser - Gaz Metal Ark (GMA) karma kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Yüksek saflıkta argon gaz akış oranı 10, 15 ve 20 lt/dk, laser gücü 1 kW'dan 2 kW'a, kaynak hızı 4 m/dk'dan 9 m/dk'ya ayarlanmıştır. Kaynak parametrelerinin tane yapısı, sertlik, çekme özellikleri ve mikroyapı



özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, Laser-GMA karma ve laser kaynak yönteminde, 9 m/dk kaynak hızında gümüş renkli tam nüfuziyet elde edildiği bildirilmiştir. Karma ve Laser kaynaklarında farklı mikroyapı elde edilmesine rağmen çekme gücü ve mikrosertlik değerlerinde önemli derecede benzerlik görüldüğü, fiber Laser ve Laser-GMA karma kaynaklı numunelerin ikisinde de esas metalden daha yüksek çekme mukavemeti ve mikrosertlik değeri ölçüldüğü rapor edilmiştir.

Wang et al. [85], Ti-6Al-4V alaşımını lazer ışın kaynağı ile birleştirmişler ve 450°C'nin altında çekme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kaynak metali çekme mukavemetinin, ana metalden daha iyi olduğunu fakat uzama miktarının % 5 daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. En yüksek sertlik ergime bölgesinde olmakta ve sıcaklığın artmasıyla kaynak genişliği ve derinliğinin arttığını tespit etmişlerdir.

Lee et al. [86], 5,6 mm kalınlıklı saf titanyum parçalar sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ile birleştirilmiş ve mikrosertlik, çekme-makaslama, optik mikroskop ve TEM çalışmalarıyla incelenmiştir. Mikroyapısal inceleme ve mekanik özelliklerin ölçülmesinden, titanyum parçaların FSW ile kaynağı başarıyla uygulandığı tespit edilmiştir. Kaynak çekirdeğinin mikroyapısını, dislokasyon yapısının yüksek yoğunluğu ve rastgele yönlendirilmiş ikiz yapının büyük miktarda kaba tane içermesinden oluştuğu, titanyumun FSW kaynaklı bölgesinde mikroyapının baskın olarak ikiz tanelerden oluşumu, hegzagonal sıkı paket yapı malzemelerde kayma sisteminin zayıf olmasıyla açıklanabileceği rapor edilmiştir.

Meshram et al. [87], Fe-Ti, Cu-Ti, Fe-Cu, Fe-Ni ve Cu-Ni farklı metal kombinasyonları sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ve optik mikroskop, çekme-makaslama, mikrosertlik, SEM, EPMA ve XRD çalışmalarıyla incelenmiştir. Genişletilmiş etkileşim zamanının, çözünmez sistemler (Fe-Cu) ve ötektoid yapı sistemlerde (Fe-Ti ve Cu-Ti) kalın intermetalik tabaka oluşumundan dolayı mukavemet düşmesine sebep olduğu, çözünebilir sistemlerde katı eriyik oluşumundan dolayı artan etkileşim zamanı ile mukavemet artışı gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Yung et al. [88], değişik titanyum alaşımlarını TIG kaynağı ile birleştirerek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda en iyi mukavemet 1048 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer esas metalin değerinden % 3,2 daha düşüktür. Düşük soğuma hızı seçildiğinde oksijen ve azot gibi elementlerin tane sınırlarındaki varlığı azaldığından daha homojen bir yapı elde edilmektedir. Sonuç olarak, yüksek soğuma hızının göreceli olarak sünekliği arttırdığı belirtilmiştir.

### **5.3. TİTANYUM VE NOKTA DİRENÇ KAYNAğI ÇALIşMALAR**

Kahraman [89], 1,5 mm kalınlıkta ve 100x30 mm boyutlarında ticari saflıkta (Grade 2) titanyum sacları, 10 kA sabit kaynak akımı, 2, 4 ve 6 kN elektrod güçleri, 5, 15 ve 25 çevrim kaynak zamanları ve kaynak atmosferi (argon ve açık hava) değiştirilerek nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Kaynaklı bağlantılar çekme-makaslama, mikrosertlik ve optik mikroskop çalışmalarıyla incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kaynak zamanı ve elektrod gücü artışıyla çekme-makaslama mukavemetinin arttığı, argon gaz atmosferinde açık havadan daha iyi çekme-makaslama mukavemeti sergilediği ve kaynak zamanının çekme-makaslama testlerinde diğer değişkenler olan elektrod gücü ve kaynak atmosferinden daha etkili olduğu, en az etkinin kaynak atmosferi olduğunu rapor edilmiştir. Sertlik testlerinde, en yüksek değerin kaynak çekirdeğinden elde edildiği, onu ITAB ve esas metalin takip ettiği, kaynak atmosferinin bağlantı bölgelerinde sertliğe etki etmediği bildirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, kaynak süreci boyunca deformasyondan tanelerde ikizlenmelerin olduğu aynı zamanda elektrod gücü ve kaynak zamanı artışıyla ikizlenmelerde artış olduğu rapor edilmiştir.

Almus [69], 90x20x1,5 mm boyutlarında çelik-titanyum (ticari saflıktaki Grade 2) ve titanyum-titanyum sacları, ara bağlayıcı (0,3 mm kalınlığında A 1306 Gümüş folyo) ve ara bağlayıcısız olarak, argon koruyucu gazında, 5 kA kaynak akımı ve 3,5 bar sabit elektrod gücü ve 40, 50 ve 60 çevrim kaynak zamanlarında nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynaklı numuneler çekme-makaslama, mikrosertlik ve mikroyapı çalışmaları ile incelenmiştir. Çekme testleri sonucunda, titanyum-çelik birleştirmelerinde en iyi sonuç ara bağlayıcılı birleştirmelerden elde edildiği ve kaynak zamanı artışıyla mukavemetin arttığı, titanyum-titanyum birleştirmelerinde

kullanılan gümüş ara bağlayıcı birleştirmelerin mekanik dayanımlarını düşürdüğü rapor edilmiştir. Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri ITAB’da ölçülürken bunu sırasıyla kaynak çekirdek merkezi ve ana malzeme takip ettiğı bildirmiştir.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 6.1. KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada, üstün korozyon direncinden dolayı petrol endüstrisinde kullanılan ticari saflıktaki titanyum (Grade 2) sac malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan titanyum malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de, fiziksel özellikleri Çizelge 6.2’de ve mekanik özellikleri ise Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi

ASTM Standardı	İmpüriteler					Ti
	N	C	H	Fe	O	
Grade 2	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25	Kalan

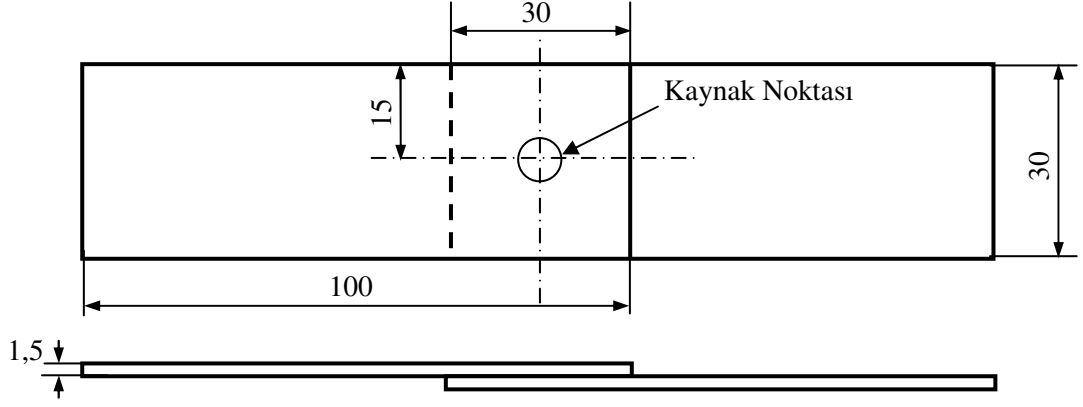
Çizelge 6.2. Kullanılan malzemenin fiziksel özellikleri

Alaşım Sembolü	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Ergime Noktası (°C)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Isınma Isısı (J/kg)	Isıl Genleşme (µm/mK)	Elektrik İletkenliği (µ-ohm)
Grade 2	4,5	1665	16	520	8,35	420

Çizelge 6.3. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri

Elastik Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)	Charp Kırma Enerjisi (J)	Sertlik (HRB)
103	345	276	20	30	150	225

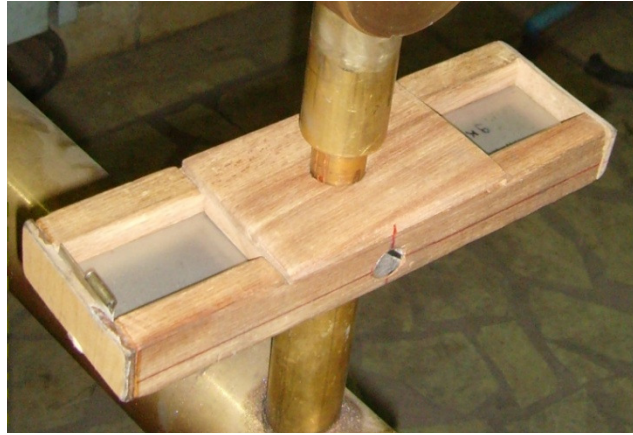
Deneysel çalışmalar için titanyum sac malzemeler, Şekil 6.1’de görülen ölçülerde ve standartlara uygun olarak 100x30x1,5 mm ebatlarında, KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi atölyesinde mevcut giyotin makas ile kesilerek, toplam 144 adet hazırlanmıştır.



Şekil 6.1. Nokta direnç kaynak numune ölçüleri

## 6.2. MALZEMENİN KAYNAĞA HAZIRLANMASI

1,5 mm kalınlığındaki, 100 mm uzunluğunda ve 30 mm genişliğindeki titanyum levhalar, nokta direnç kaynağı ile birleştirilmek için birleştirme yüzeylerinden itibaren 30 mm’ lik yüzeyleri 600 ve 1000 mesh’lik SiC zımparalarla oksitlerden temizlenmiş ve yüzeyler % 99 saflıkta ve yapısında kükürt içermeyen aseton ile temizlenmiştir. Kaynak işlemi sırasında bindirilmiş levhaların, ekseninden kaymasını önlemek için Şekil 6.2’de görüldüğü gibi ahşaptan özel bir kalıp hazırlanmıştır.



Şekil 6.2. Kaynak esnasında kullanılan kalıp resmi

### 6.3. MALZEMELERİN KAYNAĞININ YAPILIŞI

Öncelikle, titanyum levhaların birleştirilebileceği, kaynak parametrelerini belirlemek için ön deneyler yapılmıştır. Ön çalışmalarda, nokta direnç kaynak işlem parametrelerinden; elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı değiştirilerek titanyum numunelerin birleştirilebildiği kaynak parametreleri belirlenmiştir. Elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının çok düşük ve çok yüksek olduğu ön deneylerde, yetersiz birleştirme ve fazla deformasyondan dolayı kabul edilebilir kaynak çekirdeği sınırları aşılmıştır. Ön deneylerin değerlendirilmesi sonucunda; elektrod kuvveti olarak 3 ve 6 kN, kaynak akımı olarak 3, 5 ve 7 kA ve kaynak zamanı olarak ise; 10, 20 ve 30 çevrimin (1 çevrim=0,02 sn) uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Ön deneylerde zımparalanmamış ve asetonla temizlenmemiş titanyum saclarda oluşan oksidin kaynak sırasında fişkırmaya neden olduğu gözlenmiştir. Ayrıca kaynak esnasında kalıp kullanılmadığında bindirilmiş levhaların birleştirme ekseninden kaydığı görülmüştür.

Deneylerde, titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirmeleri için elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı ayarlanabilir, Baykal SPP 60 tipi su soğutmalı ve pnömatik kontrollü nokta direnç kaynak makinesi kullanılmıştır. Kullanılan nokta direnç kaynak makinası özellikleri Çizelge 6.4’de kaynak makinesi fotoğrafı ise Şekil 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Nokta direnç kaynak makinesinin özellikleri

<b>Makine Adı</b>	<b>Baykal SPP 60</b>
Makine Gücü	60 kVA
Besleme Gerilimi	380 V (3 fazlı)
Punta Kollarını Besleyen Hava Basıncı	0 – 6 kN
Soğutma Suyu Debisi	20-25 lt/dk
Elektrodların Soğutma Suyu Debisi	4 lt/dk
Elektrod çapı	Üst elektrod çapı 7 mm, Alt elektrod çapı 14 mm
Elektrodlar arası mesafe	10 mm
Elektrod Malzemesi	Kesik konik uçlu ticari saflıkta Cu (Bakır)



Şekil 6.3. Kullanılan SPP 60 tipi nokta direnç kaynak makinesi

Kaynak yapılacak titanyum levhaların kaynak yüzeyleri, asetonla temizlendikten sonra kaynak yapılacak parçalar ahşap düzeneğe yerleştirilmiştir. Kaynak yapılacak malzemelerin içine yerleştirildiği kalıp, elektrodlar arasına yerleştirilmiş ve kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak süresince elektrod kuvvetinin sabit kalması ve elektrod soğutma suyunun akışı sürekli kontrol edilmiştir. Deneyler esnasında kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 6.5’de verilmiştir. Kaynak işlemleri her bir parametreden 4’er adet olmak üzere toplam 72 adet gerçekleştirilmiş ve kaynak işlemi biten numuneler, kalıptan çıkarılarak açık havada soğutulmuşlardır.

Çizelge 6.5. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri

Elektrod kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (çevrim)			İnme (Down) Zamanı (çevrim)	Sıkıştırma (Squeeze) Zamanı (çevrim)	Ara (Weld Off) Zaman (çevrim)	Tutma (Hold) Zamanı (çevrim)	Ayrılma (Off) Zamanı (çevrim)
3	3	10	20	30	10	30	25	30	20
	5								
	7								
6	3	10	20	30	10	30	25	30	20
	5								
	7								

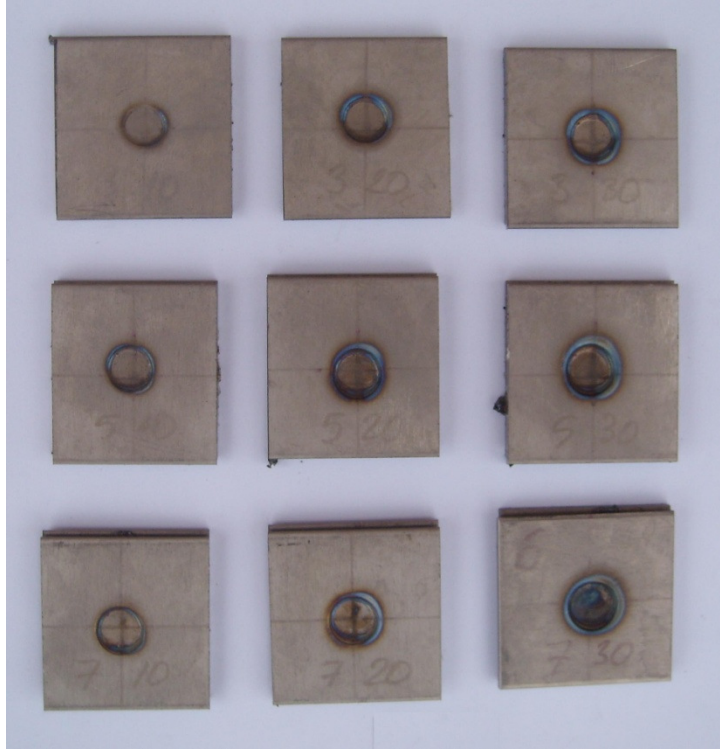
#### 6.4. NUMUNE HAZIRLAMA

Kaynak işlemi sonucunda, 170x30 mm ebatlarında elde edilen birleştirmelerden sadece 6 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 10, 20 ve 30 çevrim kaynak zamanlarında gerçekleştirilen numunelerin görüntüleri Şekil 6.4'de, örnek olarak verilmiştir. Çekme-makaslama deneyi için, 170x30 mm boyutlarındaki numuneler kullanılmıştır. Mikrosertlik ve mikroyapı numunesi için, bindirme ve kaynak çekirdeği bölgesinden, Şekil 6.5'de görüldüğü gibi 30x30 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra 30x30 mm ebatlarındaki numuneler, kaynak çekirdeği merkezinden tekrar kesilerek mikroyapı ve sertlik deneyleri için hazır hale getirilmişlerdir. Kesme işlemlerinde Metkon Meta Cut 250 abrasiv kesme makinası kullanılmış ve kesme esnasında istenmeyen dönüşümlerin meydana gelmemesi için bor yağlı soğutma sıvısı kullanılmıştır. Mikroyapı numuneleri, epoksi reçine içine soğuk olarak bakalite alınmışlar ve sonrasında standart metalografik numune hazırlama işlemlerine (zımparalama ve parlatma) tabi tutulmuşlardır. Hazırlanan mikroyapı numuneleri aynı zamanda mikrosertlik ölçümü için de kullanılmışlardır.



Şekil 6.4. Kaynak işlemi sonucunda elde edilen numune





Şekil 6.5. Mikrosertlik ve mikroyapı numuneleri

## 6.5. MEKANİK ÖZELLİKLERİN TESPİTİ

### 6.5.1. Çekme-Makaslama Deneyi

Nokta direnç kaynaklı titanyum sacların mekanik özelliklerini belirlemek için Şekil 6.6'da resmi verilen, KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi, Malzeme laboratuvarındaki 5 ton kapasiteli Shimadzu marka çekme testi cihazı kullanılmıştır. Nokta direnç kaynak yöntemi ile 18 farklı parametrede birleştirilmiş kaynaklı numuneler, standartlara uygun olarak çekme deney cihazına bağlanmış ve çekme-makaslama testi 2 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında, gerilme ve % uzama değerleri, çekme cihazı üzerindeki proplar ile bilgisayara aktarılarak otomatik olarak kaydedilmiştir.

Çekme-makaslama deneyleri, kaynak esnasında meydana gelebilecek kaynak hatalarının etkisini en az seviyede tutabilmek amacıyla, her bir parametreden 3 adet numuneye uygulanmış ve grafikler bu üç sonucun ortalaması alınarak çizilmiştir.



Şekil 6.6. Çekme deneyi cihazı ve donanımı resmi

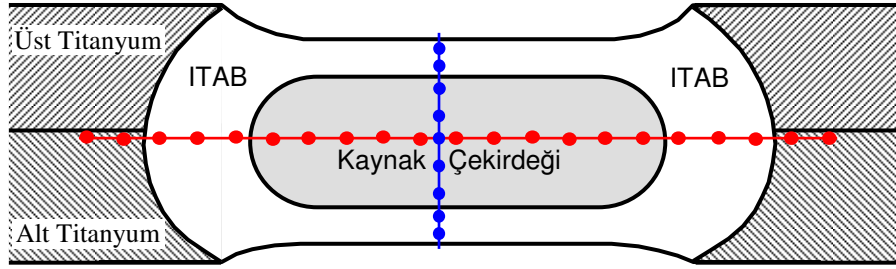
### 6.5.2. Kaynak Çekirdek Çapı ve Elektrod Dalma Derinliği Ölçümü

Nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş titanyum malzemelerde, elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının kaynaklı birleştirmeler üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile kaynak çekirdek çapları ve elektrod dalma derinlikleri ölçülmüştür. Kaynak çekirdeği çapı ölçümlerinde dijital kumpas, elektrod dalma derinliği ölçümlerinde ise mikrometre kullanılmıştır.

### 6.5.3. Sertlik Testi

Farklı kaynak parametrelerinde nokta direnç kaynağı ile birleştirilen titanyum malzemelerde elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının; ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeği üzerindeki sertlik değişimini tespit etmek amacıyla kaynaklı numunelerin tümüne sertlik testi uygulanmıştır. Metalografik muayene için hazırlanmış numuneler üzerinde, kaynak dikişinin ortası 0 kabul edilerek, Şekil 6.7'de gösterildiği gibi kaynak dikişine paralel ve dikey olarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, yatay ekseninde 4 ana malzeme, 6 ITAB ve 11 kaynak çekirdeği olmak üzere (yaklaşık 500 mikron aralıklarla) toplam 21 adet ve dikey ekseninde 4 ITAB

ve 5 kaynak çekirdeği olmak üzere toplam 9 adet olarak (yaklaşık 250 mikron aralıkla) gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik deneyleri, KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi, Malzeme Laboratuvarında bulunan Şekil 6.8’de resmi verilen Shimadzu HMV marka cihaz ile HV cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde 500 g yük ( $HV_{0,5}$ ) uygulanmış ve sonuçlar her bir bölgede gerçekleştirilen 5 ölçüm sonucunun ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.7. Mikrosertlik değeri ölçüm noktaları



Şekil 6.8. Mikrosertlik ölçüm cihazı resmi

#### 6.5.4. Metalografik Muayene

Nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen titanyum malzemelerde, elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının, kaynak bölgesindeki tane morfolojisine etkilerinin belirlenmesi amacıyla optik mikroskop çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bilindiği gibi numunelerin yüzeyinde, kesilen aletin kesme izleri bulunur. Ayrıca kesme esnasında numunenin yüzeyi bir miktar deforme olur. Numuneyi orijinal yapı temsil ettiğinden, toplam deformasyona uğramış tabakanın ortadan kaldırılması zımparalama ve parlatmanın amacıdır.

Bakalite alınan kaynaklı numuneler, yüzeylerinin çizilmemesi için su zımparası ile zımparalanmışlardır. Zımparalama işlemi sırasıyla olmak üzere; 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik silisyum karbür su zımparası ile ve de her zımparalama arasında 90<sup>0</sup> çevrilerek tamamlanmıştır. Zımparalama işlemi biten numuneler malzeme yüzeyini hazırlamada son basamak olan parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Parlatma işleminde amaç düzgün yüzeyli, çizik olmayan ve ayna gibi bir görünüm sağlamaktır. Parlatma işlemi, dönen bir disk üzerine yerleştirilmiş 3 µm bir keçe ile gerçekleştirilmiş ve bu keçe üzerine de 3 µm' lik elmas pasta emdirilmiştir. Parlatma işlemleri Şekil 6.9'da resmi verilen Mecapol P 262 marka parlatma cihazında 600 dev/dk hız kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir numune 5 dakika süreyle disk üzerinde yük uygulanmaksızın tutulmuştur.

Malzemelerde gerçek içyapı özelliklerini ortaya çıkarmak için metalografide çoğu kez, parlatılmış numune yüzeyine uygun bir reaktif tatbik edilir. Bu işleme kimyasal dağlama veya kısaca dağlama (etching) denir. Dağlama ile parlatma sonunda görülemeyen mikroyapı özellikleri açığa çıkar. Dağlama, ayrıca fazların cinsini tayin etmede ve yönlenme etütlerinde kullanılır.

Parlatma işlemi tamamlanan numuneler mikroyapılarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Dağlama işleminde amaç tane sınırları ve kaynak arayüzeyini daha iyi görebilmektir. Bu amaç ile 5 ml HNO<sub>3</sub> (Nitrik Asit), 10 ml HF

(Hidro Florik Asit) ve 85 ml saf sudan oluşan kimyasal solüsyonda 60 sn dağlama yapılmıştır. Dağlama işlemi tamamlanan numuneler, Şekil 6.10'da resmi verilen LEIKA DFC 320 dijital kamera bağlantılı, LEIKA DM 4000 M marka optik mikroskop ile grntlenmişlerdir. Kaynak bölgesi (ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeği) görüntüleri, farklı büyütmelerde ve farklı bölgelerden alınarak, mikroyapısal değişimler gözlemlenmiştir.



Şekil 6.9. Parlatma cihazı resmi



Şekil 6.10. Optik mikroskop resmi

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 7.1. ÇEKME-MAKASLAMA DENEYİ

Farklı kaynak parametrelerinde (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5 ve 7 kA kaynak akımı ve 10, 20 ve 30 çevrim kaynak zamanında, toplam 18 farklı parametrede) nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş ticari saf (Grade 2) titanyum saclarda, farklı parametrelerin kaynak dikişinin mekanik özelliklere etkisinin tespiti için Şekil 7.1’de görülen kaynaklı numunelerden, her parametreden 3’er adet olmak üzere toplam 54 numuneye çekme-makaslama deneyi uygulanmıştır. Çekme-makaslama deneyi sonucunda elde edilen 3 değerın ortalamaları Çizelge 7.1’de, bu numunelere ait çekme-makaslama grafikleri ise Şekil 7.2 ve 7.3’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Çekme-makaslama numunesi resmi

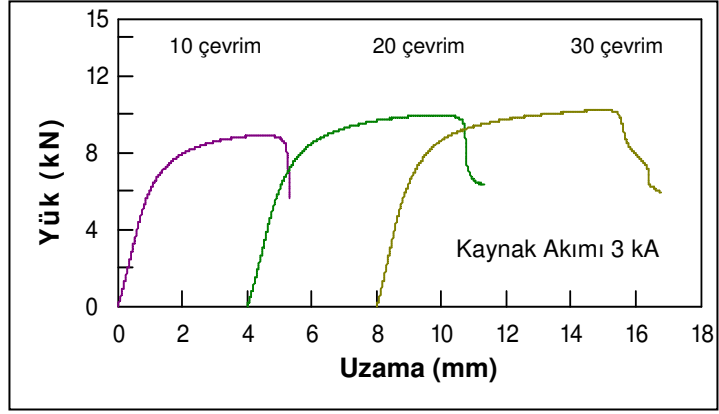
Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılara ait Çizelge 7.1’deki çekme-makaslama deneyi sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme-makaslama dayanımı 12.496 N ile 6 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak zamanında birleştirilen numuneden elde edilmiştir. Aynı şekilde en yüksek uzama miktarı da 7,00 mm ile aynı kaynak parametrelerinde elde edilmiştir. En düşük çekme-makaslama dayanımı ise 8.034 N ile 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak zamanında elde edilirken, en düşük uzama miktarı da yine aynı numuneden 5,03 mm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 7.1. Farklı kaynak parametrelerinden elde edilen çekme-makaslama deneyi sonuçları

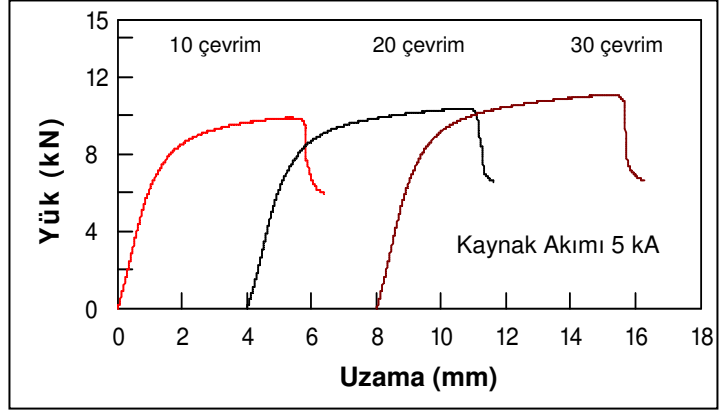
Elektrod Kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (çevrim)	Çekme-makaslama Mukavemeti (N)	Toplam Uzama (mm)
3	3	10	8.034	5,03
		20	9.025	5,41
		30	9.868	6,26
	5	10	8.893	5,47
		20	10.827	6,26
		30	11.207	6,58
	7	10	10.810	5,84
		20	11.537	6,43
		30	11.703	6,65
6	3	10	9.653	5,75
		20	10.628	6,22
		30	10.860	6,39
	5	10	10.727	6,18
		20	11.818	6,70
		30	11.934	6,91
	7	10	11.108	6,28
		20	12.298	6,75
		30	12.496	7,00

Çizelge 7.1 genel olarak incelendiğinde, kaynak parametrelerinden elektrod kuvveti ve kaynak akımının artmasıyla, çekme-makaslama ve % uzama değerlerinin arttığı görülmektedir. Benzer şekilde artan kaynak zamanıyla da çekme-makaslama ve % uzama değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

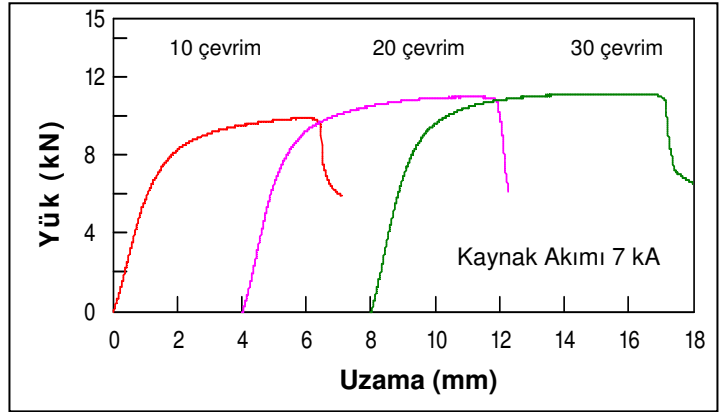
Şekil 7.2'de 3 kN ve Şekil 7.3'de ise 6 kN elektrod kuvvetinde, (a) 3 kA, (b) 5 kA ve (c) 7 kA kaynak akımlarında birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama grafikleri verilmiştir.



(a)



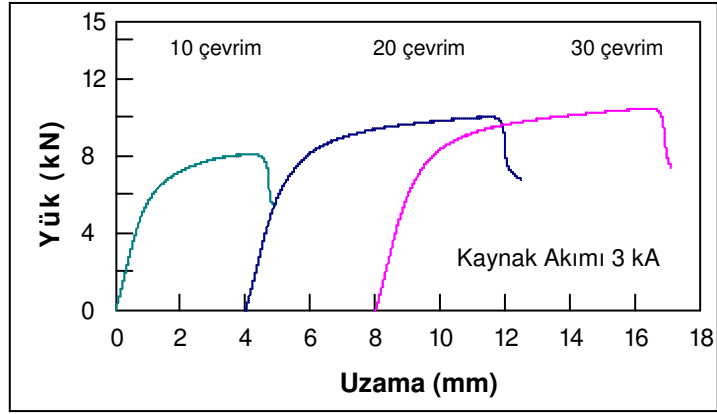
(b)



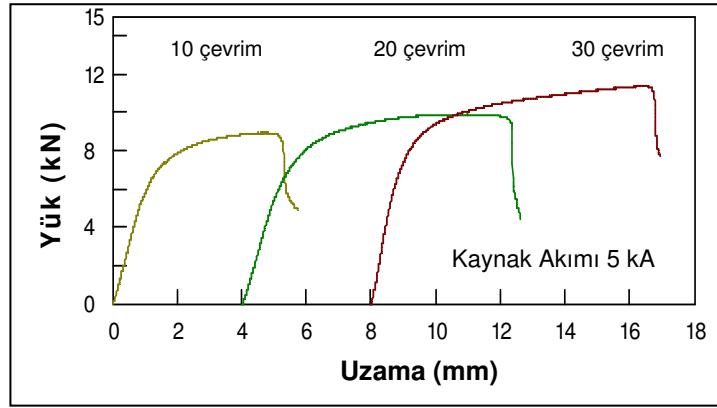
(c)

Şekil 7.2. 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama grafikleri; a) 3 kA, b) 5 kA ve c) 7 kA kaynak akımı

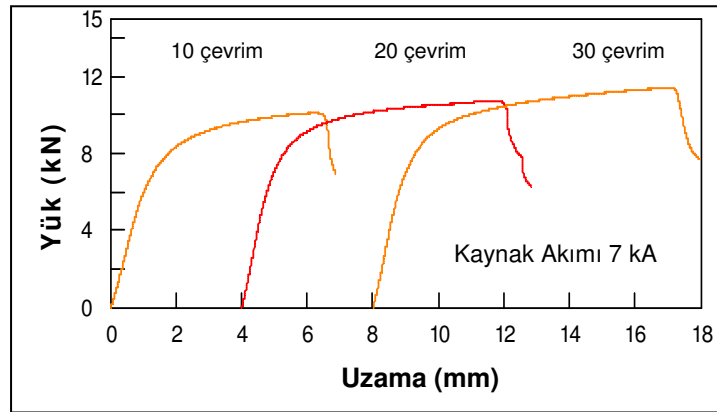




(a)



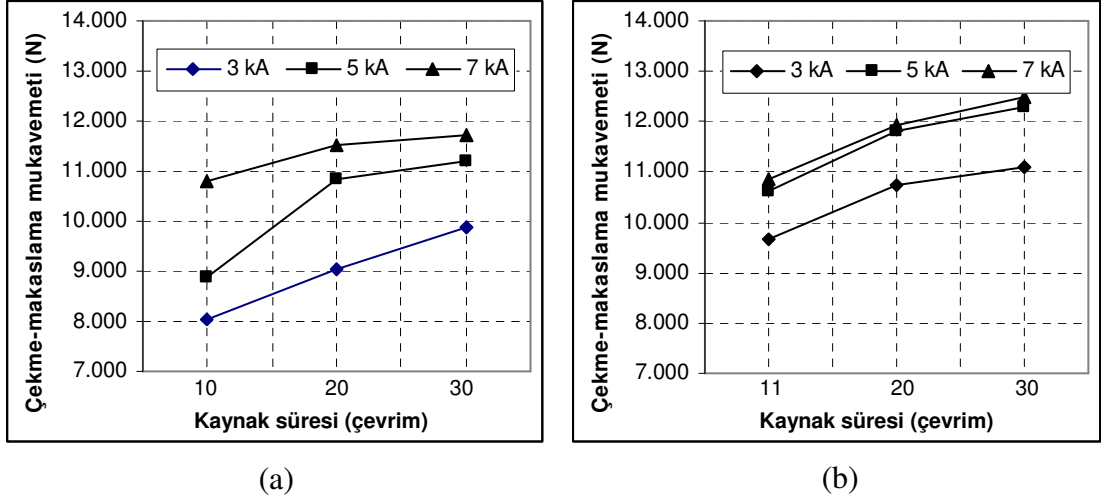
(b)



(c)

Şekil 7.3. 6 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama grafikleri; a) 3 kA, b) 5 kA ve c) 7 kA kaynak akımı

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen saf titanyum numunelerin çekme-makaslama dayanımlarına, farklı kaynak parametrelerinin etkisi, Şekil 7.4'de verilen grafikte görülmektedir.



Şekil 7.4. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen saf titanyum numunelerin çekme-makaslama grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerdeki elektrod kuvvetinin, çekme-makaslama dayanımına etkisi Çizelge 7.1'deki veriler ve Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'deki grafiklerden tespit edilmiştir. Çizelge ve Şekiller incelendiğinde, kaynak esnasında uygulanan elektrod kuvvetinin kaynaklı numunelerin çekme-makaslama dayanımlarını değiştirdiği görülmektedir. Benzer şekilde Gourd [6], nokta direnç kaynak uygulamalarında, elektrod baskı kuvvetinin, bağlantı dayanımı üzerine etkisi olduğu bildirmiştir. 10 çevrim kaynak zamanı, 3 kA kaynak akımı ve 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilen numunenin çekme-makaslama dayanımı değeri 8.034 N iken, bu değer diğer parametreler sabit olmak üzere 6 kN elektrod kuvvetinde 9.653 N'a yükseldiği görülmektedir. Benzer biçimde, 20 çevrim kaynak zamanı, 5 kA kaynak akımı ve 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilen numunenin çekme-makaslama dayanımı değeri 10.827 N iken, bu değer diğer parametreler sabit olmak üzere, 6 kN elektrod kuvvetinde 11.818 N'a çıktığı görülmüştür. Son olarak 30 çevrim kaynak zamanı, 7 kA kaynak akımı ve 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilen numunenin çekme-makaslama dayanımı değeri 11.703 N iken, bu değer diğer kaynak parametreleri sabit olmak üzere, 6 kN elektrod kuvvetinde 12.496 N'a yükselmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, elektrod kuvveti artışının, bağlantının çekme-

makaslama dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Nokta direnç kaynağında kaynak bölgesindeki ısı girdisi  $Q=I^2.R.t$  formülüyle hesaplandığı bilinmektedir. Burada I iş parçasından geçen akımı, R toplam direnci ve t kaynak zamanını ifade etmektedir. Elektrod kuvvetinin artışıyla, R toplam direnci azalırken, iş parçasından geçen akım artar ve iş parçası ısı girdisi artmış olur. Isı girdisinin artışı, kaynak çekirdeği çapının artmasına bu da dolayısıyla kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarının artmasına sebep olmaktadır.

Benzer çalışmada Almus [69], 1,5 mm kalınlığında çelik-titanyum, ve titanyum-titanyum sacları, ara bağlayıcı (0,3 mm kalınlığında A 1306 Gümüş folyo) ve ara bağlayıcısız olarak, 5 kA kaynak akımı ve 3,5 bar sabit elektrod kuvveti ve 40, 50 ve 60 çevrim kaynak zamanlarında nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak yapılacak iş parçalarının akım geçişini sağlayabilmeleri için kaynak bölgesinde basınç altında bir arada tutulmaları gerektiğini, basınç miktarının belirli dereceye kadar elektrodlar arasındaki toplam direnci ve bu sebeple kaynak bölgesinden akan akım miktarını etkilediğini bildirmiştir.

Kahraman [89], ticari saflıktaki titanyum sacları, 10 kA sabit kaynak akımında, 2, 4 ve 6 kN elektrod güçlerinde, 5, 15 ve 25 çevrim kaynak zamanlarında ve kaynak atmosferini (argon ve açık hava) değiştirilerek, nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirmiş ve kaynak zamanı ve elektrod gücü artışıyla çekme-makaslama mukavemetinin arttığını bildirmiştir.

Nokta direnç kaynak akımının, kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımına etkisi Çizelge 7.1'deki veriler ve Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'deki grafiklerden incelenecek olursa, kaynak akımı artışına paralel olarak, çekme-makaslama dayanımının arttığı görülmektedir. Anık [61] ve Anık ve arkadaşları [62], artan kaynak akım değerlerinin, direnç kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımını arttıracığını bildirmişlerdir.

Sabit 3 kN elektrod kuvvetinde; 10 çevrim kaynak zamanı ve 3 kA kaynak akımında birleştirilen numunenin çekme-makaslama dayanımı değeri 8.034 N iken, bu değer aynı parametrelerde 5 kA kaynak akımında 8.893 N ve 7 kA kaynak akımında ise

10.810 N olarak ölçülmüştür. Kaynak süresi 20 çevrime yükseltildiğinde, 3 kA kaynak akımında birleştirilen numunenin çekme-makaslama dayanımı değeri 9.025 N iken, 5 kA kaynak akımında 10.827 N'a ve 7 kA kaynak akımında ise 11.537 N'a yükselmiştir. Kaynak süresinin 30 çevrime yükselmesiyle, çekme-makaslama değerleri daha da artış göstererek 3 kA kaynak akımında 9.868 N'a, 5 kA kaynak akımında 11.207 N'a, ve 7 kA kaynak akımında ise 11.703 N'a yükselmiştir. Sonuç olarak; nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş numunelerde kaynak akımının artmasıyla, ısı girdisi artmış, dolayısıyla kaynak çekirdeği genişlemiş, bu genişleme sayesinde kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımları artmıştır.

Benzer çalışmalarında Fukumoto et al. [71], 200 µm kalınlığında, 25 mm uzunluğunda ve 8 mm genişliğinde çeşitli östenitik paslanmaz çelik levhaları, (302, 304, 310S, 316L ve 347) nokta direnç kaynağı ile birleştirmişler ve kaynak akımının artışıyla çekirdek genişlemesinden dolayı makaslama gücünün arttığını rapor etmişlerdir.

Marashi et al. [70], 1 mm kalınlığında düşük karbonlu galvanizli çelik ile 1,2 mm kalınlığında östenitik paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve düşük kaynak akımlarında nokta direnç kaynak yapımının, küçük ergime bölgesi boyutu ve ara yüzey boyunca düşük çekme-makaslama mukavemetine sebep olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, aşırı yüksek kaynak akımlarında nokta direnç kaynak yapımının, daha geniş ergime bölgesi ve ara yüzey boyunca düşük çekme-makaslama mukavemetine sebep olduğunu bildirmişlerdir.

Özyürek [73], 1 mm kalınlıklı 304L östenitik paslanmaz çelik sacları, 4, 7 ve 9 kA kaynak akımlarında, 8 atm elektrod gücünde, atmosfer ve nitrojenli ortamda nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Sonuçta kaynak akımı ile artan ısı girdisinden dolayı çekirdek boyutunun büyüdüğünü ve kaynaklı numunelerin çekme-makaslama mukavemetinin arttığını bildirmiştir.

Sun et al. [74], 1,2 mm kalınlığında Mg alaşımlı sacları, 15 - 23 kA kaynak akımlarında, 8 çevrim kaynak zamanında ve 2,5 kN elektrod gücünde nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak akımı 15 kA'den 23 kA'e arttırıldığında,

birleştirme çekme-makaslama mukavemetinin 1460 N'dan 3000 N'a yükseldiği rapor edilmiştir.

Vural and Akkuş [76], 1,03 mm kalınlıklı galvanizli çelik ve 0,93 mm kalınlıklı östenitik paslanmaz çelik sacları, 5,5 - 13 kA (0,5 kA artışla) kaynak akımlarında ve 3400 N elektrod gücünde nokta direnç kaynağı ile birleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, kaynak akımı arttırıldığında kritik akım değerine kadar kaynak çekirdeği çapının arttığı, kaynak çekirdeği çapı arttıkça çekme-makaslama mukavemetinin arttığı, ancak kritik akım değeri geçildikten sonra, ara yüzeyde aşırı metal ergimesi ve sıçramasından dolayı kaynak çekirdeği çapının azaldığını rapor etmişlerdir.

Anık ve Gülbahar [80], 1,5 mm kalınlığında ve ferritik paslanmaz çelik sacları, 5 kN elektrod gücünde, 5, 15, 25 ve 50 periyot kaynak zamanlarında ve 5,5 – 14,5 kA (1 kA artışla) kaynak akımlarında nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve bütün kaynak zamanlarında akım şiddeti arttıkça kaynak çekirdek çapının arttığı ve yassılaştığı, bununla birlikte çekme-makaslama mukavemetinin arttığını ancak belirli bir yassılaştıktan sonra nufuziyetin azaldığı ve çekme-makaslama mukavemetinin düştüğünü bildirmişlerdir.

Aslanlar ve arkadaşları [90], farklı kalınlıklardaki galvaniz kaplanmış kromatlı mikro alaşımlı çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirmişler ve artan akımla beraber ısı girdisinin ve çekme-makaslama dayanımının iyileştiğini bildirmişlerdir.

Çalışmalarımız sonucunda titanyum sacların nokta direnç kaynağında artan kaynak zamanının, kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımına etkili olduğu görülmektedir. (Çizelge 7.1, Şekil 7.2, 7.3 ve 7.4). Elektrod kuvveti ve kaynak akımının artışında olduğu gibi, kaynak zamanının artmasıyla da kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarının arttığı görülmüştür.

3 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımı sabit olmak üzere nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerde, 10 kaynak çevriminde çekme-makaslama değeri 8.034 N ölçülürken, bu değer kaynak zamanının 20 çevrime yükseltilmesiyle 9.025 N'a ve 30 çevrime yükseltilmesiyle de 9.868 N'a yükselmiştir. Benzer biçimde

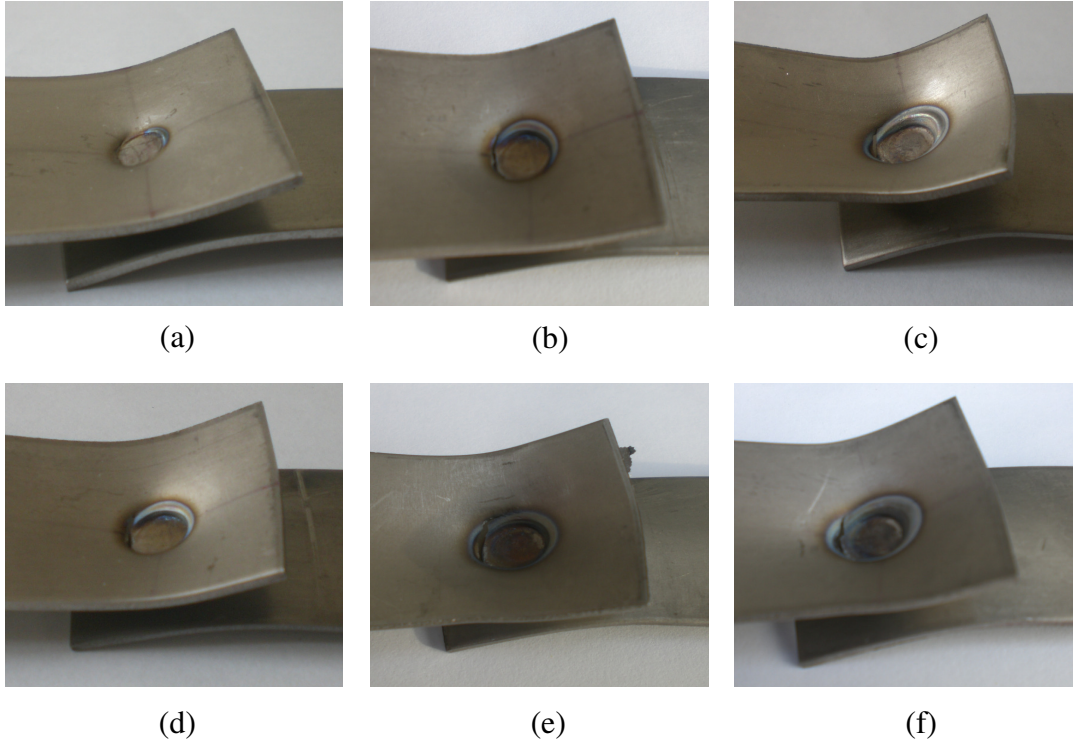
diğer iki parametre (elektrod kuvveti ve kaynak akımı) sabit tutulduğunda kaynak zamanının artmasıyla bütün bağlantılarda çekme-makaslama değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; kaynak zamanı 10 çevrimde iken, ısı girdisinin düşük olması nedeniyle kaynak çekirdek çapı küçük oluşmuştur. Bunun sonucu olarak, kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama mukavemeti değerleri de düşük olmaktadır. Kaynak zamanı artmasıyla (10, 20 ve 30 çevrim) ısı girdisi artmakta, buna bağlı olarak da kaynak çekirdek çapı artmakta, dolayısıyla çekme-makaslama mukavemeti artmaktadır.

Benzer çalışmalarında Martin et al. [72], 0,8 mm kalınlığında 304 östenitik paslanmaz çelik sacları, 1,5 - 6,5 kA (0,5 kA artışla) kaynak akımlarında ve 1000 ve 1500 N elektrod güçleri kullanılarak nokta direnç kaynağı ile birleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, kaynak zamanı ve akımın artışı ile ısı girdisi artmış ve kaynak çekirdeğinin genişlemiş, bundan dolayı çekme-makaslama mukavemeti artmış, fakat kaynak zamanı ve kaynak akımını değerlerinin aşırı artışının akmaya neden olduğunu bildirilmişlerdir.

Hayat [63], Eryürek [79], Aslanlar [90] ve Chuko and Gould [91], yaptıkları çalışmalarda, artan kaynak zamanının ısı girdisi üzerinde, akım şiddeti artışı gibi etki göstererek, benzer ve farklı malzeme çiftlerinin nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin dayanımlarını arttırdığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde Kocabekir ve arkadaşları [92], Hayat ve arkadaşları [93,94], yaptıkları çalışmalarda, artan kaynak zamanına bağlı olarak, birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımlarının arttığını bildirmişlerdir.

Şekil 7.5'de bütün elektrod kuvvetlerinde ve kaynak akımlarında fakat sadece 20 çevrim kaynak zamanında birleştirilmiş kaynaklı numunelerin çekme-makaslama testi sonrasında elde edilen kopma fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde, çekme-makaslama testi sonrası birleştirmelerin tümünde kopmanın ITAB'da ve genelde birleştirmenin ITAB bölgesindeki tane irileşmesinin olduğu yerden başlayarak meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 7.5. Kaynaklı numunelerin çekme-makaslama testi sonrası kopma görüntüleri; 3 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, a) 3 kA b) 5 kA c) 7 kA 6 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, d) 3 kA e) 5 kA f) 7 kA

Çekme-makaslama testi yapılan numunelerdeki kopma türleri incelenerek, kriterlere uygun olup olmadığı ve kaynaklı bağlantılarda elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının kopma türüne etkisi incelenmiştir. Kaynaklı bağlantılarda düğme, ayrılma ve yırtılma türü olmak üzere üç tip yırtılma mevcuttur [95].

Düğme tip kopma, kaynak parametrelerinin uygun olduğunu gösteren, kaynak zamanı artışıyla ısı girdisinde artış meydana gelen, buna bağlı olarak, kaynak çekirdeği çapı ve kaynak bölgesinde artış görülen ve çekme-makaslama dayanımında da yükselmenin görüldüğü kopma türüdür [78]. Kaynaklı bağlantıdan istenilen tür, kopma şeklidir.

Ayrılma tip kopma, kaynak parametrelerinin yetersiz olduğu, düşük kaynak akımından dolayı oluşan düşük ısı girdisine bağlı olarak meydana gelen yetersiz kaynak çekirdeği çapı ve kaynak bölgesinin oluştuğu kopma tipidir ve çekme-makaslama dayanımı esas metal dayanımından daha düşüktür [77].

Yırtılma tipi kopma ise kaynak parametrelerinin aşırı olduğu, aşırı kaynak akımı artışından dolayı oluşan aşırı ısı girdisine bağlı olarak meydana gelen aşırı ergime ve fişkırmadan dolayı, çekme-makaslama dayanımında düşüş görülen kopma tipidir [78]. Bu iki tip kopma türü de istenilmeyen türdedir.

Birleştirmeler yapılmadan önce ön deneyler yapıp, uygun kaynak parametreleri belirlendiği için birleştirmelerde ayrılma ve yırtılma tipi kopmaya rastlanmamıştır. Birleştirmelerin tümü düğme kopma türünden olmuştur. Bu sonuç, kaynak parametrelerinin uygun olarak seçildiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Düğme kopma türünde, çekme-makaslama deney sonucunda, malzemenin kopma tipi kaynaklı bölgeden kopmadan, malzemedan yırtılmaya doğru gitmektedir. Bunun nedeni çekirdek bölgesinin çekme-makaslama değerinin, malzemenin çekme-makaslama değerinden daha yüksek olmasıdır.

Hayat [63], çift-fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında kaynak süresinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Kaynak süresi 10 çevrimde iken ısı girdisi miktarının düşük olması nedeniyle elektrodun dalma derinliği (çekirdek yüksekliği) ve çekirdek çapı küçük olduğunu, bunun sonucu olarak çekme-makaslama değerleri de düşük olduğunu ve ayrılma tip kopma görüldüğünü bildirmiştir. Kaynak akım şiddetinin ve kaynak sürelerinin artırılması durumunda malzemedan oluşan ısı girdisi arttığını, böylelikle çekme-makaslama değerlerinde de artış gözlemlemiştir. Buna bağlı olarak kopma tipi malzemedan yırtılmaya doğru gitmekte olduğunu yani düğme tipinde kopma olduğunu tespit etmiştir.

Hayat et al. [95], (DIN EN 10130-1999) IF çeliğinin nokta direnç kaynağında, kaynak akımı ve kaynak zamanının mekanik özelliklere etkisini incelemiş ve düşük kaynak akımı ve zamanında (3 kA ve 5 çevrim), yetersiz kaynak çekirdeği ve çekme-makaslama dayanımına bağlı olarak, ayrılma tip kopma tespit etmişlerdir. 5 kA kaynak zamanı ve 5 ve 10 çevrim kaynak zamanlarında düğme tip kopma olduğunu bildirmişlerdir.

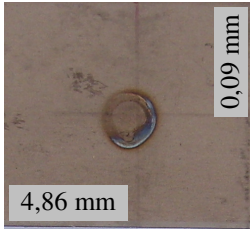
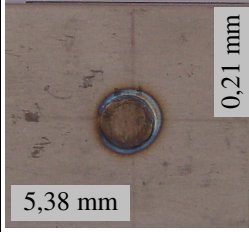
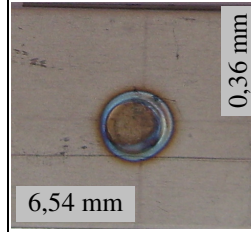
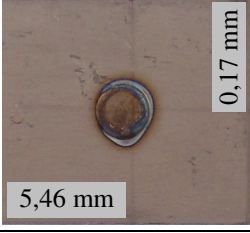
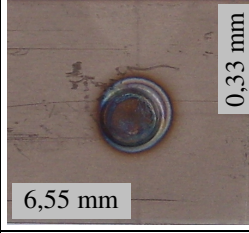
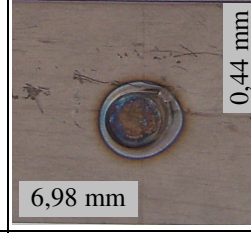
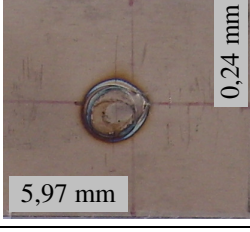
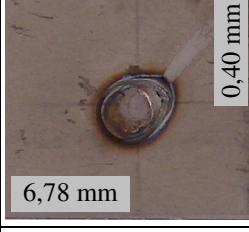
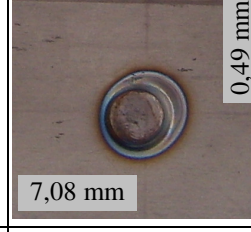
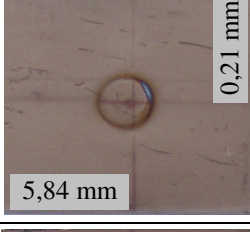

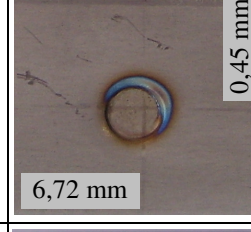
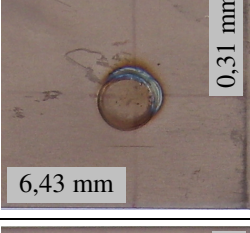
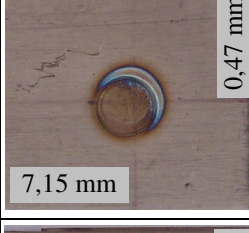
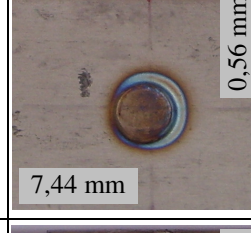
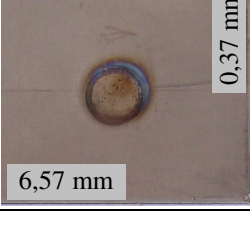
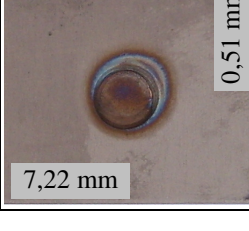
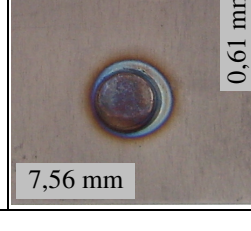


## 7.2. KAYNAK ÇEKİRDEĞİ ÇAPI VE ELEKTROD DALMA DERİNLİĞİ ÖLÇÜMÜ

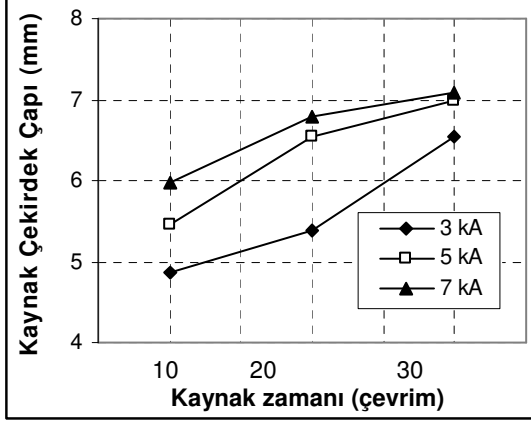
Farklı parametreler (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5 ve 7 kA kaynak akımı, 10, 20 ve 30 çevrim kaynak zamanı) kullanarak, nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numuneler üzerinde çekirdek çapı ölçümü enine ve boyuna olarak ölçülmüştür. Değişen kaynak parametrelerinin çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliğine etkisi incelenmiştir. Bu ölçümlerin ortalama değerleri Şekil 7.6.'de (yatayda, çekirdek çapı ve dikeyde, elektrod dalma derinliği) sayısal olarak, Şekil 7.7 ve 7.8' de ise grafik olarak gösterilmiştir.

Literatürde [69], istenilen kaynak çekirdeği çapının; kaynak akımı ve kaynak zamanı uygun bir şekilde ayarlanmasıyla elde edilir. Zaman kısa tutulursa kaynak çapı küçülür; aksine uzun tutulursa ergiyen hacim fazlaşır ve ergiyiğin dışarı çıkacağı bildirilmiştir.

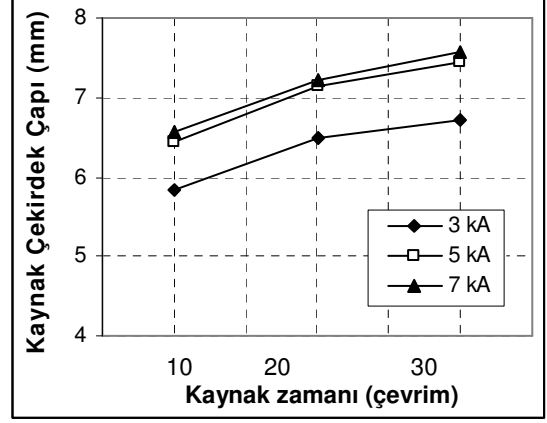
Şekil 7.6. incelendiğinde; en büyük kaynak çekirdeği çapı (yatay) ve elektrod dalma derinliği (dikey), 6 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak zamanında 7,56 mm çekirdek çapı ve 0,61 mm elektrod dalma derinliği olarak ölçülmüştür. En küçük çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliği ise, 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak zamanında 4,86 mm çekirdek çapı ve 0,09 mm elektrod dalma derinliği olarak belirlenmiştir.

Çekirdek Çapları ve elektrod dalma derinlikleri				
Elektrod Kuvveti	Kaynak Akımı	Kaynak Süresi		
		10 çevrim	20 çevrim	30 çevrim
3 kN	3 kA	 4,86 mm 0,09 mm	 5,38 mm 0,21 mm	 6,54 mm 0,36 mm
	5 kA	 5,46 mm 0,17 mm	 6,55 mm 0,33 mm	 6,98 mm 0,44 mm
	7 kA	 5,97 mm 0,24 mm	 6,78 mm 0,40 mm	 7,08 mm 0,49 mm
6 kN	3 kA	 5,84 mm 0,21 mm	 6,49 mm 0,35 mm	 6,72 mm 0,45 mm
	5 kA	 6,43 mm 0,31 mm	 7,15 mm 0,47 mm	 7,44 mm 0,56 mm
	7 kA	 6,57 mm 0,37 mm	 7,22 mm 0,51 mm	 7,56 mm 0,61 mm

Şekil 7.6. Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilen numunelerin kaynak çekirdeği çapı ve elektrod dalma derinliği ölçümleri

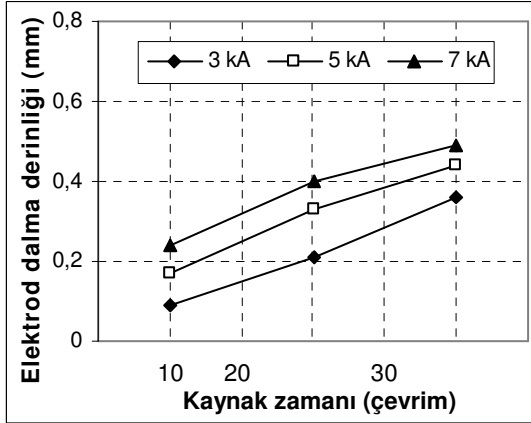


(a)

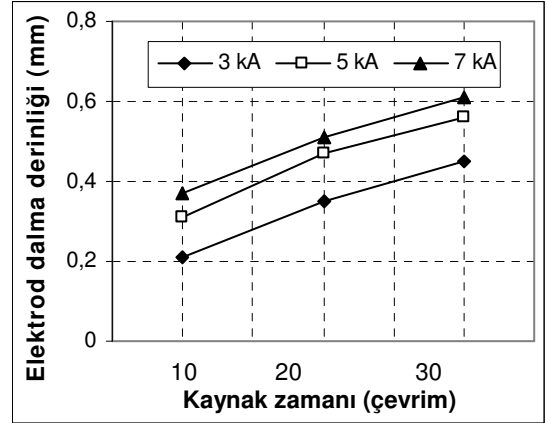


(b)

Şekil 7.7. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen saf titanyum numunelerin kaynak çekirdeği çapı grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti



(a)



(b)

Şekil 7.8. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen saf titanyum numunelerin elektrod dalma derinliği grafikleri; a) 3 kN, b) 6 kN elektrod kuvveti

Şekil 7.6'deki veriler, Şekil 7.7 ve 7.8'deki grafikler incelendiğinde; sabit 3 kN elektrod kuvvetinde, 10 çevrim kaynak zamanı ve 3 kA kaynak akımında birleştirilen numunenin kaynak çekirdeği çapı 4,86 mm ve elektrod dalma derinliği 0,09 mm olarak ölçülmüştür. Aynı parametrelerde 5 kA kaynak akımında çekirdek çapı 5,46 mm ve derinlik 0,17 mm, 7 kA kaynak akımında ise çekirdek çapı 5,97 mm ve derinlik 0,24 mm olarak ölçülmüştür. 5 kA kaynak akımı, 20 çevrim kaynak zamanı ve 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilen numunenin kaynak çekirdeği çapı 6,55 mm ve elektrod dalma derinliği 0,33 mm iken, elektrod kuvveti 6 kN'a çıkarıldığında ise

çekirdek çapı 7,15 mm ve derinlik 0,47 mm'ye yükselmiştir. 6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak zamanında birleştirilen numunenin çekirdek çapı 5,84 mm ve derinliği 0,21 mm iken, kaynak zamanı 20 çevrime çıkarıldığında çekirdek çapı 6,49 mm ve derinlik 0,35 mm'ye yükselmiştir. 30 çevrime çıkarıldığında ise çekirdek çapı 6,72 mm ve derinlik 0,45 mm'ye yükselmiştir. Sonuç olarak; elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının artmasıyla, ısı girdisi artmış, dolayısıyla kaynak çekirdeği çapı artmış olup bununla birlikte elektrod dalma derinliğinin de arttığı tespit edilmiştir.

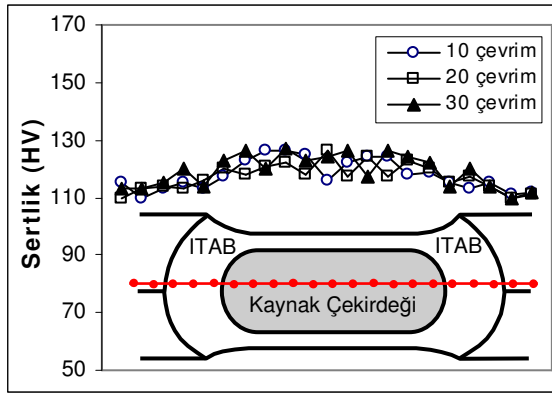
Martin et al. [72], kaynak zamanı ve kaynak akımı artışı, Hayat [63], Özyürek [73], Sun et al. [74], Vural and Akkuş [76], Anık ve Gülbahar [80], Hasanbaşoğlu [96], kaynak akımı artışı, Aslanlar et al. [78], Hayat et al. [95], kaynak zamanı artışı ile ısı girdisinin ve kaynak çekirdeği çapının arttığını bildirmişlerdir.

Artan kaynak zamanıyla elektrod dalma derinliği artış göstermiştir. Literatürde [62], Elektrod kuvveti sabit olduğu halde bu artışın nedeni ısı girdisiyle açıklanmaktadır. Aslanlar et al. [77,78], 1,2 mm kalınlıklı galvanizli kromatlı (mikro alaşımlı) çelik sacları nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş. Kaynaklı sacların yüzey kalitesi, elektrodun malzemeye çentik derinliği sac kalınlığının % 8-20'si geçmeyecek şekilde kabul edildiğinde 10 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak zamanı veya 9 kA kaynak akımı ve 12 çevrim kaynak zamanı yeterli olacağını bildirmiştir.

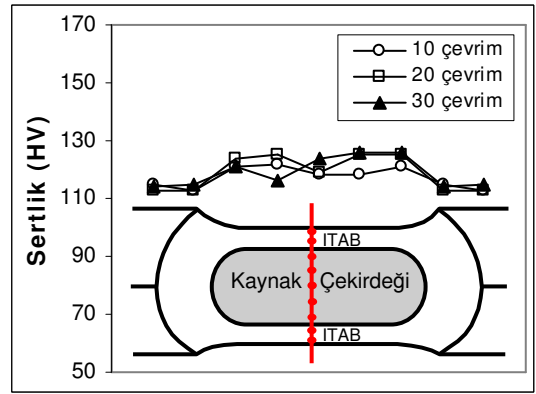
### **7.3. SERTLİK TESTİ**

Nokta direnç kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen titanyum malzemelerde, kaynak bölgesindeki (ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeği) sertlik değişimini belirlemek amacıyla kaynaklı numunelerin tümüne sertlik testleri uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerdeki sertlik taramaları, kaynak çekirdeği kesitine paralel ve dikey olmak üzere iki farklı yönde gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklı birleştirmelere uygulanan sertlik deneyi sonuçlarından 3 kN kaynak kuvveti ve 3, 5 ve 7 kA kaynak akımı kullanılarak gerçekleştirilen birleştirmelerin sertlik dağılımları sırasıyla Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve 7.11'de verilmiştir.

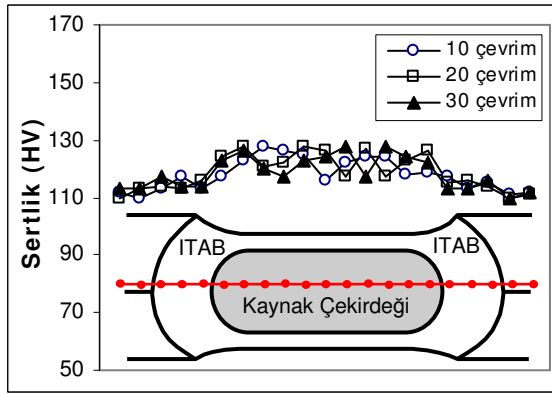


(a)

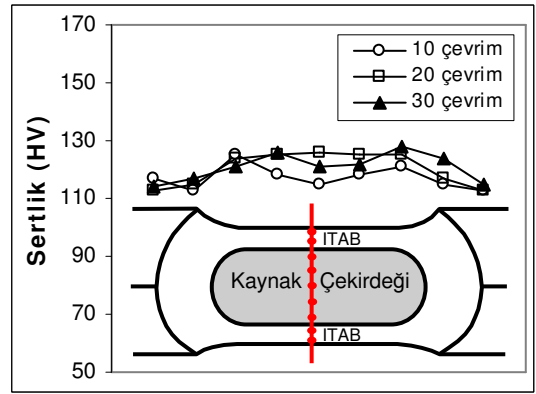


(b)

Şekil 7.9. 3 kN ve 3 kA'de elde edilen sertlik grafikleri; a) yatay ve b) dikey

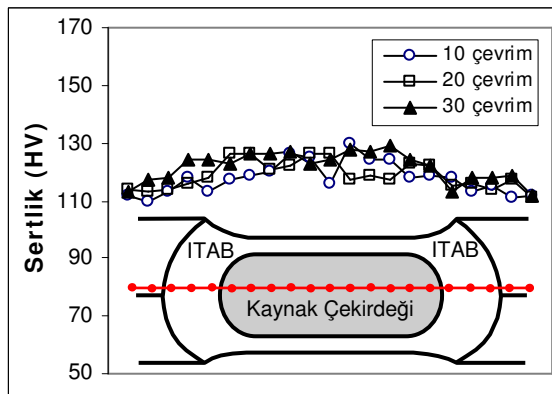


(a)

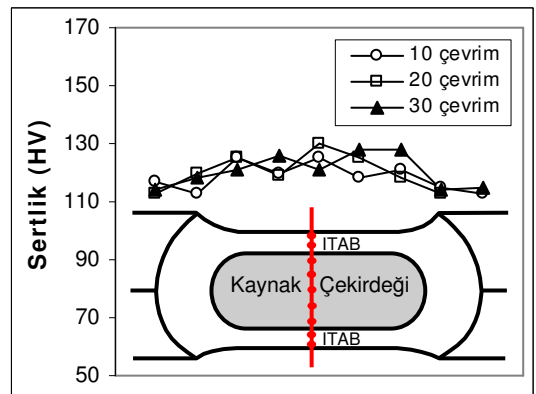


(b)

Şekil 7.10. 3 kN ve 5 kA'de elde edilen sertlik grafikleri; a) yatay ve b) dikey

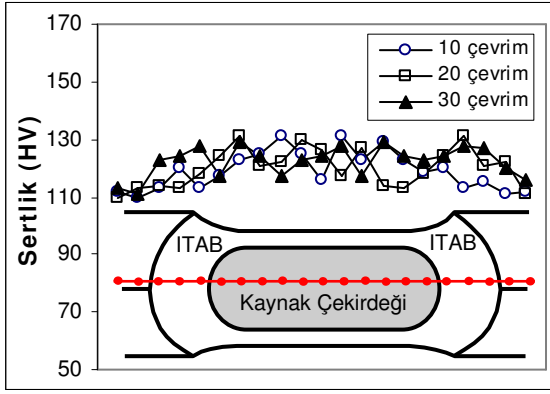


(a)

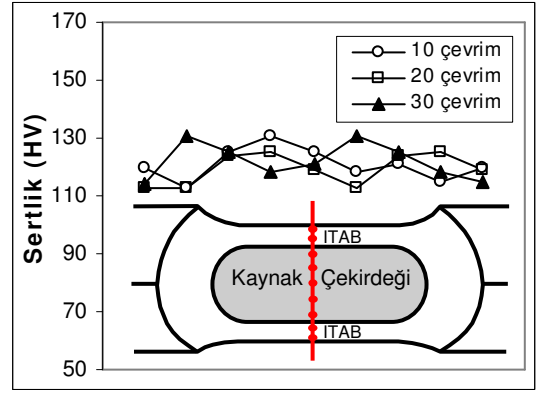


(b)

Şekil 7.11. 3 kN ve 7 kA'de elde edilen sertlik grafikleri; a) yatay ve b) dikey

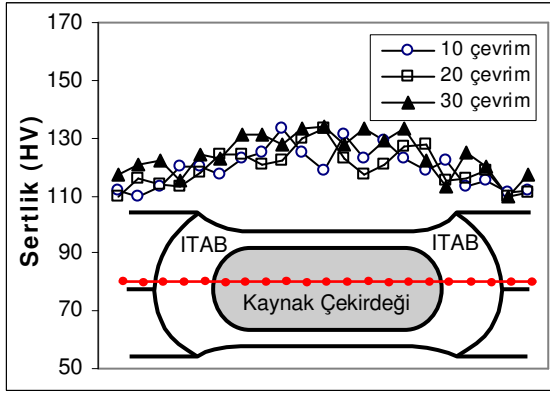


(a)

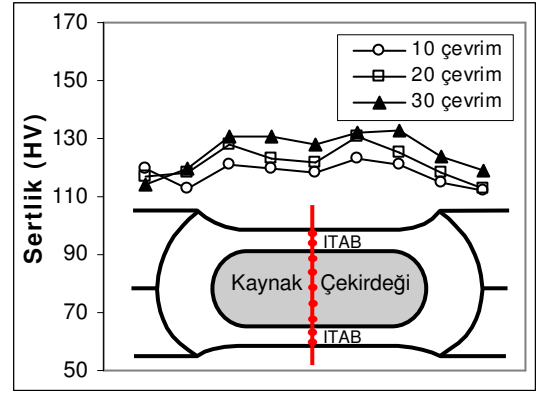


(b)

Şekil 7.12. 6 kN ve 3 kA'de elde edilen sertlik grafikleri; a) yatay ve b) dikey

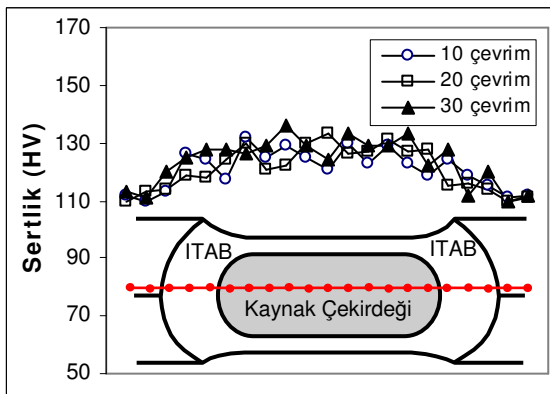


(a)

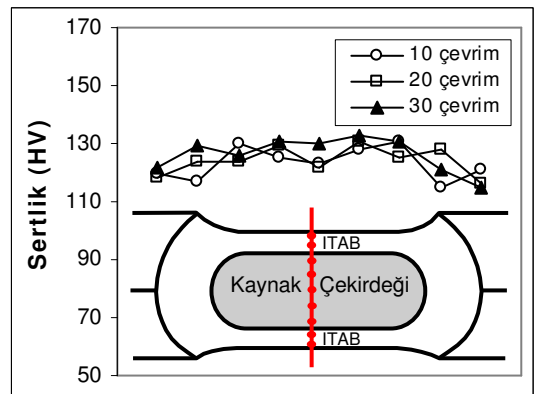


(b)

Şekil 7.13. 6 kN ve 5 kA'de elde edilen sertlik grafikleri; a) yatay ve b) dikey



(a)



(b)

Şekil 7.14. 6 kN ve 7 kA'de elde edilen sertlik grafikleri; a) yatay ve b) dikey

Şekil 7.12, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’de, 6 kN elektrod kuvveti ve 3, 5 ve kA kaynak akımlarıyla birleştirilmiş kaynaklı numunelerden ölçülmüş sertlik değerleri sırasıyla verilmiştir.

Grafikler genel olarak incelendiğinde; kaynak çekirdeğinden esas metale doğru sertlikte bir düşüş olduğu görülmektedir. Burada en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinden ölçülürken, onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir. Ayrıca farklı kaynak parametreleri (elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı) ile birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri kıyaslandığında; en yüksek sertlik değeri, çok fazla bir fark olmamakla birlikte, 6 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak zamanında ölçülmüştür. Burada, esas metal  $113\pm 5$  HV, ITAB  $128\pm 5$  HV ve kaynak çekirdeği ise  $136\pm 5$  HV olarak ölçülmüştür. En düşük sertlik değeri ise, 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak zamanında (esas metal  $110\pm 5$  HV, ITAB  $115\pm 5$  HV ve kaynak çekirdeği  $126$   $HV\pm 5$ ) ölçülmüştür.

Kaynak parametrelerinden elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının, kaynaklı bağlantıların sertlik değişimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; gerek artan elektrod kuvveti, gerek kaynak akımı ve gerekse kaynak zamanının artmasıyla, kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerlerinin çok belirgin olmamakla beraber artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş numunelerden elde edilen sertlik grafiklerinde dikkat çeken bir başka nokta da, kaynak çekirdeğine dik yönde ölçülen sertlik değerleri ile kaynak çekirdeğine paralel olarak ölçülen sertlik değerlerinin birbirlerine yakın değerlerde olmasıdır.

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak bölgelerinden ölçülen sertlik değerlerinin esas metalden daha yüksek olduğu, ayrıca, kaynak parametre değerlerinin artmasıyla da, sertlik değerlerinde bir miktar sertlik artışı olduğu tespit edilmiştir. Buradan, kaynak esnasında kaynak bölgesine verilen ısının etkili olduğu sonucunu çıkarılabilir. Kaynak işlemi esnasında uygulanan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının artmasıyla kaynak bölgesine verilen ısı miktarı

artmaktadır. Yüksek ısı girdisiyle birlikte kaynak bölgesinde ısı daha uzun süre kalmakta, bu da sertliğin azda olsa yükselmesine neden olmaktadır.

Sertlik test sonuçlarına göre kaynak zamanı artışıyla (10, 20 ve 30 çevrim) kaynak çekirdeğindeki sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi ise kaynak sürelerindeki artışla birlikte ısı girdisinin artışına bağlanmaktadır. Ayrıca artan kaynak zamanıyla ITAB'daki sertlik değerlerindeki artış, ısı girdisindeki artışla birlikte ITAB'da tane irileşmesiyle açıklanabilir.

Kaynaklı birleştirmelerin tümünde, kaynak zamanı ve kaynak akımı artışı ile ısı girdisi artmış ve kaynak çekirdeği genişlemiştir. Bu nedenle, kaynak çekirdeğinin sertlik değeri, tutma zamanı boyunca elektrod gücünün sebep olduğu deformasyon sertleşmesinden dolayı esas metal ve ITAB'dan daha yüksek olduğu bulunmuştur. Martin et al. [72], 304 östenitik paslanmaz çelik sacları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve benzer sonuçları rapor etmişlerdir.

Vural and Akkuş [76], galvanizli çelik ve östenitik paslanmaz çelik sacları, 5,5 - 13 kA (0,5 kA artışla) kaynak akımlarında ve 3400 N elektrod gücünde nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Mikrosertlik ölçümleri sonucunda, en büyük sertlik değerleri, kaynak çekirdeğinin ortasında 350 HV olarak ölçülmüştür.

Kahraman [89], ticari saflıkta titanyum sacları, 10 kA sabit kaynak akımında, 2, 4 ve 6 kN elektrod güçlerinde, 5, 15 ve 25 çevrim kaynak zamanlarında ve kaynak atmosferi (argon ve açık hava) değiştirilerek nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Sertlik testlerinde, en yüksek değerler kaynak çekirdeğinden elde edildiği, onu ITAB ve esas metalin takip ettiği, kaynak atmosferinin bağlantı bölgelerinde sertliğe etki etmediği bildirilmiştir.

Hayat [63], kaynak sürelerindeki artışla (10, 15 ve 20 çevrim) kaynak çekirdeğindeki sertlik değerlerinin arttığını gözlemiştir. Bunun sebebi ise kaynak sürelerindeki artışla birlikte ısı girdisinin artışına bağlanmaktadır. Ayrıca kaynaklı bağlantıların en düşük sertlik değerlerinin ana malzemede olduğunu ve ITAB'da sertlik değerlerinin

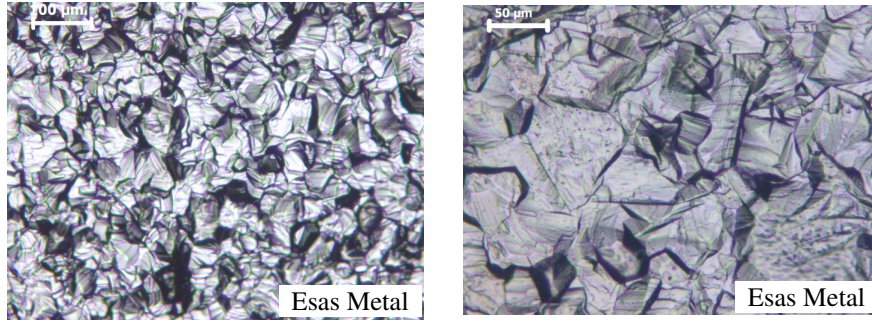


artmaya başladığını ve en yüksek sertlik değerlerine kaynak çekirdeğinde ulaşıldığını bildirmiştir.

Bak [97], IF çeliklerini nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirmiş ve numunelerin mikrosertlik değerlerinde ise tüm kaynaklı numunelerde, kaynak bölgesinin ITAB ve ana malzeme sertlik değerlerinden fark edilir oranda yüksek olduğunu bildirmiştir.

#### 7.4. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

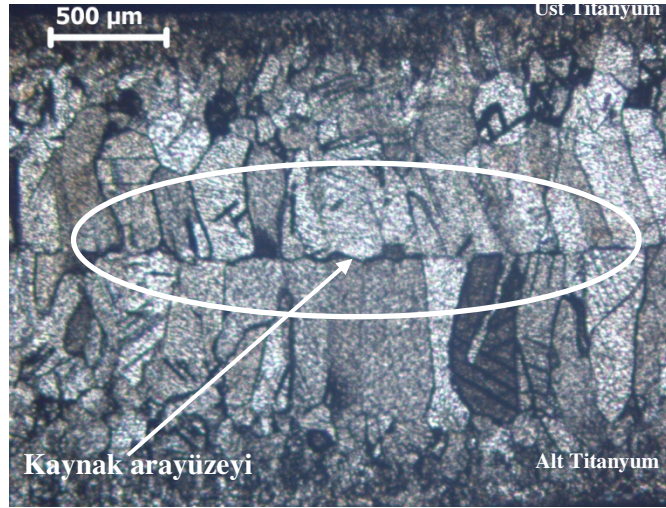
Bu çalışmada, üstün korozyon direncinden dolayı petrol endüstrisinde kullanılan ticari saflıktaki titanyum (Grade 2) sac malzemeler kullanılmıştır. Şekil 7.15’de deneysel çalışmalarda kullanılan titanyum malzemenin orijinal mikroyapısı farklı iki büyütme oranında verilmiştir.



Şekil 7.15. Deneysel çalışmalarda kullanılan titanyum malzemenin mikroyapısı

Şekil 7.15’deki esas metal mikroyapısı görüntüsünden, ince eş eksenli  $\alpha$  (alfa) tanelerinden oluştuğu görülmektedir. Literatürde [1], saf titanyumun 600-700 °C’de tavlaniılarak kullanılması çok yaygın olduğu ve böyle bir ısıl işlem sonucunda mikroyapının ince eş eksenel  $\alpha$  (alfa) taneciklerinden oluşacağı bildirilmiştir.

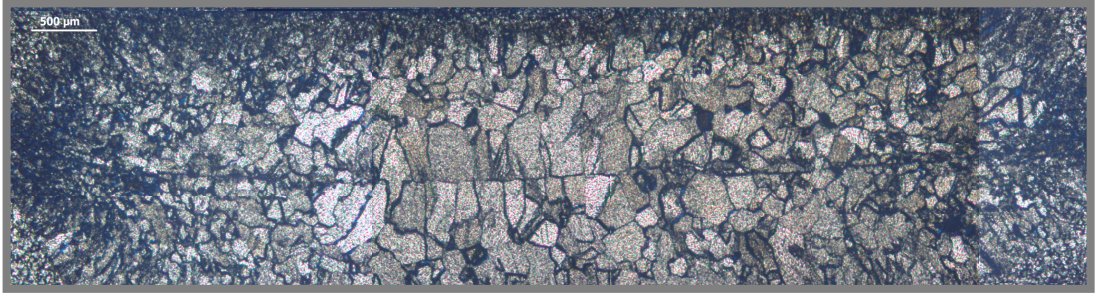
Şekil 7.16’de nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş saf titanyum malzemenin kaynak arayüzeyi mikroyapısı görülmektedir.



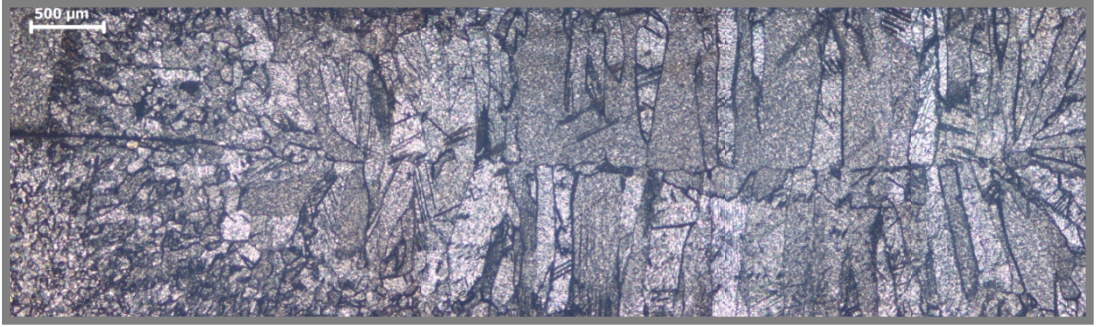
Şekil 7.16. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş saf titanyum malzemenin kaynak arayüzeyi mikroyapısı

Şekil 7.16.'de ok işaretiyle gösterilen bölgede, iki malzemenin birleşim arayüzeyi ve kaynak başlangıç noktası görülmektedir. Bu bölge esas malzemenin mikro yapısından oldukça farklıdır ve taneler ısı merkezine doğru yönelmiştir. Ayrıca yapılan kaynak ile arayüzeyde yeni taneler oluşmuş ve bu taneler kaynak süresince uygulanan ısı girdisine bağlı olarak, orijinal tanelerden daha büyük olduğu görülmektedir. Titanyumun ısı iletimi çok düşük olduğundan, kaynak esnasındaki ısı, kaynak bölgesinde daha uzun süre kalmakta, bu da tanelerin daha fazla irileşmesine sebep olmaktadır.

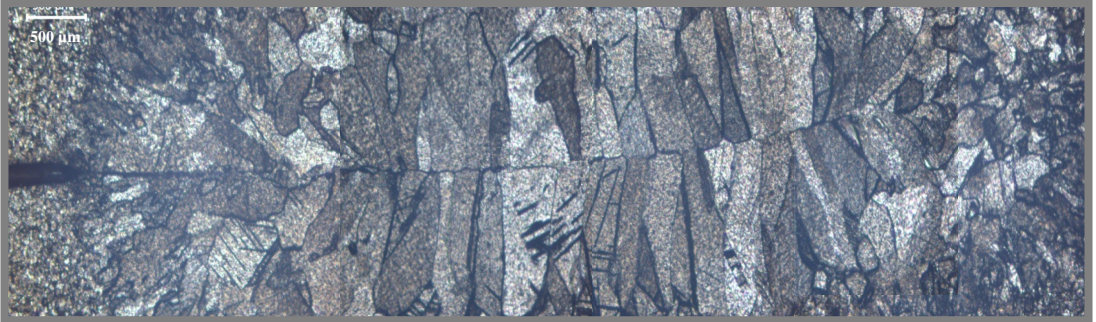
Şekil 7.17'de 3 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, (a) 3 kA, (b) 5 kA ve (c) 7 kA kaynak akımında nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş saf titanyum malzemenin kaynak çekirdeği mikroyapısı görülmektedir.



(a)



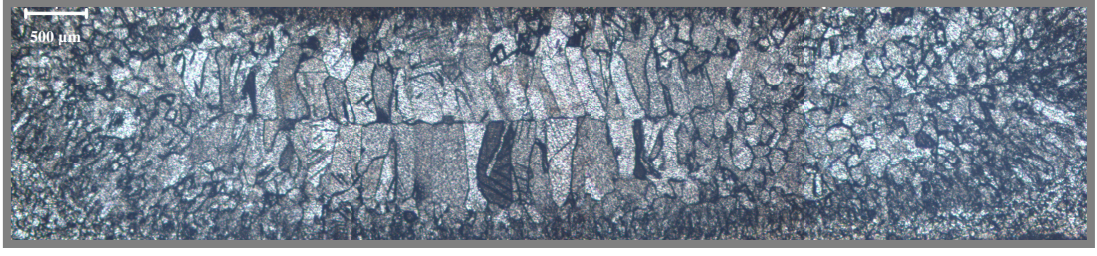
(b)



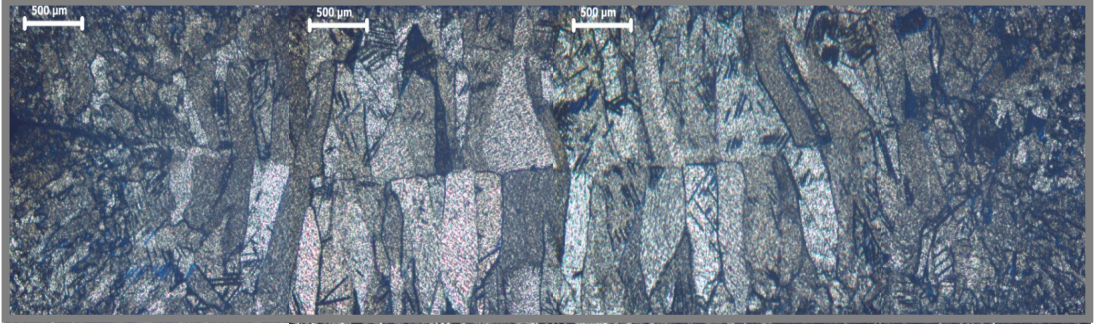
(c)

Şekil 7.17. 3 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, a) 3 kA, b) 5 kA ve c) 7 kA kaynak akımında nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunenin kaynak çekirdeği mikroyapısı

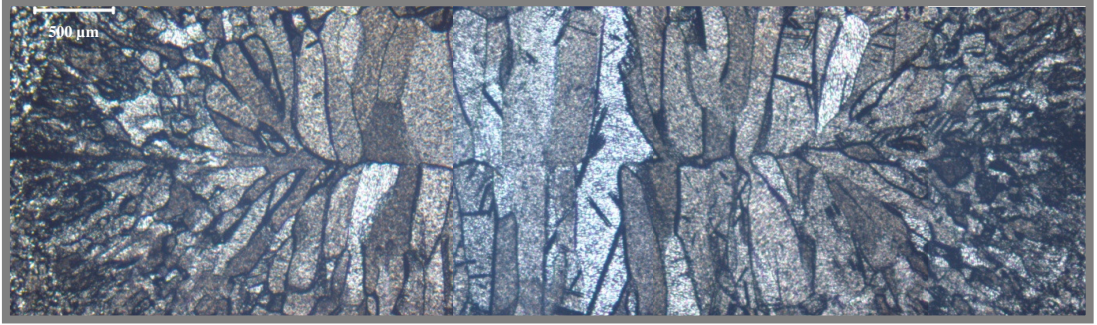
Şekil 7.18'de 6 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, (a) 3 kA, (b) 5 kA ve (c) 7 kA kaynak akımında nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş saf titanyum malzemenin kaynak çekirdeği mikroyapısı görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.18. 6 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, a) 3 kA, b) 5 kA ve c) 7 kA kaynak akımında nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunenin kaynak çekirdeği mikroyapısı

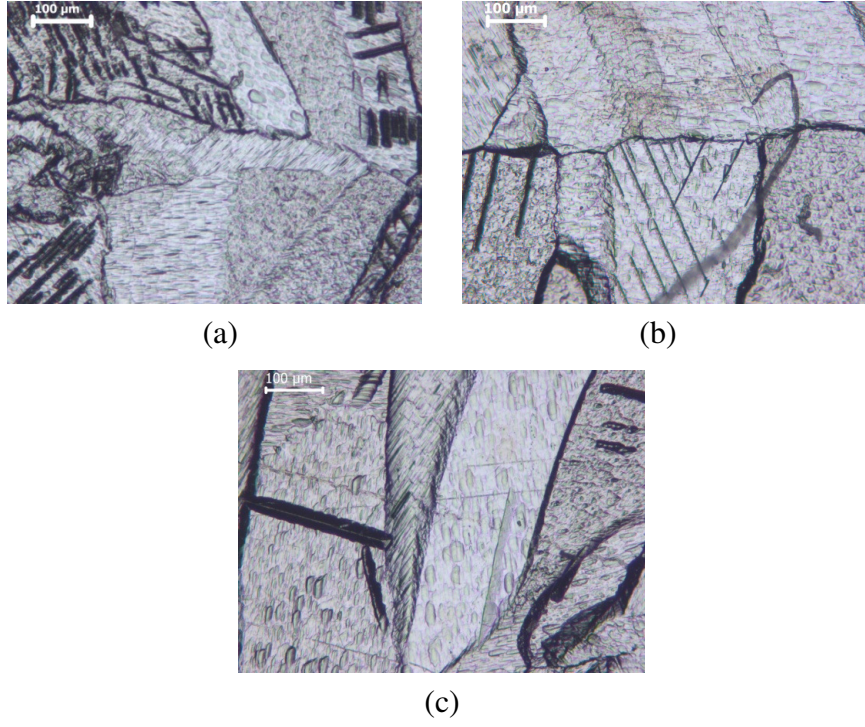
Şekil 7.17 ve 7.18 incelendiğinde, orijinal esas metalden mikroyapısından oldukça farklı bir mikroyapı görülmektedir. Orijinal tanelerden farklı olarak, kaynak süresince uygulanan basınçtan (elektrod kuvveti) dolayı ikizlenme ve ısı girdisinden dolayı tane irileşmesi meydana gelmiştir. Literatürde [10], titanyum malzemelerde ikizlenmenin, uygulanan deformasyondan dolayı oluştuğu bildirilmiştir. Nokta direnç kaynaklı numunelerin mikroyapı görüntülerinden, tanelerin ısı akış yönüne paralel yönlendirilerek oluştuğu görülmektedir. Bu taneler elektrod basınç yönüne paralel uzamıştır ve yüksek elektrod kuvvetlerinde uzama daha belirgindir. Mikroyapı

görüntüleri incelendiğinde, tanelerarası yönlenmeden dolayı tanelerde renk farkı olduğu ve yapının  $\alpha$  (alfa) tanelerinden oluştuğu görülmektedir. Kaynak çekirdeği dışında görülen küçük taneler ise elektrod kuvveti ve ergime hızından dolayı oluşmaktadır.

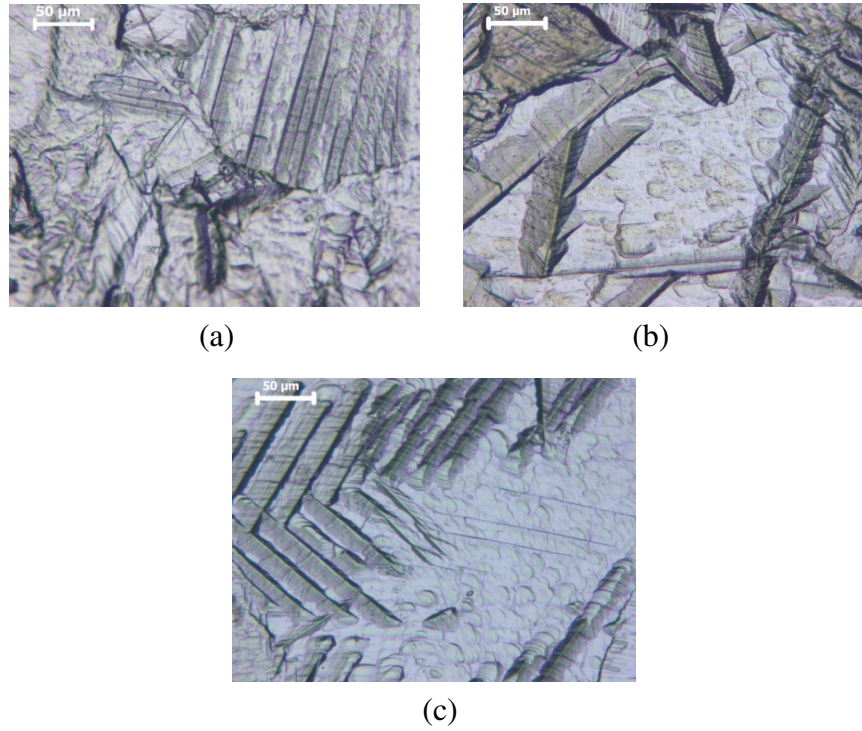
Şekil 7.17’de 3 kN ve Şekil 7.8’de 6 kN elektrod kuvveti, 3 kA (a), 5 kA (b) ve 7 kA (c) kaynak akımlarında kaynak akımlarında nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları ayrı ayrı incelendiğinde, artan kaynak akımı ve kaynak zamanlarıyla tanelerin irileştiği görülmektedir. Şekil 7.17 ve Şekil 7.18 birbiriyle kıyaslandığında ise, artan elektrod kuvvetiyle de tanelerin irileştiği tespit edilmiştir. Artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanıyla, tanelerin irileşmesinin sebebi, artan ısı girdisinin etkisi olarak düşünülmüştür. Ayrıca ısı girdisi artışına bağlı olarak kaynak çekirdeğinin genişlediği görülmüştür. Kaynak işleminde kullanılan ısı girdisi, gerek kaynak çekirdeği gerekse ITAB’da oluşan mikro yapılar üzerinde direkt etkilidir. Literatürde [27], saf titanyum  $\beta$  alanı içinde ısıtılırsa (900-950 °C) hızlı bir tane büyümesi meydana gelir ve soğumayla birlikte kaba tırtıllı  $\alpha$  (alfa) tanelerinin oluşacağı bildirilmiştir.

Şekil 7.19’de 3 kN ve Şekil 7.20’de 6 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, (a) 3 kA, (b) 5 kA ve (c) 7 kA kaynak akımlarında kaynak akımlarında nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapılarında oluşan ikizlenmeler görülmektedir.

Şekil 7.19 ve Şekil 7.20’de verilen 3 kN ve 6 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanında birleştirilen numunelerden elde edilen mikroyapılar kıyaslandığında, 6 kN’da oluşan ikizlenmenin 3 kN’da oluşan ikizlenmeden daha fazla olduğu görülmüştür. Artan elektrod kuvveti ve kaynak zamanı ile deformasyon artması, kaynak bölgesindeki ikizlenmelerin artmasına sebep olmuştur.



Şekil 7.19. 3 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, a) 3 kA, b) 5 kA ve c) 7 kA kaynak akımında nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunenin kaynak çekirdeği mikroyapısındaki ikizlenmeler



Şekil 7.20. 6 kN elektrod kuvveti, 20 çevrim kaynak zamanı, a) 3 kA, b) 5 kA ve c) 7 kA kaynak akımında nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunenin kaynak çekirdeği mikroyapısındaki ikizlenmeler

Lee et al. [86], 5,6 mm kalınlıklı saf titanyum parçalar sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ile birleştirilmiştir. Kaynak çekirdeğinin mikroyapısının, rastgele yönlenmiş kaba taneli ikiz yapıdan oluştuğu ve bu oluşumun, hegzagonal sıkı paket yapılı malzemelerde kayma sisteminin zayıf olmasıyla açılanabileceği rapor edilmiştir.

Kahraman [89], 1,5 mm kalınlıkta ve 100x30 mm boyutlarında ticari saflıkta (Grade 2) titanyum sacları, 10 kA sabit kaynak akımında, 2, 4 ve 6 kN elektrod güçlerinde, 5, 15 ve 25 çevrim kaynak zamanlarında ve kaynak atmosferi (argon ve açık hava) değiştirilerek nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Artan elektrod kuvveti ve kaynak zamanının, kaynak bölgesine uygulanan ısı girdisi arttırdığını sonuç olarak ise tane irileşmesine neden olduğu rapor etmiştir. Mikroyapı deneyleri sonucunda, kaynak süresi boyunca uygulanan basınçtan dolayı, kaynak bölgesinde ikizlenmeler görüldüğünü ve elektrod kuvveti ve kaynak zamanı artışına bağlı olarak ikizlenmelerde de artış olduğunu bildirmiştir.

Hayat [63], Almus [69], Kocabekir [92], Hayat et al. [95], kaynak zamanı artışına bağlı olarak, Vural ve Akkuş [76], Hasanbaşoğlu [96], kaynak akımı artışıyla, ısı girdisinde artış tespit etmişler ve artan ısı girdisinin etkisiyle, birleştirmelerde tane büyümesi olduğunu bildirmiştir.

## BÖLÜM 8

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 1,5 mm kalınlıkta ve 100x30 mm boyutlarında ticari saflıktaki (Grade 2) titanyum saclar nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri; 3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5 ve 7 kA kaynak akımı ve 10, 20 ve 30 çevrim kaynak zamanı olmak üzere 18 farklı parametrede gerçekleştirilmiş ve kaynaklı bağlantılar üzerinde kaynak parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerin dayanımlarını belirlemek için kaynaklı numunelere çekme-makaslama testi uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin kaynak çekirdeği çapları dijital kumpasla, elektrod dalma derinlikleri ise mikrometreyle ölçülmüştür. Ayrıca, kaynaklı numunelerin, kaynak bölgelerinde sertlik ve optik mikroskop çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Ticari saf (Grade 2) titanyum sacların nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirildiği ve farklı kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı bu çalışma sonucunda;

- 1- Farklı parametreler kullanılarak nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerin tümünde birleşme gerçekleşmiştir.
- 2- Artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanıyla birleştirilen numunelerin çekme-makaslama dayanımları artmıştır.
- 3- Çekme-makaslama testi sonrası, kopma, ITAB'da meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, kaynak dikişlerinin güvenli olduğunu göstermektedir.
- 4- Artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanıyla, ısı girdisi artmış ve buna bağlı olarak, kaynak çekirdeği çapı ve elektrod dalma derinliği artmıştır.



- 5- Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinden lölölürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir.
- 6- Mikroyapı incelemeleri sonucunda, kaynak çekirdeğinde oluşan tanelerin irileştiği gözlenmiştir. Ayrıca, kaynak süreci boyunca deformasyondan dolayı ikizlerin oluştuğu, aynı zamanda elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı artışıyla ikizlenmelerin arttığı belirlenmiştir.
- 7- Bu alışma sonucu elde edilen veriler dikkate alındığında, kaynak zaman aralıkları azaltılarak çalışmalar yapılması, ayrıca kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi için kısa ömürlü yorulma deneylerinin yapılması önerilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Kahraman, N., “Titanium levhaların patlamalı kaynak yöntemi ile farklı metallerle birleştirilmesi ve arayüzey özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-23 (2003).
2. Büyük Larousse., *Milliyet Yayınları*, 22. Cilt, 11557, (1986).
3. Türkmen, M., “Toz enjeksiyon kalıplama metodu ile üretilen metalik esaslı malzemelerin biyokorozyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 12-17 (2007).
4. Doğan, İ., “Titanium malzemelerin (kalite 265.2) TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-4 (2002).
5. Ürgen, M., “Modern yüzey işleme teknolojileri ve Türkiye’deki gelişmeler”, *9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 333-350 (1997).
6. Gourd, M. L., “Kaynak teknolojisinin esasları”, Çeviri: Eryürek İ. B., Bodur O., ve Dikicioğlu A., *Birsen yayınevi*, İstanbul, 2-4 (1996).
7. Gültekin, N., “Kaynak tekniği” *Yıldız Üniversitesi Yayınları*, İstanbul, 1-27 (1985).
8. Eryürek, B., “Elektrik direnç nokta kaynağında temas direncinin etüdü”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 10-46 (1976).
9. Agwan, V.S., “Resistance welding reliable technology for productivity”, *Tool and Alloy Steels*, 243-247 (1989).
10. Smith, W. F., “Structure and properties of engineering alloys”, 2<sup>th</sup> edition, *McGraw-Hill, Inc.*, New York, 433-439 (1993).
11. Erdoğan, M., “Mühendislik malzemelerinin yapı ve özellikleri”, Cilt 2, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 447-492 (2001).
12. Yue, T. M., Yu, J. K., Mei, Z. and Man, H. C., “Excimer laser surface treatment of Ti-6Al-4V alloy for corrosion resistance enhancement”, *Materials Letters*, 52 (3): 206-212 (2002).
13. Fujii H., Takahashi K., and Yamashita Y., “Application titanium and its alloys for automobile parts”, *Nippon Steel Technical Report*, 88: 70-75, (2003).

14. Ensarioğlu C., ve Çakır M. C., “Titanium ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü 1. Bölüm.”, *Mühendis ve Makina*, 46 (546): (2005).
15. Xu J. H., and Geng G. S., “Experimental study on the milling of a Ti-beta”, *Journal of Materials Processing Technology*, (129): 190-192 (2002).
16. Askeland D.R., “The science and engineering of materials” Vol. 1, *Nobel Yayın Dağıtım*, 194-288 (1998).
17. Aparicio, C. F., Gil, J., Fonseca, C., Barbosa, M., and Planell, J. A., “Corrosion Behaviour of Commercially Pure Titanium Shot Blasted with Different Materials and Sizes of Shot Particles for Dental Implant Applications”, *Biomaterials*, 24 (2): 263-273 (2003).
18. Grosogeat, B., Reclaru, L., Lissac, M., and Dalard, F., “Measurement and evaluation of galvanic corrosion between titanium/Ti6Al4V implants and dental alloys by electrochemical techniques and auger spectrometry”, *Biomaterials*, 20 (10): 933-941 (1999).
19. Gurrappa, I., and Gogia, A. K., “Development of oxidation resistant coatings for titanium alloys”, *Materials Science and Technology*, (17): 581-586 (2001).
20. Barreda, J. L., Santamaria, F., Azpiroz, X., Irisarri, A. M. and Varona, J. M., “Electron beam welded high thickness Ti6Al4V plates using filler metal of similar and different composition to the base plate”, *Vacuum*, (62): 143-150 (2001).
21. Erdoğan, M., “Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri”, Cilt 1, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 288-293 (1998).
22. Gökdemir, Y., “Saf ti ve Ti6Al4V alaşımının yüksek sıcaklıkta oksidasyon davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-26 (2006).
23. Ezugwu E. O., Bonney J., and Yamane Y., “An overview of machinability of aeroengine alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, (134): 233-253 (2003).
24. Li, Z., Gobbi, S. L., Norris, I., Zolotovskiy, S. and Richter, K., H., “Laser welding techniques for titanium alloy sheet”, *Journal of Materials Processing Technology*, (65): 203-208 (1997).
25. Gonzalez, J. E. G. and Mirza-Rosca, J. C., “Study of the corrosion behaviour of titanium and some of its alloys for biomedical and dental implant applications”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 471 (2): 109-115 (1999).
26. Boyer, R. R., “Titanium and titanium alloys”, *ASM Metal Handbook*, (9): 458-462 (1985).

27. Karaca, S., “Titanyum ve alaşımlarına uygulanan yzey mzhendisliği teknikleri”, Yzsek Lisans Tezi, *Erciyes ziversitesi Fen Bilimleri Enstitzsz*, Kayseri, 1-10 (1994).
28. Polmear, I. J. “Light alloys: metallurgy of the light metals”, *Edward Arnold* London, (1): 163-213 (1981).
29. Bargel H. J., and Schulze G., “Malzeme bilgisi cilt-2”, zeviri: Gzlez, ř., ve Aran, A., *MBEAE Matbaası*, Gebze, 34-65 (1987).
30. İşler, B., “Titanyum alaşımlarının ısıl işlem ve mekanik zellikleri”, Yzsek Lisans Tezi, *İstanbul ziversitesi Fen Bilimleri Enstitzsz*, İstanbul, 16-18 (1999).
31. Tanrızver, K., ve Taşçı, A., “Titanyum ve alaşımlarının ısıl işlemi”, *Mzhendis & Magazin*, (58): 126-134 (1997).
32. Akman, E., “Ti6Al4V titanyum alaşımlarının atımlı Nd:Yag lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi”, Yzsek Lisans Tezi, *Kocaeli ziversitesi Fen Bilimleri Enstitzsz*, Kocaeli, 58-59 (2006).
33. Oh, J., Kim, N. J., Lee, S. and Lee, E. W., “Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds”, *Materials Science & Engineering A*, 340 (1-2): 232-242 (2003).
34. Threadgil, P. L., “Non-aerospace applications of titanium”, *TMS Annual Meeting*, San Antonio, Texas, 71-80 (1998).
35. Codaro, E. N., Nakazato, R. Z., Horovistiz, A. L., Ribeiro, L. M. F., Ribeiro, R. B. and Hein, L. R. O., “An image analysis study of pit formation on Ti-6Al-4V”, *Materials Science and Engineering A*, 341 (1-2): 202-210 (2003).
36. “Titanium and titanium alloys”, *ASM Metal Handbook*, Committee on Titanium, 8<sup>th</sup> edition, Ohio, (1): 1147-1153 (1962).
37. Phillips, D. H., “Selection and weldability of advanced titanium-base alloys”, *ASM Metals Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, (6): 524-527 (1993).
38. şule, Y., şirin., Nejat, Y. Sarı., ve Kaluç, E., “Titanyum ve alaşımlarının kaynağı 1”, *Makine Magazin*, (19): 62-70 (1997).
39. Oğuz, B., “Demirdışı metallerin kaynağı”, *Oerlikon Yayınları*, İstanbul, 548-602 (1990).
40. Webster, R. T., “Welding of titanium alloys”, *ASM Metals Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, (6): 783-786 (1993).

41. Baeslack, W. A., Davis, J. R. and Cross, C. E., “Selection and weldability of conventional titanium alloys”, *ASM Metals Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, 8<sup>th</sup> edition, (6): 507-523, (1993).
42. Anık, S., Anık, E., ve Vural M., “Titanium ve alaşımlarının kaynak kabiliyeti”, *Mühendis ve Makine*, 27(318): 18-22 (1986).
43. Şirin, Ş. Y., Sarı, N. Y. ve Kaluç, E., “Titanium ve alaşımlarının kaynağı II”, *Makine Magazin Dergisi*, (20): 52-62 (1997).
44. Lathabai, S., Jarvis, B. L., and Barton, K. J., “Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium”, *Materials Science and Engineering A*, (299): 81-93 (2001).
45. Paton, B. E., Zamkov, V. N., and Prilutsky, V. P., “Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium”, *Welding Journal*, 37-41 (1996).
46. Althouse A. D., Turnquist C. H., Bowditch W. A., and Bowditch K. E., “Gas tungsten arc welding”, *Modern Welding*, 507-508 (1993).
47. Kahraman, N., ve Gülenç B., “Modern kaynak teknolojisi”, *Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti.*, Ankara, 1-99 (2009).
48. Anık, S. ve Vural, M., “Gazaltı ark kaynağı (TIG, MIG-MAG)”, *Gedik Eğitim Vakfı Yayını*, İstanbul, (3): 222-223 (1997).
49. Chen, S. J., and Devlation, H. J., “Microstructure and mechanical properties of electroslag welds in Ti-6Al-4V alloys”, *Welding Research Supplement*, 319-325 (1990).
50. Richard, S.S., “The procedure handbook of arc welding”, *The Lincoln Electric Company*, Cleveland, Ohio, 554-555 (1995).
51. Karadeniz, S., “Plazma tekniği”, *Makina Mühendisleri Odası*, Ankara, (137): 57-60 (1990).
52. Williams, J. L., and Belov, A. F., “Titanium and titanium alloys, volume 1”, *Titanium org.*, 1107-1119 (1996).
53. Yamagishi T., Ito M., and Oshida Y., “Tensile strength and elongation of laser welded titanium”, *Dental materials*, (24): 42-51 (1999).
54. Liu J., Watanabe I., Yoshida K., and Atsuta M., “Joint strength of laser-welded titanium”, *Dental materials*, (18): 143-148 (2002).
55. Elmer, J. W., and Kautz, D. D., “Fundamentals of friction welding”, *ASM Metals Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, 8<sup>th</sup> edition, (6): 150-155 (1993).

56. Ateş, H., “Ferritik süper alaşımların sürtünme kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16-17 (2002).
57. Anon, W., “Explosive welding”, *Welding Journal*, 80 (5): 50-51 (2001).
58. Yener, S., “Otomotiv sanayinde kullanılan direnç nokta kaynak elektrodu ömrünün deneysel analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 13-37 (1999).
59. Saghafian, H., and Kheirandish, S., “Correlating microstructural features with wear resistance of dual phase steel”, *Materials Letters*, (61):14-15 (2007).
60. Gürdaş, M., “Kaynaklı konstrüksiyonlarda alüminyum ve alaşımlarının kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-65 (1999).
61. Anık, S., “Kaynak teknolojisi el kitabı”, *Gürış Makine ve Montaj Sanayi A.Ş.*, 175-193 (1983).
62. Anık, S., Anık, E., ve Vural, M., “1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı, Cilt 1”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 186-195 (1993).
63. Hayat, F., “Çift-fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında mho ile kaynak süresinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 28-49 (2005).
64. “Welding brazing, and soldering, resistance spot welding”, 9<sup>th</sup> edition *ASM Metals Handbook*, U.S.A., 469-493 (1983).
65. Welding handbook, *AWS V.4.7. Edition*, Miami U.S.A, 19-20 (1984).
66. Anık, S., “Kaynak tekniği el kitabı”, *Gedik Holding Yayını*, İstanbul 124-131 (1991).
67. Yükler, İ., “Alaşımsız dual fazlı çeliklerin mekanik ve nokta kaynak özellikleri” Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 23-47 (1993).
68. Eryürek, İ.B., Bodur O., ve Dikicioğlu A., “Kaynak teknolojisinin esasları”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 190-192 (1996).
69. Almus, Z., “Nokta direnç kaynağında ara bağlayıcının birleşme özelliklerine etkilerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-63 (2006).

70. Marashi, P., Pouranvari, M., Amirabdollahian, S., Abedi, A., and Goodarzi, M., "Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels", *Materials Science and Engineering A*, (480): 175-180 (2008).
71. Fukuomoto, S., Fujiwara, K., Toji, S., and Yamamoto, A., "Small-scale resistance spot welding of austenitic stainless steels", *Materials Science and Engineering A*, 492 (1-2): 243-249 (2008).
72. Martin, O., Tiedra, P. D., Lopez, M., San-Juan, M., Garcia, C., Martin, F., and Blanco, Y., "Quality prediction of resistance spot welding joints of 304 austenitic stainless steel", *Materials and Design*, 30 (1): 68-77 (2008).
73. Özyürek, D., "An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel", *Materials and Design*, (29): 597-603 (2008).
74. Sun, D. Q., Lang, B., Sun, D. X., and Li, J. B., "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded magnesium alloy joint", *Materials Science and Engineering A*, (460-461): 494-498 (2007).
75. Hasanbaşoğlu, A., and Kaçar, R., "Resistance spot weldability of dissimilar materials", *Materials and Design*, (28): 1794-1800 (2007).
76. Vural, M., and Akkuş, A., "On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, (1-6): 153-154 (2004).
77. Aslanlar, S., Uğur, A., Öz Saraç, U., İlhan, E., and Demir, Z., "Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding", *Materials and Design*, (28): 2-7 (2007).
78. Aslanlar, S., Uğur, A., Öz Saraç, U., and İlhan, E., "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding", *Materials and Design*, (29): 1427-1431 (2008).
79. Hasanbaşoğlu, A., Kaçar, R., Gündüz, S., ve Gülenç, B., "Akım şiddetinin AISI 304 - IF 7114 direnç kaynaklı birleştirmeleri özelliklerine etkisi", *Kaynak Teknolojisi V. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, 45-52 (2005).
80. Anık, S., ve Gülbahar, B., "%17 kromlu ferritik paslanmaz çelik sacların nokta direnç kaynağında çekme-makaslama kuvveti ile çekirdek boyutları arasındaki ilişkinin etüdü", *II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı*, İstanbul, 94-105 (1989).
81. Atasoy, E., "Titanyum ve düşük karbonlu çelik çiftinin arabağlayıcı kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 38-40 (2007).

82. Atasoy, E., and Kahraman, N., “Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer”, *Materials Characterization*, 59 (10): 1481-1490 (2008).
83. Gülenç, B., “Difüzyon sert lehimlemesi ile titanyum ve düşük karbonlu çelik malzemelerin birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *ODTU Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 5 (1): 22-28 (2003).
84. Li, C., Muneharua, K., Takao, S., and Kouji, H., “Fiber Laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium”, *Materials and Design*, 30 (1): 109-114 (2009).
85. Wang, S.H., Wei, M.D. and Tsay L.W., “Tensile properties of lbw welds in Ti–6Al–4V alloy at evaluated temperatures below 450 °C”, *Materials Letters*, (57): 1815– 1823 (2003).
86. Lee, W. B., Lee, C. Y., Chang W. S., Yeon, Y. M., and Jung, S. B., “Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium”, *Materials Letters*, (59): 3315-3318 (2005).
87. Meshram, S. D., Mohandas, T., and Madhusudhan, Reddy, G., “Friction welding of dissimilar pure metals”, *Journal of Materials Processing Technology*, (184): 330-337 (2007).
88. Yung, W. K. C., Ralph, B., Lee W. B., and Fenn R., “An investigation into welding parameters affecting the tensile properties of titanium welds”, *Journal of Materials Processing Technology*, (63): 759-764 (1997).
89. Kahraman, N., “The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets”, *Materials and Design*, (28): 420-427 (2007).
90. Aslanlar, S., Demirhan, N., Karabaş, V., ve İlhan, E., “Farklı kalınlıklardaki galvaniz kaplanmış kromatlı mikro alaşımlı çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetinin çekme sıyırma dayanımına etkisi”, *Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi Bildiri Kitabı*, Kütahya, 85-92. (2000).
91. Chuko, W. L., and Gould, J. E., “Development of appropriate resistance spot welding practice for transformation-hardened stells, *Supplement to the welding journal*, 1-5 (2002).
92. Kocabekir, B., Kaçar, R., Gündüz, S., and Hayat, F., “An effect of heat input, weld atmosphere and weld cooling conditions on the resistance spot weldability of 316l austenitic stainless steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, (195): 327–335 (2008).
93. Hayat, F., Demir, B., ve Aslanlar, S., “Nokta direnç kaynak süresinin IF 7114 çeliği birleştirmelerinin mekanik özelliklerine etkisi”, *4. Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Karabük, 243-248 (2007).



94. Hayat, F., ve Demir, B., “Galvaniz kaplamalı-kaplamasız DP450 çelik sacının nokta direnç kaynaklı birleştirmelerinin incelemesi”, *12. Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 498-504 (2008).
95. Hayat, F., Demir, B., Acarer, M., and Aslanlar, S., “Effect of weld time and weld current on the mechanical properties of resistance spot welded IF (DIN EN 10130–1999) steel, *Kovove Materials*, 47 (1): 11-17 (2009).
96. Hasanbaşoğlu, A., “Direnç kaynak yöntemiyle birleştirilen IF çelikleri ile östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 34-123 (2005).
97. Bak, A., “Arayer atomu içermeyen (IF) çeliklerde ve bu çeliklerin nokta direnç kaynaklı bağlantılarında deformasyon yaşlandırmasının mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 99-101 (2010).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Yakup KAYA 31.12.1980 tarihinde KARABÜK'te doğdu. İlkokul ve ortaokul öğrenimi aynı şehirde tamamladı. Karabük Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümü'nden mezun oldu. 2000 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon Meslek Yüksek Okulu Elektrik Bölümü'nü kazandı ve mezun olarak Elektrik Teknikerliği diplomasına sahip oldu. 2003 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesini Metal Öğretmenliği Bölümü'nü kazandı ve 2006 yılında "iyi" derece ile mezun oldu. 2007 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Eğitimine başladı. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Eğitimine devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Teknik Eğitim Fakültesi  
Metal Eğitimi Bölümü  
Balıklarkayası Mevkii 78050 / KARABÜK

Tel : 0 505 696 69 61

E-posta : ykaya@karabuk.edu.tr