

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

**MOTOR KAM SENSÖRLERİNİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA  
KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK  
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Uğur NAKAŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Erdiñ İLHAN**

**Ocak 2021**

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MOTOR KAM SENSÖRLERİNİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA  
KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK  
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur NAKAŞ

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 20/01/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından  
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Salim ASLANLAR	Başarılı
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Erdiñç İLHAN	Başarılı
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY	Başarılı

## **BEYAN**

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

Uğur NAKAŞ

20/01/2021

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Erdiñ İLHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Litaratür araştırmalarımnda, deneysel uygulamalarda ve hemen her konuda yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İmalat Mühendisliğı Bölüm Başkanı Prof. Dr. Salim ASLANLAR'a , bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın meslektaşım Melih KEKİK'e ve Sırma AYDIN'a teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmamda ve hayatımın her anında, manevi açıdan bana destek olan sevgili ailem; Sami ve Sevil NAKAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
KISALTMALAR .....	v
SİMGELER .....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
GRAFİK LİSTESİ .....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY .....	xiii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
-------------	---

### BÖLÜM 2.

MOTOR KAM MİLİ SENSÖRÜ .....	3
2.1. Kam Milinin Kısa Geçmişi.....	3
2.2. Motor Kam Milinin Yapısı.....	5
2.2.1. Motor kam mili imalat metotları .....	7
2.2.2. Motor kam millerinin montajlı imalatı.....	9
2.2.3. Montajlı imalat yöntemleri.....	10
2.3. Kam Milli Pozisyon Sensörü ve Önemi .....	14
2.4. Kam Millerinde Pozisyon Belirleme .....	15
2.4.1. Mekanik pozisyon sensörleri.....	16
2.4.2. Kapasitif pozisyon sensörleri .....	16
2.4.3. Hall etkisi pozisyon sensörleri .....	17

### BÖLÜM 3.

ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI.....	19
3.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı.....	19
3.2. Direnç Nokta Kaynağı Oluşumu .....	21
3.3. Kaynak Ekipmanı Donanımı .....	22

3.4. Direnç Nokta Kaynak Ekipmanlarındaki Kontrol Yapıları.....	22
3.5. Direnç Nokta Kaynağı Mekanik Yapısı .....	24
3.6. Direnç Nokta Kaynağı Elektrik Devre Yapısı.....	25
3.7. Direnç Nokta Kaynak Birleşiminin Oluşumu .....	26
3.8. Direnç Nokta Kaynağı Çevrimi.....	27
3.9. Direnç Nokta Kaynağının Uygulama Alanları.....	29
3.10. Elektrik Nokta Direnç Kaynağı ile Lehim Birleştirmeleri .....	29
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>DİRENÇ NOKTA KAYNAĞININ PARAMETRELERİ .....</b>	<b>31</b>
4.1. Kaynak Akımı .....	31
4.2. Çevirim Süresi.....	32
4.3. Elektrotlar .....	33
4.3.1. Elektrot malzemesi.....	33
4.3.2. Elektrot dizaynı .....	34
4.4. Elektrot Baskı Kuvveti .....	35
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>DİRENÇ NOKTA KAYNAKALARININ MEKANİK TESTLERİ .....</b>	<b>37</b>
5.1. Test Tipleri .....	37
5.2. Soyma testi .....	37
5.3. Keski testi.....	38
5.4. Çekme testi .....	38
<b>BÖLÜM 6.</b>	
<b>TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU.....</b>	<b>41</b>
6.1. Taguchi Yöntemi.....	41
6.2. Ortogonal Diziler.....	41
6.3. S/N Oranı.....	42
<b>BÖLÜM 7.</b>	
<b>DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>44</b>
7.1. Malzemeler .....	44
7.2. Spot Kaynak Ekipmanları .....	45
7.3. Taguchi Ortogonal Dizi ve Deney Parametrelerinin Belirlenmesi .....	46
7.4. Deney Parçalarının üretilmesi .....	47
7.5. Laboratuvar Test Ekipmanları ve Test Süreci .....	47
7.6. Çekme Testi Sonuçları .....	50
7.7. Optimum Parametrelerin Belirlenmesi.....	52
7.7.1. Belirlenen optimum parametrelerin deneysel teyidi .....	53
<b>BÖLÜM 8.</b>	
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>55</b>

<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>58</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>62</b>



## KISALTMALAR

AHSS	: Gelişmiş Yüksek Mukavemet Çelikleri
ANOVA	: Varyans Analizi
CMOS	: Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletkeni
DC	: Doğru Akım
ECM	: Elektronik Motor Kontrol Sistemleri
F-Testi	: İstatiksel Dağılım Sınaması
MAG	: Aktif Gaz Koruması Altında Yapılan Kaynak
S/N	: Sinyal-Gürültü Oranı
TSD	: Toplam Serbestlik Derecesi
ÜÖM	: Üst Ölü Merkez



## SİMGELER

A	: Amper
a	: Optimum Seviyedeki Ortalama S/N Oranı
Al	: Alüminyum
b	: Kesik Koni Taban Çapı
C	: Karbon
CO <sup>2</sup>	: Karbondioksit
Cr	: Krom
d, d <sub>m</sub> , d <sub>a</sub>	: Dış Çap
dB	: Gürültü Seviyesi
D <sub>i</sub>	: İç Çap
Hz	: Frekans
K	: Isı Sabiti
kA	: Kilo Amper
kVA	: Görünür Trafo Gücü
Li	: Ortogonal seri
mm	: Milimetre
MPa	: Basınç – Mega Paskal
ms	: Mili Saniye
η <sub>j</sub>	: S/N Oranı
η <sub>m</sub>	: Toplam Ortalama S/N Oranı
N	: Newton
n	: Test Sayısı
η*	: Tahmini S/N Oranı
Ni	: Nikel
P	: Elektrot Kuvveti
p	: Özgül Isı Direnci
Q	: Isı

R, Rm	: Direnç
s	: Et kalınlığı
T	: Periyod
T, t	: Zaman
V	: Voltaj
yi	: Ortalama Kalite Karakteristik Değeri
Zn	: Çinko



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 7.1: Proses değişkenleri ve deneyde kullanılan seviyeler.....	46
Tablo 7.2: L9 Ortogonal dizi yapısı. ....	47
Tablo 7.3: Deneylerden elde edilen Çekme Mukavemetleri.....	51
Tablo 7.4: Deney sırası ile S/N oran karşılıkları.....	51
Tablo 7.5: Parametrelerin S/N Değerleri. ....	51
Tablo 7.6: Doğrulama Deneyi sonuçları. ....	54

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1: Villard de Honnecourt'ın kam mekanizması.....	3
Şekil 2.2 Vanoccio Biringuccio'un kağıt mili kam mekanizması.....	4
Şekil 2.3: El-Cezeri yüzen muzik otomatı tasviri .....	4
Şekil 2.4: Kam mili yapısı ve bileşenleri .....	6
Şekil 2.5: Motor bloğunda konumlandırılmış ve silindir kapağı bölgesinde konumlandırılmış kam mili yapısı.....	6
Şekil 2.6: Sensör makarası (Dişlisi).....	7
Şekil 2.7: Döküm Metodu ile imal edilmiş motor kam milleri.....	8
Şekil 2.8: Bir milin press ile parçaya çakılması ve oluşan yüzey kuvvetleri.....	11
Şekil 2.9: Genleştirici iş takım ile montajlama işlemi detayı.....	11
Şekil 2.10: Cidar genişletme metodu ile montajlama işlemi detayı.....	12
Şekil 2.11: Hidrolik basıncı iletmekte kullanılan bir mandrel .....	13
Şekil 2.12: Yüksek hidrolik basınçla cidar genişletme işlemi detayı.....	13
Şekil 2.13: Sıcak geçme işlem basamakları. ....	14
Şekil 2.14: İçten yanmalı motorlarda kam mili sensör şeması.....	15
Şekil 2.15: Kam mili sensörlerinin çalışma prensibi. ....	15
Şekil 2.16: Kapasitif sensör çalışma prensibi. ....	16
Şekil 2.17: Hall etkisi ile voltaj oluşumu. ....	17
Şekil 2.18: CMOS teknolojisi ile üretilmiş silikon Hall etkisi sensör örnekleri.....	17
Şekil 2.19: Direnç nokta kaynağı ve enjeksiyon kaplama işlemi tamamlanmış Motor Kam Mili Sensörü.....	18
Şekil 3.1: Direnç nokta kaynağı .....	21
Şekil 3.2: Kaynak Kontrol yapısı .....	23
Şekil 3.3: Direnç nokta kaynak makinesi tipleri (a) Külbütör tipi (b) Düz etkili tabanca tipi (c) Dengeleme tabancası tipi (d) Sıkıştırma tabancası tipi ve (e) Ayaklı kaynakçı tipi .....	24
Şekil 3.4: Temel bir direnç nokta kaynak makinesi detayı. ....	25
Şekil 3.5: Direnç nokta kaynak makinesi elektrik devre yapısı. ....	25
Şekil 3.6: Bir direnç nokta kaynak sistemindeki toplam direnç bileşenleri.....	27
Şekil 3.7: Bir direnç nokta kaynak birleşiminin oluşumu.....	27
Şekil 3.8: Direnç nokta kaynağı çevriminin aşamaları .....	28
Şekil 3.9: Direnç nokta kaynağında lehimleme ile birleştirilmiş malzemelerin mikroyapısı .....	30
Şekil 4.1: Avrupa standardı elektrot şekilleri.....	35
Şekil 4.2: Elektrot baskı kuvvetleri gösterimi.....	36
Şekil 5.1: Soyma testinin uygulama gösterimi.....	37
Şekil 5.2: Keski testinin uygulama gösterimi .....	38
Şekil 5.3: Çekme Testi uygulama gösterimi. ....	39
Şekil 5.4: Çekme testi sırasında şekil değiştirme eğilimi. ....	40

Şekil 7.1: FECPH054 Terminali, Gümüş Kaplamalı Bakır-Çinko Alaşım (CuZn30/ R270).....	44
Şekil 7.2: Terminal Ayak yapısı ; Kalınlık 0.8 mm, genişlik 0,8 mm. ....	44
Şekil 7.3: Üç ayaklı Hall etkisi sensörü, Kalay kaplı Bakır Nikel Alaşım. ....	45
Şekil 7.4: Sensör ayak yapısı; Kalınlık 0,25 mm, genişlik 0,8 mm. ....	45
Şekil 7.5: Kaynak makinesi : Miyachi IPB-5000A , 10kA.....	46
Şekil 7.6: Kaynaklanmış terminal-sensör örneği. ....	47
Şekil 7.7: Çekme Testi Ekipmanı - Ametek LS1 , Kapasite 250N. ....	48
Şekil 7.8: Çekme testi. ....	48
Şekil 7.9: Yüzey Parlatma Ekipmanı: MetsPre , 100-1380 rpm. ....	49
Şekil 7.10: Dijital Mikroskop- Keyence VHX-2000 , 100-1000 dijital büyütme.....	49
Şekil 7.11: Oluşan kaynak birleşimi (lehimleme) yapısı (yatay ve dikey kesitlerde).....	50
Şekil 7.12: Çekme testi sonrası kopma bölgesi detayı (x150 büyütme). ....	50



## GRAFİK LİSTESİ

Grafik 7.1: Proses Parametre S/N ortalamalarının gösterimi.....	52
Grafik 7.2: Çekme mukavemeti S/N ortalama oranları - normal olasılık grafiği. ....	53



# MOTOR KAM SENSÖRLERİNİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

## ÖZET

Elektrik direnç nokta kaynağı, çoğunlukla Otomotiv sanayinde metal-metal birleştirme proseslerinde yaygın olarak başvurulan bir birleştirme işlemidir. Bu işlemle ilişkili önde gelen problemler, proseste gürültü yani değişkenlik oluşturan birçok farklı parametrenin bulunması ve bu parametrelerin farklı varyasyonlarına göre kaynak kalitesine farklı farklı etki etmeleridir. Fazla kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot baskısı hem kaynatılacak malzemeler üzerinde hem de oluşan kaynak birleşiminde olumsuz etkiye sebep olarak kaynak kalitesini düşüreceği gibi aynı zamanda düşük seviyede kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot baskısı da benzer şekilde kaynak birleşim kalitesini olumsuz etkilemekte ve yetersiz çekme mukavemeti oluşturmaktadır. İyi kalitede kaynak birleşimi elde edebilmek için optimum parametrelerin ayarlanması ve prosesin robust hale getirilmesi şarttır. Bu çalışmada en yüksek kaynak kalitesini sağlamak adına, Taguchi metodu kullanılarak motor kam sensörleri birleştirilmesinde kullanılan elektrik direnç nokta kaynağı prosesi parametrelerinin optimizasyonu için yapılan bir deneysel araştırma sunulmaktadır. Deneyde gümüş kaplamalı Bakır-Çinko alaşım terminal yapısı ile, kalay kaplı Bakır Nikel alaşım sensör ayakları direnç nokta kaynağı ile birleştirilmektedir. Deneysel çalışmada kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot baskı kuvveti değişken parametreler olarak seçilmiştir. Çalışmada, Taguchi metoduna göre L9 ortogonal deneysel tasarım dizisi ve optimum parametreleri belirlemek için Sinyal-Gürültü (S/N) oranı ile En büyük-En iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Tespit edilen optimum parametrelere göre yapılan deneysel doğrulama testinde çıkan sonuçlar, kaynak bölgesindeki çekme mukavemetinde oluşan artışı ve Taguchi yönteminin geçerliliğini doğrulamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrik direnç nokta kaynağı, Taguchi metodu, S/N oranı, kaynak parametre optimizasyonu.

# **OPTIMIZATION OF WELDING PARAMETERS IN MOTOR CAM SENSORS WHICH COMBINED WITH ELECTRICAL RESISTANCE POINT WELDING**

## **SUMMARY**

Electrical spot resistance welding is a joining process that is widely used in metal-metal joining processes, mostly in the automotive industry. The leading problems associated with this process are the presence of many different parameters that create noise in the process and different effects on the welding quality according to different variations of these parameters. Excessive welding current, welding time and electrode pressure will reduce the welding quality by causing a negative effect on both the material to be welded and the welding core formed, as well as low welding current, welding time and electrode pressure also negatively affect the welding quality and create insufficient tensile strength. In order to obtain a good quality welding, it is necessary to set the optimum parameters and to make the process robust. This study presents an experimental research for the optimization of electrical spot resistance welding process parameters which used in motor cam sensors production by using Taguchi method in order to provide the highest welding quality. In the experiment, silver plated Copper-Zinc alloy terminal structure and tin plated Copper Nickel alloy sensor feet are combined with spot resistance welding. In the experimental study, welding current, welding time and electrode pressing force were selected as variable parameters. In the study, L9 orthogonal experimental design array according to Taguchi method, Signal-to-Noise (S/N ratio) and Larger is Better approach was used to determine the optimum parameters. The results of the experimental verification test performed according to the determined optimum parameters confirmed the increase in tensile strength in the weld zone and the validity of the Taguchi method.

**Keywords:** Electrical spot resistance welding, Taguchi method, S / N ratio, welding parameter optimization.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Otomotiv sanayi, sürekli yenilenen teknolojiyi takip eden ve her bu gelişmelere hızla ve başarı ile adapte olan bir endüstridir koludur. Bir otomobilin üretiminde binden fazla parça kullanılmakta ve bu parçalar birçok farklı procesten geçmektedir. Bu proseslerden birisi de, aracın gövdesinden koltuğuna, motor aksamlarından elektronik devre elemanlarına kadar kullanılan kaynaklı birleştirme işlemidir. Otomotiv sektöründeki kaynaklı birleştirme yöntemlerinden önde gelen kaynak yöntemleri; MAG kaynağı, saplama ark kaynağı, direnç birleşim kaynağı ve direnç nokta kaynağıdır (Anık ve diğ, 2000).

Günümüzde sadece bir otomobil üretimlerinde bile, nokta direnç kaynağı araç şaseleri, karasorleri ve destek saçları gibi noktalar başta olmak üzere 5000 adetten fazla kez kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebebi ise, nokta direnç kaynağının metal-metal birleştirme yöntemlerinden en ekonomik ve etkin yöntem olmasından kaynaklanmaktadır (Sato ve diğ, 1996; Anık ve diğ, 2000). Bu birleştirme yöntemi sadece ana gövde elemanlarında değil araçta bulunan elektronik devre elemanlarının birleşimlerinde de rol oynamaktadır.

Montaj ve imalatın en temel birleştirme metotlarından olan, elektrik direnç nokta kaynağının uygulanmasında tıpkı diğer montaj ve imalat yöntemlerinde olduğu gibi çeşitli problemler ile karşılaşmaktadır. Düşük karbonlu kaplanmamış çeliklerin kaynatılma işlemi sırasında yaşanan ergime kaynak prosesinin parametrelerinin doğru olarak belirlenip belirlenmediği hakkında bize bilgi vermektedir (Ma ve diğ, 2007; Zhang, 1999). Aynı zamanda, yüksek mukavemetli ve kaplama uygulanmış çeliklerde ise, kaynak uygulanan bölgede malzeme kaybı, gözenekleşme, boşluklu yapı (porozite) gibi süreksizlik sebepli oluşumlardan dolayı kaynak mukavemetinde azalma gözlenir. Bu mukavemet azalışının haricinde kaynatılan yüzeyde korozyon oluşum riski artar. Bunun yansira laboratuvar ve işletmelerde kaynak kalitesi belirlemeye yarayan testler

çoğunlukla mekanik olduğundan sonuçlar farklılık gösterebilir. Voltajda oluşan dalgalanmalar, elektrot baskı kuvvetleri ve hatalı tipte elektrot seçimi gibi bir kaynak kalitesine etkisi olan birçok faktör vardır. Bu parametrelerin üretim kalitesini sağlamak için düzenli olarak kontrol edilmesi gerekir (Zhang & Senkara, 2011; Tang ve diğ., 2003).

Otomotiv sanayi başta olmak üzere, pek çok farklı endüstride kullanılan direnç nokta kaynağı prosesi hakkında birçok akademik çalışma yapılmıştır. Çimen ve Akkuş (1999), kaynak akım miktarının ve saç malzeme kalınlıklarının, direnç nokta kaynak birleşimindeki sıcaklık dağılımı ve soğuma hızı üzerindeki yansımalarını araştırılmıştır. Anık ve diğ. (2000), kaynak akım gücünün, elektrik nokta direnç kaynağına ve oluşan çekme-kesme mukavemetine etkisini galvaniz kaplanmalı, krom- mikro alaşımlı saçların üzerinde araştırmıştır. Tang ve diğ. (2003) direnç nokta kaynak makinesinin tip ve mekanik özelliklerinin kaynak kalitesi ve kaynak prosesi üzerine etkilerine dair detaylı bir araştırma yapmışlardır.

Benzer bir çalışmada ise Akkuş ve Vural (2003), direnç nokta kaynağındaki basınç parametresinin ve akım şiddetinin kaynak bölgesinin çekme direncini etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğunu tespit etmiş ve kaynak kalitesi açısından bu parametrelerin devamlı olarak gözlem altında tutulması gerektiğini bildirmişlerdir.

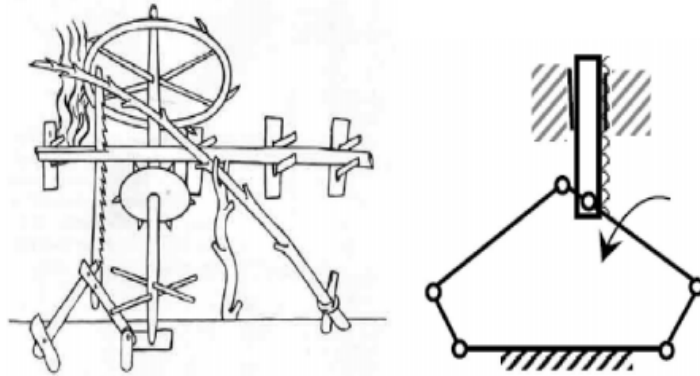
Daha önce yapılan çalışmalarda verilerde de tespit edildiği üzere, kaynak parametrelerinin kaynak kalitesine ve dolayısıyla üretim maliyetlerine doğrudan etkisi vardır. Bu parametrelerin belirlenmesi işlemi, hem zaman hem de maliyet olarak işletmelere önemli yükler getirmekte, daha da önemlisi optimize edilmeyen parametreler kullanıldığında en ufak proses değişkenliğinde kaynak kalitesi bozulmakta ve hurda maliyet oranları artmaktadır. Hazırlanan bu çalışmada kam millerinin pozisyonunu belirlemeye yarayan, Hall etkisi sensörlerinin imalatında kullanılan direnç nokta kaynağı metodundaki parametrelerin kaynak kalitesine etkisi ve bu parametrelerin optimize edilmesinde Taguchi metodunun kullanılması araştırılmıştır. Elde edilecek sonuçlar neticesinde direnç nokta kaynak parametrelerinin hızlı, etkili ve optimum değerlerde tespit edilmesi; dolayısı ile üretim hazırlık süreleri, hatalı parça üretim oranları ve üretim maliyetlerin düşürülmesi hedeflenmektedir.

## BÖLÜM 2. MOTOR KAM MİLİ SENSÖRÜ

### 2.1. Kam Milinin Kısa Geçmişi

Bir kam mili en basit anlatımla, dönen bir nesnedeki dönme hareketini karşılıklı bir harekete dönüştüren çıkıntılı (kamalı) bir yapıdır.

İlk kam millerinin basit mekanizmalarda kullanılması, çok eski dönemlere dayanmaktadır. Müller (1987)'in iddiasına göre, kam mekanizmalarının kökeninin Paleolitik çağa kadar dayandığı ve dolayısıyla kam mekanizmalarının yaklaşık 10.000 yıl önce ortaya çıkmış olabileceğidir. İskenderiye’de, milattan önce birinci yüzyılda bir seviye ayarlama aracı olarak ilkel bir kam mekanizmasının kullanılmış olduğu kabul edilmektedir. (Müller, 1987; Dudita ve diğ, 1989). Aynı referanslarda, Orta Çağ’da körükleri ve dökümhane çekiçlerini çalıştırmak için kam mekanizmalarının kullanıldığını görüyoruz. Bununla birlikte, Avrupa’daki ilk kayıtlı belgele Fransız Girbir mühendis hem de bir mimar olarak yolculukları sırasında gözlemediği bir hidrolik testereyi resmetmiştir (Şekil 2.1) Görüldüğü gibi, eksantrik mili bir hidrolik tekerlek tarafından tahrik edilmektedir. Bu yapı büyük olasılıkla, altı üyeli ve bir prizmatik çifti olan tek serbestlik dereceli bir mekanizma yapısıdır (Meneghetti ve Maggiore, 2011) .



Şekil 2.1: Villard de Honnecourt'ın kam mekanizması (Meneghetti ve Maggiore, 2011).

1276'lı yıllarda İtalya'da bulunan Fabriano şehrindeki bir kağıt üretim değirmeni için Vanoccio Biringuccio tarafından tasarlanmış olan ve hidrolik güçten faydalanarak çalışan yapıda, dönen su çarkından alınan aksenal hareketin çekiçlere yatay salınım hareketi olarak bir kam yapısı ile aktarımı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Vanoccio Biringuccio'un kağıt mili kam mekanizması (Meneghetti ve Maggiore, 2011).



Şekil 2.3: El-Cezeri yüzen muzik otomatı tasviri (Farrukh ibn Abd al-Latif, 1315).

Kam milleri ile ilgili Ortadoğu coğrafyasından en bilinen çalışmalarda El-Cezeri tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan en bilinenlerden 1206 da yapmış olduğu ve tarihteki ilk programlana bilir otomat olarak da atfedilen gölde yüzen müzik otomatıdır (Sharkey, 2007). El-Cezeri'nin çalışması, su akışının saatlik veya yarım saatlik aralıklarla büyük bir tanktan diğerine değiştiği çeşmeleri ve müzikal otomatları kapsıyordu (Şekil 2.3). Bu mekanizmanın çalışması, kam sistemine bağlı yenilikçi hidrolik anahtarlamaların kullanımı sayesinde gerçekleştirildi (Meneghetti ve Maggiore, 2011).

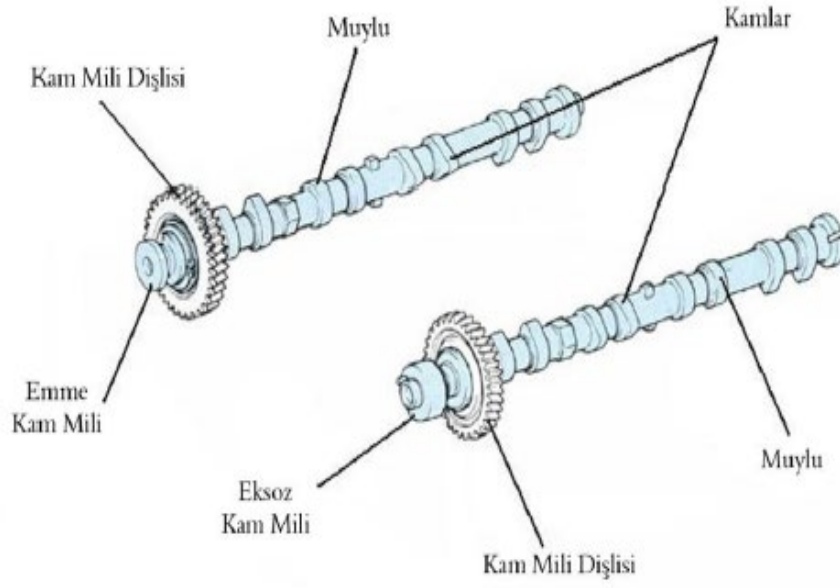
Endüstriyel manada ilk kam mekanizmaları sanayi devriminin başladığı İngiltere ortaya çıkmıştır. 1719'da İngiltere'de John Kay, kam milleri kullanan bir kumaş dokuma makinesi geliştirir (Petrescu & Petrescu, 2019). İnsan gücünden yaralanan bu makine ile beş katlı bir binada. 300'den fazla kadın ve çocuk kadrosuyla dünyanın ilk fabrikası kurulmuş olacaktır.

Görüldüğü üzere kam milleri, kağıt, tekstil, demir, gıda ve diğerleri gibi birçok endüstrinin ve karmaşık mekanizmaların gelişiminde temel bir göreve sahip olmuştur. Çağımızda ise genellikle metal bir silindir üzerinde konumlandırılan çok sayıda metal kam ile, içten yanmalı motorların subap ve egzoz zamanlama kontrollerinde yoğun olarak kullanılmaktadırlar.

## **2.2. Motor Kam Milinin Yapısı**

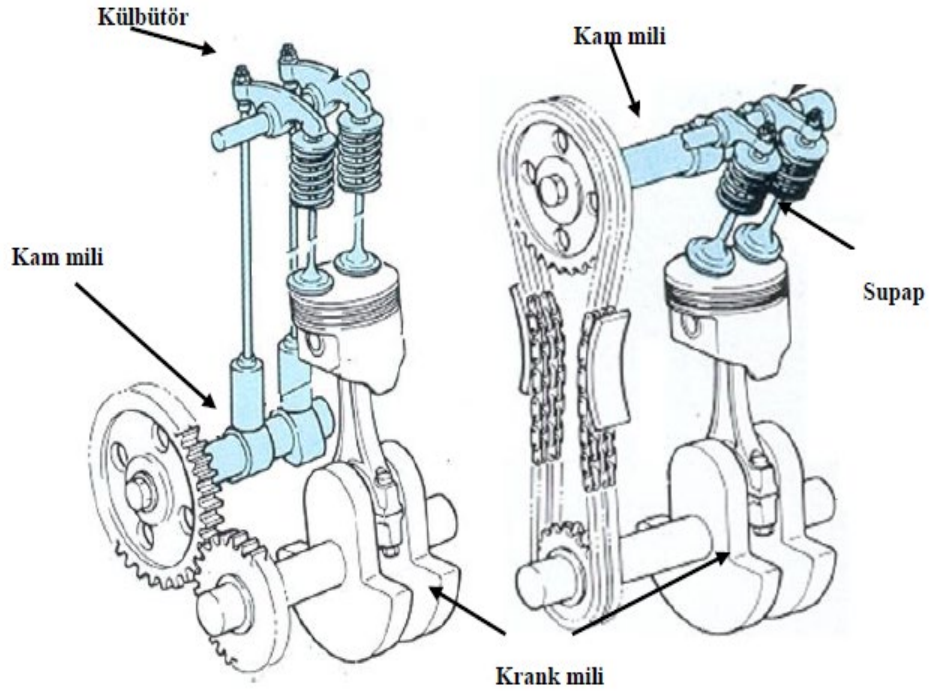
Kam millin bir motordaki ana görevi zamanlama kontrolünü sağlamaktır. Metal silindirik gövde üzerine önceden belirlenmiş açılar ile dizilmiş metal kam yapıları sayesinde motor subaplarının uygun zamanlamada açılması, uygun zamanlamada kapatılması ve istenilen süre boyunca açık kalmasını sağlarlar. Bu zamanlamayı sağlamak için motor shaft milleri ile senkron olarak çalışırlar. Ayrıca kamların yüksek hassasiyette motor içerisinde çalışması için kullanılacakları bölgeye uygun olarak üzerlerine yerleştirilmiş yüksek hassasiyetli yataklar (muylular) bulunur (Şekil 2.4).

Bu bahsedilen ana görevleri haricinden, yapısında bulunan helis dişliler vasıtası ile yağ pompası, yakıt pompası ve distribütör gibi diğer motor elemanlarının çalışmasını sağlarlar (MEB, 2011).



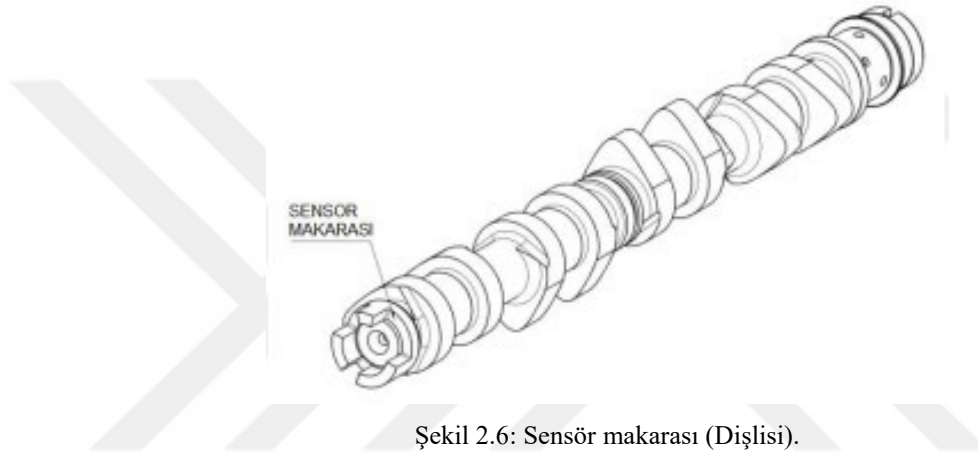
Şekil 2.4: Kam mili yapısı ve bileşenleri (MEB, 2011).

Dört zamanlı motorlarda, motor dizaynına göre minimum bir adet kam mili bulunmaktadır. Seçilen motor dizaynına bağlı olarak, motor bloklarında ya da silindir kapağı bölgesinde konumlandırılabilirler (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Motor bloğunda konumlandırılmış ve silindir kapağı bölgesinde konumlandırılmış kam mili yapısı (MEB, 2011).

Daha önce bahsedilen, ana görevlerine (subab zamanlama, yakıt pompalama, yağ pompalama vb.) ek olarak, özellikle günümüz yeni nesil, elektronik motor kontrol sistemlerine (ECM) sahip olan araçlarda, motor pistonlarının anlık silindir içindeki konumlarını ve dolayısı ile yanma odasındaki sıkışma miktarının hesaplanması ile anlık motor devrinin hesaplanmasına yardımcı olan elektronik kontrol sensörlerine kılavuzluk etmektedirler. Bu işlem için kam milinin bir ucuna ya da her iki ucuna önceden belirlenmiş diş dizaynına sahip sensör makaraları (dişli) takılmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Sensör makarası (Dişli).

### 2.2.1. Motor kam mili imalat metotları

Bir motor kam mili, kamlar, muylular ve diğer dişli elamanları ile bütünleşik bir shaft bölümünü tanımlayan karmaşık bir metal parçadır. Geleneksel imalat yöntemlerinde, motor kam mili istenen konfigürasyonlara ve boyutlara tek bir parçadan imal edilmektedir. Bu imalat metotları, döküme demirden işleme, dövme demirden işleme ve çelik silindir bloktan işleme olarak sıralanabilir (Röhrle, 2002).

Dökme demirden yapılan ve soğutulmuş döküm işlemi kullanılarak üretilen kam milleri (Şekil 2.7), günümüzün hafif benzinli motorlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Üretilen kam mili kalıp modelleri kullanılarak bir kum döküm oluşturulur. Ardından kam mili boşlukları, yüzeyde hızlı katılma elde etmek için soğuk demir döküm metodu kullanılarak dökülür. Bu sayede Rockwell C sertliği, 45'i aşan kam parçası yüzeyleri elde edilir ve motor çalışması sırasında oluşacak aşınmaya karşı yüksek mukavemet sağlanır.





Şekil 2.7: Döküm Metodu ile imal edilmiş motor kam milleri (Röhrle, 2002).

Fakat döküm yöntemi ile üretilen motor kam millerinde yaklaşık 1.000 Mpa'lık yükleme kapasitesi sınırı olduğundan kullanım alanları sınırlanmaktadır.

Dövme imalat metodu ile üretilen çeliklerde, bu kapasite daha yüksektir.  elik kamlar 100Cr6 (DIN 17230) ya da Cf53 (DIN 17212) malzemedен imal edilirler. İmal edilen  elik kamlar 1.800 ila 2.000 MPa arasındaki yükleme kapasitesine sahiptirler.

Dizel motorlarda oluşan yükler, benzinli motorlarda oluşan yüklere göre daha yüksek olduğundan, dövme kam milleri öncelikli olarak bu motorlarda kullanılır. Ancak, bu kam millerinin ağırlıkları fazla olduğundan, ağırlık azaltmak için i  kısımlarının delinmesi gerekmektedir. Buda imalat maliyetini ve karmaşıklığını arttırmaktadır

Bu imalat yöntemlerine ek olarak,  elik silindir bloklardan motor kam mili geometrisi şeklinde yapıyı, talaşlı imalat yöntemleri ile işlemek ve daha sonrasında malzeme ve yüzey sertleştirme işlemlerine tabi tutarak kam mili imalatı yapılabilir. İmalat hassasiyet gerekliliği, imalat hızındaki düşüklük ve bu sebeplere bağlı maliyet yüksekliliği sebebi ile çok yaygın olarak kullanılmamaktadırlar.



Bahsedilen bu geleneksel yöntemlerle imal edilen motor kam millerinin imalat süreleri uzun ve birkaç aşamadan meydana gelen karmaşık yöntemlerden oluşmaktadır. Bu nedenle de yüksek üretim maliyetlerine sebebiyet vermektedirler. Kaldı ki başarıyla dövüldüğünde, döküldüğünde ve işlendiğinde bile, iç kusurlardan dolayı kırılmaya daha yatkın olma dezavantajına sahiptirler (Hiroshi, 1976).

Bu tür yapısal dezavantajları aşmak için, yeni ve günümüzde genellikle tercih edilen imalat metodu, kam millerinin montajlı imalat metodudur.

### **2.2.2. Motor kam millerinin montajlı imalatı**

Döküm veya dövme imalat yöntemleri yapısı gereği ile yalnızca bir malzemeden motor kam mili üretilmektedir ve buda uygulama alanlarına sınırlamalar getirmektedir. 1976 yılında ortaya çıkartılan ve 90'lı yıllara kadar geliştirilip endüstriyel uygulamasına geçilen (Bechtold ve Körner, 2007), kam millerinin montajlı imalat metodunda ise, kam mili farklı çeşitlerde malzemelerin kombinasyonu ile üretilmesi ile yükleme kapasiteleri arttırılmakta ve aynı zamanda kam mili ağırlığı da azalmaktadır.

Kam mili üreticisi Mahle/Süko firması, 1982 gibi erken bir tarihte, binek otomobillerin benzinli motorları için montajlı kam milleri geliştirmeye başladı (Röhrle, 2002). Günümüz otomotiv sanayinde kullanılan motor kam milleri çoğunlukla montajlı imalat metodu ile üretilmektedir.

Montajlı imalat metodunun diğer metotlara göre başlıca avantajları şunlardır;

- İmalatları hızlı ve kolaydır,
- Üzerlerindeki elemanlar farklı malzeme ve sertlik karakteristiklerine sahip olarak üretilirler.
- Döküm kam millerine göre aşınmaya karşı daha dirençlidir,
- Boru tipi mil kullanılması ile geleneksel dövme imalat kam millerinden %45'e varan oranlarda daha hafiftirler (Bechtold ve Körner, 2007),
- Ağırlık azaltımı sebebi ile güç ve yakıt tasarrufu avantajları yüzünden otomotiv endüstrisinde ön plana çıkmaktadırlar,
- Sağladıkları yakıt tasarrufu sebebi ile içten yanmalı motorların CO2 salınımının azaltılmasına yardımcı olurlar,

- Tek gövde çelik silindir bloklarından üretilen motor kam millerine benzer olarak, oldukça yüksek yükleme kapasitesine sahiptirler ve yüksek dinamik momentleri sorunsuzca iletebilirler (Bechtold ve Körner, 2007).

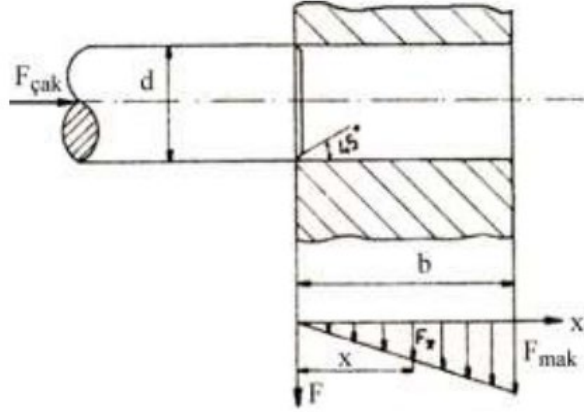
### **2.2.3. Montajlı imalat yöntemleri**

Kam mili montajlı imalat metodunda, her kam mili parçası, kendisine özel olarak tasarlanmış herhangi bir malzemedan yapılabilir. Mil üzerine monte edilecek kamlar ve muylular, arzu edilen motor zamanlamalarını yakalayacak şekilde tam açısal ve aksenal konumlarda bir çelik mil üzerine montajlanır. Bu imalat metodunda sadece motor subap kapakların tam istenilen zamanlamayı yakalamasını sağlamak değil, ayrıca kam ve muylularda elde edilen düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek yüzey sertlikleri değerleri sayesinde, yüzeylerde sürtünme ile oluşan aşınma miktarı ve buna bağlı problemlerin görünmesi de en aza indirgenmiş olur (Hiroshi, 1976).

Montajlı motor kam mili imalat metotlarında, ağırlık azaltma amaçlı olarak montaj şaftı olarak yüksek mukavemetli içi boş çelik boru borular kullanılmaktadır. Daha sonra bu botu şaft elemanın üzerine, sertleştirilmiş ve çeşitli talaşlı imalat metotları ile yüzey pürüzlülüğü azaltılmış olan kam ve muylular parçaları presleme (çakma), cidar genişletme ve sıcak geçirme gibi yöntemler kullanılarak sıkı geçme şekilde

#### **2.2.3.1. Pres (çakama) yöntemi**

Montaj edilecek parçalar arasındaki iç çap ve dış çap arasındaki boyut farklarına (sıkılık) ve bu yüzeyler arasında oluşan yüzey sürtünmelerin moment yüklerini taşıması prensibine dayanır (Şekil 2.8). Bu yöntemde, kam mili çapı üzerine montaj edilecek kam ve muyluların delik iç çaplarına göre daha geniş seçilir daha sonrasında soğuk presleme ile kam ve muylular çelik kam mili üzerine çakılarak monte edilir.

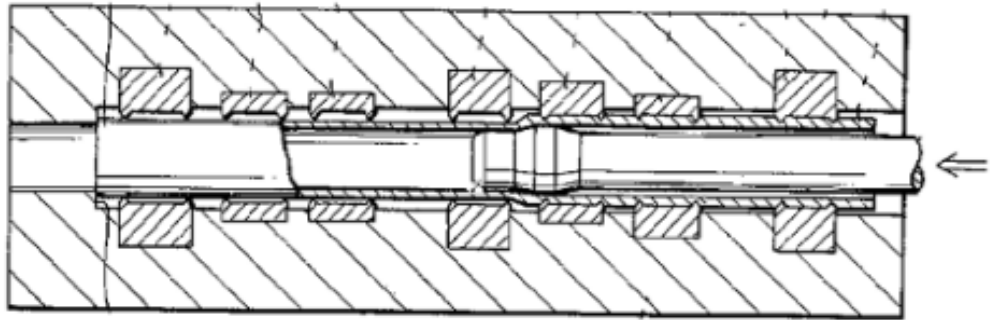


Şekil 2.8: Bir milin press ile parçaya çakılması ve oluşan yüzey kuvvetleri (Çayıroğlu, 2020).

Burada dikkat edilmesi gereken konu pres kuvvetleri ile gerçekteşen çakma işleminin sırasında kam milinde yada monte edilen parçalarda elastik deformasyon limitlerinde kalmak ve plastik deformasyon oluşmamasına özen göstermektir. Plastik deformasyonu oluşması durumunda hem kam mili geometrisi bozulacak hem de malzeme yüzeyinde değişiklik oluşacağından istenilen sürtünme kuvveti ve sıkılık sağlanamayacaktır.

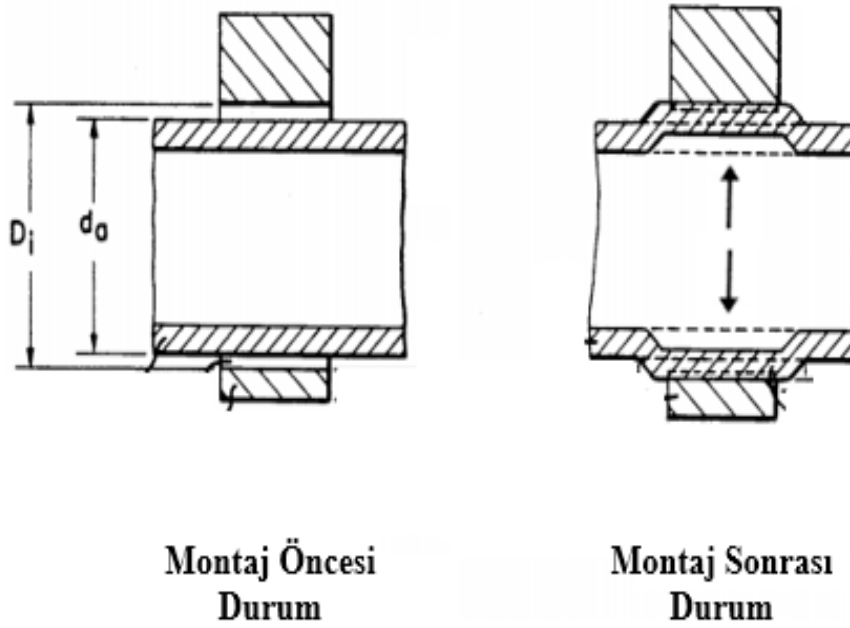
### 2.2.3.2. Cidar genişletme yöntemi

İçten ya da dıştan basınca maruz bırakılan kam mili borusunda, plastik deformasyon oluşması sağlanır. Bu deformasyon sırasında kam ve muylularda sadece elastik deformasyon oluşması istenir. Deformasyonu sağlayan iç veya dış basınçlar seçilen yöntemle göre mekanik olarak genişletirici iş takımları ile veyahut boru içerisinde verilen yüksek hidrolik basınçlı sıvılar ile sağlanır (Şekil 2.9). Bu yöntemde kam mili dış çapı üzerine montaj edilecek kam ve muyluların delik çaplarından belirli ölçüde daha dardır.



Şekil 2.9: Genişletirici iş takımı ile montajlama işleminin detayı (Sugiuchi ve diğ, 1986).

Genleştirme iş takımları ile yapılan birleştirmelerde, kam mili üzerine monte edilecek kam, muyu ve diğer dişli parçalar hareketli bir montaj fikstürüne yerleştirilir ve sonrasında kam boru delik çapına göre geniş dış çapı olan iş takımı baştan sona doğru belirli bir kuvvet ile itilerek boruda plastik deformasyon oluşumu ile dış çap genişletilmesi sağlanır (Şekil 2.10). Böylece kam, üzerine takılmış olan elemanlarla sıkı geçme olarak birleştirilmiş olur.



\*  $D_i$  montajlanacak kam vb. eleman iç çapını ve  $D_a$  ise kam mili borusu dış çapını belirtmektedir.

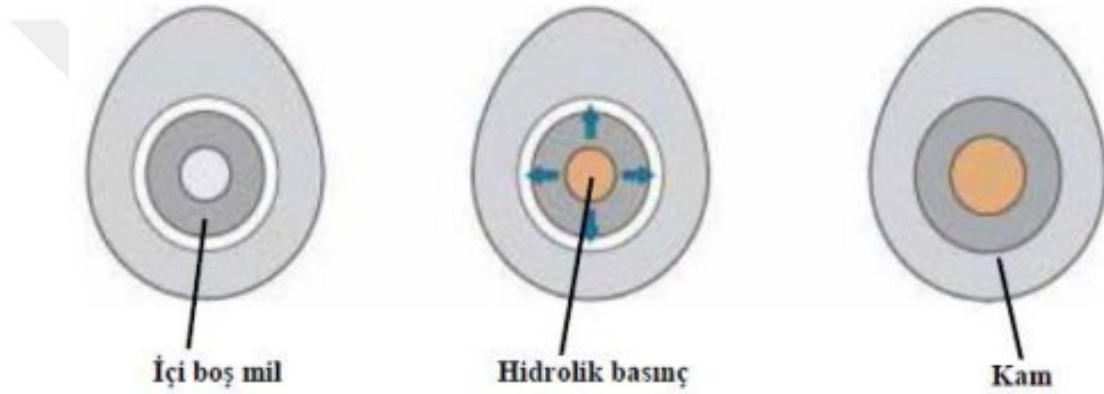
Şekil 2.10: Cidar genişletme metodu ile montajlama işlemi detayı (Hans, 1992).

Yüksek hidrolik basınçlar ile cidar genişletme metodunda ise, mekanik genişletmedeki gibi kam, muyu ve dişli gibi motor kam mili elemanları çelik boru üzerine yerleştirilir. Yine bu yöntemde de oluşturulacak iç basınç ile boru cidarında radyal genişlemeye bağlı oluşacak olan plastik deformasyonla elemanlarla sıkı geçme montaj ilişkisi kurulur. Fakat bu yöntemde kam miline uygun geometride yapılmış olan mandreller (Şekil 2.11) yardımı ile hidrolik basıncın uygulanacağı bölgeler sadece montaj elemanlarının bulunacağı bölgelerle sınırlı kaldığından motor kam boru şaftının yük kapasitesi oldukça arttırılmaktadır (Gary & Abhay, 2001).



Şekil 2.11: Hidrolik basıncı iletmekte kullanılan bir mandrel (Uça, 2016).

Bölgesel olarak oluşan plastik deformasyon ve sıkı geçme işleminin detayları Şekil 2.12’de görülmektedir. Daha yüksek yük kapasitesi ve hassas konumlandırma sağlayabildiğinden, cidar genişletmeli montaj yöntemleri adasında çoğunlukla bu metot kullanılmaktadır.



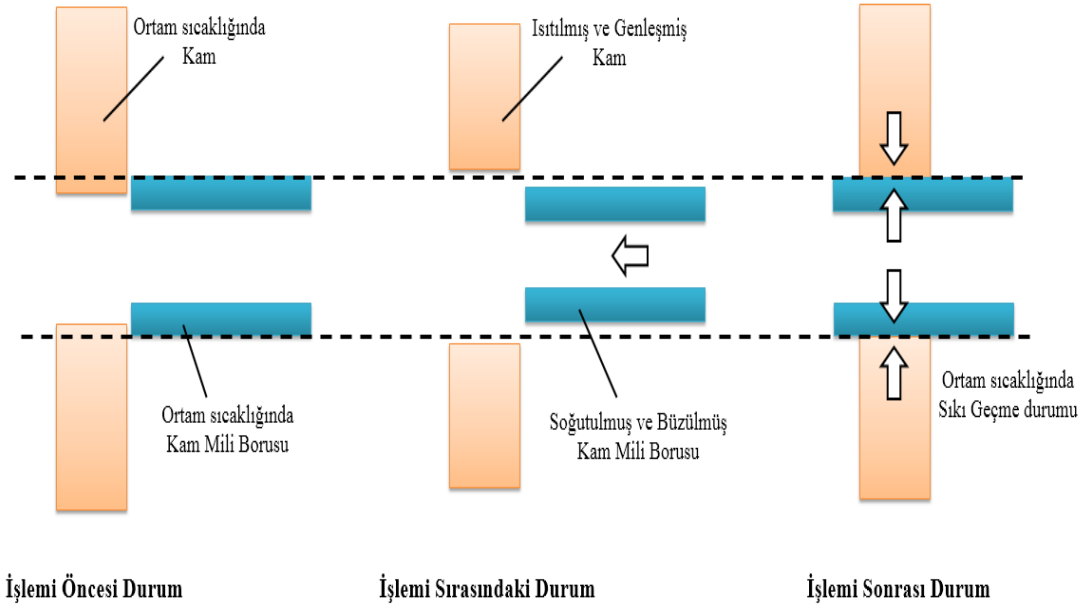
Şekil 2.12: Yüksek hidrolik basınçla cidar genişletme işlemi detayı (Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2011).

### 2.2.3.3. Sıcak geçirme yöntemi

Sıcak geçirme yönteminde, kam mili imalatı termal montaj işlemiyle gerçekleşir. Yani kam miline montajlanmak istenen kam, muylu, dişli ve benzeri bileşenlerin ısıtılması ve borunun soğutulması ile bu malzemelerin ısı karşısında gösterdikleri elastik daralma-genleşme prensibinden faydalanılır. Bu yöntem, montajlanan parçaların, aksel ve açısal boyutların yüksek hassasiyetiyle ve aralarında kısa mesafelerle montajlanmasına imkân verir. Kamlar ve diğer parçalar, hatasız bir motor kam mili montajı oluşturmak için bilgisayar kontrollü özel amaçlı makinelerde art arda monte edilir. Montaj işlemi, eksen hattında  $\pm 0,2 - 0,3$  mm ve radyal olarak da  $\pm 20 - 30$  açısal dakika hassasiyeti gibi yüksek hassasiyetlerde gerçekleştirilir (Röhrle, 2002).

Sıcak geçirme yönteminde kam mili borusunun dış çapı üzerine montajlanacak olan kam ve diğer parçaların delik iç çaplarından daha geniş seçilir. İşlem sırasında montaj parçaları

ısıtılırken, kam mili borusu soğutulmaktadır. Böylelikle kam ve diğer montaj elemanlarının delik çapları genişlerken, kam mili borusunun dış çapında daralma olmaktadır. Tam bu esnada boşluklu geçirme işlemi uygulanır. Sonrasında ortam sıcaklığına geri dönmek isteyen malzemeler birbirlerine sıkı geçme olarak kenetlenirler. Bu işlemin basamakları Şekil 2.13'te gösterilmektedir.

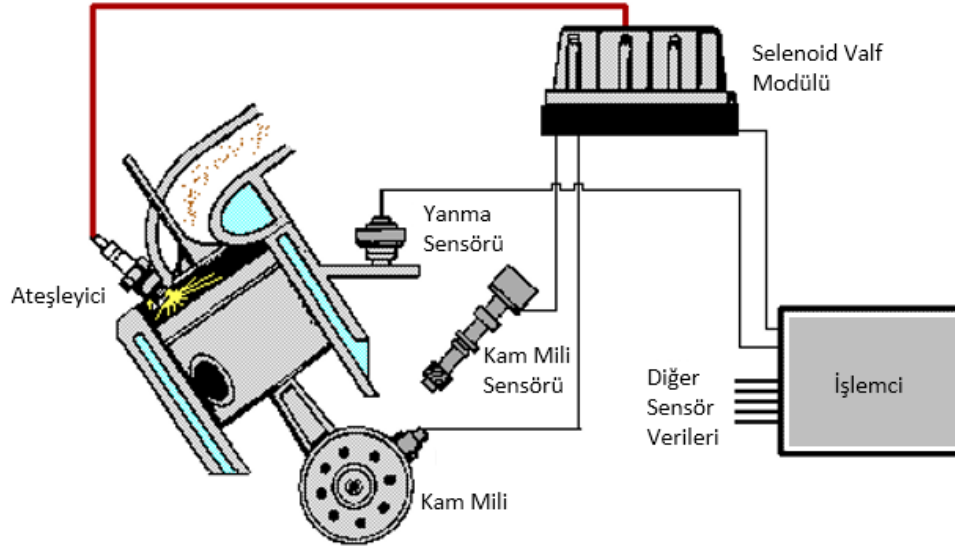


Şekil 2.13: Sıcak geçme işlem basamakları.

### 2.3. Kam Milli Pozisyon Sensörü ve Önemi

İçten yanmalı motorların tasarlandığı gibi çalışması için hava, yakıt ve ateşlenme çok önemlidir. Bu üç unsur, verimli bir yanma için en uygun zamanla ile en uygun miktarda mevcut olmalıdır. Zamanlama çok geç olursa veya bir parça erken başlarsa, herhangi bir yanma oluşmayabilir. Bu zamanlamayı belirleye bilmek için içten yanmalı motorlarda kam mili pozisyon sensörleri kullanılmaktadır.

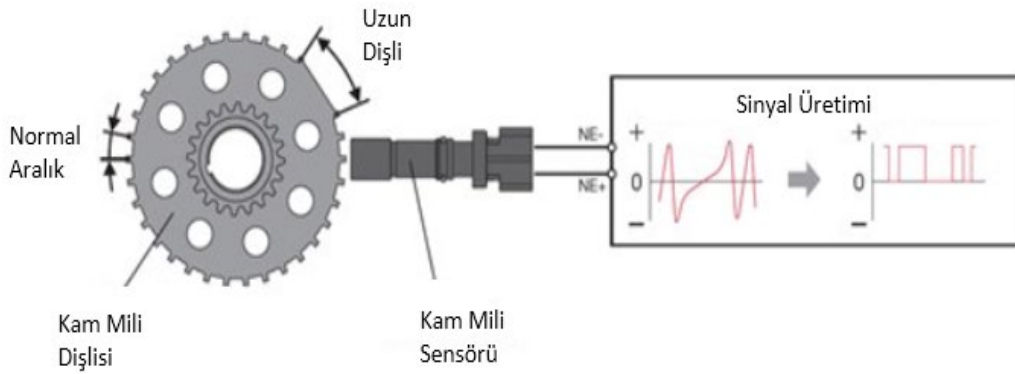
Bu kam mili sensörleri sıkıştırma anındaki konumu belirlemek üzere, kam miline bağlı dişlide bulunan boşluk yada sürekliliği takip eder ve pistonun Üst Ölü Merkeze (ÜÖM) yaklaştığını belirlemek için türüne göre mekanik ya da Doğru Akım (DC)'dan faydalanarak sinyal üretirler. Üretilen bu sinyal motor işlemcisine iletilerek, ateşleme zamanlaması ve yakıt enjekte zamanlaması en optimal biçimde ayarlanır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14: İçten yanmalı motorlarda kam mili sensör şeması.

#### 2.4. Kam Millerinde Pozisyon Belirleme

Kam mili pozisyon sensörleri, özellikle valflerin açılıp kapandığı andaki kam milinin dönüşünü izler. Kam mili sensörlerinin çoğunluğu, kam mili üzerindeki çentikli bir dişlinin hemen üzerine monte edilmiştir ve dişliler arasındaki boşluk miktarına göre kam mili pozisyonlarını tespit ederler (Şekil 2.15).



Şekil 2.15: Kam mili sensörlerinin çalışma prensibi.

Kam mili pozisyon sensörleri, farklı teknolojilerden faydalanarak pozisyon belirleme işlevini gerçekleştirirler. Bunlardan üçü; mekanik pozisyon sensörleri, kapasitif pozisyon sensörleri ve Hall etkisi pozisyon sensörleridir.

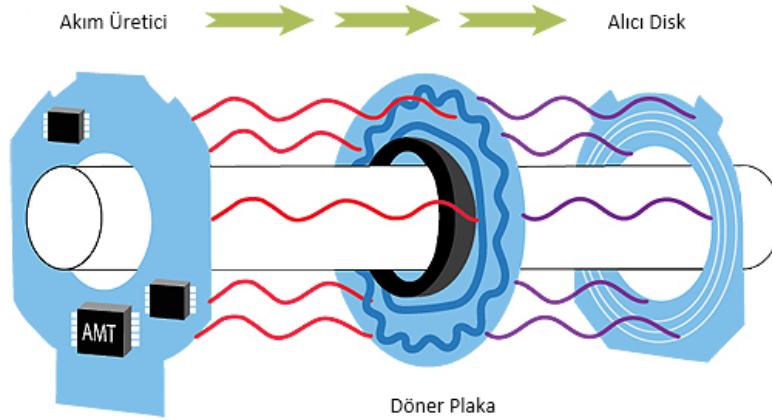
### 2.4.1. Mekanik pozisyon sensörleri

Bu sensörler aynı zamanda potansiyometre olarak da bilinir. Bu sensör tipleri en eski kullanılan sensör tipleridir. Birbirine temas halinde bulunan iki metal plaka arasında oluşan direnç ve direnç değişimi farkından yararlanarak pozisyon belirlemede kullanılırlar. Bu tip sensörün avantajları, düşük maliyetleri ve diğer tüm yöntemlerle göre daha az karmaşık olmalarıdır. Ana dezavantajı, mekanik temas prensibine göre çalışmalarına dayanmaktadır, çünkü bu nedenle çabuk aşınırlar ve mekanik şok ve titreşime karşı yüksek negatif duyarlılığa sahiptirler. Doğrulukları düşüktür ve genelde yavaş hareketli sistemlerde kullanılırlar. Günümüz içten yanmalı motorlarında kullanılmamaktadırlar (Masahiko, 2010).

### 2.4.2. Kapasitif pozisyon sensörleri

İki veya daha fazla farklı potansiyellere sahip elektrik yüklü plakalar, ortada bulunan ve motora bağlı döner plakaya paralel olarak ve yakın mesafede monte edilmiştir. Pozisyonu belirlemede plakalar arasındaki kapasite değişikliği kullanır (Şekil 2.16).

Bu tür bir sensörle ilişkili avantajlar arasında düşük maliyet, üretim kolaylığı, düşük sıcaklık hassasiyeti ve düşük güç tüketimi başta gelmektedir. Bu algılama yönteminin ana dezavantajı, Doğru Akım'a dayanmasıdır. Plakalar arasında üretilen elektrik alan kolayca çevresel alternatif akım (AC) veya doğru akım (DC) gürültüsünden etkilenir. Bu nedenle, bu sensör türü yalnızca birkaç ticari uygulamaya sahiptir (Brasseur, 2001).

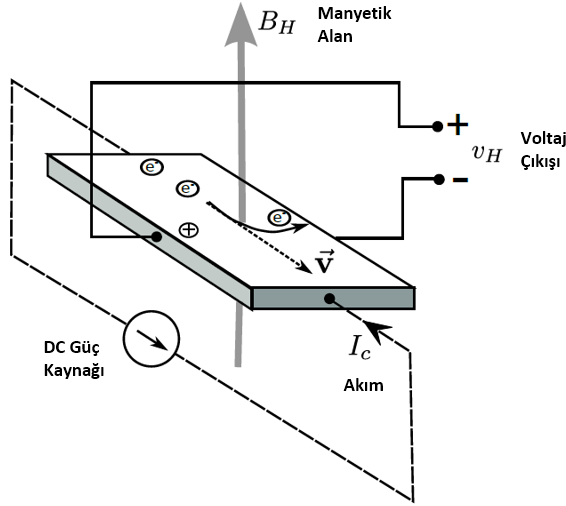


Şekil 2.16: Kapasitif sensör çalışma prensibi.



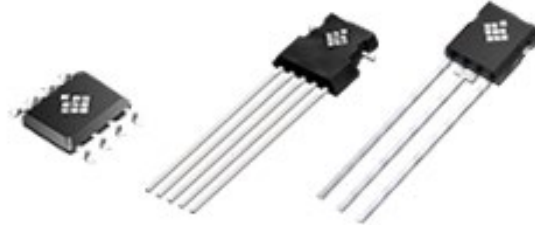
### 2.4.3. Hall etkisi pozisyon sensörleri

Hall etkisi pozisyon sensörü, uygulanan manyetik alana yanıt olarak çıkış voltajı üreten bir dönüştürücüdür (Mohammed, 2003). Yarı iletken veya metal alaşımlardan yapılmıştır. Uygulanan manyetik alanı algılamak için metallerin ve yarı iletkenlerin Hall etkisi prensibinden yararlanırlar (Şekil 2.17).



Şekil 2.17: Hall etkisi ile voltaj oluşumu.

Bu yönteme dayanan bir dönüştürücü, mevcut CMOS (Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletkeni) işlem teknolojisi kullanılarak bir silikon çip üzerinde çok küçük hale getirilebilir (Şekil 2.18). Böylelikle, referans manyetik alanın yönünü ve dolayısıyla iki pozisyon ölçme performansını iyileştirmek için çok sayıda Hall etkili transdüserin 2 boyutlu bir çip yüzeyinde farklı topolojilerde birleştirilmesi mümkündür.



Şekil 2.18: CMOS teknolojisi ile üretilmiş silikon Hall etkisi sensör örnekleri.

Bu yöntemin temel avantajı, CMOS işlemiyle çok küçük bir fiziksel boyutta üretilebilmesi ve diğer analog yada dijital devrelere entegre edilebilmesidir. Böylece üretim ve uygulama maliyetleri büyük ölçüde azalmaktadır.

Bu yöntemin ana dezavantajı, algılama mesafesinin oldukça düşük olması ve sıcaklığa karşı yüksek hassasiyete sahip olmasıdır. Bu dezavantajlara rağmen, son yirmi yılda, kullanımı, özellikle küçük boyutu olması ve iyi bir performans-maliyet oranına sahip olması nedeniyle, motor kam mili ve motor şaftı mili pozisyonlarının algılanması da mevcut olmak üzere birçok çok endüstriyel uygulama için sürekli olarak artmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19: Direnç nokta kaynağı ve enjeksiyon kaplama işlemi tamamlanmış Motor Kam Mili Sensörü.

## **BÖLÜM 3. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI**

### **3.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı**

Otomotiv sanayi, beyaz eşya sanayi, çelik yapı inşaat sektörü, savunma sanayi, makine ekipmanı imalat sektörü, elektrik elektronik sanayi ile uzay ve havacılık sektörüne kadar birçok sektörde metal malzeme ve alaşımlarının birleştirilmesinde tercih edilmektedirler. Bu tercihin en temel sebebi, özellikle et kalınlığı düşük metal malzemelerin kaynaklı birleşiminde kaynak bölgesi dışında malzemeye çok fazla ısı girdisi yaşanması ve malzemelerde plastik şekil değiştirmelerle içyapı tanecik bozuklukları oluşmasıdır. Elektrik direnç nokta kaynaklarında ise kaynak süreleri çok düşüktür ve malzemeye de oluşan sıcaklık düşük seviyelerde tutulabilmektedir. Böylece malzemelerde kalıcı deformasyonlar oluşmamakta ve tanecik yapıları korunmaktadır. Ayrıca diğer metotlara göre çok daha hızlı olmaları ve ek malzeme kullanılmamaları nedeni ile ekonomiktirler (Bechtold ve Körner, 2007).

Üretim operatörleri tarafından, bir düğme ya da ayak pedalı ile çalıştırılan bir kaynak makinesine parçaların yerleştirilmesi ile hızla gerçekleştirile bilen, seri imalata uygun ve pratik bir kaynak metodudur. Hızla gerçekleştirilmesi ve üretim operatörleri için üst düzey eğitim gerektirmediğinden, endüstri de kullanılan diğer kaynak metotlarına kıyasla işçilik maliyeti oldukça düşüktür. Fakat makine teçhizatın ilk yatırım maliyetleri oranından karşılaştırılma yapıldığında bu kaynak yöntemi daha pahalıdır. Bu yöndeki negatif etkisini, MAG yönteminde olduğu gibi ek kaynak malzemesi, parçada ek ağırlık oluşturmaması, yüksek kaynak kalitesi, görsel olarak minimum seviyede iz oluşturması, düşük eğitim ihtiyacı, proses hızının yüksek olması ve ince malzemelerde kullanılabilmesi gibi sağladığı artı nedenlerle kapatmakta ve sektörde büyük ölçüde kullanılmaktadır (Akyol, 2001; Yuan ve diğ, 2017). Direnç nokta kaynağı, kaynatılacak malzemelere baskı uygulandığı sırada, bu malzemelerden yüksek güçte akım geçirilmesi

ve kaynatılacak bu malzemelerin akıma karşı oluşturduğu iç direnç ile elde edilen ısı ile gerçekleştirilen bir kaynaklama metodudur.

$$Q = K \cdot I^2 \cdot R \cdot T \quad (4.5)$$

K : Malzemelerin ısı sabiti

I : Kaynak akımı

R : Sistemin toplam direnci

T : Kaynak süresi

Q : Üretilen ısı

Yukarıda belirtilen formülden (4.5) de anlaşılacağı gibi kaynak işlemi için gereken ısının oluşmasında kaynak akımının önemi büyüktür. Kaynaklama işleminin gerçekleşmesi için öncelikli olarak malzemeler iletken elektrotlar arasında baskı kuvveti ile sıkıştırılır ve malzemeler arası akım iletimi gerçekleşir. Kaynaklanacak malzemelerin toplam dirençleri genelde düşük değerler olduğundan, kaynak için gereken ısıyı üretebilmek adına sistemde yüksek akım şiddeti kullanılmalıdır. Bu yüksek akım elektrik tansformatörlerinden sağlanmaktadır.

Direnç kaynağı uygulama yöntemlerine göre üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bunlar (Akyol, 2001; Yuan ve diğ, 2017):

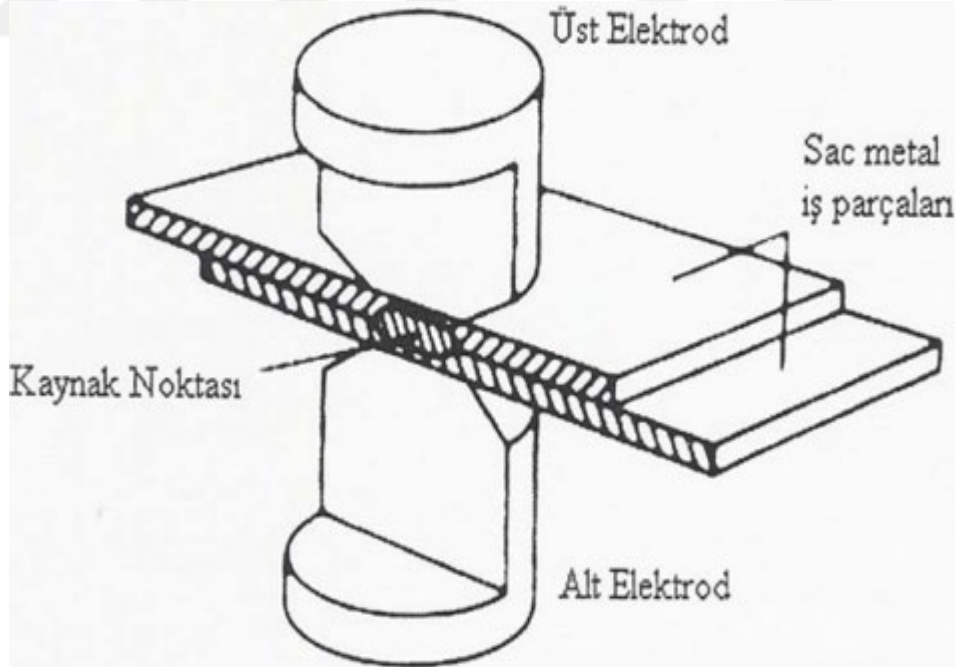
- Direnç nokta (punta) kaynağı,
- Direnç birleşim kaynağı,
- Direnç yakma alın kaynağı.

Hangi direnç kaynak yöntemi olursa olsun, kaliteli kaynak üretimi sağlamak için uygun akım gücü miktarı, uygun kaynaklama süresi ve kaynak yöntemine göre seçilen uygun elektrot ile bu elektrotlardan sağlanan baskı kuvveti ne ihtiyaç duyar.

Direnç kaynak işlemi, kısaca iki katı metalin ergime noktasına erişecekleri seviyede ısı oluşturulması ve iki elektrot arasında baskılanan metaller arası oluşan kaynak banyosunun baskı altında soğuyarak tekrar katılaşması işlemidir. Malzemeler üzerinde oluşacak termal gerilmeleri ve ısı kayıplarını minimumda tutmak için kaynak hızları mümkün olduğunda hızlı olarak gerçekleştirilir (Akyol, 2001; Ramazani ve diğ, 2015).

### 3.2. Direnç Nokta Kaynağı Oluşumu

Direnç nokta kaynağı, direnç kaynağı metotları arasında en sık kullanılan metottur. Kaynatılacak malzemeler iki iletken elektrot arasına konur ve elektrotların uyguladığı baskı kuvveti ile bir temas halinde tutulan kaynatılacak malzemeler üzerinde elektrik akımının geçişi sağlanır. Malzemelerin üzerlerinden geçen akıma karşı oluşturdukları dirençten yararlanarak elde edilen ısı ile kaynak bölgesindeki kaynatılacak malzemelerde ergime sağlanır ve elektrotların oluşturduğu basınç ile iki malzeme birbirine birleştirilir (Ramazani ve diğ, 2015). Malzemeye aktarılan akım gücü, malzemeler arasındaki temas yüzeyinde yoğunlaşarak o bölgede ısı birikimine sebep olmakta ve ergimiş malzeme havuzu meydana getirilmektedir. Elektrotların ergiyik malzeme üzerinde oluşturmuş olduğu baskı kuvveti akım süresince sabit tutulmalıdır. Sonrasında istenilen kaynak kalitesine ulaşmak ve boşluklu kaynak yapısı oluşmaması için kaynak elektrotlarının oluşturduğu baskı kuvveti bir süre daha sabit tutulabilir. Direnç nokta kaynağında tüm kaynak işlemi milisaniyelerle (ms) ifade edilecek kadar hızlı gerçekleşmektedir (Mert, 2004).



Şekil 3.1: Direnç nokta kaynağı (Mert, 2004).

Meydana gelen kaynak birleşiminin boyut ve şekli kullanılan elektrot uçlarının şekli ve boyutu belirlenir. Kaynak işlemi malzemeler arasındaki dirençten çıkan ısı ile

oluşturduğundan kaynak birleşimi iç yüzeylerde oluşur ancak malzemelerin dış yüzeyine (Şekil 3.1). Uygun olarak yapılmış bir direnç nokta kaynağı işlemi sonrasında kaynak birleşimin yan kesit şekli oval, üst kesit şekli ise yaklaşık olarak kullanılan elektrot ucunun şekil ve boyutundadır (Uijl, 2010). Seçilen elektrotlar, kaynak işlemi boyunca üretilecek olan ısıya dayanabilecek malzeme özelliklerine sahip iletken metalden (çoğunlukla bakır alaşımları ve tungsten vb.) imal edilmelidir. Kaynatılacak bölge, kaynatılan malzemelerin kenarlarından yeterli miktarda uzakta seçilmeli ve böylece kaynak işlemi sırasında ergiyik metalden çıkabilecek kaynak kıvılcıklarının (cüruf) önüne geçilmelidir. Önemli bir koşulda, eğer aynı malzemeler üzerinde birden çok nokta kaynağı oluşturulacak ise, bu noktalar arasındaki mesafe, akım atlamalarına (yan devre etkisi) neden olmayacak kadar aralıklı olarak seçilmelidir. (Akyol, 2001; Uijl, 2010).

### **3.3. Kaynak Ekipmanı Donanımı**

Genelde kullanılan direnç nokta kaynak makineleri enerji hatlarından alınan 50Hz değere sahip alternatif akım (AC) 220V ya da 440 V'luk gerilimi, doğru akım (DC) 2 ~ 20 V aralığında bir değere düşürmekte ve elektrotları bu DC akımla beslemektedir. (Akyol, 2001).

Direnç nokta kaynak ekipmanının ana bileşenleri şöyledir;

- Kontrol yapısı: Kaynak akımının başlatılmasını sağlar ve başlangıç sonrasında kaynak akımının elektrotlardan geçeceği süreyi belirler. Elektrotların malzemeler üzerine yapacağı baskı miktarı ve uygulanacak olan kaynak akımı miktarı da bu yapıdan kontrol edilir.
- Elektrik devre yapısı: Konektörler, elektrotlar, transformatör çekirdeği, esnek iletken kablo, birincil ve ikincil sargılardır.
- Mekanik Yapı: Elektrotların bağlandığı ve malzemelere baskı kuvveti uygulayacak kenetleme ve tutucu sistemler (Uijl, 2010).

### **3.4. Direnç Nokta Kaynak Ekipmanlarındaki Kontrol Yapıları**

Direnç Nokta kaynak ekipmanlarındaki kontrolörler üç ana işlemi yerine getiriler oluşurlar:

- Güç devresini kontrol ederek kaynak akımını başlatma ve sonlandırma,

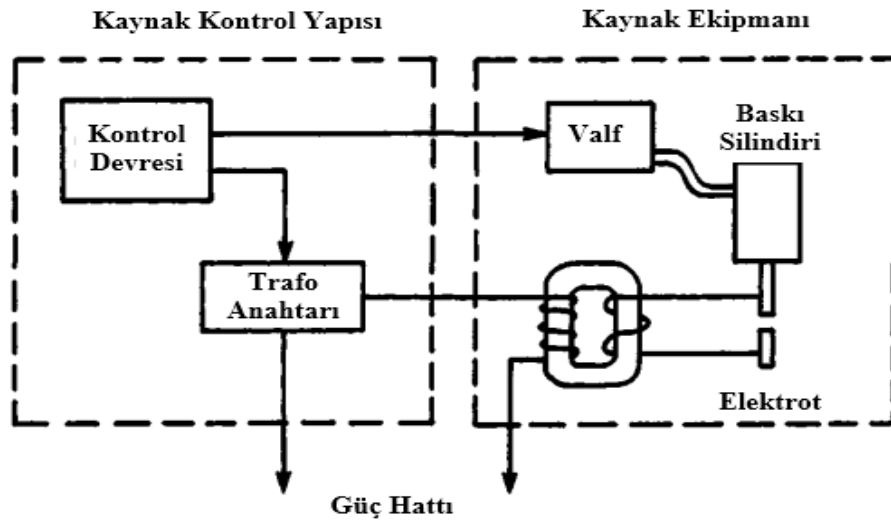
- Birincil devre kontrolü ile kaynak akımının gücünü ayarlama,
- Kaynak süresini kontrol etme.

Kaynak kontrolör yapısını (Şekil 3.2) üç grup altında toplayabiliriz. Bunlar: kaynak kontaktları, zamanlama kontrolörü ve akım ayarlayıcılarıdır (Donders ve diğ, 2005).

Kaynak kontaktları elektrik güç devresinin başlatılması ve kapanmasını yönetir. Genellikle birincil devrede bulunurlar. Mekanik tür kontaktlar, manyetik tür kontaktlar ve elektronik tür kontaktlar olmak üzere üç türe ayrılmaktadırlar.

Kaynak işleminin artarda çalışmaya devam etmesi yani devri zamanlayıcı tarafından kontrol edilir. Ön sıkıştırma, kaynaklama ve ayrılma sürelerin tamamı da zamanlayıcı devresi tarafından kontrol edilir.

Birincil devre üzerinde bulunan sargı anahtarı ve sargı sayısının değiştirilerek akım gücünün değiştirilmesi akım ayarlayıcıları tarafından sağlanır. Bu devreler sayesinde kaynak işlemi sırasında da akım gücü değişimine gidilerek kaynak birleşiminde oluşan ısı miktarı kontrol altında tutulmaktadır (Donders ve diğ, 2005). Ayrıca, kaynak işlemi sırasında gereken kaynak akımını  $\pm\%2$  derecesinde sabit olarak sağlamak adına akım regülatörleri kullanılmaktadır (Uijl, 2010).

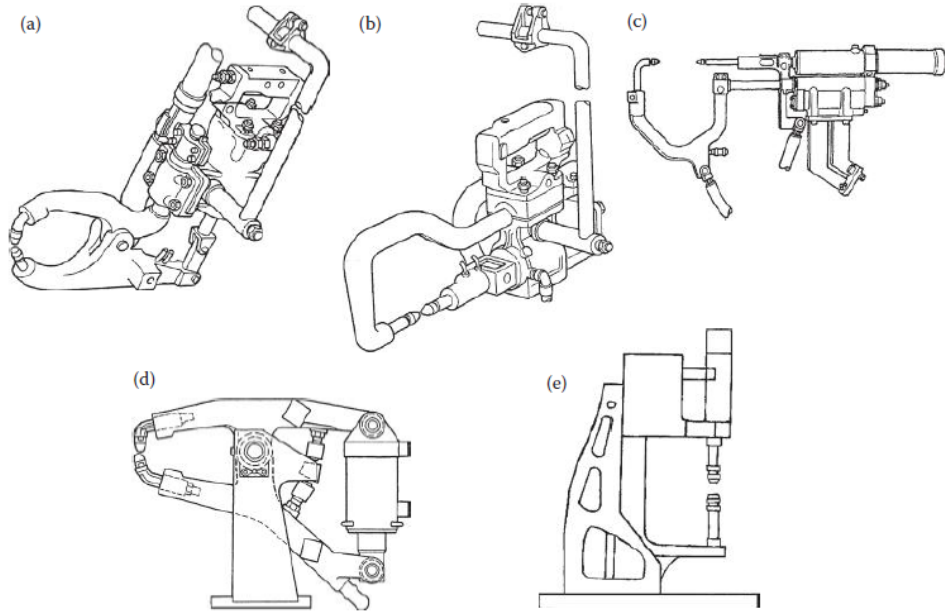


Şekil 3.2: Kaynak Kontrol yapısı (RWMA, 2003).

### 3.5. Direnç Nokta Kaynağı Mekanik Yapısı

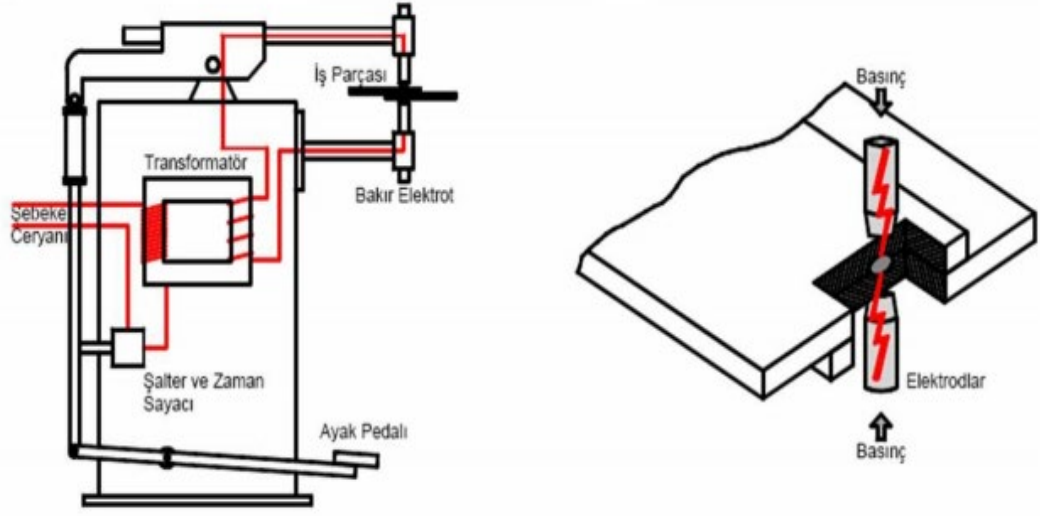
Direnç nokta kaynak ekipmanları genellikle elektrotların iş parçasına göre hareket ettiren mekanizmaların hareket yönüne bağlı olarak sınıflandırılır. Esasen çoğu ekipmanın belirli uygulamalar için özel olarak üretilmesi nedeniyle, makine tipi terminoloji ve tanımlarında önemli farklılıklar vardır. Bununla birlikte, direnç nokta kaynağı ekipman tiplerindeki temel farklılıkları göstermek için beş tip makine tipinin çizimleri Şekil 3.3'de gösterilmektedir (Zhang & Senkara, 2011).

Servomotor tahrikli ekipmanların popüler hale gelmesine rağmen, ayak baskılı yada pnömatik silindirikli elektrot kapatma ve açma kaynak ekipmanlarında kullanılan en yaygın tahrik sistemleridir (Şekil 3.4). Bir kaynak makinesinin hareketli kısmı, piston kafasından elektrotta kadar olan montajdan oluşur. Piston tarafından iş parçasına doğru elektrotların hareket etmesiyle iş parçası tutulur ve iki elektrot arasında sıkışan iş parçaları üzerinde bir baskı kuvveti oluşur. Genellikle bu elektrotları tutan kollardan birisi sabit diğeri hareketlidir. Kaynak akımının oluşması ve oluşan kaynaktaki kalite ile bu baskılama kuvveti doğrudan ilişkilidir. Uçların arasında oluşan kaçıklık veya baskı kuvvetinde kesintiler kaynak birleşimini doğrudan ve olumsuz olarak etkilemektedirler.



Şekil 3.3: Direnç nokta kaynak makinesi tipleri (a) Külbütör tipi (b) Düz etkili tabanca tipi (c) Dengeleme tabancası tipi (d) Sıkıştırma tabancası tipi ve (e) Ayaklı kaynakçı tipi (Zhang & Senkara, 2011).

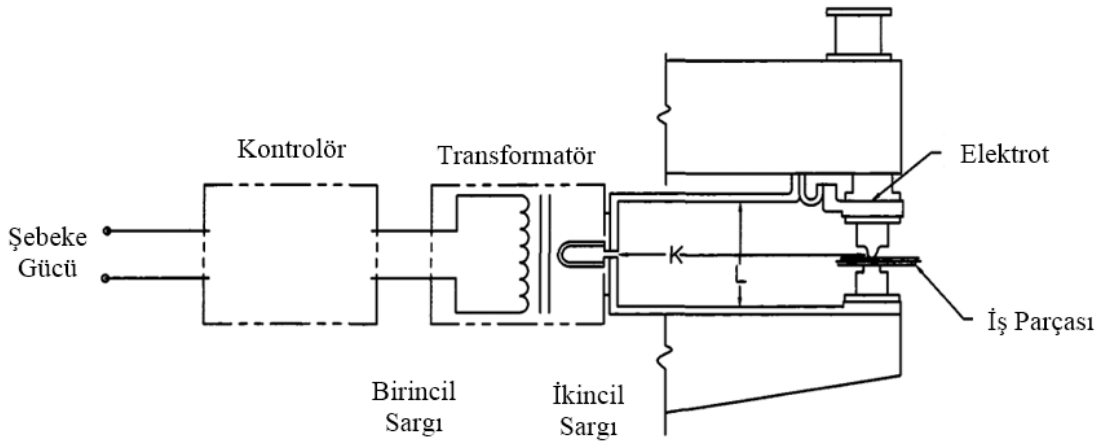




Şekil 3.4: Temel bir direnç nokta kaynak makinesi detayı (Anık ve diğ., 2000).

### 3.6. Direnç Nokta Kaynağı Elektrik Devre Yapısı

Direnç nokta kaynağında gerekli olan yüksek akım, şebeke geriliminden beslenen transformatörlerden sağlanır. Kullanılan transformatör, yüksek akım elde edebilmek için, şebekeden çektiği yüksek gerilimi düşük gerilime dönüştürürler (Sarı, 2002). Bu prensibe göre çalışan bir direnç nokta kaynağı makinesinin detayı Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Direnç nokta kaynak makinesi elektrik devre yapısı (RWMA, 2003).

Transformatörler birincil sargılara gelen yüksek şebeke gerilimini, ikincil sargıda 2 ila 5V arası düşük gerilimlere dönüştürüp, yüksek akım miktarları elde ettikleri için, ikincil sargı üzerinde yüksek ısı miktarları oluşmaktadır. Oluşan bu ısı enerjisini uzaklaştırmak

ve transformatör de hasarı önlemek için genellikle devir daimli su soğutmaları kullanılmaktadır (Akyol, 2001).

Kontrolör tarafından yönetilen ikincil sargı devresinin, üzerinden geçen akım miktarı arttıkça, devrenin tamamındaki kayıplar da artar. Bu nedenle, ikincil devre için ana kaygı, devreyi olabildiğince kısa yapmaktır ve endüktans da genişliğin bir fonksiyonu olduğu için iletkenler mümkün olduğunca geniş olmalıdır (RWMA, 2003).

### 3.7. Direnç Nokta Kaynak Birleşiminin Oluşumu

Direnç nokta kaynağında, kaynak birleşimini oluşturmak için gereken ısı, elektrotlar arasındaki sıkıştırılan malzemelerden düşük gerilim sahip yüksek elektrik akımı uygulanarak üretilir. Bu nedenle, kaynak birleşiminin istenilen seviyede oluşumu, büyük ölçüde malzemeler ve malzemeler kaplamalı ise malzemelerin kaplamalarının elektriksel ve termal özelliklerine bağlıdır (Zhang & Senkara, 2011). Elektriksel ve termal parametrelerin kontrol edilmesi direnç nokta kaynağında yaygın bir uygulamadır.

Bir elektrik devresinde üretilen ısıнын genel formülü şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (3.1)$$

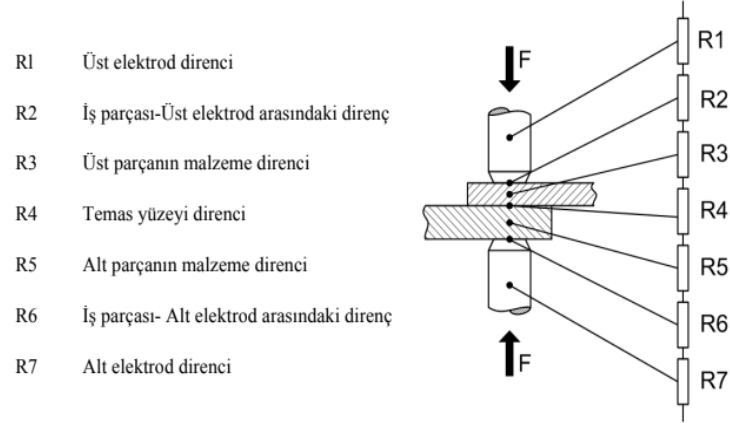
Burada;  $R(\Omega)$  sistemdeki toplam direnç,  $I(A)$  akımı,  $t(s)$  zamanı belirtmektedir. Bu formülden yola çıkarak, bir direnç nokta kaynağında kaynak birleşimi oluşturmak için üretilen ısıyı hesaplamak adına önce sistemdeki toplam direnç tespit edilmelidir.

Toplam direnç, kaynak elektrotları ve onların arasındaki malzemelerin iç dirençleri ile, tüm bu elemanların aralarında oluşturdukları temas dirençlerinin toplamına eşittir ve bu direnç bileşenleri Şekil 3.6'te açıklamaları ile gösterilmektedir.

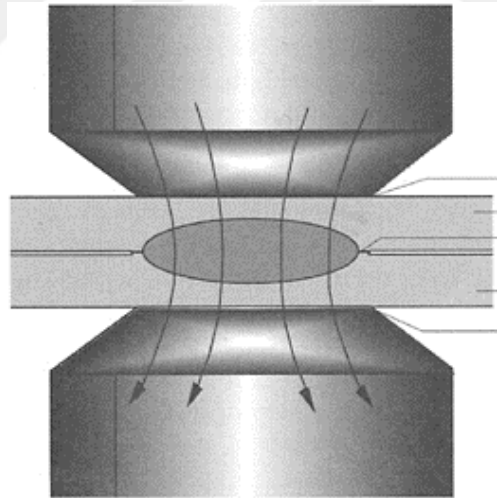
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (3.2)$$

Bu direnç değerleri genellikle sabit değildir, temas direnci, sıcaklık ve basıncın güçlü bir fonksiyonudur ve malzeme iç direnci basınca değil sıcaklığa duyarlıdır. Dirençler sayesinde oluşmaya başlayan ısı birleştirilecek olan her iki malzemenin arasında elektrot uçlarına en yakın mesafede toplanmaya başlar. Sonrasında oluşan bu yüksek ısı ile malzemeler ergiyip konuma geçip, soğuduğunda her iki malzemeyi birbirine bağlayacak olan kaynak birleşimini oluşturacak olan, ergime havuzuna dönüşürler (Şekil 3.7). Oluşan kaynak birleşimi yapı ve özellikleri elektrot ve kaynak çevrimi parametrelerine doğrudan

bağlıdır. Elektrotları elektrik direnç katsayıları düşük ancak ısı iletkenliğini yüksek olmalıdır. Böylece gerekir ise su ile daha da hızlı soğutulan elektrotlarda ergime görünmez, ergime ve kaynak birleşimi plakalar arasındaki bölgede oluşur (Esendir, 2009).



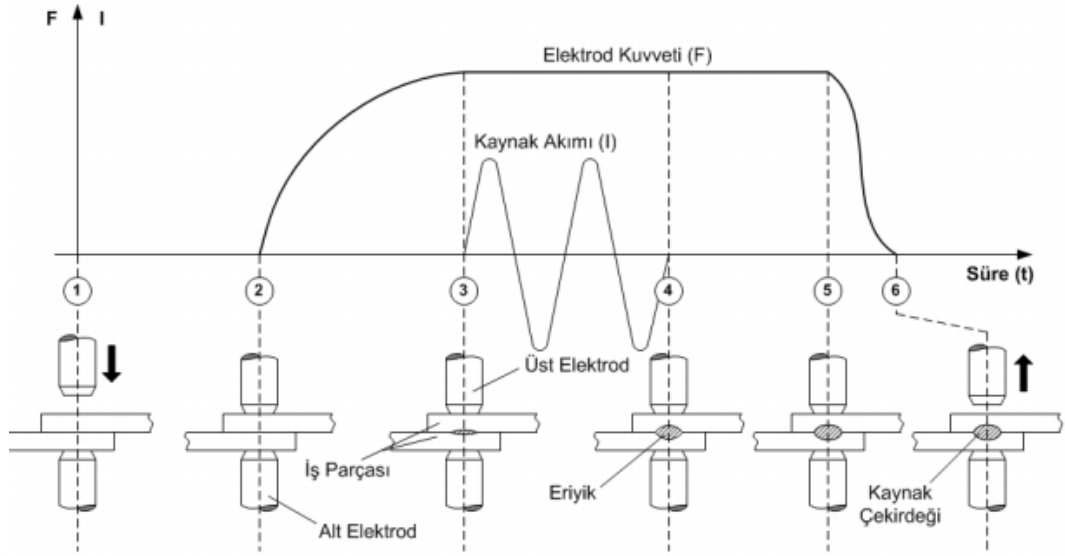
Şekil 3.6: Bir direnç nokta kaynak sistemindeki toplam direnç bileşenleri (Sarı, 2002).



Şekil 3.7: Bir direnç nokta kaynak birleşiminin oluşumu (Zhang & Senkara, 2011).

### 3.8. Direnç Nokta Kaynağı Çevrimi

Direnç nokta kaynağının bir tam çevrimini altı ana safhaya ayırabiliriz. Bu safhalar; yaklaşma, ön tutma, ön ısıtma, kaynaklama, kaynak sonrası tutma ve ayrılımdır (Akyol, 2001).



Şekil 3.8: Direnç nokta kaynağı çevriminin aşamaları (Sarı, 2002).

**Yaklaşma:** Birbirlerine kaynatılacak olan malzemeler elektrot uçları arasında yerleştirilir ve bazı uygulamalarda her iki elektrot bazı uygulamalarda ise sadece üst ayda alt elektrot hareket ederek parçalarla teması sağlanır.

**Ön tutma:** Malzemeler elektrotlar arasında sıkıştırılmaya başlanır ve belirli bir miktarda baskı kuvveti oluşturulur.

**Ön ısıtma:** Malzemelerin ısıtılması için kaynak akımına oranla daha küçük miktarda bir akım parçalardan geçirilir. Bu sayede malzemelerin kaynaklanması için gereken ana akım miktarı azaltılmış olurken aynı zamanda da kaynak sonrası soğuma hızları da azaltılmaktadır. (Akyol, 2001; Yuan ve diğ, 2017; Ramazani, 2015).

**Kaynak:** Kaynak akım belirlenen sürede malzemelerden geçirilir. Kaynak akımın girişi ile ısı üretimi başlar ve eriyik malzeme havuzu oluşur.

**Kaynak sonrası tutma:** Kaynak akımı kesilir fakat elektrotlar parçalara baskı yapmaya devam eder. Böylelikle kaynak birleşim bölgesinin soğuması sırasında homojen bir yayılımla sertleşip istenen tanecik yapısının oluşması sağlanır.

**Ayrılma:** Kaynak birleşim bölgesi sıcaklığı istenilen seviyeye düşürüldükten sonra elektrotlar açılarak, kaynaklanan malzemeler serbest bırakılır.

Bu çevrim yapısına ek olarak, bazı imalatlarda malzemelerin tanecik yapılarını korumak adına tavlama işlemi de gerçekleştirilebilir. Bu işlemde kaynak sonrası elektrotlar baskıya devam ederken parçaya belirli bir miktarda akım verilerek malzemeler tavlanmaktadır. (Yuan ve diğ, 2017; Ramazani, 2015).

### **3.9. Direnç Nokta Kaynağının Uygulama Alanları**

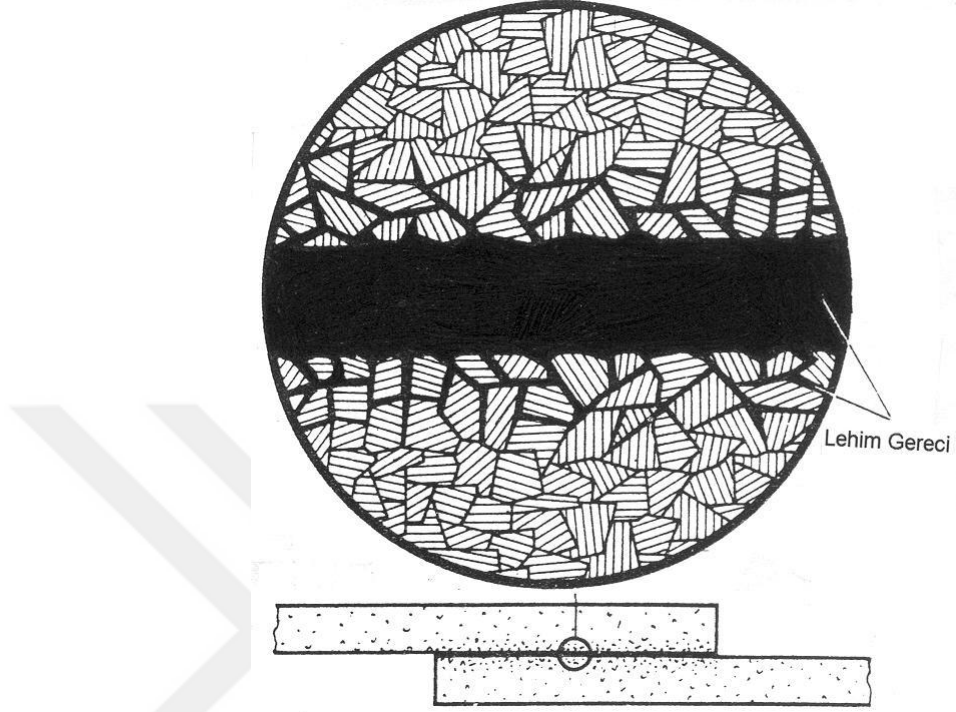
Direnç nokta kaynağı, metalleri birleştirmek için çok esnek bir yöntemdir. Birçok farklı şekil, boyut ve malzeme üzerinde uygulanabilirlerdir. Esneklik özelliği iki bakış açısından incelenebilir. Temel direnç nokta kaynak işlemlerinin her biri için, küçük tezgâh tipi manuel kaynak makinelerinden, işlemin bilgisayar kontrollü otomatik bir sisteme dâhil edildiği robotlu büyük kaynak makinelerine kadar değişen yapılar da direnç nokta kaynak makineleri mevcuttur. Ayrıca, bu kaynak makinesi türlerinin çoğu, elektrotlarda ve bağlantılarda nispeten basit değişiklikler yaparak birkaç farklı kaynak türü ve malzeme için kullanılabilir. Boyut sınırlamalarına gelince, ölçeğin alt ucunda, sensör ayakları gibi minik alaşımlı metal uçların kaynaklanması ve 0,02 mm çaplı tellerin birleştirilmesine kadar ufak malzemeler ile üst aralıklarda, 6 mm ye kadar yüksek mukavemetli otomotiv çeliklerinin (AHSS) kaynatılmasına kadar geniş aralıkta örnekler bulunmaktadır (RWMA, 2003).

Bu kaynak uygulaması otomotivden, beyaz eşyaya, mutfak ekipmanlarından uçak sanayine kadar hemen her endüstride; çelik, paslanmaz çelik, bakır, alüminyum (Al), ve buna benzer birçok metalin hızlı ve kolay olarak kaynatılabilmesine olanak vermektedir. Ayrıca, iki adetten daha fazla metalin, farklı kalınlıklarda metallerin ya da kaplamalı metallerin kaynatılması konusundaki başarısı ile de ön plana çıkmaktadır (Uijl, 2010).

### **3.10. Elektrik Nokta Direnç Kaynağı ile Lehim Birleştirmeleri**

Birleştirilmeleri mümkün olmayan yada çok ufak boyutlardaki parçaların birleştirilmesinde elektrik direnç nokta kaynağı ile lehimleme metodu kullanılmaktadır. Bu metotta, birleştirme malzemesi olarak ek bir malzeme yada metaller üzerinde bulunan kaplamalar eritilerek birleştirilecek malzemelerin birleşmesi sağlanır. Lehimleme ile birleştirme sırasında ana metaller erimez ve çok yüksek sıcaklıklar oluşmaz (yaklaşık

400°C ). Elektrik ve elektronik sektörlerinde direnç nokta kaynağı ile lehim birleştirmeleri sıklıkla uygulanmaktadır.



Şekil 3.9: Direnç nokta kaynağında lehimleme ile birleştirilmiş malzemelerin mikroyapısı (MEB, 2013).

## **BÖLÜM 4. DİRENÇ NOKTA KAYNAĞININ PARAMETRELERİ**

### **4.1. Kaynak Akımı**

Kaynak akımı, direnç nokta kaynak birleşimi oluşmasında en temel etkidir. Kaynak ekipmanlarının devre yapısındaki transformatörde üretilen yüksek kaynak akımı, elektrotları tutan mekanik yapılara bağlanmış olan bakır malzeme esnek yaprak plaka veya sargı kablolar yardımı ile elektrotlara iletilir. Sonrasında elektrotlardan kaynatılacak malzemelere iletilen bu akım ile parçalar arasında ısı artışı başlar. Tabii ki iletilen bu akım gücünün bir kısmı, elektrot, iletim bağlantıları ve transformatör yapısında ısı enerjisine dönüşerek kaybolmaktadır. Akım parametresini belirlerken bu kayıp dikkate alınmalıdır (Nemecek ve diğ., 2012).

Malzemeler üzerinde artan akım gücü ile birlikte kaynak birleşimin yoğunluğu ve boyutu da hızla artar. Aşırı akım, kaynaklanan parçalarda derin girintilere, ana metalin fazla ısınmasına, dahası elektrotların aşırı ısınıp hızla bozulmasına neden olabilir. Ayrıca akım gücünü aşırı olduğunda, kaynak birleşimi düşük mekanik mukavemete sahip olmakta, kaynağın çatlaması ve ergimiş metalin dışarı atılması ile buna bağlı olarak kaynak birleşiminde iç boşluklarla sebebiyet verebilir (O'Brien ve Guzman, 2007).

Bazı durumlarda akım gücü çok fazla geldiğinde, kaynak bölgesinde patlamalar oluşmakta ve kaynak cürufaları etrafa saçılarak iş güvenliği tehlikesi yaratılmaktadır. Ve yahut hatalı olarak seçilmiş fazla akım gücü, elektrot yüzeyinde de ergimeye sebep olup, kaynaklanan metal ve elektrotu birbirine yapıştırılmaktadır. Buda hem imal edilen malzemelere hem de kaynak elektrotuna zarar vermektedir. Bu yüzden öncelikli proses parametresi olan akım seçiminde sınırlar belirlenmeli ve bu sınırlar içerisinde direnç nokta kaynağı gerçekleştirilmelidir (Akyol, 2001; Ujil, 2010).

## 4.2. Çevirim Süresi

Isı enerjisi uygulandığı zamanla (t) çarpılan güce eşit olduğundan, kaynak akımının var olduğu süre, üretilen toplam ısı enerjisini kontrol eden faktörlerden birisidir. Direnç nokta kaynağında kaynak süresi ile üretilen toplam ısı miktarı doğru orantılıdır. İşlem sırasında üretilen ısı enerjisi, etraftaki ana metal ve elektrotlara iletilerek kaybolur; radyasyon ışınımı ile de çok ufak bir ısı enerjisi kaybolmaktadır. Bu kayıplar da kaynak süresi ve kaynatılan metallerin ısı dirençleri ile doğru orantılı olarak artar. Bir direnç nokta kaynağı işlemi esnasında tüm bu ısı kayıplar göz önüne alınarak, ergiyik malzeme havuzu elde etmek için gerekli minimum akım girdisinin devam ettirilmesi gerekir.

Kaynak süresi genellikle 1 saniyeden daha az, milisaniyeler (ms) ile ölçülmektedir. Kaynak işleminin gerçekleşmesi için gereken asgari süre ye ait yaklaşık hesaplama altta belirtilen denklem yardımı ile bulunabilir (Akyol, 2001; Ujıl, 2010).

$$T = 8 \cdot s \quad (4.1)$$

Bu denklemde, kaynak süresi T (periyot) olarak gösterilmektedir ve 50 Hz frekansına sahip bir beslemede bir periyot 2 ms'lik (1/50 saniye) bir süreye eşittir. Kaynatılan malzemelerin toplam kalınlık miktarı ise s (mm) ile belirtilmektedir.

Gerekli olan kaynak süresi ne kadar düşükse, üretilen fazla ısı ve kaynatılan malzemelerin gövdesine iletilen ısıda o kadar düşük olacağından, kaynak işleminin asgari sürelerde gerçekleştirilmesi tavsiye edilir. Ayrıca kısa sürelerde kaynak yapılmasının elektrotların çalışma ömrüne de pozitif etkisi vardır.

Direnç nokta kaynağı ile kalın metaller kaynatılmak istendiği zaman, ana kaynak akımı uygulaması öncesi, nispeten kısa bir süre ve düşük bir akım ile malzemelere akım verilmektedir. Bu işlemin amacı, kaynatılacak malzemeler arasındaki ıyı kademeli olarak arttırmaktır. Bu süreye ön ısıtma suresi adı verilmektedir (O'Brien ve Guzman, 2007).

Direnç nokta kaynağında sadece kaynak akımının verildiği süre değil, kaynak akımın kesildiği fakat elektrotların halen baskı kuvvetinde kaldığı sürede oldukça önemlidir. Akım kesildiği anda sistemde ısı üretimi durur ve kaynatılmış malzemeler soğumaya başlar. Isı iletkenlikleri nedeniyle, su soğutmalı elektrotlar hızla neredeyse soğutma suyu sıcaklığına dönecektir. Soğuyan bu elektrotlar malzemelerin temas yüzeylerinden ısı



iletimi gerçekleştirmeye başlar. Böylece kaynak birleşim bölgesi tepeleri neredeyse anında düzleştirir ve merkez yavaş yavaş soğur. Soğutma hızı, ısı girdisinin miktarını belirleyen aynı koşullar tarafından belirlenir. Bununla birlikte, elektrotlar kaynak akım kesildikten hemen sonra kaldırılırlar ise, kaynak birleşim bölgesinde olan ısıyı absorbe edemezler, bu ısı ile kaynak birleşim bölgesi tepe noktalarındaki çıkıntılar artacak, kaynak yüzeyinde boşluklar ve uygunsuzlar oluşacaktır. Kaynak birleşim bölgesi henüz soğumadan, kaynak hala plastik veya ergimiş haldeyken elektrot baskı kuvvetleri kaldırıldığı için, kaynak mukavemeti yani kalitesi düşük olacaktır. Kaynağın soğuma hızı, kaynak birleşiminin özellikleri üzerinde metalürjik bir öneme sahip olduğundan, bu parametrede mutlaka kontrol edilmelidir (RWMA, 2003).

### **4.3. Elektrotlar**

#### **4.3.1. Elektrot malzemesi**

Direnç nokta kaynak prosesinde kullanılan elektrotların ana malzemesi genelde bakır ve bakır alaşımlı metallerdir. Elektrotların ana görevi, kaynak akımını kaynatılacak malzemelere iletmek, kaynak birleşimi oluşacak bölgeye gerekli baskı kuvvetini uygulamak ve soğuma sırasında kaynak bölgesinden ısıyı uzaklaştırmaktır. Seçilen elektrot uçları, çalışma şartları altında şekil bütünlüğünü, termal ve elektriksel iletkenlik özelliklerini korumalıdır. Direnç Kaynakçıları İmalat Derneği (RWMA) direnç nokta kaynağı elektrotları malzemeleri bakımından iki gruba ayırmıştır:

Grup A - Bakır alaşım bazlı elektrotlar,

Grup B - Refrakter metal bazlı elektrotlar,

Bunun haricinde, her bir içerdikleri alaşım miktarlarına göre numaralandırılıp sınıflandırılmışlardır. Grup A, içerisinde Sınıf I, II, III, IV, V olarak sınıflara ayrılmaktadır ve bakır alaşımlarından imal edilmiş elektrotları kapsar. Grup B ise, Sınıf 10, 11, 12, 13, 14 sınıfları olarak kategorilendirilerek refrakter alaşımlı malzemeden imal edilmiş elektrotları temsil eder.

Grup A Sınıf I elektrotları, bileşiminde en saf bakıra sahip olan sınıf elektrottur ve sınıf numarası artış gösterdikçe tavlama sıcaklık ve sertlik değerleri artarken ısıl ve elektriksel iletkenlik azalır.

Grup B elektrotları, yüksek ısı girdisi olan kaynak işlemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Aşınma direnci ve dinamik yüklere karşı dayanımı yüksek olan sinterlenmiş bakır ve tungsten benzeri metal alaşımlarından imal edilmektedirler. Bakıra göre sertlikleri yüksektir ve sertlikteki artış elektrotların iletkenliğin azalmasına sebep olur (Akyol, 2001; Nemecek ve diğ, 2012). Tıpkı Grup A'daki gibi Grup B içinde sınıf değerleri arttıkça elektrot iletkenliği azalmaktadır. Sınıf 10 elektrotları iletkenliği saf bakırın yaklaşık olarak yüzde 40'ına sahip alaşımlardan üretilirler. Grup B elektrotları düşük iletkenlik özellikleri sebebi ile normal nokta direnç kaynağı uygulamalarında kullanılmayıp, çok yüksek ısı, kaynak akımı ve baskı kuvveti gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Miller, 2018).

#### 4.3.2. Elektrot dizaynı

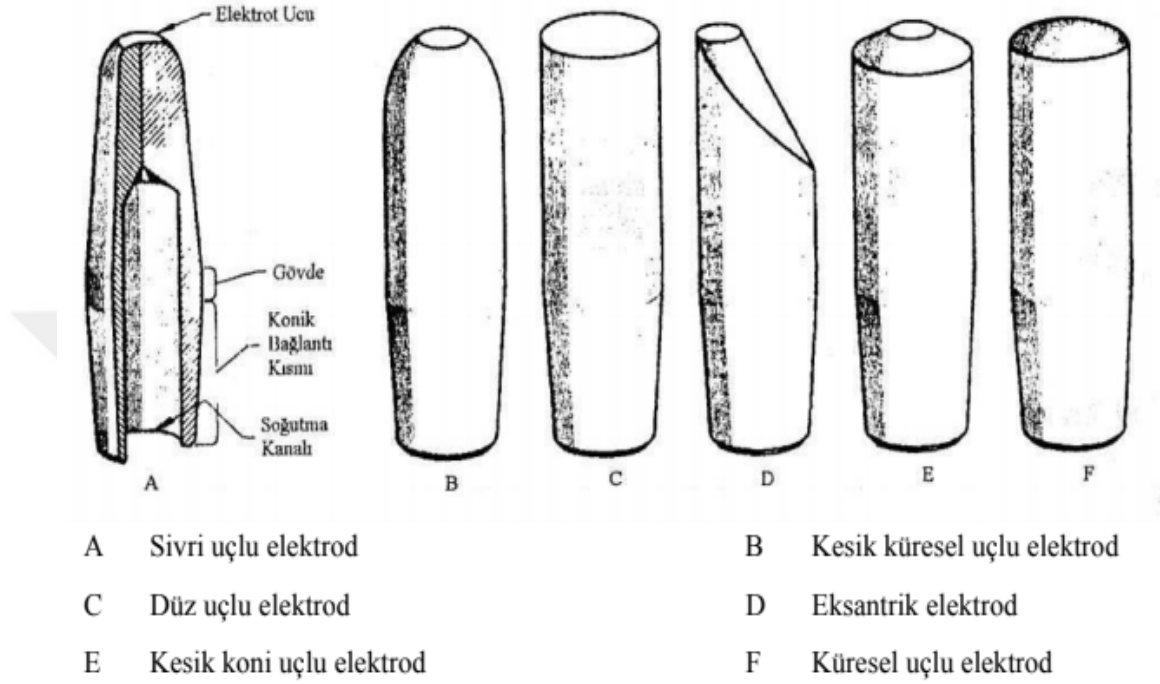
Kaynak akımının kaynatılacak malzemelere iletilmesinin elektrot aracılığıyla olduğunu düşündüğünüzde, elektrotun uç noktası geometrisinin direnç nokta kaynak birleşim bölgesi boyutuna ve yapısına etki etmesi oldukça mantıklıdır. Uygun bir kaynak işleminde, kaynak birleşim bölgesi büyüklüğü, elektrot uç noktasının çapından biraz daha az olmalıdır. Elektrot ucunun çapı, yapılacak kaynak uygulaması için çok küçükse, kaynak birleşim bölgesi boyutu ufak ve mukavemeti düşük olacaktır. Bunun yansırsa, eğer elektrot ucunun çapı fazla büyük tercih edilir ise, kaynak sırasında kaynatılan metalde aşırı ısınma ve buna bağlı boşluklar ile gaz cepleri oluşma riski vardır. Her iki hatalı seçimde de, oluşan kaynak birleşiminin yapısı ve kalitesi kabul edilemez. Elektrot ucu çapını ve tipini belirlemek için proses tasarımcısı bazı temel formüllerden faydalanmalıdır. Farklı malzeme türlerinde malzeme iç direnç faktörleri değiştiğinden, bu durum formüllere de yansıtılmıştır. Belirtilen formül (4.1) birçok uygulama için kullanılacak elektrot ucu çap değerlerini hesaplamada kullanılabilir (Miller, 2018).

$$d_{uç} = 2,54 + 2.s \quad (4.1)$$

$$d_{uç} = 2,54, + 1,5 .s \quad (4.4)$$

Yukarıda belirtilen formülde,  $d_{uç}$  elektrot çap boyutunu ve  $s$ 'de elektrotlar arasındaki toplam malzeme kalınlığını milimetre (mm) cinsinden belirtmektedirler.

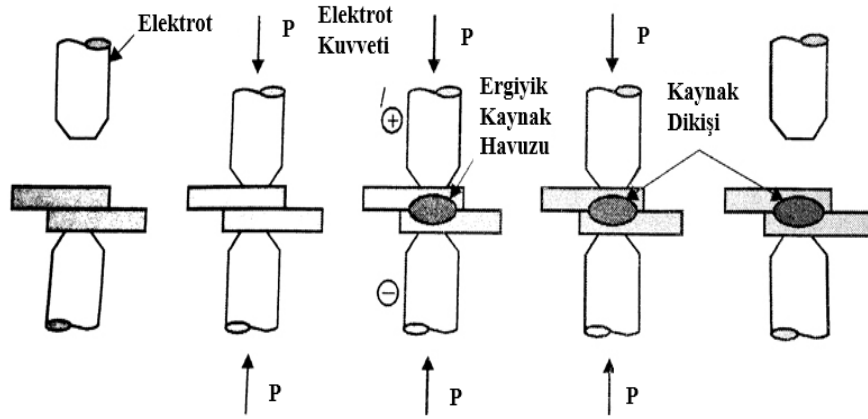
Direnç nokta kaynağında birçok farklı geometride uç yapısı ile kaynak yapılması mümkündür. Fakat genel olarak imalat sanayinde kullanılan ve TS EN 2582'e göre standart olarak belirlenmiş Elektrot uç geometrileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Avrupa standardı elektrot şekilleri (Sarı, 2002).

#### 4.4. Elektrot Baskı Kuvveti

Kaynatılacak olan malzemeleri bir arada tutan ve kaynak boyunca oluşan kaynak birleşim bölgesine basınç uygulayan kuvvete elektrot baskı kuvveti ya da kaynak kuvveti denmektedir (Şekil 4.2). Proses girdisi olarak sabit olarak girilen bir değer olsa da, bu kuvvet kaynak işlemi sırasında kaynatılan malzeme, elektrot malzemesi ve kaynak birleşimi yapısına göre dinamik olarak değişmektedir (Donders ve diğ, 2005).



Şekil 4.2: Elektrot baskı kuvvetleri gösterimi.

Elektrot baskı kuvveti, malzemeler arasındaki kontak yüzey alanlarını etkilediği için, kaynak işlemi sırasında oluşan direnç değerini de etkilemektedir. Direnç nokta kaynağında elektrot baskı kuvvetinin fazla olması durumunda temas yüzey alanı artacak ve böylece malzemeler arası temas direnci miktarı düşecektir. Aynı şekilde azalan baskı kuvveti ile de temas direnci artacaktır. Buda oluşan ısı miktarına ve doğrudan kaynak birleşimin kalitesine etki etmektedir. Bu sebeple kaynak elektrot kuvveti miktarı en uygun direnç miktarını sağlayacak şekilde seçilmelidir (Akyol, 2001). Bu kuvvetin belirlenmesinde kullanılan genel formül (4.5) kaynatılmak istenen malzeme özelliklerine göre altta belirtilmiştir. Kuvvet (P) kilonewton cinsinden hesaplanmakta ve kaynaklanacak malzeme kalınlığı (s) milimetre (mm) cinsinden seçilmelidir.

$$\text{Alaşımsız çelikler için: } P = 2 \cdot s \quad (4.5)$$

$$\text{Yüksek alaşımlı çelikler için: } P = 3,5 \cdot s \quad (4.6)$$

$$\text{Alüminyum alaşımları için: } P = 2,5 \cdot s \quad (4.7)$$

Elektrot baskı kuvvetinin, temas direnç miktarlarına etki etmesinin dışında, özellikle kaynak yapısı üzerinde önemli etkileri de vardır. Ergiyik kaynak birleşimi havuzunun soğuması esnasında yeterli kuvvet olmazsa oluşan iç gerilmeler sebebi ile kaynak birleşiminde boşluklar ve çatlaklar oluşacak böylece kaynak mukavemeti düşecektir (Akyol, 2001; Uijl, 2010). Ayrıca yine kuvvet yeterli olmaz ise kaynak işlemi esnasında malzemeler arasından cüruf sıçramaları oluşacaktır.

## BÖLÜM 5. DİRENÇ NOKTA KAYNAKALARININ MEKANİK TESTLERİ

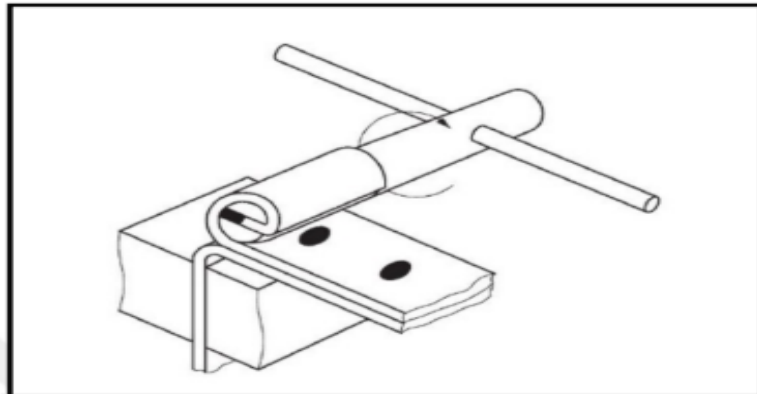
### 5.1. Test Tipleri

Direnç nokta kaynaklarına dair mekanik özelliklerin ölçülmesinde çeşitli testler kullanılmaktadır. Bu testler bazıları; soyma, gerileme, darbe, yorulma, burulma ve keski testleridir. Çekme, keski ve soyma testleri, bu testlerin içerisinde endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan testlerdir (Uijl, 2010; Donders ve diğ., 2005).

### 5.2. Soyma testi

Direnç nokta kaynaklarında sıklıkla yapılan ve mekanik bir test olan soyma testi, kaynak edilebilirliğin tayininde, tüm otomotiv şartlarında kullanılmaktadır. Maliyetinin düşük olması, atölyelerde kalite kontrol amacıyla kullanılabilirliği ve performans kolaylığı sağlaması, kabul edilmesinin en önemli nedenleridir (European Standard, 2016).

Kaynak birleşimde ideal olan boyutun sağlanma durumunun tespit edilmesinde kullanılmakta olan soyma testi, oluşan kaynak birleşimin kullanım alanındaki performansına ve mukavemetine ilişkin sağladığı nicel veriler sınırlıdır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Soyma testinin uygulama gösterimi (European Standard, 2016).

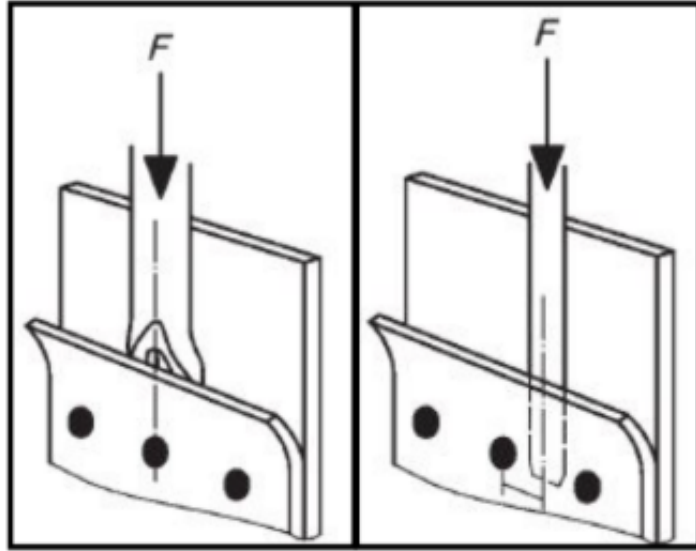
Test ve sonucun yorumlanması büyük ölçüde deneyim/beceriye bağlı olduğundan, genellikle bu tür testleri yapmak için özel eğitim almış bir operatör ya da kalite uzmanına ihtiyaç duyulur.

### 5.3. Keski testi

Keski testi, kaynaklı yapılar üzerindeki nokta direnç kaynaklarının sünekliğini ölçmek için kullanılır. Kayna birleşim bölgesinin yanına, plakaların arasına keski aracılığıyla yük uygulanması dışında keski testi, soyma testine benzemektedir (Şekil 5.2).

Amaç, kaynak yapılamamış ya da hatalı kaynaklanmış dâhil kırılgen (soğuk) kaynak birleşimini tespit etmektir. Kaynak birleşim bölgesi, koparma işlemi yapıldıktan sonra gözle kontrol edilir. Soyma testi ile aynı şekilde bu testi değerlendirmekte tamamen insan faktörüne bağlıdır ve belirli bir eğitim ile tecrübe gerektirir.

Keski testinde tekrarlanabilirlik nispeten düşüktür. Ağır kalınlıkta sac kaynağı test edilirken otomatik bir keski testi kullanılır.

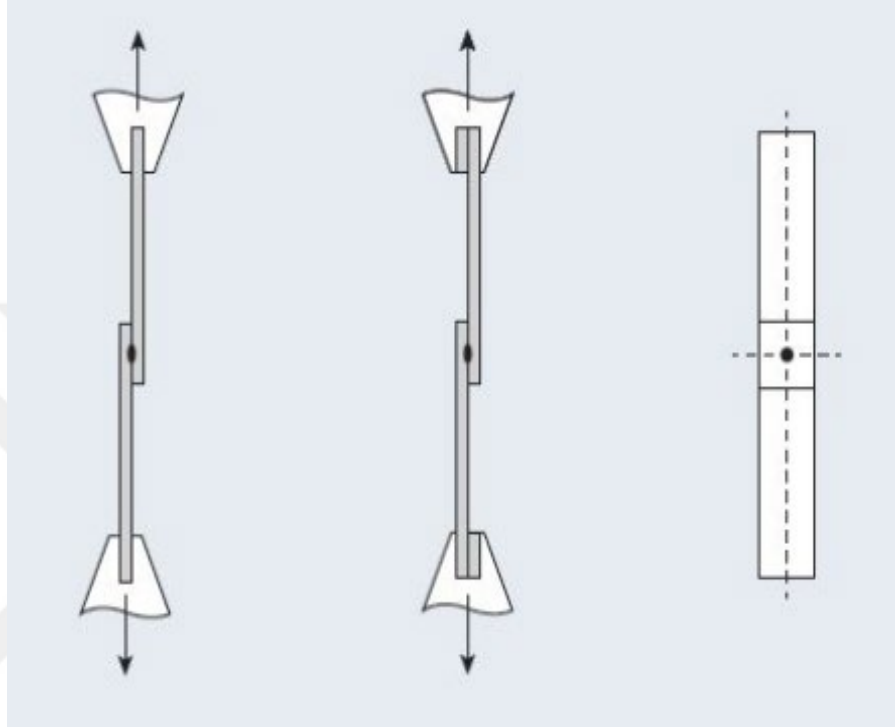


Şekil 5.2: Keski testinin uygulama gösterimi (European Standard, 2016).

### 5.4. Çekme testi

Yapılan testler arasında, çekme testi, numune imalat ve testin basitliği nedeniyle kaynak mukavemetinin sayısal olarak belirlenmesi için yaygın olarak başvurulan bir metottür.

Bu testte, tek bir direnç nokta kaynağı ile kaynatılan ve bir şerit halinde kesilen test numuneleri standart bir test makinesinde yerleştirilmekte ve kaynaklanan yapılar kopup birbirinden ayrılana kadar kademeli olarak iki kısmından ters yönlere kuvvet uygulanarak çekilip gerilmektedirler. Deney yapısı Şekil 5.3'teki gibidir.



Şekil 5.3: Çekme Testi uygulama gösterimi.

Test numunesinin nihai mukavemeti ve kırılmanın niteliği, ister kaynak birleşimini kopartarak, ister ana malzemeyi yırtarak, ister plastik deformasyon elde edilip edilmediğine bakılarak kaydedilmekte ve belirlenmektedir (Zhang & Senkara, 2011).

Test sonrasında numuneler koptuğundan ya da plastik deformasyona uğradığından tekrar kullanılamazlar.

Bir kaynak çekme yükü altında olduğunda, Şekil 5.4' te gösterildiği gibi, kaynaklanmış uçlar, kaynaklı bağlantı ile hizalamak için dönme eğilimi göstermektedir. Çekme testlerinin daha tutarlı ve karşılaştırılabilir değerlerde olmasını temin etmek için bu dönme etkilerini hafifletmek gereklidir. Dönme etkisini azaltmak için şimler ve sınırlayıcı cihazlar kullanmak veya basitçe daha geniş numuneler kullanmak gerekmektedir.



Şekil 5.4: Çekme testi sırasında şekil değıştirme eğilimi.



## **BÖLÜM 6. TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU**

### **6.1. Taguchi Yöntemi**

İlk kez Dr. Genichi Taguchi tarafından 1950'li yılların başlarında geliştirilen ve kendi adı ile anılmaya başlayan Taguchi'nin kalite mühendisliği yöntemleri, düşük maliyetle yüksek kaliteli sistemler tasarlamak için toplam kalite yönetiminin önemli istatistiksel araçlarından biridir (Thakur, 2010). Bu sisteme Japonya'da kalite mühendisliği, Batı da ise robust tasarımı denmektedir (Sing, 2001).

Taguchi; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı metotları ile istenen ürün kalitesini elde etmek için üç aşamalı bir süreç önermektedir. Sistem tasarımı, tasarım parametrelerinin çalışma seviyelerini belirlemeye yardımcı olurken, parametre tasarımı, incelenen ürün veya sürecin en iyi performansını sağlayan parametre seviyelerini belirlemeye çalışır. Optimum koşul, kontrol edilemeyen faktörlerin (gürültü faktörleri) etkisinin sistem performansında minimum değişime neden olacağı şekilde seçilir. Ortogonal diziler, ANOVA, S / N oran analizi ve F testi, parametre tasarımı için temel araçlardır. Tolerans tasarımı ise, parametre tasarımının sonuçlarına ince ayar yapmak için kullanılan bir adımdır (Ross, 2005).

Taguchi yönteminin önemli bir avantajı, önceden belirlenmiş olan sınırlar içindeki bir değerden ziyade hedef değere yakın bir ortalama performans karakteristik değerini bulması ve böylece ürün kalitesini iyileştirmesidir. Yapılan bir araştırma/geliştirme projesinin kapsamını hızlı bir şekilde daraltmak veya üretim sürecindeki sorunları zaten var olan verilerden yararlanarak hızla tanımlamak için kullanılabilir (Fralely ve diğ, 2006).

### **6.2. Ortogonal Diziler**

Bu yöntemde, proses sonuçlarını etkileyen ana proses parametreleri veya kontrol faktörleri girdi parametreleri olarak alınır ve deney, özel olarak tasarlanmış Ortogonal

Dizi (OD) 'ye göre gerçekleştirilir. Ortogonal diziler parametrelerin birbirleri ile varyasyonlu olarak seçilmesini sağlarlar. Ayrıca, birbirlerine göre eş dengeleme fonksiyonu sayesinde yapılacak deney sayılarını asgari düzeye indirirler (Kackar, 1989). Uygun OD'nin seçimi, şu şekilde hesaplanan toplam serbestlik derecesine (TSD) dayanır (6.1) (Dubey, 2008).

$$\begin{aligned} Tsd = & \{ (\text{Derece Miktarı}-1) \text{ her bir faktör için} \} \\ & + \{ (\text{Derece Miktarı}-1) \\ & \times (\text{Derece Miktarı}-1) \text{ her bir etkileşim için} +1 \} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Yukarıda verilen formülü kullanarak oluşturulan ortogonal diziler sayesinde uygun parametre seviyelerini belirlemek için yapılması gereken deney sayılarında çok ciddi oranlarda düşüş ve buna bağlı olarak da maliyet kazancı sağlanmaktadır. Deney sayısındaki bu azalmaya rakamlarla bir örnek vermek gerekir ise; bir otomobil firmasında direksiyon geliştirmek isteyen tasarım mühendisleri, direksiyon performansına etkileyen 13 adet önemli parametre tespit etmişlerdir. Her bir parametrenin değişiminin performans etkisini tespit etmek için, en yüksek, orta ve düşük seviyelerde olmak üzere 3'er adet veri ile deneme yapmak istemeleri durumunda, toplamda 1.594.323 farklı deney varyasyonu ortaya çıkmaktadır. Fakat Taguchi metodu ile kritik parametreler her defasında birer birer değiştirilmek yerine, ortogonal diziye göre varyasyonlar oluşturulduğuna  $L_{27}$  yani toplamda 27 deney ile en uygun parametre varyasyonu belirlene bilmektedir. (Taguchi & Clausing, 1990)

### 6.3. S/N Oranı

Ortogonal diziler ile belirlenen deney parametrelerin uygulanması sonrası ortaya çıkan sonuçlar performans istatistiği ölçütünü hesaplamada kullanılır. Hesaplanan bu istatistiksel veriler, parametrelerin deneye tabi tutulan sistemdeki etkisini belirleme ve en uygun parametrelerin belirlenmesinde kullanılır. Taguchi performans istatistiği ölçütünü belirlemek adına sinyal-gürültü (S/N) oranını kullanmaktadır (Byrne ve diğ, 1987).

Burada Sinyal (S), prosesin son çıktısını (kontrol değeri) temsil etmekte, gürültü (N) ise elde edilen sinyali negatif olarak etkileyen tüm verileri kapsamaktadır. Bu gürültü verileri

kimi durumlarda direk procesten kaynaklanmakta kimi zamansa dış kaynaklardan gelen unsurlardan oluşmaktadır (Yanar, 2008).

Genel olarak, sinyal-gürültü (S/N) oranı ( $\eta$ , dB), deneylerin Taguchi tasarımımda (DOE) gözlemlenen veriler için kalite özelliklerini temsil eder ve matematiksel olarak şu şekilde hesaplanabilir (6.2):

$$\eta_j = -10 \log L_j \quad (6.2)$$

$L_j$ : Toplam kayıp fonksiyonudur ve genellikle kalite kaybı işlevi olarak bilinir

$\eta_j$ : S/N oranı olarak hesaplanır

Genellikle, S / N oranının analizinde kalite karakteristiğinin üç kategorisi vardır; bunlar en düşük-en iyi, en yüksek-en iyi ve nominal-en iyidir. En yüksek en iyi fonksiyonunda toplam kayıp şu şekilde hesaplanabilir (6.3);

$$L_j = \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.3)$$

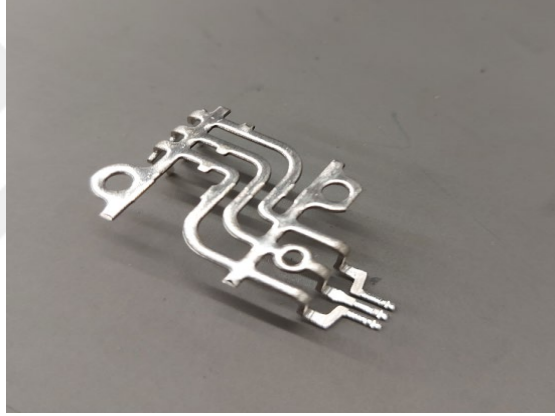
n: Test sayısıdır

$y_i$ : Ortalama kalite karakteristik değeridir

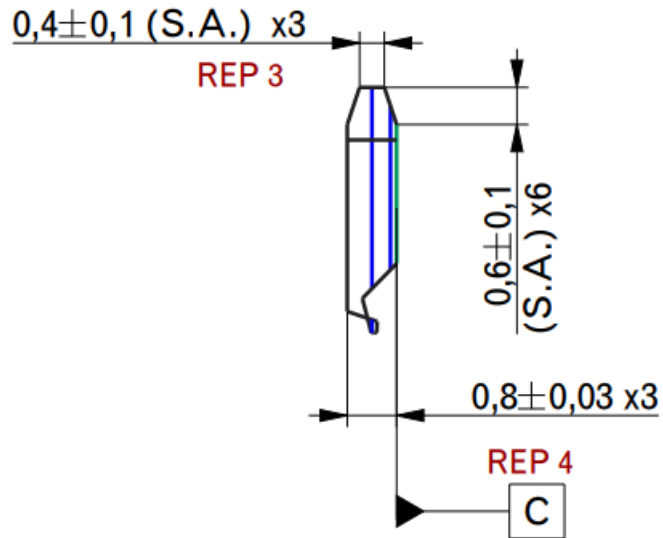
## BÖLÜM 7. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 7.1. Malzemeler

Deneysel direnç nokta kaynak birleştirilmesi yapılmak üzere FECPH054 Terminal ayağı (Şekil 7.1- 7.2) ve FECPH054 Hall etkisi sensörü (Şekil 7.3- 7.4) seçilmiştir. Terminal üzerini gümüş kaplamaya sahiptir. Kalay kaplama lehimle ile birleşmeyi sağlayacaktır.



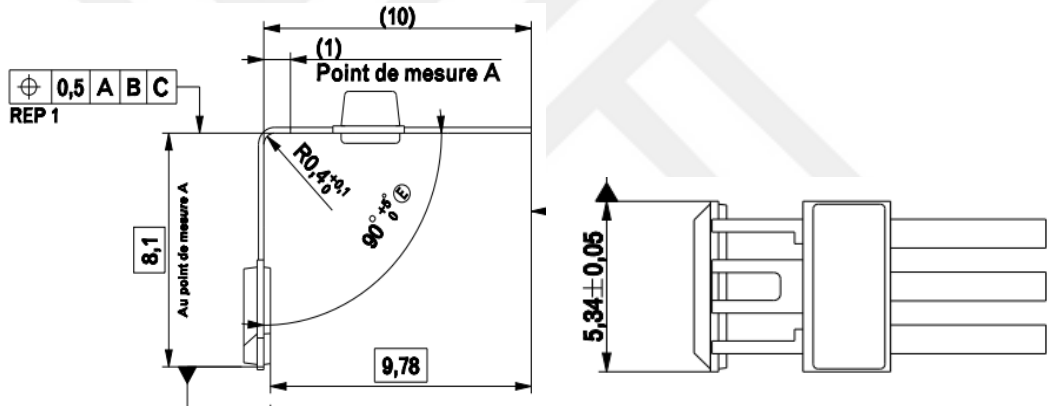
Şekil 7.1: FECPH054 Terminali, Gümüş Kaplamalı Bakır-Çinko Alaşım (CuZn30/ R270).



Şekil 7.2: Terminal Ayak yapısı ; Kalınlık 0.8 mm, genişlik 0,8 mm.



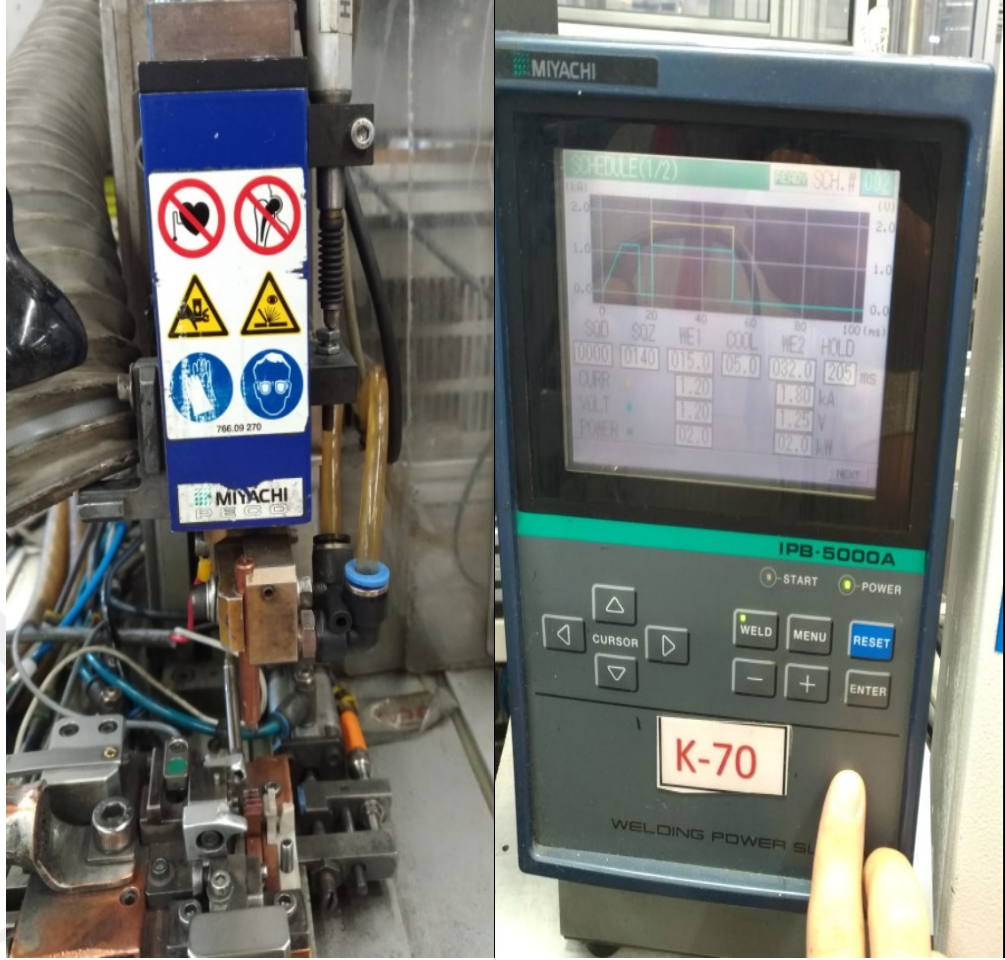
Şekil 7.3: Üç ayaklı Hall etkisi sensörü, Kalay kaplı Bakır Nikel Alaşım.



Şekil 7.4: Sensör ayak yapısı; Kalınlık 0,25 mm, genişlik 0,8 mm.

## 7.2. Spot Kaynak Ekipmanları

Deney için seçilen kaynak makinesi DC güç ile çalışan Miyachi firmasına ait direnç nokta kaynak makinesidir (Şekil 7.5). Kaynak makinesinde tungsten katkılı bakır C-Tipi düz, 1,2 mm kalınlığında elektrot kullanılmıştır.



Şekil 7.5: Kaynak makinesi : Miyachi IPB-5000A , 10kA.

### 7.3. Taguchi Ortogonal Dizi ve Deneysel Parametrelerinin Belirlenmesi

Yapılan deneyde terminal, sensör ve kaynak elektrotu malzemeleri sabit olarak tutulmuştur. Deneyde seçilen proses değişkenleri ve değişken seviyeleri Tablo 7.1’de belirtilmektedir.

Deney için seçilen parametreler Tablo 7.2’de belirtildiği gibi Taguchi L<sub>9</sub> ortogonal dizisine göre belirlenen sıra ile uygulanmıştır.

Tablo 7.1: Proses değişkenleri ve deneyde kullanılan seviyeler.

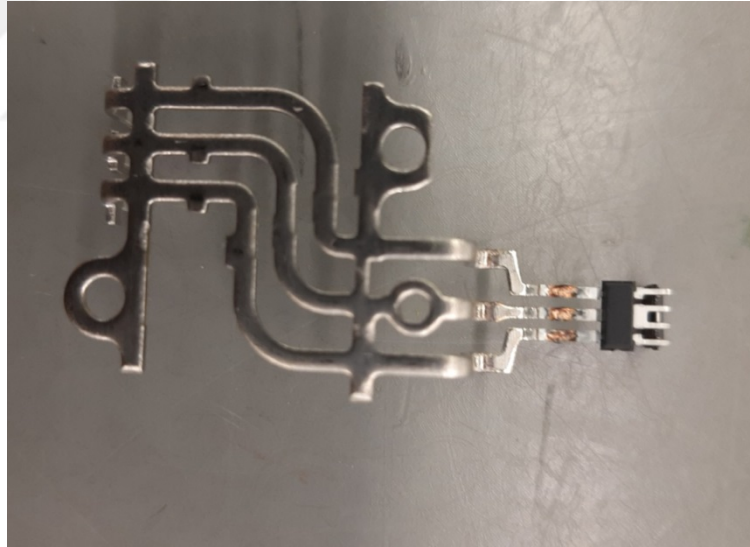
Terminal Kalınlığı	Sensör Kalınlığı	Değişken Sembölü	Proses Değişkenleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
0.8	0.25	A	Kaynak Akımı	kA	1.50	1.75	2.00
		B	Kaynak Süresi	ms	30.00	36.00	42.00
		C	Baskı Kuvveti	N	6.00	8.00	10.00

Tablo 7.2: L9 Ortogonal dizi yapısı.

Deney Numarası	Seçilen Parametre Seviyeleri		
	A	B	C
	Kaynak Akımı	Kaynak Süresi	Baskı Kuvveti
1	1	1	3
2	1	2	2
3	1	3	1
4	2	1	2
5	2	2	1
6	2	3	3
7	3	1	1
8	3	2	3
9	3	3	2

#### 7.4. Deney Parçalarının üretilmesi

Terminal ve Hall etki sensörü Kaynak makinesine yerleştirilmiş ve L<sub>9</sub> ortogonal dizisinde belirlenen kaynak akımı, kaynak süresi ve baskı kuvveti parametreleri her bir deney numarasına göre kaynak makinesi kontrol ünitesine girilerek her bir deney numarası için 10'ar adet örnek üretilmiştir (Şekil 7.6).



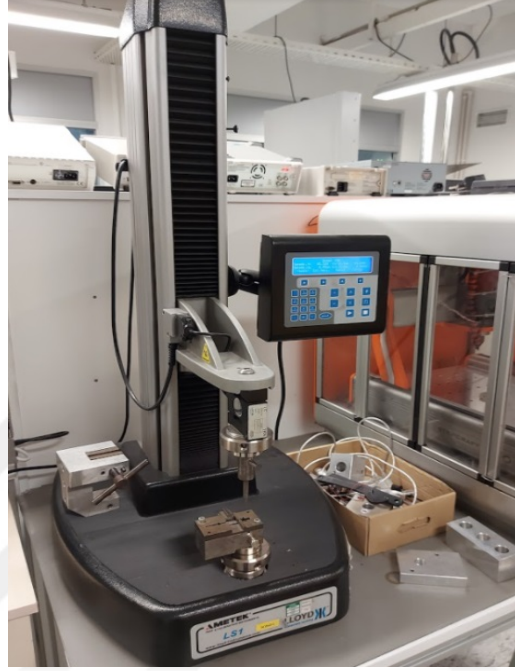
Şekil 7.6: Kaynaklanmış terminal-sensör örneği.

#### 7.5. Laboratuvar Test Ekipmanları ve Test Süreci

Deney sonuçlarının gözlenmesi sırasında öncelikle 3 ayaklı kaynatılmış sensör ayakları ayrı ayrı kesilmiş ve her bir parametreden 10'ar adet örneğin çekme mukavemetleri, çekme testi ekipmanı ile (Şekil 7.7) Çekme Mukavemetleri ölçülmüştür (Şekil 7.8). Çekme deneylerinde kopmanın sensör ana malzemesinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu



ise kaynak birleşimin uygunluğunu teyit etmektedir (Şekil 7.12). Sonrasında daha detaylı gözlemler için kaynak penetrasyon numuneleri alınmış ve önce yüzey parlatma işlemleri uygulanmış (Şekil 7.9), sonrasında ise digital mikroskop (Şekil 7.10) ile oluşan kaynak penetrasyon birleşimi yapısı dikey ve yatay olarak gözlemlenmiştir (Şekil 7.11). Ayrıca



Şekil 7.7: Çekme Testi Ekipmanı - Ametek LS1 , Kapasite 250N.



Şekil 7.8: Çekme testi.

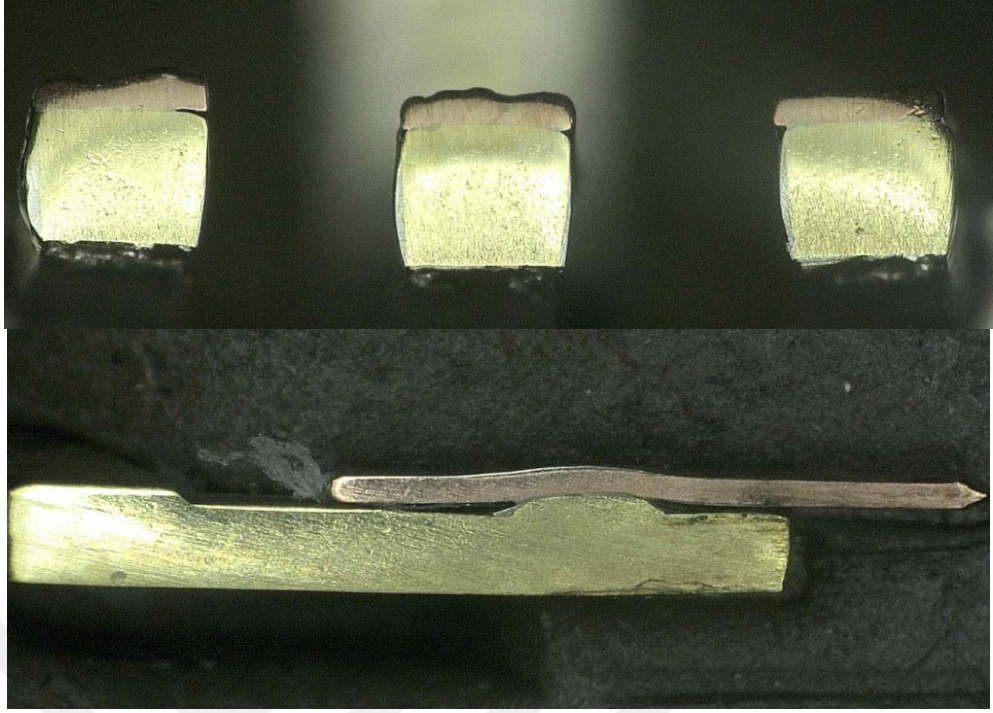




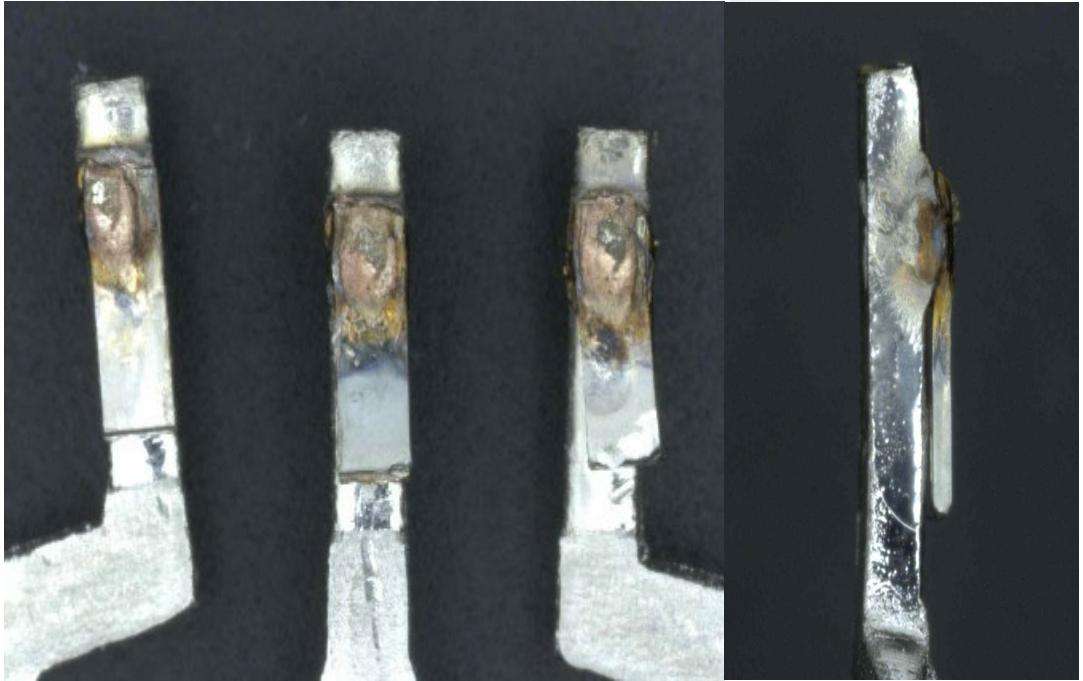
Şekil 7.9: Yüzey Parlatma Ekipmanı: MetSPre , 100-1380 rpm.



Şekil 7.10: Dijital Mikroskop- Keyence VHX-2000 , 100-1000 dijital büyütme.



Şekil 7.11: Oluşan kaynak birleşimi (lehimleme) yapısı (yatay ve dikey kesitlerde).



Şekil 7.12: Çekme testi sonrası kopma bölgesi detayı (x150 büyütme).

## 7.6. Çekme Testi Sonuçları

Deneysel sonuçlarda ortaya çıkan çekme mukavemeti sonuçları Tablo 7.3'te verilmektedir.

Tablo 7.3: Deneylerden elde edilen Çekme Mukavemetleri.

Deney Numarası	Çekme (N)	Mukavemeti
1	63.27	
2	66.00	
3	67.73	
4	67.60	
5	64.83	
6	65.87	
7	65.53	
8	66.13	
9	64.50	

Deney sonuçlarından yola çıkarak Taguchi'nin En büyük-En iyidir metodu ile S/N oranları hesaplanmış ve Tablo 7.4'e yansıtılmıştır.

Tablo 7.4: Deney sırası ile S/N oran karşılıkları.

Deney Numarası	S/N (dB)	Oranları
1	36.02	
2	36.39	
3	36.62	
4	36.60	
5	36.24	
6	36.37	
7	36.33	
8	36.41	
9	36.19	

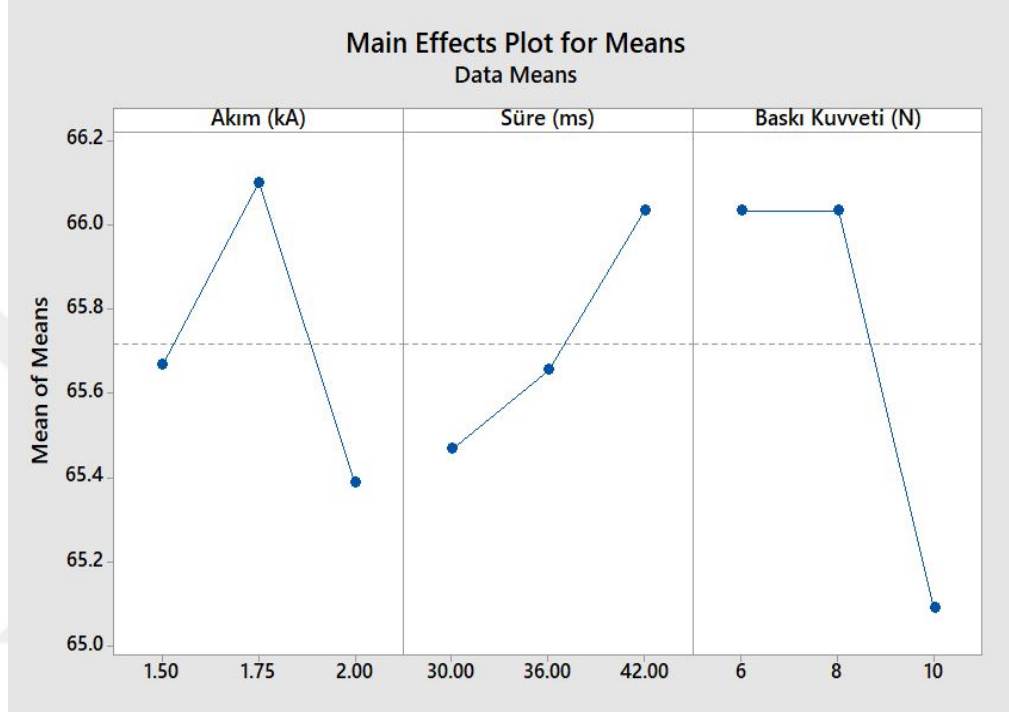
Hesaplanan Sinyal-Gürültü (S/N) oranlarına ek olarak, her bir parametrenin çekme mukavemeti üzerindeki etkileri araştırmak ve optimum parametrelerin belirlenmesini sağlamak adına, parametrelerin ortalama S/N oranları hesaplanmış ve Tablo 7.5'te belirtilmiştir.

Tablo 7.5: Parametrelerin S/N Değerleri.

Simge	Kaynak Parametreleri	S/N Oranları (dB)			Toplam Ortalama S/N (dB)	Maksimum - Minimum
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
A	Akım (kA)	65.67	66.1	65.39	65.64	0.71
B	Süre (ms)	65.47	65.66	66.03		0.57
C	Basınç (N)	66.13	66.03	65.09		0.94

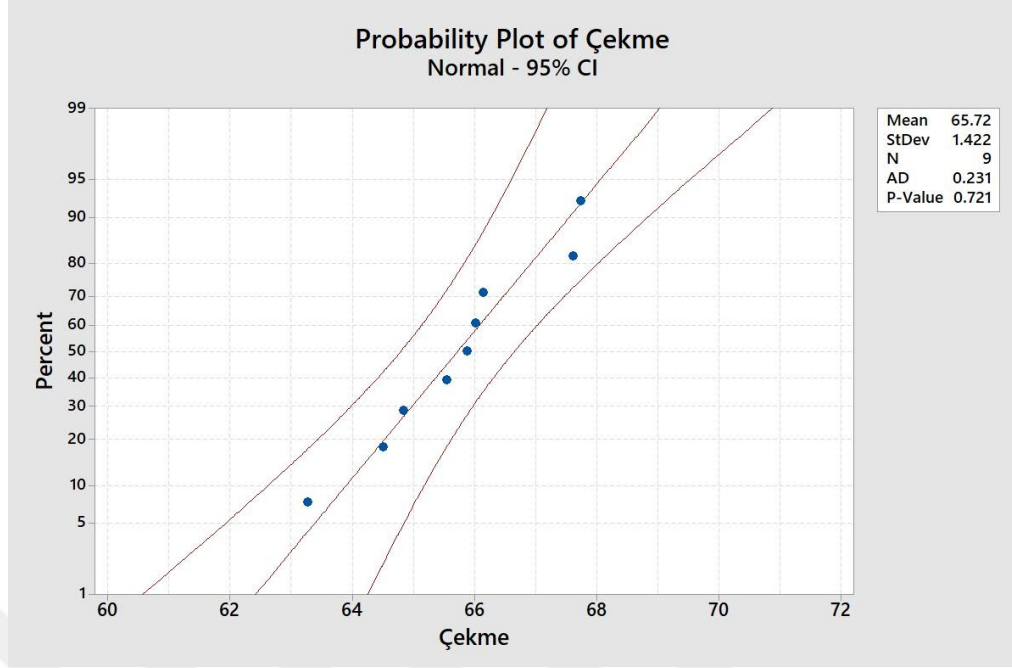
## 7.7. Optimum Parametrelerin Belirlenmesi

Optimum parametrelerin belirlenmesi için parametre değişikliklerinin S/N oranlarının grafiksel analizi yapılmaktadır. Parametre etkilerinin bu metoda uygun olarak gösterimi Grafik 6.1’de yansıtılmaktadır.



Grafik 7.1: Proses Parametre S/N ortalamalarının gösterimi.

Grafik 7.1’de gösterilen veriler incelendiğinde deneyde konu alan direnç nokta kaynağı prosesi için optimum parametrelerin  $A_2B_3C_1$  olduğu tespit edilmektedir. Deneylerde elde edilen dataların doğrulukları normal olasılık grafiği ile teyit edilmiştir (Grafik 7.2).



Grafik 7.2: Çekme mukavemeti S/N ortalama oranları - normal olasılık grafiği.

### 7.7.1. Belirlenen optimum parametrelerin deneysel teyidi

Optimum parametrelerin belirlenmesinden sonra, bu optimum parametreleri kullanılarak yapılacak direnç nokta kaynağı sonrası parçanın tahmini çekme mukavemetini hesaplamak üzere S/N oranı alttaki formül kullanılarak bulunur (3) ;

$$\eta^* = \eta_m + \sum_{i=1}^n (a - \eta_m) \quad (7.1)$$

$\eta^*$  : Tahmini S/N oranı

$\eta_m$  : Toplam Ortalama S/N oranı

a : Optimum seviyedeki ortalama S/N oranı

n : Mukavemete etki eden kaynak parametrelerinin adeti

Optimum parametrelerin tahmini çekme mukavemeti miktarı ve yapılan deneysel teyit sonucu ölçülen çekme mukavemeti miktarı Tablo 7.6'da gösterilmektedir. Ayrıca, karşılaştırma için, bu tabloda deneyler öncesi ilk üretim kaynak parametreleri, S/N oranı ve ölçülen çekme mukavemeti miktarı da verilmiştir.

Tablo 7.6: Doğrulama Deneyi sonuçları.

Veriler	Başlangıç Kaynak Parametreleri	Optimum Proses Parametreleri		S/N Oranındaki iyileşme miktarı %
		Tahmini	Deneysel	
Parametre Seviyeleri	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	
Çekme Mukavemeti (N)	63.27	68.23	67.92	2.10
S/N Oranları (dB)	36.02	36.82	36.78	

## BÖLÜM 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Özellikle otomotiv sektörü gibi yoğun ve artan bir rekabetin olduğu sanayi sektörlerinde, işletmelerin ayakta kalabilmesi için daha kaliteli ürünleri daha düşük fiyatlara üretmeleri bir zorunluluktur. Üretilen ürünlerin kalite ve maliyet verimliliğini geliştirmek içinse proseslerdeki değişken yani parametrelerin belirlenmesi ve optimize edilmesi önemli bir rol oynamaktadır.

Proses parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan klasik deneysel çalışmalarda çok fazla sayıda deney yapılması zorunluluğu yüzünden, zaman ve maliyet kayıpları oluşmakta; ayrıca parametreler kesin olarak optimize edilmediğinden seri imalat durumlarında proseste ve malzemede oluşacak değişimler dolayısı ile kalite problemleri ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden de, parametre belirlenmesinde kullanılan deneysel çalışmalarda, Taguchi metodu gibi istatistiksel metotların kullanılması bir gerekliliktir (Canıyılmaz, 2001).

Taguchi metodu ile çok sayıda değişken ve parametrenin prosese etkisi, minimum adette deneme yapılarak sistematik bir şekilde incelenebilmekte, daha henüz uygulama yapmadan dahi parametrelerin sonuçlara etkisi öngörülelebilmektedir (Canıyılmaz ve Kutay, 2003). Böylece bu metot, işletmelere zaman ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Taguchi metodu kullanılarak belirlenen parametreler aynı zamanda optimize edilmiş değerler olduğu için, prosesin dış etkenlerden daha ez etkilenmesi yani robust olması sağlanmakta ve kalite hatalarının oluşumunun önüne geçilmektedir.

Bu çalışmada, otomotiv sektörü için motor kam milli Hall etkisi etkili sensör üretimi yapan bir firmada, sensör birleştirme prosesi olan direnç nokta kaynağı prosesindeki parametrelerin optimizasyonu ve kalite artışı hedeflenmiştir.

Yapılan literatür ve deneysel çalışma incelemelerinde direnç nokta kaynağı prosesinde, kaynak kalitesi yani çekme mukavemetine en büyük etkisi olan üç adet parametre olarak; kaynak akım gücü (kA), kaynak akım süresi (ms) ve elektrot baskı kuvveti (N)



belirlenmiştir (Muhammad, 2012). Belirlenen bu üç parametreye göre üç ayrı deney seviyeli bir iterasyon planlanmış ve bunun için Taguchi metodundaki L9 ortogonal diziliminden faydalanılmıştır. L9 ortogonal dizilimine göre hareket edilerek 9 adet deney uygulanmıştır. Her bir deneyde 10'ar adet parça olmak üzere 90 adet örnek üzerinde çekme mukavemeti testleri ve kesit analizleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde elde ortaya çıkan çekme mukavemeti değerlerinin S/N oranları, Taguchi "En büyük-En iyi" metodu ile incelenmiş ve en optimum parametreler olarak A2B3C1 parametre seviyeleri tespit edilmiştir. Burada A2: 1.75 kA, B3: 42 ms ve C1: 6 N değerlerini temsil etmektedir.

Parametrelerin S/N oranları analizinde optimum parametre seviyelerin belirlenmesinin yansira, proses üzerindeki maksimum minimum gürültü seviyeleri karşılaştırılmıştır. Değer olarak sırası ile baskı kuvveti 0,94, akım 0,71 ve son olarak kaynak süresi ise 0,57 hesaplanmıştır. Bu verilere dayanarak bu prodesteki çekme mukavemeti miktarına en fazla etki eden parametrenin kaynak sırasında elektrotların parçalara uyguladığı baskı kuvveti olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonrasında da sırası ile akım gücü ve kaynak süresi prosesi etkilemektedir.

Tespit edilen optimum parametre kombinasyonun deney ile teyit edilmesi öncesinde bu parametrelerle üretilecek parçanın yaklaşık çekme mukavemeti miktarına ulaşmak için tahmini S/N oranı hesaplaması metoduna gidilmiştir. Yapılan hesaplar sonucunda tahmini S/N oranı 36.82 dB ve bu orana bağlı olarak tahmini çekme mukavemeti 68.23 N olarak tahmin edilmiştir.

Optimize edilmiş parametrelerle yapılan deneysel üretimin sonunda elde edilen S/N oranı 36.78 dB ve çekme kuvveti değeri de 67.92 N olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç deneysel çalışmalar öncesi ilk parametre değerleri ile üretilen örnekteki 36.02 dB olan S/N oranı ve 63.27 N olan çekme mukavemeti sonuçları ile karşılaştırıldığında; S/N oranında %2.10'lik bir iyileşme ve çekme mukavemetinde de %7.34'lük bir artış gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, motor kam milleri sensörleri birleştirmesinde kullanılan direnç nokta kaynağı prosesinin parametre iyileştirmelerinde ve diğer benzer proseslerin parametre iyileştirmelerinde Taguchi metodunun uygulanmasının oldukça avantajlı olduğu ve kaynak kalitesinde iyileştirmeler sağlandığı belirlenmiştir. Bu yöntemin kolayca ve efektif olarak sanayide uygulanabilirliği ve avantajları bu çalışma ile bir kez daha teyit edilmiştir. Bu yüzdendir ki proses geliştirme ve kalite güvence birimlerinde görev alan



mühendis ve teknik adamların bu yöntemi öğrenmesi ve uygulaması tavsiye edilmektedir. Bu metodun yaygınlaşması ile deney adetleri azalacak, robust prosesler oluşturulacak ve toplam üretim verimliliği arttırılacaktır.

İleri dönem ki araştırmalarda, bu çalışma dahilinde incelenmemiş olan, elektrik direnç nokta kaynağı parametre optimizasyonun kaynak birleştirmelerindeki mikro yapıya etkileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında incelenebilir. Ayrıca kaplamalı malzemeler, üzerlerindeki kaplama tabakaların kaldırılması ve farklı kaplama malzemeleri ile üzerlerine kaplama uygulamaları yapılarak deneme ve değişken adetleri arttırılabilir, böylece bu değişkenlerin etkileride Taguchi metodu ile incelenerek kam mili sensörlerinin elektrik direnç nokta kaynak ile birleştirilmesi uygulamalarında en uygun kaplama tür ve kalınlığı tespit edilmesi çalışması da gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Akkuş, A. & Vural, M. (2003). Direnç nokta kaynaklı galvanizli YDDA çelik sacların statik ve dinamik dayanımı üzerine çekirdek çapının etkisi. *TMMOB, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*.
- Akyol, M. (2001). *Otomotiv sanayiinde kullanılan direnç nokta kaynak uygulamaları ve karşılaşılan sorunlar*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Anık, S., Anık, E. & Vural, M. (2000). *1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı*. İstanbul: Birsen.
- Bechtold, M. & Körner, E. (2007). Powerful, light-weight and cost effective: Constructed camshafts. *Schmiede-Journal, Marz*, 31-32.
- Brasseur, G. (2001). Modeling of the front end of a new capacitive finger-type angular-position sensor. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50(1), 111-116.
- Byrne, D. M. & Taguchi, S. (1987). The Taguchi approach to parameter design. *Quality Progress*, 20(12), 19-26.
- Canıyılmaz, E. & Kutay, F. (2003). Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 18(3), 51-63.
- Canıyılmaz, E. (2001). *Kalite geliştirmede Taguchi metodu ve bir uygulama*. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çayıroğlu, İ. (2020). Makine elemanları ders notları. Erişim: 25 Ekim 2020, [http://www.ibrahimcayiroglu.com/Sayfalar/Ders\\_MakineElemanlari.aspx](http://www.ibrahimcayiroglu.com/Sayfalar/Ders_MakineElemanlari.aspx)
- Çimen, M. & Akkuş, A. (1999). *Nokta Direnç Kaynağında Sıcaklık Dağılımının İncelenmesi, Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*. Kitap No:363, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- Donders, S., Brughmans, M., Hermans, L., & Tzannetakis, N. (2005). The effect of spot weld failure on dynamic vehicle performance. *Sound and Vibration*, 39(4), 16-25.
- Dubey, A. K. & Yadava, V. (2008). Multi-objective optimisation of laser beam cutting process. *Optics & Laser Technology*, 40, 562-570.

- Dudita, F. L. (1989). *Articulated, Inventive, Cinematic Mechanisms*. Bucharest: Technical Publishing House.
- Esendir, E. (2009). *Farklı metallerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- European Standard. (2016). TS EN ISO 14270, specimen dimensions and procedure for mechanized peel testing resistance spot, seam and embossed projection welds. Erişim: 8 Eylül 2020, <https://www.iso.org/standard/24040.html>
- Fraley, S., Oom, M., Terrien, B. & Date, J. (2006). Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. *The Michigan Chemical Process Dynamic and Controls Open Text Book*, 2(3), 4.
- Gary, M. & Abhay, N. (2001). *Weight Reduction Opportunities through Innovative Hydroforming Case of One Piece Frame Rails & Hollow Camshafts*. Excella Technologies Inc: Canada, India.
- Hiroshi, H. (1976). *Method of Manufacturing Assembly-Type Camshaft*. US Patent.
- Kackar, R. N. (1989). Taguchi's quality philosophy: analysis and commentary. In *Quality control, robust design, and the Taguchi method* (pp. 3-21). Springer, Boston, MA.
- Ma, C., Chen, D.L., Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A. & Biro, E. (2007). Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 485(1-2), 334-346.
- Masahiko, O., Nobuyuki, I., Yuto, N. & Masayuki, I. (2010). Stiffness Readout in Musculo-Skeletal Humanoid Robot by Using Rotary Potentiometer. In *SENSORS, 2010 IEEE* (pp. 2329-2333). IEEE.
- MEB. (2011). *Supap Sistemleri*. Milli Eğitim Bakanlığı Motorlu Araçlar Teknolojisi, 14-21.
- Meneghetti, U. & Maggiore, A. (2011). Antique applications of cam mechanisms. In *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*.
- Mert, T. (2004). *Kaynaklı yapımlarda robotik uygulamalar ve Türkiye'deki durumu*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Miller (2018). Guidelines for resistance spot welding. Erişim 26 Aralık 2020, <https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/resistance.pdf>
- Mohammed, E. B., & Rehman, M. (2003). Digital capacitive angular-position sensor. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 150(1), 15-18.
- Motorlu Araçlar Teknolojisi (2011). *Subap Sistemleri*. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı: Ankara.

- Muhammad, N., Manurung, Y. H., Hafidzi, M., Abas, S. K., Tham, G., & Rahim, M. R. A. (2012). A quality improvement approach for resistance spot welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol*, 2(3), 17-22.
- Müller, J. (1987). The history of cams and cam mechanisms. In *Proceedings of the 7th world congress of TMM*, 3, 1649-1652).
- Nemecek, S., Mužík, T. & Mišek, M. (2012). Differences between laser and arc welding of HSS steels. *Physics Procedia*, 39, 67-74.
- O'Brien, A. & Guzman, C. (Eds.). (2007). *Welding handbook: welding processes*. Miami: American Welding Society.
- Petrescu, F. I. T., & Petrescu, R. V. V. (2019). Dynamics of the distribution mechanism with rocking tappet with roll. *Independent Journal of Management & Production*, 10(3), 951-965.
- Ramazani, A., Mukherjee, K., Abdurakhmanov, A., Abbasi, M., & Prah, U. (2015). Characterization of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded DP600 steel. *Metals*, 5(3), 1704-1716.
- Ross, P. J. & McGraw, T. (2005). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Röhrle, M. D. (2002). The camshaft in the course of time. *MTZ worldwide*, 63(3), 7-9.
- RWMA. (2003). *Resistance Welding Manual*. Philadelphia: RWMA.
- Sarı, H. (2002). *Alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında direnç bileşenleri ve nokta boyutları arasındaki ilişkinin incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Satoh, T., Abe, H., Nakaoka, T. & Hayata, Y. (1996). The fatigue life of the spot welded joint under a repeated of R= -1. *Welding in the World*, 37(1): 12 -15
- Sharkey, N. (2007). A 13th century programmable robot. Erişim: 14 Nisan 2020, <https://www.sheffield.ac.uk/marcoms/eview/articles58/robot.html>
- Sing, S. H., Ruxton, T. & Wang, J. (2001). Taguchi concepts and their applications in marine and offshore safety studies, *Journal of Engineering Design*, 12(4), 331-358.
- Sugiuchi, T., Aoyama, S. & Yoshida, T. (1986). *U.S. Patent No. 4,575,913*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Taguchi, G. & Clausing, D. (1990). Robust quality. *Harvard business review*, 68(1), 65-75.

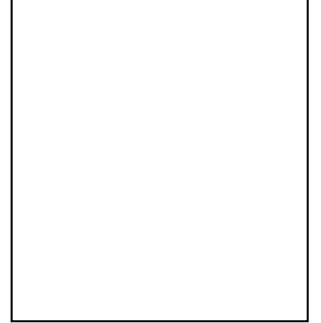
- Tang, H., Hou, W. & Hu, S. J. (2003). Influence of welding machine mechanical characteristics on the resistance spot welding process and weld quality. *Welding Journal Int.*, 5, 116-124.
- Thakur, A. G., Rao, T. E., Mukhedkar, M. S. & Nandedkar, V. M. (2010). Application of Taguchi method for resistance spot welding of galvanized steel. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(11), 22-26.
- Uça, B. (2016). *Otomatik sıkı geçme bağlantıları ile montajlı kam milinin üretilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Uijl, N. D. (2010). Resistance Spot Welding Of A Complicated Joint In New Advanced High Strength Steel. *Conference: 6th International Seminar on Advances in Resistance Welding*, Hamburg, Germany.
- Yanar, N. (2008). *Hidrolik silindir imalatında yüzey pürüzlülüğüne etkili parametrelerinin Taguchi yöntemi ile belirlenmesi*. (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Yuan, X., Li, C., Chen, J., Li, X., Liang, X., & Pan, X. (2017). Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 31-41.
- Zhang, H. (1999). Expulsion and its influence on weld quality. *Welding Journal-New York-*, 78, 373-s.
- Zhang, H., & Senkara, J. (2011). *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*. CRC.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Uğur NAKAŞ

**Doğum Tarihi ve Yeri** : [REDACTED]

**E-posta** : [REDACTED]



### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİMLER:

- 2012-2013 yılları arasında Kırıkkale TÜPRAŞ Rafinerisinde saha mühendisi olarak görev aldı.
- 2013-2014 yılları arasında Ankara'da bulunan Serra Enerji şirketinde, yenilenebilir güneş enerjisi sistemlerinin mekanik konstrüksiyonu üzerinde geliştirmelerde bulundu.
- 2015-2019 yılları arasında Sakarya, Arifiye yerleşkesinde bulunan TOYOTA Boshoku şirketinde uzman proje mühendisi olarak görev aldı.
- 2019'dan beri İstanbul'da bulunan UNIFIL Otomotiv şirketinde proje liderliği görevini sürdürmekte.