

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GALVANİZLİ VE OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK  
SACLARIN NOKTA KAYNAKLI BAĞLANTILARININ  
YORULMA DAYANIMLARININ ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ  
Y. Müh. Ahmet AKKUŞ**

**Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : KONSTRÜKSİYON VE İMALAT**

**MART 2006**

**GALVANİZLİ VE OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK  
SACLARIN NOKTA KAYNAKLI BAĞLANTILARININ  
YORULMA DAYANIMLARININ ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ  
Y. Müh. Ahmet AKKUŞ  
(503992011)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Ocak 2006  
Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Mart 2006**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Murat VURAL**  
**Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Barlas ERYÜREK (İ.T.Ü.)**  
**Prof. Nurullah GÜLTEKİN (Y.T.Ü.)**  
**Prof.Dr. Ahmet ARAN (İ.T.Ü.)**  
**Prof.Dr. Sabri ALTINTAŞ (B.Ü.)**

**MART 2006**

## ÖNSÖZ

Konstrüksiyonların imalinde en yaygın şekilde kullanılan imal usulü kaynaktır. Kaynak yöntemleri, işlemin cinsine göre ergitme kaynağı ve basınç kaynağı olmak üzere sınıflandırılır. Basınç kaynağı yöntemleri arasında, elektrik direnç nokta kaynağı en yaygın şekilde kullanılan yöntemi oluşturur. Özellikle ince saclardan oluşmuş konstrüksiyonların kullanıldığı otomotiv sanayi, nokta kaynağının en önemli uygulama alanlarından birisidir.

Bazı nokta kaynaklı bağlantı bölgeleri, değişken yüklemeler altında zorlanmaktadır. Yorulma hasarı olarak adlandırılan hasar tipi, genellikle yapıdaki bir hata veya süreksizlikten başlar. Kaynak bölgesi bir çeşit süreksizlik olduğundan, nokta kaynaklı bağlantı bölgeleri, yorulma hasarına karşı kritik bölgelerdir, çentik etkisi yaparak yorulma dayanımını büyük ölçüde düşürürler. Bu bağlantıların yorulma dayanımlarının tespit edilerek, bunlara göre uygun parametreler kullanılarak bir imalat yapılması çok önemlidir.

Bu çalışmada, çinko kaplanmış (galvanizli) çelik saclar ve ostenitik paslanmaz çelik saclar kendi aralarında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Birleştirilen parçalara, bazı ön deneylerin ardından (ayırma testi, çekme testi, mikro sertlik ölçüm testi, makro ve mikro yapıların incelenmesi), uzun ömürlü yorulma deneyleri yapılmış ve hasara uğrayıncaya kadar geçen tekrar sayıları belirlenerek bağlantıların S-N eğrileri elde edilmiştir. Yüksek gerilemelerde koparak hasara uğrayan son kopma bölgeleri Tarayıcı Elektron Mikroskobu ile incelenmiştir. Ayrıca bazı bağlantı bölgeleri, yorulma öncesinde ve sonrasında olmak üzere iki aşamalı ultrasonik muayeneye tabii tutulmuştur. Yorulma sonucunda çekirdekte oluşan boyut değişimleri incelenerek, kaynaklı bağlantıda yorulma sonrası çatlak boyları mekanik yöntemler ve bilgisayar programları yardımıyla ölçülmüştür. Bu ölçümler yardımıyla nokta kaynaklı bağlantıya ait malzeme sabitleri ve çatlak ilerleme hızını veren bağıntı elde edilmiştir.

Tez çalışmalarım sırasında maddi, manevi ve bilimsel destekleriyle her zaman yanımda olan ve kendisiyle çalışmaktan büyük onur duyduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat VURAL'a, çalışmalarımda her türlü yardımı sağlayan ve eleştirileriyle beni yönlendiren Anabilim Dalı'mızın değerli öğretim üyelerine, deney malzemelerinin temin edilmesindeki katkılarından dolayı TOYOTA'ya, deneysel çalışmalarımın bazı aşamalarında teçhizat ve makina kullanımı sağladığı için COŞKUNÖZ AŞ.'ye ve FORD OTOSAN'a, tüm teknisyen ve mesai arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olup beni destekleyen, bana güç veren değerli eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Mart 2006

Ahmet AKKUŞ

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>vi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xi</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
<b>2. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI</b>	<b>5</b>
2.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağının Prensibi ve Yöntem Esasları	5
2.2. Kaynak Çevrimi	6
2.3. Direnç Kaynağında Meydana Gelen Isı	7
2.4. Nokta Kaynağı Değişkenlerinin İncelenmesi	9
2.4.1. Elektrot Bileşiminin ve Şeklinin Isı Üretimine Etkisi	9
2.4.2. Kaynak Akımının Isı Üretimine Etkisi	9
2.4.3. Kaynak Zamanının Isı Üretimine Etkisi	10
2.4.4. Kaynak Kuvvetinin Isı Üretimine Etkisi	10
2.4.5. İş Parçasının Malzemesinin Isı Üretimine Etkisi	10
2.4.6. Kaynak Edilecek Parçaların Yüzey Koşullarının Isı Üretimine Etkisi	11
2.5. Kaynak Noktasının Mukavemeti	12
<b>3. ÇALIŞMA KAPSAMINA GİREN ÇELİK SAÇLAR VE YORULMA ÖZELLİKLERİ</b>	<b>13</b>
3.1. Galvanizli Çelik Saclar	13
3.1.1. Çinkonun Korozyon Davranışı	14
3.1.2. Çeliğin Çinko ile Kaplanması	15
3.2. Ostenitik Paslanmaz Çelikler ve Fiziksel Özellikleri	17
3.3. Nokta Kaynağında Kaynak Kabiliyeti	18
3.3.1. Karbonlu Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti	20
3.3.2. Galvanizli Çelik Sacların Kaynak Kabiliyeti	20
3.3.3. Ostenitik Paslanmaz Çelik Sacların Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Kabiliyeti	22
3.4. Metallerde Yorulma Hasarı	22
3.4.1. Yorulma Zorlanmasının Özellikleri	24
3.4.2. Yorulma Kırılmasının Nedeni	25
3.4.3. Yorulma Sınırı Kavramı ve Saptanması	26

3.4.4. Yorulma Ömrü	29
3.5. Konu ile İlgili Literatürde Yer Alan Çalışmalar	29
3.6. Konunun Önemi ve Çalışmanın Planlanması	37
3.6.1. Konunun Önemi	37
3.6.2. Çalışmanın Planlanması	38
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>40</b>
4.1. Genel	40
4.2. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	40
4.2.1. Deneş Malzemelerinin Mekanik Özellikleri	41
4.2.2. Deneş Parçalarının Boyutları	42
4.2.3. Deneş Numunelerinin Hazırlanması	42
4.2.4. Kaynak Makinası	43
4.2.5. Deneylerde Kullanılan Elektrotlar	44
4.3. Kaynaklı Bağlantıların Oluşturulması ve Ön Deneyler	44
4.3.1. Direnç Nokta Kaynaklarının Yapılışı	44
4.3.2. Çekme – Makaslama Deneyleri	46
4.3.3. Işık Mikroskobu ile Yapılan Çalışmalar	47
4.3.4. Çekirdek Boyutlarının Ölçümü	47
4.3.5. Sertlik Değerlerinin Ölçümü	48
4.4. Yorulma Deneyleri	48
4.4.1. Deneş Düzenegi	48
4.4.2. Yorulma Deneyleri ve S-N Eğrilerinin Çıkartılması	51
4.5. Tarayıcı Elektron Mikroskobu ile Yapılan Çalışmalar	52
4.6. Ultrasonik Test Yöntemiyle Yapılan İncelemeler	52
4.7. Yorulma Sonrası Kaynak Bölgelerinin Makroskobik İncelenmesi ve Bağlantının Malzeme Sabitlerinin Bulunması	55
<b>5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ</b>	<b>56</b>
5.1. Genel	56
5.2. Ön Deneş Sonuçlarının İrdelenmesi	56
5.2.1. Kaynak Akımının Çekirdek Boyutlarına Etkisi	56
5.2.2. Çekme – Makaslama Deneş Sonuçları	58
5.2.3. Mikroyapı İnceleme Sonuçları	60
5.2.4. Makroskobik İnceleme Sonuçları	63
5.2.5. Mikrosertlik Deneş Ölçüm Sonuçları	67
5.3. Bağlantıların Yorulma Davranışlarının İncelenmesi ve Parametrelerin Yorulma Ömrüne Etkisi	72
5.3.1. Numunelerin S-N Eğrileri ve Çekirdek Çapının Yorulmaya Etkisi	72
5.4. Yüksek Gerilmelerde Koparak Hasara Uğrayan Numunelerin Son Kopma Yüseylerinin SEM (Tarayıcı Elektron Mikroskobu) Görüntüleri	74
5.5. Kaynaklı Numunelerin Gerilme Şiddet Faktörünün ( $\Delta K$ ) Belirlenmesi	76
5.6. Ultrasonik İnceleme Sonuçları	78
5.7. Yorulma Sonrası Makroskobik İnceleme Sonuçları	81

5.8. Yorulma Sonrası Kalan Çekirdek Çapının ve Malzeme Sabitlerinin Belirlenmesi	83
5.8.1. Kalan Çekirdek Çapının Ölçümü	83
5.8.2. Çatlak Boyunun Tespiti	83
5.8.3. Bağlantıya Ait "C" ve "m" Malzeme Sabitlerinin Bulunması	85
5.8.4. Bağlantının Çatlak İlerleme Hızı Grafiği	87
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>	<b>89</b>
6.1. Sonuçların İrdelenmesi ve Öneriler	89
6.2. Konuyla İlgili İleride Yapılabilecek Çalışmalar	92
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>93</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>99</b>

## KISALTMALAR

<b>Kva</b>	: Kilovoltamper
<b>ITAB</b>	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
<b>AISI304</b>	: Ostenitik paslanmaz çelik sac (18 8 Cr Ni)
<b>TS</b>	: Türk Standardı
<b>N</b>	: Newton
<b>kN</b>	: Kilo Newton
<b>MPa</b>	: Mega Pascal
<b>kA</b>	: Kilo Amper
<b>p</b>	: Periyot
<b>HV</b>	: Hardness Vickers
<b>SEM</b>	: Scanning Electron Microscopy

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 3.1.</b> Elektrokimyasal gerilim serisi .....	13
<b>Tablo 3.2.</b> Çinkonun fiziksel özellikleri .....	14
<b>Tablo 3.3.</b> Düşük karbonlu çelik ile paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması .....	17
<b>Tablo 3.4.</b> Bazı malzemelerin fiziksel özellikleri ile kaynak kabiliyetleri .....	19
<b>Tablo 3.5.</b> Farklı yükleme modları için Kt gerilme yığılma faktörü ve $\phi t$ pozisyon açısı değerleri .....	33
<b>Tablo 4.1.</b> Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi .....	40
<b>Tablo 4.2.</b> TS 138'e göre çekme numuneleri boyutları (kalınlığı 0.5mm ve 3mm arasında olan çelik saclar için) .....	41
<b>Tablo 4.3.</b> Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri .....	42
<b>Tablo 4.4.</b> Deneylerde kullanılan elektrotların kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri .....	44
<b>Tablo 5.1.</b> Kaynaklı numunelerin max. çekme kuvveti ve kesme dayanımları	59
<b>Tablo 5.2.</b> Çevrim sayısına göre kalan kaynak çekirdek çapları .....	83



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Elektrik nokta direnç kaynağının prensibi .....	5
Şekil 2.2 : Kaynak çevriminin safhaları .....	6
Şekil 2.3 : Nokta direnç kaynağında tipik sıcaklık dağılımı .....	7
Şekil 2.4 :: Nokta kaynağına uygulanan mukavemet deneyleri .....	12
Şekil 3.1 : Çinko kaplı çeliğin katodik koruması .....	15
Şekil 3.2 : Sıcak daldırma ile galvanizleme işleminde işlem sırası .....	16
Şekil 3.3 : Sıcak daldırma ile çinko kaplamada geçiş bölgesi iç yapısının Fe – Zn denge diyagramı yardımıyla şematik açıklanması .....	16
Şekil 3.4 : Kaynak bölgesinde çinko tabakasının davranışı .....	21
Şekil 3.5 : Wöhler eğrisi .....	28
Şekil 3.6 : Nokta kaynağı bölgesindeki çentik durumu ve gerilme yığılması .....	30
Şekil 3.7 : Anahtar deliği şeklindeki çentikte temel yükleme tipleri .....	31
Şekil 3.8 : Tipik nokta kaynağı yükleme modları .....	32
Şekil 3.9 : Nokta kaynaklarında temel yükleme tipleri .....	34
Şekil 3.10 : Mod I – II – III temel yükleme tipleri .....	34
Şekil 4.1 :: Sac çekme numunesinin boyutları .....	41
Şekil 4.2 : Deney numunelerinin boyutları .....	43
Şekil 4.3 : Deneylerde kullanılan direnç nokta kaynağı makinası .....	43
Şekil 4.4 : Deneylerde kullanılan elektrotların boyutları .....	44
Şekil 4.5 : Deneylerde uygulanan kaynak periyodu .....	45
Şekil 4.6 : Nokta kaynaklı numuneler .....	46
Şekil 4.7 : Çekme deneyi sonrası kopan kaynaklı numuneler .....	47
Şekil 4.8 : Yorulma makinası ve deney düzeneği .....	48
Şekil 4.9 : Alt tutucu tabla .....	49
Şekil 4.10 : Tutucu çenelerin ilk parçası .....	49
Şekil 4.11 : Tutucu çenelerin ikinci parçası .....	50
Şekil 4.12 : Deneylerde kullanılan tutucu çeneler .....	50
Şekil 4.13 : Dalgalı çekme bölgesinde yorulma zorlanması .....	51
Şekil 4.14 : Çeneler arasına tutturulmuş kaynaklı yorulma deney numunesi .....	52
Şekil 4.15 : Asmalı tip mobil kaynak makinası .....	53
Şekil 4.16 : Ultrasonik test cihazı .....	54
Şekil 4.17 : Kullanılan test probunun görünümü .....	54
Şekil 4.18 : Ultrasonik test anı .....	55
Şekil 5.1 : Nokta çapının kaynak akımına göre değişimi .....	57
Şekil 5.2 : Çekirdek çapı ve malzeme türünün bağlantının çekme mukavemetine etkisi .....	59
Şekil 5.3 : Esas metallerin mikroyapıları .....	60
Şekil 5.4 : Paslanmaz çelik sac bağlantılara ait mikroyapı görünüşleri.....	61

<b>Şekil 5.5</b>	:: Paslanmaz çelik – galvanizli çelik sac bağlantılara ait mikroyapı görüntüleri.....	62
<b>Şekil 5.6</b>	: Galvanizli çelik sac bağlantılara ait mikroyapı görüntüleri.....	63
<b>Şekil 5.7</b>	: Paslanmaz çelik sac çiftleri kaynak bölgeleri .....	64
<b>Şekil 5.8</b>	: Paslanmaz – galvanizli sac çiftleri kaynak bölgeleri .....	65
<b>Şekil 5.9</b>	: Galvanizli çelik sac çiftleri kaynak bölgeleri .....	66
<b>Şekil 5.10</b>	: Sertlik ölçümü yapılan doğrultular .....	67
<b>Şekil 5.11</b>	: Ostenitik paslanmaz çelik sac çiftlerine ait sertlik dağılımları ...	68
<b>Şekil 5.12</b>	: Galvanizli sac çiftlerine ait sertlik dağılımları .....	69
<b>Şekil 5.13</b>	: Paslanmaz- galvanizli bağlantı çiftlerine ait sertlik dağılımları ..	70
<b>Şekil 5.14</b>	: Kaynak bölgesinin beklenen faz yapısının Schaeffler diyagramında gösterilişi .....	71
<b>Şekil 5.15</b>	:: Paslanmaz çelik sac çiftleri S-N eğrileri .....	72
<b>Şekil 5.16</b>	: Paslanmaz – galvanizli çelik sac çiftleri S-N eğrileri .....	73
<b>Şekil 5.17</b>	: Galvanizli çelik sac çiftleri S-N eğrileri .....	74
<b>Şekil 5.18</b>	: Yüksek Gerilmelerde Koparak Hasara Uğrayan Paslanmaz Çelik Sac Çiftlerinden Oluşan Bağlantıların Yorulma Sonrası Son Kopma Bölgelerinin SEM Fotoğrafları ve Makro Görüntüleri .....	75
<b>Şekil 5.19</b>	: Yüksek Gerilmelerde Koparak Hasara Uğrayan Paslanmaz Çelik Sac – Galvanizli Çelik Sac Çiftlerinden Oluşan Bağlantıların Yorulma Sonrası Son Kopma Bölgelerinin SEM Fotoğrafları ve Makro Görüntüleri .....	75
<b>Şekil 5.20</b>	: Yüksek Gerilmelerde Koparak Hasara Uğrayan Galvanizli Çelik Sac Çiftlerinden Oluşan Bağlantıların Yorulma Sonrası Son Kopma Bölgelerinin SEM Fotoğrafları ve Makro Görüntüleri .....	75
<b>Şekil 5.21</b>	: Dengeleyici yerleştirilmiş nokta kaynaklı deney numunelerinin şematik gösterimi .....	76
<b>Şekil 5.22</b>	: Paslanmaz çelik saclardan oluşan bağlantıların $\Delta K - N$ eğrileri .	77
<b>Şekil 5.23</b>	: Paslanmaz - galvanizli saclardan oluşan bağlantıların $\Delta K - N$ eğrileri .....	77
<b>Şekil 5.24</b>	: Galvanizli çelik saclardan oluşan bağlantıların $\Delta K - N$ eğrileri .	77
<b>Şekil 5.25</b>	: 30.000 çevrimlik numunenin ultrasonik inceleme sonuçları .....	78
<b>Şekil 5.26</b>	: 60.000 çevrimlik numunenin ultrasonik inceleme sonuçları .....	79
<b>Şekil 5.27</b>	: 90.000 çevrimlik numunenin ultrasonik inceleme sonuçları .....	80
<b>Şekil 5.28</b>	:104.000 çevrimlik numunenin ultrasonik inceleme sonuçları .....	81
<b>Şekil 5.29</b>	: Yorulma sonrası saclar arasında kalan kaynak bölgeleri .....	82
<b>Şekil 5.30</b>	: Çatlak boyunun belirlenmesi .....	84
<b>Şekil 5.31</b>	: Çatlak boyunun çevrim sayısına göre değişimi .....	84
<b>Şekil 5.32</b>	: Kaynaklı bağlantının $\log \Delta K_{II} - \log da/dN$ grafiği .....	86
<b>Şekil 5.33</b>	: Paslanmaz çelik - galvanizli çelik sac bağlantılar için yorulma çatlak ilerleme hızı grafiği.....	87
<b>Şekil 5.34</b>	: Mod I için esas metallere ait yorulma çatlak ilerleme hızları grafiği.....	88

## SEMBOL LİSTESİ

<b>F, P</b>	: Elektrot kuvveti
<b>T</b>	: Sıcaklık ( $K^0$ )
<b>V (u)</b>	: Gerilim
<b>E</b>	: Üretilen toplam ısı (Watt-saniye)
<b>I</b>	: Akım şiddeti (Amper)
<b>R</b>	: Toplam direnç (Ohm)
<b>t<sub>k</sub></b>	: Kaynak süresi (saniye)
<b>Q</b>	: Kaynak bölgesinde üretilen toplam ısı (Watt-saniye)
<b>s, t</b>	: Levha kalınlığı (mm)
<b>d<sub>e</sub></b>	: Elektrod uç çapı
<b>N</b>	: Çevrim sayısı
<b>N<sub>T</sub></b>	: Toplam yorulma ömrü (Çevrim sayısı)
<b>N<sub>i</sub></b>	: Yorulma çatlaklarının başlangıç ömrü
<b>N<sub>p</sub></b>	: Yorulma çatlaklarının ilerleme ömrü
<b>σ<sub>ort</sub></b>	: Ortalama gerilme
<b>σ<sub>alt</sub></b>	: Min. gerilme
<b>σ<sub>üst</sub></b>	: Max. gerilme
<b>σ<sub>g</sub></b>	: Gerilme genliği
<b>σ<sub>y</sub></b>	: Yorulma sınırı
<b>σ<sub>max</sub></b>	: Max. çentik gerilmesi
<b>σ<sub>φ</sub></b>	: Yorulma çentik gerilmesi
<b>K<sub>t</sub></b>	: Gerilme yığılma faktörü
<b>K<sub>f</sub></b>	: Yorulma çentik faktörü
<b>φ<sub>t</sub></b>	: Pozisyon açıları
<b>V</b>	: Çekme hızı (m/sn)
<b>ΔL</b>	: Boyca uzama (mm)
<b>ΔP</b>	: Kuvvet aralığı
<b>ΔK</b>	: Gerilme şiddet faktörü aralığı
<b>K<sub>i</sub>, K<sub>ii</sub>, K<sub>iii</sub></b>	: Mod <sub>i</sub> , Mod <sub>ii</sub> , Mod <sub>iii</sub> yüklemelerde gerilme şiddet faktörleri
<b>σ<sub>k</sub></b>	: Çentik ucu gerilmesi
<b>τ<sub>k</sub></b>	: Çentik ucu kayma gerilmesi
<b>F</b>	: Çekme kuvveti
<b>ρ</b>	: Çentik ucu yarıçapı
<b>e</b>	: Kaynak noktasının flanşa olan mesafesi
<b>α, β</b>	: Mod <sub>ii</sub> ve Mod <sub>iii</sub> yüklemelerin ağırlık faktörleri
<b>K<sub>eş</sub></b>	: Eşdeğer gerilme şiddet faktörü
<b>a</b>	: Çatlak boyu (mm)
<b>C, m</b>	: Malzeme sabitleri
<b>D<sub>ilk</sub>, D<sub>son</sub></b>	: Yorulma öncesi ve sonrasında ölçülen çekirdek çapları
<b>ΔK<sub>ii</sub></b>	: Mod <sub>ii</sub> yükleme tipine ait gerilme şiddet faktörü aralığı

# GALVANİZLİ VE OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN NOKTA KAYNAKLI BAĞLANTILARININ YORULMA DAYANIMLARININ ARAŞTIRILMASI

## ÖZET

Bu çalışmada, çinko kaplanmış (galvanizli) çelik saclar ve ostenitik paslanmaz çelik saclar kendi aralarında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Her farklı sac kombinasyonu için 3 ayrı çekirdek çapı parametre olarak belirlenmiştir.

Belirlenen çekirdek çaplarını verecek kaynak akımlarını optimize etmek amacıyla, kaynaklı numuneler elde edilmeden önce kaynak akımının çekirdek çapına etkisi incelenmiştir. Kaynak çekirdek çapının ve sac kombinasyonunun bağlantının mukavemetine etkisini incelemek için kaynaklı numunelere çekme makaslama deneyleri yapılmıştır. Kaynak bölgeleri ve esas metalleri içine alacak şekilde mikro sertlik ölçümleri yapılmış, bağlantı bölgelerinin makro ve mikro yapıları incelenmiştir. Kaynak parametrelerinin bağlantının özellikle makro yapısı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Galvanizli çelik – ostenitik paslanmaz çelik saclardan oluşan nokta kaynaklı bağlantılarda, farklı çeliklerin kaynağında ortaya çıkan ısıl dengesizlikten dolayı, kaynak çekirdeğinin simetrikliğini kaybettiği görülmüş ve bu durumun bağlantı mukavemeti üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

Üç farklı sac kombinasyonuna sahip nokta kaynaklı numunelerin her bir serisinden sekiz adet özdeş deney numunesi hazırlanmıştır. Bu numune serilerine uzun ömürlü yorulma deneyleri yapılmış ve hasara uğrayıncaya kadar geçen tekrar sayıları belirlenerek bağlantıların S-N eğrileri elde edilmiştir. Buna göre, her üç sac kombinasyonunda da yorulma sınırı gösterme eğilimi vardır, ve en yüksek yorulma sınırı gösteren bağlantı galvanizli çelik saclardan oluşan bağlantıdır. Yorulma sonrasında, yüksek gerilmelerde zorlanan ve koparak hasara uğrayan numunelerin kopma yüzeyleri Tarayıcı Elektron Mikroskobu ile incelenmiş, bunların fotoğrafları çekilmiştir.

Yorulma öncesi ve yorulma sonrası kaynaklı bağlantıdaki değişimleri incelemek amacıyla, galvanizli sac – ostenitik paslanmaz çelik sac bağlantılardan oluşan özdeş 4 adet numuneye ultrasonik testler yapılmıştır. Bu testler yardımıyla, yorulma sonucunda çekirdekte oluşan boyut değişimleri incelenmiştir. Aynı kaynaklı bağlantıda, yorulma sonrası çekirdek boyutlarındaki değişimler ve dolayısıyla da çatlak boyları mekanik yöntemler ve bilgisayar programları yardımıyla ölçülmüştür. Bu değerler yardımıyla bu tip nokta kaynaklı bağlantıya ait malzeme sabitleri (C ve m malzeme sabitleri) ve çatlak ilerleme hızını veren bağıntı elde edilmiştir.

# **THE INVESTIGATION OF THE FATIGUE STRENGTH OF THE SPOT WELDED GALVANIZED AND AUSTENITIC STAINLESS STEEL SHEETS**

## **SUMMARY**

In this study, galvanized steel sheets and austenitic stainless steel sheets were welded by using resistance spot welding. Three different nugget diameters were selected for each sheet combinations.

The effect of the weld current on the nugget diameter were investigated to optimize determined weld nugget diameters as experiment parameter. The tensile – shear tests were performed to welded specimens to investigate the effects of the weld nugget and sheet combination on the strength of the welded joints. Also, micro hardness tests were made to weld area and base metals, and macro – micro structures of the welded joints were investigated by experimentally. The antisymmetric nugget formation which occurs in resistance spot welding of the different steel sheets was seen in galvanized steel – austenitic stainless steel sheet combination and the effects of this result on the weld strength were discussed.

The fatigue tests were applied to the eight identical spot welded specimens series with three different sheet combinations, and the S-N curves of the welded joints were obtained by recording number of cycles to failure. The galvanized steel sheets combination has the highest fatigue limit.

The failure after fatigue tests was seen as rupture in some of the high stresses applied spot welded specimens and those rupture surfaces were investigated by SEM (Scanning Electron Microscopy) and taken photographs. The ultrasonic tests were performed to four identical specimens of the welded galvanized steel sheet – austenitic steel sheet to observe the variations in the welded joints both before and after fatigue. The crack lengths after fatigue were measured by using mechanical method and a software program for the same welded joint. By using the obtained measurements, material coefficients (C and m coefficients) and crack growth rate relation of the resistance spot welded galvanized steel – austenitic stainless steel sheet joint were obtained.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Bir mühendislik malzemesinin seçiminde, maliyet de dahil olmak üzere, bir çok faktör rol oynar. Metalik malzemelerden yapılan uygulamaların büyük çoğunluğunda, farklı çeliklerden oluşan konstrüksiyonlar kullanılmaktadır. Aynı konstrüksiyonda değişik zorlamalara maruz kısımlar, bu zorlamalara göre seçilen malzemelerden meydana getirilmektedir. Örneğin, korozyona maruz kısımlarda korozyona dayanıklı malzemeler, yüksek dayanım gerektiren kısımlarda da yüksek dayanımlı malzemeler tercih edilir [1, 2, 3].

Günümüzde korozyona karşı dayanıklı malzemelerin kullanılmasına duyulan büyük talep artışı nedeniyle, bu alanda çok geniş araştırmalar yapılmakta ve yeni teknikler geliştirilmektedir. Çelik malzemelerin korozyona karşı dayanıklı hale getirilmelerinde birçok yöntem uygulanmaktadır. Bunlar esas olarak çeliğin bileşimine, korozyona dayanımı artıran alaşım elemanları katmak ya da çelik bileşimini değiştirmeden, malzemenin yüzeyine korozyona dayanıklı bir tabaka kaplamaktır. Birinci duruma paslanmaz çelikler, ikinci duruma da galvanizli çelikler tipik bir örnektir [4, 5].

Metalik kaplama işleminde iki esas faktör söz konusudur. Birincisi, metalin korozif ortamdan mekanik olarak yalıtılması, ikincisi de kaplama tabakası ile esas tabaka arasındaki galvanik ilişkidir. Eğer kaplama metali, esas metale göre galvanik seride daha yüksek bir sırada ise, esas metal bu durumda katodik olduğundan ve bu sayede korunduğundan dolayı, kaplamadaki süreksizlikler ciddi bir sorun oluşturmaz. Çinko ve kadmiyum, çeliğe galvanik koruma sağlayan metallere iki örnektir [5, 6].

Metalik kaplama uygulamalarında, çok sayıda yöntem kullanılmaktadır. Çelik üzerine çinko kaplama (galvanik kaplama), genellikle temiz yüzeylere sahip çelik sacların, erimiş çinko banyosuna daldırılmasıyla yapılır. Daha ince ve uniform çinko kaplamaları, elektroliz yoluyla elde edilebilir. Bu yöntem, giderek daha fazla

uygulama alanı bulmaktadır. Diğer bir kaplama yöntemi olan difüzyon esaslı kaplama işlemi, toz halindeki çinko metalin yüksek sıcaklıkta çelik üzerine uygulanmasıyla yapılır. Daha kalın kaplamalar, metal püskürtme yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu halde, özel bir üfleç, kaplama metalini eriyik haline getirir ve basınçlı hava yardımıyla bu eriyiği, önceden hazırlanmış esas metal yüzeyine püskürtür [6].

Konstrüksiyonların oluşturulmasında, günümüzde eskiye oranla temel değişiklikler gerçekleşmiştir. Daha önceleri, bitmiş iş parçaları çinko banyosuna daldırılıp galvanizlenirken, artık günümüzde tek tek parçalar ya da konstrüksiyonun tamamı galvanizli çelik sac ya da profillerden yapılmaktadır. Bu gelişme, 1960'lara kadar, sacların galvanizleme işleminin insan gücü ile tek tek yapılması işleminden, bu tarihten sonra otomatik sac galvanizleme sistemlerinin geliştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu otomasyon beraberinde maliyet düşüşlerini ve kalite artışlarını getirmiştir. Günümüzde galvanizleme fabrikaları, çeşitli form ve boyutlarda galvanizli çelik saclar üretmekte ve bu alandaki talebe yanıt vermektedirler. Bir çelik sacın yüzeyindeki çinko tabakası, normal şartlarda 350 g/m<sup>2</sup>'lik bir değerdedir ve çelik sacın özelliklerinden bağımsız olarak, esas malzemenin hasara uğramasına kadar yüzeyde kalır [6].

Çelik malzemelerin korozyona karşı dayanıklı hale getirilmesinde uygulanan ikinci yöntem, çeliğin bileşimine korozyona dayanımı artıran alaşım elemanları katmaktır. Paslanmaz çeliklerin üretimi bu esasa dayanır. Çeliğin bileşiminde korozyona karşı dayanımı artıran en önemli alaşım elementi kromdur. Korozyona dayanımın sağlanabilmesi için çeliğin bileşiminde en az %12 krom bulunması gerekir. Paslanmaz çelikler, ferritik kromlu paslanmaz çelikler, martenzitik kromlu paslanmaz çelikler ve ostenitik kromlu paslanmaz çelikler olmak üzere başlıca üç grupta toplanır [7, 8].

Konstrüksiyonların imalinde en yaygın şekilde kullanılan imal usulü kaynaktır. Kaynak yöntemleri, işlemin cinsine göre ergitme kaynağı ve basınç kaynağı olmak üzere sınıflandırılır. Basınç kaynağı yöntemleri arasında, elektrik direnç nokta kaynağı en yaygın şekilde kullanılan yöntemi oluşturur. Özellikle ince saclardan oluşmuş konstrüksiyonların kullanıldığı otomotiv sanayi, beyaz eşya ve mutfak eşyaları imalat sanayi, kimyasal kapların imalat sanayiinde nokta kaynağı başlıca

birleştirme yöntemidir. Nokta kaynağının esasını, elektrotlar tarafından bir arada basınç altında tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı, iş parçalarının gösterdiği direnç nedeniyle oluşan ısı ile birleşmenin meydana gelmesi oluşturur [9, 10, 11].

Galvanizli çelik sacların ostenitik paslanmaz çelik saclarla nokta kaynağında, malzemelerin kendi aralarında nokta kaynağı ile birleştirilmeleri sırasında ortaya çıkan problemlere ek olarak, bir araya getirildiklerinde ayrıca çeşitli problemler oluşur. Bu problemlerden en önemlisi, galvanizli çelik sac ve ostenitik paslanmaz çelik sac çiftinin nokta kaynağında, galvanizli tarafta ortaya çıkan elektrotun çinko tabakası ile alaşımlanmasıdır. Ayrıca bu malzemelerin elektrik ve ısı iletkenliklerinin farklı olması da uygun kaynak parametrelerinin tespit edilmesinde güçlükler doğurur [12, 13, 14].

Özellikle otomotiv sektöründe, dış kısmı oluşturan sac bölgeler nokta kaynağı ile birleştirilmektedir. Bir otomobil gövdesinde yaklaşık 3000 – 4000 adet nokta kaynağı vardır. Önceleri, otomobillerde sadece düşük karbonlu çelik saclar kullanılırdı. Ancak son yıllarda otomobil üreticileri, yapıyı korozyona karşı dirençli hale getirmek için düşük karbonlu çelik sacları çinko ile kaplayarak kullanılmaktadır. Böylece, bu tip saclar galvanizli çelik sac olarak adlandırılırlar.

Otomotiv sektöründeki nokta kaynaklı bağlantı bölgeleri, değişken yüklemeler altında zorlanmaktadır. Yorulma hasarı olarak adlandırılan hasar tipi, genellikle yapıdaki bir hata veya süreksizlikten başlar. Kaynak bölgesi bir çeşit süreksizlik olduğundan, nokta kaynaklı bağlantı bölgeleri, yorulma hasarına karşı kritik bölgelerdir, çentik etkisi yaparak yorulma dayanımını büyük ölçüde düşürürler. Bu bağlantıların yorulma dayanımlarının tespit edilerek, bunlara göre uygun parametreler kullanılarak bir imalat yapılması çok önemlidir. Çünkü, otomotiv sektöründe işletme sırasında meydana gelebilecek bir hasar, doğrudan emniyetle ilgili bir problemdir. Son yıllarda otomotiv gövdesinde kullanılan malzemelerde yapılan değişiklikler, aracın güvenliğini belirleyen başlıca parametrelerden biri olan nokta kaynaklarının yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir. Otomobil gövdelerinde kullanılmaya başlanan galvanizli çelik sacların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma davranışlarının incelenmesi önem kazanmıştır.



Nokta kaynaklı bağlantıların yorulma olayının incelenmesi ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu araştırmalarda, özellikle deneysel yöntemler birbirleriyle benzerlik göstermektedir. Ayrıca, teorik olarak çalışan araştırmacılar, bazı nümerik kodlar geliştirerek veya var olan bilgisayar programları kullanarak deneysel verilere yaklaştırmaya çalışmışlardır. Hemen hemen tüm çalışmalarda, nokta kaynağı ile eşlenen malzemeler aynı tür malzemelerdir. Bunlara paslanmaz çelikler, çift fazlı paslanmaz çelikler, yumuşak çelikler, yüksek dayanımlı düşük karbonlu çelikler örnek olarak gösterilebilir. Galvanizli sacların ve farklı bileşime sahip iki malzemenin birbiriyle eşlenerek bunların yorulma davranışlarının araştırılması konusunda yapılan bir çalışmaya, literatür taramasında rastlanmamıştır. Özellikle galvanizli çelik sacların son yıllarda otomotiv endüstrisinde kullanımı oldukça artmıştır. Bu nedenle kullanılan galvanizli çelik saclar, uluslararası bir otomobil imalatçısı firmadan temin edilmiştir.

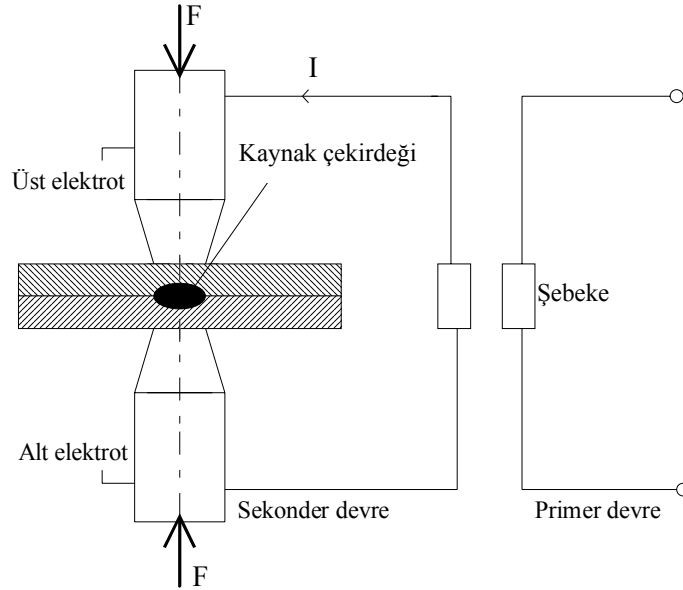
Yüzyılımız otomotiv endüstrisinde artık en önemli parametreler dayanıklılık (korozyon, aşınma, darbelere karşı mukavemet vb.), hafiflik ve ucuz olmasıdır. Dolayısıyla otomobilin veya herhangi bir taşıma aracının gövdesinin her yerinde aynı özelliğe sahip malzeme kullanmak doğru değildir. Özellikle otomobilin farklı bölgelerinde, farklı özelliklere sahip, değişik işlemler görmüş sac malzemeler kullanılmaktadır. Bu da, farklı bileşime, farklı özelliğe sahip sacların nokta kaynağı ile birleştirilmesi ve bu bağlantıların değişken yüklemeler altında zorlanması anlamına gelir. Örneğin, bir otomobilin çamurluk kısmında korozyona direnç daha önemli olduğundan, sıcak daldırılmış çinko kaplı çelik sac kullanılırken, yan kapı kısımlarında paslanmaz çelik sac (bazı özel otomobillerde) ya da elektroliz yoluyla çinko kaplanmış düşük karbonlu çelik sac kullanılır [15]; veya otomobillerin alt kısmında bulunan ekipmanlardan bazıları galvanizli çelik şasiye paslanmaz çelik kelepçeler yarımıyla nokta kaynağı yapılarak tutturulmaktadır. Böylece, galvanizli çelik sacların, ostenitik paslanmaz çelik sacların ve bu iki malzemenin bileşiminden oluşan nokta kaynaklı bağlantıların ve bunların yorulma davranışlarının incelenmesinin önemi ortaya çıkmaktadır ve bu nedenle bu konu doktora tezi olarak seçilmiştir.

## 2. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

### 2.1 Elektrik Direnç Nokta Kaynağının Prensibi ve Yöntem Esasları

Elektrik nokta direnç kaynağı, elektrotlar arasında tutulan parçaların, geçirilen elektrik akımının direnç sebebiyle ısıya dönüşmesi sonucu birbirlerine bir veya daha fazla noktadan birleştirilmesi işlemidir. Kaynak edilecek malzemelerin temas yüzeyi, kısa bir süre tatbik edilen düşük gerilimli ve yüksek akım şiddetli akım ile eriyen kaynak çekirdeğine dönüştürülür. Elektrik akımı kesilince, ısınan metal hızla soğur ve katılaşır. Bu sırada elektrotlar, kaynak edilen parçaları sıkı bir şekilde tutmaya devam ederler, daha sonra geri çekilerek parçayı serbest bırakırlar [16].

Elde edilen kaynağın şekli ve boyutu öncelikle elektrot ucunun boyutu ve çevresi ile belirlenir. Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi, kaynak çekirdeği iki parçanın temas yüzeylerinde meydana gelir ve dış yüzeylere kadar yayılmaz. Kesit alınırsa, uygun bir şekilde yapılmış kaynağın çekirdeğinin dışbükey mercekleşmiş olduğu görülür. Üstten görünüşü ise, elektrot yüzeyinin şeklinde ve yaklaşık aynı boyuttadır.



Şekil 2.1 : Elektrik Nokta Direnç Kaynağının Prensibi [9]

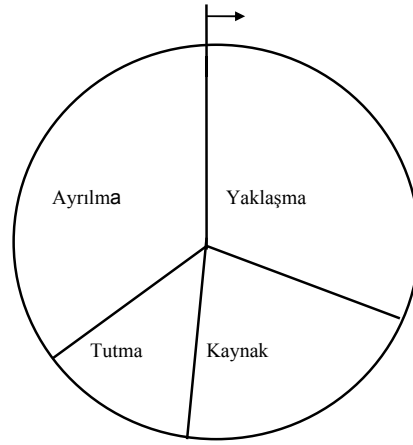
## 2.2 Kaynak Çevrimi

Nokta direnç kaynağında kaynak çevrimi, dört ana zaman diliminden oluşur. Bunlar;

- 1 - Yaklaşma ve sıkma zamanı
- 2 - Kaynak zamanı
- 3 - Tutma zamanı
- 4 - Ayrılma zamanı.

Bu dört zaman dilimi, şematik olarak Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.

Bütün bu zaman dilimlerinin süreleri “ periyot “ ile ifade edilir. Frekansı 50 Hz olan bir elektrik akımında bir periyot 1/50 saniyeye karşı gelir.



1 Yaklaşma	= 15 periyot
2 Kaynak	= 8 periyot
3 Tutma	= 4 periyot
4 Ayrılma	= 13 periyot
<u>Toplam</u>	<u>= 40 periyot</u>
1 periyot	= 1/50 saniye
1 Nokta kaynağı	= 0,8 saniye

**Şekil 2.2 :** Kaynak Çevriminin Safhaları [17]

### 1. Yaklaşma zamanı

Elektrotların birbirine yaklaşıp iki sacı sıkması için geçen süredir.

### 2. Kaynak zamanı

Birleştirilen saclara düşük gerilimde yüksek akım şiddetinde akımın uygulanma süresidir.

### 3. Tutma zamanı

Elektrotlar içerisinde su sirkülasyonu vasıtasıyla kaynak noktasının soğutulması ve bağlantının tam olarak meydana gelmesinin sağlanması için geçen süredir.

#### 4. Ayrılma zamanı

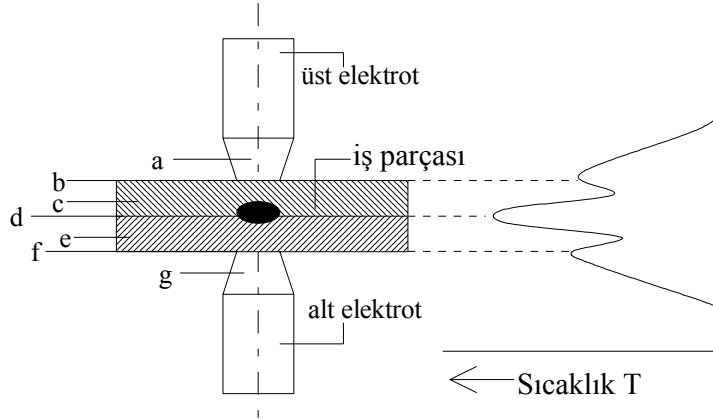
Oldukça kısa bir süre olup, parçaların diğer bir nokta kaynağı için hareket ettirildiği süredir.

### 2.3 Direnç Kaynağında Meydana Gelen Isı

Direnç nokta kaynağı makinalarının sekonder devreleri, kaynak edilecek parçalar dahil, bir seri dirençten meydana gelmiştir. Bu dirençlerin toplamı elektrik akım şiddetini tayin eder. Elektrik akımı (amper olarak) devrenin her noktasında, o noktanın direncinden bağımsız olarak aynıdır. Bununla beraber herhangi bir noktada meydana gelen ısı, doğrudan o noktadaki direnç ile orantılıdır. Sekonder devreyi meydana getiren elektrikselsistem, istenilen noktada ısı meydana getirecek ve sistemin geri kalan elemanlarının relatif olarak soğuk kalmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Kaynak olan parçalarda ve elektrotlarda ısının meydana gelişi ve dağılımı Şekil 2.3.'de görülmektedir [9]. İki metalin kaynağında, yedi direnç seri halde birbirine bağlanmıştır:

- a - Üst elektrotun malzeme direnci
- b - Üst elektrot ile üstteki parça arasındaki temas direnci
- c - Üst parçanın malzeme direnci
- d - Üst parça ile alt parça arasındaki temas direnci
- e - Alt parçanın malzeme direnci
- f - Alt elektrot ile alt parça arasındaki temas direnci
- g - Alt elektrotun malzeme direnci



Şekil 2.3 : Nokta Direnç Kaynağında Tipik Sıcaklık Dağılımı [9]

Bu noktaların her birinde, o noktanın direnci ile orantılı olarak ısı meydana gelir. En fazla ısının kaynak olan noktada yani, kaynak edilecek metallerin temas yüzeyinde (d noktasında) meydana gelmesi istenir ve diğer noktalarda meydana gelen ısının azaltılmasına çalışılmalıdır.

Şekil 2.3.'de kaynak işleminin başlangıcında, bütün parçaların sıcaklıkları başlangıç sıcaklığı hattı ile belirtilmiştir. Sıcaklık, direncin en fazla olduğu kaynak edilen parçaların yüzeyinde (d noktasında) hızla artar. Bu noktadan sonra en fazla dirence sahip olan noktalar b ve f ' dir. Burada da sıcaklık çabuk bir şekilde, fakat d noktasındakinden daha az bir hızla yükselir. b ve f noktalarında meydana gelen ısı, a ve g bölgelerinden, su ile soğutulan elektrot içerisine hızla dağılır. Kaynak parametreleri, uygun bir şekilde kontrol edildiğinde, ilk önce kaynak edilecek parçaların ara yüzeyindeki, yani d noktasının yanındaki noktalar kaynak sıcaklığına ulaşır. Isıtma periyodu boyunca bu küçük belirli sıcaklığa kadar ısınmış metal bölgeleri genişler ve sürekli hale gelerek, kaynak çekirdeğini meydana getirir.

Şekil 2.3.'de görülen sıcaklık dağılımı, kaynak edilecek iş parçalarının malzemesine, boyutuna, metal ile elektrotların relatif ısı iletkenliklerine, elektrotun şekline, boyutlarına ve elektrotun soğutulma şekline bağlıdır [18].

Elektrotlar arasında oluşan ısı miktarı 'E', Joule kanununa göre elektriksel dirence eşdeğer olarak,

$$E = u \cdot i \cdot t \text{ ( W.s)} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır. Ohm kanununa göre, gerilim  $u = i \cdot R \text{ ( V )}$  yerine yazılarak,

$$E = i^2 \cdot R \cdot t \text{ ( W. s )} \quad (2.2)$$

elde edilir. Dalgalı akımda sinüs formundaki dalgalı akım  $I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$  verildiğinde ve

$1W.s = 0,239 \text{ cal}$  olarak yerine yazıldığında, elektrik direnç kaynağında oluşan ısı miktarı;

$$E = 0,239 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \text{ (cal)} \quad (2.3)$$

olarak yazılabilir.

$E =$  Üretilen toplam ısı (Watt-saniye)

$I =$  Akım şiddeti (Amper)

$R =$  İş parçasının toplam direnci (Ohm)

$t =$  Kaynak süresi (saniye)

## 2.4 Nokta Kaynağı Değişkenlerinin İncelenmesi

Kaynak kalitesini etkileyen başlıca kaynak değişkenleri şu şekilde sıralanabilir;

A - Elektrotların malzemesi ve boyutları

B - Kaynak akımı

C - Kaynak zamanı

D - Elektrot kuvveti

E - İş parçasının malzemesi

F - İş parçasının yüzey durumu [19]

### 2.4.1 Elektrot Bileşiminin ve Şeklinin Isı Üretimine Etkisi

Elektrotun ısınmasını minimumda tutabilmek için, elektrotlar yüksek elektrik iletkenliğine ve düşük temas direncine sahip olmalıdırlar. Aynı zamanda, elektrot ucu ile metalin temas ettiği alanlardaki (b ve f bölgeleri, Şekil(2.3.)) ısının uzaklaştırılabilmesi için, yüksek ısı iletkenliğine sahip olmalıdırlar. Elektrotlar ayrıca, tekrarlanan yüksek kaynak kuvvetlerinin sebep olduğu deformasyonlara direnebilecek kadar kuvvetli olmalıdırlar. Genellikle alaşımın sertliği arttıkça ısı ve elektrik iletkenliği azalmaktadır. Dolayısıyla en uygun alaşımın seçiminde, elektriksel, ısıl ve mekanik özelliklerin uygun bir kombinezonu bulunmalıdır.

Levha kalınlığı ve malzemeye bağlı olarak, elektrot temas yüzeyi (uç) çapları aşağıdaki gibi seçilir;

A - Sivri, kubbe, düz, eksantrik ve kesik koni uçlu elektrotlar için;

$$S \leq 3 \text{ mm için } d_e = 5 \sqrt{S} \quad (2.4)$$

Ampirik 2.4 denkleminde, S mm olarak bir levhanın kalınlığı,  $d_e$  mm olarak elektrot uç çapıdır.

### 2.4.2 Kaynak Akımının Isı Üretimine Etkisi

Kaynak akımı, transformatörün sekonder sargısı, sargıyı kollara bağlayan elastik kablolar, kollar, elektrotlar ve kaynak olacak parçalardan geçer. Devrenin her kısmında dirence bağlı olarak ısı meydana gelir.

Meydana gelen ısının bir kısmı, elektrotlardan ve kaynak olan parçalardan radyasyon ve konveksiyon ile kaybolur.

Çeliklerin ısı iletkenliği bakırın ısı iletkenliğinin yaklaşık %12'si kadardır. Eğer çeliğin bakır esaslı elektrotlar ile kaynağında yeterli bir kaynak akımı kullanılırsa, kaynak edilecek parçaların ara yüzeyinde meydana gelen ısının kaynak noktasından uzaklaşması, elektrot yüzeylerinde meydana gelen ısının su soğutmalı elektroda geçişinden daha yavaştır. Dolayısıyla, önce kaynak edilen parçaların ara yüzeyi birleşme sıcaklığına ulaşır ve kaynak bu noktada meydana gelir (Şekil 2.3).

#### 2.4.3 Kaynak Zamanının Isı Üretimine Etkisi

Kaynak edilen parçalar içerisinde sıcaklığın zamana bağlı olarak değişimi Şekil 2.3.'de görülmektedir. Kaynak noktasında (d), ilk % 20 zaman sonunda, sıcaklık yükselmesi, geriye kalan kaynak zamanındaki yükselme oldukça düşüktür.

Düşük karbonlu alaşımsız çeliklerin kaynağında, gerekli kaynak zamanı ampirik 2.10 denklemi yardımıyla seçilebilir [19]:

$$t_k = 8. S \quad (2.5)$$

Burada,  $t_k$  periyot olarak kaynak zamanı, S mm olarak levha kalınlığıdır.

#### 2.4.4 Kaynak Kuvvetinin Isı Üretimine Etkisi

Kaynak kuvveti veya elektrot kuvveti, elektrot tarafından kaynak edilecek parçalara, kaynak çevrimi boyunca uygulanan kuvvettir.

Malzeme cinsine ve levha kalınlığına bağlı olarak elektrot kuvveti P, aşağıda verilen ampirik 2.6 eşitlikleri yardımıyla seçilebilir.

Alaşımsız çelikler için	$P = 2.S$	
Yüksek alaşımlı çelikler için	$P = 3,5.S$	(2.6)
Alüminyum için	$P = 2,5.S$	

Burada P, kN olarak elektrot kuvveti, S, mm olarak levha kalınlığıdır [19].

#### 2.4.5 İş Parçasının Malzemesinin Isı Üretimine Etkisi

Bir metalin özgül elektrik direnci, ısı formülündeki R direnç değerinin şiddetini ve sonuçta da verilen bir akım için oluşacak sıcaklığı etkiler. Metalin bileşimi aşağıdaki özellikleri etkiler:

- 1 - Özgül ısı
- 2 - Erime noktası

3 - Gizli erime ısısı

4 - Yoğunluk

Metalin bileşimi, aynı zamanda yumuşama ve erime noktaları arasındaki sıcaklık bölgesini de etkiler. Çeliklerin bu sıcaklık bölgesi oldukça büyüktür. Bu sebeple, verilen iki çelik sac, akım, zaman ve basıncın geniş bir bölgesi içerisinde kaynak yapılabileceğinden, çeliğin kaynağı için şartlar kritik değildir [20].

#### **2.4.6 Kaynak Edilecek Parçaların Yüzey Koşullarının Isı Üretimine Etkisi**

Yüksek ve tekrarlanabilir kalitede nokta kaynaklarının elde edilebilmesi için, elektrotların temas dirençleri minimum tutulmalıdır. Düşük elektrot temas direnci, temiz parçalar kullanılarak ve elektrot kuvveti kontrol edilerek sağlanır.

Mikro boyutlarda bakıldığında metal saçların yüzeylerinin muntazam olmadığı görülür. Bu durum, düşük elektrot basıncı tatbik edildiğinde metal-metal temas yüzeyinin, bütün temas yüzeyinin ufak bir yüzdesi olmasına neden olur. Elektrot kuvveti artırıldıkça metal-metal temas alanı artar ve böylece elektrik direnci azalır. Elektrot malzemesinin kaynak edilecek parçalardan daha yumuşak olduğu durumlarda, elektrot kuvvetinin artırılması, metal-elektrot temas yüzeyinin, metal-metal temas yüzeyinden daha iyi bir şekilde temas etmesini sağlar.

Her ne kadar, elektrot kuvveti ısı enerjisi formülüne ( $Q = I^2.R.t$ ) direk olarak girmiyorsa da, elektrik direnci üzerine büyük bir etkisi vardır. Temas direnci, elektrot kuvveti ile ters orantılıdır [21].

Kaynak edilecek parçalar veya en azından birleştirme yüzeyleri, iyi bir şekilde temizlenmelidir. Elektrotlarla temasa gelebilecek kir, pas ve oksit filmleri kaynakların yüzey görünümünü bozarlar.

Kirlilik ve yağ filmleri, buhar fazında yağ alma veya kimyasal banyolarla uzaklaştırılabilir. Bununla beraber, bezle, elle silinerek de kaliteli nokta kaynakları elde edilebilir. Oksit filmleri ise mekanik yollarla uzaklaştırılabilir.

Soğuk haddelenmiş yüzeyler veya asit ile temizlenmiş sıcak haddelenmiş ve yağlanmış yüzeyler üzerindeki ince yağ filmlerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkisi çok küçüktür. Bu konuda yapılan testlerde, ince bir yağ filmi bulunan metaller üzerinde yapılan nokta kaynaklarının dirençlerinin, aynı metallerin yağı alındıktan sonra yapılanlara nazaran % 2-3 daha düşük olduğunu göstermiştir.

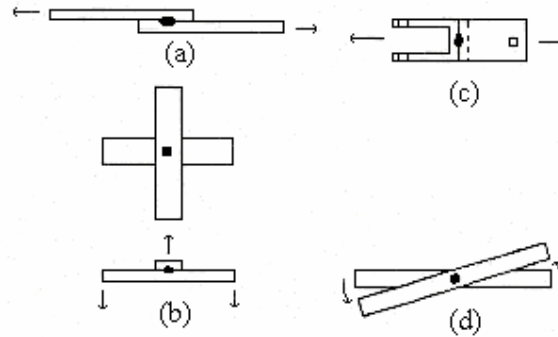


Paslanmış veya ısı ile meydana gelmiş siyah veya mavi oksit filmleri ihtiva eden çelikler, direnç nokta kaynağı ile kaynak edilebilirler. Fakat kaynak kalitesi ve sürekliliği, bu tabakaları ihtiva etmeyen çeliklere nazaran düşük olur. Kalın fakat muntazam oksit filmleri ihtiva eden çelikler, düşük bir değerden orta bir değere doğru artan seri halde bir kaynak akımı tatbik edilerek ve oldukça yüksek elektrot kuvvetleri kullanılarak kaynak edilebilirler [22].

## 2.5 Kaynak Noktasının Mukavemeti

Nokta kaynağının statik mukavemetini tayin için aşağıdaki deneyler yapılmaktadır (Şekil 2.4).

- Çekme - makaslama deneyi
- Haç biçimi çekme deneyi
- U biçimi çekme deneyi
- Burulma deneyi



Şekil 2.4 : Nokta Kaynağına Uygulanan Mukavemet Deneyleri [19]

- Çekme - makaslama
- Haç biçimi çekme
- U biçimi çekme
- Burulma

Elektrot boyutları kısmında belirtilen elektrot uç çapları kullanıldığında, özellikle 3 mm kalınlığa kadar levhalarda, çekme - makaslama deneyi sonucu levhalar düğümlenme yoluyla hasara uğrar. Yani kaynak noktası levhanın birinden sıyrılıp, bir delik bırakarak diğer levhada kalır. Bu hasar tipi, yeterli bir kaynak mukavemetinin göstergesidir. Bu nedenle, imalat sırasında kalite kontrolü amacıyla, ayırma deneyi çok sık kullanılır [23].

### 3. ÇALIŞMA KAPSAMINA GİREN ÇELİK SAÇLAR VE YORULMA ÖZELLİKLERİ

#### 3.1 Galvanizli Çelik Saclar

Karbonlu çeliklere alaşım elementi ilaveleri ve ısı işlemlerin uygulanması, çekme dayanımını ve yorulma sınırını büyük miktarda artırır, ancak korozyona karşı davranışı üzerinde belirgin bir etkisi yoktur. Galvanizli saclar, bu amaçla yüzeyleri çinko kaplanmış düşük karbonlu saclardır. Çinkonun kaplama malzemesi olarak seçilmesinin başlıca nedenleri, elektrokimyasal gerilim serisindeki yerinin asallıktan uzak oluşu (Tablo 3.1.) ve yaygın kullanılan metallerle temasta olduğu zaman anot olarak davranmasıdır [24].

**Tablo 3.1:** Elektro Kimyasal Gerilim Serisi

Element (iyonlar)	Normal potansiyel	Diğer pH değerlerinde		
	V	pH = 6 V	pH = 7,5 V	
Au <sup>++</sup>	+ 1,42	+ 0,3	+ 0,2	Asal ↑ Asal Olmayan ↓
Ag <sup>+</sup>	+ 0,80	+ 0,2	+ 0,15	
Cu <sup>+</sup>	+ 0,52			
Cu <sup>++</sup>	+ 0,34	+ 0,2	+ 0,1	
H <sup>+</sup>	± 0			
Pb <sup>++</sup>	- 0,13	- 0,3	- 0,2	
Sn <sup>++</sup>	- 0,14	- 0,3	-0,8	
Ni <sup>++</sup>	- 0,23	+ 0,1	+ 0,04	
Cd <sup>++</sup>	- 0,40			
Fe <sup>++</sup>	- 0,44	- 0,4	- 0,3	
Cr <sup>+++</sup>	- 0,71	- 0,2	- 0,3	
Zn <sup>++</sup>	- 0,76	- 0,8	- 0,3	
Al <sup>+++</sup>	- 1,66	- 0,2	-0,7	
Ti <sup>++</sup>	- 1,75	+ 0,2	- 0,1	
Mg <sup>++</sup>	- 2,40			

### 3.1.1 Çinkonun Korozyon Davranışı

Dünyada çinkonun toplam tüketiminin yaklaşık %40'ı , demir ve çeliğin korozyonunun kontrolüne yardımcı olmak için kullanılır. Çinkonun fiziksel özellikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

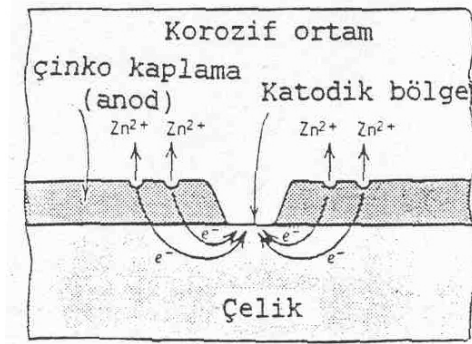
**Tablo 3.2:** Çinkonun Fiziksel Özellikleri

Yoğunluk	$\text{g/cm}^3$	7.14
Erime sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$	419
Buharlaşma Sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$	906
Elastiklik Modülü	$\text{N/mm}^2$	
Çokkristal (izotrop)		94000
Tekkristal (c – eks.)		37500
Tekkristal (a – eks.)		125000
Genleşme Katsayısı	$10^{-6} / \text{K}$	
İzotrop		39,8
c – ekseninde		63,0
a – ekseninde		14,2
Elektrik İletkenliği	$\text{m} / (\Omega \text{ mm}^2)$	17

Galvanizli çelikte çinkonun başlangıçtaki korozyon direnci, parçanın servis ömrü süresince azalmadan devam eder. Kaplamanın altındaki çelik açığa çıktığı zaman da, çinkonun tükenen (kurban) anot olarak koruma kabiliyeti devam eder. Çinko, çeliğe göre korozyona çok daha fazla dayanıklıdır. Çinkonun kimyasal bileşimi, atmosfer etkisindeki korozyona uğrama hızına çok az etki eder. Çinkonun içinde bulunduğu suyun sıcaklığı yükseldiği zaman, çinkonun korozyon hızı önce artar, sonra azalır. Yüksek sıcaklıktaki bölgelerde, korozif etki yerel hale gelir ve noktasal korozyon ortaya çıkar. Çinkonun sudaki korozyon hızı, havada olduğu gibi, demirinkine oranla daha azdır. Çinkonun korozyon hızı, sıcaklığa, pH ve oksijen yoğunluğuna bağlıdır. Bu hız, artan oksijen ve karbondioksit miktarıyla artar. Çinko, atmosferik bir metaldir ve ancak pH derecesi 6 – 12,5 arasında bulunan sulu çözeltilerde kullanılabilir. Asit oranı yüksek olan çözeltilerde korozyon hızı da artar. Çinko kaplı ürünler, kapalı bir ortamda uzun süre depolanırsa, saklı kalan nem nedeniyle,

yüzeylerinde beyaz bir reaksiyon ürünü toz oluşur. Bu, genellikle “beyaz pas” olarak bilinir. Ancak çinko kaplama, bu durumdan olumsuz yönde etkilenmez.

Eğer çinko kaplama sürekli ise, korozyon olayında korozyona maruz kalma hızı tek faktördür. Nemli havanın veya doğal koşulların etkisiyle çinko yüzeyinde hidroksit ve karbonat karışımı sürekli bir zarf şeklinde koruyucu bir tabaka oluşur. Bu tabaka, korozyon hızını azaltır. Ancak kaplama sürekli değilse veya atmosfer etkileri, gözenekler, kusurlar ve çatlaklar nedeniyle süreksiz hale gelmişse, bu durumda çinkonun elektro kimyasal özelliği veya anodik yapısı, koruma işleminde ön plana çıkar ve demir kotadik olarak korunur. Şekil 3.1.’de çinko kaplı çeliğin katodik koruması şematik olarak gösterilmektedir [6, 25, 26].

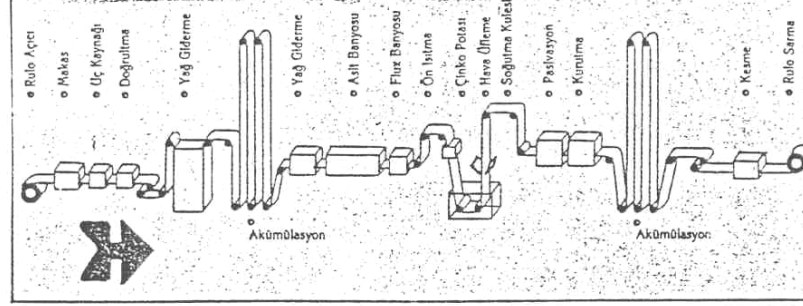


Şekil 3.1 : Çinko Kaplı Çeliğin Katodik Koruması

### 3.1.2 Çeliğin Çinko ile Kaplanması

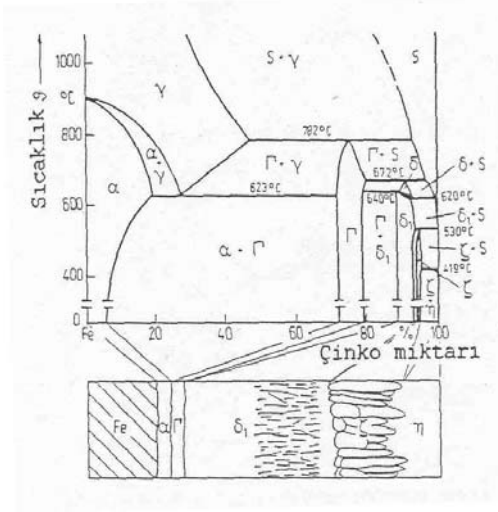
Çinkonun en büyük kullanım alanını oluşturan galvanizleme işlemi, ya çeliğin erimiş çinko banyosu içerisine daldırılmasıyla (sıcak daldırma) ya da elektrokaplama (elektro galvanizleme) ile yapılır. Bunun dışında difüzyon ve metal püskürtme tipi kaplama yöntemleri de vardır.

Normal koşullarda çinko tabakası, her iki yüzeyde de olmak üzere  $650 \text{ g/m}^2$  dir. Bu 50  $\mu\text{m}$  kalınlıkta çinko kaplı saclar, normal atmosfer koşullarında yaklaşık 20 yıl için korunmuş olurlar. Kaplamanın sıcak daldırma veya elektroliz yoluyla yapılması, ömür açısından pratik bir fark oluşturmaz. Kaplamanın etkinliği, kalınlığa bağlıdır. Şekil 3.2.’de bir sıcak daldırma ile galvanizleme işlemi sırası görülmektedir [ 5, 27].



**Şekil 3.2 :** Sıcak Daldırma ile Galvanizleme İşleminde İşlem Sırası

Sıcak daldırmada, esas metal ile çinko arasındaki geçiş bölgesinde Fe – Zn alaşımları meydana gelir (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3 :** Sıcak Daldırma ile Çinko Kaplamada Geçiş Bölgesi İç Yapısının Fe – Zn Denge Diyagramı Yardımıyla Şematik Açıklanması

Demir – çinko denge diyagramı göz önünde bulundurulduğunda, çelik yüzeyinin önce (%21 – 28 Fe)  $\Gamma$  fazı, daha sonra (%7 – 11,4 Fe)  $\delta_1$  fazı ve nihayet (%6 – 6,2 Fe)  $\xi$  fazını oluşturduğu görülür. Bu ara tabakaların kalınlığı, banyo sıcaklığı yanında, dalma süresi ve demirce giderek zenginleşen eriyiğin bileşimine bağlıdır. Bu metaller arası bileşikler gevrek bir yapıda olduğundan, çinko tabakaların şekillendirilme kabiliyeti, bu gevrek tabakaların kalınlığına bağlıdır. Sıcak daldırma ile galvanizlemede kural olarak %98,7 – 99,5 çinko ve %0,2'ye kadar alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum, bu gevrek ara tabakaların gevrekliğini azaltmakta ve çinko tabakanın parlaklığını artırmaktadır. Özel amaçlar için sıcak daldırma ile galvanizleme işleminde %99,99 çinko kullanılmaktadır [5, 25].

### 3.2 Ostenitik Paslanmaz Çelikler ve Fiziksel Özellikleri

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler, bileşimlerinde %12 – 25 Cr ve % 8 – 25 Ni içerirler. Nikel, kuvvetli ostenit yapıcı element olduğundan, bu çeliklerde katılma esnasında ostenit, oda sıcaklığının altındaki sıcaklık değerlerinde bile dönüşmeden kalır. Soğuma esnasında  $\gamma \rightarrow \alpha$  dönüşümü olmadığından bu tür paslanmaz çelikler su verme yoluyla sertleştirilemezler. Bu grup paslanmaz çelikler içinde en fazla tanınan ve yaygın uygulama alanı bulan, bileşiminde % 18 Cr ve %8 Ni içeren 18 / 8 çeliğidir. Antimagnetik olan bu tür paslanmaz çeliklere korozyon direncini artırmak için katılan alaşım elementleri ve etkileri şu şekilde sıralanabilir.

- Çukur ve çatlaklardaki korozyonu önlemek için molibden ilavesi
- Kaynak edilmiş parçalarda taneler arası korozyonu önlemek için karbon miktarının azaltılması veya titanyum, niyobyum ve tantalyum gibi stabilizasyon elementleri ilavesi
- Yüksek sıcaklıklarda korozyon direncini yükseltmek için krom ve nikel miktarlarının artırılması
- Gerilmeli korozyonu önlemek için nikel miktarının artırılması.

Paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerini, korozyon dirençlerini, işlenebilme özelliklerini ve uygulama alanlarını iyileştirmek amacıyla katılan alaşım elementleri bu çeliklerin fiziksel özelliklerini de önemli ölçüde etkiler. Özellikle kaynak kabiliyeti açısından büyük bir önem taşıyan bu özelliklerin az karbonlu çeliklerle karşılaştırılması Tablo 3.3.'de verilmiştir.

**Tablo 3.3:** Düşük Karbonlu Çelik ile Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özelliklerinin Karşılaştırılması [28]

Özellik	Birim	St 37.3	X 8 Cr 17	X 5 CrNi 18 9
Isıl iletkenliği	l(cmsK)	0.50	0.25	0.15
Isıl Uzama Katsayısı	K <sup>-1</sup>	12.10 <sup>-6</sup>	11.10 <sup>-6</sup>	16.10 <sup>-6</sup>
Elektrik İletme Direnci	( $\Omega$ mm <sup>2</sup> )/m	0,107	0,476	0,769

Kromlu çeliklerin ısı iletme kabiliyetleri, alaşımsız çeliklerin yaklaşık yarısı, ostenitik krom-nikelli çeliklerin ise üçte biri kadardır. Bu durum kaynak bölgesinde ısının uzun süre kalacağını gösterir ki, bu da bazı problemlerin ortaya çıkmasına neden olur.

Kromlu paslanmaz çelikler genellikle alaşimsız çelikler ile aynı ısıl uzama katsayısına sahiptirler. Ostenitik krom-nikelli çeliklerde ise bu değer karbonlu çeliklerden %50 daha fazladır. Bu durum sadece kaynakçıyı değil, konstrüktörü de yakından ilgilendirir.

Alaşimsız çelikler düşük elektrik iletme direncine sahiptirler. Paslanmaz çeliklerde ise bu değer yaklaşık 4 – 7 kat daha fazladır. Bu nedenle, paslanmaz çelik elektrotlar daha kısa olarak imal edilirler ve normal elektrotlara nazaran %25 daha az bir akım şiddetiyle yüklenirler [1, 28, 29].

### **3.3 Nokta Kaynağında Kaynak Kabiliyeti**

Nokta kaynağında kaynak kabiliyeti kavramı, diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi, şu şekilde ifade edilir: Bir metalik malzemenin, verilen bir kaynak yöntemi ile, bir amaç için bir dereceye kadar kaynak yapılabildiği kabul edilir. Uygun bir yöntem kullanarak kaynaklı bir metalik bağlantı elde edildiği zaman bu bağlantı gerek yerel özellikleri gerekse bunların konstrüksiyona etkileri bakımından, önceden belirlenen koşulları yerine getirmelidir.

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilecek olan parçalarda, I akım şiddeti, R omik direnç ve t akımın uygulanma süresine bağlı olarak ortaya çıkan Joule etkisi sonucu bir ısı oluşur. Bu ısı, yukarıda belirtildiği gibi şu şekilde ifade edilir:

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

Bu ifadeden, nokta kaynağında kaynak kabiliyetinin, malzemenin cinsine bağlı olduğu görülür. Kaynak bölgesinde erimenin oluşabilmesi için R direncinin yeteri kadar büyük olması gerekir. Bir malzemenin, içinden geçen elektrik akımına gösterdiği direnç, o malzemenin elektrik iletme kabiliyeti ile ters orantılı olduğundan, malzemenin elektrik iletkenliği ne kadar yüksekse, o malzemenin nokta kaynağı kabiliyetinin o kadar kötü olduğu anlaşılır.

Nokta kaynağında kaynak kabiliyetine, malzemenin ısıl iletkenliği ve erime noktası da etki eder. Isıl iletkenliğinin yüksek olması, kaynak için gerekli olan ısı yoğunlaşmasını zorlaştırır. Bu nedenle ısı iletme kabiliyeti yüksek bir malzemenin nokta kaynağı kabiliyeti de düşüktür. Aynı şekilde erime noktasının büyük olması, kaynak için gerekli ısı miktarının yükselmesine neden olur.

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, malzemenin elektrik iletkenliği ve erime noktası göz önüne alınarak, nokta kaynağında kaynak kabiliyeti için aşağıdaki ampirik ifade kullanılır:

$$S = (10^4) / \lambda \cdot \alpha \cdot t_e \quad (3.2)$$

Burada,

S: Kaynak kabiliyeti faktörü

$\alpha$ : Kaynak yapılan malzemenin elektrik iletkenliği

$\lambda$ : Kaynak yapılan malzemenin ısıl iletkenliği

$t_e$ : Kaynak yapılan malzemenin ergime noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )'dir.

Denklem 3.2. ile bulunan kaynak kabiliyeti faktörlerine bağlı olarak elektrik direnç kaynağında kaynak kabiliyeti aşağıdaki biçimde değerlendirilir:

<u>Kaynak Kabiliyeti Faktörü</u>	<u>Kaynak Kabiliyeti Durumu</u>
0,25'den küçük	Kötü
0,25 – 0,75	Yeterli
0,75 – 2,00	İyi
2,00'den büyük	Çok iyi

Tablo 3.4'de bazı malzemelerin fiziksel özellikleri ile kaynak kabiliyeti faktörleri görülmektedir [9].

**Tablo 3.4:** Bazı Malzemelerin Fiziksel Özellikleri ile Kaynak Kabiliyetleri

Malzeme	Elektrik İletkenliği (m/ $\Omega\text{mm}^2$ )	Isıl iletkenliği (cal/cms $^{\circ}\text{C}$ )	Erime noktası $t_e$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Kaynak kabiliyeti faktörü	Kaynak kabiliyeti durumu
Karbonlu çelik	6,0	0,12	1490	9,3	Çok iyi
Ferritik paslanmaz çelik	5,7	0,07	1450	17,2	Çok iyi
Ostenitik paslanmaz çelik	3,5	0,05	1420	40,2	Çok iyi
Çinko	17,0	0,25	906	2,6	Çok iyi



### 3.3.1 Karbonlu Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Karbonlu çeliklerin kaynağında en önemli etken, çeliğin bileşimindeki karbondur. Karbon oranı, bu çeliklerin kaynak kabiliyetini de belirler. Kaynak kabiliyeti, çeliğin bileşimi, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB)'deki ilgili mikro yapılar ve bu bölgedeki uygun olmayan mikro yapılardan kaçınma yeteneği tarafından kontrol edilir. Örneğin, yüksek karbonlu çelikler, ITAB'da, düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek sertlik değerlerine sahiptir. Ancak, kaynak prosedürünü değiştirerek oluşacak mikro yapı, çatlakların bulunmayacağı bir mikro yapıya dönüştürülebilir.

Karbonlu çeliklere, tüm direnç kaynağı yöntemleri başarıyla uygulanabilir. Özellikle %0.15 veya daha düşük karbon içerikli karbonlu çelikler, kolayca direnç nokta kaynağıyla birleştirilebilirler [30].

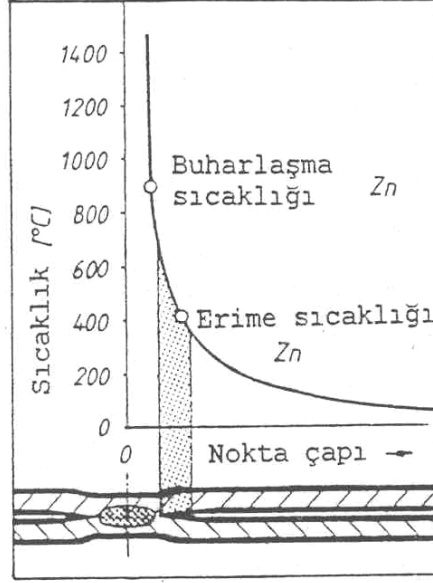
Uluslar arası Kaynak Enstitüsü'nün IX numaralı Kaynak Kabiliyeti Komisyonu, ITAB'da maksimum sertlik için 350 HV'yi önermektedir. ITAB'ın sertliğini düşürmek için en emin yol, parçaya kaynaktan önce bir ön tavlama uygulamak ve kaynağı bu sıcaklık derecesinden itibaren başlatmaktır. Böylece soğuma hızı, kritik soğuma hızının altına düşmüş olur. İkinci bir yöntem ise, kaynaktan sonra bir normalizasyon tavlama uygulamasıdır.

Karbonlu sacların nokta kaynağı, elektrik direnç nokta kaynağının bulunuşundan itibaren geçerli bir uygulama şeklidir. Bu yüzden, hem sanayide geniş bir uygulama alanına sahiptir hem de karbonlu çeliklerin nokta kaynağı üzerine pek çok çalışma yapılmıştır.

### 3.3.2 Galvanizli Çelik Sacların Kaynak Kabiliyeti

Galvanizli çelik saclar, çeşitli direnç kaynağı yöntemleriyle uygun şekilde kaynak edilebilir. Nokta kaynağı, galvanizli çelik saclara en çok uygulanan direnç kaynağı yöntemidir ve çinko kaplamanın direnç etkisi iyi bilirse, ciddi bir sorun oluşturmaz [24].

Bir çelik malzeme üzerindeki çinko kaplama, düşük karbonlu ve kaplanmamış bir çeliğin kaynak koşullarına göre iki noktada fark oluşturur. Birincisi, çinko 419 °C'de erir. Bu sıcaklık, elektrot ile iş parçası ara yüzeyindeki sıcaklığın oldukça altındadır (Şekil 3.4.).



**Şekil 3.4 : Kaynak Bölgesinde Çinko Tabakasının Davranışı**

Erimiş çinko, bakır esaslı elektrotun ucu ile kolayca alaşım oluşturur. Eğer elektrotun uç formu uygun bir şekilde şekillendirilmemişse, alaşımlanma nedeniyle elektrot-iş parçası temas yüzeyi değişir ve kaynak bölgesindeki akım yoğunluğu azalır.

İkincisi, yumuşak ve yüksek iletkenliğe sahip çinko tabakasının varlığı, kaynak bölgesinin elektriksel ve ısıl karakteristiklerini değiştirir. Galvanizli çelikler, kaplanmamış düşük karbonlu çeliklerde bulunan yüksek temas direncini göstermezler. Bu nedenle, aynı kaynak şartları altında, galvanizli çeliklerin ara yüzeyinde daha düşük bir ısı üretilir. Ek olarak, elektrotlarla temas halindeki çinko tabakası, kaynak bölgesinden, su ile soğutulan elektrotlara doğru mükemmel bir ısı akış yolu oluşturur. Bunun telafisi, galvanizli çeliklerde hem kaynak akımının hem de kaynak süresinin %25 ile 50 artırılması ile sağlanır. Ancak çalışmalar, bu artımların, galvanizli çelikler için, kaplanmamış çeliklere oranla daha sınırlı olduğunu göstermiştir. Bu, kaynak parametreleri için daha dar tolerans sınırları anlamına gelir [24].

### **3.3.3 Ostenitik Paslanmaz Çelik Sacların Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Kabiliyeti**

Günümüzde paslanmaz çelik ince sacların özellikle taşıt, mutfak-ev eşyaları ve mimari dekorasyonda yaygın biçimde kullanılabilmesi, elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi ile birleştirmenin üstünlüklerine dayanmaktadır. Bu yöntemde, üst üste konmuş paslanmaz çelik sacların birleştirilmesinde, kaynak yerinde çok az renk değişimi ve elektrot izlerinden başka bir şey görülmez. Ayrıca iyi bir bağlantının yapılmasında, ısınmanın çok kısa bir sürede meydana gelmesi nedeni ile, eritme kaynağı ile birleştirilmiş paslanmaz çeliklerin ostenitik türlerinde görülen krom karbür çökmesi ve ferritik türlerde görülen tane irileşmesi ya yoktur ya da çok az bulunur [31].

### **3.4 Metallerde Yorulma Hasarı**

Makine parçalarının bazıları, düzenli olarak artan yüklemelere maruz kalarak hasara uğrarlar. Ancak, pek çok makine parçası veya yapı elemanına, büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz sürekli olarak değişen kuvvetler ile eğme ve burma momentleri etki eder. Değişken zorlamalardan dolayı kırılma, söz konusu malzemenin akma sınırının çok altındaki gerilmelerde oluşabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması denir. Yorulma yüklemesine maruz kalan yapı elemanlarına örnek olarak, pompalar, otomotiv gövdeleri, delici makinalar, hava taşıtları, gemiler gösterilebilir.

Yorulma, tekrarlı değişken yüklemelerin sebep olduğu veya korozyonlu yorulma adı verilen çevrenin saldırgan etkisinden kaynaklanan bir toplam hasar olayıdır. Normal elastik gerilme dalgalanmalarına maruz kalan parçalardaki yorulma hasarı, yerel gerilmelerin malzemenin akma gerilmesini geçtiği bölgelerde meydana gelir. Belirli bir değişken yük sayısından sonra, plastik olarak hasara uğrayan bölgede bir çatlakın veya çatlakların çekirdeklenmesi ve büyüyerek ilerlemesi meydana gelir. Bu durum çoğunlukla bileşenlerin kırılmasına sebep olur. Gerilme yığılması ne kadar fazla ise, yorulma çatlakının başlama zamanı da o kadar kısa sürede olur.

Bir yorulma çatlakının başlaması için gerekli olan çevrim sayısı, yorulma çatlak başlangıç ömrü  $N_i$  ile gösterilir. Yorulma çatlakının kritik bir boyaya gelmesi ve

çatlağın ilerlemesi için gerekli çevrim sayısı da yorulma çatlağı ilerleme ömrü  $N_p$  ile gösterilir. Toplam yorulma ömrü, bunların toplamıdır [32].

$$N_t = N_i + N_p \quad (3.3)$$

Bu iki ömür arasında, basit veya açık bir bağıntı yoktur. Ancak, daha önce malzemede var olan bir hata veya çatlak, yorulma çatlağı başlangıç ömrünü azaltır veya ortadan kaldırır, böylece yapının toplam yorulma ömrü azalır.

Yorulma hasarının incelenmeye başlanması, Avrupa'da 19. yüzyılın ilk yarısına kadar uzanır [33].

1852'de Wöhler, parlatılmış numuneler üzerinde çekme, eğme ve burulma olmak üzere değişken yüklemeler uyguladı. Yorulma, 19. yüzyılın sonlarında dizayn kriterlerine girmeye başladı. Ancak, en önemli gelişmeler 1950'lerden başlayarak meydana gelmiştir. Günümüzde, yorulma, hemen hemen tüm mühendislik yapıları için dizayn kriterlerinin önemli bir parçasıdır ve oldukça geniş bir çalışma ve araştırma alanına sahiptir.

Konstrüktörler tasarımlarında malzemelerin ekonomik olarak kullanımını göz önünde bulundurmaya zorlandılar. Mukavemet ve elastisite bilgisinin gelişmesi, giderek daha düşük güvenlik katsayılarının seçimi ve yüklerin daha kesin olarak tahmin edilebilmesi ile, malzeme değişikliğine gitmeden de makine ve yapı elemanlarının daha küçük kesitli olarak boyutlandırılabilmesi mümkün olmuştur. Ancak bu durumda gerilmelerin akma sınırını aşmamasına özen gösterildiği halde, işletme sırasında makine parçalarında kırılmalar gözlenmeye başlanmıştır. Herhangi bir şekil değiştirme yaratmadan ortaya çıkan bu kırıkların, yüksek yüklerin bir kez ve tek yönde uygulanması ile oluşan kırılma yüzeylerinden, görünüşleri bakımından tamamıyla farklı oldukları saptanmıştır. Bu gözlemlere dayanarak kısa bir süre sonra yüklerin veya momentlerin büyüklüğü ve yönünde zamanla değişmelerin söz konusu olduğu durumlarda, statik deneylerle saptanan mukavemet değerlerinin malzemenin davranışını belirlemede yetersiz olduğu anlaşılmıştır.

Böylece bütün bu deneyimler yorulma dayanımı kavramının doğmasına neden olmuş ve deneysel olarak yorulma dayanımının yorulma dayanımının, statik dayanım deneylerinden çok daha düşük düzeyde olduğu saptanmıştır. Ancak, işletme yüklerine göre hesaplanan gerilmeler, kullanılan malzemenin düzgün yüzeyli ve

parlatılmış deney parçaları yardımıyla bulunan yorulma dayanımının çok altında kalmasına rağmen, makine parçalarının yine de hasara uğradığı görülmüştür. Bunun üzerine yapılan deneylerle, şekil, yüzey durumu, kuvvet iletimi, makine parçasının bulunduğu ortam ve malzemenin iç yapısı gibi değişik iç ve dış etkenlerin yorulma dayanımını değiştirdiği anlaşılmıştır [33].

Tasarım esnasında, işletme koşullarının göz önüne alınmasıyla makine parçalarının yorulma sonucu hasara uğramaları minimum düzeye indirilmeye çalışılmaktadır. Ancak yorulmaya etki eden faktörlerin fazlalığından dolayı, günümüzde de yine çok sayıda yorulma hasarına rastlanmakta, makine, taşıt vb. konstrüksiyonlarda görülen hasarın %90 – 95'i yorulmadan ileri gelmektedir.

Konstrüktörler, değişken yükler ile zorlanan parçaların tasarımında verilere bağlı olarak aşağıdaki değişik hesaplama yöntemlerini izleyebilirler.

- a) Konstrüksiyonu belirleyen dört büyüklük de (şekil, boyut, malzeme ve zorlama) verilmiş ise, sadece kritik kesitlerde yorulmaya karşı güvenliğin olup olmadığı kontrolü gerekir. Güvenliğin yeterli olmadığı durumlarda, özel yöntemler ile yorulma dayanımı yükseltilmeye çalışılır (yüzeylerin sertleştirilmesi, parlatma, ıslah etme vb.).
- b) Sadece malzeme ve zorlama şeklinin belirli olduğu durumlarda, parça gerekli güvenlik sağlayacak şekilde boyutlandırılır.
- c) Eğer parçanın şekli ve boyutları belirli ise, o zaman gerekli güvenlik sağlanacak şekilde, malzeme ve zorlama üst sınırı saptanır.

### **3.4.1 Yorulma Zorlanmasının Özellikleri**

Büyükluğu ve yönü düzenli ya da düzensiz bir şekilde sürekli olarak değişen kuvvet veya momentlerin (eğme, burma) etkimesi, yorulma zorlanması olarak adlandırılır. Zorlama sırasında yük istendiği kadar tekrarlanabilir veya zorlamanın yapılmadığı zaman aralıkları var olabilir [33].

Yorulma zorlamasında yükün zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinden çok, en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü önemli olduğundan, yük değişimi genellikle sinüzoidal olarak kabul edilebilir. Birim zamandaki çevrim sayısı (yük tekrarı) çok düşük veya malzemenin ısınmasına sebep olacak kadar çok yüksek olmamak koşuluyla, yorulma ömrünü (kırılma oluncaya kadar geçen tekrar sayısı) önemli

ölçüde etkilemez. Kuvvetin veya momentin en küçük ve en büyük değerleri sıfır konumuna göre aynı veya ters işaretli olabilir. Yorulma zorlamasının iki hali için özel isimler verilmiştir: Kuvvet veya moment aynı büyüklükte, fakat bir artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında değişiyor ise tam değişken zorlama ve malzemenin dayanımı bakımından değişken yorulma dayanımı söz konusudur. Kuvvet veya moment değeri sıfır ile belli bir sınır değeri arasında değişiyorsa, dalgalı zorlanma ve malzeme dayanımı bakımından dalgalı yorulma dayanımı deyimleri kullanılır. Yorulma zorlanması sadece dış kuvvetlerin değil, örneğin sıcaklık farklılıkları nedeniyle oluşan iç kuvvetlerin etkimesiyle de görülebilir (Isıl yorulma).

### **3.4.2 Yorulma Kırılmasının Nedeni**

İşletme koşullarındaki zorlanmalar sonucu ortaya çıkan gerilmeler mukavemet bilgisinin temel denklemlerine her zaman uymaz, dolayısıyla çekme veya basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılma, eğme ve burma gerilmeleri de yüzeyden ortaya doğru doğrusal bir azalma göstermeyebilir. Uygulamada, bu kuramsal gerilmelerde sapmalar görülebilir. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozif etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme, malzeme hatası, mikro yapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenler ile yerel gerilme yığılmaları oluşur. Yorulma çatlakları gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde başlar. Ayrıca bir yapı veya makine elemanının öz titreşim frekansına yakın bölgelerde zorlanması sonucu oluşan rezonans titreşimlerine veya her zaman önlenmesi mümkün olmayan aşırı yüklere dayanacak şekilde tasarlanmış olmaması da yorulma çatlaklarına yol açabilir. Yorulma hasarının diğeri bir nedeni de montaj hatalarıdır. Örneğin balansı bozulmuş bir milde, hesaplarda öngörülen daha yüksek gerilmeler oluşabilir. Ayrıca zorlanan bölgelerde dolgu kaynağı işlemlerinin uygun olarak yapılmaması halinde de yorulma çatlakları görülebilir. Aşırı zorlanan bir bölgede bir çatlakın başlaması durumunda yorulma kırılmasının önlenmesine çoğunlukla olanak yoktur. Çatlakın ilerleyerek kırılmanın oluşması ise çevrim sayısı yani (frekansa bağlı olarak) belirli bir zaman sorunudur. Bir yorulma çatlakının görülmesi, kullanılan malzeme veya malzeme durumu için yerel bir gerilme yükselmesinin bulunduğu işaretlerdir. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi ortaya çıkarttığından, gerilmeler bakımından durum daha da kötüleşecek, bu yolla yaratılan çok yüksek gerilme yığılmaları çatlakın hızla ilerlemesine büyümesine sebep olacaktır. Ayrıca, yük taşıyan kesit

sürekli küçüldüğünden bu kesitte gerilmenin sınır değerleri giderek daha da yükselecektir. Gözlemler, yorulma çatlak ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermektedir. Parçanın ikiye ayrılması, çoğunlukla uzun bir süreyi gerektirdiği ve zorlama sürekli değiştiği için olay yorulma kırılması olarak adlandırılır. Bazı durumlarda ise, yorulma çatlakları kesitin tam olarak ayrılması ile sonuçlanmaz, çatlak oluşması ile parça daha az zorlanır ve dolayısıyla gerilmenin üst sınırı malzemenin yorulma dayanımı değerinin altında kalırsa veya çatlak çevresinde gerilme durumunun değişmesi ile yerel bir malzeme pekleşmesi olursa çatlak ilerlemesi durabilir [33].

### **3.4.3 Yorulma Sınırı Kavramı ve Saptanması**

Yorulma sınırı deyiminden, düzgün veya çentikli parçalarda, belirli bir ortalama gerilme için parçanın kırılmadan veya belirli bir şekil değişimini aşmadan sonsuz çevrim sayısında taşıyabileceği gerilme genliği anlaşılır. İzin verilen şekil değiştirmenin miktarı, yorulma deneyinin yapıldığı şartlara (örneğin deney sıcaklığı) veya deney malzemesi cinsine bağlıdır.

Sonsuz sayıda yük tekrarını, kırılmadan veya aşırı şekil değişimine uğramadan taşıyabilen bir yapı elemanı, yorulmaya karşı dayanıklıdır denir. Taşınabilir en büyük gerilme genliği de yapı elemanının yorulma dayanımı olarak adlandırılır. Bir yapı elemanının yorulma dayanımı sadece bir malzeme özelliği olmayıp, bunun yanında parçanın büyüklüğü, biçimi ve üretim şekline de bağlı olduğundan, genlik gerilmesi ile verilen yorulma dayanımı, belirli bir biçim ve yüzey kalitesindeki parçanın konstrüktif dayanımı diye de tanımlanır [33].

Malzemelerin yorulma sınırının saptanması için eksene paralel doğrultuda mekanik veya elektrolitik olarak parlatılmış düzgün deney parçaları kullanılır. Çentik duyarlılığının araştırılması için de çentik katsayıları belirli çentikli deney parçalarından yararlanılır. Günümüzde kullanılan yorulma deney makinaları, çekme, çekme-basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Bu makinaların deney frekansları, yapılarına bağlı olarak 500.....15000 dak.<sup>-1</sup> (8.....250 Hz.) arasındadır. Söz konusu aralık için çelikten yapılmış düzgün parçaların yorulma dayanımları frekansa bağlı değildir. Ancak hafif metallerde ve çentikli çelik parçalarda yorulma davranışı frekansla değişir ve bu

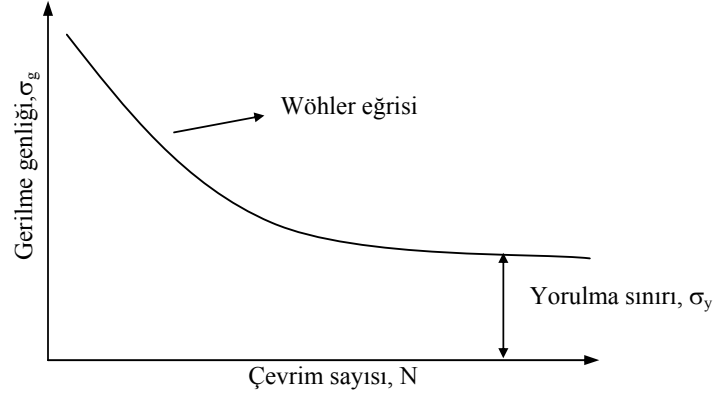
değişim süreli yorulma durumunda daha fazladır. Deney parçası örneğin asit içermeyen bir yağla soğutulmazsa, ısınma nedeniyle zamanından önce çatlayabilir. Süreli yorulma zorlamasında frekansın çok düşük veya çok yüksek olması, çeliklerde de düz veya çentikli tüm parçaların yorulma ömürlerinin azalmasına neden olur.

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemiyle bulunur. Bu yöntemde, biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının her biri aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları saptanır. Bir deney serisinde çoğunlukla 6 – 10 adet parça gereklidir. Belirli bir deney parçası için başlangıçta ayarlanan yorulma zorlanması deney sırasında değiştirilmez, yani tek kademeli yorulma deneyi söz konusudur. Buna karşın çok kademeli yorulma deneyinde, zorlama sistematik olarak deney sırasında değiştirilir. Her bir zorlama kademesi belirli çevrim sayıları arasında sabit kalır ; zorlamaların sırası istenildiği gibi seçilebilir, yani giderek artırılabilir, azaltılabilir veya karışık olabilir. Sadece iki zorlama seviyesinin bulunduğu deneyler iki kademeli yorulma deneyi olarak adlandırılır.

Yorulma deneyi zaman zaman durdurulursa, düzgün deney parçalarında toparlanma olayı görülür ve böylece aralıksız olarak yapılan deneyden daha yüksek yorulma dayanımları elde edilir. Çentikli deney parçalarında malzeme bünyesindeki değişik mekanizmalara bağlı böyle bir toparlanma olayının etkisi görülmez.

Deneyin amacına, malzeme ve deney makinasına göre yük veya şekil değiştirme genlikleri kontrol edilir ve bu büyüklükler gerilme veya birim şekil değişimi değerlerine dönüştürülür. Wöhler yönteminde bir deney serisinde tüm parçalar için ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  veya alt gerilme  $\sigma_{alt}$  sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği  $\sigma_g$  seçilir. İlk deney parçası akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney parçalarına ise gittikçe daha düşük zorlama uygulanarak kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanır. Bir deney serisi sonunda uygulanan gerilme genlikleri ve kırılmanın görüldüğü çevrim sayılarının bir eğri olarak çizimi ile, eğer noktalar büyük dağılımlar göstermiyor ise, Wöhler eğrisi elde edilir (Şekil 3.5).





**Şekil 3.5 : Wöhler Eğrisi [33]**

Bu grafikte normal olarak apsis (çevrim sayısı) logaritmik, ordinat (gerilme genliği) ise metrik bölümlü olarak seçilir. Sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmeyen en büyük gerilme genliği yorulma sınırı olup, genellikle  $\sigma_y$  ile gösterilir. Belirli bir çevrim sayısından sonra (sınır çevrim sayısı  $N_s$ ) eğri sonsuz çevrim sayısına yaklaşıyor kabul edilebilir. Sınır çevrim sayısı oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda çelikler için  $10 \cdot 10^6$ , ağır ve hafif metallerle yüksek sıcaklıklardaki çelikler için  $100 \cdot 10^6$  olarak alınır. Deney süresinin kısaltılması amacıyla, çelik için  $2 \cdot 10^6$  ve hafif metaller için  $10 \cdot 10^6$  .....  $50 \cdot 10^6$  sınır çevrim sayıları da kullanılmaktadır. Yorulma dayanımından daha büyük gerilme genliklerinin bir süre uygulanması, mutlaka hasara veya yorulma dayanımının azalmasına yol açmaz. Önemli olan bu aşırı yüklemelerin seviyesi ve bunların çevrim sayısıdır. Hangi koşullarda hasarın başlayacağını belirten ve görünümü bakımından Wöhler eğrisine benzeyen “Hasar çizgisi”, sürekli yorulma bölgesi için geçerli olup yüksek çevrim sayılarında Wöhler eğrisi ile birleşir. Wöhler eğrisinin sınır çevrim sayısına kadar olan bölümüne “Sürekli Yorulma Bölgesi” denir. Hasar çizgisi, yorulma dayanımının üzerinde bir zorlamanın, daha sonra aynı parçada yorulma dayanımına eşit bir zorlamada kırılma meydana gelmemesi koşuluyla, en çok kaç çevrim sayısı taşınabileceğini göstermektedir [33].

### 3.4.4 Yorulma Ömrü

Bir deney parçası veya yapı elemanının yorulma ömrü, yorulma dayanımından daha yüksek bir gerilmede kırılmanın olduğu çevrim sayısıdır. Yorulma ömrünün gösteriminde, ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  ve gerilme genliği  $\sigma_g$ , söz konusu kırılma çevrim sayısına indis olarak eklenir. Örneğin,

$N_{(+10 \pm 14)} = 2,5 \cdot 10^6$  gösterimi ile  $\sigma_{ort} = +10 \text{ kg/mm}^2$  ve  $\sigma_g = \pm 14 \text{ kg/mm}^2$  olan bir zorlamada, kırılmanın  $2,5 \cdot 10^6$  çevrim sayısında olduğu anlaşılmaktadır.

### 3.5 Konu ile İlgili Literatürde Yer Alan Çalışmalar

Nokta kaynaklı bağlantıların yorulma olayının incelenmesi ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu araştırmalarda, özellikle deneysel yöntemler birbirleriyle benzerlik göstermektedir. Ayrıca, teorik olarak çalışan araştırmacılar, bazı nümerik kodlar geliştirerek veya var olan bilgisayar programları kullanarak deneysel verilere yaklaştırmaya çalışmışlardır. Hemen hemen tüm çalışmalarda, nokta kaynağı ile eşlenen malzemeler aynı tür malzemelerdir. Bunlara paslanmaz çelikler, çift fazlı paslanmaz çelikler, yumuşak çelikler yüksek dayanımlı düşük karbonlu çelikler örnek olarak gösterilebilir. Galvanizli sacların ve farklı bileşime sahip iki malzemenin birbiriyle eşlenerek bunların yorulma davranışlarının araştırılması konusunda yapılan bir çalışmaya, literatür taramasında rastlanmamıştır.

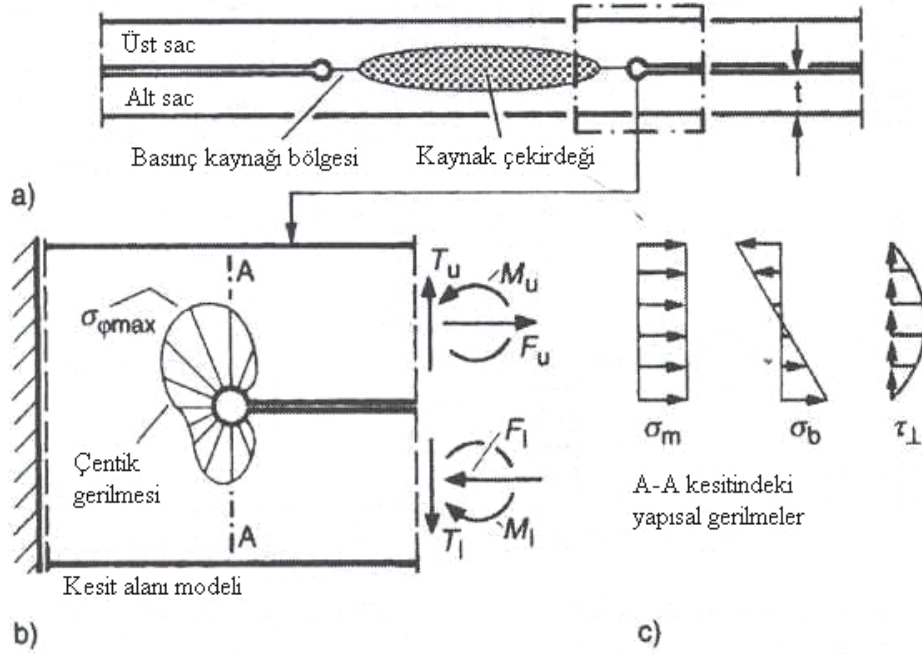
Nokta kaynağı özellikle otomotiv endüstrisinde halen çok yaygın olarak kullanıldığından, bu bağlantının yorulma dayanımının araştırılması pek çok araştırmaya konu olmaya devam etmektedir. Bu araştırmalarda hem deneysel hem de çeşitli nümerik metotlar kullanılmaktadır.

Radaj, Lehreke ve Greuling, nokta direnç kaynağında kaynak bölgesinde oluşan gerilme yığılması ve geometriden kaynaklanan çentik etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmacılara göre, otomobillerdeki gibi ince sacların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma olayı, henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Lokal yaklaşımlarla yorulma dayanımı ve yorulma ömrü tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Nokta kaynağının uç kısmındaki elastik çentik gerilmeleri, yorulma çatlaklarının başlangıcının temelini oluşturmaktadır. Bunun için, uzun ömürlü yorulmada mikro

yapısal, kısa ömürlü yorulmada ise makro yapısal (elastik-plastik) hipotezlerden faydalanılmaktadır [34].

Nokta kaynağında, anahtar deliği şeklinde bir çentik geometrisinin var olduğu kabul edilmektedir. İyi yapılmış bir nokta kaynağında, bu çentiğin yarıçapı çok küçüktür (özellikle 0,1 mm'den daha küçük, bazen sifıra yakın). Bu çentik yarıçapının kesin değeri çok önemli değildir, çünkü bunun etkisi mikro yapısal etkiyle etkinlik kazanmaktadır.

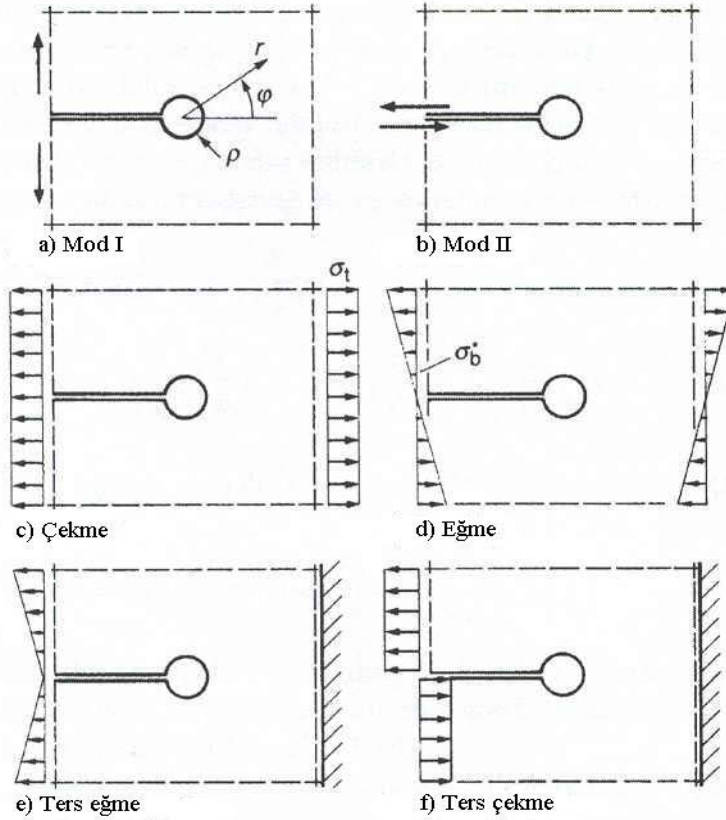


**Şekil 3.6 :** Nokta Kaynağı Bölgesindeki Çentik Durumu ve Gerilme Yığılması [34]

Burada, çentiğin konumu da önemlidir. Çentiğin konumu, çentik ucundaki yapısal gerilme durumunu etkiler. Nokta kaynağının çekirdeği, halka şeklinde basınçla kaynak olmuş katı fazla çevrelenmiş durumdadır. Anahtar deliği şeklinde kabul edilen çentik, bu halka şeklindeki kaynaklı bölgenin dış kısmından başlar, hemen kaynak çekirdeğinin dibinden başlamaz.

Şekil 3.6.'dan da görüldüğü gibi, kaynak bölgesinde kabul edilen bu çentik çok küçük olduğundan, orijinal çentik gerilmelerinden yorulma çentik gerilmelerini elde edebilmek için mikro yapısal hipotezi kullanmak gereklidir [34].

Şekil 3.7’de, en sık karşılaşılan yükleme tipleri olan Mod I ve Mod II yüklemeler ile çekme, eğme, ters eğme, ters çekme modları şematik olarak ayrı ayrı gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Anahtar Deliği Şeklindeki Çentikte Temel Yükleme Tipleri [34]

Tipik nokta kaynaklı bağlantılarda (otomotiv endüstrisinde  $t = 0,6 - 2,5$  mm kalınlıktaki saclar) çentik yarıçapı  $\rho$ 'nun çok küçük olduğu kabul edilmektedir ( $\rho \leq 0,05$  mm.).

Çentik ucundaki gerilmeler, mod I ve mod II yüklemelerde  $r/\rho$  oranının artmasıyla bir azalma gösterir ( $r$  : çentik ucundan uzaklık;  $\rho$  : çentik ucu yarıçapı) (Şekil 3.7). Yorulma çentik faktörü  $K_f$ , elastik gerilme yığılma faktörü  $K_t$  ve  $\rho^*/\rho$  oranına bağlı olarak hesaplanabilir. ( $\rho^*$  : mikroyapısal genişlik). Buna Peterson formülü adı verilir. Burada, pek çok nokta kaynağında,  $(\rho^*/\rho) = 0,1/0,05 = 2$  olarak alınabilir. (ferritik çelikler ve alüminyum alaşımları için  $\rho^* = 0,1$ ) [34].

Burada yorulma çentik faktörü  $K_f$  şöyle formülize edilebilir:

$$K_f = 1 + (K_t + 0,8(\rho^*/\rho)[1 + (\rho^*/\rho)]) / 1 + [2(\rho^*/\rho)] \quad (3.4)$$

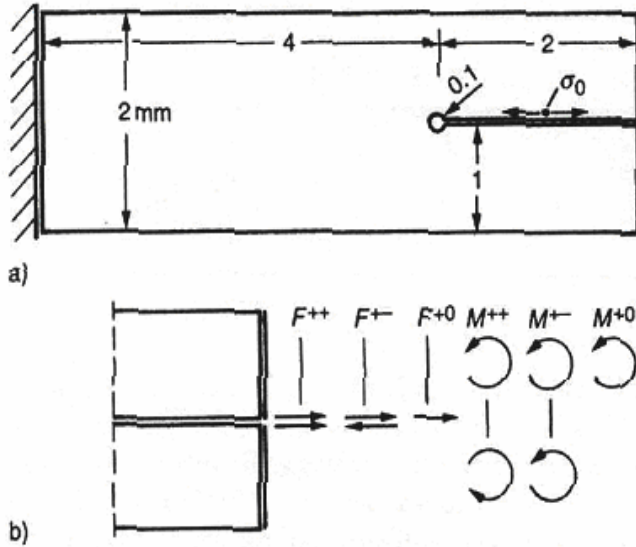
Mod I ve Mod II yüklemelerde,  $r$  mesafesinin (Şekil 3.7) geniş olması, çentik gerilmelerini azaltır. Dolayısıyla, Mod I ve Mod II yüklemeler için yorulma etkili çentik gerilmeleri aşağıdaki şekilde formülize edilir [34]:

$$\sigma_{\max} = [(2,12) / 1 + 0,7(\rho^*/\rho)]. [K_I/(\pi\rho)^{1/2}] \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\max} = [(2,86) / 1 + 0,7(\rho^*/\rho)]. [K_{II}/(\pi\rho)^{1/2}]$$

Yine Radaj, Lehreke ve Greuling, anahtar deliği şeklindeki çentikten faydalanılarak oluşturulan orijinal çentik gerilmelerini tipik nokta kaynağı yükleme durumuna uyarlamışlardır. Nokta kaynağı için, çentik yarıçapını normal  $\rho = 0,05$  mm değerinden daha büyük olacak şekilde  $\rho = 0,1$  mm olarak kabul etmişlerdir [34].

Şekil 3.8’de, düzlem yükleme durumları gösterilmektedir (çekme-eğilme yüklemesi, ve sadece eğilme yüklemesi; simetrik, antisimetrik ve nonsimetrik modeller). Yarık ucundaki referans gerilme  $\sigma_0$ ’dır. Bu gerilme aynı zamanda, mod I ve mod II yüklemelerdeki çentik gerilme analizlerinin temelini oluşturan gerilme şiddet faktörünü de tayin etmektedir.



Şekil 3.8 : a) Anahtar Deliği Çentikli Nokta Kaynağı Ucunun Kesit Modeli  
b) Tipik Nokta Kaynağı Yükleme Modları [34]

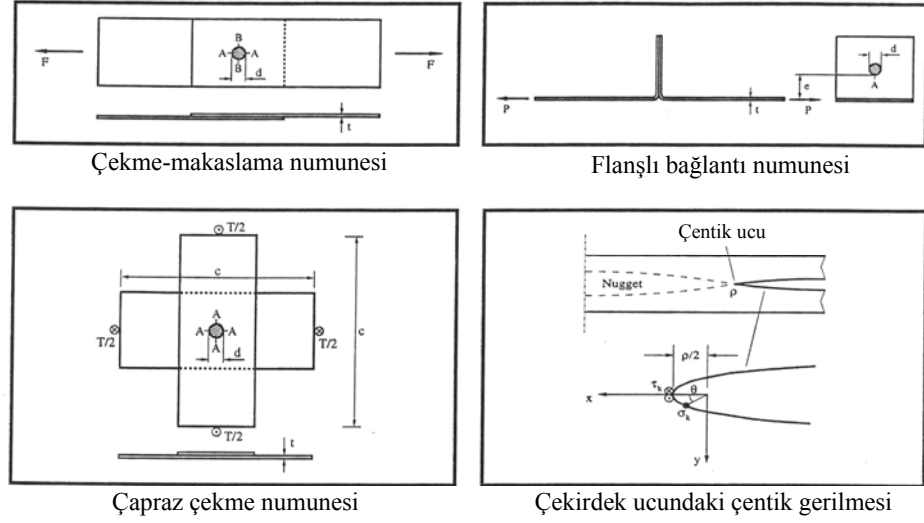
Şekil 3.8’de verilen tüm yükleme durumları için, Kt gerilme yığılma faktörleri ve  $\phi t$  pozisyon açıları Tablo 3.5’de verilmektedir [34].

**Tablo 3.5:** Farklı Yükleme Modları için Kt Gerilme Yığılma Faktörü ve  $\phi t$  Pozisyon Açısı Değerleri ( $\phi t$  :max. gerilmenin çentik ucu ile yaptığı açı; (Şekil 3.7))

	Çekme – Eğme			Sadece eğme		
	F <sup>++</sup>	F <sup>+-</sup>	F <sup>+0</sup>	M <sup>++</sup>	M <sup>+-</sup>	M <sup>+0</sup>
Kt	2,93	3,31	3,11	2,83	3,2	3,01
$\phi t$	84°	74°	76°	69°	74°	73°

Bu Kt gerilme yığılma faktörlerinden, yükleme şekline uygun olan tip seçilerek (Şekil 3.8), denklem 3.4’de yerine yazılırsa, Kf yorulma çentik faktörü tespit edilebilir. Böylece, nokta kaynak bölgesinde oluşan gerilme yığılması ve çentik etkisinin sonuçları yorulma ömrü üzerine etki ettirilebilir.

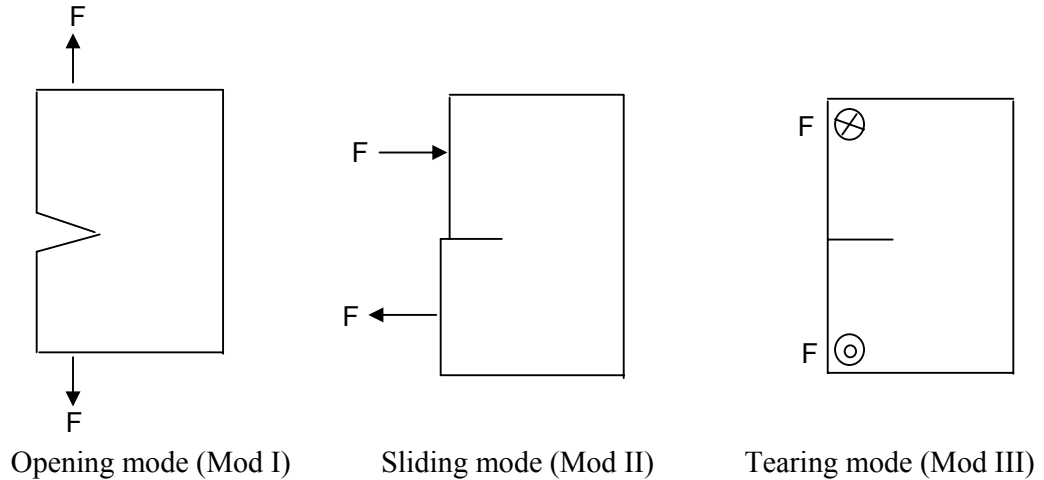
Zhang, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak, nokta kaynaklı numunelerin gerilme şiddet faktörlerini belirlemeye çalışmıştır. Nokta kaynaklı bağlantıların yorulma testlerinden elde edilen datalar genellikle kuvvet aralığı ( $\Delta F$ ) – yorulma ömrü (N) şeklinde grafik haline getirilerek incelenmektedir. Ancak bu durumda, farklı kaynak geometrilerini farklı numune konfigürasyonlarını birbiriyle karşılaştırmada bazı problemler ortaya çıkabilmektedir. Uygun düzeltme parametreleri kullanmak, bu problemi ortadan kaldırmaktadır. Düzeltme parametresi olarak gerilme şiddet faktörü kullanıldığında, ortaya çıkan datalardaki aşırı dağılımın azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, çentik ucu gerilmesi de bir diğer düzeltme faktörü olarak kullanılabilir. Ancak, gerilme şiddet faktörleri ve çentik ucu gerilmelerini deneysel olarak tespit etmek, basit çekme – makaslama ya da çapraz çekme numunelerinde bile oldukça güçtür. Bu amaçla üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntemleri kullanarak, temel nokta kaynaklı yükleme tipleri olan çekme – makaslama numunesi, flanşlı bağlantı numunesi ve çapraz çekme numunesi için gerilme şiddet faktörleri ve çentik ucu gerilmelerini tespit edilmiştir. Şekil 3.9’da bu temel yükleme tipleri verilmektedir [35].



**Şekil 3.9 :** Nokta Kaynaklarında Temel Yükleme Tipleri [35]

Nokta kaynaklı bağlantıların gerilme şiddet faktörleri ve bunların çentik ucundaki gerilmeleri, doğrudan uygulanan kuvvete ve kaynak ile numunenin geometrilerine bağlıdır. Bu yaklaşımla elde edilen analitik sonuçların, yaygın mühendislik uygulamaları için kabul edilebilir olduğu ispat edilmiştir. Bu temel yükleme tiplerine ait veriler kullanılarak, daha karmaşık geometriye ve yükleme durumuna sahip nokta kaynaklı bağlantıların da gerilme şiddet faktörleri ve çentik gerilmeleri hesap edilebilir [35].

Şekil 3.10’da, mod I, mod II ve mod III temel yükleme tipleri gösterilmektedir.



**Şekil 3.10 :** Mod I -II - III Temel Yükleme Tipleri [36]

Herhangi bir katıda bulunan bir çatlak, Şekil 3.10’da gösterildiği gibi üç farklı modda gerilme altında zorlanabilir. Normal gerilmeler “opening mode” ya da Mod I yükleme tipinin ortaya çıkmasına sebep olur. Bu durumda, çatlak yüzeylerinin deplasmanları çatlak düzlemine diktir. “Sliding mode” yani Mod II tipinde, kayma gerilmelerinin neticesinde çatlak yüzeylerinin deplasmanları çatlak düzlemi üzerindedir ve çatlağın ucuna diktir. “Tearing mode” yani Mod III’de ise çatlak yüzeyi deplasmanları çatlak düzleminde ve çatlağın ucuna paraleldir. Yapının geometrisi ve yükleme durumuna göre, bu yükleme modları tek başına ya da bir arada yapı üzerinde etkin olabilirler.

Aşağıda, Şekil 3.9’da verilen nokta kaynaklı üç temel yükleme şekline ait gerilme şiddet faktörleri ve çentik ucu gerilmeleri analitik olarak verilmektedir. Burada,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri mod I, mod II ve mod III gerilme şiddet faktörleri,  $\sigma_k$  çentik ucu gerilmesi,  $\tau_k$  çentik ucu kayma gerilmesi,  $F$  numuneye uygulanan kuvvet,  $t$  sac kalınlığı,  $d$  kaynak çekirdek çapı ve  $\rho$  çentik ucu yarıçapıdır [35].

Çekme - makaslama numunesi:

$$K_I = \frac{\sqrt{3}.F}{2.\pi.d\sqrt{t}} ; \quad K_{II} = \frac{2.F}{\pi.d\sqrt{t}} ; \quad K_{III} = \frac{\sqrt{2}F}{\pi.d\sqrt{t}} \quad (3.6)$$

$$\sigma_k = \frac{4F}{\pi.d.t} \left[ 1 + \frac{\sqrt{3} + \sqrt{19}}{8\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right] \quad (3.7)$$

$$\tau_k = \frac{F}{\pi.d.t} \left[ 1 + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right] \quad (3.8)$$

Çapraz çekme numunesi :

$$K_I = \frac{3\sqrt{3}.c.T}{16\pi.d.t\sqrt{t}} ; \quad K_{II} = \frac{3cT}{32\pi.d.t\sqrt{t}} \quad (3.9)$$



$$\sigma_k = \frac{3c.T}{4\pi.d^2} \left[ 1 + \frac{2\sqrt{3} + \sqrt{13}}{8\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right] \quad (3.10)$$

Burada, T çapraz çekme kuvveti, c ise numune boyutudur (Şekil 3.9).

Flanşlı bağlantı numunesi :

$$K_I = \frac{2\sqrt{3}e.P}{\pi.d.t\sqrt{t}} \quad (3.11)$$

$$\sigma_k = \frac{6e.P}{\pi.d.t^2} \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{3\pi}} \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right] \quad (3.12)$$

Burada, e kaynak noktasının flanşa olan mesafesi, P numuneye uygulanan kuvvettir (Şekil 3.9).

Yukarıda ifade edilen tüm kaynaklı numuneler için eşdeğer gerilme şiddet faktörü şöyle tanımlanmaktadır ;

$$K_{es} = \sqrt{K^2 + \alpha.K_{II}^2 + \beta.K_{III}^2} \quad (3.13)$$

Burada,  $\alpha$  ve  $\beta$ , Mod II ve Mod III gerilme şiddetlerinin ağırlık faktörleri olup, normal olarak 1'e yaklaşık değerlerdedir [35].

Stawiarski ve Frutiger, sabit ve değişken genlikli yüklemeler için geliştirilen bilgisayar programı kullanarak bazı test şartlarını simule etmişlerdir. Bu çalışmada, simulasyon yapılarak numunelerin teorik yorulma ömürleri tespit edilmiş, bunlar deneysel yorulma ömürleri ile karşılaştırılmıştır [37].

Linder ve Malender, nokta kaynaklı paslanmaz çelik sacların %3'lük NaCl çözeltisi içerisinde korozyonlu yorulma dayanımlarını araştırmışlardır. Bu araştırmacıların bulduğu sonuçlara göre, korozif ortamdaki yorulma dayanımı, normal atmosfer şartlarındaki yorulma dayanımından %30 – 40 daha düşüktür [38].

Otomotiv endüstrisinde kullanılmaya başlayan bir diğer bağlantı yöntemi de lazer nokta kaynağıdır. Yang ve Lee, lazer nokta kaynaklı sacların yorulma dayanımlarının incelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır [39].

Larsson ve Bergengren, benzer türdeki deneyleri ostenitik paslanmaz çelik ve duplex (çift fazlı) paslanmaz çelik saclar üzerinde yapmışlardır [40].

Newman ve Dowling, bazı kabuller yaparak nokta kaynaklı bağlantıların yorulması sırasında çatlak ilerlemesini nümerik olarak ifade etmeye çalışmışlardır [41].

Nakaoka ve Hayata, gerilme oranının yorulma ömrü üzerine etkisini incelemek amacıyla, yumuşak çelik ve yüksek dayanımlı çelik sacları nokta kaynağı ile birleştirerek karşılaştırmasını yapmışlardır [42]. Bazı araştırmacılar benzer çalışmaları sadece nümerik olarak da yapmışlar, ve tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir [43, 44, 45].

Niemi ve Koshimaki, üç farklı paslanmaz çelik sac kullanarak, bunların nokta kaynaklı numunelerinin yorulma dayanımlarını birbirleri ile karşılaştırmışlardır [46].

Nokta kaynağı, bazı durumlarda çok tabakalı yani ikiden fazla sacların birleştirilmesinde de kullanılmaktadır. Jung ve Kwan, bu tip çok tabakalı bir birleştirmenin yorulma dayanımını incelemiştir [47].

Gupta ve Dorn, 1 mm. kalınlığındaki düşük karbonlu çelik sacın nokta kaynağında, elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı parametrelerinin bağlantının dayanımı ve yorulma ömrü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [48].

Krause ve Chernenkoff, nokta kaynak bağlantılı ve perçin bağlantılı alüminyum sacların yorulma dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar, perçinle bağlanmış alüminyum saclarda yorulma dayanımının, nokta kaynaklı bağlantılara göre % 25 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir [49].

### **3.6 Konunun Önemi ve Çalışmanın Planlanması**

#### **3.6.1 Konunun Önemi**

Gerek galvanizli ve gerekse de ostenitik paslanmaz çelik saclar, elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi ile endüstrinin çeşitli sektörlerinde yaygın olarak birleştirilmektedir. Teknolojinin ilerlemesine paralel olarak, değişik konstrüktif şekillendirmelerle bu tip

malzemeler artık birlikte de kullanılmaktadır. Zorlama türlerinin değişik biçimlerde ortaya çıkması ve konstrüksiyonların minimum maliyette yapılması ilkesi, farklı malzemelerin eş çalışır durumda kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu nedenle, galvanizli-ostenitik paslanmaz çelik sacların birbiriyle birleştirilmesi de yaygın bir uygulama olarak göze çarpmaya başlamıştır.

### **3.6.2 Çalışmanın Planlanması**

Çelik sacların nokta kaynağı ile birleştirilmesi konusunda çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Ancak, yapılan literatür taramasının sonucunda, galvanizli sacların ostenitik paslanmaz çelik saclarla nokta kaynağı konusunda yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu grup malzemelerin nokta direnç kaynaklı bağlantılarının mekanik, metalurjik ve yorulma davranışlarını incelemek için adı geçen malzemeler deney parçaları boyutlarında hazırlanmış ve önceden tespit edilmiş kaynak parametrelerine göre kaynak edilmişlerdir.

Ön deneylerin ardından, kaynak parametrelerinin bağlantının kaynak davranışına ve yorulma dayanımına etkisinin saptanabilmesi için, kaynak parametreleri belirli bir aralıkta değiştirilmiştir.

Ön deneylerin tamamlanmasından sonra, kaynak parametrelerinin bağlantının mekanik özelliklerine ve çekirdek boyutlarına etkisinin araştırılmasının yanında, bağlantı bölgesinde oluşan metalurjik değişikliklerin saptanması amacıyla esas metal, ITAB (Isının Tesiri Altındaki Bölge) ve kaynak metali ışık mikroskobu ile incelenmiştir. Bu bölgelerdeki sertlik dağılımını incelemek amacıyla da mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bağlantıların tespit edilen mekanik özelliklerinden yola çıkarak, kaynaklı numunelere yorulma testleri uygulanmış ve her numuneye ait Wöhler eğrileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Yüksek gerilme değerlerinde zorlanan ve koparak hasara uğrayan deney numunelerinde, yorulma deneyi sonrası son kopma bölgeleri tarayıcı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Ayrıca, paslanmaz çelik ve galvanizli çelik sac çiftlerinden oluşan bir dizi kaynaklı deney numunesi, farklı çevrim sayılarında kopma hasarı meydana gelmeyecek şekilde yorulma zorlanmasına maruz bırakılmıştır. Daha sonra bu numuneler ultrasonik olarak incelenmiş ve yorulma öncesi ve sonrası ultrasonik muayene sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Aynı bağlantının çeşitli çevrim sayıları sonunda bağlantıyı

oluşturan son çekirdek çapları ölçölerek, buradan çatlak boyları hesap edilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak, nokta kaynaklı galvanizli sac – ostenitik paslanmaz elik sac çiftine ait yorulma karakterişini veren malzeme sabitleri ve çatlak ilerleme hızı bağıntısı elde edilmiştir.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Genel

Bu çalışmada, deney malzemeleri olarak galvanizli ve ostenitik paslanmaz çelik saclar, galvanizli – galvanizli, ostenitik – galvanizli ve ostenitik – ostenitik olmak üzere üç farklı kombinasyonda eşlenmiştir. Elektrot formu, elektrot malzemesi, soğutma suyu giriş hızı sabit tutulmuş, kaynak akımını değiştirmek suretiyle nokta çapı değiştirilerek, her koşulda nokta kaynak bağlantılı numune serileri elde etmek üzere elektrik direnç nokta kaynağı ile bu saclar birleştirilmiştir. Bağlantıların dayanım değerlerini saptamak için bütün seriler çekme – makaslama deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca sertlik ve mikro yapı özellikleri tespit edilmiş, kaynak bölgesinin boyutları makro düzeyde incelenmiştir. Her bir seriye, yorulma deneyleri uygulanarak bağlantıların yorulma ömürleri ve yorulma davranışları araştırılmıştır.

### 4.2 Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Deneylerde kullanılan galvanizli çelik saclar, düşük karbonlu ve alaşımsız çelik saclardır. Ostenitik kromlu paslanmaz çelik saclar ise AISI 304 tipi 18 8 Cr Ni çeliktir. Bu çelik sacların kimyasal bileşimleri Tablo 4.1’de verilmiştir<sup>1</sup>.

**Tablo 4.1:** Deney Malzemelerinin Kimyasal Bileşimi

Malzeme	Kimyasal Bileşim (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
Ostenitik Paslanmaz Çelik (AISI 304)	0,047	0,4461	1,4622	0,029	< 0,001	18,128	8,0	0,2084	71,25
Galvanizli Çelik (TS 822)	0,01	0,002	0,081	< 0,001	0,0058	0,028	0,0079	< 0,001	99,839

<sup>1</sup> Gedik Kaynak Laboratuvarı, GEDİKPAW, NA A.Ş.

#### 4.2.1 Deney Malzemelerinin Mekanik Özellikleri

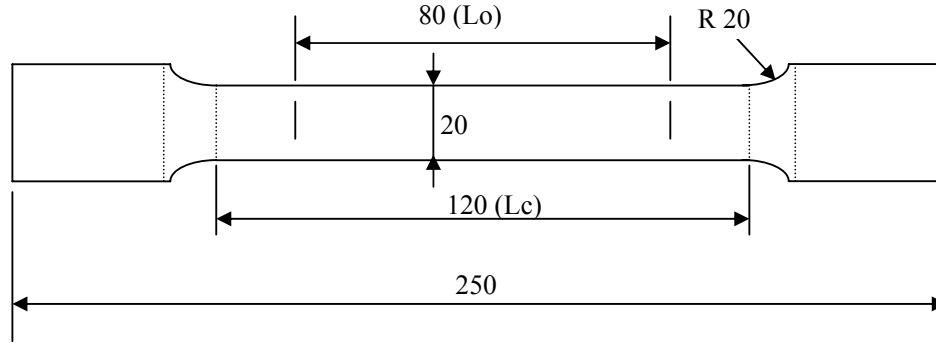
Dinamik yüklemelerde, istenilen yorulma tipine göre uygulanacak yükleri belirleyebilmek ve kullanılan sac malzemelerin akma ve kopma dayanımlarını tespit etmek için, bu sac malzemelere çekme deneyi yapılmıştır.

Bunun için galvanizli çelik sacdan ve ostenitik paslanmaz çelik sacdan çekme numuneleri hazırlanmıştır. Ostenitik paslanmaz çelik sac ve galvanizli çelik sacların kalınlıkları sırasıyla 1,03 mm ve 0,93 mm'dir. Bu sac numunelerden çekme numuneleri yapılırken, boyutlar TS 38 Türk Standartları Çekme Deneyleri bölümünden alınmıştır [50] (Tablo 4.2, Şekil 4.1).

**Tablo 4.2:** TS 138'e göre Çekme Numuneleri Boyutları (Kalınlığı 0,5mm ve 3mm Arasında Olan Çelik Saclar İçin)

Tip	Genişlik(b) (mm)	İlk ölçü uzunluğu (Lo) (mm)	Gövde uzunluğu (Lc) (mm)	Paralel kenarlı şerit uzunluğu (mm)
1	20	$80 \pm 0,8$	$120 \pm 10$	$140 \pm 10$
2	12,5	$80 \pm 0,5$	$75 \pm 5$	$87,5 \pm 50$
3	20	$200 \pm 2$	$225 \pm 10$	$260 \pm 10$

Bu çalışmada, tip 1 kategorisindeki boyutlar kullanılmıştır.



**Şekil 4.1 :** Sac Çekme Numunesinin Boyutları

Akma anında deney parçası gövde uzunluğunun uzama hızı 0,0025/sn.'yi geçmemelidir [50]. Buna göre çekme hızı  $V = 0,0025 \cdot Lc$  (m/sn) olarak alınmıştır ( $V = 0,3$  mm/sn).

Çekme Deneyi Sonuçları:

Ostenitik Paslanmaz Çelik Sac:

$L_o = 80$  mm.

$L_{son} = 121,5$  mm.

$\Delta L = 41,5 \text{ mm}$

Akma anındaki yük = 6,525 kN

Kopma anındaki yük = 13,35 kN

Galvanizli Çelik Sac:

$L_0 = 80 \text{ mm}$ .

$L_{son} = 125,5 \text{ mm}$ .

$\Delta L = 45,5 \text{ mm}$ .

Akma anındaki yük = 3,12 kN.

Kopma anındaki yük = 5,325 kN.

Son parça genişliği (kopma bölgesinde en küçük kesit) = 12,4 mm.

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen akma ve çekme dayanımı değerleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

**Tablo 4.3:** Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
Ostenitik paslanmaz çelik (AISI 304)	326	667	34,5
Galvanizli çelik (TS 822)	156	266	38

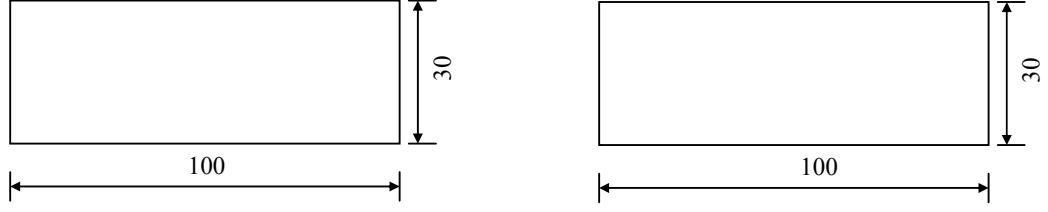
#### 4.2.2 Deney Parçalarının Boyutları

Deneylerde kullanılan deney numunelerinin boyutları Şekil 4.2'de verilmiştir.

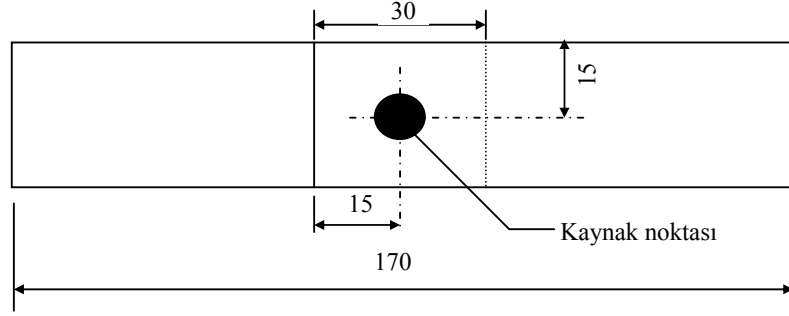
Deney numunelerinin boyutlarının seçiminde, çekme – makaslama deneyi sırasında kırılmanın kaynak bölgesinden oluşmasını sağlamak, kenar etkilerini ortadan kaldırmak ve minimum malzeme sarfiyatı gibi faktörler göz önüne alınmıştır.

#### 4.2.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney parçaları, giyotin makas ile Şekil 4.2.a'da gösterilen boyutlarda kesildikten sonra, derin bir kap içerisinde yüzeyleri yağ, pas ve kir gibi yabancı maddelerden arındırmak için %96 saflıktaki etil alkol içerisinde yıkanmış ve temiz bir bezle silinmiştir.



a) Birleştirilecek Alt ve Üst Saclar



b) Nokta Kaynağı Sonrası Numune Boyutları

Şekil 4.2 : Deney Numunelerinin Boyutları

#### 4.2.4 Kaynak Makinası

Deneylerde, tek kollu, 120 kVA gücünde elektronik akım ve zaman kontrollü, pnömatik basma tertibatlı elektrik direnç nokta kaynağı makinası kullanılmıştır<sup>2</sup>. Elektrot kuvveti, kaynak makinasının alt koluna yerleştirilen bir manometre<sup>2</sup> ile ölçülmüş ve sürekli olarak kontrol edilmiştir. Kaynak zamanı, sıkıştırma ve tutma süreleri, makinanın kendi elektronik donanımları aracılığıyla ayarlanmıştır. Şekil 4.3'de, deneylerde kullanılan direnç nokta kaynak makinası gösterilmektedir.



Şekil 4.3: Deneylerde Kullanılan Direnç Nokta Kaynağı Makinası

<sup>2</sup> Coşkunöz marka, Coşkunöz AŞ.

<sup>2</sup> Coşkunöz AŞ. Özel imalatı

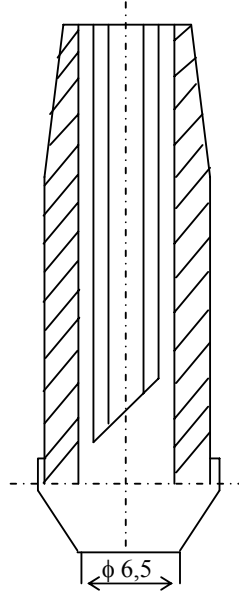


#### 4.2.5 DeneYlerde Kullanılan Elektrotlar

DeneYlerde, uç çapı 6,5 mm. olan bakır – krom – zirkonyum alaşımı elektrotlar (A2.2 tipi – Dın 44750; Malzeme no: 2.1293; Tip – G – ISO – 5182) kullanılmıştır. Tablo 4.4’de elektrotların kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri, Şekil 4.4’de ise elektrotların boyutları verilmiştir.

**Tablo 4.4:** DeneYlerde Kullanılan Elektrotların Kimyasal Bileşimleri ve Mekanik Özellikleri (ISO 5182)

Elektrod tipi	Kimyasal bileşim (%)	Isıl iletkenlik (J/Cms°K)	Elektrik iletkenliği (m/Ωmm <sup>2</sup> )	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
CuCrZr	91,12 Cu 0,8 Cr 0,08 Zr	320	48	500



**Şekil 4.4 :** DeneYlerde Kullanılan Elektrotların Boyutları

#### 4.3 Kaynaklı Bağlantıların Oluşturulması ve Ön DeneYler

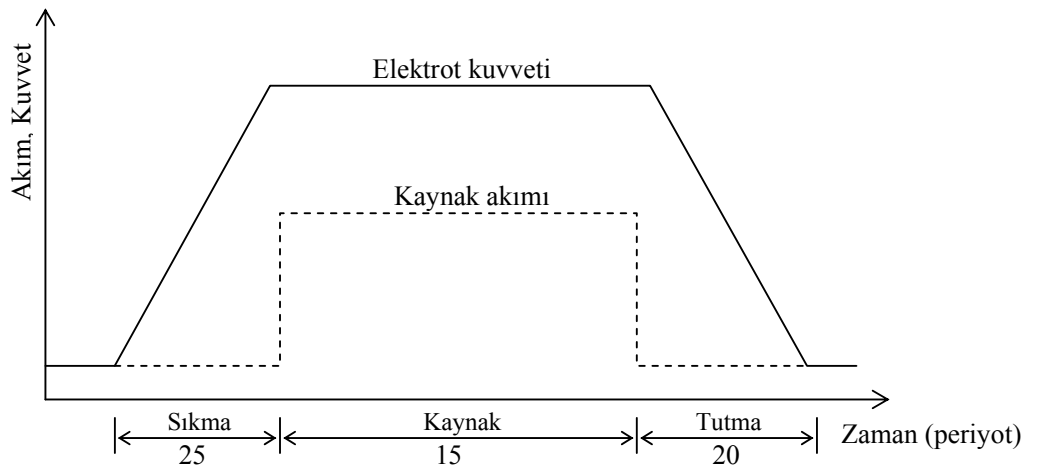
##### 4.3.1 Direnç Nokta Kaynaklarının Yapılışı

DeneY parçaları, Şekil 4.2’de gösterilen boyutlarda hazırlanıp temizlendikten sonra, galvanizli sac – galvanizli sac, galvanizli sac – ostenitik paslanmaz çelik sac ve

ostenitik paslanmaz çelik sac – ostenitik paslanmaz çelik sac çiftleri halinde, 30 mm. üst üste bindirilerek, bindirme kısmının orta noktasından kaynak edilmiştir.

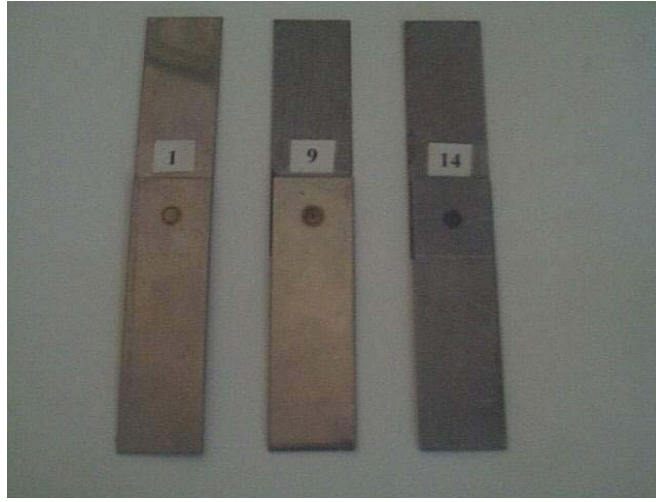
Elektrot kuvveti, her üç tip malzeme kombinasyonunda da birleştirilen malzemelerin cinsine göre değiştirilmiştir. Bu değerler, yönergelerden alınmıştır [51]. Buna göre, elektrot kuvvetleri galvanizli saclardan oluşan bağlantılarda 280 kg., galvanizli sac – ostenitik paslanmaz çelik saclardan oluşan bağlantılarda 340 kg ve ostenitik paslanmaz çelik saclardan oluşan bağlantılarda ise 450 kg. olarak belirlenmiştir. Bu değerler, tüm kaynak işlemi boyunca makinanın iki kolu arasına yerleştirilen manometre ile sürekli olarak kontrol edilmiştir.

Kaynak çekirdeği boyutları, her üç kombinasyonda da 4, 5 ve 6mm ( $\pm 0,1$ ) olarak üç değişik değerde seçilmiştir. Bu çekirdek çapları, kaynak akımı değiştirilerek elde edilmiştir. İstenilen kaynak çekirdeği çapını oluşturması beklenen kaynak akımını tespit etmek amacıyla bir dizi ön deneyler yapılmıştır. Her üç kombinasyonda da kaynak akımı 5,5 kA ve 13,5 kA arasında 0,5'er amperlik artışlarla değiştirilerek kaynaklar yapılmıştır. Bu kaynaklı numunelerin çekirdek boyutları ölçü mikroskobu ile ölçülerek, kaynak akım şiddetinin çekirdek boyutları üzerindeki etkisi grafik haline getirilmiştir. Elde edilen bu grafik yardımıyla, istenilen çekirdek çapını oluşturacak olan kaynak akım şiddetleri tespit edilmiştir. Bütün serilerde, kaynak süresi 15, sıkıştırma süresi 25 ve tutma süresi 20 periyot olarak sabit tutulmuştur (1 periyot = 1/50 sn). Şekil 4.5, deneylerde uygulanan kaynak periyodunu göstermektedir.



**Şekil 4.5 : Deneylerde Uygulanan Kaynak Periyodu**

Her deney koşulunda kaynak bağlantılı parçalar elde edilmiştir. Şekil 4.6’da nokta kaynağı ile birleştirilmiş numuneler görülmektedir. Bu parçaların bir serisi çekme – makaslama deneyine tabi tutulmuş, bir serisine mikro vickers sertlik ölçüm deneyi yapılmış, bir serisi çekirdek boyut ölçümlerinde kullanılmış, bir diğer serisi ışık mikroskobu ile mikro yapı fotoğraflarının çekilmesi için kullanılmış, sonuncu seriler ise yorulma ömürleri ölçüm deneylerinin yapılması, yorulma öncesi ve sonrası kaynaklı bölgelerin ultrasonik olarak muayenesi ve kopma bölgelerinin tarayıcı elektron mikroskobu ile incelenmesi aşamalarında kullanılmıştır.



**Şekil 4.6 : Nokta Kaynaklı Numuneler**

#### **4.3.2 Çekme – Makaslama Deneyleri**

Kaynaklı parçalar, laboratuvar koşullarında 60 tonluk çekme makinasında<sup>1</sup> çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi sırasında çekme hızı 0,1 mm/sn. olarak belirlenmiştir [50]. Çekme dayanımı olarak verilen değerler, çekme makinasının kontrol ünitesindeki kuvvet – zaman grafiğinden okunan maksimum değerlerdir. Kaynaklı numunelere yapılan bu çeke deneyleri yardımıyla, her bir numuneye ait maksimum çekme kuvveti tespit edilmiş ve kaynak parametrelerinin bağlantının çekme dayanımı üzerine etkileri irdelenmiştir. Şekil 4.7’de, çekme deneyleri sonrasında kopan numunelerden bazıları görülmektedir.

<sup>1</sup> DARTEC Çekme Makinası, Max. 60 ton, İTÜ Makine Fakültesi, Mekanik Deneyler Laboratuvarı



**Şekil 4.7 : Çekme Deneyi Sonrası Kopan Kaynaklı Numuneler**

#### **4.3.3 Işık Mikroskobu ile Yapılan Çalışmalar**

Nokta kaynaklı deney parçalarının her birinden alınan numuneler, mekanik olarak çekirdek ortasından kesilmiş ve poliestere gömülmüştür. Zımparalama ve parlatma işleminden sonra, her malzeme kombinasyonu için ayrı ayrı tespit edilen uygun ayraçlar ile dağlanmıştır [52, 53]. Esas metallerin, kaynak ve Isı Tesiri Altındaki Bölgelerin (ITAB) mikro fotoğrafları çekilmiş ve kaynak sonrası oluşan iç yapı değişimleri incelenmiştir. Dağlama işlemlerinde kullanılan ayraçlar aşağıda verilmiştir.

Ostenitik paslanmaz çelik çifti için	: 5 gr. $\text{CuCl}_2$ + 40 ml. $\text{HCl}$ + 30 ml. $\text{H}_2\text{O}$ + 25 ml Etil alkol.
Galvanizli çelik çifti için	: 10 ml. $\text{HNO}_3$ + 5 ml. Asetik asit + 85 ml. $\text{H}_2\text{O}$ .
Paslanmaz – Galvanizli çelik çifti için	: 10 gr. $\text{CuCl}_2$ + 20 ml. $\text{HCl}$ + 500 ml. Etil alkol.

#### **4.3.4 Çekirdek Boyutlarının Ölçümü**

Kaynak akım şiddetinin çekirdek boyutları üzerindeki etkisini, çekirdek oluşumunu ve kaynak bölgesinin konumunu incelemek amacıyla, kaynaklı numunelerin çekirdek boyutları ölçü mikroskobu ile ölçülmüştür. Bunun için, kaynak bölgesinin ortasından mekanik olarak kesilen numuneler, plastiğe gömülmüş, parlatılmış ve kaynak ayraçları ile dağlanmıştır. Ortaya çıkan kaynak çekirdeklerinin makro fotoğrafları çekilmiştir.

### 4.3.5 Sertlik Değerlerinin Ölçümü

Bağlantılardaki sertlik dağılımlarının belirlenmesi amacıyla, her bir numunenin çekirdek enine ve boyuna kesitinde ITAB, kaynak bölgesi ve esas metali içerisine alacak şekilde sertlik değerleri Microvickers sertlik ölçme cihazıyla<sup>1</sup> ölçülmüş ve bu bölgelerdeki sertlik dağılımları grafik haline getirilmiştir.

### 4.4 Yorulma Deneyleri

Kaynak parametrelerinin bağlantıların yorulma ömürleri üzerindeki etkilerini incelemek ve kaynaklı numunelerin Wöhler eğrilerini elde edebilmek için, bir dizi deney numunesine uzun ömürlü yorulma deneyleri yapılmıştır.

#### 4.4.1 Deney Düzeneği

Deneylerde, 60 tonluk servo-hidrolik tertibatlı yorulma makinası<sup>2</sup> kullanılmıştır. Deney makinası, buna bağlı yardımcı ekipmanlar ve yorulma deney düzeneği Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

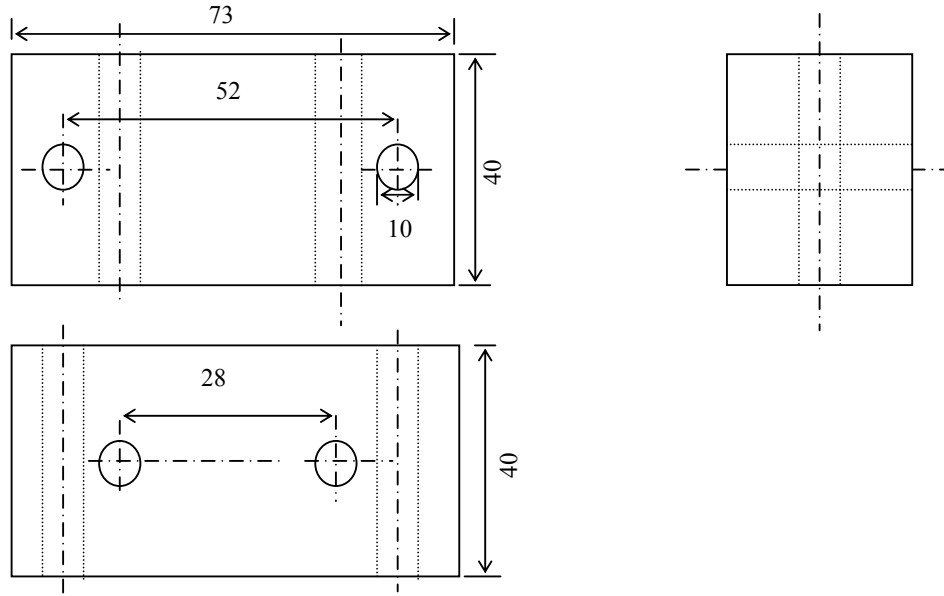


Şekil 4.8 : Yorulma Makinası ve Deney Düzeneği

<sup>1</sup> SIMADZU Marka, İTÜ Makine Fakültesi, Mekanik Deneyler Laboratuvarı

<sup>2</sup> DARTEC Marka, İTÜ Makine Fakültesi, Mekanik Deneyler Laboratuvarı





**Şekil 4.11** : Tutucu Çenelerin İkinci Parçası (2 adet)

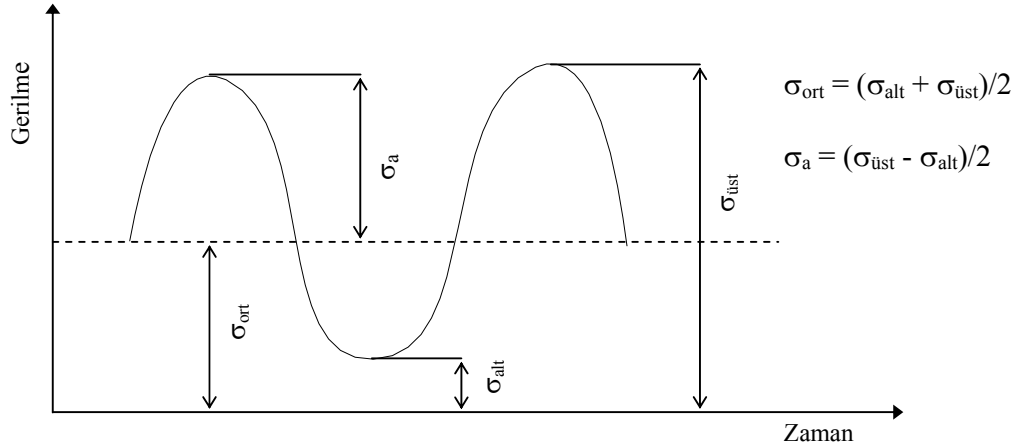
Şekil 4.10'da gösterilen tutucu çenenin ilk parçası, civatalarla Şekil 4.9'daki alt tablaya sabitlenmiştir. Şekil 4.11'de gösterilen tutucu çenenin ikinci parçası ise alt tabladan bağımsızdır. İlk parça ile karşılıklı olarak civata ile tutturulduğunda, sac numuneler iki parça arasında sıkışarak sabitlenmektedir. Yükleme sırasında numunelerin tutturulan yerlerinden kaymasını önlemek için birinci ve ikinci parçaların birbirleriyle temas ettikleri tutma yüzeylerine planya tezgahında çapraz dişler açılmıştır. Bu dişler sac parçaların çeneler arasına gelen kısmını ısırarak rijit bir bağlantı oluşumunu sağlamaktadır. Şekil 4.12'de, imal edilen bu çenelerin fotoğrafı görülmektedir.



**Şekil 4.12** : Deneylerde Kullanılan Tutucu Çeneler

#### 4.4.2 Yorulma Deneyleri ve S-N Eğrilerinin Çıkarılması

Yorulma deneylerinin ikinci aşamasında, farklı parametrelere sahip her bir kaynaklı numunenin yorulma davranışını incelemek ve Wöhler eğrilerini çıkarabilmek için her bir deney numunesine, yöntemin metodolojisine uygun olarak farklı büyüklüklerde ve giderek azalan değerlerde dinamik yüklemeler yapılmıştır. Yoruma yüklerinin seçiminde, kaynaklı parçaların çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar göz önüne alınmıştır. Kaynaklı parçaların maksimum çekme kuvvetinin yaklaşık %70'i dinamik yüklemelerde üst limit olarak seçilmiştir [54]. Yorulma yükü, giderek azalan bir değerde uygulanarak, aynı parametrelere sahip numune serisi üzerinde yaklaşık 8 adet deney yapılmıştır. Bu deneyler iki defa tekrar edilerek, bulunan yorulma ömürlerinin ortalamaları alınmıştır. Benzer işlemler her bir kaynaklı numune serisine uygulanarak elde edilen değerler  $\Delta\sigma$ -N (Gerilme aralığı - Çevrim sayısı) grafikleri şeklinde sunulmuş ve yorumlanmıştır. Numunelerin maruz kaldığı yükleme tipi, dalgalı çekme bölgesinde yorulma zorlanmasıdır (Şekil 4.13), ve yükleme oranı  $R = (P_{min}/P_{max}) = 0,09$  değerinde sabit tutulmuştur. Yükleme frekansı tüm deneylerde 10 Hz. olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.13 : Dalgalı Çekme Bölgesinde Yorulma Zorlanması

Bu deneyler sırasında, kaynaklı parçanın rijitlik değerindeki düşüş miktarının %25'i geçtiği an, parçanın yorulma sonucu hasara uğradığı kabul edilmiştir. Kaynaklı numunenin rijitliği  $\Delta P/\Delta l$  olarak ifade edilmektedir. Burada  $\Delta P$  periyodik yük aralığı ( $P_{max} - P_{min}$ ),  $\Delta l$  her bir yükleme periyodunda numunenin periyodik uzama aralığıdır [40]. Ancak, yüksek gerilmelerdeki zorlamalarda bazı kaynaklı deney parçaları %25'lik rijitlik düşüşü göstermeden kaynak çekirdeğinin en dış bölgesinden



koparak hasara uğramıştır. Yorulma deneylerinde yorulma kuvvet aralığı sabit kaldığından (kuvvet kontrollü deney), rijitlikteki değişimi takip edebilmek için numunenin periyodik uzama aralığı  $\Delta l$ , deney düzeneğinin monitöründeki yük – uzama grafiğinden devamlı olarak kontrol edilmiştir. Şekil 4.14’de, çeneler arasına tutturulmuş yorulma deney numunesi görülmektedir.



**Şekil 4.14 : Çeneler Arasına Tutturulmuş Kaynaklı Yorulma Deney Numunesi**

#### **4.5 Tarayıcı Elektron Mikroskobu ile Yapılan Çalışmalar**

Kaynaklı numunelere yorulma deneylerinin yapılmasından sonra, hasara uğrayan parçalarda son kopma bölgelerinin incelenmesi amacıyla Tarayıcı Elektron Mikroskobunda<sup>1</sup> çalışmalar yapılmıştır. Burada incelenen bölgeler, yorulma çatlağının oluştuğu saclar arası bölgeler olmayıp, yüksek gerilme değerlerinde zorlanan ve hasarın kopma yoluyla meydana geldiği numunelerin son kopma bölgeleridir.

#### **4.6 Ultrasonik Test Yöntemiyle Yapılan İncelemeler**

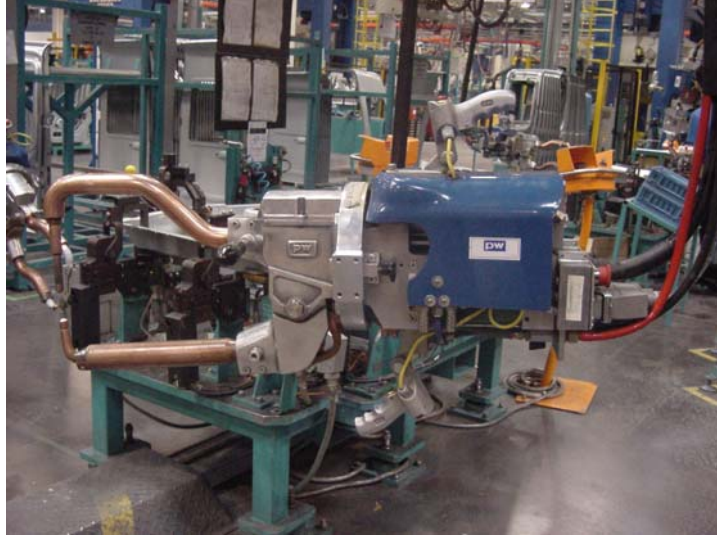
Çalışmanın bu aşamasında, yorulmaya maruz kalmış nokta kaynaklı bağlantıların ultrasonik yöntemle muayenesi ve kaynak bölgesindeki değişimlerin bu yolla incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için, galvanizli çelik sac – ostenitik paslanmaz

<sup>1</sup> İTÜ Kimya – Metalurji Fakültesi

çelik sac çiftlerinden 5 mm. çekirdek çapına sahip numunelerden oluşan bir seri hazırlanmıştır. Bu kaynaklı serilerin kaynak işlemleri, Ford Otosan Gölcük Fabrikası Kaynak Bölümünde yapılmıştır. Kaynak işlemi sırasında, galvanizli çelik sacda bulunan çinko tabakasını parçalamak için up slope (artan akım) ve down slope (azalan akım) yöntemiyle kaynak akımının devreden geçişi sağlanmıştır. Kaynak parametreleri aşağıda verilmiştir.

Ön sıkma zamanı	: 10 periyot
Kaynak öncesi sıkma	: 16 periyot
Kaynak sonrası bekleme	: 15 periyot
Kaynak zamanı	: 10 periyot
Akım artışı (Up slope)	: 3 periyot
Akım azalışı (Down slope)	: 3 periyot
Kaynak akımı	: 9 kA
Elektrot ucu	: ISO 1089 - B tipi
Elektrot kuvveti	: 340 kg.

Şekil 4.15’de kullanılan kaynak makinası gösterilmektedir.



**Şekil 4.15 : Asmalı Tip Mobil Kaynak Makinası**

Elde edilen kaynaklı numuneler, Krautkammer firmasının Ford Otosan için özel olarak ürettiği ultrasonik nokta kaynağı muayene cihazında test edilmiştir. Test sonucunda tüm numunelerde istenilen kaynak çekirdeği ve kalitesinin elde edildiği tespit edilmiştir.

Testlerde kullanılan ultrasonik test cihazı Şekil 4.16'da, nokta kaynakları için özel olarak imal edilen prob ise Şekil 4.17'de gösterilmektedir.



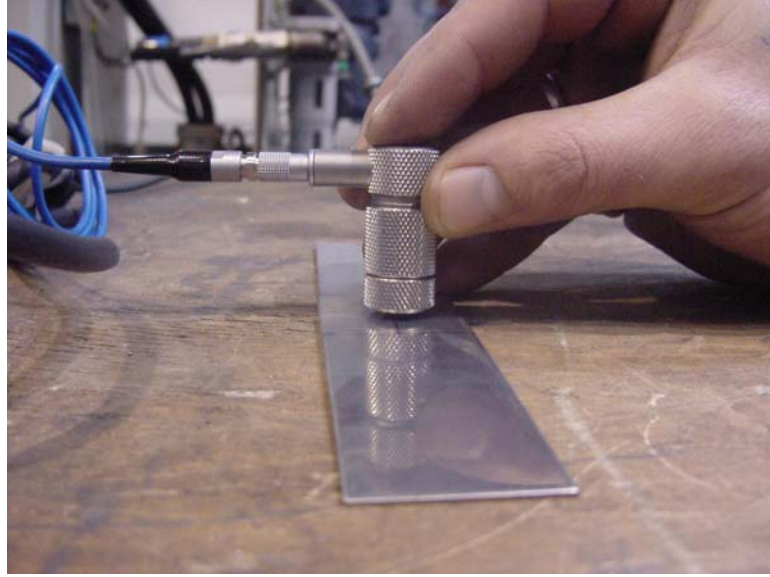
**Şekil 4.16 : Ultrasonik Test Cihazı<sup>1</sup>**



**Şekil 4.17 : Kullanılan Test Probu'nun Görünümü<sup>2</sup>**

Ultrasonik olarak hatasız oldukları teste edilen kaynaklı numunelerden dört adedi sırasıyla 30000, 60000, 90000 ve 104000 çevrimlik yorulma zorlanmasına maruz bırakılmışlardır. Bu yüklemelerde kuvvet aralığı ve yükleme frekansı sabit tutulmuştur. Anılan çevrimler sonucunda, numunelerin hiç birinde herhangi bir ayrılma meydana gelmemiştir. Yorulma sonrası kaynak bölgeleri tekrar ultrasonik olarak incelenmiş ve farklı çevrim sayılarında yorulma sonrası oluşan muhtemel hasarlar incelenerek, sonuçlar irdelenmiştir. Ultrasonik test sonuçları, yorulma öncesi ve yorulma sonrası karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.18'de test anı görülmektedir.

<sup>1,2</sup> Krautkammer Marka Ultrasonik Test Cihazı ve Test Probu



**Şekil 4.18 : Ultrasonik Test Anı**

#### **4.7 Yorulma Sonrası Kaynak Bölgelerinin Makroskobik İncelenmesi ve Bağlantının Malzeme Sabitlerinin Bulunması**

Yorulmaya maruz bırakılan bu numunelerde, sacların birleşme bölgesinde yorulma sonrası oluşan ayrılma ve çatlak ilerlemesini incelemek için, numunelere 200 °C'de ısıl renklendirme işlemi yapıldıktan sonra, alt ve üst saclar kaynak bölgesinden birbirinden ayrılmış, planya ile çapak alma ve ultrasonik yüzey temizleme işleminden sonra kalan kaynak kesitinin makro fotoğrafları çekilmiştir. Bu fotoğraflar yardımıyla, yorulma sonrası kalan çekirdek kesiti ve çatlak boyutları tespit edilerek çevrim sayısı – çatlak boyu ve çatlak ilerleme hızı grafikleri çizilmiş, bağlantıya ait yorulma olayını karakterize eden malzeme sabitleri (C ve m sabitleri) elde edilmiştir.

## **5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ**

### **5.1 Genel**

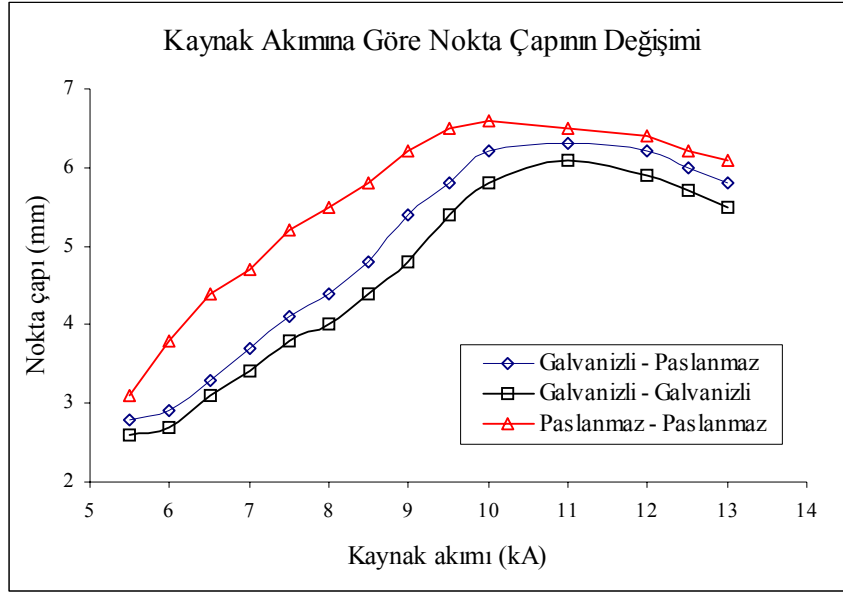
Bu çalışmada, galvanizli çelik sac ve ostenitik paslanmaz çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında, çekirdek çapının ve sac kombinasyonunun bağlantının çekme – makaslama dayanımına, sertlik dağılımına, makro ve mikro yapısına ve yorulma dayanımına etkileri araştırılmıştır. Bir dizi kaynaklı deney numunesi, farklı çevrim sayılarında yorulma zorlanmasına maruz bırakılarak, testler sonrasında kaynak bölgeleri ultrasonik olarak incelenmiş, bağlantının çatlak ilerleme hızını karakterize eden C ve m malzeme sabitleri tespit edilmiştir. Deney malzemesi olarak piyasa koşullarındaki saclar kullanılmış ve deneyler laboratuvar koşullarında yapılmıştır.

### **5.2 Ön Deney Sonuçlarının İrdelenmesi**

Tez çalışmasının ön deneylerinin yapılması aşamasında, kaynak akımının çekirdek boyutlarına etkisi irdelenmiş, kaynaklı parçalar çekme – makaslama deneyine tabi tutulmuş, kaynak bölgelerinin makroskobik ve mikroskobik fotoğrafları çekilmiş ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır.

#### **5.2.1 Kaynak Akımının Çekirdek Boyutlarına Etkisi**

Kaynak akımına göre çekirdek boyutlarındaki değişimleri incelemek için, galvanizli – galvanizli sac, galvanizli – ostenitik paslanmaz çelik sac ve ostenitik paslanmaz – ostenitik paslanmaz çelik sac olarak eşleştirilen deney parçaları, 5,5 kA'den 13,5 kA'e kadar 0,5'er kA'lik artışlarla kaynak yapılmıştır. Daha sonra kaynaklı deney parçalarına sıyırma testi yapılarak gerçekleşen çekirdek çapları ölçülmüştür. Kaynak akımına göre nokta çapının değişimi Şekil 5.1'de verilmiştir.



**Şekil 5.1 :** Nokta Çapının Kaynak Akımına Göre Değişimi

5,5 kA ve 6 kA gibi düşük akım şiddetlerinde, kaynak bölgesine verilen ısı miktarının düşük olması nedeniyle çekirdek çapları özellikle galvanizli çelik sac çiftleri ve galvanizli – paslanmaz çiftlerinde oldukça küçük çıkmıştır (2,7 – 3 mm). Düşük akım şiddetleriyle kaynak yapılan bu parçalarda sıyırma testleri sonucunda, saclar kaynak yerinden birinden ayrılmış ve kaynak bölgelerinde tam bir erimenin olmadığı görülmüştür. Ancak, ostenitik paslanmaz çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda, aynı düşük akım şiddetlerinde çekirdek çapı 3 ila 4 mm. arasında çıkmıştır. Bunun sebebi, ostenitik paslanmaz çeliğin galvanizli çeliğe göre elektriksel direncinin daha büyük olması, aynı akım şiddetinde kaynak bölgesinde ısı yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır. Bu da, eriyen kütlenin ve dolayısıyla da kaynak çekirdeğinin paslanmaz çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda daha büyük olmasına neden olmaktadır. Kaynak bölgesinde en düşük ısı oluşumunun ve en küçük çekirdek çapının galvanizli çelik sac çiftlerinde olduğu görülmektedir. Bu oluşumda, galvanizli çeliğin elektriksel direncinin düşük olmasının yanı sıra, sac üzerindeki koruyucu çinko tabakasının da etkisi büyüktür. Yüzeyde bulunan ince çinko tabakası, elektrodlarla çinko arasındaki temas direncini artırarak kaynak bölgesinde akım yoğunluğunun azalmasına sebep olmakta, ve böylece de ısı girdisi azalarak kaynak çekirdeğinin daha küçük çapta şekillenmesine ya da bağlantının çok zayıf olmasına sebebiyet vermektedir. Kaynak akımı arttıkça, kaynak bölgesindeki

ısı girdisi arttığından, her üç tip sac kombinasyonunda da çekirdek çapı düzgün bir şekilde artmaktadır.

10 – 10,5 kA akım şiddetinden itibaren, çekirdek kesitinin aşırı büyümesi (6,5 mm) ve elektrotlar arasındaki malzeme arakesitinde aşırı yumuşama ve erime oluşması sonucu, sac yüzeylerinde derin elektrot izleri oluşmakta ve bu da bağlantının kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. 12 kA değerinden itibaren, elektrot ile iş parçası arasında ortaya çıkan ısının elektrotlar tarafından yeterli oranda soğutma suyuna iletilmemesi sonucu, elektrotlar ile iş parçası arasında yapışmalar ortaya çıkmaktadır.

11 kA akım değerinden sonra, ergimiş metalin elektrot baskı alanının dışına taşması sonucu, özellikle ostenitik paslanmaz çelik sac çiftinde arakesitte çekirdekten fişkırmalar görülmekte ve bağlantının olduğu kesit yani çekirdek çapı küçülmektedir. Bunun sonucu olarak, her üç malzeme kombinasyonunda da, yaklaşık 10,5 – 11 kA'lık akım değerlerinden itibaren bağlantıların çekirdek çapları düşmektedir.

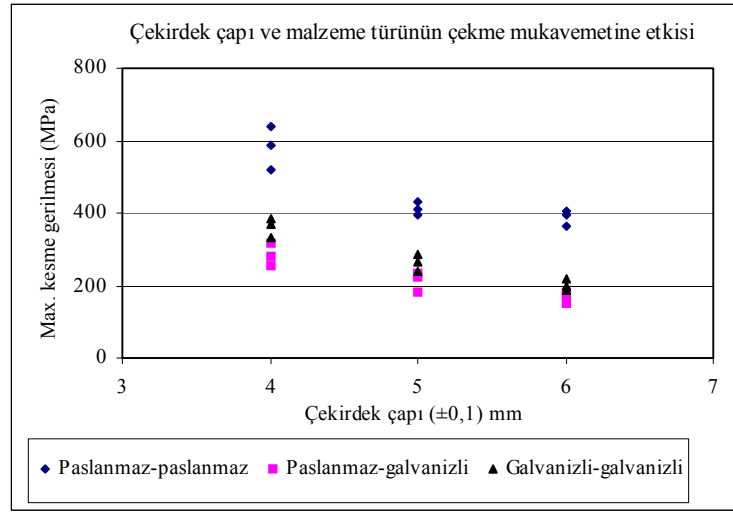
### **5.2.2 Çekme – Makaslama Deneyi Sonuçları**

Kaynak çekirdek çapının bağlantıların çekme mukavemeti üzerine etkisini incelemek için numunelere çekme – makaslama deneyleri yapılmıştır. Her deney numunesine üç defa çekme deneyi uygulanarak, kopma sonrası kuvvet – zaman grafiğinden okunan maksimum kuvvet değerleri, kaynaklı numunelerin çekme mukavemeti olarak kaydedilmiştir. Tablo 5.1'de, kaynaklı numunelerin çekme kuvvetleri verilmiştir. Şekil 5.2'de ise, kaynak çekirdek çapının numunelerin çekme mukavemeti üzerine etkisi gösterilmektedir.

Tablo 5.1 ve Şekil 5.2 incelendiğinde, her üç tip sac kombinasyonunda da çekirdek çapı arttıkça, bağlantının çekme mukavemetinin arttığı görülmektedir. Kaynak çekirdeği büyüdükçe, yük taşıyan kesit artmakta ve o bölgedeki gerilme değeri küçülmektedir. Bunun sonucunda da, kaynaklı bölge daha yüksek kuvvet değerlerinde hasara uğramaktadır.

**Tablo 5.1:** Kaynaklı Numunelerin max. Çekme Kuvveti ve Kesme Dayanımları

Malzeme çifti	Çekirdek çapı ( $\pm 0,1$ mm)	Max. çekme kuvveti (kN)	Max. kesme dayanımı (Mpa)
Paslanmaz çelik sac çiftleri	4	6,5 - 7,35 - 8,0	518 - 585 - 637
	5	7,7 - 8,1 - 8,5	392 - 413 - 433
	6	10,32 - 11,2 - 11,5	365 - 396 - 407
Paslanmaz çelik – galvanizli çelik çiftleri	4	3,2 - 3,5 - 4,0	255 - 279 - 318
	5	3,6 - 4,4 - 4,55	183 - 224 - 232
	6	4,2 - 4,8 - 5,1	149 - 170 - 180
Galvanizli çelik çiftleri	4	4,2 - 4,65 - 4,8	334 - 370 - 382
	5	4,7 - 5,15 - 5,6	239 - 262 - 285
	6	5,25 - 5,6 - 6,2	186 - 198 - 219



**Şekil 5.2:** Çekirdek Çapı ve Malzeme Türünün Bağlantının Çekme Mukavemetine Etkisi

Kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonrası kopma bölgeleri incelendiğinde, hasarın yırtılma şeklinde gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.7). Kaynak çekirdeğinin çekme - makaslama dayanımının esas metalin çekme dayanımı civarında ve hatta üzerinde olmasından dolayı çekirdek bölgesinden herhangi bir ayrılma olmamış, gerilme yığılmasının en kritik olduğu çekirdek kenarından bir yırtılma gerçekleşerek kopma hasarı meydana gelmiştir. Bu tip bir hasar sonucunda, seçilen çekirdek çaplarının yeterli mukavemete sahip bir nokta kaynağı bağlantısı oluşturdukları sonucuna varılabilir.

En yüksek çekme dayanımına sahip sac kombinasyonu, paslanmaz çelik sac çiftleridir. Paslanmaz çeliğin çekme dayanımı, galvanizli düşük karbonlu çeliğe göre

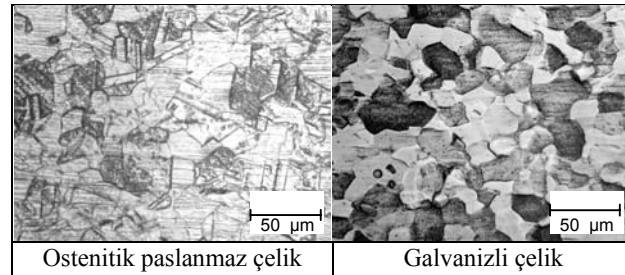


daha yüksek olduğundan, nokta kaynaklı bağlantısı da en yüksek çekme dayanımına sahiptir. En düşük çekme dayanımı ise, galvanizli sac – paslanmaz çelik sac çiftinde görülmüştür. Bunun en önemli sebebi, farklı malzemelerin nokta kaynağında ortaya çıkan ısı dengesi ve bunun sonucunda da kaynak çekirdeğinin simetrik olmayışıdır. Bu bağlantı tipinde, kaynak çekirdeği sacların tam ortasında şekillenme özelliğini yani simetrikliğini kaybederek, direnci yüksek olan sac tarafında daha çok şekillenmiş ve sacların birleşme bölgesinde mukavemetin düşmesine yol açmıştır. Ortaya çıkan bu ısı dengesizliğinin nedenleri ve etkileri, makroskopik inceleme sonuçları kısmında irdelenmiştir.

Çekirdek çapının artmasıyla bağlantının çekme mukavemetindeki artışın en açık görüldüğü bağlantı tipi paslanmaz çelik sac çiftleridir. Diğer iki bağlantıda, özellikle 4 ve 5 mm. çekirdek çapına sahip numunelerin çekme dayanımları arasındaki fark çok küçükken ve bu değerler birbirine çok yakınken, paslanmaz çelik sac çiftinde aynı çekirdek çaplı numunelerin çekme dayanımları arasında oldukça belirgin bir fark gözlenmiştir. Bu durum Şekil 5.2’de de açık olarak görülebilmektedir. Paslanmaz çelik sac ve paslanmaz – galvanizli sac çiftlerinde çekirdek çapı arttıkça çekme kuvveti değerleri artış yavaşlama eğilimi gösterirken, paslanmaz çelik sac çiftinde bu değer artış eğilimine devam etmektedir. Dolayısıyla, çekirdek çapının artması, mukavemeti arttırmak bakımından en fazla paslanmaz çelik saclardan oluşan bağlantıları etkilemektedir.

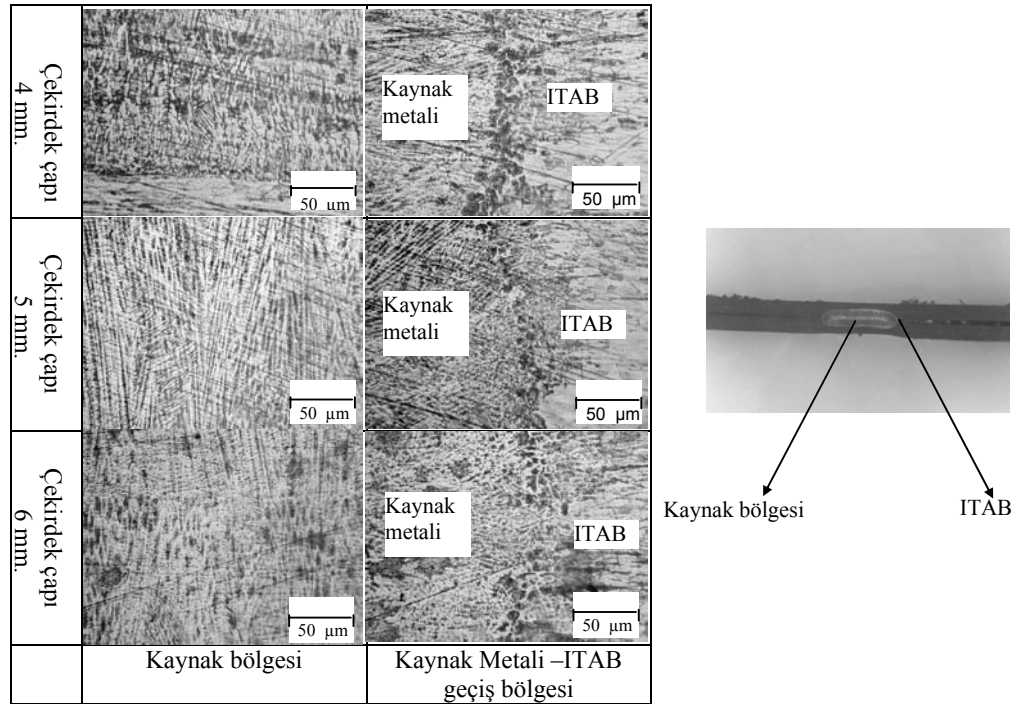
### 5.2.3 Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Esas metallerin mikroyapıları Şekil 5.3’de, paslanmaz çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantıların mikroyapıları Şekil 5.4’te, paslanmaz – galvanizli bağlantıların mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.5’de ve galvanizli saclardan oluşan bağlantıların mikroyapı fotoğrafları da Şekil 5.6’da verilmektedir.



Şekil 5.3 : Esas Metallerin Mikroyapıları

Şekil 5.3 deki ilk mikroyapı fotoğrafı, AISI 304 tip ostenitik paslanmaz çelik sacın mikro yapısını göstermektedir. Yapı tamamen eş eksenli ostenit tanelerinden oluşmaktadır. Aynı şekilde ikinci fotoğrafta ise galvanizli çelik sacın mikro yapısı görülmektedir. Çeliğin karbon miktarına bağlı olarak (% 0,01) yapı tamamen ferrit fazından oluşmaktadır. Burada bazı ferrit tanelerinin daha koyu renkte gözükmesi, farklı fazdan oluşmasından olmayıp, farklı kristal doğrultularında katılmış olmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dağlama karakteristiğinden dolayı, farklı yönlerdeki ferrit taneleri daha koyu gözükmektedir. Taneler arasında farklı fazların olabileceğini gösteren herhangi bir şekilsel farklılık mevcut değildir. Doalysıyla çeliğin mikroyapısı tamamen ferritten oluşmaktadır.

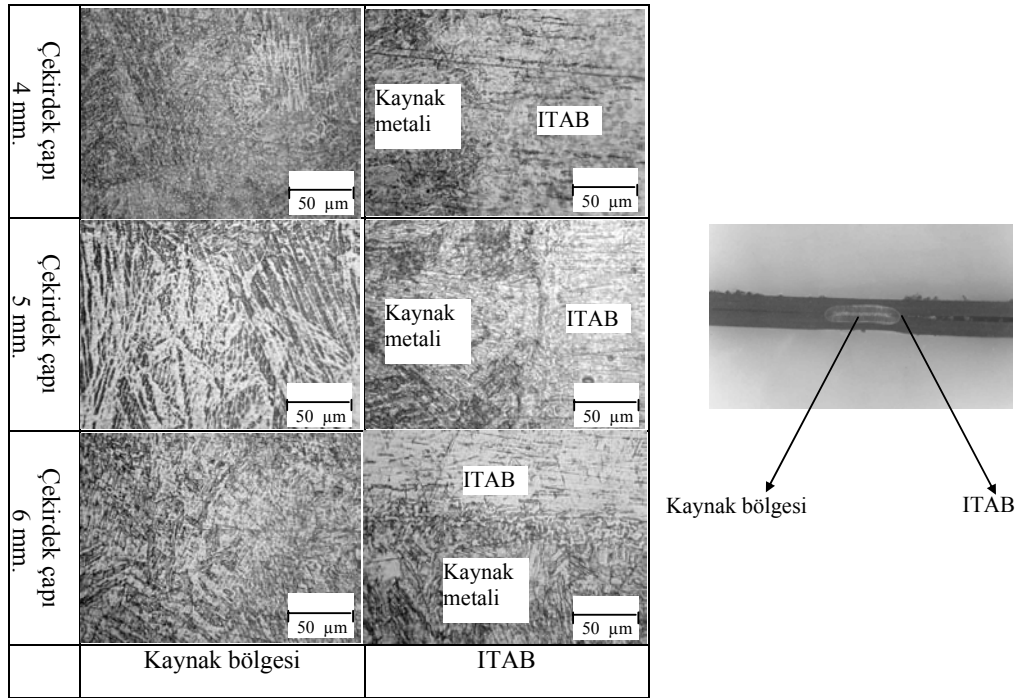


**Şekil 5.4 : Paslanmaz Çelik Sac Bağlantılara Ait Mikroyapı Görünüşleri**

Mikroyapı fotoğrafları, kaynak bölgesi ve ITAB olmak üzere iki bölgeden çekilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde, ostenitik paslanmaz çelik sac çiftinin kaynak bölgesinde kolonsal bir yapı oluştuğu görülmektedir. Ostenitik paslanmaz çeliklerde, herhangi bir aşamada ostenit – ferrit dönüşümü olmadığından, katılma sonucunda iç yapıda martenzit oluşma olanağı yoktur. Hızlı soğumadan ve yönlendirilmiş katılmasından dolayı, yukarı doğru uzayan düzgün kolonsal bir yapı mevcuttur. Bu

sac bağlantısının kaynak bölgesinde bir faz dönüşümü olmadığı, mikrosertlik ölçüm sonuçlarından da anlaşılmaktadır.

Kaynak metali ile esas metal arasındaki ITAB’da (Isının Tesiri Altındaki Bölge), esas metalin yapısına göre daha ince taneli bir yapı mevcuttur. Bu bölgede herhangi bir erime sözkonusu değildir. Kaynak metali ile esas metal arasında oluşan mikroyapıdaki bu değişim, ITAB’ın kaynak sırasında erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar ısınması ve kaynak sonrasında normal atmosfer ortamında soğumasından kaynaklanmaktadır. Bu bölgenin hemen yanında ise, ısıdan etkilenmeyen esas metalin mikroyapısı görülmektedir. Çekirdek çapının ve dolayısıyla da kaynak akımının artmasıyla ITAB’ın mikroyapısında önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Isı girdisinin artmasıyla, soğuma hızının artması sonucu kaynak bölgesinde daha ince ve yoğun bir kolonsal yapı oluşmuştur.

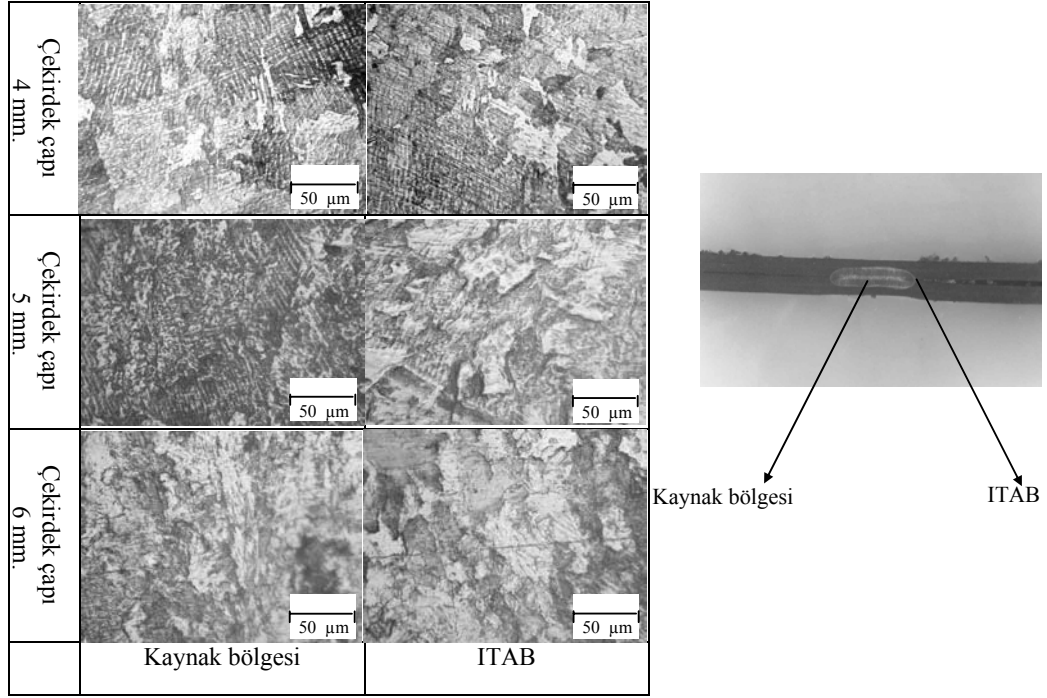


**Şekil 5.5 :** Paslanmaz Çelik – Galvanizli Çelik Sac Bağlantılara Ait Mikroyapı Görünüşleri

Şekil 5.5’de görülen paslanmaz – galvanizli çelik sac çiftlerinde, özellikle 4 mm. ve 5 mm. çekirdek çapına sahip numunelerin kaynak bölgelerinde hızlı soğumadan dolayı yine kolonsal bir yapı mevcuttur. Kaynak bölgesi, galvanizli çelik ve ostenitik paslanmaz çelik karışımından oluştuğu için bu bölgede hızlı bir ostenit – ferrit dönüşümünden dolayı bir martenzitik yapı oluşmuştur. Isı girdisinin yüksek olduğu 6 mm. çekirdek çaplı numunenin kaynak bölgesinde kolonsal yapının bozulduğu

görülmektedir. Yine bu numunede, kaynak metalini ile esas metal arasındaki geçiş bölgesi (ITAB) ve ince tane oluşumu açıkça görülmektedir.

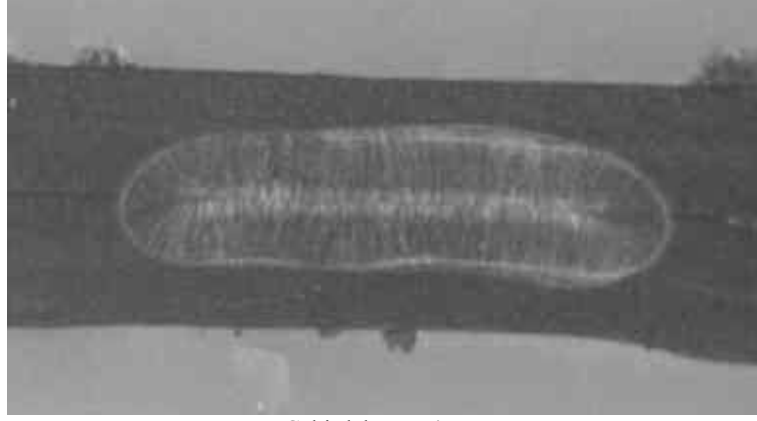
Şekil 5.6'daki galvanizli sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda, kaynak metalini ile esas metal arasındaki geçiş bölgesi (ITAB)'ın, diğer sac kombinasyonlarına göre daha dar olduğu görülmüştür. Kaynak metalinin, diğer malzeme çiftlerinde oluşanlara göre, daha hızlı bir soğuma nedeniyle tam kolonsal bir yapıya sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Galvanizli çeliğin düşük karbonlu olması ve dolayısıyla da sertleşme eğiliminin az olması göz önüne alındığında, bu bağlantının kaynak metalinde, galvanizli – paslanmaz bağlantılara göre mikroyapının tam ferritik olduğu görülmüştür. Mikrosertlik ölçümleri de bu sonucu doğrulamaktadır.



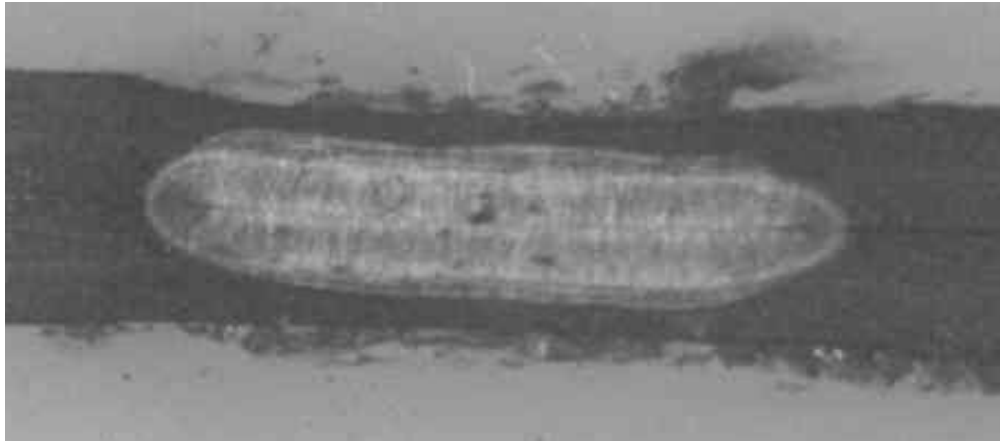
**Şekil 5.6 :** Galvanizli Çelik Sac Bağlantılara Ait Mikroyapı Görünüşleri

#### 5.2.4 Makroskopik İnceleme Sonuçları

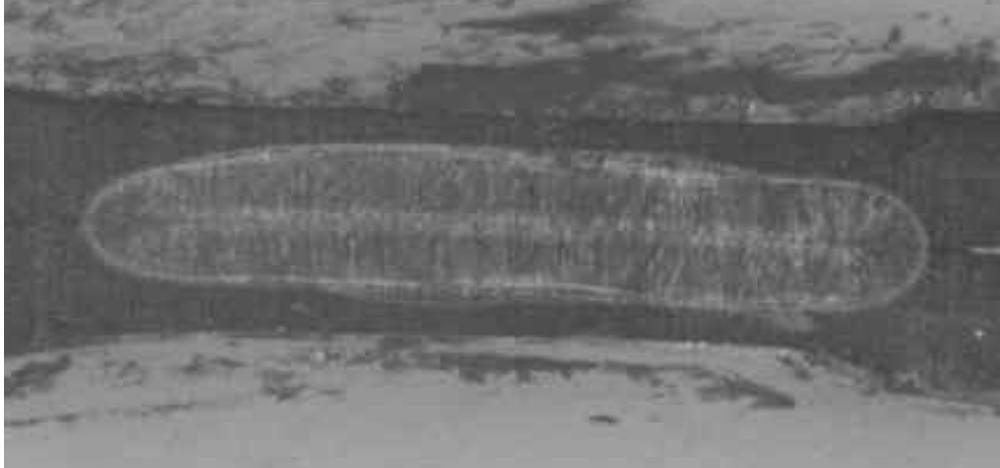
Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da sırasıyla paslanmaz çelik sac çiftleri, paslanmaz – galvanizli sac çiftleri ve galvanizli sac çiftlerine ait kaynak çekirdeklerinin makro fotoğrafları görülmektedir.



Çekirdek çapı 4 mm



Çekirdek çapı 5 mm



Çekirdek çapı 6 mm

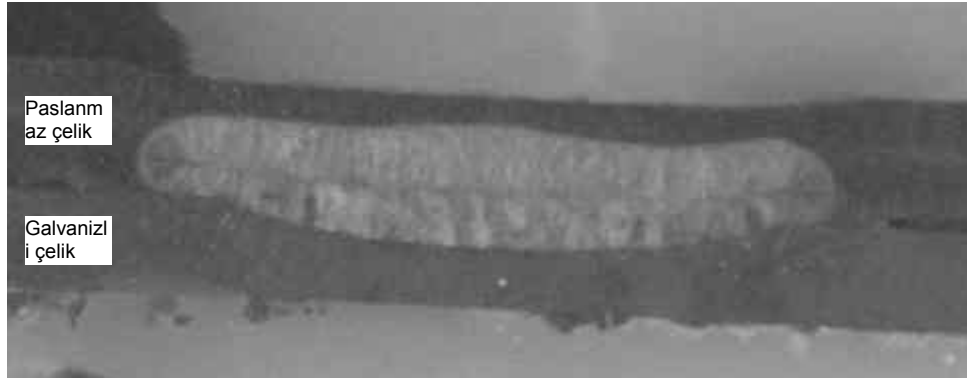
**Şekil 5.7 :** Paslanmaz Çelik Sac Çiftleri Kaynak Bölgeleri (x20)

Şekil 5.7. incelendiğinde, kaynak çekirdeklerinin her iki sacın tam ortasında simetrik olarak oluştuğu görülmektedir. Kaynak akımının artmasıyla birlikte, çekirdek çapı da artmaktadır. Özellikle 5 ve 6 mm. çekirdek çapına sahip numunelerde akım

şiddetinin yüksek olmasından dolayı sacların elektrodlar altında kalan bölgelerindeki çökme açıkça görülmektedir. Bu sac kombinasyonunda, akım şiddetinin ve dolayısıyla çekirdek çapının artması, çekirdeğin simetrikliğinde herhangi bir bozulma meydana getirmemektedir.



Çekirdek çapı 4 mm

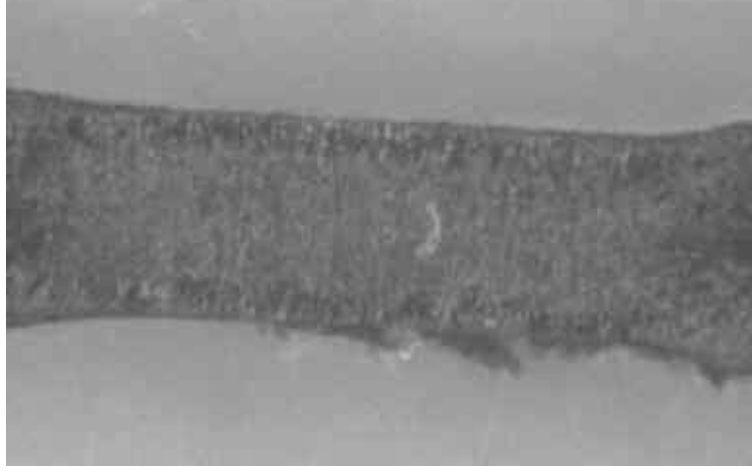


Çekirdek çapı 5 mm

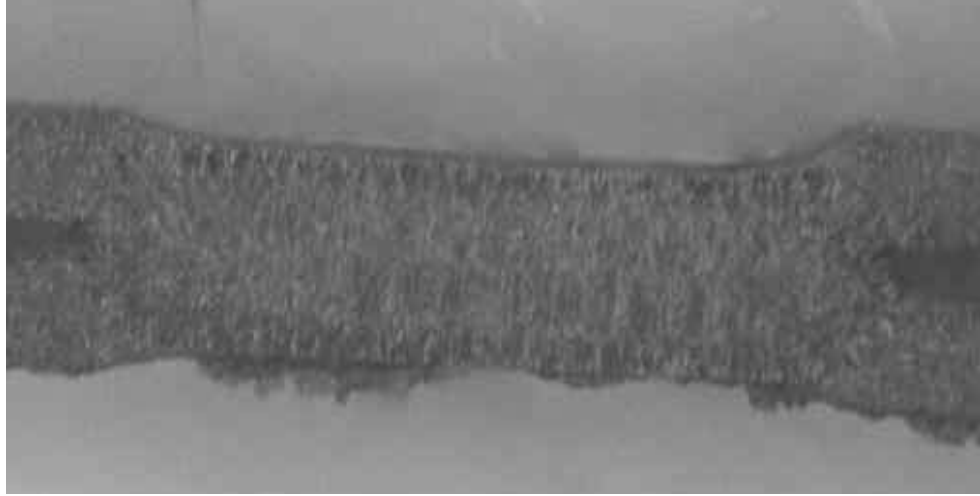


Çekirdek çapı 6 mm

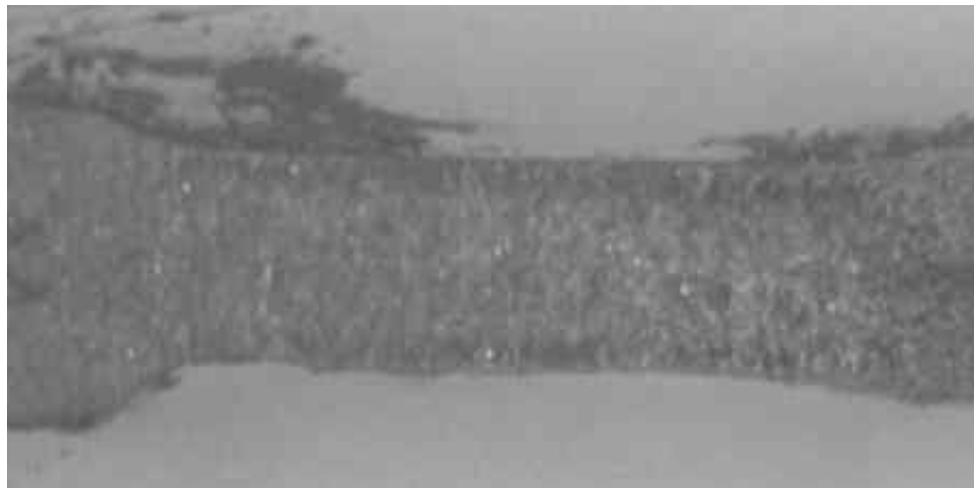
**Şekil 5.8 : Paslanmaz – Galvanizli Sac Çiftleri Kaynak Bölgeleri (x20)**



Çekirdek çapı 4 mm



Çekirdek çapı 5 mm



Çekirdek çapı 6 mm

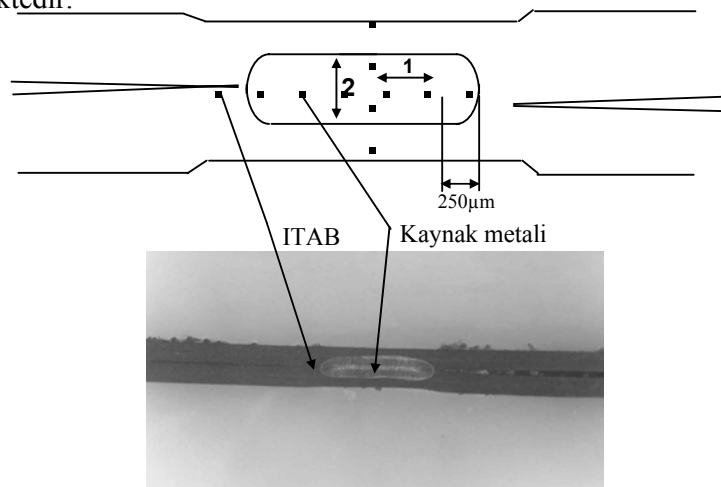
**Şekil 5.9** : Galvanizli Çelik Sac Çiftleri Kaynak Bölgeleri (x20)

Paslanmaz çelik ve galvanizli çelik sac çifti bağlantıların makro fotoğraflarının verildiği Şekil 5.8 incelendiğinde, kaynak çekirdeklerinin sacların tam temas yüzeyinde oluşmadığı ve asimetrik bir forma sahip olduğu tesbit edilmiştir. Bu durum, elektrik iletkenlikleri farklı sacların kaynağında ortaya çıkan ısı dengesizlikten kaynaklanmaktadır. Ostenitik paslanmaz çelik, galvanizli çeliğe göre daha yüksek bir elektriksel dirence sahip olduğundan ve direnç nokta kaynağında da, bu durumun ortaya çıkması sonucunda, temas yüzeyinin paslanmaz çelik sac tarafında ısı yoğunlaşması ve erime kısmen daha yüksek olmakta; kaynak çekirdeği temas bölgesindeki simetrikliğini kaybederek paslanmaz çelik sac tarafına kaymaktadır. Çekirdek çaplarının ölçümünden, paslanmaz çelik – galvanizli çelik çifti nokta kaynağında asimetrikliğin etkisinin sınırlı olduğu, çekme dayanımı değerlerinin, sac kalınlığına göre verilen referans değerleri sağladığı görülmüştür [55]. Akım şiddetinin artması, özellikle galvanizli çelik sac tarafında elektrodun dalma derinliğinin artmasına sebep olmaktadır.

Şekil 5.9'daki galvanizli çelik sac çiftlerinin makroskopik görüntülerine göre, kaynak çekirdeklerinin sacların temas bölgesinin tam ortasında şekillendiği görülmektedir.

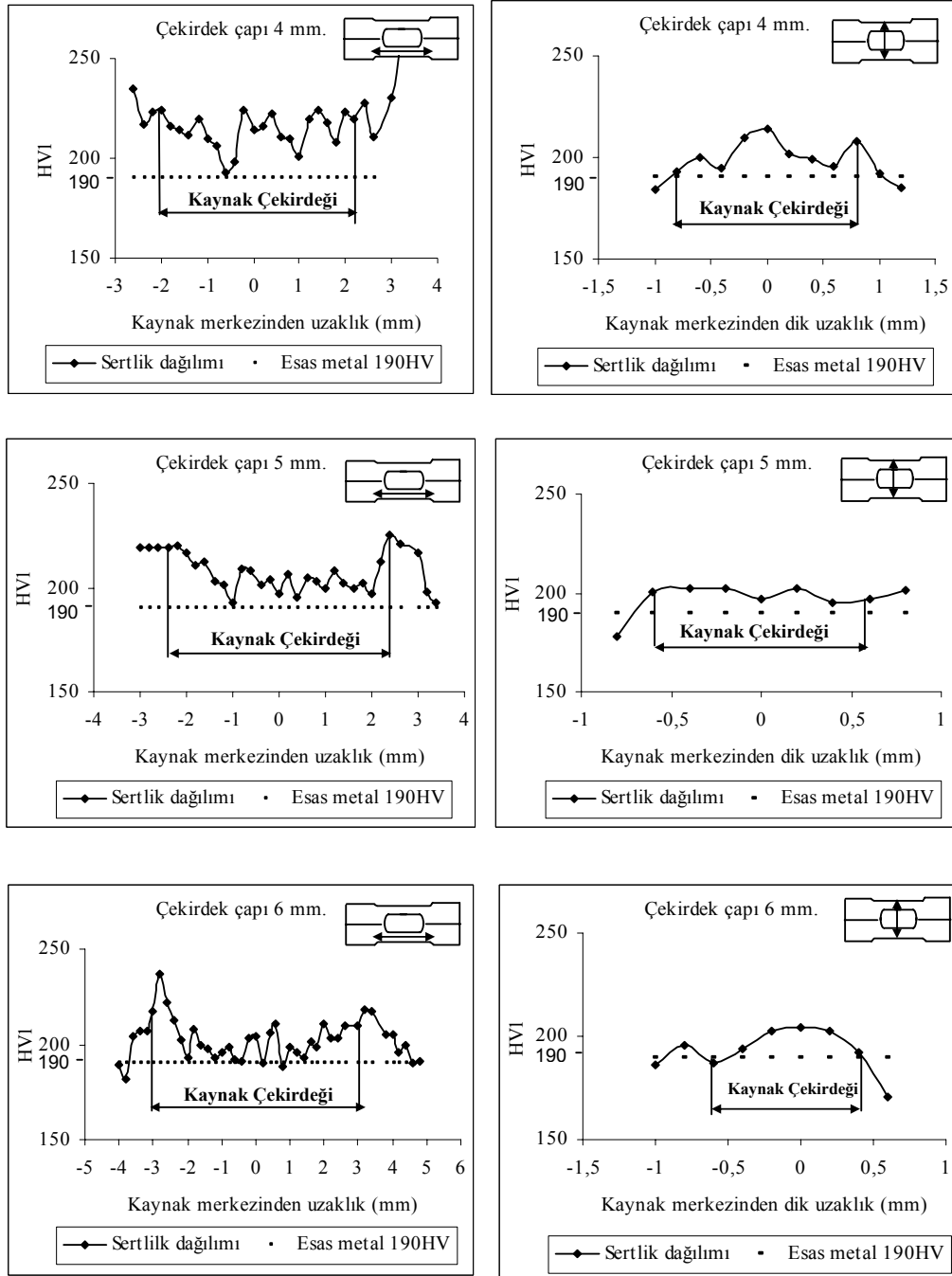
### 5.2.5 Mikrosertlik Deney Ölçüm Sonuçları

Her üç bağlantı çiftinin kaynak metallerinde, ITAB'larında ve esas metallerinde MicroVickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.10'da sertlik ölçümlerinin yapıldığı doğrultular, Şekil 5.11, 5.12 ve 5.13'de ise sertlik dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 5.10 : Sertlik Ölçümü Yapılan Doğrultular

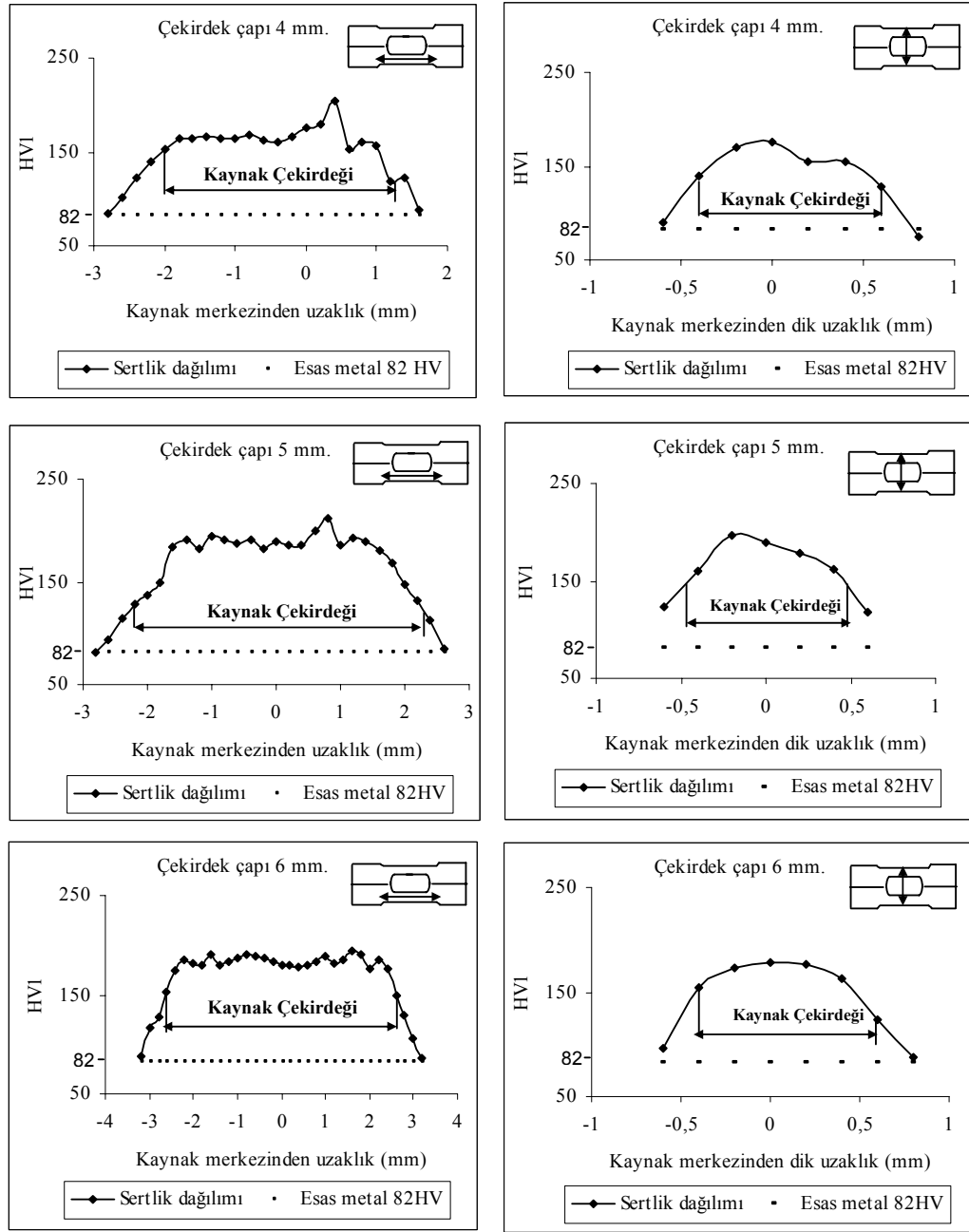




**Şekil 5.11 : Ostenitik Paslanmaz Çelik Sac Çiftlerine Ait Sertlik Dağılımları**

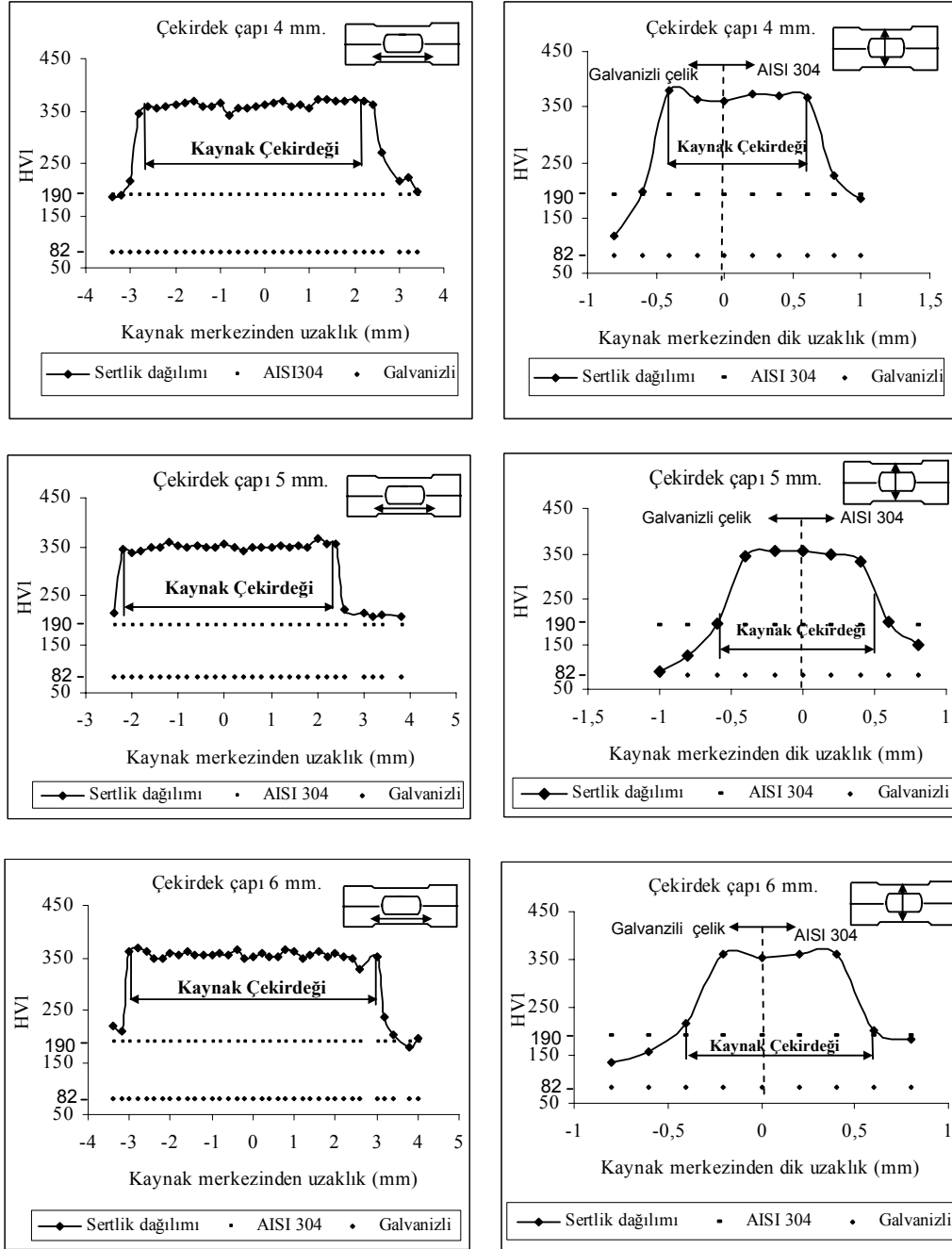
Şekil 5.11 incelendiğinde, ostenitik paslanmaz çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantıların kaynak bölgelerinde herhangi bir sertlik artışının olmadığı görülmektedir. Deneilerde kullanılan ostenitik paslanmaz çeliğin yapısının oda sıcaklığında tamamen ostenit olması nedeniyle soğuma sırasında herhangi bir ferrit – ostenit dönüşümü olmadığından, bu tip çelikler ısı ile sertleştirilememektedir. Bu nedenle, nokta kaynağında da hızlı bir ısınma ve soğuma çevrimi olmasına

rağmen, ostenitik paslanmaz çelik sac çifti bağlantılarda kaynak metali ile esas metal arasında sertlik farkı olmamıştır. Kaynak akımının dolayısıyla da çekirdek çapının artması da sertlik dağılımını değiştirmemektedir.



**Şekil 5.12 : Galvanizli Sac Çiftlerine Ait Sertlik Dağılımları**

Şekil 5.12'den de görüldüğü gibi, galvanizli çelik sac çiftleriyle yapılan bağlantıların kaynak bölgelerinde, sertlik değerlerinde esas metale göre hafif bir artış tesbit edilmiştir. Bu sertlik artışının kaynak çekirdeğindeki tane irileşmesinden ileri geldiği düşünülmektedir.

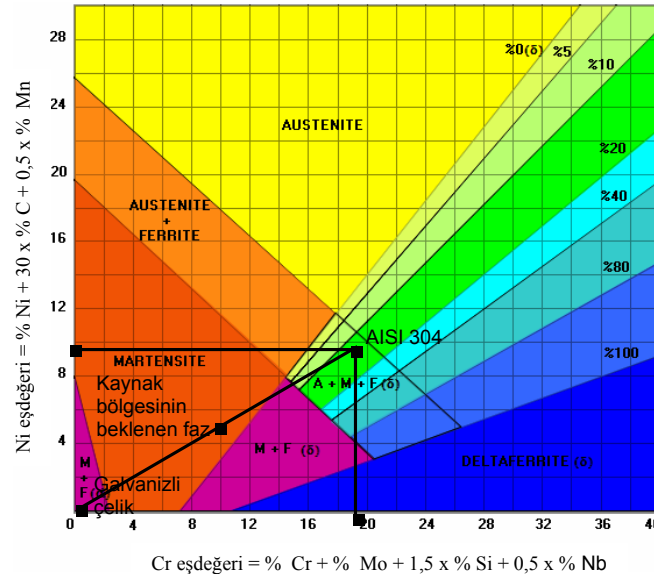


**Şekil 5.13 : Paslanmaz- Galvanizli Bağlantı Çiftlerine Ait Sertlik Dağılımları**

Şekil 5.13’den de görülebileceği gibi, kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değerleri ostenitik paslanmaz çelik sac – galvanizli çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda ölçülmüştür. Bu sac çiftinde de, kaynak bölgesi ile esas metal arasında büyük sertlik farklılıkları vardır. Kaynak çekirdeğinin orta bölgelerinde sertlik değerleri 350 Vickers civarındadır. Kaynak bölgesindeki sertliklerin, kritik değer olan 350 Vickers’in civarında olmasından dolayı, ostenitik paslanmaz çelik ve galvanizli çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantıların, kaynak sonrası sertleşme eğilimi açısından

önemli bir tehlike oluşturmadığını söylemek mümkündür [56]. Bu bağlantı tipinde de, çekirdek çapının artması sertlik dağılımı üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir.

Burada özellikle paslanmaz çelik sac ve galvanizli çelik sac bağlantılarındaki görülen önemli sertlik artışını açıklayabilmek için, Schaeffler diyagramından faydalanılabilir. Bu tip bir bağlantıda, kaynak bölgesinde %50 ostenitik paslanmaz çelikten %50 ise galvanizli çelikten gelen bir karışımın var olduğu kabul edilebilir. Kullanılan malzemelerin spektral analiz sonuçlarına göre (Tablo 4.1) esas metallerin krom ve nikel eşdeğerleri hesaplanıp, bulunan noktalar Schaeffler diyagramına taşındığında, oluşması beklenen kaynak bölgesi faz yapısının martenzitik olduğu görülmektedir (Şekil 5.14)



**Şekil 5.14 :** Kaynak Bölgesinin Beklenen Faz Yapısının Schaeffler Diyagramında Gösterilişi

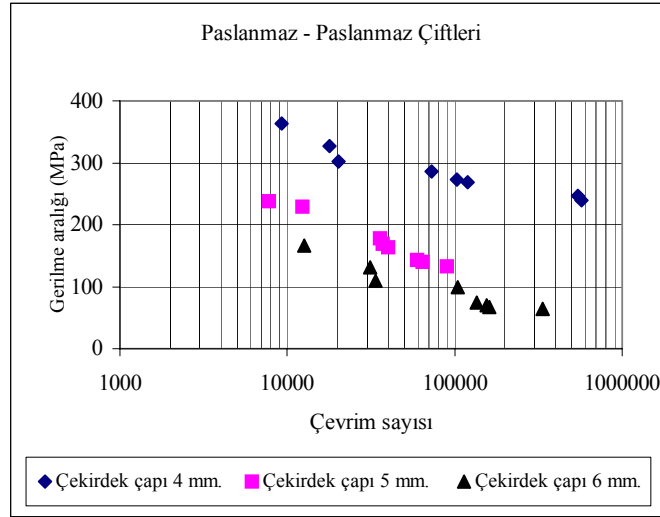
Kaynak işlemi sonrasında, galvanizli çelik – ostenitik paslanmaz çelik sac bağlantılarının kaynak bölgesinin faz yapısının martenzit olması, bu bölgede oluşan sertlik artışını da açıklamaktadır. İki farklı sacın kaynak edilmesinde, kaynak bölgesinde iki sacın %50 - %50 oranında erimesi ve katılaşmasıyla oluşan kaynak metalinde, bileşimi esas metallere farklı bir karışım meydana gelir, ve her iki çelikten gelen alaşımlanmayla yeni bir yapı oluşur. Nokta kaynağında kaynak sonrasında hızlı bir soğuma gerçekleştiğinden ve bu alaşımlanmanın da etkisiyle

sertlikte artış meydana gelmektedir. Kaynak metalinin %9 kromla alaşımlanması bu sertliği doğurduğu ve bu % 9 krom ilavesinin hızlı soğuma sırasında ostenit fazını martenzite dönüştürdüğü düşünülmektedir.

### 5.3 Bağlantıların Yorulma Davranışlarının İncelenmesi ve Parametrelerin Yorulma Ömrüne Etkisi

#### 5.3.1 Numunelerin S-N Eğrileri ve Çekirdek Çapının Yorulmaya Etkisi

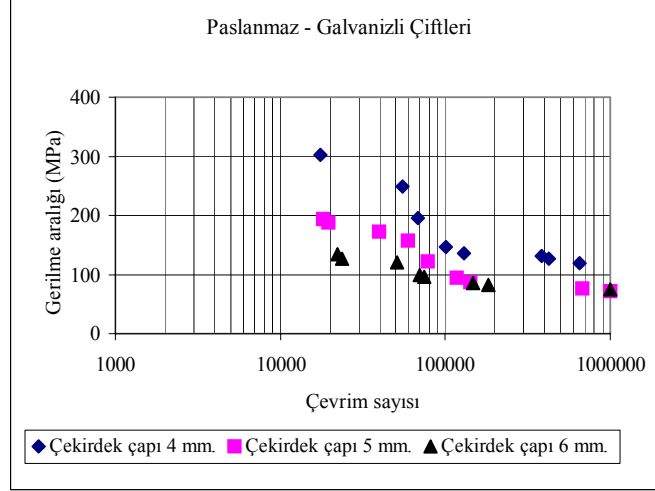
Üç farklı çekirdek çapına sahip ve toplam üç farklı sac kombinasyonundan oluşan deney serilerine giderek azalan genlikte dalgalı çekme bölgesinde yorulma zorlanması uygulanarak (Şekil 4.12), numunelerin hasara uğrayıncaya kadar geçen çevrim sayıları kaydedilmiştir. Bu veriler yardımıyla, her numune serisine ait, gerilme genliği – çevrim sayısı grafikleri elde edilmiştir. Bu eğriler, Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17’de her grafikte üç nokta çapına sahip numuneler olacak şekilde verilmektedir.



Şekil 5.15 : Paslanmaz Çelik Sac Çiftleri S-N Eğrileri

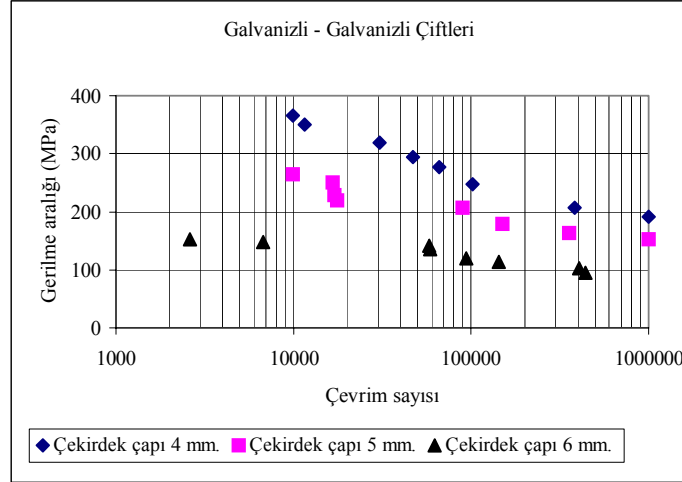
Şekil 5.15’de, paslanmaz çelik sac çiftlerine ait numunelerin (çekirdek çapına göre) S-N eğrileri verilmektedir. Bu bağlantı tipinde, 4 ve 6 mm.’lik kaynak çekirdek çapına sahip numunelerde sırasıyla 3 ve 2 kN.’luk kuvvet aralıklarında 100.000 çevrim üzerinde en yüksek yorulma ömürleri tesbit edilirken, 5 mm. kaynak çekirdek çapına sahip numunede en yüksek yorulma ömrü 2,6 kN.’luk kuvvet aralığında 100.000 çevrimin altında tesbit edilmiştir. Özellikle 5 ve 6 mm. çekirdek çaplı

numuneler, yüzeyi parlatılmış deney numunelerinde olduğu gibi bu tip bağlantı için belirgin bir yorulma sınırı gösterme eğilimindeyken, 4 mm. çekirdek çaplı numune bu sınırdan biraz uzaklaşmaktadır.



**Şekil 5.16 :** Paslanmaz – Galvanizli Çelik Sac Çiftleri S-N Eğrileri

Şekil 5.16'da paslanmaz – galvanizli ac çiftlerine ait bağlantıların S-N eğrileri görülmektedir. Bu grafikte, 3,8 kN.'luk kuvvet aralığına karşılık gelen en düşük yorulma ömürleri incelendiğinde, bunların birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Kuvvet aralığı değeri düşükçe, numunelerin yorulma ömürleri arasındaki fark da artmaktadır. 4 mm. kaynak çekirdeğine sahip numunelerde, 1,5 kN.'luk kuvvet aralığında en yüksek yorulma ömrü 100.000 çevrimin üzerinde tespit edilirken, 5 ve 6 mm.'lik çekirdek çaplı numunelerde hemen hemen benzer kuvvet aralığında 1.000.000 çevrim civarında bile hasar meydana gelmemiştir. Grafik incelendiğinde, paslanmaz-galvanizli saclardan oluşan bağlantıların belirli bir yorulma sınırı gösterme eğiliminde olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.17 :** Galvanizli Çelik Sac Çiftleri S-N Eğrileri

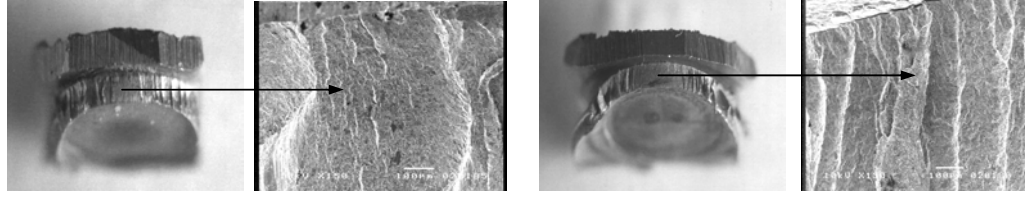
Şekil 5.17’de gösterilen galvanizli çelik saclara ait S-N eğrileri incelendiğinde, 4 mm. kaynak çekirdek çaplı numunede en yüksek yorulma ömrü 2,6 kN’luk kuvvet aralığında görülürken, 5 mm. çekirdek çaplı numunede bu değer 3,2 kN’a çıkmaktadır. Bu değer altındaki kuvvet aralıklarında hasar oluşmamıştır. 6 mm. çekirdek çaplı numunede ise, hasar oluşturan en düşük kuvvet aralığı 2,7 kN.’a kadar düşmüştür. Çekirdek çapından bağımsız olarak, bağlantı tipi göz önüne alındığında, bu tip bağlantıda da belirgin bir yorulma sınırı gösterme eğilimi vardır.

Genel olarak, çekirdek çapı ve dolayısıyla da kaynak akımı arttıkça, numunelerin yorulma ömürlerinde de bir artış meydana gelmektedir. Ancak, çekirdek çapındaki bu artış, kaynak bölgesinde çentik etkisinin de artmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, yüksek değerdeki çekirdek çaplarında S-N eğrilerinde daha bariz bir düşüş meydana gelmektedir. Bu durum en belirgin olarak paslanmaz çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda görülmektedir. En yüksek yorulma sınırı gösteren bağlantı galvanizli saclardan oluşan bağlantıdır. En düşük yorulma sınırı ise, galvanizli çelik sac – ostenitik paslanmaz çelik saclardan oluşan bağlantıda görülmüştür.

#### **5.4 Yüksek Gerilmelerde Koparak Hasara Uğrayan Numunelerin Son Kopma Yüzeylerinin SEM (Tarayıcı Elektron Mikroskobu) Görüntüleri**

Uzun ömürlü yorulma deneyleri sonunda, tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla kaynaklı parçaların kopma bölgelerinin fotoğrafları çekilmiştir. Şekil

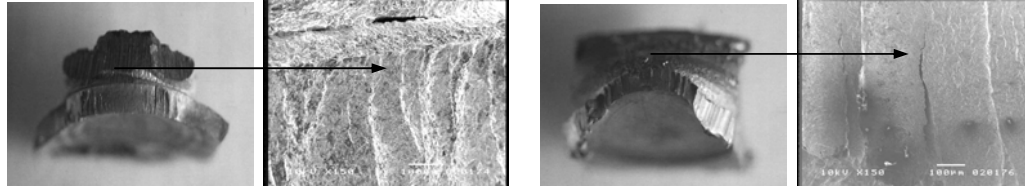
5.18, 5.19 ve 5.20’de bu SEM fotoğrafları ve fotoğrafların çekildiği bölgeleri gösteren kopma yüzeylerinin mokra fotoğrafları görülmektedir.



a) Çekirdek çapı 5 mm.

b) Çekirdek çapı 6 mm.

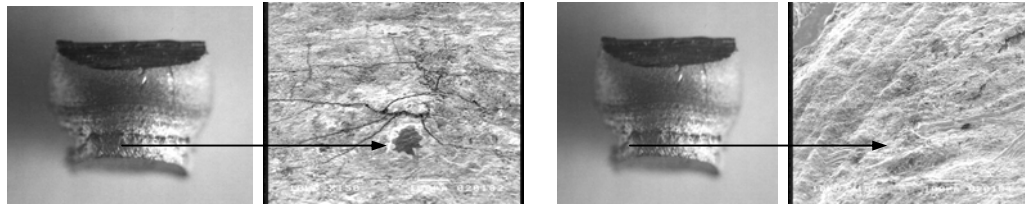
**Şekil 5.18 :** Yüksek Gerilmelerde Koparak Hasara Uğrayan Paslanmaz Çelik Sac Çiftlerinden Oluşan Bağlantıların Yorulma Sonrası Son Kopma Bölgelerinin SEM Fotoğrafları ve Makro Görüntüleri



a) Çekirdek çapı 5 mm.

b) Çekirdek çapı 6 mm.

**Şekil 5.19 :** Yüksek Gerilmelerde Koparak Hasara Uğrayan Paslanmaz Çelik Sac – Galvanizli Çelik Sac Çiftlerinden Oluşan Bağlantıların Yorulma Sonrası Son Kopma Bölgelerinin SEM Fotoğrafları ve Makro Görüntüleri



a) Çekirdek çapı 5 mm. (Orta bölge)

b) Çekirdek çapı 5 mm. (sol bölge)

**Şekil 5.20 :** Yüksek Gerilmelerde Koparak Hasara Uğrayan Galvanizli Çelik Sac Çiftlerinden Oluşan Bağlantıların Yorulma Sonrası Son Kopma Bölgelerinin SEM Fotoğrafları ve Makro Görüntüleri

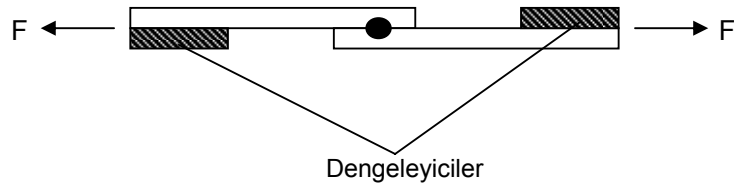
Bölüm 4’de de daha önce belirtildiği gibi, yüksek gerilmelerdeki zorlamalarda bazı kaynaklı deney parçaları %25’lik rijitlik düşüşü göstermeden düşük çevrim sayılarında kaynak çekirdeğinin en dış bölgesinden koparak hasara uğramıştır. Şekil 5.20’de gösterilen bölgeler, bu şekilde kaynak çekirdeği dış bölgesinden koparak



hasara uğrayan numunelerdeki son kopma bölgeleridir. Rijitlikteki azalmanın %25'den daha büyük değerlere ulaşarak hasara uğrayan deney numunelerinde, kaynaklı saclar birbirinden ayrıldığında yorulma çatlaklarının ilerlediği ara yüzeyde ayırma karakteristiğinden dolayı bozulma meydana geldiği ve bu bölgelerde çatlak ilerlemesini belirleyecek izlerin kaybolduğu görülmüştür. Şekil 5.20'de gösterilen SEM fotoğrafları ise son kopma bölgeleri olup, yüzeylerin incelenmesinden, plastik deformasyon olmadığı ve tipik taneler arası gevrek kırılma olduğu görülmüştür.

### 5.5 Kaynaklı Numunelerin Gerilme Şiddet Faktörünün ( $\Delta K$ ) Belirlenmesi

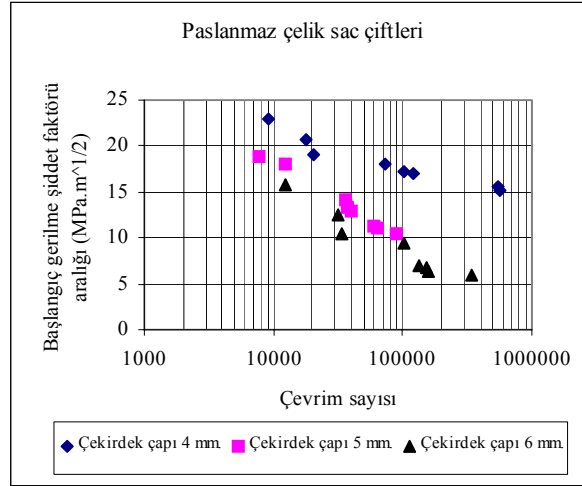
Bu çalışmada kullanılan kaynaklı numunelere yorulma deneylerinin yapılması esnasında, eksen kaçıklığını ve döndürme momentini ortadan kaldırmak için tutucu çeneler ve sac arasına Şekil 5.21'de görüldüğü gibi saclarla aynı kalınlığa sahip dengeleyiciler yerleştirilmiştir.



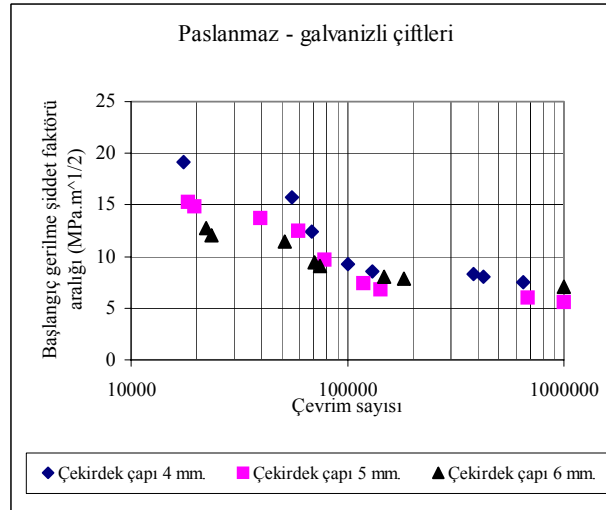
**Şekil 5.21 :** Dengeleyici Yerleştirilmiş Nokta Kaynaklı Deney Numunelerinin Şematik Gösterimi

Şekil 5.21'de görülen bir yükleme tipinde, kaynak çekirdeği sadece kaymaya zorlanmaktadır. Bu durum Şekil 3.10'daki temel yükleme tipleriyle karşılaştırıldığında, bu tip bir yüklemde sadece Mod II yani "sliding mode" yükleme tipinin etkin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan nokta kaynaklı numunelerin gerilme şiddet faktörü aralıkları hesap edilirken, (3.6.) eşitliğinde verilen  $K_{II}$  ifadesi kullanılmıştır. Hesaplanan değerler yardımıyla, numunelere ait gerilme şiddet faktörü aralığı - yorulma ömrü ( $\Delta K - N$ ) grafikleri elde edilmiştir.

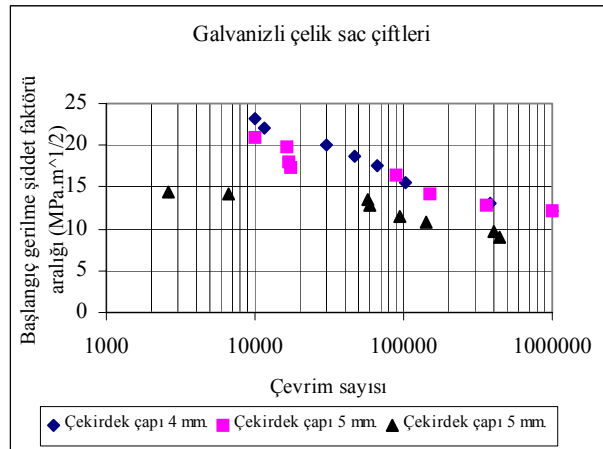
Şekil 5.22, 5.23 ve 5.24'de sırasıyla paslanmaz çelik saclar, paslanmaz - galvanizli çelik saclar ve galvanizli çelik saclardan oluşan nokta kaynaklı bağlantılara ait  $\Delta K - N$  eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.22: Paslanmaz Çelik Saclardan Oluşan Bağlantıların ΔK - N Eğrileri



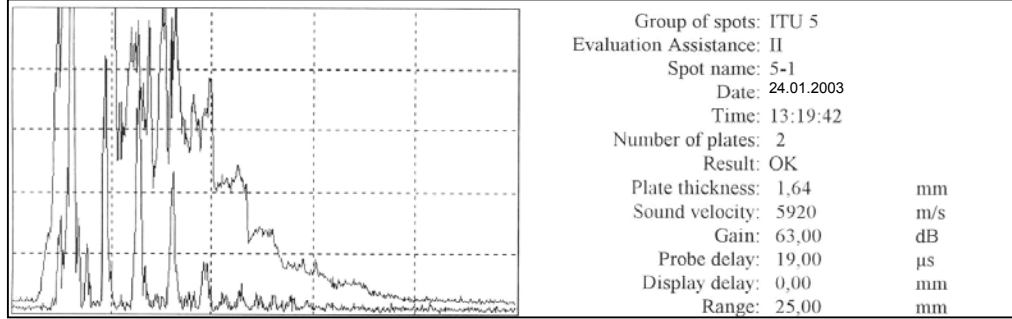
Şekil 5.23: Paslanmaz - Galvanizli Saclardan Oluşan Bağlantıların ΔK - N Eğrileri



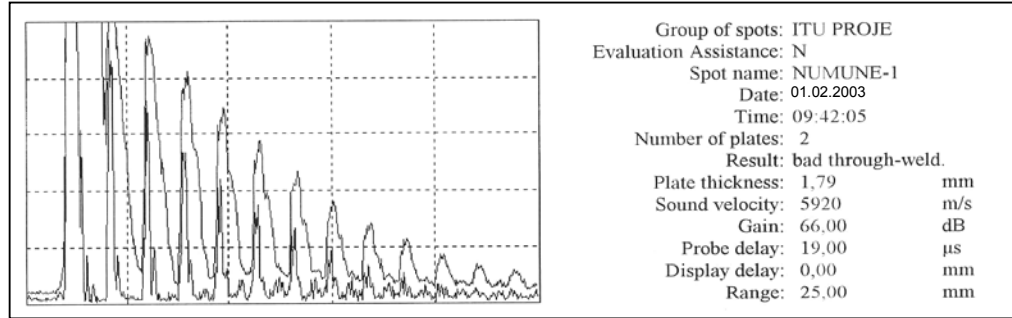
Şekil 5.24: Galvanizli Çelik Saclardan Oluşan Bağlantıların ΔK - N Eğrileri

## 5.6 Ultrasonik İnceleme Sonuçları

Şekil 5.25, 5.26, 5.27 ve 5.28'de dört farklı çevrim sayısında yorulmaya maruz bırakılan özdeş kaynaklı numunelerin yorulma öncesi ve yorulma sonrası ultrasonik inceleme sonuçları görülmektedir. Ultrasonik incelemelerde, galvanizli çelik - paslanmaz çelik saclardan oluşan ve 5 mm. Çekirdek çapına sahip nokta kaynaklı numuneler kullanılmıştır.



a) Yorulma Öncesi Hasarsız Durum

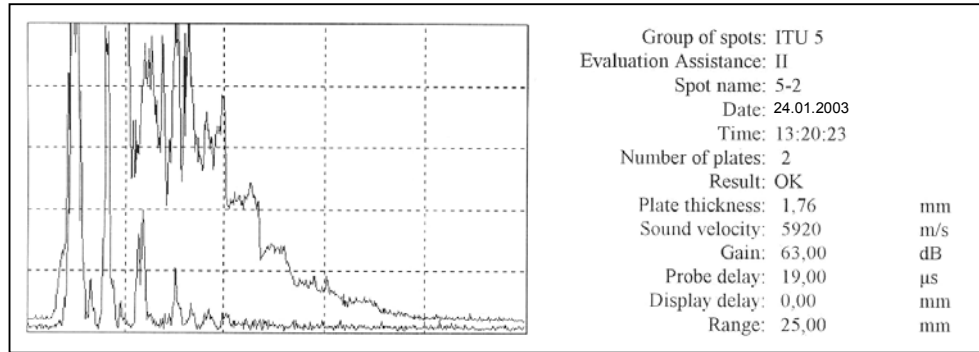


b) Yorulma Sonrası Durum

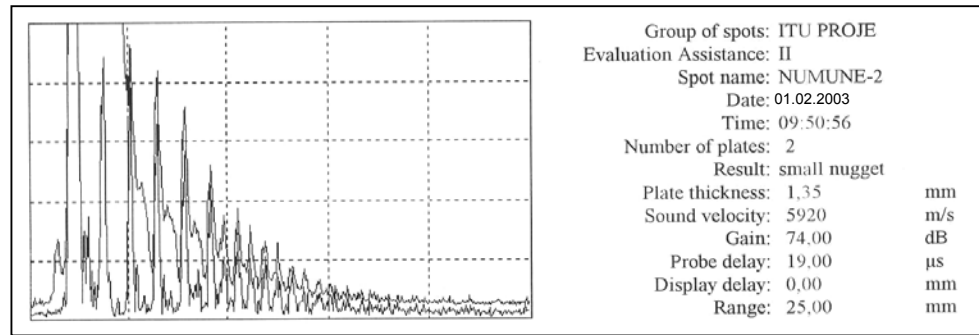
**Şekil 5.25** : 30000 Çevrimlik Numunenin Ultrasonik İnceleme Sonuçları

Şekil 5.25 incelendiğinde, 30000 çevrim yorulmaya maruz bırakılan numunede kaynak bölgesindeki toplam kalınlık 1,89 mm.'den 1,79 mm.'ye düşmektedir. Bu da kaynak sırasında sacların birleşme bölgesinde yaklaşık 0,1 mm.'lik çökme olduğunu göstermektedir. Kaynak çekirdeğinin etrafındaki soğuk birleşme bölgesinin yorulma sonrasında ayrılması ve yük taşınamaması söz konusudur. Ayrıca kristal yapıda bir tane irileşmesi olduğu tahmin edilmektedir. Alınan hata sinyallerinden yola çıkarak ve test cihazının özel programının verdiği sonuca dayanarak (bad - through weld), 30000 çevrimlik yorulma sonucunda çekirdek çapında bir azalma meydana

gelmediği ve herhangi bir çatlak oluşmadığı söylenebilir. Sadece çekirdek etrafındaki soğuk birleşme bölgesi ayrılmıştır.



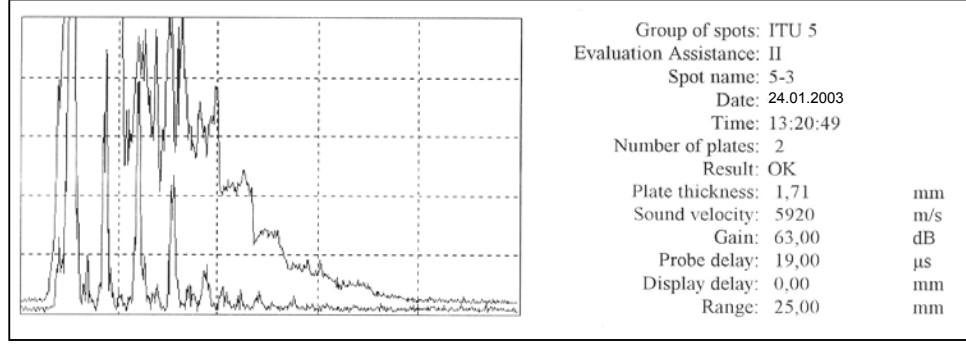
a) Yorulma Öncesi Hasarsız Durum



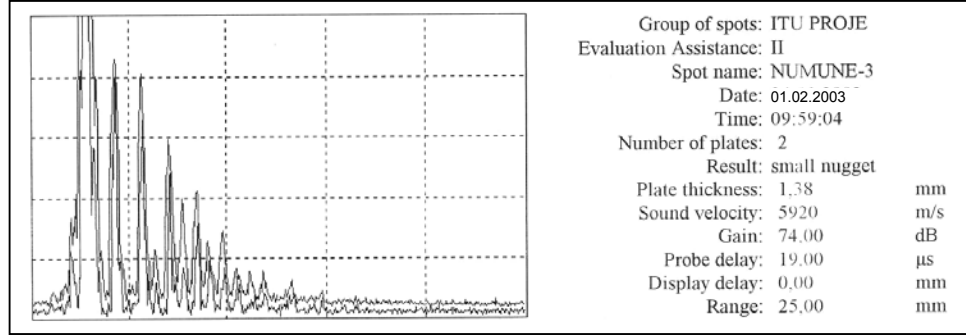
b) Yorulma Sonrası Durum

Şekil 5.26 : 60000 Çevrimlik Numunenin Ultrasonik İnceleme Sonuçları

Şekil 5.26'da 60000 çevrimlik yorulma numunesinin ultrasonik test sonuçları görülmektedir. Bu numunede çekirdek çapı, yorulma öncesinde ölçülen değerden yaklaşık %30 daha küçük çıkmıştır. Toplam kalınlık kaynak bölgesinde 1,35 mm.'ye düşmektedir. Yorulma testi sonrasında, hem çekirdeğin hemen yanında bulunan soğuk birleşme bölgesi kırılmış hem de hem de çekirdek içerisinde ilerleyen bir çatlak oluşumu meydana gelmiştir. Çekirdek çapındaki düşüş de bu sonucu doğrular niteliktedir.



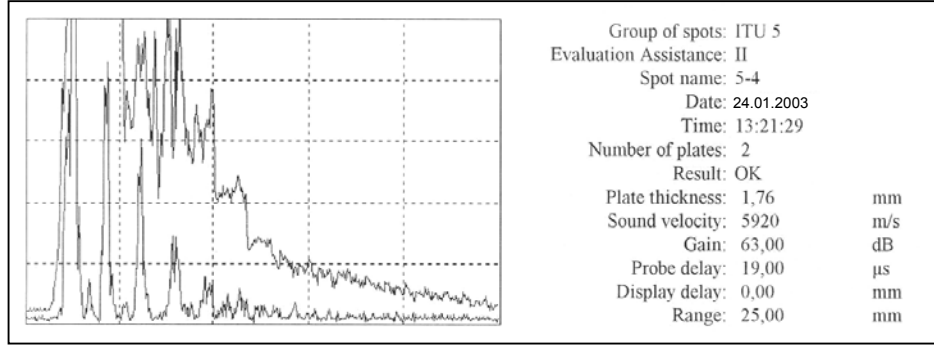
a) Yorulma Öncesi Hasarsız Durum



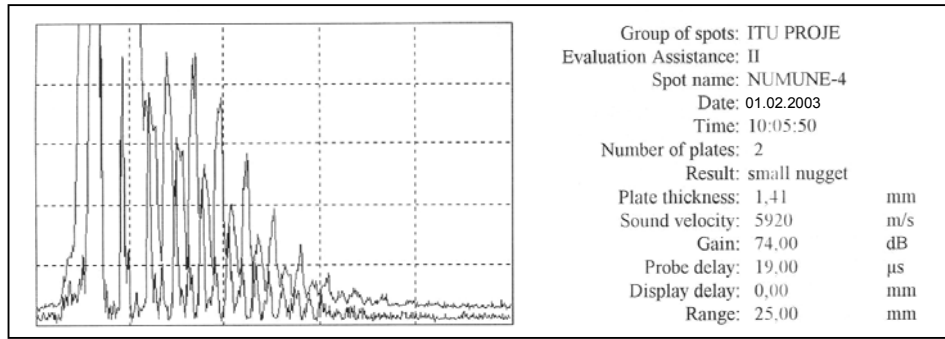
b) Yorulma Sonrası Durum

Şekil 5.27 : 90000 Çevrimlik Numunenin Ultrasonik İnceleme Sonuçları

Şekil 5.27 incelendiğinde, 90000 çevrim sonrasında numunenin çekirdek çapının yaklaşık 1 ila 1,5 mm. arasına düştüğü görülmektedir (small nugget). Yapışık punta - soğuk kaynak belirtileri vardır. Yorulma testi sonrasında çekirdekte büyük miktarda ayrılma meydana gelmiştir. Yorulma testinde, %20 civarında daha fazla çevrim sayısı uygulansaydı, numunenin kaynak yerinden ayrılacağı söylenebilir. Ayrıca, kaynak sonrası hızlı soğuma sonucu tane yapısındaki değişim de gözlenebilmektedir.



a) Yorulma Öncesi Hasarsız Durum



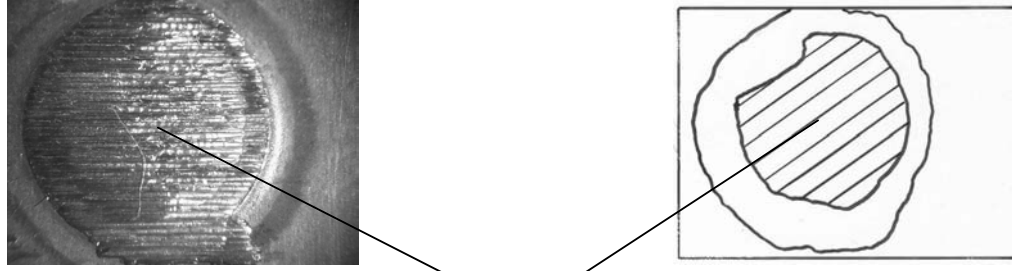
b) Yorulma Sonrası Durum

**Şekil 5.28 :** 104000 Çevrimlik Numunenin Ultrasonik İnceleme Sonuçları

Şekil 5.28’de ise, 104000 çevrim sonrası ultrasonik test sonuçları verilmektedir. Bu numunede kaynak çekirdek çapı yaklaşık olarak 1 mm.’ye düşmüştür. Giden ve yansıyan sinyaller arasında oluşan hata sinyalleri, test başlangıcında verilen toleransın üzerinde büyük gözükürse, çekirdek çapı verilen toleransın altına düşmüş demektir. Çekirdek çapındaki azalma miktarı bu kurala göre tesbit edilmekte ve yorumlanmaktadır. Yorulma testi sonrasında kaynak bölgesinde soğuk alanın kırılması ve kaynak çekirdeği boyunca belli bir bölgede ayrılma meydana geldiği söylenebilir.

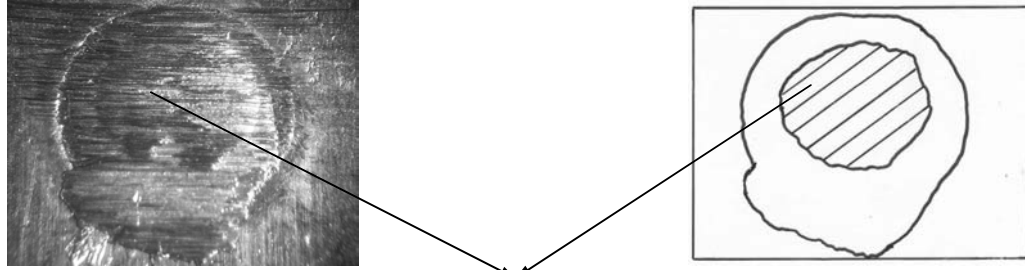
### 5.7 Yorulma Sonrası Makroskobik İnceleme Sonuçları

Yorulmaya maruz bırakılan kaynaklı deney numunelerinde yorulma sonrası çekirdek çapındaki değişimin hassas olarak ölçülmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.29’da bu makro fotoğraflar ve kaynak bölgelerinin şematik gösterimi verilmektedir.



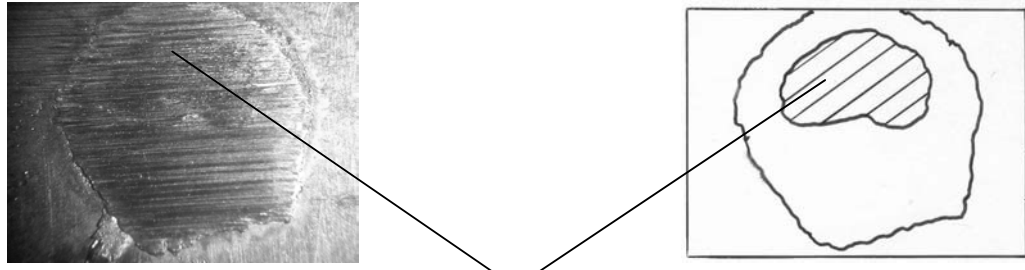
Son bağlantı bölgesi

a) 30000 Çevrimlik Numune



Son bağlantı bölgesi

b) 60000 Çevrimlik Numune



Son bağlantı bölgesi

c) 90000 Çevrimlik Numune



Son bağlantı bölgesi

d) 104000 Çevrimlik Numune

Şekil 5.29 : Yorulma Sonrası Saclar Arasında Kalan Kaynak Bölgeleri (x10)

Şekil 5.29’da görülen son bağlantı bölgelerini elde etmek için, yukarıda anlatılan dört adet deney numunesi ısıtma renklendirme yapmak amacıyla 200<sup>0</sup>C sıcaklıktaki fırında 30 dakika bekletilmiş, oda sıcaklığına kadar soğutulup havada bırakıldıktan sonra -30 °C’ye kadar soğutulup kaynak bölgelerinin tam ortasından keski ile vurularak birbirinden ayrılmıştır. Birleşme bölgesindeki çapaklar planya ile hassas bir şekilde alındıktan sonra paslanmaz çelik sac üzerindeki parçanın üzerinde kalan kaynak bölgesinin fotoğrafları çekilmiştir.

## 5.8 Yorulma Sonrası Kalan Çekirdek Çapının ve Malzeme Sabitlerinin Belirlenmesi

### 5.8.1 Kalan Çekirdek Çapının Ölçümü

Bu aşamada, Şekil 5.29’da gösterilen “son bağlantı bölgeleri” nin alanlarının hassas olarak ölçülmesi ve buradan da yorulma sonrası yük taşıyan son çekirdek çapının tesbit edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için Scan Pro-5 bilgisayar programı kullanılmıştır. Şekil 5.29’da gösterilen bölgelerin alanları piksel olarak belirlendikten sonra, program içerisinde var olan ölçeklendirme sistemi yardımıyla gerçek alanlar mm<sup>2</sup> olarak kaydedilmiştir. Ayrıca, milimetrik kağıt ölçümleri de yapılarak, sonuçların doğruluğu kıyaslanmıştır. Bu alanı veren çap değerinin, kalan çekirdek çapını verdiği kabul edilmiştir. Böylece optimum bir değer, yorulma sonrası yük taşıyan çekirdek çapı olarak belirlenmiştir. Bu değerler Tablo 5.2’de verilmektedir.

**Tablo 5.2:** Çevrim Sayısına Göre Kalan Kaynak Çekirdek Çapları

Çevrim sayısı	Çekirdek çapı (mm)
30.000	3,475
60.000	3,15
90.000	2,41
104.000	1,49

### 5.8.2 Çatlak Boyunun Tespiti

Nokta kaynaklı bağlantılar, kaynağın geometrisinden dolayı birer yüzey çatlakları olarak davranırlar. Dolayısıyla Şekil 5.30’dan da görüldüğü gibi, çatlak boyu olarak ilk çap ve son çapın arasındaki farkın yarısı alınmıştır.

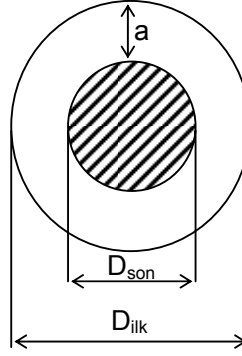


Burada;

Çatlak boyu  $(a) = (D_{ilk} - D_{son}) / 2$  (Şekil 5.29)

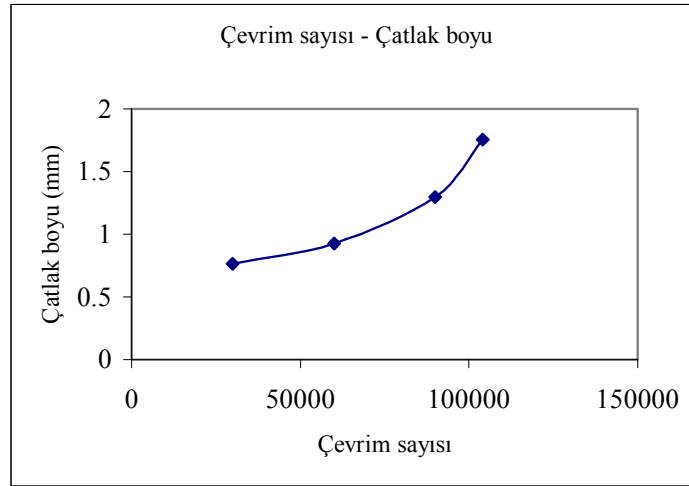
$D_{ilk} = 5$  mm.

olarak alınmıştır.



Şekil 5.30 : Çatlak Boyunun Belirlenmesi

Şekil 5.31’de, çatlak boyunun çevrim sayısına göre değişimi  $(a - N)$  görülmektedir.



Şekil 5.31 : Çatlak Boyunun Çevrim Sayısına Göre Değişimi

Şekil 5.31’den de görüldüğü gibi, çevrim sayısı arttıkça nokta çapı düşmekte ve dolayısıyla çatlak boyu artmaktadır. Ancak bu artış lineer bir artış olmayıp eğrinin eğimi giderek artmaktadır. Burdan, çevrim sayısı arttıkça kaynaklı bağlantıda ki çatlak ilerleme hızının da arttığı sonucuna varılabilir.

### 5.8.3 Bağlantıya Ait “C” ve “m” Malzeme Sabitlerinin Bulunması

Yukarıda verilen yorulma sonrası son nokta çapları ve çatlak boyları yardımıyla, ve Şekil 5.31 kullanılarak, galvanizli – paslanmaz nokta kaynaklı bağlantının malzeme sabitleri olan ve bu bağlantıda çatlak ilerleme karakteristiğini belirleyen C ve m değerleri belirlenmiştir.

$$\text{Paris - Erdoğan bağıntısı: } \frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (5.1)$$

$$\text{Çatlak ilerleme hızı: } \left( \frac{da}{dN} \right)_i = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5.2)$$

a = Çatlak boyu  $(D_{ilk} - D_{son})/2$  (mm)

$D_{ilk} = 5$  mm.

$D_{son} =$  Yorulma sonrası ölçülen çekirdek çapı (mm)

Mod II (Sliding Mode) yükleme tipine göre, nokta kaynaklı bağlantıların gerilme şiddet faktörü [35],

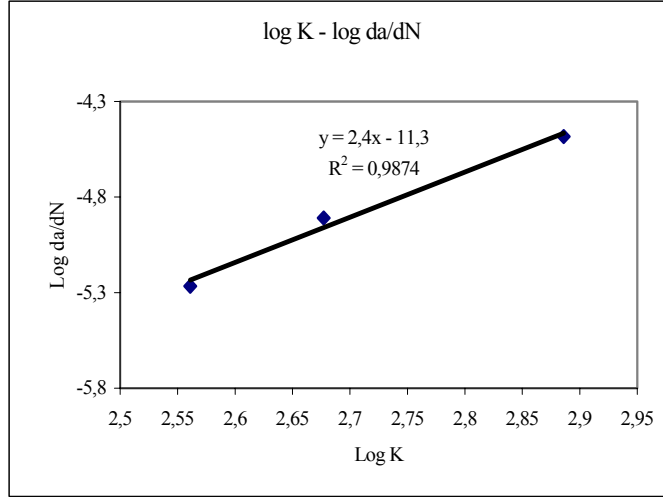
$$\Delta K = \frac{2 \cdot \Delta F}{\pi \cdot D_{son} \cdot \sqrt{t}} \quad (\text{N} / \text{mm}^{3/2}) \quad (5.3)$$

Burada,

$\Delta F = F_{max} - F_{min} = 1800$  N.

t = 1 mm. (Sac kalınlığı)

Yukarıdaki formüllere göre,  $\frac{da}{dN}$  ve  $\Delta K$  değerleri hesap edilerek, bunların logaritmaları alınmıştır. Bu logaritmik değerler yardımıyla, (5.9) denkleminde verilen C ve m sabitlerini tesbit etmek için Şekil 5.32’de görülen  $\text{Log} \Delta K - \text{Log} \frac{da}{dN}$  grafiği çizilmiştir [57].



**Şekil 5.32** : Kaynaklı Bağlantının Log  $\Delta K_{II}$  – log da/dN Grafiği

Bu grafiğin gösterdiği noktalardan geçen en uygun lineer doğrunun denklemi,

$$y = 2,4x - 11,3 \quad (5.4)$$

Bu denklemde,

$$y = \log \frac{da}{dN} \text{ ve } x = \log \Delta K \text{ dir.} \quad (5.5)$$

Dolayısıyla,

$$\log \frac{da}{dN} = -11,3 + 2,4 \cdot \log \Delta K \text{ elde edilir.} \quad (5.6)$$

Çatlak ilerlemesini veren (5.1) nolu Paris-Erdoğan bağıntısının her iki tarafının logaritmasını alırsak [57],

$$\log \frac{da}{dN} = \log C + m \cdot \log \Delta K \text{ elde edilir.} \quad (5.7)$$

(5.6) ve (5.7) ifadeleri karşılaştırıldığında,

$$m = 2,4 \text{ ve,}$$

$$\log C = -11,3 \text{ den, } C = 10^{-11,3} \text{ bulunur.}$$

Bu değerler, galvanizli ve ostenitik paslanmaz elik saclardan oluşan nokta kaynaklı bağlantılara ait malzeme sabitleridir.

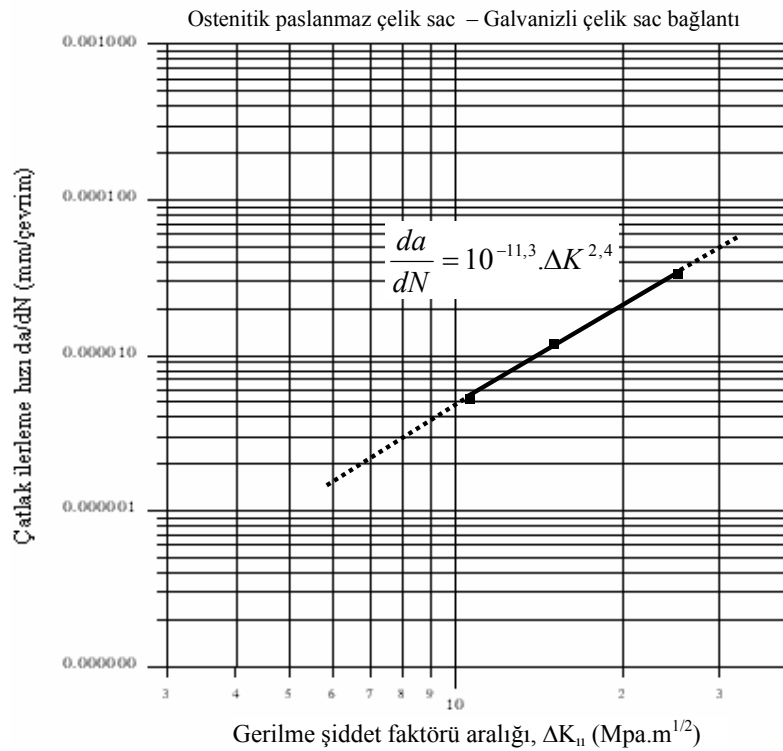
Bu durumda, bu tip nokta kaynaklı bağlantıların çatlak ilerleme hızını veren ifade aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\frac{da}{dN} = 10^{-11,3} \cdot \Delta K^{2,4} \quad (5.8)$$

Bu ifadede,  $\Delta K$  : N / mm<sup>3/2</sup> ;  $\frac{da}{dN}$  : mm / çevrim'dir.

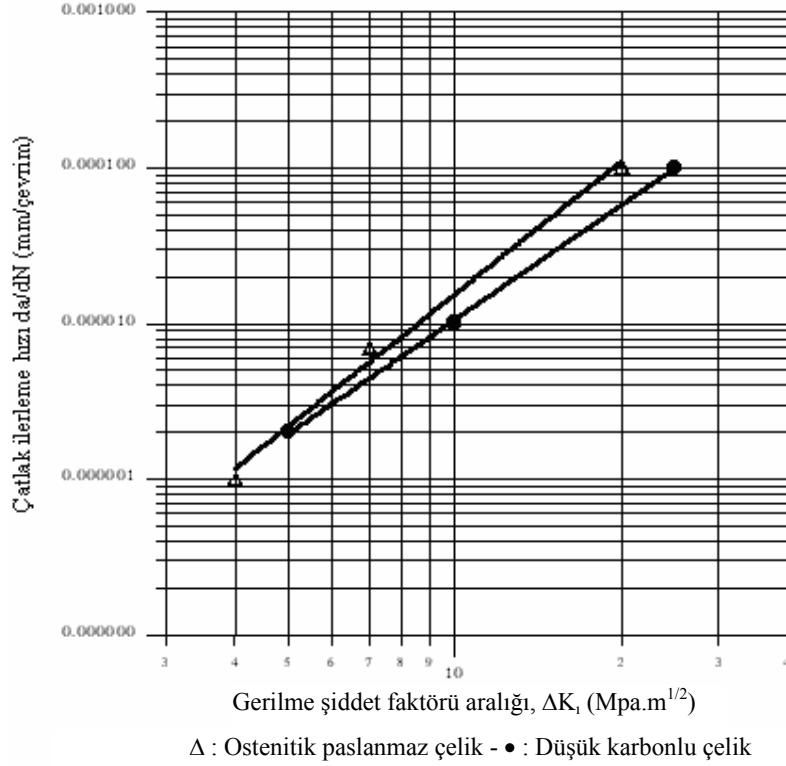
### 5.8.4 Bağlantının atlak İlerleme Hızı Grafiği

şekil 5.33'de yukarıda elde edilen değerlere göre, kaynaklı bağlantıya ait gerilme şiddet faktörü aralığı (MPa.m<sup>1/2</sup>) ve çatlak ilerleme hızı (mm/çevrim) grafiği verilmektedir.



**şekil 5.33** : Ostenitik Paslanmaz elik - Galvanizli elik Sac Bağlantılar İçin Yorulma atlağı İlerleme Hızı Grafiği

Şekil 5.34’de ise, literatürde Mod I için alaşımsız çelik ve ostenitik paslanmaz çeliğe ait yorulma çatlak ilerleme eğrileri verilmektedir [58].



**Şekil 5.34 :** Mod I için Esas Metallere Ait Yorulma Çatlak İlerleme Hızları Grafiği

Yorulma deneyleri sırasında, kaynak bağlantısında oluşacak eğilme momentini ortadan kaldırmak amacıyla numunelerin her iki tarafına da aynı kalınlıkta dengeleyiciler yerleştirildiği daha önceki deneysel çalışmalar bölümünde detaylı olarak verilmiştir. Bu dengeleyicilerin kullanımı nedeniyle, yorulma deneylerinde Mod II (Sliding Mode) yükleme tipi etkindir. Dolayısıyla, kaynaklı bağlantının çatlak ilerleme eğrisi Mod II yükleme tipine göre belirlenmiştir. Mod I yükleme tipine göre belirlenen esas metallere ait çatlak ilerleme eğrileri ile Mod II yükleme tipine göre belirlenen nokta kaynaklı paslanmaz çelik sac - galvanizli çelik sac bağlantısına ait çatlak ilerleme eğrisi birbirleriyle karşılaştırıldığında, nokta kaynaklı sac bağlantının çatlak ilerleme eğrisinin düşük karbonlu çeliğin çatlak ilerleme eğrisine daha yakın olduğu ve çatlağın kaynaklı bağlantıda daha yavaş ilerlediği görülmektedir. Ayrıca, bu sonuçlar, mod I yükleme tipinin mod II yükleme tipine göre daha kritik bir yükleme tipi olduğunu da bir kez daha vurgulamaktadır.

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 6.1 Sonuçların İrdelenmesi ve Öneriler

Bu doktora tez çalışmasında, galvanizli çelik sac ve ostenitik paslanmaz çelik saclar elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Ön deneylerde, çekirdek çapı ve sac kombinasyonunun bağlantının çekme - makaslama dayanımına, sertlik dağılımına, makro ve mikro yapısına etkileri araştırılmıştır. Bu deneylerden sonra, üç farklı çekirdek çapı ve üç farklı sac kombinasyonundan oluşan 9 adet nokta kaynaklı numune serisi hazırlanmış ve her bir seriden 8 adet özdeş deney numunesi elde edilmiştir. Bu numunelere uzun ömürlü yorulma deneyleri yapılmış ve S-N eğrisi sistematiğine uygun olarak her bir nokta kaynaklı bağlantının S-N eğrileri elde edilmiştir. Yüksek gerilmelerde yorulma zorlanmasına maruz bırakılan ve koparak hasara uğrayan numunelerinin son kopma bölgelerinin Tarayıcı Elektron Mikroskobunda fotoğrafları çekilmiştir. Bir dizi deney numunesine ise, yorulma öncesi ve yorulma sonrası ultrasonik incelemeler yapılarak, sonuçlar irdelenmiştir. Ultrasonik muayenelerde kullanılan deney numuneleri, yorulma sonrası mekanik yöntemle birleşme bölgelerinden ayrılarak, çekirdek çapındaki değişim ve dolayısıyla da yorulma sonucu oluşan çatlakın boyu ölçülmüştür. Bunlardan yola çıkarak, o bağlantıya ait çatlak ilerleme hızını veren bağıntı elde edilmiş ve grafiksel olarak gösterilmiştir. Sonuçlar, literatür verileri ve malzeme özellikleriyle karşılaştırılmış, bu sonuçların uygulanabilirliği tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Paslanmaz çelik sac ve galvanizli çelik sac bağlantı çiftlerinde, kaynak çekirdeği sacların ortasında simetrik oluşurken, paslanmaz çelik - galvanizli çelik sac kombinasyonunda ısıl dengesizlikten dolayı kaynak çekirdeği elektriksel direnci yüksek olan paslanmaz çelik sac tarafına kayarak simetrikliğini kaybetmiştir. Bu asimetriklikten kaynaklanan çekirdek çapındaki değişim 4 mm çekirdek çaplı numunede %8, 5 mm çekirdek çaplı numunede %5 ve 6 mm çekirdek çaplı

numunede %3 olarak ölçülmüştür. Bu değerlerin, sac kalınlığına göre verilen referans değerleri sağladığı ve toleranslar arasında olduğu görülmüştür

2. Kaynak bölgesinde en yüksek sertlik artışı paslanmaz çelik - galvanizli çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda oluşmaktadır. Kaynak bölgesindeki sertlikler, yönergelerde verilen kritik değer olan 350 Vickers'in civarında olduğundan, ostenitik paslanmaz çelik ve galvanizli çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantılar, kaynak sonrası sertleşme eğilimi açısından önemli bir tehlike oluşturmamaktadır. Kaynak sonrasında kaynak bölgesinin faz yapısının, mikroyapı görüntüleri ve Schaeffler Diyagramı üzerinde martenzit olarak belirlenmesi, bu bağlantı tipinde görülen sertlik artışını açıklamaktadır. Ostenitik paslanmaz çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda ise kaynak bölgesinde bir sertlik artışı meydana gelmemiştir.
3. Uzun ömürlü yorulma deneyleri sonucunda elde edilen kaynaklı numunelere ait S-N eğrileri incelendiğinde, her üç sac kombinasyonunda da bir yorulma sınırı gösterme eğilimi vardır. Genel olarak kaynak akımının artışına bağlı olarak çekirdek çapı arttıkça, kaynaklı parçaların yorulma ömürleri de artmaktadır. Yüksek değerdeki çekirdek çaplarında S-N eğrisinde düşüş hızı daha belirgin olmaktadır. Bu durum en açık şekilde paslanmaz çelik sac çiftlerinde görülmektedir. Yorulma sınırı açısından, en yüksek yorulma sınırı gösteren bağlantı galvanizli çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantıdır.

Nokta kaynaklı bağlantılarda, kaynak çekirdeği ve çekirdek etrafındaki sacların birleşme bölgeleri doğal bir çentik etkisi yapmaktadır. Dinamik zorlama esnasında bu bölgelerde oluşan gerilme yığılması nedeniyle, erken safhalarda çatlak başlamakta ve zorlama durumuna göre iki sac arasında çekirdek içerisinde ilerlemektedir. Dolayısıyla, nokta kaynaklı bağlantıların yorulma hasarında temel mekanizma çatlak başlangıcı değil, çatlak ilerlemesidir; bağlantının yorulma ömrünün büyük bir kısmı çatlak ilerleme safhasında geçmektedir.

En düşük yorulma ömrü, paslanmaz çelik sac – galvanizli çelik saclardan oluşan bağlantıda görülmüştür. Yapının diğer malzeme çiftlerine göre daha sert ve martenzitik oluşunun bu etkiye yol açtığı düşünülmektedir.

4. Ultrasonik muayene sonuçlarına göre, düşük çevrimli yorulma zorlamasına maruz bırakılan kaynaklı bağlantılarda, saclar arasındaki soğuk birleşme bölgesi

birbirinden ayrılmakta, çekirdekte ve çevresinde herhangi bir çatlak oluşumu meydana gelmemektedir. Ancak yüksek çevrim sayısında yapılan dinamik zorlamalarda, kaynak çekirdeğinden başlayan bir yorulma çatlak ve bunun neticesinde de çekirdek çapında bir azalma meydana gelmektedir. Çevrim sayısı arttıkça, çekirdek çapındaki azalma da hızlı bir şekilde artmaktadır.

5. Çatlak ilerleme eğrisinin ölçümünde, farklı çevrim sayılarında yorulma zorlanmasına maruz bırakılmış, aynı çekirdek çapına sahip özdeş dört numunedeki yorulma sonrası birleşme bölgesi mekanik yöntemlerle birbirinden ayrılmış ve kalan nokta çaplarından faydalanılmıştır. Yorulma öncesi kaynak çekirdek çapı ve yorulma sonrası kalan çekirdek çapı arasındaki fark, çatlak boyu olarak alınmıştır. Yorulma sonrası kaynak bölgesinde yapılan çatlak boyu ölçümlerine göre, çevrim sayısı arttıkça nokta çapı düşmekte ve çatlak boyu artmaktadır. Bu artış, lineer bir artış değildir. Çevrim sayısı arttıkça, kaynaklı bağlantıdaki çatlak ilerleme hızı da artmaktadır.

6. Çatlak boyu ölçümü ve yapılan hesaplamalar sonucunda, nokta kaynaklı ostenitik paslanmaz çelik - galvanizli çelik sac bağlantıya ait çatlak ilerleme karakteristiğini belirleyen C ve m malzeme sabitleri bulunmuştur. Buna göre, bu bağlantıya ait çatlak ilerleme hızını veren bağıntı,

$$\frac{da}{dN} = 10^{-11,3} \cdot \Delta K^{2,4} \quad \text{şeklinde elde edilmiştir. Burada, } \frac{da}{dN} : \text{ mm/çevrim,}$$

$\Delta K : \text{ N/mm}^{3/2}$ , dir.

7. Paslanmaz çelik sac - galvanizli çelik sac çiftinden oluşan nokta kaynaklı bağlantının mod II yükleme tipine göre ölçülen çatlak ilerleme hızı, esas metallerin mod I tip çatlak ilerleme hızları ile karşılaştırıldığında, mod I yükleme tipi daha kritik olup, mod II tip yüklemeli nokta kaynaklı bağlantıda çatlak daha yavaş ilerlemektedir.



## 6.2 Konuyla İlgili İleride Yapılabilecek Çalışmalar

Bu çalışmada, özellikle otomotiv sektöründe çok yaygın olarak kullanılan galvanizli çelik saclar ve ostenitik paslanmaz çelik saclar 3 farklı sac kombinasyonunda nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Seçilen 3 farklı kaynak çekirdek çapında yapılan bu bağlantılara, ön deneylerin ardından yorulma deneyleri yapılmış ve kaynak çekirdek çapı ve sac kombinasyonunun bağlantıların yorulma dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Galvanizli çelik sac – ostenitik paslanmaz çelik saclardan oluşan bir seri deney numunesi üzerinde yorulma sonrası çatlak boyu ölçümleri yapılmış ve bağlantıya ait malzeme sabitleri belirlenmiştir. Aynı bağlantının çatlak ilerleme hızını veren eğri çizilerek, bunlar esas metal çatlak ilerleme hızlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu ölçümlerde, tek nokta çapına sahip özdeş kaynaklı numuneler kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmaların rehberliğinde, aşağıda ana hatlarıyla verilen çalışmalara devam edilmesi düşünülmektedir.

1. Nokta kaynaklı bağlantının çatlak ilerleme hızı grafiği elde edilirken, mod II yükleme tipine göre yapılan deney sonuçları esas alınmıştır. Esas metallerin çatlak ilerleme hızını veren grafikler ise literatürden alınmıştır ve en kritik yükleme tipi olan mod I yükleme tipine göre elde edilen eğrilerdir. Esas metallere de mod II yükleme tipine göre deneyler yapılarak, buna göre çatlak ilerleme hızı eğrileri elde edilip, aynı yükleme moduna göre nokta kaynaklı bağlantıların ve esas metallerin çatlak ilerleme hızları karşılaştırılabilir.
2. Bu çalışmada, galvanizli saclar ve ostenitik paslanmaz çelik saclar deney malzemesi olarak seçilmiştir. Son yıllarda, özellikle dayanım, hafiflik ve mukavemet açısından çalışma kapsamındaki saclara benzer şekilde optimum özelliklere sahip malzemeler de kullanılmaktadır. Bu tip farklı malzemelerin de nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma dayanımlarının araştırılmasının, çalışmaların genişletilmesi açısından uygun olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Anık, S.**, 1981. Kaynak Tekniği Cilt III, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul.
- [2] **N. N.**, 1983. Metals Handbook, Vol. 6, Welding and Brazing, ASW Ohio.
- [3] **Phillips, A.L.**, 1966. Modern Joining Processes, ASW New York, 1966.
- [4] **Bernhardsson, S., Nornberg, P., Ericksson, H., and Forssell, D.**, 1986. Selection of Stainless Steels for Refineries and the Petrochemical Industry, *Anti-Corrosion, Jan.*, 14-16.
- [5] **N. N.**, 1982. Metals Handbook, Vol. 1, Properties and Selection, AWS Ohio.
- [6] **Bargel, H.J., Schulze, G.**, 1985. Werkstoffkunde, Çev. Güleç, Ş., Aran, A., Tübitak Yayını.
- [7] **Avner, S.H.**, 1984. Introduction to Physical Metallurgy, 2. Ed., Mc Graw Hill.
- [8] **Leslie, W.C.**, 1982. The Physical Metallurgy of Steels, Mc Graw Hill.
- [9] **Anık, S.**, 1983. Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Ergör Matbaası, İstanbul.
- [10] **Anık, S.**, 1991. Kaynak Tekniği El Kitabı-Yöntemler ve Donanımlar, Kansu Matbaacılık, İstanbul
- [11] **N.N.**, 1990. Widerstandschweißen von Stählen bis 3 mm. Einzeldicke Punktschweißung, Merkblatt DVS 2902, Teil 2.
- [12] **Nakamura, T., Hmasaki, M., and Obokata, S.**, 1963. Punktschweißen von Verzinkten Stahlblech, *J. Japon Weld. Soc.*, **32** , 1054-1058.
- [13] **Rosenheimer, V.M.**, Punktschweißen von Verzinkten Blechen, *ZIS-Mitteilungen, H. 1/68*, 42-51.

- [14] **Burton, C.**, 1979. Resistance Welding of Stainless Steel, *Sheet Metal Industries*, 122-138.
- [15] **Llewellyn, D. T.**, 1992. Steels Metalurgy and Applications, Second Edition.
- [16] **Alcini, W.V.**, 1990. Experimental Measurement of Liquid Nugget Heat Convection in Spot Welding, *Welding Journal*, **69**, **n5**, 77-180.
- [17] **Apps, R.L.**, 1970. Heat Development And Weld Nugget Formation in Mild Steel Spot Welds, *Proceeding of The Conference on Advances in Welding Processes*, **4**, 34.
- [18] **Yamamoto, T. and Okuda, T.**, 1970. A Study of Spot Welding of Heavy Gage Mild Steel, *International Institute of Welding*.
- [19] **Eryürek, B.**, 1982. Elektrik Direnç Kaynağı, *Mühendis ve Makine, TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, **24**, **n279**, 22-31.
- [20] **Wang, S.C. and Lin, M.S.**, 1996. Transport Phenomena During Resistance Spot Welding, *Journal of Heat Transfer*, **118**, **n3**, 762-773.
- [21] **Çimen, M.Ş. and Karadeniz, S.**, 1998. The Investigation of Contact Resistance in Resistance Spot Welding By Using Numerical Methods, *Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*.
- [22] **Chen, C. and Hsu, T.**, 1994. Resistance Spot Welding of Precoated Steel Sheet - Computational Heat Transfer Analysis, *Metallurgical and Materials Transactions*, **25**, **n3**, 415-423.
- [23] **Hartmann, E.**, 1958. Mechanical Tests of Spot Welds, *Welding Journal*, **37**, **n11**, 520-523.
- [24] **Vural, M.**, 1992. Galvanizli Çelik Sacların Karbonlu ve Ferritik Paslanmaz Çelikler ile Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Davranışına ve Bağlantının Dayanımına Etkisi, *Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.

- [25] **Beyer, B.**, 1971. Werkstoffkunde NE- Metalle, *VEB Deutscher Verlag für Grundstoff Industrie*, Leipzig.
- [26] **Callister, W.D. Jr.**, 1985. Materials Science and Engineering, *Jhon Wiley and Sons*, Inc. Canada.
- [27] **N.N.**, 1992. Demirsac A.Ş. Üretim Katalogları, İstanbul.
- [28] **Kaluç, E.**, 1986. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, *Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Kaynak Tekniği Yaz Okulu*, Yıldız Üniversitesi Matbaası, 65 –83, İstanbul.
- [29] **Tülbentçi, K.**, 1985. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, *Böhler Kaynak Dünyası*, 11, 6 – 10, İstanbul.
- [30] **N.N.**, 1982. Metals and Their Weldability, *Welding Handbook*, **4, 7. Ed.** , AWS, USA.
- [31] **Kaluç, E.**, 1988. Ferritik-Ostenitik Paslanmaz Çelik Çiftinin Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Çekme – Makaslama Mukavemetine ve Tanelerarası Korozyona Etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] **Eryürek, B.**, 1993. Hasar Analizi I. Baskı, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul.
- [33] **Güleç, Ş. and Aran, A.**, 1983. Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, *TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü*, Gebze.
- [34] **Radaaj, D., Lehreke, H.P. and Greuling, S.**, 2001. Theoretical fatigue – effective notch stresses at spot welds, *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structure*, **24**, 293 – 308.
- [35] **Zhang, S.**, 1999. Approximate stress intensity factors and notch stresses for common spot-welded specimens, *Welding Journal*, Miami, Fla., **78, n5**, 173 – 179.

- [36] **Broek, D.**, 1987. Elementary Engineering Fracture Mechanics, *Fracture Research INC.*, Galena, OH, USA.
- [37] **Stawiarski, T. and Frutiger, R.**, 1996. Fatigue analysis of spot – welded joints under variable load history, *Engineering Fracture Mechanics*, 55, no 3, 363 – 369.
- [38] **Linder, J. and Melander, A.**, 1998. Fatigue strength of spot welded stainless sheet steels exposed to %3 NaCl solution, *International Journal of Fatigue*, 20, no. 55, 383 – 388.
- [39] **Yang, Y.S. and Lee, S.H.**, 1999. A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications, *Journal of Metal Processing Technology*, 151 – 156.
- [40] **Linder, J., Melander, A., Larsson, M. And Bergengren, Y.**, 1998. Fatigue design of spot welded austenitic and duplex stainless sheet steels, *Fracture of Engineering Materials and Structures*, 21, 673 – 686.
- [41] **Newman, J.A. and Dawling, N.E.**, 1998. A crack growth approach to life prediction of spot welded lap joints, *Fatigue and Fracture of Engineering and Structures*, 1123 – 1132.
- [42] **Satoh, T., Abe, H., Nakaoka, T. and Hayata, Y.**, 1996. The fatigue life of the spot welded joint under a repeated load of  $R = -1$ , *Welding in the World*, 37, no 1, 12 – 15.
- [43] **Hahn, O., Gieske, D., Klasfauseweh, U. and Rohda, A.**, 1996. Fatigue resistance of spot welds under multiaxial loads, *Welding in the World*, 37, no 5, 217 – 224.
- [44] **Henrysson, H.F.**, 2000. Fatigue life predictions of spot welds using coarse FE meshes, *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*, 23, 737 – 746.

- [45] **Zhang, G. and Richter, B.**, 2000. A new approach to the numerical fatigue life prediction of spot welded structures, *Fatigue and Fracture Engineering Materilas and Structure*, **23**, 499 – 508.
- [46] **Niemi, E. and Koshimaki, M.**, 1997. Fatigue strength of welded joints in three types of stainless steel, *Welding in the World*, 39, no 2, 65 – 73.
- [47] **Jung, W. and Kwan, Y.**, 1997. Selecting the spot welding condition of multi-layer vechile structure, *SAE International Congress and Exposition*, Sp. 1233, Detroit, Michigan, USA.
- [48] **Gupta, A. and Dorn, P.**, 1996. An experimental study of resistance spot welding in 1 mm. thick sheet of low carbon steel, *Journal of Engineering Manufacture*, **210, no B4**, 341.
- [49] **Krause, A.R. and Chernenkoff, R.A.**, 1995. A comparative study of the fatigue behaviour of spot welded and mechanically fastened aluminum joints, *SAE International Congress and Exposition*, Detroit, Michihan, USA.
- [50] **TS – 138**, 1978. Metalik Malzemelerin Çekme Deneyleleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [51] **Aichele, G.**, 1993. Leistungskennwerte für Schweißen und Schneiden, *DVS – Verlag*.
- [52] **Kehl, L. R.**, 1949. The Principles of Metallographic Laboratory Practice, *McGraw-Hill Book Company*, New York.
- [53] **Schumann, H. and Oettel, H.**, 2005. Metallografie, 14. Auflage, p 440, WILEY – VCH Verlag BmbH & Co. KGaA.
- [54] **Farahmand, B.**, 1997. Fatigue and Fracture Mechanics of Hihg Risk Parts, *Chapman and Hall*, NewYork.
- [55] **Ford Engineering Specification**, 2001. Frame 2 – 9, EB00 E 11211056 000 , ES-1S71-1K251-AB.

- [56] **IIW – Doc. IX – 1342**, 1984. Determination of welding on the maximum hardness in the heat – affected zone of welded joints.
- [57] **Vardar, Ö.**; 1988. Fracture Mechanics, Boğaziçi University Publication, p 232, İstanbul.
- [58] **ASM Handbook**, 1997. Fatigue and Fracture, **19**, November.

## ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Sivas’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini burada tamamladı. 1994 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 1996 yılında aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1998 yılında Yüksek Mühendis ünvanını aldı. Şubat 1999’da İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat programında doktora öğrenimine başladı. Yine aynı tarihte, bir üniversite adına başka bir üniversitede lisans üstü eğitim yapmak üzere, Yüksek Öğretim Kanunu’nun 35. maddesi uyarınca İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı’nda araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen bu görevine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

Ahmet AKKUŞ