



**NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ  
DP1000 ÇELİĞİNİN FARKLI YÜKLERDEKİ  
YORULMA ÖMRÜNE KOROZİF ORTAMIN  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Mustafa GÖKTAŞ**

**2020  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ DP1000 ÇELİĞİNİN  
FARKLI YÜKLERDEKİ YORULMA ÖMRÜNE KOROZİF ORTAMIN  
ETKİLERİ**

**Mustafa GÖKTAŞ**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**KARABÜK  
Haziran 2020**

Mustafa GÖKTAŞ tarafından hazırlanan “NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ DP1000 ÇELİĞİNİN FARKLI YÜKLERDEKİ YORULMA ÖMRÜNE KOROZİF ORTAMIN ETİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Bilge DEMİR

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



### KABUL

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/06/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. İhsan TOKTAŞ ( AYBÜ)

Üye : Prof. Dr. Bilge DEMİR ( KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL ( KBÜ)



KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

.....

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

Mustafa GÖKTAŞ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ DP1000 ÇELİĞİNİN FARKLI YÜKLERDEKİ YORULMA ÖMRÜNE KOROZİF ORTAMIN ETKİLERİ**

**Mustafa GÖKTAŞ**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**Haziran 2020, 127 sayfa**

İleri dayanımlı çeliklerin birinci jenerasyonundan olan çift fazlı çelikler, mükemmel dayanım-süneklik ilişkisi, yüksek pekleşme üssü ve şekillendirilebilirlik gibi üstün özelliklerinden dolayı, otomotiv sanayisinde yaklaşık 40 yıldır yaygın olarak tercih edilmektedir. İlk üretilen çift fazlı çelikler orta seviye dayanım değerlerine sahip iken, son yıllarda çift fazlı çeliklerin ultra yüksek dayanımlı serileri de ticari olarak otomotiv imalatında yerini almıştır. Sahip oldukları mikro yapı çift ve diğer ileri dayanımlı sac çeliklerinin imalat süreçlerinde özelliklerini kaybetmemeleri açısından hassasiyet oluşturmaktadır. Bu çalışmada, ultra dayanımlı çift fazlı çeliklerden olan DP 1000 kalite sac çeliklerinin nokta direnç kaynaklı birleştirmelerinin, farklı yüklerdeki yorulma davranışları ve eşzamanlı olarak korozyif ortamın yorulma ömürlerine etkileri incelenmiştir. Öncelikle, otomobillerde kritik bölgelerde bulunan nokta direnç kaynağı ile T şeklinde birleştirilmiş sac çelik parçalardaki nokta direnç

kaynakların maruz kaldığı kuvvetler analiz edilerek bir yorulma modeli geliştirilmiş ve yorulma deneyleri, geliştirilen model ile yapılmıştır. Modelin doğrulaması ve kuvvet analizleri için ticari bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS kullanılmıştır. Nokta direnç kaynaklı birleştirmeler değişken kaynak akımları ve diğer kaynak parametreleri sabit tutularak uygulanmıştır. Nokta kaynaklı birleştirme numuneleri altı farklı genlik değerinde yorulma deneyine tabi tutulmuştur. İlave olarak nokta direnç kaynaklı birleştirmeler ticari sonlu elemanlar program SIMUFACT ile benzer sınır şartlarındada teorik olarak modellenip elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Nokta direnç kaynak işlemleri EN ISO 12473 standartına uygun olarak yapılmıştır. Yorulma deneyleri korozif ortam içerisinde tekrarlanarak korozif ortamın numunelerin yorulma ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Korozyonlu yorulma deneyleri %3,5 NaCl ve saf sulu elektrolit ortamında yapılmıştır. Ayrıca numuneler her deney aşamasında makro ve mikro görüntü analiz (SEM, Stereo ve optik mikroskop) analizine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak nokta direnç kaynaklı birleştirme numunelerinin yorulma davranışı, çekme yük taşıma kapasitesi, etken kırılma davranışları detaylandırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Çift fazlı çelik, nokta direnç kaynağı, yorulma, mikroyapı ve mekanik özellikler, korozyon, sonlu elemanlar analizi.

**Bilim Kodu** : 91416

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CORROSIVE ENVIRONMENT ON THE FATIGUE LIFE OF DP1000 STEEL JUNCTIONED WITH RESISTANCE SPOT WELDING**

**Mustafa GÖKTAŞ**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**June 2020, 127 pages**

Dual phase steels, which are the first generation of advanced strength steels, have been widely preferred in the automotive industry for nearly 40 years due to their superior properties such as excellent strength-ductility relationship, high hardening exponential and formability. While the first produced dual phase steels have medium strength values, in recent years, ultra high strength series of double phase steels have also taken their place in automotive manufacturing commercially. The microstructure which they possess creates sensitivity in terms of not losing their properties in the manufacturing processes of dual phase and other high strength sheet steels. In this study, the spott resistance welded joints of DP 1000 quality sheet steels, which are ultra-resistant dual-phase steels, and their effects on the fatigue life of the corrosive environment were investigated simultaneously. Firstly, a fatigue model was developed for T shaped conjunctioned automotive parts and the forces was analysed

which applied on resistance spot welded junction areas and all the fatigue tests were made by the model that developed for T shaped junctions. ANSYS, a commercial finite element analysis program, was used for model verification and force analysis. Resistance spot welded joints are applied by keeping variable welding currents and other welding parameters constant. Spot welded samples were subjected to fatigue tests at six different amplitude values. In addition, the spot resistance welded joints are theoretically modeled under similar boundary conditions with the commercial finite element program SIMUFACT and the results obtained are compared with the experimental results. Spot resistance welding processes were carried out in accordance with EN ISO 12473 standard. Fatigue tests were repeated in the corrosive environment and the effects of the corrosive environment on the fatigue life of the samples were examined. Corrosion fatigue tests were carried out in 3.5% NaCl and pure aqueous electrolyte condition. In addition, samples were subjected to macro and micro image analysis (SEM, Stereo and optical microscope) analysis at each experimental stage. As a result, fatigue behavior, tensile load carrying capacity and active damage behaviors of joint resistance welded joint samples are detailed.

**Key Word** : Dual phase steels, resistance spot welding, fatigue, microstructure and mechanical properties, corrosion, finite element analysis.

**Science Code** : 91416



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının hazırlanmasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile her zaman bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Bilge DEMİR'e saygı ve teőekkürlerimi sunarım. Çalıőmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa ACARER'e ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammed ELİTAŞ'a teőekkürlerimi sunarım.

Yorulma cihazının bakımlarında ve geliştirilmesinde yardımcı olan Khalil ABUBAKER BELRAS ALI'ye, kaynak kalıplarının temininde yardımcı olan Abdulkerim ALZAHOUGI' ye, yorulma aparatlarının yapımında yardımcı olan otomotiv teknikeri Mustafa ÜLKÜ'ye ve kaynak işlemlerinin yapılmasındaki katkıları için ALBAKSAN MAKİNE'ye ve Ayhan YILMAZ'a teőekkürlerimi sunarım.

Dualarını benden esirgemeyen ve her daim destekçim olan aileme saygımı ve teőekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xix
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	5
OTOMOTİV ENDÜSTRİSİ VE ÇELİKLER .....	5
2.1. ÇİFT FAZLI (DUAL PHASE) ÇELİKLER .....	6
2.2. DP ÇELİKLERİNİN OTOMOBİL UYGULAMALARI .....	9
BÖLÜM 3 .....	11
OTOMOBİLLERDE NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI UYGULAMALARI.....	11
3.1. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ MEKANİZMASI.....	12
3.1.1. Kaynak Akımı ve Zamanı.....	14
3.1.2. Elektrot Kuvveti.....	16
3.2. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ FİZİKSEL VE METALÜRJİK ETKİLERİ .....	17
3.3. NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK PERFORMANSI.....	21
3.4. NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE KIRILMA TİPLERİ .....	22

3.5. NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER .....	24
3.5.1. Yükleme Koşullarının Etkileri.....	24
3.5.2. Kaynak Bölgesi Boyutunun Etkileri .....	25
3.5.3. Sac Kalınlığının Etkileri .....	25
3.5.4. Kırılma tiplerinin Etkileri .....	26
3.5.5. Ana Metalin Çekme Dayanımının Etkileri .....	26
3.5.6. Kırılma Bölgesinin Mikroyapısı ve Sertliğinin Etkileri .....	26
3.5.7. Nokta Direnç Kaynağı Parametrelerinin Etkileri .....	28
BÖLÜM 4 .....	29
NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE YORULMA .....	29
4.1. YORULMA.....	29
4.2. KOROZYON.....	30
4.2.1. Korozyon Çeşitleri.....	32
4.2.1.1. Genel Korozyon .....	32
4.2.1.2. Galvanik Korozyon.....	33
4.2.1.3. Çukur Korozyonu.....	34
4.2.1.4. Aralık Korozyonu .....	35
4.2.1.5. Taneler Arası Korozyon.....	37
4.2.1.6. Seçilimli Korozyon .....	38
4.2.1.7. Erozyonlu Korozyon .....	38
4.2.1.8. Aşınmalı Korozyon.....	39
4.2.1.9. Stres Korozyonu.....	40
4.2.1.10. Hidrojen Gevrekliği .....	41
4.2.1.11. Yorulma Korozyonu .....	42
4.2.2. Ortamın Korozyona Etkileri .....	43
4.2.2.1. Atmosferik Ortamda Korozyon .....	44
4.2.2.2. Su İçinde Korozyon .....	48
4.3. NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN YORULMA ÖMÜRLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER .....	51
4.3.1. Yükleme Koşullarının Etkisi .....	52
4.3.2. Sac Kalınlığının Etkisi.....	53

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.3.3. Kaynak Bölgesinin Boyutunun Etkisi .....	53
4.3.4. Kalıntı Gerilemelerin Etkisi.....	53
4.3.5. Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	54
<b>BÖLÜM 5 .....</b>	<b>65</b>
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>65</b>
5.1. GENEL BAKIŞ.....	65
5.2. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILACAK MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ .....	65
5.3. KAYNAK PARAMETRELERİNİN SIMUFACT TİCARİ PROGRAMI İLE KONTROLÜ .....	67
5.4. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İŞLEMİNİN YAPILIŞI .....	68
5.4. MİKROYAPI VE MİKRO SERTLİK ÇALIŞMALARI.....	70
5.5. ÇEKME MAKASLAMA TESTLERİ .....	70
5.6. YORULMA MODELİ GELİŞTİRİLMESİ VE YORULMA DENEYLERİNİN YAPILMASI.....	70
5.7. KOROZYONLU YORULMA DENEYLERİ.....	73
<b>BÖLÜM 6 .....</b>	<b>74</b>
<b>DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>74</b>
6.1. KAYNAK PARAMETRELERİNİN TİCARİ SONLU ELEMANLAR YAZILIMI SIMUFACT İLE KONTROLÜ .....	74
6.1.1. Malzeme Modelinin Özellikleri.....	74
6.1.2. Nokta Direnç Kaynağı İşlemi .....	75
6.1.3. Nokta Direnç Kaynaklı Birleştirmelerin Çekme Makaslama Özellikleri	79
6.2 MİKROYAPI VE MİKROSERTLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ	84
6.2.1 Mikroyapı .....	84
6.2.2. Sertlik testi .....	86
6.3 YORULMA ÇALIŞMALARI .....	88
6.3.1 Yorulma Deneyinin Modellenmesi ve Doğrulama Çalışmaları .....	88
6.3.2 Nokta Direnç Kaynaklı DP1000 Çeliklerinin Yorulma Özellikleri .....	95
6.3.3. Hasara Uğrayan Deney Numunelerinin Kopma Yüzeylerinin İncelenmesi .....	108

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.3.3. Nokta Direnç Kaynaklı DP1000 Çeliklerinin %3,5 NaCl Çözelti İçerisinde Korozyon Hızının Tespiti.....	110
6.3.4. Nokta Direnç Kaynaklı DP1000 Çeliklerinin Korozif Yorulma Özellikleri.....	112
BÖLÜM 7 .....	114
SONUÇLAR .....	114
KAYNAKLAR .....	117
ÖZGEÇMİŞ .....	127

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. AHSS kuşaklarının dayanım-uzama ilişkilerini gösteren muz grafiği.....	7
Şekil 2.2. ULSAB AVC raporuna göre otomobillerde çeliklerin kullanım yüzdeleri	7
Şekil 2.3. DP çeliğine ait bir mikroyapı görüntüsü. ....	8
Şekil 2.4. Otomobilde burkulma bölgeleri ve güvenli bölge olan yolcu kompartımanı. ....	9
Şekil 2.5. C segmenti bir otomobilde kullanılan çelik türlerinin daire grafiği ile gösterimi.....	10
Şekil 3.1. Nokta direnç kaynağını oluşturan adımların gösterimi.....	12
Şekil 3.2. NDK işleminde direnç noktaları ve direnç-sıcaklık ilişkisinin gösterimi.	13
Şekil 3.3. Çeliğin nokta direnç kaynağı için tipik dinamik direnç eğrisi. ....	14
Şekil 3.4. Nokta direnç kaynağı için akım ve zaman diyagramları: kaynak akımı- $I_w$ , kaynak zamanı- $t_k$ , yükselme zamanı- $t_y$ , düşme zamanı- $t_d$ , kaynak kuvveti- $F_k$ , dövme kuvveti- $F_{dövme}$ , tavlama akımı- $I_a$ . ....	16
Şekil 3.5. Elektrot kuvveti ve kaynak basıncının sebep olduğu kuvvet arasındaki denge. $F_N$ : kaynak metali sıvı basıncı kuvveti, $F_E$ : elektrot kuvveti. ....	17
Şekil 3.6. Nokta direnç kaynaklı bir birleştirmenin makro yapısı. KB-kaynak bölgesi, ITAB-ısı tesiri altındaki bölge, EM-esas metal .....	18
Şekil 3.7. Nokta direnç kaynağında farklı bölgelerin sertlikleri a-konvansiyonel ve DP çeliklerinin nokta direnç kaynağının sertlik profili b) ITAB yumuşamasının görüldüğü DP780 ve DP980 çeliğinin nokta direnç kaynağı c) martensitik çeliklerin nokta direnç kaynağı sertlik profili. ....	19
Şekil 3.8. Nokta direnç kaynağının mekanik test modelleri a) çekme-makaslama testi b) çapraz çekme testi c) koç kabuğu testi. ....	22
Şekil 3.9. Nokta kaynaklı birleştirmelerin mekanik testler sonucunda görülen hasar tipleri. a-arayüzey tipi hasar, b-çekme tipi hasar, c-kısmi arayüzey tipi hasar, d-kısmi kalınlık-çekme tipi hasar. ....	23
Şekil 3.10. Kaynak boyutu ile maksimum yük arasındaki ilişki.....	25
Şekil 3.11. Çekme hasar tipinin ilk gözlemlendiği kaynak bölgesi boyutunda 1.5 mm kalınlığındaki farklı dayanıma sahip nokta direnç kaynaklı DP çeliklerinin maksimum yük ve kırılma enerjisi.....	28
Şekil 4.1. Malzemenin S-N eğrisinin örnek gösterimi. ....	29
Şekil 4.2. Demir üzerinde oluşan anot ve katot reaksiyonları.....	31
Şekil 4.3. Su damlasının sebep olduğu korozyon.....	32
Şekil 4.4. Galvanik korozyon sebebiyle metal kaybı .....	33
Şekil 4.5. Çukur korozyonunda oyuk oluşumu. ....	34

Şekil 4.6. Aralık korozyonu sebebiyle metal kaybı.....	35
Şekil 4.7. Perçinli bağlantılarda aralık korozyonunun meydana gelmesi. ....	36
Şekil 4.8. Taneler arasında krom karbit oluşumuna bağlı krom eksilmesi. ....	37
Şekil 4.9. Yüksek hızlı akışa bağlı olarak korozyon ile metal kaybının gerçekleşmesi. ....	39
Şekil 4.10. Korozif ortamda statik kuvvet ile çatlak oluşumu ve ilerlemesi.....	40
Şekil 4.11. İnert bir ortamda (üst eğri) ve agresif bir ortamda (alt eğri) bir malzeme için S-N eğrilerinin karşılaştırılması. ....	42
Şekil 4.12. Bazı korozif ortamlardaki çeliğin korozyon hızları. ....	44
Şekil 4.13. Bakırın farklı ortamlarda korozyon hızı.....	45
Şekil 4.14. Bağlı nem ve kirli atmosferin karbon çeliğinin korozyonu üzerine etkisi. ....	46
Şekil 4.15. Demirin Korozyon Hızının Bağlı Nem ile İlişkisi. ....	47
Şekil 4.16. SO <sub>2</sub> bulunan ve bulunmayan atmosferin korozyona etkisi. ....	48
Şekil 4.17. NaCl konsantrasyonu ile korozyon hızı arasındaki ilişkiyi gösteren eğri. ....	51
Şekil 4.18. Deniz içine çakılmış çelik kazıkta derinliğe göre korozyon hızının değişimi. ....	52
Şekil 4.19. Tekrarlı yükleme dalgası şekilleri.....	53
Şekil 4.20. yorulma çatlakları ilerleme bölgeleri: a,b) düşük çevrimli yorulma şartlarında c,d) yüksek çevrimli yorulma şartlarında. ....	55
Şekil 4.21. T şekilli yapısal parçalara uygulanan kuvvetler.....	57
Şekil 4.22. Araçlarda farklı tipte yüklere maruz kalabilecek nokta direnç kaynaklı T şekilli birleştirmeler. ....	64
Şekil 5.1. DP1000 sac çeliğinin mikroyapısı. ....	66
Şekil 5.2. Nokta direnç kaynaklamanın Simufact ortamında oluşturulan 2 boyutlu modeli.....	67
Şekil 5.3. Farklı kaynak akımı parametrelerin malzeme üzerinde uygulanması.....	67
Şekil 5.4. Nokta kaynaklı numunelerin hazırlanması için kullanılan ölçüler. ....	68
Şekil 5.5. Nokta direnç kaynak işlemi için kullanılan kaynak cihazı.....	69
Şekil 5.6. Nokta direnç kaynağı ile EN ISO 14273 standartlarına göre birleştirilen numunenin görüntüsü.....	69
Şekil 5.7. Nokta direnç kaynaklı numune kesiti ve sertliği alınan noktalar. ....	70
Şekil 5.8. T şekilli yapısal parçanın modellenmesi ve kuvvet koşulu.....	71
Şekil 5.9. Yorulma modelinin ANSYS ortamındaki modeli.....	72
Şekil 5.10. Özel amaçlı yorulma cihazı.....	72

Şekil 5.11. Korozyonlu yorulma deneylerinin şematik gösterimi.....	73
Şekil 6.1. DP1000 malzemeye yapılan çekme testlerinin Simufact ortamında elde edilmiş dayanım sonuçları.....	74
Şekil 6.2. Farklı modellerin çekme simülasyonları sonucu elde edilen eğrilerin DP1000 çeliğinin çekme testinden elde edilen eğriyle kıyaslanması .....	75
Şekil 6.3. 6 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı. .	76
Şekil 6.4. 7 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı. .	76
Şekil 6.5. 8 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı. .	77
Şekil 6.6. 9 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı. .	77
Şekil 6.7. 10 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı.	77
Şekil 6.8. Kaynak akımlarının artmasıyla meydana gelen kaynak kusurları. ....	78
Şekil 6.9. Çalışmadan elde edilen kaynak boyutu değerleri.....	79
Şekil 6.10. 7 kA kaynak akımı ile kaynaklanan DP1000 çeliğinin çekme-makaslama simülasyonu.....	80
Şekil 6.11. 8 kA kaynak akımı ile kaynaklanan DP1000 çeliğinin çekme-makaslama simülasyonu.....	80
Şekil 6.12. 9 kA kaynak akımı ile kaynaklanan DP1000 çeliğinin çekme-makaslama simülasyonu.....	81
Şekil 6.13. Farklı nokta direnç kaynak akım parametreleri ile birleştirilen DP1000 çeliğinin 3 boyutlu simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen kuvvet-uzama eğrileri. a) üç boyutlu sayısal model grafikleri, b) deneysel sonuç grafikleri.....	83
Şekil 6.14. 7 kA kaynak akımlarında kaynaklanan DP1000 çeliğinin makro görüntüsü.....	85
Şekil 6.15. 8 kA kaynak akımlarında kaynaklanan DP1000 çeliğinin makro görüntüsü.....	85
Şekil 6.16. 9 kA kaynak akımlarında kaynaklanan DP1000 çeliğinin makro görüntüsü.....	85
Şekil 6.17. DP1000 çeliğinin ITAB ve kaynak metali mikroyapı görüntüsü.....	86
Şekil 6.18. DP1000 sac çeliğinin farklı kaynak akımlarında gerçekleştirilen nokta direnç kaynağı işleminden sonra elde edilen sertlik değerleri. ....	87
Şekil 6.19. ANSYS ortamında T şekilli modelin yüklenmesi ile üzerinde oluşan gerilme dağılımları. ....	89
Şekil 6.20. ANSYS ortamında T şekilli modelin yüklenmesi ile kaynak kökünde oluşan gerilme değerleri.....	89
Şekil 6.21. Kaynak akımlarının artmasıyla meydana gelen kaynak kusurları. ....	90
Şekil 6.22. Geliştirilen modelin ANSYS ortamında elde edilmiş gerilme değerleri. .	90
Şekil 6.23. Geliştirilen modelin ANSYS ortamında elde edilmiş gerilme oranları. .	91



Şekil 6.24. Geliştirilen modelin ANSYS ortamında elde edilmiş ömür verileri.....	91
Şekil 6.25. T şekilli modele ait (DP600) ANSYS ortamında elde edilen gerilim ve gerinim eğrisi (R=-0.43).....	92
Şekil 6.26. Geliştirilen modele ait (DP600) ANSYS ortamında elde edilen gerilim ve gerinim eğrisi (R=-0.41).....	92
Şekil 6.27. Yorulma deneyine tabi tutulan DP600 numunelerin kırık yüzeylerinin makro görüntüsü.....	93
Şekil 6.28. Yorulma deneyine tabi tutulan DP600 numunelerin kırık yüzeylerinin dik görüntüleri. ....	94
Şekil 6.29. 7 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri. ....	96
Şekil 6.30. 6 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri. ....	97
Şekil 6.31. 4 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri. ....	98
Şekil 6.32. 3 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri. ....	99
Şekil 6.33. 2 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri. ....	100
Şekil 6.34. 1 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri.....	101
Şekil 6.35. Yorulma deneylerinde 6 ve 2 mm genliklerden elde edilen kuvvet çevrim grafikleri, a) 6 mm genlikten b) 2 mm genlikten elde edilen kuvvet-zaman grafikleri .....	102
Şekil 6.36. Kuvvet zaman grafiğinin karakteristik özelliği.....	103
Şekil 6.37. 7 kA kaynak akımıyla birleştirilmiş DP1000 çeliğinde uygulanan genlik ile oluşan gerilmelerin Simufact programı ile analizi.....	104
Şekil 6.38. 8 kA kaynak akımıyla birleştirilmiş DP1000 çeliğinde uygulanan genlik ile oluşan gerilmelerin Simufact programı ile analizi.....	104
Şekil 6.39. 9 kA kaynak akımıyla birleştirilmiş DP1000 çeliğinde uygulanan genlik ile oluşan gerilmelerin Simufact programı ile analizi.....	105
Şekil 6.40 Farklı kaynak akımlarında birleştirilmiş DP1000 numunelerin kuvvet kolundan elde edilmiş kuvvet-yer değiştirme eğrisi. ....	105
Şekil 6.41. Farklı kaynak akımlarıyla birleştirilmiş numunelerin yorulma deneylerinden elde edilmiş genlik-çevrim eğrisi. ....	106
Şekil 6.42. Farklı kaynak akımlı birleştirmelerin yorulma deneylerinin kuvvet-çevrim değerleri.....	106
Şekil 6.43. Farklı kaynak akımında kaynaklanmış birleştirmelerin yorulma deneyleri sonucu elde edilmiş gerilme-çevrim eğrilerinin karşılaştırılması. ....	107
Şekil 6.44. 9 kA kaynak akımlarında kaynaklanan birleştirmenin yorulma hasarının görüntüsü a) 7 mm genlikte yapılan b) 2 mm genlikte yapılan yorulma deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.....	108
Şekil 6.45. Hasarlı yüzeyde kaynak bölgesinin SEM görüntüsü .....	109
Şekil 6.46. Hasarlı yüzeyde kopmanın gerçekleştiği bölgenin SEM görüntüsü. ....	109

**Sayfa**

Şekil 6.47. Düşük genliklerde hasara uğrayan numunenin kırık yüzeyinde taneler arası kırılmaların görüntüsü. ....	110
Şekil 6.48. Normal hava koşullarında ve %3,5 NaCl koşullarında yapılan yorulma deneylerinden elde edilen ömür verilerinin birlikte gösterimi. ....	112
Şekil 6.49. Farklı genliklerde korozyonlu yorulma testlerine tabi tutulan nokta direnç kaynaklı DP1000 çelikleri; a) yüksek genlik, b) düşük genlikli korozyonlu yorulma numunesi. ....	113

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 4.1. Literatür ışığında nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin yüksek-düşük çevrim yorulma dayanımlarını etkileyen koşulların etkileri .....	56
Çizelge 5.1. DP100 sac çeliğinin kimyasal bileşimi (%) .....	66
Çizelge 5.2. Kullanılan elektrotun genel özellikleri.....	68
Çizelge 5.3. DP600 çeliğine ait mekanik özellikler.....	71
Çizelge 6.1. DP1000 çeliklerinin kaynak bölgesi ITAB boyutları. ....	78
Çizelge 6.2. Farklı nokta direnç kaynak akım parametreleri ile birleştirilen DP1000 çeliğinin 3 boyutlu simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen çekme yükü taşıma kapasitesi değerlerinin gerçek çekme yükü taşıma kapasitesi değerleri ile karşılaştırılması.....	82
Çizelge 6.3. Geliştirilen model ile yapılan deneysel yorulma deneyleri neticesinde elde edilen hasar çevrimleri. ....	93
Çizelge 6.4. Yorulma deneyleri neticesinde farklı modellerden elde edilen hasar çevrimleri. ....	93
Çizelge 6.5. Daldırma testi verileri ve formülden elde edilen korozyon hızı değeri. ....	111

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Mg : magnezyum

C : karbon

Ag : gümüş

Al : alüminyum

Si : silisyum

Au : altın

Cu : bakır

H<sub>2</sub> : hidrojen

He : helyum

Mo : molibden

Ni : nikel

V : vanadium

Cr : krom

Fe : demir

$\sigma_M$  : martensit dayanımı

$\sigma_F$  : ferrit dayanımı

## **KISALTMALAR**

- DP : Dual Phase (Çift Fazlı)
- TRIP : Transformation Induced Plasticity (Dönüşümle Plastikliği Arttırılmış)
- HV : Vickers Hardness (Vickers Sertliği)
- AHSS : Advanced High Strength Steel (Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik)
- HSLA : High Strength Low Alloy (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli)
- CP : Complex Phase (Kompleks Fazlı)
- KM : Kaynak Metali
- EM : Esas Metali
- Q&P : Quenching and Partitioning (Su Verilmiş ve Bölümlenmiş)
- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
- AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı)
- ULSAB : Ultra Light Steel Auto Body (Ultra Hafif Oto Gövdesi)
- AVC : Advanced Vehicle Concept (İleri Taşıt Konsepti)
- ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
- TS : Türk Standardı
- HCl : Hydrochloride (Hidroklorik)
- NaCl : Sodium Chloride (Sodyum Klorür)
- NDK : Nokta Direnç Kaynak

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Son zamanlarda artan dünya nüfusunun neden olduğu üretim ve taşımacılık hizmetlerindeki artış sebebiyle taşıtların oluşturduğu karbon salınımları dünya atmosferini önemli ölçüde kirletmektedir. Araçların hava kirliliğinde önemli bir paya sahip olması ve hava kirliliğinin önemli sağlık sorunlarına sebep olması nedeniyle bilim insanları ve otomobil üreticileri araçlarda salınımın azaltılması ve yakıt tasarrufunun artırılmasını önemle vurgulamışlardır [1,2].

Araçlarda yakıt tasarrufunu etkileyen en önemli parametrenin araç ağırlığı olduğu ise gerek yapılan çalışmalar olsun gerek gözlemler olsun iyi bilinen bir gerçektir. İlgili alanda yapılan son çalışmalar, AHSS çeliklerinin kullanımıyla araç ağırlıklarının %25 azaldığını ortaya çıkarmıştır. Sabit performanslı kullanımlarda %1 miktarda ağırlık azalmasıyla %0,66 oranında yakıt tasarrufunun elde edilebilmesi nedeniyle araç ağırlığı, yakıt tasarrufu için önemli bir parametredir. Bunun yanında ağırlığın azaltılması araç verimini ve performansını da arttırmaktadır [3,4].

Bunların yanında otomobil üreticileri güvenlik standartlarını karşılamak ve otomobilin sac çelik olan yapısal parçalarının dayanımlarını da arttırmak için çalışmalar yapmışlardır. Dayanımı arttırmanın bir yolu olan parça kalınlıklarını arttırmak, yakıt tüketimini ve karbon salınımını arttırdığı için üreticiler hafif ve dayanıklı malzeme arayışı içine girmişlerdir. Hafiflik ve dayanım performansına duyulan ihtiyaç sonuç itibariyle ileri yüksek dayanımlı çeliklerin (AHSS) geliştirilmesiyle ciddi manayla çözülmüştür. AHSS çelikleri otomobillerin güvenliğini artırmanın yanında yüksek çekme dayanımlarına sahip olmaları, tok yapıya ve iyi şekillendirilebilirliğe sahip olmaları, otomobil üretiminde sıklıkla kullanılmalarının nedenlerindedir [5,6].

Otomotiv uygulamalarında en yaygın kullanıma sahip olan AHSS türü ise DP (çift fazlı) çelikleridir. Bunun sebebi yüksek dayanımı, iyi şekillendirilebilme kabiliyeti, iyi kaynaklanabilirlik özelliklerine sahip olmasının yanında üretiminin kolay olmasıdır [7]. DP çelikleri kritik sıcaklıklarda yapılan tavlamanın ardından su verilerek hızlıca soğutulması ile elde edilir. Bu işlemler neticesinde ferrit ve martensit fazlarından oluşan bir mikroyapı elde edilir. Ferrit fazı sünekliliği ve şekillendirilebilirliği sağlarken martensit fazı dayanımı sağlayan fazdır. Bunların yanında dayanım ağırlık oranının da iyi olması diğer geleneksel yüksek dayanımlı çelikler karşısında önemli bir avantaj sağlar [8,9].

Otomobillerde yapı olarak sac metallere oluşmakla birlikte sacların birleştirilmesi için çoğunlukla kaynaklama yöntemleri kullanılır. İşlem süresinin kısalığı, düşük ısı girdisi, hata riskinin az olması, ek bir dolgu malzemesi gerektirmemesi gibi avantajlarından dolayı nokta direnç kaynağı en yaygın kullanılan ve tercih edilen kaynak yöntemidir. İki bakır elektrot arasındaki saclara belli bir elektrot basıncı ve düşük voltajlı akım uygulanması sonucu iki sac arasındaki direnç sebebiyle oluşan sıcaklığın temas noktalarını ergiterek birleştirmesi temeline dayanan nokta direnç kaynağı yöntemi, işlem kolaylığı bakımından otomasyon için oldukça uygun bir birleştirme yöntemidir. Standart bir araçta yaklaşık 3000-6000 arasında nokta direnç kaynaklı birleştirme bulunur [10,11]. Bu nedenle otomobil dayanımı ve rijitliği büyük ölçüde kaynak kalitesine bağlıdır.

Her kaynak işleminde olduğu gibi nokta kaynak işlemi esnasında ani ısı değişimleri sebebiyle birleştirme bölgelerinde yorulma ömrünü sınırlayan içsel kusurlar, kalıntı gerilmeler ve metalürjik değişimler meydana gelir. Bu kusurlar ve kalıntı gerilmeler tekrarlı yüklere maruz kaldıkça bu noktalarda gerilme yığılmaları meydana gelir. Gerilme yığılmalarının akma dayanımını geçtiği noktalarda ise yorulma çatlakları meydana gelir ve çatlakların ilerlemesiyle otomobilin yapısal parçalarında kırılma meydana gelir. Bu nedenle kaynak kusurları yorulma performansını önemli ölçüde etkiler [12–15].

Otomobiller hareketli sistemler oldukları için otomobilin yapısal bileşenleri, servis ömürleri boyunca arazi şartlarına göre farklı çevresel etkilere ve titreşimlere bunun

yanında farklı genliklerde farklı yükleme modlarına maruz kalırlar [16]. Özellikle yükleme koşulları birleştirmelerin yorulma ömürleri üzerinde oldukça önemlidir. Bu sebeple araştırmacılar farklı yükler altında nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin yorulma performanslarını incelemişlerdir. Fakat nokta kaynaklı birleştirmeler gerçekte karışık modlarda yüklemeler de görülebilir. Özellikle otomobillerde T şekilli yapısal parçaların birleştirmeleri karışık türlerde yüklemelere maruz kalabilmektedir [17,18]. Karışık moddaki yüklemelere maruz kalan parçalarda ise yorulma hasarları beklenen çevrimlerin altında meydana gelebilir.

Bir diğer önemli çevresel tehlike ise korozyon ortamının etkileridir. Korozyon, metallerin kimyasal, elektrokimyasal ya da fiziksel olarak çözünmesidir. Bu çözünme sonucunda metal, oksitli bileşiklerine dönüşür ve ağırlık kaybeder. Özellikle denize yakın bölgelerin ve endüstriyel şehirlerin atmosferleri otomobiller için son derecede korozyon ortamlardır. Denize yakın yerleşim yerlerinde nem oranının yüksek olması 1 metrekarelik metal yüzeyine 5 ile 1500 mg sodyum klorür (NaCl) birikmesine sebep olur. Bu nedenle korozyon hızı 0.5-8µm/yıl arasında değişir. Endüstriyel ortamlar ise sülfür salınımları sebebiyle metal yüzeylerinde sülfür dioksit birikmesine sebep olur. Bu birikme ise malzeme yüzeyindeki pH derecesinin 4'ün altına düşürerek yüzeyde asitliğin artmasına sebep olur. Asitliğin artması ise korozyon hızını önemli ölçülerde artırır. Endüstriyel ortamlarda ise metal yüzeyine metrekareye 200 miligram SO<sub>2</sub> birikir. Bu ise senede 1-16 mg ağırlık kaybına sebep olur. Bu ortamların yanında kışın yollarda yapılan tuzlama çalışmaları da otomobil için şiddetli bir korozyon ortamı oluşturur. Hatta otomobillerin metal yüzeylerine yapışan çamurlar bile korozyona sebep olabilir. Çamur altında kalan bölge nemden dolayı anot, çevre yüzeyler katot davranışı gösterir. Böylece anot kısımlar korozyona uğrarlar. Korozyonun engellenmesi imkansızken korozyon oluşum hızı ihmal edilebilir seviyelere düşürülebilir. Bunun için otomobil parçaları galvanizleme ile çinko kaplanır. Koruyucu çinko tabaka dış etkenler sebebiyle zarar görürse metal yüzey atmosfer ile temas eder ve daha şiddetli korozyona uğrarlar [19–22].

Özellikle otomobillerde korozyon, yorulmayla birlikte kaynaklı bağlantıların yorulma performansını önemli ölçüde azaltabilir. Kaynak işlemi normalde korozyona karşı direnç gösteren bir metalin mikroyapısının bozulmasına sebep olacağından bu



bölgeler korozyona karşı korunmasız kalırlar [23]. Böylece korozyona uğrayan metaller normalden çok daha düşük çevrimlerde hasara uğrarlar. Bu sebeple nokta direnç kaynaklı bağlantıların korozyonlu yorulma performanslarının incelenmesi son derecede önemlidir.

Bütün bu nedenler doğrultusunda bu tez çalışmasında, optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi ve gerçek koşullara uygun yorulma modeli tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Çalışmalar için otomotiv endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılan ve AHSS türü olan DP1000 çelikleri nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş ve tasarlanan sistemde normal atmosferik ve koroziv ortam şartlarında yorulma testlerine tabi tutularak yorulma ömürleri incelenmiştir. Bunların yanında nokta direnç kaynaklı numunelerin mikroyapı, sertlik ve çekme makaslama testleri yapılarak kaynak parametrelerindeki değişimin etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak güvenilir ve emniyetli bir tasarım için yorulma ömürleri incelenmiş ve optimum kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. İlk defa bu çalışmayla açık literatürde olmayan nokta direnç kaynaklı T şekilli DP1000 sac çelik birleştirmelerinin korozyonlu yorulma ömrünün incelenmesi yukarıda izah edilen çalışmayla ortaya konulmuştur.

## BÖLÜM 2

### OTOMOTİV ENDÜSTRİSİ VE ÇELİKLER

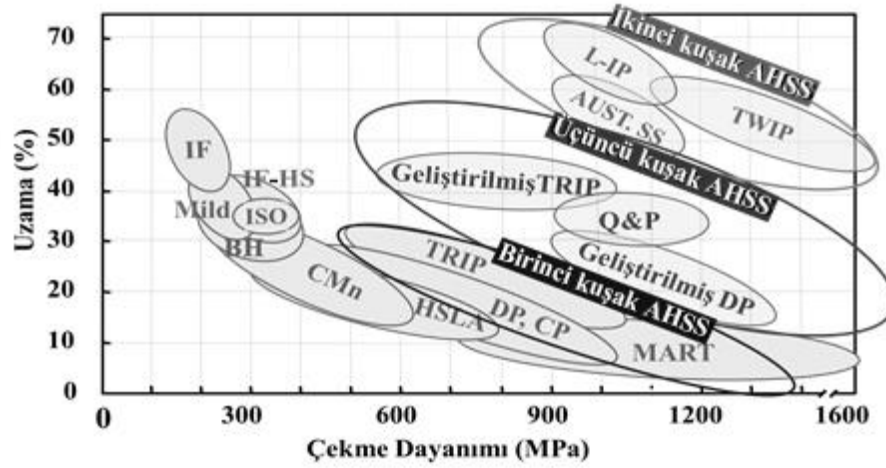
Otomobil yapısının büyük bir çoğunluğu çeliklerden oluşmaktadır. Presle şekillendirilmiş çelik yapıların birleştirilmesiyle oluşan bir sistemde kullanılacak çeliklerin iyi şekillendirilebilirliğe ve iyi kaynaklanabilme yeteneğine sahip olması beklenir [24]. Ancak teknolojinin ilerlemesi ile artan kalite ve güvenlik anlayışının yanında ekolojik problemler, çelikler için yeni kriterlerin oluşmasına sebep oldu. Bu kriterlerden en önemlileri dayanım ve hafifliktir [25]. Araç ağırlığındaki artışın, yakıt tüketiminin ve karbon salınımının artmasına sebep olduğu için üreticiler hafif ve daha dayanıklı malzeme arayışı içine girmişlerdir.

Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı HSLA (High Strength Low Alloy) çeliklerinin otomotiv endüstrisinde kullanılmasıyla taşıt ağırlıklarında önemli ölçüde azalma sağlanmıştır. Ancak HSLA çeliklerinin şekillendirilme kabiliyetlerinin iyi olmaması sebebiyle yerini iyi dayanım-süneklik özelliği gösteren ve ilk AHSS çeliklerinden çift fazlı DP çeliklerine bırakmıştır [25,26]. Böylece AHSS çeliklerinin otomobil endüstrisindeki serüveni başlamıştır. Bunun arkasındaki yatan asıl sebep AHSS çeliklerinin, dayanım, güvenlik, hafiflik ve şekillendirilebilme ihtiyacını yeterli şekilde karşılamasıdır.

AHSS çelikleri, yüksek enerji absorpsiyon yetenekleri sebebiyle yolcu güvenliğini önemli ölçüde artırmasının yanında yüksek dayanım ve süneklik özellikleriyle otomobil yapılarında daha ince kesitlerin kullanılmasını da mümkün kılarak araç ağırlığının azaltılmasını sağlar. Özellikle yüksek akma dayanımına ve sertleşebilme kabiliyetlerine sahip olan AHSS çelikleri üstün çarpışma dayanımına sahiptir. Benzer dayanıma sahip geleneksel yüksek mukavemetli çeliklere kıyasla daha iyi şekillendirilebilirliğe sahip olması daha karmaşık parçaların üretimini mümkün kılar [27].

AHSS çeliklerinin ilk kuşağını hala otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan ferrit esaslı mikroyapıya sahip DP (Dual Phase), TRIP (Transformation Induced Plasticity),

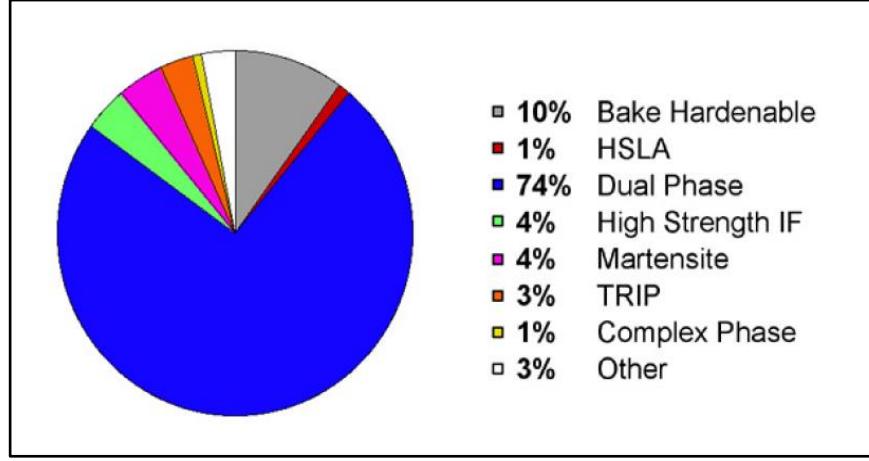
CP (Complex Phase) ve MART (Martensitic) çelikleri, ikinci kuşağını östenitik mikroyapıya sahip manganez içerikli TWIP (Twinning Induced Plasticity) çelikleri, alüminyum takviyeli L-IP (Lightweight Steels with Induced Plasticity) çelikleri ve SIP (Shear Band Strengthened Steels) çelikleri oluşturmaktadır. İkinci kuşaktaki çeliklerde kararlı östenitik mikroyapının sağlanması için alaşım miktarlarının yüksek olması sebebiyle oldukça maliyetli olması üçüncü kuşak Q&P (Quenching and Partitioning steel) çeliklerine olan ilgiyi artırmıştır [7].



Şekil 2.1. AHSS kuşaklarının dayanım-uzama ilişkilerini gösteren muz grafiği [7].

## 2.1. ÇİFT FAZLI (DUAL PHASE) ÇELİKLER

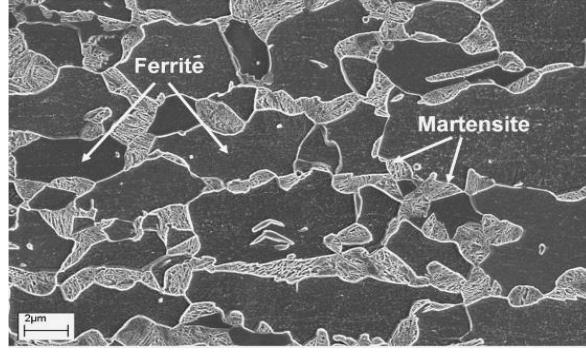
DP çelikleri 1970'li yıllarda geliştirilmiştir. AHSS karakteristiğini yansıtan özelliklerin çoğu DP çeliklerinin de özelliği olduğu için DP çelikleri otomotiv endüstrisinde en sık kullanılan sac çeliğidir. Şekil 2.2'de ULSAB-AVC (Ultra Hafif Çelik Oto Gövdesi-Ileri Otomobil Konsseptleri) programı raporundaki şekilde görüldüğü gibi DP çelikleri C segmentteki bir aracın yapısının %74'ünü oluşturur.



Şekil 2.2. ULSAB AVC raporuna göre otomobillerde çeliklerin kullanım yüzdeleri [28].

DP çelikleri, otomobilin yapılarına mükemmel katkı sağlar. Kaza esnasında meydana gelen deformasyon DP çeliğinin pekleşmesine yol açarak dayanımın artmasını sağlar. Özellikle araçların ön kısmındaki raylarda kullanımı enerji absorpsiyonunun yüksek olması sayesinde yolcu kompartımanındaki çarpışmanın şokunu azaltır [29,30].

Belirli faz dönüşümleri ile üretilen çift fazlı çelikler, ilk yüksek dayanımlı otomotiv sac çeliklerindedir. Mükemmel dayanım-süneklik uyumuyla iyi şekillendirilme kabiliyetlerine sahip olan DP çeliklerinin çekme dayanımları faz oranlarına ve alaşım türlerine göre 450-1400 MPa değerleri arasında değişebilmektedir. Kritik sıcaklıklarda tavlama ve sonrasında su verme işlemi ile üretilirler. Yapılan bu kontrollü ısıl işlemlerden sonra faz, yumuşak ferrit yapısı içerisinde dağılmış martensit fazlarından oluşmaktadır. Mikroyapılarında çok az miktarda kalıntı östenit, beynit ve perlit içerseler de çift faz ismi, esas fazları oluşturan ana yapı ferrit ve ikinci yapı martensit fazından gelmektedir [31–33].



Şekil 2.3. DP çeliğine ait bir mikroyapı görüntüsü [34].

DP çeliklerinin dayanımları büyük oranda martensit hacim oranlarına bağlıdır. Martensit fazının sertliği çift fazlı çeliklerin dayanımını belirler. Martensit fazının sertliği ise karbon miktarına bağlıdır. Karbon miktarı arttıkça martensit fazının sertliği de artar. Süneklik ve şekillendirilme kabiliyeti ise ferrit fazına bağlıdır. Ferrit fazının saf, yani katı eriyik atomlardan ve çökelek gibi safsızlıklardan arınmış olması istenir. İdeal DP çelik kalitesi için en fazla %0.3C ve %15-25 martensit hacim oranı arzu edilir [31,32,35]. DP çeliklerinin, dayanımını martensit fazından sünekliliğini ve şekillendirilebilirlik kabiliyetini ferrit fazından aldığı göz önünde bulundurulursa kompozit malzeme özelliği gösterdiği düşünülebilir. DP çeliklerinin faz oranları ve dayanım ilişkisi Denklem 2.1 ve 2.2’de formüle edilmiştir:

$$V_{martensit} + V_{ferrit} = 1 \quad (2.1)$$

$$\sigma_T = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (2.2)$$

Denklemden  $\sigma_T$  toplam dayanımı,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_f$  martensit, ferrit fazının dayanımı  $V_m$ ,  $V_f$  ise fazların hacim oranlarını ifade etmektedir. DP çelikleri iyi başlangıç gerinim sertleşmesi oranlarına sahiptir. Deformasyon esnasında gerinim, sert martensit fazını çevreleyen ferrit fazında yoğunlaşarak yüksek sertleşme sağlar. Benzer dayanımdaki çeliklere göre daha çok uzama davranışı gösterirler ve yüksek çekme ve düşük akma dayanımına sahiptir. Bunların yanında DP çelikleri fırında sertleşerek akma dayanımını artırma özelliğine sahiptirler. DP çelikleri şekillendirme işlemlerinden sonra fırında yaşlandırma işlemiyle akma dayanımları yükseltilerek vurma ve kazalara karşı dirençleri artırılır [24].

## 2.2. DP ÇELİKLERİNİN OTOMOBİL UYGULAMALARI

Otomobil üretiminde malzeme seçimi hayati öneme sahiptir. Kullanım süreleri boyunca farklı dinamik yüklere maruz kalan otomobillerin bileşenleri de farklı gerilmelere maruz kaldıkları için kullanılan malzemenin yerinde dayanıma sahip olması otomobil güvenliğinin yanında hafifliği için de oldukça önemli bir husustur. Bu sebeple otomobil üreticileri yolcu güvenliğini esas alarak yolcu kompartımanını oluşturan yapıların üretiminde yüksek dayanımlı çelikleri kullanmayı tercih etmişlerdir.



Şekil 2.4. Otomobilde burkulma bölgeleri ve güvenli bölge olan yolcu kompartımanını [36].

Otomobillerde burkulma bölgesinde kullanılacak sac çeliklerde istenen özellikler:

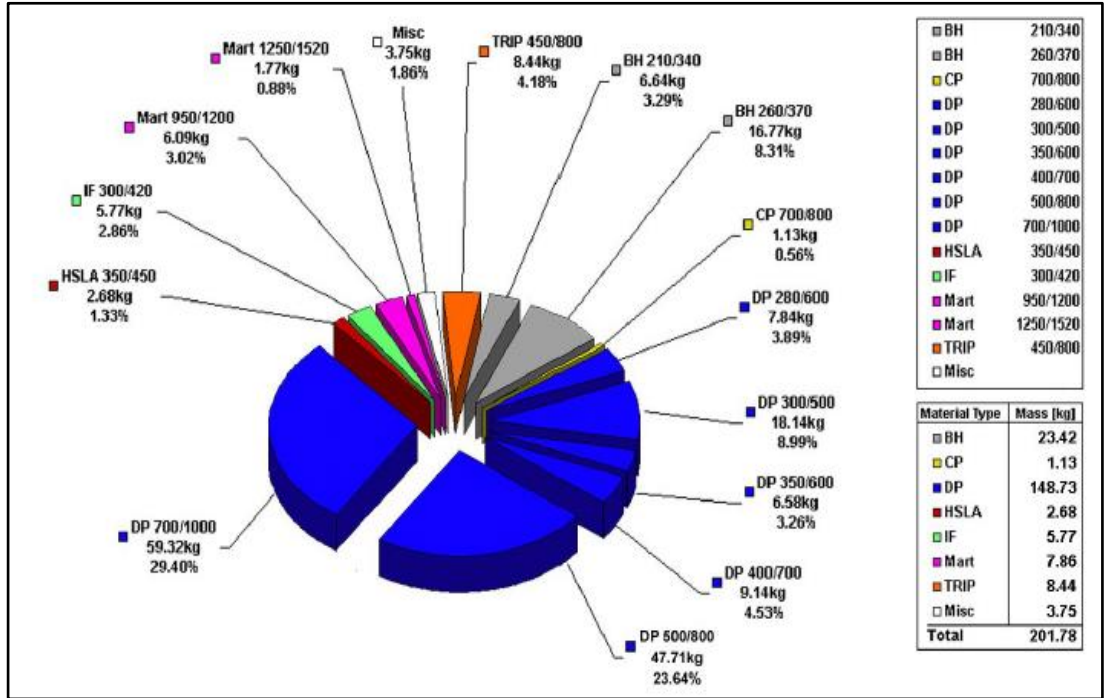
- Çarpışma esnasında birim mesafede maksimum enerjinin absorpsiyonu
- Yüksek sertleşme oranı
- Yüksek dayanım ve süneklik
- Yüksek tokluk

Yolcu kompartımanında kullanılacak sac çeliklerde istenen özellikler:

- Çarpışma esnasında minimum deformasyon
- Yüksek akma dayanımı
- Yüksek çekme dayanımı [36].

İki farklı kaza bölgesi için aranan özelliklerin çoğunu DP çeliklerinin karakteristik özellikleri ile uyuşması DP çeliklerinin otomobillerde en yaygın kullanılan AHSS türlerinden olmasının nedenlerindedir. Bu karakteristik özellikler şunlardır:

- Sertleştirme ile yüksek akma dayanımı sergilemesi
- Yüksek çekme dayanımına sahip olması
- Yüksek başlangıç gerinim sertleşme oranlarına sahip olması
- Uygun akma dayanımı-çekme dayanımı oranları
- Üniform uzama davranışı
- İyi yorulma direnci [34].



Şekil 2.5. C segmenti bir otomobilde kullanılan çelik türlerinin daire grafiği ile gösterimi [28].

## BÖLÜM 3

### OTOMOBİLLERDE NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI UYGULAMALARI

Otomobil gövdeleri, A, B, C sütunları, kapı ve kızak gibi ince sacdan şekillendirilmiş parçaların kaynak işlemi kullanılarak birleştirilmesi ile imal edilirler. Birleştirme için kullanılan en yaygın kaynak yöntemi ise nokta direnç kaynak yöntemidir. Bunun ana sebepleri, yüksek kaynaklama hızı, düşük termal çarpılma, diğer geleneksel kaynak işlemlerine göre hızlı işlem prosesi, otomasyona uygunluğu, ek dolgu malzemesine ihtiyaç duyulmaması ve operatör becerisi gerektirmemesi gibi üstün özelliklere ve avantajlara sahip olmasıdır. Nokta direnç kaynaklı birleştirmeler otomobil imalatında kullanılan bütün birleştirmelerin %85'ini teşkil etmektedir [37,38].

Standart bir otomobilde 3000-5000 adet arasında nokta direnç kaynaklı birleştirme bulunmaktadır. Otomobil parçaları, çarpışma esnasında yükü otomobil yapısı boyunca aktarılmasını nokta kaynak grupları sağlar. Bunun yanında darbe enerjisinin sönmelenmesi için bir katlanma bölgesi işlevini sağlarlar [39,40]. Bir otomobil yapısının, çarpışma durumlarında yolcu yaralanmasına karşı yeterli koruma sağlama yeteneği olan araç çarpışma kabiliyeti, nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin bütünlüğüne ve mekanik performansına bağlıdır [39,41,42]. Ayrıca nokta direnç kaynaklı birleştirmelerindeki kusurların araç kazalarındaki anahtar kusurlardan biri olarak tanımlanmıştır [43]. Nokta direnç kaynaklı birleştirmelerdeki kusurlar araç rijitliğini etkileyerek titreşimin etkilerini artırır [12]. Bu nedenle nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin kalitesi, performansı ve kırılma karakteristiği, araç dayanımı ve yolcu güvenliği için önemlidir.

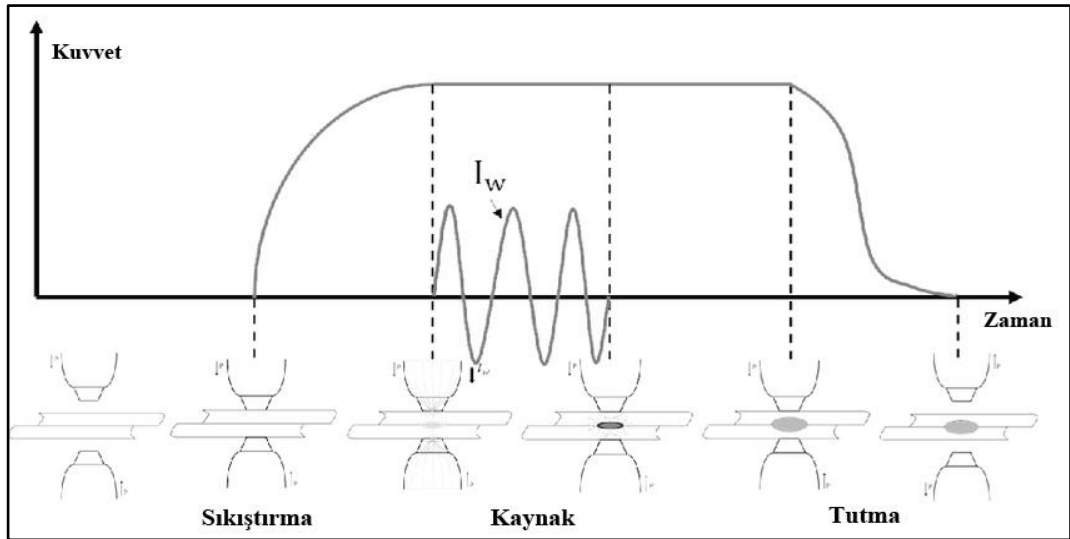
Nokta direnç kaynağının kalitesi 3 ana parametre olan kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot kuvvetine bağlıdır [44]. Bu 3 parametre arasındaki karmaşık ilişkinin yanında elektriksel ve fiziksel ve metalürjik özellikler arasındaki karmaşıklık



sebebiyle nokta direnç kaynak işleminin mekanizmasının ana hatlarıyla bilinmesi güvenilir kaynakların elde edilebilmesi için oldukça önemlidir.

### 3.1. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ MEKANİZMASI

Nokta direnç kaynağı, yüksek iletkenliğe sahip iki bakır elektrot arasındaki üst üste iki veya daha fazla saca basınç uygulanarak belirli periyotta düşük voltajlı yüksek akım geçirilmesi sonucu direnç sebebiyle akımın geçişinin zor olduğu temas noktasında oluşan yüksek ısıyla sac metallerin ergitilerek birleştirilmesi yöntemidir. Bu yöntem sıkıştırma, kaynatma ve tutma olmak üzere üç adımla uygulanır. Sıkıştırma adımında kaynak cihazı, pnömatik kollara bağlı elektrotlar vasıtasıyla aradaki saclara istenilen miktarda basınç uygular. Kaynatma adımında kaynak cihazı yüksek iletkenliğe sahip elektrotlar vasıtasıyla saclara belirlenen basınç altında akım uygular. Akımın uygulanması ile birlikte saclardan istenilen zaman kadar akım geçer ve direncin fazla olduğu sac aralarında ısı oluşumu meydana gelir. Üretilen ısıyla saclar arasında ergimiş metal havuzu (nugget) oluşur. Akımın kesilmesi ile tutma adımı başlar. Bu adımda ergimiş metal, elektrotların içinden geçen soğutma sıvısı ve çevrenin etkisiyle hızla soğuyarak katılaşıp böylece kaynak işlemi tamamlanmış olur [38,45].



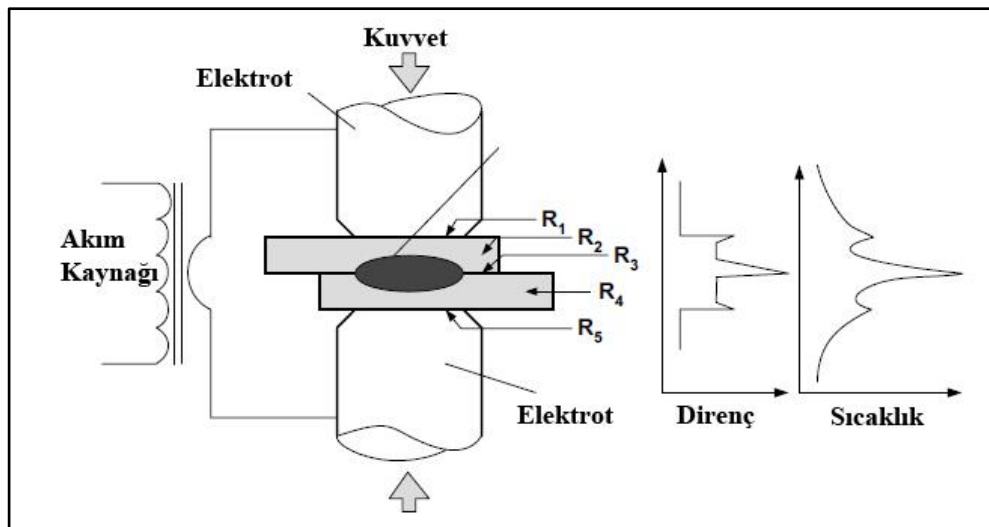
Şekil 3.1. Nokta direnç kaynağını oluşturan adımların gösterimi [46].

Nokta direnç kaynağı yönteminde en önemli unsurlar direnç ve öz dirençtir. Öz direnç malzemenin elektrik akımına gösterdiği direnci ifade eden ve geometriden bağımsız fiziksel bir özelliktir. Direnç ise malzemenin öz direncini ve geometrisini ifade eden fiziksel bir ifadedir. Direnç denklem 3.1’de ile ifade edilmiştir.

$$R = \rho l/A \quad (3.1)$$

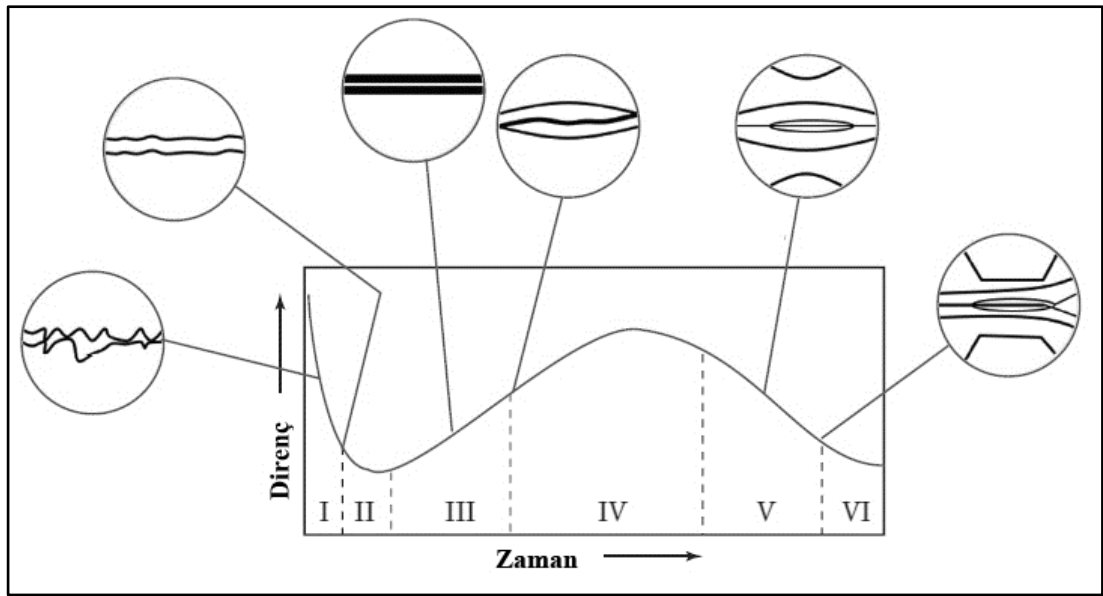
R: direnç,  $\rho$ : öz direnç, l: iletkenin uzunluğu, A: iletkenin kesit alanı

Nokta direnç kaynağında doğru yerde ısının üretilebilmesi için elektrot ve malzemelerin öz dirençleri oldukça önemlidir. Öz direncin azalmasıyla direnç de azalır böylece iletkenlik artar. İletkenliği fazla olan malzemelerden akım zorlanmadan geçtiği için alüminyum gibi iletkenliği fazla olan malzemelerin nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmesi zordur. Bir diğer önemli unsur da temas direncidir. Temas direnci kaynatılacak sacların yüzey koşullarına ve elektrot tarafından uygulanan kuvvete bağlıdır. Şekil 3.2’de nokta direnç kaynağı yöntemindeki temas noktaları gösterilmiştir. En fazla temas direncinin  $R_3$  bölgesinde oluşması ve  $R_1$  ve  $R_5$  noktalarındaki dirençten kaynaklanan ısı üretiminin fazla olmaması için elektrotların iletkenliğinin fazla olması istenir.  $R_3$  direnç bölgesi kaynak külçesi oluşumunu belirlediği için en önemli bölgedir [38,44].



Şekil 3.2. NDK işleminde direnç noktaları ve direnç-sıcaklık ilişkisinin gösterimi [38].

Kaynak esnasında ise direnç hızla değişir bu yüzden direnç dinamik kabul edilir. Kaliteli bir kaynak için NDK işlemi sırasında direnç izlenerek direnç grafiği oluşturulabilir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi başlangıçta yüzey oksitleri ve pürüzlü yüzeyler akıma karşı yüksek direnç oluşturduğundan direnç yüksektir. Yeterli basınç ve ısı ile oksitlerin parçalanması ve yüzey pürüzlülüğünün azalması direnci azaltır. Sonrasında oluşan ısı ile çevre metalin daha da ısınmasıyla direnç önemli ölçüde artar ve levhaların kitle direnci baskın hale gelir. Daha sonra kitle dirençli ısıtma ergimiş bir havuz oluşturacak kadar artar. Ergimiş havuzun büyümesiyle akımın aldığı yol genişler ve akım yoğunluğu azalır, direnç en yüksek değerine ulaşır ve düşer. Bunun yanında oluşan girintiler de direnci önemli ölçüde düşürebilir [44].



Şekil 3.3. Çeliğin nokta direnç kaynağı için tipik dinamik direnç eğrisi [44].

### 3.1.1. Kaynak Akımı ve Zamanı

Kaynak sırasında oluşan ısı, zaman ve akımın karesi ile doğru orantılıdır. Her ne kadar iki parametre ısı üretiminden sorumlu olsalar da ısı üretim hızı kaynak akımına bağlıdır. Çünkü artan zaman ile kaybedilen ısı miktarı artar. Üretilen ısı Eşitlik 3.2 ile ifade edilir.

$$H = I^2Rt$$

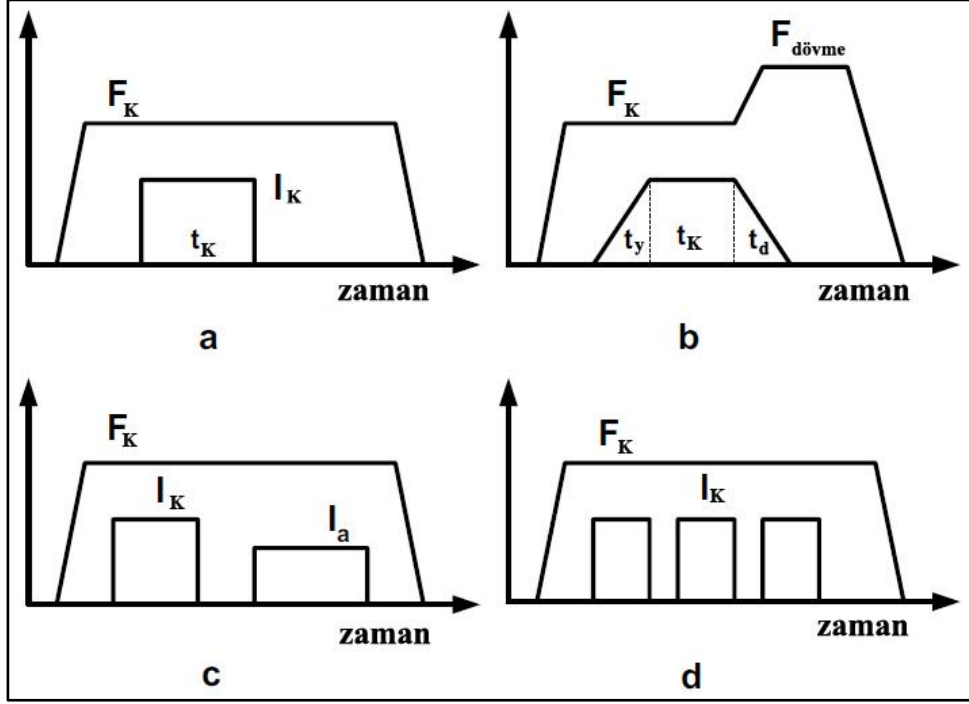
(3.2)

Burada H: üretilen ısı, I: uygulanan kaynak akımı, R: direnç, t: kaynak zamanı (periyot) olarak ifade edilmektedir.

Artan ısı kaybı ise ısıdan etkilenen bölge oluşumunu ve termal bozulmayı artırır. Herhangi bir metal için gereken akım seviyesi, elektrik ve termal dirençleri ile ters orantılıdır. Artan kaynak akımıyla kaynak boyutu da artar. Ancak artan kaynak akımıyla aşırı elektrot girintisini, sıçramayı ve elektrot ucu bozulmasını önlemek için kaynak zamanı azaltılmalıdır [38,44].

Kaynak akımı hafif alaşımlar için 20kA'dan 100kA'ya kadar değerlerde olabilirken, çeliklerde 4kA ve 20kA arası değerler yaygın olarak kullanılır. Kaynak zamanı ise malzemenin cinsine ve kaplamasına bağlıdır. Dickenson vd. çalışmalarında çinko kaplamalı çeliğin kaynağı için %50-100 oranında zaman artışı gerektiğini göstermişler [47]. Kaynak zamanının artırılması çinko kaplamanın kaynak bölgesinden uzaklaşmasına izin verir. Ayrıca kaynağın mekanik performansını geliştirir. Ancak aşırı kaynak zamanı sıçramaya, girintiye ve gözenekli yapı oluşumuna sebep olur. Sıçramalar malzeme için kullanılabilir kaynak akımının üst sınırını tanımlar [38].

Kaynak akımı çevrimleri malzemeye göre değişik şekillere sahip olabilir. Şekil 3.4-a'daki sabit akımlı bir çevrim en basit çevrim şeklidir ve yumuşak çelikler için uygundur. Soğuk çatlamaya karşı hassas yüksek dayanıma sahip çelikler için, yükselme süresi  $t_y$  ve düşme süresi  $t_d$  ile modüle edilmiş, kaynağın kademeli olarak ısıtılmasına ve soğutulmasına izin veren Şekil 3.4-b'deki gibi kaynak akımı kullanılabilir. Kaynakta kırılğan yapıların oluşması söz konusu olan malzemelerin kaynağında ise Şekil 3.4-c'deki gibi ek bir  $I_a$  akım çevrimi kaynağın tavlanması için faydalı olabilir. Kalın malzemelerin (3mm'den fazla) nokta kaynağında ise Şekil 3.5-d'deki gibi sıralı akım darbeleri kullanılabilir [38].



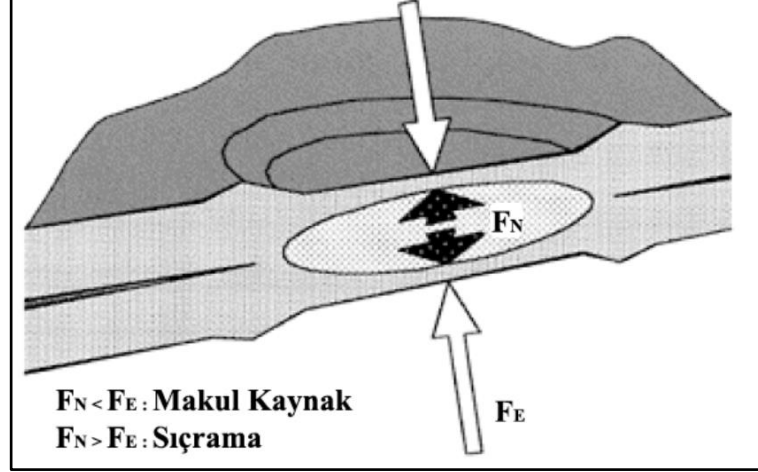
Şekil 3.4. Nokta direnç kaynağı için akım ve zaman diyagramları: kaynak akımı- $I_K$ , kaynak zamanı- $t_K$ , yükselme zamanı- $t_y$ , düşme zamanı- $t_d$ , kaynak kuvveti- $F_K$ , dövme kuvveti- $F_{dövme}$ , tavlama akımı- $I_a$ . [38].

### 3.1.2. Elektrot Kuvveti

Elektrot kuvvetinin artışı sac yüzeyindeki temas oranını artırdığı için direnci önemli ölçüde azaltır ve yüzey oksitlerinin ve kaplamanın bölgeden uzaklaşmasını sağlar. Bütün metallerin yüzeylerinde sacların bir araya getirildiğinde temas bölgesini sınırlayan pütürler bulunur. Sacları akım verildiğinde elektronlar birbirine temas eden bu pütürlerden geçmeye zorlanır. Böylece artan direnç sebebiyle akım yoğunluğunda bölgesel artışlar meydana gelir. Elektrot kuvvetinin artmasıyla direnci artıran bu pütürler giderilir. Bu ise üretilen ısının daha az olacağı manasına gelir. Elektrot kuvvetlerinin artırılması ile oksitlerin ve yüzey kirliliklerini giderilmesi temas direncini düşürmede aynı etkiyi gösterirler [38,44].

Bunların yanında elektrot kuvvetinin bir kısmı da ergimiş metalin sıvı basıncının dengelenmesi için harcanır [45]. Basıncın dengelenemediği durumlarda ise sıçrama olayı meydana gelir. Sıçrama olayının temel olarak iki mekanizması vardır. İlk mekanizma elektrot tarafından uygulanan basıncın yanında kaynak akımı ve kaynak

zamanının çok yüksek olduğu durumlarda meydana gelir. İkinci mekanizma ise yetersiz elektrot kuvvetinden kaynaklanır. Kaynak esnasında, kaynak metalinin basıncı elektrot kuvvetinden fazla olması durumunda genişlemenin devam etmesiyle sıçrama gerçekleşir.



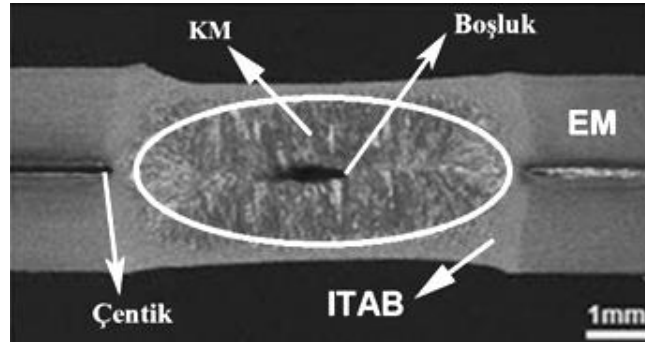
Şekil 3.5. Elektrot kuvveti ve kaynak basıncının sebep olduğu kuvvet arasındaki denge.  $F_N$ : kaynak metali sıvı basıncı kuvveti,  $F_E$ : elektrot kuvveti [45].

Yine de temas direncini yüksek tutmak için en ideal kuvvetin uygulanması gerekir. Düşük elektrot kuvvetlerinde yapılan kaynaklar temas direncindeki anormal değişikliklere sebep olacağından farklı kaynak özelliklerine sebep olur. Bununla birlikte sacların yüzeylerinde üretimden kaynaklı değişiklikler, düşük elektrot kuvvetlerinde tutarsız ısınmaya sebep olacağından elde edilen kaynak kaliteleri de tutarsız olacaktır. Elektrot kuvvetlerinin çok fazla olması durumunda ise elektrot girintileri, sıçramalar ve elektrot aşınması problemleri ortaya çıkacaktır. Bu etkiler doğrultusunda elektrot kuvveti malzemenin mukavemeti ve mikroyapı dahil birçok etkene bağlı olduğu sonucu ortaya çıkabilir [44].

### 3.2. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ FİZİKSEL VE METALÜRJİK ETKİLERİ

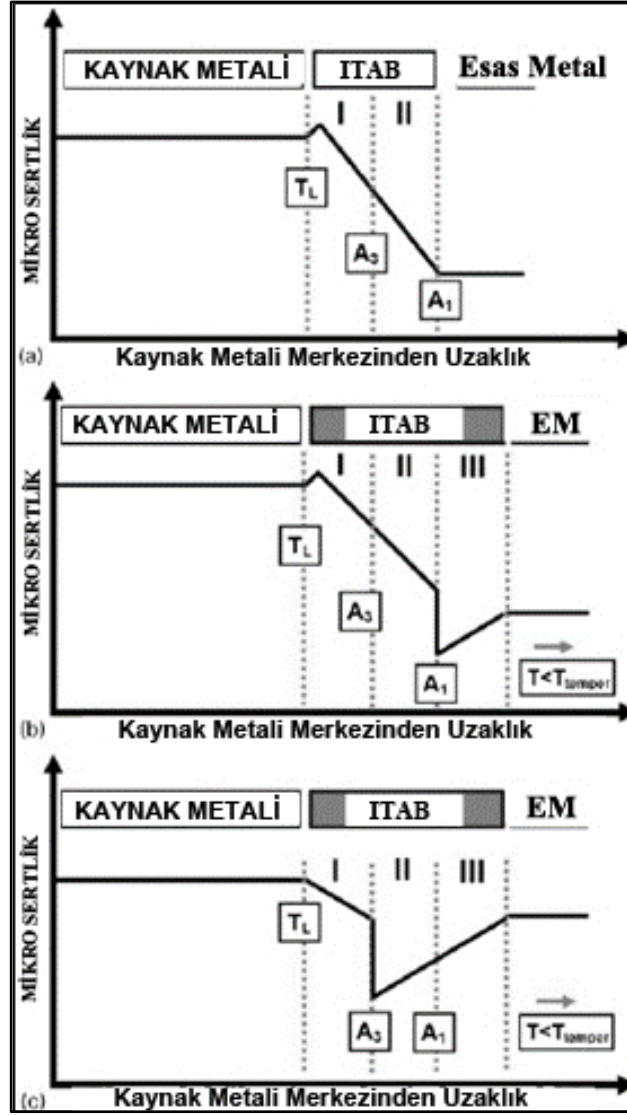
Kaynak işlemi metalürjik bir işlemdir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen kaynak işlemi kaynak bölgesinde ve çevresinde mikroyapısal değişikliklere sebep olduğu için parçaların yapısal homojenliği bozulur. Bu sebeple kaynak bölgesi ve çevresinde

ana metalin sahip olduğu mekanik özelliklerden farklı performanslar gözlemlenir. Nokta direnç kaynağı sonunda birleştirme bölgesinde üç ayrı makro yapısal bölüm vardır [48]. Bunlardan ilki kaynak işlemi esnasında eriyen ve yeniden katılaşılan bu sebeple döküm yapısı özelliğı gösteren kaynak bölgesidir. Sırasıyla kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot kuvveti gibi kaynak parametreleri tarafından yönetilen ısı girişı ile yönetilir. İki sac arasındaki kaynak bölgesinin boyuna yöndeki genişliğı olarak tanımlanan kaynak boyutu nokta direnç kaynağıının kalitesinin belirlenmesindeki en önemli faktördür [49–53]. İkincisi erimenin gözlemlenmediğı fakat oluşan ısı sebebiyle mikroyapısal değışikliklere maruz kaldığı ısıdan tesiri altındaki (ITAB) bölgedir. ITAB, kaynak performansını önemli ölçüde etkiler. ITAB boyutu kaynak bölgesinden çevreye verilen ısı kaybına bağılıdır. Isı tesiri altındaki bölgenin, nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin sünekliğini etkileyebileceğı rapor edilmiştir. Üçüncü bölge ise herhangi mikroyapısal değışikliğin gözlemlenmediğı ana metal bölgesidir.



Şekil 3.6. Nokta direnç kaynaklı birleştirmenin makroyapısı. KM-kaynak metal, ITAB-ısı tesiri altındaki bölge, EM-esas metal [54].

Nokta direnç kaynağı esnasındaki termal çevrimlerin sebep olduğı hızlı ısıtma ve soğutma, mikroyapıda önemli değışikliklere sebep olarak sertlik profilinde büyük farklılıklar oluşturabilir [38,45]. Şekil 3.7’de bölgelere göre farklı sertlik oranları gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Nokta direnç kaynağında farklı bölgelerin sertlikleri a)konvansiyonel ve DP çeliklerinin nokta direnç kaynağının sertlik profili, b) ITAB yumuşamasının görüldüğü DP780 ve DP980 çeliğinin nokta direnç kaynağı, c) martensitik çeliklerin nokta direnç kaynağı sertlik profili [39].

Karbon çeliklerinde esas metalin mikroyapısına ve kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak kaynak bölgesi ve ITAB'da önemli sertleşme olabilirken bazen ITAB'da yumuşama da olabilir. Nokta direnç kaynaklarının mikroyapı gelişimini ve sertlik karakteristiğinin etkileyen iki önemli unsur kimyasal kompozisyon ve soğuma oranıdır [39].

**Kimyasal kompozisyon:** Kaynak bölgesinin bileşimi, bileşime karışan esas metalin kimyasal bileşiminden ve bunların karışımından etkilenir. Farklı kalınlıkta veya



farklı metallerin kaynağında her sacın erime oranı farklıdır [55]. Saclardan daha yüksek elektrik direncine veya kalınlığa sahip olanı daha fazla elektriksel dirence sahip olmakla kaynak bölgesinin hacmine daha fazla katkı sağlar [45].

**Soğuma hızı:** Nokta direnç kaynağındaki ısıtma ve soğutma oranları konvansiyonel ark kaynağı ve lazer kaynağından önemli ölçüde fazladır [56]. Nokta direnç kaynağı esnasında ısı dağılımı iki mekanizma ile gerçekleşir. İlki su ile soğutulan elektrotlara olan aksel ısı dağılımıyla ikincisi ise nispeten daha soğuk esas metale radyal ısı dağılımıdır. Küçük boyutlardaki (kaynak metalinin çapı elektrot uç çapından az olan) nokta direnç kaynağı operasyonlarında aksel yönlü ısı dağılımı fazlayken büyük boyutlardaki (kaynak metali boyutunun elektrot uç çapından fazla olan) operasyonlarda ise radyal ısı kaybı baskındır [57,58]. Soğuma hızı aşağıdaki özelliklere bağlıdır [39]:

- Sac kalınlığı: Artan sac kalınlığı ile kaynak bölgesi çapı elektrot uç çapını geçer. Bu sebeple soğuma hızı azalır [59].
- Elektrot yüz kalınlığı ( $t_E$ ):  $t_E$  arttıkça su tarafından ısının uzaklaştırılması zorlaşacağından soğuma hızı azalır.
- Kaynak parametreleri:
  - Isı girdisini artarsa soğuma hızı azalır.
  - Tutma süresinin artması elektrotlar vasıtasıyla uzaklaştırılan ısı miktarını arttırdığı için soğuma hızı artar [59,60].
  - Darbeli kaynak akımlarının kullanılması soğuma hızını azaltabilir [61].

Bölümün başında da bahsedildiği üzere araç güvenilirliği için oldukça önemli olan birleştirme hasarlarının modu ve hasar mekanizması analizi, kaynak neticesinde oluşan birbirinden farklı mekanik özelliklere sahip heterojen bölgeler sebebiyle oldukça zorlaşır. Kaynak metali, ITAB ve esas metal arasındaki dayanım uyumsuzluğu en düşük dayanıma sahip bölgede gerinim konsantrasyonu oluşmasına sebep olur. Bunların yanında kaynak işleminden sonra ana metale kıyasla birleştirmelerin yük taşıma kapasitesini azaltan gerilme konsantrasyonlarına sebep olan birleşme bölgesi çentiği ve elektrot kuvvetinin sebep olduğu girintiler meydana

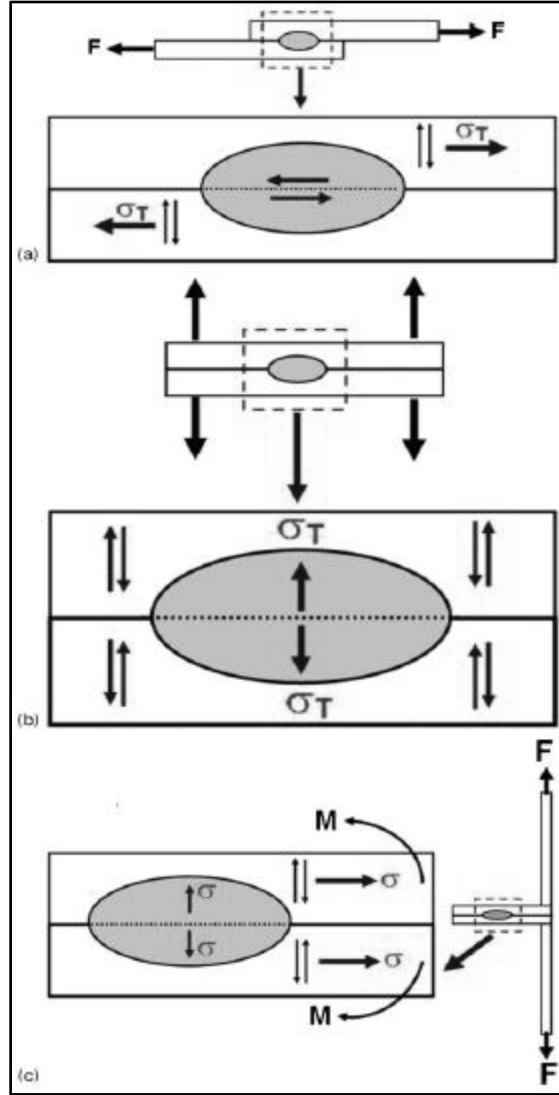
gelir [41,48]. Bir diğ er önemli kaynak kusuru ise kaynak esnasında oluşan boşluklardır. Kaynak boşluklarının oluşması iki mekanizma ile gerçekleşir. Bu mekanizmalar sıçrama ve kaynak metalinin soğumasıyla büzülmesi yoluyla gerçekleşir [58]. İlk mekanizma sıçrama sebebiyle kaynak bölgesinden atılan malzeme, ergimiş metalin katılaşmasıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluşmasına sebep olması şeklinde gerçekleşir. İkinci mekanizmada ise kaynak bölgesindeki ergimiş metalin soğumayla büzülmesi boşlukların oluşmasına sebep olur. Soğuma esnasında elektrot kuvveti yeterince yüksek olursa kaynakta boşluk veya gözeneklerin oluşumu önlenemez. Bu mekanizmanın gerçekleşme nedeni elektrotların kaynak havuzu tam katılaşmadan serbest bırakılmasıdır. Genellikle boşluklar katılaşmanın son olarak oluştuğu kısım olan kaynak bölgesinin merkezinde oluşmaktadır [62,63]. Kaynak bölgesindeki boşluklar birleştirmenin mukavemetini önemli ölçüde etkiler. Vijayan vd. [64] çinko kaplamalı DP çelikleriyle yaptıkları çalışmalarda nokta direnç kaynaklı DP çeliklerindeki boşluk boyutunun artmasıyla çapa ve sac kalınlığına bağı lı olarak çekme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir.

### **3.3. NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK PERFORMANSI**

Nokta direnç kaynakların mekanik performansı genel olarak statik/yarı statik, yorulma ve darbe koşulları altında değerlendirilir. Çoğu nokta kaynağı yorulma şartlarında hasara uğrasa da aşırı bozuk yol şartları sebebiyle kaynaklara aşırı yük uygulanması kaynakların hasara uğramasına sebep olabilir [4,65–70].

Otomobiller servis sürecinde nokta direnç kaynaklı birleştirmeleri, bitişik sacların birbiriyle bağı ntılı yer değı ştirmesi veya dönme hareketi sebebiyle hem kesme yüklemelerine hem de sacların birbirinde ayıran çekme yüklemelerine maruz kalmaktadır [71,72]. Buradan yola çıkılarak nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin mekanik davranışlarını değı rlendirmek için farklı yükleme koşullarında mekanik testler yapılmaktadır. Bunlardan en sık kullanılan testler; çekme-makaslama, çapraz çekme ve koç kabuğı testidir [45]. Şekil 3.8’de testlerin modelleri gösterilmektedir. Nokta kaynaklı birleştirme üzerinde çekme-makaslama testi, kaynak bölgesindeki

çekme yüklemesini, çapraz çekme testi, çekme yüklemesini, koç kabuğu testi ise eğilme momentinin oluşturduğu çekme yüklemesini oluşturmaktadır [43,71,73].

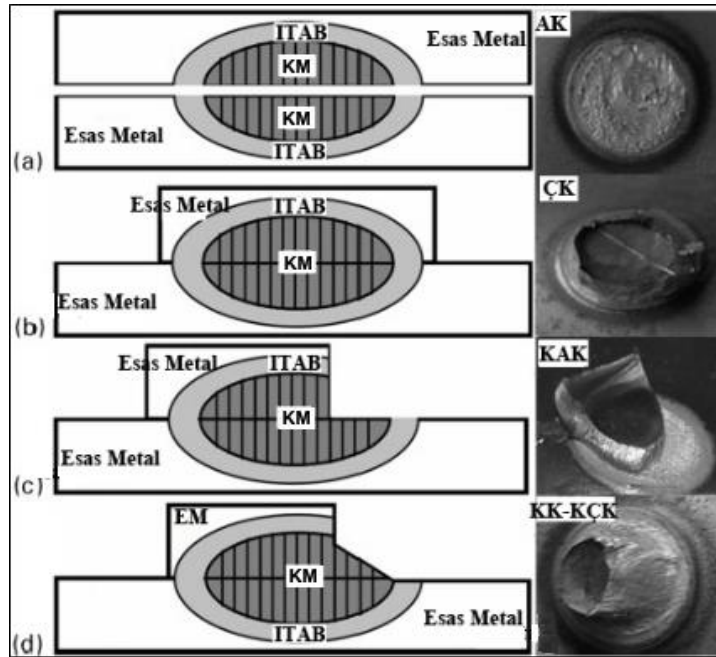


Şekil 3.8. Nokta direnç kaynağının mekanik test modelleri; a) çekme-makaslama testi b) çapraz çekme testi c) koç kabuğu testi [39].

### 3.4. Nokta Direnç Kaynaklı Birleştirmelerde Kırılma Tipleri

Bir nokta direnç kaynaklı birleştirmenin kırılma tipi mekanik özelliğinin niteliğini ifade eder [62,73–78]. Şekil 3.9’da mekanik testler neticesinde oluşan kırılma tipleri gösterilmiştir. Nokta direnç kaynaklı birleştirmelerde genelde 4 farklı kırılma tipi görülür [55,79,80].

- Arayüzey hasar tipinde kırılma kaynak bölgesi boyunca gerçekleşir. Araçların çarpışma dayanımları üzerine kötü etkileri olduğu düşünüldüğü için istenmeyen bir kırılma tipidir.
- Çekme tipi hasarda ise kırılma kaynak bölgesinden saca doğru gerçekleşir. Bu hasar tipinde çatlak, kaynak bölgesinin metalürjik ve geometrik özelliklerinin yanında yükleme koşullarına göre esas metal-ITAB veya kaynak metali-ITAB arasında başlayabilir. Çekme tipi hasar, görülmesi tercih edilen bir hasar tipidir.
- Kısmi hasar tipinde ise çatlak kaynak bölgesinde başladıktan sonra sac kalınlığı boyunca ilerler.
- Kısmi kalınlık-çekme hasar tipinde ise kaynak bölgesine ilerleyen eğimli çatlak sac kalınlığının belirli bir kısmından kopmaya sebep olur.



Şekil 3.9. Nokta kaynaklı birleştirmelerin mekanik testler sonucunda görülen hasar tipleri. a-arayüzey tipi hasar, b-çekme tipi hasar, c-kısmi arayüzey tipi hasar, d-kısmi kalınlık-çekme tipi hasar [39].

Kırılma tipleri nokta direnç kaynaklı birleştirmelerde yük taşıma kapasitesini ve enerji absorpsiyon kabiliyetini önemli ölçüde etkiler. Yüksek absorpsiyon ve plastik deformasyon özelliklerinden dolayı nokta direnç kaynaklı birleştirmelerde çekme tipi hasarın görülmesi tercih edilir [43,49,52]. Otomobil tasarımının için oldukça önemli

bir unsur olan çarpışma dayanımı, arayüzey kırılmalarında önemli ölçüde azalabilir [79]. Çekme tipi hasarın kalite kontrolü, aynı kaynağın daha yüksek kuvvetleri iletebildiğini böylece kaza esnasında bitişik komponentlerde daha şiddetli plastik deformasyona sebep olarak gerinim konsantrasyonunun dağıtılabileceğini göstermiştir [81]. Bu yüzden kaynak işlemlerinin çekme hasar tipinin oluşacağı kaynak parametrelerinde yapılması gerekmektedir. Bunun için malzemelerin nokta direnç kaynaklanabilme yeteneklerinin incelenmesi oldukça önemli bir husustur. Özellikle kaynak işlemleri neticesinde ITAB yumuşaması, kaynak bölgesinde sert ve kırılğan fazların oluşumu gibi karmaşık mikroyapısal dönüşümlerin gözlemlendiği AHSS çelikleri için bu husus oldukça önemlidir.

### **3.5. NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER**

Nokta kaynaklı birleştirmelerin mekanik yüklemelere karşı tepkisi kaynak bölgesi ve ITAB' ın mikroyapısal farklılıkları ve kaynağın neden olduğu geometrik gerilim konsantrasyonları sebebiyle ana metalden oldukça farklıdır. Nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımı ana metalin çekme dayanımına göre verimliliği %29-54 aralığında değişmektedir [82].

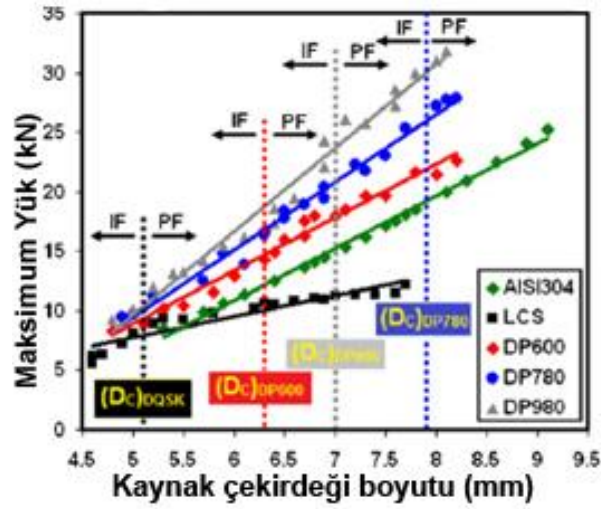
Nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin yarı statik yükleme koşullarında yük taşıma kapasitesi ve enerji absorpsiyon kabiliyeti bazı faktörlere bağlıdır.

#### **3.5.1. Yükleme Koşullarının Etkileri**

Nokta kaynaklı birleştirmelerin zirve yükü sırasıyla koç kabuğu, çapraz çekme ve çekme-makaslama yükleme koşullarıyla artar [50,71]. Yükleme açısı arttıkça yük taşıma kapasitesini azalttığı görülmüştür [83]. Bunların yanında birleştirmelerin enerji absorpsiyon kabiliyetleri sırasıyla koç kabuğu, çapraz çekme ve çekme-makaslama yükleme koşullarıyla arttığı gözlemlenmiştir [50]. Yük taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışındaki fark, farklı birleşme şekilleriyle değişen gerilme durumlarıyla ilgilidir. Çapraz çekme zirve yükünün, çekme-makaslama yüküne oranı birleştirmenin sünekliliğini gösteren süneklilik oranını ifade eder [39].

### 3.5.2. Kaynak Bölgesi Boyutunun Etkileri

Birleştirme alanını ifade eden kaynak bölgesi boyutu mekanik performansını etkileyen en önemli parametredir. Sıçramanın olmadığı bir kaynakta zirve yük ile enerji absorpsiyonunun kaynak bölgesi boyutu ile orantılı bir korelasyon olduğu gösterilmiştir. Şekil 3.10'da farklı malzemelerin kaynak bölgesi boyutuyla zirve yük arasındaki doğrusal ilişki gösterilmiştir [39].



Şekil 3.10. Kaynak boyutu ile maksimum yük arasındaki ilişki [39].

Yük taşıma kapasitesinin kaynak bölgesi boyutuna bağlılığı yükleme koşullarına ve hasar tipine bağlıdır. Yük taşıma kapasitesinin kaynak bölgesi boyutuna bağlılığı sırasıyla koç kabuğu, çapraz çekme ve çekme makaslama yükleme koşullarına doğru artmaktadır. Buna ek olarak arayüzey tipinde kırılan birleştirmelerde çekme tipinde kırılan birleştirmelere göre maksimum yük, kaynak bölgesi boyutuna çok daha fazla bağlıdır. Arayüzey hasar tipinde nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin maksimum yükü kaynak bölgesi boyutunun karesi ile orantılı iken, çekme hasar tipinde maksimum yük kaynak bölgesi boyutu ile doğru orantılıdır [39].

### 3.5.3. Sac Kalınlığının Etkileri

Kalın saclı birleştirmelerin tüm yükleme koşullarında daha yüksek zirve yük değeri gösterdiği gözlenmiştir [39].

### **3.5.4. Kırılma tiplerinin Etkileri**

Çekme tipi kırılma daha yüksek enerji absorpsiyon kabiliyeti ve zirve yükü göstermektedir. Ara yüzey tipi hasarın artışıyla birleştirme performansı da azalmaktadır [43,49,52,73].

### **3.5.5. Ana Metalin Çekme Dayanımının Etkileri**

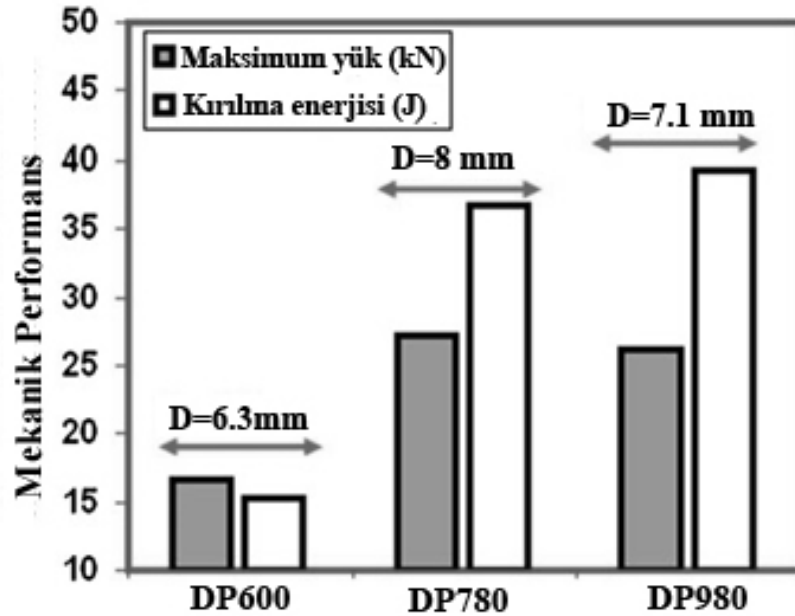
Ana metalin çekme dayanımının artmasıyla çekme makaslama dayanımı da orantılı olarak artmaktadır. Artan ana metal dayanımıyla çapraz çekme dayanımı en yüksek değere ulaştıktan sonra azalmaktadır. Bu durum arayüzey hasar tipine eğilimin artması ve ana metalin dayanımının artmasıyla kaynak bölgesi etrafındaki gerilim yoğunluğundaki artış ile ilişkilendirilmiştir [84]. Bu sebeple ana metalin çekme dayanımının artmasıyla süneklik oranı azalır. Buna ek olarak malzemenin karbon eşdeğeri çapraz çekme dayanımı azalmaktadır. Karbon eşdeğerlik  $[CE=C+Si/30+Mn/20+2P+4S]$  formülüne göre hesaplanan karbon eşdeğeri 0.24 değerinden fazla olursa arayüzey kırılması eğilimi dayanım ve süneklik ile ilişkili olarak azalır.

### **3.5.6. Kırılma Bölgesinin Mikroyapısı ve Sertliğinin Etkileri**

Nokta direnç kaynağının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ihmal edilen faktörlerden birisi de kırılma bölgesinin mikroyapısı ve mekanik özellikleridir. Kırılma bölgesinin dayanımının mekanik özellikler üzerindeki etkisi, kırılma tipine bağlıdır [43,75]. Arayüzey hasar tipinde, nokta direnç kaynağının performansı kaynak bölgesinin mekanik özelliklerine bağlıdır. Çekme makaslama yükleme tipinde zirve yük kaynak bölgesinin sertliği ile orantılıyken karbon çeliklerinin çapraz çekme yükleme tipinde zirve yük değeri kaynak bölgesi sertliği ile ters orantılı olan kaynak bölgesinin kırılma tokluğu ile orantılıdır.

Ana metal olsun kaynak bölgesi/ITAB ya da yumuşamış ITAB olsun çekme yüklemesi durumunda kırılmanın yeri nokta direnç kaynağının mekanik özelliklerini belirler. Nokta direnç kaynaklarında çekme tipi hasarlarda zirve yük ana metalin

çekme dayanımıyla doğru orantılıdır. Fakat ITAB yumuşaması durumunda, çekme hasar tipinde nokta direnç kaynağının mekanik özellikleri, yumuşamış ITAB'ın dayanımına bağlıdır. Şekil 3.12'de DP980 çeliğinin ana metalinin dayanımı DP780 çeliğinin ana metalinin dayanımına göre %25 daha dayanıklı olduğu halde 8 mm kaynak bölgesi boyutlarında DP780 ve DP980 çeliklerinin nokta direnç kaynaklarının zirve yükleri arasındaki fark %14'tür. Bu nedenle ITAB yumuşamasının bir sonucu olarak, birleştirmenin zirve yükü ana metalin dayanımı ile orantılı olarak artmaz. Her nasılsa ITAB yumuşaması kaynakların genel mekanik performansını arttırabilmektedir. Şekil 3.11'de çekme hasar tipinin ilk gözlemlendiği kaynak bölgesi boyutunda DP çeliklerinin zirve yükünü ve kırılma enerjisi karşılaştırılmıştır. Şekilde nokta direnç kaynaklı DP780 ve DP980 birleştirmelerinin geçiş yükleri birbiri ile hemen hemen aynıdır. Fakat DP980 düşük kaynak bölgesi çapına sahip olmasına rağmen daha çok hasar enerjisine sahiptir. Bu ise nokta direnç kaynaklı DP980 birleştirmesindeki ITAB yumuşamasına bağlanabilir. Böylece ITAB yumuşamasının daha küçük kaynak bölgesi çapında yük taşıma kapasitesini ve enerji absorpsiyon kapasitesini arttırarak nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin mekanik performansını geliştirdiği düşünülebilir [39].



Şekil 3.11. Çekme hasar tipinin ilk gözlemlendiği kaynak bölgesi boyutunda 1.5 mm kalınlığındaki farklı dayanıma sahip nokta direnç kaynaklı DP çeliklerinin maksimum yük ve kırılma enerjisi [39].



### 3.5.7. Nokta Direnç Kaynağı Parametrelerinin Etkileri

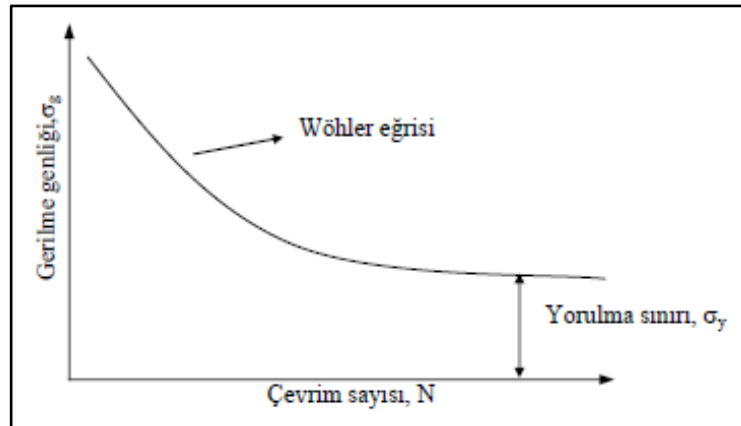
Yüksek performansa sahip nokta direnç kaynağı elde etmek için optimum ısı girdisi vardır. Kaynak akımı veya kaynak zamanının artırılması ile ısı girdisinin artırılması kaynak çapını arttırdığından dolayı kaynak performansını da artırır. Fakat ısı girdisinin kritik sınırın üstünde olması bazı nedenlerden dolayı kaynağın mekanik dayanımını kötü etkiler. Isı girdisinin çok fazla olması sıçramaya sebep olabilir. Sıçrama, birleştirmelerde boşluk oluşumuna ve derin elektrot girintilerinin oluşmasına sebep olur. Bu, birleştirmenin taşıma kapasitesini etkilemese de enerji absorpsiyon kabiliyetini azaltabilmektedir. Isı girdisinin bir diğer etkisi ise ITAB yumuşamasına sebebiyet vermesidir. ITAB yumuşamasındaki artış nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin mekanik performansını azaltabilir. ITAB yumuşamasının mekanizması, kaynatılacak olan malzemeye bağlıdır. Soğuk haddelenmiş çeliklerde yeniden kristalleştirme, ITAB yumuşamasına sebep olan gerinim sertleşmesinin etkilerini tamamen veya kısmen ortadan kaldırabilir. DP çeliklerinde, martensit veya beynit fazının temperlenmesi ITAB yumuşamasına sebep olmaktadır. Bunlardan yola çıkarak yüksek artan ısı girdisinin ITAB yumuşamasının artmasına sebebiyet verdiği anlaşılabilir [39].

## BÖLÜM 4

### NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE YORULMA

#### 4.1. YORULMA

Otomobillerin bileşenleri, yol şartlarına bağlı olarak tekerler vasıtasıyla titreşimli, artan-azalan yüklere maruz kalırlar. Bu yüklerin büyüklükleri düzenli veya düzensizdir. Bu yükleme şartları altında birleştirmelerde hasar, akma dayanımlarının altında gerçekleşebilir. Bu tür hasarlar yorulma hasarı olarak bilinmektedir. Bu konuyla ilgili ilk çalışmaların August Wöhler tarafından yapıldığı kabul edilmektedir [85]. August Wöhler bir malzemenin yorulma özelliklerini göstermek için S-N eğrisi kullanılabileceğini göstermiştir. Bu testte standart ölçülere uygun olarak hazırlanan numuneler, maksimum kuvvet oluşturacak genlik değerinden başlanarak  $10^6$  yorulma sınırı çevrimine ulaştığı genliğe kadar belli bir frekans değerinde tekrarlı kuvvetlere maruz bırakılmaktadır. Yorulma sınırı ortalama gerilme altında parçanın kırılmadan veya şekil değiştirmeden sonsuz çevrimde dayanabileceği gerilme genliğini ifade eder. Yaygın olarak bilinen ve kullanılan dönel eğmeli yorulma testi sonunda yorulma verilerinin S-N grafiği ile ifadesi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Malzemenin S-N eğrisinin örnek gösterimi.

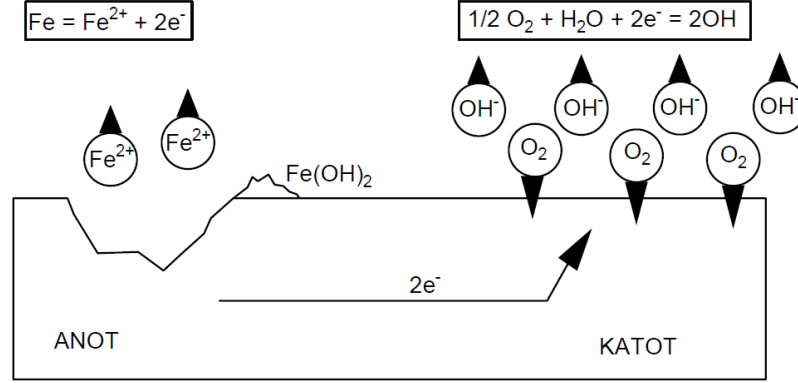
Tekrarlı elastik yüklemeler altındaki yapısal parçaların yüzeyindeki herhangi bir kusurun çevresinde meydana gelen gerilme yığılmalarının malzemenin akma dayanımını geçtiği bölgelerde çatlak meydana gelmektedir. Devam eden yüklemeler neticesinde çatlak bazı şartlara bağlı olarak malzeme kalınlığı boyunca belirli bir hızla ilerleyerek yapıda büyük hasarlara sebep olmaktadır. Çatlağın oluşması için geçen çevrim sayısı, yorulma çatlağı başlangıç ömrü ( $N_i$ ) olarak ifade edilir. Yorulma çatlağının ilerleyerek hasara sebep olmasına kadar ki çevrim sayısı ise çatlak ilerleme ömrü ( $N_p$ ) olarak ifade edilir. Netice olarak toplam yorulma ömrü bu iki çevrim sayısının toplamı kadardır ( $N_T=N_i+N_p$ ). Çatlak başlangıcı ve çatlak ilerleme dönemlerini ayrı ayrı düşünmek teknik olarak önemlidir, çünkü çeşitli koşulların çatlak başlama periyodu üzerinde büyük bir etkisi vardır, ancak çatlak büyüme periyodu üzerinde sınırlı bir etkisi vardır veya hiç etkisi yoktur. Çatlak başlangıcı yüzeye bağlı bir olgudur. Çatlak oluşup malzeme içine nüfuz ettiğinde ise yorulma malzeme dayanımına bağlı bir olgu haline gelmektedir [86].

Yukarıdaki paragrafta da bahsedildiği üzere yorulma çatlağının başlama ve ilerleme hızını etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bu iki olguyu kötü şekilde etkileyen en önemli faktör korozyon ortamının etkisidir. Korozyon bölümünde de bahsedildiği gibi korozyon sebebiyle yüzeylerde gerilme yığılmalarına sebep olan oyuklar meydana gelir. Bu sebeple  $N_i$  çevrim sayısı azalır. Korozyon ortam yorulma için oldukça önemli bir kavram olan yorulma sınırını düşürür. Korozyon sebebiyle yorulma sınırı altındaki bölgelerde de çatlaklar oluşabilir [86]. Bu sebeple korozyonun ve sebeplerinin anlaşılması oldukça önemlidir

## **4.2. KOROZYON**

Metaller doğada metalin en kararlı hali olan oksitler halinde bulunurlar ve kullanılabilir değerli hammaddeye dönüştürülebilmeleri için çok fazla enerji gerekmektedir. Ne var ki metaller, kararlı hali olan oksit yapıya geri dönüşme eğilimindedirler. Bu yüzden metaller, elektro kimyasal tepkimeler sonucu buldukları ortamın elemanları ile reaksiyona girerek önce iyon hale sonra da ortamdaki başka elementlerle kararlı bileşiklere dönüşerek bozunurlar. Bu yolla

metal kaybı gerçekleştiğinde oluşan bileşime korozyon ürünü adı verilirken bu olaya korozyon adı verilir [20,87].

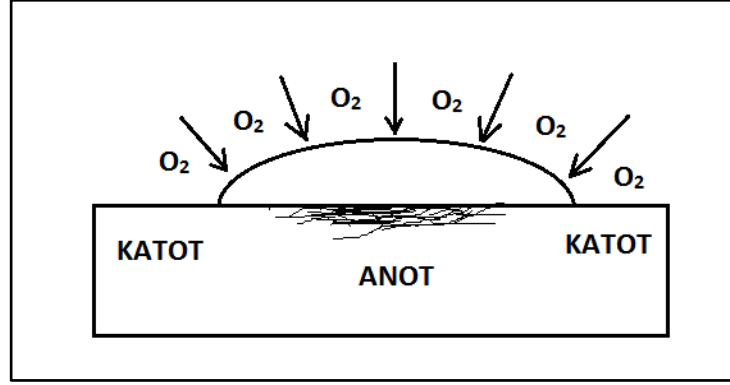


Şekil 4.2. Demir üzerinde oluşan anot ve katot reaksiyonları.

Korozyon olayları çoğunlukla elektrokimyasal reaksiyonlar ile yürür. Bu reaksiyonlar metal ve elektrolit arasında gerçekleşir. Elektrokimyasal korozyon, anotta oksidasyon ve katotta redüksiyon şeklinde aynı anda yürüyen iki elektro kimyasal reaksiyon şeklinde oluşur. Anot elektron verip çözünürken katot elektron alarak çözünmeye sebep olur [20].

Günlük hayatta kullandığımız piller de kontrollü olarak yürütülen bir elektrokimyasal tepkimeden açığa çıkan enerjiden faydalanmak için kullanılırlar. Üretilen bir birim enerjiye karşılık aynı zamanda bir miktar ürün yok olmaktadır. Korozyon olayı ise kontrolsüz olarak gerçekleşir. Bu yüzden korozyon olayı bir redoks tepkimesine de benzetilebilir [20].

En çok karşılaşılan korozyon olayı olarak metal yüzeyine düşmüş bir su damlası örnek gösterilebilir. Damla altında korozyon öncelikle damlanın altındaki her alanda başlar fakat zamanla damla içerisindeki çözülmüş oksijen ( $O_2$ ) biter ve atmosferden gelen oksijen damla içerisinde damla içerisinde çözünür. Su tabakasının ince olması sebebiyle damlanın kenar bölmelerine kolayca ulaşan oksijen damlanın merkezine ulaşması daha uzun sürdüğü için orta kısımlar anodik, kenar kısımlar katodik davranış göstermeye başlar. Böylece orta kısımlarda korozyon meydana gelir [20].



Şekil 4.3. Su damlasının sebep olduğu korozyon.

Korozyon, değerli olan hammaddeyi kullanılmaz hale getirerek, üretimi sırasında harcanan enerjinin boşa gitmesine sebep olduğu için önlenmesi gerekir. Bununla beraber korozyon işletimin durmasına, ürün kaybına ve kirlenmeye sebep olmakla beraber sistemlerde güvenliği önemli derecelerde azalttığı için insan sağlığını da tehdit eder. Her ne kadar korozyonu önlemek için birçok yöntem bulunsa da metalin bozunmaya olan eğilimi sebebiyle bu yöntemler korozyon olayını durduramaz ama önemli miktarlarda yavaşlatılarak parçaların ömrü uzatılabilir. Bunun yanında korunma yöntemlerinin etkin kullanımı için uygun tasarımların yapılması gerekir. Bunun için korozyon tiplerinin ve farklarının iyi bilinmesi gereklidir.

#### 4.2.1. Korozyon Çeşitleri

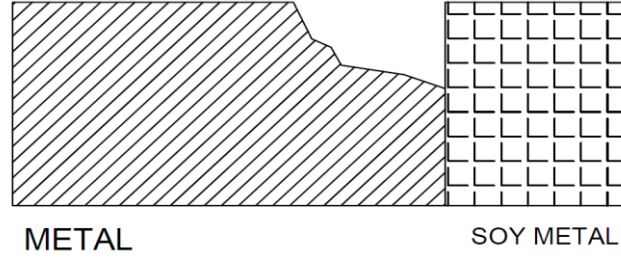
##### 4.2.1.1. Genel Korozyon

Metal yüzeyinin tamamında eşit ölçülerde oksidasyon meydana gelmesiyle yürüyen korozyon çeşididir. Gelişimi yerel mikro hücrelerin oluşumu ile olur. Sık karşılaşılan ve diğer korozyon türlerine nazaran fazla tehlike oluşturmayan bir korozyon türüdür. Metalin her yerinde eşit şekilde meydana geldiği için metal kalınlığı da eşit şekilde azalır. Bu nedenle kütle kaybının ölçülmesi ile korozyon hızı, (mm/yıl) ya da ( $\text{mg}/\text{dm}^3 \cdot \text{gün}$ ) olarak tespit edilip metalin ömrü belirlenip gerekli önlemlerin alınması kolaydır.

Genel korozyon dışındaki diğer korozyon türlerinde oksidasyon, yüzeyde bazı yerel noktalarda eşit olmaksızın farklı hızlara ulaşabilir. Bu sebeple metalde delinme veya kırılmalar gerçekleşebilir [20,87].

#### 4.2.1.2. Galvanik Korozyon

Farklı elektrokimyasal potansiyele sahip metallerin teması ile meydana gelen korozyon türüdür. Farklı metallerin teması ile metallerden daha soy olanı katot, daha aktif olanı ise anot olur. Anot olan metal korozyona uğrar.



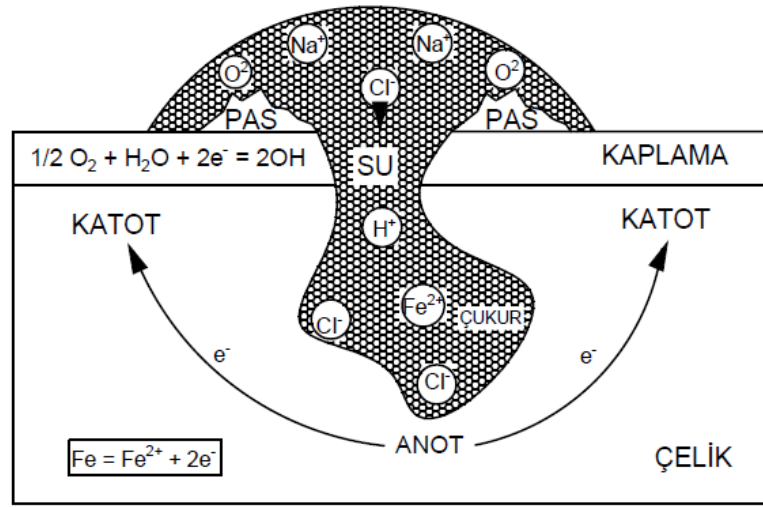
Şekil 4.4 Galvanik korozyon sebebiyle metal kaybı.

Galvanik korozyona uygun tasarımların yapılabilmesi için galvanik seri tabloları hazırlanmıştır. Bu tabloda daha yukarıda olan metaller daha aşağıda bulunan metallere göre anot davranışı göstererek korozyona uğrarlar. Bunların yanında aynı metalin elektrolitin farklı konsantrasyonundaki bölgelerinde potansiyel fark oluşması ile aynı metal üzerinde galvanik hücre oluşabilir. Örnek olarak su içine daldırılmış olan bir demir çubuğun bir bölgesi diğer bölgesinden farklı olarak oksijen konsantrasyonuna maruz kalması iki bölge arasında oksijen pili oluşturur. Bu en çok denizel bölgelerde bir kısmı deniz altında bir kısmı deniz seviyesinin üzerinde bulunan kazıklarda görülür. Kazığın su yüzeyinde sürekli deniz suyu ile ıslanan bölgesi bol oksijen aldığı için katot olurken su seviyesinin altında kalan bölge az oksijen gördüğü için anot olarak korozyona uğrar [87].

Galvanik korozyonun önüne geçmek için bağlantılarda aynı tür metal bağlantısı kullanılmalı veya seride olabildiğince aktifliği birbirine yakın metaller seçilmeli. Bir diğer yöntem ise iki metal arasına yalıtkan veya kurban metal de yerleştirilerek galvanik korozyonunun neden olacağı zararın önüne geçilebilir [87].

### 4.2.1.3. Çukur Korozyonu

Metalin bazı noktalarında çukur formlar oluşmasına sebep olan çukurcuk korozyonu, tespit edilmesinin zor olması ve ani hasarlara sebep olması sebebiyle en tehlikeli korozyon türüdür. Genellikle yüzeyinde katodik kaplamaların veya pasif oksit tabakaların bulunduğu yüzeylerde görülür. Bu yüzeylerin herhangi şekilde hasar almasıyla hasar alan bölge anot, çevre bölgeler katot olacağından anot bölge derinlere doğru tahrip olarak çukur formlar meydana gelir ve zamanla metalin delinmesine yol açar [87].



Şekil 4.5. Çukur korozyonunda oyuk oluşumu.

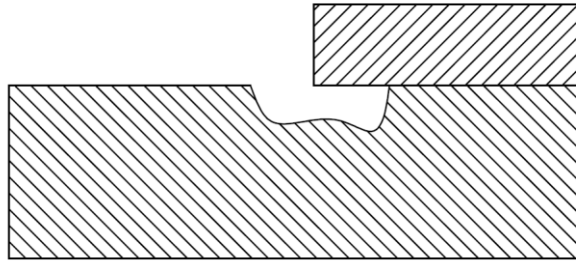
Şekil 4.5'te Na<sup>+</sup> ve Cl<sup>-</sup> iyonları içeren su içerisindeki korozyon gösterilmektedir. Anodik bölgede metal çözülürken, çevre yüzeylerde oksijen redüksiyonu meydana gelir. Anodik reaksiyon sonucu ortaya çıkan metal iyonları pozitif yükleri artırır. Bu ise klorür iyonlarının çukur bölgesine doğru hareket etmesine neden olur böylece metal klorür ve hidrojen iyonu konsantrasyonunda artışa sebep olarak çukurda pH derecesini yükseltir ve korozyonun hızını artırır. Fakat zamanla metal hidroksitlerinin çukurun ağzını kapatması, Cl<sup>-</sup> iyonlarının çukur içinde metale ulaşmasının zorlaştırması sebebiyle korozyon hızı azalır. Bu yüzden elektrolitin hızlı aktığı bölgelerde çukur korozyonu gerçekleşmez. Çukur korozyonu genelde akışın azaldığı bölgelerde görülür [20,87].

Metalin cinsi çukur korozyonu oluşumunda oldukça önemlidir. Pasifleşme özelliği gösteren metaller çukur korozyonuna daha meyillidir. Pasifleşme, anot bölge yüzeyinde oluşan oksit ya da hidroksit çökeltilerinin kapaticılığı ve kararlılığı sonucu anodik akımın geçişini zorlaştıran pasif bir oksit örtü oluşturmasıdır. Fakat anodik potansiyelin çok arttığı korozyif ortamlarda yüzeydeki oksit oksijen çıkararak parçalanmaya başlar. Bu nedenle oksit tabakanın kaplayıcı özelliği kaybolur. Yüzeyin açılan bölgelerinde çukur korozyonu meydana gelir. Bu yüzden durgun korozyif ortamlarda paslanmaz çelik gibi pasifleşme özelliği olan metaller yerine düşük karbonlu metallerin kullanılması gerekir [87].

Çukur korozyonundan korunmak için pasifleşme özelliği olan veya korozyon ürünleri suda az çözünen malzemelerin kullanılmaması gerekir. Katodik koruma uygulanarak çukur korozyonu oluşması tam olarak engellenebilir. Metal yüzeyini pasifleştiren inhibitör kullanılarak da çukur korozyonunun önüne geçilebilir. Fakat inhibitör dozajının uygun olarak ayarlanmış olması gerekir yoksa daha şiddetli korozyon ile karşılaşılabilir [87].

#### **4.2.1.4. Aralık Korozyonu**

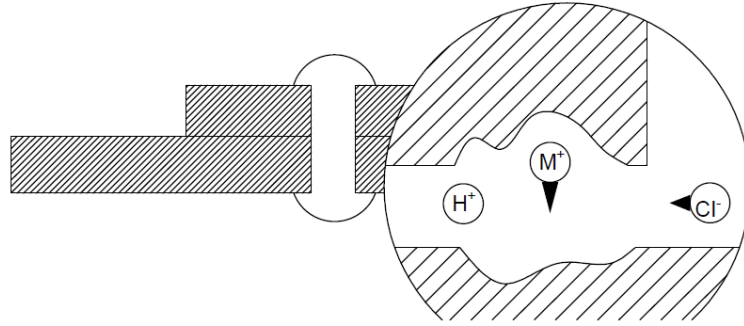
Metal yüzeyinde bulunan çatlaklar, dar aralıklar veya birleştirilmiş iki levha arasında kalan levhalar elektrolitin hareketlerinden kolay etkilenmedikleri için aralıklar durgun bölgeler oluşur. Bu alanlarda korozyon diğer alanlara göre daha hızlıdır. Bunun yanında uzun süre metal cisimlerin üzerinde hareketsiz duran cisimlerde aralık korozyonuna sebep olur [20,87].



Şekil 4.6. Aralık korozyonu sebebiyle metal kaybı.

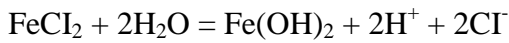


Aralık korozyonu gerçekleşme mekanizması, elektrolit akışının çok yavaş olduğu bölgelerde oksijen konsantrasyonunun diğer bölgelerdekine nazaran daha az olması sebebiyle durgun bölge ve çevre arasında konsantrasyon bölgesi oluşması şeklindedir. Böylece aralık bölgeler anot olurken çevre bölgeler katot olur. Özellikle perçinle birleştirilmiş iki çelik metal parça arasında sıklıkla karşılaşılan bir durumdur [87].



Şekil 4.7. Perçinli bağlantılarda aralık korozyonunun meydana gelmesi.

Başta korozyon hem aralıkta hem çevre bölgelerde aynı hızda meydana gelirken aralık bölgede oksijenin zamanla tükenmesi ve aralık bölgeye oksijenin ulaşmasının imkansızken çevre bölgelerde oksijen yenilenir. Böylece çevre bölgelerde oksijen reaksiyonları olurken çatlakta çözünmenin devam ettiği görülür. Çözünmenin devam etmesiyle çatlak içinde  $Fe^{++}$  iyon konsantrasyonunun artması polar etki sebebiyle çatlak içerisinde  $Cl^-$  iyonlarının artmasına sebep olur. Netice de çatlak içinde aşağıdaki tepkime ile demir hidroksiti oluşturan  $FeCl_2$  oluşur [87].

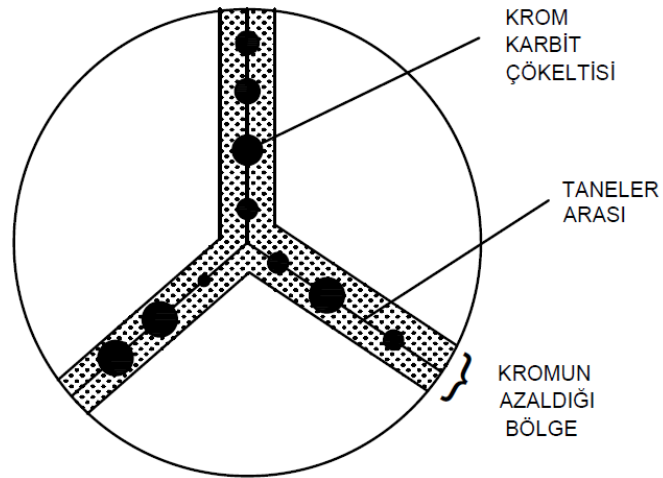


Bu tepkime ile hidroksitin çatlak içine çökmesi sonucu çatlak içerisinde HCl konsantrasyonu artmasıyla korozyon hızında artış gözlemlenir. Aralık korozyonunun önüne geçmek için dar aralıkların önlenmesi gerekir. Aralıklar için yalıtkan contaların kullanılması ya da aralık bölgenin kaynakla doldurulması aralık korozyonunun önlenmesini sağlar [87,88].

#### 4.2.1.5. Taneler Arası Korozyon

Metaller sınırlar ile ayrılan kristal yapılardan meydana gelirler. Herhangi bir ergitip soğutma işlemi sonrası bu sınırlarda meydana gelen bozukluklar ya da alaşım çökelmeleri, kristal sınırları korozyona karşı güçsüz kılar. Örnek olarak alüminyum içinde az miktarda demir bulunması taneler arasında korozyonun meydana gelmesine sebep olur. Bunun yanında paslanmaz çeliklerde tane sınırlarında krom miktarlarının az olması sebebiyle taneler arası korozyona karşı dayanıksızdır [87].

Paslanmaz çeliklerde korozyon direncini artırdığı için çeliğin kimyasal kompozisyonunda en az %12 oranında krom ihtiva etmesi gerekir. Paslanmaz çeliğin 500-800°C'lere kadar ısıtılması durumunda, paslanmaz çeliğin bileşimindeki kromlar, karbonlar ile birleşerek krom karbür ( $Cr_{23}C_6$ ) olarak tane sınırlarında çöklerler. Tane sınırlarında kromların çökmesi sebebiyle tane sınırları korozyona karşı duyarlı hale gelir [87].



Şekil 4.8. Taneler arasında krom karbit oluşumuna bağlı krom eksilmesi.

Özellikle paslanmaz çeliklerde kaynak prosesleri esnasındaki yüksek sıcaklıkların uzun süre uygulanması kaynak çevresinde krom karbürlerin çökmesine neden olduğu için kaynak çürütmesine sebep olur. Bu durumlarda malzemenin kalınlığı önemlidir. Çünkü ince levhalarda kaynak süresinin kısa, sıcaklık kaybının yüksek olması krom karbür bileşiğinin oluşması ve taneler arasında birikmesi için yeterli

koşulları sağlamaz böylece kaynak çürümesi de görülmez. Bu nedenle çeliklerin elektrikle kaynak edilmeleri daha uygun olur [87].

Paslanmaz çeliklerde taneler arası korozyonun engellenmesi için en çok kullanılan yöntem ısıtılma işlemi yapılmasıdır. Bunun için paslanmaz çelik 1100°C'ye kadar ısıtıldıktan sonra su veya yağ içine daldırılarak soğutulur. Ani soğutmayla alaşım içindeki çözelti halindeki krom karbür homojen olarak dağıtılmış olur [87].

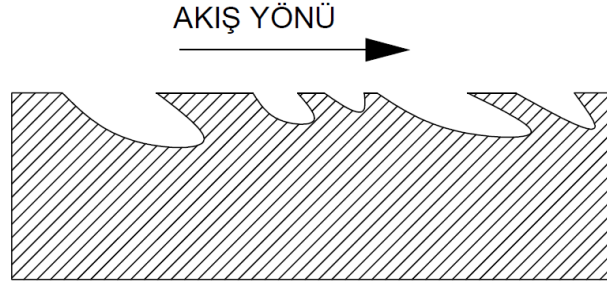
Taneler arası korozyonun önlenmesi için bir diğer yöntem ise paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonuna az miktarda titanyum ve kolombiyum gibi stabilizörlerin eklenmesidir. Bu stabilizörler, karbonu kromdan daha sağlam bağlayarak kromun çökmesini engellerler [87].

#### **4.2.1.6. Seçimli Korozyon**

Bir alaşım içinde bulunan bileşenlerden birinin korozyona uğrayarak uzaklaşmasıdır. Dezinfikasyon olarak da bilinir. Bu korozyon türüne en iyi örnek, pirinç alaşımı içinde bulunan çinkonun bakırdan önce korozyona uğrayarak uzaklaşmasıdır. Çinkonun korozyonundan önce pirinç sarı renkliyken korozyondan sonra bakır kırmızısı rengine dönüşür. Seçimli korozyonu, bileşenleri herhangi bir şekilde dış ortamdan yalıtarak tüm bileşeni sistem içinde katot halinde kalması sağlanarak önlenir [87].

#### **4.2.1.7. Erozyonlu Korozyon**

Korozif çözeltinin hızla aktığı durumlarda korozyonun yanında erozyon olayı da meydana gelir. Bu durumda hızlı akan akışkan malzemenin yüzeyindeki ürünün yüzeyden ayrılmasına sebep olacağından korozyon hızlanarak devam eder. Erozyonlu korozyonda malzemenin yüzeyi Şekil 4.9'da görüldüğü gibi olacaktır [87]



Şekil 4.9. Yüksek hızlı akışa bağlı olarak korozyon ile metal kaybının gerçekleşmesi.

Pasifleşme özelliği bulunan metaller hızlı korozif akışkanların bulunduğu ortamlarda erozyonlu korozyona uğramaya yatkındır. Hızlı akışkanın metal yüzeyindeki pasif filmin ayrılmasına sebep olacağından korozyon önlenemez ve korumasız kalan bölgeler şiddetle korozyona uğrar [87].

Erozyonlu korozyonun önlenmesinde en önemli parametre akışkan hızıdır. Akışkan hızının artmasıyla korozyonun hızı da artacaktır. Korozyon sonucu oluşan küçük bir oyuk ise türbülans etkisiyle erozyonlu korozyon olayını başlatır. Bu yüzden sistemdeki akışın laminar rejimde kalması zorunludur. Akış hızının çelik boru içerisinde 1,2 m/s, bakır borular içerisinde 1,5 m/s ve paslanmaz çelik borular içerisinde 7,5-9 m/s hızlarını geçmemesi gerekir. Bunun yanında bu tür yüksek akışkanlı sistemlerde korozyon dayanıklılığı yüksek bir malzemenin seçilmesi, sıcaklığın azaltılması veya katodik korumanın yapılması ile erozyonlu korozyonun önüne geçilebilir [87].

#### 4.2.1.8. Aşınmalı Korozyon

Birbiri ile sürtünme yoluyla temas eden bölgeleri aşınması ile yürüyen korozyon olaylarına aşınmalı korozyon denir. Aşınmalı korozyon konusunda iki değişik teori vardır. İlki, sürtünen iki metalin yüzeyinde küçük metal parçacıkları kopar. Kopan metal parçacıkları kolayca oksitlenerek korozyona uğrar. İkincisi, metal yüzeyi oksijen ile temas ettiğinde yüzeyi kaplayan ince oksit tabaka oluşur. Sürtünme sonucu yüzeydeki oksit tabaka yüzeyden uzaklaşır böylece yüzey parlak görünüm kazanır [87].

Aşınmalı korozyonu etkileyen altı etken vardır. Bunlar, temas kuvveti, genlik, frekans, bağıl nem, sıcaklık ve çevrim sayısıdır [88]. Kontak kuvveti genlik azalmadıkça aşınmayla artacaktır. Kuru hava ortamındaki aşınma miktarı doymuş havadakine göre daha fazla olur. Genlik için aşınmanın oluşmayacağı herhangi bir değer yoktur ancak genliğin artmasıyla aşınma ve malzeme kaybı artar. Yağlanmamış parçaların sürtünmesi ve vibrasyonu sonucu yüzeylerde aşınma meydana gelir. Aşınma sonucu korozyon ürünleri yüzeyden ile uzaklaşır. Bu sebeple yüzeylerde korozyon hızı artar. Bunu önlemek için yüzeyler yağlanmalı ya da birbirine tutturularak hareketleri önlenmelidir. Bunlarla beraber aşınma yorulma ile beraber görülebilir. Aşınma ve yorulma etkileri beraber malzeme dayanımını on kat azaltabilirler [87].

#### 4.2.1.9. Stres Korozyonu

Statik yükler altındaki bir metal korozyon yükleri altında ise daha erken hasar uğrar. Normalde korozyon ürünleri yüzeyde koruyucu bir tabaka oluştururken stres altındayken bu mümkün olmaz. Bu nedenle metal yüzeyindeki gerilme sebebiyle oluşan bir çukur veya çatlak, kolay korozyona uğraması sebebiyle daha erken hasara uğrar [20,87].



Şekil 4.10. Korozyif ortamda statik kuvvet ile çatlak oluşumu ve ilerlemesi.

Stres korozyonun en önemli stres tipi çekme stresidir. Kırılma için gerekli olan gerilme direk olarak uygulanabilirken, soğuk şekillendirme, kaynak, talaşlı imalat ve taşlama gibi işlemler sebebiyle oluşan kalıntı gerilmelerle de oluşabilir. Çukur tipi korozyon veya taneler arası korozyon bu gerilmelerin etkisini artırır. Bu gerilmeler sonucu bu bölgelerde çatlaklar oluşur. Korozyif ortam da stres korozyonunun başlamasına yardımcı olur. Stres altındayken, bakır ve bakır alaşımları amonyaklı

ortamlarda, paslanmaz çelikler klorürlü ortamlarda, sade karbonlu çelikler ise nitratlı çözeltiler içerisinde stres korozyonu daha şiddetli gerçekleşir [87].

Stres korozyonunun önüne geçilmesi için malzeme üzerindeki çekme gerilmesinin kaldırılması, korozif ortamın ortadan kaldırılması veya her iki faktörün de giderilmesi uygun olur. Bunun yanında Takakuwa ve Soyama yaptıkları çalışmalarda östenitik çeliğin yüzeylerine farklı yüzey bitirme işlemleriyle farklı değerlerde kalıntı gerilmeler oluşturmuşlar ve malzemelerin korozif davranışını incelemişler. İncelemeleri sonucu östenitik paslanmaz çeliğinin yüzeyinde oluşturulan basma gerilmelerinin çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirmesinin yanı sıra korozyon direncini de artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmadan yola çıkılarak çekme stresi oluşturan kalıntı gerilmeler stres korozyonu ihtimalini artırabilirler [89].

#### **4.2.1.10. Hidrojen Gevrekliği**

Korozyon, Katodik koruma, asidik yüzey temizleme veya ıslak kaynak sonucu ortaya çıkan hidrojenler, metal yüzeyine nüfuz ederler. Nüfuz ettikten sonra hidrojen atomları molekül oluşturarak hacim artışına sebep olurlar. Hacim artışı ise metalde gerilmeler oluşturarak çatlak oluşmasına sebep olur [87].

Doğal olarak tek hidrojen atomunun girebildiği aralıktan iki atomlu gaz molekülü çıkamaz. Boşluklarda bu şekilde oluşarak biriken hidrojen gazı basıncın artmasına sebep olur ve bir süre sonra artan basıncın etkisiyle oluşan patlama yüzeyin açılmasına neden olur. Metali korozif ortamın etkilerinden koruyan pasif film bu yüzey olayıyla açılır ve açılan bölgede korozyon başlar ve hızlanarak devam eder [20].

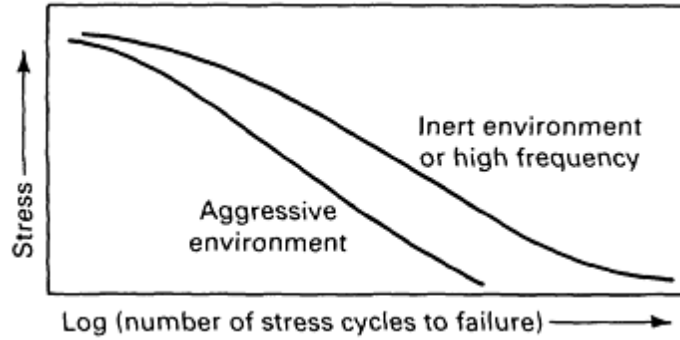
Hidrojen gevrekliği, genellikle yüksek dayanımlı, HMK yapılı malzemelerde görülür. HMK yapıya sahip metaller kristal ağı içine yabancı atomlar veya iyonlar nüfuz edebilir. Bu tür yapılar ise kırılabilirliğin artmasına sebep olurlar. Çelik yapının içine hidrojen atomlarının girmesi kırılabilirliği artırır. Hidrojenin nüfusu ile paslanmaz çeliklerde, nikel, titanyum, alüminyum, alaşımlarda uzama ve kesit daralmasında azalma gözlemlenir. Hidrojenin neden olduğu kırıklar genelde taneler arasında ilerler [87,88].

Hidrojen gevrekliğini önlemek için metaller 100-150°C sıcaklıklara ısıtılarak hidrojenin metalden uzaklaşması sağlanabilir. Çeliklerin yapısına eklenen nikel ve molibden hidrojen kırılma dayanıklılığına karşı dayanıklılığı artırabilir. Islak halde kaynak işlemi yapılmamalı ve katodik korumalarda aşırı voltajlardan kaçınılmalıdır [87,88].

#### 4.2.1.11. Yorulma Korozyonu

Korozyon yorulması metallerde tekrarlı uygulanan gerilme ve korozyif ortamın kombine etkisi sebebiyle oluşur. Yorulma korozyonu, yüke, ortama ve metalürjik etkilere bağlıdır. Herhangi bir malzemenin yorulma dayanımı korozyif ortamın etkisiyle azalacaktır. Çünkü korozyif ortam yorulma çatlak başlangıcını, çatlak ilerleme hızını ya da her ikisini de etkiler [88].

Malzeme ömürlerinin %95'i yorulma çatlak başlangıcına harcanmaktadır. Korozyif ortamın etkisiyle erken çatlak başlangıcı görülür dolayısıyla erken hasar meydana gelir. Şekil 4.11'deki S-N eğrisinde korozyif ortam ile normal ortam arasında kıyaslama yapılmıştır.



Şekil 4.11. İnert bir ortamda (üst eğri) ve agresif bir ortamda (alt eğri) bir malzeme için S-N eğrilerinin karşılaştırılması [87].

Yorulma korozyonu çatlakları malzemenin yüzeyine yakın yerlerde kusurlar ve gerilme konsantrasyonlarına sebep olan durumlar olmadıkça yüzeylerde başlarlar. Yorulma korozyonu çatlaklarının başlangıcı yüzey ve ortam değişkenlerine göre değişir. Karbon çeliklerinde çatlak, önemli miktarlarda korozyon ürünü içeren yarı küresel korozyon çukurlarından başlar. Çatlak genelde tane sınırları arasındadır ve dallanma gözlemlenebilir. Yorulma korozyonu çatlak oluşması her zaman yüzeyde

oluşan çukurlara bağlı değildir. Çatlaklar çukur olmaksızın taneler arasında da meydana gelebilir ve çatlak tane sınırlarını takip ederler. Korozif ortam çatlak ilerleme hızını da etkiler. Bunun yanında çatlak ilerleme hızını etkileyen diğer faktörler [78];

- Gerilme şiddeti aralığı ( $\Delta K$ ): Artan gerilme şiddeti ( $\Delta K$ ) değeriyle çatlak ilerleme hızı da artar.
- Yük frekansı: Tekrarlı yük frekansı, yorulma korozyonunu etkileyen en önemli parametredir. Yüksek frekanslarda plastik şekil değiştirmenin gerçekleşmesi için yeterli zaman olmadığı için yorulma dayanımı artar
- Gerilme oranı: Gerilme oranının artmasıyla çatlak ilerlemesi de artar fakat korozif olmayan ortamlarda gerilme oranının etkisi çok azdır.
- Sulu ortamın elektrot potansiyeli: yorulmalı korozyonunu şiddetli bir şekilde etkiler. Potansiyelin kontrollü olarak değiştirilmesi ya çatlak ilerleme hızının durdurulmasına ya da dramatik olarak artmasına neden olabilir.
- Metalürjik değişkenler: Malzemenin bileşimi ve geçirdiği ısıl işlemler yorulma korozyonu çatlak ilerleme hızını etkiler.

Korozyon meydana gelmeden bile korozif ortamlarda çeliğin çekme dayanımı normal dayanım değerinin yarısına kadar düşebilir. Tuzlu su içerisinde çekme dayanımı limiti, normaldeki değerinden %6-7 daha düşüktür [87].

Yorulma korozyonunu önlemek için malzeme üzerindeki gerilmeler azaltılmalıdır. Katodik koruma ve inhibitör kullanılması yorulma korozyonunu önleyebilir. Bunları dışında metal yüzeyi krom, nikel, çinko gibi metaller ile kaplanabilir [87].

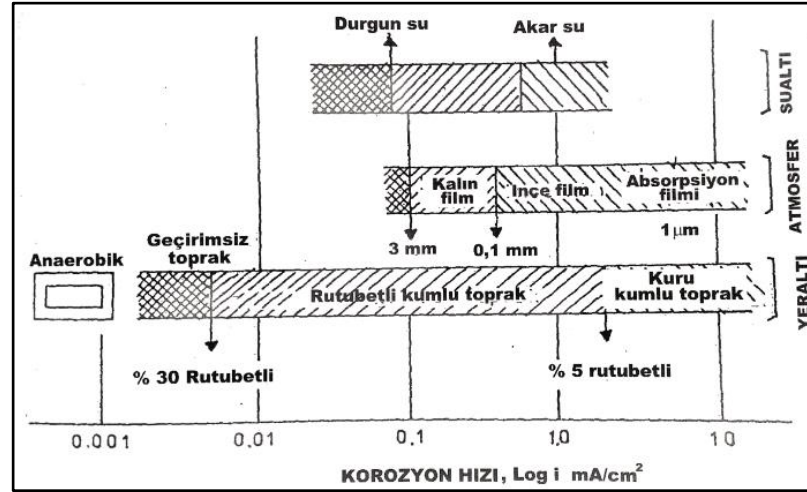
#### **4.2.2. Ortamın Korozyona Etkileri**

Korozyona sebep olan reaksiyonun türünü içinde bulunduğu ortam belirler. Bu sebeple metalin bulunduğu ortam şartlarının hangi riskleri taşıdığına bilinmesi korozyonun önlenmesi için büyük önem taşır. Genel olarak metallerin korozyona uğrayabileceği atmosferik, su altı ve toprak altı olmak üzere üç ortam bulunmaktadır [90].



#### 4.2.2.1. Atmosferik Ortamda Korozyon

Atmosferin sebep olduğu korozyon ile malzeme kaybının, diğer tüm ortamların sebep olduğu malzeme kaybından daha fazla olduğu ileri sürülmektedir. Bunun yanında atmosferik ortamda meydana gelen korozyon hızı diğer ortamlarda meydana gelen korozyon hızlarından daha yüksektir [87].



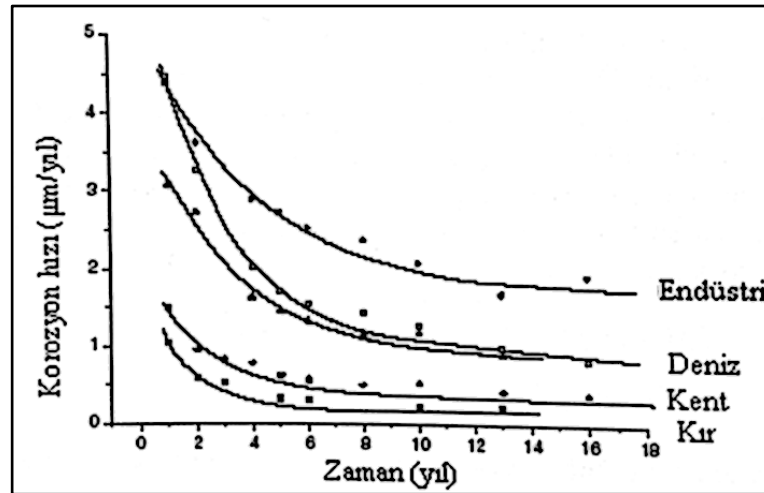
Şekil 4.12. Bazı korozif ortamlardaki çeliğin korozyon hızları [87].

Atmosferik korozyon, havanın bağıl nemi sebebiyle metal yüzeyinde yoğunlaşan nem tabakası içinde gelişir. Nem tabakasının herhangi bir sulu ortama göre oksijenin metal yüzeyine daha kolay ulaşması sebebiyle oksitlenme daha kolay gerçekleşir. Genel olarak atmosferik korozyonun sulu ortamda meydana gelen korozyondan çok farklı değildir. Ancak atmosferin farklılığından dolayı bazı farklar görülebilir [20,87].

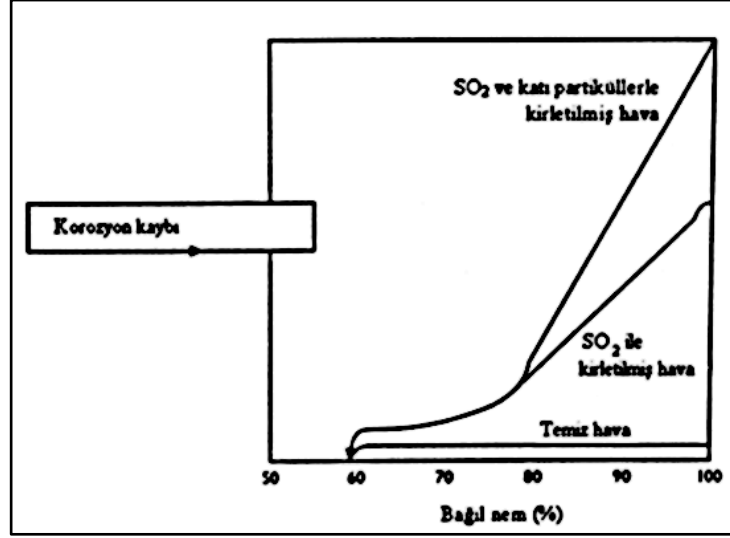
Dünya üzerinde atmosfer özelliklerinde yer yer farklılıklar görülür. Bu farklılıklar endüstriyel olarak kirlenme, denize yakınlık ve nem oranları gibi etkenler sebebiyle meydana gelir.

Atmosferde daima bir miktar su buharı ve yanmadan dolayı oluşan gazlar bulunmaktadır. Atmosferin bu yapısına göre koroziflik açısından dört grup altında incelenebilir [87].

- Kuru kırsal atmosfer: Endüstriyel tesislerin bulunmadığı ve denizden en az 50 km uzaklıkta bulunan atmosferde korozif yapıcı bileşenler bulunmaz. Rutubet çok az olduğu için çiylenme olayına da az rastlanır.
- Endüstriyel atmosfer: Endüstriyel faaliyetlerin çok olduğu durumlarda atmosfere SO<sub>2</sub> ve NO<sub>2</sub> gibi korozif özelliğe sahip gazlar salınır. Bu gazlar çiylenme yoluyla metal yüzeylerinde toplanarak asidik bir elektrolit oluşmasına sebep olurlar. Kirlenme kaynağına yakınlaştıkça korozifliğin şiddeti de artar.
- Deniz atmosferi: Özellikle denizlerden gelen rüzgarlar sis partikülleri halinde klorür iyonları taşır. Denizden olan uzaklığa bağlı olarak metalik yüzeyler üzerinde taşınan su metal yüzeyine yapışır ve buharlaşmayla yüzeyde tuz birikir. Klorür iyonu metal yüzey üzerinde korozyona karşı koruyucu pasif film oluşmasını engeller. Bu sebeple metal yüzeyinde şiddetli bir şekilde korozyon meydana gelir.
- Kentsel atmosfer: Konut ısıtılması ve trafikten dolayı kent atmosferinde SO<sub>2</sub> konsantrasyonu oldukça yüksektir.



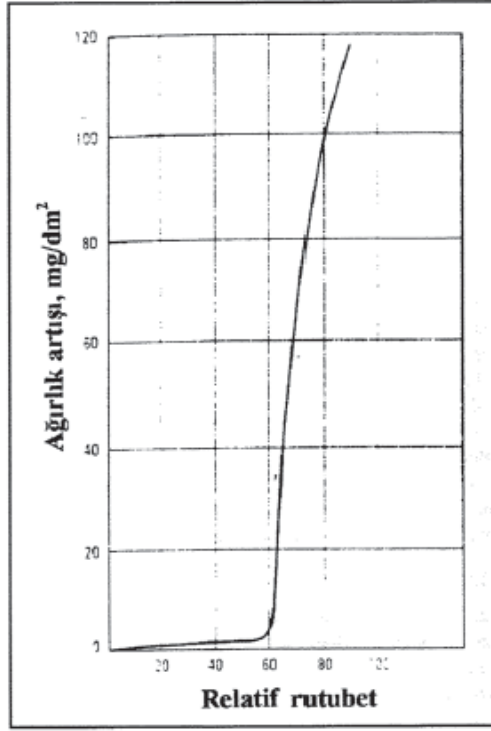
Şekil 4.13. Bakırın farklı ortamlarda korozyon hızı [87].



Şekil 4.14. Bağıl nem ve kirli atmosferin karbon çeliğinin korozyonu üzerine etkisi [87].

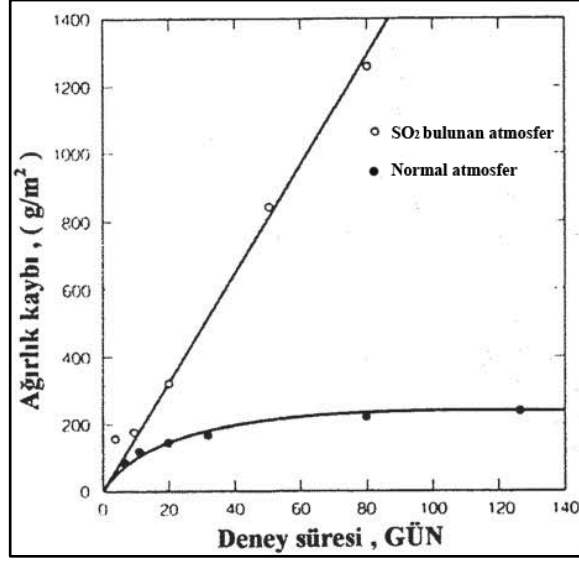
Atmosferik ortamda korozyonun hızını, rutubet, sıcaklık ve kirlilik önemli ölçüde etkiler. Sonuç olarak atmosferik bir ortamda meydana gelen elektrolitik bir korozyon olduğu için metal yüzeyinin ıslak kalma süresine bağlıdır. Atmosferik ortamda korozyona etki eden faktörler:

- Bağıl Nemin Etkisi: Kuru bir ortamda normal sıcaklıklarda korozyon gerçekleşmezken az bir miktar su buharı korozyonun gerçekleşmesine sebep olabilir. Bağıl nemin belli değerler altında olduğu durumlarda ise korozyon ihmal edilebilir seviyelerdedir. Çünkü bağıl nem metalin yüzeyinde sıvı filmi oluşturabilecek miktarda olmalıdır. Şekil 4.15'te bağıl nem ile korozyon hızını veren eğri verilmiştir [87]. Sıcaklığın 0<sup>0</sup> C'nin üstünde olduğu durumlarda, kapalı alanlarda bulunan çelik yüzeyler için kritik bağıl nem %60 açık atmosferde bulunan yüzeyler için %70'tir. Bunun yanında yüzeyde oluşan sıvı film kalınlığının artması oksijen difüzyonunu azaltacağı için sıvı film kalınlığı da önemli bir parametredir [87].



Şekil 4.15. Demirin Korozyon Hızının Bağıl Nem ile İlişkisi [87].

- Hava Kirliliğinin Etkisi: Özellikle endüstriyel tesislerin çok olduğu bölgelerde birçok kimyasal gaz, buhar ve katı parçacıklar havaya karışır. Özellikle bu kirliliğe neden olan en yaygın ve etkili olanı kükürt oksitleridir. Özellikle bu kirliliğe neden olan en yaygın ve etkili olanı kükürt oksitleridir. Metal yüzeyinde korozyon ürünlerinin olması ve bağıl nemin çok olmasıyla kükürt oksitleri yüzeye daha kolay absorbe olur. Kükürt oksitlerinin absorbe olduğu yüzeylerde pH derecesi 4'ün altına kadar düşer. Bu değerlerde korozyonun devam etmesi için oksijen konsantrasyonuna gerek yoktur [87]. Bunun yanında metal yüzeyine tutunan katı partiküller nem oluşturmaları sebebiyle korozyona sebep olurlar. Yağışlar bu birikintileri giderse de çığ olma durumunda birikintiler nemin uzun süre metal yüzeyinde tutulmasını sağlar [87].



Şekil 4.16. SO<sub>2</sub> bulunan ve bulunmayan atmosferin korozyona etkisi [87].

- Sıcaklığın Etkisi: Sıcaklık korozyon hızını artırır. Fakat sıcaklığın çok olması durumunda metal yüzeyindeki nem giderildiği için korozyon belli bir sıcaklıkta maksimum değere ulaştıktan sonra azalır [87].

#### 4.2.2.2. Su İçinde Korozyon

Soğutma sistemleri, su depoları, ısı değıştiricileri, gemi gövdeleri gibi birçok ekipman ve sistem su altında çalışırlar ve korozyona maruz kalırlar. Bu gibi sistemlerin korozyona karşı tedbirler alınarak korunması için su altı korozyonunun anlaşılması gerekmektedir. Genel olarak su altında korozyon, tatlı su ve tuzlu su içinde korozyon olmak üzere ikiye ayrılır.

1. Tatlı su korozyonu: Tatlı sular bünyesinde az miktarda da olsa tuz bulundurmaları sebebiyle iletken olabilmektedirler. Bunun yanında tatlı suların oksijen konsantrasyonu başta olmak üzere pH derecesi ve sıcaklığı korozifliğini belirler [87].

- Oksijen konsantrasyonu: Nötral sular içerisinde korozyon olayı oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak ilerler. Eğer su içerisinde oksijen yoksa katot reaksiyonu yürümez böylece korozyonda gerçekleşmez. Suyun

içerisindeki oksijen konsantrasyonu suyun sıcaklığına bağlıdır. Sıcaklık arttıkça su içerisindeki oksijen konsantrasyonu azalır. Sıcaklığın 100°C'ye ulaşmasıyla su içerisindeki oksijen tamamen uzaklaşmış olur. Su içindeki oksijen konsantrasyonu arttıkça korozyonun hızı da belli bir değere kadar artar. Belli bir değerden sonra pasifleşme nedeniyle korozyon hızı azalır [87].

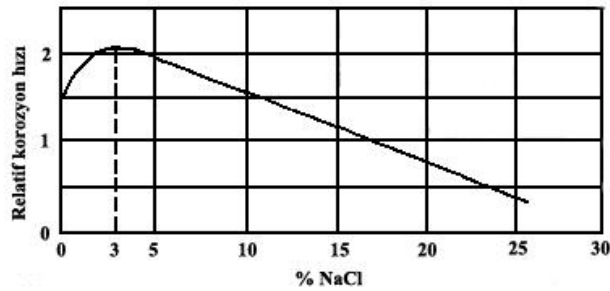
- pH'ın Etkisi: Suyun pH derecesinin 4 ve 10 arasındaki olduğu durumlarda pH'ın korozyon hızı üzerinde önemli bir etki olmazken Suyun pH derecesinin 4'den küçük olması halinde korozyon hızında önemli bir artış gözlemlenir [87].
- Sıcaklığın Etkisi: Suyun sıcaklığı arttıkça korozyon artar. Suyun her 10° C artmasıyla korozyon hızı da 2 kat artar. Fakat sıcaklık 80° C'ye ulaştıktan sonra gittikçe oksijen konsantrasyonunun azalması sebebiyle korozyon hızı azalır [87].

2. Tuzlu Su Korozyonu: Deniz sularındaki tuz konsantrasyonu buharlaşma ve tatlı su karışma durumlarına göre 32-39 g/L (1 litre deniz suyu içerisinde gram olarak çözülmüş tuz kütlesi) suyu arasında değişir. Bu tuzların %70'lik kısmını sodyum klorür oluşturur. Tuzluluk oranı denizin derinliklerine doğru artarken pH ve oksijen konsantrasyonu azalır [87]. Deniz suyunun iletkenliğinin fazla olması sebebiyle deniz suları oldukça koroziftir. İletkenliğin fazla olması metal yüzeyinde korozyon hücreleri meydana gelmesini kolaylaştırır. Bunun yanında klorür iyonları pasifleşmeyi önleyerek korozyon hızının artmasına sebep olurlar. Deniz suyunun iletkenliği, pH derecesi, oksijen konsantrasyonu ve hareket hızı korozyon özelliğini etkiler [87].

- İletkenliğin etkisi: Deniz suyunun iletkenliği tatlı sulara göre 250 kat fazladır. Deniz suyunun iletkenliğini içeriğindeki tuz konsantrasyonu belirler. Tuz konsantrasyonunun artmasıyla deniz suyunun iletkenliği

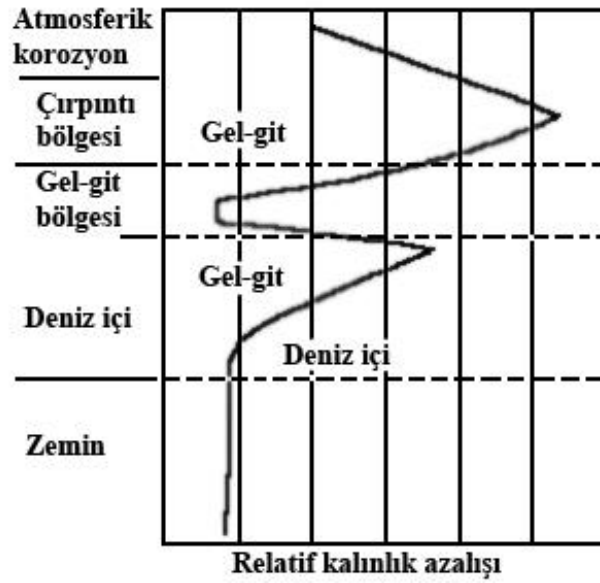
artar. Bunun yanında iletkenliği etkileyen bir diğer etmen sıcaklıktır. Sıcaklık deniz suyunun iletkenliğini artırır [87].

- pH Etkisi: Deniz suyunun yüzeydeki pH değeri 8 dolaylarındadır. Derinlere gittikçe deniz suyunun pH derecesini azaltır. Deniz suyunun pH değeri yüksek olursa katodik reaksiyon çözülmüş oksijenin redüksiyonu ile gerçekleşir. Fakat pH derecesinin 8'den düşük olması durumunda korozyon ürünleri metal yüzeyine çökebilir. Aynı zamanda katot reaksiyonu sonucu hidroksil iyonları oluşarak katot bölgesinde pH derecesinin yükselmesine neden olarak deniz suyu içinde bulunan  $Ca^{2+}$  ve  $Mg^{2+}$  gibi katyonlar hidroksit halinde silikat iyonları ile metal yüzeyinde kabuk oluşmasına neden olur. Yüzeyde oluşan kabuk, oksijen konsantrasyonunu azaltır ve elektrik direncini artırır böylece korozyon hızını önemli ölçüde azaltır [87].
- Oksijen konsantrasyonu: Deniz suyu içinde bulunan metallerin korozyon hızı oksijen konsantrasyonuna bağlıdır. Oksijenin kaynağının atmosfer olması sebebiyle derinlere gittikçe oksijen konsantrasyonu gittikçe azalır. Deniz suyu içindeki oksijen konsantrasyonu oksijen çözünürlüğünü etkilediği için dolaylı yoldan su içindeki tuz konsantrasyonuna ve suyun sıcaklığına bağlıdır [87]. Deniz suyu içerisinde çeliğin pasiflik hali bozulduğu için korozyon çok hızlıdır. Ancak tuzluluğun artmasıyla oksijen konsantrasyonu azalır böylece korozyon hızı da azalır. NaCl konsantrasyonu %3 değerine kadar korozyon hızı artar daha yüksek değerlerde korozyon hızı azalır [87].



Şekil 4.17. NaCl konsantrasyonu ile korozyon hızı arasındaki ilişkiyi gösteren eğri [87].

Deniz suyundaki oksijen konsantrasyonunun etkisi denize içine çakılmış çelik kazıklarda görülebilir. Deniz suyunun temas etmediği bölgeler yine denize yakın oluşundan kaynaklı şiddetli korozyon görülür. Deniz suyunun dalgalanması ile ıslanan bölge ise zaman zaman kurur tekrar ıslanır bu nedenle en şiddetli korozyon bu kısımda gerçekleşir. Gelgit bölgesi ise uzun süre su altında ve su üstünde kalır su sebebiyle korozyon hızı bu bölgede de hızlıdır. Fakat bu bölgede kabuk oluşumu olursa zamanla korozyon hızı azalır. Sürekli su altında kalan üst bölgede ise oksijen konsantrasyonunun hala çok olması sebebiyle korozyon hızı fazladır. Daha derinlere gidildikçe oksijen konsantrasyonunun azalması sebebiyle korozyon hızı azalır [87].



Şekil 4.18. Deniz içine çakılmış çelik kazıkta derinliğe göre korozyon hızının değişimi [87].

#### 4.3. NOKTA DİRENÇ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN YORULMA ÖMÜRLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Otomobiller hareketli sistemler oldukları için farklı dinamik bileşke yüklere ve çevresel etkilere maruz kalırlar. Bu kuvvetlere karşı otomobilin rijitliğini koruyan temel unsurlar ise birleştirmelerdir. Hareket halindeki bir otomobilin kaynaklı birleştirmelerinde gerilmeler oluşacaktır. Bu gerilmeler, burma eğme ve çekme gibi farklı türlerde meydana gelebilirler. Ayrıca özellikle çarpışma anı kısa ömürlü yorulma kapsamında değerlendirilebilir. Bu sebeple malzemelerin farklı kuvvetler

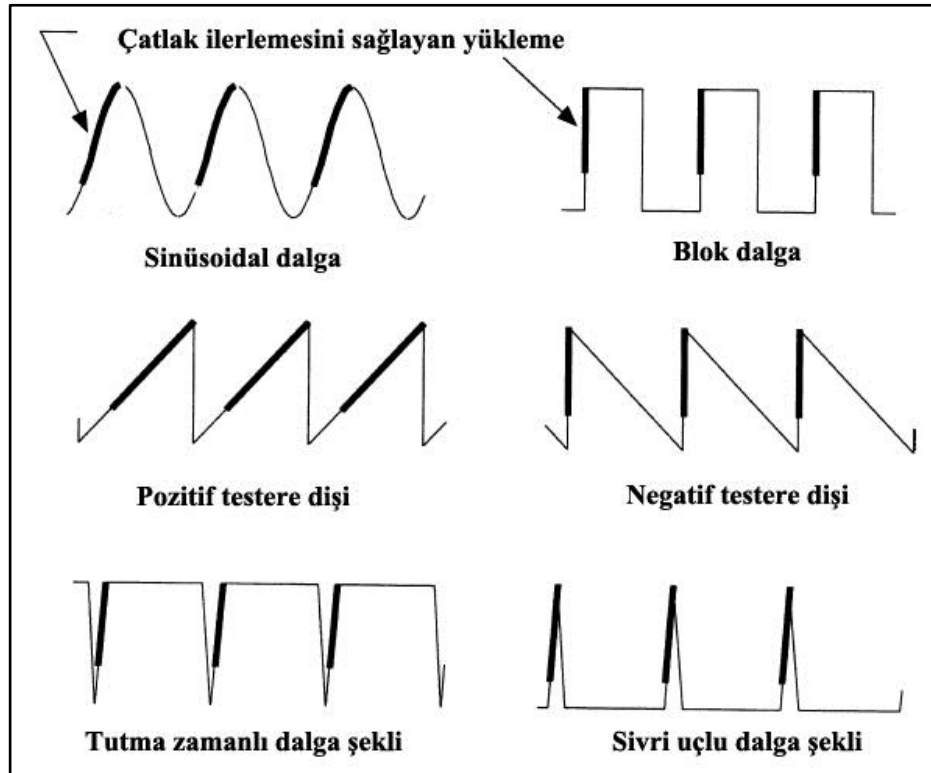


altındaki yorulma davranışlarının incelenmesi malzeme geliştirme, otomobili tasarım vb. birçok açıdan elzemdir [86].

#### 4.3.1. Yükleme Koşullarının Etkisi

Servis süresince otomobiller kaynaklı birleştirmeleri farklı yükleme (çekme, eğme ve burma) tiplerine maruz kalırlar. Birleştirmeler yükleme türlerinden birine veya ikisine kombine bir şekilde maruz kalabilirler. Yükleme tiplerinde kesme yüklemesi arttıkça nokta direnç kaynakların yorulma ömrü azalmakla birlikte arayüzey tipinde hasara uğrama eğilimi de artmaktadır [92].

Bir diğer önemli husus ise yük frekansının dalga şeklidir. Yükün uygulanması zamana bağlı bir olgu olduğundan farklı dalga şekillerinde uygulanabilmektedir. Zamana bağlı etkilerin özellikle korozyif ortamın, çatlak ilerleme hızını arttırabildiği için önemlidir. Yorulma testlerinde yük genelde sinüsoidal şekilde uygulanmakla gerçek şartlarda farklı dalga çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 4.19'da bazı dalga çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Tekrarlı yükleme dalgası şekilleri [86].

#### **4.3.2. Sac Kalınlığının Etkisi**

Çatlak büyüme ömrünün ( $N_p$ ), çatlağın sac kalınlığı boyunca yayılması esnasında harcandığı için sac kalınlığının artması ile yorulma ömrü de artar [82]. Nokta direnç kaynaklarının dayanımının sac kalınlığının karesinin kökü ile orantılı olduğu deneysel olarak ispatlanmıştır [93].

#### **4.3.3. Kaynak Bölgesinin Boyutunun Etkisi**

Yorulma dayanımı ile kaynak çekirdeğinin boyutu arasında doğru orantılı bir ilişki vardır [72,94–96]. Kaynak bölgesi boyutunun artmasıyla kaynak çentiği çevresindeki gerilim konsantrasyonu azalacağı için çatlak başlama ömrü de artar. Kaynak bölgesi boyutunun, otomotiv endüstrisi için optimum kaynak bölgesi boyutu  $\sqrt{5t}$ 'den minimum kaynak edilebilir kaynak bölgesi boyutu  $\sqrt{3,5t}$ 'e düşmesi kesme ve sıyırma yükleme koşullarında yorulma ömründe sırasıyla %70 ve %80 azalışa neden olduğu bildirilmektedir [95].

#### **4.3.4. Kalıntı Gerilemelerin Etkisi**

Kaynak işlemindeki homojen olmayan termal çevrimlerden dolayı kaynak çevresinde oluşan kalıntı gerilmelerin kaynaklı yapının yorulma dayanımını etkiler [87,88]. Kalıntı gerilme yapılarında kuvvet uygulanmaksızın var olan gerilmeleri tanımlamaktadır. Kalıntı gerilmeler, yorulma ömrü için oldukça önemlidir. Kalıntı gerilmelerde çekme gerilemeleri ve basma gerilmeleri beraber oluşurlar. Çekme kalıntı gerilmeleri yorulma ömrünü olumsuz yönde etkilerken basma kalıntı gerilmeleri tam tersi şekilde olumlu yönde etkiler [86].

Kalıntı gerilmeler yorulma kuvveti parçaya uygulandığında gerilme genliğini etkilemese de malzeme içerisinde var olduğu için parça üzerindeki ortalama gerilme miktarını denklem 4.1 ve 4.2'de gösterildiği gibi etkiler [86].

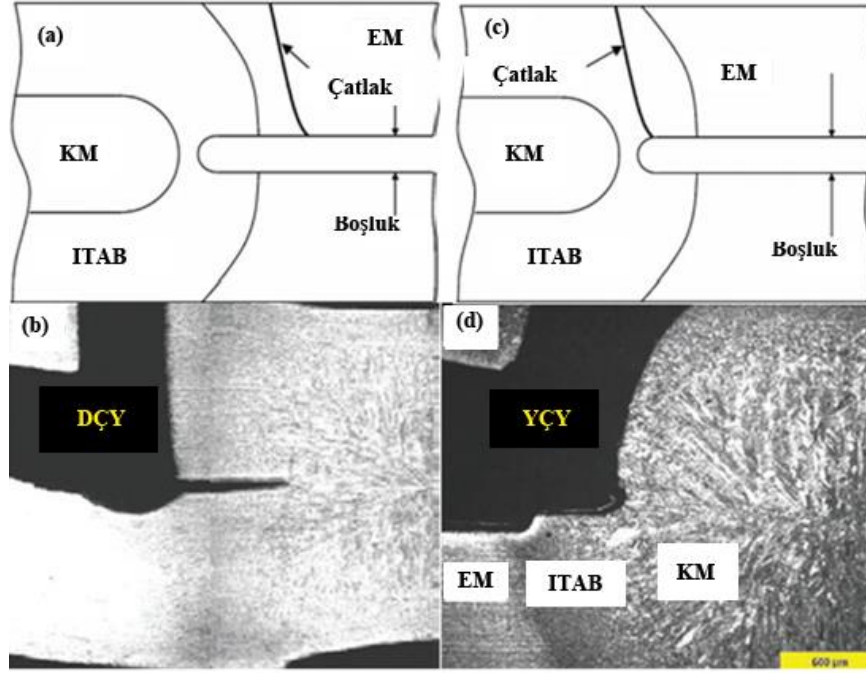
$$\sigma_a = \sigma_{a, \text{ external load}} \quad (4.1)$$

$$\sigma_m = \sigma_{m, \text{ external load}} + \sigma_{\text{residual}} \quad (4.2)$$

#### 4.3.5. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

Malzeme dayanımı yorulma dayanımını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Kaynaklanan malzemelerde kaynaklanan bölge yüksek ısı sebebiyle esas metalin mekanik özelliklerinden farklı özellikler gösterebilir. Şekil 4.20’de bir çatlakın yüksek çevrimli ve düşük çevrimli yorulma durumlarına göre ilerleme yolu gösterilmiştir. Düşük çevrimli yorulma durumunda çatlak esas metalden ilerlemekteyken yüksek çevrimli yorulma durumlarında ITAB boyunca ilerlemektedir [97]. Çeliklerde kırık yolunun değişmesi değişen sertlik dağılımıyla ilişkilendirilebilir. Düşük çevrimli yorulma durumlarında, yüksek sertliğe sahip olan ITAB’da çatlak ucunun plastik deformasyonu zorlaşırken, yüksek çevrimli yorulmalarda ise yüksek gerilim konsantrasyonu sebebiyle çatlak ucu çatlak yayılma alanıdır [98].

Düşük çevrimli yorulma durumunda yorulma çatlak ilerleme hızı, esas metalin mikroyapı ve dayanımına bağlıdır. Bu sebeple AHSS çeliklerinin nokta direnç kaynaklı birleştirmeleri yüksek çevrimli yorulma durumlarında mükemmel yorulma performansı göstermektedir. Yüksek çevrimli yorulma durumunda yorulma çatlak ilerleme hızı, esas metalin mikroyapı ve dayanımından bağımsız olmakla beraber sac kalınlığı ve kaynak çekirdeği boyutuna sıkı bir şekilde bağlıdır. Yüksek çevrimli yorulma durumunda ITAB’daki çentik sertliği farklı olan malzemelerde yapılan deneyler sonucunda da çatlak ilerleme hızının dayanımdan bağımsız olduğunu göstermektedir [66,95,98].



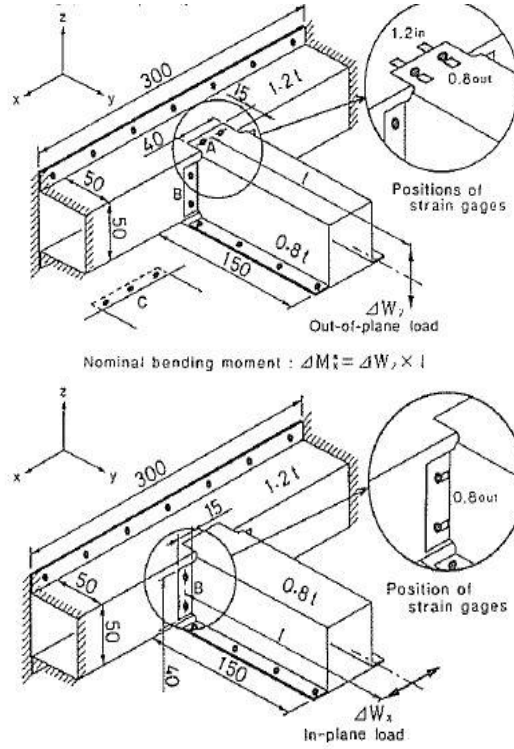
Şekil 4.20. Yorulma çatlakları ilerleme bölgeleri: a,b) düşük çevrimli yorulma şartlarında c,d) yüksek çevrimli yorulma şartlarında [97].

Nokta kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımı üzerine birçok araştırma bulunmaktadır. Yukarıda verilen bilgiler ışığında yapılan bazı literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1. Literatür ışığında nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin yüksek-düşük çevrim yorulma dayanımlarını etkileyen koşulların etkileri.

KOŞULLAR		SONUÇLAR		KAYNAK
		Düşük çevrim rejiminde	Yüksek çevrim rejiminde	
1	Sac kalınlığı artışı	Performans artışı	Artan kalınlıkla performans artışı	[99]
2	Kaynak çekirdeği çapı artışı	Performans artışı	Az ya da hiç artış yok	[99,100]
3	Hem kaynak çekirdeği çapı hem de sac kalınlığı artışı	Performans artışı		[101]
4	Akma dayanımı artışı	Performans artışı	Etkisi yok	[99,100,102]
5	ITAB mikroyapısı	Belirsiz	Etkisi yok	[103]
6	Numune genişliği artışı	Performans artışı		[104]
7	Galvaniz kaplamanın varlığı	Performans artışı		[105]

Özellikle otomobillerde bulunan nokta kaynaklı T şekilli yapısal parçalarda kombine kuvvetlerin etkisi görülmektedir. Mori vd. [18] otomobillerde bulunan nokta kaynaklı T şekilli parçaların nokta kaynaklı birleştirmelerinin maruz kaldığı kuvvetler ve birleştirmelerin yorulmaları üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada T şekilli parçaya Şekil 4.21’de olduğu gibi farklı eksenlerde 50 N.m değerinde eğme momenti uygulayarak A ve B noktalarındaki birleştirmelerde meydana gelen gerilim tipleri ve büyüklüklerini elde etmeye çalışmışlar. Bunun için Şekil 4.21’deki parça sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek belirtilen kuvvetlerde birleştirmelerin maruz kaldığı gerilme türleri ve büyüklükleri elde edilmiştir. Aynı zamanda gerçekte olarak T şekilli parçada nokta kaynaklı birleştirmelerden 2mm uzaklığa gerinim ölçerler yerleştirilmiş, gerilme türleri ve büyüklükleri elde edilmiştir. Yapılan iki çalışma sonucunda alınan veriler birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.21. T şekilli yapısal parçalara uygulanan kuvvetler [18].

Yapılan çalışmalar neticesinde en fazla gerilim ve gerinim değerleri A bölgesindeki kaynaklarda en fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgedeki kesme kuvvetinin 490 N, kaynak bölgesine dik aksenal kuvvetin 3,09 N ve eğme momentinin 185 N.mm olarak ölçülmüştür. Devam eden çalışmada A bölgesindeki benzer yükleme ve rijitlik

özelliklerinde tek nokta kaynaklı numuneler hazırlanmış ve önceki çalışmadan yola çıkılarak kesme kuvveti ve eğme momenti  $F/M=0,4$ ,  $R=0$  ve 20Hz değerlerinde yorulma deneyleri yapılmıştır. Aynı çalışmalar sonlu elemanlar yöntemiyle de yapılmış neticede iki çalışmanın sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Banerjee vd. [106] yaptıkları çalışmalarda nokta direnç kaynaklı DP590 çeliğinin yorulma, kaynak bölgesi boyutunu, mikroyapı özelliklerini ve çentik geometrisini incelemişler. Yorulma ömrünün kuvvetli bir şekilde yük rejimi, çekme ve normal gerilme şartlarına, kaynak bölgesi boyutuna ve çentik hassasiyetine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Shinozaki vd. [107] yaptıkları çalışmalarda farklı çekme dayanımlarına sahip, nokta direnç kaynağı ve ark kaynağı yöntemiyle birleştirilmiş HSS ve DP çeliklerinin yorulma dayanımlarını kapsamlı şekilde incelemişler. Çekme yorulma deneyleri için 20-30 Hz,  $R=0$  parametreleri kullanılırken ark kaynaklı numunelerin eğmeli yorulma deneyleri için 30Hz  $R=0$  (-1) parametreleri kullanılmıştır. Deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1.  $R=0$  parametresinde ana metal için yapılan yorulma deneyleri neticesinde yorulma limit gerilmesinin ve çentik hassasiyetinin sadece çekme dayanımına değil akma dayanımını da bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlam  $(YS+TS)/2$  ile lineer bir orantıya sahiptir.
2.  $R= (-1)$  parametresinde ana metal için yapılan eğmeli yorulma deneyleri neticesinde yorulma sınırı gerilmesinin çekme dayanımıyla arasında lineer bir orantı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
3.  $R=0$  parametresinde ana metal için yapılan yorulma deneyleri neticesinde yorulma sınırı gerilmesi ve çekme özellikleri arasındaki ilişki yukarıda bahsedilen iki ilişkinin ortasında olduğu gözlemlenmiştir.
4. Nokta direnç kaynaklı DP çeliklerinin yorulma dayanımlarının, ölçülü sıçramanın oluşmasını sağlayan kaynak akımı değerleriyle dikkate değer ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.

5. Nokta direnç kaynaklı HSS çeliklerinin yorulma dayanımları, yapılarındaki yüksek karbon sebebiyle uygun temperleme işlemleriyle arttırılabileceği gözlemlenmiştir.
6. (4) ve (5) 'deki bu gelişmeler, yüksek elektrot kuvvetinin neden olduğu kalıntı basınç gerilimlerinin üretilmesi veya artmasından kaynaklanmaktadır.
7. Yukardaki maddeler neticesinde anal metal dayanımının artması nokta dienc kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarını da arttırabileceği sonucuna varılmıştır.
8. Ark kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımları da ana metalin çekme dayanımı ile arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ma vd. [108] yaptıkları çalışmalarda nokta kaynaklı sıcak daldırma ile galvanizlenmiş DP600 çeliklerinin mikroyapı, mikro sertlik, çekme ve yorulma özelliklerini incelemişler. Çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır.

1. Nokta direnç kaynağı işleminin ardından ITAB ve kaynak bölgesinin martensit fazından oluştuğunu gözlemlerken ITAB'ın ince martensit, kaynak bölgesinin daha iri martensit yapıların olduğunu gözlemlenmiştir.
2. Kaynak bölgesinde çita martensit oluşumuna bağlı olarak sertliğin, ana metalin sertliğine göre iki kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.
3. 8.1-8.3 kA akım aralığında kaynaklanan numunelerin statik çekme testlerinde en yüksek değere ulaşılmıştır. Sıçramanın meydana geldiği numunelerde daha düşük yüklerde kırılma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu numunelerde ara yüzey kırılması meydana gelmiş olsa da birleştirmenin yük taşıma kapasitesinin yine de yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
4. Yorulma testlerinde kaynak esnasında sıçrama meydana gelen numunelerde biraz daha düşük yorulma sınırı gözlemlenmiştir. Dört temel kırılma tipi gözlemlenmiştir. Yüksek yük seviyelerinde kırılma ara yüzey kırılması ya da kaynak bölgesine yakın ITAB'dan biraz plastik deformasyon göstererek kırılabildiği gözlemlenmiştir. Yorulma sınırına yakın yüklerde çatlak kaynak bölgesinden başlar, sac kalınlığı boyunca ilerler ve yükleme eksenine dik yönde ilerlemeye devam eder. Orta seviye yüklerde ise çatlak kaynak bölge

sınırında başlar ve kaynak bölgesi çevresinin %10-50'si boyunca ilerleyerek ana metale doğru gelişmeye devam eder.

5. Hem çekme hem yorulma testlerinde çatlakların, kaynak bölgesi çevresinde ve iki sacın birleşme noktasından başladığı gözlemlenmiştir. Teorik bir gerilme analizi neticesinde bunun iki bölgede meydana gelen üç eksenli gerilmelerin varlığından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.
6. Uygun olmayan kaynak parametrelerinin, statik veya çevrimli yüklemelerde ara yüzey kırılmasına sebep olan kaynak bölgesinde boşluklar ve soğumadan kaynaklı çatlakların oluşmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Lara vd. [109] çalışmalarında nokta direnç kaynaklı DP590 ve DP980 çeliklerinin mikroyapı, mikro sertlik, çekme dayanımı ve yorulma özelliklerini incelemişler. DP980 çeliğinin DP590 çeliğine göre daha ince taneli olduğu ve martensit faz oranının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak işlemi 9.5kA kaynak akımı, 60Hz ve 4kN parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Yorulma testleri ise  $R=0.1$  ve 30Hz değerlerinde yapılmıştır. Yorulma testlerinde çatlakların kaynak bölgesi çevresinden başlayarak ITAB ve ana metal boyunca ilerlediği görülmüştür. İki sacın birleşim noktasındaki gerilim konsantrasyonu sebebiyle mod I kırılmanın baskın olduğu ancak zamanla çatlağın kaynak bölgesinde ITAB'a ilerlemesiyle mod III kırılmaya dönüştüğü görülmüştür. Netice olarak aşağıdaki sonuçlara ve bulgulara ulaşılmıştır.

1. Kaynak parametrelerinin birleştirmelerin mekanik davranışı üzerinde büyük etkiye sahiptir.
2. DP980 çeliğinin mikroyapısal dönüşümü DP590 çeliğinden daha şiddetlidir. Bu değişiklik ise termal girdiye bağlıdır.
3. DP980 çeliğinde ITAB'da malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve soğuma döngüsüne bağlı olarak yumuşama gözlemlenmiştir.
4. Çekme makaslama testlerinde iki malzemede de benzer dayanımlar gözlemlenirken DP590 çeliğinde daha fazla uzama görülmüştür.
5. DP590 çeliği DP980 çeliğine nazaran daha iyi yorulma davranışı göstermiştir.

Rathbun vd. [72] yaptıkları çalışmalarda nokta direnç kaynaklı DP590, TRIP ve HSLA çeliklerinin çekme makaslama ve çapraz çekme yükleme şartları altında



yorulma davranışlarını incelemişler. Sonuç olarak yorulma performansının, yüksek çevrim koşullarında ana metal dayanımından ve mikroyapıdan bağımsız olduğunu yüksek çevrim koşullarında sadece geometriye bağlı olduğunu gözlemlemişler. Bunun yanında düşük çevrimli yorulma koşullarında yüksek dayanıma sahip çeliklerin üstün yorulma davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Alemius vd. [110] yaptıkları çalışmalarda nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş farklı paslanmaz çeliklere %3,5 NaCl elektrolit ve hava pompası bulunan bir ünite içerisinde korozyon yorulma testi uygulamışlardır. Testler neticesinde çelik ve paslanmaz çelik birleştirmelerinin kaynak bölgesinin korozyon ve hidrojen gevrekliğine karşı duyarlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Sudhakar vd. [111] ASTM G31 standartlarına göre %3,5 NaCl içeren korozyonel ortamlarda farklı martensit faz oranlarına sahip (%32-76) DP çeliklerinde çatlak ilerleme hızlarını incelemek için yaptıkları çalışmalarda martensit fazı oranının çatlak ilerleme hızını artırdığını gözlemlemişler. Korozyon miktarının artmasıyla kırık kapanmasına bağlı olarak kırılma yüzeyi pürüzlülüğünü artırdığı görülmüştür. Bunun yanında martensit fazı oranının artmasıyla korozyonun da arttığı gözlemlenmiştir.

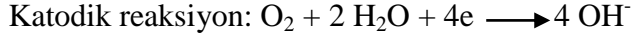
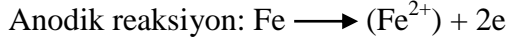
Linder vd. [112] çalışmalarında nokta kaynaklı östenitik (AISI304) ve duplex (SA2304) çeliklerini %3,5 NaCl çözelti içeren ortamda yaptığı korozyonel yorulma deneyleri sonucunda NaCl ortamının havaya göre yorulma dayanımını %30-40 oranlarında azalttığını gözlemlemişlerdir.

Sarkar vd. [113] çalışmalarında çift fazlı çeliklerin mikroyapısının %3,5 NaCl çözelti içerisindeki elektrokimyasal korozyon direncine olan etkilerini incelemişler. Ferrit-martensit yapılı çift fazlı çeliklerin %3,5'lik NaCl çözeltisindeki korozyon oranının, fazların hacim oranına ve morfolojisine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Mekanik özellikleri iyileştirmek için martensit ve tanelerin yüksek miktarda inceltmesinin, çift fazlı çeliğin korozyon davranışı üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğu sonucuna varmışlardır.

Kayalı vd. [114] çalışmalarda ferritik-perlitik ve farklı kritik sıcaklıklarda (720-780°C) tavllanmış ferritik-martensitik çift fazlı çeliklerini, 6.8 pH özelliğine sahip %3,5 NaCl solüsyonu içerisinde korozyon deneylerine tabi tutarak DP çeliklerinin koroziyon davranışlarını incelemişler. Ölçümler Echem analiz programı destekli 600 potansiyostat/galvanostat/ZRA (Zero Resistance Ammeter) dan oluşan sistemler ile yapılmıştır. Deneyler için ferritik-perlitik, ferritik-martensitik ve boronize edilerek yüzeyi bor kaplanmış ferritik-martensitik numuneler kullanılmıştır. Numuneler oda sıcaklığında 1 saat solüsyon içerisinde bekletildikten sonra korozyon deneylerine başlanılmıştır. Deneylerde DP çeliklerinin korozyon hızının mikroyapıya ve faz oranlarına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada tavlama kritik sıcaklığının artmasıyla martensit fraksiyonun arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında ölçümlerde martensit miktarının artmasıyla  $i_{corr}$  korozyon akımının arttığı gözlemlenmiştir. Bu ise martensitin artmasıyla korozyon oranının artması anlamına gelmektedir. Mikroyapının ferrit-perlit fazdan ferrit-martensit faza dönüşmesiyle korozyon akım yoğunluğunun ve korozyon oranının arttığı gözlemlenmiştir. Bu ise korozyon direncinin düştüğünü göstermektedir. Bor kaplamanın korozyon direncini arttırdığı ve korozyon oranını azalttığı gözlemlenmiştir. Bor kaplı ferrit-martensit çeliklerinin korozyon direnci ferrit perlit çeliklerinden daha zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Buna kaplama yüzeyinde meydana gelen çatlaklar ve boşlukların korozyon direncini azaltmasının sebep olabileceği belirtilmiştir.

Lakshmana vd. [115] çalışmalarında farklı martensit hacim oranlarına sahip düşük karbonlu 1mm kalınlığa sahip ferritik-martensitik DP sac çeliklerine %3,5 NaCl çözeltili ortamlarında potansiyodinamik polarizasyon ve daldırma testleri uygulayarak DP çeliklerinin koroziyon davranışlarını incelemiş ve ferritik-perlitik çeliklerle kıyaslamalarda bulunmuşlardır. Bütün deneysel çalışmalar açık hava ortamında ve oda sıcaklıklarında yapılmıştır. Numuneler korozyon deneyleri öncesinde zımpara ile yüzeyleri parlatılmıştır. Sonra PARSTAT 2273 potansiyostat ve standart kalomel elektrot kullanılarak, iki kez saflaştırılmış su ile hazırlanmış NaCl (pH:6,9) solüsyonu içinde polarizasyon deneyleri yapılmıştır. Potansiyostat testlerinden önce numuneler 30 dakika solüsyon içerisinde bekletilerek ortam ile kararlı hale gelmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Bunun yanında korozyon hızı için daldırma testi de yapılmıştır. Deneyler ASTM G31 standartlarına göre ağırlık kaybı

ölçümleri yapılarak numunelerin korozyonel davranışları incelenmiştir. Deneylerden önce her bir numunenin ağırlığı hassas terazide ölçülerek deneyden sonraki ağırlıkları kıyaslanmış ve ağırlık kayıpları hesaplanarak korozyon oranları hesaplanmıştır. Neticede meydana gelen reaksiyonlar:



Reaksiyonların ortamın O<sub>2</sub> ve pH miktarına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Polarizasyon testleri sonucu elde edilen  $i_{\text{corr}}$  değerleri ile korozyon oranı denklem 4.3 ile hesaplanmıştır.

$$CR = \frac{3,27 \times 10^{-3} \times i_{\text{corr}} \times EW}{D} \quad (4.3)$$

CR: Korozyon oranı (mm/yıl), D: Yoğunluk (7,88g/cm<sup>3</sup>), EW: Demirin atomik ağırlığı (55,845 g/mol).

Daldırma testleri sonucu elde edilen korozyon oranı ise denklem 4.4 ile hesaplanmıştır.

$$CR = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (4.4)$$

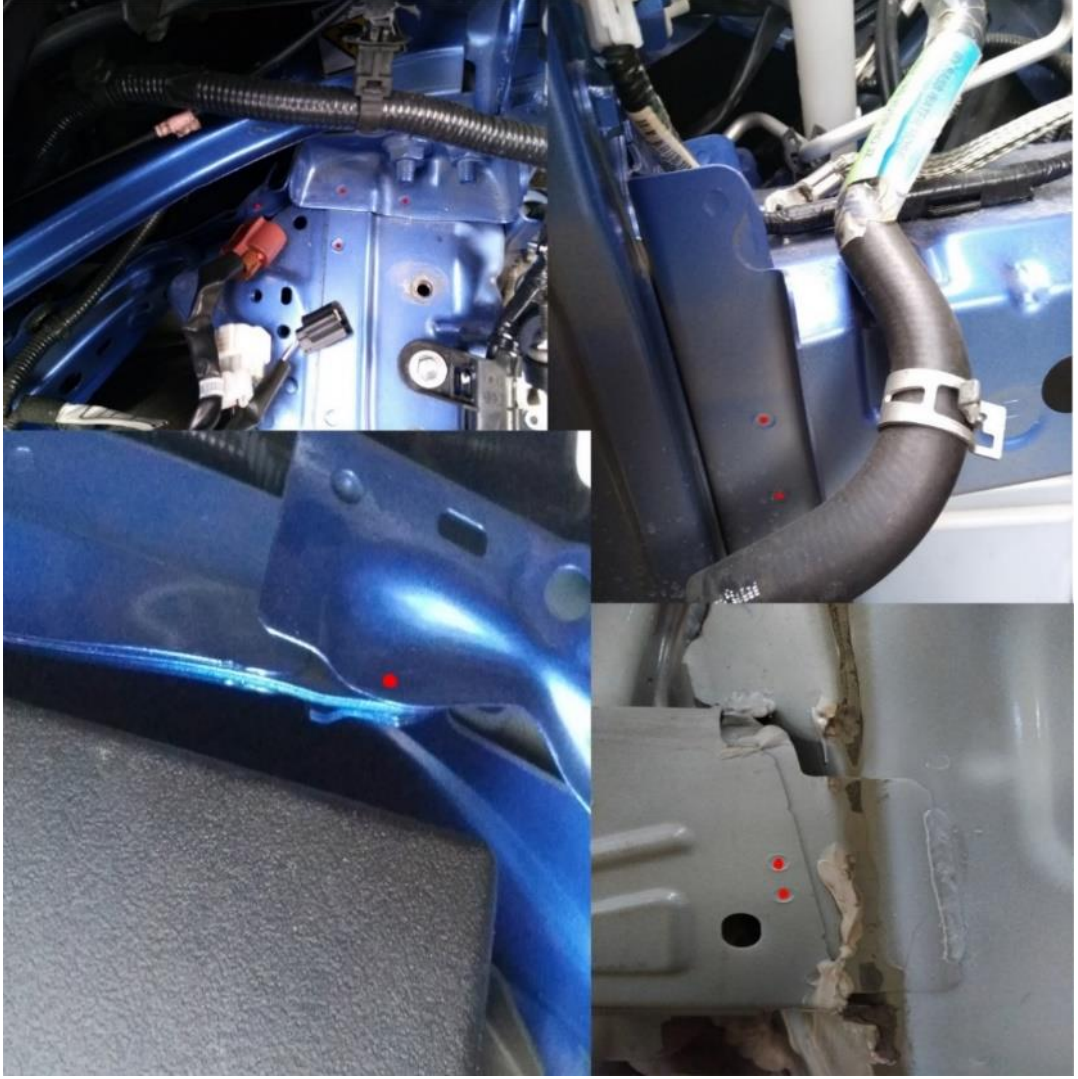
CR: Korozyon oranı (mm/yıl), D: Yoğunluk (7,88g/cm<sup>3</sup>), K: sabit (8.76x10<sup>4</sup>), T: Maruz kalma süresi (saat), A: Alan (cm<sup>2</sup>), W: ağırlık kaybı (g).

Mikroyapının ferrit-perlit fazından ferrit-martensit fazına değişmesiyle  $i_{\text{corr}}$  ve korozyon oranının azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu durumu hem daldırma testlerinde hem de polarizasyon testlerinde gözlemlemişlerdir. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile daldırma yöntemi ile elde edilen korozyon hızı sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Daha sonra numuneler SEM ile analiz edildiğinde ferrit-martensit çeliğin yüzeylerinde ferritik-perlitik

eliklere göre daha derin çukurcuklar ve korozyon ürünleri (pas) oluştuğu gözlemlenmiştir.

Literatür çalışmalarından da anlaşıldığı üzere nokta direnç kaynaklı birleştirmeler otomobillerde en yaygın kullanılan birleştirme yöntemidir. Araç rijitliği, çarpışma dayanımı, sürüş konforu ve yolcu güvenliği bakımından nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Birleştirmelerin mekanik özelliklerinin bilinmesinin yanında farklı yükleme ve ortam şartlarında birleştirmelerin göstereceği mekanik davranışların incelenmesi son derecede önemlidir. Literatürde de görüldüğü üzere nokta direnç kaynaklı birleştirmeler, farklı yüklerin ve koroziif ortamların etkisiyle beklenmedik mekanik davranışlar ve hasar tipleri sergileyebilir.

Özellikle otomobillerde bulunan şekil 4.22'dekine benzer olan T şeklindeki yapısal parçalar gibi farklı bölgelerdeki parçaların birleştirildiği bölgeler farklı şekilli parçaların birleşimlerinde farklı tipteki yüklemelerin etkisine kombine bir şekilde maruz kalabilirler. Bu ise birleştirmelerin belirli yükleme tiplerindeki testlerle yapılmış yorulma ömür ve davranışlarından farklı sonuçların doğmasına sebep olabilir. Bunun yanında koroziif ortam ile temasa uygun bölgelerdeki birleştirmeler korozyona maruz kalabilir. Özellikle literatürde otomobil imalatında yaygın olarak kullanılan nokta direnç kaynaklı DP eliklerinin farklı yükler altındaki yorulma davranışları ve koroziif ortamın etkileri üzerine neredeyse hiçbir çalışma bulunamamıştır. Bu sebeple farklı kuvvetlerin ve koroziif ortamın etkilerinin incelenmesi son derecede önemlidir.



Şekil 4.22. Araçlarda nokta direnç kaynaklı T şekilli birleştirmeler.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

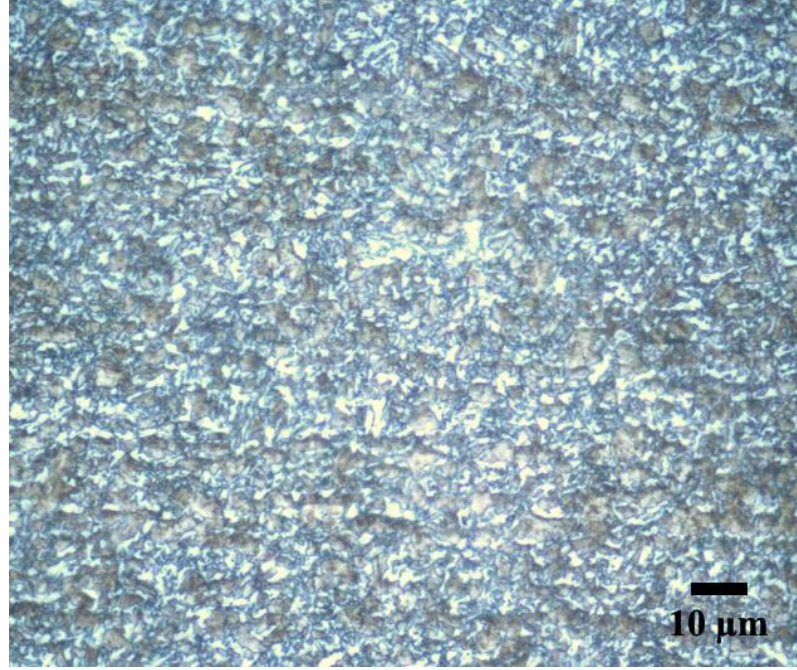
#### 5.1. GENEL BAKIŞ

Bu tez çalışmasında, DP çelik sacların nokta kaynak birleştirmelerinin mekanik ve özellikle de yorulma ve ve korozyonlu yorulma davranışları hem sayısal teorik hem de deneysel çalışma metotları kullanılarak incelenmiştir. Metodolojik olarak birinci aşama olarak ifade edebileceğimiz ilk çalışmada, otomobil gövdesinin ve dolayısıyla nokta kaynaklı birleştirmelerinin maruz kalabileceği gerilme tipleri için literatür ışığında model geliştirilmiştir. Esasende “T şekilli nokta kaynaklı birleştirme” nin önemi ve yaygın etkisi anlaşılmış ve buna göre hem teorik ve hemde deneysel olarak yorulma şartlarını simüle eden model oluşturulmuştur. Nokta kaynaklı birleştirmeler için model geliştirme çalışmalarında (sayısal teorik ve deneysel) DP 600 çelik sacları kullanılmıştır. Bu çalışmanın ikinci aşamasında, DP1000 çelik sacı kullanılarak hem teorik ve hem de deneysel olarak, nokta kaynaklı birleştirmelerin çekme ve sertlik çalışmalarının yanında esasen bu çalışmanın temelini oluşturan nokta kaynaklı birleştirmelerinin tasarlanan modele göre yorulma ve korozyonlu yorulma test ve analizleri yapılmıştır. Buna ilave olarak makro ve mikro görüntü analizleri (SEM, optik, stereo mikroskop’lar ile) hem mikroyapı ve hem de kırılma davranışlarının incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Sayısal teorik analizler ticari bir sonlu eleman yazılımı olan SIMUFACT ve ANSYS yazılımları kullanılmıştır.

#### 5.2. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILACAK MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ

Tez çalışmaları için temin edilen 500x500x1,2mm ebatlarında ticari DP1000 sac çeliği giyotin ile EN ISO 14273 standartlarına göre 100x30mm boyutlar halinde küçük parçalara kesilmiştir. Mikroyapı çalışması için küçük parçalarda kesilen bir

numune bakalite alınmış ardından zımparalama, parlatma ve %2 nital (%2 nitrik asit + %98metanol) çözültisi ile dağlanarak fazlar görüntü almaya uygun hale getirilmiştir. Gözlemlenen mikroyapı Şekil 5.1’de verilmiştir. Çizelge 5.1’ de ise DP1000 çeliğinin kimyasal kompozisyonun % ağırlık olarak verilmiştir.



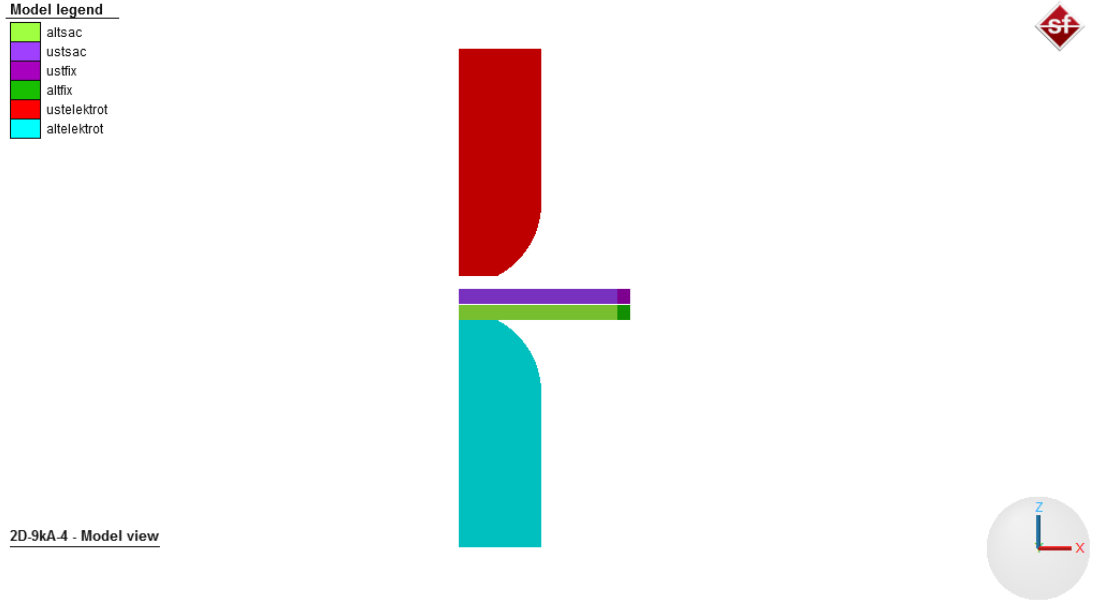
Şekil 5.1. DP1000 sac çeliğinin mikroyapısı.

Çizelge 5.1. DP100 sac çeliğinin kimyasal bileşimi (%).

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
<b>DP1000</b>	0,136	0,203	1,57	0,021	0,003	0,022	0,039
	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Nb</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>
	0,044	0,001	0,009	0,021	0,01	97,897	0,021

### 5.3. KAYNAK PARAMETRELERİNİN SIMUFACT TİCARİ PROGRAMI İLE KONTROLÜ

Kaynak parametrelerinin belirlenmesi hususunda bir ön çalışma olarak benzer malzeme modeliyle Simufact ortamında benzer sınır şartları oluşturularak nokta direnç kaynağı işlemi gerçekleştirilmiş ve çekme makaslama testleri yapılmıştır.



Şekil 5.2. Nokta direnç kaynaklamanın Simufact ortamında oluşturulan 2 boyutlu modeli.

Daha sonra belirlenen 6, 7, 8, 9 ve 10 kA kaynak akımlarında DP1000 sac çeliğine kaynaklama işlemleri yapılarak kaynak kaliteleri kontrol edildiğinde 6kA kaynak akımında kaynaklama sonrası birleşme olmadığı görülmüştür.

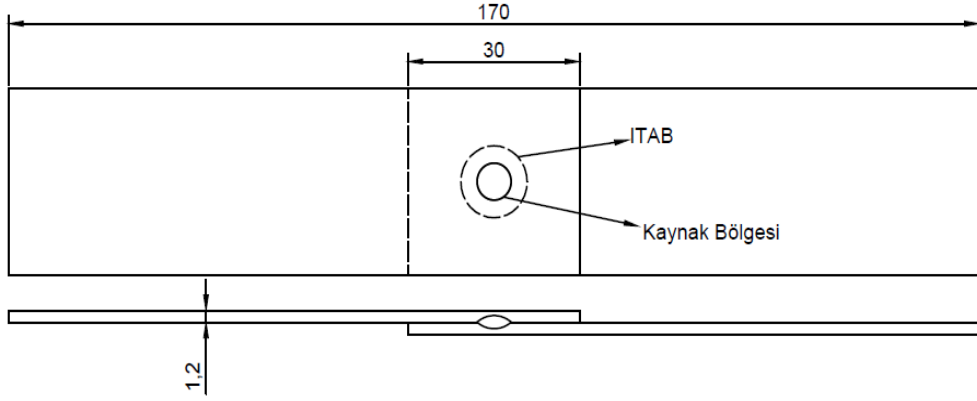


Şekil 5.3. Farklı kaynak akımı parametrelerin malzeme üzerinde uygulanması.



#### 5.4. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI İŞLEMİNİN YAPILIŞI

DP1000 sac çeliklerinden 100x30mm boyutlarında hazırlanan parçalar EN ISO 14273 standartlarına göre nokta direnç kaynağı yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynaklama işlemi için ISO 5821 standartlarında F tipi 6 mm çaplı radyüslü LUVATA marka A-TRODE bakır elektrotlar kullanılmıştır. Nokta direnç kaynak işlemi 4 kN (3,3 bar) elektrot kuvvetlerinde, 7,8 ve 9 kA kaynak akımlarında ve 12 çevrim kaynak zamanında yapılmıştır (1 çevrim=0,02 saniye). Kaynaklama işlemi ALBAKSAN firmasında Heron DN-80KVA'lık nokta direnç kaynak makinesinde yapılmıştır (Şekil 5.4).



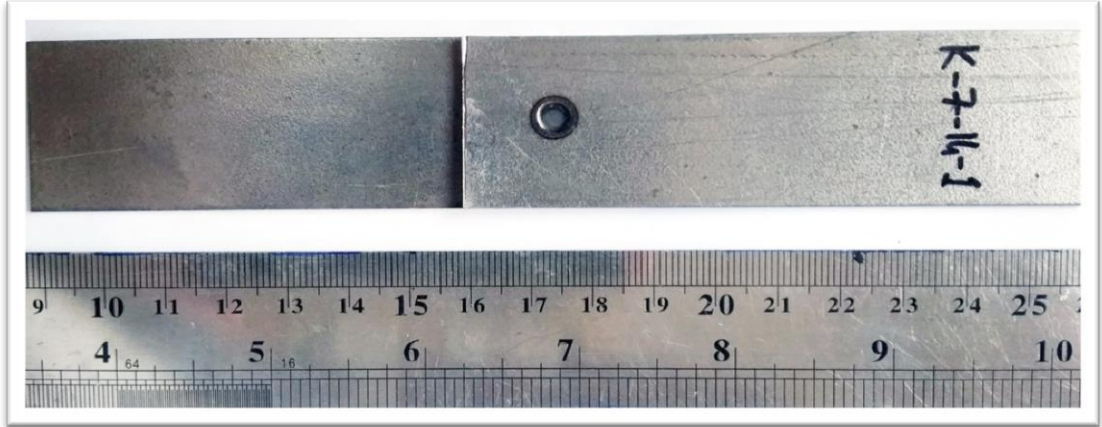
Şekil 5.4. Nokta kaynak numunesinin teknik resim çizimi.

Çizelge 5.2 Kullanılan elektrotun genel özellikleri.

Alaşım	Kimyasal Kompozisyon	Elektrik İletkenlik (m/Ωmm <sup>2</sup> )	Termal İletkenlik (W/mK)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (HV 30)
CuCrZr	Cr: %0,7-0,12	>43	320	490	>160
	Zr: %0,06-%0,15				
	Cu > 95				



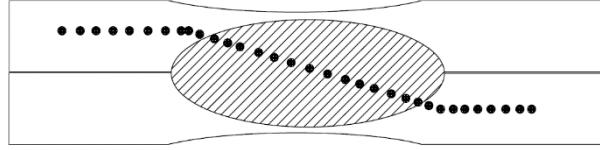
Şekil 5.5. Nokta direnç kaynak işlemi için kullanılan kaynak makinesi.



Şekil 5.6. Nokta direnç kaynağı ile EN ISO 14273 standartlarına göre birleştirilen numunenin görüntüsü.

#### 5.4. MİKROYAPI VE MİKRO SERTLİK ÇALIŞMALARI

Nokta direnç kaynak işleminden sonra her bir kaynak akımında kaynaklanan birer numune, kaynak bölgesinin ortasından diskotom aracılığıyla kesilerek bakalite alma işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan numuneler düşük numaralı zımpara (80) kağıdından başlanarak daha yüksek numaralı (2500) zımpara kağıdına kadar 90 derecelik zımparalama yönü değişikliğiyle zımparalanmış ve parlatma işlemi yapılmıştır. Sonra %2 nital çözeltisi ile dağlanarak alkol ile temizlenerek mikroskop altında incelemeye uygun hale getirilmiştir. Farklı büyütmelerde kaynak, ITAB ve ana metal bölgesinin faz görüntüleri elde edilmiştir. Daha sonra numuneler ile mikro sertlik çalışmaları için kullanılmıştır. Sertlik için vickers sertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri HV 0,3 değerlerinde Şekil 5.7'de görülen şablona uygun şekilde yapılmıştır.



Şekil 5.7. Nokta direnç kaynaklı numune kesiti ve sertliği alınan noktalar.

#### 5.5. ÇEKME MAKASLAMA TESTLERİ

4 kN elektrot kuvvetinde 7,8 ve 9 kA kaynak akımlarında kaynaklanan 1,2 mm kalınlığındaki DP1000 numunelere çekme makaslama testleri yapılmıştır. Testlerde çekme çenesinin hızı 2mm/dakika olarak belirlenmiştir. Her bir parametre için 2 adet deney numunesi kullanılmıştır.

#### 5.6. YORULMA MODELİ GELİŞTİRİLMESİ VE YORULMA DENEYLERİNİN YAPILMASI

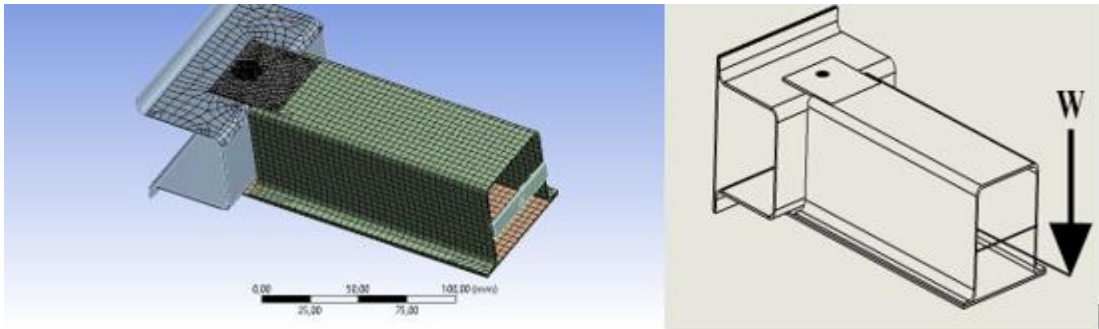
Çalışmanın 4. bölümünde de anlatıldığı üzere otomobillerde bulunan T şekilli yapısal parçalarının nokta direnç kaynaklı birleştirmelerinin maruz kaldığı yüklemeleri modellemek için benzer kuvvetlerin oluşturulabileceği deneysel yorulma

modellemesi yapılmış ve test düzeneği oluşturulmuştur. Modelleme için gerilmelerin analizi ANSYS ve Simufact sonlu elemanlar programı ile yapılmış ve doğrulanmıştır. ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile yorulma analizi yapılmıştır. Analizde ve doğrulama çalışmalarında 1 mm kalınlığındaki DP600 sac çeliği kullanılmıştır. Doğrulama çalışması kaynaklama işlemleri 8 mm çaplı düz konik uçlu bakır elektrot kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada gerinim temelli malzeme modeli oluşturulmuş ve ANSYS ortamında yapılan yorulma deneyleri gerinim ömrü baz alınarak yapılmıştır. Yapılan analizle testler ile doğrulanmıştır.

Çizelge 5.3. DP600 çeliğine ait mekanik özellikler.

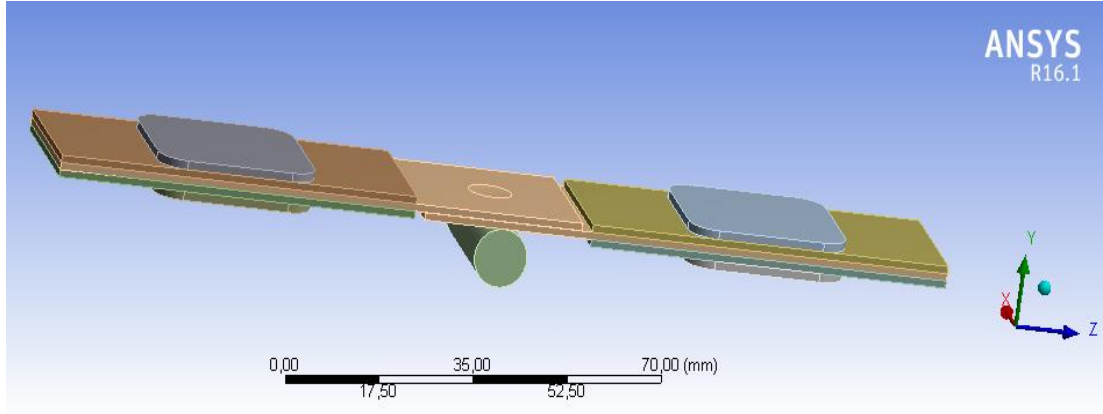
<b>DP600 çeliğinin mekanik özellikleri</b>	
Çekme dayanımı (MPa)	<b>660</b>
Akma dayanımı (MPa)	<b>412</b>
Young modülü (E)(Gpa)	<b>206</b>
Yorulma dayanımı katsayısı	<b>983</b>
Yorulma süneklik katsayısı	<b>0,211</b>
Yorulma dayanımı üsteli	<b>-0,101</b>
Yorulma süneklik üsteli	<b>-0,457</b>
Çevrimsel dayanım katsayısı	<b>1363</b>
Çevrimsel gerinim sertleşme üsteli	<b>0,219</b>

DP1000 çeliklerine yapılan yorulma deneyleri  $R=-0.5$ ,  $f=10\text{Hz}$  değerlerinde ve 7, 6, 4, 3, 2, 1 mm genlik değerlerinde yapılmıştır. Genlik değerlerindeki kuvvetler ANSYS ve Simufact ile elde edilmiştir. Analiz için önce nokta direnç kaynaklı birleştirmeye sahip T şekilli bir otomobil yapısının modeli ANSYS ortamında yüklemeye maruz bırakılmıştır.



Şekil 5.8. T şekilli yapısal parçanın modellenmesi ve kuvvet koşulu.

T şekilli parçaya yapılan analizler neticesinde parça üzerinde meydana gelen gerilme değerleri incelenmiş ve benzer sınır koşullarına sahip deney yapılabilir ideal modele indirgenmiş. Neticede oluşturulan model Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Yorulma modelinin ANSYS ortamındaki modeli.

Yorulma cihazının tutma kollarındaki kuvvet yoğunlaşmalarının önlenmesi amacıyla numune ile çenelerin arasına aynı kalınlıkta aynı malzemedeki sac yerleştirilmiştir. Oluşturulan iki modelin analizinden elde edilen gerilme ve yorulma ömür değerleri birbiriyle kıyaslanmıştır. Ardında model gerçek olarak aynı sınır koşullarında teste tabi tutulmuş ve değerler birbiri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 5.10. Özel amaçlı yorulma cihazı.



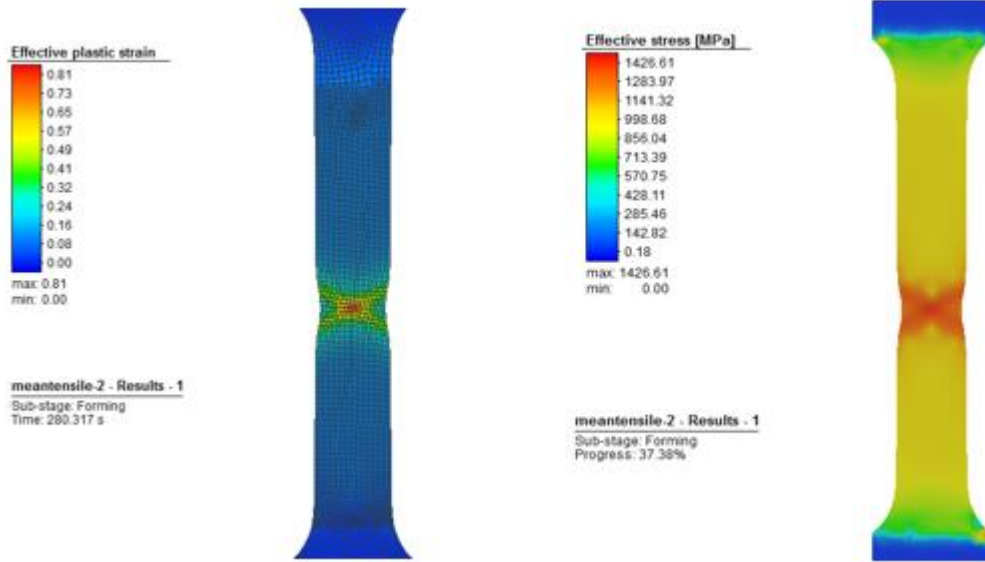
## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 6.1. KAYNAK PARAMETRELERİNİN TİCARİ SONLU ELEMANLAR YAZILIMI SIMUFACT İLE KONTROLÜ

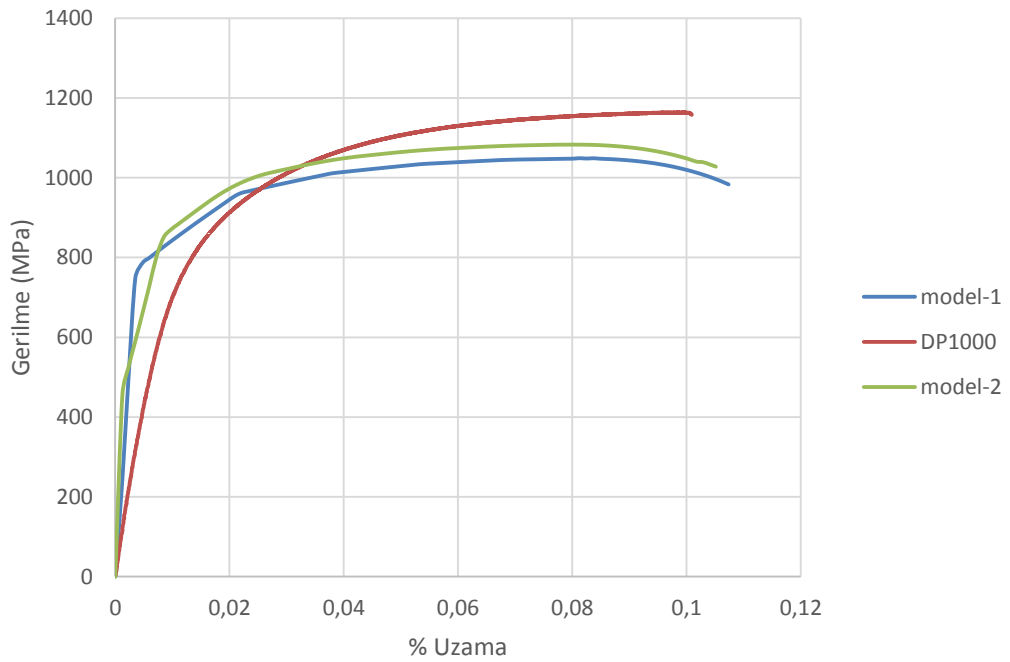
##### 6.1.1. Malzeme Modelinin Özellikleri

Nokta direnç kaynak işleminin yapılmasından önce kaynak işlemi aynı sınır koşullarında ve kaynak parametrelerinde Simufact aracılığıyla yapılmış olup kaynaklı numunelere çekme makaslama testleri yapılmıştır. Bütün çekme testlerinde çene hızı 2 mm/dk olarak belirlenmiştir. Kaynak işleminden önce kullanılan malzemenin çekme testi sonuçları Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. DP1000 malzemeye yapılan çekme testlerinin Simufact ortamında elde edilmiş dayanım sonuçları.

Şekil 6.2’de farklı modellerin çekme simülasyonları sonucu elde edilen eğrilerin DP1000 çeliğinin çekme testinden elde edilen eğriyle kıyaslanması gösterilmiştir. Programdan alınan gerilme-gerinim eğrisi ile DP1000 çeliğinin gerilme-gerinim eğrisi karşılaştırılması sonucunda malzeme modelinin DP1000 çeliğinin çekme dayanımına benzer dayanım sergilemektedir. Modellerin genel olarak belli bir akma gösterdiği gibi bir eğri söz konusu olsa da esasında kullanılan mesh yoğunluğuna bağlı olarak böyle bir sonuç gerçekleşmektedir. Bilindiği üzere deneysel olarak verilen eğriden de anlaşıldığı üzere çift fazlı çelikler belirli bir akma noktası göstermektedir.



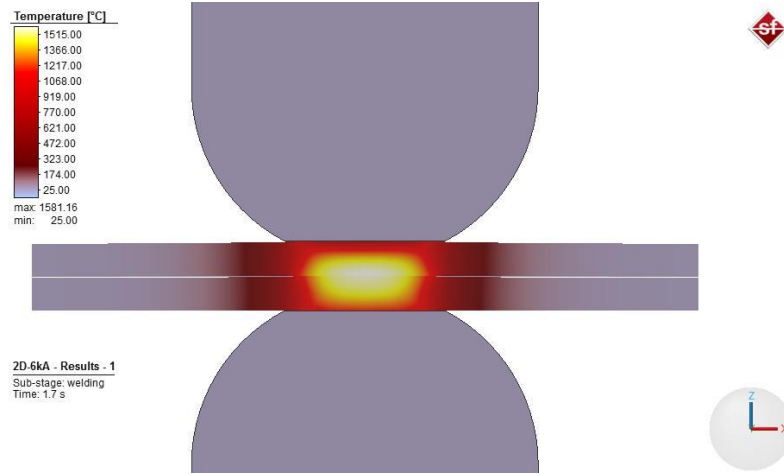
Şekil 6.2. Farklı modellerin çekme simülasyonları sonucu elde edilen eğrilerin DP1000 çeliğinin çekme testinden elde edilen eğriyle kıyaslanması.

### 6.1.2. Nokta Direnç Kaynağı İşlemi

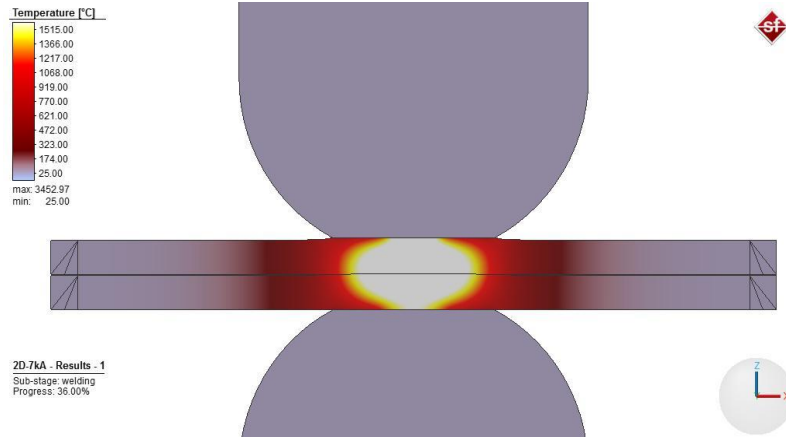
Kaynak simülasyonları için 2 boyutlu model oluşturularak kaynak işlemleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde kaynak metali çapı ve elektrot girintileri ölçülmüştür. Simülasyonda 10 kA kaynak akımlarında yapılan deneyde sıçrama ve deformasyonlar gözlemlenmiştir. 7,8 ve 9 kA kaynak akımlarında yeterli kaynak metali oluşumu gözlemlenirken 6 kA kaynak akımında yeterli oluşum meydana gelmemiştir. Simülasyon çalışmalarında kaynak akımının artmasıyla girinti



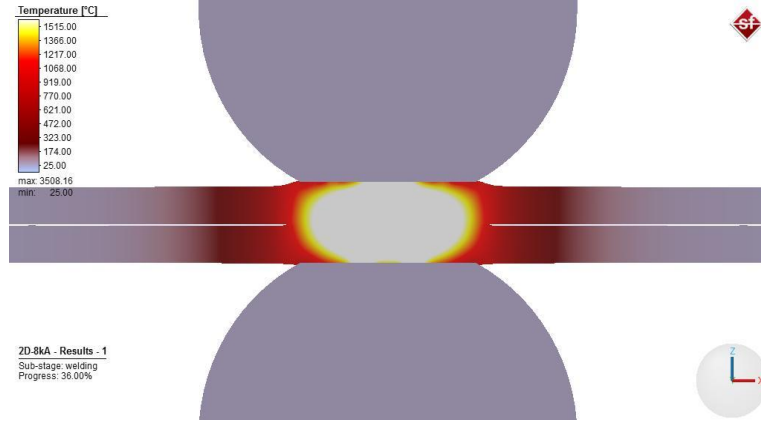
derinliğinin, kaynak bölgesi boyutlarının ve ITAB boyutlarının arttığı gözlemlenmiştir. Bunların yanında kaynak akımının artmasıyla kaynak bölgesinde çatlamların arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi malzemede artan kaynak akımıyla artan ısı girdisi ve kaynak bölgesindeki yüksek ısı kaybıdır. Şekil 6.3-Şekil 6.7’de farklı akımlarda kaynak bölgelerinde ısı oluşumları gösterilmiştir.



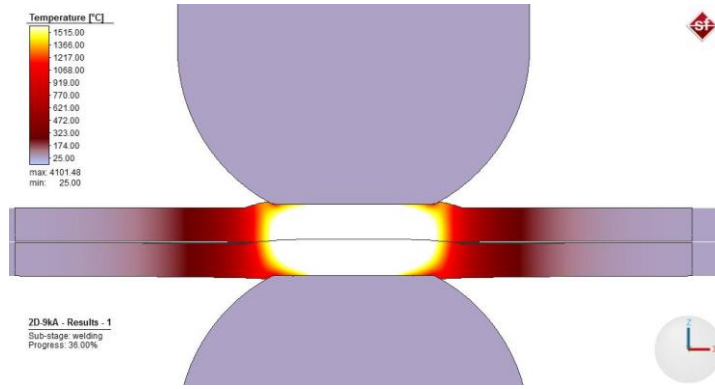
Şekil 6.3. 6 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı.



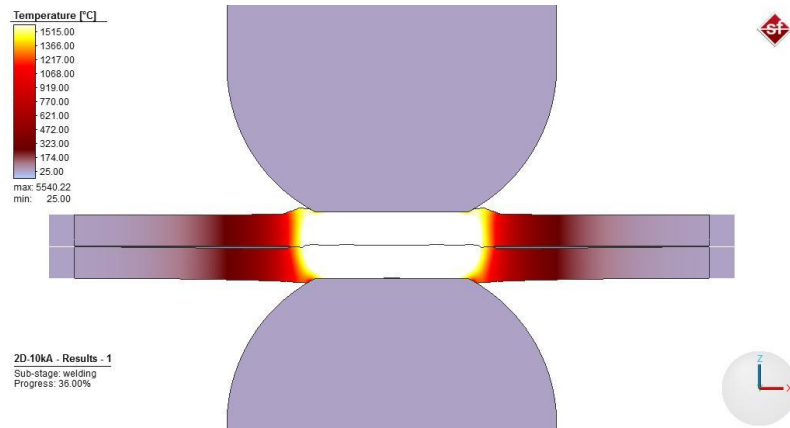
Şekil 6.4. 7 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.5. 8 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı.



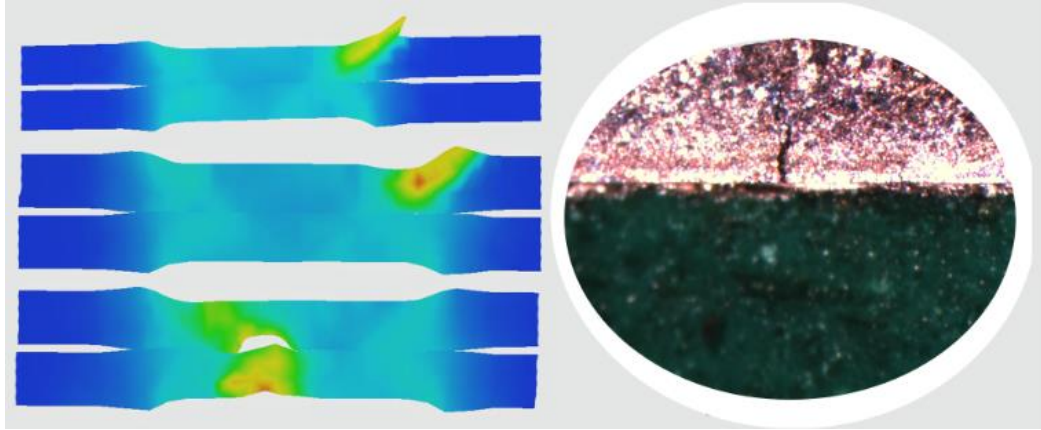
Şekil 6.6. 9 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.7. 10 kA akımda yapılan nokta kaynak işleminde oluşan sıcaklık dağılımı.

Kaynak akımının artması ile kaynak ısı girdisi de artmaktadır. Isı girdisi yukarda izah edildiği gibi sayısal simülasyonlarda 10 kA kaynak akımı uygulanması durumunda

kaynak erime bölgesinde “kaynak çatlaklarına” sebep olmaktadır. Benzer şekilde sonuçlar benzer kaynak parametreleri kullanılarak yapılan Deneysel çalışmalarda da gözlenmiştir. Bu sayısal simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Şekil 6.8’de ayrıca 10 kA kaynak akımında kaynak bölgesinde görülen yoğun deformasyon görülmektedir.

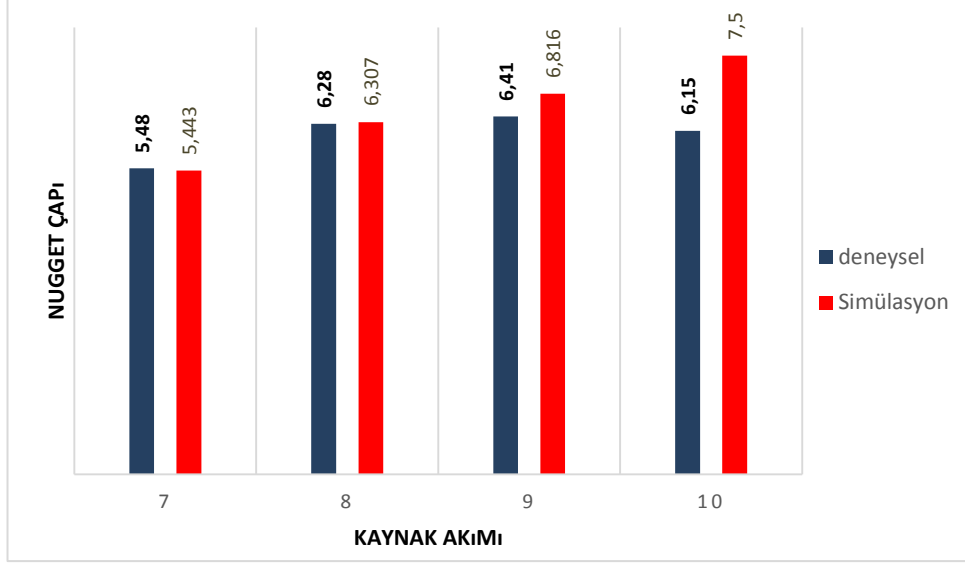


Şekil 6.8. kaynak akımlarının artmasıyla meydana gelen kaynak kusurları.

Sayısal modelleme ile üretilen simülasyon numunelerinin kaynak düğmesi çap ölçümleri, DP1000 çeliklerinin kaynaklanmasından sonraki çap ölçümleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Nokta direnç kaynaklı DP1000 çeliğinin kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Şekil 6.9’da ise simülasyon çalışmasından elde edilen kaynak metali ve ITAB boyutları ve deneysel çalışmalardan elde edilen değerlerin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. DP1000 çeliklerinin kaynak metali ITAB boyutları.

Kaynak Akımı (kA)	Deneysel boyutlar		Sayısal simülasyon boyutları	
	Nugget çapı (mm)	ITAB (mm)	Nugget çapı (mm)	ITAB (mm)
7	5,48	6,94	5,443	6,977-7,257
8	6,28	7,68	6,307	7,869-8,112
9	6,41	7,95	6,816	8,586-8,827
10	6,15	7,9	7,5	9,417-9,717

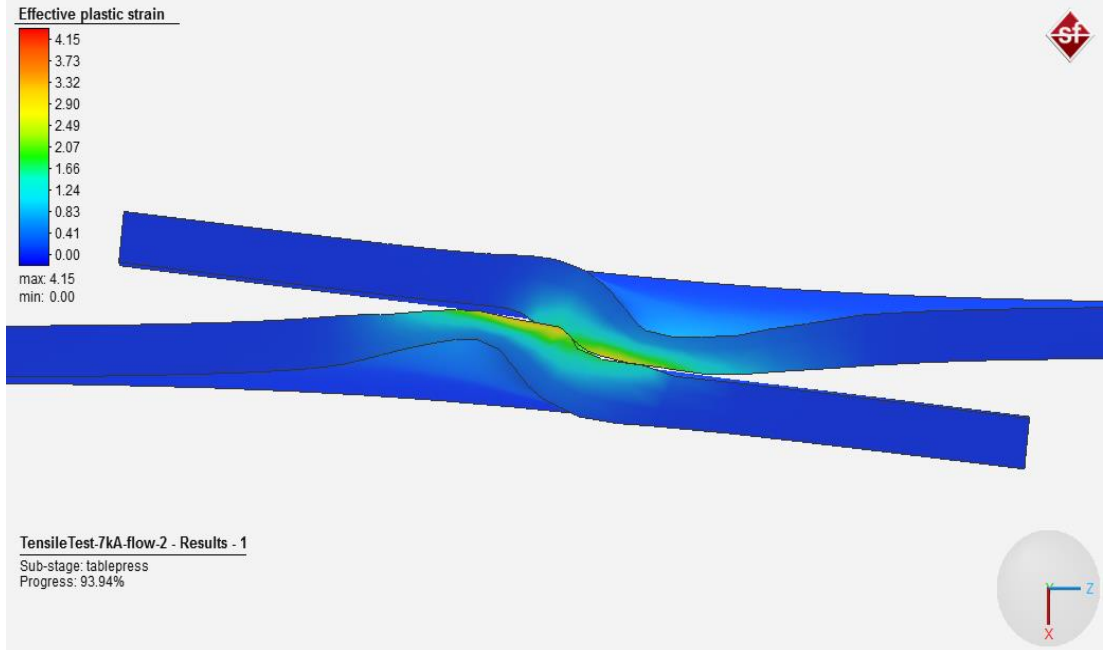


Şekil 6.9. İki çalışmadan elde edilen kaynak boyutu değerleri.

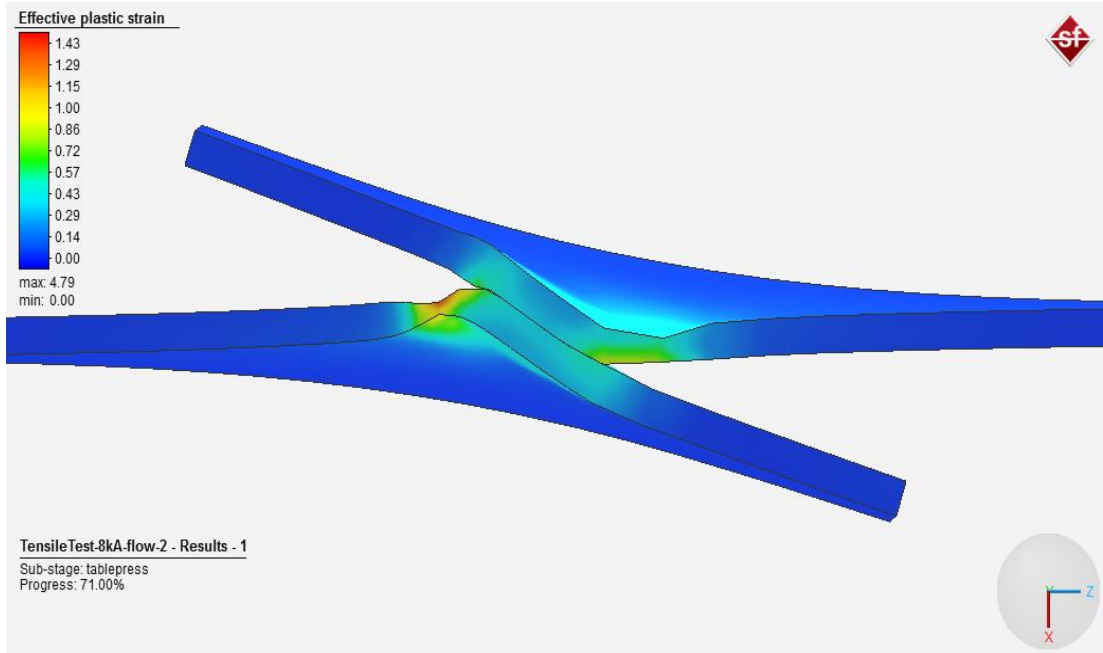
Artan kaynak akımlarıyla ortaya çıkan kaynak bölgesi boyutu farklılıklarının malzeme modelindeki farklılıklardan ve sıçrama olayının tam olarak modellenmesinin zor olmasından kaynaklandığı, ayrıca gerçek elektrot yüzeyinde tekrarlı kullanımlardan dolayı meydana gelebilecek deformasyon ve aşınmalar neticesinde ortaya çıkabileceği değerlendirilmektedir [75,78,82].

### 6.1.3. Nokta Direnç Kaynaklı Birleştirmelerin Çekme Makaslama Özellikleri

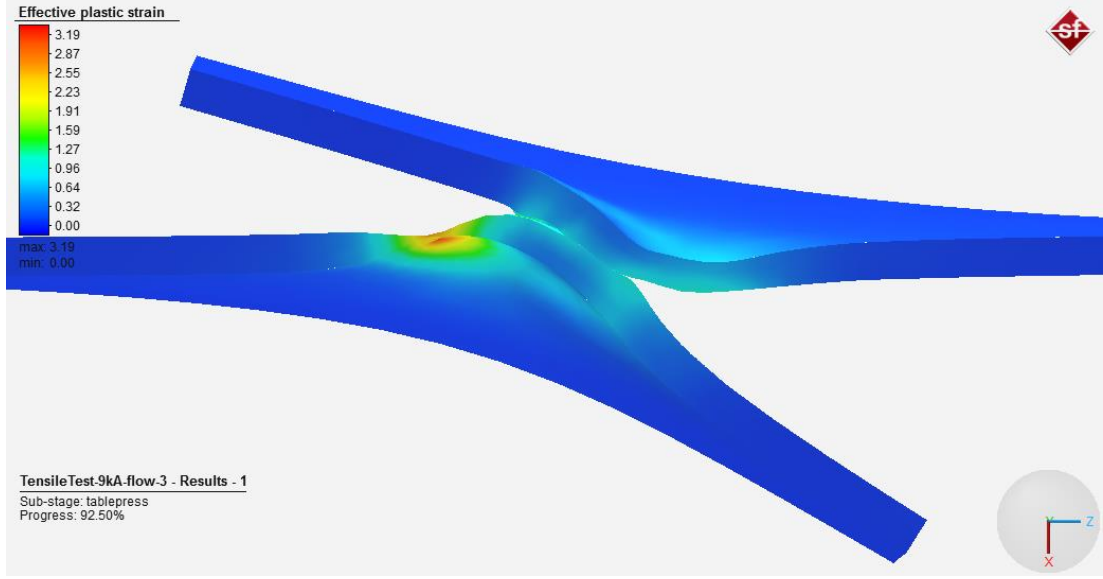
Kaynaklı birleştirmelerin yük taşıma kapasitelerini belirlemek amacıyla nokta direnç kaynaklı 2 boyutlu numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak 7,8 ve 9 kA kaynak akımında kaynaklanan numunelerin simüfact ortamında yapılan çekme makaslama testinden kuvvet uzama eğrileri elde edilmiştir. Şekil 6.10, 6.11 ve 6.12'de yapılan 3 boyutlu çekme makaslama simülasyonları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 7 kA kaynak akımlarında ara yüzey kırılması meydana gelirken 8 ve 9 kA kaynak akımlarında çekme tipi kırılma gözlemlenmiştir.



Şekil 6.10. 7 kA kaynak akımı ile kaynaklanan DP1000 çeliğinin çekme-makaslama simülasyonu.



Şekil 6.11. 8 kA kaynak akımı ile kaynaklanan DP1000 çeliğinin çekme-makaslama simülasyonu.



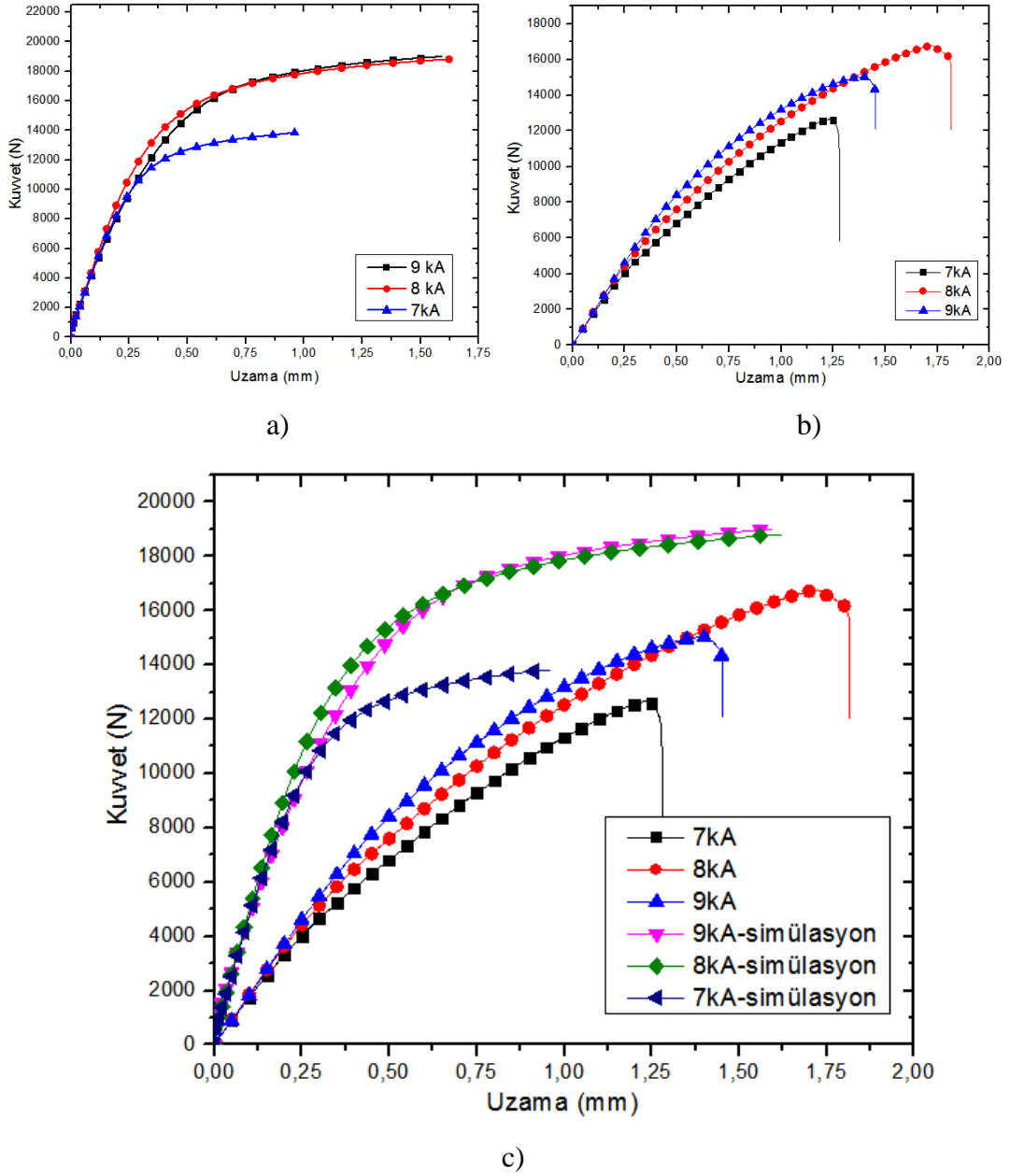
Şekil 6.12. 9 kA kaynak akımı ile kaynaklanan DP1000 çeliğinin çekme-makaslama simülasyonu.

Farklı nokta direnç kaynak akım parametreleri ile birleştirilen DP1000 çeliğinin 3 boyutlu simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen çekme yükü taşıma kapasitesi, değerlerinin gerçek çekme yükü taşıma kapasitesi, değerleri ile karşılaştırılması Çizelge 6.3'te görülmektedir. Yapılan deneysel çekme testi çalışmalarının neticesinde en iyi yük taşıma kapasitesi 8 kA kaynak akımlarından elde edilmiştir. Simülasyon çalışmaları sonucunda ise en iyi yük taşıma kapasitesi 9 kA akımında kaynaklanan DP1000 numunelerden elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda 9 kA kaynak akımı ile kaynaklanan numunelerde aşırı sıçramaların olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar nokta direnç kaynak işlemlerinde makul sıçramalar kabul edilebilir olsa da sıçramalar ergiyen metal miktarını azaltmaktadır [44]. Bununla birlikte nokta direnç kaynağı işleminde oluşan sıçramaların birleştirmenin çekme makaslama yük kapasitesini ve enerji absorpsiyonunu azaltabileceği yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [75]. Dolayısıyla sayısal simülasyon yönteminde sıçrama tam olarak modellenemediği için artan kaynak akımına rağmen sıçrama gözlemlenmemiş ve çekme makaslama yük kapasitesi artmaya devam etmiştir. Aksine deneysel çalışmalarda sıçramanın çekme makaslama yük taşıma kapasitesini azalttığı görülmüş olup aşırı sıçramanın 9 kA akımında kaynaklanan bazı numunelerde ara yüzey kırılmasına sebep olduğu da gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.2. Farklı nokta direnç kaynak akım parametreleri ile birleştirilen DP1000 çeliğinin 3 boyutlu simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen çekme yükü taşıma kapasitesi değerlerinin gerçek çekme yükü taşıma kapasitesi değerleri ile karşılaştırılması.

Numune	Çekme makaslama deney sonuçları			
	Çekme makaslama yükü taşıma kapasitesi (N)	Uzama (%)	Çekme makaslama, yükü taşıma kapasitesi 3D (N)	Uzama (%)
7 kA	13109,5	1,37926	13832,9	0,96
8 kA	16606,9	1,70692	18813,3	1,62
9 kA	14705,8	1,41938	19005,5	1,59

Yapılan üç boyutlu simülasyonların sonucunda 9, 8 ve 7 kA kaynak akımlarında elde edilen maksimum çekme makaslama yük taşıma kapasite değerleri; sırasıyla 19 kN, 18,8 kN ve 13,8 kN olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte Deneysel Çalışma sonuçlarında bu değerlerden farklı olarak çekme makaslama yük taşıma kapasitesi değerleri biraz düşük çıkmıştır. Şekil 6.13-a incelendiğinde 9 ve 8 kA kaynak akımlarında kaynaklanan numunelerde benzer uzama davranışı gözlemlenirken, 7 kA kaynak akımlarında ise ara yüzey tipi kırılma sebebiyle daha az uzama ve yük taşıma değerleri gözlemlenmiştir. Şekil 6.13-b incelendiğinde ise en iyi çekme makaslama yük taşıma kapasitesi 8 kA kaynak akımlarında kaynaklanan numunelerde gözlemlenmiştir. Üç boyutlu çalışmaların ikisinde de 7 kA kaynak akımlarında ara yüzey kırılması gözlemlenmiştir. 9 ve 8 kA kaynak akımlarında kaynaklanan numunelerde ise literatürde yüksek absorpsiyon ve plastik deformasyon özellikleri sebebiyle görülmesi tercih edilen çekme tipi kırılma gözlemlenmiştir [39]. Bunların yanında gerçek testler ve üç boyutlu simülasyon çalışmalarından elde edilen değerlerin arasındaki nicel farkın, modellerde sıçrama olayının ve kusurların tam olarak modellenememesinden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 6.13. Farklı nokta direnç kaynak akım parametreleri ile birleştirilen DP1000 çeliğinin 3 boyutlu simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen kuvvet-uzama eğrileri. a) üç boyutlu sayısal model grafikleri, b) deneysel sonuç grafikleri c) a ve b'deki grafiklerin birlikte görünümü (yeniden üretilen deneysel çekme eğrileri ve simülasyon ile üretilen çekme eğrileri).



## 6.2 MİKROYAPI VE MİKROSERTLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

### 6.2.1 Mikroyapı Özellikleri

Kaynak işlemleri ısı girdisi sebebiyle mikroyapısal değişimlere sebep olmaktadır. Isıdan etkilenen bölgenin kalitesi, kaynağın mekanik davranışı üzerinde araştırmacıların bildirdiğine göre oldukça etkilemektedir. Özellikle bu çalışmada olduğu gibi üst üste bindirilen numunelerin nokta direnç kaynağı ve çekme makaslama testinde, ITAB'ın kaynaklı birleşimlerinin dayanımı üzerinde etkisi, çekme makaslama sırasında gerilmenin her iki dikey yönde ITAB'da yoğunlaşmasından dolayı çok daha artmaktadır. Dolayısıyla kantitatif ve kalitatif olarak nokta direnç kaynağının kalitesini veya seviyesini belirlemektedir. ITAB'da meydana gelen değişimler (tane boyutu, faz dönüşümü, çökelti oluşumu, vb.) ITAB'ın performansında belirleyici olmaktadır. ITAB' da tane büyüklüğü olarak küçük taneli yapıdan kaynak metaline doğru iri taneli yapı oluşumları gözlemlenir. Bu ise kaynak metalinden esasa metale doğru kaynak sırasında oluşan sıcaklık gradyanına bağlı dönüşüm sıcaklıkları ile alakalıdır. Bilindiği üzere çeliklerde mikroyapı değişimi için sıcaklığın  $Ac_1$  sıcaklığının üzerinde olması gerekir. ITAB sıcaklık gradyanı ergime sıcaklıklarına yakın sıcaklıklar ile  $Ac_1$  arasındaki değerlerde oluşmaktadır. ITAB tane oluşumu  $Ac_1$  sıcaklıkları arasında meydana değişmektedir. Sıcaklığın artmasıyla östenit fazı hızlı soğumayla da martensit fazı meydana gelir.  $Ac_3$  sıcaklığının hemen üstündeki sıcaklıklarda, tutulma süresinin kısa olması sebebiyle tanelerin büyümesi için yeterli zaman çok azdır. İri taneli ITAB oluşumunda ise sıcaklık  $Ac_3$  sıcaklıklarının çok üstündedir. Bu sebeple östenit tanelerinin irileşmesi için yeterince zaman vardır. Sıvı fazını aşan sıcaklıklarda ise çok daha iri taneli iğnemsiz martensit fazından oluşan döküm yapıları kaynak metali oluşmaktadır.

Yapılan kaynak işlemleri mikroyapısal değişikliklerin etkilerinin anlaşılması için mikroyapısal gelişimin anlaşılması önemlidir. Şekil 6.14, 6.15 ve 6.16'da 7,8 ve 9 kA kaynak akımlarında nokta direnç kaynaklanan DP1000 çeliklerinin makro görüntüleri verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere kaynak akımının artmasıyla ITAB genişliği ve kaynak metali genişliği artmaktadır. Özellikle 9 kA kaynak akımı değerlerinde ITAB genişliği oldukça artmaktadır.



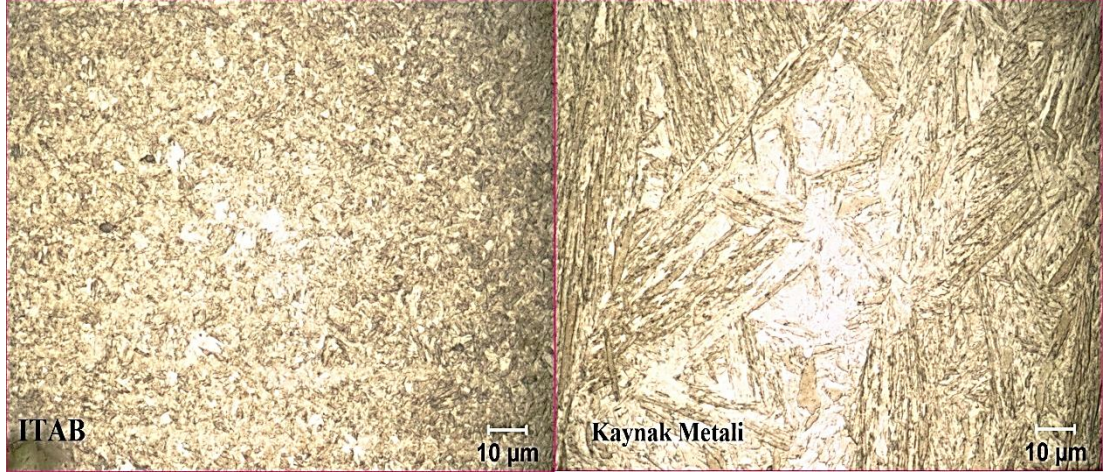
Şekil 6.14. 7 kA kaynak akımlarında kaynaklanan DP1000 çeliğinin makro görüntüsü.



Şekil 6.15. 8 kA kaynak akımlarında kaynaklanan DP1000 çeliğinin makro görüntüsü.



Şekil 6.16. 9 kA kaynak akımlarında kaynaklanan DP1000 çeliğinin makro görüntüsü.



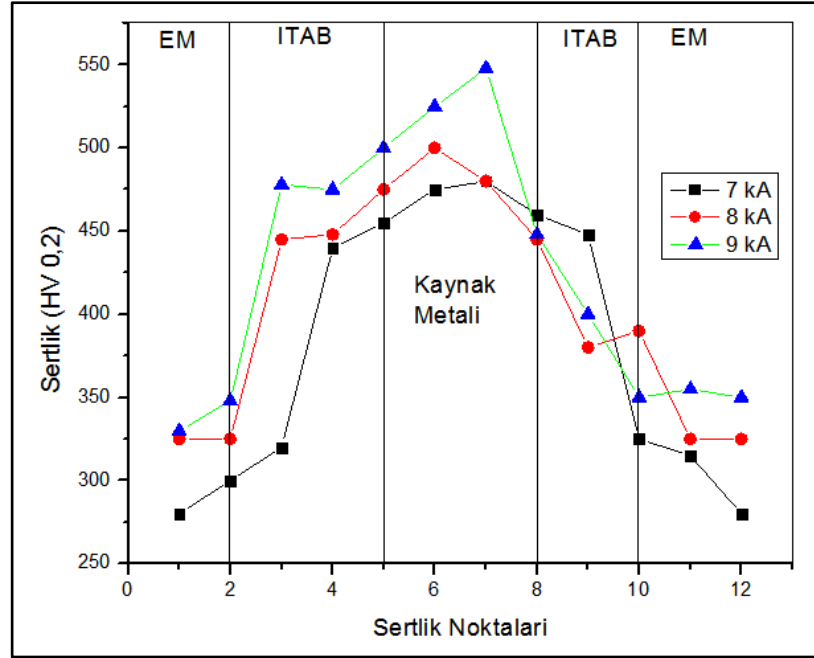
Şekil 6.17. DP1000 çeliğinin ITAB ve kaynak metali mikroyapı görüntüsü.

Şekil 6.17’de görüldüğü gibi kaynak metali yüksek ısı girdisine ve soğumaya bağlı olarak iri taneli iğnemsî martensit yapılardan oluştuğu görülmektedir. ITAB’ da ise ısının tane boyutunu artıracak kadar yüksek olmaması sebebiyle daha düşük tanelerden oluştuğu görülmektedir.

### 6.2.2. Sertlik Testi

Nokta kaynak numunelerin sertlik profilleri Şekil 6.18’de verilmiştir. Görüldüğü gibi bu çalışmada tipik olarak ileri dayanımlı çeliklerin sertlik profilleri sağlanmıştır. Genel olarak çift fazlı ve diğer ileri dayanımlı çeliklerin sertleşebilirlikleri iyi olduğundan erime bölgesi ve ITAB bölgelerinde oluşan östenit ve miktarına bağlı olarak, nokta kaynağının dar bir alanda olması ve dolayısıyla ısı transferinin yüksek olmasından ve elektrodların da soğutmalı olmasından dolayı nokta direnç kaynağı sonrası soğuma martensit oluşacak kadar hızlıdır. Netice olarak eriyen ve  $Ac_1$  üstü sıcaklıklara çıkan bölgelerde oluşan östenitin önemli bir kısmı martensite dönüşmekte yani sertleşme gerçekleşmektedir. Dolayısıyla nokta direnç kaynaklı birleştirmelerinin dayanımı için oldukça önemli oluşumlar gerçekleşmektedir. Kaynak bölgesindeki sertlik dağılımını belirlemek ve nokta direnç kaynak işlemi sırasında ısı girdisinin mikro sertlik üzerindeki etkisini gözlemlemek için farklı kaynak akımına birleştirilen nokta kaynaklı bölgelerde mikro sertlik ölçümleri yapıldı. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere kaynak işleminden sonra kaynak bölgesi

sertliği oldukça artmaktadır. Sertlik ile dayanım arasında doğrusal ilişki vardır. Kaynak sertliği arttıkça dayanımda artmaktadır.



Şekil 6.18. DP1000 sac çeliğinin farklı kaynak akımlarında gerçekleştirilen nokta direnç kaynağı işleminden sonra elde edilen sertlik değerleri.

Kaynak işlemi ile hızlı ısıtma soğutma çevrimleri, malzemenin sertleşebilirlik yeteneğine göre, sert bir faz olan martensit fazının oluşmasına sebep olabilmektedir. Dolayısıyla ITAB ve kaynak metalinde martensit oluşumuna bağlı olarak sertleşme meydana gelmektedir. Martensit oranı ITAB'dan kaynak bölgesine doğru artmaktadır. Dolayısıyla sertlik değerlerinin ısıtma ve soğuma hızının fazla olduğu kaynak metaline doğru arttığı Şekil 6.18'de görülmektedir.

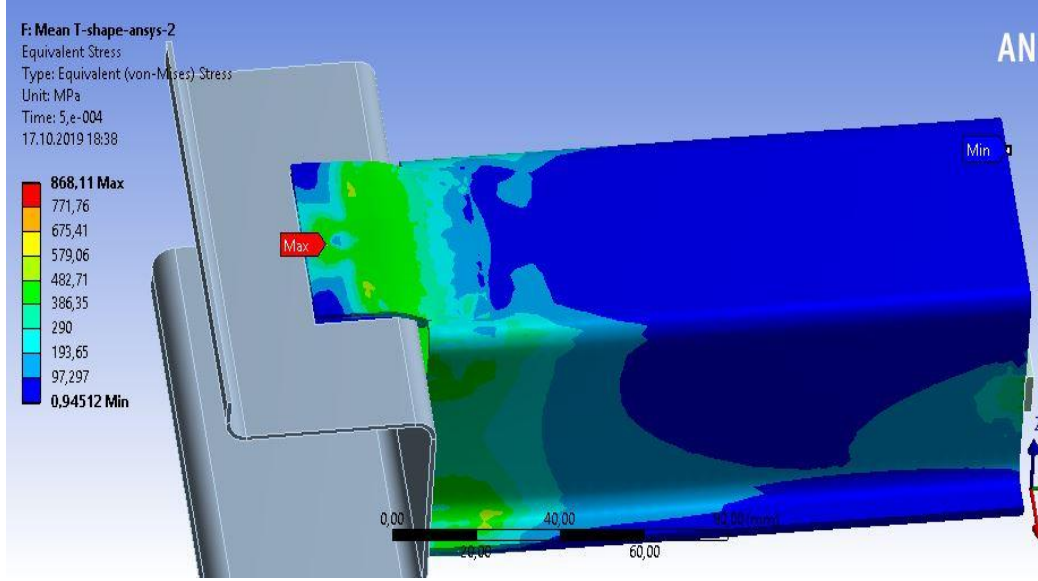
Ayrıca ITAB'da sertlik değişiklikleri gözlemlenmiştir. Bununla ilgili benzer çalışmada Yılmaz vd. [116], nokta direnç kaynaklı bağlantıların her iki tarafındaki ITAB'lardaki sertlik değerlerindeki yüksek değişikliğin, nokta direnç kaynağı işlemi sırasında kaynak döngüsündeki termal değişimler nedeniyle ITAB'lardaki ciddi mikroyapı değişikliklerinden kaynaklandığını açıklamışlardır. Bununla birlikte literatürde DP çeliklerinin mikro sertliği üzerine yapılan bazı çalışmalarda elde edilen sertlik değerleri araştırılmıştır. Pouranvari ve arkadaşları [75], DP980 sac çeliği ile yaptıkları nokta direnç kaynağı çalışmasında kaynak metalini 500

HV, ITAB sertliğini 300 HV olarak elde etmişler. Ayrıca yüksek martensit fazına sahip DP çeliklerinde martensit fazının temperlenmesine bağlı olarak ITAB yumuşamasının meydana gelebileceği vurgulanmıştır. Aydemir ve arkadaşları [117] yaptıkları çalışmalarda kaynak metali sertliğini 400-530 HV arasında aynı şekilde Pakkanen ve arkadaşları [118], yaptıkları çalışmalarda kaynak metali sertliğini 400-550 HV olarak elde etmişlerdir. Yapılan araştırmalar neticesinde elde edilen sertlik değerlerinin literatürde yapılan çalışmalara benzer olarak elde edildiği Şekil 6.18’de görülmektedir.

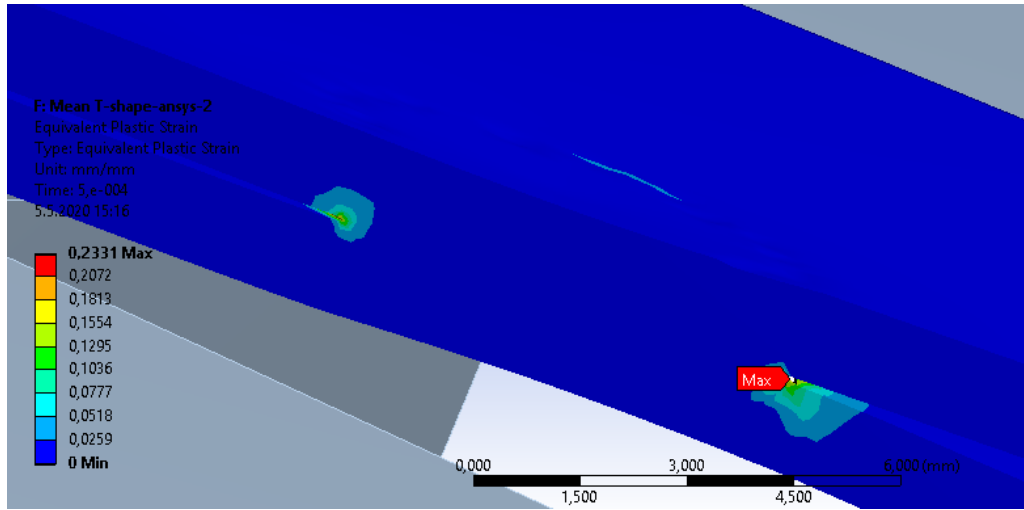
## **6.3 YORULMA ÇALIŞMALARI**

### **6.3.1 Yorulma Deneyinin Modellenmesi ve Doğrulama Çalışmaları**

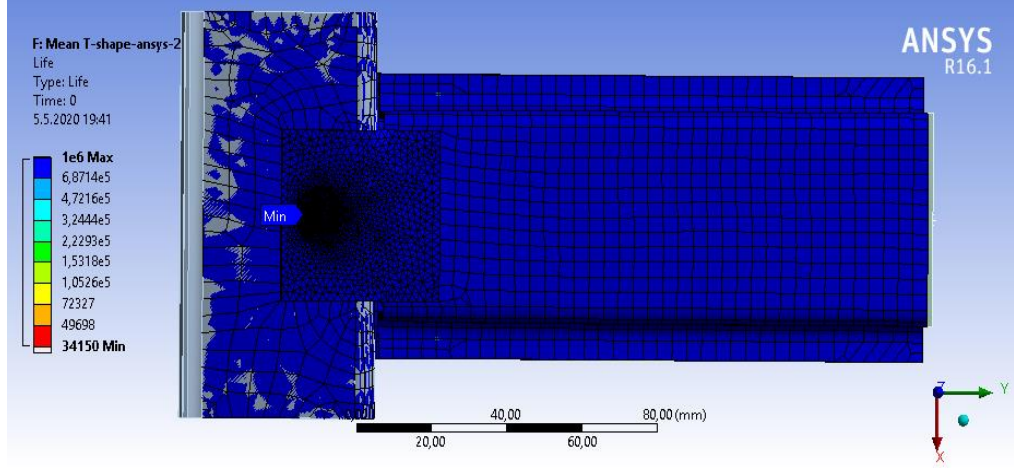
Bu çalışmada, otomobillerde nokta direnç kaynakla birleştirilmiş T şekilli komponentlerin eğilmesi baz alınarak nokta direnç kaynaklı T şekilli bir parça modellenmiş ve ANSYS ortamında yüklemeye maruz bırakılmıştır. Yükleme şekil değiştirme üst limiti 5 mm alt limit ise 0 olarak uygulanmıştır. T şekilli parçaya uygulanan 5 mm yer değiştirme ile yapılan sayısal modellemede Şekil 6.10’da gösterilen gerilim dağılımları elde edilmiştir. Sayısal simülasyonda maksimum gerilme ve gerinim değerinin birleştirilmenin kök kısmında oluştuğu gözlemlenmiştir. Model geliştirme ve doğrulama çalışmalarında 1 mm kalınlıkta DP600 sac çeliği kullanılmıştır. Doğrulama çalışmaları için sadece 1 kaynak parametresi kullanılmış olup CAD dosyaları kaynaklama işleminde elde edilen kaynak metali çapı doğrultusunda modellenmiştir. Yorulma çalışmalarında ANSYS ortamında gerinim temelli malzeme oluşturulmuş olup malzemenin özellikleri bir önceki bölümde Çizelge 5.3’de verilmiştir.



Şekil 6.19. ANSYS ortamında T şekilli modelin yüklenmesi ile üzerinde oluşan gerilme dağılımları.

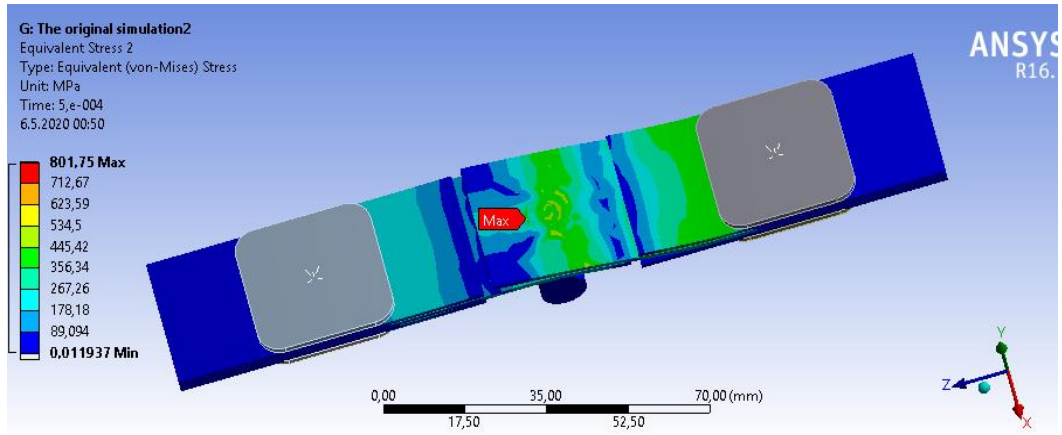


Şekil 6.20. ANSYS ortamında T şekilli modelin yüklenmesi ile kaynak kökünde oluşan gerinim değerleri.

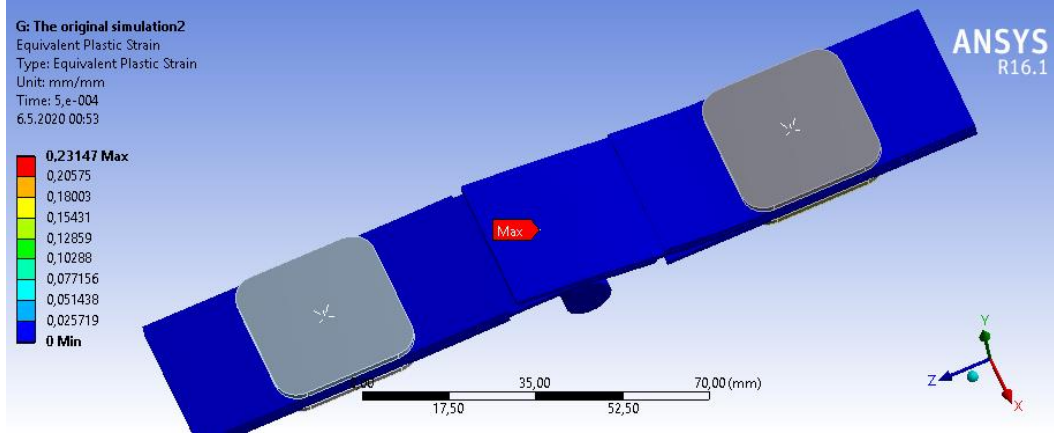


Şekil 6.21. ANSYS ortamında T şekilli modelden elde edilen yorulma ömür verileri.

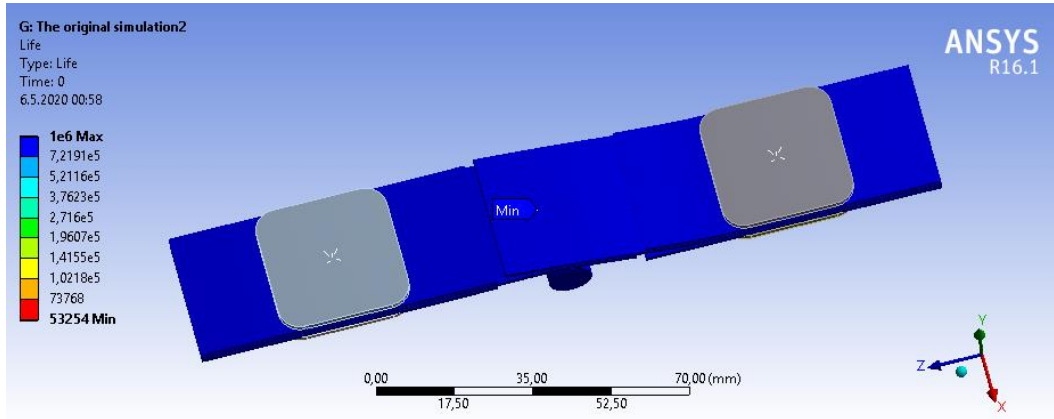
T şekilli parçaya yapılan simülasyon çalışmalarında maksimum gerilme ve gerinim değerlerinin, birleşim noktasında sac parçalarının birbirinden uzaklaştığı kısma bakan kaynak kökünde meydana geldiği görülmüştür. Geliştirilen model için yapılan sonuçlarda gerilim büyüklüğü, gerilim dağılımı ve gerinim oranları T şekilli otomobil parçası modeli ile arasında uyum gözlenmiştir. Geliştirilen modelin ANSYS ortamında yapılan analizlerden elde edilmiş sonuçları Şekil 6.19’da geliştirilen modelin gerilim büyüklükleri ve dağılımı, Şekil 6.20’de gerinim oranı, Şekil 6.21’ de yorulma ömür verileri olarak verilmiştir.



Şekil 6.22. Geliştirilen modelin ANSYS ortamında elde edilmiş gerilim değerleri.



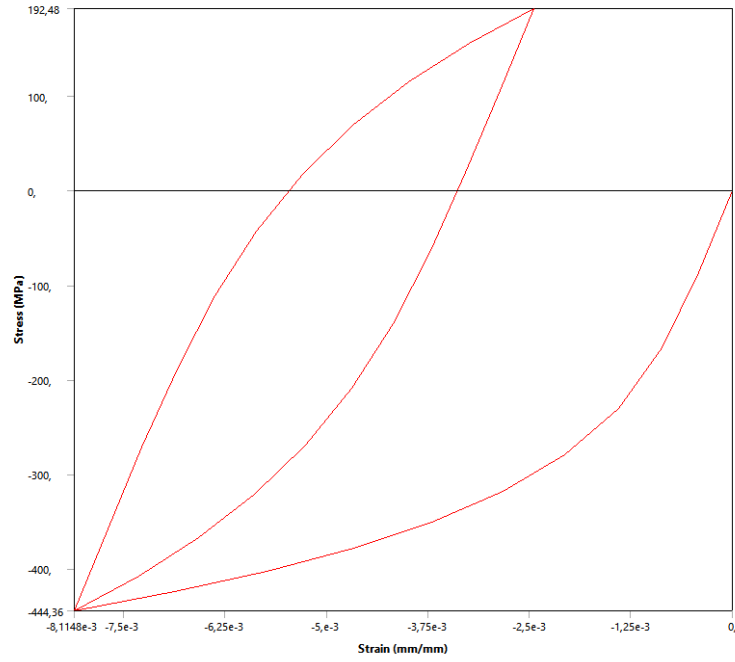
Şekil 6.23. Geliştirilen modelin ANSYS ortamında elde edilmiş gerinim oranları.



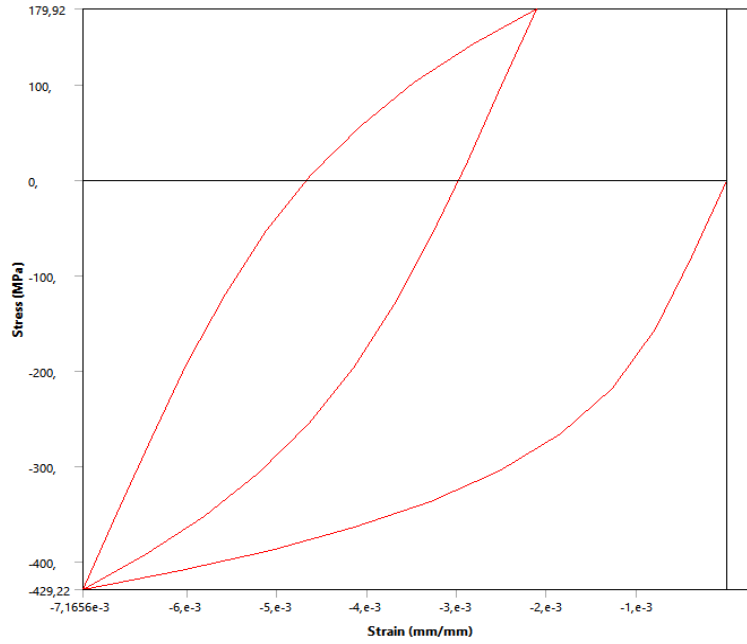
Şekil 6.24. Geliştirilen modelin ANSYS ortamında elde edilmiş ömür verileri.

Nihai olarak analizi yapılmış olan iki modelin bir yük çevrimine ait gerilim gerinim eğrileri arasında uyum gözlenmiştir.





Şekil 6.25. T şekilli modele ait (DP600) ANSYS ortamında elde edilen gerilim ve gerinim eğrisi (R, gerilme oranı=-0.43).



Şekil 6.26. Geliştirilen modele ait (DP600) ANSYS ortamında elde edilen gerilim ve gerinim eğrisi (R, gerilme oranı =-0.41).

Elde edilen veriler ve kıyaslamalar doğrultusunda doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalar için nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numuneler geliştirilen model ile aynı parametrelerde yorulma deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler

neticesinde Çizelge 6.3'teki yorulma ömürlerine ulaşılmıştır. Deneylelerden elde edilen veriler birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. ANSYS ortamında elde edilen veriler ile gerçekte yapılan deneylelerden elde edilen farkın sebebi ANSYS ortamında gerçekte kaynak operasyonlarında meydana gelen çarpılma, faz oluşumu ve çentik etkisinin modellenmede olmamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.3. Geliştirilen model ile yapılan deneysel yorulma deneyleleri neticesinde elde edilen hasar çevrimleri.

<b>DP600 Numune</b>	<b>Hasar Çevrimi</b>
Numune 1	45262
Numune 2	29600
Numune 3	34560

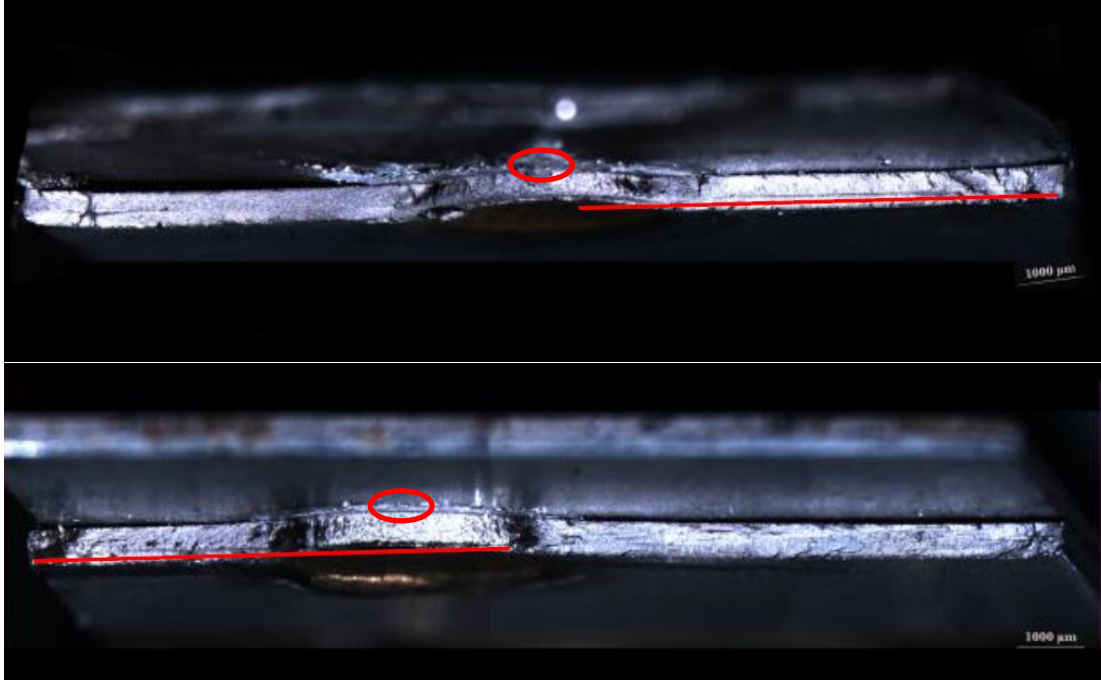
Çizelge 6.4. Yorulma deneyleleri neticesinde farklı modellerden elde edilen hasar çevrimleri.

<b>T şekilli Model (ANSYS)</b>	<b>Geliştirilen Model (ANSYS)</b>	<b>Geliştirilen Model (Deneysel)</b>
34150	53254	36474

Deneysel yorulma çalışmaları neticesinde DP600 numunelerin kırılma bölgeleri Şekil 6.27 ve Şekil 6.28'de incelenmiştir.



Şekil 6.27. Yorulma deneyleğine tabi tutulan DP600 numunelerin kırık yüzeylerinin makro görüntüsü.



Şekil 6.28. Yorulma deneyine tabi tutulan DP600 numunelerin kırık yüzeylerinin dik görüntüleri.

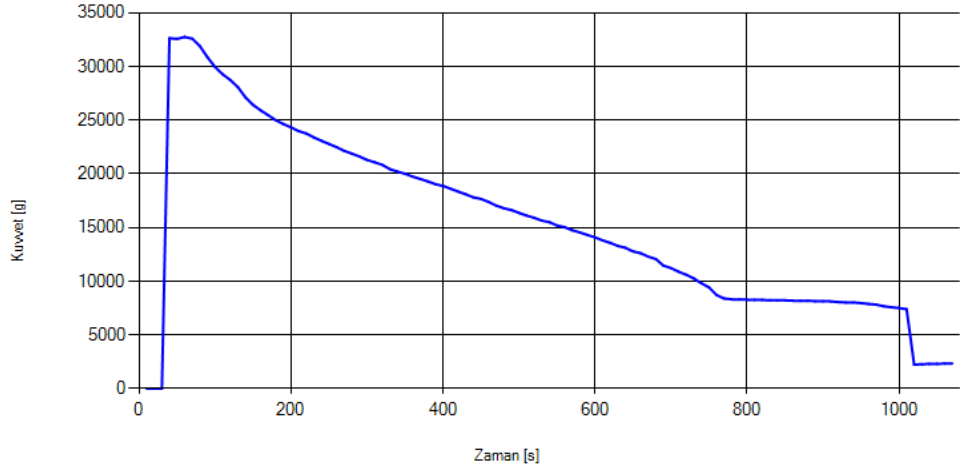
Tersinir eğilmenin de etkisiyle yüzeyde basma-çekme gerilmeleri oluşurken yüzeyin arasında kuvvetlerin etkisinde olmayan nötr eksen oluşur. Şekil 6.28’de nötr eksen kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Nötr eksen sac çeliğin uç kısımlarındayken kaynak bölgesine yaklaştıkça nötr eksen kaynak metali yüzeyine kaydığı görülmektedir. Bu sebeple maksimum çekme gerilmeleri iki sacın birleştiği bölgede (elips ile gösterilen nokta) kaynak kökünde oluşmaktadır.

Sonuç olarak T şekilli parça modeline ANSYS ortamında 5 mm sehim ile zorlanarak kaynaklı birleştirmenin maruz kaldığı gerilmeler analiz edilmiştir. Maksimum gerilmenin 868,11 MPa olduğu ve kaynak kökünde olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında maksimum gerininin de aynı noktada olduğu ve 0,2331 mm/mm olduğu gözlemlenmiştir. Yine ANSYS ortamında yapılan yorulma testi neticesine en düşük yorulma ömrünün, maksimum gerilmenin olduğu noktada  $3,4 \times 10^5$  çevrim olduğu gözlemlenmiştir. T şekilli modelin, test edilebilir basit modele indirgenmesi amacıyla tasarlanan yorulma modelinde ise ANSYS ortamında EN ISO 12473 standartlarına göre birleştirilmiş model analiz amacıyla, benzer sınır koşullarında 5 mm sehim ile bir uçtan zorlanmıştır. Test sonucunda geliştirilen modelde meydana gelen

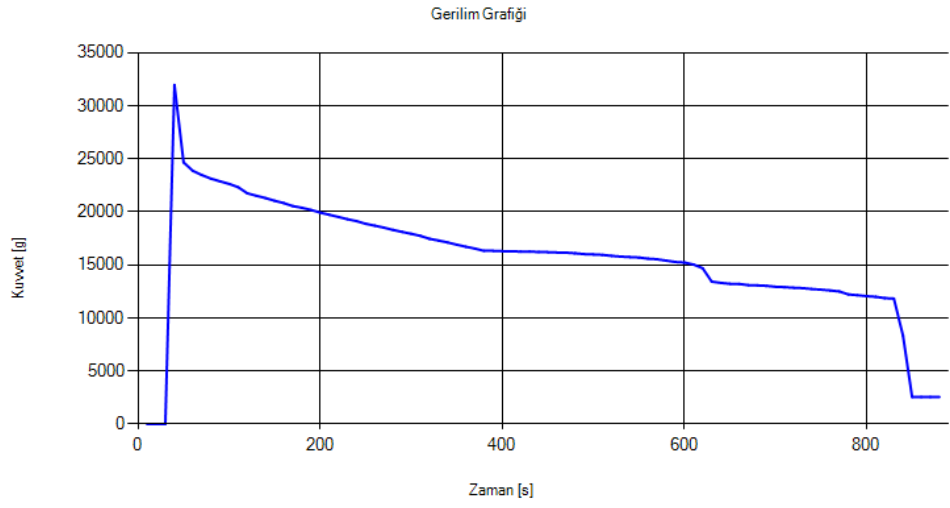
maksimum gerilmenin 801,75 MPa olduğu ve kaynak kökünde olduğu gözlemlenmiştir. Yine maksimum gerinim değerin maksimum gerilme değerin olduğu noktada olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen gerinim değerin ise 0,231 mm/mm olduğu gözlemlenmiştir. T şekilli parçadan ve geliştirilen modelden elde edilen gerilim-gerinim büyüklüğü ve lokasyonu arasında büyük bir benzerlik olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde geliştirilen modele ANSYS ortamında uygulanan yorulma testi neticesinde en düşük ömür maksimum gerilmenin olduğu noktada  $5,3 \times 10^5$  olduğu gözlemlenmiştir. Tasarlanan sistemde yapılan gerçek yorulma testlerinde ise ortalama  $3,6 \times 10^5$  yorulma ömrü elde edilmiştir. Çevrim sayılarındaki bu farkın ise kaynak bölgesindeki çarpılma ve çentik etkisinin yanında faz oluşumlarının ANSYS ortamında modellenememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun dışında T şekilli model ve geliştirilen modelin arasındaki uyum yapılan çalışmalarla doğrulanmıştır.

### **6.3.2 Nokta Direnç Kaynaklı DP1000 Çeliklerinin Yorulma Özellikleri**

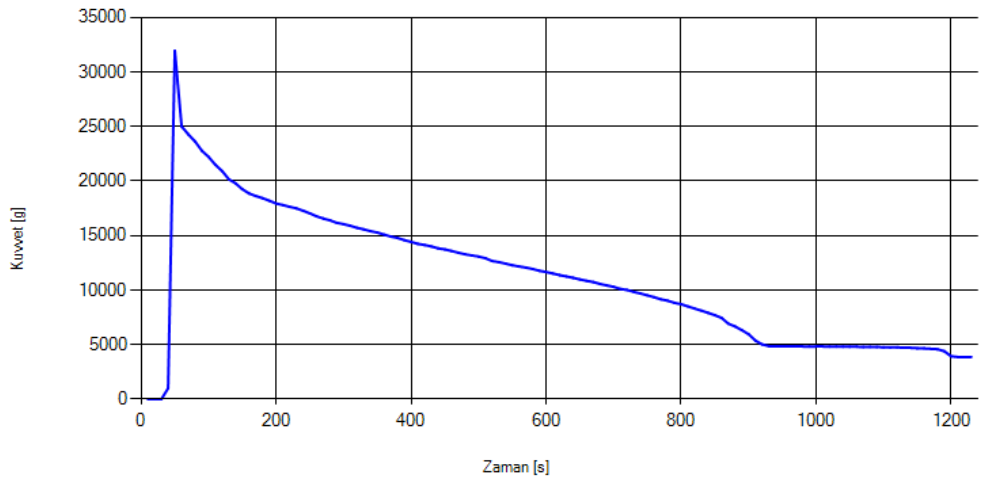
Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen DP1000 sac çelikleri geliştirilen model ile yorulma testine tabi tutulmuş ve kaynak parametrelerinin yorulma ömrü üzerine etkileri incelenmiştir. Yorulma deneyleri yaklaşık  $R \approx -0.5$  genlik  $f=10\text{Hz}$  değerlerinde oda sıcaklığında yapılmıştır. Her bir parametre için 1,2,3,4,6 ve 7 mm genlikler uygulanarak wöhler eğrisi elde edilmiştir. Deneysel yorulma sonuçları parametrelere göre aşağıdaki Şekil 6.29-Şekil 6.34'te kuvvet-zaman grafikleri olarak verilmiştir.



a) 9 kA

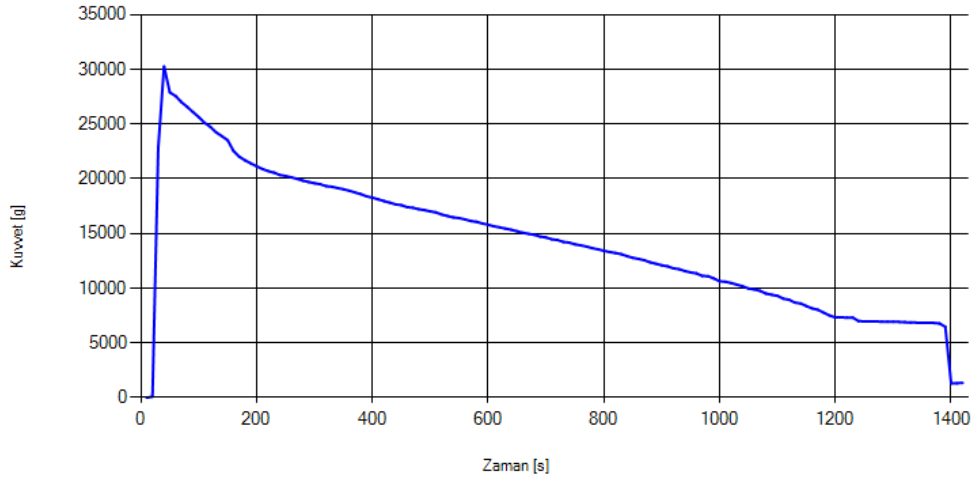


b) 8 kA

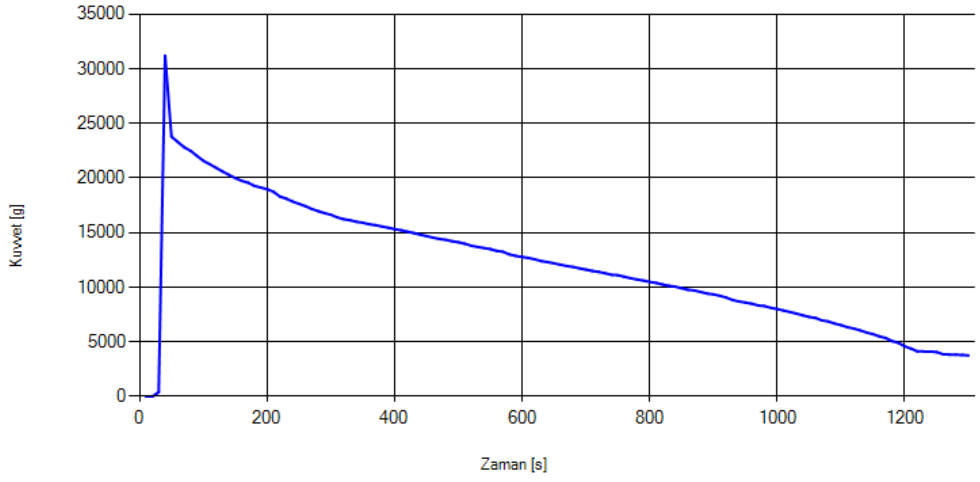


c) 7 kA

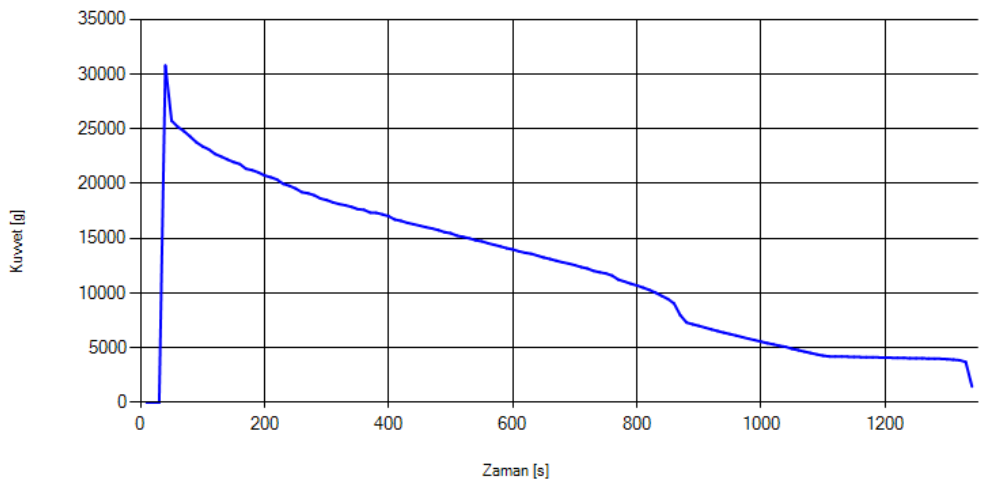
Şekil 6.29. 7 mm genlik değeriinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri.



a) 9 kA

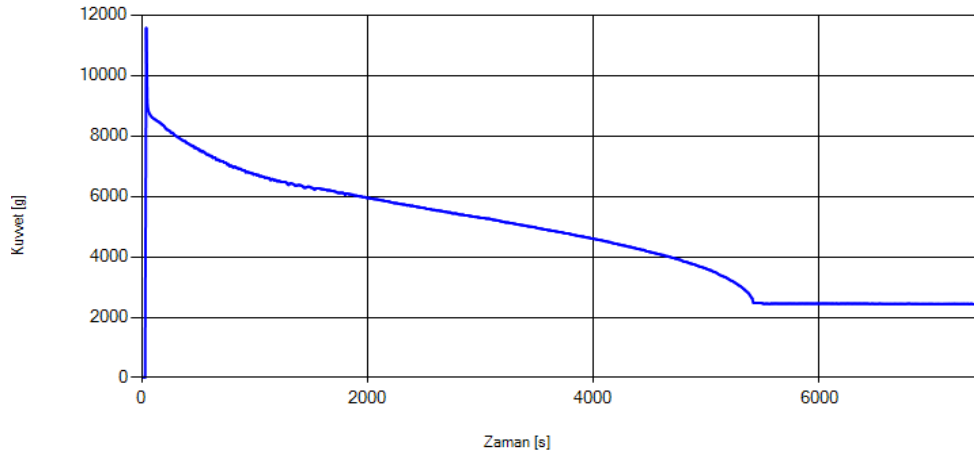


b) 8 kA

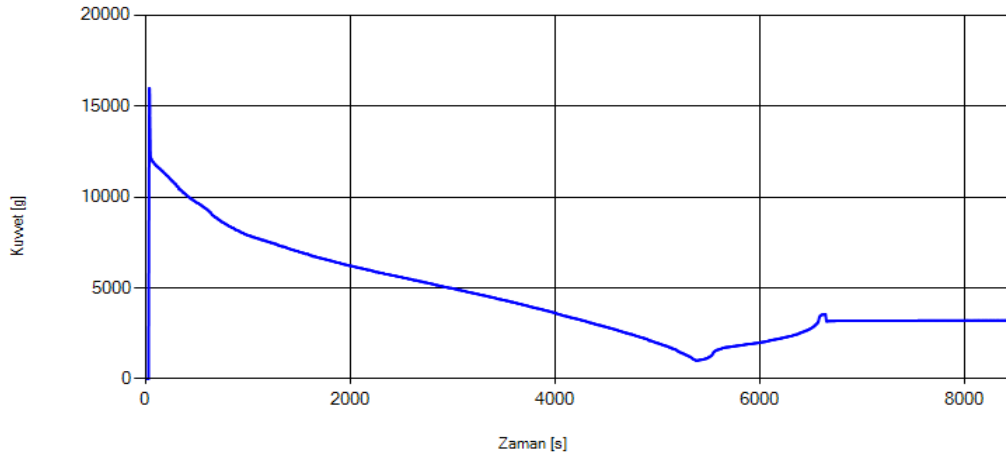


c) 7 kA

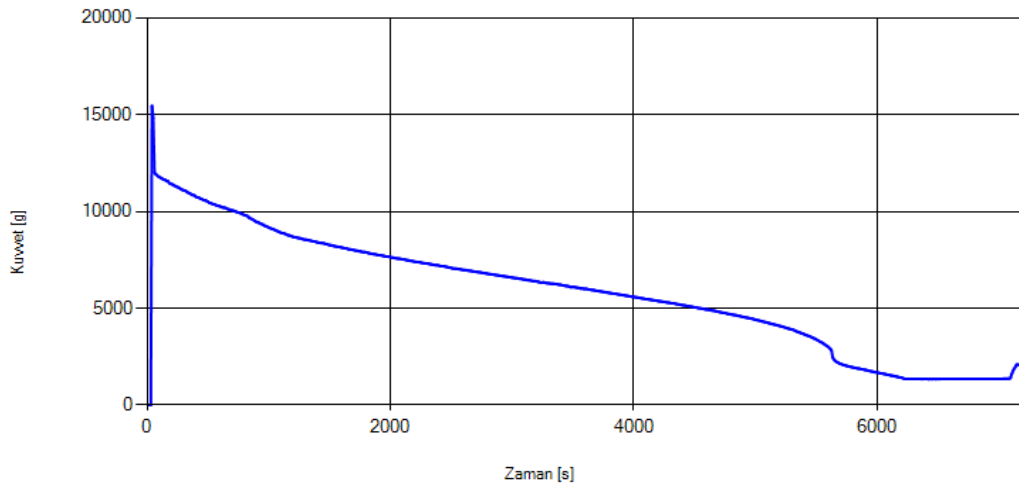
Şekil 6.30. 6 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri.



a) 9 kA



b) 8 kA

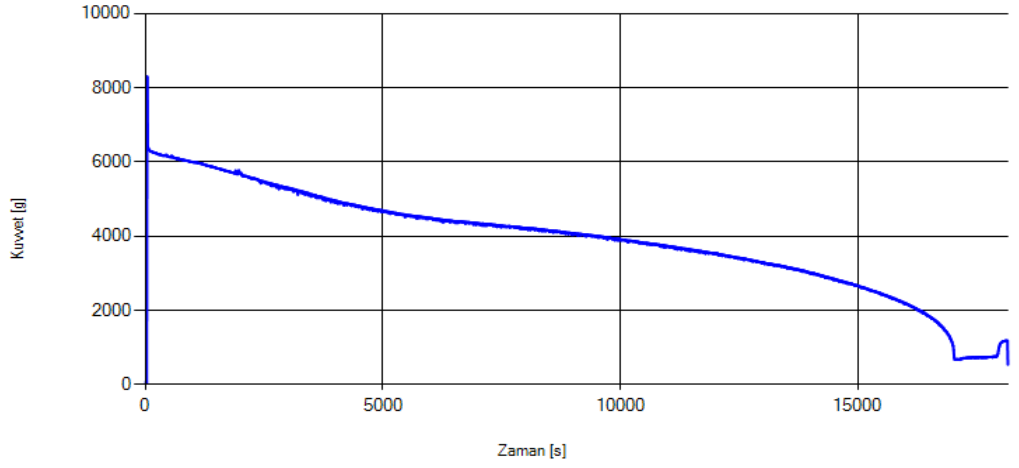


c) 7 kA

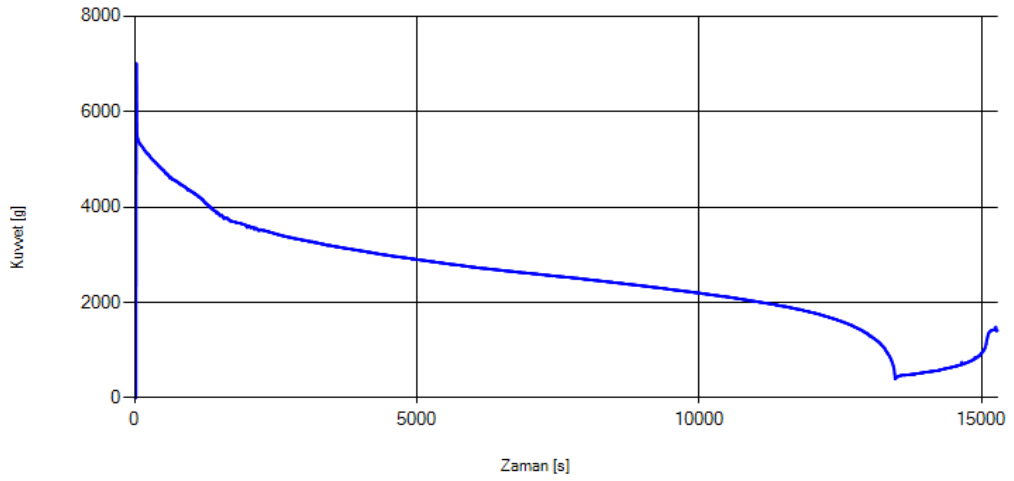
Şekil 6.31. 4 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri.



a) 9 kA



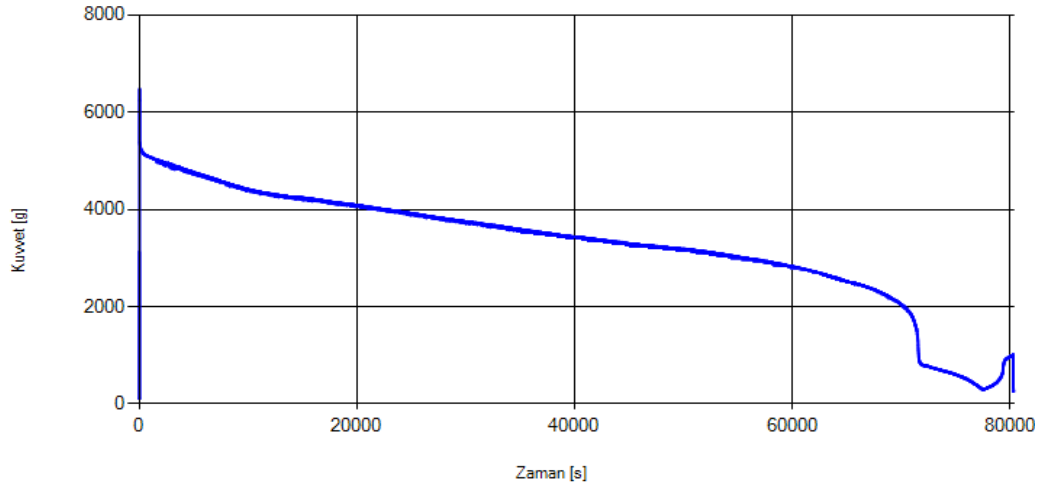
b) 8 kA



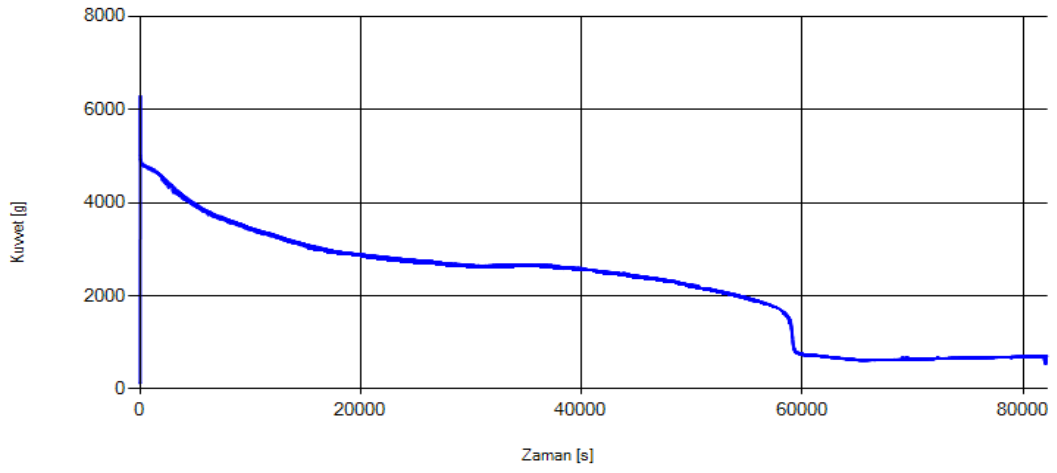
c) 7 kA

Şekil 6.32. 3 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri.

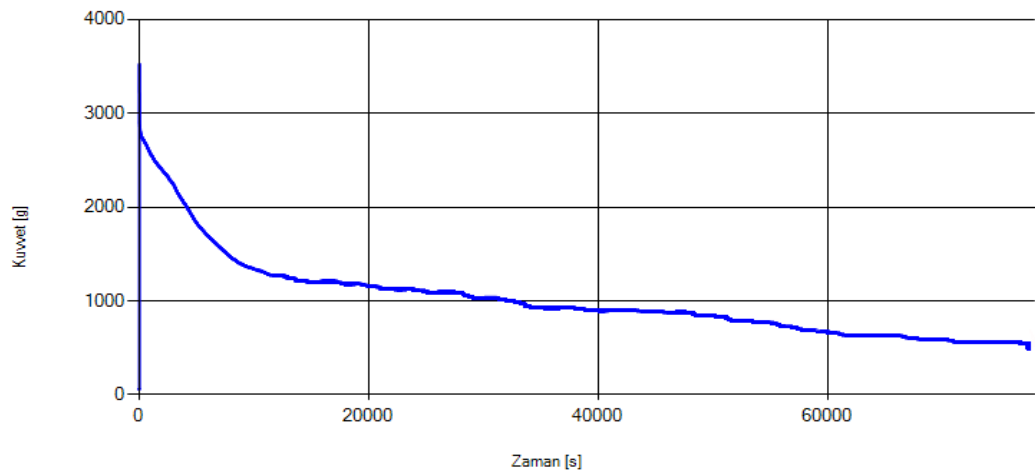




a) 9 kA

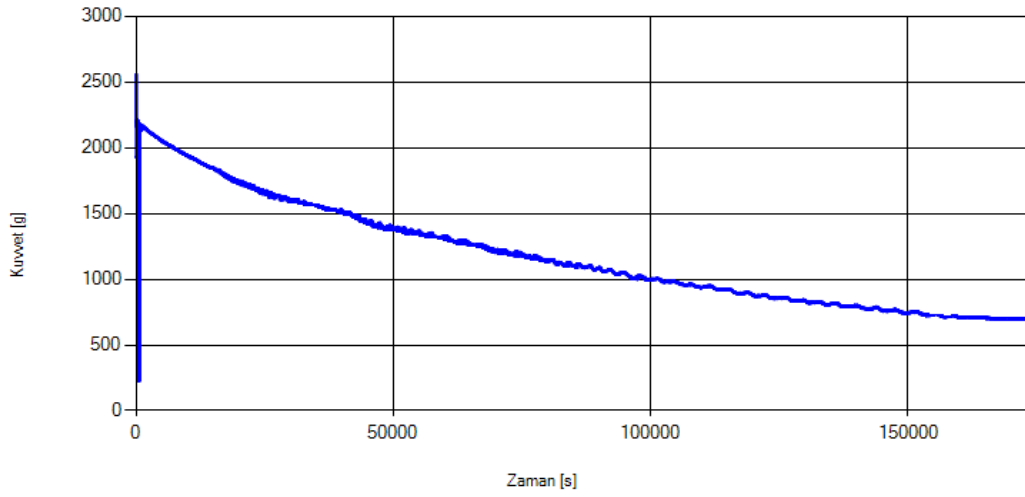


b) 8 kA

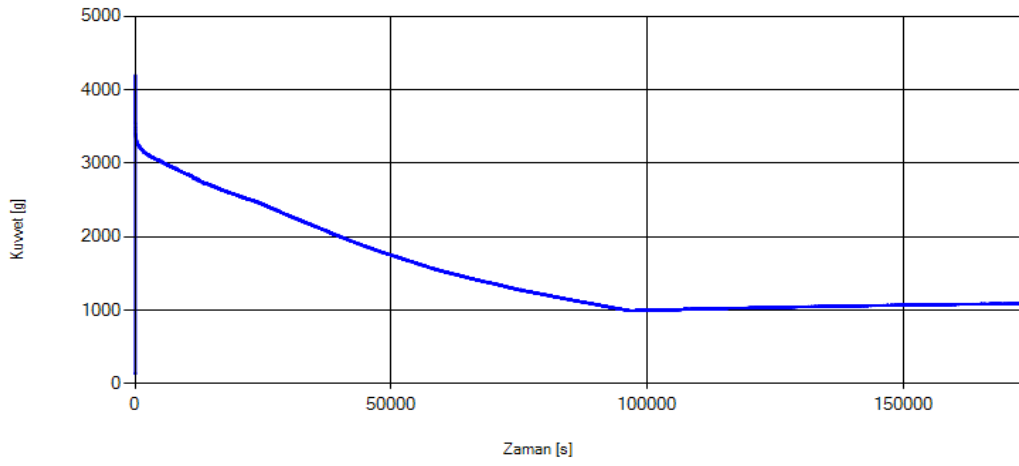


c) 7 kA

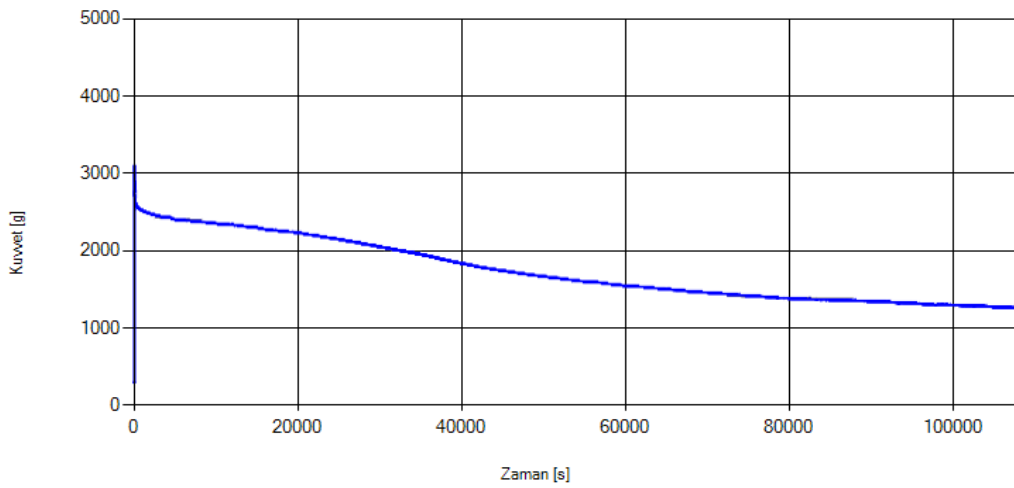
Şekil 6.33. 2 genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri.



a) 9 kA



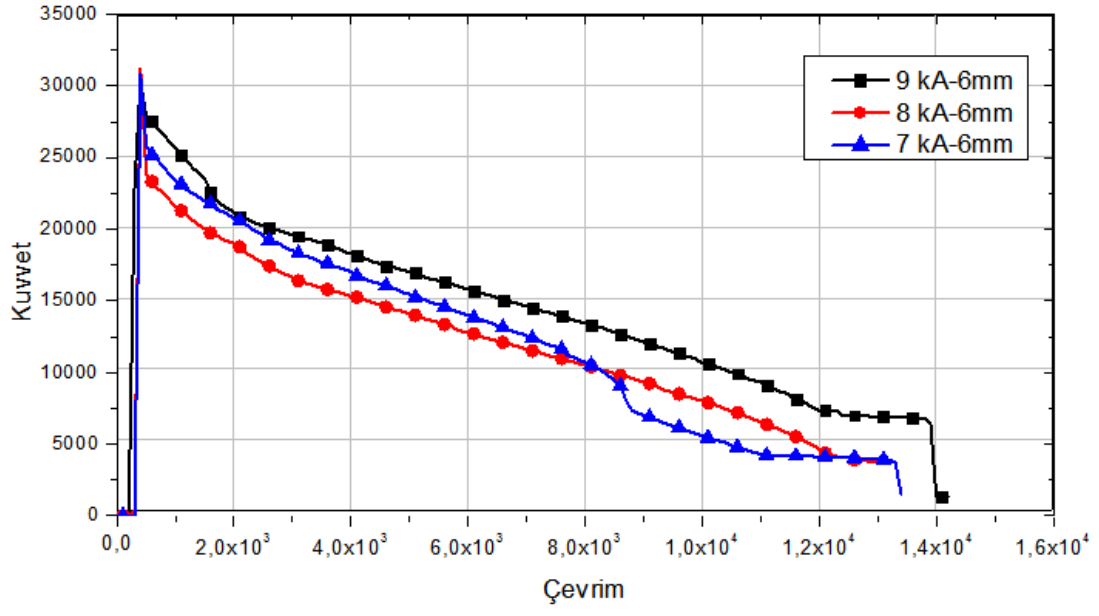
b) 8 kA



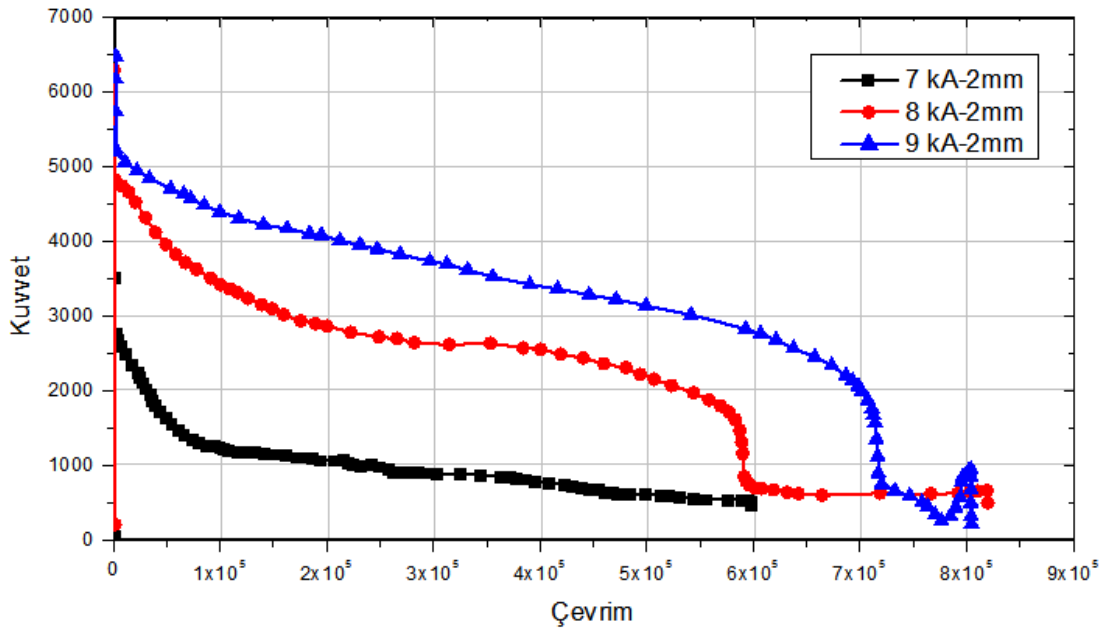
c) 7 kA

Şekil 6.34. 1 mm genlik değerinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri.

Yorulma deneylerinde 6 ve 2 mm genliklerde elde edilen Kuvvet zaman grafiklerinin birleştirilmiş hali ise Şekil 6.35'te verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi en iyi kuvvet performansı 9 kA kaynak akımında kaynaklanan numunelerden elde edilmiştir.



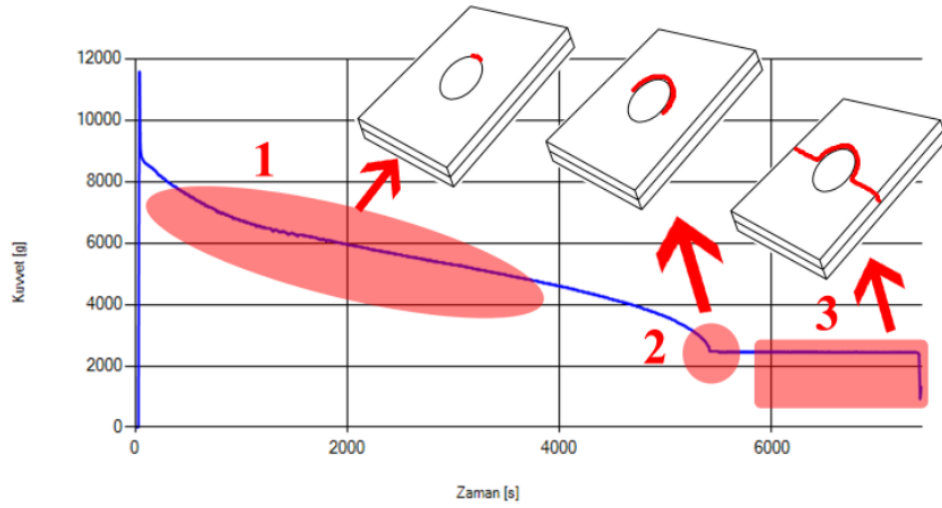
a)



b)

Şekil 6.35. Yorulma deneylerinde 6 ve 2 mm genliklerden elde edilen kuvvet çevrim grafikleri, a) 6 mm genlikten b) 2 mm genlikten elde edilen kuvvet-zaman grafikleri.

Kuvvet zaman grafikleri incelendiğinde çatlak ilerlemesi ile ilgili önemli sonuçlara ulaşılabilir. Azalan genliklerle çatlak ilerlemesine bağlı grafik değişimleri özellikle 1 mm genlik değerinde oldukça azaldığı görülmektedir. Şekil 6.36’da kuvvet zaman grafiğinin karakteristik özelliği gösterilmiştir. Şekilde 1 numaralı bölge yorulma deneyinin başlangıcından itibaren başlayıp çatlakın kaynak bölgesi boyunca ilerlediği bölgeyi gösterirken 2 numaralı bölge çatlakın kaynak çekirdeği etrafındaki ilerlemesini tamamladığı bölgeyi göstermektedir. Bu bölge kaynak dayanımının kaybedildiği bölgedir. 3 numaralı bölgede ise çatlak malzeme boyunca hasar gerçekleşene kadar ilerler. Bu bölgede yorulma ömrü ana malzemeye bağlıdır.



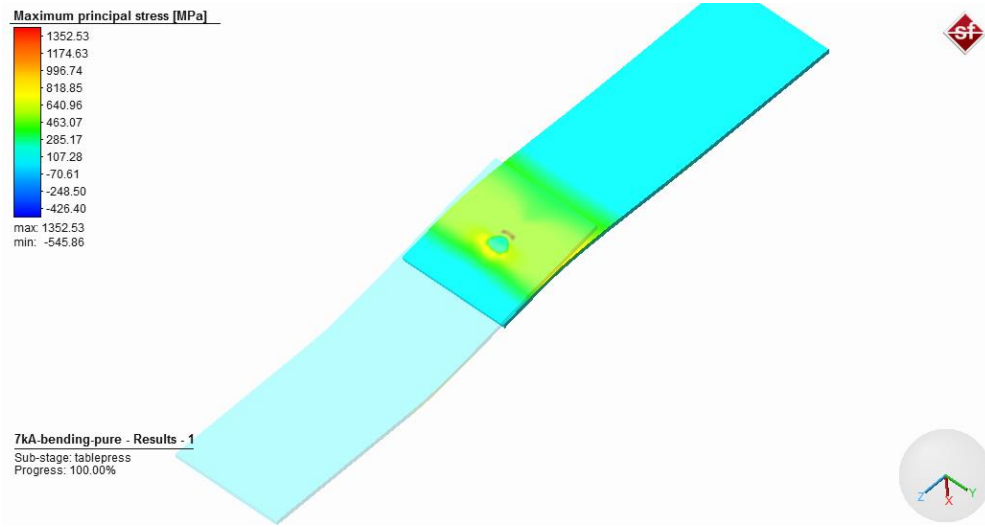
Şekil 6.36. Kuvvet zaman grafiğinin karakteristik özelliği.

Kuvvet zaman grafikleri incelendiğinde en yüksek kuvvet değerlerinin 9 kA kaynak akımı ile kaynaklanan numunelerden elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni artan kaynak akımıyla kaynak çekirdeği boyutlarının artmasıdır. Kaynak metali boyutlarının artması birleşim bölgesi alanının arttırdığı böylece dayanımın da artmasını sağladığı söylenebilir.

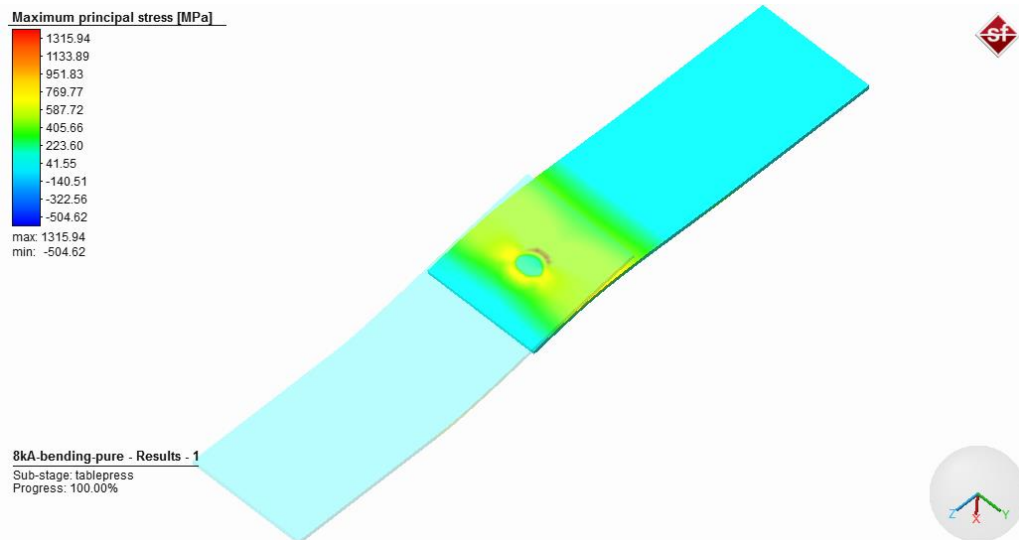
Yapılan yorulma deneylerinden çevrim-gerilme ve çevrim kuvvet eğrileri elde edilmiştir. Neticede en iyi ömür performansı 9 kA kaynak akımlarında yapılan birleştirmelerden elde edilmiştir. Bazı deneylerde 9 kA kaynak akımı ile birleştirilen numunelerin daha az yük taşıma kapasitesine sahip olduğu gözlenmiş olsa da kaynak çapındaki artışa bağlı olarak en iyi yorulma ömür performansları yine 9 kA kaynak

akımlarında gözlemlenmiştir. 9 kA kaynak akımında yük taşıma kapasitesindeki bu azalışların kaynak esnasında meydana gelen sıçramalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

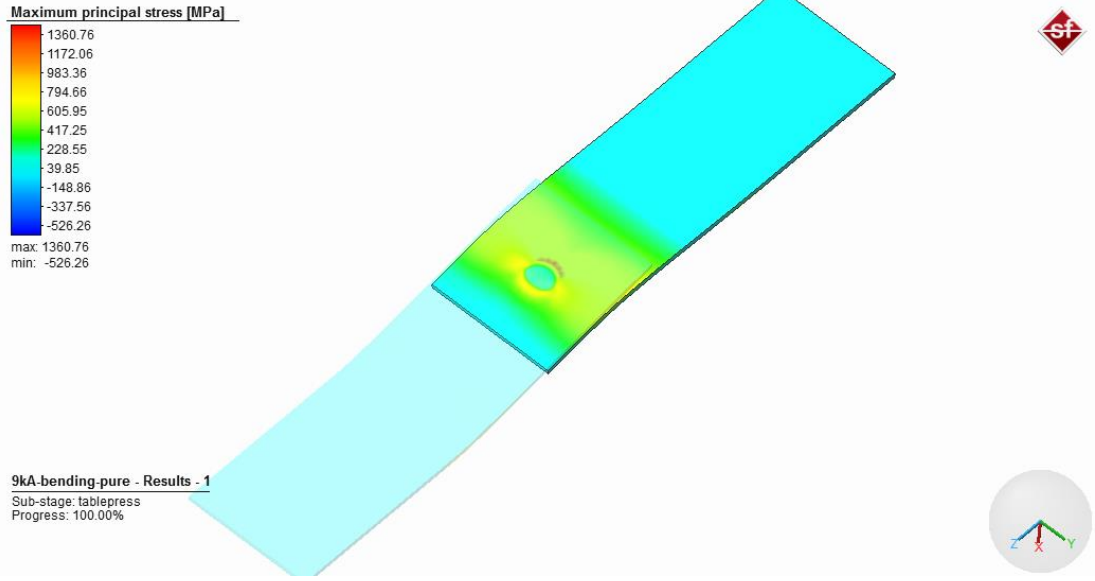
Geliştirilen modelde nokta direnç kaynaklı DP1000 numunelerde meydana gelen kuvvetler ve gerilmeler Simufact sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiştir.



Şekil 6.37. 7 kA kaynak akımıyla birleştirilmiş DP1000 çeliğinde uygulanan genlik ile oluşan gerilmelerin Simufact programı ile analizi.

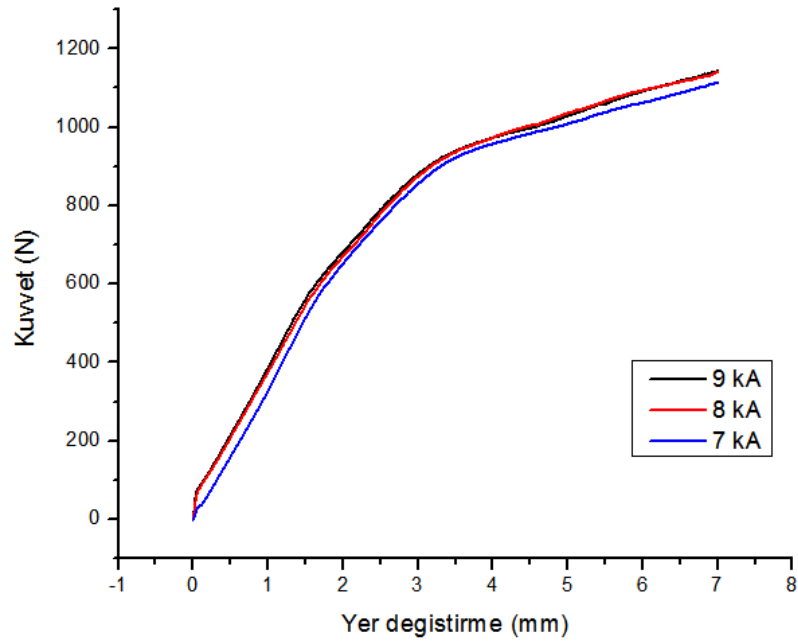


Şekil 6.38. 8 kA kaynak akımıyla birleştirilmiş DP1000 çeliğinde uygulanan genlik ile oluşan gerilmelerin Simufact programı ile analizi.

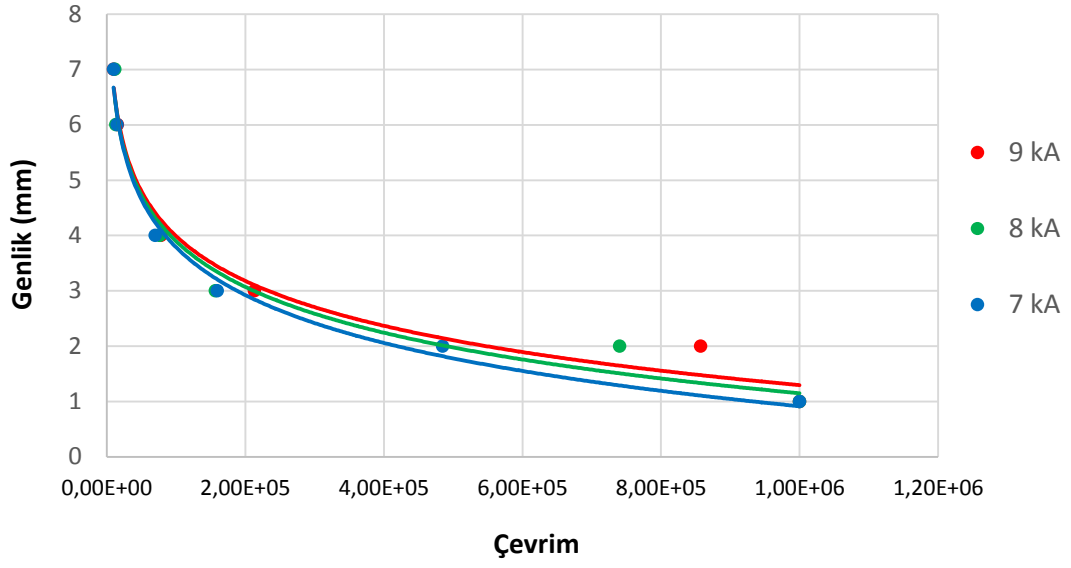


Şekil 6.39. 9 kA kaynak akımıyla birleştirilmiş DP1000 çeliğinde uygulanan genlik ile oluşan gerilmelerin Simufact programı ile analizi.

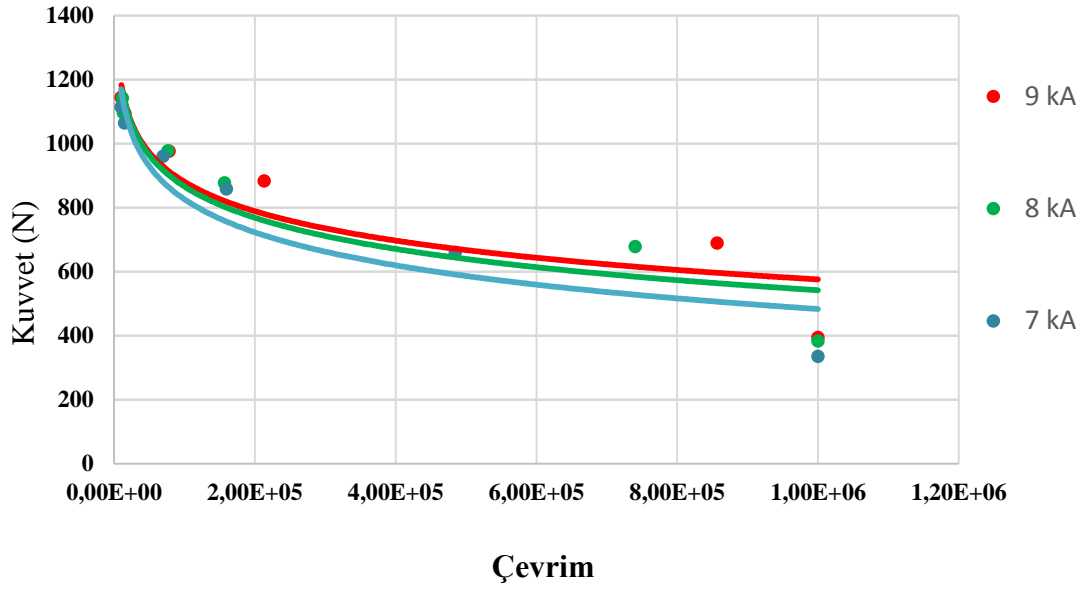
Simufact programı ile kuvvet uygulayan kola ait kuvvet eğrileri elde edilmiştir. 8 ve 9 kA kaynak akımlarında kaynaklanan numuneler için maksimum kuvvet 1143 N olarak elde edilirken 7 kA akımında kaynaklanan numunelerde 1141 N olarak elde edilmiştir.



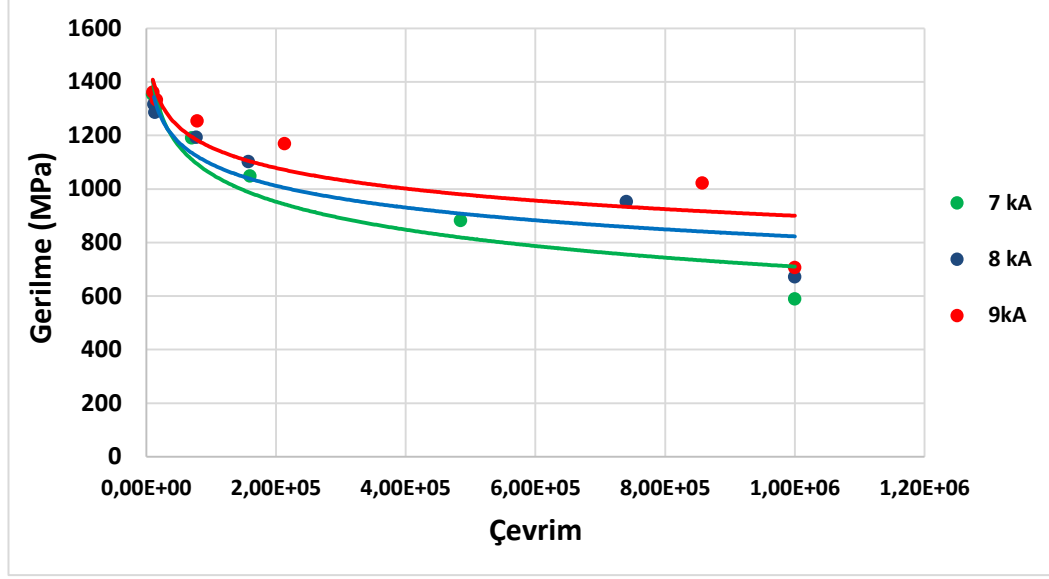
Şekil 6.40. Farklı kaynak akımlarında birleştirilmiş DP1000 numunelerin kuvvet kolundan elde edilmiş kuvvet-yer değıstirme eğrisi.



Şekil 6.41. Farklı kaynak akımlarıyla birleştirilmiş numunelerin yorulma deneylerinden elde edilmiş genlik-çevrim eğrisi.



Şekil 6.42. Farklı kaynak akımlı birleştirmelerin yorulma deneylerinin kuvvet-çevrim değerleri.



Şekil 6.43. Farklı kaynak akımında kaynaklanmış birleştirmelerin yorulma deneyleri sonucu elde edilmiş gerilme-çevrim eğrilerinin karşılaştırılması.

Kuvvet artışına bağlı olarak simülasyon çalışmasında kaynak kökünde gerilimin arttığı görülmüştür. Kaynak işleminden kalan kalıntı gerilmelerin bölgede oluşan net gerilmelerin elde edilmesini zorlaştırdığı görülmüştür. Kalıntı gerilmelerin kuvvetin uygulanışı esnasında kaynak çevresinde meydana gelen gerilmelere pozitif veya negatif olarak eklendiği görülmüştür. Her kaynak işleminde meydana gelen farklı kalıntı gerilmeler sebebiyle her noktada farklı gerilmelerin oluştuğu görülmüştür. Bu sonuçlardan incelendiğinde kalıntı gerilmelerin yorulma ömrü üzerine etkisi ve önemi anlaşılmaktadır.

Yorulma deneylerinin sonucunda elde edilen gerilme-ömür ve kuvvet-ömür grafikleri incelendiğinde genlik değerlerinin artışıyla kuvvetin arttığı görülmektedir. Artan genliklerle numunelerin yorulma ömrü azalmaktadır. Ayrıca düşük genliklerde farklı kaynak akımıyla kaynaklı numuneler benzer yorulma ömrü sergilemektedir. Bu ise düşük çevrimli yorulmalarda kaynak dayanımından ziyade sac dayanımının önemli olduğunu göstermektedir. 8 ve 9 kA kaynak akımı ile kaynaklanmış numuneler bütün çevrimlerde birbirine yakın ömür sergilemiştir. Bu benzerliğin 9 kA kaynak akımında meydana gelen sıçramalardan ve yüksek ısı girdisine bağlı kalıntı gerilmelerin etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yine de çap artışına bağlı olarak en iyi ömür performansı 9 kA kaynak akımlarında kaynaklanan numunelerden



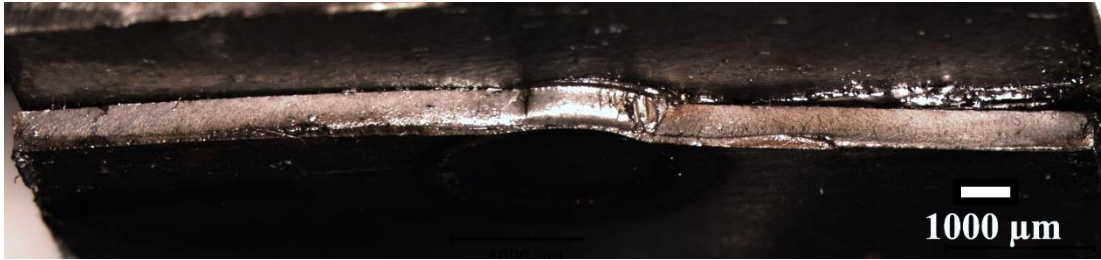
elde edilmiştir. Çalışmalar neticesinde kaynak çapı ile yorulma ömrü arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kaynak çapının artması ile kaynak çentiğindeki gerilim faktörünün azalmasına bağlı olarak ömrün artmasıdır [106]. En iyi yorulma ömrü 9 kA kaynak akımlarında gözlemlenmiştir. Genliğin azalmasıyla numunelerin yorulma ömürleri artmaktadır. Normal hava koşullarında yapılan yorulma testlerinde 1 mm genlikte bütün numuneler  $1 \times 10^6$  çevrim yorulma sınırını geçmiştir.

### 6.3.3. Hasara Uğrayan Deneysel Numunelerinin Kopma Yüzeylerinin İncelenmesi

Yorulma deneyleri sonrası deneysel numunelerinin kırık yüzeyleri makro ölçekli optik cihazlarla elde edilen görüntüsü Şekil 6.44'de gösterilmiştir.

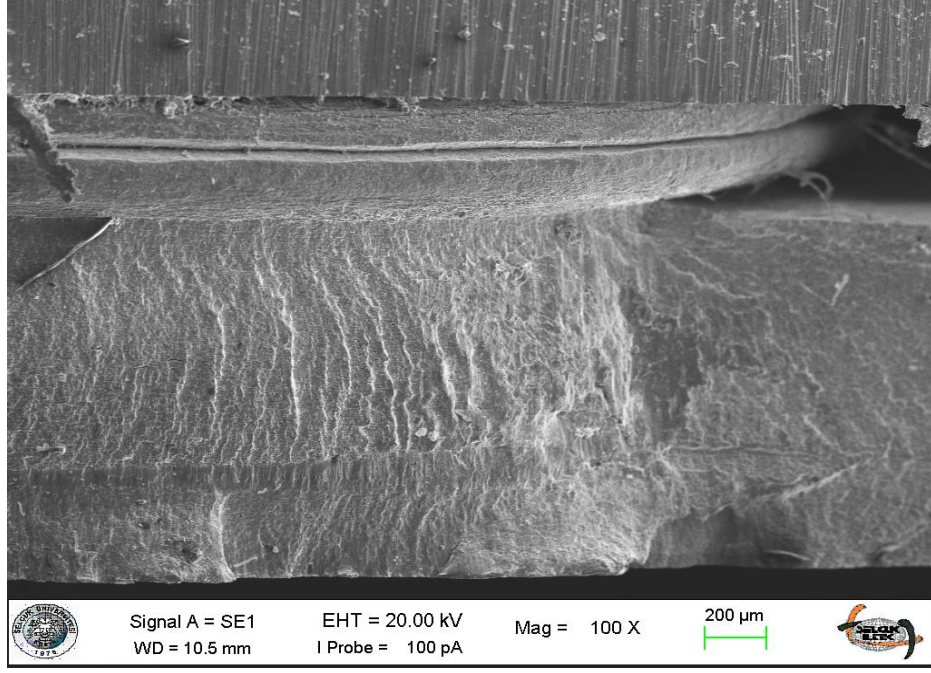


a)

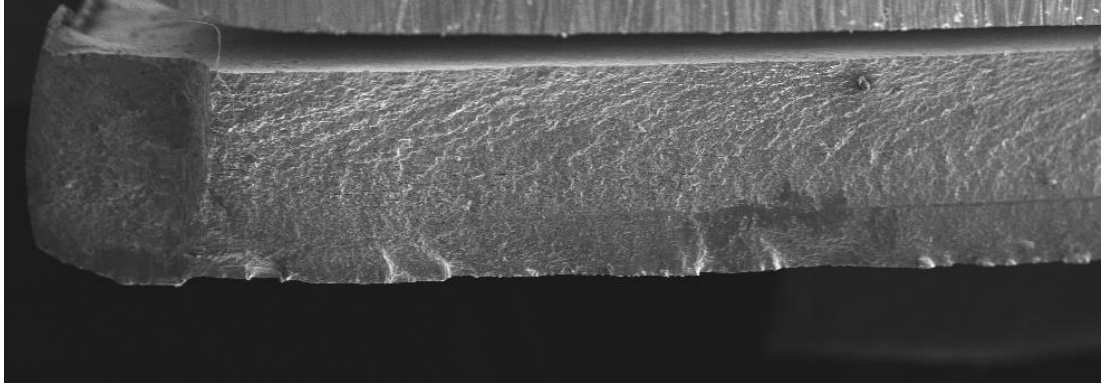


b)

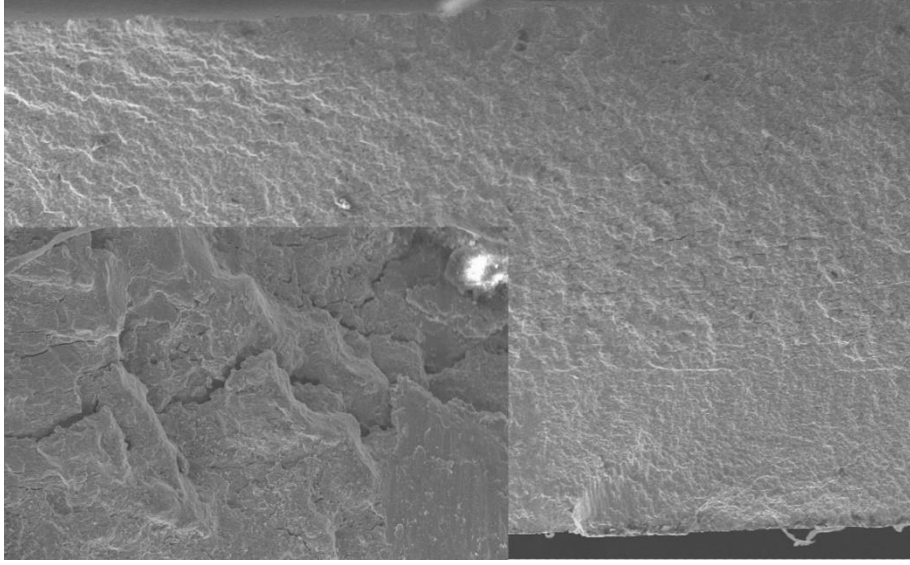
Şekil 6.44. 9 kA kaynak akımlarında kaynaklanan birleştirimin yorulma hasarının görüntüsü a) 7 mm genlikte yapılan b) 2 mm genlikte yapılan yorulma deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.



Şekil 6.45. Hasarlı yüzeyde kaynak bölgesinin SEM görüntüsü.



Şekil 6.46. Hasarlı yüzeyde kopmanın gerçekleştiği bölgenin SEM görüntüsü.



Şekil 6.47. Düşük genliklerde hasara uğrayan numunenin kırık yüzeyinde taneler arası kırılmaların görüntüsü.

Şekil 6.45, 6.46 ve 6.47 incelendiğinde çevrimli yüklere bağlı olarak gelişen çatlak ilerlemesinin neden olduğu çevron izleri görülmektedir. Çatlak kaynak bölgesinden başladığı ve sac metal boyunca ilerlediği nihai olarak kopmanın meydana geldiği görülmektedir. Özellikle şekil 6.49 a ve b çevron izleri arasındaki mesafeler göz önüne alınarak kıyaslandığında yüksek genliklerde kaynak bölgesi ve sac metalde çevron izlerinin belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Genlik değerlerinin azaltılması ile iki çatlak arasındaki (sitriation) mesafenin azaldığı görülmüştür. Çevron iz açılarının kaynak bölgesinde artarken ana metal boyunca çevron açılarının daraldığı görülmüştür. Bunun kaynak bölgesinde artan sertliğe bağlı olarak çatlak ilerlemesinin yavaşlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 6.47 incelendiğinde ise gerilmenin yüzeye dik uygulanmasına bağlı olarak çatlağın taneler arasında ilerlediği görülmektedir.

### **6.3.3. Nokta Direnç Kaynaklı DP1000 Çeliklerinin %3,5 NaCl Çözelti İçerisinde Korozyon Hızının Tespiti**

DP1000 çeliğinden hazırlanan kuponlar, hazırlanan %3,5 NaCl korozyon çözelti ortamında 168 saat süreyle bekletilerek hassas terazi yardımıyla ağırlık kaybı belirlenmiş ve korozyon hızı mm/yıl olarak bulunmuştur. Deneyler esnasında

çözeltinin pH değeri 7.50 dolaylarında seyretmiştir. Korozyon hızı, ağırlık kaybı formülü ile elde edilmiştir [115].

$$KH = KxW / AxWxD \quad (6.1)$$

KH: Korozyon hızı (mm/yıl), D: Yoğunluk ( $7,88\text{g/cm}^3$ ), K: sabit ( $8.76 \times 10^4$ ), T: Maruz kalma süresi (saat), A: Alan ( $\text{cm}^2$ ), W: ağırlık kaybı (g).

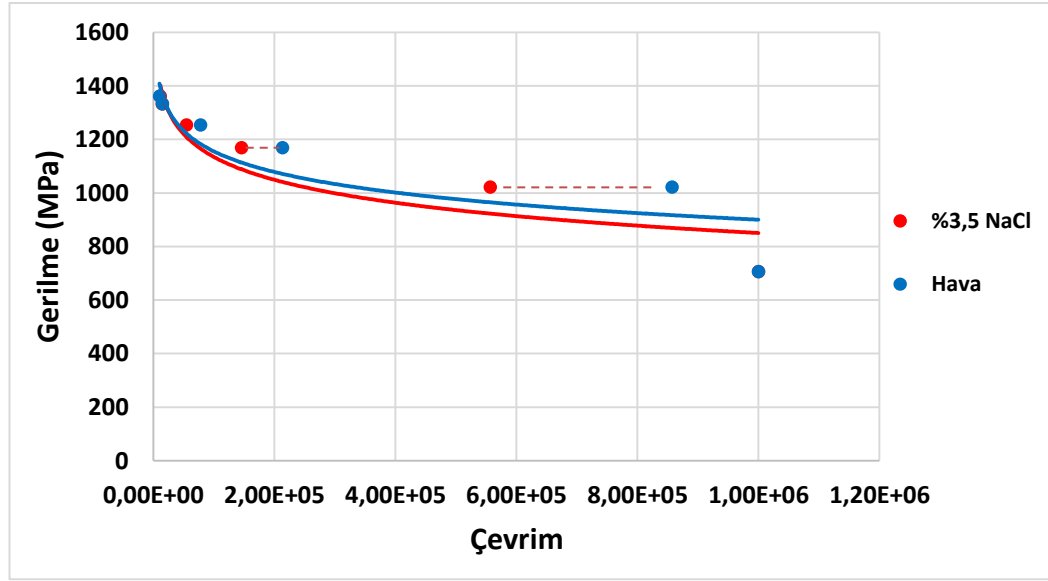
Çizelge 6.5. Daldırma testi verileri ve formülden elde edilen korozyon hızı değeri.

Alan ( $\text{cm}^2$ )	Ağırlık Kaybı (g)	Süre (saat)	KH (mm/yıl)
22,88	0,026	168	<b>0,075</b>

Çalışma neticesinde elde edilen korozyon hızı değeri literatürde yapılan çalışmalarda DP çeliklerinden elde edilen korozyon hızı değerleri ile benzer olarak elde edilmiştir [119,120]. Çift fazlı DP çeliklerinin dayanımları ve süneklik oranları yapılarındaki faz oranlarıyla yakından ilişkilidir. Martensit fazı oranının artması DP çeliklerinin dayanımı artırsa da sünekliğin azalmasına neden olur. Literatürde yapılan birçok çalışmada martensit oranının çift fazlı çeliklerin korozyon direncini de etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Sarkar vd. [113] yaptıkları çalışmalarda ferrit martensit yapıları DP çeliklerin %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki korozyon hızının, faz bileşenlerinin oranlarına ve morfolojisine bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Mekanik özellikleri geliştirmek için martensit miktarını arttırmak ve daha yapısal inceltme DP çeliğinin korozyon davranışı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu gözlemlenirken ada yapılı martensit morfolojisinin korozyon direnci üzerine olumlu etkileri olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Benzer şekilde Kayalı vd. [114] farklı kritik arası sıcaklıklar arası tavlama sonucu farklı martensit oranlarına (%32, %61, %81) sahip çift fazlı çeliklere korozyon hızı deneyleri yapmışlardır. Sonuçta korozyon numunelerin hızları sırasıyla 0,076 mm/yıl, 0,139 mm/yıl ve 0,201 mm/yıl olarak martensit fazındaki artışın DP çeliklerinde korozyon direncini azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

### 6.3.4. Nokta Direnç Kaynaklı DP1000 Çeliklerinin Korozif Yorulma Özellikleri

Geliştirilen model ile yapılan yorulma deneylerinde en iyi yorulma ömür performansının sağlayan 9 kA akımında kaynaklanan numuneler için yorulma deneyi esnasında nokta direnç kaynaklı numuneler üzerine %3,5 NaCl çözelti uygulanmıştır. Deneylerden önce numuneler 168 saat ön korozyona maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak.



Şekil 6.48. Normal hava koşullarında ve %3,5 NaCl koşullarında yapılan yorulma deneylerinden elde edilen ömür verilerinin birlikte gösterimi.

Şekil 6.48 incelendiğinde yüksek genliklerde korozyonun etkileri oldukça az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni korozif çözeltilere maruz kalma süresinin oldukça az olmasıdır. Ayrıca yükleme durumunda iki sacın birbirinden uzaklaşmasıyla birleştirme bölgesinin korozif ortama daha şiddetli maruz kaldığı görülmüştür. Düşük genliklerde artan maruz kalma süresi korozyonun şiddetini artırdığı ve yorulma ömrünü azalttığı görülmüştür. Korozyonun sebep olduğu ömürdeki azalış en fazla 2 mm genlikte  $6 \times 10^5$  çevrim olduğu görülmüştür. Korozif ortam yorulma dayanımını ortalama olarak %30-35 civarında azalttığı Şekil 6.48'de görülmektedir. En düşük genlikte bazı numuneler sınır çevriminin altında kırılmıştır. Bazıları ise yorulma sınırından sonra hasara uğramıştır. Dolayısıyla korozif ortamın yorulma sınırını etkilediği görülmüştür.

Thierry vd. [121] yaptıkları çalışmalarda üst üste kaynatılmış ve T şekilli birleştirilmiş parçalara korozyonlu yorulma çalışmaları yapmışlar. T şekilli parçaların zorlanması esnasında birleşim bölgelerinin korozif ortamla temasını dolayısıyla korozyonun şiddetinin bu parçalarda daha fazla olduğunu ve daha düşük ömür sergilediklerini gözlemlemişler. Geliştirilen modelin zorlanma türünden dolayı kaynaklı birleşim bölgesinin korozif ortamla daha kolay temas ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.49. Farklı genliklerde korozyonlu yorulma testlerine tabi tutulan nokta direnç kaynaklı DP1000 çelikleri; a) yüksek genlik, b) düşük genlikli korozyonlu yorulma numunesi.

Şekil 6.49'da görüldüğü gibi düşük genliklerde artan çevrim ile birlikte korozif ortama maruz kalma süresi arttığı için korozyon miktarı da artmıştır. Bu durum ile bağlantılı olarak Şekil 6.48'de korozyona maruz süresinin artmasıyla aynı genliklerde normal koşullara göre yorulma ömür çevrimlerindeki düşüşün arttığı görülmektedir. Yine iki sacın üst üste geldiği bölgelerde aralık korozyonuna bağlı olarak aralık bölgenin daha fazla korozyona uğradığı Şekil 6.49'da görülmektedir.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışmada otomobillerde bulunan T şekilli nokta kaynaklı birleştirmenin maruz kaldığı kuvvetler ve gerilmeler farklı sonlu elemanlar yazılımları ANSYS ve SIMUFACT kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizlerin doğruluğunun kontrolü için 1 mm kalınlığında DP600 çeliği kullanılmış ve T şekilli birleştirmelerin yorulma testleri için kolayca indirgenmiş bir model geliştirilmiştir. Esas yorulma deneyleri için 1,2 mm kalınlığında DP1000 çelikleri kullanılmıştır. Farklı kaynak parametrelerinin etkilerinin gözlemlenmesi amacıyla farklı kaynak parametreleri ile kaynaklanan numunelere yorulma deneyleri uygulanmıştır. Kaynaklanan numunelerin sertlik ve mikroyapı özellikleri, çekme makaslama dayanımları incelenmiştir. Bunların yanında korozif ortamın etkilerinin incelenmesi amacıyla en iyi ömür performansının elde edildiği kaynak parametresi ile %3,5 NaCl korozif ortamda yorulma deneyleri tekrar edilmiş ve korozif ortamın etkileri incelenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda;

- Kaynak akımlarındaki artış ile kaynak metali boyutunun arttığı 9 kA kaynak akımından sonra azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında kaynak akımındaki artışla sıçrama olaylarında artış gözlemlenmiştir. 10 kA kaynak akımlarında ise elektrot yapışmaları gözlemlenmiştir.
- SIMUFACT sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan nokta direnç kaynak işlemi sonucunda 7,8 ve 9 kA kaynak akımları için benzer kaynak metali çapı ve ITAB boyutları elde edilmiştir. 10 kA kaynak akımında ise sıçrama olayının belirsizliği ve modellenmesinin zor oluşu sebebiyle kaynak metali ve ITAB boyutlarında farklılıkların oluştuğu gözlemlenmiştir

- Kaynaklarda meydana gelen sıçramaların nokta direnç kaynaklı DP1000 birleştirmelerin yük kapasitelerini, yapılan deneysel çalışmalara göre düşürdüğü gözlemlenmiştir.
- Yapılan çekme makaslama testleri neticesinde en iyi yük taşıma kapasitesinin 8 kA kaynak akımlarında elde edildiğı gözlemlenmiştir. Yapılan üç boyutlu simülasyon çalışmalarında ise en iyi yük taşıma kapasitesi 9 kA kaynak akımlarında kaynaklanan modelden elde edilmiştir. Gerçek ve simülasyon deneylerindeki bu farkın simülasyon çalışmalarında sıçrama olayının tam olarak modellenememesinden kaynaklandığı anlaşılmıştır.
- Nokta direnç kaynaklı numunelerde kaynak metalinin mikroyapısının martensit fazından meydana geldiğı gözlemlenirken ITAB bölgesinin de ağırlıklı olarak küçük taneli martensit fazlarından meydana geldiğı gözlemlenmiştir.
- Kaynak metali ve ITAB'ın esas metale göre daha yüksek sertliğe sahip olduğı gözlemlenmiştir.
- ANSYS ortamında sehim uygulanan T şekilli birleştirmeli model ve yorulma deneyleri için geliştirilmiş modelde benzer gerilme ve gerinim değerleri elde edildiğı gözlemlenmiştir. İki modelde de maksimum gerilme aynı bölgede kaynak kökünde meydana geldiğı gözlemlenmiştir.
- ANSYS ortamında yapılan yorulma deneyleri neticesinde T şekilli birleştirmeli model ve yorulma deneyleri için geliştirilmiş modelde yorulma ömürleri gözlemlenmiştir. En düşük ömür gerilme ve gerinim değerlerinin en yüksek olduğı bölgede gözlemlenmiştir. Yine ANSYS ortamında yapılan yorulma deneylerinde iki modelin benzer gerilme genliklerine sahip olduğı gözlemlenmiştir.



- Geliştirilmiş model ile gerçekte yapılan DP600 yorulma deneyleri neticesinde elde edilen hasar çevriminin, ANSYS ortamında elde edilen yorulma ömürleri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.
- Geliştirilen modelde yapılan yorulma deneylerinde en iyi yorulma ömür performansı 9 kA kaynak akımlı birleştirmelerde gözlemlenmiştir.
- T şekilli nokta direnç kaynağı ile birleştirilen parçalarda yorulma ömrü ile kaynak çapı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu gözlemlenmekle beraber bu ilişkinin nokta kaynağının çekme makaslama performansının yorulma ömrünü etkilemediği gözlemlenmiştir.
- Geliştirilen model ile korozif ortamda yapılan yorulma deneylerinde korozif ortamın numunelerin yorulma ömrünü %30-35 civarında azalttığı gözlemlenmiştir.
- T şekilli birleştirmelerin yüklenme türünden dolayı birleştirmenin olduğu iki sacın arasının açılmasından kaynaklı daha kolay korozif ortama maruz kaldığı dolayısıyla korozyonun diğer birleştirmelerine göre bu bölgeler için daha şiddetli meydana gelebileceği gözlemlenmiştir.
- Artan çevrimlerle korozif ortama maruziyetin artmasına bağlı olarak yorulma ömürlerinde azalış gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. "Vehicles, Air Pollution & Human Health | Union of Concerned Scientists", <https://www.ucsusa.org/resources/vehicles-air-pollution-human-health> (2020).
2. Internet: Brinson, L., "How Much Air Pollution Comes from Cars? | HowStuffWorks", <https://auto.howstuffworks.com/air-pollution-from-cars.htm> (2020).
3. Decicco, J. M., "Steel and iron technologies for automotive lightweighting", (2005).
4. Zhang, X., Zhang, Y., and Chen, G., "Research on weldability for dual-phase steels using servo gun spot welding system", *Key Engineering Materials*, 353–358 (PART 3): 1597–1600 (2007).
5. Chatterjee, D., "Behind the Development of Advanced High Strength Steel (AHSS) Including Stainless Steel for Automotive and Structural Applications -An Overview", *Materials Science And Metallurgy Engineering*, 4 (1): 1–15 (2017).
6. Grajcar, A., Kuziak, R., and Zalecki, W., "Third generation of AHSS with increased fraction of retained austenite for the automotive industry", *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 12 (3): 334–341 (2012).
7. Matlock, D., Speer, J., De Moor, E., and Gibbs, P., "Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview", *Jestech*, 15 (1): 1–12 (2012).
8. Elitaş, M., "Nokta Direnç Kaynağı İle Birleştirilen İleri Dayanımlı Otomotiv Sac Çeliklerinin Yorulma Davranışlarının İncelenmesi", *Karabük Üniversitesi*, (2018).
9. "Dual Phase (DP) Steels - WorldAutoSteel", <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/> (2020).
10. Elitaş, M., Demir, B., and Yazıcı, O., "The effects of the electrode pressure on tensile strength and fracture modes of the RSW junctions of DP600 sheet steel", *IMSTEC*, 324–329 (2017).
11. Gupta, H. N., Gupta, R. C., and Mittal, A., "Manufacturing Processes", Second. Ed., *New Age International (P) Limited, Publishers*, New Delhi, 129–140 (2009).

12. Donders, S., Brughmans, M., Hermans, L., and Tzannetakis, N., "The Effect of Spot Weld Failure on Dynamic Vehicle Performance", *LMS International, Interleuvenlaan 68*, (April): 1–13 (2005).
13. Elitas, M., Demir, B., and Göktaş, M., "The effects of the welding parameters on tensile properties of RSW junctions of DP1000 sheet steel", *International Conference On Material Science And Technology*, 120–124 (2018).
14. Ninh, N. T. and Wahab, M. A., "The effect of residual stresses and weld geometry on the improvement of fatigue life", *Journal Of Materials Processing Technology*, 48: 581–588 (1995).
15. Karakaş, Ö. and Gülsöz, A., "Kaynaklı Birleştirmelerin Statik ve Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler", *Mühendis Ve Makina*, 48 (573): 10–17 (2007).
16. Orhan, S., "Otomotiv Sektöründe Dinamik Yüklere Maruz Bir Kaynaklı Bağlantı İçin Yorulma Dayanımı Değerlendirmesi", *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2017).
17. Davidson, J. A., Jr, E. J. I., Davidson, J. A., and Imhof, E. J., "A Fracture-Mechanics and System-Stiffness Approach to Fatigue Performance of Spot-Welded Sheet Steels", 92 (1983): 48–58 (1984).
18. Mori, N., Amago, T., Ono, M., Sasanabe, M., and Hiraide, T., "Fatigue life Prediction Methods for Spot Welds In T-Shaped Members under Bending", Detroit, Michigan, (1986).
19. Internet: Fagnani Martina, "Metal Corrosion in Automotive Parts", <https://www.bruschitech.com/blog/metal-corrosion-in-automotive-parts> (2019).
20. Erbil, M., "Korozyon İlkeler-Önlemler", *Korozyon Derneği*, Ankara, 1–150 (2012).
21. Yalçın, H. and Koç, T., "Mühendisler İçin Korozyon", 2. Ed., *Korozyon Derneği*, Ankara, 1–127 (2014).
22. Xi, Y. and Xie, Z., "Corrosion Effects of Magnesium Chloride and Sodium Chloride on Automobile Components", *Department Of Transport*, (May): 1–91 (2002).
23. Somervuori, M. E., Johansson, L. S., Heinonen, M. H., Van Hoecke, D. H. D., Akdut, N., and Hänninen, H. E., "Characterisation and corrosion of spot welds of austenitic stainless steels", *Materials And Corrosion*, 55 (6): 421–436 (2004).
24. Rana, Radhakanta and Singh, S. B., "Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications", *Elsevier Ltd*, 478 (2017).

25. Bouaziz, O., Zurob, H., and Ā, M. H., "Driving Force and Logic of Development of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications", 84 (10): 937–947 (2013).
26. Demir, B. and Erdoğan, M., "Ticari , Geliştirilmiş Çift - Fazlı Çelik Üretimi Commercial , Advanced Dual-Phase Steel Productions", 3 (2): 74–91 (2014).
27. Evin, E., Tomas, M., Katalinic, B., Wessely, E., and Kmec, J., "Design Of Dual Phase High Strength Steel Sheets For Autobody", 46: 767–786 (2013).
28. ULSAB-AVC, "Advanced Vehicle Concept", (2002).
29. Gronostajski, Z., Niechajowicz, A., and Polak, S., "Prospects For The Use Of New Generation Steels Of The AHSS Type For Collision Energy Absorbing Components", *Archives Of Metallurgy And Materials*, 55 (1): 221–230 (2010).
30. Ma, M. and Yi, H., "Advanced Steels", *Advanced Steels*, 187–198 (2011).
31. Davies, R. G., "Influence of martensite composition and content on the properties of dual phase steels", *Metallurgical Transactions A*, 9 (5): 671–679 (1978).
32. Hayami, S. and Furukawa, T., "A Family of High Strength, Cold Rolled Steels", *Proceedings Of Micro-Alloying (Internatinal Symposium On HSLA)*, 311–320 (1975).
33. Kuziak, R., Kawalla, R., and Waengler, S., "Advanced high strength steels for automotive industry", *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 8 (2): 103–117 (2008).
34. "Steels for Automotive Applications – IspatGuru", <https://www.ispatguru.com/steels-for-automotive-applications/> (2020).
35. Avtar, R., Jha, B. K., Saxena, A., Dwivedi, V. S., Patnaik, B. B., Banerjee, B., And Srinivasan, S., "An As Hot Rolled Approach to Production of Molybdenum and Chromium Microalloyed Dual Phase Steels", *Transactions Of The Iron And Steel Institute Of Japan*, 26 (9): 822–828 (1986).
36. Tamarelli, C. M., "Ahss 101: Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications", *SMDI, Steel Market DevolpmentI Nstitute*, (2011).
37. Doruk, E. and Pakdil, M., "Otomotiv sektöründe direnç nokta kaynağı uygulamaları", *Mühendis Ve Makina*, 57 (673): 49–51 (2016).
38. Pires, J. N., Loureiro, A., Godinho, T., Ferreira, P., Fernando, B., and Morgado, J., "Welding Robots", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 54–60 (2003).

39. Pouranvari, M. and Marashi, S. P. H., "Critical review of automotive steels spot welding: Process, structure and properties", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 18 (5): 361–403 (2013).
40. Peterson, W. and Borchelt, J., "Maximizing cross tension impact properties of spot welds in 1.5mm low carbon, dual-phase, and martensitic steels", *SAE Technical Papers*, (724): (2000).
41. Pouranvari, M., Abedi, A., Marashi, P., and Goodarzi, M., "Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon steel resistance spot welds", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 13 (1): 39–43 (2008).
42. Zuniga, S. M., "Predicting overload pull-out failures in resistance spot welded", *Stanford University*, (1994).
43. Pouranvari, M., Marashi, S. P. H., and Safanama, D. S., "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part II: Experimental investigation and model validation", *Materials Science And Engineering A*, 528 (29–30): 8344–8352 (2011).
44. Kimchi, M. and Phillips, D. H., "Resistance Spot Welding Fundamentals and Applications for the Automotive Industry", *Morgan & Claypool*, Ohio, (2017).
45. Zhang, H. and Senkara, J., "Resistance Welding Fundamentals and Application", *Taylor & Francis CRC Press*, 19–287 (2006).
46. Almeida, F. A., Gomes, G. F., Sabioni, R. C., Gomes, J. H. de F., de Paula, V. R., de Paiva, A. P., and da Costa, S. C., "A gage study applied in shear test to identify variation causes from a resistance spot welding measurement system", *Journal Of Mechanical Engineering*, 64 (10): 621–631 (2018).
47. Dickinson, D., "Welding in the automotive industry: state of the art: a report", *Republic Steel Research Center*, Independence Ohio, (1981).
48. Pouranvari, M., Asgari, H. R., Mosavizadch, S. M., Marashi, P. H., and Goodarzi, M., "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 12 (3): 217–225 (2007).
49. Sun, X., Stephens, E. V., and Khaleel, M. A., "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions", *Engineering Failure Analysis*, 15 (4): 356–367 (2008).
50. Sun, X., Stephens, E., Davies, R., Khaleel, M., and Spinella, D., "Effects of Fusion Zone Size on Failure Modes and Static Strength of Aluminum Resistance Spot Welds", *Weld. J.*, 83: (2004).

51. Lin, P. C., Lin, S. H., and Pan, J., "Modeling of failure near spot welds in lap-shear specimens based on a plane stress rigid inclusion analysis", *Engineering Fracture Mechanics*, 73 (15): 2229–2249 (2006).
52. Sun, X., Stephens, E. V., and Khaleel, M. A., "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high-strength steel spot welds", *Welding Journal (Miami, Fla)*, 86 (1): (2007).
53. Vural, M., Akkuş, A., and Eryürek, B., "Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets", *Journal Of Materials Processing Technology*, 176 (1–3): 127–132 (2006).
54. Ramazani, A., Mukherjee, K., Abdurakhmanov, A., Abbasi, M., and Prahll, U., "Characterization of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded DP600 steel", *Metals*, 5 (3): 1704–1716 (2015).
55. Pouranvari, M., Marashi, S. P. H., and Mousavizadeh, S. M., "Failure mode transition and mechanical properties of similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 and low carbon steels", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 15 (7): 625–631 (2010).
56. Gould, J. E., Khurana, S. P., and Li, T., "Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels", *Welding Journal (Miami, Fla)*, 85 (5): (2006).
57. Uijl, N. and Smith, S., "Resistance Spot Welding of Advanced High Strength Steels for the Automotive Industry", (2006).
58. Uijl, N., Smith, S., Goos, C., Moolevliet, T., and Veldt, T., "Failure modes of resistance spot welded advanced high strength steels", *Proc. 5th Int. Semin. On 'Advances In Resistance Welding', Toronto, Canada*, (24-26 September): 78–104 (2008).
59. Pouranvari, M. and Marashi, S. P. H., "On the failure of low carbon steel resistance spot welds in quasi-static tensile-shear loading", *Materials And Design*, 31 (8): 3647–3652 (2010).
60. Gould, J. E., "Hold time sensitivity and RSW of high strength steel. Weld process effects cracking", *Welding Design & Fabrication*, 72 (8): 48–49 (1999).
61. Indacochea, J. E., Chen, C. H., and Bhat, S., "Weld nugget development and integrity in resistance spot welding of high-strength cold-rolled sheet steels", *Welding Journal*, 72 (5): 209–216 (1993).
62. Uijl, N. J. and Smith, S., "Resistance spot welding of advanced high strength steels for the automotive industry", *4th International Seminar On Advances In Resistance Welding, Wels, Austria*, (June): 30–60 (2006).

63. Joaquin, A., Elliott, A. N. A., and Jiang, C., "Reducing shrinkage voids in resistance spot welds", *Welding Journal (Miami, Fla)*, 86 (2): 24–27 (2007).
64. Vijayan, V., Murugan, S. P., Son, S. G., and Park, Y. Do, "Shrinkage Void Formation in Resistance Spot Welds: Its Effect on Advanced High-Strength-Steel Weld Strength and Failure Modes", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 28 (12): 7514–7526 (2019).
65. Yang, Y. S., Son, K. J., Cho, S. K., Hong, S. G., Kim, S. K., and Mo, K. H., "Effect of residual stress on fatigue strength of resistance spot weldment", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 6 (6): 397–401 (2001).
66. Long, X. and Khanna, S. K., "Fatigue performance of spot welded and weld bonded advanced high strength steel sheets", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 13 (3): 241–247 (2008).
67. Gaul, H., Weber, G., and Rethmeier, M., "Influence of HAZ cracks on fatigue resistance of resistance spot welded joints made of advanced high strength steels", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 16 (5): 440–445 (2011).
68. Daneshpour, S., Riekehr, S., Koçak, M., and Gerritsen, C. H. J., "Mechanical and fatigue behaviour of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 14 (1): 20–25 (2009).
69. Wung, P., Walsh, T., Ourchane, A., Stewart, W., and Jie, M., "Failure of spot welds under in-plane static loading", *Experimental Mechanics*, 41 (1): 100–106 (2001).
70. Daneshpour, S., Kokabi, A. H., Ekrami, A. A., and Motarjemi, A. K., "Crack initiation and kinking behaviours of spot welded coach peel specimens under cyclic loading", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 12 (8): 696–702 (2007).
71. Pouranvari, M. and Marashi, S. P. H., "Failure of resistance spot welds: Tensile shear versus coach peel loading conditions", *Ironmaking And Steelmaking*, 39 (2): 104–111 (2012).
72. Rathbun, R. W., Matlock, D. K., and Speer, J. G., "Fatigue behavior of spot welded high-strength sheet steels", *Welding Journal (Miami, Fla)*, 82 (8): (2003).
73. Pouranvari, M. and Marashi, P., "Failure mode transition in AISI 304 resistance spot welds", *Welding Journal*, 91: 303–309 (2012).
74. Pouranvari, M., "Failure mode transition in similar and dissimilar resistance spot welds of HSLA and low carbon steels", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51 (1): 67–74 (2012).

75. Pouranvari, M. and Marashi, S. P. H., "Key factors influencing mechanical performance of dual phase steel resistance spot welds", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 15 (2): 149–155 (2010).
76. Chao, Y., "Failure mode of spot welds: interfacial versus pullout", *Science And Technology Of Welding & Joining*, 8: 133–137 (2003).
77. Pouranvari, M., Marashi, P., Goodarzi, M., and Bahmanpour, H., "Metallurgical factors affecting failure mode of resistance spot welds", *Materials Science And Technology Conference And Exhibition, MS And T'08*, 4: 2465–2473 (2008).
78. Tumuluru, M., "Resistance spot weld performance and weld failure modes for dual phase and TRIP steels", *Failure Mechanisms of Advanced Welding Processes*, Elsevier Ltd., 43–64 (2010).
79. Khan, M. I., Kuntz, M. L., and Zhou, Y., "Effects of weld microstructure on static and impact performance of resistance spot welded joints in advanced high strength steels", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 13 (3): 294–304 (2008).
80. Pouranvari, M., "Influence of welding parameters on peak load and energy absorption of dissimilar resistance spot welds of DP600 and AISI 1008 steels", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 50 (4): 381–388 (2011).
81. Marya, M. and Gayden, X. Q., "Development of requirements for resistance spot welding dual-phase (DP600) steels part 2: Statistical analyses and process maps", *Welding Journal*, 84: 197-s (2005).
82. Bohr, J., Jiang, C., and Sang, Y., "Resistance spot welding of advanced high strength steel, a comparative study of joint efficiency", *Proc. 5th Int. Semin. On 'Advances In Resistance Welding'*, 147–166 (2008).
83. Lin, S. H., Pan, J., Wu, S. R., Tyan, T., and Wung, P., "Failure loads of spot welds under combined opening and shear static loading conditions", *International Journal Of Solids And Structures*, 39 (1): 19–39 (2001).
84. Oikawa, H., Murayama, G., Sakiyama, T., Takahashi, Y., and Ishikawa, T., "Resistance spot weldability of high strength steel(HSS) sheets for automobile", 39–45 (2007).
85. Zenner, H. and Hinkelmann, K., "August Wöhler – founder of fatigue strength research", *Steel Construction*, 12 (2): 156–162 (2019).
86. Schijve, J., "Fatigue of Structures and Materials", *Fatigue of Structures and Materials*, Springer, Delft, (2008).
87. Yalçın, H. and Koç, T., "Mühendisler İçin Korozyon.Pdf", *TMMOB Kimya Mühendisleri Odai*, Ankara, (1997).



88. Korb, L. J., "ASM HandBook Volume 13 Corrosion", *Asm International*, 3470 (1987).
89. Takakuwa, O. and Soyama, H., "Effect of Residual Stress on the Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel", *Advances In Chemical Engineering And Science*, 05 (01): 62–71 (2015).
90. Kaftan, M. A., "Çelik Yapılarda Korozyon Oluşumu Ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması", *Pamukkale Üniversitesi*, (2006).
91. Çakır, A. F., "Korozyon: İnsanlık İçin Stratejik Öneme Sahip Tabii Bir Olay", 30: 35–40 (2016).
92. Hambling, S. J., Jones, T. B., and Fournalis, G., "Influence of steel strength and loading mode on fatigue properties of resistance spot welded H beam components", *Materials Science And Technology*, 20 (9): 1143–1150 (2004).
93. Zhang, Y. and Taylor, D., "Sheet thickness effect of spot welds based on crack propagation", *Engineering Fracture Mechanics*, 67 (1): 55–63 (2000).
94. Swellam, M. H., Aş, G. B., and Lawrence, F. V., "A Fatigue Design Parameter for Spot Welds", *Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures*, 17 (10): 1197–1204 (1994).
95. Hilditch, T. B., Speer, J. G., and Matlock, D. K., "Effect of susceptibility to interfacial fracture on fatigue properties of spot-welded high strength sheet steel", *Materials And Design*, 28 (10): 2566–2576 (2007).
96. Long, X. and Khanna, S. K., "Fatigue properties and failure characterization of spot welded high strength steel sheet", *International Journal Of Fatigue*, 29 (5): 879–886 (2007).
97. Adib, H., Gilgert, J., and Pluvillage, G., "Fatigue life duration prediction for welded spots by volumetric method", *International Journal Of Fatigue*, 26 (1): 81–94 (2004).
98. Radaj, D. and Sonsino, C. M., "Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches", Second Edi. Ed., *Woodhead Publishing*, (2006).
99. Bonnen, J. J. F., Agrawal, H., Amaya, M. A., Iyengar, R. M., Kang, H., Khosrovaneh, A. K., Link, T. M., Shih, H. C., Walp, M., and Yan, B., "Fatigue of Advanced High Strength Steel spot-welds", *SAE Technical Papers*, 115 (2006): 726–744 (2006).
100. Overbeeke, J. L. and Draisma, J., "Fatigue Characteristics of Heavy-Duty Spot-Welded Lap Joints.", *Met Constr Br Weld J*, 6 (7): 213–219 (1974).

101. "Fatigue Properties of a Low Carbon Steel and a Low Alloy High Strength Steel After Spot Welding", (1974).
102. Wilson, R. B. and Fine, T. E., "Fatigue behavior of spot welded high strength steel joints", *SAE Technical Papers*, (1981).
103. Chandel, R. S. and Garber, S., "Mechanical and metallurgical aspects of spot-welded joints in heat-treated low-carbon mild steel sheet", *Metals Technology*, 1 (1): 418–424 (1974).
104. Orts, D. H., "Fatigue strength of spot welded joints in a HSLA steel", *SAE Technical Papers*, (1981).
105. Freytag, N. A., "A Comprehensive Study of Spot Welding Galvanized Steel", *Welding Journal*, 1455–1565 (1965).
106. Banerjee, P., Sarkar, R., Pal, T. K., and Shome, M., "Effect of nugget size and notch geometry on the high cycle fatigue performance of resistance spot welded DP590 steel sheets", *Journal Of Materials Processing Technology*, 238: 226–243 (2016).
107. Shinozaki, M., Toshiyuki, K., and Toshio, I., "Fatigue of Automotive High Strength Steel Sheets and Their Welded Joints", *SAE Technical Papers*, (1983).
108. Ma, C., Chen, D. L., Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A., and Biro, E., "Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel", *Materials Science And Engineering A*, 485 (1–2): 334–346 (2008).
109. Ordoñez Lara, J. H., Ambriz, R. R., García, C., Plascencia, G., and Jaramillo, D., "Fatigue Life of Resistance Spot Welding on Dual-Phase Steels", *Proceedings Of The 17th International Conference On New Trends In Fatigue And Fracture*, (8): 225–236 (2018).
110. Alemius, M., Pohjanne, P., Somervuori, M., and Hanninen, H., "Exploring the Mechanical Properties of Spot Welded Dissimilar Joints for Stainless and Galvanized Steels", *Welding Journal*, 305–313 (2006).
111. Sudhakar, K. V., Asim, B. A. G., Dwarakadasa, E. S., and Ray, K. K., "Effect of corrosive medium on fatigue crack growth behaviour and fracture in high martensite dual phase steel", *Bulletin Of Materials Science*, 22 (7): 1029–1036 (1999).
112. Linder, J. and Melander, A., "Fatigue strength of spot welded stainless sheet steels exposed to 3% NaCl solution", *International Journal Of Fatigue*, 20 (5): 383–388 (1998).

113. Sarkar, P. P., Kumar, P., Manna, M. K., and Chakraborti, P. C., "Microstructural influence on the electrochemical corrosion behaviour of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution", *Materials Letters*, 59 (19–20): 2488–2491 (2005).
114. Kayali, Y. and Anaturk, B., "Investigation of electrochemical corrosion behavior in a 3.5wt.% NaCl solution of boronized dual-phase steel", *Materials And Design*, 46: 776–783 (2013).
115. Bhagavathi, L. R., Chaudhari, G. P., and Nath, S. K., "Mechanical and corrosion behavior of plain low carbon dual-phase steels", *Materials And Design*, 32 (1): 433–440 (2011).
116. Yılmaz, I., Bilici, A., and Aydın, H., "Microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welded DP1000–QP1180 steel sheets", *Journal Of Central South University*, 26 (1): 25–42 (2019).
117. Aydemir, B., Aydemir, E., and Kaluç, E., "DP1000 çelik sacların uzaktan lazer (RLW) ve direnç nokta kaynaklı (RSW) birleştirmelerinin çekme ve yorulma özelliklerinin incelenmesi", *Mühendis Ve Makina*, 58 (687): 17–28 (2017).
118. Pakkanen, J., Vallant, R., and Kičin, M., "Experimental investigation and numerical simulation of resistance spot welding for residual stress evaluation of DP1000 steel", *Welding In The World*, 60 (3): 393–402 (2016).
119. Ismail, M., Muhammad, B., Hamzah, E., and Keong, T. W., "Corrosion behaviour of dual-phase and galvanized steels in concrete", *Anti-Corrosion Methods And Materials*, 59 (3): 132–138 (2012).
120. Salamci, E., Candan, S., and Kabakci, F., "Effect of microstructure on corrosion behavior of dual-phase steels", *Kovove Materialy*, 55 (2): 133–139 (2017).
121. Thierry, D., Vucko, F., Luckeneder, G., Weber, B., Dosdat, L., Bschorr, T., and Rother, K., "Fatigue behavior of spot-welded joints in air and under corrosive environments Part I: Materials , specimen and test results in air", Yutz,France, (2016).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Mustafa GÖKTAŞ 1995 yılında Aksaray’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamladı. Kırşehir Mesleki ve Teknik Lisesi Bilişim Teknolojileri Bölümü – Web Tasarımı dalında lise öğrenimini tamamladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği İngilizce programında öğrenime başlayıp 2018 yılında mezun oldu. 2018 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Yenice Mah. Atatürk Cad. Kapı no.111 Merkez/KIRŞEHİR

Tel : (541) 367 47 90

E-posta : m.goktas68@hotmail.com