

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR BİNEK ARAÇ GÖVDESİNDEKİ ÇELİK SAÇLARIN DİRENÇ  
NOKTA KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİNİN YORULMA  
DAYANIMLARININ PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Emre DORUK**

**Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fehim FINDIK**

**Temmuz 2018**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

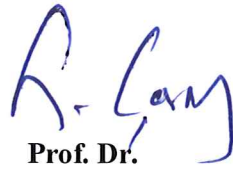
BİR BİNEK ARAÇ GÖVDESİNDEKİ ÇELİK SACLARIN DİRENÇ  
NOKTA KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİNİN YORULMA  
DAYANIMLARININ PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Emre DORUK

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 09/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



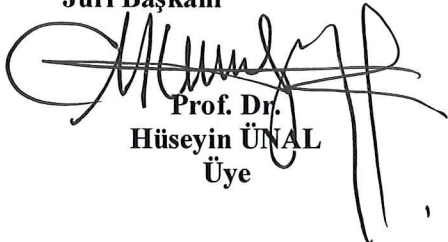
Prof. Dr.  
Gürel ÇAM  
Jüri Başkanı



Prof. Dr.  
Fehim FINDIK  
Üye

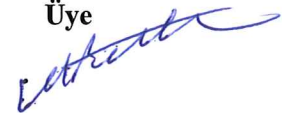


Prof. Dr.  
Salim ASLANLAR  
Üye



Prof. Dr.  
Hüseyin ÜNAL  
Üye

Doç. Dr.  
Murat PAKDİL  
Üye



## BEYAN

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

Emre DORUK

01.06.2018



## ÖNSÖZ

Bu çalışmada bir binek araç gövdesindeki çelik sacların direnç nokta kaynaklı birleştirmelerinin mekanik, metalurjik ve yorulma davranışları parametrik olarak incelenmiştir.

Doktora çalışmalarım boyunca akademik bilgi birikimi ve vizyonunu benden esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Fehim FINDIK'a şükranlarımı sunarım. Doktora tez izleme komitesinde yer alan hocalarım Sayın Doç. Dr. Murat PAKDİL ve Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL'a tezin daha kaliteli hala olması için yaptıkları katkı ve desteklerden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının yapılmasında emeği geçen Tofaş ar-ge gövde tasarım yöneticiliği'nden Mak. Müh. Levent AKSEL'e, Tofaş pres üretim yöneticiliği'nden Serhat ASA'ya, Tofaş ar-ge'den Dr. Mak. Müh. İsmail DURGUN'a, Tofaş ar-ge malzeme mühendisliği yöneticiliği'nden Yük. Metalurji ve Malzeme Mühendisi Gürkan YILMAZOĞLU'na ve Metalurji ve Malzeme Mühendisi Utku Can Kumru'ya, Tofaş ar-ge prototip atölyesi çalışanlarına, Tiberina Otomotiv'den Taner MUTLU ve Cem SULTAN'a, Nuri Körüstan Makine Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den Sedat Türkoğlu'na yaptıkları katkı ve desteklerden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma süresince bana verdiği destek ve anlayışından ötürü sevgili eşim Tuğba DORUK'a, doktora çalışmalarım devam ederken dünyaya gelen canım oğlum Tunçalp DORUK'a ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|  |     |
|--|-----|
| ÖNSÖZ.....   | i   |
| İÇİNDEKİLER.....                                   | ii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....               | v   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                              | vi  |
| TABLolar LİSTESİ.....                              | x   |
| ÖZET.....  | xi  |
| SUMMARY.....                                       | xii |
| BÖLÜM 1.   |     |
| GİRİŞ.....   | 1   |
| 1.1. Çalışmanın Amacı ve Literatür Özeti.....      | 1   |
| BÖLÜM 2.   |     |
| ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI .....                | 10  |
| 2.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Yöntemi.....    | 10  |
| 2.2. Kaynak Çevrimi.....                           | 11  |
| 2.3. Kaynak Esnasında Oluşan Isı.....              | 11  |
| 2.4. Kaynak Bölgesinin Analizi.....                | 13  |
| 2.4.1. Çekirdek oluşumu.....                       | 13  |
| 2.4.2. Isıdan etkilenen bölge (IEB).....           | 13  |
| 2.5. Kaynak Kalitesini Etkileyen Parametreler..... | 14  |
| 2.5.1. Kaynak akımı.....                           | 14  |
| 2.5.2. Kaynak süresi.....                          | 15  |
| 2.5.3. Elektrod kuvveti.....                       | 15  |
| 2.5.4. İş parçası malzemesi.....                   | 16  |
| 2.5.5. Kullanılan elektrotlar.....                 | 16  |

|  |    |
|--|----|
| 2.6. Kaynak Noktasının Mukavemeti..... | 16 |
|--|----|

### BÖLÜM 3.

|   |    |
|---|----|
| YORULMA .....                             | 18 |
| 3.1. Metallerde Yorulma Olayı .....       | 18 |
| 3.2. Yorulma Mekanizması .....            | 18 |
| 3.3. Yorulma Kırılması .....              | 19 |
| 3.4. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma ..... | 19 |
| 3.5. Yorulmaya Etki Eden Faktörler .....  | 21 |
| 3.5.1. Ortalama gerilme .....             | 21 |
| 3.5.2. Parça büyüklüğü .....              | 23 |
| 3.5.3. Metalürjik faktörler .....         | 23 |
| 3.5.4. Yüzey işlemleri .....              | 23 |
| 3.5.5. Sıcaklık .....                     | 24 |
| 3.5.6. Gerilme gradyanı .....             | 24 |
| 3.5.7. Atık gerilmeler .....              | 24 |
| 3.6. Yorulma Deneyi .....                 | 25 |
| 3.6.1. Kavramlar .....                    | 25 |
| 3.6.2. S-N eğrileri .....                 | 26 |
| 3.6.3. Deney cihazları .....              | 27 |

### BÖLÜM 4.

|  |    |
|--|----|
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....  | 28 |
| 4.1. Çalışmanın Planlanması.....                                   | 28 |
| 4.2. Malzeme.....  | 29 |
| 4.2.1. Dual fazlı çelikler.....                                    | 29 |
| 4.2.2. TWIP çelikleri.....   | 31 |
| 4.2.3. Test numunelerinin hazırlanması.....                        | 33 |
| 4.2.4. Kullanılan elektrotların özellikleri.....                   | 34 |
| 4.3. Metot.....  | 34 |
| 4.3.1. Kaynak makinesi.....  | 34 |
| 4.3.2. Elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların yapılması..... | 35 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3.3. Çekirdek çaplarının tespiti.....                        | 36 |
| 4.3.4. Ultrasonik Kaynak Kontrolü.....                         | 37 |
| 4.3.5. Çekme-makaslama testleri.....                           | 38 |
| 4.3.6. Işık mikroskobu incelemeleri.....                       | 40 |
| 4.3.7. Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri.....    | 40 |
| 4.3.8. Sertlik değerlerinin tespiti.....                       | 40 |
| 4.3.9. Yorulma test düzeneği.....                              | 41 |
| 4.3.10. Yorulma testleri ve S-N eğrilerinin elde edilmesi..... | 42 |

## BÖLÜM 5.

|  |    |
|--|----|
| DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....   | 44 |
| 5.1. Genel.....  | 44 |
| 5.2. Elde Edilen Direnç Nokta Kaynaklı Bağlantılar.....                                    | 44 |
| 5.3. Ultrasonik Kaynak Kontrolü Sonuçları.....   | 45 |
| 5.4. Çekme-Makaslama Testi Sonuçları.....  | 47 |
| 5.5. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları.....   | 50 |
| 5.6. SEM İnceleme Sonuçları.....   | 56 |
| 5.7. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....   | 61 |
| 5.8. Kaynaklı Bağlantıların S-N Eğrileri ve Yorulma Davranışlarının Karşılaştırılması..... | 66 |

## BÖLÜM 6.

|  |    |
|--|----|
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                  | 79 |
| 6.1. Genel Sonuçlar.....                                   | 79 |
| 6.2. Konu ile İlgili İleride Yapılabilecek Çalışmalar..... | 82 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| KAYNAKLAR ..... | 83 |
|-----------------|----|

|                |    |
|----------------|----|
| ÖZGEÇMİŞ ..... | 89 |
|----------------|----|

## **SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ**

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| DP   | : Dual phase                          |
| FZ   | : Fusion zone                         |
| HV   | : Vickers hardness                    |
| IEB  | : Isıdan etkilenen bölge              |
| PPM  | : Parts per million                   |
| Q&P  | : Quenching and partitioning          |
| SEM  | : Scanning electron microscopy        |
| SWB  | : Spot weld-bonded                    |
| SW   | : Spot weld                           |
| ŞSD  | : Şekillendirilebilme sınır diyagramı |
| TRIP | : Transformation induced plasticity   |
| TWIP | : Twinning induced plasticity         |
| BIW  | : Body in white                       |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 2.1.  | Elektrik nokta direnç kaynağı ile birleştirme.....                    | 10 |
| Şekil 2.2.  | Elektrik nokta direnç kaynağında meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 12 |
| Şekil 2.3.  | Elektrik nokta direnç kaynağında dikiş geometrisi.....                | 13 |
| Şekil 2.4.  | Isıdan etkilenen bölge (IEB).....                                     | 14 |
| Şekil 2.5.  | Direnç nokta kaynağı statik mukavemet testleri.....                   | 17 |
| Şekil 2.6.  | Direnç nokta kaynağında düğümlenme hasarı.....                        | 17 |
| Şekil 2.7.  | Direnç nokta kaynağında makaslama hasarı.....                         | 17 |
| Şekil 3.1.  | Direnç nokta kaynağındaki çentik kabulü ve gerilme yığılması..        | 20 |
| Şekil 3.2.  | Nokta kaynağındaki temel yükleme tipleri.....                         | 21 |
| Şekil 3.3.  | Smith diyagramı.....  | 22 |
| Şekil 3.4.  | Gerber parabolü, goodman ve soderberg doğrusu.....                    | 22 |
| Şekil 3.5.  | Periyodik yükleme.....  | 25 |
| Şekil 3.6.  | Wöhler eğrisi.....  | 26 |
| Şekil 3.7.  | Instron 8801 (100 kN kapasiteli) yorulma test cihazı.....             | 27 |
| Şekil 4.1.  | Farklı malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri...     | 31 |
| Şekil 4.2.  | Farklı çelik malzemelerin enerji emme kabiliyetleri ( $J/mm^3$ )...   | 32 |
| Şekil 4.3.  | Farklı çelik malzemelerin ŞSD diyagramı.....                          | 32 |
| Şekil 4.4.  | Numune boyutları.....   | 33 |
| Şekil 4.5.  | Mobil kaynak makinesi.....  | 35 |
| Şekil 4.6.  | Direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numuneler.....                | 36 |
| Şekil 4.7.  | Ayırma testi.....   | 36 |
| Şekil 4.8.  | Ultrasonik nokta kaynak kontrolü.....                                 | 37 |
| Şekil 4.9.  | Ultrasonik test kontrol ekipmanları.....                              | 38 |
| Şekil 4.10. | Zwick/Roell çekme cihazı, maks. 25 ton.....                           | 39 |
| Şekil 4.11. | Çekme deneyi sonrası kopan kaynaklı parça.....                        | 39 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 4.12. | Bakalite alınan nokta kaynaklı numune kesiti.....  | 40 |
| Şekil 4.13. | Metal sertlik ölçüm cihazı, vickers.....   | 41 |
| Şekil 4.14. | Instron 8801 servo-hidrolik yorulma test cihazı.....   | 41 |
| Şekil 4.15. | Periyodik Yükleme.....   | 42 |
| Şekil 4.16. | Yorulma testi.....   | 43 |
| Şekil 5.1.  | DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm)-5 mm çekirdek çapı-ultrasonik kontrolü-iyi kaynak.....   | 45 |
| Şekil 5.2.  | DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm)-5 mm çekirdek çapı-ultrasonik kontrolü-yanmış kaynak.....  | 46 |
| Şekil 5.3.  | DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm)-5 mm çekirdek çapı-ultrasonik kontrolü-kayıp kaynak.....   | 46 |
| Şekil 5.4.  | DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) (5 mm çekirdek çapı) gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....  | 49 |
| Şekil 5.5.  | Çekme-makaslama testi sonucunda hasara uğrayan numune.....   | 49 |
| Şekil 5.6.  | DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantı kesiti.....  | 50 |
| Şekil 5.7.  | DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı kesiti.....  | 50 |
| Şekil 5.8.  | TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantı kesiti.....  | 51 |
| Şekil 5.9.  | TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı kesiti...   | 51 |
| Şekil 5.10. | DP 800 çeliği mikro yapısı.....  | 52 |
| Şekil 5.11. | TWIP 1000 çeliği mikro yapısı.....   | 52 |
| Şekil 5.12. | DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantı (a) 4 mm çekirdek çapı (b) 5 mm çekirdek çapı (c) 6 mm çekirdek çapı-kaynak bölgeleri.....       | 53 |
| Şekil 5.13. | DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı (a) 4 mm çekirdek çapı (b) 5 mm çekirdek çapı (c) 6 mm çekirdek çapı-kaynak bölgeleri.....           | 54 |
| Şekil 5.14. | TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantı (a) 4 mm çekirdek çapı (b) 5 mm çekirdek çapı (c) 6 mm çekirdek çapı-kaynak bölgeleri..... | 55 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 5.15. | TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı (a) 4 mm çekirdek çapı (b) 5 mm çekirdek çapı (c) 6 mm çekirdek çapı-kaynak bölgeleri..... | 56 |
| Şekil 5.16. | 4 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-kaynak bölgesi.....   | 57 |
| Şekil 5.17. | 4 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-esas metal.....   | 57 |
| Şekil 5.18. | 4 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-IEB.....  | 58 |
| Şekil 5.19. | 5 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-kaynak bölgesi.....   | 58 |
| Şekil 5.20. | 5 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-esas metal.....   | 59 |
| Şekil 5.21. | 5 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-IEB.....  | 59 |
| Şekil 5.22. | 6 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-kaynak bölgesi.....   | 60 |
| Şekil 5.23. | 6 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-esas metal.....   | 60 |
| Şekil 5.24. | 6 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-IEB.....  | 61 |
| Şekil 5.25. | Sertlik ölçümü yapılan doğrultular.....   | 62 |
| Şekil 5.26. | DP 800 (1 mm)- DP 800 (1 mm) 4 mm çekirdek çapına sahip numunenin yatay sertlik taraması.....   | 63 |
| Şekil 5.27. | DP 800 (1 mm)- DP 800 (1 mm) 4, 5, 6 mm çekirdek çapına sahip numunelerin yatay sertlik taraması.....   | 63 |
| Şekil 5.28. | DP 800 (1 mm)- DP 800 (1 mm) 4, 5, 6 mm çekirdek çapına sahip numunelerin dikey sertlik taraması.....   | 64 |
| Şekil 5.29. | DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı.....                               | 67 |
| Şekil 5.30. | DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapı.....   | 68 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 5.32. | DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı.....           | 71 |
| Şekil 5.33. | DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapı.....                           | 71 |
| Şekil 5.34. | Yorulma testi sonucunda kopan DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantılar.....                                   | 72 |
| Şekil 5.35. | TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı..... | 74 |
| Şekil 5.36. | TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapı.....                 | 74 |
| Şekil 5.37. | Yorulma testi sonucunda kopan TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantılar.....                         | 75 |
| Şekil 5.38. | TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı.....      | 77 |
| Şekil 5.39. | TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapı.....                      | 77 |
| Şekil 5.40. | Yorulma testi sonucunda kopan TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantılar.....                              | 78 |

## TABLolar LİSTESİ

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tablo 4.1. | DP 800 kimyasal bileşimi.....   | 30 |
| Tablo 4.2. | DP 800 mekanik özellikleri.....   | 30 |
| Tablo 4.3. | TWIP 1000 kimyasal bileşimi.....  | 32 |
| Tablo 4.4. | TWIP 1000 mekanik özellikleri.....  | 33 |
| Tablo 4.5. | Kullanılan elektrotların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri..   | 34 |
| Tablo 4.6. | Oluşturulan direnç nokta kaynaklı bağlantı çiftleri.....  | 35 |
| Tablo 5.1. | Kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama testi sonuçları.....   | 47 |
| Tablo 5.2. | DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantının sertlik dağılımı (HV) (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı.....  | 61 |
| Tablo 5.3. | TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantının sertlik dağılımı (HV) (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı | 64 |
| Tablo 5.4. | TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının sertlik dağılımı (HV) (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı..... | 65 |

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Elektrik direnç nokta kaynağı, yorulma, araç gövde imalatı, yeni nesil çelikler

Otomotiv sektöründe araç hafifletme çalışmaları kapsamında araç gövdesinde yeni nesil yüksek mukavemetli sacların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, bir binek araç gövdesinde kullanılan dual fazlı çelik sacların ve kullanılması planlanan yeni nesil twip çelik sacların direnç nokta kaynaklı birleştirmelerinin mekanik, metalurjik ve yorulma davranışları incelenmiştir. DP 800 ve TWIP 1000 sacları kendi aralarında ve birbirleriyle üç farklı çekirdek çapında birleştirilmiştir. Belirlenen üç ayrı çekirdek çapını elde etmek için kaynak akımı parametrik hale getirilmiştir. Toplamda dört grup kaynaklı birleştirme kombinasyonu elde edilmiştir. Kaynaklı numunelerin kalitesi/uygunluğu ultrasonik kaynak kontrol yöntemi ile incelenmiştir. Sonrasında bu numunelere çekme-makaslama testi yapılmış ve kaynak çekirdek çapının ve farklı kaynaklı birleştirme kombinasyonunun bağlantının mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Nokta kaynaklı numunelerin kesiti bakalıte alınarak esas metal, kaynak bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge (IEB) mikro ve makro fotoğrafları çekilmiş, mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır.

Uzun ömürlü yorulma testleri için her gruptaki her bir test serisi için yaklaşık 6 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Testler sonucunda her bir seri için S-N eğrileri çıkartılmıştır. Her bir kaynaklı birleştirme kombinasyonunda yer alan farklı çekirdek çaplarının yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. En yüksek yorulma sınırı gösteren bağlantı DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) saclardan oluşan bağlantıdır. En düşük yorulma sınırı ise, TWIP (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) saclardan oluşan bağlantıda görülmüştür.

# **PARAMETRIC INVESTIGATION OF THE FATIGUE BEHAVIOR OF RESISTANCE SPOT WELDED STEEL JOINTS IN A VEHICLE BODY**

## **SUMMARY**

Keywords: Resistance spot welding, fatigue, vehicle body manufacturing, new generation steels

In the automotive sector, the usage of new generation high-strength steel sheets is becoming increasingly widespread in BIW (Body-in-white, which refers to the stage in automobile manufacturing in which a car body's components have been joined together using one or a combination of different joining techniques) within the framework of the studies aiming at reducing the total vehicle weight. In this study, the mechanical, metallurgical and fatigue behaviors of resistance spot welded dual phase steel joints which are used in BIW and resistance spot welded new generation TWIP steel joints which are planned to be used in BIW have been investigated. DP 800 and TWIP 1000 steel sheets were joined with each other and together employing three different nugget diameters. The weld current is varied to obtain the three specified nugget diameters. In total, four spot welded joints were obtained. The quality/suitability of welded samples was investigated by ultrasonic test. Then these samples were subjected to a tensile-shear test and the effect of nugget diameter and different joint combination on strength of the joint were investigated. Cross sections of welded samples were mounted in bakelite and then macro-micro structures of base metals, weld metals and heat affected zones (HAZs) were investigated. Microhardness measurements were also made on welded joints.

The fatigue tests were applied to the six spot welded specimens for each series and each sheet combination. S-N curves were obtained for each welded joint. The effect of different nugget diameters on the fatigue life of welded joint combinations was investigated. DP 800 (1 mm) -DP 800 (1 mm) steel sheets combination exhibited the highest fatigue limit, while TWIP (1.4 mm) -DP 800 (1 mm) steel sheets combination displayed the lowest fatigue limit.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Çalışmanın Amacı ve Literatür Özeti

Bu çalışmanın amacı araç hafifletme çalışmaları kapsamında kullanımı yaygınlaşan yüksek mukavemetli çelik sacların nokta kaynaklı birleştirmelerinin mekanik, metalurjik ve yorulma davranışlarının parametrik olarak belirlenmesidir. Bu kapsamda DP 800 ve TWIP 1000 sacları kendi içlerinde ve birbirleriyle farklı kombinasyonlarda nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Bu birleştirmelerin yorulma dayanımlarını tespit etmek için S-N eğrileri çıkartılmış; kaynak parametrelerinin bu eğriler üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Literatüre bakıldığında bir birleştirme tekniği olarak direnç nokta kaynağı ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda nokta kaynağı ile birleştirilen bağlantıların mekanik, metalurjik ve yorulma davranışları fiziksel testlerle ve sanal analizlerle tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yu ve ark. yaptıkları çalışmada, 1 GPa seviyesindeki TWIP çeliği ile 1 GPa seviyesindeki DP çeliğinin direnç nokta kaynağı karakteristiklerini karşılaştırmışlardır [1]:

- TWIP 980 çeliğinin olduğu durumda, esas metal, IEB ve kaynak çekirdeği sadece östenit fazda var olmaktadır. Aksine, DP 980 olduğu durumda martenzit daha çok kaynak çekirdeğinde yer tutmakta ve martenzit ve ferritin karışık mikroyapısı IEB ve esas metalde görülmektedir.
- İki çelik arasındaki mikroyapıdaki farklılık yüzünden, IEB'in sertliği ve çeliğin kaynak çekirdeği DP 980'de TWIP 980'e göre daha büyüktür.



- Aynı eşit kaynak çekirdek çaplarında, DP 980'in kesme dayanımı gerilimi TWIP 980'den 1.6 kat daha fazladır. Bunun sebebi sertlik dağılımı ve mikroyapıdaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.
- TWIP 980'in akma olmadan maksimum sıcaklık girişi DP 980'den büyük ölçüde daha düşüktür.
- TWIP 980'in uygun kaynak aralığı DP 980'e göre daha küçüktür.

Saha ve ark. yaptıkları çalışmada, yüksek miktarda Mn içeren çift indüklenmiş östenitik çeliğin direnç nokta kaynağı ile ilgilenmişlerdir [2]:

- Çalışmada yüksek miktarda Mn içeren çift indüklenmiş östenitik çeliğin kaynaklanabilirliğinin geliştirilmesi ve parametre optimizasyonlarına yer verilmiştir.
- Kaynaklanmış parçada çatlak için yüksek eğilim vardır; kaynak akım seviyesi belli bir düzeye ulaştığında, çatlaklar IEB'de kaynak çekirdeğine yakın yerde görülmektedir. Çatlak formasyonu ve yayılması kaynak akımı, kaynak zamanlaması ve elektrot gücünden etkilenmektedir.

Tanegashima ve ark. Yaptıkları çalışmada, yüksek dayanımlı çeliğin nokta kaynaklı birleşim noktalarının yorulma çatlakları ilerlemesini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [3]:

- Makroskobik çatlak morfolojilerindeki gerilme ilişkisi belirlenmiştir. Düğme çatlakları yüksek gerilme seviyesinde ortaya çıkmaktadır, ana metal çatlakları ise düşük gerilme seviyesinde meydana gelmektedir.
- Bu çalışma nokta kaynak bağlantıları yorulma çatlaklarının kaynak alanı üzerinde gerilme seviyesinden bağımsız olarak başlaması için çalışma süresi boyunca çok fazla yorulma periyoduna ihtiyaç duyulmuştur.
- Nokta kaynak bağlantılarındaki yorulma limiti değişken yük şartlarında yok olmaktadır. Modifiye Miner yasası yorulma süresi tahmini üzerinde

geçerliliği olduğu halde, Miner yasasına dayanarak yapılan yorulma süresi değerlendirilmesi tutarsız olmaktadır.

Kang ve ark. yaptıkları çalışmada, farklı alüminyum alaşımlarının nokta kaynaklı birleştirmelerinin yorulma davranışlarını tespit etmeye çalışmışlardır. Klasik nokta kaynak birleştirme yöntemine ilave olarak yapısal performansını arttırmak için, epoksi yapışkanlar kullanılmıştır. Çalışma sonuçları şu şekilde özetlenebilir [4]:

- Farklı alüminyum nokta kaynaklarının kaynak çekirdek büyüklüğü yapışkan ilaveli nokta kaynaklarda daha büyüktür fakat çekme-makaslama testlerinde maksimum yük kapasitesi yapışkan ilavesizlerle aynıdır.
- Ana yorulma çatlakları kaynak çekirdeğinin köşesinde başlar ve kalınlık yönünde Aural2 basınçlı döküm saca kaynak dolgusunun içine doğru gitmektedir.
- Maksimum yapısal AA 5754 için gerilme- tekrar sayısı eğrisi, Aural2 yapıştırıcılı veya yapıştırıcısız farklı alüminyum nokta kaynakları kaynak çekirdeğinin büyüklüğünü belirten, yorulma süresini belirleyen, çekme ve eğilme mukavemetlerine uyan ana eğri içinde yer alır.

Duraffourg ve ark. yaptıkları çalışmada, direnç nokta kaynağının yorulma süresi tahminine dair yeni bir metodoloji geliştirmişlerdir. Nokta kaynağın yorulma davranışı tespit edilirken numerik ve fiziksel test sonuçları arasında doğrusal olmayan çoklu regresyon metodu ile bir korelasyon sağlanmaktadır. Geliştirilen bu yeni metodoloji ile araç gövdesindeki yaklaşık 4000 nokta kaynak noktasının yorulma testi yapılabilmektedir [5].

Becker ve ark. yaptıkları çalışmada, galvanizleme işleminin AISI410 martenzit çeliğinin nokta kaynağının mekanik ve yorulma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Martenzit yapılı yüksek mukavemetli çeliğin kaynağı hızlı soğuma sonrası kırılğan tanecik yapısının ortaya çıkması yüzünden zordur. Tavlama (sertliği giderilmiş) ve galvanize etme işlemleri sayesinde nokta kaynaklı birleştirilmiş numunelerin

mekanik özellikleri gelişmeye başlamıştır. Ayrıca yorulma testleri ve aşırı yük bozulmalarının kırılma modlarında büyük değişiklikler gözlemlenmiştir [6].

Ertas ve ark. yaptıkları çalışmada, nokta kaynağının optimum konumunun bulunması ve maksimum yorulma ömrü için birleştirilmiş tabakaların optimum bindirme uzunluğu için bir yöntem önermişlerdir. Minimum kaynaktan kaynağa ve kaynaktan köşeye mesafeler, kenar kısıtlamaları gibi düşünülmüş ve endüstri tarafından önerilmiştir. Toplam gerilme ömrü denklemleri yorulma ömrünü tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu modeli kullanmak için, yapıdaki gerilme durumu gereken periyodik yüklemeler altında geliştirilmiştir. Bu amaçla, doğrusal olmayan sonsuz eleman analizleri yapılmıştır. Nokta kaynak bölgesindeki plastik deformasyonların oluşması yüzünden meydana gelen kalıntı gerilmeler hesaba katılmıştır. Nelder-Mead (ardışık tek yönlü) optimizasyon prosedürü arama algoritması olarak çalıştırılmıştır [7].

Fujii ve ark. yaptıkları çalışmada, 3'lü birleştirilmiş sac nokta kaynağı bağlantısının yorulma dayanımını ve yorulmaya bağlı çatlak mekanizmalarını incelemişlerdir. 3 sacı birleştirmeyi iki farklı yöntemle yapmışlardır. Birincisi nokta kaynakla yapıştırma (SWB) ikincisi ise nokta kaynakla (SW) birleştirmedir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir [8]:

- Ana çeliklerin dayanım seviyelerini hesaba katmadan SWB tipi birleştirmede yorulma dayanımı, SW birleştirmeye kıyasla daha yüksektir. Yüksek periyodik yorulma rejiminde SWB birleştirmelerin yorulma dayanımı iki çelikte de birbirine yakındır.
- Ara yüzey ile ilgili olan yapışma azalması başladığında yapıştırıcı köşeden kaynak çekirdeğine doğru yayılır ve yorulma çatlakları kaynak çekirdeğinin köşesinde başlamaktadır.

- Kaynak çekirdeği köşesinde gerilme yoğunluk faktörleri yorulma başlangıcında düşüktür, ara yüzey yapışma azalmasının gelişimi ile artmaktadır. SWB birleştirmelerin yorulma dayanımı artmıştır çünkü kaynak dolgusunun köşesindeki gerilme konsantrasyonu azalmış, yine kaynak dolgusunun köşesindeki yorulma çatlağı başlaması geciktirilmiştir.

Khanna ve ark. yaptıkları çalışmada, çelik saclı nokta kaynak bağlantılarının yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Bu çelikler; yumuşak çelik, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik, çift fazlı çelik, dönüştürülmüş-indüklenmiş plastisite çelikler, geri tavllanmış çelikler ve martenzit çeliklerdir. Yorulma ömrü öngörüsü için çeşitli nümerik modeller, nominal gerilme yaklaşımı gibi, sıcak nokta gerilme yaklaşımı, eşdeğer yapısal gerilme yaklaşımı, çatlak mekaniği (yayılmı) ve bölgesel çentik gerilimi yaklaşımı incelenmiştir. Artık gerilmeler ve rastgele yüklemelerin etkileri üzerine tartışılmıştır [9].

Kim ve ark. yaptıkları çalışmada, soğuk haddelenmiş yumuşak çelik sacların çapraz gerilme nokta kaynağı bağlantılarının yorulma dayanımını incelemişlerdir. Çalışma kaynak zamanının ve akımın, gerilme dayanımı ve yorulma ömrü üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılmıştır. 10 kA'lık normal akım şartından 2 kA'lık bir azalma yorulma ömrü ve statik bağlantı dayanımının her ikisinde de büyük miktarda azalmaya sebep olmuştur. Nominal kaynak akımında 2 kA'lık artış statik bağlantı dayanımında artışa sebep olmuştur. Kaynak zamanının 5 periyod artması en optimum statik dayanım değerini vermiştir [10].

Kong ve ark. yaptıkları çalışmada, bor içeriği ve kaynak akımının kompleks fazlı çeliklerin direnç nokta kaynaklı birleştirmelerinin mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemiş ve aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir [11]:

- Kaynak çekirdek çapı ve çatlak çapı kaynak akımı ile orantılıdır. Bor içeriğinin (0-40 ppm) kaynak dolgusu çapında ve çatlak çapında az bir etkisi vardır. Çünkü bu öz direnci değiştirmez.

- Çekme-kesme testinin hata modü iki parçaya ayrılmıştır. Bunlar ara yüzey hatası ve çıkarım hatasıdır. Çıkarım hatası güvenilir hafifletilmiş alanda meydana gelmiştir. Kaynakta sertliğin en düşük olduğu yer ana metal/ısıdan etkilenmiş alan sınırındır. Bor içeriği martenzitin çatlak hacmini artırır. Çatlak çapı kaynak akımı ile artmaktadır.
- Çekme-kesme yükündeki çekilme hatasında numune çatlakları, çatlak çapı ve yumuşatılmış alanın sertliği ile artmaktadır. Çekme-kesme yükü değerleri öngörülerini ile analitik olarak hesaplanan değerlerle fiziksel ölçüm değerleri arasındaki korelasyon faktörü 0.97'dir.
- Kaynak çekirdeği mikro yapısı tamamen martenzit yapıdadır ve kaynak akımı ile bor içeriğinden kaynaklanan küçük değişiklikler içermektedir. Kesme yükü sadece çatlak çapına bağlıdır.

Mirsalehi ve ark. yaptıkları çalışmada, nokta kaynaklı bağlantının yorulma ömrünü artık gerilmelerin etkisini içeren çatlak ilerleme metoduna göre hesaplamışlardır. Bu yaklaşımda, kaynak artık gerilmeleri hesaba katılmıştır. Artık gerilme etkisi hesaba katıldığında yorulma dayanımı yaklaşık % 26.99 oranında azalmaktadır. Geliştirilen bu metod ile direnç nokta kaynağı bağlantılarındaki yorulma ömrünün analitik değeri yapılan fiziksel testlerle korele çıkmaktadır [12].

Saha ve ark. yaptıkları çalışmada, TWIP çeliğinin nokta kaynaklı birleştirmelerinde segregasyon davranışını ve IEB bölgesi ergime çatlaklarını incelemişlerdir. Çatlaklar sonradan kaynaklı bağlantılarda kısmen erimiş alanda oluşmaktadır. Çatlak boyu ve çatlak aralık genişliklerinin ısı girişi ile arttığı gözlemlenmiştir. Kaynak akımı çatlak oluşumu için en etkili parametredir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir [13]:

- TWIP çeliği eritilmiş çatlak oluşumu için yüksek oranda duyarlıdır. Çatlakların taneler arası karakteristikleri ve çatlakların içerisindeki sıvı metal varlığı ısıtma şartı boyunca çatlak oluşumunun gerçekleştiğini göstermektedir. C, Mn ve Ti gibi ana alaşım elementleri güçlü segregasyon gösterir ve çatlak alanını izler.

- Çatlak çapları (çatlak boyu ve kök çatlağı genişliği) kaynak akımı ile büyük oranda artmaktadır.
- Çatlak oluşumunun ısı girişinden etkilendiği bulunmuştur; yüksek sıcaklık girişi kısmen ısıtılmış alanı genişletmektedir ve sonradan çatlakları geliştirmeye izin veren kaynak çekirdeği basıncını artırır. Sıvılaştırılmış çatlakların oluşumu, hem ısı girişi ile de orantılı olan kaynak dolgusu büyüklüğü ile ilişkilidir; bu demektir ki çatlaklar en küçük kaynak dolgusu çapına ulaşıncaya kadar IEB’de görülmez. Bu çalışmada kaynak dolgusu çapı 4.50 mm’nin altındaki bağlantılar çatlaksızdır; çap 4.50-5.00 mm aralığında çatlak başlangıç alanıdır ve çap 5.00 mm üzerinde iken tam gelişmiş çatlak oluşumu başlamaktadır.

Shafee ve ark. yaptıkları çalışmada, direnç nokta kaynağı proses parametrelerini kaynak kalitesini geliştirmek için Taguchi metodu ile optimize etmişlerdir. Yapılan çalışmalarda elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı parametrik seçilmiştir. Deneysel sonuçların doğruluğunu ispatlamak için güvenilirlik seviyesi verilen ANOVA tercih edilmiştir. Optimize edilen parametrelerin nokta kaynaklı bağlantının kesme ve çekme gerilmeleri üzerine etkileri araştırılmıştır [14].

Shen ve ark. yaptıkları çalışmada, kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımını hesaplamak için gerekli olan yapısal gerilmeleri çentik gerilimi dayanım teorisine göre hesaplayan bir metodoloji geliştirmişlerdir. Altı farklı ekstrapolasyon gerilmesi ve yapısal gerilme kaynaklı yapıların yorulma dayanımları çıkartılmıştır. Yorulma ömründe kalınlık boyunca gerilme gradyeninin etkisi düşünülerek, 1 mm gerilme ve sıfır nokta yapısal gerilmesi beklenen çatlak yayılma yolu kompleks kaynak bağlantılarının yorulma dayanımlarını değerlendirmek için hesaplanmıştır. Önerilen metodun geçerliliği literatürde rapor edilen beş kompleks kaynak bağlantısı için yorulma test sonuçları analiz edilerek doğrulanmıştır [15].

Wang ve ark. yaptıkları çalışmada, Q&P 980 çeliğinin nokta kaynaklı birleştirmelerinin yorulma davranışını incelemişlerdir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir [16]:

- Nokta kaynaklı Q&P980 çeliğinin yorulma davranışı ve kırılma modları DP780 çeliğinkilerle karşılaştırılmıştır.
- Kaynak çekirdeği ve ana metalin sertlik değerleri sırasıyla 497 ve 334 HV'dir. Kaynak çekirdeği ve IEB sertlik değerleri martenzit yapı sayesinde ana malzemeden daha yüksektir.
- Çekme-kesme ve çapraz-çekme numunelerinin maksimum çekme kuvveti sırasıyla  $23.7 \pm 0.6$  kN ve  $10.8 \pm 0.5$  kN'dur. Çekme-kesme ve çapraz-çekme numuneleri için çekme testlerinin hata modları sırasıyla ara yüzey hatası ve çekilme hatasıdır.
- Şartlı yorulma limit yükleri ( $10^7$  çevrim) çekme-kesme ve çapraz-germe numuneleri için sırasıyla 1300 N ve 280 N'dur.

Xu ve ark. yaptıkları çalışmada, DP600 ve DP980 ana malzemeleri için bindirmeli (lap-shear) nokta kaynaklı bağlantıların hata analizlerini hesaplamışlardır. Hatalar analitik elastik ve elasto-plastik sonsuz eleman analizine göre hesaplanmıştır. Elasto plastik sonsuz eleman analizi ilk olarak belverme ya da incelmeyi analiz etmek için yapılmıştır. Maksimum eş değer plastik şekil değiştirme ya da başlangıç belverme hatası noktalarının açısız konumları bulunmuştur. Bunlar nokta kaynağı dolgusu ile çelik sac tabaka için dört açısız aralıkta konumlandırılmıştır. Türetmiş gerilme dağılımları hata davranışlarını öngörmeye ve nokta kaynağı ile bağlanmış çoğu mühendislik yapılarında zarar gelişimini değerlendirmeye izin vermektedir [17].

Zhang ve ark. yaptıkları çalışmada, DP780/DP600 çift fazlı çelik bağlantıların farklı kalınlıktaki direnç nokta kaynaklarının mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir [18]:

- Ergimiş bölgenin (FZ) mikro yapısı geniş kafes martenzit ve ferrittir. Tane boyutu ve martenzit hacmi ana metal, IEB ve FZ'ye bağlı olarak artar. Alaşımli elemanların dağılımı birleştirme alanında düzgün karakterdedir.
- Ergimiş bölgenin (FZ) sertliği ana metalden önemli ölçüde daha yüksektir. Kritik altı IEB'de ana metale yakın yerde martenzit yapının temperlenmesinden kaynaklanan yumuşamış bölümler mevcuttur.
- Yarı statik çekme-kesme testi boyunca, ara yüzey ve çekilme hatalarından DP780 ve DP600'de modlar belirlenmiştir.
- Bu çalışmada hata modları ana olarak birleştirme alanı büyüklüğüne bağlıdır ve taşıma ile hata modları arasında 6.6 mm'lik bir kritik ergimiş bölge (FZ) mevcuttur.

Zhang ve ark. yaptıkları çalışmada, çift fazlı direnç nokta kaynağı bağlantılarının farklı kalınlıktaki makro karakteristiklerini ergime oranı, çentik çapı, kaynak çekirdek çapı ve çentik çapı bakımından incelemişlerdir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir [19]:

- Kaynak bağlantı bölgesinde DP600 tarafındaki ergime oranı, DP780 tarafına kıyasla daha yüksektir. Bunun sebebi kaynak dolgusunun DP600 tarafına doğru hareket etmesidir.
- Kaynak bağlantı bölgesinde DP600 tarafındaki elektronun malzemeye dalma derinliği (girinti) oranı, DP780 tarafına kıyasla daha düşüktür. Bunun sebebi daha büyük elektriksel iletkenlik ve daha fazla ısı girişidir.
- Aynı proses parametreleri ile DP780/DP600 kaynaklı bağlantıları, DP600/DP780 kaynak bağlantılarından daha büyük çekirdek çapına sahiptir. Her iki taraftaki girinti çapı elektrot kuvvetine ve geometrisine bağlıdır.

Yapılan literatür araştırması sonucunda elektrik direnç nokta kaynağının kalitesini ve mukavemetini etkileyen proses parametreleri ortaya çıkarılmıştır. Literatürdeki normlarda ve standartlarda uygulamada kullanılan bir çok çelik sac malzemenin nokta kaynak ile birleştirilmesi için optimum çekirdek çapını elde edecek kaynak proses parametreleri verilmektedir. Bu tez kapsamında kullanılan TWIP 1000 çeliği için literatürde optimum kaynak çekirdek çapını veren kaynak proses parametreleri



belirlenmemiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar devam etmekte olup, bu tez çalışması bu alana da katkı sağlayacaktır. Ayrıca bu tez çalışmasında, araç hafifletme çalışmaları kapsamında kullanılmaya başlanan yüksek mukavetmeli TWIP 1000 çeliğinin nokta kaynaklı birleştirmelerinin yorulma dayanımları da hesaplanmış olacaktır.

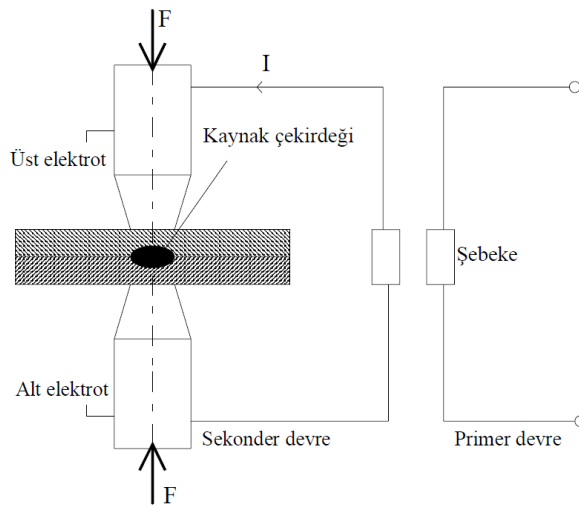


## BÖLÜM 2. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

### 2.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Yöntemi

Direnç nokta kaynağı ilk kez 1880 yılında Elihu Thomson tarafından uygulanmıştır [20]. Zaman içerisinde yaygınlaşarak otomotiv sektörü için vazgeçilmez bir birleştirme yöntemi haline gelmiştir. Günümüzde bir araç gövdesinde ortalama 5000-6000 adet direnç nokta kaynağı bulunmaktadır.

Elektrik nokta direnç kaynağı, birleştirilecek iş parçalarının, elektrodlar üzerinden geçirilen elektrik akımının ısıya dönüşmesi sonucu bir veya daha fazla noktadan birleştirilmesi işlemidir. Birleştirilecek parçaların temas yüzeyinde, kaynak süresince uygulanan yüksek şiddetli akım ile eriyen kaynak çekirdeği oluşturulur. Elektrik akımı ortadan kaldırıldığında, ısınan metal hızlı bir şekilde soğur ve katılaşır [21]. Şekil 2.1.'de elektrik direnç nokta kaynağının proses şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Elektrik nokta direnç kaynağı ile birleştirme [22]

## 2.2. Kaynak Çevrimi

Optimum bir direnç nokta kaynağı için kaynak çevrim planlamasının çok iyi hesaplanması gerekmektedir. Genel olarak kaynak çevrimi 4 ana safhadan oluşur. Bunlar; yaklaşma ve sıkma zamanı, kaynak zamanı, tutma zamanı, ayrılma zamanıdır. Bu safhaların süreleri periyot ile ifade edilir. Bir periyot 1/50 saniyeye denk gelmektedir (Frekans 50 Hz) [23, 24, 25].

Yaklaşma ve sıkma zamanı: Elektrotların karşılıklı iki iş parçasını sıkmaları için geçen süredir.

Kaynak zamanı: İş parçalarına düşük gerilim, yüksek akım uygulanan süredir.

Tutma zamanı: Kaynak metalinin soğuyarak katılaşması ve bağlantının tam olarak meydana gelmesi için geçen süredir.

Ayrılma zamanı: Bir sonraki çevrimdeki basma zamanının başlangıcına kadar geçen, elektrotların iş parçasıyla temasta olmadığı süredir.

## 2.3. Kaynak Esnasında Oluşan Isı

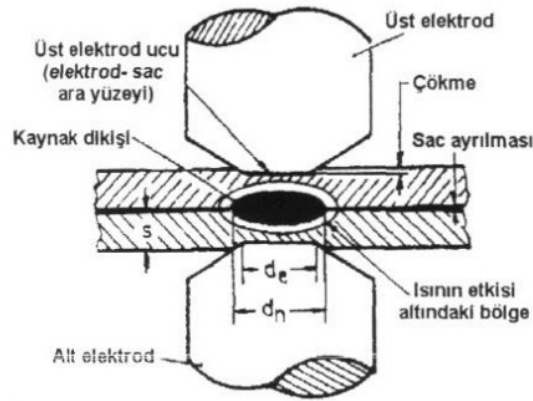
Elektrik direnç nokta kaynağı makinasının çevrimi, kaynak edilecek iş parçaları da dahil olmak üzere bir seri dirençten meydana gelmektedir. Elektrik akım şiddeti bu dirençlerin toplamıdır. Devre üzerindeki elektrik akımı her noktada ayndır fakat o noktada meydana gelen ısı o noktanın direnci ile orantılıdır. Kaynak esnasında iş parçasında ve elektrotlarda meydana gelen ısı ve sıcaklık dağılımı Şekil 2.2.'de gösterilmektedir. İki parça metalin direnç nokta kaynağında 7 adet seri bağlanmış direnç bulunmaktadır [22, 26].



## 2.4. Kaynak Bölgesinin Analizi

### 2.4.1. Çekirdek oluşumu

Elektrik direnç nokta kaynağında çekirdek Joule yasasına göre oluşmaktadır. Kaynak esnasında elektrik akımına karşı gösterilen direnç (kullanılan malzeme dirençleri, temas dirençleri) sonucunda Şekil 2.3.'de gösterilen kaynak bölgesi ve çekirdek meydana gelir [28].



Şekil 2.3. Elektrik nokta direnç kaynağında dikiş geometrisi [29]

### 2.4.2. Isıdan etkilenen bölge (IEB)

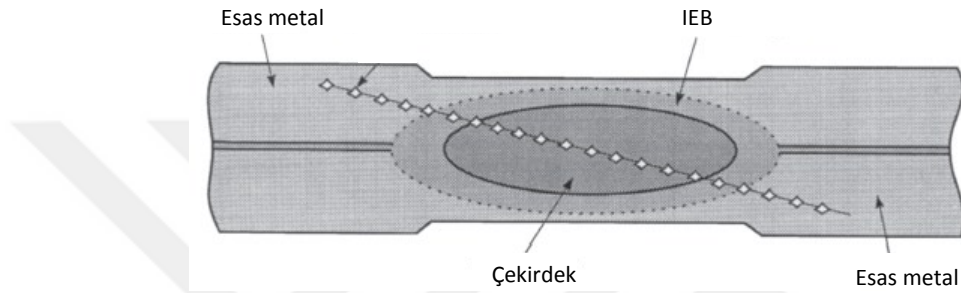
Şekil 2.4.'de gösterilen IEB'in yapısı ve genişliği, direnç nokta kaynağının ısı çevrimine ve malzemenin iç yapısını bağlıdır. Çelik malzemeler östenit sıcaklığına kadar ısıtıldığında östenit taneleri oluşur ve büyür. Sıcaklık artışı tane büyümesi kolaylaştırmaktadır. IEB metalürjik açıdan üç bölgeden oluşmaktadır [30].

**Süper kritik bölge:** Kaynak çekirdeğine bitişik, tane irileşmesinin görüldüğü bölgedir.

**Orta bölge:** Bu bölgede kısmi dönüşüm gözlenmektedir. Maksimum sıcaklık süper kritik bölgeye göre daha düşüktür. Esas metalde görülmeyen bazı fazlar bu bölgede ortaya çıkabilir.

Kritik altı bölge: Bu bölgede herhangi bir dönüşüm gözlemlenmez. Bazı durumlarda çok ince çökelti meydana gelebilmektedir.

Isıdan etkilenen bölgenin yapısını etkileyen parametrelerden bir tanesi de metalik olmayan oksit ve sülfürlerdir. Dönüşüme uğrayan östenit tanecikleri, ferrit çekirdeklenmesini sağlayıp, martenzit veya beynite dönüşecek östenit miktarını azaltarak IEB'in düşük sertlik değerine sahip olmasına sebep olmaktadır [28].



Şekil 2.4. Isıdan etkilenen bölge (IEB) [1]

## 2.5. Kaynak Kalitesini Etkileyen Parametreler

Kaynak işlemi esnasında kontrol edilen işlem parametrelerinin doğru planlanması uygun bir kaynak kalitesi elde edilmesi için son derece önemlidir. Kaynak sonunda elde edilecek optimum çekirdek çapı, bağlantı mukavemeti ve iç hataların olmaması için aşağıdaki parametrelerin doğru seçilmesi gerekmektedir.

- Kaynak akımı
- Kaynak süresi
- Elektrod kuvveti
- İş parçası malzemesi
- Kullanılan elektrodlar

### 2.5.1. Kaynak akımı

Bilindiği gibi elektrik nokta direnç kaynağında oluşan ısı;  $Q = 0,239 * I^2 * R * t$  formülü ile ifade edilmektedir. Bu ısının oluşmasında en önemli parametrelerden biri de akımdır. Bu yüzden istenen kriterlere uygun bir kaynak elde etmek için akım değerini iyi tayin etmek gerekmektedir. Çeliğin ısıl iletimi yaklaşık olarak bakırın ısıl iletiminin % 12'si kadardır. Bu sebeple, çelik malzemeler bakır esaslı elektrotlarla yeterli kaynak akımı verilerek kaynak edilirse, iş parçalarının arayüzeyinde oluşan ısı, kaynak bölgesinden, elektrod uçlarında oluşan ısının su soğutmalı elektrotlara iletilmesine göre, daha yavaş uzaklaşmaktadır. Bu sayede, önce iş parçalarının arayüzeyi birleşme sıcaklığına ulaşır ve kaynak bu bölgede oluşur [23, 31].

### 2.5.2. Kaynak süresi

Elektrik nokta direnç kaynağında oluşan ısı, Joule yasasına göre ( $Q = 0,239 * I^2 * R * t$ ) kaynak süresi, ile doğru orantılıdır. Bu süre çok kısa tutulduğunda bağlantı gerçekleşmeyebilir, yani yeterli çekirdek çapı oluşmayabilir, uzun tutulduğunda ise ergimiş bölge genişler, aradan malzeme fışkırabilir, derin izler oluşur. Optimum çekirdek çapının oluşması için gereken süre, kaynak akımı ne kadar arttırılsa da, sınırlı ölçüde kısaltılabilmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe zaman kısıtı nedeniyle kısa süreli kaynak tekniği çok gelişmiştir. Önceki yıllarda çok ince levhalar için bile birkaç saniye olan kaynak süresi, robotik uygulamalar ve akım devrelerindeki gelişmeler üzerine birkaç periyoda kadar düşürülmüştür. Ayrıca kaynak süresi azaldıkça ısı kayıpları da azaldığından prosesin ısıl verimliliği artmaktadır [31, 32].

### 2.5.3. Elektrod kuvveti

Elektrod kuvveti, kaynak edilecek iş parçalarına kaynak çevrimi boyunca uygulanan kuvvettir. Doğru bir kaynak konfigürasyonunda iş parçalarının bir arada tutulması gerekmektedir. Bu bir arada tutma da elektrod baskısıyla sağlanmaktadır. Elektrod kuvveti, iş metalinin temas direncini azaltacağı ve kaynak bölgesindeki iş

parçalarının yüzeyleri arasında açığa çıkan toplam ısıyı düşüreceği için çok yüksek olmamalıdır. İlaveten, yüksek elektrod kuvveti, kaynak edilen parçalarda istenmeyen distorsiyonlara neden olmaktadır [23, 33]. Elektrod kuvveti, P, malzemenin türüne ve sac levha kalınlığına (s) bağlı olarak çeşitli ampirik eşitliklerle hesaplanabilmektedir. Bu ampirik ifadeler şu şekildedir; Alaşımız çelikler için  $P=2*s$ , yüksek alaşımlı çelikler için  $P=3.5*s$ , alüminyum için  $P=2.5*s$  [34].

#### **2.5.4. İş parçası malzemesi**

Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmadan önce iş parçasının malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Malzemenin ısı ve elektrik iletkenliği, özgül ısı, ergime noktası, yoğunluk gibi özellikleri kaynak edilebilirliğini direkt olarak etkileyen parametrelerdir. Metallerin kimyasal bileşimindeki katkı maddelerinin de kaynak kabiliyetine etkisi bulunmaktadır. Fosfor ve kükürt genellikle çekirdek arayüzeyinde yırtılmayı ilerletici etki yapmaktadır. Metalin içersindeki titanium oranını arttırmak genellikle çekirdek çapını, çekme-makaslama dayanımını ve kaynak akım sınırını düşürmektedir [31, 35, 36].

#### **2.5.5. Kullanılan elektrodlar**

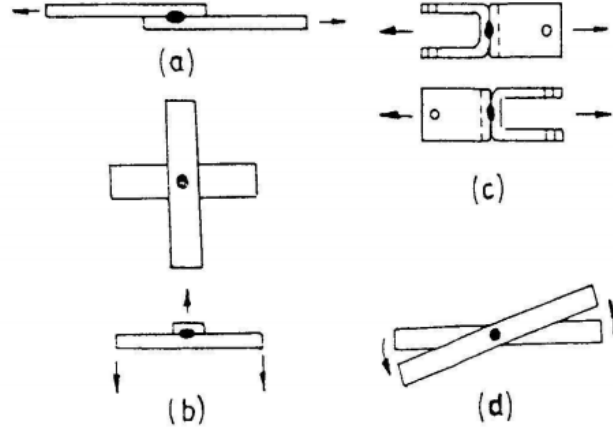
Elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan elektrodların kaynak sırasında ısınmayı minimumda tutabilmek için yüksek elektrik iletkenliğine ve düşük temas direncine sahip olmaları gerekmektedir. Ayrıca iş parçası ile temas ettikleri alanlardaki ısının uzaklaştırılabilmesi için ısı iletkenlikleri yüksek olmalıdır. Elektrodlar tekrarlı yükler altında kolayca deformasyona uğramayacak kadar mukavemetli olmalıdır. Elektrodun sertliği arttıkça ısı ve elektrik iletkenliği azalmaktadır. Dolayısıyla elektrod seçiminde tüm bu özellikler göz önünde bulundurulmalıdır [22].

#### **2.6. Kaynak Noktasının Mukavemeti**

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen bağlantıların statik mukavemetini belirlemek için dört farklı test yapılabilmektedir. Bu testler; (a) çekme-makaslama

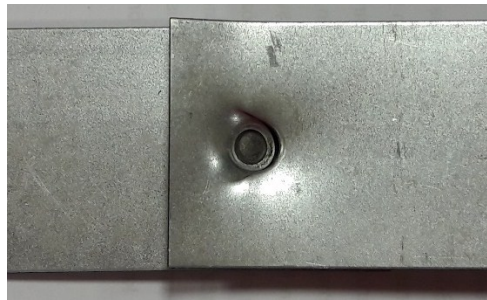


testi, (b) Haç biçimi çekme testi, (c) U biçimi çekme testi, (d) Burulma testi olmak üzere Şekil 2.5.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Direnç nokta kaynağı statik mukavemet testleri [22, 34]

Çekme-makaslama testi sonucunda yeterli bir kaynak mukavemetine sahip bağlantı düğümlenme yoluyla hasara uğramaktadır. Bu hasar tipinde Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi kaynak noktası levhanın birinden sıyrılıp, bir delik bırakarak diğer levhada kalmaktadır. Yetersiz bir kaynak dikişinde ise hasar makaslama yoluyla meydana gelmektedir. Bu hasar tipinde ise Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi yırtılma tipi bir kopma söz konusudur [37].



Şekil 2.6. Direnç nokta kaynağında düğümlenme hasarı



Şekil 2.7. Direnç nokta kaynağında makaslama hasarı



## **BÖLÜM 3. YORULMA**

### **3.1. Metallerde Yorulma Olayı**

Tekrarlı yüklere maruz kalan makina parçalarında veya mekanik elamanlarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen belirli bir çevrim sayısına ulaşıldığında çatlak oluşumu ve bunun devamında kopma olayı meydana gelir. Bu olaya yorulma adı verilmektedir. Mühendislik malzemeleri genellikle dalgalı ve periyodik yükler altında çalışmaktadırlar. Türbülanslı havanın uçak kantlarına etkisi, pistonlu motorların bağlantı çubuklarının yaprak yaylar üzerine etkisi gibi mühendislik deformasyon sebeplerinin en yaygını yorulmadır. Yorulma hasarında kırılma şekli her zaman gevrek kırılmadır. Çünkü uygulanan yükler, malzeme sünek davranış gösterse bile akma gerilmesinden genellikle daha düşüktür [38].

Sadece çevreden gelen mekanik kuvvetler değil, ısı gerilmeler de yorulmaya neden olabilmektedir. Yorulma olayında çatlak başlangıcı, yüzeydeki bir pürüzde, çentikte veya ani kesit değişimlerinin olduğu bölgededir. Bunların dışında parça geometrisi, metalürjik etkiler, gerilme gradyanı, sıcaklık, kaynak bölgesinin yapısı da yorulmaya etki eden faktörler arasındadır [39].

### **3.2. Yorulma Mekanizması**

Yorulma sonunda parçada kırılmanın ne şekilde meydana geldiğini anlamak için çeşitli yorulma mekanizması teorileri ortaya atılmıştır. Metaller tekrarlı yükler altında aynı yönlü kristalografik yönlerde kayarlar. Kayma hatları genellikle ilk bir kaç bin tekrar sayısında ortaya çıkmaktadır. Kayma bantları bir müddet sonra yüzeyde pürüz ve çentik oluşturmaktadırlar. Bu bölgelerdeki gerilme yoğunlaşması

sonucunda yorulma başlamaktadır. Wood'un mikro deformasyon teorisine göre yorulma iki aşamada meydana gelmektedir. Birinci aşama ancak elektron mikroskobu ile görülebilen çatlakların oluştuğu aşamadır. İkinci aşamada ise artık çatlak oluşmuştur. Çatlak ilk duruma göre daha hızlı ilerlemektedir. Malzemede plastisite yoktur [40, 41].

### 3.3. Yorulma Kırılması

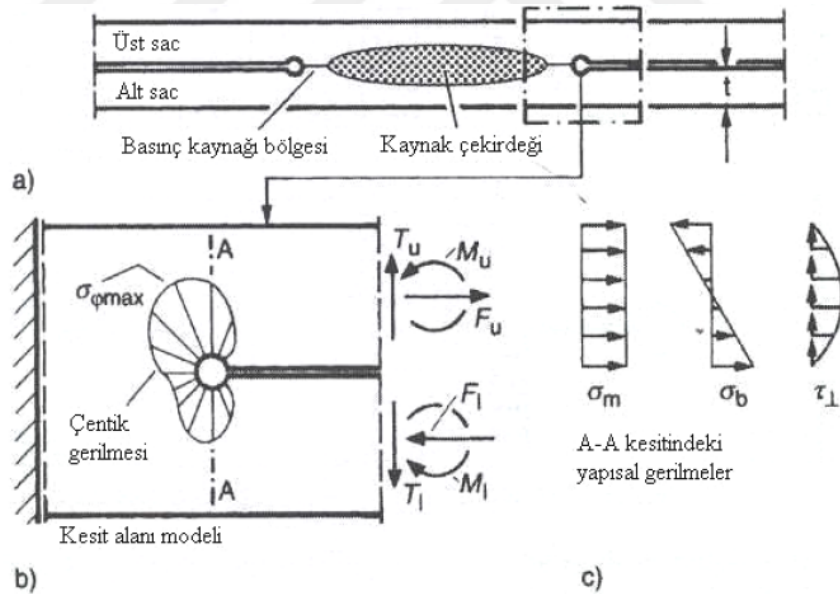
Lokal gerilme yığılmaları; iç yapı hataları, parka geometrisi, yüzey kalitesi, korozif etkiler, ön gerilme gibi nedenler ile oluşmaktadır. Yorulma çatlakları gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde başlamaktadır. Makine elemanlarının rezonans titreşimlerine ve aşırı yüklere dayanacak şekilde tasarlanması yorulma çatlaklarına neden olabilmektedir. Ayrıca montaj hataları ve kaynak bölgesinin iyi tasarlanmamış olması yorulma çatlaklarının oluşmasına neden olan etkilere sahiptir. Aşırı zorlanan bir bölgede bir çatlak başlaması durumunda yorulma kırılmasının meydana gelmesi önlenemez. Çatlak ilerleyerek belirli bir çevrim sayısına ulaştığında kırılma meydana gelmektedir. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi yaratarak, yüksek gerilme yığılmaları çatlakların hızla ilerlemesine ve büyümesine sebep olmaktadır. Yorulma çatlakları ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığı yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Bazı durumlarda, yorulma çatlakları kesitin tam olarak ayrılmasına sebep olmaz. Çünkü çatlak oluşumu ile parça daha az zorlanır ve gerilmenin üst sınırı malzemenin yorulma dayanım değerinin altında kalır. Bu durumda çatlak çevresinde gerilme durumunun değişmesi ile yerel bir malzeme pekleşmesi olur ve çatlak ilerlemesi bu sayede durabilmektedir [22, 42].

### 3.4. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma

Kaynaklı bağlantılar, kaynağın geometrik ve metalürjik etkilerinden dolayı yorulma hasarı oluşmasına yatkındır. Tasarım aşamasında kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının öngörülmesi son derece önemlidir. Kaynaklı bağlantılarda yorulma çatlakları genellikle kaynak uçlarında başlar ve ilerler [43, 44]. Literatüre bakıldığında direnç nokta kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımı ve yorulma

ömrünü tespit etmeye çalışan birçok deneysel ve nümerik çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalarda kaynak edilen malzemeler genellikle dual fazlı çelikler, galvenizli ve ostenitik paslanmaz çeliklerdir. Dual fazlı çeliklerin, yeni nesil yüksek mukavemetli çeliklerle (TWIP 1000 gibi) birleştirilerek yorulma davranışlarının araştırılması konusunda yapılan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

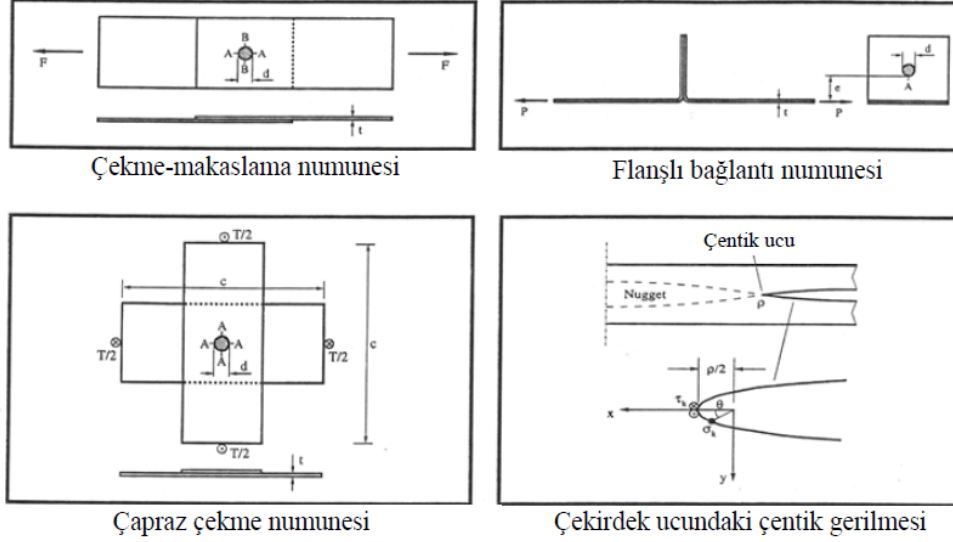
Direnç nokta kaynağının uç kısmındaki elastik çentik gerilmeleri, yorulma çatlakının başlangıcını oluşturmaktadır. Uzun ömürlü yorulmada mikro yapısal, kısa ömürlü yorulmada ise makro yapısal (elastic-plastik) hipotezlerden yararlanılmaktadır [45]. Direnç nokta kaynağında Şekil 3.1.'de görülebileceği gibi anahtar deliği geometrisine benzeyen bir çentik kabulü yapılmaktadır. Kaynak bölgesinde kabul edilen bu çentik çok küçük olduğu için original çentik gerilmelerinden yorulma çentik gerilmelerinin elde edilmesinde mikro yapısal hipotezler kullanılmaktadır. Uygulamada çentik yarıçapı  $\rho = 0,1 \text{ mm}$  olacak şekilde kabul edilmektedir.



Şekil 3.1. Direnç nokta kaynağındaki çentik kabulü ve gerilme yığılması [45]

Direnç nokta kaynaklı bağlantılarda Şekil 3.2.'de görülebileceği gibi temel yükleme tipleri mevcuttur. Bunlar; çekme makaslama, çapraz çekme ve flanşlı bağlantılardır. Nokta kaynaklı bağlantıların gerilme şiddet faktörleri ve bunların çentik ucundaki gerilmeleri, doğrudan uygulanan yüke ve bağlantının geometrisine bağlıdır. Bu temel

yüklemeler tipleri esas alınarak, karmaşık geometrilere ve yüklemeler durumlarına sahip bağlantıların da gerilme şiddet faktörleri ve çentik gerilmeleri tespit edilebilmektedir [46].



Şekil 3.2. Nokta kaynağındaki temel yüklemeler tipleri [46]

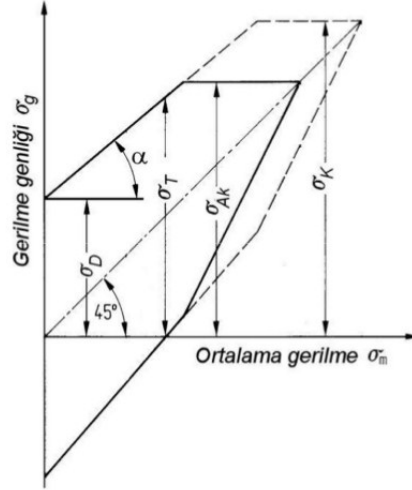
Kaynaklı bağlantılarda yorulma dayanımını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Korozif ortam yorulma dayanımını %30-40 oranında düşürmektedir [47].

### 3.5. Yorulmaya Etki Eden Faktörler

#### 3.5.1. Ortalama gerilme

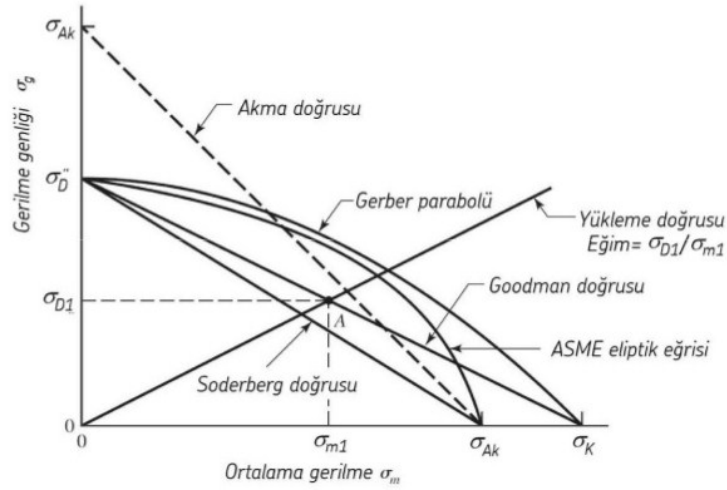
Literatürdeki farklı malzemelere ait yorulma dayanımını veren verilerin büyük bir kısmı ortalama gerilmenin sıfır olduğu değişken yorulma zorlaması için belirlenmiş değerlerdir. Ancak malzemelerin gerçekteki yorulma davranışları ideal durumdan farklıdır. İşletme şartlarında malzemelere gerilme genliğinin yanında ortalama gerilme de etki etmektedir. Ortalama gerilmenin olduğu durumda malzemenin yorulma dayanımı iki farklı yöntem ile hesaplanabilmektedir [48]:

- 1) Malzemenin yapısına ve zorlanma şekline uygun Smith diyagramı ile indirgenmiş yorulma dayanımı tespit edilebilmektedir. Fiziksel yorulma deneyleri sonucu elde edilen Şekil 3.3.'te gösterilen Smith diyagramlarını sık kullanılan malzemeler için kolaylıkla bulmak mümkündür.



Şekil 3.3. Smith diyagramı [49]

- 2) Malzemenin akma ve çekme dayanımını esas alarak bazı matematiksel ifadeler ve grafiksel yöntemler kullanarak da indirgenmiş yorulma dayanımı tespit edilebilmektedir. Bunun için kullanılan yöntemler Soderberg doğrusu, Goodman doğrusu ve Gerber parabolüdür. Bu eğriler Şekil 3.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Gerber parabolü, goodman ve soderberg doğrusu [49]

### 3.5.2. Parça büyüklüğü

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde parça büyüklüğü arttıkça yorulma dayanımının düştüğü tespit edilmektedir. Bunun sebebi, parçanın boyutlarının artmasıyla dış yüzey alanı artmakta ve çatlak ilerlemesi kolaylaşmaktadır. Diğer bir sebep ise parçanın boyutsal büyümeyle birlikte daha fazla iç yapı hatası ve gerilme yığılmasına sahip olmasıdır [40].

### 3.5.3. Metalurjik faktörler

Isıl işlem, haddeleme, ve ekstrüzyon işlemleri sonucunda metallerin tane boyutu ve yapısı değişmektedir. İnce taneli yapıların yorulma dayanımları artmaktadır. Malzeminin kimyasal bileşiminin de yorulma dayanımı üzerine etkileri mevcuttur. Çelikteki karbon miktarı arttıkça yorulma mukavemeti artar. Kükürt ise metal olmayan inklüzyonlar meydana getirdiği için yorulma dayanımını düşürmektedir [50]. Malzeme iç yapısının fazlar ve deformasyon bölgeleri için düzensizlik göstermesi yorulma dayanımını azaltıcı yönde etki yapmaktadır. Özellikle karbürlerin tane sınırına çökelmiş olması ve artan karbür tanesi büyüklüğü yorulma dayanımını olumsuz etkileyen faktörlerdendir. Malzemenin çekme mukavemeti yorulma dayanımı ile doğrudan ilgilidir. Demir esaslı metal ve alaşımlar için yorulma



dayanımının çekme dayanımına oranı %50 civarında iken, demir dışı metal ve alaşımlar için bu oran %35 mertebelerindedir [48].

#### **3.5.4. Yüzey işlemleri**

Talaş kaldırma, haddeleme, ekstrüzyon gibi imalat proseslerinden sonra parça yüzeyinde yüzey pürüzlülüğü oluşmaktadır. Yüzeydeki bu pürüzler çentik etkisi oluşturacağı için malzemenin yorulma dayanımını düşürmektedir. Çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri (karbürleme, nitrürleme, vb.) yorulma ömrünü arttırmaktadır. Parça yüzeyinde tasarımdan kaynaklanan girinti, çıkıntı, keskin köşe yorulma dayanımını azaltmaktadır [38].

#### **3.5.5. Sıcaklık**

Malzemelerin yorulma dayanımı sıcaklığın düşmesiyle artmaktadır. Oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda, sıcaklık arttıkça yorulma dayanımı düşmektedir. Sıcaklık 400 °C'nin üzerine çıktığında yorulma yerine sürünmeden bahsedilmektedir. Yorulma kırılması tane içi kırılması şeklinde gerçekleşir iken, sürünme kırılması ise tane sınırı kırılması şeklinde olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda yorulmaya yol açan gerilmelerin mekanik yüklerden kaynaklanması gerekmez; değişen ısı gerilmeleri de çelikte yorulmaya sebep olabilir. Bu tür yorulmaya, ısı yorulma adı verilmektedir [51].

#### **3.5.6. Gerilme gradyanı**

Gerilme yığılması parçada delik ve çentiklerin olduğu bölgeler ile ani kesit daralmasının görüldüğü noktalarda meydana gelebilmektedir. Gerilme gradyanı, gerilmenin parça kesitinde değişimini ifade etmektedir. Gerilme yığılma bölgelerinin fazlalığı yorulma çatlağı oluşum zamanını kısaltmaktadır. Çekme ve basma yorulma dayanımlarında gerilme gradyanı açısından parçanın boyutlarının herhangi bir etkisi yoktur.

### 3.5.7. Artık gerilmeler

Makine parçalarının üretim aşamasında üzerinde oluşan artık gerilmeler, çalışma esnasında oluşan gerilmeler ile aynı yönlü ise parçanın yorulma ömrü azalmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda yorulması beklenen iş parçaları üzerinde işletme gerilmeleri ile ters yönde bir artık gerilme oluşturularak yorulma ömürlerinde ciddi iyileşmeler sağlanabilmektedir. Bu işleme bilye püskürtme adı verilmektedir [48].

## 3.6. Yorulma Deneyi

### 3.6.1. Kavramlar

Çevrim (Tekrar Sayısı): Gerilme-zaman grafiğinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük bölümüne çevrim denilmektedir.

$\sigma_{maks}$ , maksimum gerilme: gerilme periyodundaki maksimum gerilme,

$\sigma_{min}$ , minimum gerilme: gerilme periyodundaki minimum gerilme,

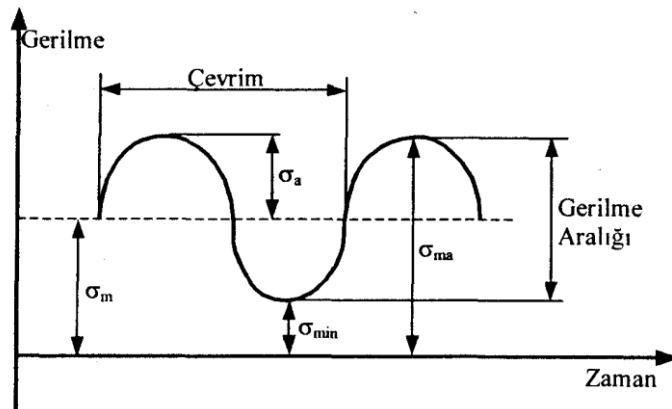
$\sigma_m$ , ortalama gerilme: Minimum ve maksimum gerilmenin aritmetik ortalamasıdır.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2}$$

$\sigma_a$ , gerilme genliği: Minimum ve maksimum gerilmenin cebirsel farkının yarısıdır.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2}$$

Şekil 3.5.'te yorulma deneyi ile ilgili gerilme-zaman grafiği gösterilmektedir.



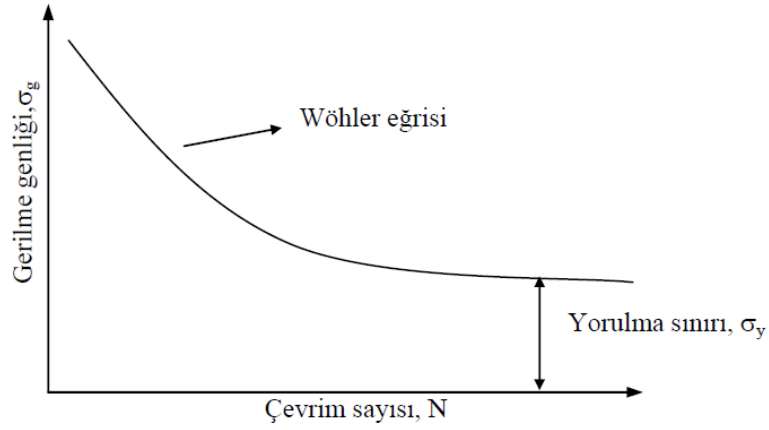
Şekil 3.5. Periyodik yükleme [38]

Çevrim sayısı,  $n$ , deney sırasında uygulanan period sayısı, yorulma periyot sayısı,  $N$ , malzemenin kopma esnasındaki periyot sayısı, yorulma dayanımı,  $\sigma_N$ , gerilme altında deney numunesinin  $N$  periyodu süresince dayanabildiği gerilme değeri, yorulma sınırı,  $\sigma_D$ , istatistik olarak belirlenen yükleme koşullarında numunenin sonsuz sayıdaki periyoda dayanabileceği maksimum gerilme, gerilme oranı,  $R$ , bir periyottaki minimum gerilmenin, maksimum gerilmeye oranıdır [38].

### 3.6.2. S-N eğrileri

Yorulma dayanımı Wöhler metodu ile hesaplanabilmektedir. Bu metotta, standartlara uygun olarak hazırlanmış deney numuneleri ardışık şekilde ve farklı yükleme koşullarında zorlanarak kırılmanın gerçekleştiği çevrim sayıları belirlenmektedir. Bir seride genellikle 6 – 10 adet numune kullanılmaktadır. Tek kademeli yorulma deneyinde, bir deney numunesi için başlangıçta seçilen yorulma zorlanması deney sırasında değiştirilmez. Çok kademeli yorulma deneylerinde ise, yorulma zorlaması sistematik olarak değiştirilmektedir. Her bir zorlama kademesi belirli çevrim sayıları arasında sabit kalır; zorlamaların sırası istenildiği gibi artırılıp azaltılabilmektedir [22].

Wöhler yönteminde bir deney serisinde tüm numuneler için ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  veya alt gerilme  $\sigma_{alt}$  sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği  $\sigma_g$  seçilmektedir. İlk deney numunesi akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek derecede zorlanmaktadır. Daha sonraki deney numunelerine uygulanan zorlama kademeli olarak düşürülerek kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanmaktadır. Bir grup deney sonunda uygulanan gerilme değerleri ve kırılmanın meydana geldiği tekrar sayılarının bir eğri olarak çizilmesi sonucunda Şekil 3.6.'da gösterilen Wöhler eğrisi (S-N eğrisi) elde edilmektedir [42].



Şekil 3.6. Wöhler eğrisi [42]

Wöhler grafiğinde çevrim sayısı logaritmik, gerilme aralığı ise metrik olarak çizilmektedir.  $\sigma_y$  olarak gösterilen yorulma sınırı, sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmediği en büyük gerilmedir. Belirli bir sınır çevrim sayısına,  $N_s$ , ulaşıldığında eğri sonsuz çevrim sayısına yakınsıyor olarak kabul edilebilmektedir. Sınır çevrim sayısı oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda çelikler için  $10 \cdot 10^6$ , ağır ve hafif metallerle yüksek sıcaklıklardaki çelikler için  $10 \cdot 10^6$  olarak kabul edilebilmektedir. Deney süresinin kısaltılması amacıyla, çelik için  $1 \cdot 10^6$  ve hafif metaller için  $10 \cdot 10^6 \dots 50 \cdot 10^6$  sınır çevrim sayıları da kullanılmaktadır [42].

### 3.6.3. Deney cihazları

Deney numunesine uyguladıkları gerilme türüne göre yorulma cihazları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [52]:

- Aksenal çekme-basma uygulayan
- Burulma gerilmesi uygulayan
- Bileşik gerilme uygulayan
- Eğme gerilmesi uygulayan (Düzlemsel eğme gerilmesi-dönen eğme gerilmesi)

Bu tez çalışması kapsamında yorulma testleri INSTRON 8801 marka 100 kN'luk servo hidrolik yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7.'de gösterilen cihaz aksenal çekme-basma uygulamaktadır.



Şekil 3.7. Instron 8801 (100 kN kapasiteli) yorulma test cihazı

## **BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **4.1. Çalışmanın Planlanması**

Otomotiv sektöründe araç hafifletme çalışmaları kapsamında yeni nesil çeliklerin kullanımı oldukça yaygın bir uygulamadır. Bu yeni nesil çeliklerin gövde imalatında kullanımı, kendi aralarında ve diğer gövde sacları ile kaynaklı birleştirilmelerinde bir takım kritiklikleri beraberinde getirmektedir. Literatüre bakıldığında DP 450, DP 600, FeP04, FEE 340, TRIP 800, DP 800 gibi bir çok araç gövde sacının nokta kaynağı ile ilgili yapılmış çalışma bulunmaktadır. Standart ve normlarda bu malzemelerin elektrik nokta direnç kaynağı ile birleştirilmelerinde optimum çekirdek çapına erişmek için gerekli kaynak parametreleri önerilmektedir. Ancak bu tez çalışmasında da kullanılan TWIP 1000 sacının ve yeni geliştirilen bazı çelik sacların optimum kaynak parametreleri standart ve normlarda yer almamaktadır. Bu yeni nesil sacların geliştirilme aşamasında kaynak edilebilirlik çalışmaları yapılmakla birlikte, özellikle üretim adetlerinin çok yüksek olduğu ve araç üzerinde yaklaşık 3000-6000 nokta kaynağın yer aldığı otomotiv sektöründe nokta kaynak parametrelerinin optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bu yeni nesil sacların nokta kaynaklı birleştirmelerinin yorulma dayanımlarının belirlenmesi son derece önemlidir.

Çalışma kapsamında hali hazırda araç gövde imalatında kullanılan DP 800 sacı ile mevcutta çarpma traversinde kullanılan ve kullanımının yaygınlaşması beklenen TWIP 1000 sacının nokta kaynaklı birleştirmeleri üzerinde çalışılmıştır. Kaynak parametrelerinin bağlantının nokta kaynak davranışına ve yorulma dayanımına etkisi araştırılmıştır.

Kaynak parametrelerinden kaynak akımı belirli aralıklarla değiştirilerek her bir deney grubu için 4-5-6 mm kaynak çekirdek çapı elde edilmiştir. Böylece çekirdek çapının kaynaklı bağlantının mekanik, metalurjik ve yorulma dayanımı üzerine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Nokta kaynaklı bağlantıda meydana gelen iç yapı değişikliklerini tespit etmek için esas metal, IEB (Isıdan etkilenen bölge), kaynak metali ışık mikroskobu ile gözlemlenmiştir. Bu bölgelerdeki sertlik değerlerini incelemek için mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Nokta kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla çekme-makaslama testi yapılmıştır. Bu mekanik özelliklerden yola çıkarak, yorulma testleri gerçekleştirilmiş ve bağlantıların S-N eğrileri çıkartılmıştır.

## 4.2. Malzeme

Bu çalışmada DP 800 ve TWIP 1000 sacları kullanılarak 4 farklı nokta kaynaklı bağlantı oluşturulmuştur. Bunlar; DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm), DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm), TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm), TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm). Bu bağlantılar oluşturulurken kaynak akımı belirli aralıklarda değiştirilmiş, diğer tüm kaynak parametreleri sabit tutulmuştur.

### 4.2.1. Dual fazlı çelikler

Dual fazlı çelikler, ferritik ana yapı içerisinde martensitik adacıklar içeren bir mikro yapıya sahiptir. Çok yüksek enerji emme ve iyi şekillendirilebilme özelliğine sahiptir. Otomotiv sektöründe en fazla kullanılan çelik sac türüdür [53].

Dual fazlı çelikler genelde %0,1'in altında karbon içeriği ile direnç nokta kaynağı için gayet elverişlidir. Kimyasal kompozisyonundaki % 1-1,5 oranındaki mangan ise hızlı soğutma sırasında martensit dönüşümüne yardımcı olmaktadır. Krom ve molibden ise maksimum % 0,6 oranındadır [54]. Krom ve molibden interkritik tavlama sıcaklığını ve martensit dönüşüm sıcaklığına etki etmektedir. İçerisinde bulunan silisyum ise katı eriyik sertleştiricisi olarak görev yapmaktadır. Kompozisyonda küçük oranlarda bulunan vanadyum, niobyum ve titanyum ise

çökelti sertleşmesini sağlamaktadır ve/veya tane boyutunu kontrol etmektedir [55]. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan DP 800 sacının kimyasal bileşimi Tablo 4.1.'de verilmektedir.

Tablo 4.1. DP 800 kimyasal bileşimi

| Malzeme | C      | Mn     | Al    | Si     | P      | S      | Cu     | B      |
|---------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | % maks | % maks | % min | % maks | % maks | % maks | % maks | % maks |
| DP 800  | 0.23   | 3.3    | 0.010 | 2.0    | 0.090  | 0.015  | 0.20   | 0.006  |

Yüksek mukavemetli dual fazlı çeliklerin deformasyon sertleşmesi üssü değeri düşüktür ve deformasyon sertleşmesi ısı ilemlerle artırılabilir. Bu sayede araç gövde imalatında kullanılan bu çeliklerin et kalınlığı azaltılarak ağırlık indirimi sağlanabilmektedir. Deformasyon sertleşmesi dual fazlı çeliklerde 3 aşamada gerçekleşmektedir [53,55]:

- Hızlı deformasyon sertleşmesi: % 0.1-0.5 şekil değişimi, kalıntı gerilmelerin eliminasyonu ve faz uyumsuzluğu sonucu iç gerilmeler artmaktadır. Bu durum çeliğin şekillendirilebilme kabiliyetini arttırmaktadır.
- Kalıntı östenit dönüşümü ve oluşumu
- Dislokasyon oluşumu ve deformasyon etkisiyle ferrit tanelerinin yönlenmesi

Bu kapsamda kullanılan DP 800 sacının mekanik özellikleri Tablo 4.2.'de gösterilmektedir.

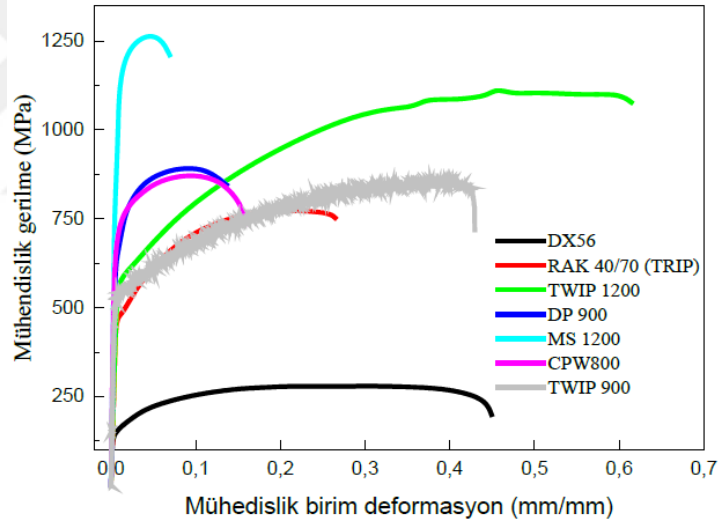
Tablo 4.2. DP 800 mekanik özellikleri

| Malzeme | Akma Dayanımı (Mpa) |      | Çekme Dayanımı (Mpa) | $A_{50}$ % Uzama | $n_{%10-20}$ Pekleşme | $n_{%4-6}$ Pekleşme |
|---------|---------------------|------|----------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
|         | min                 | maks | min                  | min              | min                   | min                 |
| DP 800  | 420                 | 550  | 780                  | 15               | 0.11                  | 0.15                |



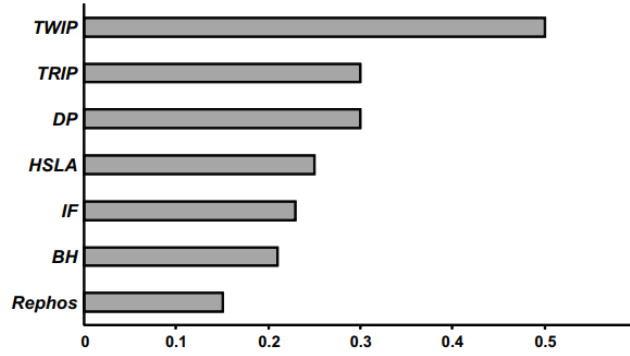
#### 4.2.2. TWIP çelikleri

TWIP (TWinning Induced Plasticity) çeliği östenit fazındadır. Yüksek oranda mangan içermektedir. TWIP çelikleri, diğer yüksek mukavemetli çeliklerin aksine deformasyon mekanizmasında kayma dislokasyonunun yanında ikizlenmeyi de içermektedirler [56, 57]. TWIP çeliğinin yüksek mukavemeti, bu ikizlenme mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca yüksek pekleşme değerlerinden dolayı boyun verme olayı daha geç meydana gelmekte, bunun sonucunda yüksek miktarda uzama değerleri elde edilmektedir. Diğer taraftan geri esneme problemi TWIP çeliklerinin önemli dezavantajlarından [58, 59]. Şekil 4.1.'de otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan çeliklere ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmektedir [60]. Burada TWIP serisi çeliklerin istenilen mukavemet ve süneklik değerlerini sağladığı görülmektedir.



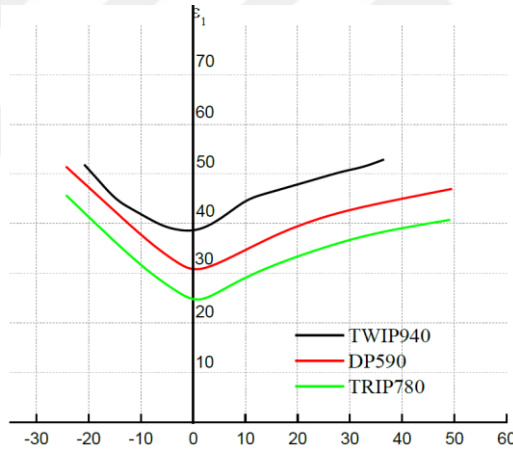
Şekil 4.1. Farklı malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri [60]

Şekil 4.2.'de ise araç gövde saclarında aranan önemli özelliklerden biri olan enerji emme kabiliyetleri gösterilmektedir. TWIP çeliğinin enerji emme kabiliyeti diğer çeliklere göre oldukça yüksektir [61].



Şekil 4.2. Farklı çelik malzemelerin enerji emme kabiliyetleri ( $J/mm^3$ ) [61]

TWIP çelikleri yüksek mukavemet değerlerinin yanında yüksek süneklik değerine de sahiptir. Bu durum TWIP çeliğinin şekillendirilebilme kabiliyetini arttırmaktadır. Şekil 4.3.'de bazı otomotiv çeliklerinin şekillendirilebilme sınır diyagramı (ŞSD) gösterilmektedir [62].



Şekil 4.3. Farklı çelik malzemelerin ŞSD diyagramı [62]

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan TWIP 1000 sacının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 4.3. ve Tablo 4.4.'de gösterilmektedir.

Tablo 4.3. TWIP 1000 kimyasal bileşimi

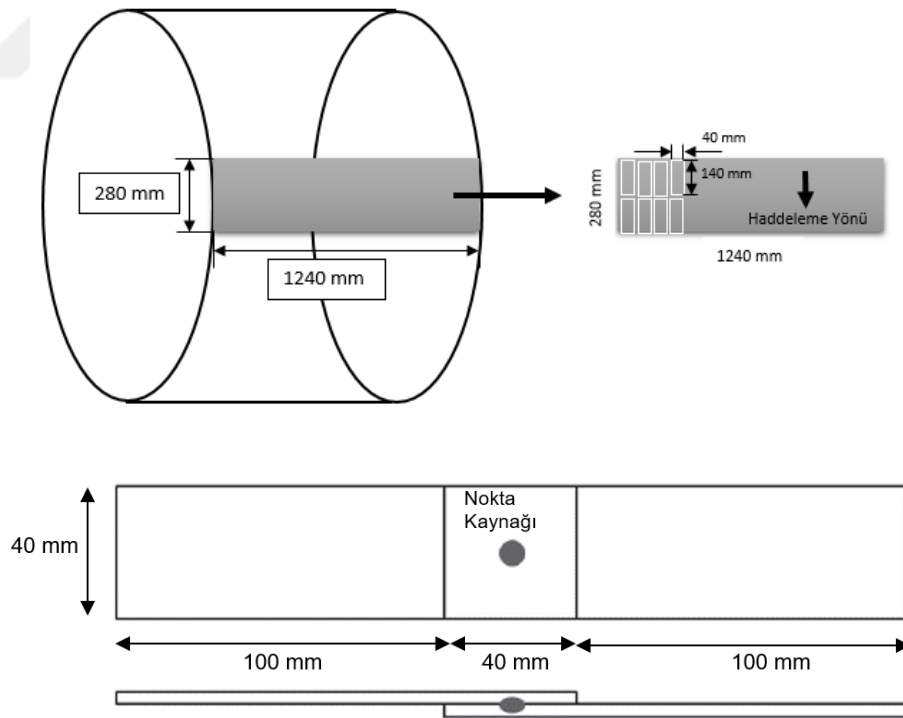
| Malzeme   | C         | Si     | Mn    |        | S      | Al     |
|-----------|-----------|--------|-------|--------|--------|--------|
|           | % aralık  | % maks | % min | % maks | % maks | % maks |
| TWIP 1000 | 0.50-0.80 | 0.80   | 12.0  | 20.0   | 0.025  | 2.50   |

Tablo 4.4. TWIP 1000 mekanik özellikler

| Malzeme   | Akma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | $A_{50}$ %<br>min | $A_{80}$ %<br>min | $r$<br>min | $n_{%4-40}$<br>min |
|-----------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------------|--------------------|
| TWIP 1000 | 450-600             | 950                  | 47                | 45                | 0.80       | 0.35               |

#### 4.2.3. Test numunelerinin hazırlanması

Direnç nokta kaynağı ile birleştirilecek test numunelerinin boyutları tespit edilirken, çekme-makaslama ve yorulma testleri esnasında kırılmanın kaynak bölgesinden oluşmasını sağlayacak, kenar etkilerini ortadan kaldıracak bir geometrinin seçilmesi gerekmektedir. Bu şartları sağlayan numune boyutları Şekil 4.4.'de gösterilmektedir. Birinci adımda rulodan haddeleme yönünde kesilen sac plaka, ikinci adımda giyotin makas ile numune boyutlarına getirilmiştir.



Şekil 4.4. Numune boyutları

#### 4.2.4. Kullanılan elektrotların özellikleri

Numuneler uç çapı 6 mm olan bakır-zirkonyum elektrotlar (Z-Trode) ile birleştirilmiştir. Kullanılan elektrotlar; C15000 CuZr, EN ISO 5182 A2/4, DIN 17666 Wn 2.1580, RWMA Class I. Kullanılan elektrotların kimyasal içeriği ve mekanik özellikleri Tablo 4.5.'de gösterilmektedir.

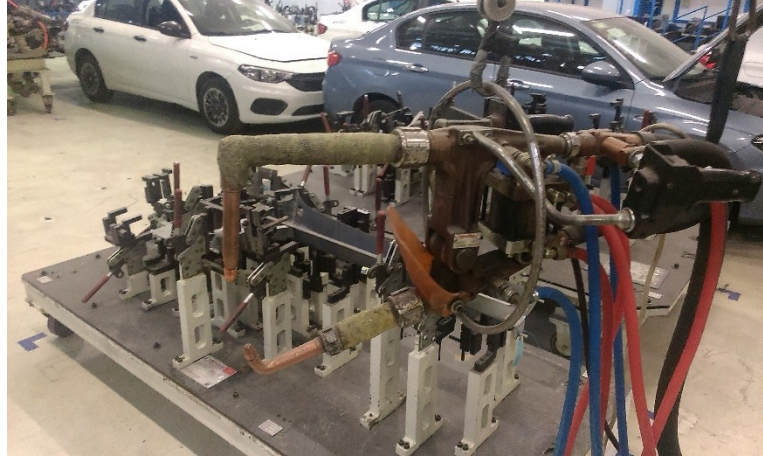
Tablo 4.5. Kullanılan elektrotların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

| Elektrot tipi | Kimyasal kompozisyon (%) | Termal iletkenlik ( $W/mK$ ) | Elektrik iletkenliği | Çekme dayanımı ( $N/mm^2$ ) | %0,2 ofset akma dayanımı ( $N/mm^2$ ) | Sertlik HV |
|---------------|--------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| CuZr          | 0,15 Zr, kalan Cu        | 367                          | En az %85 IACS       | $\geq 420$                  | $\geq 379$                            | $\geq 132$ |

### 4.3. Metot

#### 4.3.1. Kaynak makinası

DP 800 ve TWIP 1000 sacları kullanılarak oluşturulan 4 farklı serinin (DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm), DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm), TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm), TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm)) kaynak işlemleri TOFAŞ Ar-ge prototip atölyesinde yapılmıştır. Şekil 4.5.'de kullanılan kaynak makinesi gösterilmektedir. Tüm deneylerde kaynak zamanı 20 periyot sabit tutulmuştur. Kaynak akımı ise 7 kA ile 11 kA arasında değiştirilmiştir. Kaynak işlemi boyunca kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrod kuvveti sürekli olarak kontrol edilmiştir.



Şekil 4.5. Mobil kaynak makinesi

### 4.3.2. Elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantıların yapılması

DP 800 ve TWIP 1000 sacları, Şekil 4.4.'de gösterilen ölçülerde kesilerek üst üste bindirme şeklinde kaynak edilmiştir. Toplamda 4 farklı grup için nokta kaynaklı bağlantılar oluşturulmuştur. Oluşturulan bağlantılar Tablo 4.6.'da gösterilmektedir.

Tablo 4.6. Oluşturulan direnç nokta kaynaklı bağlantı çiftleri

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| DP 800 (0,8 mm)    | DP 800 (0,8 mm)    |
| DP 800 (1 mm)      | DP 800 (1 mm)      |
| TWIP 1000 (1,4 mm) | TWIP 1000 (1,4 mm) |
| TWIP 1000 (1,4 mm) | DP 800 (1 mm)      |

Elektrod kuvveti 4 grup için yapılan tüm kaynak işlemlerinde 3 kN olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında kaynak çekirdek çapının, bağlantının mekanik özelliklerine ve yorulma dayanımına etkisi tespit edilmiştir. Bunun için kaynak akımı tüm gruplarda 7 kA ile 11 kA arasında 0,5 kA'lık artışlarla değiştirilip, 4, 5 ve 6 mm kaynak çekirdek çapına sahip bağlantılar elde edilmiştir. İstenilen kaynak çekirdek çaplarını elde etmek için bir dizi ön direnç nokta kaynaklı birleştirme yapılmıştır. Bütün gruplarda kaynak zamanı 20 periyot, sıkıştırma zamanı 25 periyot, tutma zamanı ise 20 periyottur. (1 periyot = 1/50 sn). Şekil 4.6.'da direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numuneler gösterilmektedir.

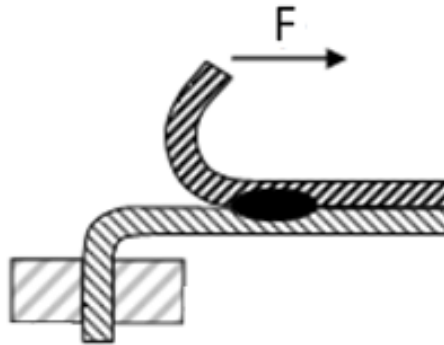


Şekil 4.6. Direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numuneler

Kaynaklı numunelerin bir serisi çekirdek çapı ölçümlerinde, bir serisi çekme-makaslama testlerinde, bir serisi mikro yapı görüntüleme ve sertlik ölçüm testlerinde, bir serisi de yorulma S-N eğrilerinin çıkartılmasında kullanılmıştır.

#### 4.3.3. Çekirdek çaplarının tespiti

Direnç nokta kaynağı ile birleştirilen numunelerin çekirdek çaplarını tespit etmek için Şekil 4.7.'de gösterilen ayırma testi yapılmıştır. Ayırma testi ile kaynaklı saclar birbirinden ayrılarak çekirdek çapları ölçülmüştür.

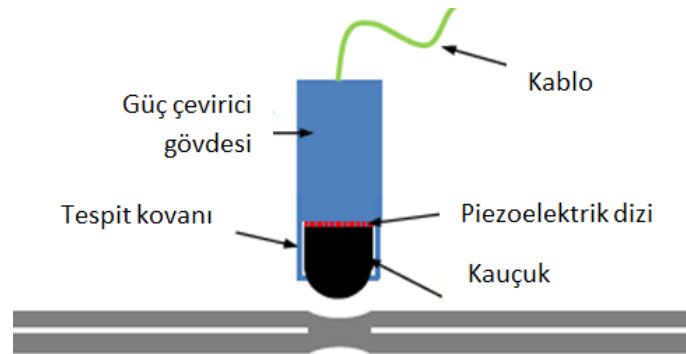


Şekil 4.7. Ayırma testi

#### 4.3.4. Ultrasonik kaynak kontrolü

Nokta kaynak kalitesini ölçmek için ayırma veya keski testi gibi tahribatlı muayene yöntemleri kullanılmaktadır. Bu sayede kaynak çekirdek çapı tespit edilebilirken deformasyon sonucu kopan kaynaklı bağlantının ayrılma şekli kaynak kalitesi hakkında yorum yapabilmemize olanak tanımaktadır. Otomotiv sektöründe belirli aralıklarla üretim hattından alınan komple bir araç gövdesindeki nokta kaynaklı birleştirmeler tahribatlı nokta kaynak kontrolüne tabi tutulmaktadır. Fakat tahribatlı muayene yöntemi hem pahalı ve hem de zaman kaybına yol açan bir yöntemdir. Bunun yerine otomotiv sektöründe nokta kaynak kontrolünde sıklıkla kullanılan tahribatsız muayene yöntemi ultrasonik kaynak kontrol yöntemidir. Üretim hattında günde yaklaşık 1500 araç üretimi gerçekleştirildiği göz önüne alındığında bu yöntem ucuz ve pratik olması sebebiyle tercih edilmektedir. Bu yöntem ile uygunsuz kaynak tespit edildiğinde geriye dönüp önlem almak ve hatalı kaynakları tespit ederek son kullanıcıya gitmeden düzeltmek mümkündür.

Şekil 4.8.'de gösterilen ultrasonik nokta kaynak kontrol yönteminde, piezoelektrik kristaller aracılığı ile üretilen ve algılanan ultrasonik dalgalar katı malzemeler içerisinde yayınarak, sınır yüzeylerden yansıyıp malzemenin iç yapısı ile ilgili bilgiler elde edilmektedir [63].



Şekil 4.8. Ultrasonik nokta kaynak kontrolü

Nokta kaynağı ile birleştirilen tüm numuneler elde edilen kaynak kalitesi tespit etmek amacıyla ultrasonik kaynak kontrolüne tabi tutulmuşlardır. Tüm testler Tofaş bünyesinde bulunan UltraLOG ultrasonik muayene cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9.'da kullanılan ultrasonik test kontrol ekipmanları gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Ultrasonik test kontrol ekipmanları

Ultrasonik muayenede bazı dikkat edilmesi gereken hususlar mevcuttur. Test parçasının yüzeyi pas, toz vb. maddelerden arındırılmalıdır. Bu maddeler ultrasonik dalga transferi ve prob yüzeyini bozarak yanlış ölçümlere sebebiyet verebilir. Test sisteminin belirli aralıklarla kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Ultrasonik kaynak kontrolü sonucunda kaynak bölgesinin kalitesi sınıflandırılmaktadır. Bunlar; iyi kaynak, soğuk kaynak, yapışmış kaynak, yanık kaynak, kaynak oluşmamış, küçük çekirdekli kaynaktır.

#### 4.3.5. Çekme-makaslama testleri

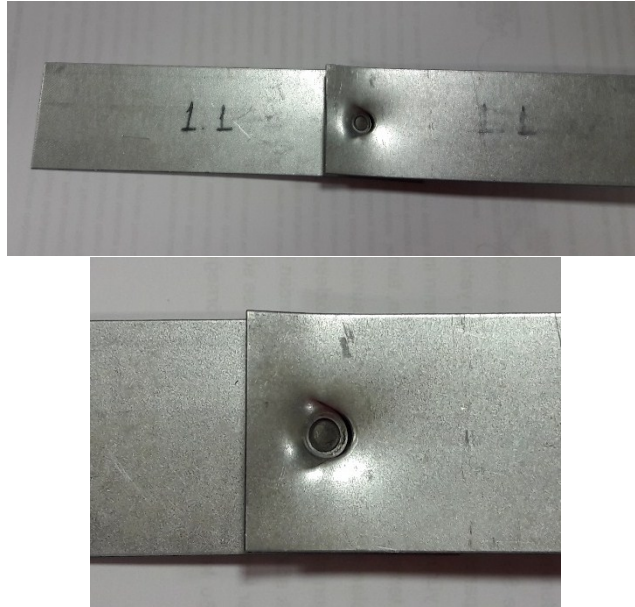
Kaynaklı numuneler TOFAŞ malzeme mühendisliği laboratuvarındaki çekme cihazında çekme testine tabi tutulmuştur. Testler Şekil 4.10.'da gösterilen 25 tonluk Zwick/Roell çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Test standardı DIN EN ISO 6892-1 dir. Test hızı 0.0067 1/s'dir. Yapılan testlerde elde edilen maksimum çekme kuvveti, çekme cihazında kuvvet-zaman grafiğinden okunan maksimum değerlerdir.





Şekil 4.10. Zwick/Roell Çekme Cihazı, maks. 25 ton

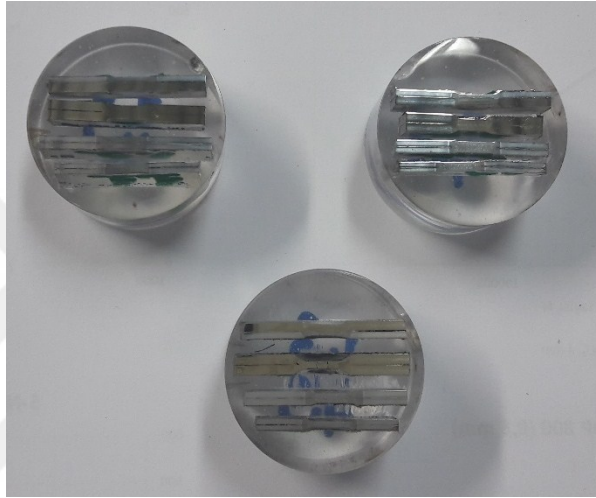
Şekil 4.11.'de çekme testi sonucunda kopan bir numune görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi kopmanın kaynak bölgesinden değil parçadan gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu durum parçaların uygun bir nokta kaynak ile birleştirildiğini göstermektedir.



Şekil 4.11. Çekme deneyi sonrası kopan kaynaklı parça

#### 4.3.6. Optik mikroskop incelemeleri

Çalışma kapsamında 4 grupta yer alan tüm kaynaklı bağlantılar mekanik olarak çekirdek ortasından kesilerek Şekil 4.12.'de gösterilen bakalite alınmıştır. Numulere ilk önce sırasıyla zımparalama ve parlatma işlemi sonrasında ise uygun ayraçlar ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Esas metal, kaynak bölgesi ve ısı tesiri altında kalan bölgelerin mikro fotoğrafları çekilmiş ve kaynak sonrası meydana gelen iç yapı değişimleri irdelenmiştir. Dağlama işlemlerinde % 3 nital çözeltisi kullanılmıştır.



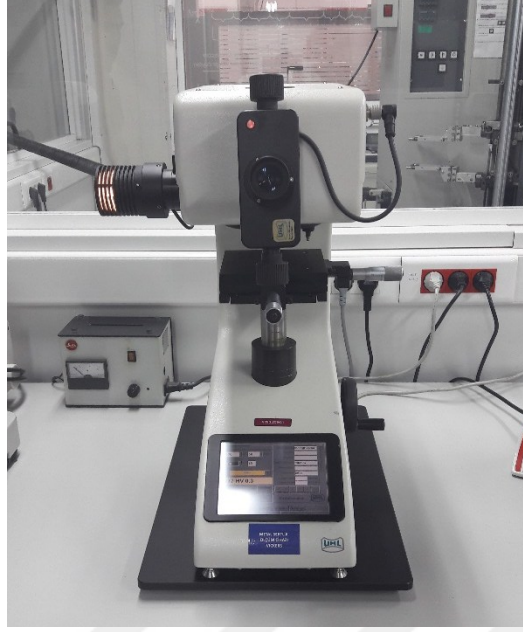
Şekil 4.12. Bakalite alınan nokta kaynaklı numune kesiti

#### 4.3.7. Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

Çalışma kapsamında kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi, IEB ve esas metal mikro yapılarının daha net anlaşılması için tarayıcı elektron mikroskobunda incelemeler yapılmıştır.

#### 4.3.8. Sertlik değerlerinin tespiti

Kaynaklı bağlantılardaki sertlik dağılımını tespit etmek amacıyla esas metal, kaynak metali ve ısı tesiri altında kalan bölgeyi içerisine alan diyagonal travers kesitinde sertlik değerleri Şekil 4.13.'de gösterilen UHL marka microvickers sertlik ölçme cihazıyla ölçülmüştür.



Şekil 4.13. Metal sertlik ölçüm cihazı, vickers

#### 4.3.9. Yorulma test düzeneği

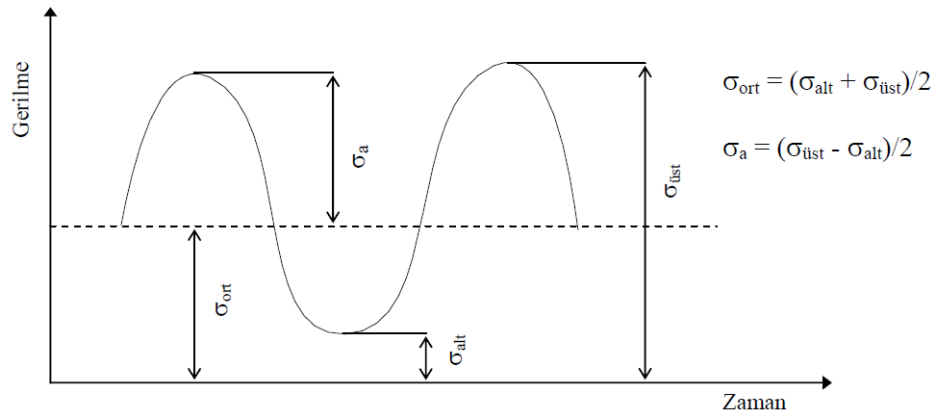
Yorulma deneylerinde Şekil 4.14.'de gösterilen 100 kN kapasiteli INSTRON 8801 aksenal çekme-basma uygulayan yorulma test cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada yorulma testlerindeki kullanılan frekans değeri 10 Hz, gerilme oranı  $r: 0,1$ 'dir.



Şekil 4.14. INSTRON 8801 servo-hidrolik yorulma test cihazı

#### 4.3.10. Yorulma testleri ve S-N eğrilerinin elde edilmesi

Farklı çekirdek çaplarının kaynaklı bağlantıların yorulma ömürlerine etkilerini incelemek için bir dizi deney numunesine uzun ömürlü yorulma testleri yapılmıştır. 4 grupta yer alan farklı parametrelere sahip her bir nokta kaynaklı bağlantının yorulma davranışını incelemek ve S-N eğrilerini çıkarabilmek için her bir bağlantıya farklı büyüklüklerde ve giderek azalan değerlerde dinamik yükler uygulanmıştır. Dinamik yorulma yükleri, kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama testlerinden elde edilen maksimum çekme kuvvetinin %50'si üst limit olacak şekilde seçilmiştir. Yorulma yükleri üst limitten aşağıya doğru belirli aralıklarla azaltılarak aynı gruptaki aynı kaynak parametrelerine sahip her bir test serisi için yaklaşık 6 adet deney yapılmıştır. Benzer yorulma testleri 4 grupta yer alan tüm kaynaklı bağlantılar için yapılmış, elde edilen değerler  $\Delta\sigma$ , Gerilme aralığı- N, Çevrim sayısı grafiklerinde verilmiştir. Testlerde numunelere Şekil 4.15.'de gösterilen periyodik yükleme tipi uygulanmıştır. Testlerde çevrim sayısı  $10^6$  değerine ulaştığında hasara uğramayan bağlantılar sonsuz ömürlü olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.16.'da yorulma testine tabi tutulan kaynaklı bağlantı gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Periyodik yükleme



Şekil 4.16. Yorulma testi

## **BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA**

### **5.1. Genel**

Bu çalışma kapsamında otomotiv sektöründe gövde imalatında sıklıkla kullanılan dual fazlı çelikler ve araç hafifletme çalışmaları kapsamında kullanımı yaygınlaşması beklenen TWIP çelikleri kullanılmıştır. Bu çelik saclar kendi aralarında ve birbirleriyle farklı çekirdek çapları elde edecek şekilde elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Sonrasında farklı kombinasyonlarda birleştirilen kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımı, sertlik dağılımı, mikro yapıları ve yorulma dayanımları incelenmiştir.

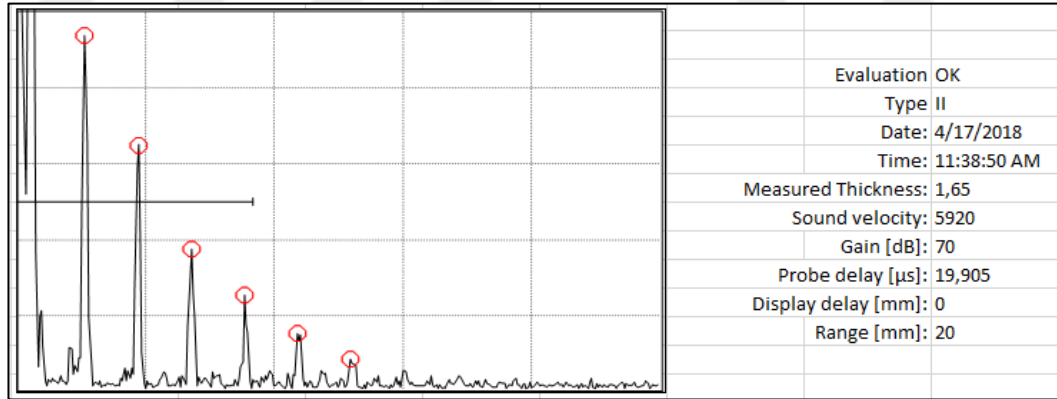
### **5.2. Elde Edilen Direnç Nokta Kaynaklı Bağlantılar**

DP 800 ve TWIP 1000 sacları kullanılarak elde edilecek nokta kaynaklı bağlantılarda kaynak akımı haricindeki diğer kaynak parametreleri sabit tutulmuştur. Böylelikle kaynak akımının bağlantıda oluşan çekirdek çapına etkisi incelenmiştir. DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm), DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm), TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm), TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) sac olarak eşleştirilen numuneler 7 kA ile 11 kA arasında 0,5 kA'lık aralıklarla artan kaynak akım değerlerinde birleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tüm kombinasyonların 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapına sahip nokta kaynaklı bağlantıları elde edilmiştir. İstenilen bu çekirdek çaplarını elde etmek için bir dizi ön nokta kaynaklı birleştirme yapılmıştır. Elde edilen numunelerde genel olarak 4 tip kombinasyonda da kaynak akımının artmasıyla çekirdek çapının büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bu durum kaynak akımının artmasıyla, kaynak bölgesindeki ısı girdisinin artması şeklinde açıklanabilmektedir. Düşük akım değerlerinde birleştirilen bağlantılarda, kaynak bölgesine verilen ısı düşük olduğu için oluşan çekirdek çapı küçük olmaktadır. Bu tip bağlantılarda kaynak bölgesinde tam bir erime olmadığı için ayırma testi sonucunda kopma kaynak

bölgesinden olmaktadır. 11 kA gibi yüksek akım değerlerinden itibaren birleştirilen bağlantılarda kaynak bölgesinde derin elektrot izleri, fişkırmalar, elektrot ile esas metal arasında yapışmalar meydana gelebilmektedir. Bu durum kaynak kalitesini olumsuz yönde etkilemekte ve bağlantıların çekirdek çapları küçülmektedir.

### 5.3. Ultrasonik Kaynak Kontrolü Sonuçları

Bu çalışma kapsamında farklı malzeme ve kaynak parametrelerine göre elde edilmiş 4 gruptaki tüm nokta kaynaklı birleştirmeler ultrasonik kaynak kontrolü ile incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda uygun kaynak kalitesine sahip olan numuneler ile çekme-makaslama deneylerine devam edilmiştir. Şekil 5.1.'de DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) 5 mm çekirdek çapına sahip kombinasyonun ultrasonik inceleme sonucu verilmektedir. Şekil 5.1.'de uygun bir kaynak kalitesine sahip inceleme sonucu gösterilmektedir. Şekil 5.1.'de kırmızı ile işaretlenen ve yuvarlak içerisine alınan ekolar görülebilmektedir. İlk geri dönen eko, temas yüzeyi ekosunun en az % 80'i kadar olmalıdır.

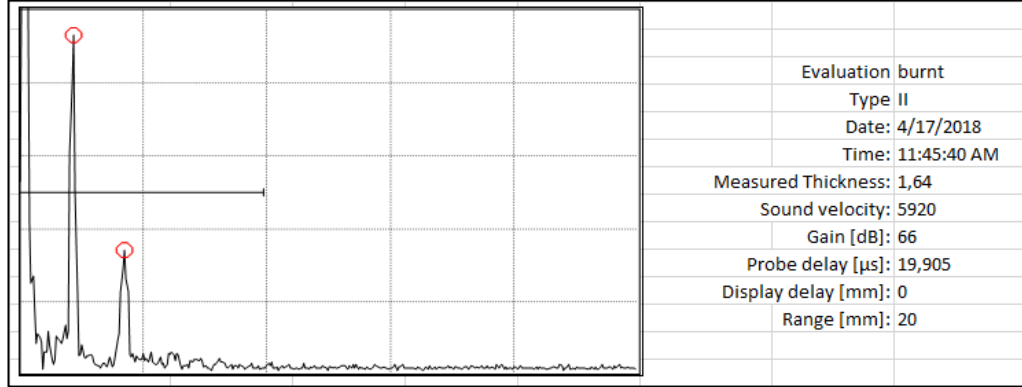


Şekil 5.1. DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm)-5 mm çekirdek çapı-ultrasonik kontrolü-iyi kaynak

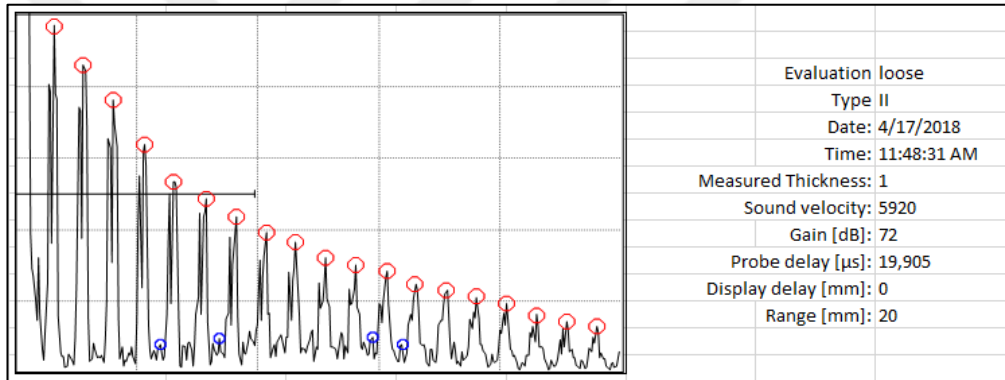
Şekil 5.2. ve 5.3.'de sırasıyla yanmış ve kayıp kaynak hatasına ait ultrasonik inceleme sonuçları gösterilmektedir. Direnç nokta kaynağı işleminde meydana gelen kaynak hatalarının olası sebepleri uygulanan kaynak ve proses parametreleri ile ilgilidir. Örneğin sıkma zamanının kısa olması, kaynak ara yüzeyinden çapak oluşumuna ve zayıf kaynak mukavemetine sebebiyet vermektedir. Kaynak zamanının kısa olması, zayıf kaynak mukavemetine yol açarken, uzun olması ise elektrod uc



ömrünün kısılmasına, çapak oluşumuna, yüzeyde mantarlaşmaya, kaynak bölgesinde yüksek göçertmeye neden olmaktadır.



Şekil 5.2. DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm)-5 mm çekirdek çapı-ultrasonik kontrolü-yanmış kaynak



Şekil 5.3. DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm)-5 mm çekirdek çapı-ultrasonik kontrolü-kayıp kaynak

Tutma zamanının kısa olması, yüzeyden aşırı çapak, uc yapışması, zayıf kaynak mukavemeti ve kaynak çatlakları gibi hatalara sebep olmaktadır. Elektrod kuvvetinin az olması, kaynak çatlaklarına sebep olurken, fazla olması ise düşük uc ömrü, yüzeyde mantarlaşma ve yüksek göçertmeye neden olmaktadır. Uygulanan kaynak akımının az olması, zayıf kaynak mukavemeti ve kaynak çatlaklarına sebep olurken, fazla olması, uc ömrünün azalmasına, çapak oluşumuna, uc yapışmasına, yüksek göçertmeye, uc çıkmasına ve elektrod çatlmasına sebebiyet vermektedir. Dar bir elektrod yüzey alanı, kısa uc ömrüne, çapak oluşumuna, yüksek çökertme ve uc çıkmasına yol açmaktadır. Geniş elektrod yüzey alanı ise zayıf kaynak mukavemetine sahip kaynaklı bağlantılar oluşturmaktadır. Elektrotlar arasında eksen kaçıklığı olması durumunda çapak oluşumu ve uç yapışması hataları meydana



gelebilmektedir. Elektrodların soğutulması yeterince yapılmaz ise, kısa uc ömrü, yüzeyden çapak oluşumu, uc yapışması, yüzeyde mantarlaşma meydana gelebilmektedir. Alt ve üst pensedeki elektrod uçları uyumsuz ise, oval kaynak oluşumu görülmektedir. Elektrod yüzeyinde galvaniz birikmesi sonucunda, uc aşınması artar, çapak oluşumu, uç yapışması, kaynak mukavemetinde zayıflama, kaynak çatlağı oluşumu ve oval kaynak hatası riski artar. İki farklı malzemeyi kaynak ederken de uc aşınması, çapak oluşumu, uç yapışması, uç çıkması, ısıl dengesizlik sonucu simetrik olmayan çekirdek çapı eldesi gibi kaynak hataları ile karşılaşmak mümkündür.

#### 5.4. Çekme- Makaslama Testi Sonuçları

DP 800 ve TWIP 1000 saclarından oluşan 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantılara çekme-makaslama testi yapılmıştır. Tablo 5.1.'de tüm kombinasyonlar için elde edilen maksimum çekme kuvveti ve gerilmesi değerleri gösterilmektedir. Bu değerler hesaplanırken her bir alt grup için 3 adet çekme testi yapılmış ve bunların ortalamaları alınmıştır. Tablo 5.1.'de görülebileceği gibi tüm kaynaklı bağlantı kombinasyonları 1.1, 2.3, 4.2 şeklinde alt gruplara ayrılarak numaralandırılmıştır.

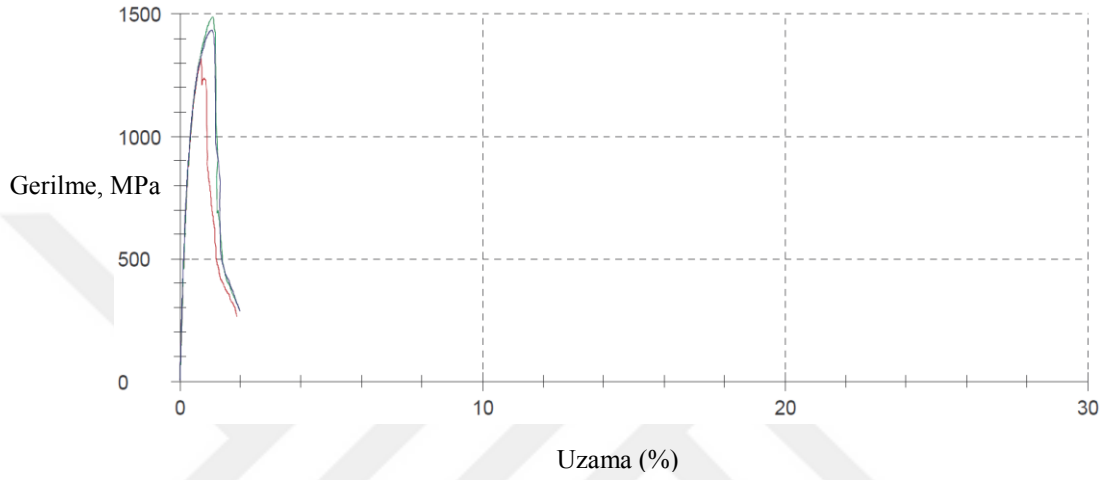
Tablo 5.1. Kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama testi sonuçları

| Malzeme Adı                         | Alt Grup | Maks. Çekme Gerilmesi (MPa) | Ort. Maks. Çekme Gerilmesi (MPa) | Maksimum Çekme Kuvveti (kN) | Ort. Maks. Çekme Kuvveti (kN) | Çekirdek Çapı (mm) |
|-------------------------------------|----------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| DP 800 (0,8 mm)-<br>DP 800 (0,8 mm) | 1.1      | 1541                        | 1574                             | 9.86                        | 10.07                         | 4                  |
|                                     |          | 1794                        |                                  | 11.48                       |                               | 4                  |
|                                     |          | 1386                        |                                  | 8.87                        |                               | 4                  |
|                                     | 1.2      | 1239                        | 1388                             | 9.91                        | 11.10                         | 5                  |
|                                     |          | 1490                        |                                  | 11.92                       |                               | 5                  |
|                                     |          | 1435                        |                                  | 11.48                       |                               | 5                  |
|                                     | 1.3      | 1303                        | 1124                             | 10.43                       | 10.09                         | 6                  |
|                                     |          | 980                         |                                  | 9.41                        |                               | 6                  |
|                                     |          | 1089                        |                                  | 10.45                       |                               | 6                  |

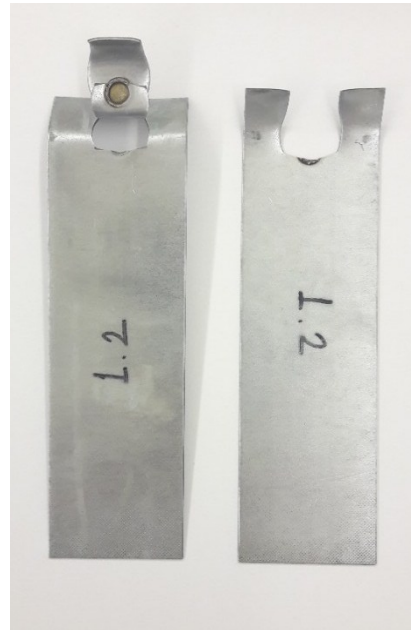
Tablo 5.1. (Devamı)

| Malzeme Adı                           | Alt Grup | Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa) | Ort. Maks. Çekme Gerilmesi (MPa) | Maksimum Çekme Kuvveti (kN) | Ort. Maks. Çekme Kuvveti (kN) | Çekirdek Çapı (mm) |
|---------------------------------------|----------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm)           | 2.1      | 1247                           | 1463                             | 9.97                        | 11.7                          | 4                  |
|                                       |          | 1530                           |                                  | 12.24                       |                               | 4                  |
|                                       |          | 1611                           |                                  | 12.89                       |                               | 4                  |
|                                       | 2.2      | 1353                           | 1423                             | 13.53                       | 14.23                         | 5                  |
|                                       |          | 1456                           |                                  | 14.56                       |                               | 5                  |
|                                       |          | 1460                           |                                  | 14.60                       |                               | 5                  |
|                                       | 2.3      | 1346                           | 1281                             | 16.15                       | 15.37                         | 6                  |
|                                       |          | 1084                           |                                  | 13.01                       |                               | 6                  |
|                                       |          | 1414                           |                                  | 16.97                       |                               | 6                  |
| TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) | 3.1      | 1355                           | 1344                             | 15.17                       | 15.04                         | 4                  |
|                                       |          | 1332                           |                                  | 14.91                       |                               | 4                  |
|                                       |          | 1344                           |                                  | 15.05                       |                               | 4                  |
|                                       | 3.2      | 1170                           | 1201                             | 16.38                       | 16.8                          | 5                  |
|                                       |          | 1246                           |                                  | 17.44                       |                               | 5                  |
|                                       |          | 1186                           |                                  | 16.6                        |                               | 5                  |
|                                       | 3.3      | 1067                           | 1100                             | 17.92                       | 18.48                         | 6                  |
|                                       |          | 1130                           |                                  | 18.99                       |                               | 6                  |
|                                       |          | 1103                           |                                  | 18.53                       |                               | 6                  |
| TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm)      | 4.1      | 887                            | 790                              | 12.77                       | 11.37                         | 4                  |
|                                       |          | 687                            |                                  | 9.90                        |                               | 4                  |
|                                       |          | 796                            |                                  | 11.46                       |                               | 4                  |
|                                       | 4.2      | 1191                           | 1131                             | 14.29                       | 13.57                         | 5                  |
|                                       |          | 1037                           |                                  | 12.44                       |                               | 5                  |
|                                       |          | 1165                           |                                  | 13.98                       |                               | 5                  |
|                                       | 4.3      | 1468                           | 1519                             | 14.09                       | 14.58                         | 6                  |
|                                       |          | 1524                           |                                  | 14.63                       |                               | 6                  |
|                                       |          | 1566                           |                                  | 15.04                       |                               | 6                  |

Şekil 5.4.'de alt grup 1.1 için gerilme-şekil değiştirme eğrisi gösterilmektedir. Nokta kaynaklı numunelerin çekme testi sonrasında kaynak bölgesinden değil parçadan hasara uğraması ve kopması beklenmektedir. Şekil 5.5.'de çekme testi sonrası parçadan yırtılma hasarına uğramış bir numune gösterilmektedir. Bu tip bir kopma hasarı kaynaklı bağlantının yeterli mukavemete sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) ( 5 mm çekirdek çapı) gerilme-şekil değiştirme eğrisi

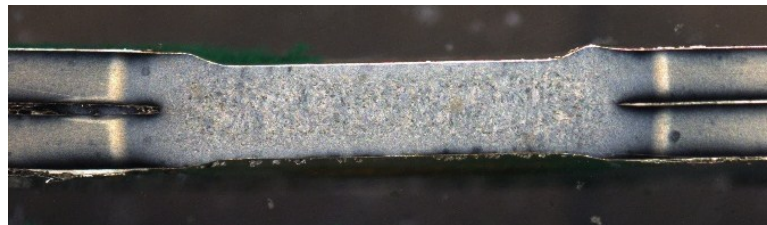


Şekil 5.5. Çekme-makaslama testi sonucunda hasara uğrayan numune

Tablo 5.1.'de yer alan tüm sac kombinasyonları incelendiğinde genel olarak bağlantının çekirdek çapı arttıkça çekme mukavemetinin de arttığı gözlemlenmektedir. En yüksek çekme dayanımına sahip bağlantı tipi TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) dir. TWIP 1000 çeliğinin çekme dayanımı DP 800 çeliğine göre daha yüksek olduğu için direnç nokta kaynaklı bağlantısının çekme dayanımı da daha yüksektir. TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kombinasyonun çekme dayanımı, DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kombinasyonun çekme dayanımına göre daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi farklı malzemelerin direnç nokta kaynağında karşılaşılan ısı dengesizlik ve simetrik oluşmayan kaynak çekirdeğidir. Birleştirilecek sacların farklı malzemelerden olmaları durumunda elektriksel dirençleri farklı olacağından aynı ısı girdisinde çekirdek çapı, direnci yüksek olan sac tarafında daha çok şekillenecek ve bağlantı bölgesinde mukavemet düşüşüne sebep olacaktır (bkz Şekil 5.9.).

### 5.5. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları

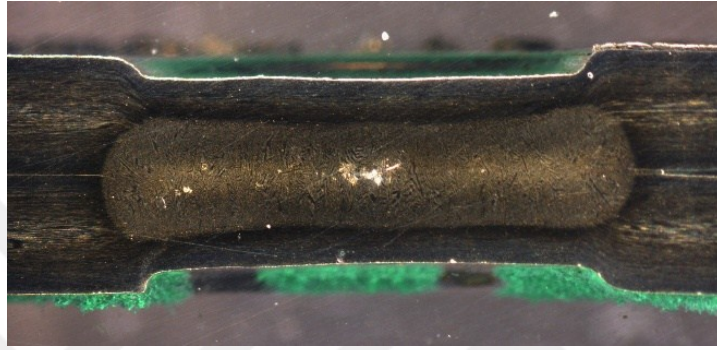
Şekil 5.6., 5.7., 5.8. ve 5.9.'da DP 800 ve TWIP 1000 saclarından oluşan 4 kombinasyonun makroskopik inceleme fotoğrafları gösterilmektedir. Şekil 5.8.'de kaynak çekirdeğinin iki sacın tam ortasında simetrik olarak oluştuğu görülmektedir. Tüm makro fotoğraflarda elektrodlarla temas eden bölgelerdeki çökmeler görülebilmektedir. İlgili normlara göre nokta kaynak kalitesini etkileyen gerekli ölçülerin (çökme derinliği, birleştirilen iki sac arasındaki mesafe, vb.) uygunluğu tüm numunelerde kontrol edilmiştir.



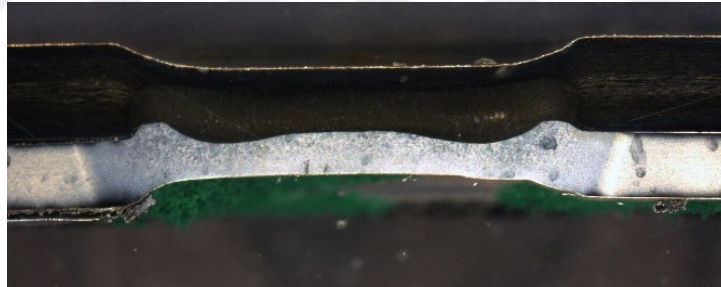
Şekil 5.6. DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantı kesiti



Şekil 5.7. DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı kesiti

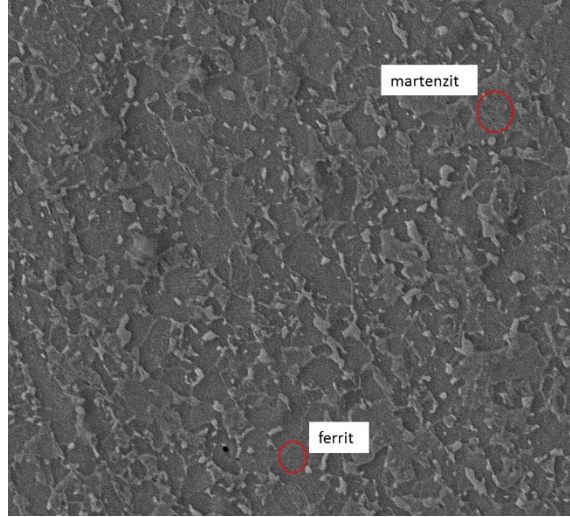


Şekil 5.8. TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantı kesiti

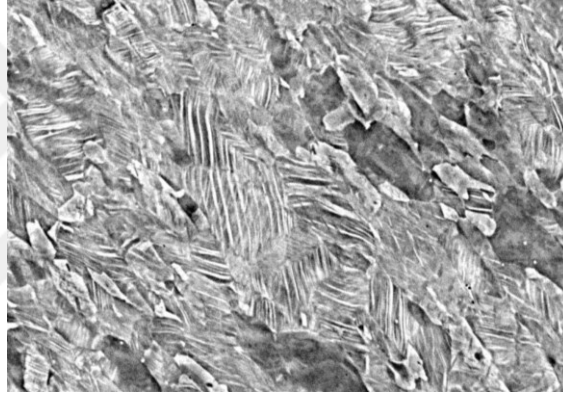


Şekil 5.9. TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı kesiti

Çalışma kapsamında esas metal olarak kullanılan DP 800 ve TWIP 1000 çeliklerinin mikro yapıları sırasıyla Şekil 5.10. ve Şekil 5.11.'de gösterilmektedir. DP 800 çeliğinin iç yapısı ferrit ve martenzitten oluşmaktadır. TWIP 1000 çeliği ise yüksek mangan içeren östenit fazında bir çeliktir. Şekil 5.11.'den görülebileceği gibi diğer yüksek mukavemetli çeliklerin aksine kayma dislokasyonunun yanında ikizlenme içermektedir. Bu sayede yüksek mukavemetinin yanında % uzama değeri de yüksektir.



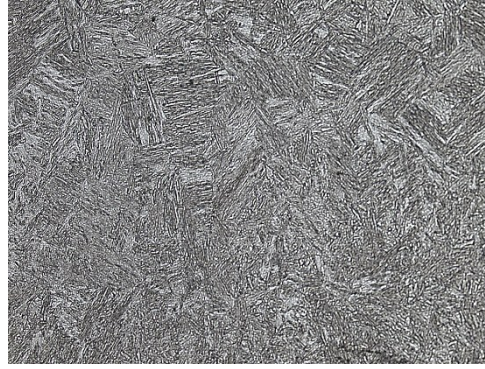
Şekil 5.10. DP 800 çeliği mikro yapısı



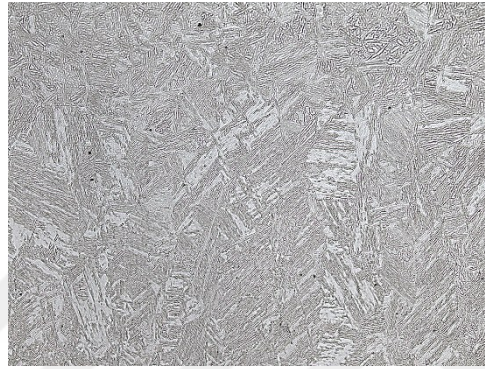
Şekil 5.11. TWIP 1000 çeliği mikro yapısı

Kaynak bölgesi ve IEB mikro yapı görüntüleri ışık mikroskobunda 200x büyütmede elde edilmiştir. Tüm grupların 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantılarının kaynak bölgesi ve IEB mikro fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 5.12.'de 0,8 mm kalınlığında DP 800 sac kombinasyonunun kaynak bölgesi mikro fotoğrafları gösterilmektedir. Bu kombinasyonun kaynak bölgesi mikro yapısı incelendiğinde esas metal de ferrit+martenzit olan iç yapının faz dönüşümü sonucunda martenzite evrildiği açıkça görülebilmektedir. Bu dönüşüm mikro sertlik sonuçları ile de desteklenmektedir. Esas metal de 250-270 HV olan sertlik değeri kaynak bölgesinde 450-470 HV seviyelerine çıkmaktadır.

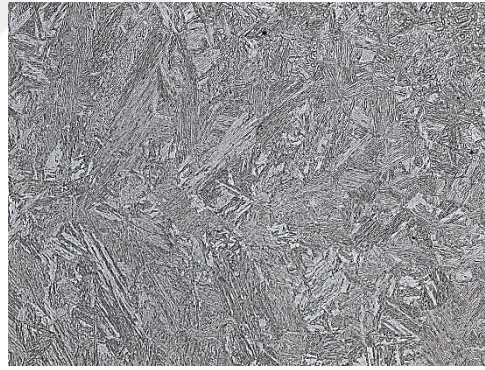




(a)



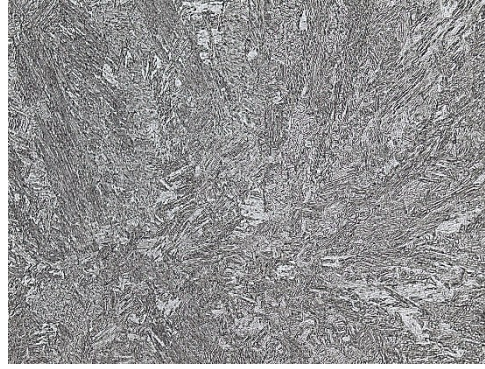
(b)



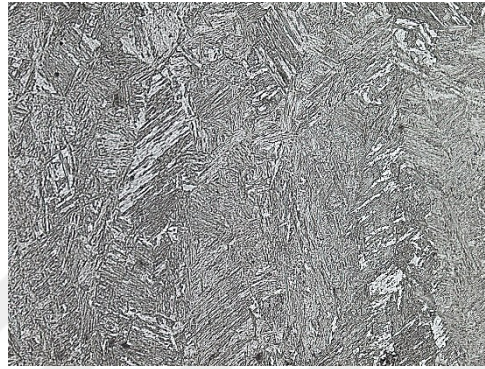
(c)

Şekil 5.12. DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantı (a) 4 mm çekirdek çapı (b) 5 mm çekirdek çapı (c) 6 mm çekirdek çapı-kaynak bölgeleri

Şekil 5.13.'de 1 mm kalınlığında DP 800 sac kombinasyonunun kaynak bölgesi mikro fotoğraları gösterilmektedir. Bu kombinasyonda da kaynak bölgesinde martenzit oluşumu gözlemlenmiştir. Yine bu durum ölçülen sertlik değerleri ile desteklenmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.13. DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı (a) 4 mm çekirdek çapı (b) 5 mm çekirdek çapı (c) 6 mm çekirdek çapı-kaynak bölgeleri

Şekil 5.14.'de 1,4 mm kalınlığında TWIP 1000 sac kombinasyonunun kaynak bölgesi mikro fotoğraları gösterilmektedir. Kaynak bölgesinde herhangi bir faz değişimi söz konusu değildir. TWIP esas metalinde 250 HV mertebelerinde olan sertlik değeri kaynak bölgesinde de 250-260 HV civarındadır. Kaynak bölgesi de östenitik yapıdadır.





(a)



(b)



(c)

Şekil 5.14. TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantı (a) 4 mm çekirdek çapı (b) 5 mm çekirdek çapı (c) 6 mm çekirdek çapı-kaynak bölgeleri

Şekil 5.15.'de 1,4 mm kalınlığında TWIP 1000 sac ile 1 mm kalınlığındaki DP 800 sacının kombinasyonunun kaynak bölgesi mikro fotoğraları gösterilmektedir. Bir taraf martenzitik yapıda iken diğer taraf östenitikdir.



(a)



(b)



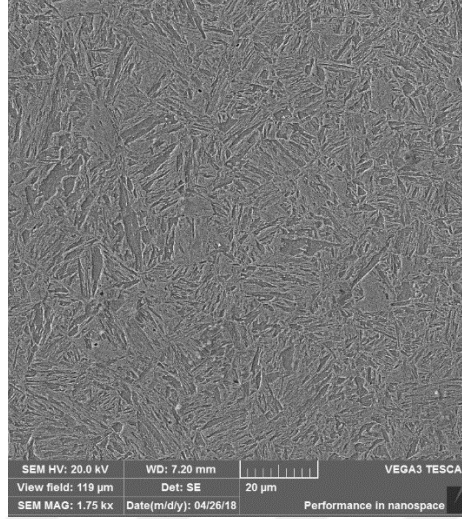
(c)

Şekil 5.15. TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı (a) 4 mm çekirdek çapı (b) 5 mm çekirdek çapı (c) 6 mm çekirdek çapı-kaynak bölgeleri

## 5.6. SEM İnceleme Sonuçları

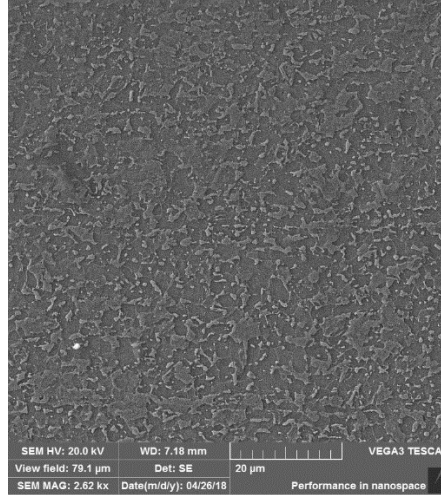
DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kombinasyonunun 3 farklı çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantısının esas metal, kaynak bölgesi ve IEB mikro yapısı incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan DP 800 esas metalinin iç yapısı ferrit ve martenzitten, TWIP 1000 esas metalinin iç yapısı ise tek fazlı östenitten oluşmaktadır. Şekil 5.16.'da çekirdek çapı 4 mm olan DP 800 (1

mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı tipi için kaynak bölgesi iç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.16. 4 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-kaynak bölgesi

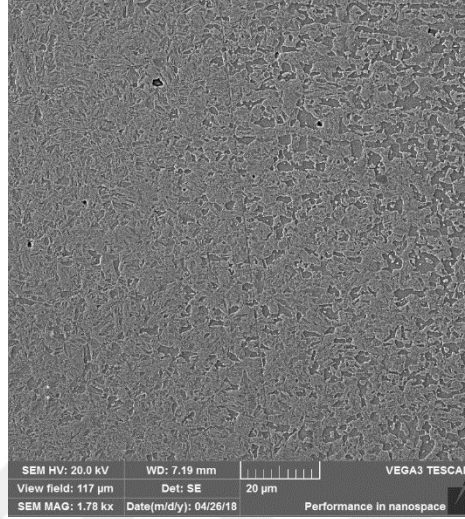
Şekil 5.16.'dan görülebileceği gibi kaynak bölgesi martenzitik yapıdadır. Şekil 5.17.'de ferrit ve martenzitten oluşan esas metalin iç yapısı gösterilmektedir.



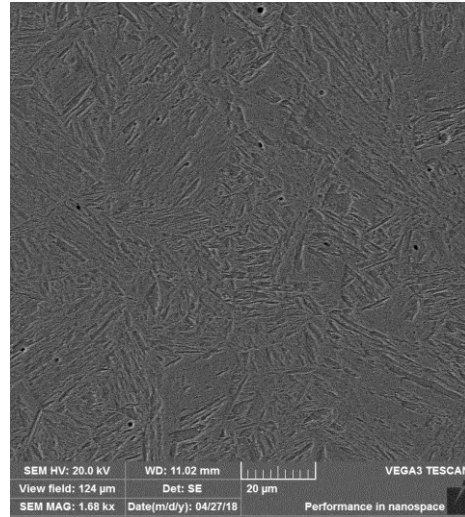
Şekil 5.17. 4 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-esas metal

Şekil 5.18.'de ise ısıdan etkilenen bölge gösterilmektedir. Genel olarak IEB bölgesi arttıkça kaynaklı bağlantının yorulma ömrü azalmaktadır. Bunun sebebi IEB' in

sertliğinin ve mukavemetinin düşük olmasıdır. Şekil 5.19., 5.20. ve 5.21.'de 5 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantının kaynak bölgesi, IEB ve esas metal SEM incelemeleri gösterilmektedir.

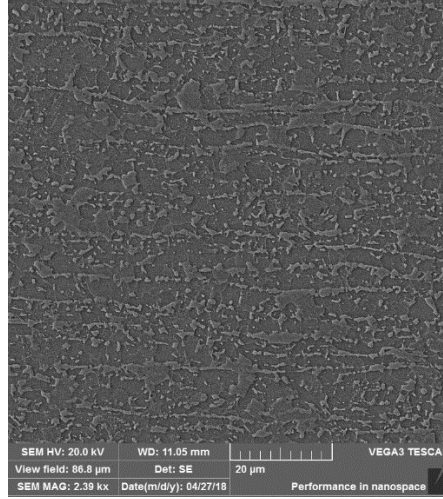


Şekil 5.18. 4 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-IEB

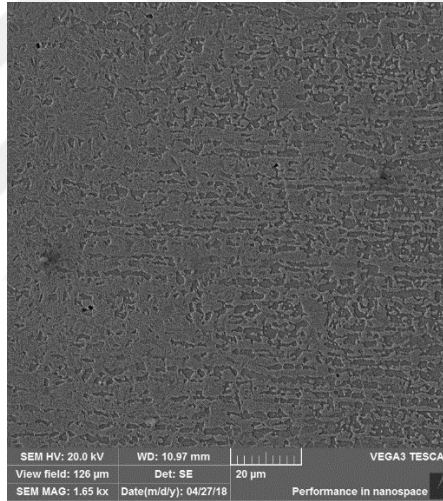


Şekil 5.19. 5 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-kaynak bölgesi

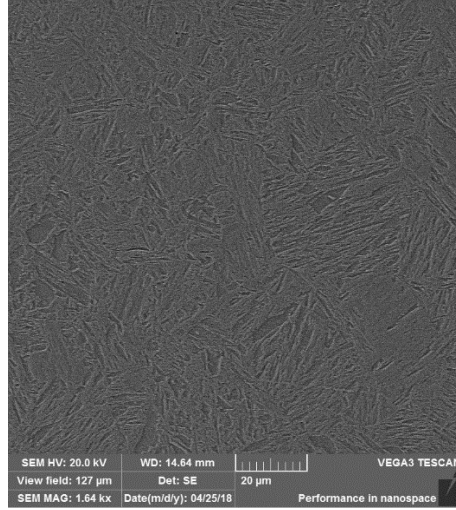




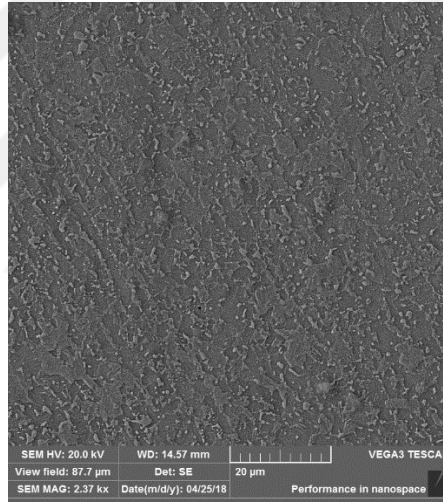
Şekil 5.20. 5 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-esas metal



Şekil 5.21. 5 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-IEB

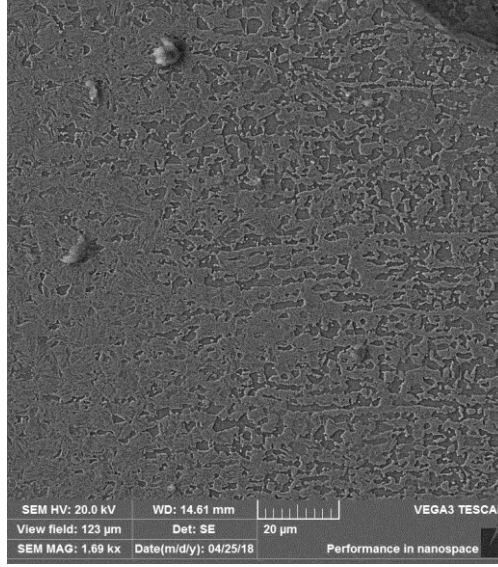


Şekil 5.22. 6 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-kaynak bölgesi



Şekil 5.23. 6 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-esas metal

Şekil 5.22., 5.23. ve 5.24.'de 6 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantının kaynak bölgesi, IEB ve esas metal SEM incelemeleri gösterilmektedir.



Şekil 5.24. 6 mm çekirdek çapına sahip DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantı-IEB

### 5.7. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

4 kaynaklı bağlantı tipi için de üst sac (esas metal), üst sac (IEB), punto bölgesi, alt sac (esas metal), alt sac (IEB) bölgelerinde microvicker sertlik ölçümleri yapılmıştır. Tablo 5.2., 5.3. ve 5.4.'de sertlik dağılımları gösterilmektedir.

Tablo 5.2. DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantının sertlik dağılımı (HV) (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı

(a) 4 mm çekirdek çapı

| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|---------------|-------------|---------|
| 260     | 280         | 463           | 333         | 261     |

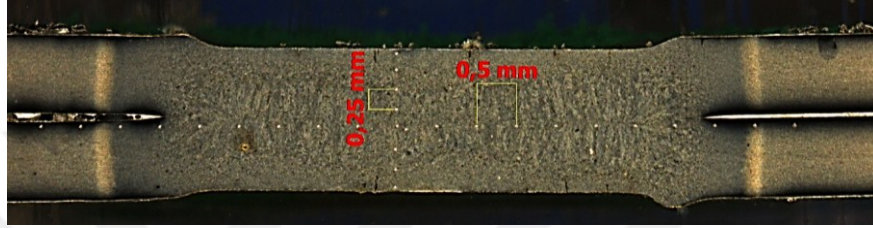
(b) 5 mm çekirdek çapı

| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|---------------|-------------|---------|
| 261     | 322         | 436           | 293         | 269     |

(c) 6 mm çekirdek çapı

| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|---------------|-------------|---------|
| 262     | 308         | 451           | 335         | 260     |

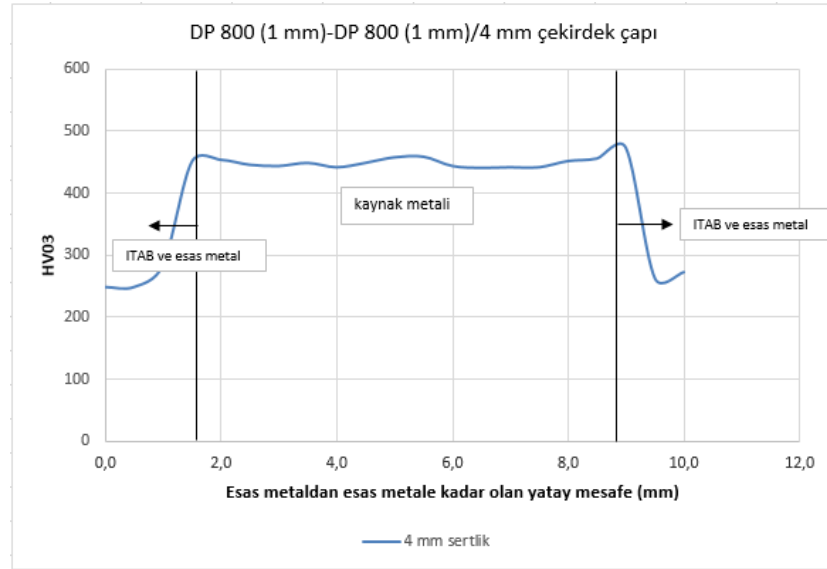
Tablo 5.2.'de görülebileceği üzere DP 800 sac kombinasyonunda kaynak bölgesinde esas metale göre ciddi bir sertlik artışı görülmektedir. Bunun sebebi bu kombinasyonda kaynak bölgesinin martenzitik yapıda olmasıdır. Kaynak bölgesi ve ısı tesiri altında kalan bölgeyi daha iyi analiz etmek için DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kombinasyonu için 4, 5, 6 mm çekirdek çapına kaynaklı bağlantıların sertlik taramaları Şekil 5.25.'de gösterildiği gibi yatay (0,5 mm aralıklı) ve dikey (0,25 mm aralıklı) doğrultuda yapılmıştır.



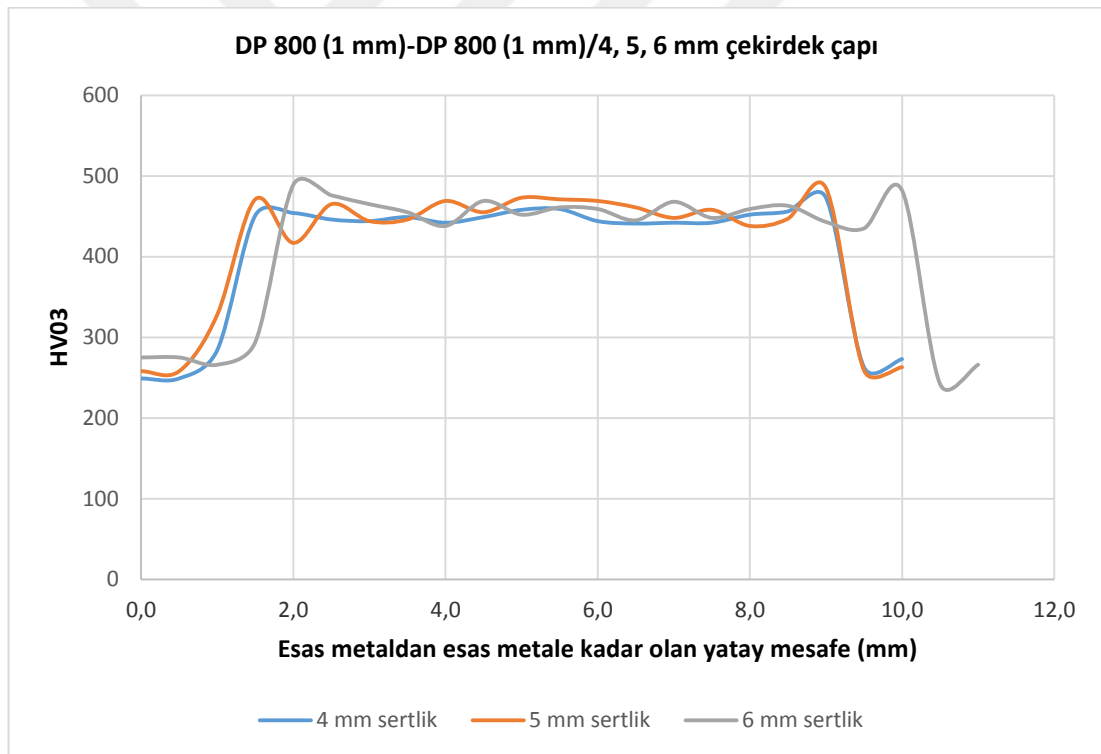
Şekil 5.25. Sertlik ölçümü yapılan doğrultular

4 mm çekirdek çapına sahip bağlantıda sertlik taraması sonucu oluşan mikrosertlik profili Şekil 5.26.'da gösterilmektedir. Direnç nokta kaynağında iyi bir kaynak mukavemeti için ısıdan etkilenen bölgenin dar olması istenmektedir. Kaynak akımı ile çekirdek çapı büyüklüğü doğru orantılıdır. Bu çalışma kapsamında elde edilen 4, 5, 6 mm çekirdek çapları diğer kaynak parametreleri sabit tutularak kaynak akımının artırılması ile elde edilmiştir. 6 mm çekirdek çapına sahip numunelerde kaynak akımının dolayısıyla IEB uzunluğunun daha fazla olması beklenmektedir. Şekil 5.27.'de sertlik profilleri incelendiğinde 6 mm çekirdek çapına sahip numunenin IEB bölgesinin 4 ve 5 mm çekirdek çapına sahip numunelere göre daha geniş olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 5.28.'de dikey yönde yapılan sertlik taraması sonuçları gösterilmektedir. Kaynak akımının, dolayısıyla çekirdek çapının artması dikey yöndeki sertlik dağılımını önemli ölçüde etkilememektedir.

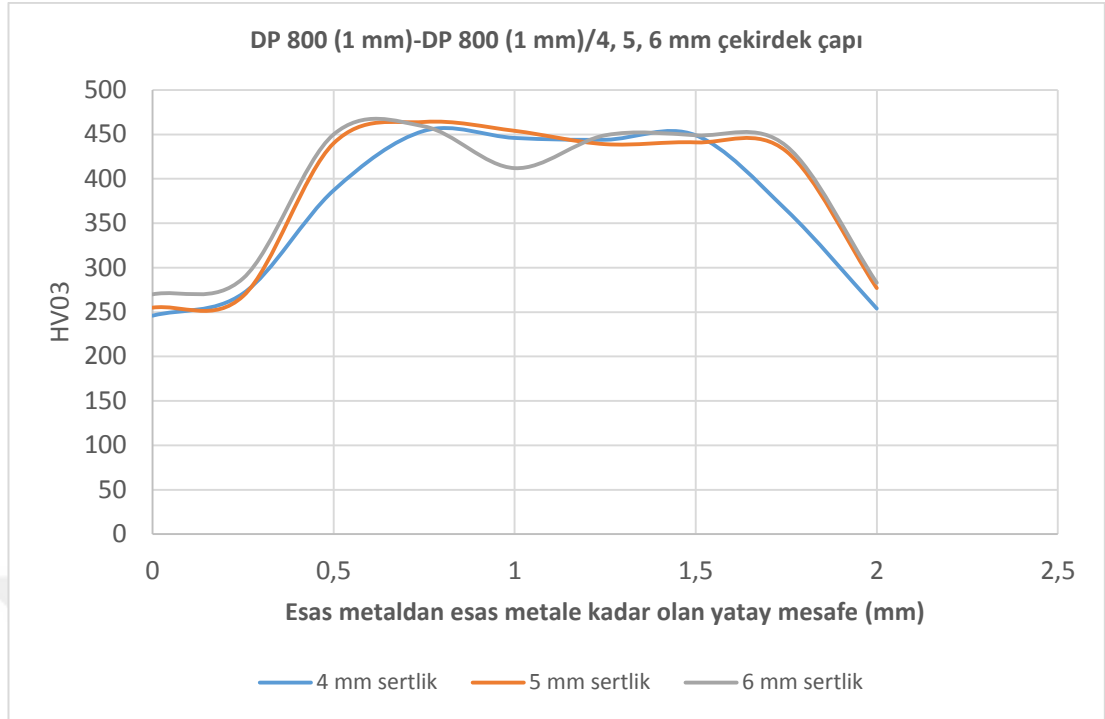




Şekil 5.26. DP 800 (1 mm)- DP 800 (1 mm) 4 mm çekirdek çapına sahip numunenin yatay sertlik taraması



Şekil 5.27. DP 800 (1 mm)- DP 800 (1 mm) 4, 5, 6 mm çekirdek çapına sahip numunelerin yatay sertlik taraması



Şekil 5.28. DP 800 (1 mm)- DP 800 (1 mm) 4, 5, 6 mm çekirdek çapına sahip numunelerin dikey sertlik taraması

Tablo 5.3. TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantının sertlik dağılımı (HV) (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı

(a) 4 mm çekirdek çapı

| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|---------------|-------------|---------|
| 250     | 255         | 261           | 243         | 256     |

(b) 5 mm çekirdek çapı

| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|---------------|-------------|---------|
| 257     | 240         | 252           | 243         | 247     |

(c) 6 mm çekirdek çapı

| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|---------------|-------------|---------|
| 252     | 232         | 222           | 237         | 246     |

Tablo 5.3.'de verilen TWIP sac kombinasyonu için sertlik değerleri incelendiğinde kaynak bölgesinde herhangi bir sertlik artışının olmadığı gözlemlenmektedir. Kaynak esnasında bu kombinasyonda bir faz dönüşümü gerçekleşmediği için sertlik değişimi de meydana gelmemektedir. Kaynak akımı değiştirilerek elde edilen 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantılar da kaynak bölgesinde sertlik artışı oluşmamaktadır. Tablo 5.4.'de TWIP-DP sac kombinasyonu için mikro sertlik değerleri verilmektedir.

Tablo 5.4. TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının sertlik dağılımı (HV) (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı

(a) 4 mm çekirdek çapı

| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi        | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|----------------------|-------------|---------|
| 276     | 260         | TWIP: 258<br>DP: 468 | 307         | 253     |

(b) 5 mm çekirdek çapı

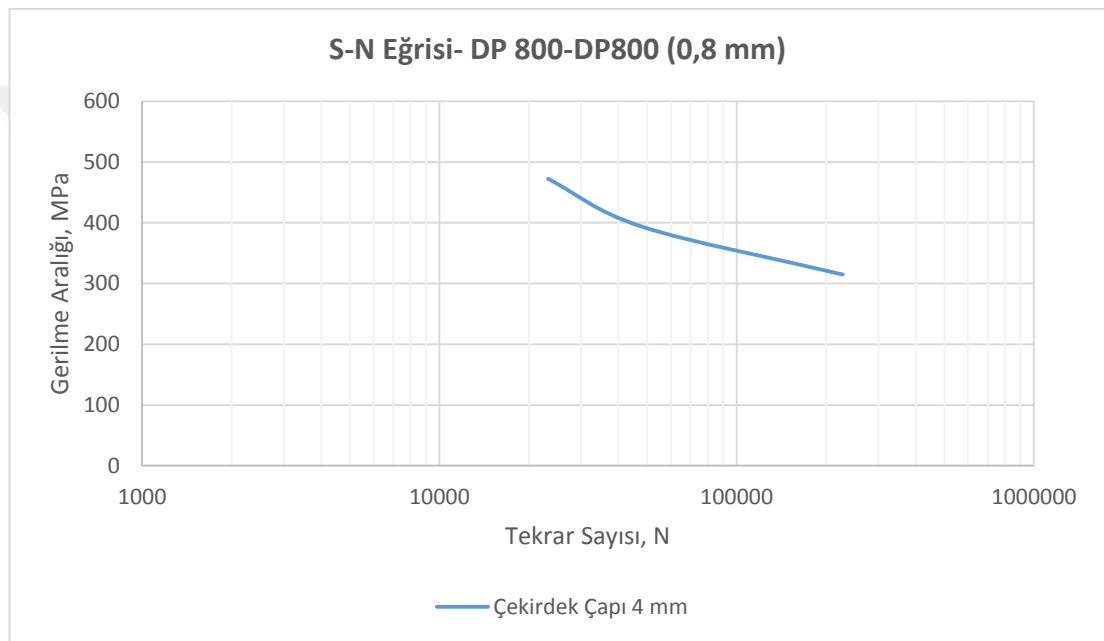
| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi        | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|----------------------|-------------|---------|
| 245     | 257         | TWIP: 254<br>DP: 451 | 318         | 252     |

(c) 6 mm çekirdek çapı

| Üst sac | Üst Sac IEB | Punto bölgesi        | Alt Sac IEB | Alt sac |
|---------|-------------|----------------------|-------------|---------|
| 240     | 295         | TWIP: 245<br>DP: 447 | 307         | 255     |

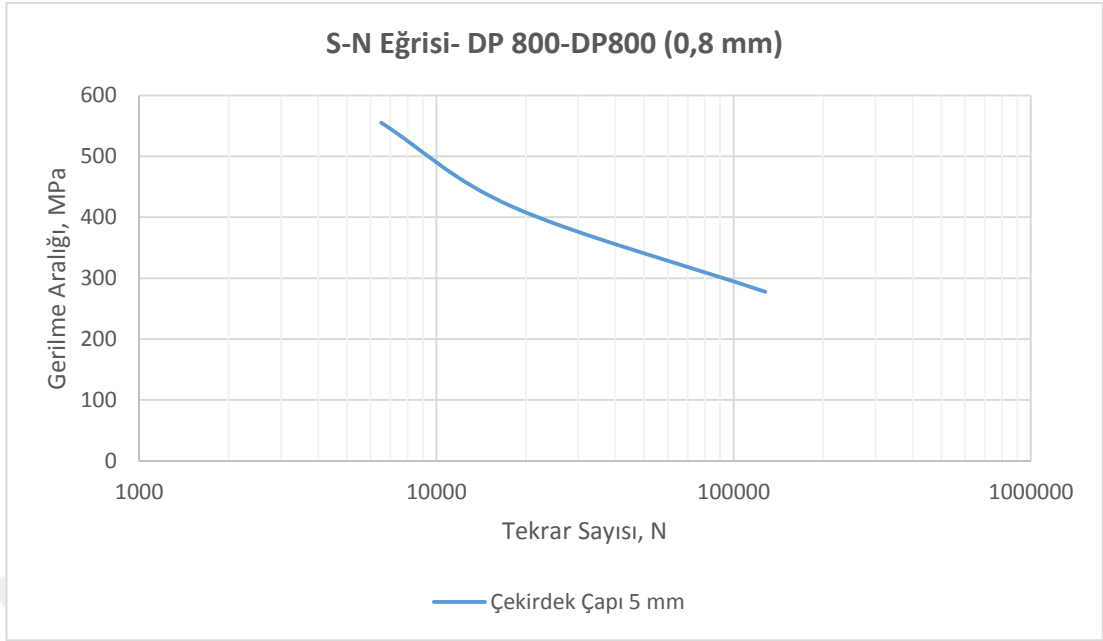
### 5.8. Kaynaklı Bağlantıların S-N Eğrileri ve Yorulma Davranışlarının Karşılaştırılması

Her biri 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapına sahip toplam dört farklı kaynaklı bağlantı tipinden oluşan bir dizi deney numunesine farklı büyüklüklerde ve giderek azalan değerlerde dinamik yükler uygulanmıştır. Elde edilen değerler gerilme aralığı (S), çevrim sayısı (N) grafiklerinde verilmiştir. Şekil 5.29.'da 0,8 mm kalınlığında DP 800 sac çifti için elde edilen S-N eğrileri gösterilmektedir.

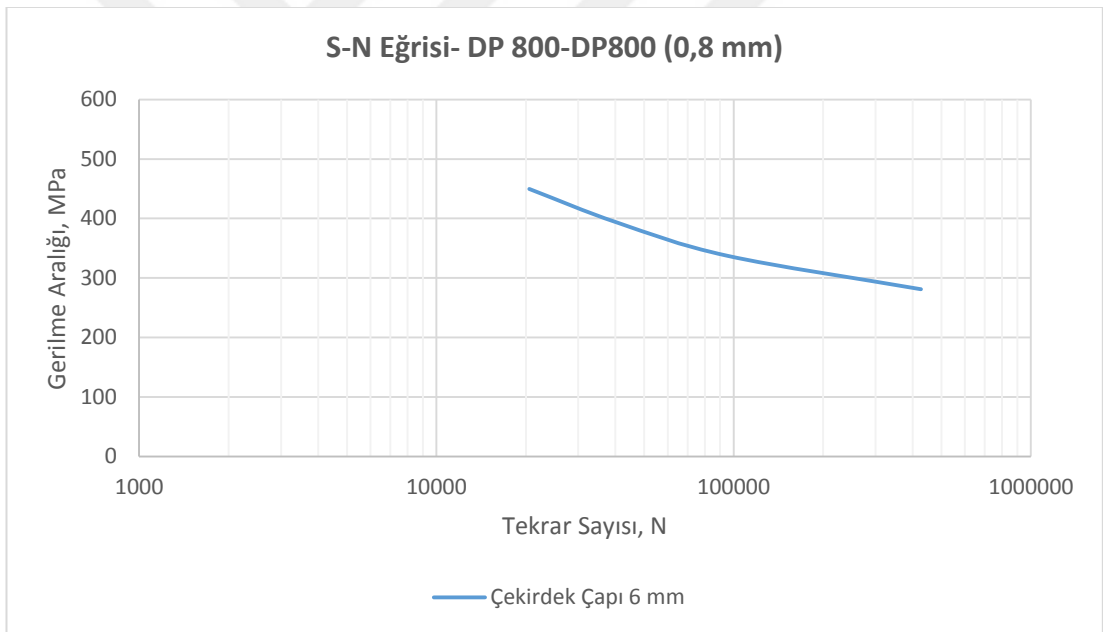


(a)

Şekil 5.29. DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı



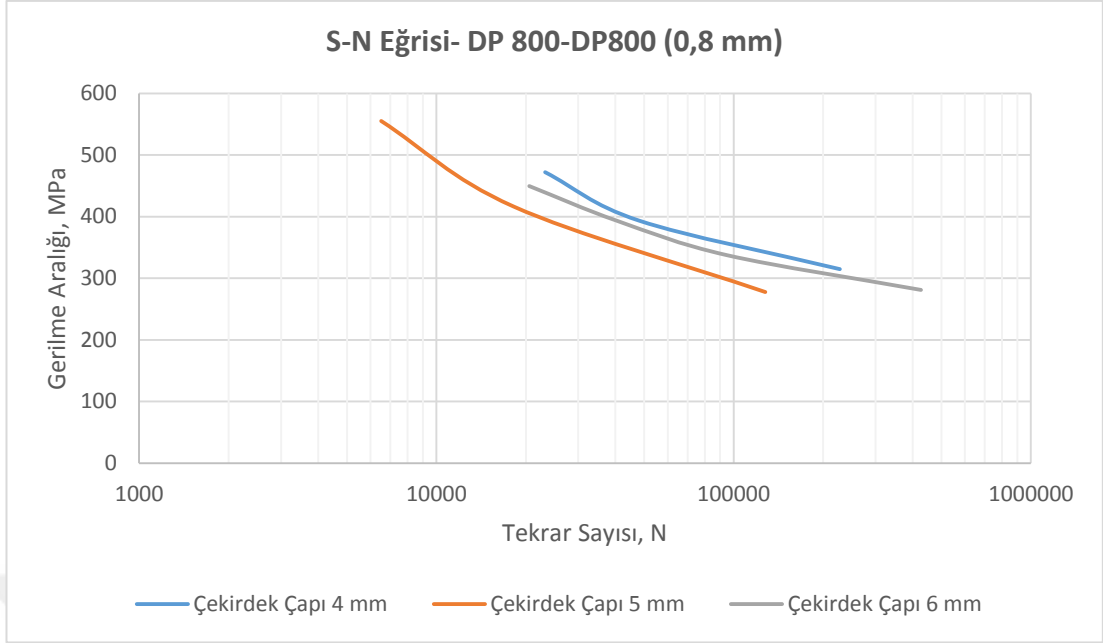
(b)



(c)

Şekil 5.29. (Devamı)

Şekil 5.30.'da DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantının 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapları için toplu gösterimi verilmektedir.



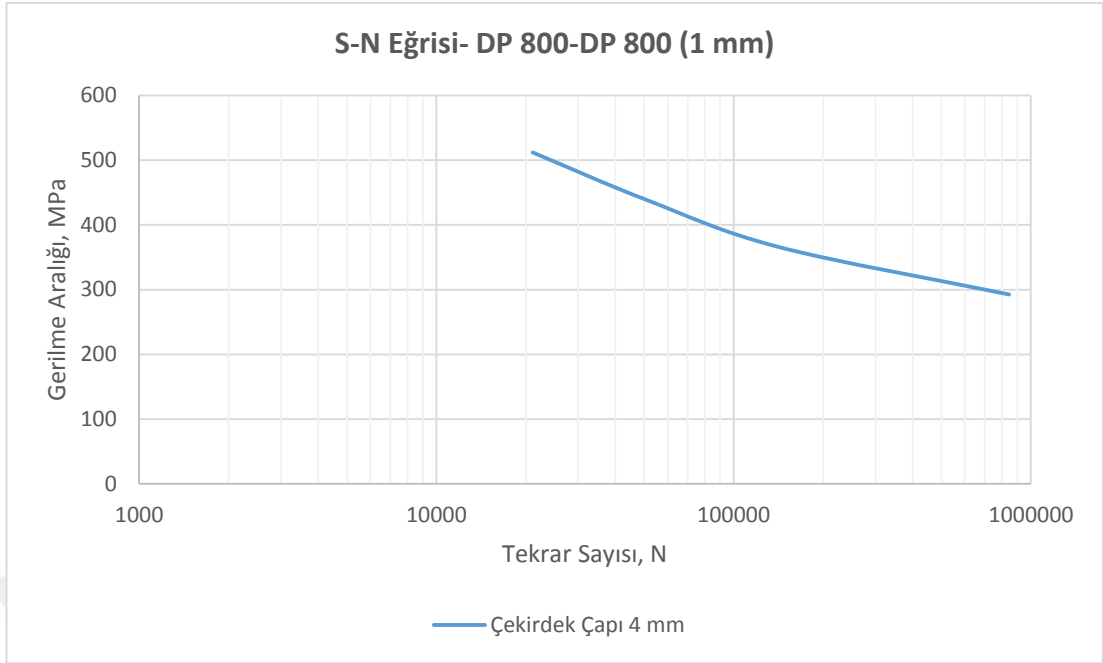
Şekil 5.30. DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapı

Şekil 5.30.'da elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde en yüksek yorulma ömrü 4 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantıya aittir. Bu bağlantı tipinde, 4 mm çekirdek çapına sahip numuneler için 300-400 MPa gerilme aralığında 100.000 çevrim üzerinde en yüksek yorulma ömürleri tespit edilmiştir. Aynı şekilde 5 mm çekirdek çapı için 300-400 MPa gerilme aralığında yorulma ömrü 100.000 çevrimin altında, 200-300 MPa aralığı için 100.000 çevrimin üstünde tespit edilmiştir. 6 mm çekirdek çapına sahip numunede en yüksek yorulma ömrü yaklaşık 300 MPa gerilme aralığında 400.000 çevrimin üstünde tespit edilmiştir. Şekil 5.31.'de yorulma testi sonrası hasara uğrayarak kopan DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantılar gösterilmektedir.

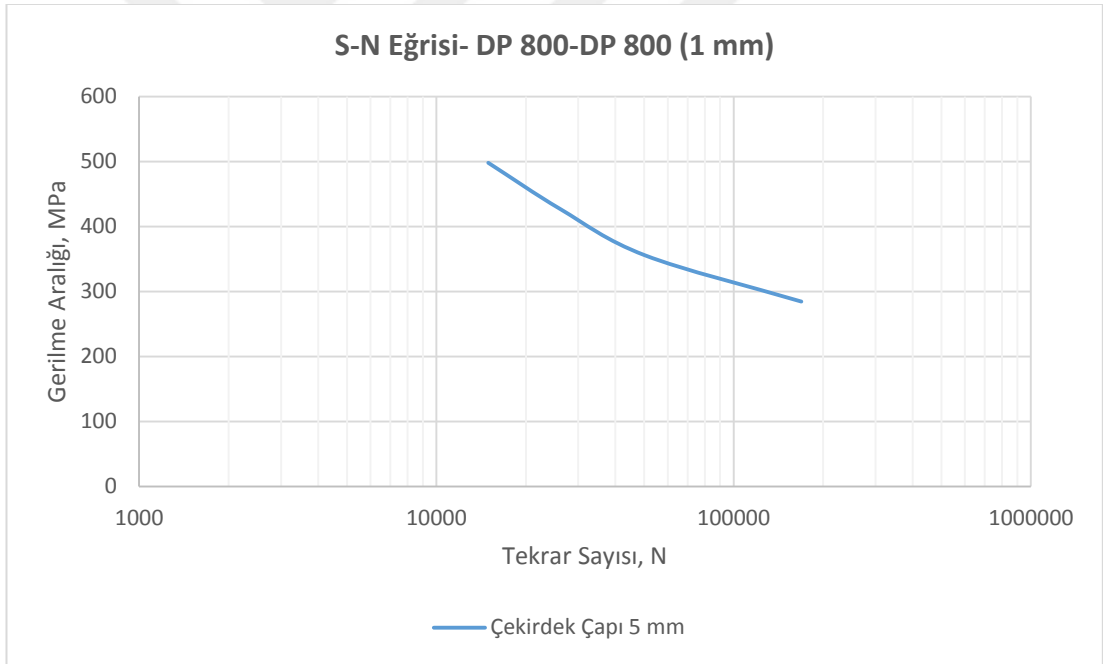


Şekil 5.31. Yorulma testi sonucunda kopan DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm) kaynaklı bağlantılar

Şekil 5.32.'de gösterilen 1 mm kalınlığında DP 800 sac çifti için elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde, en yüksek yorulma ömrü 4 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantıya aittir. Bu bağlantı tipinde, 4 mm çekirdek çapına sahip numuneler için 400-500 MPa gerilme aralığında yorulma ömürleri 100.000 çevrimin altında tespit edilirken, 300-400 MPa gerilme aralığında en yüksek yorulma ömrü 800.000 çevrim mertebelerine kadar çıkmıştır. 5 mm çekirdek çapına sahip numuneler için 300-400 MPa gerilme aralığında yorulma ömürleri 100.000 çevrimin altında tespit edilmiştir. 200-300 MPa gerilme aralığında hem hem 5 hem de 6 mm çekirdek çapına sahip numunelerin 100.000 çevrim üzerinde en yüksek yorulma ömürleri tespit edilmiştir. Şekil 5.34.'de yorulma testi sonrası hasara uğrayarak kopan DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantılar gösterilmektedir.



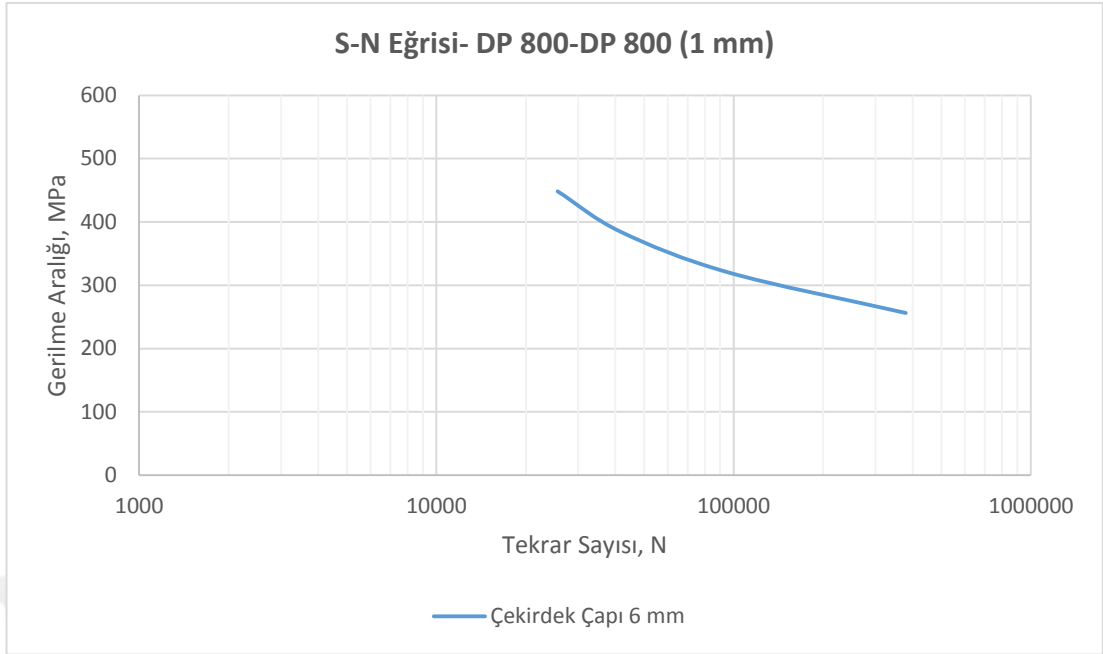
(a)



(b)

Şekil 5.32. DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı

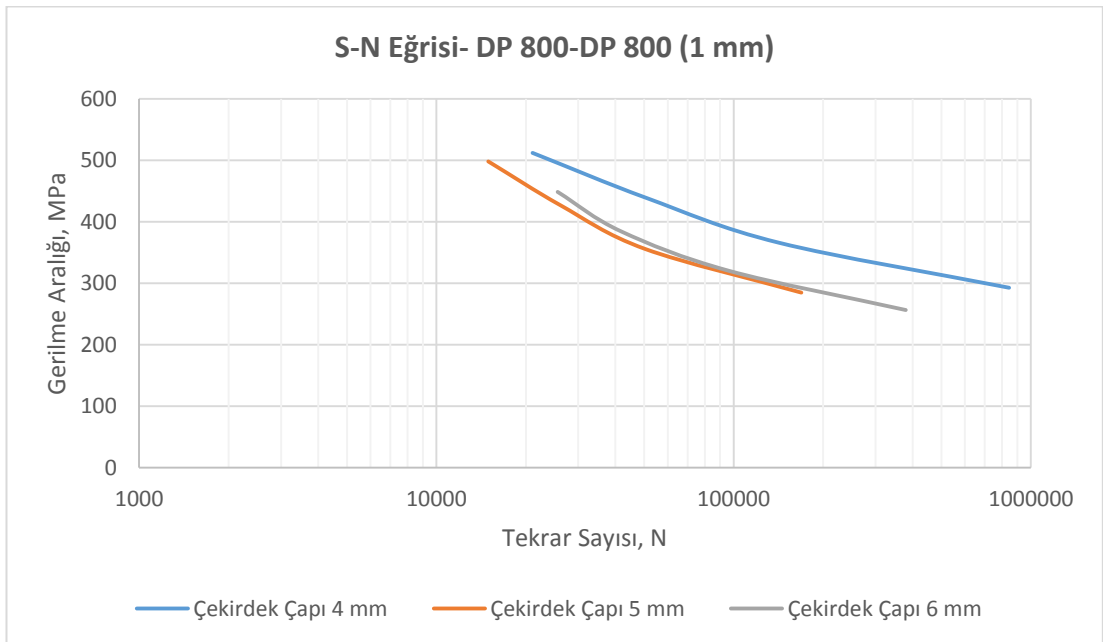




(c)

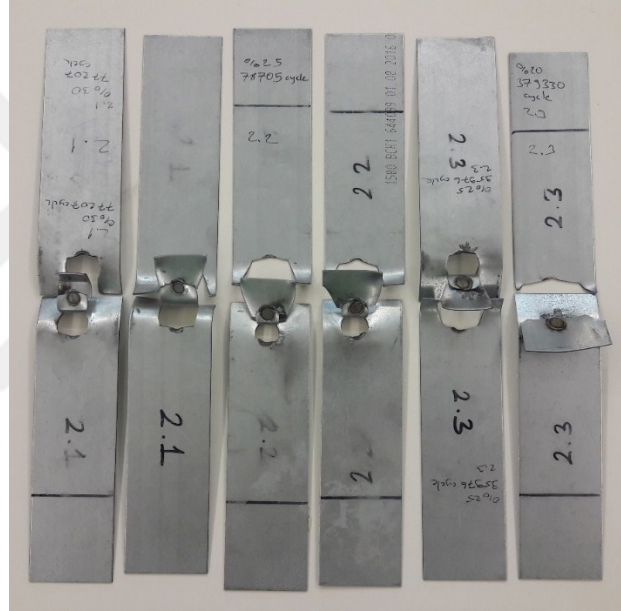
Şekil 5.32. (Devamı)

Şekil 5.33.'de DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapları için toplu gösterimi verilmektedir.



Şekil 5.33. DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapı

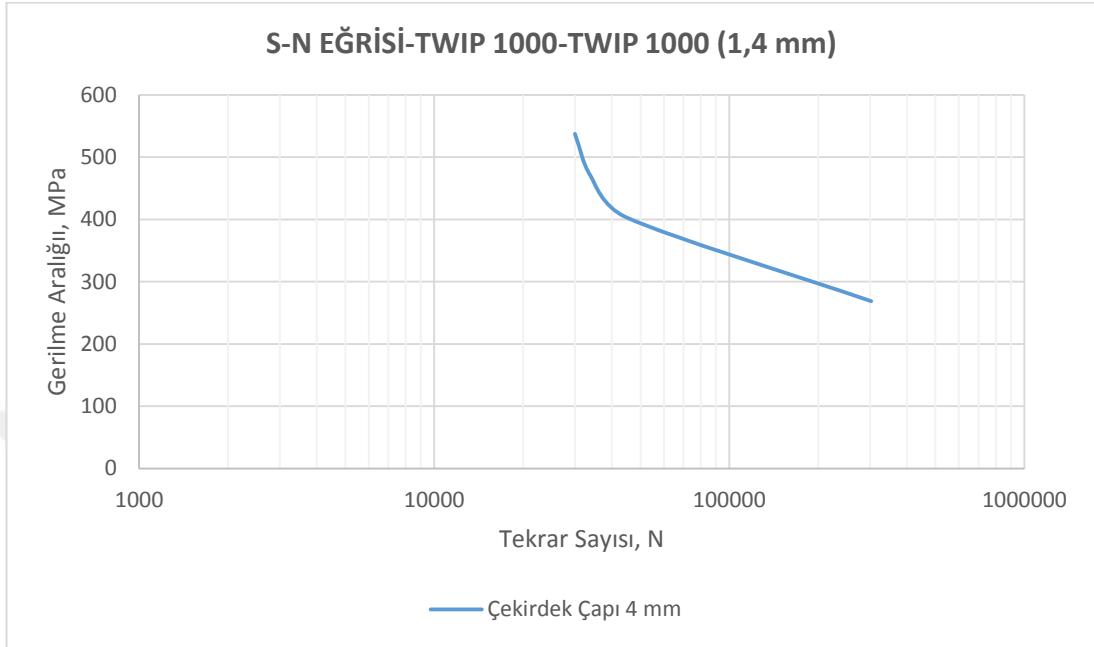
Direnç nokta kaynaklı bağlantılarda IEB genişliği arttıkça kaynaklı bağlantının yorulma ömrü azalmaktadır. Bölüm 5.7.'de elde edilen mikrosertlik ölçüm sonuçlarına göre 6 mm çekirdek çapına sahip numunede ısı tesiri altında kalan bölgenin 4 ve 5 mm çekirdek çapına sahip numunelerdeki IEB'e göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak da ısı girdisinin artmasıyla ısı tesiri altında kalan bölgenin genişlemesi gösterilebilir. Şekil 5.33.'de gösterilen S-N eğrileri incelendiğinde dar IEB'e sahip 4 mm çekirdek çaplı kaynaklı bağlantıların yorulma ömürleri, daha geniş IEB'e sahip 6 mm çekirdek çaplı kaynaklı bağlantıların yorulma ömürlerinden yüksektir.



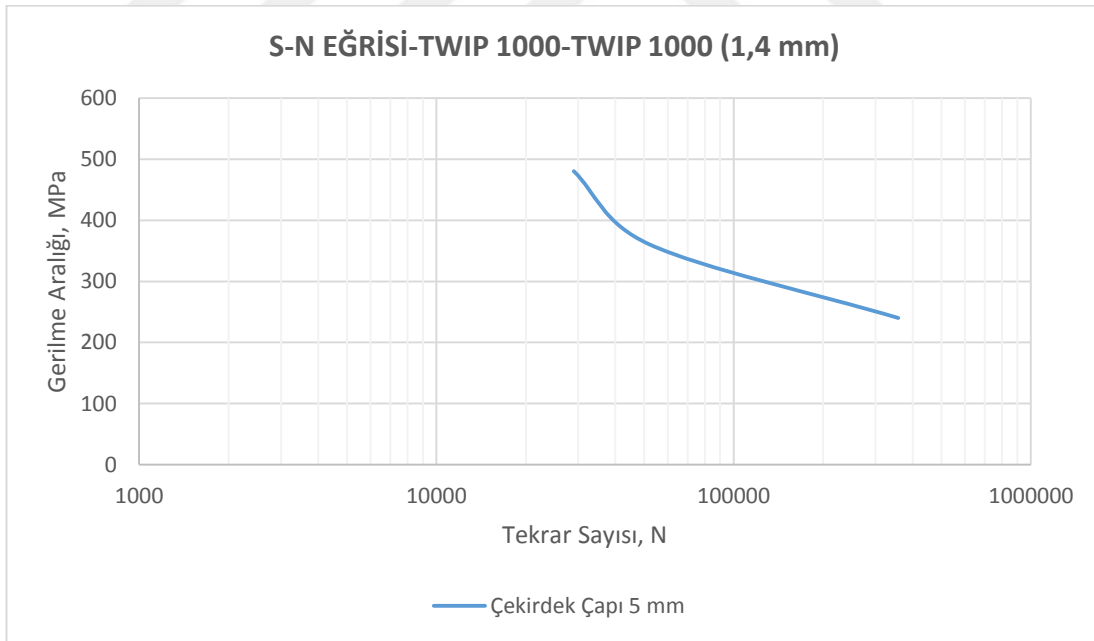
Şekil 5.34. Yorulma testi sonucunda kopan DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantılar

Şekil 5.35.'de gösterilen 1,4 mm kalınlığında TWIP 1000 sac çifti için elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde, en yüksek yorulma ömrü 4 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantıya aittir. Bu bağlantı tipinde, 4 mm çekirdek çapına sahip numuneler için en yüksek yorulma ömrü 270 MPa aralığında 300.000 çevrim sayısında görülürken, 5 mm çekirdek çapına sahip numunelerde bu değer 240 MPa aralığında 340.000 çevrim olarak tespit edilmiştir. 6 mm çekirdek çapına sahip numune için 300-400 MPa gerilme aralığında yorulma ömrü 100.000 çevrim sayısının altında kalırken, 200-300 MPa gerilme aralığında yorulma ömrü 100.000 çevrim sayısının üzerinde tespit edilmiştir. Şekil 5.37.'de yorulma testi sonrası hasara

uğrayarak kopan TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantılar gösterilmektedir.

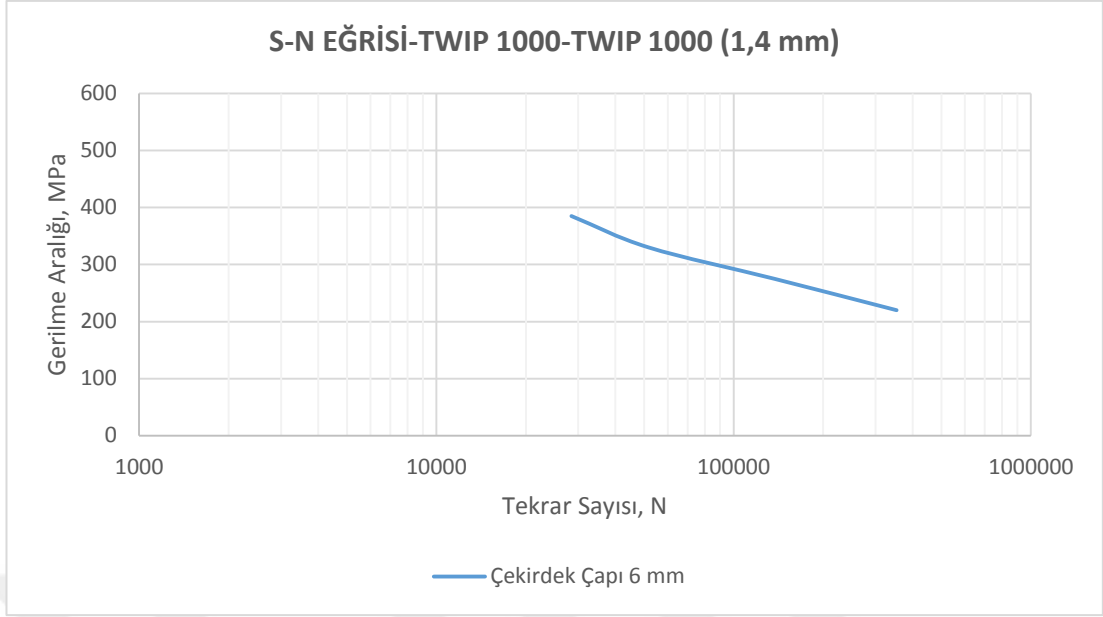


(a)



(b)

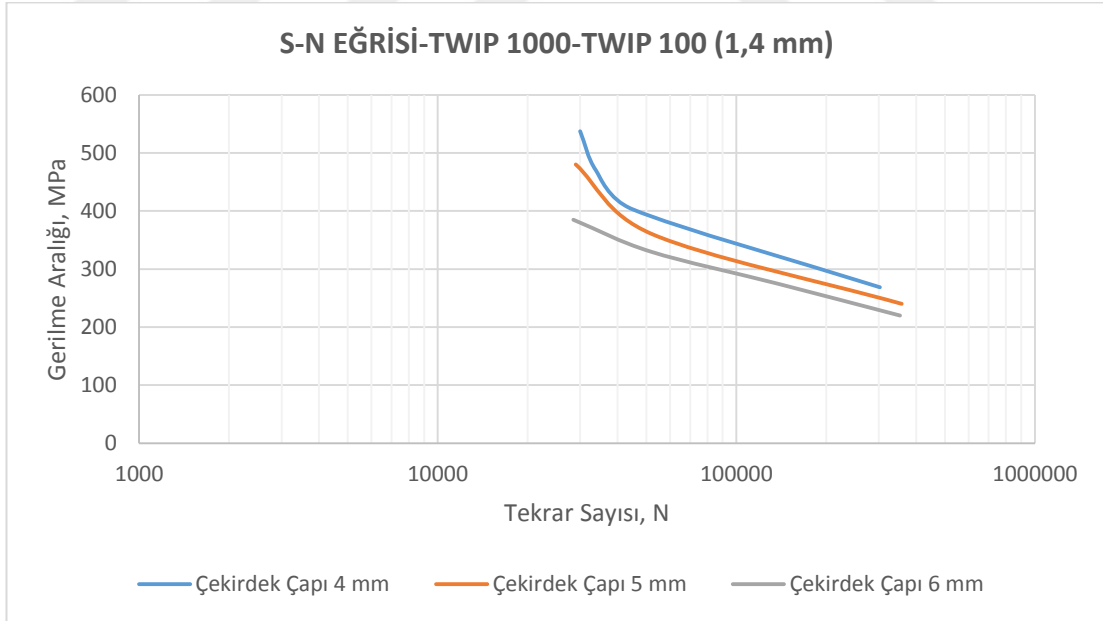
Şekil 5.35. TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı



(c)

Şekil 5.35. (Devamı)

Şekil 5.36.'da TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantının 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapları için toplu gösterimi verilmektedir.

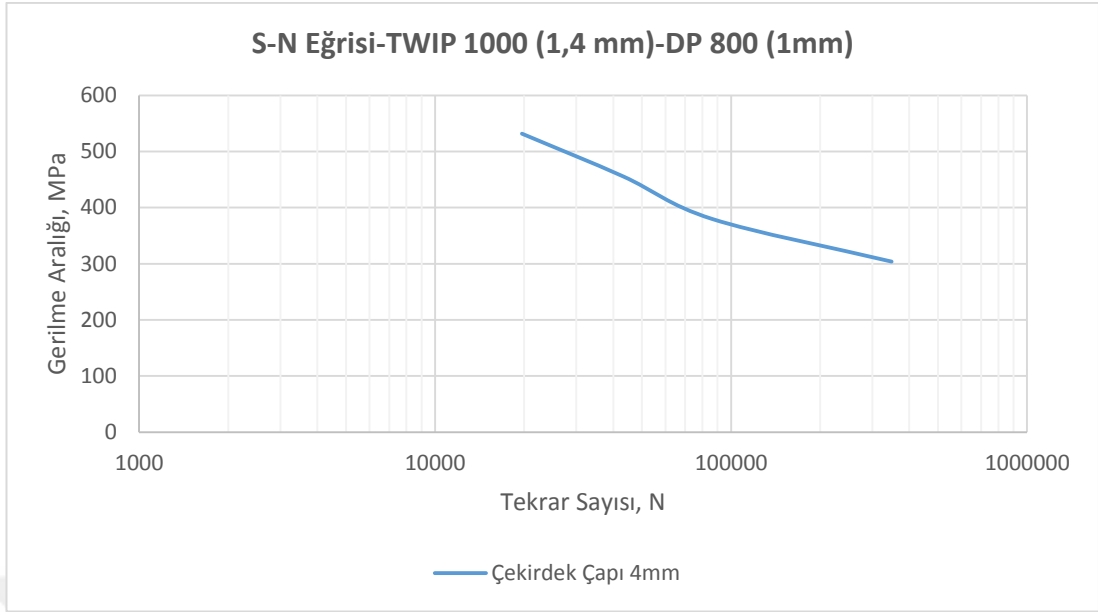


Şekil 5.36. TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi 4, 5 ve 6 mm ç. çapı

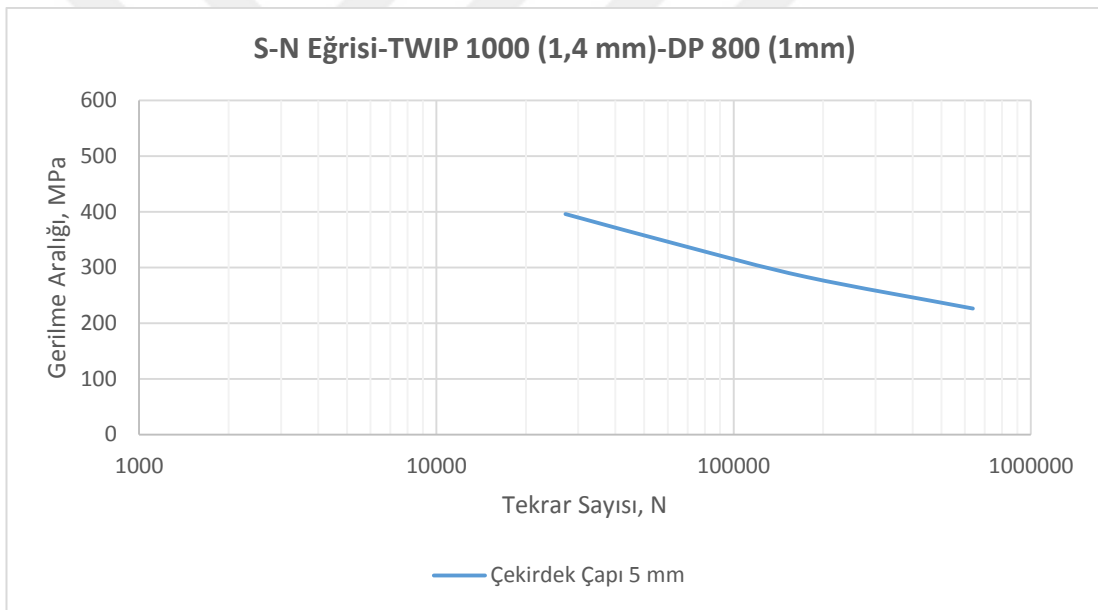


Şekil 5.37. Yorulma testi sonucunda kopan TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) kaynaklı bağlantılar

Şekil 5.38.'de gösterilen 1,4 mm kalınlığında TWIP 1000 ile 1 mm kalınlığındaki DP 800 sac çifti için elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde, en yüksek yorulma ömrü 4 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantıya aittir. Bu bağlantı tipinde, 4 mm kaynak çekirdek çapına sahip numuneler 300-400 MPa gerilme aralığında 100.000 çevrim sayısı üzerinde en yüksek yorulma ömrüne sahiptir. 5 mm çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantı ise 100.000 çevrim sayısının üzerine 200-300 MPa aralığında çıkabilmektedir. Çekirdek çapı arttıkça S-N eğrilerindeki düşüş belirginleşmektedir. Şekil 5.40.'da yorulma testi sonrası hasara uğrayarak kopan TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantılar gösterilmektedir.

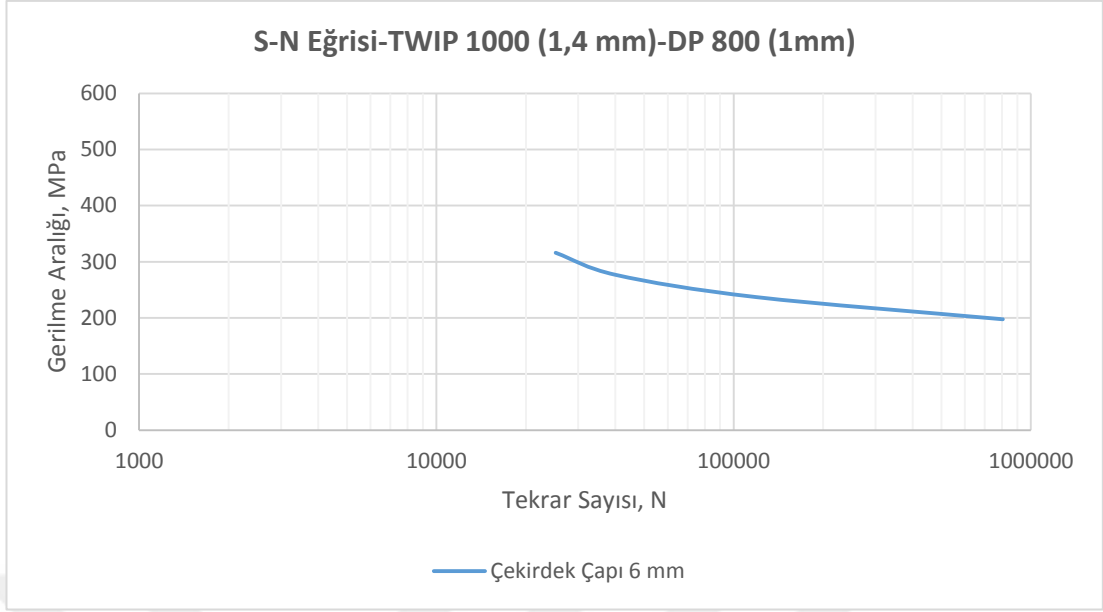


(a)



(b)

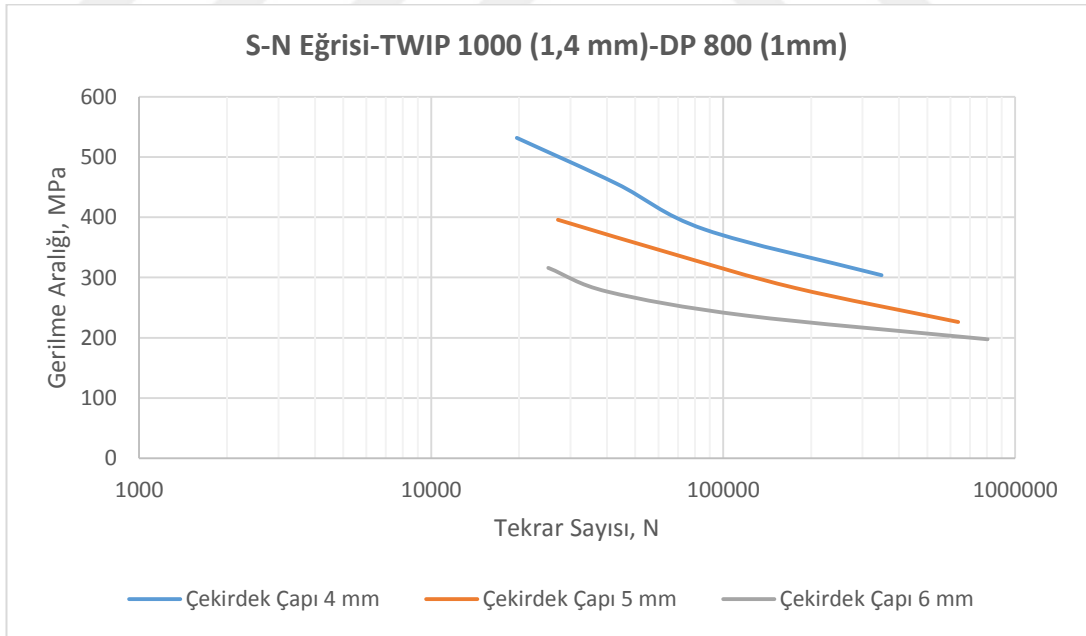
Şekil 5.38. TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm çekirdek çapı



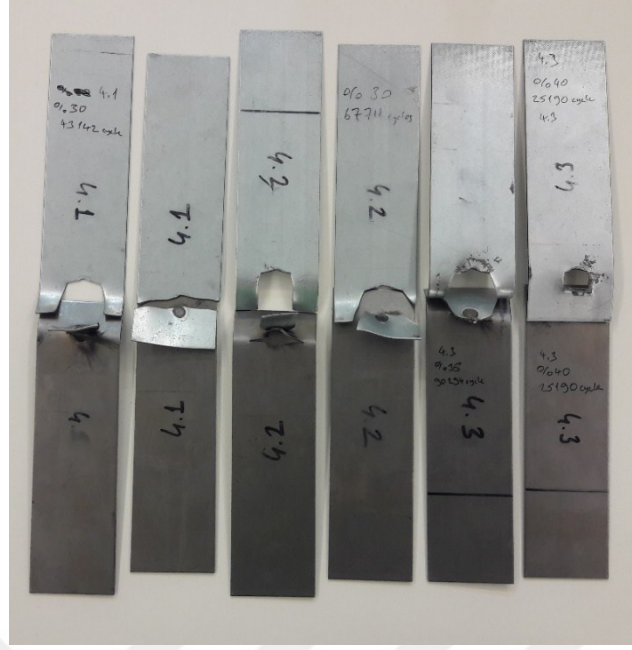
(c)

Şekil 5.38. (Devamı)

Şekil 5.39.'da TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapları için toplu gösterimi verilmektedir.



Şekil 5.39. TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantının S-N eğrisi 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapı



Şekil 5.40. Yorulma testi sonucunda kopan TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kaynaklı bağlantılar

Nokta kaynaklı bağlantılarda çekirdek çapının artması kaynak bölgesinin gevrekleşmesine ve çentik etkisinin artmasına yol açmaktadır. Bu sayede çatlak daha hızlı ilerleyerek yorulma ömrünü azaltmaktadır. Büyük çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantıların S-N eğrilerinde daha bariz bir düşüş meydana gelmektedir. Bu durum en belirgin olarak TWIP-DP sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda görülmektedir. En yüksek yorulma sınırı gösteren bağlantı DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) saclardan oluşan bağlantıdır. En düşük yorulma sınırı ise, TWIP (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) saclardan oluşan bağlantıda görülmüştür.



## BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Genel Sonuçlar

Bu doktora tez çalışması kapsamında otomotiv sektöründe gövde imalatında sıklıkla kullanılan dual fazlı çelikler ve araç hafifletme çalışmaları kapsamında kullanımı yaygınlaşması beklenen TWIP çelikleri kullanılmıştır. Bu çelik saclar kendi aralarında ve birbirleriyle farklı çekirdek çapları elde edecek şekilde elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinden kaynak akımı belirli aralıklarla değiştirilerek her bir deney grubu için 4-5-6 mm kaynak çekirdek çapı elde edilmiştir. Böylece çekirdek çapının kaynaklı bağlantının mekanik, metalurjik ve yorulma dayanımı üzerine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen kaynaklı bağlantıların kaynak kalitesini tespit etmek için ultrasonik kaynak kontrolü yapılmıştır. Nokta kaynaklı bağlantıda meydana gelen iç yapı değişikliklerini tespit etmek için esas metal, IEB (Isıdan etkilenen bölge), kaynak metali ışık mikroskobu ve SEM ile gözlemlenmiştir. Bu bölgelerdeki sertlik değerlerini incelemek için mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Nokta kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla çekme-makaslama testi yapılmıştır. Bu mekanik özelliklerden yola çıkarak, yorulma testleri gerçekleştirilmiş ve bağlantıların S-N eğrileri çıkartılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- DP 800 (0,8 mm)-DP 800 (0,8 mm), DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm), TWIP 1000 (1,4 mm)- TWIP 1000 (1,4 mm), TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) sac olarak eşleştirilen numuneler 7 kA ile 11 kA arasında 0,5 kA'lık aralıklarla artan kaynak akım değerlerinde birleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tüm kombinasyonların 4, 5 ve 6 mm çekirdek çapına sahip nokta kaynaklı bağlantıları elde edilmiştir. İstenilen bu çekirdek çaplarını elde etmek için bir dizi ön nokta kaynaklı birleştirme yapılmıştır. Elde edilen numunelerde genel olarak 4 tip kombinasyonda da kaynak akımının

artmasıyla çekirdek çapının büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bu durum kaynak akımının artmasıyla, kaynak bölgesindeki ısı girdisinin artması şeklinde açıklanabilmektedir. Düşük akım değerlerinde birleştirilen bağlantılarda, kaynak bölgesine verilen ısı düşük olduğu için oluşan çekirdek çapı küçük olmaktadır. Bu tip bağlantılarda kaynak bölgesinde tam bir erime olmadığı için ayırma testi sonucunda kopma kaynak bölgesinden olmaktadır. Yüksek kaynak akım değerlerinde birleştirilen bağlantılarda kaynak bölgesinde derin elektrot izleri, fişkirmalar, elektrot ile esas metal arasında yapışmalar meydana gelebilmektedir. Bu durum kaynak kalitesini olumsuz yönde etkilemekte ve bağlantıların çekirdek çapları küçülmektedir.

- DP 800 ve TWIP 1000 saclarından oluşan 4 kombinasyon için de çekme-makaslama testi gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda nokta kaynaklı bağlantıların kaynak bölgesinden değil parçadan hasara uğradığı ve kopduğu gözlemlenmiştir. Çekme-makaslama testi sonuçları incelendiğinde genel olarak bağlantının çekirdek çapı arttıkça çekme mukavemetinin de arttığı gözlemlenmektedir. En yüksek çekme dayanımına sahip bağlantı tipi TWIP 1000 (1,4 mm)-TWIP 1000 (1,4 mm) dir. TWIP 1000 çeliğinin çekme dayanımı DP 800 çeliğine göre daha yüksek olduğu için direnç nokta kaynaklı bağlantısının çekme dayanımı da daha yüksektir. TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) kombinasyonun çekme dayanımı, DP 800 (1mm)-DP 800 (1 mm) kombinasyonun çekme dayanımına göre daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi farklı malzemelerin direnç nokta kaynağında karşılaşılan ısıl dengesizlik ve simetrik oluşmayan kaynak çekirdeğidir. Birleştirilecek sacların farklı malzemelerden olmaları durumunda elektriksel dirençleri farklı olacağından aynı ısı girdisinde çekirdek çapı, direnci yüksek olan sac tarafında daha çok şekillenecek ve bağlantı bölgesinde mukavemet düşüşüne sebep olacaktır.
- DP 800 sacının kendi arasında yaptığı kombinasyonlarda kaynak bölgesinde esas metale göre ciddi bir sertlik artışı görülmektedir. Bunun sebebi bu kombinasyonda kaynak bölgesinin martenzitik yapıda olmasıdır. Direnç

nokta kaynağında iyi bir kaynak mukavemeti için ısıdan etkilenen bölgenin dar olması istenmektedir. Kaynak akımı ile çekirdek çapı büyüklüğü doğru orantılıdır. Bu çalışma kapsamında elde edilen 4, 5, 6 mm çekirdek çapları diğer kaynak parametreleri sabit tutularak kaynak akımının artırılması ile elde edilmiştir. Yatay doğrultuda ölçülen sertlik profilleri incelendiğinde 6 mm çekirdek çapına sahip numunenin IEB bölgesinin 4 ve 5 mm çekirdek çapına sahip numunelere göre daha geniş olduğu tespit edilmiştir. Kaynak akımının, dolayısıyla çekirdek çapının artması dikey yöndeki sertlik dağılımını ise önemli ölçüde etkilememektedir. TWIP sacının kendi arasındaki kombinasyonu için sertlik değerleri incelendiğinde kaynak bölgesinde herhangi bir sertlik artışının olmadığı gözlemlenmektedir. Kaynak esnasında bu kombinasyonda bir faz dönüşümü gerçekleşmediği için sertlik değişimi de meydana gelmemektedir.

- Direnç nokta kaynaklı bağlantılarda IEB genişliği arttıkça kaynaklı bağlantının yorulma ömrü azalmaktadır. Bunun sebebi, IEB'in sertliğinin ve mukavemetinin düşük olmasıdır. Çekirdek çapı arttıkça kaynaklı bağlantıda oluşan IEB genişliği artacağından yorulma ömrü azalmaktadır. Bir diğer mekanizma ise nokta kaynaklı bağlantılarda çekirdek çapının artması, kaynak bölgesinin gevrekleşmesine ve çentik etkisinin artmasına yol açmaktadır. Bu bölgelerde dinamik zorlama esnasında oluşan gerilme yığılması nedeniyle çatlak daha hızlı ilerleyerek yorulma ömrünü azaltmaktadır. Büyük çekirdek çapına sahip kaynaklı bağlantıların S-N eğrilerinde daha bariz bir düşüş meydana gelmektedir. Bu durum en belirgin olarak TWIP-DP sac çiftlerinden oluşan bağlantılarda görülmektedir. En yüksek yorulma sınırı gösteren bağlantı DP 800 (1 mm)-DP 800 (1 mm) saclardan oluşan bağlantıdır. En düşük yorulma sınırı ise, TWIP 1000 (1,4 mm)-DP 800 (1 mm) saclardan oluşan bağlantıda görülmüştür.

## 6.2. Konu ile İlgili İleride Yapılabilecek Çalışmalar

Bu doktora tez çalışmasında, bir binek araç gövdesinde kullanılan dual fazlı çelik sacların ve kullanılması planlanan yeni nesil TWIP çelik sacların direnç nokta kaynaklı birleştirmelerinin mekanik, metalurjik ve yorulma davranışları incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalar ışığında konu ile ilgili yapılabilecek ileri araştırmalar şu şekildedir:

- Araç gövde imalatında son yıllarda birçok yeni birleştirme metodu geliştirilmektedir. Otomotiv sektörü için hala en ekonomik ve seri imalata en uygun birleştirme yöntemi olarak hali hazırda kullanılan direnç nokta kaynağının yerini zamanla yeni nesil birleştirme metotlarının alabileceği düşünülmektedir. Klinç, perçin, yapıştırma, lazer kaynak gibi yeni nesil birleştirme metotları ile birleştirilen bağlantıların mekanik ve yorulma dayanımları araştırılmalıdır.
- Direnç nokta kaynağının mekanik kopma yükünün ve yorulma ömrünün hesaplanması için çok fazla sayıda fiziksel deney yapmak gerekmektedir. Kullanılacak sanal analiz yazılımları, matematiksel model ve çeşitli makrolarla malzeme türü, sac kalınlığı, kaynak parametrelerine duyarlı bir sistem geliştirilerek ile fiziksel test sayısı azaltılabilir. Bu sayede farklı birleştirme kombinasyonlarının mekanik ve dinamik dayanımları için bir kütüphane oluşturulabilir.
- TWIP-DP sac çiftinin nokta kaynağında aynı malzeme ve aynı çapa sahip elektrot kullanıldığından ve bu iki çeliğin elektrik direncinin farklı olmasından dolayı kaynak çekirdeği her iki malzemede aynı büyüklükte oluşmadığı ve bu nedenle kaynak mukavemetinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu farklı iki çeliğin nokta kaynağında elektrot malzemesi ve/veya çapı değiştirilerek ısı dağılımı düzenlenebilir ve her iki malzeme içerisinde aynı boyutta homojen bir kaynak çekirdeği elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Yu, J., Shim, J., Rhee, S., Characteristics of resistance spot welding for 1 GPa grade twin induced plasticity steel. *Mater. Trans.*, 53(11): 2011-2018, 2012.
- [2] Saha, D.C., Park, Y.D., Weldability and liquation cracking characteristics on resistance-spot-welded high-Mn austenitic steel. *Trends in Welding Research, Proceedings of the 9th International Conference, Chicago*, 330-335, 2012.
- [3] Tanegashima, R., Akebono, H., Kato, M., Sugeta, A., The influence of the load variation on fatigue strength of the spot welded joint using the high strength steel. *Procedia Engineer.*, 10: 3405-3410, 2011.
- [4] Kang, J., Chen, Y., Sigler, D., Carlson, B., Wilkinson, D.S., Fatigue behavior of dissimilar aluminum alloy spot welds. *Procedia Engineer.*, 114: 149-156, 2015.
- [5] Duraffourg, S., Argoul, P., Vasseur, E., Cumunel, G., New spot weld fatigue criteria and fatigue data editing technique. *Procedia Engineer.*, 133: 433-453, 2015.
- [6] Becker, N., Gilgert, J., Petit, E.J., Azari, Z., The effect of galvanizing on the mechanical resistance and fatigue toughness of a spotwelded assembly made of AISI410 martensite. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, 596(2) :145-156, 2014.
- [7] Ertas, A.H., Sonmez, F.O., Design optimization of spot-welded plates for maximum fatigue life. *Finite Elem. Anal. Des.*, 47:413-423, 2011.
- [8] Fujii, T., Tohgo, K., Suzuki, Y., Yamamoto, T., Shimamura, Y., Fatigue strength and fatigue fracture mechanism of three-sheet spot weld-bonded joints under tensile-shear loading. *Int. J. Fatigue*, 87:424-434, 2016.
- [9] Khanna, S.K., Long, X., Fatigue behavior of spot welded joints in steel sheets, Woodhead Publishing Limited, 65-100, 2010.
- [10] Kim, D.H., Kim, H.K., Fatigue strength evaluation of cross-tension spot weld joints of cold rolled mild steel sheet. *Mater. Des.*, 30: 3286–3290, 2009.

- [11] Kong, J.P., Han, T.K., Chin, K.G., Park, B.G., Kang, C.Y., Effect of boron content and welding current on the mechanical properties of electrical resistance spot welds in complex-phase steels. *Mater. Des.*, 54:598-609, 2014.
- [12] Mirsalehi, S.E., Kokabi, A.H., Fatigue life estimation of spot welds using a crack propagation-based method with consideration of residual stresses effect. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, 527:6359-6363, 2010.
- [13] Saha, D.C., Chang, I., Park, Y.D., Heat-affected zone liquation crack on resistance spot welded TWIP steels. *Mater. Charact.*, 93:40-51, 2014.
- [14] Shafee, S., Naik, B.B., Sammaiah, K., Resistance spot weld quality characteristics improvement by taguchi method. *Mater. Today-Proc.*, 2: 2595-2604, 2015.
- [15] Shen, W., Yan, R., Barltrop, N., Liu, E., Song, L., A method of determining structural stress for fatigue strength evaluation of welded joints based on notch stress strength theory. *Int. J. Fatigue*, 90:87-98, 2016.
- [16] Wang, B., Duan, Q.Q., Yao, G., Pang, Y.C., Li, X.W., Wang, L., Zhang, Z.F., Investigation on fatigue fracture behaviors of spot welded Q&P 980 steel. *Int. J. Fatigue*, 66:20-28, 2014.
- [17] Xu, F., Sun, G., Li, G., Li, Q., Failure analysis for resistance spot welding in lap-shear specimens. *Int. J. Mech. Sci.*, 78:154-166, 2014.
- [18] Zhang, H., Wei, A., Qiu, X., Chen, J., Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints. *Mater. Des.*, 54:443-449, 2014.
- [19] Zhang, H., Qiu, X., Bai, Y., Xing, F., Yu, H., Shi, Y., Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels. *Mater. Des.* 63:151-158, 2014.
- [20] E. Thomson, *Electrical World*, McGraw-Hill Publishing Company, 307-309, 1886.
- [21] Alcini, W.V., Experimental measurement of liquid nugget heat convection in spot welding. *Weld. J.*, 69(5): 177-180, 1990.
- [22] Akkuş, A., Galvanizli ve östenitik paslanmaz çelik sacların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma dayanımlarının araştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2006.

- [23] Baytemir, M., Ostenitik AISI 310- ferritik AISI 430 paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [24] Gültekin, N., Kaynak Tekniği, Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 1-27, 1985.
- [25] Apps, R.L., Heat development and weld nugget formation in mild steel spot welds. Proceeding of the Conference on Advances in Welding Processes, 4-34, 1970.
- [26] Anık, S., Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Ergör Matbaası, İstanbul, 1983.
- [27] Yamamoto, T., Okuda, T., A study of spot welding of heavy gage mild steel, International Institute of Welding, 1970.
- [28] Güngör, O., Elektrik direnç nokta kaynağının sonlu elemanlar yöntemi ile parametrik analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [29] Kaluç, E., Kaynak Teknoloji El Kitabı, Yıldız Fotokopi, Kocaeli, 2003.
- [30] Lancaster J.F., Metallurgy of Welding, Abington Publishing, 1999.
- [31] Yener, S., Otomotiv sanayinde kullanılan direnç nokta kaynak elektrodu ömrünün deneysel analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1999.
- [32] Anık, S., Kaynak Tekniği El Kitabı, Yöntemler ve Donanımlar, Kansu Matbaacılık, 1991.
- [33] Almus, Z., Nokta direnç kaynağında ara bağlayıcının birleşme özelliklerine etkilerinin araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [34] Eryürek, B., Elektrik direnç kaynağı. Mühendis ve Makine, 24(279): 22-31, 1982.
- [35] Olson, D.L., ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing and Soldering, 9th Edition ASM Metals Handbook, 469-493, 1983.

- [36] Hayat, F., Çift-fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında mho ile kaynak süresinin mekanik özelliklere etkisi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- [37] Aktaş, S., Otomotiv sektöründe kullanılan dual faz sacların direnç nokta kaynağında mekanik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [38] Ünal, E., Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 4340 çeliği ile paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımının araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2003.
- [39] Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company Limited, 750-755, 1988.
- [40] Postacıoğlu, B., Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, İTÜ Matbaası, İstanbul, 492-544, 1981.
- [41] Çapa, M., Metallerin yorulma teorileri. Mühendis ve Makine, 16(188), 1972.
- [42] Güleç, Ş., Aran, A., Çelik ve dökme demirlerin yorulma dayanımı. Tübitak Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Gebze, 1983.
- [43] Orhan, S., Otomotiv sektöründe dinamik yüklere maruz bir kaynaklı bağlantı için yorulma dayanımı değerlendirmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [44] Gurney, T., Fatigue of Welded Structures, Cambridges University Press, 254-260, 1968.
- [45] Radaj, D., Lehreke, H.P. and Greuling, S., 2001. Theoretical fatigue-effective notch stresses at spot welds. Fatigue Fract. Eng. M., 24(5): 293-308, 2001.
- [46] Zhang, S., Approximate stress intensity factors and notch stresses for common spot-welded specimens. Weld. J., 78(5): 173-179, 1999.
- [47] Linder, J., Melander, A., Fatigue strength of spot welded stainless sheet steels exposed to %3 NaCl solution. Int. J. Fatigue, 20(55): 383-388, 1998.



- [48] Talay E., Nokta kaynaklı konstrüksiyonların bilgisayar destekli yorulma ömür hesaplamaları ve deneysel yöntemlerle doğrulanması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [49] Babalık, F.C., Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Dora Yayınları, 2013.
- [50] Sayaca, T., Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 2000 serisi alüminyum alaşımların yorulma davranışının incelenmesi. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [51] Demirkol, M., Mekanik Metalurji Ders Notları, 1991.
- [52] Doruk, E., AA 6082 alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerine temper durumunun etkisi. Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [53] Zeytin H.K., Otomotiv endüstrisi ve çelik: Yeni nesil çelikler: 57H5501. Proje Sonuç Raporu, Tübitak Mam, 2008.
- [54] International iron & steel institute committee on automotive applications; Advanced high strength steel (AHSS) application guidelines, 2006.
- [55] Aydın H., Çelik sacların çift faz ısıl işleminin sonrası mekanik ve mikroyapı özelliklerinin değişimi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [56] Grässel, O., Krüger, L., Frommeyer, G., Meyer, L.W., High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application. Int. J. Plasticity, 16(10-11): 1391-1409, 2000.
- [57] Jung, J., Lee, O., Park, Y., Kim, D., Jin, K., Kim, S., Song, K., Microstructure and mechanical properties of high Mn TWIP steels. J. Korean Inst. Met. Ma., 46: 627-633, 2008.
- [58] Lee, M. G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M. L., Chung, K., Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic–kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, part III: applications. Int. J. Plasticity, 21(5): 915-953, 2005.
- [59] Kılıç, S., Öztürk, F., Otomotiv endüstrisinde TWIP çeliklerin geleceği. 8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi Bildiriler Kitabı, Bursa, 988-996, 2016.

- [60] Sobotka, J., Solfronk, P., and Doubek, P., Using contact-less optical systems to characterize and measure deformation of TWIP materials. *Physcs. Proc.*, 22: 2-7, 2011.
- [61] Cooman B. C., Chin, K., Kim, J., High Mn TWIP steels for automotive applications, *New trends and developments in automotive system engineering*, Intech Open Science, 101-128, 2011.
- [62] [http://www.kosen21.org/nwebzine/webzine\\_view.jsp?webzine\\_seq=79&board\\_seq=959&data\\_seq=1244.](http://www.kosen21.org/nwebzine/webzine_view.jsp?webzine_seq=79&board_seq=959&data_seq=1244.), Eriřim Tarihi: 06.05.2015.
- [63] Ünlükal E., Otomotiv sanayinde kullanılan direnç nokta kaynak kalitesinin arttırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.



## ÖZGEÇMİŞ

Emre Doruk, 01.07.1987'de Karabük'de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Safranbolu'da tamamladı. 2005 yılında Safranbolu Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü bitirdi. 2014 yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2010-2011 yılları arasında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 2011-2014 yılları arasında Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2014 yılından beri hala TOFAŞ, Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge departmanında araştırmacı olarak çalışmaktadır. Araştırma konuları; yorulma, elektrik direnç nokta kaynağı, sac metal şekillendirme, araç çarpışma analizleri, hızlı prototipleme teknikleri, araç hafifletme, bilgisayar destekli tasarım ve mühendisliktir. Bu araştırma konuları ile ilgili SCI ve SCI-Expanded dergilerde yayınlanmış 5 adet makalesi, ULAKBİM tarafından taranan ulusal hakemli dergilerde yayımlanmış 3 makalesi, diğer uluslararası hakemli dergilerde yayınlanmış 6 adet makalesi, uluslararası konferanslarda sözlü sunumu yapılmış tam metin 7 adet bildirisi, ulusal konferanslarda sözlü sunumu yapılmış tam metin 8 adet bildirisi olmak üzere toplam 29 akademik yayın çalışması bulunmaktadır. Ayrıca, TR 2015/07899 kodlu araçlar için bir darbe sönümleme sistemi adında bir patent başvurusu mevcuttur.