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

# KAYNAK ZAMANININ KAYNAK ELEKTROT ÖMRÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAVUZ KELEŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ**

**TEMMUZ 2021**

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

# KAYNAK ZAMANININ KAYNAK ELEKTROT ÖMRÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAVUZ KELEŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 28/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.**

| JÜRİ | BAŞARI DURUMU |
|---|---|
| Jüri Başkanı: Prof. Dr. SALİM ARSLANLAR | BAŞARILI |
| Üye: Prof. Dr. UĞUR ÖZSARAÇ | BAŞARILI |
| Üye: Dr. Öğretim Üyesi VOLKAN ONAR | BAŞARILI |

## 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

Yavuz KELEŞ

23/06/2021

# TEŞEKKÜR

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

Laboratuar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Prof. Dr. Şükrü TALAŞ hocama, tez çalışmam sırasında bana imkanlarını sunan Yıldız Kalıp Yönetim Kurulu Başkanı Cemil YILDIZ ve Genel Müdür Yardımcısı Ensar YILDIRIM, Fabrika Müdürü Erhan Halit ÇEBİ, Ar-ge şefi Dr. Mert ONAN, Arge Uzman Yardımcısı Yüksek Mühendis Resul Önder Temiz'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma esnasında bana manevi desteklerini esirgemeyen babam Ahmet KELEŞ, annem Kurthanım KELEŞ, eşim Nurşen KELEŞ, çocuklarım Yaren KELEŞ ve Kaan KELEŞ'e sonsuz teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**BEYAN** ..... **i**
**TEŞEKKÜR** ..... **ii**
**İÇİNDEKİLER** ..... **iii**
**KISALTMALAR** ..... **v**
**SİMGELER** ..... **vi**
**TABLOLAR LİSTESİ** ..... **vii**
**ŞEKİLLER LİSTESİ** ..... **ix**
**ÖZET** ..... **xi**
**SUMMARY** ..... **xii**

**BÖLÜM 1. GİRİŞ** ..... **1**

**BÖLÜM 2. OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDEKİ ÇELİKLER** ..... **6**
2.1. Otomotiv Sektöründe AHSS Çelik Türleri ..... 6
2.1.1. Maztenzitik çelikler ..... 7
2.1.2. Çift fazlı (DP) çelikler ..... 7
2.1.3. Yüksek manganlı çelikler (TWIP) ..... 8
2.1.4. Karmaşık fazlı (Complex phase) çelikler ..... 8
2.1.5. TRIP çelikleri (TRIP-transformation induced plasticity) ..... 9
2.1.6. Mikro alaşımlı çelikler (HSLA) ..... 9
2.2. Çift Faz (DP) Çelikleri ..... 10
2.2.1. Çift fazlı çeliklerinin sınıflandırılması ..... 10
2.2.2. Çift fazlı çeliklerinin mikroyapısal özellikleri ..... 11
2.2.3. Çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri ..... 11
2.3. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kayak Yöntemleri ..... 12
2.3.1. Direnç nokta kaynağı ..... 12
2.3.2. Direnç nokta kaynağı çalışma prensibi ..... 13
2.3.3. Çift fazlı çeliklerin direnç nokta kaynağı kullanılarak birleştirilmesi ..... 14
2.3.4. Direnç nokta kaynağı parametreleri ..... 14
2.3.4.1. Kaynak akımı ..... 15
2.3.4.2. Kaynak süresi ..... 15
2.3.4.3. Kaynak kuvveti ..... 16

2.3.5. Direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot türleri ..... 17
2.3.6. Çift fazlı çeliklerde direnç nokta kaynağı sonrası çökmenin oluşumu .... 19
2.3.7. Direnç nokta kaynağı birleşiminin mikroyapısal incelemesi ..... 21

**BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOD ..... 23**
3.1. Malzeme Temini Ve Özellikleri ..... 23
3.2. Nokta Kaynak Parametreleri ..... 23
3.3. Kaynakların Mikroyapısal Karakterizasyonu Ve Fiziksel Özelliklerinin Tayini ..... 25

**BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR ..... 26**
4.1. Genel Parametreler Hakkında Bilgiler ..... 26
4.1.1. Zaman faktörü ..... 27
4.2. Punta Elektrot Ve Kaynak Bölgesi Boyutsal Ölçümler ..... 28
4.3. Elektron Mikroskop Analizleri ..... 44
4.4. Mikroyapı Ve Mikrosertlik Analizleri (HV) ..... 56

**BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 64**

**KAYNAKLAR ..... 66**

# KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| AHSS | : Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler |
| AC | : Alternatif Akım |
| BIW | : Otomotiv Araç Gövdesi |
| CP | : Karmaşık Fazlı |
| CHAZ | : Merkez Isıdan Etkilenen Bölge |
| DC | : Doğru Akım |
| DP | : Çift Fazlı (Dual Faz) |
| EDS | : Enerji Dispersiyon Spektroskopi |
| EDX | : Enerji Dispersiyon X Işın |
| FCAW | : Özlü ark kaynağı |
| FZ | : Füzyon bölgesi |
| GTAW | : Gaz tungsten ark kaynağı |
| HAZ | : Isıdan Etkilenmiş Bölge |
| HV | : Hardness Vickers |
| IHAZ | : İç Isıdan Etkilenen Bölge |
| RSW | : Direnç Punta Kaynağı |
| SAW | : Tozaltı ark kaynağı |
| SEM | : Taramalı Elektron Mikroskobu |
| SMAW | : Korumalı Metal Ark Kaynağı |
| TRIP | : Dönüşüm Yoluyla Plastisite Kazanan |
| TWIP | : İkizlenme Yoluyla Plastisite Kazanan |

# SİMGELER

| | |
|---|---|
| A | : Amper |
| I | : Akım |
| kA | : Kilo Amper |
| kN | : Kilo Newton |
| kVA | : Kilo Volt Amper |
| N | : Newton |
| MPa | : Mega Pascal |
| t | : Zaman |
| *t* | : Direnç punta kaynağı sonrası sac kalınlığı |
| R | : Direnç |
| µm | : Mikro Metre |
| °C | : Santigrat Derece |
| γ | : Ostenit |
| ρ | : Yoğunluk |
| σ | : Gerilme |

# TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1: Arcelor Mittal 3 mm kalınlık altındaki DP çeliklerinin ISO numune gereksinimleri. ..... 10
Tablo 2.2: Tek satırlı ve kolonlar ortalanmış. ..... 20
Tablo 3.1: Kaynak deneyleri esnasında kullanılan parametreler. ..... 24
Tablo 4.1: F tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynakların çekirdek ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları; nokta direnç kaynağı ITAB dahil çekirdek dış çapı ve kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve kaynak çekirdek merkez çapı ve kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları. ..... 29
Tablo 4.2: B tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları..... 36
Tablo 4.3: G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları..... 40
Tablo 4.4: 7 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 46
Tablo 4.5: 8 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 47
Tablo 4.6: 9 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 48
Tablo 4.7: 4 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 50
Tablo 4.8: 5 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 51
Tablo 4.9: 6 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 52
Tablo 4.10: 1 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 54
Tablo 4.11: 2 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 55
Tablo 4.11: 2 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri ..... 56
Tablo 4.12: G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları..... 62
Tablo 4.13: G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı

ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları..... 63

# ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : İki farklı MART çeliği ve yumuşak çeliğin gerinim-gerilme grafiği. ..... 7
Şekil 2.2 : DP çeliğine örnek mikroyapı. ..... 8
Şekil 2.3 : TRIP çeliği mikroyapısına ait örnek. ..... 9
Şekil 2.4 : DP çeliklerin mikroyapısı. ..... 11
Şekil 2.5 : DP/TRIP/HSLA çeliklerin çekme eğrilerinin kıyaslanması. ..... 12
Şekil 2.6 : Direnç nokta kaynağı şematik gösterimi [38-39]. ..... 13
Şekil 2.7 : Kaynak zamanı parametreleri. ..... 16
Şekil 2.8 : Farklı geometrilere sahip elektrot türleri. ..... 18
Şekil 2.9 : Direnç Nokta Kaynağında penetrasyon oluşumu [42, 43, 44]. ..... 20
Şekil 2.10 : Direnç Nokta Kaynağında çökmenin oluşumu [36]. ..... 20
Şekil 2.11 : Üç adet sacın birbirine kaynaklandığı yapının mikroyapısı. Tanelerin, kaynak çekirdeğinden dışarıya doğru soğutma doğrultusunda yönlenmesi [54]..... 22
Şekil 2.12 : Üç DP600 çelik Direnç nokta kaynağı bağlantı noktası mikroyapıları; a) DP600 OHAZ; b) DP600 CHAZ; c) DP600 IHAZ; d) FZ. (PF: poligonal ferrit; M: martenzit; TM: temper martenzit; B: beynit; M/A: martenzit-östenit) [55]. ..... 22
Şekil 3.1 : Rulo olarak temin edilen sac malzemeye ait test sertifikası. ..... 23
Şekil 3.2 : Tercih edilen farklı tip elektrotlar. ..... 24
Şekil 3.3 : (a)Kaynak çekirdek çapının çapı, (b) Kaynak çekirdeğinin merkez çapı. 25
Şekil 4.1 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 7 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü, f) elektrotların takribi basma yüzeyleri ve kesit profilleri. ..... 32
Şekil 4.2 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 8 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. ..... 33
Şekil 4.3 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 9 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. ..... 34
Şekil 4.4 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 4 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. ..... 37
Şekil 4.5 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 5 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. ..... 38
Şekil 4.6 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 6 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. ..... 39

Şekil 4.7 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 1 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve () dikey ölçümü..... 41
Şekil 4.8 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 2 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. ..... 42
Şekil 4.9 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 3 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. ..... 43
Şekil 4.10 : 7 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 45
Şekil 4.11 : 8 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 46
Şekil 4.12 : 9 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 47
Şekil 4.13 : 4 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 49
Şekil 4.14 : 5 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 50
Şekil 4.15 : 6 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 51
Şekil 4.16 : 1 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 53
Şekil 4.17 : 2 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 54
Şekil 4.18 : 3 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri. ..... 55
Şekil 4.19 : a) 7 b) 8 ve c) 9 nolu numuneye ait x50 ve x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı. ..... 57
Şekil 4.20 : a) 4, b) 5 ve c) 6 nolu numuneye ait (a) x50, (b) x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı. ..... 59
Şekil 4.21 : a) 1, b) 2 c) 3 nolu numuneye ait (a) x50, (b) x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı. ..... 61

# KAYNAK ZAMANININ KAYNAK ELEKTROT ÖMRÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Otomotiv sektöründe günümüzde sıklıkla tercih edilen sac malzemelerin başında geliştirilmiş yüksek mukavemete sahip çelikler (AHSS) gelmektedir. AHSS çelikleri ile yüksek mukavemet, iyi süneklik ve yeterli enerji sönümleme değerleri sağlanmaktadır. Bu değerlerle birlikte AHSS çeliklerin performans ve şekillenebilirlik faydaları da vardır. Dünyadaki karbondioksit salınımının önemli bir kısmı otomobillerden ve otomotiv endüstrisinden gelmekte olup, yüksek mukavemetli çeliklerin araçlarda kullanımı hafiflik sağlamasından dolayı karbon emisyonu ve yakıt tasarrufuna imkan tanımaktadır. Bu özellikleri otomotiv endüstrisinde kullanımlarını artırmış ve araştırılmalarını cazip hale getirmiştir. Özellikle bu çeliklerin kaynak yapılabilirliği konusunda çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada çinko kaplamalı DP600 sac malzemenin nokta kaynağı ile birleştirilmesi işlemi 300 adet uygulama ile yapılmıştır. Kaynak prosesi esnasında akım sabit tutularak farklı kaynak süreleri denenmiş ve en uygun koşullarda üretimin gerçekleşmesi sağlanmıştır. Uygulama deneylerine geçmeden önce, direnç nokta kaynağı farklı elektrot uç türlerine göre sac üzerinde ön denemeler yapılmış olup sıçrama ve yapışma olmadan gerçekleşebildiği uygun parametreler belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar gruplandırılmış ve elektrot tipine göre farklı akımlarda uygulamalar yapılmıştır. Kademeli olarak takip edilen nokta kaynağı 300 adette bitirilmiştir. Her bir parametre ile yapılan 300. nokta kaynağı bölgesi kesilerek analiz için hazır hale getirilmiştir. 300. nokta kaynağını içeren sac numunelerin kesilmesi ile, nokta kaynağının tam ortasında olacak şekilde öncelikle aşındırıcı kesme taşı ile numune kesilmiş ve daha sonra bakalite alınarak parlatılmıştır. Parlatma işlemi için 220G'den başlanmış ve 1200G'ye kadar zımpara kullanılarak yüzeyler zımparalanmış ve daha sonra 1 mikrometrelik Alümina tozu kullanarak ayna parlaklığına getirilmiştir. Parlatma işleminin ardından %1'lik Nital ile dağlayarak mikroyapının ortaya çıkması sağlanmıştır. Kaynak denemeleri sonrası elektrodun boyutsal ölçümleri incelenmiş, elektrotların ömürleri hakkında bilgi edinilmiştir. Malzemedeki kaynak çapının boyutsal ölçümü, mikroyapısal incelemeler ve kesitten alınan mikrosertlik yardımıyla kaynak sertliği ile çökme hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Sac malzemede meydana gelen sıçrantıların tespiti SEM-EDS ve EDX çalışmaları ile ortaya çıkarılmıştır. Deneyler ve analizler neticesinde belli bir süre sonunda hangi elektrodun daha verimli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Direnç Nokta Kaynağı, Çift Fazlı Çelikler, Kaynak Süresi, Elektrot Ömrü

# INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WELDING TIME ON WELDING ELECTRODE LIFE

## SUMMARY

Advanced high strength steels (AHSS) are one of the most preferred materials in the automotive industry. High strength, good ductility and sufficient energy absorption values are provided by AHSS steels. Also with these values, AHSS steels have performance and formability advantages. Considering that a high percent of carbondioxide emissions in the world are caused by the automobile and automotive industry, the use of AHSS steels in vehicles provides carbon emissions and fuel savings due to their lightness. These features have increased their use in the automotive industry and made their research attractive. Especially studies on the weldability of these steels continue. In this study, the process of joining the zinc-coated DP600 material with spot welding was done with 300 spot weld. During the welding process, the current was kept constant and different welding times were tried and production was carried out under the most suitable conditions. Before starting the application tests, preliminary tests were carried out according to the resistance spot welding according to different electrode types on the sheet and the appropriate parameters that can be performed without spatter and sticking were determined. Experimental studies were grouped and applications were made at different currents according to the electrode type. The progressively tracked point source was terminated at 300. The 300th spot welding area made with each parameter was cut and made ready for analysis. 300th sheet metal samples containing spot welding were cut and the sample was first cut with an abrasive cut-off stone in the middle of spot welding and then mounted and polished. The polishing process was started from 220G and the surfaces were sanded with sandpaper up to 1200G and then brought to a mirror shine by using 1 micrometer Alumina powder. Etched with 1% Nitral to reveal the microstructure after polishing. After the trials, the measurements of the electrode were examined and information about the lifetime of the electrodes was obtained. With the help of dimensional measurement of weld diameter in material, microstructural studies and microhardness taken from the section, information about weld hardness and collapse was obtained. Detection of spatter in sheet material was revealed by SEM-EDS, XRD studies. As a result of experiments and analyzes, it was determined which electrode was more efficient after a certain period of time.

Keywords: Resistance Spot Welding, DP Steels, Welding Time, Welding Electrode Life

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

AHSS çelikleri sayesinde yüksek mukavemet, iyi süneklik ve yeterli enerji absorblama kabiliyeti elde edilirken performans ve şekillenebilirlik sağlanır. Enerji tasarruf talebi ve çevre kirliliğinin artması bu tür çeliklere olan çalışmaları artırmıştır. Parça başına olan ağırlıkta azalma sonucu yakıt sarfiyatı ve emisyon değerleri de azalmaktadır. Farklı geometrilerde fonksiyonel kullanım için AHSS ideal çeliklerdir. [1]

AHSS süneklik ve mukavemet özelliklerini beraber sağlayarak otomotiv sektörü için uygun mukavemet/hafiflik oranı çözüm olmaktadır [2, 3]. Karbon çelikleri (0-0,30 %C) içeren türler otomotivlerin BIW yapısında önemli oranda kullanılırlar [4].

Alaşım elementlerinin etkisi tokluk ve mukavemet sağlarken malzemenin sertleşebilirliğine de etki eder. Mikroyapıları homojen ve düşük karbon içerdiğinden iyi şekillenebilirlik ve kaynaklanabilirlik sağlanır. Bunun yanında mukavemetin artması istenirken soğuk şekillendirme ile de bu mümkündür. Fakat kimyasal kompozisyona bağlı belli bir limit ile sınırlıdır. Alaşım elementlerinin kaynak üzerine olumlu etkisi vardır [5].

Dünyadaki salınan $CO_2$ oranının %20'si otomobillerden kaynaklanmaktadır ve küresel ısınmaya yol açan sera gazlarının %77'sinin sorumlusu olarak otomotiv sektörü gösterilmektedir. Taşımacılık ve otomotiv sektöründe araçlarda ağırlık azaltmak; hem yakıt tasarrufu yaparak enerji verimliliğine katkı sağlayacak hem de $CO_2$ emisyonunu azaltarak çevreci bir yaklaşım olacaktır. Bu sebeple Avrupa Birliği ve A.B.D.'de, otomobillerin $CO_2$ emisyonlarının azaltılmasına yönelik yasal düzenlemelere gidilmektedir. Çevresel etkiler ve yakıt tasarrufu dikkate alındığında parçanın malzemesini değiştirmek hususunda kullanılacak parçanın maliyeti de oldukça etkilidir. Anlaşılacağı üzere birim parça başına en uygun malzeme türü AHSS'dir. Dört kapılı araçlarda gövde malzemesi olarak geleneksel çeliğe kıyasla AHSS kullanımı %25 oranında ağırlık azalması sağlayacaktır [6,8]. Ağırlığın azaltılması açısından ise magnezyum ve kompozit malzemelerin belirgin üstünlüğü görülmesine rağmen

maliyetleri 2.5-10 kat yüksektir [7,8]. Örneğin, bir aracın toplam ağırlığının %10 azalması ile yakıt tasarrufu ortalama %4,9 olmaktadır [9].

TRIP ve DP çelikleri otomotiv sektöründe tercih edilirken, en yaygın metod olan direnç nokta kaynağı (RSW) bu çelik türleri için idealdir [10,11]. Çekme mukavemeti 980 MPa'a kadar olan çeliklerde RSW yöntemi rahatlıkla kullanılmaktadır [12,13]. Çift fazlı bu çeliklerin mikroyapısı yumuşak ferrit matriks ile %10-40 oranında sert martenzit veya martenzit-östenitten oluşmaktadır. Bu yapı sayesinde mukavemet değerleri 500-1200 MPa değerlerine ulaşabilir [14].

Resistance Spot Welding (RSW) olarak literatüre geçen direnç punta kaynağı, metallerin basınç uygulanarak birleştirilmesi şeklinde uygulanır. Yöntemde birleştirme bölgesinden uzun süre akım geçirilir. Akıma, kaynak yapılan malzemelerin direnç göstermesi ile ısınma söz konusu olur ve ergitme, dolayısıyla kaynak havuzu oluşur. Kaynak havuzu oluşumunu takriben akım uygulaması kesilerek basınç uygulanır ve bu basınç altında soğuma ile birleştirme işlemi tamamlanır.

Kaynak süresinin akım yoğunluğuna karşı mükemmel bir şekilde yeniden konumlandırılmasıyla tercih edilen çekirdek çapını sağlamak mümkündür. Kaynak süresinin kısa olması durumunda çekirdek çapı azalır. Bunun tersine, erimiş metal miktarı artar, bu da erimiş metalin fışkırmasına neden olur ve bu da kaynak bağlantı mukavemetinin azalmasına neden olur [15]. Bu sebeple deneysel metod ile en uygun parametrelerin incelenerek bulunması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma da çinko kaplamalı DP600 sac malzemenin nokta kaynağı ile birleştirilmesi 300 adet atılarak yapılmıştır. Kaynak prosesi esnasında akım sabit ve farklı süreler denenerek en uygun koşullarda üretimin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Kaynak denemeleri sonrası elektrodun boyutsal ölçümleri incelenerek, elektrotların ömürleri hakkında bilgi edinilmiştir. Sac malzemedeki kaynak çapının boyutsal ölçümü, mikroyapısal incelemeler ve kesitten alınan mikrosertlik yardımıyla kaynak sertliği ile çökme hakkında bilgi edinilmiştir. Sac malzemede meydana gelen sıçrantıların tespiti SEM-EDS ve EDX çalışmaları ile ortaya çıkarılmıştır. Deneyler ve analizler neticesinde belli bir süre sonunda hangi elektrodun daha verimli olduğu belirlenmiştir.

İlk olarak, çalışmaya esas olan DP 600 kodlu sac malzemelerin Erdemir A.Ş.'den temini çinko kaplı rulo halinde yapılmış olup, dilimlenmesi, 1,5x640xR mm boyutlarında olacak şekilde Yıldız Kalıp A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak HCT590X+Z (ERDEMİR GZR1660) çeliği tercih edilerek çinko kaplamanın nokta kaynağına etkisi de incelenmiştir.

1,5 x 900 x 60 mm Kesilen ürün boyutları nokta kaynağı için hazır hale getirilmek üzere, lazer kesim cihazında numune kesimleri gerçekleştirilmiştir. Sac plakaların nokta kaynağı yapılacak alanları, bölmelere ayrılarak kaynak işlemi için hazır hale getirilmiştir. Otomotiv sektöründe ve fabrikamızda en çok kullanılan sabit çaplı üç farklı elektrot seçilerek nokta kaynağına geçilmiştir.

Sacların nokta kaynağı esnasında kullanılan parametreler elektrot uc formu ve kaynak akım uygulama süresi sabit olmak kaydıyla (ms) akım (A) dır. Uygulama deneylerine geçmeden önce, nokta direnç kaynağı elektrot uç türlerine göre sac üzerinde ön denemeler yapılmış olup sıçrantı ve yapışma olmadan gerçekleşebildiği parametreler belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar gruplandırılmış ve elektrot tipine göre farklı akımlarda uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Kademeli olarak takip edilen nokta kaynağı 300 adette sonlandırılmıştır. Her bir parametre ile yapılan 300. nokta kaynağı bölgesi kesilerek analiz için hazır hale getirilmiştir.

300 adet kaynak yapılan elektrot uçları ve 300. Nokta kaynağının içeren sac numunelerin kesilmesinin ardından, Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezi (Afyon Kocatepe Üniversitesi) ve Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında nokta kaynağının tam ortasında olacak şekilde öncelikle aşındırıcı kesme taşı ile kesilmiş ve daha sonra bakalite alınarak parlatılmıştır. Parlatma işlemi için 220G den başlanmış ve 1200G'ye kadar zımpara kullanılarak yüzeyler zımparalanmış ve daha sonra 1 mikrometrelik Alümina tozu kullanarak ayna parlaklığına getirilmiştir. Parlatma işleminin ardından %1'lik Nital ile dağlayarak mikroyapının ortaya çıkması sağlanmıştır. Nokta kaynağı kesit görüntileri özenlikle Olympus marka optik mikroskop kullanılarak optik resimleri çekilmiş ve daha sonra TUAM'da bulunan cihazlarla EDX, SEM-EDS analizleri ve Mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleme SEM-LEO 1430 VP ile yapılırken ek olarak OXFORD EDX cihazı ile element analiz yapılmıştır. Sac malzemenin kaynak kesintinden

alınan mikrosertlik ölçümleri, SHIMADZU HMV-2 cihazında uygulanan yük 50 gr, yükün uygulandığı süre 10 sn'dir. Üç tekrarlı yapılan mikrosertlik ölçümleri neticesinde ortalama değer üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Sac malzemenin ve elektroda ait boyutsal ölçümler yapılarak sac malzemedeki çökme ve elektrottaki aşınma hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Şekil 3.3'de boyutsal ölçümlerin nasıl yapıldığı hakkında bir görsel sunulmuştur.

Artan kaynak akım süresi, kaynak akım uygulama süresi arttıkça daha geniş bir ITAB bölgesi görülme ihtimali artmaktadır. Bu, ısı iletim kaysayısına bağlı olsa da, akımın sabit ve kaynaklanan metallerin türünün değişmediği durumlarda ise, kaynak dayanımının artması beklenmelidir.

G tipi elektrotlarda yapılan denemelerde elektrot ve nokta direnç kaynak çekirdeklerinin boyutsal ölçümlerin ortalamaları özellikle düşük ve orta ısı girdisine denk gelen akım uygulama süresi kullanılarak yapılan numunelerde en-genişlik oranı 1'e oldukca yakın bulunmaktadır. F tipi Bakır elektrotlarında görülen aşınma mekanizması bu seride de görülmektedir. Yukarıda da ifade edildiği gibi, tekrarlı yükleme sonucu yorulma ile ortaya çıkan bu durum, elektrot yüzeyinin oksitlenmesi ile beraber öncelikle bakır yüzeyinde çukurcuk oluşumu ve takiben yüksek sıcaklıkta havadaki oksijen ile etkileşimi sonucu oksitlenme ile devam eden malzeme kaybı görülmektedir. Bakır elektrot uç profilinin boyutlarının çok fazla değişmediği değerlendirilmekle beraber elektrot baskı yüzeyinin aşınması, B tipi elektrot serisinde düşük ısı girdisinde orta kısımlara ve yüksek ısı girdisinde ise daha çok kenarlarda yoğunlaşmıştır. Kenarlarda oluşan yorulma aşınmasının elektrot uç profiliyle ilişkili olması muhtemeldir.

F tipi elektrotlarla yapılan deney numunelerin elektron mikroskop görüntüleri ve kimyasal analizi verilmiştir. Yüzey kimyasal anailizinde ise, Alüminyum, Bakır ve Çinko oranlarının yüzeyde kaynak akımı uygulama süresinin artması ile beraber arttığı görülmektedir. Isı girdisinin artması, buharlaşma kabiliyetini artırmakta ve daha fazla miktarda alümünyum ve çinko buharlaşmasına sebep olmaktadır. B tipi elektrotlarla yapılan denbemelerde çinko oranları artan akım uygulama süresi ile beraber sistematik olarak artmaktadır.

F tipi elektrodun mikrosertlik üzerine etkisi oldukça belirgindir. Sertlik değerleri ortalama olarak azalmaktadır. Sistematik olarak azalan mikrosertlik değerlerinin temel parametresi değişken tane boyutu olup, ikincisi ile ortaya çıkan tane içi morfolojisidir.

Elektrot boyut ölçüleri ve ölçülerdeki değişim Tablo 4.5'de verilmiştir. Kaynak öncesi ve sonrasında kaynak elektrodunda ciddi boyutsal değişimler görülmemekle beraber, boyutlarındaki değişim miktarlarına bakıldığında, F tipi elektrodunu tabloya göre en fazla şekilsel değişime maruz kaldığı görülmektedir. G tipi elektrodun kesit formu gereği (Şekil 4.1f), daha düz bir çıkıntıya sahip olması ve B tipi elektrot da olduğu gibi daha dengeli bir basma yüzeyi oluşumu yerine deformasyonu kolaylaştırıcı ve çekirdek kalınlığını azaltan alanın diğerlerine göre darlığı, şekil değişiminde önemli bir rol oynayabilmektedir.

# BÖLÜM 2. OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDEKİ ÇELİKLER

Otomotiv endüstrisinde üreticilerin önem verdiği kriterlerden birisi de ekonomik araç üretimi olmaktadır. Bu sebeple otomobillerin hafiflemesi giderek daha fazla öneme sahip olmuştur. Otomobillerdeki hafiflik daha fazla önem kazandıkça yakıttan da tasarruf sağlanmıştır.

Otomotiv sektöründe yaya ve yolcu güvenliği değerlendirildiğinde bu amaçta malzemeler geliştirilmiş, sektörde uygulamaya alınmıştır. Kullanılan malzemeler içerisinde en yaygın yeri alan çelik malzemeler olmuştur.

## 2.1. Otomotiv Sektöründe AHSS Çelik Türleri

Literatürde otomotiv çelikleri sınıflandırması karbon oranları, üretim yöntemleri, alaşım miktarları, boyutsal formlar, mikroyapı ve benzeri işlemlere göre sınıflandırılabilmektedir.

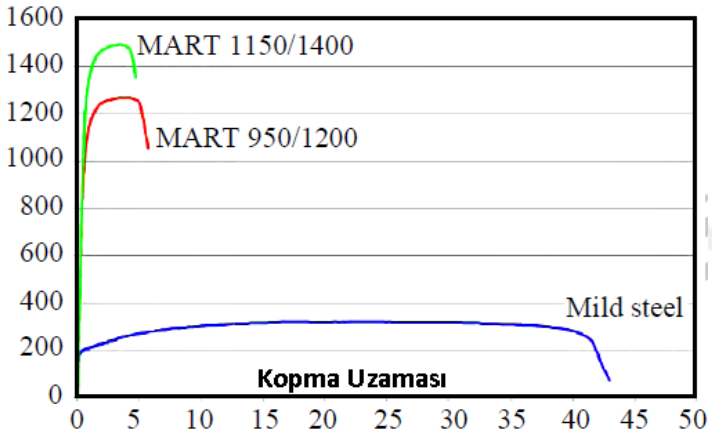
AHSS yani yüksek mukavemetli çelikler için literatürde yapılan sınıflandırma aşağıda sunulmuştur;

- Martenzitik Çelikler (MART)
- Çift Fazlı Çelikler (DP)
- Yüksek Manganlı Çelikler (TWIP).
- Karmaşık Fazlı (Complex Phase) Çelikler
- TRIP Çelikleri (TRIP-Transformation Induced Plasticity)
- Mikro Alaşımlı Çelikler (HSLA)

### 2.1.1. Maztenzitik çelikler

MART olarak belirtilen martenzitik çelikler nihai üründe en yüksek mukavemet değerlerini (1500 MPa) sağlayan çelik grubudur. Martenzitik çeliklerinin mukavemeti ve sertliği içeriğinde bulunan karbon miktarı ile doğru orantılı artar. Ayrıca MART çeliklerinde krom, manganez, nikel, molibden, bor ve vanadyum gibi çeşitli alaşım elementleri de bulunabilmektedir.

Yüksek mukavemetlere sahip olan bu çeliklerde sünekliği iyileştirmek ve şekillendirilebilirliği istenen sınırlarda sağlayabilmek amacıyla temperleme işlemi yapılır. Şekil 2.1'de yumuşak çeliklerle iki farklı martenzitik çeliğin gerinim-gerilme eğrisinde durumları sunulmuştur [14].




Şekil 2.1 : İki farklı MART çeliği ve yumuşak çeliğin gerinim-gerilme grafiği.

### 2.1.2. Çift fazlı (DP) çelikler

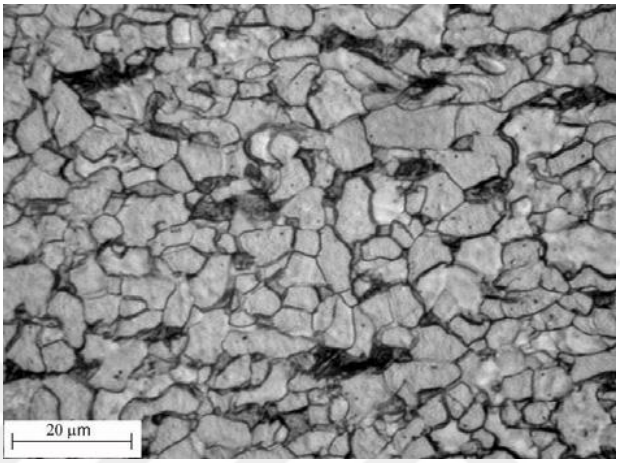
Çift fazlı DP çeliklerin mikroyapısı yumuşak ferrit matriksle %10-40 oranlarında sert martenzitik veya martenzit-östenit yapısından oluşmaktadır. Bu yapı sayesinde 500-1200 MPa mukavemet değerlerine erişebilmektedirler.

DP çelikleri klasik yüksek mukavemetli çeliklerden aşağıdaki farklara sahiptirler:

- DP çelik mikroyapısının mukavemet değeri martensit miktarı ile kontrol edilebilir,
- DP çelikleri akma noktası uzaması göstermezler,

- DP çelikleri düşük UTS / YS değerine sahiptirler
- Düşük karbon içeriğine sahip olan sınıfların mükemmel bir direnç sergilediği görülmüştür.

Şekil 2.2'de DP çeliğine ait mikroyapı sunulmuştur [14].




Şekil 2.2 : DP çeliğine örnek mikroyapı.

### 2.1.3. Yüksek manganlı çelikler (TWIP)

TWIP çeliği, yüksek mangan ihtiva eden östenit fazında olan çeliklerdir. diğer yüksek mukavemetli çeliklerin aksine TWIP çelikleri deformasyon mekanizmasını kayma dislokasyonunun yanında ikizlenme de içerirler. TWIP çeliğinin yüksek mukavemeti (>800 MPa), ikizlenme mekanizması yardımıyla oluşmaktadır [15].

Ayrıca yüksek pekleşme değerleri sayesinde boyun verme daha geç meydana gelmekte, bu sayede yüksek miktarda (>%40) uzama değerleri yakalanmaktadır. Bu durumun bir sonucu olaraksa TWIP çeliklerinin dezavantajı ise yüksek miktarda geri esnemeleridir [15].

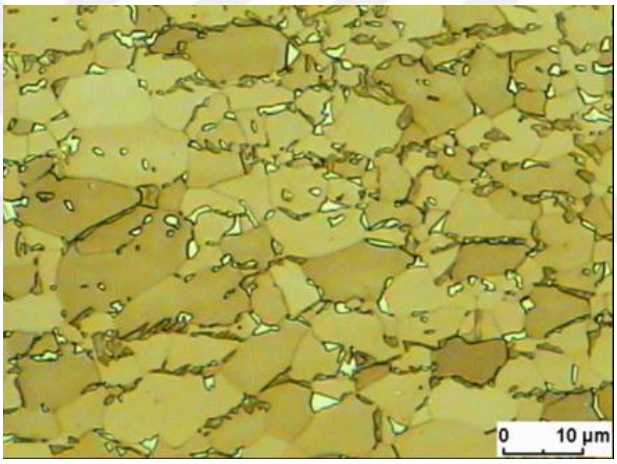
### 2.1.4. Karmaşık fazlı (Complex phase) çelikler

Kısaca CP olarak anılmakta olan karmaşık fazlı çeliklerin dayanım değerleri 600-1180 MP aralığında olmaktadır. Bu grupta, ferrit ve martenzitin yanı sıra beynit ve kalıntı östenit de görülmektedir. Bunların dışında tanecik boyutunu küçültmek için Titanyum veya Niyobyum alaşımları da yapılarında olabilir. Kimyasal kompozisyon ve mikroyapı

itibari ile TRIP çeliklerine benzerlik gösteren bu grup yüksek süneklik ve delik flanşlama kabiliyetine sahiptirler [14].

### 2.1.5. TRIP çelikleri (TRIP-transformation induced plasticity)

TRIP çelikleri Şekil 2.3'te belirtildiği üzere ferrit sınırlarına gömülü kalıntı östenit ihtiva eden bir mikroyapıya sahiptir. TRIP çeliklerindeki kalıntı östenit fazı, hem deformasyon sırasında çeliği sertleştirir martenzite dönüşür hem de yüksek bir lokal sertlik değeri sağlar ve gerinimin erken birikmesini engellemesi sayesinde yüksek süneklik imkanı sunar. TRIP'ler DP'lere göre kıyasla daha sünektirler ve bu sayede de darbe emilimleri daha yüksektir. TRIP çeliklerinde beynit ve martenzit fazı da belirli miktarlarda bulunmaktadır. Çok fazlı yapıları sayesinde bu çeliklerin mekanik özellikleri iyidir [14].




Şekil 2.3 : TRIP çeliği mikroyapısına ait örnek.

### 2.1.6. Mikro alaşımlı çelikler (HSLA)

Yüksek dayanım ve düşük alaşımlı, mikro alaşımlı çelikler (HSLA), diğer yapı çeliklerine göre kıyasla daha yüksek dayanım ve tokluk değerine sahiptirler. Karbon miktarı düşük olan mikro alaşımlı çeliklerin mukavemet değerlerini artıran faktörlerse yapısındaki mikro alaşımı sağlayan katkı elementleridir. Bu mikro alaşımlı çeliklerin uygulanan ısıl işlemler sonucunda akma sınırı 500 N/mm2 değerini yakalarken, tane boyut büyümesini ve sertliğini koruyabilmesi amacıyla mikro yapıya Nb, V, Ti elementleri eklenebilmektedir.

## 2.2. Çift Faz (Dp) Çelikleri

Çift fazlı çelikler, iki fazın bir araya gelmesiyle oluşurken bu fazlardan ilki ferrit matriks diğeri ise martenzitten meydana gelmektedir. 1970'li yıllarda bulunan DP çelikleri %10-25 oranında martenzit fazı ile yumuşak ferrit fazı içermektedirler. Bazı koşullarda kalıntı östenit, beynit ve perlit içerebilirler [16].

### 2.2.1. Çift fazlı çeliklerinin sınıflandırılması

DP çelikleri DP600, DP1000 gibi yüksek mukavemete sahip çelikleri içerir. Geleneksel çeliklere oranla 400-440 MPa yerine 600-1000 MPa değerlere sahiptirler. DP ve TRIP çelikleri AHSS çeliklerine benzer olarak üretilmişlerdir. Düşük üretim maliyeti sayesinde yüksek kalitedeki parçalarda tercih edilirler. Termal etkisi olan şekillendirilebilirlik ve kaynak kabiliyetleri de uygunluk göstermektedir. Sıcaklığın artmasıyla beraber oda sıcaklığına kıyasla çekme ve akma mukavemetlerinde düşme gözlenmektedir [17].

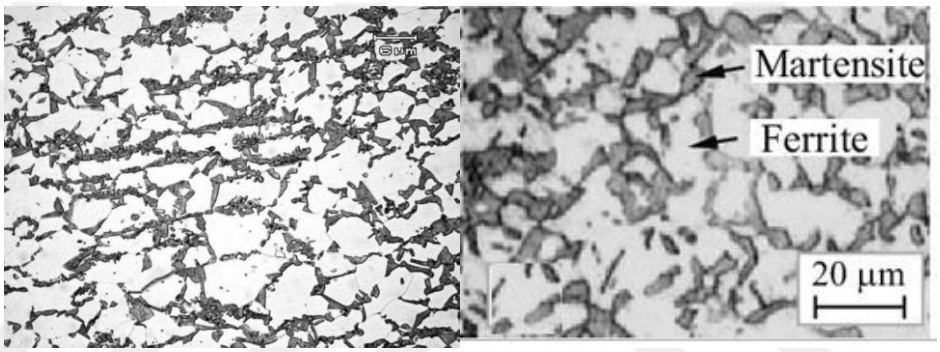
Tablo 2.1'de Arcelor Mittal'a göre 3 mm kalınlıktan az DP çeliklerin 20x80 mm ISO çekme numunelerindeki ürün gereksinimleri [18].

Tablo 2.1: Arcelor Mittal 3 mm kalınlık altındaki DP çeliklerinin ISO numune gereksinimleri.

| Çelik sınıfı | Akma mukavemeti [Mpa] | Kopma dayanımı [Mpa] | Toplam uzama % | Yön |
|---|---|---|---|---|
| DP 450 | 280-340 | 450-530 | %27 | Enlemsel |
| DP 500 | 300-380 | 500-600 | %25 | Boylamsal |
| DP 600 | 330-410 | 600-700 | %21 | Boylamsal |
| DP780 | 450-550 | 780-900 | %15 | Boylamsal |
| DP780 Y500 | 500-600 | 780-900 | %8 | Boylamsal |
| DP980 Y700 | 700-850 | 980-1100 | %5 | Boylamsal |
| DP 1180 | 900-1100 | 1180 | %5 | Boylamsal |

### 2.2.2. Çift fazlı çeliklerinin mikroyapısal özellikleri

Günümüzde DP çellikleri, ferrit matriks ve %10-40 oranında martenzit adaları içermektedir. 500 ile 1200 Mpa aralığında çekme mukavemeti eldesi sağlar. Beynitik çeliklerde mekanik özellikler iyileşirken, martenzite kıyasla şekil alma kabiliyeti artmaktadır [19-21]. Martenzit ve ferrit ortanı, tane boyutunun DP çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır [22,23]. Şekil 2.4'te verilen martenizt yapısı koyu siyah olup diğer faz ferrit ise beyaz renkli gösterilmiştir. DP çeliği mikroyapısı martenzit adacıkları içererek (sertleşen bölgeler) ve ferrit faz (yumuşak bölgeler) yapısından oluşmaktadır.




a b

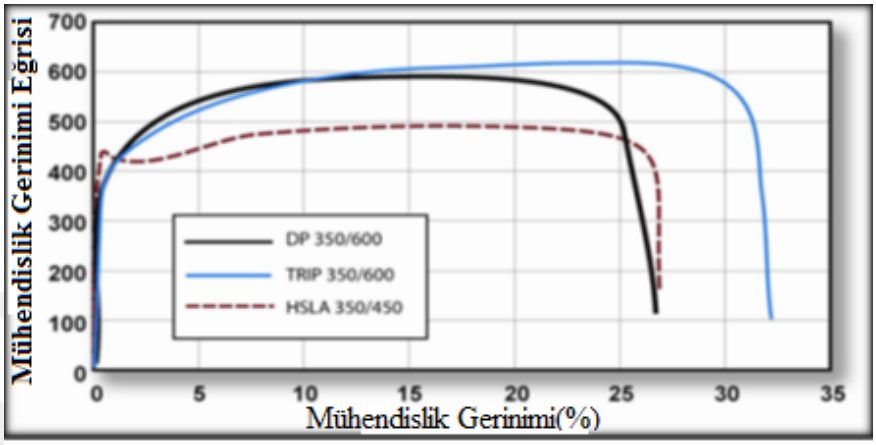
Şekil 2.4 : DP çeliklerin mikroyapısı.

% 1.5-3 Mn yüzdesi ferritte dayanımın artmasına ve östenit fazlarının stabilize olmasına neden olur. Beynit veya perlit oluşumunun krom ve molibden tarafından geciktirildiğine inanılmaktadır. Si, ferritin dönüşümünü destekler. Vanadyum ve Niobyum elementleri, mikroyapı inceltme ve çökelme kuvvetlendirmesinin arkasındaki nedendir. Yani, DP çeliklerin mekanik davranışı martenzit dağılımından etkilenir [24,25]. Martenzit alanları, bir zincir benzeri oluşturan martenzit alanlarından daha iyi bir mukavemet ve süneklik karışımı içinde ferrit matrisin sonucu içinde ayrılmış bölgeler olarak bulunur [24].

### 2.2.3. Çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri

Otomotiv Endüstrisi, yüksek uzama özelliklerine sahip çelik türlerine ihtiyaç duymaktadır. Gösterildiği gibi Şekil'de DP çelikleri ile diğer yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA) arasındaki karşılaştırma, DP çeliklerinin diğerlerinden daha iyi

özellikler sunduğunu göstermiştir. DP çeliğinin sürekli akma davranışı yerine düşük akma dayanımı, yüksek sertleştirme oranı, yüksek çekme dayanımı (yukarı 1000 MPa'ya kadar) ve yüksek uzama kabiliyetine sahiptir [26].




Şekil 2.5 : DP/TRIP/HSLA çeliklerin çekme eğrilerinin kıyaslanması.

## 2.3. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kaynak Yöntemleri

Otomotiv enüstrisinde tozaltı ark kaynağı (SAW), özlü ark kaynağı (FCAW), korumalı metal ark kaynağı (SMAW), tungsten ark kaynağı (GTAW), ve direnç punta kaynağı (RSW) gibi kaynak yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu yöntemler içerisinde direnç punta kaynağı tekrarlanabilirliği, ucuz ekipman desteği, kolay kontrol edilebilirlik özellikleri sayesinde sık kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca metodun magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları, alüminyum alaşımları, demir ve çelik esaslı malzeme gruplarında uygulanabilir olması, farklı malzemeleri bağlantı kabiliyetinib bulunması bu yöntemi öne çıkaran faktörlerdir.

### 2.3.1. Direnç nokta kaynağı

Resistance Spot Welding (RSW) şeklinde literatüre geçen direnç punta kaynağı, metallerin basınç uygulanarak birleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Yöntemin uygulamasında birleştirme bölgesi üzerinden uzun süre akım geçirilir. Akıma, kaynak yapılan malzemelerin gösterdiği direnç sebebiyle ısınma söz konusu olur ve ergitme, dolayısıyla da kaynak havuzu oluşur. Kaynak havuzu oluşumunun akabinde akım

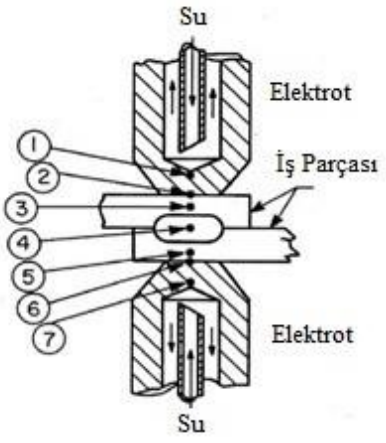
uygulaması durdurularak basınç uygulanır ve bu basınç altında gerçekleşen soğumayla birleştirme işlemi tamamlanır. Metal levhalar arasında zamana göre oluşan ısı, toplam direncin, akımın kare yoğunluğunun ve kaynak süresinin bir ürünüdür. Formülün aşağıdaki gösterdiği gibi, bazı faktörlerin üretilen ısı üzerinde etkisi vardır; aşağıdaki gibi verilir ;

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \tag{2.1}$$

Direnç nokta kaynağı çalışma prensibi temel olarak Joule ısıtma yasasına dayanmaktadır. Buna bağlı olarak yukarıdaki eşitlikten faydalanılır ve bu eşitlikte ‘’Q’’ ısıyı, ‘’R’’ malzeme arayüz direncini, ‘’T'' zamanı ifade etmektedir.

### 2.3.2. Direnç nokta kaynağı çalışma prensibi

Uygulanabilir levha kalınlık değerleri 0.5-3.0 mm aralığında olmakta olup, kaynak akımının istenilen lokal bölgeye uygulanması ve plakaları aynı anda bibirine kenetleyebilmek için bakır alaşımlı iki elektrot Şekil 2.6’da (3 ve 5 numaralı elemanlar) gösterildiği gibi kullanılır. Elektrotların temas bölgesinden (Şekil 2.6’da 2 ve 6 numaralar) kısa sürede (yaklaşık olarak 10-100 milisaniye) yüksek akım değeri bırakılmaktadır. Bu esnada malzemeden akıma karşı olan dirençten ötürü aşırı ısınma meydana gelir bu sayede kaynak havuzu oluşturulur. Kaynak havuzu oluşumuyla akım kesilir ve elektrot baskı kuvvetiyle ergiyen bölgeye basınç uygulanır. Malzemelerin kaynak havuzunun soğuması ve katılaşması ile birleştirme işlemi tamamlanır.




Şekil 2.6 : Direnç nokta kaynağı şematik gösterimi [38-39].

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi iş parçası (3 ve 5 numaralar) elektrotlar (1 ve 7 numaralar) tarafından birlikte mekanik olarak itilir. İş parçasına kontak yüzeyler üzerinden (2 ve 6 numaralar) akım uygulanır. Elektrot soğutması su vasıtası ile sistemde yapılmıştır.

### 2.3.3. Çift fazlı çeliklerin direnç nokta kaynağı kullanılarak birleştirilmesi

Direnç punta kaynağı metalin tatmin edici sıcaklık değerlerine ısıtılması ve kaynak havuzunu oluşturmak için akımın lokalize temas alanından geçirilirken, iki veya daha fazla örtüşen metalin preslenmesini içeren bir birleştirme tekniğidir [27].

Bununla birlikte, DP çeliğinin direnç noktası kaynak kabiliyeti, çok fazlı yapı özellikleri ve DP çeliğindeki nispeten daha yüksek alaşım seviyesi nedeniyle tipik HSLA çeliğine kıyasla daha dardır. [28]

Punta kaynağının gerilme performansının büyük oranda olarak kaynak çekirdeğinin sahip olduğu geometrik özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir [29,30];

Ek olarak, füzyon bölgesinde ve / veya ısıdan etkilenen bölgede görülen faz dönüşümleri, direnç noktası kaynaklı çift fazlı (RSW-DP) çeliğin gerilme özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir [31].

### 2.3.4. Direnç nokta kaynağı parametreleri

Birkaç parametre direnç punta kaynağı işlemini açıklamaktayken, zaman ve mevcut kuvvet ise kaynak işlemini açıklamaktadır. Sac metal yüzeyleri ve elektrotların boyutları, şekil ve kalınlıkları kaynak kalitesini büyük ölçüde etkilemektedirler.

Kaynak süresinin akım yoğunluğuna karşı mükemmel bir şekilde yeniden konumlandırılması sayesinde istenen çekirdek çapını sağlamak mümkündür. Parametre değerleri, en az $4\times\sqrt{t}$ külçe çapına izin verecek şekilde seçilmiştir. Burada t değeri, direnç punta kaynağı sonrası elde edilebilecek sac kalınlığını ifade etmektedir. Nokta kaynağında dikkate alınan parametreler önemlidir çünkü parametrelerin herhangi birisinde olan küçük bir değişiklik dahi kalan parametreleri etkilemektedir ve doğrudan kaynak kalitesini belirlerler. Kaynak süresinin kısa olması halinde çekirdek (nugget) çapı azalacaktır. Bunun tersine, erimiş metal miktarıysa artmaktadır. Bu da erimiş metalin

fışkırmasına sebebiyet verir ve kaynak bağlantı mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır [15]. Bu nedenle deneysel metod ile en uygun parametrelerin seçilerek bulunması ihtiyacı doğmaktadır.

Özetle kaynak parametreleri için; akım değeri, elektrot kuvveti, elektrot çapı değeri, elektrot malzemesi, kaynaklanan malzeme (R değeri sebebiyle) ve süre gösterilebilir.

#### 2.3.4.1. Kaynak akımı

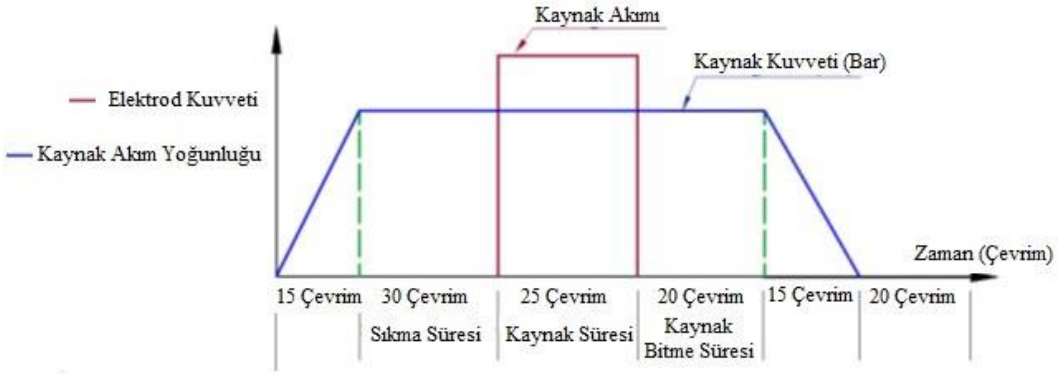
Tüm kaynak parametreler içinde kaynak akımı çok önemli bir yer almaktadır. Kaynak akımı arttığında, kaynak çekirdek boyutu da hızla artmaktadır ancak, yüksek akım elektrodu bozar ve atılmalara neden olur [32].

Kaynak akımı, teorik olarak ısı üretimi ve AC gücünün yoğunluğu ile bağlantılıdır. Tek fazlı AC, üretimde çoğunlukla tercih edilmektedir. DC gücü ise genellikle daha yüksek akım yoğunlukları sağlamasından ötürü metalleri ve alaşımları kaynaklamak için kullanılmaktadır [33]. Bir DC sistemi AHSS kaynağı için güç ihtiyacını azaltır ve direnç nokta kaynağını verimli hale getirir [34].

Aslanlar [15] tarafından yapılan çalışmada direnç nokta kaynağında, kaynak akımını iki faktörün kontrol ettiği ileri sürülmüştür; Maksimum kaynak akımını belirleyen trafo kademe anahtarı ayarı ve kaynak için mevcut akımın değerlendirilmesine yardımcı olan akım kontrol yüzdesi. Düşük yüzdeli kaynaklar için akımlar genellikle tavsiye edilmez çünkü kaynak kalitesini düşürebilirler.

#### 2.3.4.2. Kaynak süresi

Teknik olarak, bir RSW işleminin Şekil 2.7'de belirtilen dört süresi vardır. Sıkma, kaynak, tutma ve son bırakmayı periyotlarını içerir. Kaynak süresi, malzeme türüne, kalitesine ve verimliliğine bağlı olmaktadır. Sıkıştırma aralıklarında metal levhalar elektrotlar yardımıyla konumlandırılırlar ve kenetlenirler. Elektrot kuvveti gerekli seviyeye ulaştığı zaman, akım uygulanarak kaynak işlemine başlanır. Bu işlemler bölgede erimeye ve birleşmeye yol açar [39]. Burada sıkıştırma süresi, elektrot kuvveti ile bir iş parçası üzerindeki ilk uygulaması arasındaki süreyi ifade eder.




Şekil 2.7 : Kaynak zamanı parametreleri.

Kaynak akımı, elektrot kuvvetinin gerekli seviyeye ulaşmasına kadar ertelenmelidir. Bu sebeple kaynak işleminin süresi hesaplanır ve tüm zamanlama fonksiyonlarında olduğu gibi hat gerilimi çevrimlerinde ayarlaması yapılır. Akım eğer uzun bir süre devam ederse, erimiş metal miktarı artar ve bu da metalin yüzeyi bir mikroskopla incelendiğinde açık olan tepeler ve çukurları oluşturan kaynaşmış metalin fışkırmasıyla sonuçlanır. Bu nedenle kristal yapı değişir. Elektrotların bağlantısı aniden kesilirse, temas yüzeyinde koyulaşmaya sebep olan bir ısı dağılımı meydana gelir. Bir kaynak işlemi sona erdiğinde, kaynak elektrotlar kullanılarak soğutulur. Elektrot için tutma süresi önemlidir çünkü kaynak havuzunu katılaştırır ancak, ısıyı bir kaynak noktasına yaydığından dolayı süre çok uzun olmamalıdır. Örneğin elektrotu uzun süreli tutma yalnızca galvanizli karbon çeliği kaynak yapıldığında önerilmektedir [15].

### 2.3.4.3. Kaynak kuvveti

Elektrot kuvvetinin temel amacı metal levhaları bir araya getirerek birleştirilmesini sağlamaktır. Elektrot kuvveti bir ihtiyaçtır aksi takdirde kaynak kalitesi istenen seviyede olamaz. İlaveten artan elektrot kuvveti ısı enerjisini azaltır ve bu da daha yüksek elektrot kuvveti gerektireceği anlamına gelmektedir. Daha yüksek kaynak akımı, levhalar ve elektrotlar arasında sıçramaya sebebiyet vermektedir bu nedenle elektrotların tabakalara yapışması söz konusu olabilir. Elektrot kuvveti 700kg / $cm^2$'dir ve bu yeterli olan hedef değerdir [15, 35].

Elektrot kuvveti olması gerekenden daha yüksek olduğunda, düşük dirence ve gelişmiş ara yüz temasına yol açar, bu da kaynak esnasında daha az ısı oluşumuyla sonuçlanır. Bu

nedenle arttırılan kaynak süresi veya akım girişi [36] yoluyla telafi edilmelidir. Ayrıca, aşırı bir elektrot kuvvetiyse daha yüksek iş parçası girintisine sebep olur [33].

Diğer bir sorunsa kaynak işlemi esnasında temas yüzeyinin artmasıdır. Benzer koşulları devam ettirmek için; kademe kademe elektrot kuvveti artırılmalıdır. "Mantar gibi" elektrotlar sebebiyle elektrot kuvvetini değiştirmek zor olduğundan, ortalama bir değer seçilir [15]. Çok düşük kaynak kuvveti durumunda, yüksek temas direnci nedeniyle kaynak akımı uygulandığında, sonuç olarak anında ısı oluşumuyla sonuçlanan dışarı atılmaya neden olur [37].

Yüksek sıkıştırma kuvveti olduğunda, geniş temas alanı düşük temas direncine ve akım yoğunluğuna yol açar, bu da ısı oluşumunu azaltır ve kaynak külçesi boyutunu sınırlar. Çok yüksek basınç durumunda tabaka malzemesi yumuşar [38].

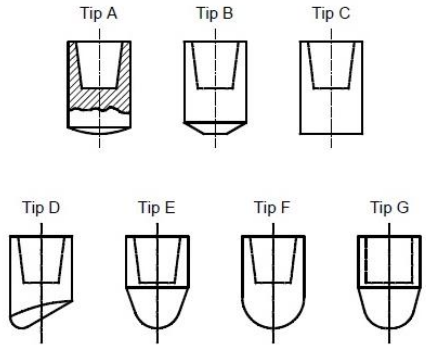
Kozmetik nedenlerden ötür yüksek girinti ihtiyacı mevcut olmadığında veya tabaka malzemesinin deformasyonu gerçekleştiğinde, konsantrasyon noktalarında baskı oluşabilir. Artan elektrot kuvveti nihayetinde temas direncini azaltır. Temas direnci, belirli bir basınçtan sonra tekdüze hale gelir [38].

Elektrot kuvveti artırılması ile ısı enerjisi azalır bu nedenle, bir kaynak bağlantısındaki yüksek basınç, elektrot uçları ile temas noktasının bulunduğu parçaların yüzeyi arasındaki direnci azaltır [15]. Yüksek elektrot kuvvetinin yüksek kaynak akımına eşlik etmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Uçlar üzerindeki çok düşük basınç nedeniyle büyük olasılıkla kaynak sıçramasına neden olur. Aynı zamanda çok yüksek kaynak akımı olduğunda da olur [39]. Basınç çok yüksek olduğunda, düşük nokta kaynağına neden olur. Bu, artan basıncın ısıyı ve elektrik akımını geniş bir alana aktarması, ancak kaynak alanını ve penetrasyonu azaltacağı anlamına gelir [40].

### 2.3.5. Direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot türleri

Elektrot boyut ve şekline bağlı kaynak süreci etkilenmektedir. Farklı geometrilerde olan elektrot türleri Şekil 2.8'de verilimiştir. Elektrotların kontak bölgesi ve açısının değişimine bağlı olmakla kaynak sonucu değişmektedir. Elektrot çapı, sac kalınlığına uygun olarak seçilir [41]. Kaynak anında meydana oluşan temas, kaynak akımını ve temas basıncını etkiler. Elektrotda degregasyon olmaması için doğru elektrot seçimi önemli bir durumdur. Degregasyon sonucunda aşınan elektrodun ucu düz bir yüzey görünümüne

sahip olur. Kaynak işleminin devam ettirilmesi durumunda konkav bir yüzey görünümüne sebep olur. Elektrot geometrisi ISO standartlarınca belirlenerek ISO 5821:2009 detaylı bilgi aktarılmıştır [42].




Şekil 2.8 : Farklı geometrilere sahip elektrot türleri.

Elektrodun, sertlik ve elektriksel iletkenlik değerleri kaynak sırasında en önemli parametrelerdir. Doğru malzeme seçimi ISO 5182:2008 standartı gereği Bakır alaşımı olduğu belirtilmiştir. Daha dirençli nikel, kobalt, berilyum alaşımlar, yüksek mukavemetli çeliklerde tercih edilir [43].

Direnç nokta kaynağında, sac malzemenin kalınlığına (t) bağlı olarak meydana gelen nugget çapı (Nçap) hesaplanabilir [39]. Basitçe 1 mm kalınlığında iki sacın birleştirilmesi işlemi sonucu 5 mm nugget çapı oluşur diyebiliriz. Aşağıdaki formüle göre nugget çapı değeri hesaplanmaktadır [44].

$$N_{çap} = 5 \cdot t^{0.5} \tag{2.2}$$

Elektrot çapını artırdığımız zaman elektrot ile sac metal arasındaki temas yüzey alanı da artış göstermektedir. Kaynak bölgesindeki ara yüzey incelendiğindeyse akım yoğunluğu düşmektedir. Ayrıca elektrot malzemesinin alaşım miktarı ve elektrodun kaplanan malzemesi de elektrik iletkenliğini düşürebilmektedir. Bahsedilen etkiler birlikte düşünüldüğünde nugget çapı boyutundaki azalmayı etkisini arttırır. Elde edilen nugget çapının başarısı kaynak kalitesini netice olarak elektrot ömrünü etkilemektedir. Elektrotda meydana gelen ve ömrünü etkileyen yumuşama, çap büyümesi, oyuklanma, rekristalizasyon temel sorunların başında gelmektedir [45].

### 2.3.6. Çift fazlı çeliklerde direnç nokta kaynağı sonrası çökmenin oluşumu

Penetrasyon derinliği bir nevi nüfuziyet, kalınlık yönü boyunca erimiş alan genişliği olarak tanımlanabilir. Küçük penetrasyon yetersiz ısıtmaya ve soğuk kaynağa işaret edebilir. Genel olarak, büyük bir penetrasyon istenir. Bununla birlikte, ısınma miktarı penetrasyonu belirlediğinden, büyük penetrasyon malzemelerin yumuşamasına ve elektrotlar tarafından olası büyük girintilere neden olur. Genel olarak, nüfuz etme gereksinimleri gevşektir, ancak çok büyük bir deformasyon oluşturmayacaksa büyük penetrasyon kabul edilecektir [46].

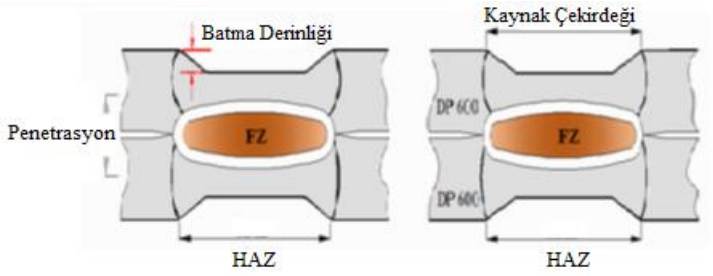
Daha önce de belirttiğimiz gibi, kaynak kabiliyetinin en önemli faktörü elektrotun kullanım ömrüdür, bu da ayarlanan sınırlar içinde yapılabilecek kaynak sayısı anlamına gelir. Çekirdek çapları etkisi, çekirdek yüksekliği elektrot girintisi ve çekirdek boyut oranları da ölçülebilmektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.9 ve Şekil 2.10 ‘da kullanılmış ve elde edilen sonuçlar kullanılarak, çekme kayma mukavemeti ve mikro sertlik üzerindeki darbe ve çekirdek boyutu etkisinin numune boyutu araştırılmıştır [15,47]. Çekirdeğin çapı (DN) veya çekirdek yüksekliği (HN) kaynak merkezindeki kayma gerilimi üzerindeki etkisini basitleştirmek için yeterli değildir. Böylece çekirdek oranı HN / DN bu nedenle ayarlanabilir [48,49]. Sac kalınlık aralıkları ve çeşitli uygulamalar için en küçük çekirdek çapına sahip bir tablo örneği Tablo 2.1'de açıklanmıştır.

Tablo 2.2: Tek satırlı ve kolonlar ortalanmış.

| | Minumum nugget çapı (mm) | |
|---|---|---|
| Sac Kalınlığı (mm) | Kategori A&B | Kategori C |
| ≥0.50<0.60 | 2.5 | 2.2 |
| ≥0.60<0.70 | 2.8 | 2.4 |
| ≥0.70<0.85 | 3.0 | 2.7 |
| ≥0.85<1.10 | 3.5 | 3.0 |
| ≥1.10<1.25 | 3.9 | 3.3 |
| ≥1.25<1.50 | 4.1 | 3.5 |
| ≥1.50<1.60 | 4.3 | 3.7 |
| ≥ 1.60<1.75 | 4.4 | 3.8 |
| ≥1.75≤1.80 | 4.7 | 4.0 |
| >1.80≤2.00 | 5.0 | 4.2 |
| >2.00≤2.25 | 5.3 | 4.5 |
| >2.25≤2.50 | 5.5 | 4.8 |
| >2.50≤ 3.00 | 6.0 | 5.2 |




Şekil 2.9 : Direnç Nokta Kaynağında penetrasyon oluşumu [42, 43, 44].




Şekil 2.10 : Direnç Nokta Kaynağında çökmenin oluşumu [36].

Punta kaynak mekanik özelliklerini oluşturan ve etkileyen elektrot girintisinin (Şekil 2.9) girinti derinliği, elektrot ve levha ara yüzünün sıcaklığına ve elektrot basıncına bağlı olmaktadır. Isı girdisi yükseldiğinde elektrot / tabaka ara yüzü sıcaklığı yükselir, bu da elektrotun basıncı altında levha yüzeyinde oluşabilecek plastik deformasyon derecesini artırır [65]. Girinti derinliğini en minumum seviyede tutmak için kaynak parametrelerini ve elektrot geometrisinin kontrolü gereklidir. FZ ve HAZ'ın sertliği ve malzeme özellikleri: kaynak ısıl döngü etkileşimi, BM'nin (baz materyal) ilk mikro yapısı ve kimyasal bileşim FZ ve HAZ'ın Sertlik ve malzeme özelliklerini kontrol eder. HAZ boyutu: FZ'den çevreye ısı transferi HAZ'ın boyutunu belirler. Birçok araştırmacı çalışmalarında, HAZ boyutunun nokta kaynaklı bağlantıların sünekliği üzerinde bir etki yapabileceğinden söz etmişlerdir [30]. BM'nin mikro yapısı, kimyasal bileşimi ve kaynak termal çevriminin etkileşimi, FZ ve HAZ'ın sertliğini ve malzeme özelliklerini kontrol eder.

### 2.3.7. Direnç nokta kaynağı birleşiminin mikroyapısal incelemesi

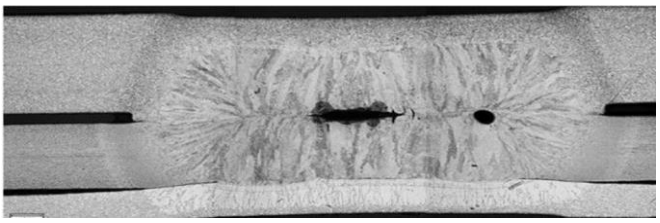
Direnç nokta kaynağı sayesinde, kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) metalurjik ve mekanik özelliklerinde birçok değişiklik oluşur. Bu değişikliklerin incelenmesi ve değerlendirilmesi, kaynaklı bağlantıların sağlamlık, güvenlik ve korunması husuları için önemlidir [50]. Metalin kaynak sonrasında sahip olduğu mikroyapısı, kaynak işlemi öncesi metalin sahip olduğu mikro yapısından farklıdır ve bu malzemelerin şekillendirilebilirliğini ve mukavemetini belirlemede kilit noktadır [51].

Kaynak çekirdeğini etkileyen etmenlerin başında ısıdan etkilenen bölge (HAZ) bulunmaktadır. Kaynak sonrası malzemenin sıcaklığı artarken ergime sonrası katılaşma ile faz dönüşümü gerçekleşir. Kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak iki tip soğuma faz sıralaması mevcuttur [52,53].

1. Sıvı-delta ferrit, östenit, martenzit ve/veya beynit.
2. Sıvı, östenit, martenzit ve/veya beynit.

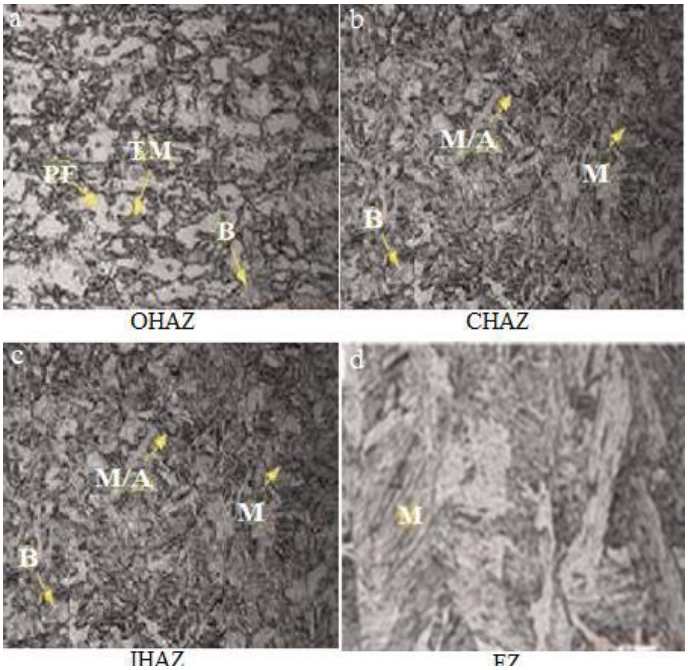
Kimyasal kompozisyon ve soğutma hızı, mikroyapısal bileşimi, bunun beynitik, martenzitik veya her ikisinin bir karışımı olup olmayacağını belirler. Düşük soğutma oranlarında ve/veya daha düşük alaşım seviyelerinde ortaya çıkan mikroyapı tipik olarak

beynitik mikroyapı olacaktır. Yükselen alaşım seviyelerinde ve yeterince yüksek soğutma oranlarındaysa, oluşan mikroyapı çoğunlukla martenzitik olacaktır. Kaynak çekirdeğinin kaynak sonrası mikroyapısal kompozisyonuna rağmen, esas olarak katılaşması ve Şekil 2.11'de gösterildiği gibi soğutma boyunca sıcaklık değişimi ile belirlenen, tanelerin ve boyutunun kaynak üzerinde önemli bir etkisi vardır.



Şekil 2.11 : Üç adet sacın birbirine kaynaklandığı yapının mikroyapısı. Tanelerin, kaynak çekirdeğinden dışarıya doğru soğutma doğrultusunda yönlenmesi [54].

HAZ'ın mikro yapılarını analiz etmek için, dış ısıdan etkilenen bölge (OHAZ), merkezi ısıdan etkilenen bölge (CHAZ) ve iç ısıdan etkilenen bölge (IHAZ) olarak ayrılır. Şekil 2.12'de gösterildiği gibi, OHAZ mikroyapıları, bir ferrit matris içinde tavlanmış beynit ve martenzit içerir. OHAZ'lerdeki beynit oluşumu, direnç nokta kaynağı işlemi yoluyla kısmi yeniden östenitleşmenin varlığına bağlanabilir.




Şekil 2.12 : Üç DP600 çelik Direnç nokta kaynağı bağlantı noktası mikroyapıları; a) DP600 OHAZ; b) DP600 CHAZ; c) DP600 IHAZ; d) FZ. (PF: poligonal ferrit; M: martenzit; TM: temper martenzit; B: beynit; M/A: martenzit-östenit) [55].

# BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, bu çalışma sırasında kullanılan malzemelerin ve test tekniklerinin içerikleri verilmiştir. Bu çalışmanın gerçekleştirlmesi sırasında, kullanılan cihazların ve prosedürlerin açıklamaları yapılmıştır.

## 3.1. Malzeme Temini Ve Özellikleri

İlk olarak, çalışmaya esas olan DP 600 kodlu sac malzemelerin Erdemir A.Ş.'den temini çinko kaplı rulo halinde yapılmış olup, dilimlenmesi, 1,5x640xR mm boyutlarında olacak şekilde Yıldız Kalıp A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. ERDEMİR A.Ş.'den temin edilen ürünün test sertifikası Şekil 3.1'de sunulmuştur. Malzeme olarak HCT590X+Z (ERDEMİR GZR1660) çeliği tercih edilerek çinko kaplamanın nokta kaynağına etkisi de incelenmiştir.

EREĞLİ DEMİR VE ÇELİK FABRİKALARI T.A.Ş.

ÇIKARTILMIŞ SERMAYE: 3.500.000.000 TL
ÜRETİM YERİ :

**TEST SERTIFIKASI**
**EN 10204 : 2004 TYPE 3.1**

TARİH : 04.11.2020
SERTİFİKA NO : 0131650Y
SAYFA NO : 1

MÜŞTERİ ADI : ERDEMIR ÇELIK SERVIS MERKEZI SAN.TIC.A.Ş.
SİPARİŞ NO : 8222782003
EBAT, mm : 1.500 x 1060 x R
STANDART ve KALİTESİ : EN 10346-2015 HCT590X+Z (ERDEMİR 1660)
ÜRÜN TİPİ ve AÇIKLAMASI : GZRB: ÇINKO KAPLI B YÜZEY GALVANIZE RULO

KAPLAMA AĞIRLIĞI : 100.00/(GR/M2)
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ : 1.10/1.70

| ÜRÜN BİLGİLERİ | | | | | MEKANİK ÖZELLİKLER | | | | | | | | | | | | | | KİMYASAL BİLEŞİM, POTA ANALİZİ % | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ETİKET NO | AĞIRLIK (kg) | DÖKÜM NO | BOBİN veya LEVHA NO | DİLİN veya LEVHA ADET | ÇEKME TESTİ | | | | KAT LAMA | AG veya BH DEĞ. | r DEĞ | A/C veya n DEĞ. NSD. | SERTLİK | DARBE TESTİ, joule YÖNÜ : | | | | | YÜK. SIC. °C AKMA N/MM2 | C % | MN % | P % | S % | SI % | AL % | CR % | MO % | V % | NB % | TI % |
| | | | | | NUM. YER. | AKMA N/MM2 | ÇEKME N/MM2 | % UZ. AO | | | | | | 1 | 2 | 3 | ORT. | SIC. °C | | | | | | | | | | | |
| | | | | | BB | | | | | | | | | | | | | | | B % | | | | | | | | |
| 3800118659 | 9760 | 11989 | 30114172200 | | BB | 386.4 | 613.9 | 26 | | | | 0.16 | | | | | | + 00 | 390.0 | 0.096 | 1.622 | 0.024 | 0.003 | 0.264 | 0.044 | 0.474 | 0.006 | 0.009 | 0.006 | 0.002 |

Şekil 3.1 : Rulo olarak temin edilen sac malzemeye ait test sertifikası.

## 3.2. Nokta Kaynak Parametreleri

1,5 x 900 x 60 mm kesilen ürün boyutları nokta kaynağı için hazır hale getirilmek üzere, lazer kesim cihazında numune kesimleri gerçekleştirilmiştir. Sac plakaların nokta kaynağı yapılacak alanları, bölmelere ayrılarak kaynak işlemi için hazır hale getirilmiştir.

Otomotiv sektöründe ve fabrikamızda en çok kullanılan sabit çaplı üç farklı elektrot seçilerek nokta kaynağına geçilmiştir. Şekil 3.2'de ALBAKSAN'dan temin edilip kullanılan elektrot ve türlerine (G, F, B) dair görseller paylaşılmıştır.



Şekil 3.2 : Tercih edilen farklı tip elektrotlar.

Yukarıda özellikleri verilen sacların nokta kaynağı esnasında kullanılan parametreler elektrot uc formu ve kaynak akım uygulama süresi değişken olmak kaydıyla (ms) sabit akım (A) dır. Uygulama deneylerine geçmeden önce, nokta direnç kaynağı elektrot uç türlerine göre sac üzerinde ön denemeler yapılmış olup sıçrantı ve yapışma olmadan gerçekleşebildiği parametreler belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar gruplandırılmış ve elektrot tipine göre farklı sürelerde (± 50 ms) uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Nokta kaynağı esnasında tercih edilen parametrelerin uygulama değerleri/aralıkları Tablo 3.1'de verilmiştir. Mactera marka, 120 kV nokta direnç kaynağı makinasında deneyler gerçekleştirilmiştir.

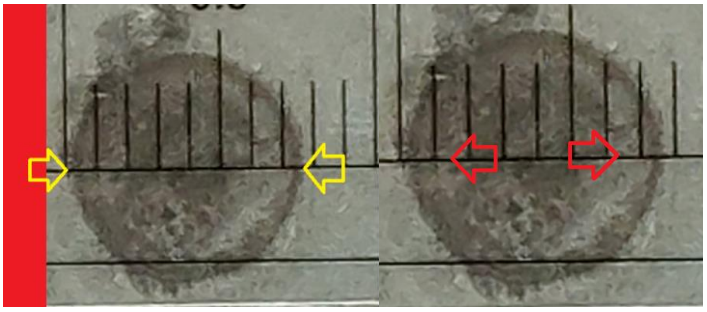
Tablo 3.1: Kaynak deneyleri esnasında kullanılan parametreler.

| Elektrot Türü | Test No | Zaman (ms) | Baskı Kuvveti (N) | Akım (A) |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 250 | 3500 | 10 kA |
| **Elektrot Tipi G** | 2 | 300 | 3500 | 10 kA |
| | 3 | 350 | 3500 | 10 kA |
| | 4 | 250 | 3500 | 10 kA |
| **Elektrot Tipi B** | 5 | 300 | 3500 | 10 kA |
| | 6 | 350 | 3500 | 10 kA |
| | 7 | 250 | 3500 | 10 kA |
| **Elektrot Tipi F** | 8 | 300 | 3500 | 10 kA |
| | 9 | 350 | 3500 | 10 kA |

Kademeli olarak takip edilen nokta kaynağı 300 adette sonlandırılmıştır. Her bir parametre ile yapılan 300. nokta kaynağı bölgesi kesilerek analiz için hazır hale getirilmiştir.

### 3.3. Kaynakların Mikroyapısal Karakterizasyonu Ve Fiziksel Özelliklerinin Tayini

300 adet kaynak yapılan elektrot uçları ve 300. Nokta kaynağının içeren sac numunelerin kesilmesinin ardından, Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezi (Afyon Kocatepe Üniversitesi) ve Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında nokta kaynağının tam ortasında olacak şekilde öncelikle aşındırıcı kesme taşı ile kesilmiş ve daha sonra bakalite alınarak parlatılmıştır. Parlatma işlemi için 220G den başlanmış ve 1200G'ye kadar zımpara kullanılarak yüzeyler zımparalanmış ve daha sonra 1 mikrometrelik Alümina tozu kullanarak ayna parlaklığına getirilmiştir. Parlatma işleminin ardından %1'lik Nital ile dağlayarak mikroyapının ortaya çıkması sağlanmıştır. Nokta kaynağı kesit görüntileri özenlikle Olympus marka optik mikroskop kullanılarak optik resimleri çekilmiş ve daha sonra TUAM'da bulunan cihazlarla EDX, SEM-EDS analizleri ve Mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleme SEM-LEO 1430 VP ile yapılırken ek olarak OXFORD EDX cihazı ile element analiz yapılmıştır. Sac malzemenin kaynak kesintinden alınan mikrosertlik ölçümleri, SHIMADZU HMV-2 cihazında uygulanan yük 50 gr, yükün uygulandığı süre 10 sn'dir. Üç tekrarlı yapılan mikrosertlik ölçümleri neticesinde ortalama değer üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Sac malzemenin ve elektroda ait boyutsal ölçümler yapılarak sac malzemedeki çökme ve elektrottaki aşınma hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Şekil 3.3'de boyutsal ölçümlerin nasıl yapıldığı hakkında bir görsel sunulmuştur.



Şekil 3.3 : (a)Kaynak çekirdek çapının çapı, (b) Kaynak çekirdeğinin merkez çapı

# BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölüm, GZR1660 çinko kaplanmış çelik sacın nokta kaynak direnç performansına kaynak akımı uygulama zamanının etkisine ait sonuçları ve konu ile ilgili tartışmayı içermektedir.

## 4.1. Genel Parametreler Hakkında Bilgiler

Nokta direnç kaynak parametresi olarak, kaynak akımı uygulama süresi (KAUS) seçilmiş olup, KAUS aralığı asıl deneylerden önce yapılan denemelerde ortaya çıkarılan sıçrantısız kaynak performansına göre belirlenmiştir. Gerek kaynak çekirdeği ve kaynak elektrotlarına ait boyutsal ölçümler ve gerekse kaynak bölgesinin ve elektrodun mikroskopik ve makroskopik görüntülerin elde edilmesi aynı koşullarda yapılmıştır. Mikroyapısal incelemeler makro ve mikro optik ve elektron mikroskop görüntülerini içermektedir. Kaynak elektrotlarının yüksek sıcaklıkta çalışması nedeniyle özellikle elektrot malzemesi olan Bakır içerisinde bulunan elektrodun çalışma sırasında boyutsal kararlılığını artırmak için ilave edilen alaşım elementlerinin bir kısmını gerek sac metali ile baskı teması neticesinde veya yüzeyde kaynak sırasında oluşan oksitlenme ve buharlaşan elementlerle yapmış oldukları kırılgan bileşiklerin oluşumu ile kaybetmesi hem boyut değişimine ve hem de elektrotun sertliğinin düşmesine neden olabilir.

Kaynak akımının ve kaynak süresinin etkileri iki şekilde esas olarak benzer etkilere sahip olacaktır. Artan kaynak akım süresi, kaynak akım uygulama süresi arttıkcadaha geniş bir ITAB bölgesi görülme ihtimali artmaktadır. Bu, ısı iletim kaysayısına bağlı olsa da, akımın sabit ve kaynaklanan metallerin türünün değişmediği durumlarda ise, kaynak dayanımının artması beklenmelidir.

Ohm yasasındaki ilgili değişiklik, watt ve ısı eş anlamlı kabul edildiğinde mümkündür. Akım bir iletkenden geçtiğinde, iletkenin elektrik akımının akışına karşı sahip olduğu

elektriksel direnci, ısının üretilmesine neden olacaktır. Isı üretimi için temel formül şu şekilde ifade edilebilir:

$$H = I^2 \cdot \mathrm{R} \tag{4.1}$$

H: Isı

$I^2$: Kaynak akımının karesi

R: Direnç

Bir direnç punta kaynak devresinin ikincil kısmı, kaynaklanacak parçalar dahil, aslında bir dizi dirençtir. Bu elektrik direncinin toplam değeri, dirençli punta kaynak makinesinin akım çıkışını ve devrenin ısı üretimini etkiler. Elektrik devresinin tüm bölümlerinde akım değeri aynı olmasına rağmen, direnç değerleri devrenin farklı noktalarında önemli ölçüde değişebilir. Üretilen ısı, devrenin herhangi bir noktasındaki dirençle doğru orantılıdır.

### 4.1.1. Zaman faktörü

Direnç nokta kaynağı, esas metalin direncine ve punta kaynağını yapmak için gerekli ısıyı üretmek için akan akım miktarına bağlıdır. Bir diğer önemli faktör ise zamandır. Çoğu durumda direnç nokta kaynağı yapımında birkaç bin amper kullanılır. Nispeten yüksek bir dirençten geçen bu tür amper değerleri, kısa sürede çok fazla ısı oluşturacaktır. İyi dayanımlı nokta kaynakları yapmak için, akımın aktığı zamanı yakından kontrol etmek gerekir. Aslında zaman, çoğu tek darbe dirençli nokta kaynağı uygulamasında kontrol edilebilen tek değişkendir. Akımın kontrol edilmesi genellikle ekonomik olarak pratik değildir. Ayrıca birçok durumda tahmin edilemez. Çoğu direnç nokta kaynağı çok kısa zaman aralıklarında yapılır. Normalde kaynak işlemi için alternatif akım kullanıldığından, prosedürler 60 döngü süresine (altmış döngü; 1 saniye) dayalı olabilir.

Yukarıda verilen ısı üretim formülüne, zaman elemanının eklenmesiyle formül şu şekilde tamamlanır:

$$H = I^2 \cdot R \cdot T \cdot K \tag{4.2}$$

T: Zaman

K=Isı kayıpları

Zamanın kontrolü önemlidir. Zaman çok uzunsa, çekirdeki ana metalin erime (ve muhtemelen kaynama) noktasını aşabilir. Bu, gaz gözenekliliği nedeniyle hatalı kaynaklara neden olabilir. Ayrıca, erimiş metalin kaynak bağlantısından sıçrama olasılığı da vardır, bu da eklemin enine kesitini azaltabilir ve kaynağı zayıflatabilir. Daha kısa kaynak süreleri, ana metalde aşırı ısı transferi olasılığını da azaltır. Kaynaklı parçaların distorsiyonu en aza indirilir ve kaynak çekirdeğinin etrafındaki ısıdan etkilenen bölge önemli ölçüde daha küçüktür.

Elektrik akımının sac üzerinden iletilmesi sırasında oluşan ısı temas halinde olan Bakır elektrotların ömrünü etkilemektedir. Bakırdan yapılmış olan nokta direnç kaynak elektrotları, kaynak sırasında ısınmış olan çekirdek bölgesinin deformasyonunu sağlamak ve asıl olan ise sac-sac arayüzeyinde ortaya çıkan ısının ani olarak sebep olduğu ve birleşmeye engel olan oksidasyon bariyerini ortadan kaldırmak için ve temiz bir yüzey eldesi ile atom atom etkileşimini kolaylaştırıp birleşmeyi sağlayan uygulanan deformasyon için gerekli olan baskı kuvvetinden dolayı ve yapılan nokta direnç kaynaklarının yapılma sıklığına göre de her ne kadar su ile sogutulma sağlansa da, sürekli bir proses olduğu için elektrodun özellikle uç kısmında ısı birikmesi nedeniyle de bir süre sonra deformasyona maruz kalmaktadır.

Elektrotların boyutsal değişimi daha ileri aşamada meydana gelmekte elektrik akımının elektrotlardan sac malzemelerin üzerinden iletilmesi aşamasında, sac malzemelerin yüzeyinde bulunan değişik kimyasalların ve kaplamaların etkisiyle istemeyen elektrik akımını zorlaştıran bir tabaka ila kaplanmaktadır. Bu tabaka, belki de en önemlisi sacdan bakıra aktarılan ısının soğutma suyu vasıtasıyla ısı transferini zorlaştırarak bakır elektrodun uç profil kısmının zamanla sertliğinin düşmesine ve kalıcı ve onarılamayan hasar görmesiyle değiştirilmesine sebep olmaktadır. Çinko veya çinko alüminyum alaşımları ile kaplanmış çeliklerin kaynağında ortaya çıkan ve kolaylıkla ısı altında buharlaşabilen çinkonun elektrot yüzeyine yapışması ile alaşımlandırma sonucu elektrot ağırlık kaybı ortaya çıkabilmektedir.

## 4.2. Punta Elektrot Ve Kaynak Bölgesi Boyutsal Ölçümler

Bu çalışmada, parametre aralıklarında yapılan nokta direnç kaynakları için verilen kaynaklara ait kaynak çekirdeği ve elektrot uç profillerinin boyutları Tablo 4.1'de ve

makroskopik görünümü ise Şekil 4.1 ve 4.9 arasında verilmiştir. Şekil 4.1 ve 4.3 arasında verilen elektrot uçlarına ve nokta direnç kaynaklarına ait resimler, F tipi elektrot uç türüne ait olup Şekil 4.1'den 4.3'e doğru kaynak akımı uygulama süresi (KAUS) artmaktadır. Gözle yapılan muayenelerde, makro optik makroyapılar, genellikle, çekirdek boyutlarının ve genel görünüşlerinin oldukca düzenli olduğu nu ve en-genişlik oranlarının (Aspect Ratio-AR) 1 civarında olduğunu işaret etmektedir. En-genişlik oranları aynı zamanda, kabul testlerinin önemli bir kontrol maddesi olduğu için bu değerin 1'e yakın olması beklenmektedir. Birden düşük değerler ve aşırı yüksek değerler baskı kuvveti uygulama sırasında elektrotların eksen bozukluğunun olduğuna ve/veya elektrot uçlarının aşınmasına da işaret etmektedir. ITAB'lı ölçümlerle çekirdek çap ölçümleri arasındaki fark düşük ısı girdisinde 3.3 mm (7 nolu numune) ve en düşük ise 2.1 mm ile 9 nolu numunede görülmüştür. Artan ısı girdisi ile beraber, bu fark azalmıştır. Bu farkların, elektro ucundaki basma yüzeylerindeki boyut değişiminin artan plastiklikle beraber kaybolmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.1: F tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynakların çekirdek ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları; nokta direnç kaynağı ITAB dahil çekirdek dış çapı ve kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve kaynak çekirdek merkez çapı ve kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları.

| **Plaka** | **1** | **2** | **ORT** | **Elektrot** | **1** | **2** | **ORT** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 9 | 8,9 | 8,95 | 7 | 10 | 10,3 | 10,15 |
| 8 | 8 | 8,8 | 8,4 | 8 | 9,4 | 9,2 | 9,3 |
| 9 | 9 | 8,9 | 8,95 | 9 | 10 | 10,4 | 10,2 |
| **Plaka** | **1** | **2** | **ORT** | **Elektrot** | **1** | **2** | **ORT** |
| 7 | 5,5 | 5,8 | 5,65 | 7 | 6,2 | 6,1 | 6,15 |
| 8 | 6 | 6 | 6 | 8 | 6,1 | 5,8 | 5,95 |
| 9 | 6,8 | 6,9 | 6,85 | 9 | 6,8 | 7,4 | 7,1 |

Boyut ölçümleri ölçülen değerler arasında belirgin bir fark olmadığına işaret etmektedir. Ancak, 9 numaralı numunenin çekirdek ölçümleri diğerlerine nazaran biraz daha geniş olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm farkı daha genel bir ifade ile, elektrodun basma profili ile ve ısı girdisi ile alakalı olup, bu seride ısı girdisinin yüksek olmasına bağlanabilir. Bu elektrot uç tipinde (F tipi) düz baskı alanı mevcut olup (Şekil 4.1.f), elektrot baskı kesitlerinin Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'de oldukca düzenli bir şekilde oluştuğu görülmektedir.

Dikkat edilirse, F tipi Elektrot uçlarının yüksek sıcaklığa kadar ısınmış olan sac yüzeyinde daha homojen eşit kalınlıkta çekirdek için dizayn edildiği ve baskı kuvvetinin plastik olarak deforme edilmekte olan sac çekirdek bölgesinde homojen dağılıma müsade ettiği görülmektedir. Numune 7 den 9'a dogru gidildikce, akım artmaktadır ve Şekil 4.3 gibi, çekirdek genişliği ve çekirdek derinliği daha eş eksenli ve belirgin olmaktadır. Buna karşın, daha düşük ısı girdisinde dahi çekirdek en genişlilk oranlarının birbirine yakın olduğu ve görünüş itibariyle daha uygun olduğuda görülmektedir.

Artan KAUS ile beraber, ısı girdisi de artmakta ve ısı girdisinin artmasının Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te de görüldüğü gibi özellikle numune 9'da çekirdek çapını artırdığı Tablo 4.1'de görülmektedir.

Artan sıcaklıkla beraber metalik malzemelerin çekme deneyi ile hesaplanan elastisite modülünün ve akma noktasının düşmesine sebep olduğu ve metalin plastikliğini iyileştirdiği bilinmektedir. Özellikle, düşük karbon içeriğine sahip olan çeliklerdeki, sıcaklık elestisite modülü değişimi alaşımlı (Cr ve V içerenlere göre) daha hızlıdır. Alaşımlı çeliklerdeki elementlerin katı hal sertleştirmesi ile matris sertliğini uzun süre koruması ve tane içi difüzyon katsaysının daha düşük olup daha az mobilitiye sebep olması elastisite modülünün daha yüksek çıkmasına sebep olmaktadır ki bu çalışmada düşük karbonlu çelik kullanıldığı için, akma dayanımının hızlı bir şekilde düşeceği muhtemeldir.

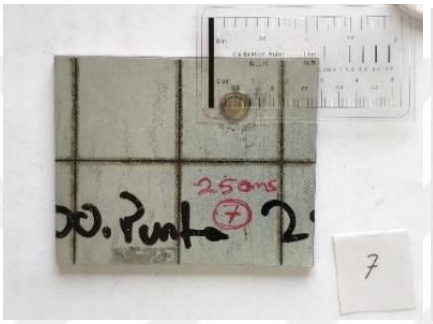
Artan direnç kaynak akımıyla beraber nokta direnç çekirdek derinliği ve nokta direnç kaynak çekirdeğinin ITAB dahil olan dış çapının arttığı görülmektedir. Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'de verilen makro resimlerde, elektrotların çalışan baskı yüzeylerinde değişik boyut ve şekilde aşınma izlerinin ortaya çıktığı görülmektedir.

Aşınma izleri, tekrarlı basma kuvvetlerinin oluşturduğu yorulma etkisi ve aynı zamanda elektrotdan sac malzemeye olan madde transferi ile kopan parçalanma sonucuyla ve/veya yukarıda belirtildiği gibi bir yorulma mekanizması ile, oksitlenme + tabakalaşma ile oluştuğu düşünülmektedir. Yorulma ile aşınma mekanizması, özellikle tekrarlı yüklerde yüzeydeki fretting etkisi ile, yani deformasyon sonucu metalin üst tabakasının yorulmasının etkisi ile, çukurcuk tipi aşınma ile başlayan hasar görmedir.

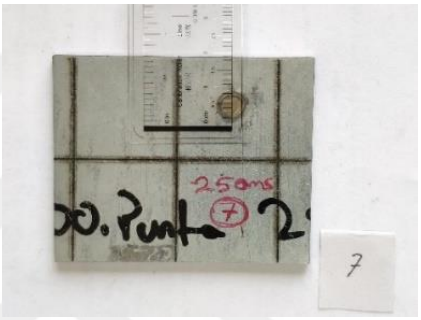
Bu aşınma mekanizmasında elektrot vasıtasıyla uygulanan yükler tekrarlı bir karaktere sahiptir; metalin akma noktasının altında mekanik olan yüklenen metalik yapılarda en çok düşük gerilim yorulması aktif olmakta iken, akma noktasına yakın olan durumlarda ise yüklemenin yorulma limitine yakın olması ile beraber çatlak oluşumu meydana gelmekte ve oyuklanma aşınması meydana gelmektedir. Bazı yorulma dayanım sınırlarının olmadığı malzemelerde bu tür yorulma hasarları daha kolay bir şekilde meydana gelmektedir ve yüksek sıcaklıkla beraber oksitlenmenin çatlak ucuna kadar ilerlemesi ile çatlağın artık tekrar adhezyon özelliğini kaybetmesi ve çatlağın basma kuvveti uygulanan bölge çevresinde yayılıp ayrılma ile sonlanması görülür. Yorulma davranışı göstererek kopan bu parçanın hemen altında ki yüzeyin de oksitlenerek tabaka oluşturması ve akabinde, diğer çatlaklı bölgelerle birleşmesi de kaçınılmazdır.




a




b



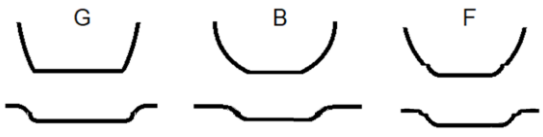

c




d




e




f

Şekil 4.1 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 7 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü, f) elektrotların takribi basma yüzeyleri ve kesit profilleri.



a





b c



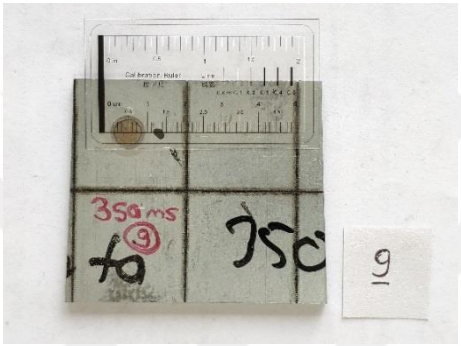


d e

Şekil 4.2 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 8 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.



a



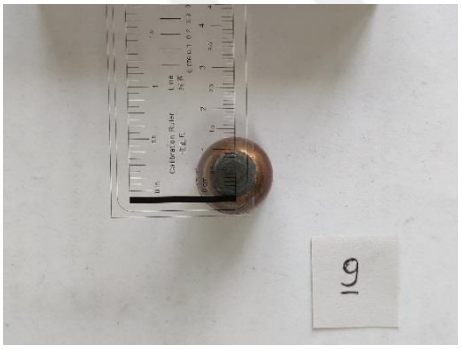
b



c



d



e

Şekil 4.3 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 9 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

İkinci seri olan B tipi elektrot ucu ile yapılan kademeli kaynaklara ait çekirdek, elektrot ve boyut ölçüm görüntüleri Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6 arasında verilmiştir. Bu serideki nokta direnç kaynak akımı, Şekil 4.4'den 4.6'ya doğru artmaktadır. Ayrıca, Tablo 4.2'de de elektrodun oluşturduğu ITAB dahil nokta direnç kaynak alanı ve çekirdek boyut ölçüm sonuçları ve ortalamaları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 4.1 ile 4.3 arasında verilen

resimlerdeki numunelerde en-genişlik oranları dikkate alındığında bu oranların ilk baştaki kaynak çekirdeklerinde 1'e yaklaşırken, uzun süreli akım uygulanması ile beraber yüksek ısı girdisinin çalışıldığı 6 nolu numunenin özellikle çekirdek boyut ölçümlerinde ciddi farklar ortaya çıktığı görülmektedir. Bir önceki seri ile karşılatırıldığında ise, en genişlik oranlarının daha değişken ve bir önceki değerlerine bu seride yaklaşmadığı görülmektedir. Bu serinin diğer özelliği ise, birinci numune hariç, numuneler 4 ve 5, elektrotların ölçülen uç en-genişlik oran değerlerinin 1'den çok farklı olduğu ve homojen bir deformasyon veya aşınma göstermediği düşünülmektedir (Tablo 4.2).

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te görüldüğü gibi çinko oksit veya genel bir ifade ile oksidasyon çemberi sac üzerinde ile elektrot ucunun çalışma alanının etrafında bulunurken, sadece Şekil 4.5de verilen görüntülerde bu halenin bulunduğu görülmektedir. F tipi Bakır elektrotlarında görülen aşınma mekanizması bu seride de görülmektedir. Yukarıda da ifade eidldiği gibi, tekrarlı yükleme sonucu yorulma ile ortaya çıkan bu durum, elektrot yüzeyinin oksitlenmesi ile beraber öncelikle bakır yüzeyinde çukurcuk oluşumu ve takiben yüksek sıcaklıkta havadaki oksijen ile etkileşimi sonucu oksitlenme ile devam eden malzeme kaybı görülmektedir.

Bakır elektrot uç profilinin boyutlarının çok fazla değişmediği değerlendirilmekle beraber elektrot baskı yüzeyinin aşınması, bu seride düşük ısı girdisinde orta kısımlara ve yüksek ısı girdisinde ise daha çok kenarlarda yoğunlaşmıştır. Kenarlarda oluşan yorulma aşınmasının elektrot uç profili ilişkili olması muhtemeldir. Öyleki, çapraz kesit mesafesi, orta kısımlarda sıfır iken, kenarlarda ise sıfırdan daha büyüktür; kenarda bir süreklilik olmaması ile açıklanabilir.

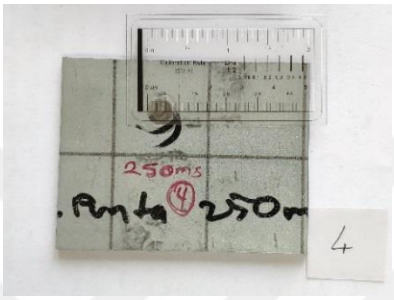
Şekil 4.4 ile Şekil 4.6 arasındaki nokta direnç kaynak çekirdeklerinin optik makro görüntülerinde de bahsi geçen bu oluşum görülmektedir. Bu durum, kaynak akımının uygulanma süresinin artması ile ortaya çıkan Isı girdisinin etkisinden daha çok, basma ekseninin farklı olması yani kaçık olması dışındaki diğer etmenlerden etkilenerek, örneğin, yüzeydeki oksit tabakasının kalınlığındaki farklılık bulunması, örneğin oksit toparlanması veya yığılımı yüzey aşınmasının homojen olmamasında etkili olabilmektedir.

Tablo 4.2: B tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları.

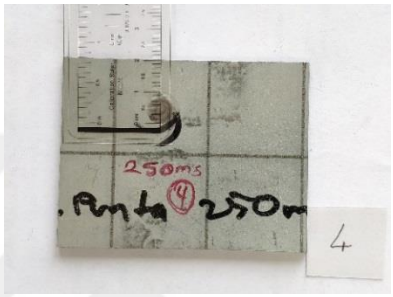
| **Plaka** | **1** | **2** | **ORT** | **Elektrot** | **1** | **2** | **ORT** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 4 | 9,9 | 9,9 | 9,9 |
| 5 | 8,9 | 8,1 | 8,5 | 5 | 10,1 | 9,7 | 9,9 |
| 6 | 7,6 | 8,8 | 8,2 | 6 | 10 | 9,6 | 9,8 |
| **Plaka** | **1** | **2** | **ORT** | **Elektrot** | **1** | **2** | **ORT** |
| 4 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 4 | 6,6 | 6,7 | 6,65 |
| 5 | 6,1 | 6,3 | 6,2 | 5 | 6,5 | 6 | 6,25 |
| 6 | 6,5 | 6,2 | 6,35 | 6 | 6,6 | 6,3 | 6,45 |



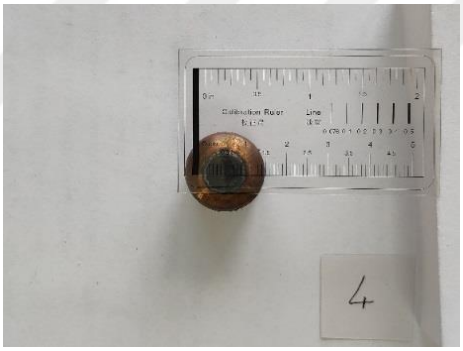

a




b




c




d



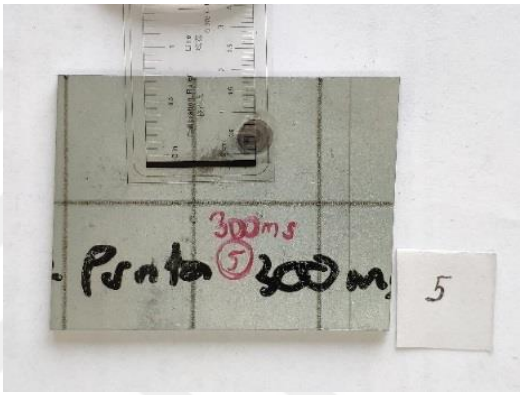

e

Şekil 4.4 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 4 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

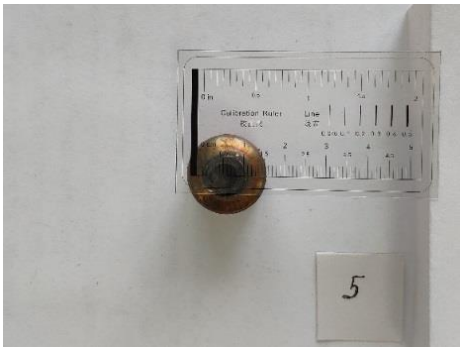


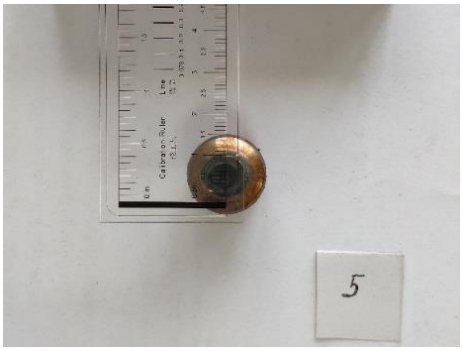

a




b c




d e

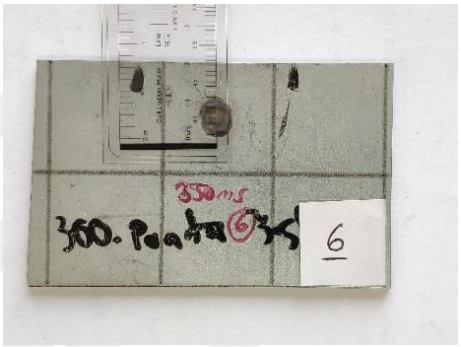
Şekil 4.5 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 5 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.



a



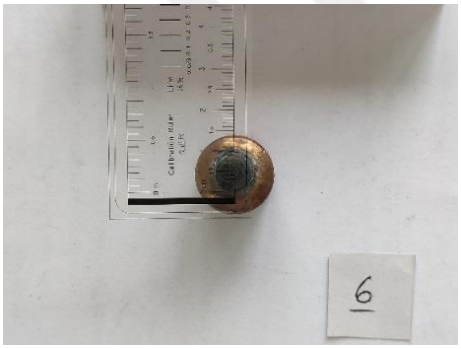
b



c



d



e

Şekil 4.6 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 6 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

Son seri olan, G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ait çekirdek ve elektrot uç özelliklerine ait resimler Şekil 4.7 ve Şekil 4.9 arasında verilmiştir. G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynakların çekirdek ITAB dahil çaplarına ve ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir. Bu seride diğer serilerdeki bilgiler dikkate alındığında, çekirdek ve elektrot uç ölçüm sonuçları daha iyi boyutsal sonuçlar vermiştir.

Elektrot ve nokta direnç kaynak çekirdeklerinin boyutsal ölçümlerin ortalamaları özellikle düşük ve orta ısı girdisine denk gelen akım uygulama süresi kullanılarak yapılan numunelerde en-genişlik oranı 1'e oldukca yakın bulunmaktadır. Yüksek KAUS/kaynak akımı uygulama süresi ile yapılan kaynakların bu değerden saptığı görülmektedir. Tablo 4.2 ve Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da verilen optik makro görüntü ölçüm sonuçlarına ve boyutsal ölüm sonnuçlarına göre, özellikle B tipi uç formuna sahip elektordlarla yapılan kaynaklarla karşılaştırıldığında, daha homojen bir görüntü veren bu serideki kaynaklarda, şekilsel olarak iyi sonuç veren F tipi elektrot ucu ile yapılan deneylere göre, belirgin bir üstünlük gösterdiği açıkca görülmektedir. Bu elektrot türü ile yapılan kaynakların ITAB alanının diğerlerine göre daha geniş olduğu da görülmektedir.

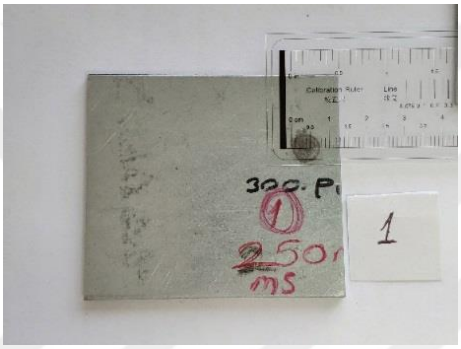
Tablo 4.3'de verilen, 1 numaralı numunedeki çekirdek dış çap ve çekirdek çap ölçümleri arasındaki farkın 1.6 mm olduğu ve artan ısı girdisi ile beraber bu fark azaldığı görülmektedir. G ve B tipi elektrotlarda en düşük ısı girdisi ile en yüksek ısı girdisi arasındaki dış çap farkı sırasıyla 3.2 ve 2.1 mm ve 0 mm ve 2.1 mm olmakta iken, bu seride, en düşük ısı girdisinde, fark 1.35 mm ve en yüksek ısı girdisinde ise 1.4 mm olmuştur. Bu elektrot uç serisinin Şekil 4.1f'de verildiği formda olduğu düşünülürse, bu durumda, daha iyi bir boyutsal kararlılık sağladığı ve artan ısı girdisi ile muhtemelen artan çekirdek kaynak sıcaklıklarında daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Diğer elektrot uç tiplerinde tartışılan, baskı yüzeyindeki aşınmanın bu elektrot tipindede görüldüğü ancak çok daha az olduğu görülmektedir.

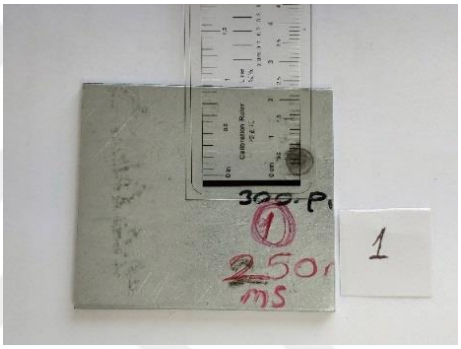
Tablo 4.3: G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları.

| **Plaka** | **1** | **2** | **ORT** | **Elektrot** | **1** | **2** | **ORT** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7,6 | 7,1 | 7,35 | 1 | 8,2 | 8,1 | 8,15 |
| 2 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 2 | 8,6 | 7,9 | 8,25 |
| 3 | 6,9 | 7,8 | 7,35 | 3 | 8,8 | 8 | 8,4 |
| **Plaka** | **1** | **2** | **ORT** | **Elektrot** | **1** | **2** | **ORT** |
| 1 | 5,8 | 6,3 | 6,05 | 1 | 6,8 | 6,4 | 6,6 |
| 2 | 6,3 | 6,1 | 6,2 | 2 | 7,1 | 7,6 | 7,35 |
| 3 | 7,2 | 6,3 | 6,75 | 3 | 7,5 | 7,3 | 7,4 |

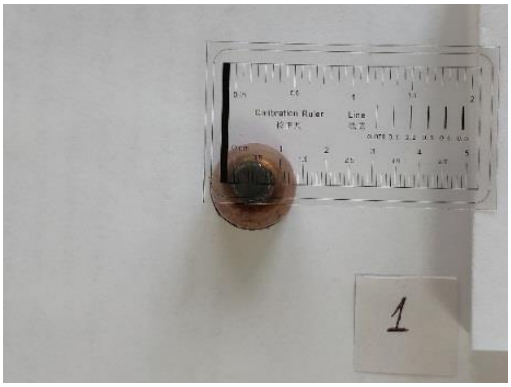


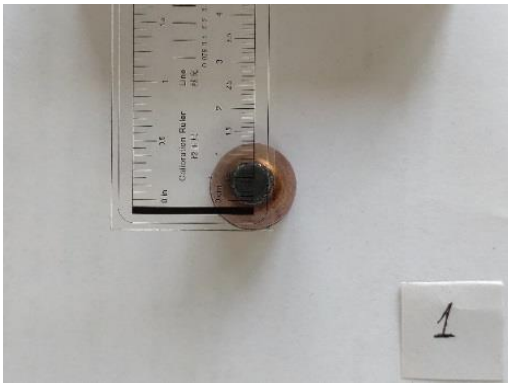

a



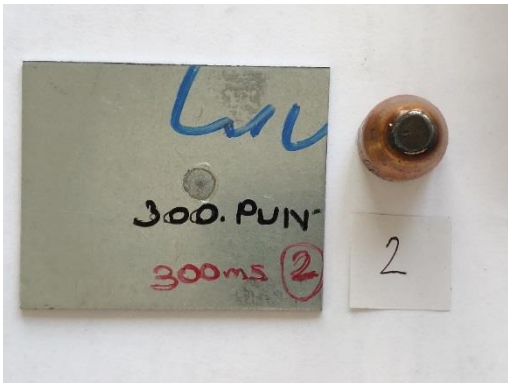

b c



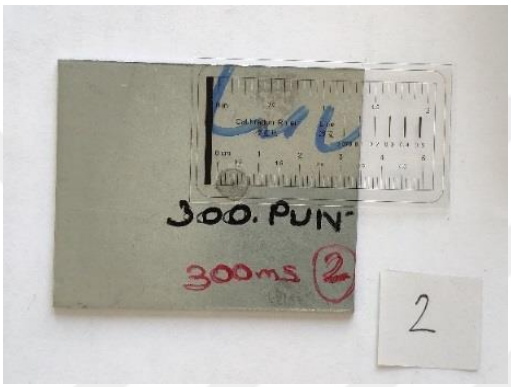



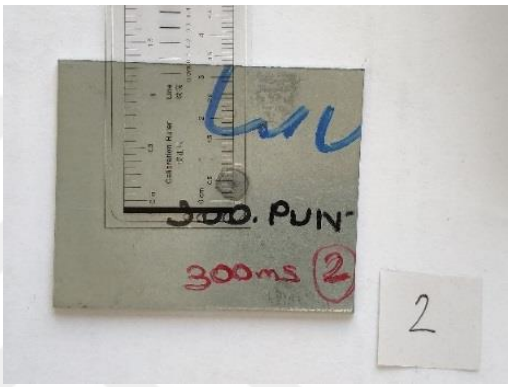

d e

Şekil 4.7 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 1 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve () dikey ölçümü.

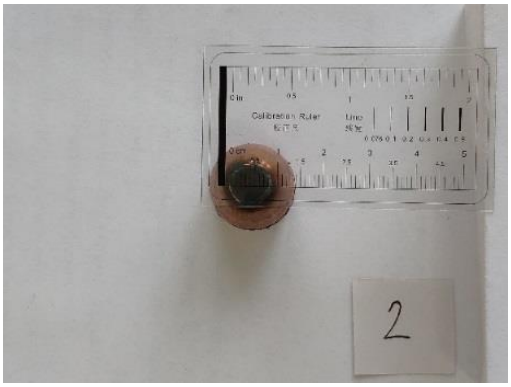



a




b c





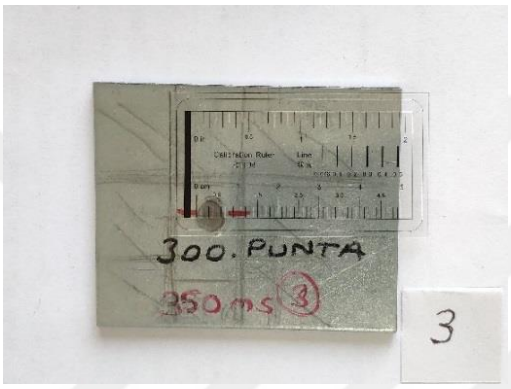


d e

Şekil 4.8 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 2 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.



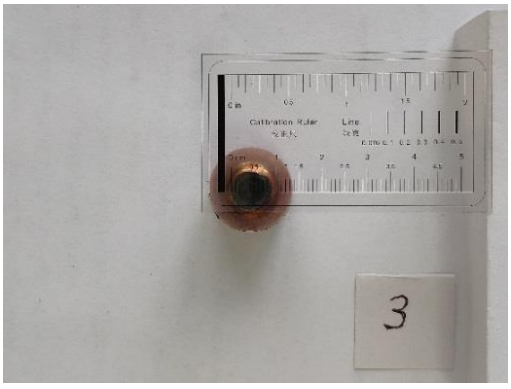

a



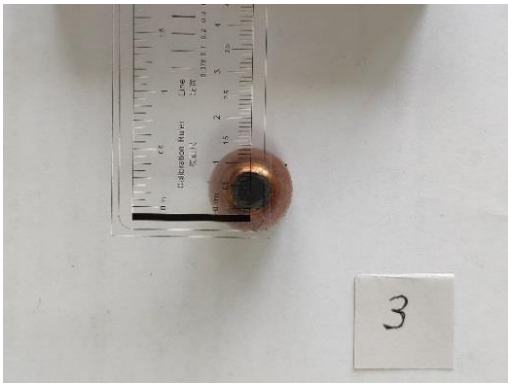

b




c




d




e

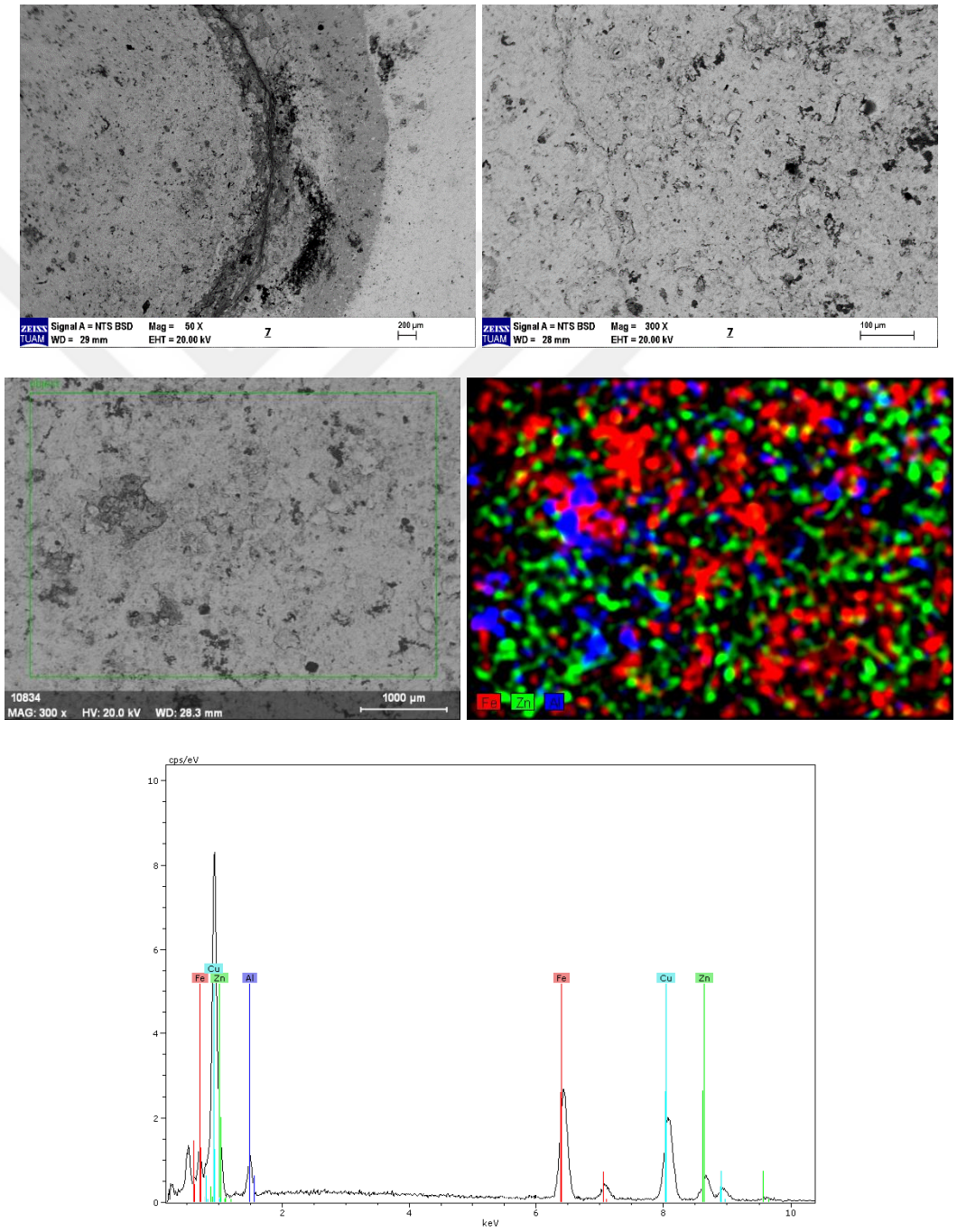
Şekil 4.9 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 3 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

### 4.3. Elektron Mikroskop Analizleri

Şekil 4.10 ile Şekil 4.12 arasında, 7, 8 ve 9 numaralı numunelerin kaynak çekirdeği ve elektrotlarına ait SEM görüntüleri yanında yüzeyden alınan EDX sonuçlarını verilmiştir. Şekillerde verilen resimlerde, nokta direnç kaynak çekirdeklerinin daha derin olduğu görülebilmektedir. ITAB bölgesinin genişliği ise, yaklaşık olarak kaynak çekirdeğinin kenarından yaklaşık olarak 1.2 ile 1.4 mm dışına olduğu görülmektedir. Nokta kaynak çekirdekleri üzerinde EDX ile yapılan elementel değişim paternin göre ise, Al, Çinko ve Bakır transferinin yüzeye gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda madde transferi, temel olarak metalin öekirdek bölgesinden buharlaşması (Al ve Çinko için) ve en soğuk olan veya en yakındaki yüzeye atomların adhesif olarak yapışması/tutunması ile gerçekleşmektedir. Bu şekilde buharlaşan elementlerin, elektrot yüzeyine yapışması ile madde transferi nedeniyle ortaya çıkan aşınma elektrot yüzeylerinde, bir önceki bölümde verilen Şekillerde görülmektedir. Ancak, buharlaşma ile oluşan elementel farklılık bakır elektrodun özellikle yüzeye yakın bölgelerde, daha düşük elastik modülüne sahip olmasına ve daha yumuşak bir karaktere sahip olmasına yol açacaktır. Bu şekilde, deformasyon kolaylaşacak ve basma kuvvetlerinin uygulanması sırasında aşınmanın hızlanmasına sebep olacaktır.

Elementel transferler, çinko ve Al buharlaşmasının elektrot yüzeyine toparlanması veya termodinamik olarak değerlendirmek gerekirse kaynak sırasında çevre sıcaklığının artması sonucu buhar fazının hacminin artması ile beraber soğuması ve en yakın yüzeye yoğuşarak yapışmasını içermektedir. Bu çalışmada verilen Şekil 4.10 ve Şekil 4.12 arasındaki resimlerde, bütün yüzeylerde Al ve çinko birikmesi söz konusu olup, bakır transferi az da olsa bulunmaktadır. Tekrarlı yüklerin etkisi ile çok sıcak yüzeylere olan yapışmanın çatlak ve kopma ile izole edilmiş bakır parçaları vasıtasıyla meydana geldiği düşünülmektedir. Bakır, ısı kapasitesi düşük ve ısı transfer katsayısı yüksek olduğu için ısıtılması zor olan bir elementtir; bu özelliği gereği elektrot olarak kullanıldığında yüksek ısı transfer katsayısı nedeniyle çok kolay bir şekilde soğutulmakta ancak oldukça yumuşak bir element olduğudan dolayı deformasyona düşük kuvvetler altında dahi müsaade etmektedir. Bazı malzemeler gibi bakır da iyi tanımlanmamış yorulma sınırı göstermedikleri için hasarı kolaylaşmakta ve her ısıl çevrimde lokal deformasyon gösteren bölgeler yüksek akım yoğunluğu ve ısıl yoğunlukla beraber kopma meydana

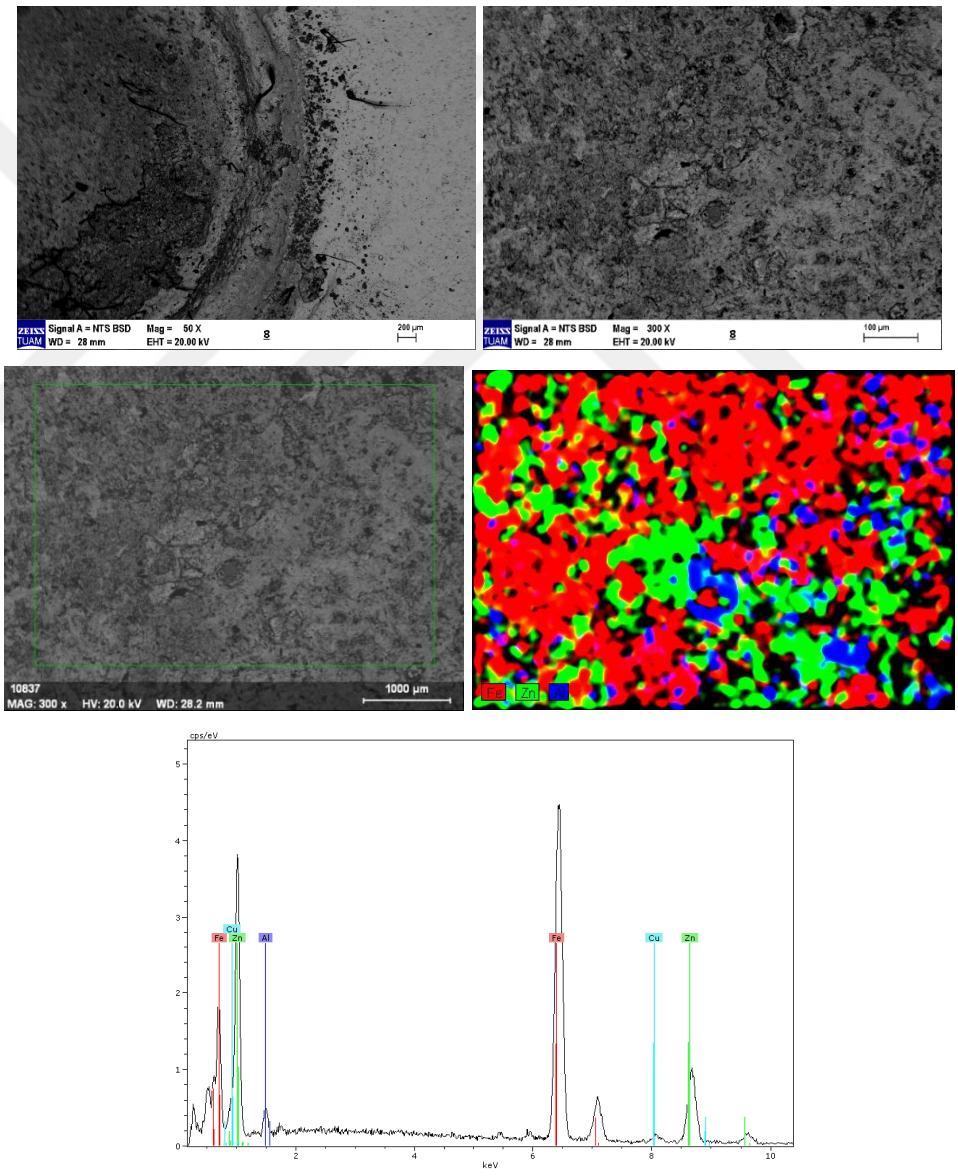
gelmektedir. Şekil 4.10 ve 4.11'de verilen EDX analiz değerlerinin incelenmesi sonucunda, çinko ve bakırın rastgele dağıldığı ve özellikle alumünyum elementinin de bulunduğu görülmektedir. Bazkı kaplamalrda çinko ile beraber alüminyumda bulunabilmektedir. Alüminyum dolayısıyla kaplamadan gelmekte ve çinko ile beraber buharlaşıp yüzeye yapışmaktadır.




Şekil 4.10 : 7 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Tablo 4.4: 7 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

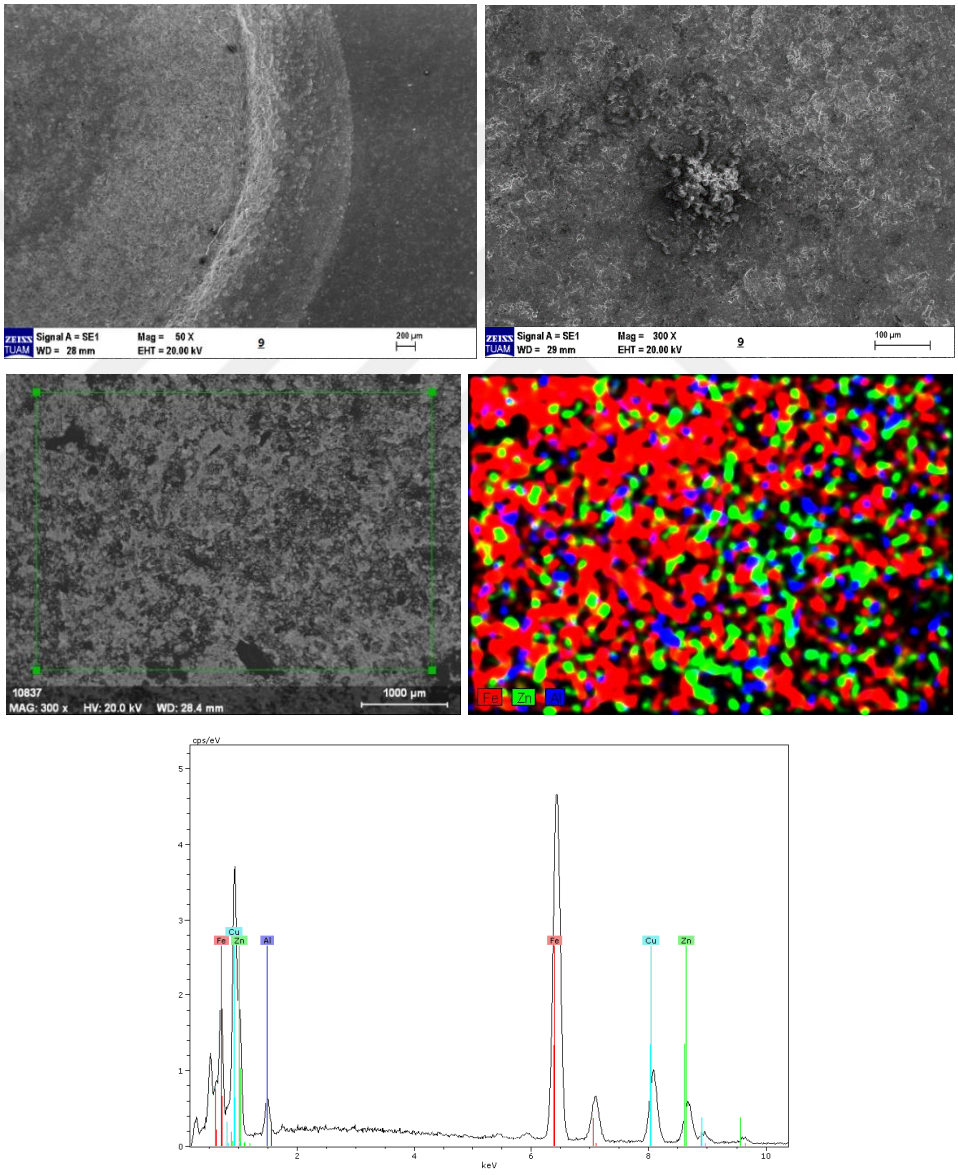
| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 2169 | 3.73 | 4.72 | 10.09 |
| Iron | K series | 12261 | 24.25 | 30.64 | 31.64 |
| Copper | K series | 10809 | 39.62 | 50.07 | 45.43 |
| Zinc | K series | 2686 | 11.52 | 14.57 | 12.84 |
| | | Total: | 79.1 % | | |




Şekil 4.11 : 8 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Tablo 4.5: 8 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 1125 | 1.92 | 2.37 | 5.02 |
| Iron | K series | 25254 | 51.17 | 63.18 | 64.76 |
| Copper | K series | 535 | 1.92 | 2.37 | 2.13 |
| Zinc | K series | 6058 | 25.99 | 32.09 | 28.09 |
| Total: 81.0 % | | | | | |




Şekil 4.12 : 9 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

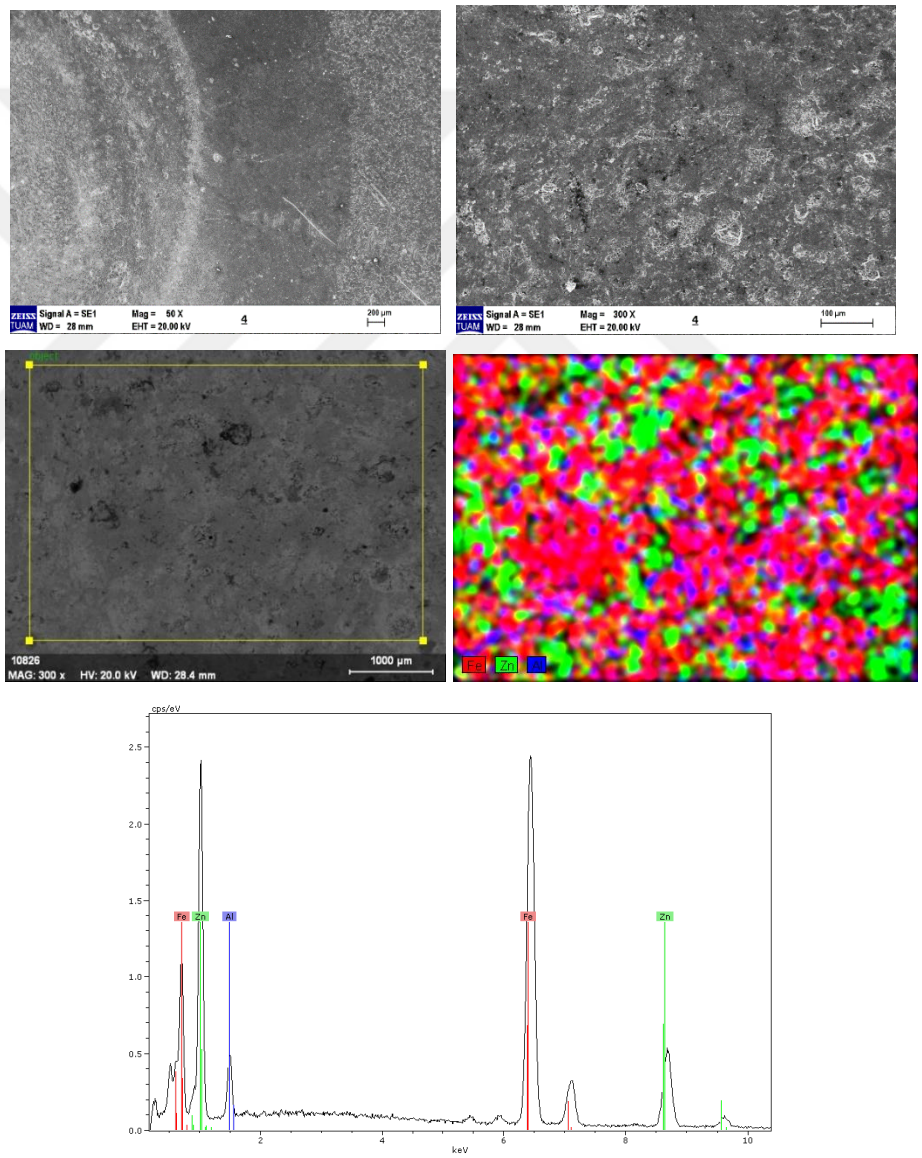
Tablo 4.6: 9 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 3532 | 1.96 | 2.32 | 4.93 |
| Iron | K series | 71828 | 49.72 | 58.90 | 60.47 |
| Copper | K series | 15841 | 19.83 | 23.50 | 21.20 |
| Zinc | K series | 8729 | 12.90 | 15.28 | 13.40 |
| | | | Total: 84.4 % | | |

Yukarıda ifade edilen, bakır ve çinkonun çekirdek yüzeyine taşınımını açıklamak amacıyla, artan akım uygulama süresi ile birlikte Şekil 4.13'te verilen sonuçlara göre çinkonun bakıra göre daha yüksek bir oranda transfer edildiği görülmektedir. Çinkonun oksitlerinin hızlı bir şekilde oluştuğuda ve yüzeye oksit olarak yoğunlaştığı düşünülürse, bu durumda, Bakır'ın transferinden daha farklı bir mekanizmanın bulunduğu görülmektedir. ZnO'nun bozunma sıcaklığı 2317 K iken CuO'nun bozunma sıcaklığı ise 1073K dır. Kaynak çekirdek sıcaklığında hızlı bir şekilde buharlaşan Zn hava ile temasında kolaylıkla oksit oluşturmaktadır ve ZnO'nun bozunma sıcaklığı yüksek olduğu için düşük kaynak akımı uygulama süresinde dahi görülmektedir; oluşum ve ayrışma sıcaklığı daha düşük olan CuO'in ayrışması ile beraber, artan sıcaklıkta beraber termodinamik olarak daha kararsız olan CuO, kaynak çekirdek sıcaklığında ayrıştığında Cu serbest kalmakta ve temiz bir yüzey olan demir yüzeyine yapışmayı kolaylaştırmaktadır. Buharlaşma ile alüminyumun yüzeye transferide benzer bir mekanizma ile transfer dilmiş olabilir ancak, alüminyum olarak değil daha çok oksit olarak yani Alümina olarak yoğunlaşması daha gerçekcidir.

B tipi elektrotlarla yapılan nokta kaynak görüntüleri ve analizleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.15 arasında verilmiştir. Analizler, çok miktarda çinko ve alüminyumun yüzeye birikiminin veya yüzeylere transferinin gerçekleştiğini işaret etmektedir. Çinko oranları artan akım uygulama süresi ile beraber sistematik olarak artmaktadır. Bakır tranferinin ilk numunede olmaması, muhtemelen, uygulanan akım süresinin yeterince buharlaşma için ısı gridisi yaratmaması ile elektrot yüzeyinde oluşan oksit tabakasının kalınlığı veya temiz yüzey oluşturma zorluğu ile ilgili olabilir. Artan kaynak akımı uygulama süresi ile beraber, alüminyum ve çinko elementinin buharlaşması neticesinde, daha fazla çinko, bakır

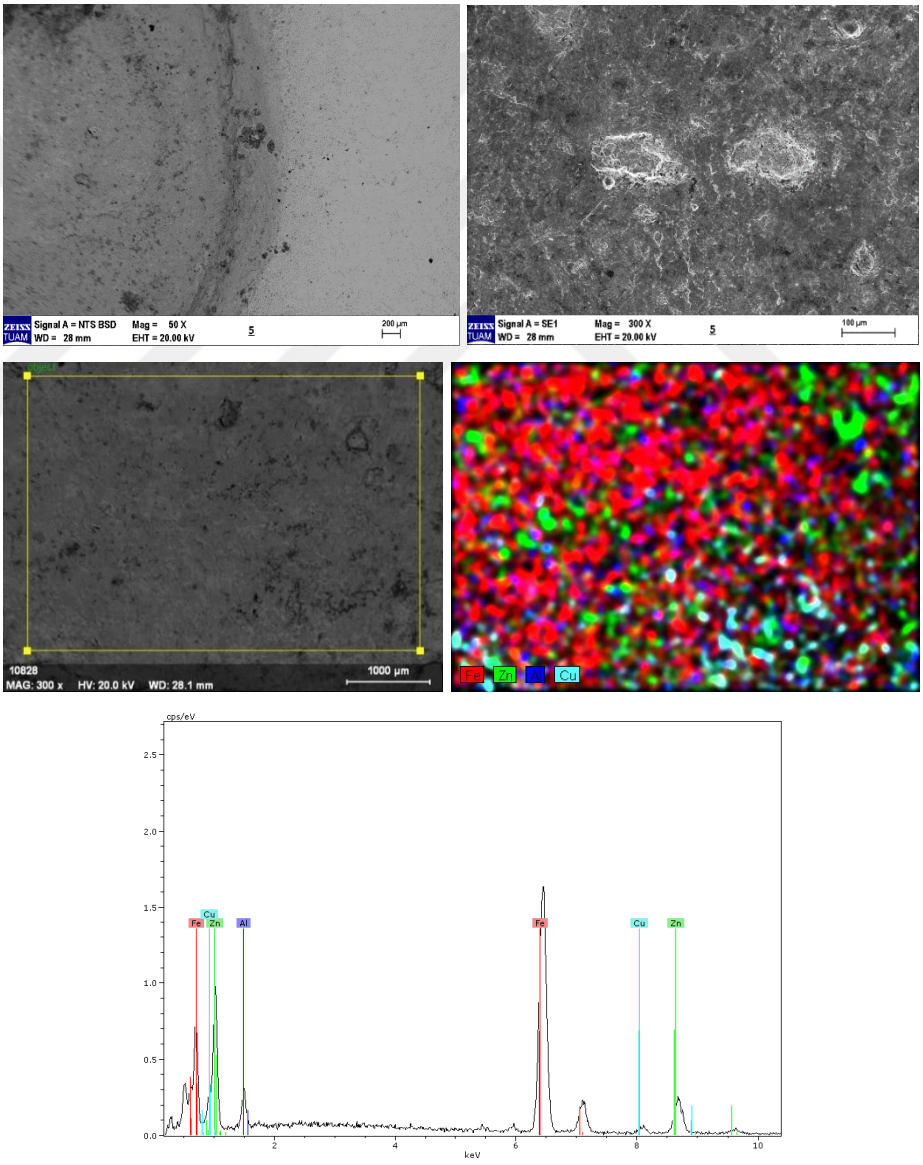
elektrot yüzeyine yapışabilmekte ve nokta kaynak çekirdeği ile bariyer oluşturup bakır transferini engelemekte faydalı olabilmektedir. Bu nedenle bu seride, bakır tranferi gerçekleşemiş ve çinko miktarı çok yüksek olmayan seviyelerde görülmüştür. Bu serideki gerek çekirdeklerin homojen olmasıve elektrot yüzeylerinin düşük ısı girdisinde daha fazla aşınmaya maruz kalmaması avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 4.15'den de görüldüğü gibi, F ve G tipi elektrotların aksine, yüksek ısı girdisi ile oluşan aşınma miktarının yüksek olması ve elektrodun yüzeyinin çinko kaplanması ile CuZn bileşiğinin oluşumuna müsade etmesi ve kütlesel aşınmaya daha kolay maruz kalması olabilir.




Şekil 4.13 : 4 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Tablo 4.7: 4 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

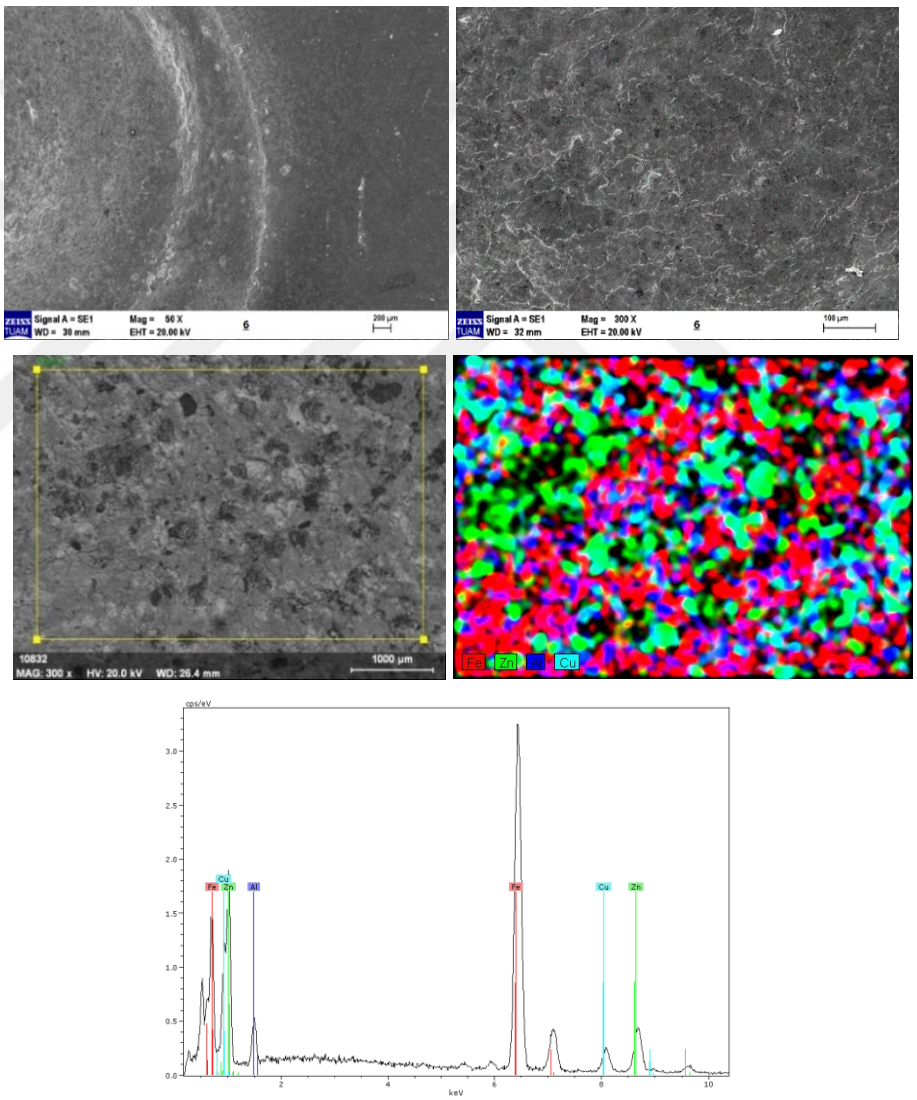
| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 4561 | 3.60 | 4.18 | 8.60 |
| Iron | K series | 51496 | 59.11 | 68.56 | 68.23 |
| Zinc | K series | 11608 | 23.50 | 27.26 | 23.17 |
| Aluminium | K series | 4561 | 3.60 | 4.18 | 8.60 |
| Total: 86.2 % | | | | | |




Şekil 4.14 : 5 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Tablo 4.8: 5 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 1469 | 3.23 | 3.95 | 8.13 |
| Iron | K series | 18726 | 57.35 | 70.02 | 69.68 |
| Copper | K series | 418 | 2.28 | 2.78 | 2.43 |
| Zinc | K series | 2932 | 19.04 | 23.25 | 19.76 |
| | | | Total: 81.9 % | | |




Şekil 4.15 : 6 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Tablo 4.9: 6 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

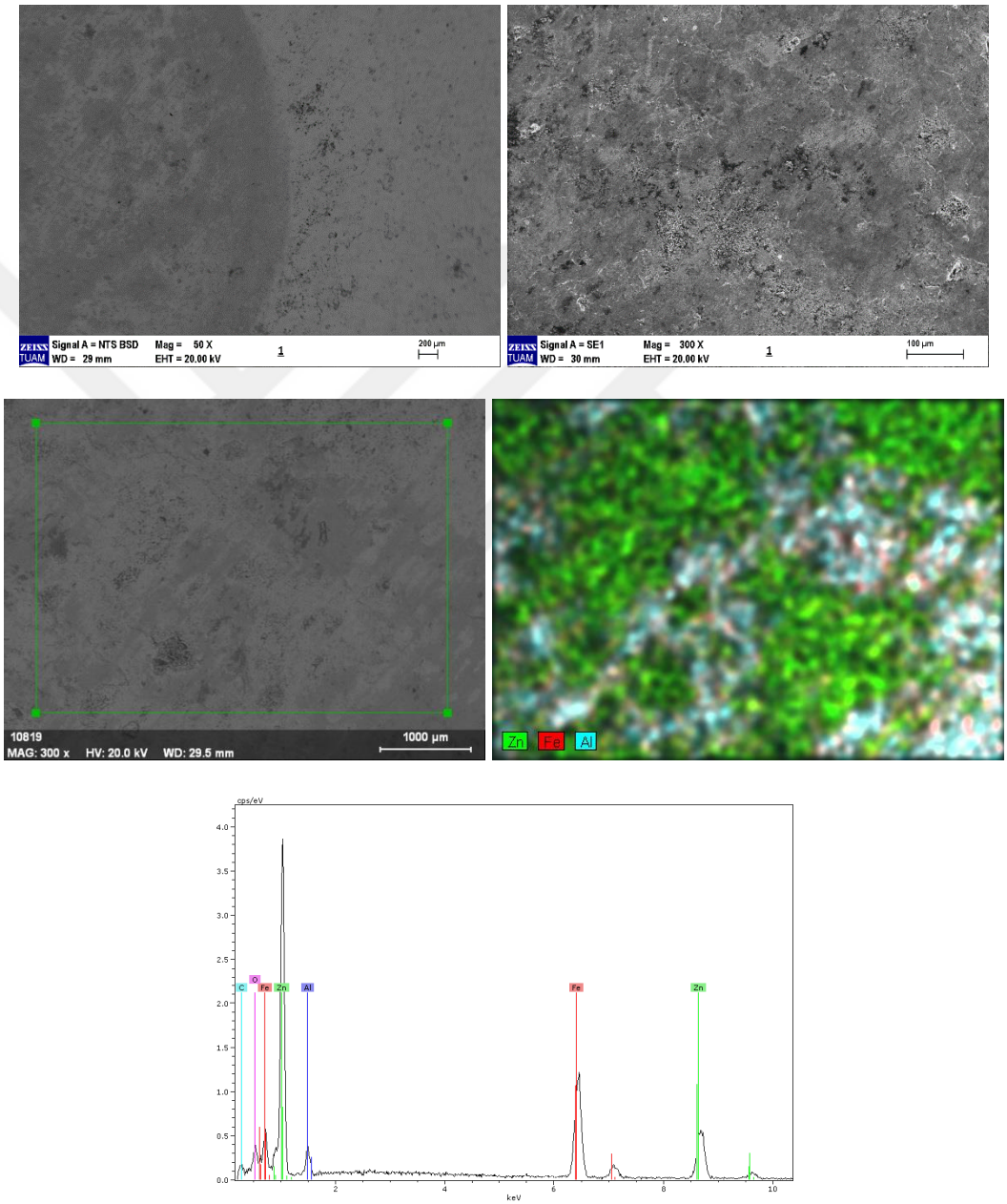
| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 2240 | 2.56 | 3.04 | 6.34 |
| Iron | K series | 33653 | 57.09 | 67.88 | 68.41 |
| Copper | K series | 2441 | 7.28 | 8.65 | 7.66 |
| Zinc | K series | 4893 | 17.19 | 20.43 | 17.59 |
| | | | Total: 84.1 % | | |

Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'de F tipi elektrotlarla yapılan deney numunelerin elektron mikroskop görüntüleri ve kimyasal analizi verilmiştir. Yüzey kimyasal anailizinde ise, alüminyum, bakır ve çinko oranlarının yüzeyde kaynak akımı uygulama süresinin artması ile beraber arttığı görülmektedir. Isı girdisinin artması, buharlaşma kabiliyetini artırmakta ve daha fazla miktarda alümünyum ve çinko buharlaşmasına sebel olmaktadır. Elementel dağılım haritalamaya göre yüzeyde elementlerin dağılımı genel olarak homojen olmakla beraber çinkonun paketler halinde bulunması yüzeyde çinko buharının oluşması ve yüzeydeki eğiriliklere veya boşluklara girerek hapsolması neticesinde, katı faz olarak yoğunlaştığı ve bu poroz bölgelerde biriktiği düşünülmektedir.

Bu serideki elektrot yüzeyindeki aşınmanın diğer serilere göre benzerlik taşıdığı görülmektedir. Nispeten daha az olan aşınmanın, elektrot şeklinin yorulma ve oksidasyonla ortaya çıkan hasarlara daha az maruz kalmasına yol açtığı veya oluşan bu gözeneklerin daha çok çinko bileşiği veya oksitlerle kaplanması ile beraber bakır transferine engel olması muhtemeldir. Diğer bir önemli mekanizma ise, en son numunede ortaya çıkan alüminyum ve çinkonun bakır elementleri ile beraber bulunması (Şekil 4.16 ve Şekil 4.18 arasındaki elementel haritalama resmi) CuZn bileşiğinin oluştuğuna dair kanıt olarak sunulabilir.

Şekil 4.16 ve Şekil 4.18 arasında, görüldüğü gibi bakıra rastlanmadığı ancak alüminyum ve çinkoya ratlandığı görülmektedir; ancak bu miktarın sabit yani neredeyse hepsinde aynı olması nedeniyle, elementel madde transferinin kopma ile gerçekleşmediği görülmektedir. Bakır transferinin olmaması, diğer iki elektrot profilide dikkate alındığında, elektrot aşınmasının azaltılmasında oldukça önemli bir etken olarak

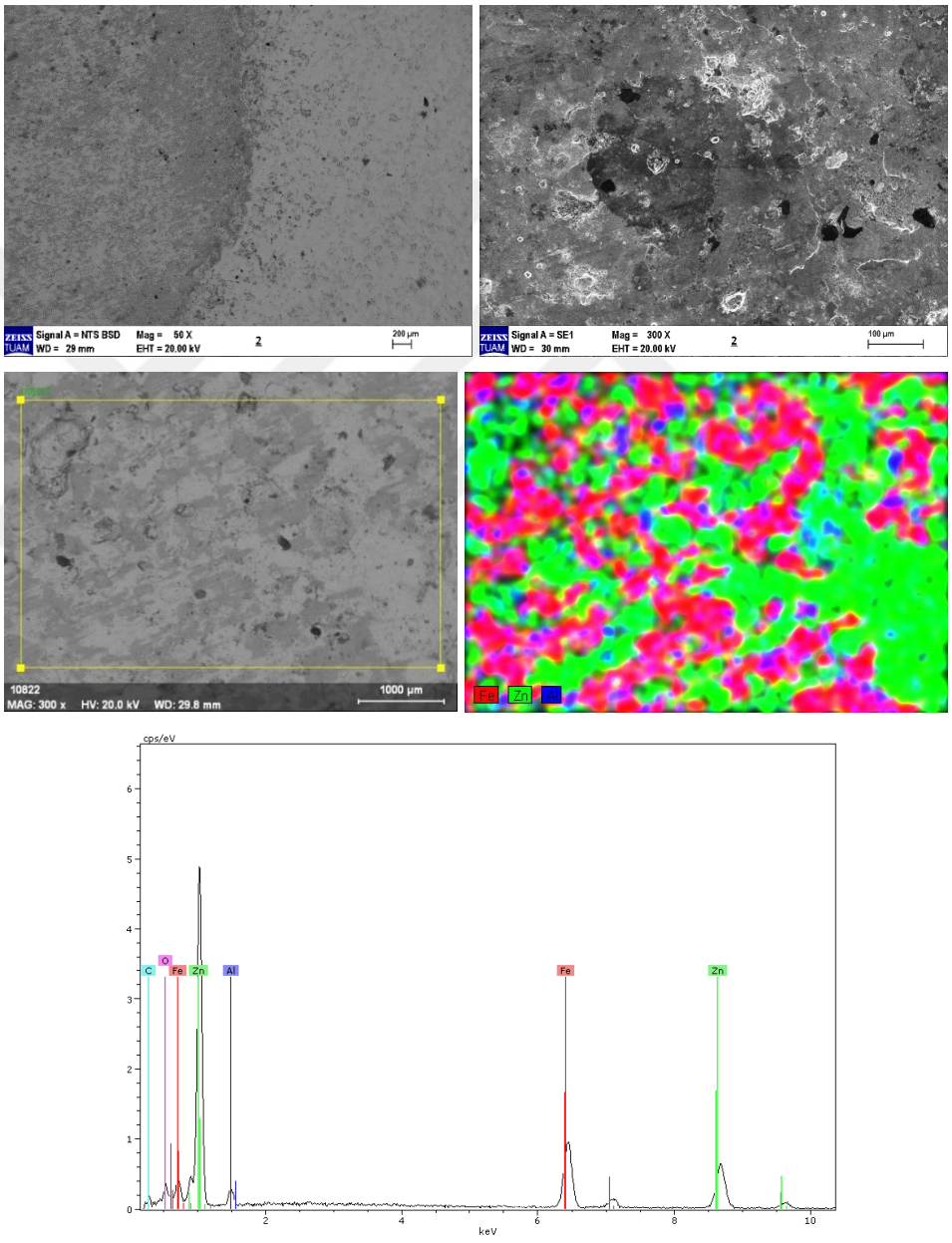
karşımıza çıkmaktadır. Özellikle, Şekil 4.9 ve Şekil 4.11 arasında verilen resimlerde de görüldüğü gibi, temiz bir yüzey görüntüsü vermesi nedeniyle bu elektrodun daha fizibil bir elektrot olduğu düşünülmektedir. Elektrot şeklinin buharlaşan alüminyum ve çinko ile teması azaltması deney numunesi yüzeyine ve elektrot yüzeyine transferini azaltması tercih edilmesi gereken bir özelliktir.




Şekil 4.16 : 1 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Tablo 4.10: 1 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

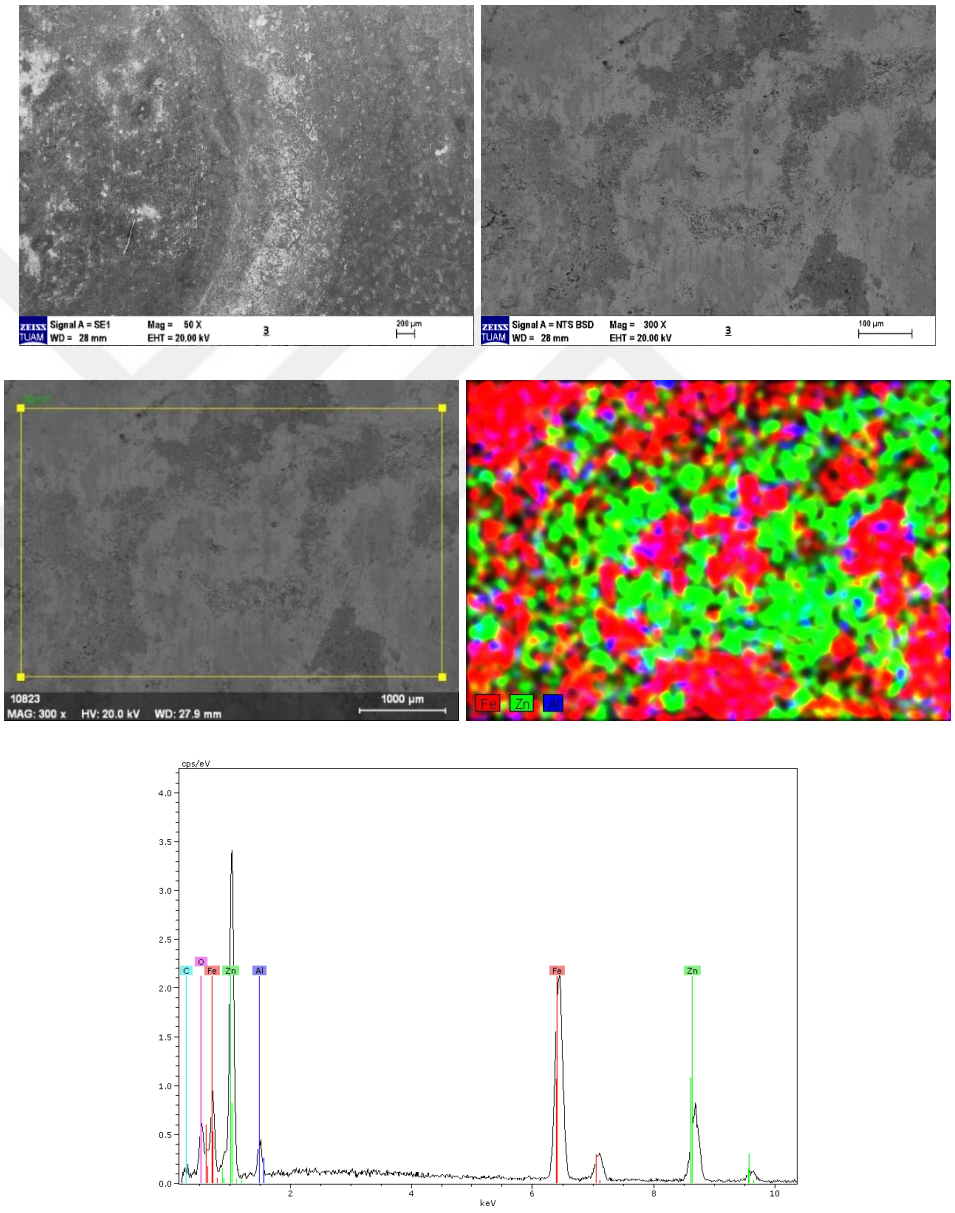
| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 1629 | 3.07 | 3.47 | 4.30 |
| Iron | K series | 11910 | 30.39 | 34.39 | 20.57 |
| Zinc | K series | 6523 | 33.49 | 37.89 | 19.36 |
| | | | Total: 88.4 % | | |




Şekil 4.17 : 2 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Tablo 4.11: 2 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 1259 | 2.67 | 2.96 | 3.82 |
| Iron | K series | 9840 | 26.80 | 29.70 | 18.55 |
| Zinc | K series | 7104 | 40.69 | 45.10 | 24.06 |
| | | | Total: 90.2 % | | |




Şekil 4.18 : 3 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektroda ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları ve son olarak numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Tablo 4.11: 2 Nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomic yüzdeleri

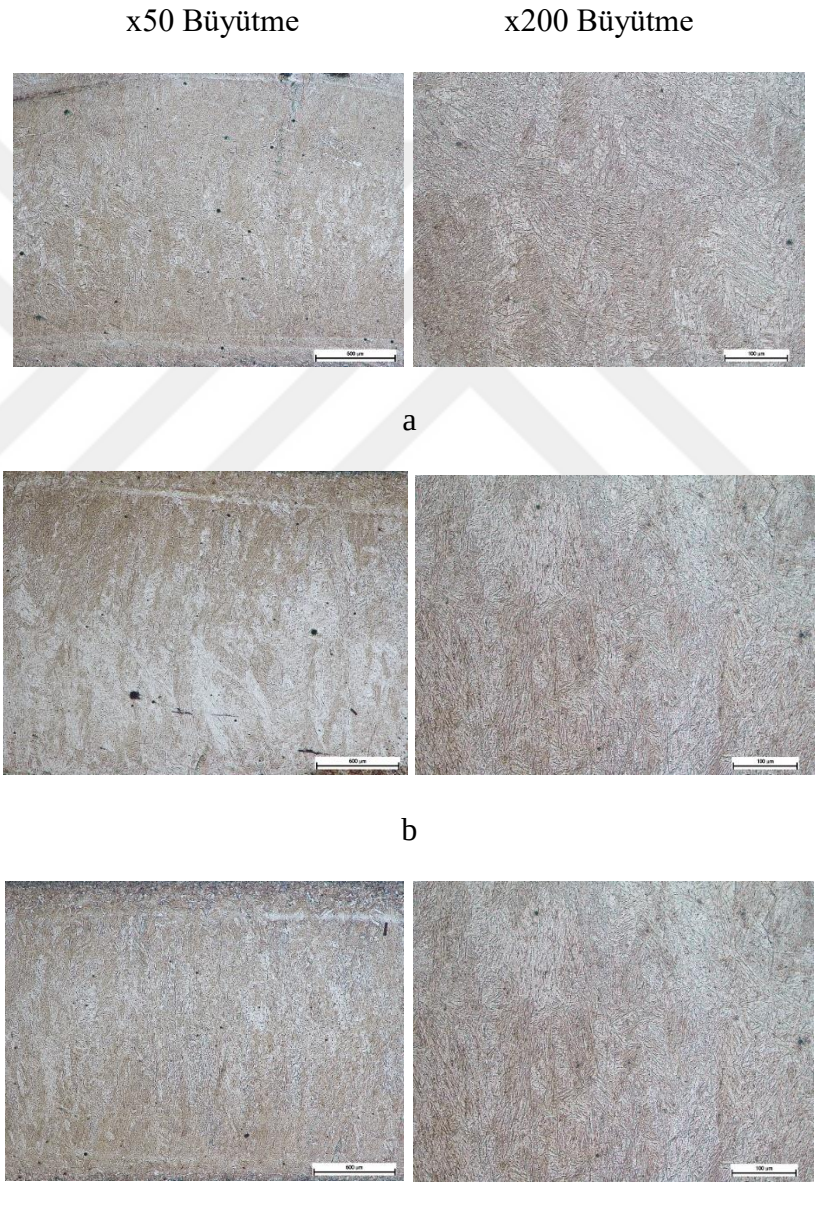
| Element | Series | Net | unn. C [wt.-%] | norm. C [wt.-%] | Atom. C [at.-%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | K series | 1079 | 2.40 | 2.54 | 3.64 |
| Iron | K series | 14571 | 41.20 | 43.55 | 30.17 |
| Zinc | K series | 5645 | 35.04 | 37.04 | 21.91 |
| | | | Total: 94.6 % | | |

## 4.4. Mikroyapı Ve Mikrosertlik Analizleri (HV)

Elektrot formunun ve kaynak akımı uygulama süresinin parametre olarak çalışıldığı ve sonuç olarak elde edilen mikroyapıların resimleri Şekil 4.19-4.21'de verilmiştir. Her seri içerisinde, kaynak akımının süresinin artırılması genel olarak nokta kaynağında ısı girdisinin artışına ve plastikliğin daha uzun süre korunmasına sebep olacaktır. Bu artışın en önemli çıktısı ise tahmin edileceği üzere, artan tavlama süresine benzer şekilde karşılık gelen mikroyapısal değişimlerdir. Bu değişimlerin esas olarak daha çok tane içi morfolojisinde etkili olacağı ve tane şekli değişiminin ise irileşme şeklinde kendisini gösterecektir. Isı girdisinin düşük olduğu durumlarda, yani kısa kaım uygulama süresinde, tane içi morfolojinin iğnemsi veya Widmanstaten türü tane sınrından tane içine ilerleyen biçimde bir mikroyapısal değişimi tetiklemesi gerekmektedir. Buna karşın akım uygulama süresinin artması ile beraber ısı girdisi arttıkca, düşen soğuma hızı nedeniyle, tane içi morfolojiin kabalaşacağı düşünülmektedir.

Faz dönüşümü gösteren malzemelrde örneğin çeliklerde ve bu malzemelerin özellikle eritmeli kaynak mikroyapılarında, kolonsal tane ile başlayan katılaşma yüksek soğuma hızının tecrübe edildiği durumlarda, tane sınırlarından tane içine doğru ilerleyen yapılar ortaya çıkar. Şekil 4.19'da görüldüğü gibi, tabandan başlayıp yukarı doğru uzanan birbirine paralel olarak sıralanmış tane yapısı ile kaynak bölgesinin kolonsal yapısı yanında tane içi morfolojisi ince yapılarla örneğin ferrit yan plakaları ve ikincil ferrit plakalarının tane sınırından hızlı ilerleme ile widmanstaten benzeri yapıları oluşturması görülmektedir. Bu seride arta kaynak akım uygulama süresi, ferrit plakalarının rtalama uzunluğunu azlatmış ve toparlanma gösteren bir yapıda sonlanmasını sağlamıştır. Artan

kaynak ısı girdisi ile, süre arttıkca, ince yapıların ilerleme mesafelerinin azaldığı ve kolonsal tane uzunluklarının da düştüğü gözlemlenmiştir. Düşük karbonlu çelik alaşım sistemlerinde, düşen karbon oranının etkisiyle, hızlı bir şekilde ince plaka oluşumu yani ignemsi olarak başlayan ve uzunlamasına büyüyen plakalar tanenin diğer kenarına ulaşıncaya kadar büyümeyi sürdürür. Yüksek karbon miktarı veya yüksek alaşım oranı veya türü ise bu ilerlemeyi yavaşlatır ve ignemsi yerine enine büyüme ile ferit plakaları kabalaşırlar. Bu durumda, tane sınırları daha belirgin bir şekilde açığa çıkacaktır.



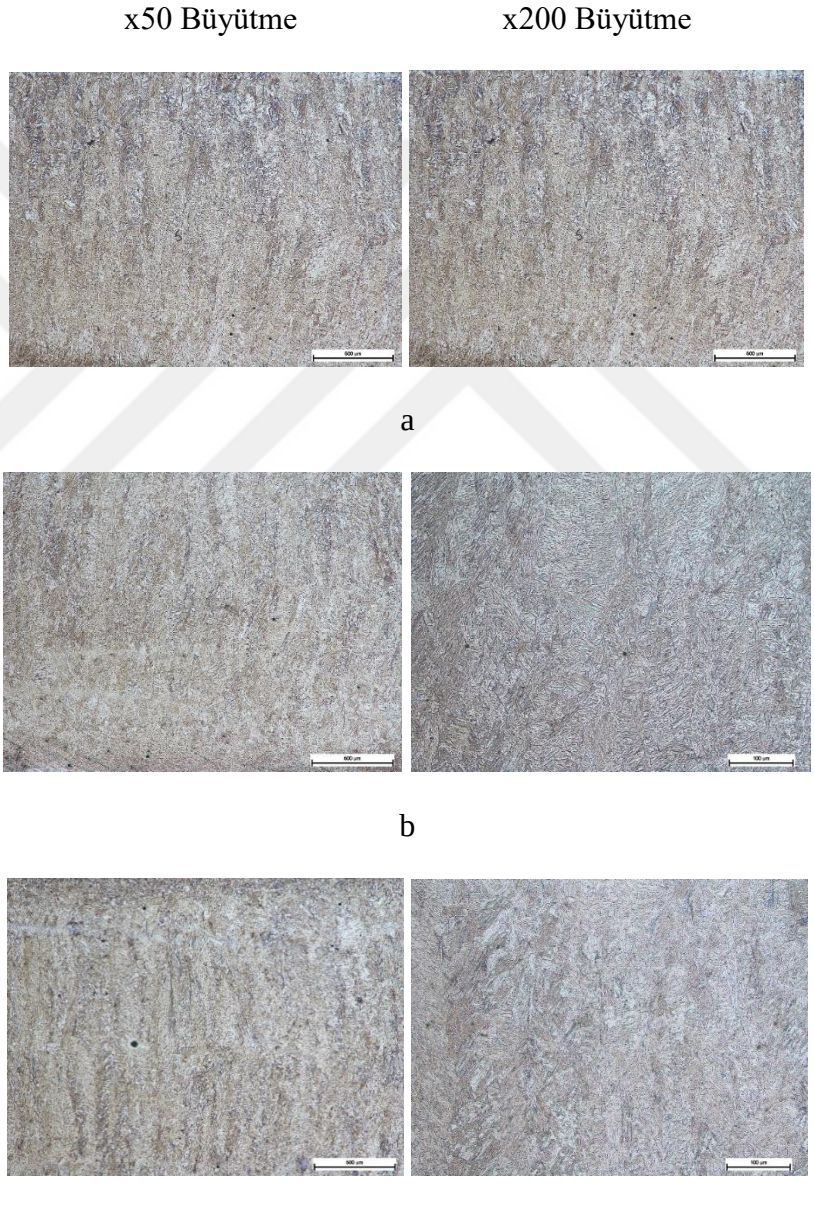

Şekil 4.19 : a) 7 b) 8 ve c) 9 nolu numuneye ait x50 ve x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı.

Optik mikroskop incelemenin yapıldığı bu bölümün birinci serisinde, (Şekil 4.19), mikroyapılarda artan süre ile beraber kısmi tane irileşmesi ve ferrit plakalarının kısaldığı görülmüştü; bu etki aslında ısı girdisi ile alakalı bir sonuç, düşük ısı girdisine sahip Şekil 4.17'de de görülen, ince mikroyapı görünüşü Şekil 4.20'de de görülmektedir. Ancak, bu serideki mikroyapıda, toparlanma/irileşme çok az miktarda olup, soğuma hızının kaynak işlemi boyunca yüksek olmasından dolayı tane yapısının ise daha ince olduğu görülmektedir. Tane içi morfolojisi bir önceki seriye göre daha ince olması, iki türlü işlemin sonucu olabilir. Öncelikle, nokta direnç kaynaklarında, ergimenin olmadığı farzedilmektedir. Ergime olmayan ancak, çok yüksek sıcaklıklara çıkan sistemlerde, tane oluşumu delta ferrit-gama ferrit ve alfa ferriti oluşum sürecinde soguma sırasında takip ederek sağlanır.

Tane oluşumu tane sınırlarının sahip olduğu yüzey alanı ve hacmi ile de ilgilidir. Artan hacim ile beraber ortaya çıkan hacim serbest enerjisi ile yüzey enerjisi ile tane yüzey alanı çarpımından gelen yüzey serbest enerjisi arasındaki etkileşim tane boyutuna karar verir. Tane sınırlarının yüzey alanının artması ile beraber yani tane boyutlarının küçülmesi (yüksek soğuma hızı yeterli olacaktır) yanyana ferrit plakalarının görülmesi ve akabinde daha ince bir görünüş elde edilmesi bu serinin de özelliğidir. Bir önceki serideki kolonsal yapının benzeri bir şekilde daha az eş kenarlı tanelerin görünmesi, bu tane yapısının sacın orijinal östenit tanelerinin yapısını koruduğunu ve bir önceki seriye göre daha benzer sıcaklıklarda oluşumun gerçekleştiğini göstermektedir. Şekillerde (Şekil 4.20) ortak bir eksen etrafında yayılan tanelerin daha çok ergimenin etkisiyle değil, plastik deformasyonun faz dönüşümlerine olan etkisi ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Faz dönüşümleri, özellikle katı-katı faz dönüşümleri, plastik deformasyonun östenitik yapıda iken oluşması, dışarıdan uygulanan bir gerilim, östenitin akma dayanımını aştığında, prensip olarak, ostenitin beynite dönüşümünün mekanik stabilizasyon olarak bilinen bir işlemle geciktirilmesi mümkün kılar.

Kayma esaslı (Displacive) dönüşümler, kayma arayüzlerinin ilerlemesi ile meydana gelir ve bu, dislokasyonlar veya tane sınırları gibi kusurlarla karşılaşıldığında engellenebilir veya sabit hale getirilebilir. Bu tür kusurlar, kayma ile oluşan dislokasyonların geçişi engellendiğinde pekleşmeye (work hardening) yol açan etkiler gibi, arayüzün östenite geçişine engel olan bir işlev görür. Ostenitin plastik olarak deforme edilmesiyle

dislokasyonların yoğunluğu arttırılırsa, dislokasyonlar ferrit plakaların büyümesini sınırlar. Şekil 4.20 de görüldüğü gibi, kaynağın tam orta kesiminde, ayrımı sağlayan bir çizgi görülmektedir. Bu çizginin iki sacın birleştiği nokta olması kuvvetle muhtemeldir. Bu eksenel ayrım hattı, aynı zamanda, iki farklı kolonsal tanelerin çekirdeklenmesi ve oluşumu ile oluşmuştur. Artan ortala çekirdek sıcaklığının çekirdeğin ergime sıcaklığına daha da yaklaştırdığı ve artan süre ile beraber daha rahat kolonsal tane oluşumuna sebep olduğu düşünülmektedir.

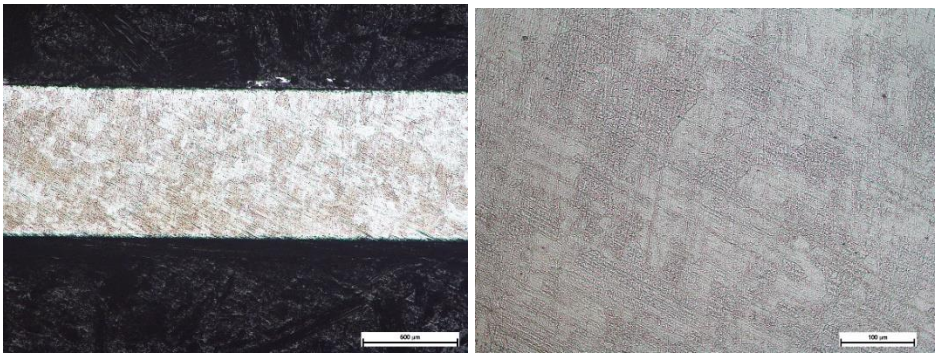



Şekil 4.20 : a) 4, b) 5 ve c) 6 nolu numuneye ait (a) x50, (b) x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı.

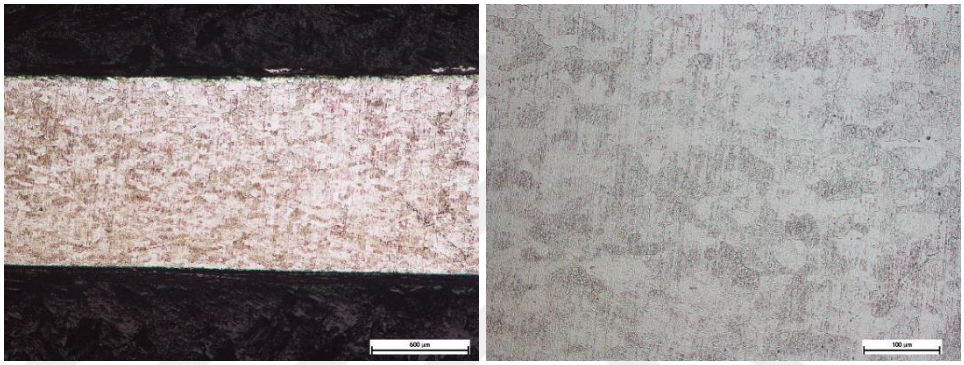
Şekil 4.20'de işaret edilen nokta direnç kaynağının dikiş bölgesinde ortaya çıkan midrib yani çekirdek ortak katılaşma ekseni alt ve üst çekirdek yarılarını ayırmakta olup, bu seridede yüksek akım uygulama süresinde görülmüştür. yani, artan ısı girdisi ile daha belirgin olarak karşımıza çıkmaktadır. Dövme teknolojisinde dövme sıcaklığı ile plastik şekillendirilebilirlik arasındaki ilişki genellikle dogrusaldır ancak sınır sıcaklığın üzerinde üslü şekilde artar. Sıcaklık arttıkca deformasyon kolaylaşır ve şekil vermesi daha kolay hale gelir. Ancak, yüksek sıcaklıkta deformasyon daha belirgin bir şekilde, östenitte kalma süresinide artıracaktır. Bu tane içi morfolojisinin bozulmasına ve genel olarak, tane sınırlarının daha düzensiz olmasına yol açar. Düşen sıcaklığın da etkisiyle katı halde oluşan dislokasyonların tane sınırlarında sonlanması ve diğer dislokasyonlara ulaşmadan sönümlenmesi ve tane sınırı açılarının özellikle büyük olduğu durumlarda tane –tane geçişlerini etkileyecektir.

Yüksek deformasyon kuvveti veya elektrot basma kuvveti veya artan ısı girdisi nokta kaynak çekirdek kalınlığının azalmasına yol açacaktır ancak bu herzaman istenmeyen bir sonuç değildir. Yine, bu seride, taneler daha eş kenarlı olmakla beraber, tane içi morfoloji artan sıcaklıkla beraber, toparlanmış yapıya dönüşmüş ve tane sınırlarına yoğunlaşmıştır. Tane içi morfoloji kesinlikle kaybolmuştur. Tane içi morofolojide incelme görülmemiş ve taneler küçük boyuttan daha kaba boyuta doğru ilerlemiştir.

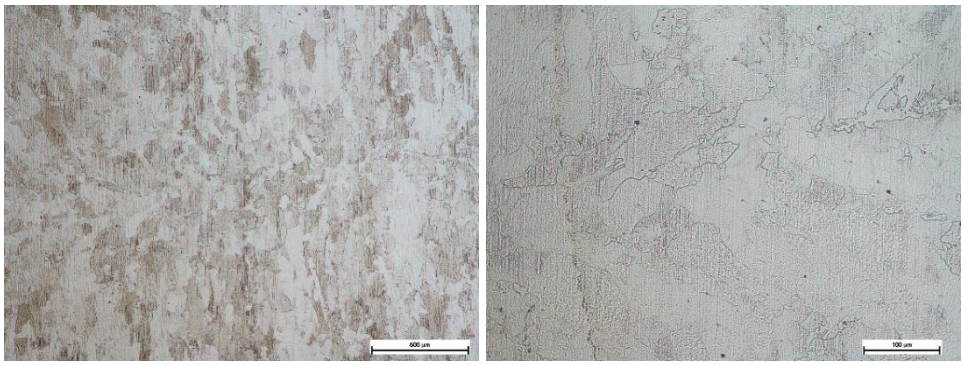
x50 Büyütme x200 Büyütme



a



b



c

Şekil 4.21 : a) 1, b) 2 c) 3 nolu numuneye ait (a) x50, (b) x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı.

Sertlik ölçümleri Tablo 4.4 ve 4.5'te verilmiştir. Genel olarak, F tipi elektrodun mikrosertlik üzerine etkisi oldukca belirgindir. Sertlik değerleri ortalama olarak azalmaktadır. Sistematik olarak azalan mikrosertlik değerlerinin temel parametresi değişken tane boyutu olup, ikincisi ile ortaya çıkan tane içi morfolojisidir. Tane

boyutunun ve tane içi morfolojisinin sertlik artışında sorumlu olması, Hall Petch denklemine göre işlemektedir. Bu denkleme göre artan akma dayanımı değeri küçük tanelerin plastik deformasyonla ortaya çıkan dislokasyonların hareketine karşı göstermiş olduğu dirençle telafuz edilmektedir. Tane boyutunun küçük olması, dislokasyonların ortalama taşınma mesafelerini azaltmakta ve tane sınırlarına dayanıp dislokasyon çakışmalarına sebep olmaktadır. Kilitlenme modu veya (Dislocation tangle) dislokasyon ağının fazlalaşması sertliğin artmasına sebep olur. Ayrıca artan kaynka kaımı uygulama süresi ile beraber artan deformasyon miktarıda tane irileşmesinin yanında, kalıntı gerilmelerin ısı girdisi ile ilişkilerini kontrol edecektir. Düşük ısı girdisi ile beraber, soğuma hıız artar ve daha fazla kalıntı gerilim ortaya çıkmaktadır. Bu seride düşük bekleme sürelerinde mikrosertlik artmıştır ki burada ki mekanizmanın kalıntı gerilimden daha çok dislokasyon kilitlenmesi olması ihtimalini artırmaktadır.

Tablo 4.12'de Elektrot uç formu ile yapılan kaynaklar sonucu elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları sunulmuştur. Tabloda elektrot tipi yapılan ölçüm ve ölçüm sonucu elde edilen değerler, teste ilişkin HV sertik değerleri sunulmuştur.

Tablo 4.12: G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları.

| Numune | Ölçüm 1 | Ölçüm 2 | Ölçüm 3 | Ortalama Sertlik (HV) |
|---|---|---|---|---|
| **F tipi -7** | 355,2 | 350,7 | 359,7 | 355,20 |
| **F tipi -8** | 387 | 379 | 412,9 | 392,97 |
| **F tipi -9** | 354,1 | 370,8 | 378,6 | 367,83 |
| **B tipi -4** | 373,7 | 414,2 | 391,4 | 393,10 |
| **B tipi -5** | 453,1 | 415,9 | 363,6 | 410,87 |
| **B tipi -6** | 421,6 | 439,5 | 386,7 | 415,93 |
| **G tipi -1** | 135,3 | 127 | 140 | 134,10 |
| **G tipi -2** | 134,8 | 126,8 | 107 | 122,87 |
| **G tipi -3** | 136,1 | 149 | 144,2 | 143,10 |

Tablo 4.13: G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları.

**Cu Elektrot Yükseklik Değerleri**

| Test No | Referans Elektrot Boyları | Yükseklik-1 | Yükseklik-2 | Ortalama Elektrot Boyları | Elektrot Boylarındaki azalma |
|---|---|---|---|---|---|
| **G 1** | 22,20 | 22,00 | 21,95 | 21,98 | 0,22 |
| **G 2** | 22,20 | 22,00 | 22,02 | 22,01 | 0,19 |
| **G 3** | 22,20 | 22,01 | 22,02 | 22,02 | 0,18 |
| **B 4** | 22,07 | 22,07 | 22,14 | 22,11 | -0,04 |
| **B 5** | 22,07 | 21,99 | 22,02 | 22,01 | 0,07 |
| **B 6** | 22,07 | 22,14 | 22,12 | 22,13 | -0,06 |
| **F 7** | 22,20 | 21,71 | 21,68 | 21,70 | 0,50 |
| **F 8** | 22,20 | 21,80 | 21,72 | 21,76 | 0,44 |
| **F 9** | 22,20 | 21,66 | 21,62 | 21,64 | 0,56 |

# BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek mekanik özelliklere sahip HCT590LAD+Z malzemesi RSW teknikleriyle başarıyla kaynaklanmıştır. Kaynak bölgesindeki ve elektrot yüzeyine ait fiziksel ve mikroyapısal incelemeler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Boyutsal ölçüm sonuçlarına göre F tipi Elektrod uçlarının yüksek sıcaklığa kadar ısınmış olan sac yüzeyinde daha homojen eşit kalınlıkta çekirdek için dizayn edildiği ve baskı kuvvetinin plastik olarak deforme edilmekte olan sac çekirdek bölgesinde homojen dağılıma müsade ettiği görülmektedir. Aşınma izleri, tekrarlı basma kuvvetlerinin oluşturduğu yorulma etkisi ve aynı zamanda elektroddan sac malzemeye olan madde transferi ile kopan parçalanma sonucuyla ve/veya yukarıda belirtildiği gibi bir yorulma mekanizması ile, oksitlenme + tabakalaşma ile oluştuğu düşünülmektedir. Yorulma ile aşınma mekanizması, özellikle tekrarlı yüklerde yüzeydeki fretting etkisi ile, yani deformasyon sonucu metalin üst tabakasının yorulmasının etkisi ile, çukurcuk tipi aşınma ile başlayan hasar görmesidir. B tipi eletrod ile yapılan kaynak denemelerinde elektrodların ölçülen uç en-genişlik oran değerlerinin 1'den çok farklı olduğu ve homojen bir deformasyon veya aşınma göstermediği düşünülmektedir. G tipi elektrod ile yapılan kaynak denemelerinde çekirdek ve elektrod uç ölçüm sonuçları daha iyi boyutsal sonuçlar vermiştir. G ve B tipi elektrodlarda en düşük ısı girdisi ile en yüksek ısı girdisi arasındaki dış çap farkı sırasıyla 3.2 ve 2.1 mm ve 0 mm ve 2.1 mm olmakta iken, bu seride, en düşük ısı girdisinde, fark 1.35 mm ve en yüksek ısı girdisinde ise 1.4 mm olmuştur.

2. F tipi eletrod uç yapılan denemelerde ise, iyi sonuç veren G tipi elektrot ucu ile yapılan deneylere göre, daha iyi sonuç verdiği açıkca görülmektedir

3. G, B ve F elektrot tipi için Çinko ve Alüminyumun yüzeye birikiminin veya yüzeylere transferinin gerçekleştiğini işaret etmektedir. Çinko oranları artan akım uygulama süresi ile beraber sistematik olarak artmaktadır.

4. Elektrot boy ölçümleri ve SEM görüntüleri incelendiğinde Aşınma izleri, tekrarlı basma kuvvetlerinin oluşturduğu yorulma etkisi ve aynı zamanda elektrotdan sac malzemeye olan madde transferi nedeniyle kopan parçalanma sonucudur. F tipi elektrotların boy ölçümlerindeki azalma diğerlerinden fazladır ve aşınmaya bağlı yorulma mekanizması daha fazladır.

5. SEM üzerinden yapılan EDX sonucuna göre F tipi elektrod kaynak denemelerinde nokta direnç kaynak çekirdeklerinin daha derin olduğu görülebilmektedir. Nokta kaynak çekirdekleri üzerinde EDX ile yapılan elementel değişim paternin göre ise, Al, Çinko ve Bakır transferinin yüzeye gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda madde transferi, temel olarak metalin çekirdek bölgesinden buharlaşması (Al ve Zn) ve en soğuk olan veya en yakındaki yüzeye atomların adhesif olarak yapışması/tutunması ile gerçekleşmektedir. B tipi elektrodlarla yapılan nokta kaynak görüntülerinde çok miktarda Çinko ve Alüminyumun yüzeye birikiminin veya yüzeylere transferinin gerçekleştiğini işaret etmektedir. Çinko oranları artan akım uygulama süresi ile beraber sistematik olarak artmaktadır. Bakır tranferinin ilk numunede olmaması, muhtemelen, uygulanan akım süresinin yeterince buharlaşma için ısı gridisi yaratmaması ile elektrod yüzeyinde oluşan oksit tabakasının kalınlığı veya temiz yüzey oluşturma zorluğu ile ilgili olabilir. G tipi elektrod ile yapılan denemelerde bakıra rastlanmadığı ancak alüminyum ve çinkoya ratlandığı görülmektedir; ancak bu miktarın sabit yani neredeyse hepsinde aynı olması nedeniyle, elementel madde transferinin kopma ile gerçekleşmediği görülmektedir. Bakır transferinin olmaması, diğer iki elektrod profilide dikkate alındığında, elektrod aşınmasının azaltılmasında oldukça önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.

6. F tipi elektrodun mikrosertlik üzerine etkisi oldukca belirgindir. Sertlik değerleri elektrot tipine göre G, F ve B sırasıyla ortalama olarak artmaktadır.

# KAYNAKLAR


[1] Tamarelli, C. M., *"The evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications,"* Steel Market Development Institute, Michigan, USA, 41-44 (2011).

[2] Govik, A., Nilsson, L. and Moshfegh, R., *"Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly,"* Journal of Materials Processing Technology, 212 (1): 1453-1462 (2012).

[3] Mesplont, C., *"Phase transformations and microstructure-mechanical properties relations in complex phase high strength steels,"* Ghent University, Belguim, 66-71 (2002).

[4] De, A., *"Spot welding"*, Science and Technology of Welding and Joining, 13(3): 213-214 (2008).

[5] Unruh, G. C., *"Understanding carbon lock-in,"* Energy policy, 28 (1): 817-830

(2000).

[6] Galan L., J., Samek, L., Verleysen, P., Verbeken, K., & Houbaert, Y. (2012). *Advanced high strength steels for automotive industry*. Revista de metalurgia, 48(2), 118-131.

[7] Sezgin, C. T. (2017). Otomotiv Endüstrisinde Yeni Nesil Çelik Kullanımının Önemi. Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 1(3), 205-210.

[8]http://analizsimulasyon.com/2016/05/10/otomotiv-yuksek-mukavemetli-celiklerin-kullanimi/

[9] Cheah, L. W. (2010). Cars on a diet: the material and energy impacts of passenger vehicle weight reduction in the US (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

[10] Pouranvari, M. and Marashi, S., *"Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties,"* Science and Technology of Welding and Joining, 18 (1): 361-403 (2013).

[11] Zhang, P. Xie, J., Wang,Y. and Chen, J. *"Effects of welding parameters on mechanical properties and microstructure of resistance spot welded DP600 joints,"* Science and Technology of Welding and Joining,16 (1): 567-574 (2011).

[12] Nayak, S., Zhou, Y. V. Hernandez, B. and Biro, E., *"Resistance spot welding of dual-phase steels: heat affected zone softening and tensile properties,"* in Proceedings

of the 9th International Conference on Trends in Welding Research, Chicago, Illinois, United States, 641-649 (2012).

[13] Chemin. F.,R. A.. Valente. T., Barreto, L. M. and Marcondes, V. P., *"An experimental approach for blankholder force determination for DP600 with different material flow strain rates in the flange during stamping,"* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227 (1): 417-422 (2013).

[14] Kuzıak, R., (2008). *'' Advanced High Strength Steels for Automotive Industry''*, Instytut Metalurgii Belaza, ul. Karola Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, Poland.

[15]http://makinatek.com.tr/uncategorized/161-otomotiv-endustrisinde-twip-celiklerin-gelecegi/

[16] Kuziyak, R., Kawalla, R. and Waengler, S., *"Advanced high strength steels for automotive industry,"* Archives of Civil and Mechanical Engineering, 8 (1): 103-117 (2008).

[17] Kumar, A. Singh, S. and Ray, K. *"Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels,"* Materials Science and Engineering: A, 474 (1): 270-282 2008.

[18] Ramazani, A., Pinard, P. Richter, S. Schwedt, A. and Prahl, U., *"Characterisation of microstructure and modelling of flow behaviour of bainiteaided dual-phase steel,"* Computational Materials Science, 80 (1): 134-141 (2014).

[19] Park K., Nishiyama, M. Nakada, N. Tsuchiyama, T. and Takaki, S., *"Effect of the martensite distribution on the strain hardening and ductile fracture behaviors in dual-phase steel,"* Materials Science and Engineering: A, 604 (1): 135-141 (2014).

[20] Avramovic-Cingara, G., Ososkov, Y., Jain, M. and Wilkinson, D., *"Effect of martensite distribution on damage behaviour in DP600 dual phase steels,"* Materials Science and Engineering: A, 516 (1): 7-16 (2009).

[21] Mazinani, M. and Poole, W., *"Effect of martensite plasticity on the deformation behavior of a low-carbon dual-phase steel,"* Metallurgical and Materials Transactions A, 38 (1): 328-339 (2007).

[22] Takechi, H. and Abe, M., *"Manufacturing techniques for high strength steel sheets for automotive applications,"* Nippon steel technical report. Overseas, London, UK, 9-18 (1984).

[23] Peng-Heng, C. and Preban, A., *"The effect of ferrite grain size and martensite volume fraction on the tensile properties of dual phase steel,"* Acta Metallurgica, 33 (1): 897-903 (1985).

[24] Jiang, Z. Guan, Z. and Lian, J., *"Effects of microstructural variables on the deformation behaviour of dual-phase steel,"* Materials Science and Engineering: A, 190 (1): 55-64 (1995).

[25] Calcagnotto, M., Adachi, Y. Ponge, D., and Raabe, D., *"Deformation and fracture mechanisms in fine-and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging,"* Acta Materialia, 59 (1): 658-670 (2011).

[26] Amirthalingam, K., *"Women's rights, international norms, and domestic violence: Asian perspectives,"* Human Rights Quarterly, South Korea, 683-708 (2005).

[27] Donders, S. Brughmans, M. Hermans, L. Liefooghe, C., Van, H.,and Desmet, W., *"The robustness of dynamic vehicle performance to spot weld failures,"* Finite Elements in Analysis and Design, 42 (1): 670-682 (2006).

[28] Zhou, Y. Gorman, P. Tan, W. and Ely, K., *"Weldability of thin sheet metals during small-scale resistance spot welding using an alternating-current power supply,"* Journal of Electronic Materials, 29 (1): 1090-1099 (2000).

[29] Khan, M. I., *"Spot Welding of Advanced High Strength Steels (AHSS),"* University of Waterloo, Canada, 55-60 (2007).

[30] Hofman, K. Soter, M., Orsette, C., Villaire, S. and Prokator, M., *"AC or DC for resistance welding dual-phase 600,"* Welding Journal, 84 (1): 46-48 (2005).

[31] Nayak, S., Zhou, Y. V. Hernandez, B. and Biro, E., *"Resistance spot welding of dual-phase steels: heat affected zone softening and tensile properties,"* in Proceedings of the 9th International Conference on Trends in Welding Research, Chicago, Illinois, United States, 641-649 (2012).

[32] Jung, G. *"Spot Weldability of TRIP Steel with High Carbon, High Aluminium Content,"* Pohang University of Science and Technology, Pohang, South Koria, 67-70 (2011).

[33] Senkara, J. and Zhang, H. *"Resistance Welding Fundamentals and Applications,"* ed: CRC Press Taylor & Francis Group, France, Paris, 23-27 (2006).

[34] Browne, D., Chandler, H., Evans, J. James, P., Wen,J. and Newton, C., *"Computer simulation of resistance spot welding in aluminum: Part II,"* Welding Journal-Including Welding Research Supplement, 74 (1): 417 (1995).

[35] Kearns, W. H., *"AWS welding handbook,welding processes resistance and solid state welding and other joining processes"*, Amer Welding Society, Aman, 1220-1230 (1980).

[36] Sarwar, M., Ahmad, E., Qureshi, K. and Manzoor, T. *"Influence of epitaxial ferrite on tensile properties of dual phase steel,"* Materials & Design, 28 (1): 335-340 (2007).

[37] Dong, S. and Zhou, Y., *"Effects of TiC composite coating on electrode degradation in microresistance welding of nickel-plated steel,"* Metallurgical and Materials Transactions A, 34 (1): 1501-1511 (2003).

[38] Yang, D., Brown, E. Matlock, D. and Krauss, G., *"Ferrite recrystallization and austenite formation in cold-rolled intercritically annealed steel,"* Metallurgical Transactions A, 16 (1): 1385-1392 (1985).

[39] Matlock, D. K., Krauss, G., Ramos, L. and Huppi, G. S., *"A correlation of processing variables with deformation behavior of dual-phase steels,"* Structure and Properties of Dual-Phase Steels, 1 (1): 62-90 (1979).

[40] Erdogan, M. *"The effect of new ferrite content on the tensile fracture behaviour of dual phase steels,"* Journal of Materials Science, 37 (1): 3623-3630 (2002).

[41] Sobhani, S., and M. Pouranvari. *"Duplex Stainless Steel/Martensitic Steel Dissimilar Resistance Spot Welding: Microstructure-Properties Relationships."* Welding Journal, 1(4): 1-16 (2019).

[42] Kobayashi, Takaya, and Yasuko Mihara. *"Numerical simulation of nugget formation in spot welding."* In SIMULIA Community Conference, Japan, 1-8 (2014).

[43] Anık, S., Ogur, A. and Aslanlar, S. *"The effect of welding current on tensileshear strength of galvanized chromate micro-alloyed steel sheets applied to electrical resistance spot welding,"* In Welding Technology 2nd National Congress, Ankara, Turkey, 12-17 (1999).

[44] Pouranvari, M. and Marashi, S., *"Critical sheet thickness for weld nugget growth during resistance spot welding of three-steel sheets,"* Science and Technology of Welding and Joining, 16 (1): 162-165 (2011).

[45] Pouranvari, M., Asgari, H., Mosavizadch, S., Marashi, P., and Goodarzi, M., *"Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds,"* Science and Technology of Welding and Joining, 12 (1): 217-225 (2007).

[46] De, A., *"Spot welding"*, Science and Technology of Welding and Joining, 13(3): 213-214 (2008).

[47] Winnicki, M., Małachowska, A., Korzeniowski, M. Jasiorski, M. And Baszczuk, A. *"Aluminium to steel resistance spot welding with cold sprayed interlayer,"* Surface Engineering, 34 (3): 235-242 (2018).

[48] Potter, D. and Easterling, K., *"Phase transformation in materials,"* Chapman & Hall, Boundary Row, London, 291-308 (1992).

[49] Rodelas, J. M. *"Friction Stir Processing of Nickel-base Alloys"*, The Ohio State University, Ohio, USA, 78-81 (2012).

[50] Lee, J. L. Hon, M. H. and Cheng G. H., *"The intermediate transformation of Mn-Mo-Nb steel during continuous cooling,"* Journal of Materials Science, 22 (1): 2767-2777 (1987).

[51] Gould, J., Khurana,S. and Li, T., *"Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels,"* Welding Journal-New York-, 85 (1): 111 (2006).

[52] Aydin, H., *"The mechanical properties of dissimilar resistance spot-welded DP600–DP1000 steel joints for automotive applications,"* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 229 (1): 599-610 (2015).

[53] Hernandez, B., Kuntz, V., Khan, M. and Zhou,Y., *"Influence of microstructure and weld size on the mechanical behaviour of dissimilar AHSS resistance spot welds,"* Science and Technology of Welding and Joining, 13 (1): 769-776 (2008).

[54] Ma, C., Chen, D., Bhole, S., Boudreau, G., Lee, A. and Biro, E. *"Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel,"* Materials Science and Engineering: A, 485 (1): 334-346 (2008).

[55] Pouranvari, M., Mousavizadeh, S., Marashi, S., Goodarzi, M. and Ghorbani, M., *"Influence of fusion zone size and failure mode on mechanical performance of dissimilar resistance spot welds of AISI 1008 low carbon steel and DP600 advanced high strength steel,"* Materials & Design, 32 (1): 1390- 1398 (2011).