



**DERİN ÇEKİLEBİLİR ÇELİK SACLARIN HAFİF  
METALLER İLE NOKTASAL KAYNAK  
EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Özer MUTLUSU**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DERİN ÇEKİLEBİLİR ÇELİK SAÇLARIN HAFİF METALLER İLE  
NOKTASAL KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Özer MUTLUSU

0000-0001-9459-3027

Doç. Dr. Rukiye ERTAN

0000-0002-9631-4607

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

Özer MUTLUSU tarafından hazırlanan "DERİN ÇEKİLEBİLİR ÇELİK SAÇLARIN HAFİF METALLER İLE NOKTASAL KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Rukiye ERTAN

**Başkan** : Doç. Dr. Rukiye Ertan

  
İmza

**Üye** : Prof. Dr. Deniz Uzunsoy

  
İmza

**Üye** : Doç. Dr. Gülçen Seraloğlu

  
İmza

**Üye** :

İmza

**Üye** :

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

  
Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü

..../..../...

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

20/08/2019.

Özer MUTLUSU



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DERİN ÇEKİLEBİLİR ÇELİK SACLARIN HAFİF METALLER İLE NOKTASAL KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

**Özer MUTLUSU**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Rukiye ERTAN

Bu çalışmada, 1 mm kalınlığındaki yüksek mukavemetli ve derin çekilebilir IF 180 çeliğinin ticari saf titanyum (ASTM Grade 2) ve 5754 alüminyum alaşımı ile noktasal kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Kaynak işlemleri elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle farklı kaynak akımları (10 kA, 12,5 kA ve 15 kA), kaynak süreleri (10, 15 ve 20 çevrim) ve elektrot kuvvetlerinde (5 kN, 10 kN ve 15 kN) gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin kaynak çekirdek çapı, sertlik ve çekme-makaslama testi sonuçları incelenerek mekanik özellikler irdelenmiştir.

Sonuç olarak, kaynak parametrelerinin IF 180 - 5754 Al alaşımı kaynak çiftinin mekanik özellikleri üzerinde IF 180 – Ti-Gr2 alaşım çiftine göre daha büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kaynak akımı ve elektrot kuvvetinin her iki kaynak çiftinde çekirdek çapı ve maksimum çekme kuvvetini önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** IF180, Titanyum Gr2, 5754 Al alaşımı, nokta direnç kaynağı, mekanik özellikler.

**2019, vii + 52 sayfa**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **INVESTIGATION OF SPOT WELDABILITY OF DEEP-DRAWN STEEL SHEETS WITH LIGHT METALS**

**Özer MUTLUSU**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Automotive Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Rukiye ERTAN

In this study, spot weldability of 1 mm thick IF 180 deep drawn high strength steel with commercial pure titanium (ASTM Grade 2) and 5754 aluminum alloy was investigated. The welding operations were performed with different welding currents (10 kA, 12.5 kA and 15 kA), welding times (10, 15 and 20 cycles) and electrode forces (5 kN, 10 kN and 15 kN) by electrical resistance spot welding. The welding nugget diameter, hardness and tensile-shear test results of the welded samples were examined and the mechanical properties were compared.

As a result of the tests, it was seen that the welding parameters had a greater effect on the mechanical properties of the IF 180 -5754 Al alloy welding pair than the IF 180 - Ti-Gr2 alloy pair. It has been determined that the welding current and electrode force significantly affect the nugget diameter and the maximum tensile force in both welding pairs.

**Key words:** IF180, Titanium Gr2, 5754 Al alloy, resistance spot welding, mechanical properties.

**2019, vii + 52 pages.**

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimi ile çalıőmalarımı ynlemdiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Rukiye ERTAN'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Deney numunelerinin kaynaklanması işleminde yardımcı olan değerli arkadaőım Fatih İLTER'e teşekkür ederim.

Bu çalışmaya katkıda bulunup desteğini esirgemeyen değerli arkadaőlarıma; Mutlu ERTUęUŐ ve őehmus GÜDEN'e teşekkür ederim.

Son olarak çalıőmalarım sırasında manevi olarak en büyük desteği veren aileme en içten sevgi ve teőekkürlerimi sunarım.

Özer MUTLUSU

20.08./2019

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	4
2.1. Kaynağın Tanımı ve Sınıflandırılması .....	4
2.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı ve Prensibi.....	5
2.2.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Çevrimi.....	7
2.2.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Parametreleri .....	8
2.2.3. Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB).....	13
2.2.4. Kaynak Kabiliyeti .....	15
2.2.5. Farklı Malzemelerin Kaynağı .....	16
2.2.6. Nokta Direnç Kaynağında Karşılaşılan Güçlükler.....	16
2.3. IF Çelikleri .....	17
2.3.1. IF Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti.....	19
2.3.2. IF Çeliklerinin Sınıflandırılması .....	19
2.4. Titanyum .....	20
2.4.1. Saf Titanyum.....	21
2.4.2. Titanyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti .....	22
2.4.3. Titanyumun Diğer Malzemeler ile Kaynağı .....	24
2.5. Alüminyum .....	24
2.5.1. Alüminyumun Sınıflandırılması .....	25
2.5.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti .....	27
2.5.3. Alüminyumun Nokta Direnç Kaynağı .....	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	29
3.1 Malzeme ve Metot.....	29
3.2 Mekanik testler.....	31
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	34
4.1 Sertlik Testleri ve Çekirdek Çapları.....	34
4.2. Çekme - Makaslama Testleri .....	38
5. SONUÇ .....	45
KAYNAKLAR .....	46
ÖZGEÇMİŞ .....	52



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

°C  
mm  
kN  
kJ

### Açıklama

Santigrat  
Milimetre  
Kilo Newton  
Kilo Joule

### Kısaltmalar

Al  
IF  
Ti-Gr2  
ITAB  
EM  
KM  
MS  
HSS  
AHSS  
HSLA  
TRIP  
DP,CP  
MART  
Q&P  
PHS  
TWIP  
HV

### Açıklama

Alüminyum  
Arayer Atomsuz  
Titanyum Grade 2  
Isı Tesiri Altındaki Bölge  
Esas Metal  
Kaynak Merkezi  
Yumuşak Çelikler  
Geleneksel Yüksek Dayanımlı Çelikler  
Geliştirilmiş Yüksek Dayanımlı Çelikler  
Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı  
Dönüşüm etkili yoğruluklu çelikler  
Çift Fazlı Çelikler  
Martenzitik Çelikler  
Sertleştirilmiş ve Menevişlenmiş Çelikler  
Basıyla sertleştirilmiş çelikler  
İkizlemeyle plastikliği arttırılmış çelik  
Vickers Sertlik

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Nokta direnç kaynak makinesi temel bileşenleri ve kaynak bölgesi detayı .....	5
Şekil 2.2. Elektrik direnç nokta kaynağı sırasında oluşan dirençler .....	6
Şekil 2.3. Direnç Nokta Kaynak Çevrimi .....	8
Şekil 2.4. Uygulanabilir akım aralığı grafiği .....	9
Şekil 2.5. Elektrik direnç nokta kaynağında elektrot basma kuvvetinin etkisi .....	11
Şekil 2.6. İmalat sektöründe en çok kullanılan nokta kaynak elektrot uç formları .....	11
Şekil 2.7. Elektrik nokta direnç kaynaklı bağlantılarda akımın kısa devre hali .....	13
Şekil 2.8. Kaynak bölgesi ile ITAB arasındaki ilişki .....	14
Şekil 2.9. Çelik Sınıflarının Dayanım ve Toplam Uzama Eğrisi .....	18
Şekil 2.10. Otomotiv ve motosiklet üretiminde titanyum örnekleri.....	21
Şekil 3.1. Coşkunöz marka nokta direnç kaynak makinesi.....	30
Şekil 3.2. UTEST marka çekme basma test cihazı .....	31
Şekil 3.3. Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynaklanan çekme numunelerinin boyutları .....	32
Şekil 3.4. Bakalite alınmış numune fotoğrafı.....	32
Şekil 3.5. Metkon marka Vickers mikro sertlik test cihazı .....	33
Şekil 3.6. Vickers sertlik ölçüm noktaları .....	33
Şekil 4.1. 5754 Al alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak süresi ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik profili .....	36
Şekil 4.2. Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak süresi ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik profili .....	37
Şekil 4.3. 5754 Al alaşımının ve Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak sürelerinde ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekirdek çapları .....	38
Şekil 4.4. 5754 Al alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak çevrimi ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekme-makaslama testi sonuçları.....	40
Şekil 4.5. Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak çevrimi ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekme-makaslama testi sonuçları.....	42
Şekil 4.6. IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı kaynak çiftlerinde kaynak parametrelerinin maksimum çekme mukavemeti üzerindeki etkisi .....	43
Şekil 4.7. 5 kN ve 15 kN elektrot kuvvetinde kaynak (a) IF 180 – 5754 Al alaşımı çiftinde ve (b) IF 180 – Ti-Gr2 kaynak çiftinde çekirdek bölgesinde meydana gelen incelme .....	44

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Kaynak yöntemlerinin enerji şiddeti ve türüne göre sınıflandırılması.....	4
Çizelge 2.2. Titanyum Elementinin Özellikleri .....	20
Çizelge 2.3. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri .....	22
Çizelge 2.4. Titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirliği .....	23
Çizelge 2.5. Alüminyum elementinin özellikleri .....	25
Çizelge 2.6. Dövme ve döküm alüminyum alaşımların sınıflandırılması .....	26
Çizelge 2.7. 5xxx serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi.....	27
Çizelge 3.1. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları .....	29
Çizelge 3.2. Malzemelerin temel mekanik özellikleri .....	29
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri.....	30



## 1. GİRİŞ

Otomotiv ve havacılık sektörlerinin enerji ihtiyacı giderek artarken, yakıt ekonomisini iyileştirmek, iklim değişikliğini, çevreye verilen zararı ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri azaltmak amacıyla araçların hafifletilmesi üzerine yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalar, çoğunlukla alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif alaşımların kullanımını içermektedir (Wang 2015, Kaya 2011, Han 2011). Ancak araç üzerinde yüksek mukavemeti ekonomik kriterler çerçevesinde sağlamak için çelik hala en çok tercih edilen metal malzeme grubundadır. Daha radikal bir yaklaşım ise, çeliğin yoğunluğundan daha düşük yoğunluğa sahip olan alüminyum ve titanyum alaşımlarının çelik ile kullanılması ve daha hafif sistemler üretilmesidir (Han 2011).

Otomotiv endüstrisinde farklı metallerin noktasal kaynağında genellikle elektrik direnç veya sürtünme-karıştırma kaynağı kullanılmaktadır. Sürtünme-karıştırma kaynağı, uygulamadaki bazı sıkıntıları nedeniyle kısıtlı kullanım alanına sahiptir (Che 2018). Nokta direnç kaynağı ise su soğutmalı elektrotlar arasında üst üste pozisyonlanmış plakaların, belirli bir süre boyunca akıma maruz bırakılarak ısıtılması şeklinde basit bir çalışma prensibi ile gerçekleştirilir. İşlem hızı oldukça yüksek, kontrol edilebilir bir imalat süreci ve düşük ilk yatırım maliyetine sahip olmasından dolayı bu yöntem otomotiv endüstrisinde vazgeçilmez olmuştur (Kianersi 2014). Elektrik direnç nokta kaynağı çelik, paslanmaz çelik, nikel, alüminyum veya titanyum alaşımlarının birleştirilmesinde en fazla kullanılan yöntemdir (Pereira 2010). Ancak ara yüzeyde oluşan yüksek sıcaklığın etkisiyle kaynaklı bölgede mekanik ve metalürjik özelliklerde önemli değişiklikler meydana gelir. Bağlantı kalitesini önemli oranda etkileyen bu değişiklikler uygun parametre ile yapılan kaynak işlemlerinde minimum düzeyde kalır (Vural 2004). Kaynak akımı başta olmak üzere kaynak süresi ve elektrot kuvveti mekanik özellikleri belirleyen önemli parametrelerdir.

Araç üzerinde kullanılan çelik alaşımın türü parçadan beklenen performansa, maliyetine ve tasarıma uygun imalatı göz önünde bulundurularak seçilir. Çelik türleri arasında ultra düşük karbonlu (<0,003) (Santos 2018) çelikler derin çekilebilir özelliklere sahip olup

otomotiv endüstrisinde yumuşak çeliklerin yerini almıştır. Bu çelikler kolay şekillendirilebilir olmalarının yanı sıra iyi kaynak edilebilir özelliklere sahiptir ve çeşitli kaynak yöntemleriyle birleştirilebilir (Hoile 2000, Campos 2002). Yüksek mekanik mukavemete, iyi yorulma ve darbe direncine sahip olan bu çelikler, yapısal parçalar (uzunlamasına kirişler, traversler, B direkleri vb.) için farklı metaller ile birlikte kullanılmaktadır (ArcelorMittal 2018). Özellikle Al alaşımları hafiflikleri ve sergiledikleri yüksek mekanik özellikler sebebiyle en fazla tercih edilen farklı metaller grubundandır. Bundan başka titanyum alaşımları da yüksek maliyetlerine rağmen hafif olmaları ve Al alaşımlarından daha yüksek mekanik özellikler sergilemeleri nedeniyle kullanımı gittikçe artan farklı metaller arasından sayılabilmektedir. Ancak farklı metallerin ergitme kaynağı ile birleştirilmesinde çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Bunlardan en önemlisi ara yüzeyde meydana gelen intermetalik faz tabakası ve sıcak çatlak oluşumudur.

Çeliklerin hafif metaller ile elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilebilirliği konusunda literatürde kısıtlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Kang ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada farklı kalınlıklardaki AA6022-T4 ve IF çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle kaynak etmişlerdir. Yorulma ve çekme-makaslama testleri, SEM görüntüleri ve kaynak çekirdek çapları ile birlikte değerlendirilerek mekanik özellikler AA6022-T4 ve AA6022-T4 kaynak çifti ile kıyaslanmıştır. Farklı metallerin kaynağında oluşan intermetalik faz ve çatlaklara rağmen aynı metallerin kaynağına göre daha yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir.

Literatürde farklı metallerin kaynağı konusunda yapılan çalışmalarda kaynak işlemi genellikle kaplama veya ara yüzey tabakası yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan, Sun ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada SAE1008 çeliğini 5182-O alüminyum alaşımı ile elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle ara yüzey tabakası kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynak birleştirmelerinin statik ve dinamik dayanımları, aynı yükleme koşulları altında perçinli birleştirmeler ile kıyaslanmıştır ve perçinli birleştirmelerin daha yüksek enerji absorbe etme yeteneğine ve yorulma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Satonaka ve ark. (2006) ve Qui ve ark. (2008) yaptıkları

çalışmada 5052 alüminyum alaşımını direnç nokta kaynağı kullanarak SUS304 paslanmaz çelik ve SPCC soğuk haddelenmiş çelik alaşımı ile SPCC alaşımı ara tabaka sacı kullanarak birleştirmişlerdir. Sonuç olarak kaynak mukavemeti elektrot çapının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Al alaşımının SUS304 ile kaynak edilmesi durumunda kaynak ara yüzeyinde oluşan sert intermetalik faz ( $Fe_2Al_5$  ve  $FeAl_3$ ) tabakası 1-2 $\mu$ m gibi çok ince kalınlıklarda meydana gelirken, SPCC alaşımı ile yapılan kaynak işlemlerinde tabaka kalınlığı 7-8 $\mu$ m'ye ulaşmıştır. Bu faz tabakasının çekme-makaslama testi sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, ancak çapraz çekme testi sonuçlarını önemli miktarda etkilediği tespit edilmiştir.

Farklı malzemelerin kaynağında meydana gelen problemleri minimize etmek amacıyla literatürdeki bazı çalışmalarda elektrik direnç kaynak yöntemi üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır. Kim ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada DP590 ve A5052 alaşımlarını Delta-direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi durumundaki elektrot morfolojisinin ve kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Zhang ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada 6008-T66 Al alaşımı ile H220YD yüksek mukavemetli çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı ile elektrot morfolojisini optimize ederek birleştirmişlerdir. Geliştirdikleri elektrot ile yapılan kaynaklı bağlantıların mukavemeti sıradan (F tipi) elektrodlar ile yapılanlara göre daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca geliştirilen elektrot ile yapılan kaynaklarda ara yüzeyde oluşan intermetalik faz tabakasının kalınlığı 4  $\mu$ m'yi aşmamıştır.

Bu çalışmada, 1 mm kalınlığındaki IF 180 çelik sac ile ticari saf titanyum (Grade2) ve 5754 Al alaşımı saclar herhangi bir kaplama veya ara yüzey tabaka malzemesi kullanmadan farklı kaynak akımları, süreleri ve elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirilmesi durumundaki mekanik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Kaynağın Tanımı ve Sınıflandırılması

Kaynak, ergime sıcaklıkları aynı veya birbirine yakın olan, iki veya daha fazla termoplastik veya metalik parçanın ısı, basınç veya her ikisinin etkisi altında birleştirilmesi işlemidir. Araya ilave malzeme katarak veya katmadan yapılabilir.

Yapılan kaynak işleminin emniyeti açısından, ilave malzemeler ile kaynağı yapılan malzemeler olabildiğince aynı ergime aralığında olmalıdır. (Akyıldız 2008)

Kaynak, kaynaklanacak malzemelerin türüne göre metal kaynağı ve plastik malzeme kaynağı olarak ikiye ayrılırken, kaynak işleminin amacına göre de doldurma kaynağı ve birleştirme kaynağı olarak adlandırılabilir. Bir diğer sınıflandırma çeşidi de kullanılan enerjini şiddetine ve türüne göre, basınç kaynağı ve ergitme kaynağıdır. (Yeşildal 2008) Kaynak yöntemlerinin enerji şiddeti ve türüne göre sınıflandırılması Çizelge 2.1’de verilmiştir. (Esendir 2008)

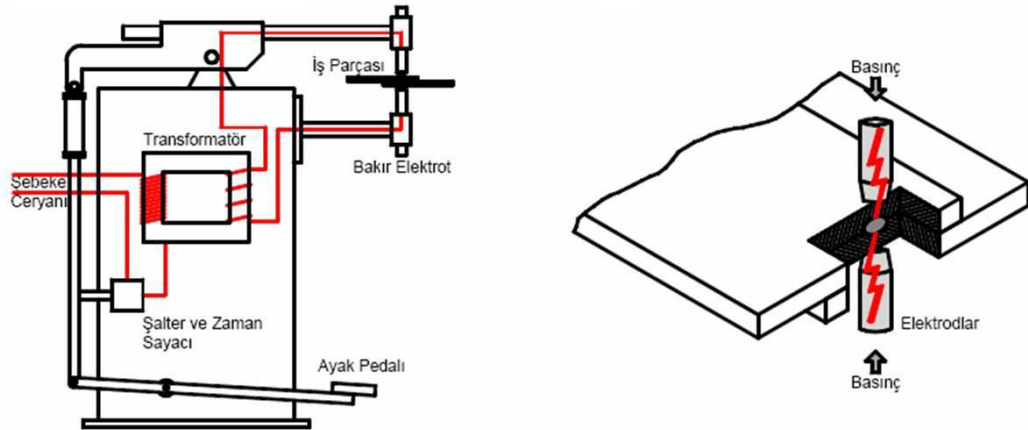
**Çizelge 2.1.** Kaynak yöntemlerinin enerji şiddeti ve türüne göre sınıflandırılması

ERGİTME KAYNAĞI	BASINÇ KAYNAĞI
1. Döküm Ergitme Kaynağı	1. Soğuk Basınç Kaynağı
2. Elektrik Direnç Ergitme Kaynağı	2. Ultrasonik Kaynak
3. Gaz Ergitme Kaynağı	3. Sürtünme Kaynağı
4. Elektrik Ark Kaynağı	4. Ocak Kaynağı
4.1. Karbon Arkı ile Kaynak	5. Döküm Basınç Kaynağı
4.2. Metal Arkı ile Kaynak	6. Gaz Basınç Kaynağı
4.3. Koruyucu Gazla Kaynak	7. Elektrik Direnç Kaynağı
4.3.1. TIG (Normal ve Plazma TIG, Ark Atom)	8. Elektrik Ark Basınç Kaynağı
4.3.2. MIG, MAG	9. Difüzyon Kaynağı
4.4. Toz Altı Kaynağı	
5. Elektron Bombardımanı ile Kaynak	
6. Lazer Işını ile Kaynak	

En sık kullanılan basınç kaynak yöntemi elektrik direnç nokta kaynağıdır. Hızlı uygulanabilmesi, güvenilir olması, ısı tesiri altında kalan bölgenin az olması, gözle kontrol edilebilmesi, elektrotların kaynak yapılan malzemelere kolay ulaşabilmesi ve kaynak makinesinin otomatize edilebilmesinden dolayı tercih edilmektedir. (Ünlükal 2007) Bu avantajları sebebiyle, elektrik nokta direnç kaynağı özellikle otomotiv sanayide kaporta ve sac parçaların montajları için kullanılmaktadır. (Antika 2017)

## 2.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı ve Prensibi

Elektrotlar tarafından kuvvet uygulanarak bir arada tutulan iş parçalarının, uygulanan elektrik akımına gösterdikleri direnç ile oluşan ısının etkisiyle eriyerek basınç altında birleşmesi işlemi elektrik direnç nokta kaynağı olarak adlandırılır. İlave olarak dış bir ısı kaynağı gerekmez. (Aktaş 2008) Nokta direnç kaynak makinesi temel bileşenleri ve kaynak bölgesi detayı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Nokta direnç kaynak makinesi temel bileşenleri ve kaynak bölgesi detayı (Yıldırım 2010)

Kaynak bölgesinde oluşan ısı Joule kanunu ile (2.1) hesaplanabilir.

$$Q = K \cdot I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.1)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (2.2)$$



Q : Oluşan ısı değeri

K: Sabit değer (0,239)

I: Akım değeri

R: Elektrik dirençlerinin toplam değeri

R1, R5: Elektrot – malzeme temas direnci

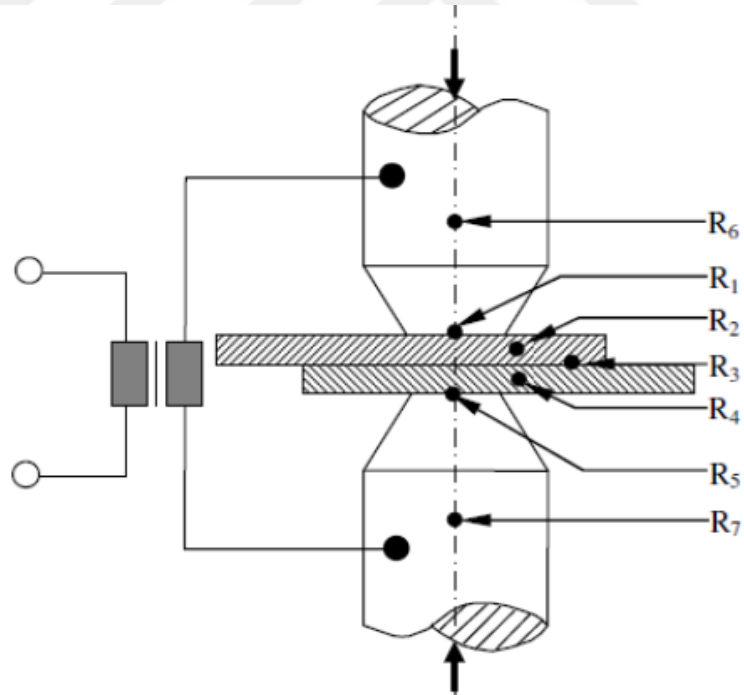
R2, R4: Kaynaklanan malzemelerin direnci

R3: Kaynaklanan malzemelerin temas direnci

R6, R7: Elektrotların direnci

t: Akımın uygulandığı süre

Malzeme direnci, kaynaklanan parçaların fiziksel özellikleri ile ilgili olduğundan dolayı değişkenlik göstermez. Temas direnci ise, elektrotların ucu ve kaynaklanan malzemelerin yüzeyi ile ilişkili olduğundan farklılık gösterir. (Erik 2010) Elektrik direnç nokta kaynağı sırasında oluşan dirençler Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Elektrik direnç nokta kaynağı sırasında oluşan dirençler (Yürük 2015)

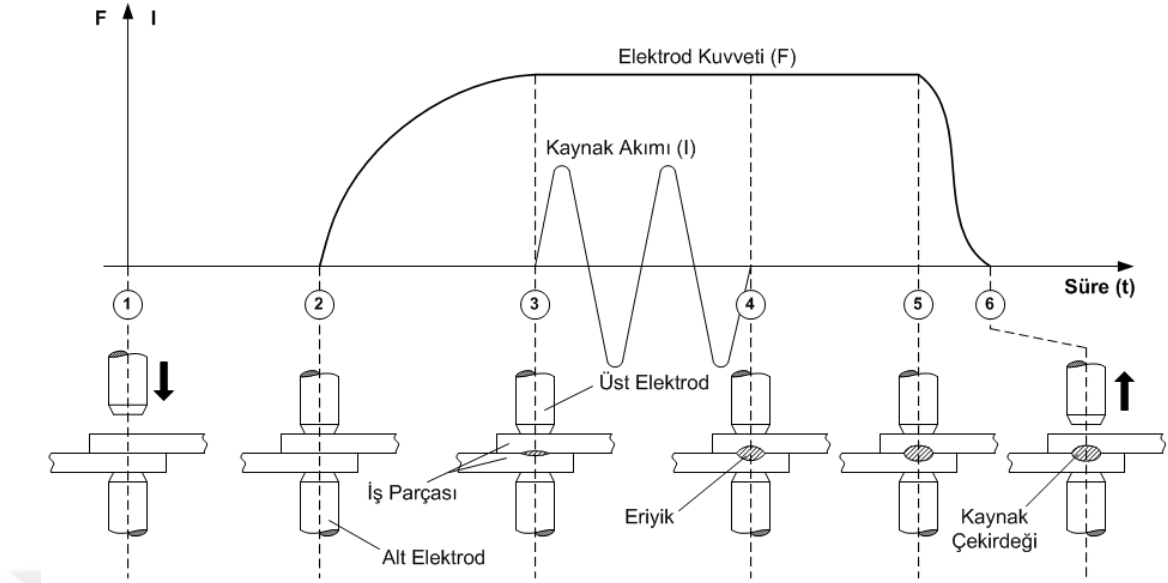
R3 direncinin bulunduğu bölge, iş parçalarının erimesiyle kaynak çekirdeğinin olduğu bölgedir. Bu sebeple R3 direncinin büyüklüğüne bağlı olarak kaynak kabiliyeti artar. Bu direncin yeterli büyüklükte olmaması durumunda kaynak işlemi başarısız olur. R3 dışındaki tüm dirençlerde, ısının mümkün olduğunca küçük olması istenir. Bu sebeple kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot kuvveti değerlerinin seçimi önemlidir. (Oğuz 2018)

R1 ve R5 temas bölgesindeki ısıyı düşük tutmak için, iyi ısı ileten elektrot kullanımı ve pas, yağ, boya gibi ısıyı iletmeyen tabakların olmadığı bir malzeme yüzeyinin sağlanması gerekir. (Erik 2010)

### **2.2.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Çevrimi**

Kaynak çevrimi (Şekil 2.3) 5 aşamadan oluşur.

1. Yaklaşma: Elektrotların iş parçasına doğru hareket ederek temas etme anına kadar geçen süreyi kapsayan aşamadır.
2. Sıkma: Elektrotların istenilen baskı kuvvetine gelmesi için geçen süreyi kapsayan aşamadır.
3. Kaynak: Kaynak akımının devreden ve iş parçalarından geçtiği süreyi kapsayan aşamadır. İş parçaları ısının etkisiyle eriyerek sıvı hale geçer.
4. Tutma: Elektrotlar içerisinde su akışı ile kaynak noktasının soğutulması ve katı hale geçmesini kapsar.
5. Ayrılma: Kaynak işleminin bitmesinden sonra, elektrotların iş parçasından ayrılarak bir sonraki işlem için hazırlanma aşamasıdır.



**Şekil 2.3.** Direnç Nokta Kaynak Çevrimi (Yıldırım 2010)

### 2.2.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Parametreleri

Nokta direnç kaynağında, kaynak kalitesini etkileyen parametreler aşağıdaki gibidir.

1. Kaynak akımı
2. Kaynak süresi
3. Elektrot kuvveti
4. Elektrotların malzemesi ve boyutları
5. Kaynaklanan parçanın malzemesi
6. Kaynaklanan parçanın yüzeyi
7. Kaynaklı noktalar arasındaki mesafenin ısınmaya etkisi

Kaynak akımı

Kaynak sırasında oluşan ısıya (2.3) etki eden en önemli parametrelerden biri kaynak akımıdır.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot T \quad (2.3)$$

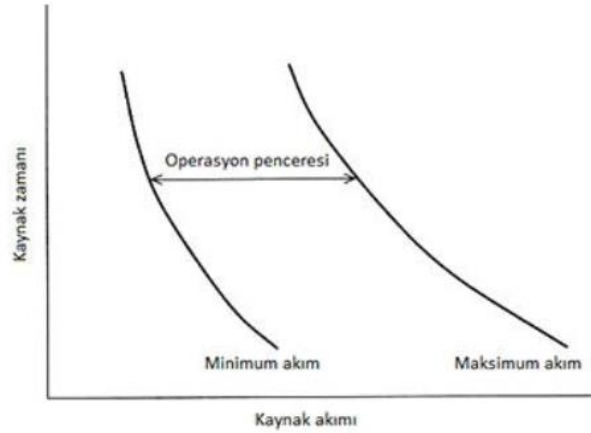
$Q$  : Isı enerjisi (Watt – sn veya Joule)

$I$  : Akım (A)

$R$  : Direnç (Ohm)

$T$ : Akımın geçtiği süre (sn)

Kaynak akımının yetersiz olması durumunda, kaynak için gerekli olan ısı birikmeyecek ve yeterli füzyon elde edilemeyecektir. Bu durumda minimum çekirdek çapından küçük ve kırılabilir bir kaynak yapısı elde edilecektir. Kaynak akımının üst değerden daha yüksek olması durumunda ise, elektrotlar arasındaki iş parçasının tamamı plastik bölgeye kadar ısınır. Elektrotlar iş parçasına gömülür. Elektrotlar yüksek ısıya maruz kalabilir, yanabilir ve iş parçasına yapışarak zarar görebilir. Eriyik malzeme kaynak bölgesinin dışına fişkirabilir. Sonuç olarak, kaynak kalitesinde düşüş görülür. Şekil 2.4' te tipik bir uygulanabilir akım aralığı grafiği gösterilmektedir. (Ünlükal 2007)



**Şekil 2.4.** Uygulanabilir akım aralığı grafiği (Yavuz 2015)

Kaynak süresi

Kaynak sırasında oluşan ısı ile kaynak süresi doğru orantılıdır. Kaynak akımı gibi kaynak süresi de çok önemli bir değişkendir. Kaynak süresinin uzun olması durumunda, düşük kaynak akımı ile çalışmak gerekir. Bu da gerekli füzyonun oluşmasını engelleyebilir.

Kaynak süresinin kısa olması durumunda ise, yüksek kaynak akımı değerine ihtiyaç duyulur. Kaynak süresinin yetersiz olursa, parçalar birbirine tutunamayabilir. Kaynak süresi azaldıkça, ısı kayıpları azalır ve ısıl verim artar. Kaynak işlemi hızlı olacağından dolayı kaynak bölgesi dışında erime sıcaklığına ulaşılamaz. Bu durumda iş parçalarının yüzeylerinde yüksek sıcaklık oluşmadan kaynak işlemi biter. Sonuç olarak, elektrot uçları da bozulmamış olur. (Ünlükal 2007)

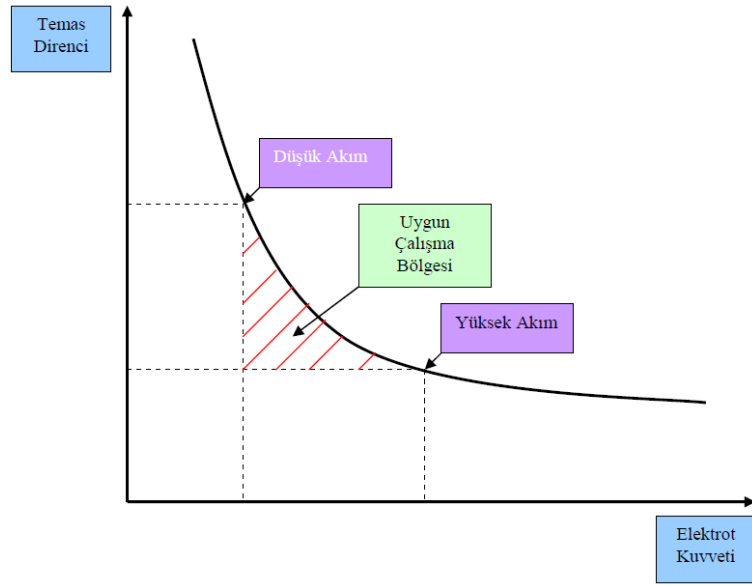
Kaynak süresinin uzun olduğu durumlarda, iş parçasının dış yüzeyi aşırı ısındığından dolayı elektrotlar malzemenin içine gömülür ve kaynak bölgesinin deformasyona uğramasına sebep olur. (Oğuz 2018)

### Elektrot Kuvveti

Kaynak çevrimi süresince, elektrotlar tarafından kaynaklanacak numunelere uygulanan kuvvete elektrot kuvveti veya kaynak kuvveti denir. Statik bir kuvvet şeklinde ifade edilse de kaynak esnasında dinamik bir kuvvettir. (Oğuz 2018)

Kaynak noktasının ısınmasında önemli etmenlerden biri de elektrot kuvvetidir. Elektrot kuvveti, iş parçalarının temas etmesini sağlayacak kadar yüksek ve uygulanan akım değeri ile de uyumlu olacak kadar düşük olmalıdır. Elektrot kuvvetinin çok yüksek olması durumunda, iş parçalarının temas yüzeyi artar ve kaynak bölgesindeki yüzeyler arasındaki toplam ısı düşer. Çekirdek çapının düşük olmasına sebep olur. Kaynak sırasında yüksek kıvılcım oluşabilir. Elektrot kuvveti düşük olursa, malzemeler arasındaki direnç yükselir ve akım geçişi sırasında patlamalar oluşur. İş parçaları temas durumunda değilken kaynak işlemi başlatılırsa, elektrot ve iş parçaları arasında ergime oluşabilir ve çekirdek optimize olamaz. (Ünlükal 2007)

Elektrik nokta direnç kaynağında, elektrot basma kuvvetinin etkisi Şekil 2.5' te gösterilmiştir. (Coşkun 2009)

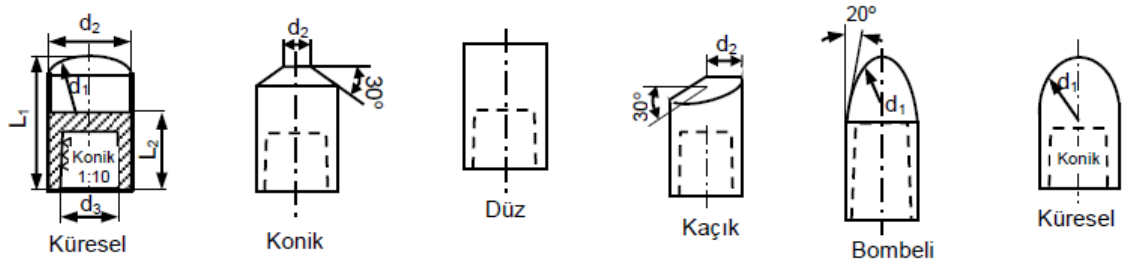


Şekil 2.5. Elektrik direnç nokta kaynağında elektrot basma kuvvetinin etkisi

#### Elektrotların Malzemesi ve Boyutları

Elektrotların yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması ve temas direncinin düşük olması istenir. Bunun yanı sıra, yüksek kaynak kuvvetine dayanabilecek sağlamlıkla olması beklenir. (Oğuz 2018)

Elektrotların şekil ve ebatları, kaynaklanacak iş parçalarının malzemesine, şekil ve ebatlarına göre seçilir. Kesik koni uçlu ve küresel tip en çok tercih edilen elektrot çeşididir. (Oğuz 2018) İmalat sektöründe en çok kullanılan nokta kaynak elektrot uç formları Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. İmalat sektöründe en çok kullanılan nokta kaynak elektrot uç formları (Yürük 2015)

Küresel uçlu elektrot kullanımında, elektrotun malzeme yüzeyine paralel şekilde teması hassas bir ayar gerektirir. Bu sebeple, üst elektrotun dairesel hareket ile malzemeye yaklaştığı kaynak makinelerinde kullanılabilen bir elektrot tipidir. İyi bir sıkıştırma ve kaynak sonrası malzeme yüzeyinde iyi bir görünüm sağlar. Soğuma hızları yüksek olduğundan dolayı alüminyum ve alaşımlarının kaynağından tercih edilir. (Yürük 2015)

#### Kaynaklanan Parçanın Malzemesi

Kaynaklanacak olan malzemelerin özgül ısı, ısı ve elektrik iletkenlik, erime sıcaklığı, yoğunluk, sertlik gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri kaynak kalitesini etkiler. Özdirenci düşük malzemelerde, akımın hızlı geçişi düşük ısı oluşuma neden olacaktır. Bu sebeple bu metallerin kaynağı beklenene göre daha zor olacaktır. (Oğuz 2018)

#### Kaynaklanan Parçanın Yüzeyi

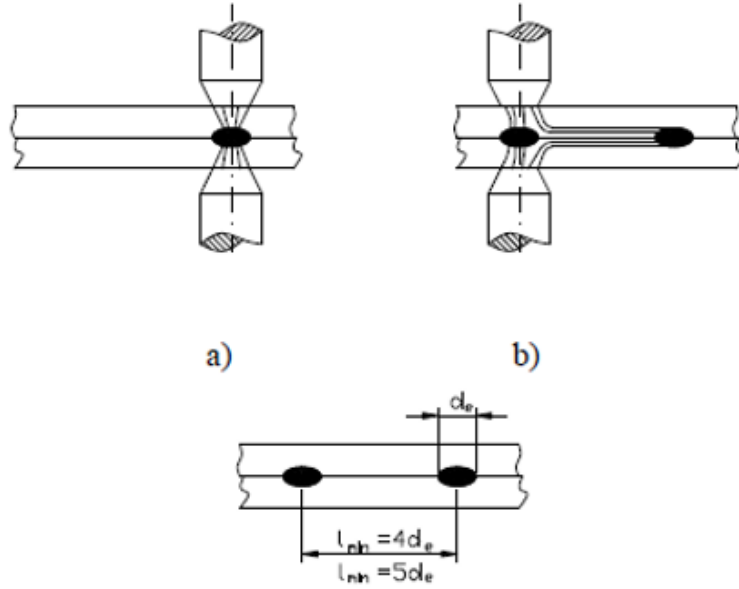
Elektrot ile temas eden iş parçası yüzeyindeki kaplamalar, pas ve oksit gibi tüm maddeler uzaklaştırılmalıdır. Aksi halde yüzeydeki direnç yüksek olacak ve iş parçalarının arasında oluşması beklenen ısı artışının, parça yüzeylerinde de aynı hızda oluşmasına yol açacaktır. Sonuç olarak kalitesiz bir kaynak elde edilecektir. (Türkoğlu 2016)

#### Kaynaklı noktalar arasındaki mesafenin ısınmaya etkisi

İş parçası üzerinde birden fazla nokta direnç kaynağı uygulanması durumunda, sistemde paralel devre meydana gelir. Akımın bir kısmı parça üzerinden bir önceki kaynak bölgesine doğru ilerler, kalan akım ise ikinci kaynak noktasında elektrotların arasındaki iş parçasından geçer. Eğer birinci ve ikinci kaynak bölgeleri arasındaki mesafe yakın ise, akımın önemli bir kısmı birinci kaynağa atlar. Oluşan bu kısa devre yüzünden, ortaya düşük akım şiddeti çıkar ve istenilen çekirdek çapı elde edilemez. (Antika 2007)

Kaynak noktalarının birbirine olan uzaklığının, kaynak çapının en az 4 katından büyük olması sağlanırsa, oluşabilecek kısa devre sorununun önüne geçilebilir. Alüminyum gibi

yüksek elektrik iletkenliğine sahip malzemelerde, bu değer 8 veya 10 kat olarak belirlenebilir. Elektrik nokta direnç kaynaklı bağlantılarda akımın kısa devre hali Şekil 2.7' te gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** Elektrik nokta direnç kaynaklı bağlantılarda akımın kısa devre hali (Aktaş 2008)

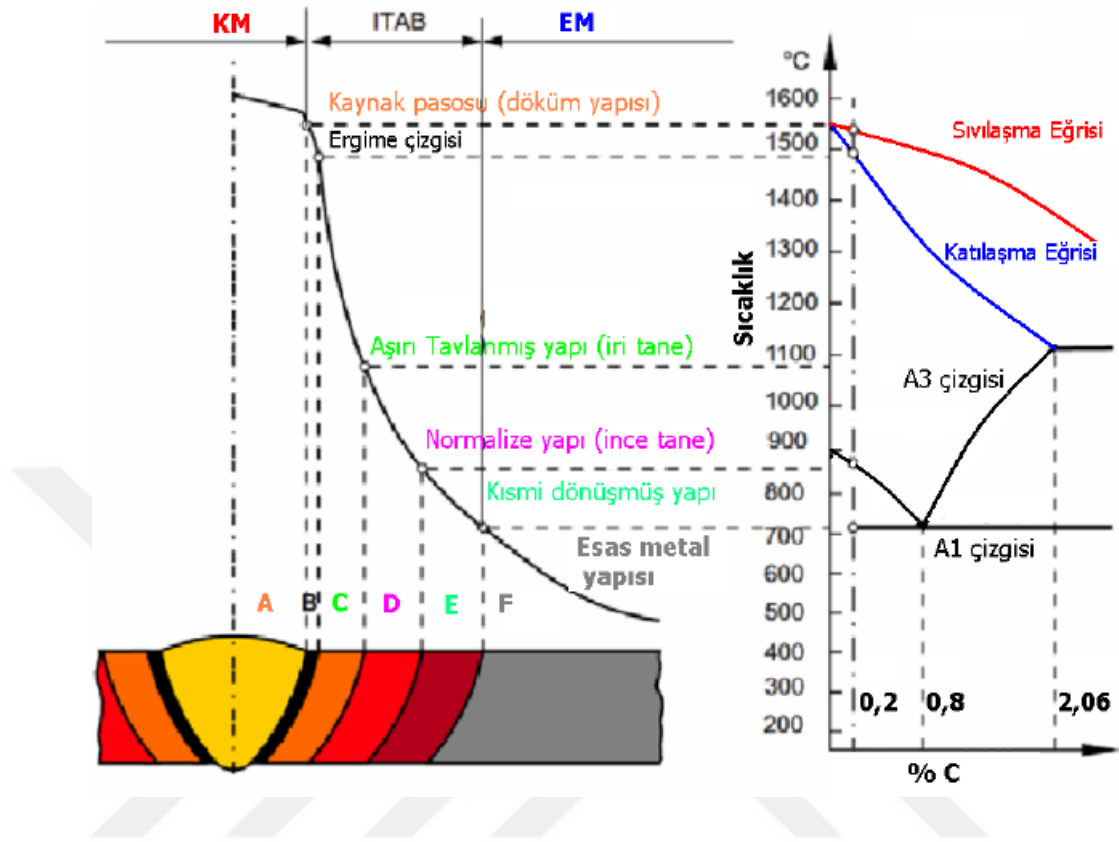
- Kısa devre olmadan akım geçişi
- Yakın noktalar arasında kısa devre akım oluşumu
- Kısa devre akım oluşumunun engellenmesi için gerekli koşul

### 2.2.3. Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

Kaynak sırasında oluşan ısıdan etkilenen ve bu etkinin ölçülebildiği bölge olarak açıklanabilir. Isı tesiri altındaki bölge 3 ana bölgeden oluşur. İlk bölge kaynak çekirdeğine bitişik olan süper kritik bölgedir. Bu bölgede tane irileşmesi görülür. İkinci bölge, sıcaklığı süper kritik bölgeden daha düşük olan ve kısmi dönüşüm gözlenen orta bölgedir. Üçüncü bölge ise ısının tesirinin görülmediği ve kritik altı bölge olarak adlandırılan kısımdır. (Yavuz 2015)



Kaynak bölgesi ile ITAB arasındaki ilişki Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Kaynak bölgesi ile ITAB arasındaki ilişki (Yeşildal 2008)

A bölgesi kaynak pasosudur. B bölgesi ise kısmi ergime çizgisidir ve A bölgesinin bir parçası olarak değerlendirilebilir. Kaynak bölgesinin yanı olan C bölgesinde, sıcaklık ergime noktasına yakındır ve bu sebeple hızlı östenitik tane büyümesi meydana gelir. Tane boyutunun büyük olması gevrekleşme eğilimini artırır ve soğuma sonrası bu bölge martenzit yapıya dönüşür. D bölgesi östenit yapıya dönüşmüştür ancak bu bölgede sıcaklık düşük olduğundan tane büyümesi azdır. E bölgesinde ise bazı tanecikler östenit yapıya dönüşse de dönüşmeyen tanecikler de bulunur. Isının etkisiyle ferrit taneciklerinin menevişlendiği görülebilir.

#### 2.2.4. Kaynak Kabiliyeti

Nokta direnç kaynak kabiliyeti net olarak açıklanabilen bir özellik olmamasına karşın, metalik parçaların kaynaklanabilirliği hakkında fikir verir. Kaynak kabiliyetinin yüksek olması ifadesinden, kaynak işlemi süresince hiçbir önlem almadan ve geniş kaynak şartları aralığında istenilen kaynak kalitesinin elde edilebileceği anlamı çıkarılabilir.

Metal malzemelerin nokta direnç kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir.

- 1- Isı iletkenlik katsayısı
- 2- Isı direnci
- 3- Ergime sıcaklığı

Optimum kaynak kabiliyeti için, metalin akıma karşı direncinin yüksek olması, ergime sıcaklığının ve ısı iletkenlik katsayısının düşük olması gerekir. Çelikler bu şartları sağladıkları için çok iyi kaynaklanabilirler. Hafif metallerin kaynak kabiliyeti daha düşüktür. (Aras 2016)

Kaynak kabiliyeti için referans olan kaynak faktörünün hesaplanabilmesi için 2.4 ile verilen formül kullanılabilir.

$$S = \frac{\alpha_t}{T_{em} \cdot K_t} \cdot 100 \quad (2.4)$$

S : Kaynak kabiliyeti

$\alpha_t$  : Isı iletkenliği

$T_{em}$  : Ergime sıcaklığı

$K_t$  : Isı iletme katsayısı

Kaynaklanacak olan malzemeler açısından, nokta direnç kaynağı diğer kaynak türlerine göre daha fazla serbestliğe sahiptir. Nokta direnç kaynağı kullanılarak birçok farklı

malzeme değişik biçim ve boyutlarda sorunsuz olarak kaynak edilebilmektedir. (Aras 2016)

### **2.2.5. Farklı Malzemelerin Kaynağı**

Farklı metallerin kaynak işleminde, malzemelerin mekanik, fiziksel ve metalürjik özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Malzemeler arasındaki geçiş bölgesinde oluşan intermetalik faz farklı malzemelerin kaynağındaki en önemli sorunlardan biridir. Bu sebeple birleştirecek malzemelerin ısı ergime sıcaklıkları ve ısı genleşme katsayıları bilinmelidir. (Esendir 2008)

### **2.2.6. Nokta Direnç Kaynağında Karşılaşılan Güçlükler**

Konstrüksiyon ve Geometri

Nokta direnç kaynağının genelde 3 mm. kalınlığa kadar olan malzemelerin kaynağında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Daha kalın ve farklı pozisyonlardaki malzemelerin kaynaklanmasında yetersiz kalabilir. Bu tip geometrik olarak nokta direnç kaynağına uygun olmayan parçaların kaynağında projeksiyon kaynağı tercih edilir. (Esendir 2008)

Kaynak Bölgesindeki Isı Oluşumu ve Soğuma Hızı

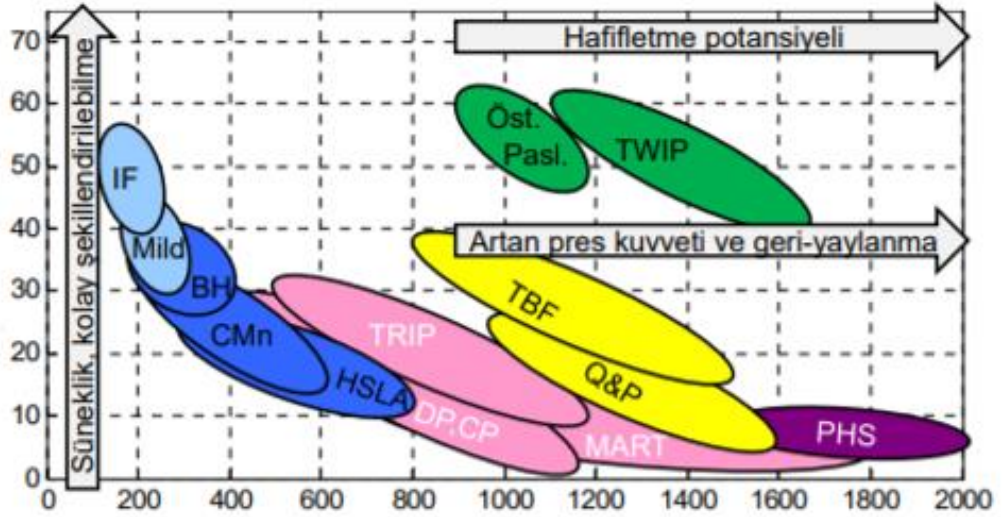
Nokta direnç kaynağında, kaynaklanacak olan malzemeler çok hızlı şekilde ısıtıldığından, soğuma hızı da çok yüksektir. Hızlı soğuma ile malzemelerin iç yapısında değişikliklere sebebiyet verebilir. Kaynak süresince akım şiddeti kontrol altında tutularak, soğuma hızı sınırlandırılabilir. Kaynak akımını birden sonlandırmak yerine kademeli olarak azaltmak gibi. Böylece çok hızlı soğuma yerine yavaş ve kontrollü bir soğuma hızı sağlanabilir. Sonuç olarak mikro yapıda meydana gelebilecek değişimler minimize edilmiş olur. (Esendir 2008)

## Isıl Dengenin Ayarlanması

Kaynağı yapılacak olan malzemelerden biri diğerine göre daha yüksek elektrik direncine sahipse, bu malzeme üzerinde ısının daha hızlı artması beklenir. Yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahip alüminyum gibi metallerde, yüksek akım değerlerinde bile meydana gelen ısı çevreye hızla yayılarak erime için gerekli şartların sağlanamamasına sebebiyet verir. Böylece kaynak işlemi zor veya imkânsız hale gelir. Örneğin yüksek dirençli paslanmaz çelik ile düşük dirençli orta karbonlu çeliğin kaynağı sırasındaki ısıl dengeyi ele alalım. Bu iki farklı malzeme arasında ısıl dengenin sağlanması için, ya paslanmaz çelik tarafındaki elektrot temas alanının artırılması ya da orta karbonlu çelik tarafında daha yüksek dirençli elektrot kullanımının sağlanması gerektiğini söyleyebiliriz. (Esendir 2008)

### 2.3. IF Çelikleri

IF (Interstitial – Free) çelikleri, derin çekilebilirlik özellikleri mükemmel olduğundan dolayı, özellikle otomotiv ve beyaz eşya sektöründe yaygın bir kullanıma sahiptir. Düşük oranda karbon ve azot (arayer katı ergiyiği oluşturan elementler) içeren IF çelikleri şekillendirilebilirliğe elverişli olmasının yanı sıra, düşük akma dayanımı ve kesit incelmeye yüksek direnç gösterirler. (Coşkun 2009) Çelik sınıflarının dayanım ve toplam uzama eğrisi Şekil 2.9' de verilmiştir.



- Yumuşak Çelikler (MS)
- Geleneksel Yüksek Dayanımlı Çelikler (HSS)
- Geliştirilmiş Yüksek Dayanımlı Çelikler (1. Nesil AHSS)
- 2. Nesil AHSS
- 3. Nesil AHSS

**Şekil 2.9.** Çelik Sınıflarının Dayanım ve Toplam Uzama Eğrisi

Şekillendirmesi zor olan ve karışık geometrideki otomobil parçalarının üretimi için, derin çekilebilir kaliteli çeliklerin akma mukavemet değerlerinin altında bir akma mukavemet değerine sahip çelik geliştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla yapılan çalışmalar neticesinde, mükemmel derin çekilebilir, iyi bir uzama ve akma mukavemeti olan soğuk haddelenmiş sac olarak IF çelikleri üretilmiştir. (Coşkun 2009)

Ticari olarak EDDQ (Enhanced Deep Draw Quality- Geliştirilmiş Derin Çekme Kalite çelik) olarak da bilinmektedir. Çamurluk davlumbazı, marşpiyel ve takviye elemanları gibi, yüksek mekanik dayanım gerektiren kompleks parçaların üretimi için uygundur. (Anonim 2018)

Düşük ve ultra-düşük karbonlu çeliklerin mukavemetini arttırmak için birden fazla metalürjik seçenek bulunmaktadır. Dayanımı artırma seçeneklerinden biri olan katı eriyik sertleşmesi %1,5 Mn, %0,5 Si, %0,1 P'ye kadar kullanılabilir. Örneğin, %0,01 fosfor ilavesi akma dayanımını yaklaşık 10MPa arttırırken, çok yüksek fosfor oranları

şekillendirme sonrası soğuk çalışma gevrekleşmesine neden olabilir. Az miktarda bor ilave edilmesinin bu etkiyi dengelediği ve katı eriyik sertleşmesine katkı yaptığı tespit edilmiştir. Bu elementler tek ya da bir kombinasyon ile yüksek mukavemetli IF çeliklerinin üretiminde kullanılabilir. (Yeşildal 2008)

### **2.3.1. IF Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti**

Çeliklerin içerdikleri alaşım elementi ve karbon miktarı, kaynak metalinin sertleşebilme kabiliyetine etki eder. Çeliğin soğuma hızı ve sertleşebilme kabiliyeti dikkate alınarak kaynak özellikleri belirlenebilir. (Hasanbaşoğlu 2005)

Ti – IF çeliğinin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde mukavemetin bir miktar azaldığı görülebilir. Ti – IF çeliklerinde, B veya Nb elementi takviyesiyle dayanım iyileştirme sağlanabilir. IF çeliklerinin nokta direnç kaynağında, ısı tesiri altında, kaynak bölgesini yormaktadır. Bu problemin önüne geçmek için, ısı tesiri altındaki bölgedeki beynit yapısına B ve Nb takviye edilir. (Hasanbaşoğlu 2005)

### **2.3.2. IF Çeliklerinin Sınıflandırılması**

Düşük ve ultra düşük karbonlu IF çeliklerinin üretimi için, sülfür, nitrür ve karbür oluşturan elementler olan Nb ve Ti gibi alaşım elementleri ilave edilir. Soğuk haddeleme ve tavlama işlemlerinden sonra IF çeliklerinin yapısında yeniden kristalleşme görülür. Bunun sebebi çökelti oluşumu ve Ti, Nb gibi alaşım elementlerinin etkisi olarak açıklanabilir. Nb ve Ti ilavesi ile yapıdaki ara yer atomları NbCN, TiC veya TiN kararlı bileşikler olarak ayrılmış olur. C ve N atomlarının çözüldüden ayrılması çeliğe mükemmel bir şekillendirilebilirlik özelliği kazandırır. (Yaşacan 2005)

IF çelikleri 3 ana grupta incelenebilir.

1. Ti-IF Çelikleri
2. Nb-Ti IF Çelikleri
3. Nb-IF Çelikleri

Ti-IF çelikleri, TiN, TiS ve TiC bazlı bileşikler meydana getirir. C, N ve S ile bağ yapacak olan Ti elementi için gerekli miktarın hesaplanması için 2.5'teki eşitlik kullanılabilir.

$$Ti > 3,42N + 1,5S + 4C \quad (2.5)$$

Nb-Ti IF çeliklerinde, TiN bileşiğinin oluşması istenir. Bu sebeple Ti ilavesi N ile bağ yapacak miktarda ilave edilir. Ayrıca NbC bileşiğinin oluşması beklenir.

Nb-IF çeliklerinde ise, NbC bileşiğinin oluşması istenir. Azot ile alüminyum bağ kurarak AlN, kükürt ile mangan bağ kurarak MnS oluşturur. (Yaşacan 2005)

## 2.4. Titanyum

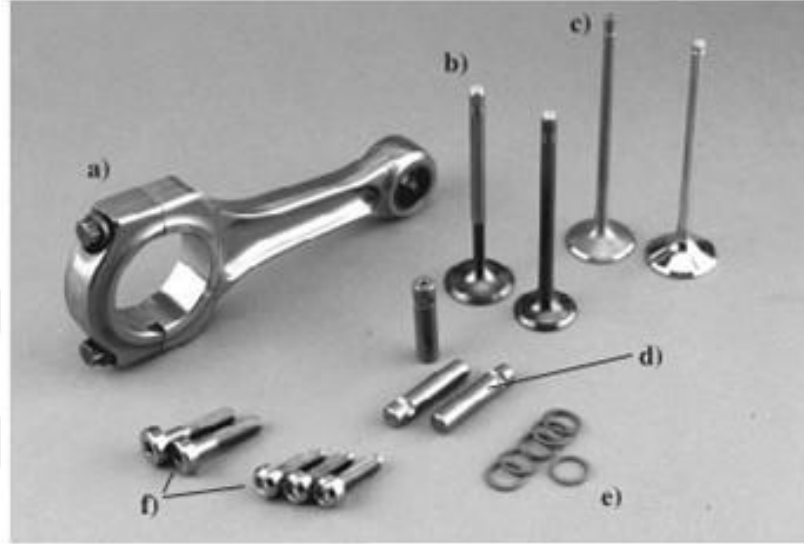
Periyodik tablonun 4. grup ve 4. periyodunda yer alan ve atom numarası 22 olan Titanyum, atom ağırlığı  $47,87 \text{ g/mol}$  olan bir geçiş elementidir. Yoğunluğu  $4,51 \text{ g/cm}^3$  olan titanyum, oldukça hafif bir metaldir. Titanyum elementine ait bazı özellikler Çizelge 2.2' de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Titanyum Elementinin Özellikleri (Kilerci 2011)

Yoğunluk	$4,51 \text{ g/cm}^3$
Ergime Noktası	1668 °C
Kaynama Noktası	1725 °C
Isı İletkenlik	$11.4 \text{ W/m.K}$
Özgül Isı	$0,5223 \text{ kJ/kg.K}$
Sertlik	70 – 74 HRB
Çekme Dayanımı	240 MPa
Poisson's Oranı	0,361

Titanyum doğada bulunma miktarına göre demir, alüminyum ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada gelmektedir. Yer kabuğunun %0,6'sını oluşturur. Titanyum ve alaşımları, yüksek korozyon direnci ve dayanım/ağırlık oranı sebebiyle, son yıllarda kullanımı giderek artan bir malzeme olmuştur. Fakat aşınmanın ve sürtünmenin önem arz ettiği uygulamalarda, düşük aşınma direnci sebebiyle kullanımı uygun değildir. Yüksek

maliyetleri ile tanınan Titanyum esaslı malzemeler, uzay ve uçak endüstrisi başta olmak üzere, otomotiv sanayi, denizcilik, tıp, biyomedikal ve kimya endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Otomotiv ve motosiklet üretiminde titanyum örnekleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir. (Kilerci 2011)



a) Biyel Kolu (Ducati), b) Emme Valfi, c) Valfler,  
d) Fren Pimi (Mercedes-Benz), f) Bijonlar  
e) Fren Sistemi Contaları (Volkswagen),

Şekil 2.10. Otomotiv ve motosiklet üretiminde titanyum örnekleri

#### 2.4.1. Saf Titanyum

Titanyumun, demir, hidrojen, azot, oksijen ve karbon ile oluşturduğu çok seyreltik alaşım ticari saf titanyum olarak isimlendirilir. Karbon, azot ve oksijen malzemeyi kuvvetlendirirken, bir yandan da sünekliği azaltır. (Kaya 2010)

Saf titanyumun 650 – 700 °C sıcaklıkları arasında tavlanarak kullanılması daha yaygın olarak görülür. Bu ısıl işlem sonrası, mikro yapı ince eş eksenli  $\alpha$  taneciklerinden oluşur. Saf titanyumun  $\beta$  alanı içerisinde 900 – 950 °C sıcaklığa ısıtılırsa, hızlı şekilde tane büyümesi görülür ve soğumayla sonrası kaba tırtıllı  $\alpha$  şekillendirilir. (Kaya 2010)



Saf titanyumun tercih edilmesinin sebebi üstün korozyon direncidir. Ticari saflıktaki titanyumun yüksek sıcaklıklarda dayanımı azalır. Fakat iyi bir korozyon direnci vardır. Bu sebeple düşük sıcaklık uygulamaları için daha uygundur. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri Çizelge 2.3’ te verilmiştir.

**Çizelge 2.3.** Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri (Kaya 2010)

ASTM Standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Alaşım Elementleri				
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40

Ticari saflıktaki titanyum, içeriğinde bulunan demir (Fe) ve oksijen (O) elementi oranına göre 4 çeşit kaliteye sahiptir. İçeriğindeki demir ve oksijen miktarı arttıkça, titanyumun akma ve çekme dayanımı da artmaktadır. (Kilerci 2011)

#### **2.4.2. Titanyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti**

Titanyum ve titanyum alaşımları, ortamdaki gazlara karşı duyarlıdır. Bu sebeple titanyum kaynağında, kullanılacak kaynak çeşidi sınırlıdır ve bir takım ek önlemlerin alınması gerekir. Bu sınırlamalar dışında, titanyum ve titanyum alaşımlarının birçoğunun kaynak kabiliyetinin iyi olduğu söylenebilir. (Kaya 2010)

Titanyum ve titanyum alaşımları, düşük sıcaklıklarda yüksek korozyon direnci göstermelerine karşın, yaklaşık 425 °C sıcaklığın üzerine çıktıklarında azot ve oksijen ile reaksiyona girme eğilimleri arttığından dolayı, atmosferdeki havayla temas etmesi durumunda kaynağının yapılması sakıncalıdır. Titanyumun kaynağını zorlaştıran bir diğer etmen ise gevrek – sünek geçiş bölgesidir. Malzemenin sünek kırılma davranışı

gösterirken, gevrek kırılma davranışı göstermeye başladığı sıcaklık olarak ifade edilir. Geçiş sıcaklığının yükselmesi, malzemenin daha düşük sıcaklıklarda gevrekleşebileceği anlamına gelir. (Kilerci 2011) Çizelge 2.4 ile bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri hakkında bilgi verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirliği (Aydın 2011)

<b>Alaşım Türü</b>	<b>Alaşım Sembolü</b>	<b>Kaynak Edilebilirlik</b>
Ticari saflıktaki Titanyum	-	Çok iyi
$\alpha$ Alaşımları	Ti-0,2Pd	Çok iyi
	Ti-5Al-2,5Sn	İyi
	Ti-5Al-2,5Sn-ELI	Çok iyi
$\alpha$ 'ya yakın Ti Alaşımları	Ti-8Al-1Mo-1V	Çok iyi
	Ti-6Al-2Cb-1Ta-0,8Mo	Çok iyi
	Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	İyi
$\alpha$ - $\beta$ Ti Alaşımları	Ti-6Al-4V	İyi
	Ti-6Al-4V-ELI	Çok iyi
	Ti-7Al-4Mo	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-6Al-4V-2Sn	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-8Mn	Kaynak yapılması önerilmez
$\beta$ Alaşımları	Ti-13V-11Cr-3Al	İyi

Titanyum ve alaşımlarının kaynağı öncesi, kaynak kabiliyetini iyileştirmek ve daha kaliteli bir kaynak elde edebilmek için, uygun bir alaşım türü seçmenin yanı sıra kaynak yöntemi belirlemek ve çevre şartlarını göz önünde bulundurmak da önemlidir.

Titanyumun ısı iletkenliği düşük olduğundan dolayı, kaynak bölgesi uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalmakta böylece kaynak dikiş uzunluğu artmakta ve ITAB daralmaktadır. Soğuma süresinin artması da tane irileşmesine sebep olmaktadır. Titanyum kaynağında soğuma hızını arttırmak için, kaynak hızı yükseltilmeli ve ısı

yoğunluğu dar bir alanda arttırılmalıdır. Bu yüzden titanyum kaynağında ısı tesiri altındaki bölgenin dar tutulabileceği bir kaynak türü tercih edilmelidir. (Kaya 2010)

Kaynak sırasında malzemenin kristalleşmesini ve kaynak sonucunda gevrek bir malzeme elde edilmesini engellemek için, kaynak işlemine başlamadan önce malzeme yüzeyindeki oksit tabakası ve pislilikler temizlenmelidir. (Kilerci 2011)

### **2.4.3. Titanyumun Diğer Malzemeler ile Kaynağı**

Titanyumun diğer metaller ile kaynağında, intermetalik fazların oluşumundan dolayı meydana gelen aşırı sertleşmeler, kaynağı zorlaştırmaktadır. Oda sıcaklığında demirin titanyumda çok az çözünebilir olması sebebiyle titanyum ve çeliğin kaynağı oldukça zordur. Bunun sebebi kaynak sırasında oluşan TiFe ve TiFe<sub>2</sub> gibi çok sert ve gevrek olan intermetalik fazdır. (Kıral 2012)

Titanyum ve çeliğin daha sağlıklı bir şekilde kaynaklanabilmesi için, her ikisinin de kaynaklanabileceği ara bir malzeme kullanılabilir. Böylece gevrekleşmeye sebep olabilecek fazların ortaya çıkması engellenir. Ara malzeme olarak Vanadyum kullanılabilir. Titanyumun çelik ve diğer malzemeler ile olan kaynağının özel bir durum gerektirdiği söylenebilir. Bu sebeple bu yöntemler, özel uygulama alanlarında kullanılmakta ve seri imalatta tercih edilmemektedir. (Kıral 2012)

## **2.5. Alüminyum**

Periyodik tablonun 3A grubunda yer alan ve atom numarası 13 olan Alüminyum, sünek bir metaldir. Hafif metaller grubuna giren alüminyumun yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  tür. Yumuşak ve hafif bir metal olan alüminyumun rengi mat gümüşümsüdür. Bu rengin sebebi, hava ile teması sırasında üzerinde oluşan ince oksit tabakasıdır. (Bebekoğlu 2019) Alüminyum elementine ait bazı özellikler Çizelge 2.5’de verilmiştir.

**Çizelge 2.5.** Alüminyum elementinin özellikleri (Kahraman 2009)

Yoğunluk	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Ergime Noktası	659,8 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	23,8 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Isı İletkenlik	0,52 cal. cm/cm <sup>2</sup> . s. °C
Özgül Isı	0,2259 cal/g. °C
Akma Dayanımı	100 – 300 N/mm <sup>2</sup>
Çekme Dayanımı	400 – 900 N/mm <sup>2</sup>
Elastiklik modülü	72000 N/mm <sup>2</sup>

Alüminyum doğada bulunma miktarına göre %8.2 oranıyla üçüncü, en çok kullanılan metaller arasında ise demirin ardından ikinci sırada gelmektedir. Hafiflik, mukavemet, korozyon dayanımı, elektrik ve ısı iletkenlik gibi üstün özelliklerinden dolayı alüminyum ve alaşımlarının endüstride kullanım alanı her geçen gün artmaktadır. Üretilen alüminyum ve alaşımlarının yaklaşık olarak %25'i taşıtlarda kullanılmaktadır. Hafif olması ve dolayısıyla yakıt tüketimini azaltarak daha az enerji sarfiyatını sağlamasından dolayı tercih sebebidir. Uzay, savunma, uçak, nakliye araçları, mimari uygulamalar, inşaat sektörü, elektrik, ambalaj, elektronik, makine, kimya, gıda endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. (Bebekoğlu 2019)

### **2.5.1. Alüminyumun Sınıflandırılması**

Üretim metotlarına göre alüminyum alaşımları dövme ve döküm alüminyum alaşımları olarak ikiye ayrılır. İki ana grup da kendi içerisinde ısı iletkenlik yapılabılır ve yapılamaz olarak iki alt gruba ayrılabilir. Isıl işlem yapılabılır alaşımlar yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilir. Isıl işlem yapılamayanlara ise, eriyik sertleşmesi, pekleşme ve dağılım (dispersiyon) sertleşmesi ile mukavemet kazandırılabilir. (Yalçın 2010)

Dövme alaşımları, plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilir. Mikro yapı ve bileşim olarak döküm alaşımlarından oldukça farklıdır. Dövme alaşımları, Mn, Mg, Cu, Ni ve Si gibi elementler içerir. Genellikle sürekli döküm yöntemiyle blok şeklinde elde

edildikten sonra, homojenleştirme tavı uygulanır, haddeleme ve ekstrüzyon ile şekillendirilir. (Kahraman 2009)

1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları, sadece şekil değişimiyle sertleştirilebilen ve ısı işlem uygulanamayan alaşımlardır. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımlarına ise, ısı işlem uygulanabilir. 4xxx serisi içerisinde ısı işleme tutulabilen ve tutulamayan alaşımlar bulunur. Alüminyum döküm alaşımları, mukavemeti arttıran elementlerin yanı sıra, akışkanlık sağlayarak döküm esnasında çekme boşluklarını beslemeyecek olan Silisyum benzeri elementleri de içermelidir (Kahraman 2009). Dövme ve döküm alüminyum alaşımlarının simgelenmesi Çizelge 2.6' te verilmiştir.

**Çizelge 2.6.** Dövme ve döküm alüminyum alaşımların sınıflandırılması (Yalçın 2010)

Dövme Alüminyum Alaşımları	
1XXX	Ticari saflıkta Al (>%99 Al) (Yaşlandırılmaz)
2XXX	Al-Cu (Yaşlandırılabilir)
3XXX	Al-Mn (Yaşlandırılmaz)
4XXX	Al -Si ve Al-Mg-S (Mg varsa yaşlandırılabilir)
5XXX	Al-Mg (Yaşlandırılmaz)
6XXX	Al-Mg-Si (Yaşlandırılabilir)
7XXX	Al-Mg-Zn (Yaşlandırılabilir)
Döküm Alüminyum Alaşımları	
1XX.X	Ticari saflıkta Al (Yaşlandırılmaz)
2XX.X	Al-Cu (Yaşlandırılabilir)
3XX.X	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si (Biraz yaşlandırılabilir)
4XX.X	Al-Si (Yaşlandırılmaz)
5XX.X	Al-Mg (Yaşlandırılmaz)
7XX.X	Al-Mg-Zn (Yaşlandırılabilir)
8XX.X	Al-Sn (Yaşlandırılabilir)

5XXX Serisi Alaşımlar

Alüminyum ve magnezyum alaşımlarıdır. Isıl işleme tabi tutulamayan alaşımlar içinde en yüksek dayanıma sahiptir. Yüksek dayanım ve sertlik özellikleri içeriğindeki magnezyum ve mangan elementlerinden kaynaklıdır.

Kaynak kabiliyeti ve korozyon dayanımı iyi olan bir seridir. Fakat yüksek orandan magnezyum içeren alüminyum alaşımlarında, gerilme ve korozyon çatlaklarını azaltmak amacıyla 150 °F üzerinde bir sıcaklıkta çalışılmamalıdır. (Kahraman 2009) 5xxx serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi Çizelge 2.7’ da verilmiştir.

**Çizelge 2.7.** 5xxx serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi (Akın 2017)

EN AW	DIN	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer (Mn+Cr)
5019	AlMg5	0,4	0,5	0,1	0,1 0,6	4,5 5,6	0,2	0,2	0,2	0,1-0,6
5052	AlMg2,5	0,3	0,4	0,1	0,1 0,6	2,2 2,8	0,15 0,35	0,1		
5754	AlMg3	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6 3,6	0,3	0,2	0,2	0,1-0,6
5082	AlMg4,5	0,2	0,4	0,2	0,15	4,0 5,0	0,15 0,35	0,3	0,1	
5083	AlMg4,5 Mn	0,4	0,4	0,1	0,4 1	4,0 4,9	0,05 0,25	0,3	0,2	

### 2.5.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti

Alüminyum oksijene karşı fazla ilgilidir. Bu sebeple yüzeyinde 0,01 mikron kalınlığında  $Al_2O_3$  oluşur. Bu tabaka, malzemenin yüzeyine kimyasal bileşiklere karşı bir dayanıklılık kazandırır. Saf alüminyumun ergimesi 658 °C sıcaklıkta meydana gelmesine karşın,

yüzeyindeki oksit tabakası 2050 °C gibi yüksek bir sıcaklıkta ergir. Bu durum kaynak işlemini zorlaştırır. (Türkiş 2010)

Alüminyum ve alaşımlarının ısı iletim katsayısı yüksek olduğundan dolayı, kaynak bölgesinin ısı yoğunluğunu sağlayabilmek için daha fazla ısı girdisine ihtiyaç olur. Diğer taraftan, alüminyumun ısı tesiri altında kalan bölgesi çeliğe göre daha geniştir.

Yüksek ısıl genleşme, kaynak esnasında oluşan distorsiyonlar (çarpılma ve kendini çekme) büyük olur. Eğer bu durum göz önünde bulundurulmazsa, gerilme çatlakları meydana gelir. Alüminyum ve alaşımlarının dayanımlarını arttırmak için, alaşımlandırma, soğuk şekil verme veya ısıl işlem tercih edilir. (Türkiş 2010)

### **2.5.3. Alüminyumun Nokta Direnç Kaynağı**

Alüminyum alaşımlarından bazılarına, diğerlerine göre daha kolay direnç kaynağı uygulanabilir. Örneğin kum döküm ve sürekli döküm alaşımlarına kolay bir şekilde nokta kaynağı uygulanabilirken, kalıp dökümleri bu metotla kaynatmak zordur. Yüksel termal ve elektrik iletkenliğine sahip olan alüminyum ve alaşımlarının, nokta kaynağı yapılabilmesi için yüksek kaynak akımı ve nispeten kısa bir kaynak süresi gereklidir. Alüminyumun nokta kaynağında takip edilen prosedürler ve gerekli olan ekipmanlar çelikler ile aynıdır. Fakat alüminyum alaşımlarının yüksek termal ve elektrik iletkenliği sebebiyle kullanılan donanım ve takip edilecek kaynak planında bazı değişiklikler yapılması gerekebilir. (Şafak 2011)

Alüminyum ve alaşımları doğru akım veya alternatif akım kullanılarak kaynak edilebilir. Yüksek kaynak akımına ihtiyaç duyulmasının sebebi alüminyumun yüksek elektrik iletkenliğidir. İyi bir kaynak kalitesi için sürekli veya kesintili doğru akım üreten makineler tercih edilmelidir. (Şafak 2011)

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Malzeme ve Metot

Bu çalışmada IF 180 çelik alaşımı, ticari saf titanyum (Ti-Gr2) ve 5754 alüminyum alaşımı saclar 1 mm kalınlığında elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi kullanılarak bindirme şeklinde kaynak edilmiştir. Bu malzemelere ait kimyasal kompozisyonlar ve mekanik özellikler, sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Malzemelerin kimyasal kompozisyonları (% ağırlıkça)

Malzeme	C	Mn	Si	Al	Cr	Ti	Mg	Fe	Cu	O	Diğer
IF 180	0,002	0,05	0,011	0,046	0,019	0,07		98,9			0,90
AA5754		0,35	0,21	95,4	0,03	0,15	2,8	0,4	0,05		0,61
Ti-Gr2	0,1					99,2		0,3		0,25	0,15

**Çizelge 3.2.** Malzemelerin temel mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Vickers Sertlik (HV0,5)
IF 180	228	290	35	118
AA5754	195	225	12	90
Ti-Gr2	278	344	20	155

Kaynak işlemi, elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi ayarlanabilir, 180 kVA gücündeki su soğutmalı, sabit direnç nokta kaynağı makinesi (Şekil 3.1) ile zirkonyum alaşımlı elektrot kullanılarak yapılmıştır.





**Şekil 3.1.** Coşkunöz marka nokta direnç kaynak makinesi

Birleştirilecek numunelerin yüzeyleri kaynak öncesi, kaynağı olumsuz etkileyebilecek kir, pas, yağ vb. maddelerden arındırılmış ve ayrıca kaynak yapılacak nokta aseton ile temizlenmiştir. Optimum kaynak parametre aralığını tespit etmek amacıyla ön çalışmalar yapılmıştır. Numuneler Çizelge 3.3'te verilen kaynak parametrelerine göre direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ve her bir malzeme çifti için 7 farklı numune elde edilmiştir.

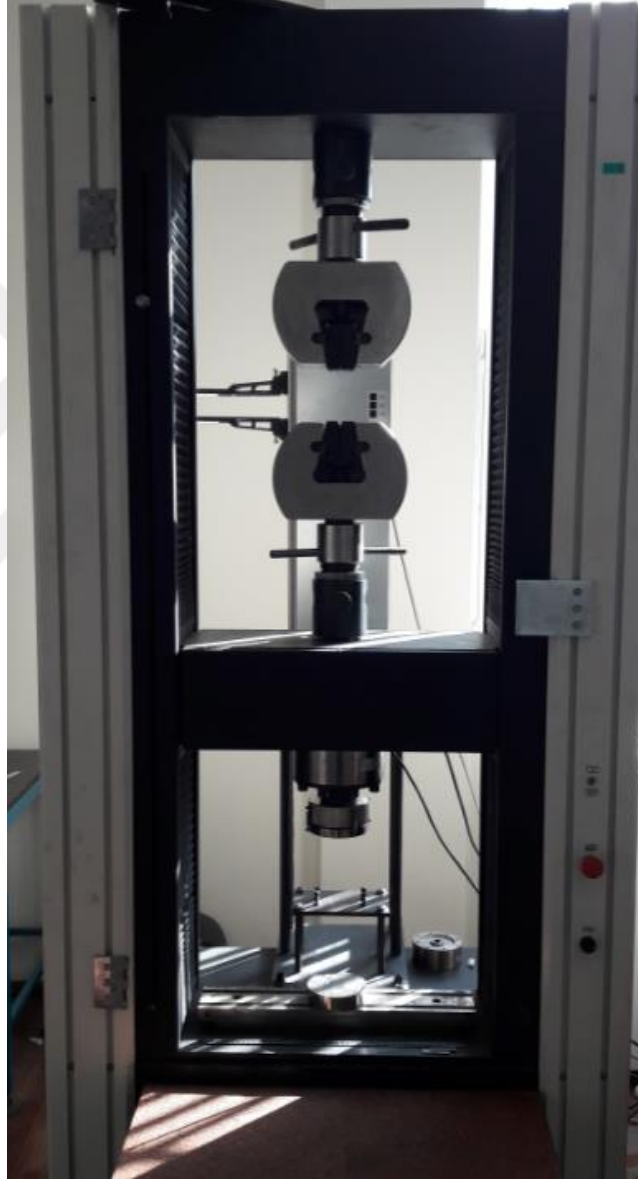
**Çizelge 3.3.** Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri

Numune	1	2	3	4	5	6	7
Akım (kA)	10	12,5	15	10	10	10	10
Süre (çevrim)*	10	10	10	15	20	10	10
Kuvvet (kN)	5	5	5	5	5	10	15

\* 1 çevrim = 0,02 sn

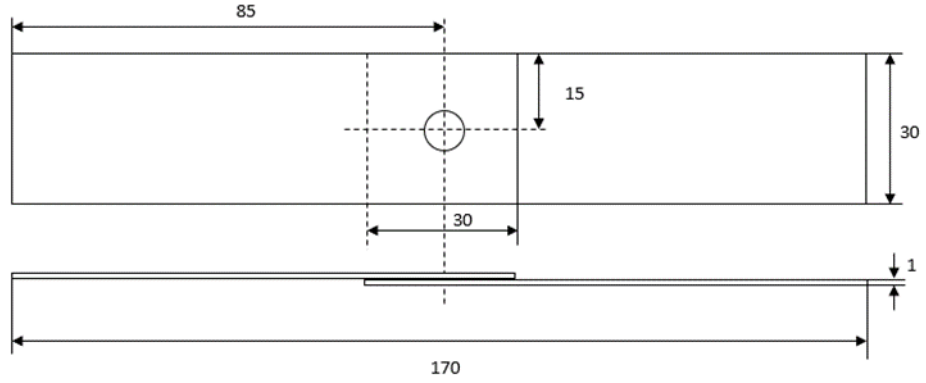
### 3.2 Mekanik testler

Kaynak sonrasında numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme-makaslama ve mikrosertlik testleri yapılmıştır. Çekme-makaslama testleri 250 kN yük kapasiteli UTEST universal çekme cihazında (Şekil 3.2), 10 mm/dk çekme hızında oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 3.2. UTEST marka çekme basma test cihazı

Teste tabi tutulan numunelerin teknik resmi Şekil 3.3’de verilmiştir.



**Şekil 3.3.** Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynaklanan çekme numunelerinin boyutları

Numuneler hassas kesme cihazı ile kaynak kesitinden kesilerek Şekil 3.4’ teki gibi bakalite alınmıştır.

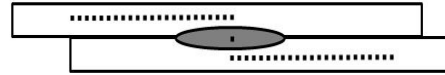


**Şekil 3.4.** Bakalite alınmış numune fotoğrafı

Sertlik ölçümleri Metkon marka Vickers sertlik ölçme cihazında (Şekil 3.5), 500 g' lık yük altında Şekil 3.6'de verilen noktalardan kaynak kesiti boyunca 1 mm aralıkla yapılmıştır. Çekme ve sertlik testleri aynı şartlardaki dört adet numunenin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.5. Metkon marka Vickers mikro sertlik test cihazı



Şekil 3.6. Vickers sertlik ölçüm noktaları

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Sertlik Testleri ve Çekirdek Çapları

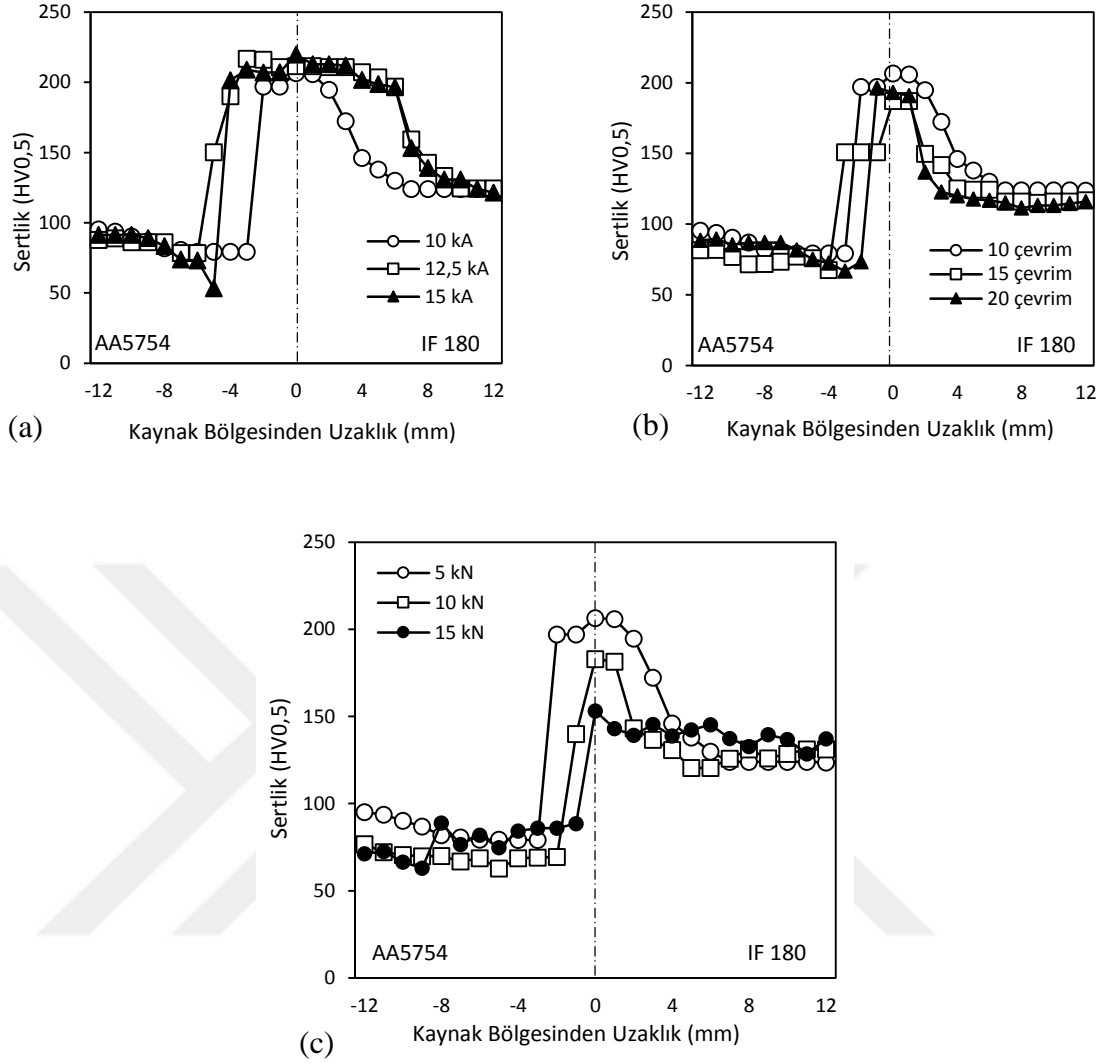
Bu çalışmada, farklı kaynak akımları, çevrim ve elektrot kuvvetlerinde kaynağı gerçekleştirilen IF 180 çelik alaşımı ve 5754 Al alaşımı malzeme çifti için noktasal birleştirmelerinin sertlik dağılımı Şekil 4.1’de verilmiştir. IF 180 çelik alaşımı ve Ti-Gr2 malzeme çifti için de Şekil 4.2’de verilmiştir.

Şekil 4.1 (a)’da IF 180 ve AA5754 malzeme çiftinin 10 kaynak çevrimi ve 5 kN elektrot kuvvetinde kaynak bölgesindeki sertlik değişimi kaynak akımı değişimine bağlı olarak verilmiştir. Alüminyum alaşımının ana metal bölgesindeki sertlik değerleri tüm numunelerde yaklaşık 90 HV civarında iken IF 180 tarafındaki ana metal bölgesindeki sertlik değerleri 120 HV civarında elde edilmiştir. Kaynak merkezinde (çekirdek bölgesi) sertlik değerleri 12,5 kA ve 15 kA akımları için yaklaşık 215 HV iken akımın 10 kA’ e düşmesiyle birlikte sertlik yaklaşık 195 HV değerine düşmüştür. Kaynak bölgesinin ortalama sertlik değeri 5754 Al alaşımı ana metal bölgesine göre 2,3 kat ve IF 180 alaşımıninkine göre 1,7 kat daha yüksektir. Literatürde, IF çeliklerinin kaynak bölgesindeki yüksek sertlik davranışı intermetalik faz çökeltilerinin yanısıra plastik deformasyon ve hızlı soğuma sebebiyle dislokasyon yoğunluğunun artması olarak ifade edilmiştir (Rao 2007, Chakraborty 2011). Ergiyen bölgenin bitiminden başlayarak içeriye doğru uzanan ve ısı etkisiyle mikro ve makro yapısında önemli değişikliklerin meydana geldiği bölge olarak adlandırılan ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) IF 180 tarafında belirgin bir sertlik düşüşü sergilemezken 5754 tarafında özellikle 15 kA akım değerinde 53 HV değerine düşmüştür. ITAB bölgesindeki düşüş, literatürde yapılan benzer çalışmalarda da 5000 serisi alüminyum alaşımlarında görülen bir davranıştır (Chen 2016, Manladan 2016). IF180 çeliklerinde ise ITAB bölgesinde malzemede tane irileşmesine bağlı olarak daha yavaş bir düşüş meydana gelmiştir (Rao 2007). Çekirdek bölgesinin sertlik profili genişliği açısından numuneler değerlendirildiğinde kaynak akımı artışıyla birlikte genel olarak yüksek sertliğe sahip bölgenin genişliği de artmıştır.

Elektrik direnç nokta kaynağı ile 10 kA kaynak akımında ve 5 kN elektrod kuvvetinde kaynak edilen IF 180 çeliği ve 5754 Al alaşımının kaynak çevrim sayısına bağlı olarak

sertlik değişim profili Şekil 4.1 (b)'de verilmiştir. Çekirdek bölgesinde elde edilen maksimum sertlik değeri 10 çevrim'de 216 HV ve minimum sertlik değeri 15 çevrim'de 193 HV'dir. Çevrim sayısının en yüksek olduğu 20 çevrim'de ise sertlik 197 HV olarak ölçülmüştür. Çekirdek bölgesinin sertlik profili genişliği açısından numuneler değerlendirildiğinde kaynak akımı değişiminin kıyaslandığı Şekil 4.1 (a)'ya göre daha dar bir bölgeyi kapsamaktadır. Çevrim sayısı ile sertlik arasında doğrudan bir bağlantı bulunamamıştır. Benzer sonuçlar literatürde de elde edilmiştir (Hayat 2009). Al alaşımı ve IF 180 tarafındaki ITAB bölgesindeki sertlik değişimi 20 çevrim'de 10 ve 15 çevrime kıyasla daha düşük değerlerde ve daha geniş bir alanda yer almıştır.

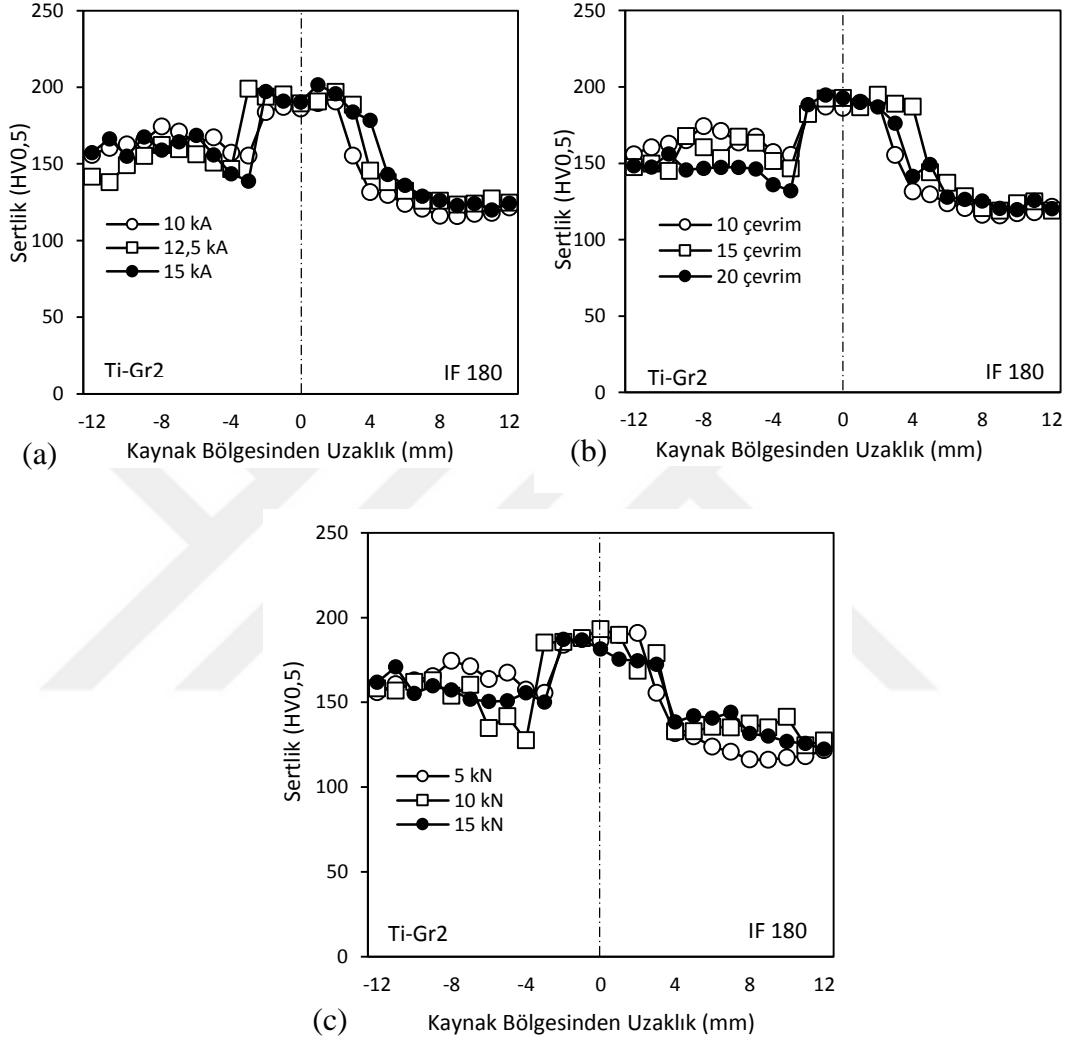
Şekil 4.1 (c)'de IF 180 çeliği ve 5754 Al alaşımının 10 kA kaynak akımında ve 10 kaynak çevriminde, elektrod kuvveti değişimine bağlı olarak kaynak bölgesindeki sertlik değişimi grafiği verilmiştir. Elektrod kuvvetinin sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu çekirdek bölgesinde kuvvet artışıyla sertlik değerinin %25 (5 kN ve 15 kN karşılaştırıldığında) düştüğü görülmüştür. Kuvvet artışıyla birlikte çekirdek bölgesinin genişliği de azalmıştır. Literatürde de farklı çelik alaşımları ile yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir (Zhou 2014).



**Şekil 4.1.** 5754 Al alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak süresi ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik profili

IF 180 çeliğinin Ti-Gr2 ile farklı kaynak akımlarında, 10 kaynak çevrimi ve 5 kN elektrot kuvvetinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik değişimi Şekil 4.2 (a)'da verilmiştir. Çekirdek bölgesinde akıma bağlı olarak sertlikte önemli bir farklılık görülmemekle birlikte, maksimum sertlik değerleri 12,5 ve 15 kA için yaklaşık 201 HV civarında, 10 kA akım değeri için ise sertlik yaklaşık 193 HV olarak elde edilmiştir. Çekirdek bölgesinin sertlik profili genişliği 10 kA'de daha düşük olmak üzere daha yüksek akım değerlerinde genişlik de artmıştır. ITAB bölgesinde, Ti-Gr2

tarafında ana metale yakın bölgede 15 kA'de daha belirgin olmak üzere sertlikte düşüş meydana gelmiştir. Genel olarak kaynak parametrelerinin (akım, çevrim ve elektrot kuvveti) IF 180 ve Ti-Gr2 sertliklerini önemli oranda etkilemediği tespit edilmiştir (Şekil 4.2).

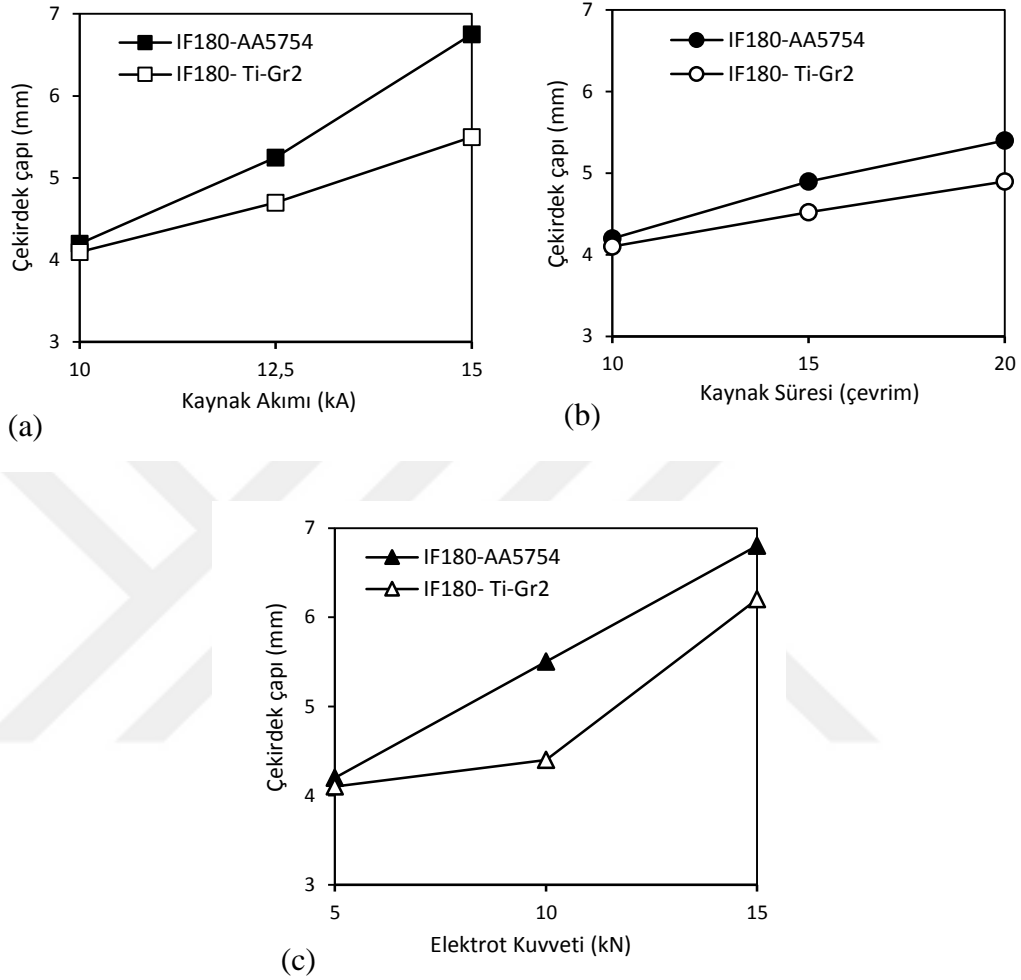


**Şekil 4.2.** Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak süresi ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik profili.

Şekil 4.3'te verilen kaynak çekirdek çaplarının kaynak parametrelerine bağlı değişimi grafiklerinde de Ti-Gr2 alaşımının sertlik değerinin yüksek olması nedeniyle çekirdek çapı değerleri tüm kaynak parametrelerinde IF 180-5754 Al alaşımı kaynak bağlantılarına göre daha düşük elde edilmiştir. Her iki malzeme çiftinde de kaynak akımı, kaynak süresi



ve elektrot kuvveti artışıyla birlikte çekirdek çapı da artmıştır. Kaynak akımı ve elektrot kuvvetinin çekirdek çapı değişimi üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.3.** 5754 Al alaşımının ve Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak sürelerinde ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekirdek çapları.

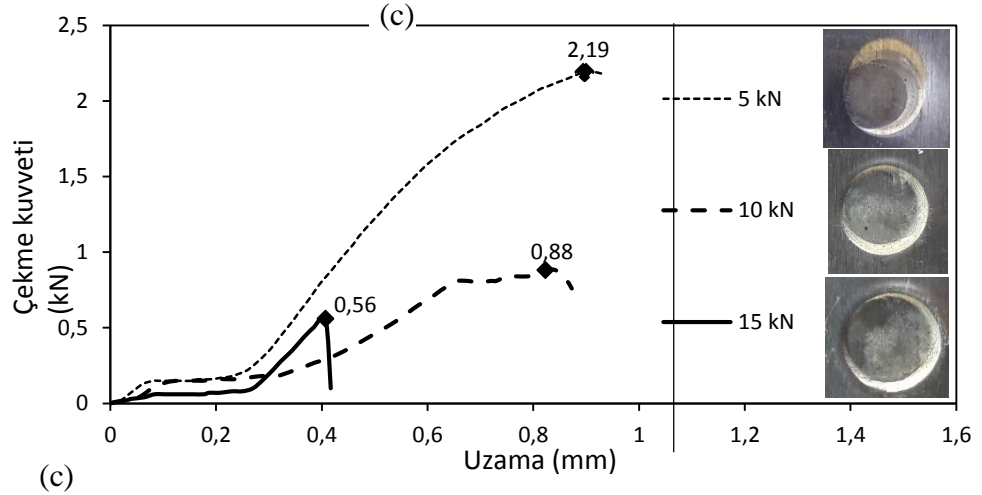
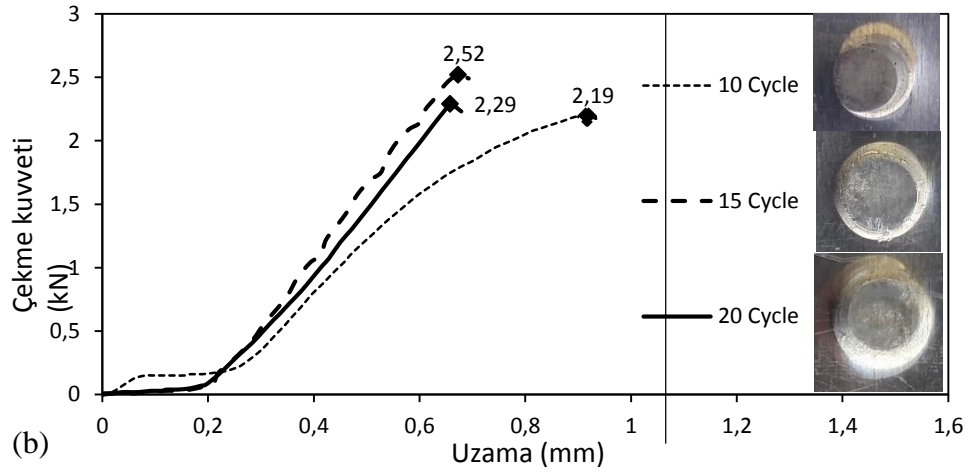
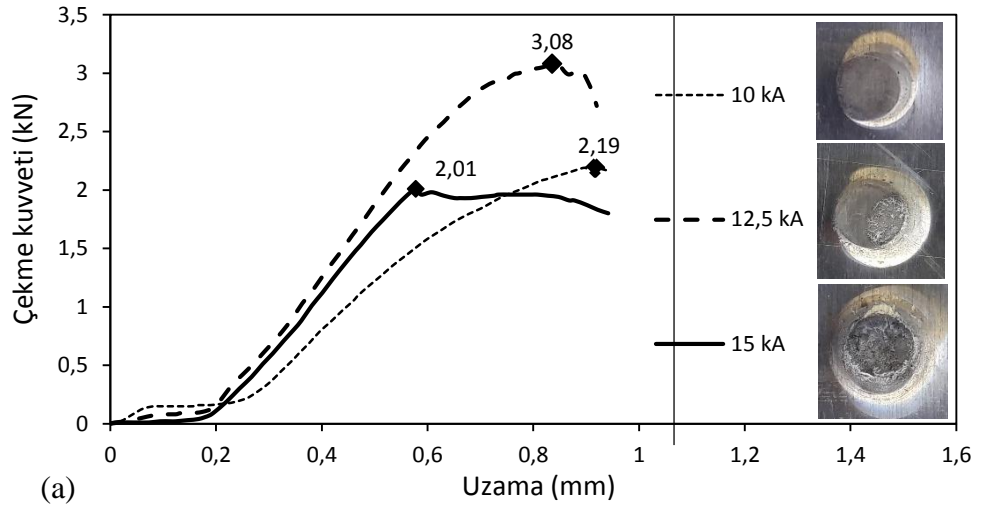
## 4.2. Çekme - Makaslama Testleri

Farklı kaynak akımları, süreleri ve elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı gerçekleştirilen IF 180 çelik alaşımı ile 5754 Al alaşımı için çekme-makaslama testi sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. IF 180 çelik alaşımı ile Ti-Gr2 alaşımı için de Şekil 4.5'te verilmiştir.

Şekil 4.4 (a)'da IF 180 ile 5754 Al alaşımının 5 kN elektrot kuvveti, 10 kaynak çevrim sayısında ve farklı kaynak akımlarında çekme-makaslama testi sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre en yüksek çekme kuvveti 3,08 kN değerinde 12,5 kA kaynak akımında ve en düşük olanı da 2,01 kN değerinde 15 kA'de ölçülmüştür. Çekme mukavemetinin kaynak akımı artışıyla ilk etapta artması ve 15 kA'de tekrar düşmesi kaynak ara yüzeyinde oluşan intermetalik fazın etkisiyle olduğu düşünülmektedir (Cui 2015).

Sabit kaynak akımı (10 kA) ve elektrot kuvvetinde (5 kN), kaynak süresine bağlı olarak elektrot kuvveti değişimi grafiği Şekil 4.4 (b)'de verilmiştir. En yüksek çekme kuvveti 15 çevrim sayısında elde edilmiştir. Kaynak süresinin daha da artmasıyla birlikte kuvvette azalma meydana gelmiştir. Maksimum kuvvette meydana gelen uzamalar açısından 10 kaynak çevriminde en yüksek uzama meydana gelmiştir. Çevrim sayısı arttıkça uzama miktarı da azalmıştır.

Farklı elektrot kuvvetlerinde sabit kaynak akımı ve çevriminde yapılan kaynak bağlantılarının çekme-makaslama testi sonuçları Şekil 4.4 (c)'de verilmiştir. Elektrot kuvveti artışıyla birlikte çekme kuvvetinde ve maksimum çekmedeki uzama miktarında önemli oranda azalma meydana gelmiştir. Elektrot kuvvetinin 5 kN'dan 15 kN'a çıkması durumunda çekme kuvvetinde %74 düşüş, maksimum çekmedeki uzama miktarında %54 düşüş ölçülmüştür. Şekil 4.1 (c)'de verilen sertlik sonuçlarıyla ilişkilendirildiğinde elektrot kuvveti artışıyla birlikte sertlik değeri de çekme kuvvetiyle paralel olarak azalmıştır. Elektrot kuvvetinin belirli bir değeri aşmasıyla sacların kaynak bölgesinde (özellikle Al alaşımı tarafında) daha fazla deformasyon ve bölgesel incelmeye birlikte çentik etkisi oluşur (Safari 2017, Zhang 2014). Bu durum çekme kuvvetinin düşmesine sebep olur.

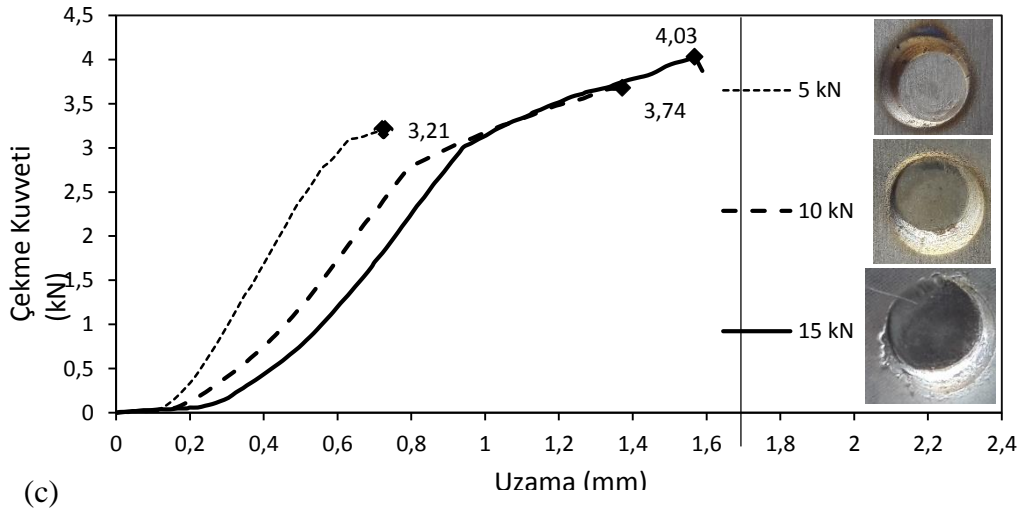
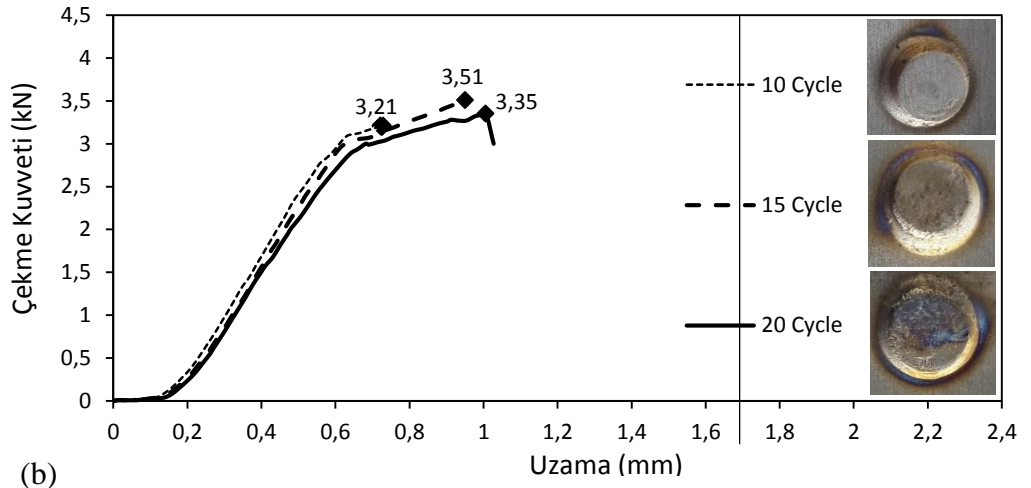
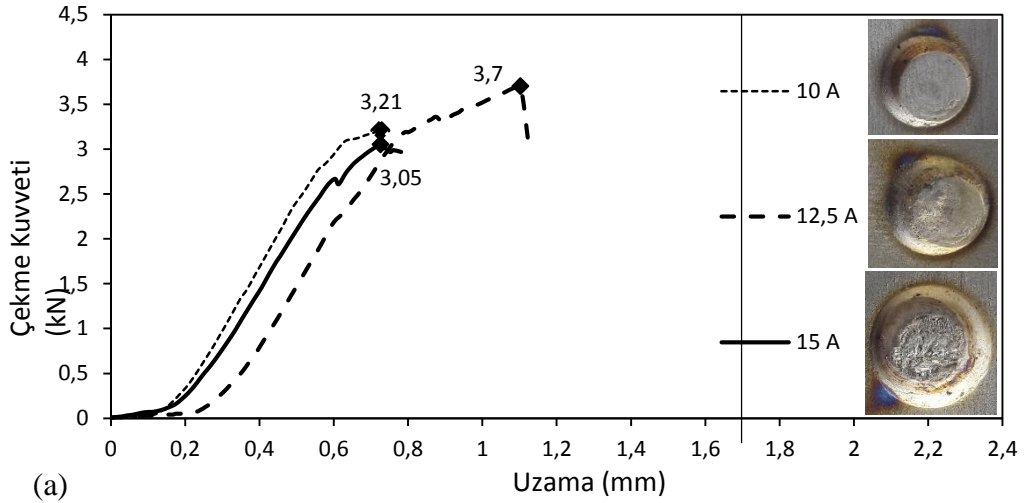


**Şekil 4.4.** 5754 Al alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak çevrimi ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekme-makaslama testi sonuçları.

IF 180 çelik alaşımının Ti-Gr2 alaşımı ile 5 kN elektrot kuvveti ve 10 kaynak çevrimi süresince farklı kaynak akımlarında yapılan elektrik direnç nokta kaynağı işlemi sonucunda numunelerin çekme makaslama testi sonuçları Şekil 4.5 (a)'da verilmiştir. Kaynak akımının 12,5 kA olduğu durumda çekme kuvveti (3,7 kN) en yüksek değerini almıştır. Akım değerinin 15 kA'ye yükselmesi çekme kuvvetini %17,5 oranında düşürmüştür. Kaynak akımı artışıyla birlikte kaynak bölgesindeki ısı miktarı ve dolayısıyla nüfuziyet artar. Ancak çok yüksek kaynak akımlarında kaynak ara yüzeyinde Ti alaşımı ve çelik alaşımı arasında TiFe intermetalik faz oluşumu da hız kazanır (Satoh 2013). Şekil 4.3. (a)'da sertlik değerlerindeki artış da bunu desteklemektedir.

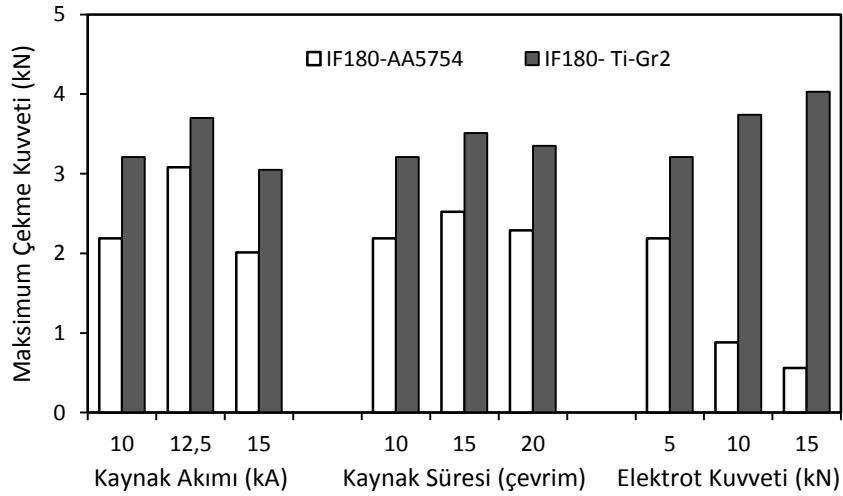
Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen IF 180 çelik alaşımı ve Ti-Gr2 alaşımında kaynak çevrim sayısının çekme-makaslama testi sonuçlarına etkisi Şekil 4.5. (b)'de verilmiştir. Kaynak akımı 10 kA ve elektrot kuvveti 5 kN'da sabit tutulmuştur. Çevrim sayısındaki artış ile birlikte çekme kuvvetinde elde edilen değişim kaynak akımı değişimi ile benzer gidişat sergilemiştir (Şekil 4.5. (a)). Her üç kaynak çevrim sayısı için elde edilen çekme kuvveti değerleri arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. En yüksek çekme kuvveti 15 çevrimde ve en düşük çekme kuvveti 10 çevrimde %8'lik bir farkla elde edilmiştir.

Elektrot kuvvetinin çekme kuvveti üzerindeki etkisi sabit kaynak akımı ve çevriminde Şekil 4.5. (c)'de verilmiştir. IF 180 çeliğinin Al alaşımı ile kaynağında sergilemiş olduğu davranışın tam tersi, IF 180 çeliği Ti alaşımı ile kaynağında elektrot kuvvetinin artmasıyla birlikte çekme kuvveti de artmıştır. Ti alaşımının Al alaşımına kıyasla daha yüksek sertliğe sahip olması (%75 daha yüksek) ve elektrotun yüksek basma kuvvetlerine karşı daha fazla direnç sergilemesiyle birlikte kaynak bölgesinde daha az kesit incelmeleri ve çentik oluşumunun minimum düzeyde kalması bu davranışı açıklamaktadır. Yeterli kaynak akımı ve sürelerinde, elektrot kuvveti artışıyla çekme kuvvetinin artışı kaynak bölgesinde daha geniş bölgede bir nüfuziyet sağlamıştır.

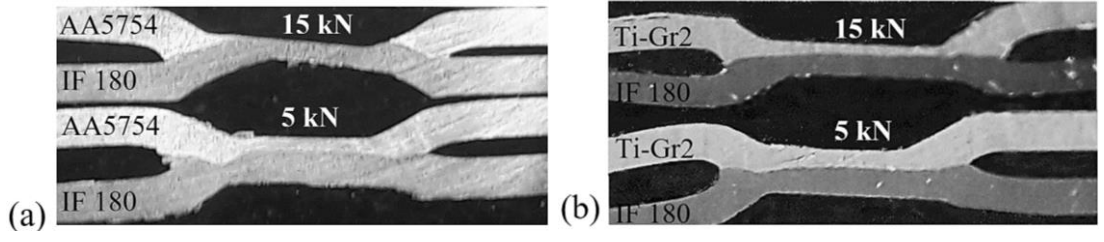


**Şekil 4.5.** Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak çevrimi ve (c) elektrot kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekme-makaslama testi sonuçları.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de verilen çekme-makaslama test sonuçlarına göre maksimum çekme kuvveti IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftleri için Şekil 4.6’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 kaynak çiftlerinin her ikisinde de benzer değişim görülürken, elektrot kuvvetinin tam tersi etkisi olmuştur. IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftinde elektrot kuvvetinin artması maksimum çekme kuvvetini de artırırken, IF 180 – 5754 Al alaşımı çiftinde düşüş meydana gelmiştir. Al alaşımının sertlik değerinin düşük olması ve uygulanan elektrot kuvveti artışı ile birlikte bölgesel çentik etkisi ve kaynak noktasında incelme meydana gelmesi bu davranışın sebebi olarak açıklanabilir. Şekil 4.7’de IF 180 çelik alaşımının AA5754 ve Ti-Gr2 sacları ile 5 kN ve 15 kN elektrot kuvvetlerindeki noktasal kaynağı sonucunda meydana gelen kaynak bölgesi kesit incelmesi fotoğrafından da bu durum net olarak görülebilmektedir. 15 kN’da alüminyum alaşımı sacın çekirdek bölgesinde sıcaklığın ve basmanın etkisiyle mikron boyutlara kadar incelendiğini, titanyum alaşımı sacıta ise bundan çok fazla etkilenmediğini görmek mümkündür.



**Şekil 4.6.** IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı kaynak çiftlerinde kaynak parametrelerinin maksimum çekme mukavemeti üzerindeki etkisi.



**Şekil 4.7.** 5 kN ve 15 kN elektrot kuvvetinde kaynak (a) IF 180 – 5754 Al alaşımı çiftinde ve (b) IF 180 – Ti-Gr2 kaynak çiftinde çekirdek bölgesinde meydana gelen incelme.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, elektrik direnç nokta kaynağı ile derin çekilebilir IF 180 çelik alaşımı sacların 5754 Al alaşımı ve Ti-Gr2 alaşımı saclar ile farklı kaynak parametrelerinde kaynak edilmesi ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ele alınmıştır. Yapılan testler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot kuvveti artışına bağlı olarak kaynak çekirdek çapı IF180-5754 Al alaşımı çiftinde daha belirgin olmak üzere IF180 - Ti-Gr2 çiftinde de artış meydana gelmiştir. Kaynak akımı ve elektrot kuvvetinin çekirdek çapı üzerinde kaynak süresine göre daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Sertlik testleri sonucunda, her iki IF180-5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftinde de en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinde ölçülmüştür. IF180-5754 Al alaşımı çiftinde kaynak parametrelerine bağlı olarak çekirdek bölgesindeki sertlik profili büyük oranda değişim sergilemiştir.
- Çekme-makaslama testleri sonuçlarına göre IF180-5754 Al alaşımı çiftinde kaynak parametrelerine bağlı olarak maksimum çekme kuvveti ve uzama miktarları kaynak parametreleri değişiminden IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftine göre daha fazla etkilenmiştir.
- IF180- Ti-Gr2 alaşımı çiftinde elektrot kuvvetinin artması maksimum çekme kuvvetini de arttırırken, IF 180 – 5754 Al alaşımı çiftinde düşüş meydana gelmiştir. Kaynak kesiti incelendiğinde alüminyum alaşımı tarafında sıcaklık ve basıncın etkisiyle önemli miktarda incelme meydana geldiği görülmüştür. Bu durum çentik etkisi ve kaynak bağlantı mukavemetinde azalmaya sebep olmuştur.



## KAYNAKLAR

- Akın, M. 2017.** Otomotiv imalat sektöründe kullanılan çelik ile alüminyum alaşımı levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) tekniği ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Aktaş, S. 2008.** Otomotiv sektöründe kullanılan dual faz sacların direnç nokta kaynağında mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Anonim, 2018.** High strength IF steels. <https://automotive.arcelormittal.com/europe/products/HYTSS/IF/EN> - (03.05.2018).
- Antika, Y.E. 2017.** Otomotiv endüstrisinde kullanılan yüksek dayanımlı çeliklerin direnç nokta kaynağı (RSW) ile birleştirilip mekanik özelliklerinin ve kabul kriterlerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Aras, S. 2016.** Nokta direnç kaynağı uygulanan farklı çeliklerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Aydın, K. 2011.** Titanyum ve bakır malzemelerin difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Ayyıldız, C. 2008.** Demir ( Fe ) esaslı toz metal ( TM ) parçaların farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde kaynak bölgesinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bebekoğlu, S. 2019.** Havacılık sanayinde kullanılan 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarının, TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi, makro ve mikro yapı ile mukavemet özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Arel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Campos, C.A., Guerrero, M., Colás, R., Garza, R. 2002.** Weldability of Galvannealed Interstitial Free Steel. *ISIJ International*, 42: 876-881.

- Chakraborty, G., Pal, T.K., Shome M. 2011.** Microstructure development in resistance spot welded galvanized IF steel sheet. *Materials Science and Technology*, 27: 382-386.
- Che, Y., Wang, L., Sun, D., Li, H., Geng, W. 2018.** Microstructures and Mechanical Properties of Resistance Spot-Welded Steel/Aluminum Alloy Joints with Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27: 5532–5544.
- Chen, J., Yuan, X., Hu, Z., Sun, C., Zhang, Y., Zhang Y. 2016.** Microstructure and mechanical properties of resistance-spot-welded joints for A5052 aluminum alloy and DP 600 steel. *Materials Characterization*, 120: 45-52.
- Coşkun, M.H. 2009.** Otomotiv endüstrisinde kullanılan IF 7114 ve DP 600 çelik sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Kocaeli.
- Cui, L., Qiub, R., Hou, L.L., Shen, Z., Li Q. 2015.** Resistance spot welding between steel and aluminum alloy. 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, 19-20 September 2015, Shenzhen, China.
- Erik, M. 2010.** Farklı kalınlıklarda galvaniz kaplanmış çelik sacların nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Esendir, E. 2008.** Farklı metallerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Han, L., Thornton, M., Li D., Shergold, M. 2011.** Effect of governing metal thickness and stack orientation on weld quality and mechanical behaviour of resistance spot welding of AA5754 aluminium. *Materials and Design*, 32: 2107–2114.
- Hasanbaşıoğlu, A. 2005.** Direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen IF çelikleri ile ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Hayat, F., Demir, B., Acarer, M., Aslanlar S. 2009.** Effect of weld time and weld current on the mechanical properties of resistance spot welded IF (DIN EN 10130-1999) steel. *Kovove Materialy*, 47: 11-17.

- Hoile, S. 2000.** Processing and properties of mild interstitial free steels. *Materials Science and Technology*, 16: 1079-1093.
- Kahraman, B. 2009.** Otomotiv endüstrisinde kullanılan 5754 alüminyum alaşımı sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kanga, J., Raoa, H.M., Siglerb, D.R., Carlson B.E. 2017.** Tensile and Fatigue Behaviour of AA6022-T4 to IF Steel Resistance Spot Welds. *Procedia Structural Integrity*, 5: 1425-1432.
- Kaya, Y. 2010.** Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Kaya, Y., Kahraman, N. 2011.** Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi. *Journal of Polytechnic*, 14: 263-270.
- Kıral, M. 2012.** Titanyumun kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kianersi, D., Mostafaei, A. and Amadeh, A.A. 2014.** Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations. *Materials and Design*, 61: 251–263.
- Kilerci, İ. 2011.** Titanyum alaşımlarının farklı kaynak yöntemleriyle kaynağının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Kim, J.-S., Kim, I.-J., Kim, Y.-G. 2016.** Optimization of welding current waveform for dissimilar material with DP590 and Al5052 by Delta-spot welding process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30: 2713–2721.
- Manladan, S.M., Yusof, F., Ramesh, S.,Fadzil, M., Luo, Z., Ao S. 2016.** A review on resistance spot welding of aluminum alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90: 605-634.
- Oğuz, H. 2018.** Paslanmaz çelik-galvanizli çelik çiftinin elektrik nokta direnç kaynağında kaynak parametrelerinin kaynaklı birleştirmenin dayanım ve mikroyapı

özellikleri üzerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

**Pereira, A.M., Ferreira, J.M., Loureiro, A., Costa, J.D.M., Bártolo, P.J. 2010.** Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminium alloy. *Materials and Design*, 31: 2454–2463.

**Qiu, R., Iwamoto, C., Satonaka, S. 2009.** Interfacial Microstructure and Strength of Steel/Al Alloy Joints Welded by RSW with Cover Plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 4186-4193.

**Rao, S.S., Chhibber, R., Arora, K.S., Shome M. 2017.** Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 246: 252-261.

**Safari, M., Mostaan, H., Yadegari, Kh. H., Asgari D. 2017.** Effects of process parameters on tensile-shear strength and failure mode of resistance spot welds of AISI 201 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89: 1853–1863.

**Santos, A.P.R., Mota, T.C., Segundo, H.V.G., Almeida, L.H., Araújo, L.S., Rocha, A.C. 2018.** Texture, microstructure and anisotropic properties of IF-steels with different additions of titanium, niobium and phosphorus. *Journal of Materials Research and Technology*, 7: 203-402.

**Satoh, G., Lawrence, Y., Qiu Y.C. 2013.** Strength and microstructure of laser fusion-welded Ti–SS dissimilar material pair. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66: 469–479.

**Satonaka, S., Iwamoto, C., Qui, R., Fujioka T. 2006.** Trends and new applications of spot welding for aluminium alloy sheets. *Welding International*, 20: 858-864.

**Sun, X., Stephens, E.V., Khaleel, M.A., Shao H., Kimchi M. 2004.** Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material-From Process to Performance. *Welding Journal*, 83: 188-195.

**Şafak, S.A. 2011.** Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının elektrik direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Türkiş, B. 2010.** Kaynakla birleştirilmiş alüminyum (AL-5754) sac malzemesinin şekillendirilebilirliğinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Türkoğlu, H. 2016.** Otomotiv endüstrisinde kullanılan darbe sönümleyici parçanın nokta direnç kaynak parametrelerinin optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünlükal, E. 2007.** Otomotiv sanayinde kullanılan direnç nokta kaynak kalitesinin artırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vural, M., Akkus, A. 2004.** On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154: 1-6.
- Wang, S.Q., Patel, V.K., Bhole, S.D., Wenc, G.D., Chen, D.L. 2015.** Microstructure and mechanical properties of ultrasonic spot welded Al/Ti alloy joints. *Materials and Design*, 78: 33–41.
- Yalçın, E.D. 2010.** AA7075 ve AA5754 alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yaşacan, D.A., Günaydın, Y., Çankaya, S. 2005.** Ti ve Nb' lu IF çeliklerin de process şartlarının Lankford değerine ( $r$ ) olan etkisi. *Makine Mühendisleri Odası*, Erdemir T.A.Ş Kdz., Zonguldak.
- Yavuz, B. 2015.** Nokta direnç kaynağında ısıl ve yapısal analizlerin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yeşildal, C. 2008.** Otomotiv sektöründeki birleştirmelerde seçilen kaynak parametreleri ve kullanılan teknolojiler: geleneksel yöntemler ve laser tekniği. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yıldırım, O. 2010.** Otomotiv endüstrisinde kullanılan nokta direnç kaynak uygulamalarında işlem parametrelerinin etkilerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Yürük, A. 2015.** Elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen farklı özellikteki paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinin karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

**Zhang, H., Qiu, X., Bai, Y., Xing, F., Yu, H., Shi Y. 2014.** Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels. *Materials and Design*, 63: 151–158.

**Zhang, W., Sun, D., Han, L., Li Y. 2015.** Optimised design of electrode morphology for novel dissimilar resistance spot welding of aluminium alloy and galvanised high strength steel. *Materials and Design*, 85: 461–470.

**Zhou, K., Cai L. 2014.** Study on effect of electrode force on resistance spot welding process. *Journal of Applied Physics*, 116: 1-7.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özer MUTLUSU  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 01.01.1987  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Bursa Nuri Erbak Lisesi (2001)  
Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği (2006)  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği, (2016~)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. (2016~)  
: Biltim Bilgisayar Destekli Tasarım Ltd. Şti. (2011-2016)

İletişim (e-posta) : mutlusu.ozер@gmail.com