

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BASINÇ KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AA6061, AA5052
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE AISI 304L PASLANMAZ
ÇELİK MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATMA CEYLAN

DENİZLİ, EYLÜL - 2023

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



BASINÇ KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AA6061, AA5052
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE AISI 304L PASLANMAZ
ÇELİK MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATMA CEYLAN

DENİZLİ, EYLÜL - 2023

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

FATMA CEYLAN

ÖZET

**BASINÇ KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AA6061, AA5052
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE AISI 304L PASLANMAZ ÇELİK
MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FATMA CEYLAN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞRETİM ÜYESİ RECEP YURTSEVEN)

DENİZLİ, EYLÜL - 2023

Günümüzde, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda, farklı malzemelerin üstün özelliklerinden yararlanmak ve aynı zamanda maliyet açısından avantaj sağlamak amacıyla farklı malzemelerin birleştirilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Farklı metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemi basınçlı kaynak yöntemlerinden elektrik direnç nokta kaynağıdır. Kaynak bağlantısından istenilen mekanik özellikleri elde edebilmek için, kaynak kalitesinin ve kaynak mikro yapısının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu iyileştirmeler, özellikle kaynak parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ile sağlanabilir.

Bu çalışma kapsamında, farklı kalınlıklarda 304L östenitik paslanmaz çelik ile 5052 ve 6061 alüminyum alaşımları, farklı kaynak akımı parametrelerinde nokta direnç kaynağı yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynak işlemi sırasında, 5 kA, 5,5 kA ve 6 kA kaynak akım değerleri uygulanmıştır. Diğer önemli kaynak parametreleri olan elektrot basıncı ve kaynak süresi sabit tutulmuştur. Kaynak işlemi sonrası malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için, çekme deneyleri ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca kaynak bölgesi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile incelenmiştir. Kaynak bağlantılarının mekanik ve metalografik özellikleri, kaynak akımının bu bağlantılar üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Deney sonuçlarına dayalı olarak, kaynak akımının artmasıyla birlikte çekme dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Bu tez kapsamındaki bulgular ile farklı malzemelerin kaynağına yönelik daha etkili ve optimize edilmiş süreçlerin geliştirilmesine katkı sağlanabilir. Böylece, mekanik özelliklerin artırılması ile endüstriyel kaynak uygulamaları daha verimli ve güvenilir hale getirilebilir.

ANAHTAR KELİMELELER: Farklı metallerin kaynağı, 304L paslanmaz çelik, 5052 alüminyum alaşımı, 6061 alüminyum alaşımı, nokta direnç kaynağı, çekme dayanımı, mikrosertlik

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AA6061, AA5052 ALUMINUM ALLOYS JOINED WITH AISI 304L STAINLESS STEEL USING PRESSURE WELDING

MSC THESIS

FATMA CEYLAN

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSISTANT PROFESSOR RECEP YURTSEVEN)

DENİZLİ, SEPTEMBER 2023

In today's engineering and industrial applications, the joining of dissimilar materials to harness their superior properties while also achieving cost advantages is becoming increasingly important. One of the commonly used welding methods for joining dissimilar metals is resistance spot welding in metalworking and industrial applications. To obtain the desired mechanical properties from the weld joint, it is essential to improve the quality and microstructure of the welding. These improvements can be achieved, especially by accurately determining welding parameters.

In this study, different thicknesses of 304L austenitic stainless steel were joined with 5052 and 6061 aluminum alloys using the resistance spot welding method at different welding current parameters. During the welding process, welding current values 5 kA, 5.5 kA, and 6 kA were applied. Other important welding parameters such as electrode pressure and welding time were kept constant. To evaluate the mechanical properties of the materials after the welding process, tensile tests and microhardness measurements were conducted. Additionally, the welding zone was examined with scanning electron microscopy (SEM) images. The mechanical and metallographic properties of the weld joints were thoroughly evaluated to understand the effects of welding current on these connections.

Based on the experimental results, it was observed that the tensile strength increased as the welding current increased. The findings in this thesis can contribute to the development of more effective and optimized processes for welding different materials. Consequently, by enhancing mechanical properties, industrial welding applications can be made more efficient and reliable.

KEYWORDS: Welding of dissimilar metals, 304L stainless steel, 5052 aluminum alloy, 6061 aluminum alloy, resistance spot welding, tensile strength, microhardness.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Taraması	3
2. ALÜMİNYUM.....	7
2.1 Alüminyum ve Alaşımları	7
2.2 Alüminyum Alaşımlarına Elementlerin Etkisi	8
2.2.1 Bakır.....	8
2.2.2 Magnezyum	8
2.2.3 Silisyum	9
2.2.4 Çinko.....	9
2.2.5 Mangan	9
2.3 Alüminyumun Korozyonu.....	9
2.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	10
2.4.1 Dövme Alüminyum Alaşımları	11
2.4.1.1 1xxx serisi alaşımlar.....	14
2.4.1.2 2xxx serisi alaşımlar.....	14
2.4.1.3 3xxx serisi alaşımları.....	15
2.4.1.4 4xxx serisi alaşımları.....	15
2.4.1.5 5xxx serisi alaşımları.....	16
2.4.1.6 6xxx serisi alaşımları.....	16
2.4.1.7 7xxx serisi alaşımları.....	17
2.4.1.8 8xxx serisi alaşımları.....	17
2.4.2 Döküm Alüminyum Alaşımları	18
2.4.3 Isıl İşlem Uygulanabilen Alaşımlar	19
2.4.4 Isıl İşlem Uygulanamayan Alaşımlar	19
2.5 Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti	20
2.5.1 Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Direnç Kaynağı.....	22
3. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	23
3.1 Genel Özellikler	23
3.2 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması ve Uygulama Alanları	24
3.2.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	25
3.2.1.1 Genel Özellikleri	26
3.2.1.2 Uygulama Alanları	26
3.2.2 Ferritik paslanmaz çelikler.....	28
3.2.3 Martenzitik paslanmaz çelikler.....	28
3.2.4 Dupleks (östenitik-ferritik) paslanmaz çelikler	28
3.2.5 Çökelme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler	29
3.3 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı.....	29
3.3.1 Krom karbür oluşumu	29

3.3.2	Sıcak çatlak oluşumu	30
3.3.3	Sigma fazı oluşumu	31
3.3.4	Delta ferrit.....	32
4.	ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI.....	33
4.1	Nokta Direnç Kaynağı Yöntemi.....	33
4.2	Nokta Kaynak Kalitesini Etkileyen Kaynak Değişkenleri	34
4.2.1	Kaynak akımı ve kaynak zamanı	34
4.2.2	Elektrotların malzemesi ve boyutları	35
4.2.3	Elektrot kuvveti.....	37
4.2.4	İş parçasının malzemesi	37
4.2.5	İş Parçasının Yüzey Durumu	38
4.3	Kaynak Çevrimi	38
4.4	Kaynak Hataları ve Nedenleri	39
4.4.1	İç hatalar;	40
4.4.1.1	Kaynak nüfuziyeti	40
4.4.1.2	Yetersiz nüfuziyet	40
4.4.1.3	Aşırı nüfuziyet;.....	40
4.4.1.4	Simetri	41
4.4.1.5	Gaz kabarcıkları ve gözeneklilik.....	41
4.4.1.6	İç çatlaklar	41
4.4.2	Dış hatalar;.....	42
4.4.2.1	Yüzey yanması	42
4.4.2.2	Levha ayrılması.....	42
4.4.2.3	Fıskırma	42
4.4.2.4	Distorsiyon	43
4.4.2.5	Aşırı ezilme	43
4.4.2.6	Dış çatlaklar	44
4.4.2.7	Bakır Birikmesi	44
4.5	Kaynak Noktasının Mukavemeti.....	44
4.6	Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı.....	45
5.	DENEYSSEL ÇALIŞMALAR	48
5.1	Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	48
5.2	Deney Numunelerinin Boyutları	49
5.3	Deneyde Kullanılan Kaynak Makinesi.....	50
5.4	Kaynak İşleminin Yapılışı.....	50
5.5	Çekme Deneyi	52
5.6	Mikro-Sertlik Ölçümü	54
6.	DENEY SONUÇLARI	59
6.1	Çekme Deneyi Sonuçları.....	59
6.2	Makro Görseller	62
6.3	Mikro-Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	65
6.4	Kırık Yüzey Analizi	69
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	75
8.	KAYNAKLAR.....	77
9.	ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Magnezyum ilavesine göre mukavemet değişimleri	20
Şekil 3.1: Schaeffler diyagramı.....	25
Şekil 3.2: Östenitik paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması.	27
Şekil 3.3: WRC diyagramı	31
Şekil 4.1: Direnç kaynağı aşamaları	33
Şekil 4.2: Direnç nokta kaynağı elektrot başlıkları.....	36
Şekil 4.3: Kaynak çevrimi.....	39
Şekil 4.4: Nokta kaynağına uygulanan mukavemet deneyleri	45
Şekil 4.5: Metal malzemelerin direnç nokta kaynağına yatkınlık durumları ...	47
Şekil 5.1: Nokta kaynaklı deney numunelerinin boyutları.....	49
Şekil 5.2: Kaynak makinesi.....	50
Şekil 5.3: Kaynak işleminin yapılışına ait görseller.....	51
Şekil 5.4: Çekme cihazı.....	53
Şekil 5.5: Kesme cihazı.....	54
Şekil 5.6: Bakalite alma cihazı.....	55
Şekil 5.7: Parlatma cihazı.....	55
Şekil 5.8: Bakalite alınmış numuneler	56
Şekil 5.9: Vickers mikro sertlik ölçüm cihazı	56
Şekil 5.10: AISI 304L-AA5052 kaynaklı numunelerin kaynak işlemi sonrası görselleri.....	57
Şekil 5.11: AISI 304L-AA6061 kaynaklı numunelerin kaynak işlemi sonrası görselleri.....	58
Şekil 6.1 : AISI304L-AA5052 malzeme çiftinin çekme mukavemeti değerleri.....	60
Şekil 6.2 : AISI304L-AA6061 malzeme çiftinin çekme mukavemeti değerleri.....	60
Şekil 6.3 : AISI 304L-AA5052 ve AISI 304L-AA6061 malzeme çiftlerinin çekme mukavemeti değerleri....	61
Şekil 6.4 : AISI 304L-AA5052 numunelerin çekme deneyi sonrası kırık yüzey görseli	63
Şekil 6.5 : AISI 304L-AA6061 numunelerin çekme deneyi sonrası kırık yüzey görseli..	63
Şekil 6.6 : AISI 304L-AA5052 kaynak kesiti görseli.....	64
Şekil 6.7 : AISI 304L-AA6061 kaynak kesiti görseli.....	64
Şekil 6.8 : AISI 304L-AA5052 kaynak bölgesi kesiti ve sertlik değeri alınan noktalar.	65
Şekil 6.9 : AISI 304L-AA5052 numune çiftinin (5 kA) mikrosertlik grafığı	65
Şekil 6.10 : AISI 304L-AA5052 numune çiftinin (5,5 kA) mikrosertlik grafığı	66
Şekil 6.11 : AISI 304L-AA5052 numune çiftinin (6 kA) mikrosertlik grafığı	66
Şekil 6.12 : AISI 304L-AA6061 kaynak bölgesi kesiti ve sertlik değeri alınan noktalar.	67

Şekil 6.13 : AISI 304L-AA6061 numune çiftinin (5 kA) mikrosertlik grafiği	67
Şekil 6.14 : AISI 304L-AA6061 numune çiftinin (5,5 kA) mikrosertlik grafiği	68
Şekil 6.15 : AISI 304L-AA6061 numune çiftinin (6 kA) mikrosertlik grafiği	68
Şekil 6.16 : AISI 304L-AA5052 kaynak kesiti SEM görüntüsü (100X).....	70
Şekil 6.17 : AISI 304L- AA6061 kaynak kesiti SEM görüntüsü (100X)....	70
Şekil 6.18 : AA 5052 kaynak bölgesi SEM görüntüsü (100X).....	71
Şekil 6.19 : AA 5052 kaynak bölgesi SEM görüntüsü (500X).....	71
Şekil 6.20 : AA 6061 kaynak bölgesi SEM görüntüsü (100X).....	72
Şekil 6.21 : AA 6061 kaynak bölgesi SEM görüntüsü (500X).....	72
Şekil 6.22 : AISI 304L kaynak bölgesi SEM görüntüsü (100X).....	73
Şekil 6.23 : AISI 304L kaynak bölgesi SEM görüntüsü (100X).....	73

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Alüminyumun genel özellikleri.	7
Tablo 2.2: Dövme alüminyum alaşımlarının gösterimi.	11
Tablo 2.3: Alüminyum alaşımlarının temel ısıl işlemlerinin gösterimi.	12
Tablo 2.4: Alüminyum alaşımlarının H (sertleştirme) işlemlerinin gösterimi..	12
Tablo 2.5: Şekil değiştirme (H) sertlik dereceleri.....	13
Tablo 2.6: Alüminyum alaşımlarının ısıl işlemlerinin (T) gösterimi.	13
Tablo 2.7: Döküm alüminyum alaşımlarının gösterimi	18
Tablo 3.1: Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması.....	24
Tablo 4.1: Nokta direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımlar.	36
Tablo 5.1: 5052 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimleri (%).	48
Tablo 5.2: 6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimleri (%).	49
Tablo 5.3: AISI 304L paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimleri (%).	49
Tablo 5.4: Kaynak parametreleri.....	52
Tablo 6.1: AISI 304L-AA5052 ile AISI 304L-AA6061 numunelerin farklı kaynak akımı değerlerinde çekme deneyi sonuçları.	59

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	:	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
AISI	:	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AWS	:	Amerikan Kaynak Birliği
DC	:	Doğru Akım
EDS	:	Enerji Dağılımı Spektrometresi
EN	:	Avrupa Birliği Normu
FESEM	:	Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu
HV	:	Vickers Sertliği
IEB	:	Isıdan Etkilenmiş Bölge
MIG	:	Metal İnerit Gas
PLA	:	Polilaktik Asit
SAE	:	Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
TIG	:	Tungsten Asal Gaz Kaynağı
TS	:	Türk Standardı
YMK	:	Yüzey Merkezli Kübik Yapı
N	:	Newton
µm	:	Mikrometre

ÖNSÖZ

Tez çalışmasının başlangıcından son aşamasına kadar bana her konuda her koşulda destek olan, yol gösteren, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Recep YURTSEVEN'e sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmasında malzeme tedarikinde gerekli imkanları bana sağlayan Dentaş Kağıt Sanayi A. Ş.'ye ve tüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatımın her anında olduğu gibi lisansüstü eğitimimde de desteğini ve ilgisini esirgemenyen yol arkadaşım canım eşim Şener CEYLANA'a tüm kalbimle teşekkür ediyorum.

1. GİRİŞ

Günümüz endüstriyel ve mühendislik uygulamalarında farklı metallerin birleştirilmesi giderek daha önemli bir hale gelmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri farklı malzemelerin özelliklerini bir araya getirerek daha üstün ve hibrit malzemelerin oluşturulabilmesidir. Örneğin, bir metalin yüksek mukavemeti ile diğerinin düşük yoğunluğu birleştirilerek hafif ve dayanıklı yapılar elde edilebilir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde, yakıt tasarrufu sağlamak için araçların ağırlığının azaltılması üzerine yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalar, çoğunlukla titanyum, alüminyum, magnezyum gibi hafif metaller üzerinedir. Ancak yüksek mukavemet aranan yerlerde çelik tercih edilmektedir. Bu sebeple alüminyum alaşımları ve çelik malzemelerin birleştirilmesiyle daha hafif sistemler üretilebilmektedir.

Bu konstrüksiyonların imalinde kullanılan en yaygın imal usulü kaynaktır. İşlem türüne göre kaynak yöntemleri ergitme kaynağı ve basınç kaynağı olmak üzere sınıflandırılır. Basınç kaynak yöntemi içinde geniş kullanım alanına sahip olan elektrik direnç nokta kaynağı yöntemidir. Elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi oldukça hızlı bir kaynak yöntemidir. Otomasyona uygunluğu sebebiyle başta otomotiv endüstrisi olmak üzere geniş ölçüde bir kullanım olanağı bulmuştur. Bunlara ek olarak nokta kaynağı yönteminde ilave malzeme kullanılmadığı için hafiflik, yüksek kaynak mukavemeti, kolay uygulanabilirliği gibi avantajları sayesinde farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti iyi seviyededir. Genellikle tüm kaynak yöntemleriyle kaynak edilebilmektedirler. Östenitik paslanmaz çelik türünün düşük elektrik ve düşük ısı iletkenlikleri kaynak edilebilirlik açısından büyük avantajdır. AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ise AISI 304 paslanmaz çeliğin karbon oranının düşürülmüş halidir. 304L serisi östenitik paslanmaz çeliklerin taneler arası korozyonu 304 paslanmaz çeliğe göre daha iyidir. Bu durumun sebebi AISI 304 L paslanmaz çelik yeterli düzeyde karbon elementi içermediğinden tane sınırlarında krom karbür oluşumuna rastlanmaz. Bu nedenle kaynak işlemi sırasında AISI 304L çeliğinin tane

sınırlarında karbür birikimi önemli ölçüde önlenerek ısıtma işlemi ve zaman tasarrufu sağlanmış olur. Kaynak işlemlerinde karbon oranının azalması AISI 304L paslanmaz çelik için yüksek avantaj sağlar.

Alüminyum alaşımı ile çeliğin kaynak yoluyla birleştirilmesi, benzer metaller veya diğer farklı metaller gibi kolay değildir. Alüminyum ve çelik arasındaki metalürjik bağların elde edilmesi, iki malzeme arasındaki elektriksel, termal ve mekanik özelliklerdeki farklılıklar nedeniyle zordur. Ayrıca kaynak bölgelerinde kırılma intermetalik bileşiklerin oluşumu, birleştirmenin mekanik özelliklerini bozar. Bu sebeplerden dolayı iki malzeme kaynak edilirken kaynak yöntemi ve kaynak parametreleri dikkatli bir şekilde seçilmelidir.

Alüminyum alaşımları ile paslanmaz çelik malzemeler endüstrinin birçok alanında kaynaklanmış hibrit yapılar olarak kullanılmaktadır. Kaynak bölgesinde farklı sebeplerden dolayı görülen kaynak hataları kaynaklı yapının taşıyacağı yük kapasitesinde azalma gibi olumsuz durumlar ile karşı karşıya kalınabilir.

Bu çalışmada, birçok endüstride yaygın kullanım alanına sahip olan alüminyum alaşımları ve östenitik paslanmaz çelik malzemeler basınçlı kaynak yöntemlerinden nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak akımı parametrelerinde birleştirilmiştir. Kaynak edilen numuneler, çekme deneyleri, mikrosertlik ölçümleri ve SEM incelemeleri ile değerlendirilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Günümüzde farklı metallerin birleştirilmesine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Endüstri uygulamalarında farklı metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak direnç nokta kaynağı kullanılmaktadır. Bu hibrit yapıların mekanik özelliklerindeki değişimin belirlenmesi, çalışan sistemler için kritik öneme sahiptir. Bu tezin temel amacı, direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş olan AA6061 ve AA5052 alüminyum alaşımları ile AISI 304L paslanmaz çelik malzemenin mekanik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemektir. Bu çalışma, farklı metal malzemelerin birleştirilmesinde kaynak akımı parametresinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamayı ve bu kaynaklı yapıların en iyi performansı sunmasına yardımcı

olmayı hedeflemektedir. Yapılan bu çalışmanın sonuçları, endüstriyel uygulamalarda bu tarz hibrit yapıların daha güvenilir bir şekilde tasarlanması ve imal edilebilmesi için öngörü oluşturabilir.

1.2 Literatür Taraması

Bu bölümde, nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş farklı metal malzemelerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini inceleyen çalışmalar değerlendirilmiştir.

Noor ve diğ. (2013), direnç nokta kaynağıyla birleştirilmiş 6063 alüminyum alaşımı ve 316L paslanmaz çelik bağlantısının, çekme kesme dayanımı ve yaşlandırma işleminin çekme kesme dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kaynak işleminde, 4 kA, 5 kA, 6 kA kaynak akımı, 1500 N elektrot kuvveti ve 10 çevrim kaynak süresi parametreleri kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarından, kaynak akımının artmasıyla çekme kesme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. En yüksek çekme kesme kuvveti 6 kA kaynak akımında 3,42 kN olarak bulmuşlardır. Kaynak akımı arttıkça çekme kesme mukavemetindeki artış sebebinin, çekirdek çapının artmasından kaynaklandığını tespit etmişlerdir.

Mortazavi ve diğ. (2011), düşük karbonlu çelik ve AA5250 alüminyum alaşımlı levhaları direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirerek, kaynak akımı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Nokta kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini çekme kesme deneyi yaparak değerlendirmişlerdir. 12,5 kA kaynak akımında en yüksek çekme değerini elde etmişlerdir. Kaynak akımındaki artış ile alüminyum levhada kaynak nüfuziyetinin arttığını tespit etmişlerdir.

Karakaş ve diğ. (2023), yaptıkları çalışmada farklı metallere uygulanan kaynak yöntemlerini inceleyen derleme çalışması yapmışlardır. Kaynaklı metallerin yorulma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklerini inceleyen, son çalışmaları değerlendirerek ayrıntılı bir literatür taraması sunmuşlardır. Bu çalışmada, farklı metallerin kaynak bölgesinin yorulma dayanımını etkileyen faktörleri açıklamışlardır. Çalışma sonucunda, farklı metallerin kaynağı sırasında oluşan intermetalik bileşikler, kaynaklı birleştirmenin hem dayanıklılığını hem de yorulma davranışını olumsuz etkilediğini bu sebeple kaynak sırasında intermetalik bileşiklerin

boyutunu küçültmek ve mukavemet üzerindeki negatif etkilerini azaltmak için bir ara tabaka kullanılması gerektiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca farklı metallerin kaynağı sırasında kaynak metalleri arasındaki termal genleşme katsayısı farklarından kaynaklanan çekme kalıntı gerilmeleri, kaynaklı yapının yorulma ömrünü azalttığını ve bu çekme kalıntı gerilmeleri ayrıca gerilme korozyon çatlamasına neden olabileceğini tespit etmişlerdir. Aynı zamanda çevresel etkiler tarafından desteklenen çatlaklara karşı malzemenin direncinin düştüğünü ve çatlak yayılma hızının arttığını bulmuşlardır.

Murat (2018), savunma sanayinde, endüstriyel ürünlerde ve çeşitli makine parçalarında kullanılan 3 mm kalınlığındaki AISI/SAE 420 kalite martenzitik paslanmaz çelik saclar ile 3 mm kalınlığındaki AISI/SAE 304L kalite östenitik paslanmaz çelik parçaları TIG kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Yaptığı çalışmada; üç farklı TIG ilave telini kaynak işlemlerinde kullanmıştır. Kaynak işleminin ardından tüm numunelerin mekanik dayanımlarını ve kaynak bölgesini analiz etmek için korozyon deneyi, Charpy V-çentikli darbe testi ve mikrosertlik ölçümü gibi deneyler yapmıştır. Korozyon testi sonuçları birbirine yakın değerler çıkmıştır ve tüm kaynaklı numunelerin korozyon dayanımı açısından yetersiz olduğunu gözlemlemiştir. Kaynak bölgesi sertliklerini incelediğinde en yüksek sertlik değerinin 420 martenzitik paslanmaz çelikte (ana metal) olduğunu bulmuştur.

Hassonia ve diğ. (2022), AISI 316L paslanmaz çeliklerin punta kaynağının mekanik özelliklerini ve korozyon direncini araştırmışlardır. Kaynak parametreleri olarak 4500 A, 5500 A ve 6500 A kaynak akımı, 20 bar, 30 bar ve 40 bar elektrot basıncı ve 0,6, 0,8 ve 1 sn sıkma süresi ve 0,3, 0,6 ve 0,9 sn kaynak süresi değerlerini kullanmışlardır. Numuneleri çekme kesme testi, korozyon testi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir. En yüksek çekme kesme kuvvetini, 4500 A kaynak akımında, 30 bar elektrot basıncında, 0,8 sn sıkma süresi ve 0,6 sn kaynak süresi ile kaynak işlemi yapıldığında 5,1 kN olarak bulmuşlardır. En düşük çekme kesme kuvveti 6500A kaynak akımı, 40 bar elektrot basıncı, 0,8 sn sıkma süresi ve 0,3 sn kaynak süresi ile kaynak yapıldığında 3,1kN olarak bulmuşlardır. Kaynak akımı ve elektrot basıncındaki artışın oyuklaşma korozyonu ve korozyon hızında artışa yol açtığını belirlemişlerdir.

Jamasri (2011), nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş 3 mm kalınlığındaki SS400 (~S275JR) genel yapı çeliği ile 1 mm kalınlığındaki 304 paslanmaz çelik sacların havada ve deniz suyu ortamında korozyonlu yorulma davranışını incelemişlerdir. Kaynak parametreleri olarak 4,7 kA kaynak akımı, 20 çevrim kaynak süresi ve 6 kN elektrot kuvveti seçmişlerdir. Yorulma, korozyonlu yorulma, metalografik muayene, mikrosertlik ölçümü, elektrokimyasal testler vb. deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sonuç olarak, deniz suyunda yapılan korozyonlu yorulma mukavemetinin havada yapılandan daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Kanga ve diğ. (2017), elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi ile kaynak edilen, farklı kalınlıklardaki AA6022-T4 Al alaşımı ve IF çelik malzemelerini incelemişlerdir. Yorulma ve çekme makaslama testleri ile kaynak çekirdek çaplarını birlikte değerlendirerek, farklı kaynak çiftlerinin mekanik özelliklerini kıyaslamışlardır. Farklı metallerin kaynağında, aynı metallerin kaynağına göre daha yüksek mekanik özellikler elde etmişlerdir.

Zedan ve Doos (2018), 5052 alüminyum alaşımı ve 1008 düşük karbonlu çelik malzemeleri nokta direnç kaynağı ile birleştirmişlerdir. Bu çalışmada kaynak esnasında zorluk yaşanan alüminyumun yüksek termal genleşmesinin üstesinden gelmek için yeni bir teknik geliştirerek alüminyum alaşımının merkezinde 3 mm çapında dairesel bir delik açmışlardır. Kaynak parametreleri olarak 1500 N-2400 N elektrot kuvveti, 11,25 kA -14,25 kA kaynak akımı ve 25-40 çevrim kaynak süresini kullanmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, en yüksek çekme kesme kuvvetini, 14,25 kA kaynak akımında, 2400 N elektrot kuvvetinde ve 40 çevrim kaynak süresi ile kaynak işlemi yapıldığında 3210 N olarak bulmuşlardır. İntermetalik bileşik katman (IMC) kalınlığını 1 µm-5 µm olarak tespit etmişlerdir.

Şafak (2011), AA5754 ve AA6061 alüminyum alaşımlarını nokta kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Malzemelerin mekanik dayanımlarını analiz etmek için çekme makaslama ve mikrosertlik gibi mekanik testler yapmıştır. Kaynak edilebilirliğin en alt değerinin 8 kA ve 10 periyot olduğunu tespit etmiştir. Çekme-kesme testlerinin sonucunda AA5754-AA5754 ve AA5754-AA6061 malzeme kombinasyonlarında maksimum çekme dayanımını 9,5 kA kaynak akımı, 12 periyot kaynak süresi parametre değerlerinde bulmuştur. AA6061- AA6061 alaşımlı malzeme çiftinde ise 9,5kA kaynak akımı ve 14 periyot kaynak süresi parametre değerinde

maksimum çekme değeri verdiğini gözlemlemiştir. Çekirdek bölgesinin mikrosertlik ölçümlerinde AA6061 alüminyum alaşımının, AA5754 alüminyum alaşımından daha sert olduğunu tespit etmiştir.

Topcu ve diğ. (2019), çalışmalarında, kaynak metali olarak 1 mm kalınlığında AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çelik sacları punta kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Böylece AISI 304 kaynak metali çiftleri, AISI 316L kaynak metali çiftleri ve AISI 304-AISI 316L kaynak metali çiftleri benzer ve farklı metallerin kombinasyonu olacak şekilde seçmişlerdir. Kaynak işlemlerini akım ve zaman kontrollü elektrikli punta kaynak makinesi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kaynak parametrelerini, kaynak akımı 10.000 A, elektrot basıncı 4 kN ve kaynak süresi 10 saniye olarak belirlemişlerdir. Punta kaynak uygulamalarından sonra numunelere çekme kesme ve mikrosertlik ölçümü gibi mekanik testler yapmışlardır. Sonuç olarak numunelerin sertliklerinin 186-240 HV (ortalama) aralığında ve çekme kesme kuvvetlerinin 1486 N-1549 N (ortalama) aralığında değiştiğini gözlemişlerdir.

Özyürek (2008), hava ve nitrojen atmosferinde direnç nokta kaynaklı 304L paslanmaz çelik malzemelerin özelliklerini incelemiştir. Numunelerin, yüzey görünümü, kaynak çekirdeği boyutu, kaynak penetrasyonu, kaynak içsel kusurları, dayanıklılık gibi kaynak kalitesini etkileyen temel kaynak parametrelerinin etkisini incelemiştir. Kaynak üst sınır akımının ısıl girdisi üzerindeki etkisini belirlemiştir. Ayrıca farklı kaynak ortamının, 304L paslanmaz çeliğin direnç nokta kaynak kalitesine etkisini de ayrıntılı olarak incelemiştir. Tüm koşullar için kaynaklı malzemelerin mikroyapısı, mikrosertlik ve çekme kesme dayanımını belirlemiştir. Deney sonucunda, nitrojen atmosferinde 9 kA kaynak akımı kullanarak optimum bir kaynak kalitesi elde etmişlerdir.

Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, yüksek mekanik ve korozyon dirençleri sebebiyle, östenitik paslanmaz çelikler ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı hibrit yapılarına birçok farklı endüstride ihtiyaç duyulmaktadır. Bu malzemelerin birleştirilmesinde direnç nokta kaynağının yaygın olarak kullanıldığı tespit edilmiştir.

2. ALÜMİNYUM

2.1 Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum, yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir (Kahraman 2009). Çelikten sonra en yaygın kullanılan metal malzeme alüminyum ve alüminyum alaşımlarıdır. Otomotiv, savunma, havacılık ve uzay, enerji, inşaat, elektrik ve elektronik gibi birçok alanda kullanımı yaygındır (Erge 2021).

Alüminyumun özgül ağırlığının düşük olması, mukavemetinin yüksek olması, elektrik ve ısı iletkenliğinin iyi olması ve korozyon direnci gibi önemli özelliklere sahiptir. Alaşımlandırma işlemi ile alüminyumun mekanik özelliklerinde önemli artışlar sağlanabilir (Erge 2021).

Alüminyumun genel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Alüminyumun yüzeyi, atmosferle teması sonucunda oluşan oksit tabakası (Al_2O_3) sayesinde korozif etkilere karşı dirençlidir. Alüminyumun saflığı arttıkça elektriksel iletkenlik ve korozyon direnci de o kadar yüksek olur (Kahraman 2009).

Tablo 2.1 Alüminyumun genel özellikleri (Taban 2004)

Sembol	Al
Atom Numarası	13
Kristal Kafes Yapısı	YMK
Maddenin Hali	Katı
Yoğunluk	2,70 g/cm ³
Elastiklik Modülü	72 GPa
Poisson Oranı	0,34
Katılma Halinde Çekme	% 6,7
Özgül Isısı	0,211 cal/g (0-100°C)
Erime Isısı	93 cal/g
Sıvı Haldeki Yoğunluğu	2,375 g/cm ³
Ergime Noktası	660,32 °C
Kaynama Noktası	2519 °C
Ergime Isısı	10,71 kJ/mol
Buharlaşma Isısı	294,0 kJ/mol

2.2 Alüminyum Alaşımlarına Elementlerin Etkisi

Alüminyum alaşımları, alüminyumun farklı elementlerle (bakır, magnezyum, silisyum, çinko, mangan vb.) alaşımlandırılmasıyla elde edilen malzemelerdir. Bu elementlerin alüminyumun mekanik özellikleri, sertlik, dayanıklılık, korozyon direnci ve diğer özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Alüminyum alaşımlarına eklenen farklı elementler, alaşımların istenilen özelliklerde olmasını sağlamak için kullanılır (Şafak 2011).

2.2.1 Bakır

Bakır alüminyumun temel alaşım elementidir. Bakır genellikle işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmek amacıyla eklenir. Ancak aşırı miktarda bakır eklenmesi alaşımın işlenebilirliğini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca bakır ilavesi alüminyum alaşımlarına sertlik kazandırır ayrıca döküm kolaylığı da sağlamaktadır. %12'ye kadar bakır ilavesi alüminyum alaşımlarının mukavemetini arttırmaktadır. Fakat bu değer %12'den fazla olması durumunda malzeme gevrekleşmektedir. Bakır ilavesinin dezavantajı ise elektrik iletkenliği azaltması ve korozif ortamlara olan direncini düşürmesidir (Ak 2012).

2.2.2 Magnezyum

Magnezyum ilavesi alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini, işlenebilirliğini ve korozyon direncini önemli ölçüde arttırabilir (Davis 1998). Ayrıca kaynak kabiliyeti ve haddeleme gibi özelliklere de katkı sağlar. Ancak malzemenin sünekliliği düşürmektedir. Alüminyum içeriğinde magnezyum oranının %6 sınırını geçmesi durumunda çökelme sertleşmesi olmaktadır. Bu durum döküm işlemlerini zorlaştırmaktadır (Deschamps et al. 2001). Kaynak kabiliyetinin yüksek olmasının istendiği durumlarda magnezyum içeriği %3,5 ve üzeri olan alüminyum alaşımları seçilir (Çüngür 2021).

2.2.3 Silisyum

Silisyum ilavesinin, alüminyum alaşımlarının kaynak edilebilirlik ve korozyon dayanımı gibi özelliklerde olumlu etkisi vardır. Silisyum, yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanımı arttırabilir. Bu özellik, yüksek sıcaklık uygulamaları (motor parçaları, egzoz sistemleri vb.) için önemlidir (Deschamps et al. 2001).

2.2.4 Çinko

Çinko ilavesi alaşımda dökülebilirliği azaltmaktadır. Alaşımda yüksek çinko ilave edilmesi durumunda sıcak çatlama meydana gelmektedir. Çinko içeriği %10'u geçmesi durumunda alaşımlarda gerilme çatlama görülmektedir (Erge 2021).

2.2.5 Mangan

Mangan ilavesi alaşımda dökülebilirliği artırmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarının mukavemetini artırabilir (Çüngür 2021).

2.3 Alüminyumun Korozyonu

Alüminyum, yüzeyindeki oksit tabakası (Al_2O_3) sayesinde atmosferde, suda ve birçok kimyasallara karşı korozyon direncine sahiptir (Şafak 2011).

pH aralığı 4-8,5 olan ortamlarda alüminyum alaşımlarının yüzeyindeki oksit tabaka alaşımı korozyona karşı korur ve sürekli. Bu pH aralığının haricindeki ortamlarda ise oksit tabaka bozulur ve alüminyum alaşımları korozyon sebebiyle hasara uğrar. Özellikle HCl, HF ve H_2SO_4 içeren kimyasal ortamlar alüminyum alaşımları için tehlike arz etmektedir.

Asidik ya da bazik ortamlarda alüminyum alaşımları genel korozyona uğrar bu sebeple malzeme kalınlığı homojen olarak azalır.

Klorürlü ortamlarda alüminyum alaşımının yüzeyinde çukurcuk korozyonu meydana gelir.

Alüminyum nötre yakın sulu ortamlarda diğer pasif metallerde olduğu gibi oyuklanma korozyonuna yatkındır. Oyuklanma korozyonu pH değerinden daha çok sulu ortamdaki klorür gibi anyonların miktarına bağlıdır (Vargel 2004).

Al-Mg alaşımlarının korozyon direnci tuzlu ve alkali ortamlarda diğer alüminyum serilerine (1xxx) göre daha iyidir. Magnezyum katkısının sınırlı kaldığı durumlarda mangan ilavesi alüminyum alaşımlarının klorürlü ortamlardaki korozyon direncini artırır (Çüngür 2021).

Bakır elementi alüminyumun korozyona karşı direncini zayıflatır. Bu sebeple bakır içerikli 2xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımların korozyon direnci düşüktür.

5xxx serisi alaşımlar mükemmel korozyon dayanımına sahiptir (Vargel 2004).

2.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum ve alaşımları üretim yöntemlerine göre dövme ve döküm olarak ayrıca mukavemet kazandırma işlemlerine göre ise ısı işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere gruplara ayrılırlar.

Alüminyum alaşımları üretim yöntemlerine dayalı olarak iki ana alt gruba ayrılır: dövme ve döküm. Bu ayırım, bu alaşımların imalat süreçlerinin farklı ihtiyaçlara sahip olduğunu gösterir. Dövme ve döküm alaşımlar birbirinden oldukça farklı mikro yapı ve kompozisyonlara sahiptirler.

2.4.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme alüminyum alaşımları, genellikle özel uygulamalarda kullanılan yüksek mukavemetli ve dayanıklı malzemelerdir. Dövme işlemi, bu alaşımların istenilen şekil, boyut ve mukavemet özelliklerine göre şekillendirilmesini sağlar.

Isıl işlem uygulanamayan dövme alüminyum alaşımları 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileridir. Bu seri alaşımlar yalnızca şekil değiştirme ile sertleştirilebilirler.

Dövme alüminyum alaşımları içerisinde ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar, 2xxx, 6xxx ve 7xxx serileridir.

4xxx ve 8xxx serileri hem ısıl işlem uygulanabilen hem de ısıl işlem uygulanamayan alaşımları içerir. Dövme alüminyum alaşımları genellikle 4 rakamdan oluşan bir tanımlama sistemi kullanılarak isimlendirilir.

Tablo 2.2 Dövme alüminyum alaşımlarının gösterimi (Anderson 2000)

Alüminyum	Başlıca Alaşım Elementi
1xxx	Min. %99,0 Al
2xxx	Al-Cu
3xxx	Al-Mn
4xxx	Al-Si
5xxx	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si
7xxx	Al-Zn
8xxx	Diğer elementler (Al-Li)
9xxx	Kullanılmayan seri

Tablo 2.3'te gösterilen simgelerde ilk rakam, alaşımların ana metali temsil eder.

İkinci rakam, orijinal alaşım elemanının çeşitli türevlerini ifade eder ve orijinal bileşimde her zaman "0" olarak başlar. Orijinal bileşimdeki değişiklikler, genellikle bir veya daha fazla alaşım elemanında %0,1-0,50 arasındaki artışları temsil eder.

Üçüncü ve dördüncü rakam seri içerisindeki özel alaşımı ifade eder.

Bu dört rakamın yanı sıra, alaşımın üzerine uygulanan özel işlemleri ve karakterleri belirten sayısal ve alfabetik kodlar da bulunur. Bu kodlar, soğuk işleme, kararlılık işlemine, kısmi tavlama, kabartmalı levhalara, temper uygulamalarına, gerilim giderme işlemlerine, su verme işlemine ve üretici dışında uygulanan ısı işlemlere işaret eder. Bu karakterler ve anlamları Tablo 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7'de açıklanmıştır.

Tablo 2.3 Alüminyum alaşımlarının temel ısı işlemlerinin gösterimi (Taban 2004)

Harf	Anlamı
F	Üretildiği gibi.
O	Tavlanmış (Yumuşak)
H	Şekil değiştirme sertleştirme
W	Çözeltiyeye alma ısı işlemi
T	Isı işleme tabi tutulmuş

Tablo 2.4 Alüminyum alaşımlarının H (sertleştirme) işlemlerinin gösterimi (Kaufman 2000)

H1- Alaşım, çözünme ısı işlemine tabi tutulmuş ve hemen sonrasında soğutulmuştur. Bu, alaşımın çözeltiyeye girip çıkmasını ifade eder.
H2- Alaşım, soğutulmuş ve sonrasında çözeltiyeye girmiştir. Bu, alaşımın sertleştirme işlemine tabi tutulduğunu gösterir.
H3- Alaşım, soğutulmuş ve çözeltiyeye girmiştir, ardından değişik bir işlemle kararlı hale getirilmiştir. Bu işlem, alaşımın daha fazla sertleşmesini ve kararlılık kazanmasını sağlar.
H4- Alaşım, soğutulmuş ve ardından doğal bir şekilde yaşlanmaya bırakılmıştır. Bu, alaşımın zamanla kendiliğinden sertleşmesini ifade eder.
H5- Alaşım, soğutulmuş ve sonrasında yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem, alaşımın daha hızlı bir şekilde sertleşmesini sağlar.
H6- Alaşım, soğutulmuş ve ardından yaşlanmaya bırakılmıştır.

Tablo 2.5 Şekil değiştirme (H) sertlik dereceleri

H'den sonra gelen ikinci harf Şekil değiştirme sertliğinin derecesini tanımlar.	
Simge	Sertlik Derecesi
HX2	1/4 Sert
HX4	1/2 Sert
HX6	3/4 Sert
HX8	Tam Sert
HX9	Çok Sert

Tablo 2.6 Alüminyum alaşımlarının ısıll işlemlerinin (T) gösterimi (Kaufman 2000)

T1-Yüksek sıcaklıkta Şekillendirme işlemiyle soğutulmuş ve doğal olarak yaşlanmış
T2-Yüksek sıcaklıkta Şekillendirme işlemiyle soğutulmuş, soğuk işlemden geçirilmış ve doğal olarak yaşlanmış
T3-Çözelti ısıll işlemine tabi tutulduktan sonra soğuk Őekillendirilmıř
T4-Çözelti ısıll işlemi görmüş ve doğal olarak yaşlanmış
T5-Yüksek sıcaklıkta Şekillendirme işlemiyle soğutulmuş ardından yapay olarak yaşlanmış.)
T6-Çözelti ısıll işlemi yapılmış ve yapay olarak yaşlanmış
T7-Çözelti ısıll işlemi yapılmış ve daha uzun süre yaşlanmış (aşırı yaşlanmış)
T8-Çözelti ısıll işlemi yapılmış, soğuk işlemden geçirilmış ve yapay olarak yaşlanmış
T9-Çözelti ısıll işlemi yapılmış, yapay olarak yaşlandırılmış ardından soğuk işlem görmüş
T10-Yüksek sıcaklıkla Şekillendirme işleminden sonra soğutulur, yapay olarak yaşlandırılır ardından, soğuk işlenir.

2.4.1.1 1xxx serisi alaşımlar

Bu seri, temel olarak saf alüminyumdan oluşan alaşımlardır. Bu gruptaki alaşımlar sadece deformasyon sertleşmesi ile kısmi derecede mukavemet kazandırılabilir, yaşlanma sertleşmesi göstermezler (Oğuz 1990). 1xxx serisi alüminyum alaşımları, genellikle düşük mukavemet ve yüksek şekil verilebilirlik özelliklerine sahiptir. Bu alaşımların mekanik dayanıklılığı düşüktür, bu nedenle yapısal uygulamalarda tercih edilmezler. Bu alüminyum alaşımlarının korozyon direnci mükemmel seviyededir. Bu nedenle genellikle koruyucu kaplamalar veya yüzey işlemleri gerektirmezler. Genellikle elektrik iletkenleri, kaplama malzemeleri, mutfak ekipmanları (tava vb.), içecek kutuları ve benzeri ambalaj malzemeleri gibi uygulamalarda kullanılır. Ayrıca, dekoratif amaçlar için de tercih edilebilirler.

2.4.1.2 2xxx serisi alaşımlar

Bakırın ana alaşım elementi olarak bulunduğu bir alüminyum alaşım serisidir. 2xxx serisi alaşımlar, genellikle havacılık ve uzay endüstrisi gibi yüksek mukavemet ve hafiflik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Uçak gövdeleri, motor parçaları, askeri uçaklar, füze bileşenleri, dişlilerde, perçinlerde ve spor otomobil tekerlekleri gibi alanlarda tercih edilirler.

Bu seri alaşımların mukavemetini arttırmak için 490 °C'den hızla soğutularak çökeltme sertleşmesi işlemine tabi tutulurlar. Mukavemetin daha fazla artırılmasının istendiği durumlarda 120 °C'de tavlansarak yapay yaşlanmaya uğratılırlar (Öksüz 1996). Bu işlemlerle sertleştirilmiş alaşımın çekme dayanımının yanı sıra işleme kabiliyeti de artar ancak malzemenin sünekliği azalır. Ayrıca bu alaşımlarda elektrik iletkenliği de azalmaktadır (Cavaliere; Cerri 2005).

2xxx serisi alaşımların bir dezavantajı, yüksek bakır içeriği nedeniyle korozyon direncinin düşük olmasıdır.

2.4.1.3 3xxx serisi alaşımları

Bu alaşım serisinin ana alaşım elementi manganezdır. Genellikle, bu alaşımlar %1,80 oranında manganez içerir. Sıcaklık dūřuřuyle alaşım içindeki manganezin çözünürlüğü azalır. 3xxx serisi alüminyum alaşımları ısıl işlemlerle yaşlandırma sertleşmesi yapılabilir. Alüminyumun ekme mukavemetini içeriğindeki manganez artırır. Bu alaşım yüksek süneklik ve mükemmel korozyon direncine sahiptir.

1xxx serisi alaşımlara kıyasla daha fazla mukavemete sahiptirler. Yaklaşık %1,5 seviyesindeki manganez ilavesi, mukavemetin önemli ölçüde (100- 170 N/mm²) artmasına neden olabilir, ancak sünekliğin hafifçe azalmasına yol açar. Manganezin düşük çözünürlüğü, bu alaşımların üretim çeşitliliğini sınırlar.

2.4.1.4 4xxx serisi alaşımları

Bu serideki alaşımların ana alaşım elementi silisyumdur (%4,0-%13,0 arasında). Silisyum, alüminyum ile birleşerek düşük ergime sıcaklığına sahip bir alaşım oluşturur. Bu özellik, özellikle döküm işlemleri için uygundur.

Bu alaşımlar, genellikle döküm endüstrisinde kullanılır. Örneğın, motor blokları, radyatörler, valf kapakları, elektrik direkleri, otomobil jantları ve diğer dökme parçaların üretiminde sıkça tercih edilirler. Genellikle silisyumun alüminyum içinde maksimum çözünme oranı %1,65'tir. Ancak 4xxx serisi alaşımlarda %2,5'e kadar silisyum içeren alaşımlar üretilebilir. Artan silisyum içeriği dökülebilirlik yeteneğini artırır.

Yüksek silisyumlu alaşımlar, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek korozyon direncine sahiptir (Cavalier ve Cerri 2005).

4xxx serisi alaşımlar ısıl işlem ile sertleştirmeye uygun değıldir (Öksüz 1996).

2.4.1.5 5xxx serisi alaşımları

Bu serideki alaşımların ana alaşım elementi magnezyumdur (%2 ila %6 arasında). Ayrıca, bazı 5xxx serisi alaşımların içerisinde manganez (Mn) bulunabilir. Manganez, alaşımın işlenebilirliğini arttırabilir (Öksüz 1996).

Magnezyum içeriği %5'in altında olan ve yeterli silisyum içermeyen alaşımlar genellikle yaşlandırma yoluyla sertleştirilemez. Genellikle bu tür alaşımlar, soğuk şekillendirme işlemleri ile sertleştirilebilir. 5xxx serisi alaşımlarda, magnezyum miktarı arttıa sertlik ve mukavemet artar, ancak aynı zamanda malzemenin sünegliği azalır (Cavaliere ve Cerri 2005). Bu seri alaşımlarda magnezyum, genellikle %0,8 ile %4,5 arasında değişen miktarlarda kullanılır. Magnezyum içeriği arttıa, çekme mukavemeti de aynı oranda artar.

Yüksek ekme mukavemeti, sertlik, aşınma karşı dayanıklılık, deniz atmosferine karşı etkili korozyon direnci ve kolayca kaynaklanabilme yeteneği, belirgin özellikleridir (Yılmaz 2002).

Bu alaşımlar çok iyi bir sünegliğe ve mükemmel bir korozyon direncine sahip olduğundan denizcilik endüstrisi, otomotiv endüstrisi (özellikle araç gövdeleri ve şasi yapıları), havacılık endüstrisi, inşaat malzemeleri ve genel yapısal uygulamalar gibi çeşitli sektörlerde kullanılır. Ayrıca, bu alaşımların deniz suyuna dayanıklılığı, denizcilik uygulamalarında da tercih edilmelerine neden olur (Oğuz 1990).

2.4.1.6 6xxx serisi alaşımları

6xxx serisi alüminyum alaşımlarının temel alaşım elementleri magnezyum (Mg) ve silisyumdur (Si). Bu seri ısıl işleme tabi tutulabilir. Magnezyum ve silisyum birleşerek Mg_2Si bileşiğini oluşturur. 6xxx serisi alaşımlar çözeltiye alma ve suni olarak yaşlandırma işlemleri uygulanırsa alüminyum matrisi içinde Mg_2Si partikülleri ökilmesiyle orta seviyede mukavemet ve sertlik elde edilir. Ancak elde edilen mukavemet değerleri 2xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının mukavemet değerlerinden daha düşük seviyededir (Cavaliere ve Cerri 2005).

6xxx serisi alüminyum alaşımları içinde yaygın bir şekilde kullanılan ve iyi ısı işlem uygulanabilen alaşım 6061'dir. Bu alaşımlar diğer yaşlandırılan alaşımlar ile kıyaslandığında kaynak kabiliyeti, talaş kaldırma kabiliyeti, şekillendirme kabiliyeti ve korozyon direnci gibi özellikleri daha fazladır (Büyükarslan 2006). Mekanik özellikleri yüksek olduğu için, bu alaşımlar uçak ve uzay yapılarında, taşıma araçlarında, demiryolu taşıtları gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılır. Ek olarak, ısı işlemle sertleştirilebilen bu alaşımlar, özellikle soğuk şekillendirme işlemleri için uygundur (Öksüz 1996).

2.4.1.7 7xxx serisi alaşımları

Bu seri alaşımlarda yaklaşık olarak %5 çinko ilave edilir ve bu yüksek çinko miktarı alaşımın yüksek çekme mukavemetine sahip olmasını sağlar. Ayrıca, bu alaşımlarda çinko ile birlikte magnezyum kullanılması, malzemenin ısı işlemle sertleştirilmesini sağlar. 7xxx serisi en mukavemetli alüminyum alaşımlarıdır.

Bu alaşımlar, yüksek mukavemet ve sertlikleri nedeniyle havacılık endüstrisi için özellikle uygundur. Uçak gövdeleri, kanatları, pervaneleri ve diğer yapısal bileşenleri için kullanılırlar. Ayrıca, tavan vinçleri, otomotiv yarış arabaları, bisiklet çerçeveleri, kamyon kasaları, dağcılık malzemeleri ve diğer spor ekipmanları gibi yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda da kullanılırlar.

Çinko ilavesi malzemenin dökülebilirlik kabiliyetini düşürmektedir. Ayrıca sıcak çatlama ve soğuma gerilmelere yol açabilir. Çinko oranı %8'in üzerinde olan alaşımlar, gerilmeli korozyon çatlaklarına daha yatkındırlar. Bu seri alaşımlar imalat zorluklarına sahiptir bu sebeple ergitme ısı işleminin hemen ardından şekillendirme işlemi yapılmalıdır. Ardından bu işlemi çökeltme ısı işlemi takip eder.

2.4.1.8 8xxx serisi alaşımları

Bu seri hem ısı işlem uygulanabilen hem de ısı işlem uygulanamayan alaşımlar içerir. Yüksek iletkenlik, mukavemet ve sertlik gibi özelliklere sahiptir. Demir, nikel ve lityum bu alaşımlar için temel alaşım elementleridir.

Al- Li alařımları dūřuk yoęunluk, yūksek elastisite modūlü, dūřuk ve yūksek sıcaklıklarda tokluk gibi ōzelliklere sahiptir (řaldır 2003).

Lityumun alūminyuma her %1 eklenmesi, alařımın yoęunluęunu %3 azaltırken elastiklik modūlūnū %6 oranında artırır. Genellikle, %1,0 - %2,0 arasında lityum ięeren alařımlar ısıl iřlem uygulanabilirler. Hızlı katılařma yōntemi ile %4'e kadar lityum eklemek mūmkūn olabilir, bu da yūksek mukavemete ve daha dūřuk yoęunluęa yol aęabilir (Őksūz 1996).

Lityum ięeren alūminyum alařımlarının ōretim maliyetleri geleneksel alūminyum alařımlarına gōre ūç ila dōrt kat daha yūksek olabilir. Bu nedenle, bu alařımların aktif kullanımı ekonomik ve teknolojik aęıdan geliřtirilmeye aęalıřılmaktadır.

2.4.2 Dōkūm Alūminyum Alařımları

Dōkūm alařımların ōretimlerinde genellikle kum dōkūm, pres dōkūm ve sabit kalıp gibi yōntemler kullanılmaktadır. Bu alařımlar oldukęa yūksek fiziksel ōzelliklere sahiptirler. Ayrıca iřlenmeye elveriřli alařımlardır.

Dōkūm alūminyum alařımların kimyasal bileřimleri dōvme alūminyum alařımlarından farklıdır. En ōnemli alařım elementi silisyumdur (% 5-12). Silisyum ōtektik reaksiyon veren bir elementtir, silisyum ilavesi alařıma iyi akıcılık ve iyi dōkūlebilirlik ōzellięi saęlar (Askeland 1998).

Tablo 2.7 Dōkūm alūminyum alařımlarının gōsterimi (Askeland 1998)

Alūminyum	Alaşım Elementi
1xxx	Min. %99,0 Al
2xxx	Al-Cu
3xxx	Al-Si-Cu ya da Al-Mg-Si
4xxx	Al-Si
5xxx	Al-Mg
7xxx	Al-Zn
8xxx	Al-Sn

2.4.3 Isıl İşlem Uygulanabilen Alaşımalar

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlar, çözeltiye alma veya yapay yaşlandırma gibi ısıtma işlemleri ile yüksek mekanik özellikler kazanırlar. Alaşım, çözeltiye alma işlemi sırasında alaşım elementlerini veya bileşiklerini eklemek için yaklaşık 532°C'ye kadar ısıtılır ve ardından hızlı bir soğutma işlemi uygulanır. Genellikle bu işlem, aşırı doymuş bir çözelti elde etmek amacıyla su içinde gerçekleştirilir. Bu işlemi, genellikle yaşlandırma ısıtma işlemi takip eder.

Yaşlandırma işlemi, istenen mekanik özelliklere (akma özelliği) sahip olmak için aşırı doymuş çözümden bir miktar element veya bileşiğin çökeltmesini içerir.

Yaşlandırma yöntemleri 2 farklı türdedir. Birincisi; doğal yaşlandırma yöntemi (oda sıcaklığında yapılan), diğeri ise; yapay yaşlandırma (yüksek sıcaklıklarda yapılan). Genel olarak yapay yaşlandırma sıcaklıkları yaklaşık 160°C' dir. Çökeltme sonucunda, tanelerin içinde gözle görülemeyen çok küçük parçacıklar oluşur. Bu submikroskopik parçacıklar, kaymayı engelleyerek alaşımın sertleşmesine ve mukavemetinin artmasına katkı sağlar. Ancak, tavlama işlemi devam ederse bu taneler büyür ve görünür hale gelir. Bu durumda, büyümüş taneler kaymayı engelleyemez hale gelir ve alaşım kazandığı mukavemet özelliklerini kaybeder (Taban 2004). Çökeltme sertleştirme işlemi, her alaşım için farklıdır ve deneylerle belirlenmiştir. İstenen sonuçları elde etmek için belirlenen sıcaklık dereceleri ve süreler hassas bir şekilde uyulmalıdır.

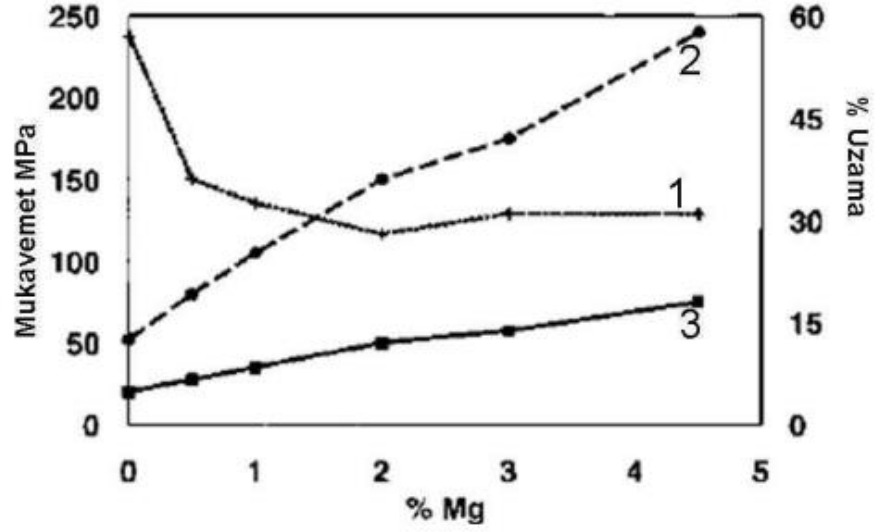
2.4.4 Isıl İşlem Uygulanamayan Alaşımalar

Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet özelliklerini şekil değiştirme sertleştirmeyle kazanırlar.

Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlar katı çözelti sertleştirme, soğuk işlem ve tanecik boyutunun kontrol edilmesi gibi yöntemlerle sertleştirilmesi sağlanır. Alüminyum içinde sadece bakır ve magnezyum katı çözelti sertleştirme uygulayabilir. Özellikle magnezyum ilavesi, akma ve çekme mukavemetlerini

artırırken, malzemenin uzama yüzdesini önemli ölçüde azaltır. Şekil 2.1’de Mg miktarına göre mukavemet değişimleri verilmiştir. (1-uzama, 2-çekme, 3-akma)

Bu yöntemler, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla kullanılır. Her bir alaşım türünün özelliklerine ve kullanım amaçlarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Alüminyum alaşımlarının dayanıklılığını ve kullanım ömrünü artırmak için şekil değiştirme sertleştirilmesi önemli bir süreçtir.



Şekil 2.1 Magnezyum ilavesine göre mukavemet değişimleri (Totten ve Mckenzie 2003)

2.5 Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti

Alüminyum alaşımları, hafiflik, yüksek mukavemet ve iyi korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılmaktadır. Bu alaşımların birleştirilmesi ise özellikle kaynak işlemleri yoluyla gerçekleştirilir. Ancak alüminyum alaşımlarının kaynak kabiliyeti, bazı özel özellikler ve zorluklar içerir. Alüminyumun yüksek termal iletkenliği ve düşük erime noktası, kaynak sırasında özel dikkat gerektiren faktörlerdir.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları birçok kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilir. Çeliklerin kaynak kabiliyetlerine kıyasla alüminyum malzemelere kaynak

işlemi uygularken alüminyuma özel bazı özelliklere dikkat edilmelidir. Alüminyumun termal iletkenliği, çelik malzemelerin termal iletkenliğinden yaklaşık altı kat daha fazladır. Alüminyum alaşımlarının özgül ısısının yüksek olması, alüminyum alaşımlarının kaynağı için daha fazla ısı girdisi gerektirir. Bu sebeple kaynak parametreleri devamlı olarak kontrol ve ayar gerektirir (Şafak 2011).

Alüminyum alaşımları, yüksek termal iletkenliğe sahip olduğundan kaynak nüfuziyeti daha düşüktür. Bu durum kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve gözenekler oluşmasına sebep olabilir (Şafak 2011).

Alüminyumun yüzeyindeki oksit 2050°C civarında ergir, bu sıcaklık değeri ana metalin ergime sıcaklığından yaklaşık 3 kat daha yüksektir. Kaynak işlemi sırasında ana metalin yüzeyde bulunan oksitten çok daha önce eriyeyeceği net olarak bellidir. Alüminyum oksijene maruz kaldığında yüzeyi hemen oksitlenir. Alüminyumun oksit kalınlığı ısıtma işlemleri ve nemli ortam şartları arttıracaktır (Welding Handbook 1970). Kaynağa başlamadan önce yüzeydeki oksit tabaka (Al_2O_3) uygun yollarla tamamen temizlenmelidir. Temizlik, kaynak boyunca aynı özen ve dikkatle yapılmalıdır. Temizlik, kaynak yapılacak ortamın ısı, nem miktarı vb. gibi şartları göz önünde bulundurularak belirli sürelerde tekrarlanmalıdır. Kaynak öncesi yapılabilecek farklı temizleme metodları vardır.

Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının kaynak sürecinde, doğal oksitler asal gaz arkı kullanılarak ayrıştırılabilir. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları ise belirli bir ısıtma işlemi için yüksek sıcaklığa çıkarıldığından, ısıtma işlemi uygulanamayan alaşımlardakinden daha kalın bir oksit tabakası oluşacaktır. Oksit tabakası giderilmediğinde yetersiz erimeye neden olabilir. Oksit tabakasını gidermek için, klorür ve florür içeren tozlar kullanılarak yapılan bazı birleştirme işlemlerinde, olası korozyon problemlerinden kaçınmak için birleştirme işleminden sonra bu tozların birleştirme bölgelerinden temizlenmesi gerekmektedir. Alüminyum oksit, elektriksel olarak yalıtıcıdır. Yeterince kalın bir tabaka oluştuğunda, arkın başlatılmasını, anodik kaplamalarda olduğu gibi engelleyebilir.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı esnasında, çeliğe göre daha fazla çarpılma meydana gelmektedir. Bu durumun sebebi alüminyumun ısı girdisinin

ve sıvı halden katı hale geçme sırasında hacim kaybının çeliğe göre daha fazla olmasıdır.

2.5.1 Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Direnç Kaynağı

Direnç nokta kaynağı, iki veya daha fazla metal parçanın birleştirilmesi işlemi için kullanılan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem, özellikle metal levhaların, tellerin veya farklı metal parçaların birleştirilmesi gerektiği endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Direnç nokta kaynağının temel prensibi, malzemeler arasından geçen elektrik akımına karşı bu malzemelerin gösterdiği dirençten kaynaklanan ısı ve aynı zamanda basıncın uygulanmasıyla gerçekleşen bir kaynak yöntemidir. Bu işlem sırasında, elektrik akımından sağlanan ısı dışında malzeme üzerine herhangi bir ek ısı uygulanmaz (Welding Handbook 1972).

Alüminyum levha yapıların imal edilmesinde nokta kaynağı yaygın olarak kullanılan pratik bir birleştirme yöntemidir. Tüm dövme alaşımlarda kullanılmasının yanı sıra sürekli döküm ve kum döküm alaşımlarda da kullanılabilir. Alüminyum alaşımları ve çeliklerin nokta kaynağı işlemi benzer prensiplere dayanır ve aynı temel ekipmanlar kullanılabilir. Her iki malzeme de elektrik akımına karşı direnç gösterdikleri için kaynatılabilirler. Ancak, kaynak parametreleri (rneğin, kaynak akımı, kaynak süresi vb.) ve bazı özel dikkat gerektiren ince ayrıntılar farklılık gösterebilir, nk alüminyum alaşımları ve çelikler farklı elektrik iletkenlik, termal iletkenlik ve erime sıcaklığı özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, malzeme tipine ve kalınlığına bağlı olarak belirli ayarlamalar yapılabilir, ancak temel kaynak prosedürleri ve ekipmanlar genellikle benzerdir (Welding Handbook 1972).

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, yüksek termal ve elektrik iletkenliğe sahiptirler. Bu nedenle, nokta kaynağı yaparken daha yüksek kaynak akımı değeri ve daha kısa kaynak süresi gereklidir. Bu durumda, aynı kalınlıktaki bir elik malzemeyi kaynak yaparken gereken birincil enerji miktarı, elik için gereken miktarın üzerindedir. En yüksek kaliteyi elde etmek için, sürekli veya kesintili doğru akım (DC) güç üreten kaynak makineleri tercih edilmelidir (Welding Handbook 1972).

3. PASLANMAZ ÇELİKLER

3.1 Genel Özellikler

Paslanmaz çelikler, kimyasal bileşimi sayesinde korozyona karşı dayanıklı yüksek alaşımlı özel bir çelik türüdür (Taban ve diğ. 2004).

Düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler genellikle korozyona karşı dayanıklı değildir. Paslanmaz çelik, içeriğindeki krom elementi sayesinde korozyona ve oksidasyona karşı dayanıklılık sağlar. Krom, mevcut oksijenle reaksiyona girerek çeliğin yüzeyinde yaklaşık 20-30 µm kalınlığında, yoğun ve sağlam pasif bir krom oksit tabakası oluşturur (Yüksel 2002). Bu tabaka, elektrolit ile anot-katot arasındaki bağlantıyı engelleyerek çeliğin yüzeyinde bir tür kaplama etkisi sağlar. En az %10,5 Cr içeren paslanmaz çeliklerde oluşan bu krom oksit tabakası, ortalama seviyedeki korozif etkilere karşı dayanıklılık gösterir (Can 2010).

CrO tabakası oksitleyici ortamlarda stabildir ancak indirgen ortamlarda stabilitesini kaybeder ve CrO tabakası incelmeye başlar. İncelen bu tabaka herhangi bir mekanik etki sonucunda hasar görebilir. Bu gibi şartlarda, eğer ortam oksitleyici ise tabaka kendi kendini onarır. Cr, Ni, Mo içeriğinin artması CrO tabakasının stabilitesi artırır ve bu sayede daha şiddetli korozif ortamlara karşı çeliğin korozyon direnci artmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda krom sayesinde mekanik özellikler korunur.

Paslanmaz çelikler, olağanüstü korozyon dayanıklılığına ek olarak yüksek ve düşük sıcaklıklarda kullanılabilme kabiliyeti, farklı mekanik özelliklere sahip çeşitlerin bulunması, şekillendirme kolaylığı ve estetik görünüm gibi özellikleriyle dikkat çeker (Aran ve Temel 2004).

3.2 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması ve Uygulama Alanları

Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi, paslanmaz çeliklerin özelliklerini ve kullanım alanlarını belirlemede kritik bir rol oynar. Özellikle krom, nikel, molibden ve manganez gibi elementlerin içerik oranları paslanmaz çeliklerin iç yapısını ve genel özelliklerini belirler.

Paslanmaz çelikler 5 ana gruba ayrılırlar. Bu gruplar aşağıda Tablo 3.1’de belirtilmiştir (ASM Handbook 1992).

Tablo 3.1 Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması (ASM Handbook 1992)

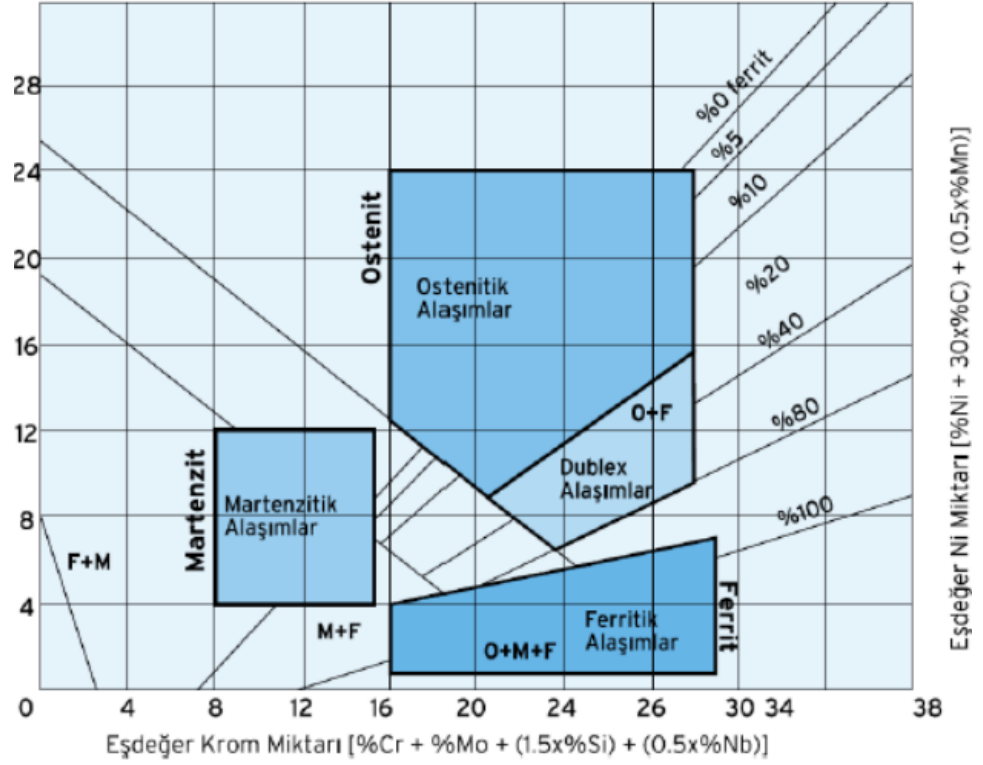
Östenitik Paslanmaz Çelikler
Ferritik Paslanmaz Çelikler
Östenitik-Ferritik Paslanmaz Çelikler
Martenzitik Paslanmaz Çelikler
Çökelme Sertleştirilmesi Uygulanabilen Paslanmaz Çelikler

Molibden, silisyum ve niyobyum gibi elementler, krom alaşım elementi gibi davranarak östenitik bölgeyi daraltabilir. Diğer yandan, karbon ve mangan gibi elementler, nikel alaşım elementi gibi östenitik bölgeyi genişletebilirler (Can 2010).

Paslanmaz çelik gruplarının her biri kendine özgü mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca, her bir grup bazı korozyon durumlarına karşı hassasiyet veya dayanım bakımından farklılık gösterir. Bununla birlikte, her bir grup belirli sınırlar içinde bir bileşim aralığına sahiptir. Bu nedenle, her bir grup geniş bir yelpazedeki korozyon ortamlarında kullanılabilir (ASM Handbook 1992).

Paslanmaz çelikler içerisinde %95’e oranında en yaygın olarak kullanılan çelikler östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerdir (Davis 1994).

Paslanmaz çeliklerin eşdeğer krom ve nikel miktarına göre sınıflandırılması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Schaeffler diyagramı (Sarıtaş 2012)

EN ve AISI standartları paslanmaz çeliklerin gösteriminde yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI standardında östenitik paslanmaz çelikler 200 ve 300'lü sayılar ile ifade edilirken, 400'lü sayılar ise ferritik ve martenzitik paslanmaz çelikleri ifade eder (Yüksel ve Meran 2010).

3.2.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, özellikle yüksek krom (genellikle %18) ve nikel (genellikle %8) içeriği ile karakterize edilen bir çelik türüdür. Bu özellikler, östenitik paslanmaz çeliklere bir dizi avantaj sağlar ve bu çelikleri birçok endüstriyel ve ticari uygulama için mükemmel bir seçenek haline getirir.

3.2.1.1 Genel Özellikleri

Yüksek korozyon direnci: Östenitik paslanmaz çelikler, çeşitli kimyasal ortamlara ve nemli koşullara karşı çok yüksek korozyon direncine sahiptirler. Bu özelliği sayesinde, denizcilik, gıda işleme, kimyasal endüstri ve tıp ekipmanları gibi uygulamalarda çok değerlidir.

Mükemmel kaynaklanabilirlik: Bu çelik türü, kolayca kaynaklanabilir ve şekil verilebilir. Bu, karmaşık tasarımların ve özel parçaların üretilmesini kolaylaştırır.

Dayanıklılık: Östenitik paslanmaz çelikler, sıcaklık değişikliklerine karşı dirençlidirler ve düşük sıcaklıklarda bile mukavemetlerini korurlar.

Estetik değer: Parlak, paslanmaz çelik yüzeyleri, estetik olarak modern bir görünüme sahiptir, bu sebeple ev eşyaları, iç mekan tasarımı ve otomotiv gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır.

3.2.1.2 Uygulama Alanları

Gıda işleme endüstrisi: Östenitik paslanmaz çelikler, gıda işleme ekipmanlarının ve mutfak gereçlerinin yapımında yaygın olarak kullanılır.

Kimyasal endüstri: Kimyasal reaktörler, borular ve depolama tankları gibi kimyasal işlemlerde kullanılırlar. Kimyasal maddelere karşı dayanıklılıkları bu endüstri için idealdir.

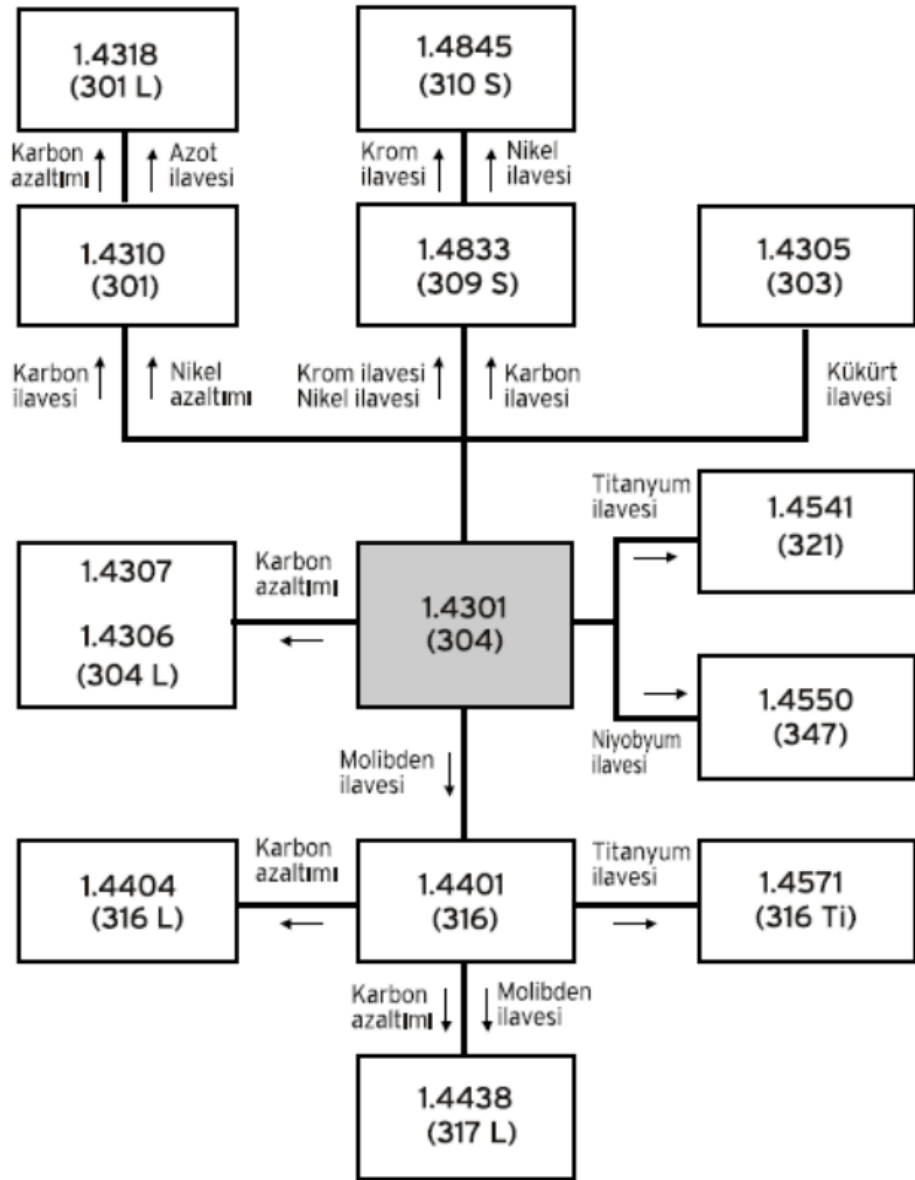
Tıp ve sağlık: Paslanmaz çelik, cerrahi aletler, diş implantları, protezler ve tıbbi ekipmanların üretiminde yaygın olarak kullanılır.

Denizcilik ve deniz uygulamaları: Tuzlu suya karşı dayanıklılıkları nedeniyle gemi yapımında, denizaltılar ve deniz platformları gibi uygulamalarda kullanılırlar.

Otomotiv endüstrisi: Paslanmaz çelikler, otomobil egzoz sistemlerinde ve iç mekan tasarımında estetik ve dayanıklı bir seçenek olarak kullanılır.

Yapı ve İnşaat: Bina dış cephe kaplamaları, asansörler ve merdiven korkulukları gibi inşaat uygulamalarında estetik ve dayanıklılık nedeniyle tercih edilirler.

Östenitik paslanmaz çelikler, geniş bir uygulama yelpazesi sunan çok yönlü malzemelerdir. Dayanıklılık, korozyon direnci ve estetik değerleri nedeniyle farklı sektörde önemli bir rolü vardır.



Şekil 3.2 Östenitik paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması (Saritaş 2012)

3.2.2 Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, düşük karbon içeriğine sahip olan paslanmaz çelik türleridir. Bu çeliklerin bileşiminde %12-18 oranında krom bulunur. Yüksek derecede korozyon direncine sahiptirler ve korozyon dirençlerini artırmak için krom miktarı artırılabilir. Ayrıca, molibden (Mo), silikon (Si), alüminyum (Al), titanyum (Ti) veya niyobyum (Nb) gibi elementlerin eklenmesiyle korozyon özellikleri daha da geliştirilebilir. Talaşlı işlemeyi kolaylaştırmak için sülfür (S) elementi de eklenmiş olabilir (Sakarya 2018).

Ferritik paslanmaz çelikler manyetik özelliklere sahiptirler ve kaynaklanmaları neredeyse imkansızdır. Östenitik çelikler kadar kolay şekillendirilemezler, ancak daha düşük paslanmazlık özelliklerine sahip oldukları için, paslanmazlık özelliği çok kritik olmayan alanlarda daha sık kullanılırlar (Temel; Aran, 2004).

3.2.3 Martenzitik paslanmaz çelikler

Çeliklerde karbon miktarı %0,1'in üzerinde olduğunda, östenitleme sıcaklığı türüne bağlı olarak 950-1050 °C arasında değişebilir. Bu sıcaklıklarda çelik suya maruz bırakılırsa, iç yapısı martenzitik hale dönüşür. Martenzitik iç yapı, mekanik dayanım özelliklerini artırır ve sonuç olarak çok sert bir malzeme elde edilir (Temel; Aran, 2004).

Bu tür çeliklerin korozyon dayanımı genellikle ortalama düzeydedir. Daha yüksek bir sertlik ve dayanım elde etmek için ısıl işlem uygulanması gerekebilir. Bu çeliklerin kaynaklanma kabiliyeti düşüktür ve manyetik bir yapıya sahiptirler (Temel; Aran, 2004).

3.2.4 Dupleks (östenitik-ferritik) paslanmaz çelikler

Dupleks paslanmaz çelik, krom oranı %18-28 ve nikel oranı %4-8 arasında olan bir çelik türüdür. Nikel oranı östenitik yapı için yeterli olmadığından, bu çelikler hem östenitik hem de ferritik yapıya sahiptir. Bu nedenle, çok yüksek mukavemet ve

süneklik özelliklerine sahiptirler. Aynı zamanda, çok iyi kaynak edilebilirler ve yüksek şekillendirilebilme özelliğine sahiptirler.

3.2.5 Çökelme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler

Bu türdeki paslanmaz çelikler, östenitik, yarı-östenitik veya matenzitik iç yapıya sahip olabilirler. Bu çelikler, alüminyum, titanyum, bakır ve nikel gibi elementlerle alaşımlanarak, çökelti oluşumu sağlanır. Bu sayede, çeliklerin mekanik dayanımı arttırılır.

Bu seri paslanmaz çelikler, korozyon dirençleri çok iyi derecededir. Ayrıca, manyetik yapıdadırlar.

3.3 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında karşılaşılan sorunlar aşağıdaki gibidir (Odabaş 2007).

3.3.1 Krom karbür oluşumu

Oda sıcaklığında, karbonun difüzyon hızı oldukça düşüktür, bu nedenle krom karbür oluşumu oda sıcaklığında meydana gelmez. Fakat kaynak sıcaklığı 450 °C'nin üzerine çıktığı durumda, difüzyon hızı artar ve karbon, malzeme tane sınırları boyunca birikmeye başlar. Karbon ve kromun hızlı bir şekilde kimyasal tepkimeye girmesi sonucunda tane sınırları boyunca krom karbür oluşumu başlar.

Krom karbür, kromun %23'ü ve karbonun %6'sı ile oluşan bir bileşiktir. Krom karbür oluşumu, malzemedeki krom oranının önemli miktarda azalmasına neden olur. Bu durum, malzemenin korozyon direncini büyük ölçüde azaltır.

Korozyon direnci azalan malzeme zamanla işlevini yerine getiremeyebilir. Bu durumu önlemek için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir:

- Düşük karbonlu çelikler kullanılabilir. Bu çelikler, krom karbür oluşumunu azaltmak için daha düşük karbon oranına sahiptir.
- Kaynak işleminden önce ön tav uygulaması yapılmamalıdır. Ön tav uygulaması, kaynak sıcaklığını düşürerek krom karbür oluşumunu azaltabilir.
- Kaynak sırasında bakır altlık gibi yardımcı malzemeler ile kaynak bölgesinin hızlı bir şekilde soğuması sağlanabilir. Bu durumda, krom karbür oluşumu için gerekli süre kısaltılır.
- Çok pasolu kaynak yerine, tek pasolu kaynak tekniği tercih edilebilir. Çok pasolu kaynakta, her pasajda kaynak bölgesi daha uzun süre sıcak kalır. Bu, krom karbür oluşumunu artırabilir.

Bu yöntemler, krom karbür oluşumunu azaltarak paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımını korumaya yardımcı olur.

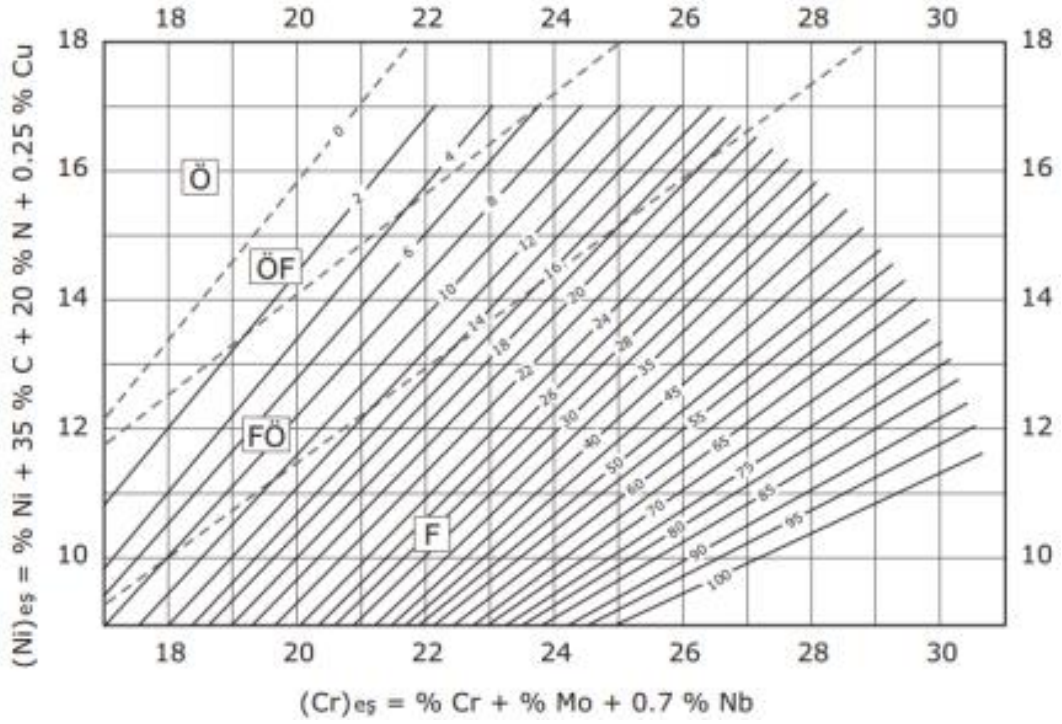
3.3.2 Sıcak çatlak oluşumu

Sıcak çatlaklar, malzemenin işlenmesini kolaylaştıran kükürt ve fosfor gibi elementlerin tane sınırlarında birikmesi sonucu meydana gelir. Bu iki element düşük ergime sıcaklıklarına sahiptir. Bu nedenle, kaynak sırasında ısı etki bölgesinde (IEB bölgesi) bulunurlarsa, kaynak sonrası uygulama bölgesi soğurken gerilme nedeniyle çatlaklar oluşabilir.

Sıcak çatlak önlemek için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir:

- Malzemenin mikro yapısı ferrit olacak şekilde ayarlanır. Bu, malzemenin fosfor ve kükürt içeriğinin azaltılmasıyla sağlanabilir.
- Fosfor ve kükürt oranı düşük malzeme tercih edilebilir. Fakat bu durumun dezavantajı ise daha pahalı malzeme kullanımına sebep olabilir.

Bu sorunu çözmek için, iç yapıdaki ferrit miktarının en az %4 olması tavsiye edilir. Ferrit içeriği, Schaeffler diyagramı kullanılarak belirlenebilir. Ancak günümüzde, azotun etkisini de hesaba katan WRC-DeLong diyagramıyla değiştirilmiştir.



Şekil 3.3 WRC diyagramı (Odabaş 2007)

3.3.3 Sigma fazı oluşumu

Sigma fazı, malzemede son derece kırılğan bir yapı oluşturur. Genellikle 550-950°C sıcaklık aralığında meydana gelir. Sigma fazının iç yapısı, yaklaşık %50 krom ve %45 demir içermektedir.

Genellikle ferritik paslanmaz çeliklerde sigma fazı gözlemlenirken, aynı zamanda nikel oranı %10'dan az olan östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinde de bulunabilir.

Sigma fazının önlenmesi için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir:

- Malzeme üzerine ısı işlem uygulaması yapılır. 900-1100 °C sıcaklık aralığında yapılan ısı işlem, ferrit miktarını azaltarak sigma fazını giderir.
- Malzeme iç yapısı %7'den az oranda ferrit içerecek şekilde seçilir. Bu şekilde, sigma fazının oluşma riski azaltılır.

3.3.4 Delta ferrit

Delta ferrit fazı, paslanmaz çeliklerde istenmeyen bir fazdır. Bu faz, sıcak şekillendirmeyi zorlaştırır ve çatlak oluşma riskine sahiptir.

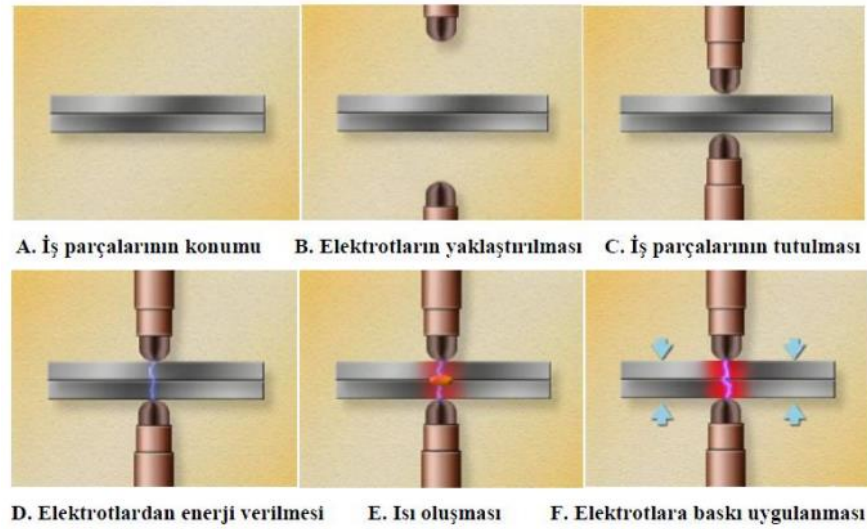
Delta ferrit fazının oluşması, sert ve gevrek sigma fazının oluşmasına neden olur. Bu durum, malzemenin mukavemetini azaltır ve malzemenin şekil verilebilirliğini zorlaştırır.

4. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

4.1 Nokta Direnç Kaynağı Yöntemi

Direnç kaynağı birbiri üzerine bindirilmiş sac levhaların arasındaki arayüzey boyunca akan akımın, malzemelerin temas yüzeylerini ısıtması etkisiyle oluşan bir birleştirme metodu olup, saclardan geçen akımın ürettiği ısı miktarını ifade eden Joule'nin birinci yasasına dayanır. Arayüzey, akımın akışına karşı bir direnç oluşturur ve sarf edilen enerji ısıya dönüşür (Şekil 4.1). Çıkan ısı, uygun donanımlar ile birçok kaynaklı birleştirme işleminde kullanılır. Bu yöntem ek bir ısı kaynağı gerektirmez.

Kaynak işlemi için gereken kaynak akımı, bir kaynak makinası ile sağlanır. Kaynak işlemi için gerekli olan elektrod basıncı ise mekanik donanımlar aracılığıyla uygulanır. Kaynak işleminin ardından parçaların elektrotlara yapışmasını engellemek ve elektrotların soğumasını hızlandırmak amacıyla su veya hava soğutmalı elektrotlar tercih edilir (Hıdıroğlu 2022).



Şekil 4.1 Direnç kaynağı aşamaları (Anonim 2012)

Elektrik direnç kaynağı yöntemi, ilave malzeme kullanmayı gerektirmeyen bir yöntem olduğundan dolayı, hafiflik sağlama, yüksek kaynak mukavemeti sunma, estetik görünüm elde etme, özel kaynak becerisi gerektirmeme ve yüksek kaynak hızı

gibi nedenlerle günümüzde özellikle otomotiv, uçak endüstrisi ve metal eşya imalatında sıkça tercih edilmektedir. Direnç kaynağı yöntemi, ısıl işleme izin veren tüm metal ve metal alaşımlarına uygulanabilir (Aras 2016).

4.2 Nokta Kaynak Kalitesini Etkileyen Kaynak Değişkenleri

Nokta kaynak kalitesini etkileyen değişkenler aşağıdaki gibidir:

- Kaynak akımı ve kaynak zamanı
- Elektrotların malzemesi ve boyutları
- Elektrot baskı kuvveti
- Kaynak edilecek parçanın malzemesi
- Kaynak edilecek parçanın yüzey durumu

Direnç kaynağını özellikle akım, kuvvet ve zaman parametreleri etkiler.

4.2.1 Kaynak akımı ve kaynak zamanı

Direnç nokta kaynağı yönteminde ısı Joule yasasına göre oluşur. Akımın en önemli kaynak parametresi haline gelmesinin başlıca sebebi Joule yasasında akımın karesinin yer almasıdır.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot T \quad (4.1)$$

Q-ısı enerjisi (Watt-sn veya Joule),

I-akım (A),

R-direnç (Ohm),

T-akımın geçtiği süredir (sn).

Kaynak sırasında oluşan ısının bir bölümü elektrodlardan ve iş parçalarından kaybolur.

Akım yoğunluğu için erimenin gerçekleşmediği bir alt sınır mevcuttur. Elektrot yüzeyinde, çevredeki havada ve elektrotlar arasındaki iletim sırasında kaybolan ısıyı karşılamak üzere yeterli ısı üretilmelidir (Akyol 2001). Kaynak akımı için aynı şekilde bir üst sınır vardır. Eğer kaynak akımı çok yüksekse, elektrotlar arasındaki metal tamamen erime sıcaklığına ulaşır, plastik bölgeye kadar ısınır ve elektrotlar metale derinlemesine gömülür. Elektrod yüzeyleri aşırı ısınabilir hatta yanabilir. Bu üst sınırın üzerindeki değerlerde, erimiş metal kaynak bölgesinde, levhalar arasında ve dışarı doğru sıçrayabilir. Elektrod ve sac temas yüzeylerinde erime meydana gelir ve elektrotlar levhalara yapışarak zarar görebilir. Sonuç olarak, kaynak kalitesi düşer (Akyol 2001).

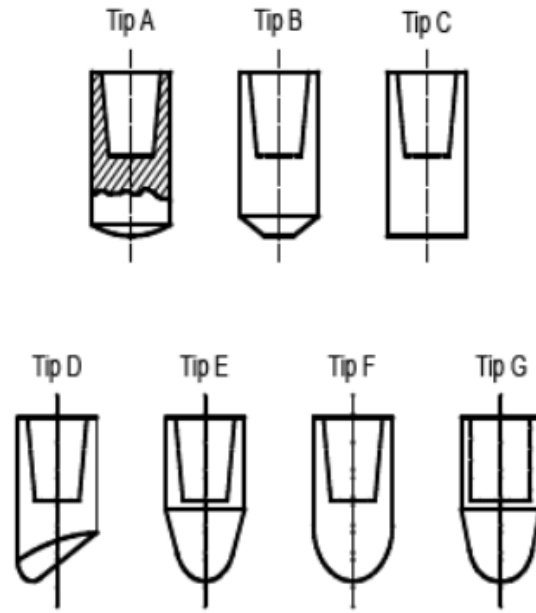
Kaynak akımı dikkatlice seçilmelidir. Eğer kaynak akımı yetersizse, ısı birikmeden kaybolur ve yeterli füzyon gerçekleşmez. Düşük akım seviyeleri, minimum çekirdek çapından daha küçükse, kırılğan kaynak oluşumuna yol açabilir (Gallagher 2003). Aşırı yüksek kaynak akımı ise sac kalınlığı boyunca plastik bölgeye ısınmaya neden olabilir ve erimiş metal aşırı kıvılcım çıkmasına yol açabilir (Ünlükal 2007).

Kaynak süresi, üretilen ısı miktarını etkileyen faktörlerden biridir. Aynı zamanda, kaynak süresi, kullanılacak akım değeri, malzeme kalınlığı ve bileşimi gibi parametreler göz önünde bulundurularak belirlenir. Eğer kaynak süresi kısa tutulursa, yetersiz bir kaynak oluşabilir. Bu durum zamanla kaynağın kopmasına veya yetersiz kaynak oluşumuna yol açabilir. Ancak süre uzun tutulursa, ergimiş bölge genişler ve uygulanan elektrot kuvveti ile patlama veya diğer tür hasarlar meydana gelebilir (Araş 2016).

4.2.2 Elektrotların malzemesi ve boyutları

Saf bakır en iyi iletkenidir ve ilk kullanılan elektrotlar saf bakırdan imal edilmiştir. Daha sonra bu elektrotların sahip oldukları düşük elektriksel iletkenlik ve düşük mekanik özelliklerden dolayı farklı bakır alaşımlı elektrotlar kullanılmaya

başlanmıştır. Genel anlamda kullanılan alaşımın sertliğinin artması elektrotun ısı ve elektriksel direncini yükseltir. Yapılacak kaynak işlemine göre uygun geometriye sahip elektrotlar kullanılmalıdır. Şekil 4.2’de TS EN 2582 ye göre bazı elektrot geometrileri verilmiştir. Tablo 4.1’de bakır alaşımlı elektrotlara ait özellikler verilmiştir.



Şekil 4.2 Direnç nokta kaynağı elektrot başlıkları (Megep 2007)

Tablo 4.1 Nokta direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımları (Eryürek 1982)

Alaşım Cinsi	Brinell Sertliği (kg/mm ²)	İletkenlik (% Saf Bakır)	Yumuşama sıcaklığı (°C)	Kullanıldığı iş parçası
Bakır	95	90	150	Alüminyum
Tellür-Bakır	100	90	175	Alüminyum
Kadmiyum-Bakır	110	85	250	İnce yumuşak çelik sac
Krom-Bakır	150	80	500	Tüm çelikler
Tungsten-Bakır	200-300	30	1000	Çelik ve bakır alaşımları

Bir uygulama için uygun elektrot alaşımının seçimi, elektrodun mekanik özelliklerinin yanı sıra ısı ve elektriksel özelliklerini de dikkate alınarak yapılır. Örneğin, alüminyumun kaynağı için kullanılan elektrotlar yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır; çünkü yüksek basma kuvveti yerine iletkenliğin daha önemli olduğu durumlar söz konusudur. Öte yandan, paslanmaz çeliğin kaynağı için kullanılan elektrotlarda, maksimum basma mukavemetini sağlamak amacıyla iletkenlikten fedakârlık edilebilir (Esindir 2008).

4.2.3 Elektrot kuvveti

Elektrot kuvveti, kaynak noktasının hassas bir şekilde belirlenmesi amacıyla levhaların elektrotlar altında belirli bir alanda temas etmesini sağlar. Kaynak aşamasında elektrot kuvvetinin rolü, levhalar arasından fişkırmaya çalışan sıvı metali, katı haldeki metalin içinde basınç altında tutarak sıçramayı engellemektir. Dövme aşamasında ise elektrot kuvveti, kaynak dikişinin sıvı halinden itibaren soğuyup katılaşmasına kadar olan süreçte meydana gelebilecek boşluklar, çatlaklar gibi kusurların oluşumunu önlemek amacıyla kullanılır. Elektrot kuvveti arttıkça, levhalar arasındaki temas direnci azalır ve bu da kaynak akımının artırılmasını gerektirebilir. Ancak çok yüksek elektrot kuvveti ise levhalarda istenmeyen bozulmalara sebep olabilir.

4.2.4 İş parçasının malzemesi

Metallerin bileşimi, özgül ısı kapasiteleri, erime sıcaklıkları, latent erime ısıları, ısı ve elektriksel iletkenlikleri ile yoğunluklarını etkiler. Metaldeki ısı ve elektrik iletkenliği genellikle aynı doğrultuda benzer şekillerde değişir. Bu nedenle bakır, gümüş, alüminyum gibi metallerin yüksek elektrik iletkenliği ve yüksek ısı iletkenliği sayesinde, yüksek akım yoğunluğunda bile üretilen az miktardaki ısı hızla yayılır ve erime için gereken ısı birikimini engeller. Bu da kaynak işlemini zorlaştırır veya bazen imkânsız hale getirir. Diğer taraftan birçok metal, birim kütlelerini erime sıcaklığına yükseltmek için gereken ısı miktarı açısından benzerdir. Örneğin, farklı nokta kaynağı özelliklerine sahip alüminyum ve paslanmaz çeliğin erime sıcaklığına

ulaşması için birim kütleleri başına yaklaşık aynı miktarda ısı verilmelidir. Ancak alüminyumun elektrik ve ısı iletkenliği, paslanmaz çelikten çok daha büyüktür. Bu nedenle, alüminyum için gerekli olan kaynak akımı, paslanmaz çelik için gereken akımdan çok daha fazla olabilir.

4.2.5 İş Parçasının Yüzey Durumu

Kaynak yapılacak iş parçalarının yüzey durumu, temas direnci yoluyla ısı üretimini etkiler. Eğer yüzeyler temizse, belirli bir uygulamada her zaman aynı kalitede kaynak noktası elde edilir. Ancak iş parçasının yüzeyinde oksit veya pul gibi oluşumlar bulunuyorsa, farklı kalitelerde kaynak noktalarının oluşmasına neden olabilir. Bu tür oluşumlar, akımın iletimini zorlaştırabilir ve aynı zamanda elektrot yüzeylerine yapışarak elektrot ömrünü kısaltabilirler (Esindir 2008).

4.3 Kaynak Çevrimi

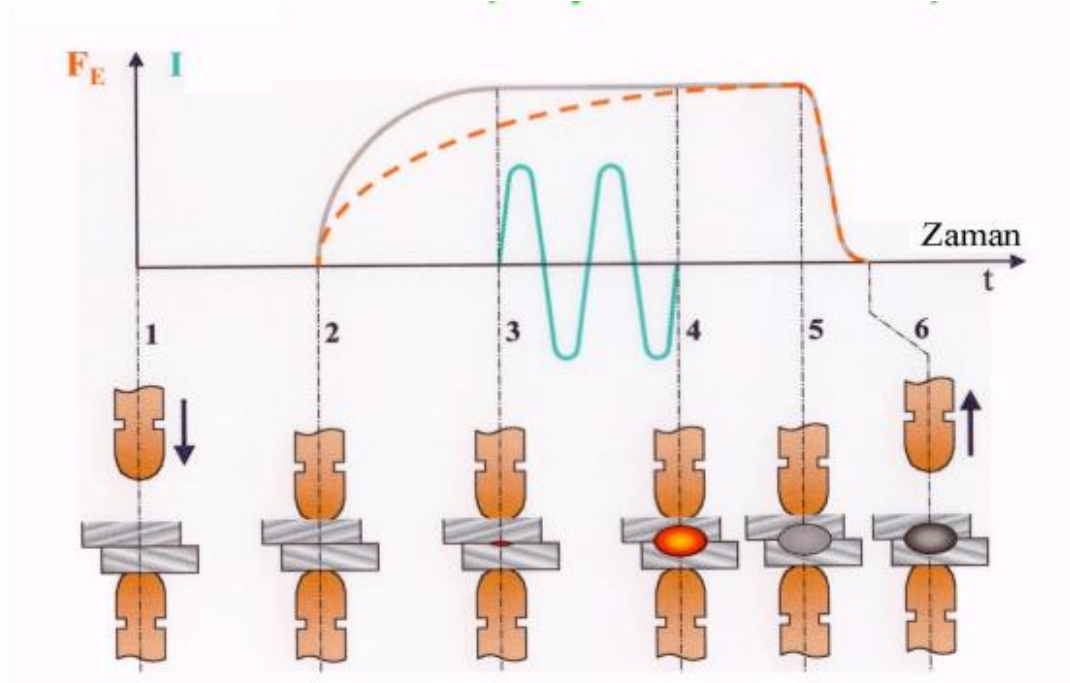
Nokta kaynak yönteminde, metal parçaların birleştirilmesi için kullanılan işlem adımlarının tümüne "kaynak çevrimi" denir. Bu çevrim Şekil 4.3'te gösterilen aşamalardan oluşur:

1-2. Yaklaşma ve sıkma zamanı: Elektrotların birbirine yaklaşarak saca temas ettiği ve iki sacı sıkması için geçen süredir.

3-4. Kaynak zamanı: Birleştirilen saclara düşük gerilimde yüksek akım şiddetinde akımın uygulanma süresidir.

5. Tutma zamanı: Elektrotlar iş parçası üzerinde kapalı ve baskı konumundayken, kaynak noktasının elektrotlar içindeki su sirkülasyonu ile soğutulması ve bağlantının tam olarak gerçekleşmesi için geçen süredir.

6. Ayrılma zamanı: Kaynak işleminin tamamlanmasının ardından elektrotların birbirinden ayrılıp iş parçalarının bir sonraki nokta kaynağı için hazır konuma getirildiği aşamadır. Bu evre çok kısa sürede gerçekleşir.



Şekil 4.3 Kaynak çevrimi (Ünlükal 2007)

4.4 Kaynak Hataları ve Nedenleri

Nokta kaynak işlemi sırasında yüksek kaliteli kaynak noktasının elde edilebilmesi için, malzemelerin kalınlığı, kaynak parametreleri, iş parçalarının yüzey durumları ve kaynak yapılacak malzemelerin özellikleri ile teçhizatın elektriksel ve mekanik uyumunun ayrıca elektrot bakımının iyi bir şekilde kontrol edilmesine bağlıdır. Bu kontrollerin etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, kaynak hatalarının türlerini ve bu hataların nedenlerini tam anlamıyla anlamak gereklidir (Almus 2006).

Bu hatalar iç ve dış hatalar olmak üzere iki gruba ayrılır.

4.4.1 İç hatalar;

İç hatalar, parçaların içinde oluşan ve özellikle kaynak noktasıyla ilgili olan hata türüdür. İç hataların, mekanik dayanımlar üzerinde doğrudan etkileri vardır (Almus 2006).

4.4.1.1 Kaynak nüfuziyeti

Nokta kaynakta "kaynak nüfuziyeti", ergimiş metalin kaynak elektrotları arasında yer alan ve birleşen metal parçalarına ne kadar derinlemesine yayıldığını ifade eder. Bu, kaynak işleminin kalitesini ve dayanıklılığını etkileyen önemli bir faktördür. Kaynak nüfuziyeti, metal parçalarının birleştirildiği ve ergimiş metalin yayıldığı bölgede ortaya çıkar.

Nokta kaynakta kaynak nüfuziyeti genellikle metalin cinsine, kalınlığına, elektrik akımına, kaynak süresine ve elektrot basıncına bağlı olarak değişebilir. Uygun bir kaynak nüfuziyeti, iki metal parçasının birleştirildiği noktada yeterli metalin birleşmesini sağlar, böylece istenilen kaynak kalitesi ve mukavemet elde edilir.

4.4.1.2 Yetersiz nüfuziyet

Kaynak işlemlerinde nüfuziyetin %20'nin altında olduğu durumu ifade eder. Bu tür zayıf nüfuziyet durumu, akım, zaman ve elektrot kuvveti gibi normal değişimler nedeniyle oluşabilir. Yetersiz nüfuziyetin nedeni düşük kaynak akımı, çok yüksek kaynak basıncı, uygun olmayan elektrot ucu gibi faktörler olabilir (Almus 2006).

4.4.1.3 Aşırı nüfuziyet;

Kaynak işlemlerinde nüfuziyet %80'den daha fazla olduğunda, aşırı nüfuziyet sorunu ortaya çıkabilir. Bu durum fışkıрма, çatlaklar ve gözenekler gibi hatalara yol açabilir. Aşırı nüfuziyetin nedenleri arasında yüzey durumunun uygun olmaması,

elektrot ucunun uygun olmaması ve yetersiz kaynak basıncı gibi faktörler etkili olabilir (Almus 2006).

4.4.1.4 Simetri

İyi bir kaynak noktası, yatay ve dikey eksen konumlarında simetrik olmalıdır. Sabit bir kaynak kalitesi elde etmek için homojen bir şekilde oluşturulmuş, uygun bir konumda bulunan ve birleşme içinde düzenli olarak yer alan noktalar arzu edilir. Simetrik olmayan kaynak noktaları parçaların düzgün hizalanmaması gibi sebeplerden oluşabilir (Almus 2006).

4.4.1.5 Gaz kabarcıkları ve gözeneklilik

Kaynak akımının ve basıncının uygun olmayan şekilde uygulanması, genellikle gözenekli bir kaynak yapısına yol açabilir. Gözeneklilik durumunda ise bu genellikle yetersiz kaynak basıncının bir sonucudur.

4.4.1.6 İç çatlaklar

Kaynak sırasında meydana gelen iç çatlaklar, çeşitli yöntemlerle tespit edilebilirler. Radyografi ile tahribatsız bir şekilde veya kaynağın kesit alınarak tahribatlı bir inceleme ile ortaya çıkarılabilirler. Bu iç çatlaklar kaynak bölgesinde enine veya boyuna doğru konumlanabilirler. Bu tür çatlaklar, ısının etkisi altında kalan bölgeden kaynak bölgesine kadar uzanabilir veya sadece kaynak bölgesi içinde sınırlı kalabilir. İç çatlakların oluşumuna düşük kaynak basıncı, yüksek kaynak akımı, elektrotların hizalarının düzgün olamaması, elektrotların yeteri kadar soğutulmaması gibi durumlardan biri veya birkaçı neden olabilir (Almus 2006).

4.4.2 Dış hatalar;

Dış hatalar genellikle gözle görülebilen hata grubudur. Bu gruptaki hatalar kaynak mukavemetini önemli derecede etkilemektedir (Almus 2006).

4.4.2.1 Yüzeş yanması

Yüzeş yanması, elektrotlarla temas halindeki metal malzeme yüzeyinin erimesi olarak tanımlanır. Bu durum, yüksek akım, yüksek basınç ve uzun süreli kaynak işlemleri sırasında kaynak metalinin yüzeyinde meydana gelen aşırı ısınma durumunu ifade eder. Bu tür durumlar kaynak kalitesini ve görünümünü olumsuz etkileyebilir. Yüzeş yanmasının nedeni elektrot temizliğinin yetersiz olması, uygunsuz yüzey durumu, düşük basıncı, çok yüksek kaynak akımı, parçaların uygun olmayan konumları, elektrot malzemesinin yanlış seçimi, elektrotların yeteri kadar soğutulmaması gibi durumlarından biri veya birkaçı olabilir (Almus 2006).

4.4.2.2 Levha ayrılması

Levha ayrılması, kaynak noktasının etrafındaki parça yüzeylerinin ayrılması olarak tanımlanır. Bu ayrılma durumu, iki dış levhanın ortalama kalınlığının %10'unu geçmiyorsa genellikle normal olarak değerlendirilir. Ancak makaslama kuvveti uygulandığında birleşim bölgesindeki eğilme momentinin artması nedeniyle aşırı ayrılma istenmeyen bir durum olarak kabul edilir.

Levha ayrılmasının nedenleri arasında elektrot ucunun küçük olması, yüksek kaynak akımı, yüksek kaynak basıncı, yüksek kaynak zamanı ve hizalama hatası olan elektrotlar gibi durumlardan biri ya da birkaçı etkili olabilir (Almus 2006).

4.4.2.3 Fışkıрма

Kaynak bölgesinde fışkıрма, genellikle kaynak işlemi sırasında meydana gelen ve ergimiş metalin kaynak noktasının çevresine taşarak dışarı çıkması durumunu ifade

eder. Fıskırma, kaynak elektrotunun oluşturduğu ısı ve basınç etkisiyle oluşur. Ergimiş metal, kaynak bölgesinde yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınç altında olduğundan, ergiyen malzeme ani buharlaşma ve genişleme ile çevresine yayılabilir.

Fıskırma, genellikle aşırı ısınma, yetersiz elektrot kuvveti veya şekli, uygun olmayan kaynak parametreleri, yüzey kirliliği veya oksit tabakasının varlığı gibi faktörlerin bir kombinasyonu sonucunda meydana gelir. Elektrot basıncı yetersiz ise, ergimiş metal daha fazla yayılabilir ve fıskırma daha olası hale gelir. Aynı şekilde, malzeme yüzeyindeki kirlilik veya oksitler, ergimiş metali düzgün bir şekilde birleştiremez ve fıskırmanın oluşmasına neden olabilir.

4.4.2.4 Distorsiyon

Distorsiyon, kaynakların iş parçasının kenarına çok yakın bir şekilde yapıldığı zaman meydana gelen bir hata türünü ifade eder. Deformasyonu kontrol altına almak, uygun seviyede mukavemet sağlamak ve aynı zamanda kenar çatlamlarını azaltmak için uygun bir kenar mesafesi belirlenmelidir. Yüzey distorsiyonu yüksek kaynak basıncı, yüksek kaynak akımı, uygunsuz kenar mesafesi ve parçanın uygun konumlanmaması gibi durumların sonucunda ortaya çıkabilir (Almus 2006).

4.4.2.5 Aşırı ezilme

Aşırı ezilme, kaynak yüzeylerinde derin çukurlaşmaların meydana gelmesidir. Elektrot basıncı, kaynak metalinin düşey genişlemesini sınırladığı için belli bir düzeyde ezilmenin kaçınılmaz olduğu anlamına gelir. Kabul edilebilir sınırlar genellikle ezilmenin etkilediği levhanın kalınlığının %10-20 arasında değişebileceği şeklindedir. Derin bir ezilme durumu, kaynak noktasının çevresindeki metal malzemenin kalınlığının azalmasına yol açar. Bu da mukavemet kaybına neden olabilen bir etkidir. Aşırı ezilmeye yüksek kaynak akımı, yüksek kaynak basıncı ve çok küçük elektrot ucu gibi faktörler neden olabilir (Almus 2006).

4.4.2.6 Dış çatlaklar

Dış çatlaklar nokta kaynağın yüzeyine doğru ilerleyen çatlaklardır. Kaynak basıncı, aşırı sıcaklığın oluşmasını engellemek için yeterli derecede yüksek olmalıdır. Düşük basınç değerleri, temas direncinin artmasına yol açabilir. Aynı zamanda, ergimiş bölgenin uygun şekilde soğumasını sağlamak için basınç yeterli süre boyunca uygulanmalıdır. Yüzey çatlakları ayrıca nokta kaynağının korozif ortamlara karşı direncini azaltan önemli faktörlerden biridir. Eğer dış çatlaklar fazla miktarda ise, nokta kaynağının mukavemetini düşürebilir. Dış çatlakların oluşumuna yetersiz kaynak basıncı, yüksek kaynak akımı, elektrotların iş parçalarına yanlış hizalanması, elektrotların yeteri kadar soğutulmaması gibi durumlar neden olabilir (Almus 2006).

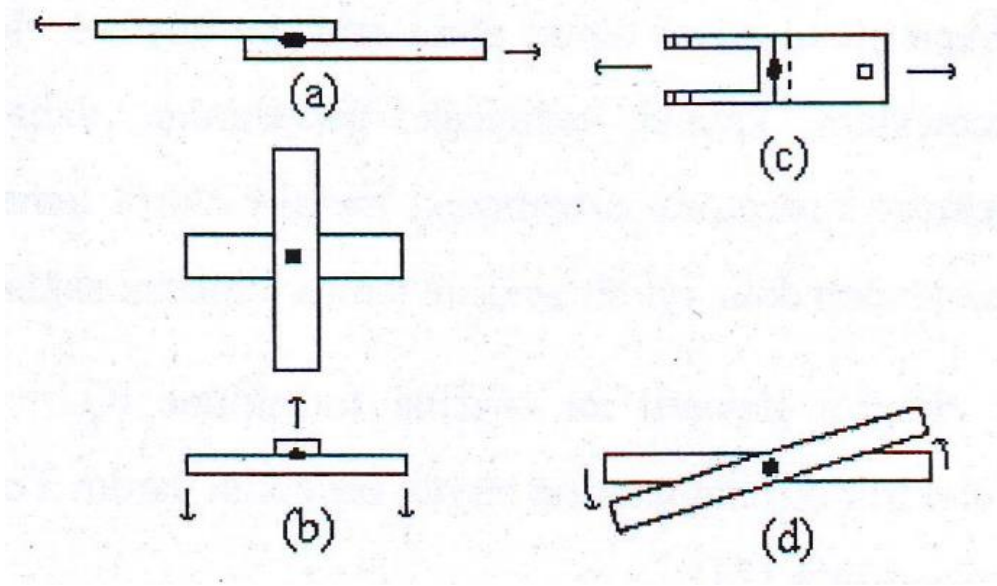
4.4.2.7 Bakır Birikmesi

Bakır birikmesi, nokta kaynağının korozyon direncini azaltan önemli bir durumdur. Bu tür birikmelerin etkilerini azaltmak için bakır döküntüleri tel fırça veya kum püskürtme gibi yöntemlerle temizlenmeli ve ortadan kaldırılmalıdır. Ayrıca temizlik işlemi kontrol altında tutulmak isteniyorsa, %10'luk asetik asit eriyiği kullanımı da bir seçenektir. Bakır birikmesinin oluşumuna elektrotların düzgün temizlenmemesi, uygun olmayan yüzey hazırlama ve yüksek kaynak akımı neden olabilir (Almus 2006).

4.5 Kaynak Noktasının Mukavemeti

Direnç nokta kaynağının statik mukavemetini belirlemek için yapılan deneyler aşağıda sıralanmıştır (Şekil 4.4).

- a. Çekme – makaslama deneyi
- b. Haç biçimi çekme deneyi
- c. U biçimi çekme deneyi
- d. Burulma deneyi



Şekil 4.4 Nokta kaynağına uygulanan mukavemet deneyleri (Akkuş 2006)

4.6 Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı

Farklı metallerin kaynağı, farklı özelliklere, bileşimlere ve özelliklere sahip metal bileşenlerini bir araya getirme sürecini içeren karmaşık ve zorlu bir işlemdir. Bu tür kaynak işlemi, otomotiv, havacılık, elektronik ve inşaat gibi çeşitli endüstrilerde karşılaşılan bir durumdur, burada farklı metallerin kombinasyonu, istenen performans, dayanıklılığı veya maliyet etkinliği elde etmek için gereklidir.

Farklı metallerin kaynağı, erime noktalarındaki farklılıklar, termal genişleme katsayıları ve metalurjik davranışlardaki farklılıklar nedeniyle benzersiz zorluklar sunar. Bu farklılıklar, çatlama, şekil bozulması ve zayıflamış birleşik bütünlük gibi sorunlara yol açabilir, ancak uygun şekilde yönetilmezse. Ancak, doğru teknikler ve düşüncelerle, farklı metaller arasında başarılı kaynaklar elde edilebilir.

Farklı metallerin direnç nokta kaynağı, benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip metal yüzeylerin birbirine bağlanmasını sağlayan özel bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem, endüstriyel üretimde ve imalatta yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Farklı metallerin direnç nokta kaynağı, yüksek hızlı ve otomasyon odaklı üretim süreçlerinde avantaj sağlamak için tercih edilir.

Direnç nokta kaynağı süreci, iki veya daha fazla metal levhanın birbirine temas eden bölgelerine elektrik akımının uygulanmasıyla gerçekleşir. Bu akım, temas noktalarındaki direnci aşar ve ısı üretir. Isı, metal yüzeylerin erimesine ve kaynağın oluşmasına neden olur. Farklı metallerin direnç nokta kaynağı, genellikle aynı metalin kaynağından daha karmaşık bir işlem gerektirir, çünkü farklı metallerin farklı elektriksel iletkenlikleri ve termal davranışları vardır.

Farklı metallerin direnç nokta kaynağının başarılı olabilmesi için aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

1. **Direnç Değerleri:** Farklı metallerin elektriksel direnç değerleri farklılık gösterebilir. Bu nedenle, benzer direnç değerlerine sahip metaller tercih edilir, çünkü eşit direnç, daha homojen ısı dağılımı sağlar.
2. **Yüzey Hazırlığı:** Kaynak noktasındaki metal yüzeylerin temiz ve oksitlerden arındırılmış olması, sağlam bir kaynak oluşturulmasını kolaylaştırır.
3. **Dolgu Malzemesi:** Farklı metallerin kaynağı sırasında kullanılan dolgu malzemesi, kaynağın dayanıklılığı ve işlevselliği üzerinde etkili olabilir. Dolgu malzemesi, birleştirilen metallerin özelliklerine ve uygulamaya bağlı olarak seçilmelidir.
4. **Proses Parametreleri:** Kaynak sürecindeki elektrik akımı, süre ve basınç gibi faktörler, kaynak bölgesindeki ısıyı ve deformasyonu etkiler. Bu parametreler, sağlam ve güvenilir bir kaynak oluşturmak için doğru şekilde ayarlanmalıdır.
5. **Sıcaklık Kontrolü:** Farklı metallerin kaynağında ısının kontrollü bir şekilde dağılması, çatlama ve şekil bozulmasını önlemek için önemlidir. Kaynak sonrası soğutma süreci de dikkatli bir şekilde yönetilmelidir.

Farklı metallerin direnç nokta kaynağı, imalat endüstrisinde verimliliği artırabilirken, uygun kaynak parametreleri ve kalite kontrol önlemleri gerektirir. Uygun şekilde uygulandığında, bu yöntem farklı metallerin birleştirilmesinde güvenilir ve dayanıklı kaynaklar oluşturabilir, böylece çeşitli endüstrilerde kullanılan ürünlerin üretimini destekler.

Farklı kalınlıktaki metallerin kaynağında, özellikle yüksek kalınlık oranları söz konusu olduğunda, soğutulmuş elektrotun ince parça tarafına yakın olması sebebiyle ara yüzeyde yetersiz ısı üretimi eğilimi görülür. Bu durum, uygun ısıl dengeyi

sağlamak için ince iş parçası tarafında daha küçük temas alanına sahip elektrot kullanarak daha yüksek akım yoğunluğu ve kısa kaynak süresi kullanmayı içerecek şekilde düzeltilmelidir. Burada ısıl denge durumunu etkileyen faktörler:

- İş parçasının ısıl ve elektriksel iletkenlikleri
- İş parçasının geometrileri
- Elektrotların ısıl ve elektriksel iletkenlikleri
- Elektrotların geometrileri.

Farklı metallerin kaynağının zorluklarını ele almak için ön kaynak hazırlığı ve son kaynak ısıl işlemleri gerekebilir. Ön kaynak temizliği, uygun birleşik tasarımı ve ısı girişinin kontrolü, şekil bozulmasını en aza indirmek ve kaynak birleşiminin kalitesini sağlamak için önemlidir. Kaynak işlemi sırasında oluşmuş olabilecek kalıntı gerilmeleri gidermek için gerilim giderme ısıl işlemi gibi son kaynak işlemleri yardımcı olabilir. Şekil 4.5'te farklı metal malzemelerin birbirleriyle kaynak edilebilme durumları verilmiştir.

Malzeme	Zr	W	Ti	Ta	Sn	Pt	NiCu	NiCr	Ni	Mo	Mg	FeNi	FeCr	Fe	CuNi	CuBe	Cu	Cd	Au	Al	Ag
Ag			4	3		3		5	3	4		5		3	3	3	4			4	3
Al			4	3	4	3	3		3	4	2	2	3	2	3	3	4	4			2
Au																					2
Cd					2		2	4	4					2			2	2			
Cu	5	4	5	3	2	2	2	2	2	4		2	4	2		2	2				
CuBe			3	1		1		1	1	3				4	2	1					
CuNi			2	2		2		2	2	3				2	2						
Fe	5	3		3	4	1	2	2	2	2		2		1							
FeCr						1			2				2								
FeNi			5		4	5	2	2	2	2		2									
Mg											2										
Mo	2	3		3		2	2	2	2	4											
Ni	2	2	5	2	3	1	2	2	2												
NiCr			5		4	1	2	2													
NiCu					2	1	2														
Pt			2	2		1															
Sn					2																
Ta			3	3																	
Ti			2																		
W	2	3																			
Zr	2																				

1- Çok İyi 2- İyi 3- Orta 4- Zor 5- Açıklık Yok

Şekil 4.5 Metal malzemelerin direnç nokta kaynağına yatkınlık durumları (Gültekin 1991)

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, kaynak kabiliyetleri birbirinden farklı olan 304L östenitik paslanmaz çelik ile AA5052, AA6061 alüminyum alaşımları farklı kaynak akımı parametrelerinde nokta kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Farklı kaynak akımlarının bu kaynaklı bağlantılar üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla mekanik ve metalografik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

İlk olarak deney malzemeleri plakalar halinde temin edilmiştir. Ardından temin edilen paslanmaz çelik plaka lazer yöntemiyle, alüminyum alaşım plakalar ise su jeti yöntemiyle ANSI/AWS C1.1M/C1.1:2012 standardına uygun ölçülerde kesilerek kaynak işlemine hazır hale getirilmiştir. Bu numuneler, kaynak süresi ve elektrot kuvveti sabit tutularak farklı kaynak akımı değerlerinde, farklı eşleştirmelerde elektrik direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynak işleminin mekanik dayanımlarının belirlenmesi için çekme deneyi yapılmıştır. Kaynak bölgesinden enine kesitler alınarak makro boyutta incelemeler yapılmış ayrıca kaynak bölgesinin mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Çekme deneyinin ardından kırık yüzeylerin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri yapılmıştır. Farklı kaynak kombinasyonlarının çekme dayanımları ve mikrosertlik değerleri karşılaştırılmıştır.

5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneylerde kullanılan ana malzemeler AA5052 ve AA6061 serisi alüminyum alaşımları ve AISI 304L östenitik paslanmaz çeliktir. Malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.1 5052 serisi alüminyumun kimyasal bileşimleri (%)

Malzeme	Elementler									
	Fe	Si	Mn	Cr	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Toplam
AA5052	0,4	0,25	0,1	0,35	2,2-2,8	0,1	0,15-0,35	0,05	0,15	0,15

Tablo 5.2 6061 serisi alüminyumun kimyasal bileşimleri (%)

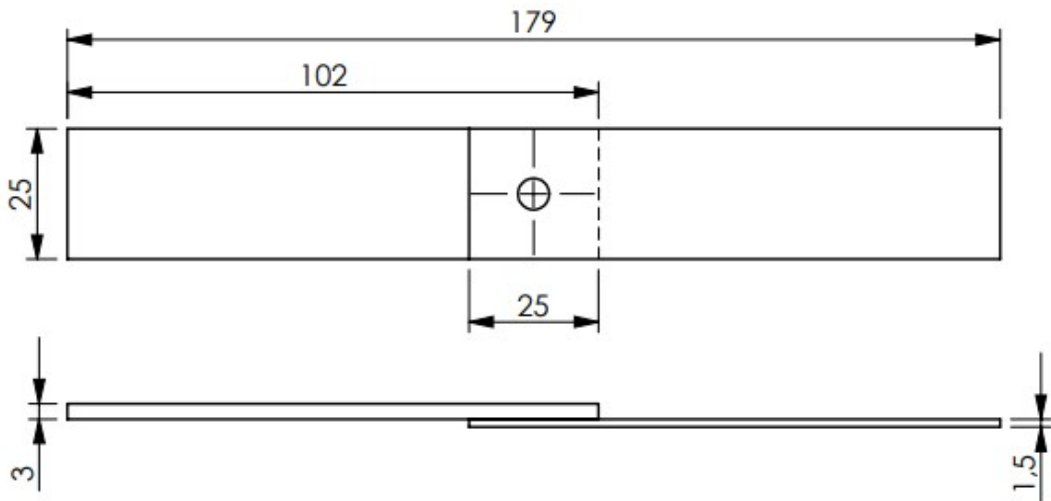
Malzeme	Elementler									
	Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
AA6061	0,7	0,40-0,8	0,15	0,15-0,40	0,8-1,2	0,25	0,04-0,35	0,15	0,15	Kalan

Tablo 5.3: AISI 304L paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimleri (%)

Malzeme	Elementler									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Mo	
304L	0,024	0,40	1,77	0,032	0,002	18,20	8,10	0,050	-	

5.2 Deney Numunelerinin Boyutları

Kaynak edilecek sacların boyutları ANSI/AWS C1.1M/C1.1:2012 standardına göre belirlenmiştir. Standarda uygun ölçülerde AA5052 (102 mm x 25 mm x 3 mm), AA6061 (102 mm x 25 mm x 3 mm) ve AISI 304 L (102 mm x 25 mm x 1.5 mm) plakalar temin edilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Kaynaklı deney numunelerinin boyutları

5.3 Deneyde Kullanılan Kaynak Makinesi

Çalışma kapsamında AA5052- AISI 304 L ile AA6061- AISI 304 L malzeme çiftlerinin kaynak işlemleri GYS - Gyspot Inverter Evolution PTI marka punta kaynak makinesinde yapılmıştır. Punta kaynak makinasının çalışma voltajı 400 V'dur. Maksimum kaynak akımı 14,5 kA'dır. Elektrot basma gücü 550 daN'dur. Şekil 5.2'de kaynak makinesine ait görsel verilmiştir.



Şekil 5.2 Kaynak makinesi

5.4 Kaynak İşleminin Yapılışı

AISI 304L-AA5052 ve AISI 304L-AA606 malzemelerin birleştirme işlemleri Şekil 5.2'de gösterilen kaynak makinesinde gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi esnasında kullanılan kaynak parametre değerleri, kaynak makinesinin kontrol ünitesine manuel olarak girilmiştir. Kaynak sırasında malzemeleri düzgün bir şekilde konumlandırmak ve kaynak noktasının konumunu belirlemek amacıyla 3D printer yazıcı ile PLA malzemeden fikstür basılmıştır.

Kaynak işleminin yapılışına ait görseller Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Kaynak parametreleri Tablo 5.4'te verilmiştir.



(a)



(b)

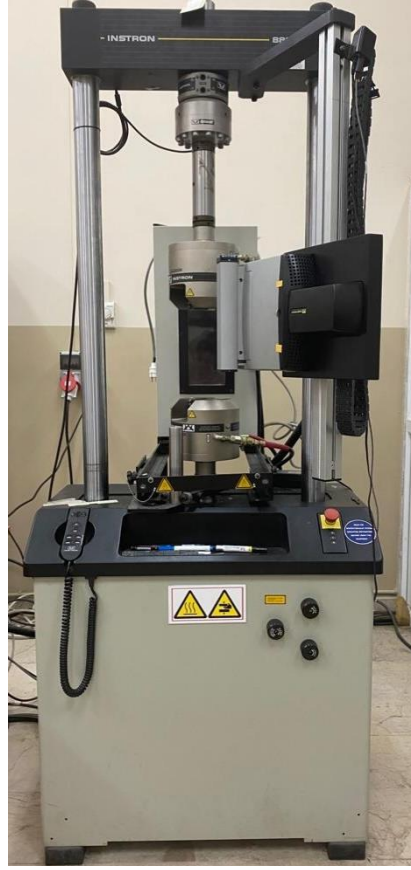
Şekil 5.3 Kaynak işleminin yapılışına ait görseller

Tablo 5.4 Kaynak parametreleri

AISI 304 L- AA5052 Malzeme Çifti			
Kod	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (ms)	Elektrot Kuvveti (kN)
A1	6	300	3
A2	6	300	3
A3	6	300	3
B1	5,5	300	3
B2	5,5	300	3
B3	5,5	300	3
C1	5	300	3
C2	5	300	3
C3	5	300	3
AISI 304 L- AA6061 Malzeme Çifti			
Kod	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (ms)	Elektrot Kuvveti (kN)
D1	6	300	3
D2	6	300	3
D3	6	300	3
E1	5,5	300	3
E2	5,5	300	3
E3	5,5	300	3
F1	5	300	3
F2	5	300	3
F3	5	300	3

5.5 Çekme Deneyi

Çekme testleri 5 kN kapasiteli INSTRON marka çekme testi cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4'te çekme test cihazının resmi verilmiştir. Numuneler 5 mm/min çekme hızı ile test edilmiştir.



(a)



(b)

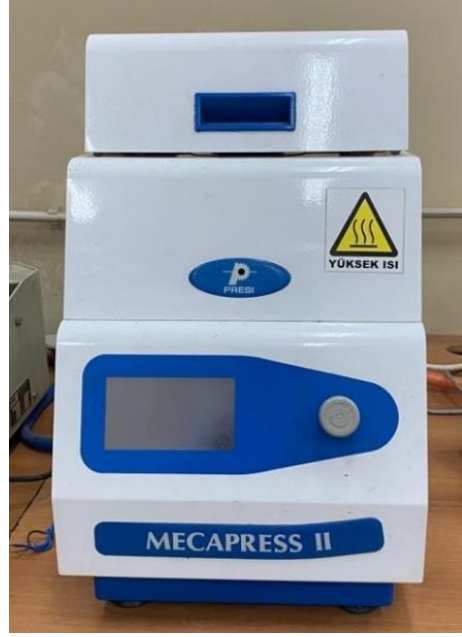
Şekil 5.4 Çekme cihazı

5.6 Mikro-Sertlik Ölçümü

Nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen numuneleri metalografik olarak incelemek ve mikro sertlik ölçümü yapmak için farklı numune çiftleri Şekil 5.5'te gösterilen Presi marka hassas kesme cihazında kesilmiştir. Ardından kesilen numunelere Şekil 5.6'da gösterilen Presi marka cihazda bakalite alma işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan numuneler Şekil 5.7'de gösterilen Presi marka parlatma cihazında sırasıyla 240, 400, 800, 1200 numaralı SiC su zımparası ile zımparalanmıştır. Hazırlanan numuneler mikro sertlik çalışmaları için kullanılmıştır (Şekil 5.8). Mikro sertlik için Şekil 5.9'da gösterilen Metkon marka Vickers sertlik cihazı kullanılarak sertlik ölçümleri HV 0,2 değerlerinde yapılmıştır.



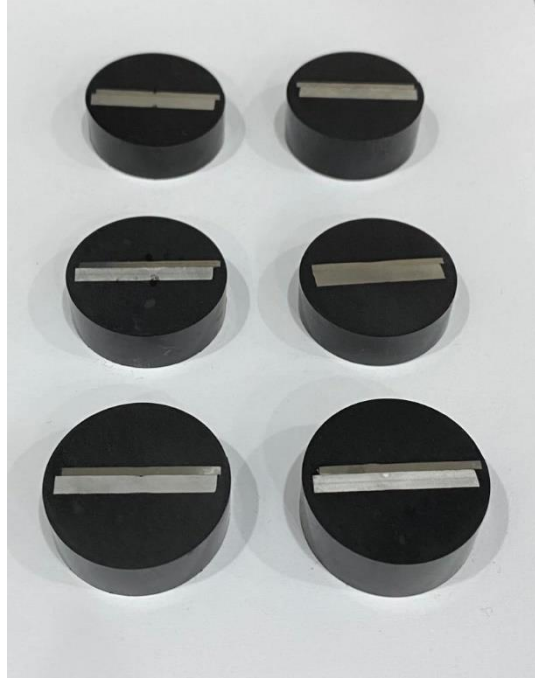
Şekil 5.5 Kesme cihazı



Şekil 5.6 Bakalite alma cihazı



Şekil 5.7 Parlatma cihazı

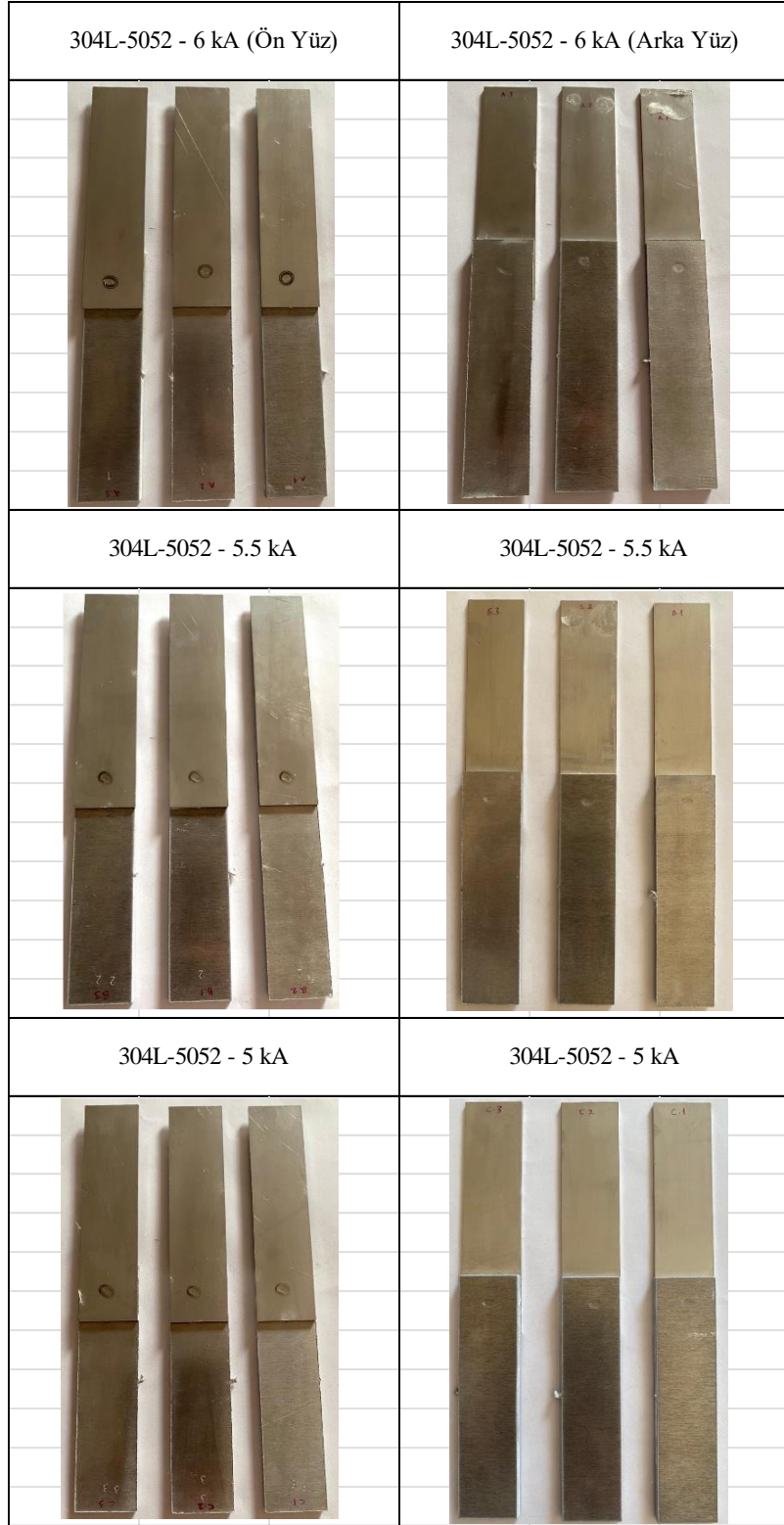


Şekil 5.8 Bakalite alınmış numuneler

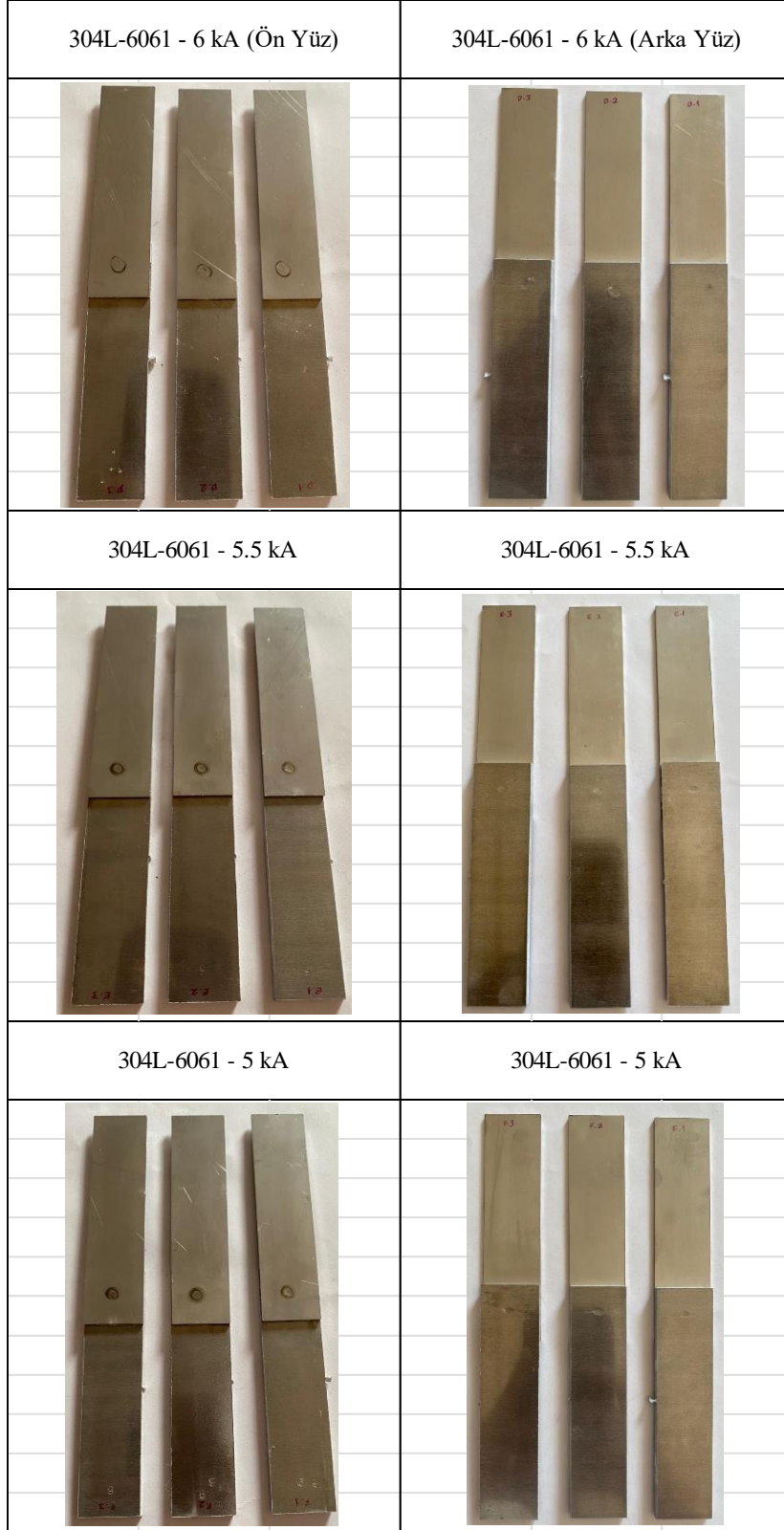


Şekil 5.9 Vickers mikro sertlik ölçüm cihazı

Kaynak işlemi sonrası AISI 304L- AA5052 ve AISI 304L- AA6061 kaynaklı numuneler Şekil 5.10 ve Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.10 AISI 304L-AA5052 kaynaklı numunelerin kaynak işlemi sonrası görselleri



Şekil 5.11 AISI 304L-AA6061 kaynaklı numunelerin kaynak işlemi sonrası görselleri

6. DENEY SONUÇLARI

6.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Alüminyum malzemelerin yüksek ısı ve elektriksel iletkenlikleri sebebiyle kaynak çekirdeğinde sağlıklı birleşme sağlamak için yeteri kadar ısı girdisi elde etmek zordur. Bu sebeple alüminyum alaşımlarının kaynak işlemi sırasında yüksek kaynak akımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Deneysel çalışmalar esnasında çok çeşitli kaynak akımları ve kaynak zamanlarında çalışılarak, birleşmenin sağlandığı en alt kaynak akım değerinin 5 kA olduğu tespit edilmiştir. 7 kA kaynak akımı üzerindeki değerlerde ise kaynak bölgesinde delinmeler ve sıçramalar başlamış, daha da üstüne çıkıldığında elektrik direnç nokta kaynak makinesinin elektrotlar ile numunelerin birbirine kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, çalışmada kullanılan kaynak akımları 5 kA, 5,5 kA ve 6 kA olarak belirlenmiştir.

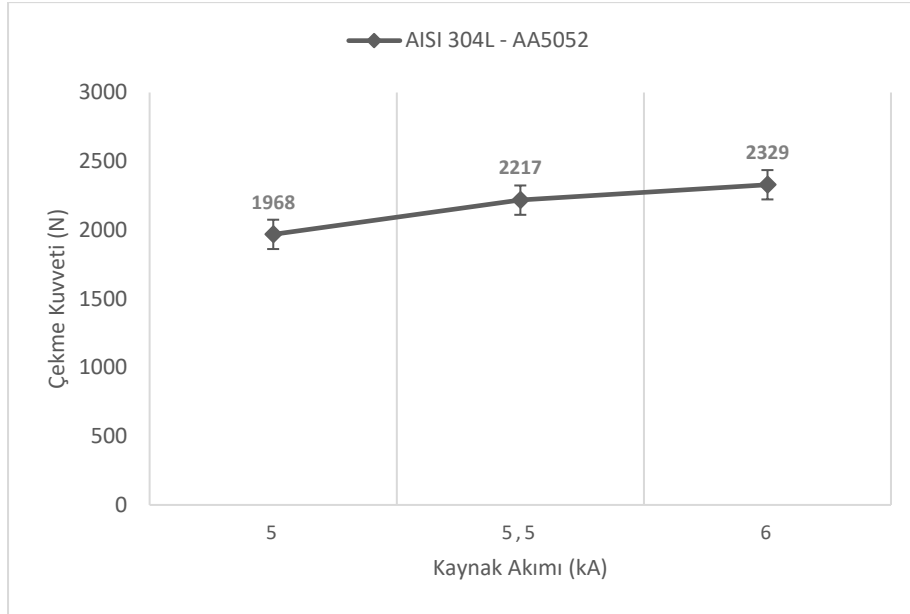
Yapılan deneyler sonucunda çekme dayanımı, artan kaynak akımıyla yükselen bir eğilim göstermiştir. En yüksek çekme dayanımı 6 kA kaynak akımında, AISI 304L-AA5052 malzeme çifti için 2329 N, AISI 304L-AA6061 malzeme çifti için ise 2220 N olarak bulunmuştur.

Tablo 6.1’de farklı kaynak akımı değerlerinde, nokta kaynaklı numunelere ait çekme deneyi sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.1 AISI 304L-AA5052 ile AISI 304L-AA6061 numunelerin farklı kaynak akımı değerlerinde çekme deneyi sonuçları

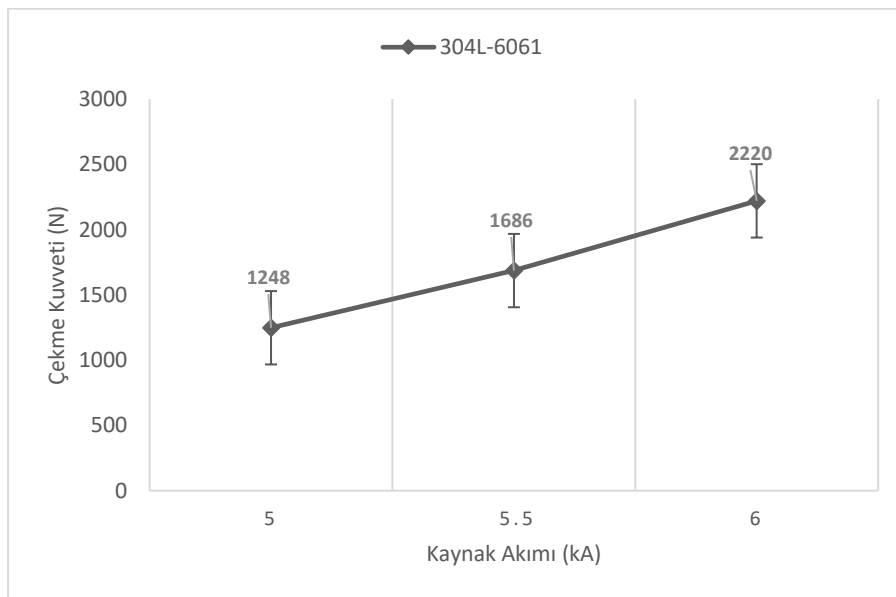
Kaynak Akımı	Çekme Deneyi Sonuçları	
	AISI 304L- AA5052	AISI 304L- AA6061
5 kA	1968 N	1248 N
5,5 kA	2217 N	1686 N
6 kA	2329 N	2220 N

AISI304L-AA5052 malzeme çiftinde en yüksek çekme dayanımı 6 kA kaynak akımında bulunmuştur. Kaynak akımının 5 kA'den 6 kA'e yükselmesi ile çekme kuvveti değeri %15,5 oranında artmıştır (Şekil 6.1).



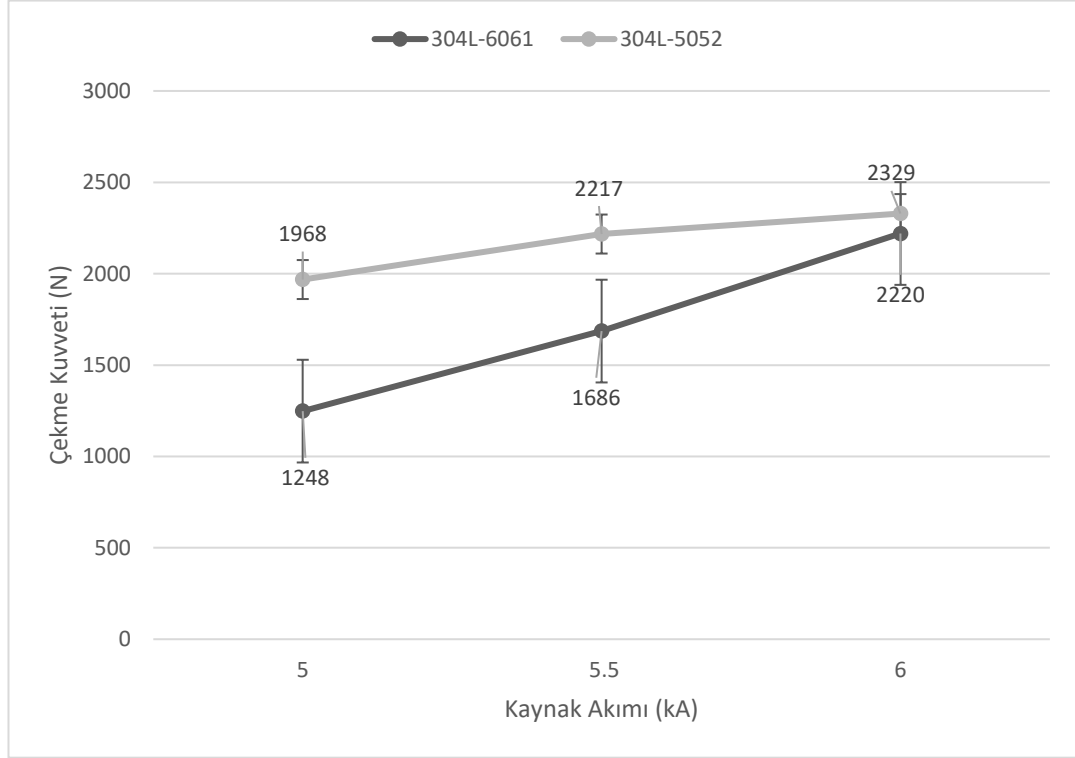
Şekil 6.1 AISI304L-AA5052 malzeme çiftinin çekme mukavemeti değerleri

AISI304L-AA6061 malzeme çiftinde de en yüksek çekme dayanımı 6 kA kaynak akımında bulunmuştur. Kaynak akımının 5 kA'den 6 kA'e yükselmesi ile çekme kuvveti %43,8 oranında yükselmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 AISI 304L-AA6061 malzeme çiftinin çekme mukavemeti değerleri

Şekil 6.3'te her iki malzeme çiftinin çekme dayanımı sonuçları aynı grafikte verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde aynı kaynak akımı değerlerinde AISI 304L-AA5052 kaynaklı numunelerin çekme dayanımları daha yüksek değerde bulunmuştur. Mekanik dayanımların ön planda olduğu çalışma koşullarında bu hibrit yapılar tercih edilebilir.



Şekil 6.3 AISI 304L-AA5052 ve AISI 304L-AA6061 malzeme çiftlerinin çekme mukavemeti değerleri

Kaynak akımı değerinin düşük olması, kaynak sırasında ergiyen malzemenin yeterince derine nüfuz etmesini engellemesiyle, kaynak bağlantısının yüzeyde kalmasına ve daha düşük bir mukavemetin oluşmasına yol açmış olabileceği kanısına varılabilir.

Kaynak akımının yükselmesiyle, kaynak bölgesindeki ısı giriş miktarı ve buna bağlı olarak da kaynak nüfuziyeti artmaktadır. Bu sebeple belli bir seviyeye kadar kaynak akımının artmasıyla çekme dayanımı artış göstermektedir.

Kaynak işlemi sırasında kaynak akımı ve diğer parametrelerin optimum seviyede kullanılması kaynak bağlantısının istenilen mukavemet ve dayanıklılığa sahip olmasını sağlar. Kaynak akımının doğru şekilde ayarlanması, malzeme ile uyumlu bir mikroyapının oluşturulmasına ve sonuç olarak daha yüksek çekme mukavemetine yol açacaktır.

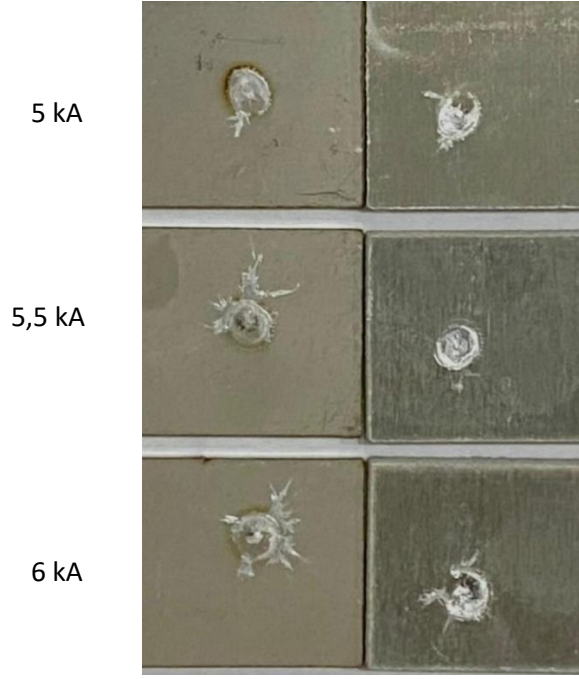
Çekme testlerinin sonuçları incelendiğinde, AISI 304L-AA6061 malzeme çifti, kaynak parametrelerinden kaynak akımının değişmesiyle AISI 304L-AA5052 malzeme çiftine göre daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir.

6.2 Makro Görseller

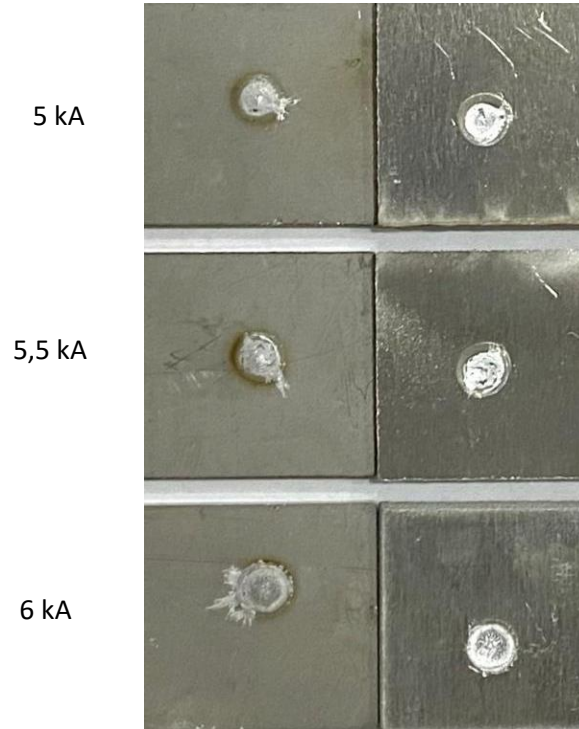
Çekme deneyi sonrası kaynaklı numuneler düşük mukavemete sahip ara yüzey kırılması (interfacial fracture) sergilemişlerdir. Bir nokta kaynağında kaynak çekirdeği boyutu ne kadar küçük olursa, levha arayüzünde o kadar yüksek kesme gerilimi yaşanır. Bu nedenle, düşük kaynak akımıyla üretilen kaynak bağlantıları küçük kaynak çekirdek boyutuna sahip olmaktadır. Bu sebepten dolayı arayüz hatası modundaki ayrılmalarda mukavemet açısından daha düşük değerler elde edilmektedir. Bu çalışmada çekilen makro görüntülerde bu durumu teyit etmektedir (Şekil 6.4 ve Şekil 6.5).

Alüminyum alaşımları ile paslanmaz çelik malzemelerin farklı termal genişleme katsayılarına sahip olması sebebiyle kaynak sırasında oluşan ısı, alüminyum ve çelik arasında gerilmelere ve sıçramalara sebep olabilmektedir. Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te verilen kaynak ara yüzeyleri incelendiğinde kaynak çekirdeğinde sıçramalar olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak akımı arttıkça sıçramaların gözle görülür bir şekilde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesindeki artan sıçramalar ile birlikte kaynak bölgesinde nüfuziyette artmaktadır. Buna bağlı olarak mukavemet değerlerinde yükseliş olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca kaynak işlemi sırasında akım, süre ve basınç gibi parametrelerin yanlış seçilmesi, kaynak bölgesinin yüzey temizliğinin yeterli düzeyde yapılmaması gibi durumlar da kaynak bölgesinde sıçramaların oluşmasına sebebiyet verebilir.

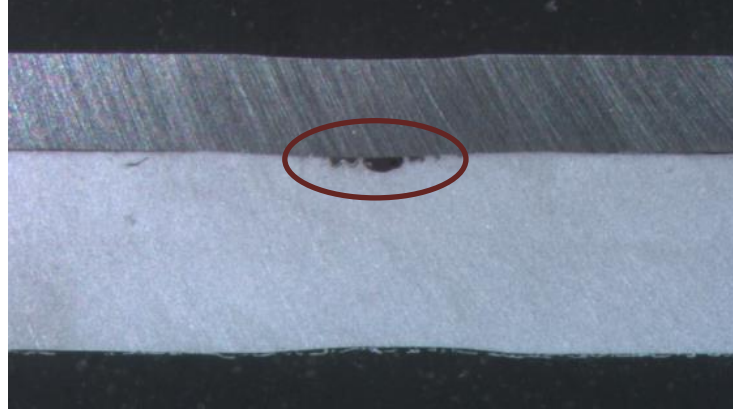


Şekil 6.4 AISI 304L- AA 5052 numunelerin çekme deneyi sonrası kırık yüzey görseli

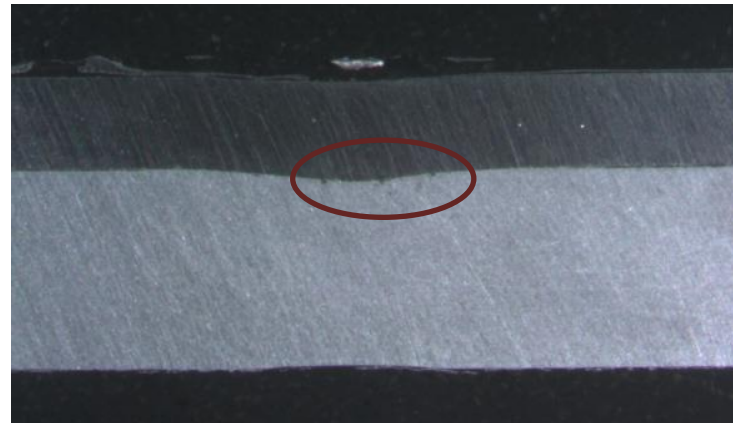


Şekil 6.5 AISI 304L- AA 6061 numunelerin çekme deneyi sonrası kırık yüzey görseli

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de iki malzeme çifti için kaynak kesitlerinin makro yapı görüntüleri incelendiğinde, kaynak çekirdeğinde porozite ve kalıntılar olduğu görülmektedir. Literatürde alüminyum malzemelerin nokta kaynağında genellikle çok küçük veya büyük çekirdek, sıçrama, kaynak metali içerisinde çatlak, porozite (gözenek) vb hataların olabileceği belirtilmiştir (Kaya 2022). Bu iç hatalar kaynak sırasında meydana gelen aşırı hızlı ısınma ve soğuma neticesinde oluşur. Genellikle düşük elektrot kuvveti, yüksek kaynak akımı veya kaynak bölgesinde fazla kaynak ısısı üreten diğer koşullar tarafından da meydana gelebilir (Harlin 2003). Alüminyum alaşımlarının yüksek termal genleşme özelliği nedeniyle, kaynak bölgesinde meydana gelen yüksek çekme gerilmeleri bu iç hatalardan sorumlu olabilmektedir. Bu gerilmeler kaynak merkezinde sıfırdır. Bu kusurlar kaynağın merkezinde olduğu için kaynağın mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmamaktadır.



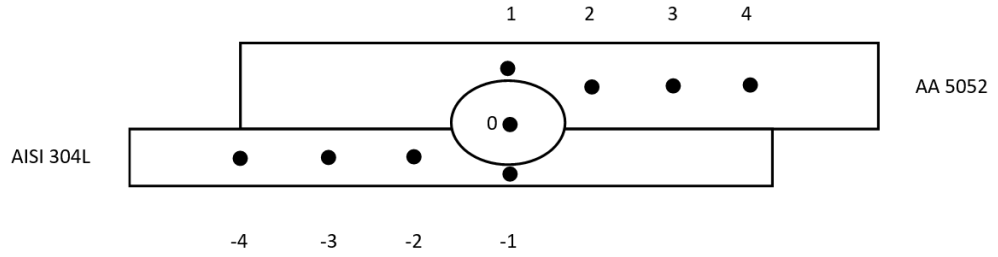
Şekil 6.6 AISI 304L-AA5052 kaynak kesiti görseli



Şekil 6.7 AISI 304L – AA6061 kaynak kesiti görseli

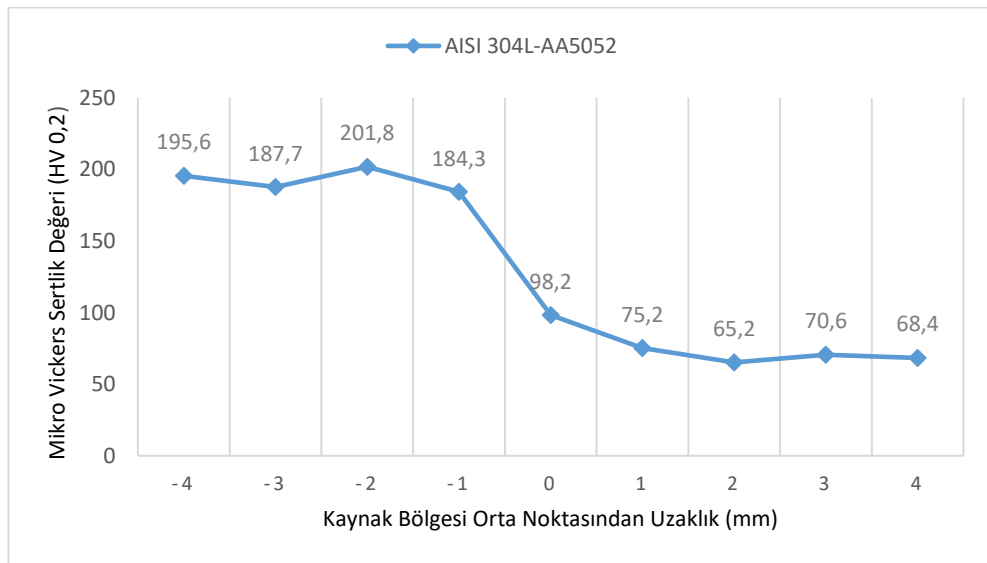
6.3 Mikro-Sertlik Ölçümü Sonuçları

Mikrosertlik ölçümlerinde, kaynak çekirdeğinin orta noktası 0 kabul edilerek 1 mm aralıklarla yapılmıştır. Ölçüm işlemleri 200 g yük 5 s süre uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktalar Şekil 6.8 ve 6.12’de gösterilmiştir. AISI 304L-AA5052 numune çiftlerinin 5 kA, 5,5 kA ve 6 kA kaynak akımı değerlerinde mikrosertlik ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de görülmektedir.



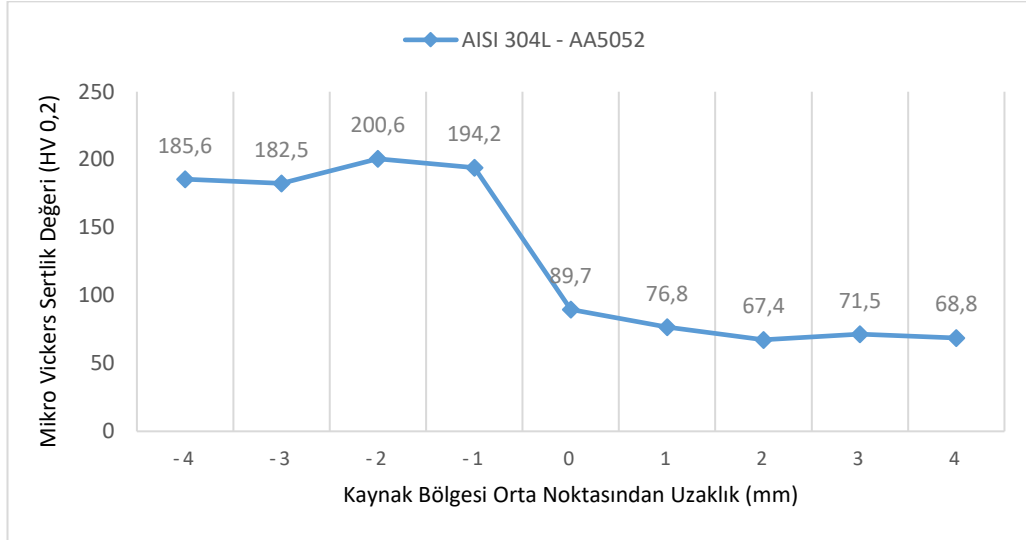
Şekil 6.8 AISI 304L – AA5052 kaynak bölgesi kesiti ve sertlik değeri alınan noktalar

5 kA kaynak akımında kaynak çekirdeğinde ölçülen sertlik değeri 98,2 HV’dir. 304 L paslanmaz çelik için sertlik değeri 184,3 HV ile 201,8 HV arasında değişmektedir. 5052 alüminyum alaşımı için sertlik değerleri ise 68,4 HV ile 75,2 HV arasındadır (Şekil 6.9).



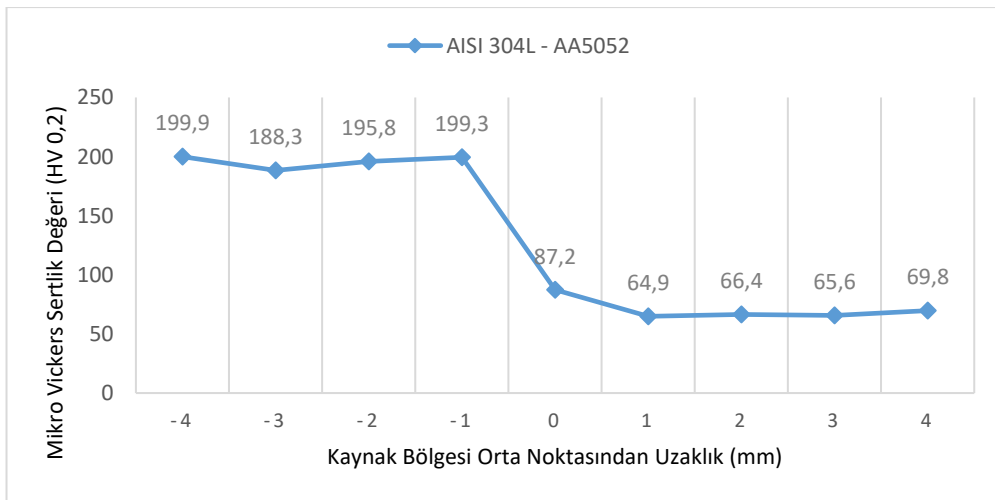
Şekil 6.9 AISI 304L-AA5052 numune çiftinin (5 kA) mikrosertlik grafiği

5,5 kA kaynak akımında kaynak çekirdeğinde ölçülen sertlik değeri 89,7 HV'dir. 304 L paslanmaz çelik için sertlik değeri 182,5 HV ile 200,6 HV arasında değişmektedir. 5052 alüminyum alaşımı için sertlik değerleri ise 67,4 HV ile 76,8 HV arasındadır (Şekil 6.10).

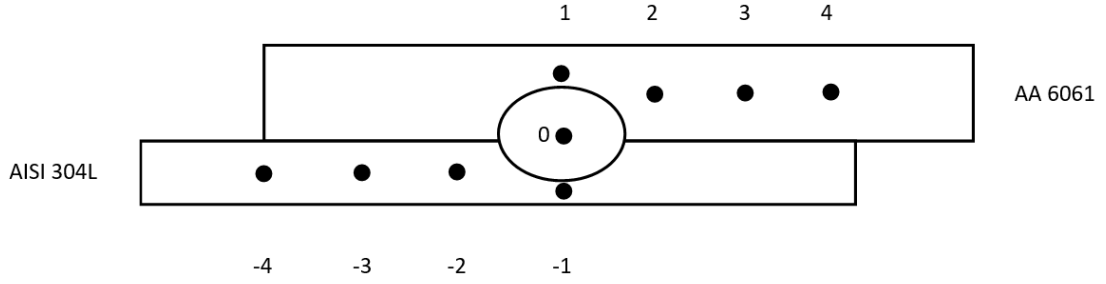


Şekil 6.10 AISI 304L-AA5052 numune çiftinin (5,5 kA) mikrosertlik grafiği

6 kA kaynak akımında kaynak çekirdeğinde ölçülen sertlik değeri 87,2 HV'dir. 304 L paslanmaz çelik için sertlik değeri 188,3 HV ile 199,9 HV arasında değişmektedir. 5052 alüminyum alaşımı için sertlik değerleri ise 64,9 HV ile 69,8 HV arasındadır (Şekil 6.11).

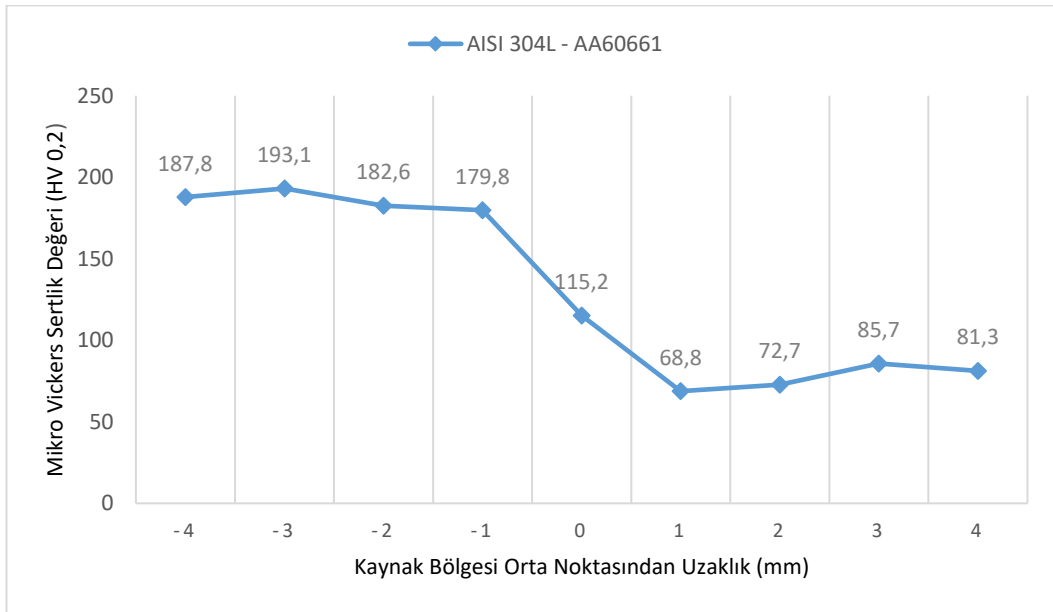


Şekil 6.11 AISI 304L-AA5052 numune çiftinin (6 kA) mikrosertlik grafiği



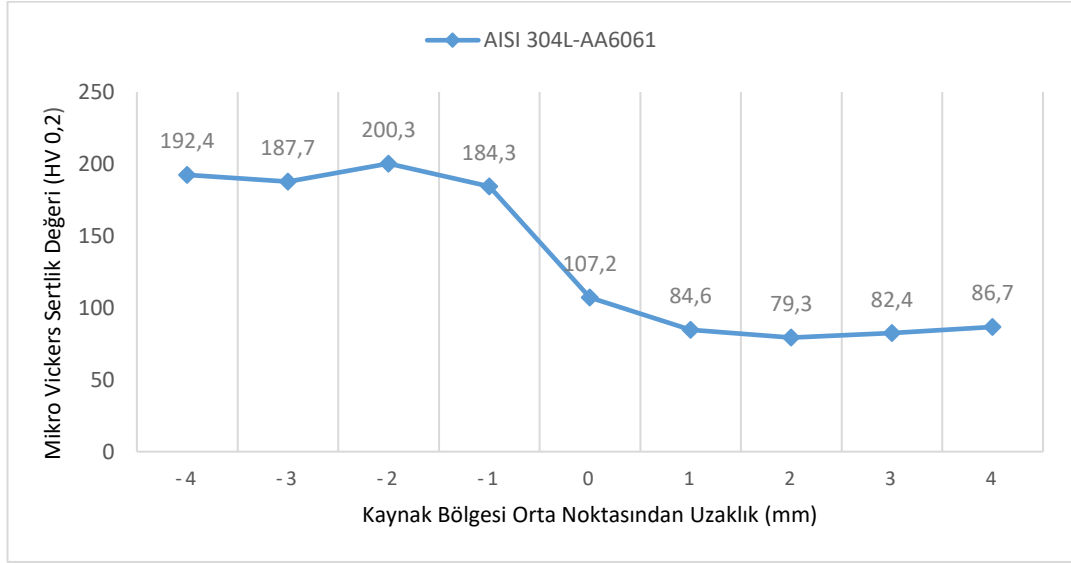
Şekil 6.12 AISI 304L – AA6061 kaynak bölgesi kesiti ve sertlik değeri alınan noktalar

5 kA kaynak akımında kaynak çekirdeğinde ölçülen sertlik değeri 115,2 HV'dir. 304 L paslanmaz çelik için sertlik değeri 179,8 HV ile 193,1 HV arasında değişmektedir. 6061 alüminyum alaşımı için sertlik değerleri ise 68,8 HV ile 85,7 HV arasındadır (Şekil 6.13).



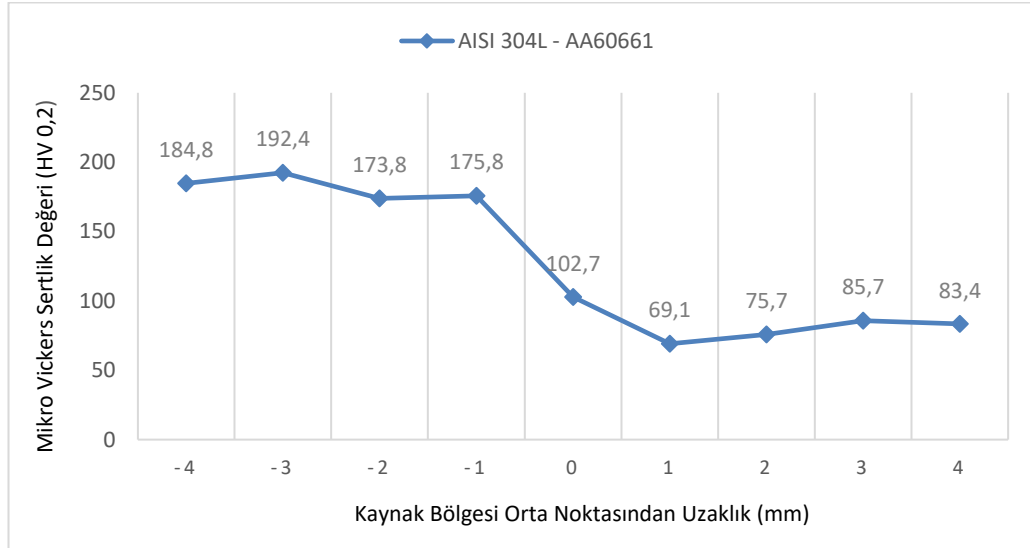
Şekil 6.13 AISI 304L-AA6061 numune çiftinin (5 kA) mikrosertlik grafiği

5,5 kA kaynak akımında kaynak çekirdeğinde ölçülen sertlik değeri 107,2 HV'dir. 304 L paslanmaz çelik için sertlik değeri 184,3 HV ile 200,3 HV arasında değişmektedir. 6061 alüminyum alaşımı için sertlik değerleri ise 79,3 HV ile 86,7 HV arasındadır (Şekil 6.14).



Şekil 6.14 AISI 304L-AA6061 numune çiftinin (5,5 kA) mikrosertlik grafiği

6 kA kaynak akımında kaynak çekirdeğinde ölçülen sertlik değeri 102,7 HV'dir. 304 L paslanmaz çelik için sertlik değeri 173,8 HV ile 192,4 HV arasında değişmektedir. 6061 alüminyum alaşımı için sertlik değerleri ise 69,1 HV ile 85,7 HV arasındadır (Şekil 6.15).



Şekil 6.15 AISI 304L-AA6061 numune çiftinin (6 kA) mikrosertlik grafiği

Direnç nokta kaynağıyla birleştirilmiş AA6061 serisi alüminyum alaşımları, AA5052 serisi alüminyum alaşımları ile AISI 304L paslanmaz çelik malzemenin

mikro sertlik ölçüm sonuçları incelendiğinde kaynak merkezinde ölçülen sertlik değerinin alüminyum alaşımlarının sertlik değerinden daha yüksek, paslanmaz çeliğin sertlik değerinden ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Birleşmenin yaşandığı ara yüzeyde nüfuziyetin etkisiyle iki malzemenin sertlik değerleri kaynak merkezinde ölçülen sertlik değerine etki etmektedir.

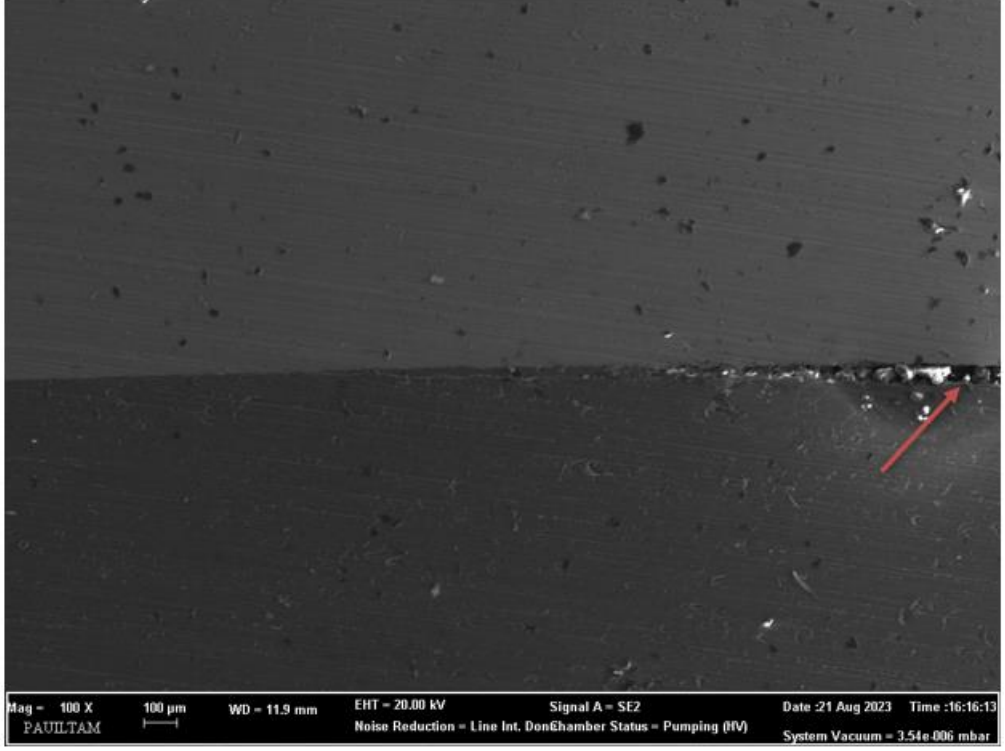
Ayrıca kaynak akımı arttıkça kaynak çekirdeğinde ölçülen sertlik değeri azalmaktadır. Kaynak akımının artması, kaynak bölgesinde daha fazla ısının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, kaynak bölgesinde daha büyük bir ısı etki oluşturmaktadır. Yükselen kaynak akımıyla, kaynak bölgesinde fazla ısınma sonucu daha çok ergimiş bölge oluşabilir. Bu durum kaynak çekirdeğinin sertliğinin düşmesine sebep olabilir.

AA6061 alüminyum alaşımının, AA5052 alüminyum alaşımına nazaran daha sert olduğu mikro sertlik ölçümü sonuçlarında görülmektedir.

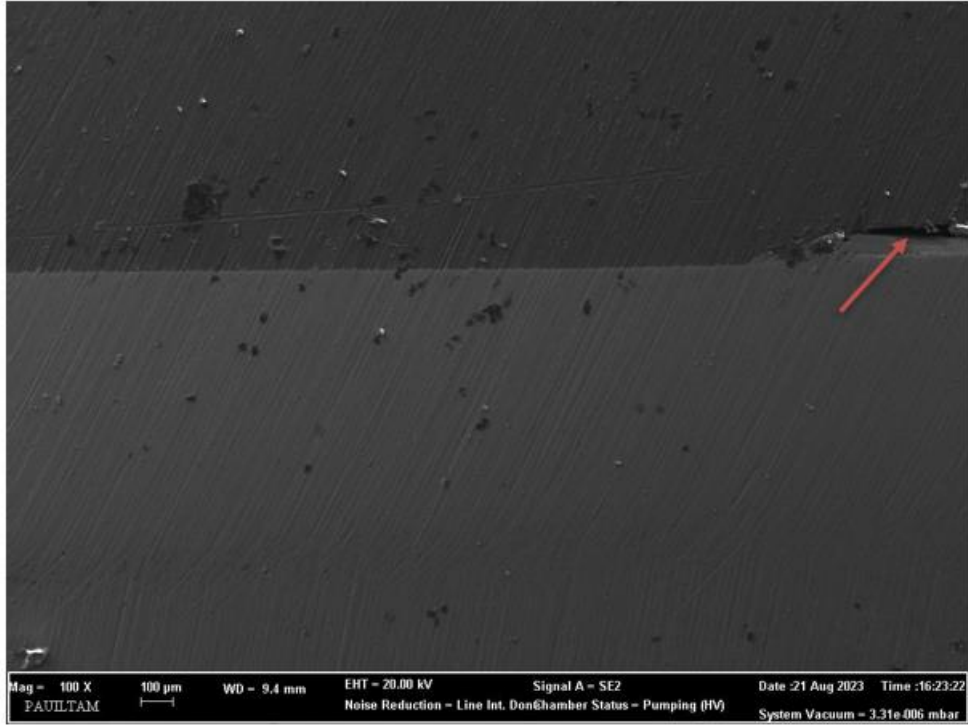
6.4 Kırık Yüzey Analizi

Çekme deneyinin ardından numunelerin kaynak çekirdeği SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile incelenmiştir.

AISI 304L- AA5052 ve AISI 304L- AA6061 numunelerin kaynak kesitlerine ait Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde kaynak çekirdeğinde işaretli bölgelerde gözenek oluşumları tespit edilmiştir.

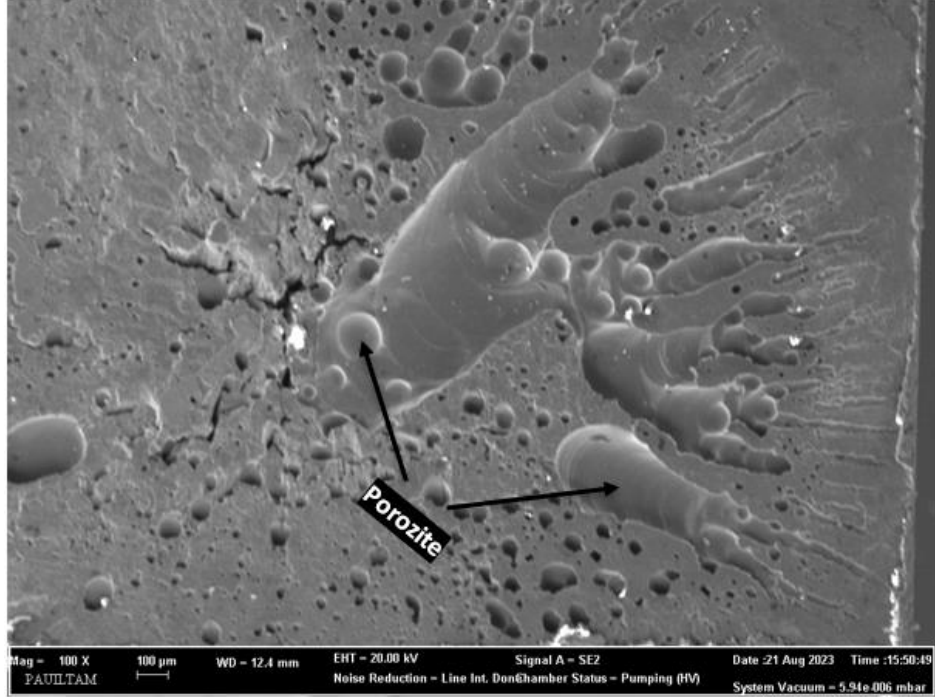


Şekil 6.16 AISI 304L- AA5052 kaynak kesiti SEM görüntüsü (100X)

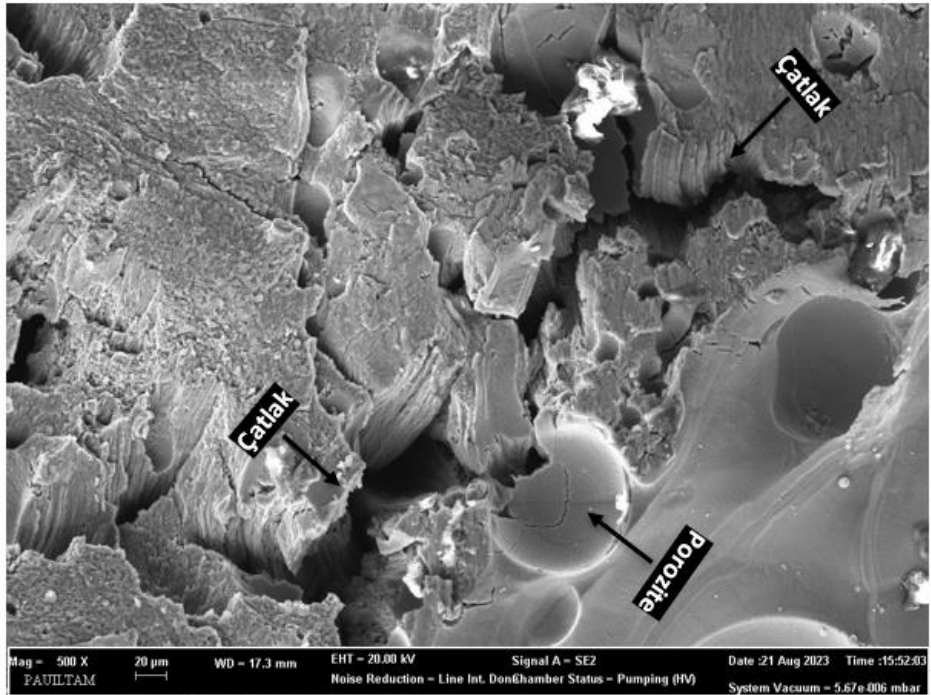


Şekil 6.17 AISI 304L- AA6061 kaynak kesiti SEM görüntüsü (100X)

5052 alüminyum alaşımına ait çekirdek bölgesi SEM görüntüleri Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde çekirdek bölgesinde çatlakların ve porozitelerin olduğu gözlemlenmiştir.



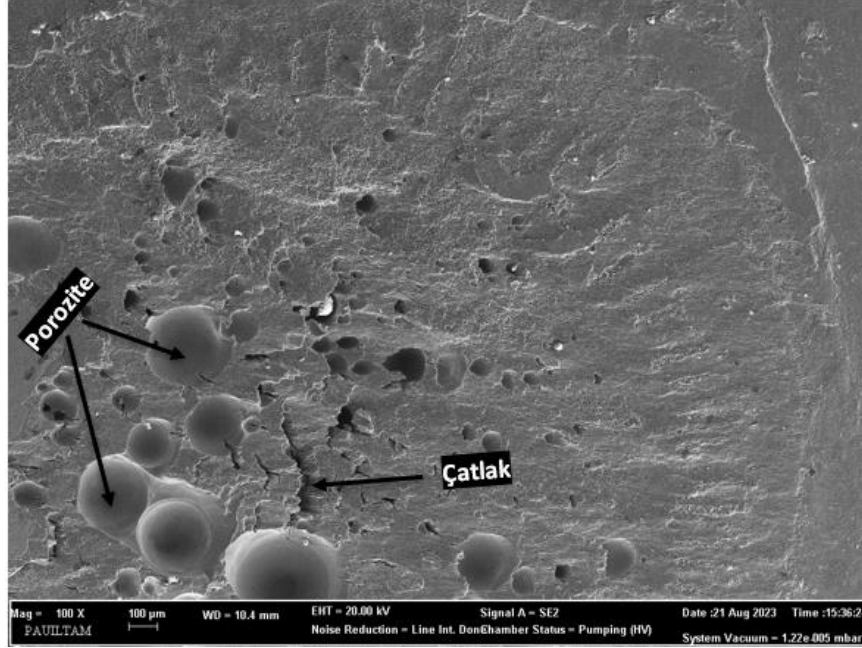
Şekil 6.18 AA 5052 kaynak bölgesi SEM görüntüsü (100X)



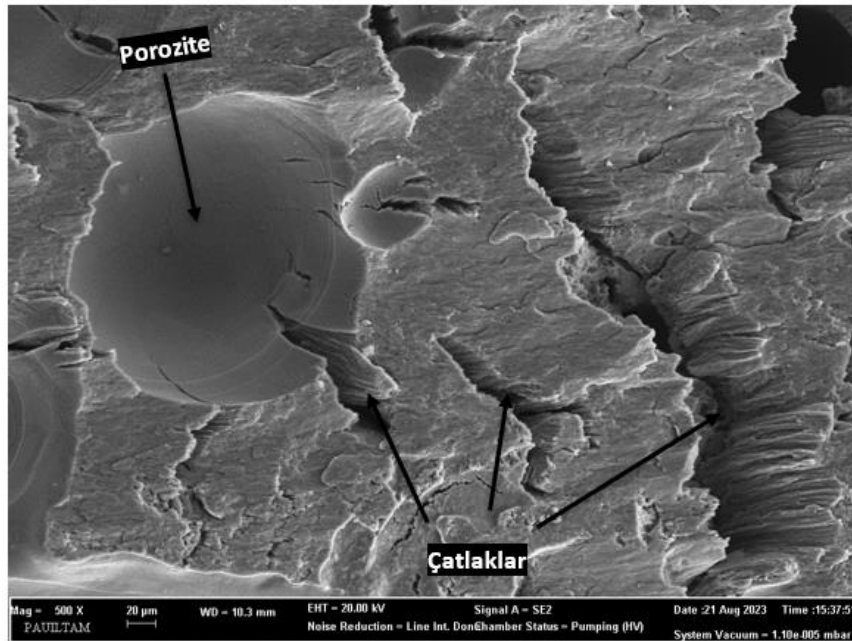
Şekil 6.19 AA 5052 kaynak bölgesi SEM görüntüsü (500X)

6061 alüminyum alaşımına ait çekirdek bölgesi SEM görüntüleri Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de gösterilmektedir.

Şekiller incelendiğinde makro görüntülerde gözlemlenen çekirdek bölgesindeki çatlakların ve porozitelerin varlığı daha net bir şekilde görülmektedir.

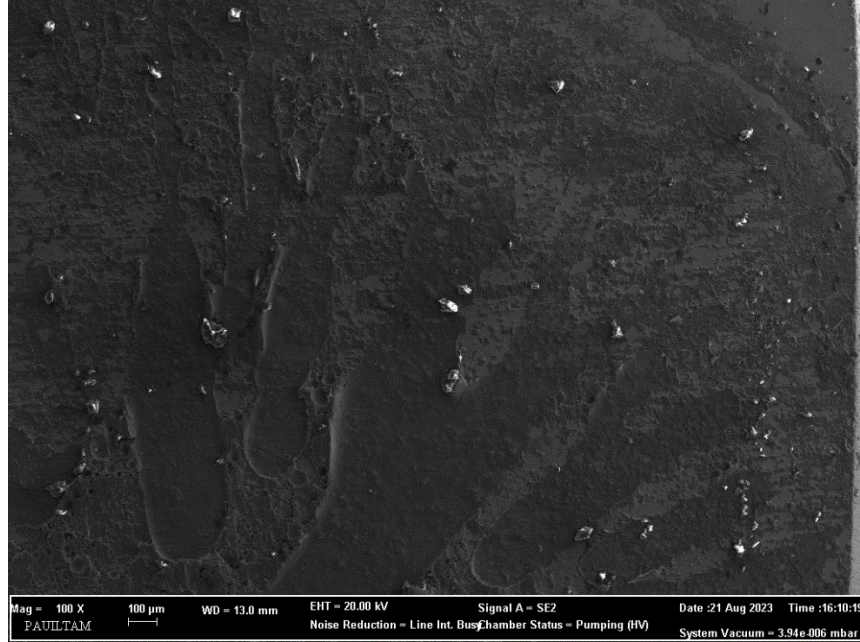


Şekil 6.20 AA 6061 kaynak bölgesi SEM görüntüsü (100X)

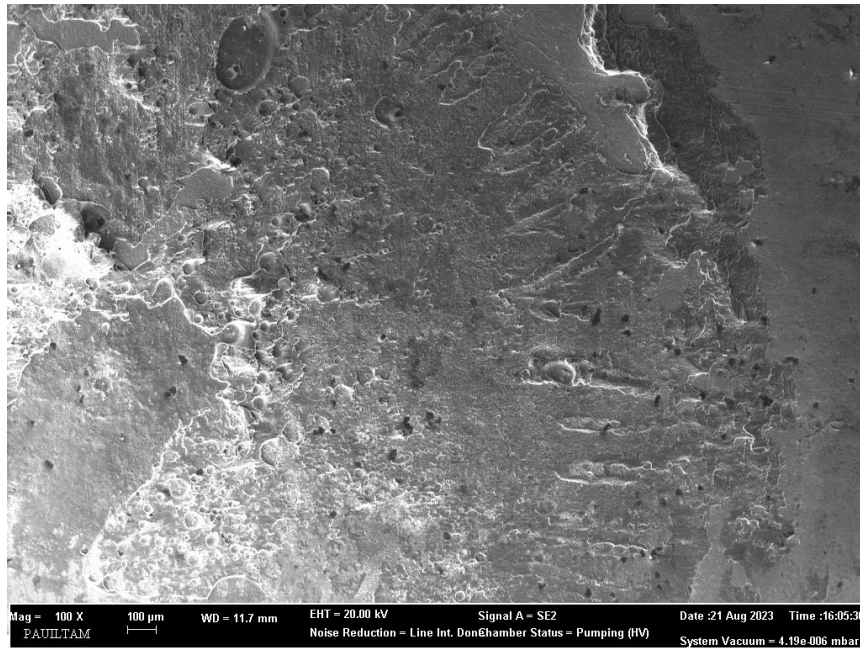


Şekil 6.21 AA 6061 kaynak bölgesi SEM görüntüsü (500X)

304 L paslanmaz çeliğe ait çekirdek bölgesi SEM görüntüleri Şekil 22 ve Şekil 23'te gösterilmektedir. Paslanmaz çelik ara yüzeyinde görülen porozite ve çatlaklar, alüminyum alaşımlarının ara yüzeyinde meydana gelen porozite ve çatlaklara nispeten daha az olduğu SEM görüntüleri ile daha net bir şekilde tespit edilmiştir.



Şekil 6.22 AISI 304L kaynak bölgesi SEM görüntüsü (100X)



Şekil 6.23 AISI 304L kaynak bölgesi SEM görüntüsü (100X)

Kaynak çekirdeğinde bu porozite ve çatlak oluşumunun her iki malzeme çifti içinde özellikle alüminyum tarafında yoğunlaşmasının sebebinin, 5xxx ve 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının daha düşük ergime sıcaklığına sahip olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu durum alüminyum alaşımlarının çatlamaya karşı eğilimli olmalarına neden olabilir.

Ayrıca kaynak işlemi sırasında meydana gelen aşırı ısınma ve aşırı soğuma sonucunda da kaynak çekirdeğinde gözenek ve çatlama oluşabilir. Alüminyum alaşımlarının yüksek termal genleşme özelliği sebebiyle, kaynak çekirdeğinde oluşan gerilmeler bu iç hatalara sebebiyet verebilir.

Gözenek ve çatlama riskini en aza indirmek için kaynak edilecek malzemelerin yüzey temizliği dikkat edilmeli ve kaynak parametreleri (akım, basınç ve süre) optimum seviyede seçilmeli ve kaynak işlemi sırasında kaynak parametreleri sürekli kontrol edilerek işlemler yapılmalıdır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş AA5052-AISI304 ve AA6061-AISI304L malzeme çiftlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi kapsamında yapılan çalışmalara ait değerlendirmeler ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- 1) AA5052-AISI304 ve AA6061-AISI304L malzeme çiftlerinin basınçlı nokta kaynağı ile belirtilen kaynak parametrelerinde, sağlıklı birleşmenin sağlandığı en düşük kaynak akımı değerinin 5 kA olduğu tespit edilmiştir. Kaynak akımı 6 kA değerini aştığında kaynak bölgesinde fışkırma, elektrot yapışması ve delinme gibi kaynak hataları meydana geldiğinden başarılı kaynak işlemi gerçekleşmemiştir. Bu sebeple belirtilen kaynak parametrelerinde nokta kaynak işlemi 5 kA-6 kA değerleri arasında yapılması gerektiği ortaya konulmuştur.
- 2) AISI 304L-AA5052 malzeme çiftinde akım değerinin 5 kA'den 6 kA'e yükselmesi ile çekme dayanımı %15,5 oranında yükselmiştir.
- 3) AISI 304L-AA6061 malzeme çiftinde akım değerinin 5 kA'den 6 kA'e yükselmesi ile çekme dayanımı %43,8 oranında yükselmiştir.
- 4) Çekme deneyinde, kaynaklı numunelerde hasar ara yüzey kırılması şeklinde meydana gelmiştir.
- 5) Kaynak akımının artmasıyla çekme dayanımının arttığı tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı, 6 kA kaynak akımında bulunmuştur. Bu duruma, kaynak bölgesindeki ısı giriş miktarının yükselmesine bağlı olarak artan nüfuziyetin sebep olduğu sonucuna varılabilir.
- 6) Mikro sertlik sonuçları incelendiğinde kaynak çekirdeğinin sertliğinin alüminyum malzemelere göre daha yüksek fakat paslanmaz çeliğe göre daha düşük değerde olduğu tespit edilmiştir.
- 7) Kaynak ara yüzeylerinde alüminyum alaşımları ile paslanmaz çelik malzemelerin farklı termal genleşme katsayılarına sahip olması ve kaynak sırasında oluşan aşırı ısınma sebebiyle sıçramalar oluşmuştur. Sıçramalar kaynak akımının artmasıyla artmıştır. Ara yüzeyde görülen bu sıçramalar mekanik dayanımı olumsuz yönde etkilemediği görülmüştür.
- 8) Kaynak bölgesi SEM görüntüleri incelendiğinde, kaynak çekirdeğinde gözenek ve çatlama hataları tespit edilmiştir. Bu problemlerin giderilmesi ve

mekanik dayanımların bu iç hatalardan en az şekilde etkilenmesi için kaynak işlemi esnasında kaynak parametrelerinin doğru bir şekilde seçilmesi ve malzemelerin yüzey temizliğinin düzgün bir şekilde yapılması önem arz etmektedir.

- 9) Nokta kaynak yöntemiyle birleştirilecek iki farklı metal için optimum parametreleri iyi saptayabilmek çok önemlidir. Özellikle, kaynak akımı, malzeme türüne ve kalınlığına bağlı olarak seçilmelidir. Kaynak akımının malzeme çiftine uygun şekilde ayarlanmaması, düşük mukavemet değerlerine sebep olabildiği kanısına varılmıştır.

8. KAYNAKLAR

Ak, M., “AA206 Alüminyum Döküm Alaşımında Empürite Demirin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-71, İstanbul, (2012).

Akkuş, A., “Galvanizli ve Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Nokta Kaynaklı Bağlantılarının Yorulma Dayanımlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006).

Akyol, M., “Otomotiv Sanayiinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2001).

Almus, Z., “Nokta Direnç Kaynağında Ara Bağlayıcının Birleşme Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2006).

Anderson, T., “The Advancement of Al within the Welding Fabrication Industry and Its Many Product Design Applications”, Svetsaren, 2, 3-5, (2000).

Askeland, D. R., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, University of Missouri-Rolla, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, (1998).

ASM Handbook, Corrosion, ASM International, (1992).

Aran, A., Temel, M. A., Paslanmaz çeliklerin kaynağı”, Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller Üretimi Kullanımı Standartları, Sarıtaş Teknik Yayını, Acar Matbacılık A.Ş., İstanbul, 58-65, (2004).

Aras, S., “Nokta Direnç Kaynağı Uygulanan Farklı Çeliklerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, (2016).

Aydın, H., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Yaşlandırılabilir Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerinin ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, (2008).

AWS C1.1-66., Recommended Practices for Resistance Welding, American Welding Society, Florida, (1997).

Büyükarslan S., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, (2006).

Can, A. Ç., “Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi”, İstanbul, (2010).

Cavaliere P., Cerri, E. “Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by Friction Stir Welding, Journal of Materials Science”, 40, 3669-3676, (2005).

Çüngür, R., “Kaynaklı ve Kaynaksız 5754 Alüminyum Alaşımının Korozyif Ortamlardaki Çekme Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2021).

Davis, J.R., Stainless Steels, ASM International, Ohio, (1994).

Davis, J., Metals Handbook: Desk Edition (Materials Park, OH: ASM International), 2, (1998).

Deschamps, A., Dumont, D., Brechet, Y., Sigli, C. and Dubost, B., “Process modeling of age-hardening aluminum alloys: from microstructure evolution to mechanical and fracture properties”, Proceedings of the James T. Staley honorary Symposium on Aluminum Alloys, (2001).

Erge, H., “Kaynaklı 5086-H32 Alüminyum Alaşımının Korozyon ve Korozyonlu Yorulma Davranışlarına Ultrasonik Darbe İşleminin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (2021).

Eryürek, B., “Elektrik direnç kaynağı”, Mühendis ve Makina, 24, 22-27, (1982).

Esindir, E., “Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2008).

Gallagher, M., “Electrode Wear In The Resistance Spot Welding Of Galvanized Steel Sheet”, MS Thesis, University of Windsor, Ontario (2003).

Gültekin, N., Kaynak Tekniği, Engin Ofset, İstanbul, (1991).

Hassonia, S.M., Barraka O.S., Ismaila M.I., Hussein, S.K., “Effect of Welding Parameters of Resistance Spot Welding on Mechanical Properties and

Corrosion Resistance of 316L”, Middle Technical University, Institute of Technology, Baghdad-Iraq, (2022).

Harlin N, Jones TB. Weld growth mechanism of resistance spot welds in zinc coated steels. J Mater Process Technol, 143–144, 448-453, (2003).

Hıdıroğlu, M., “Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Yüksek ve Ultra Yüksek Dayanımlı Otomotiv Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetlerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, (2022).

Jamasri, Iman, M.N., Soekrisno, R., Triyona, “Corrosion Fatigue Behavior of Resistance Spot Welded Dissimilar Metal Welds between Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel with Different Thickness”, Procedia Engineering, 10, 649-654, (2011).

Kahraman, B., “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alaşımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı (RSW) ve Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSSW) Yöntemleri ile Birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2009).

Kanga J., RAO H.M., Siglerb D.R. and Carlson B.E., “Tensile and Fatigue Behaviour of AA6022-T4 to IF Steel Resistance Spot Welds”, Procedia Structural Integrity, 5, 1425-1432, (2017).

Karakaş, O., Kardeş, F.B., Foti, P., Berto, F., “Dissimilar Welding Applications and Evaluation of Fatigue Behaviour of Welded Joints: An Overview” Strength of Materials, 55, 111-123, (2023).

Kaya, Y., “Titanium Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük, (2010).

Megep, “Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Ders Notları”, T.C Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara (2007).

Megep, “Elektrik Direnç Nokta Kaynağı”, T.C Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara, (2012).

Murat, M.G., “Savunma Sanayinde Kullanılan 420 ve 304L Paslanmaz Çeliklerin Tig Kaynağı Sonrası Korozyon ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, (2018).

Mortazavi, S.N., Marashi, P., Pouranvari, M., Masoumi, M., “Investigation on Joint Strength of Dissimilar Resistance Spot welds of Aluminum Alloy and Low Carbon Steel”, *Advanced Materials Research*, 264-265, 384-389, (2011).

Noor, M.M., Zhen, A.T.Y., Jamaludin, S.B., Hayazi, N.F., Shamsudin, S.R., “Joining of Dissimilar 6063 Aluminium Alloy–316L Stainless Steel by Spot Welding: Tensile Shear Strength and Heat Treatment”, *Advanced Materials Research*, 795, 492-495, (2013).

Odabaş, C., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, *Askaynak Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.Ş.*, İstanbul, 76, (2007).

Oğuz, B., “Demirdışı Metallerin Kaynağı Metalurji-Uygulama”, *Oerlikon Yayınları*, İstanbul (1990).

Öksüz, C., “Yüksek Mukavemetli (2024,6061,7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Suverme Duyarlılığı”, *İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, (1996).

Özyürek, D., “An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel”, *Materials and Design*, 29, 597–603, (2008).

Şafak, S. Ali., “Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya*, (2011).

Sakarya Üniversitesi, “Paslanmaz Çeliklerin Kaynak İşlemi Esnasında Karşılaşılan Problemler ve Alınması Gereken Önlemler”, (2018).

Sarıtaş Ç., “Paslanmaz Çeliklerin İç Yapı ve Türleri”, İstanbul, 19-23, (2012).

Şaldır, R., “Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti”, *M.Ü.F.B.E., Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, (2003).

Taban, E., “5xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının TIG, MIG, ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli*, (2004).

Topcu, İ., Çınar, Ö., Alyanakoğlu, A.E., Çetiner, B.N., Güllüoğlu, A.N., “The Similar and Dissimilar Spot Welding of 304 and 316L Austenitic Stainless Steels”, *ALKU Journal of Science*, 1, 55-59, (2019).

Totten G. E., Mackenzie S., Handbook of aluminum : Physical metallurgy and processes, Marcel Dekker Inc., USA, (2003).

Ünlükal, E., “Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Kalitesinin”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2007).

Vargel, C., “Corrosion of Aluminium Second Edition”, Elsevier, 3-16, (2020).

Yılmaz, B., “Alüminyum Alaşımlarında Faz Yapılarının Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2002).

Yüksel, M., Malzeme Bilgisi, 2002/271-1, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara, (2002).

Welding Handbook, Two Welding Process: Gas, Arc and Resistance, (1970).

Welding Handbook, Section Four Metals and Their Weldability, (1972).

Zedan, M.J., Doos, Q.M., “New Method of Resistance Spot Welding for Dissimilar 1008 Low Carbon Steel- 5052 Aluminum Alloy”, Precedia Structural Integrity, 9, 37-46, (2018).