

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GALVANİZLİ SACLARIN LAZER KAYNAĞI VE GAZALTI KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK
KALİTESİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Başar YAVUZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

EYLÜL 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GALVANİZLİ SACLARIN LAZER KAYNAĞI VE GAZALTI KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK
KALİTESİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

**Başar YAVUZ
(503152021)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat VURAL

EYLÜL 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503152021 numaralı Doktora Öğrencisi Başar YAVUZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GALVANİZLİ SACLARIN LAZER KAYNAĞI VE GAZALTI KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK KALİTESİNE ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Murat VURAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet OĞUR
Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ali PINARBAŞI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 9 Ağustos 2021
Savunma Tarihi : 11 Eylül 2021





Eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Doktora eğitimim ve tezimin hazırlanması aşamasında ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen başta tez hocam Sayın Prof. Dr. Murat VURAL olmak üzere tüm hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu tezin yazılması sırasında desteğini her zaman hissettiğim sevgili eşim Büşra'ya ve tüm eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olduklarını bildiğim aileme teşekkür ederim.

Tez çalışmamın testlerinde yardımcı olan Gedik Test Merkezi çalışanlarına da ayrıca teşekkür ederim.

Eylül 2021

Başar YAVUZ
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	13
3.1 Materyal	13
3.2 Yöntem	15
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER	33
4.1 Deney Parçalarının Hazırlanması	33
4.2 Lazer Kaynak Yöntemi İle Parçaların Birleştirilmesi	33
4.3 Gazaltı Kaynak Yöntemi İle Parçaların Birleştirilmesi	35
4.4 Radyografik Analiz	37
4.5 Çekme Testi	40
4.6 Makrografik Analiz	41
5. TESTLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	43
5.1 Radyografik Analiz Sonuçları	43
5.2 Çekme Testi Sonuçları	45
5.3 Makrografik Analiz Sonuçları	51
6. NUMUNELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	67
7. SONUÇLAR	79
KAYNAKLAR	Error! Bookmark not defined.
ÖZGEÇMİŞ	87



KISALTMALAR

A	: Amper
Ar	: Argon
CO₂	: Karbondioksit
He	: Helyum
H₂	: Hidrojen
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
LASER	: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
l/dak	: Litre/Dakika
mA	: Miliamper
MAG	: Metal Aktif Gaz Kaynağı
MIG	: Metal İnert Gaz Kaynağı
m/dak	: Metre/Dakika
mm	: Milimetre
mm/s	: Milimetre/Saniye
ms	: Milisaniye
N	: Newton
Nd	: Neodimyum
Nd Yag	: Neodymium-Doped Ytrium Aluminium Garnet
N₂	: Azot
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
TIG	: Tungsten İnert Gaz Kaynağı
Yb³⁺	: İterbiyum
Yb³⁺:SiO₂	: Silisyum Katkılı İterbiyum
W	: Watt
x-ray	: X Işını



SEMBOLLER

E1	: 1. Enerji Seviyesi
E2	: 2. Enerji Seviyesi
b	: İş Parçasının Filme Olan Uzaklığı
f	: Işın Kaynağı İle İş Parçası Arasındaki Mesafe
F	: Test Parçası
S	: Radyasyon Kaynağı
t	: Parça Kalınlığı
(+)	: Pozitif
(-)	: Negatif
%	: Yüzde



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Lazer çeşitleri ve özellikleri.	19
Çizelge 3.2 : Malzeme çeşidine göre koruyucu gazlar	24
Çizelge 4.1 : Gazaltı kaynak parametreleri.....	37





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Test numunelerinin ölçüleri.	13
Şekil 3.2 : Sıcak daldırma galvanizleme işlemine ait proses şeması.....	14
Şekil 3.3 : Korozyona maruz kalmış çelik parça	15
Şekil 3.4 : a) Absorbsiyon b) kendiliğinden emisyon c) uyarılmış emisyon.....	17
Şekil 3.5 : a) Kararlı durumdaki ortam b) enerji yollanması c) uyarılmış emisyon d) ışının yükseltgenmesi e) lazer ışını	18
Şekil 3.6 : Lazer kaynak makinelerinin çalışma prensibinin şematik gösterimi	19
Şekil 3.7 : Katılma çatlamasına ait bir örnek	21
Şekil 3.8 : Porozite oluşumuna ait bir örnek	22
Şekil 3.9: Gazaltı kaynak yönteminin şematik gösterimi	25
Şekil 3.10 : a) Robotik gazaltı kaynak makinesi b) manuel gazaltı kaynak makinesi	26
Şekil 3.11 : Gazaltı kaynak yönteminde damla iletimi a) sprej ark b) uzun ark c) kısa ark.....	27
Şekil 3.12 : Kaynak bölgesinde çatlak oluşumu.....	28
Şekil 3.13 : Kaynak bölgesinde porozite oluşumu	29
Şekil 3.14 : Kaynak bölgesinde yanma oluşu oluşumu.....	30
Şekil 3.15 : Kaynak bölgesinde yetersiz nüfuziyet oluşumu.....	31
Şekil 3.16 : Kaynak bölgesinde sıçrama oluşumu	32
Şekil 3.17 : Kaynak bölgesinde yetersiz ergime oluşumu.....	32
Şekil 4.1 : 1 mm kalınlık ve 30x100 mm ölçülerindeki sac levha.....	33
Şekil 4.2 : Lazer kaynak makinesi.....	34
Şekil 4.3 : Numunelerin lazer kaynak işlemi öncesi ve sonrasına ait görüntüleri.	35
Şekil 4.4 : Gazaltı kaynak makinesi	36
Şekil 4.5 : Numunelerin gazaltı kaynak işlemi öncesi ve sonrasına ait görüntüleri. .	37
Şekil 4.6 : Radyografik test aşamasına ait görüntüler.	39
Şekil 4.7: Radyografik incelemeye ait şematik bir çizim.....	39
Şekil 4.8 : Shimadzu AG-IS 50 kN çekme testi	41
Şekil 4.9 : a) Nikon SMZ745T mikroskop b) metacut 251 hassas kesim makinesi..	42
Şekil 5.1 : Gazaltı kaynağına ait x-ray görüntüleri a) porozite b) toplu porozite.....	43
Şekil 5.2 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 8 numaralı numuneye ait nüfuziyet noksanlığı ve toplu gözenek oluşumu gözlenen x-ray görüntüsü.	44
Şekil 5.3 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelere ait x-ray görüntüsü.	45
Şekil 5.4 : Gazaltı kaynağına ait tüm numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafiği.	46
Şekil 5.5 : Kaynak tel çapının etkisi.	46
Şekil 5.6 : Koruyucu gaz debisinin etkisi.	47
Şekil 5.7 : Kaynak hızının etkisi.....	47
Şekil 5.8 : Akımın etkisi.	48
Şekil 5.9 : Tel besleme hızının etkisi.....	48

Şekil 5.10 : Lazer kaynağına ait tüm numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafiği.	49
Şekil 5.11 : Kaynak hızının etkisi.	50
Şekil 5.12 : Güç değerinin etkisi.	50
Şekil 5.13 : Darbe süresinin etkisi.	51
Şekil 5.14 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 1 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	52
Şekil 5.15 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 2 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	53
Şekil 5.16 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 3 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	54
Şekil 5.17 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 5 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	55
Şekil 5.18 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 6 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	56
Şekil 5.19 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 1 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	57
Şekil 5.20 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 2 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	58
Şekil 5.21 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 3 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	59
Şekil 5.22 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 4 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	60
Şekil 5.23 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 5 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	61
Şekil 5.24 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 6 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	62
Şekil 5.25 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 7 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	63
Şekil 5.26 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 8 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	64
Şekil 5.27 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 9 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	65
Şekil 5.28 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 10 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.	66
Şekil 6.1 : Lazer kaynağında kaynak hızı ile gerilme ilişkisi.	71
Şekil 6.2 : Lazer kaynağında darbe süresi ile gerilme ilişkisi.	72
Şekil 6.3 : Gazaltı kaynağında koruyucu gaz debisi ile gerilme ilişkisi.	73
Şekil 6.4 : Gazaltı kaynağında kaynak hızı ile gerilim ilişkisi.	74
Şekil 6.5 : Gazaltı kaynağında akım ile gerilim ilişkisi.	75
Şekil 6.6 : Gazaltı kaynağında tel besleme hızı ile gerilim ilişkisi.	76

GALVANİZLİ SACLARIN LAZER KAYNAĞI VE GAZALTI KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK KALİTESİNE ETKİSİ

ÖZET

Günümüz endüstriyel üretimde parçaların birleştirilmesi sırasında kaynak işlemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle artan üretim hızlarında kolay, hızlı ve verimli bir şekilde kullanılabilir olmasından dolayı çok çeşitli kaynak yöntemleri pekçok alanda ihtiyaç duyulan bir üretim yöntemi olarak ele alınmaktadır.

Birçok farklı yöntemi bulunan kaynak işleminde, bu çalışma kapsamında 2 çeşidi kullanılmıştır. Bu yöntemler gazaltı kaynak yöntemi ve lazer kaynak yöntemidir.

Diğer yandan malzeme olarak endüstriyel olarak kolayca ulaşılabilen ve otomotivden, beyaz eşyaya birçok farklı alanda kullanılan 1 mm kalınlıktaki galvaniz kaplamalı sac levha kullanılmıştır.

Gazaltı kaynağı ile yapılan birleştirmelerde numuneler için belirlenen kaynak parametreleri şu şekilde sıralanabilir; kaynak tel çapı, koruyucu gaz debisi, kaynak hızı, akım ve tel besleme hızı.

Lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler için ise kaynak parametreleri kaynak hızı, güç ve darbe süresi şeklinde seçilmiştir.

Belirlenen kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla her bir aşamda bir kaynak parametresi değiştirilerek incelenmiştir. Bu değişim sırasında seçilen kaynak parametresini etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla diğer parametreler sabit bir değerde tutulmuşlardır. Bu şekilde iki farklı kaynak yöntemi kullanılarak numuneler testlere hazır hale getirilmişlerdir.

Kaynak işlemlerinin kalitesinin artırılması amacıyla, numunelerin kaynak yüzeyleri kir ve diğer artık maddelerde arındırılmışlardır. Numuneler 1 mm kalınlıktaki galvanizli sacdan 30x100 mm ölçülerinde keilmıştır. Kesilen 2 adet parça 30 mm olan yüzeylerinden alın kaynağı ile birleştirilmişlerdir.

Gazaltı kaynağı ve lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler radyografik muayene ile incelenmişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda, gazaltı kaynağı ile hazırlanan numunelerde kaynak bölgesinde porozite oluşumu görülmüştür. Bu porozite oluşumunun kaynak parametreleri ile ilişkisi incelenmiştir. Bazı numunelerde ise yüksek ısı girdisi kaynaklı olarak yanmış bölgelerin varlığı gözlenmiştir. Diğer yandan gazaltı kaynağı ile hazırlanmış numunelerde porozite ya da toplu gözenek olarak adlandırılan kaynak hataları da gözlenmiştir. Bu gibi durumlarda kaynaklı bölgenin kesit alanında azalma oluşmaktadır. Bu azalma mekanik özelliklerde azalma olarak sonuçlanmaktadır.

Lazer kaynağının radyografik sonuçlarına göre ise numunelerde bir miktar porozite varlığı tespit edilmektedir. Ancak gözlenen porozite miktarı, gazaltı kaynağı ile

hazırlanmış olan numuneler göz önüne alındığında kabul edilebilir seviyelerde kalmaktadır. Radyografik muayene sonuçlarına göre, lazer kaynağında dikkate alınacak seviyede hata varlığından söz edilememektedir.

Hazırlanmış olan numuneler kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerinin anlaşılabilmesi amacıyla çekme testine sokulmuşlardır.

Çekme testinde kaynaklı numuneler kopma gerçekleşene kadar çekme kuvvetine maruz bırakılmaktadırlar. Test kapsamında karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla herhangi bir şekilde birleştirilmemiş galvanizli sac levhada çekme testine tabi tutulmuştur. Bu sayede kaynak işlemi sonrasında mekanik özelliklerin karşılaştırılması kolaylıkla yapılabilir.

Gazaltı kaynağı ile birleştirilen numuneler görece iyi diye tanımlanabilecek olan sonuçlar vermişlerdir. Tüm numuneler ait testler çekme kuvveti-uzama şeklinde grafiklenmiş ve ilgili bölümlerde ayrıntılı bir şekilde açıklanmışlardır.

Çekme test sonuçlarında en kötü sonucu 1 numaralı numune vermiştir. Bu numuneye ait olan radyografik sonuçlara baktığımızda da aynı şekilde yüksek porozite oluşumu gözlenmiştir. Dolayısıyla radyografik muayene de belirlenen hatalar, kaynak kesit alanını azaltmıştır. Azalan kesit alan sebebiyle, ilgili numune çekme testinde kötü sonuçlar vermiştir.

Diğer yandan 8 numaralı numuneye ait çekme test verileri göz önüne alındığında 350 MPa gibi mukavemet değerleri gözlenmiştir. Bu değer iyi kabul edilebilecek bir değer olarak tanımlanabilir.

Lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan numunelere ait sonuçlar incelendiğinde ise gözlenen değerlerin gazaltı kaynağı ile birleştirilen numunelere göre oldukça düşük olduğu sonucuna varılabilmektedir. Lazer kaynağı ile hazırlanan numuneler içerisinde en iyi sonucu veren 8 numaralı numune için bile dayanım değeri 230 MPa gibi düşük kabul edilebilecek bir seviyede kalmıştır.

Her iki kaynak yöntemi kullanılarak hazırlanan ve çekme testine tabi tutulan numuneler makrografik analiz ile de incelenmişlerdir. Bu inceleme sırasında çekme testi sonucunda kopan yüzeyler incelemeye sokulmuştur.

Gazaltı kaynağı ile birleştirilen numunelerin kopma yüzeylerine bakıldığında bazı bölgelerde kararmış alanların varlığı gözlenmiştir. Bu alanlar yüksek ısı girdisi kaynaklı olarak yanmış alanlar olarak belirtilebilir. Ayrıca yüksek mekanik özellikler gösteren numunelerin makrografik incelemelerinde yetersiz nüfuziyet gibi hatalara rastlanmamıştır.

Lazer kaynağı ile birleştirilen numunelerin kopma yüzeylerine baktığımızda ise belirgin bir şekilde nüfuziyet noksanlığı varlığı tespit edilmiştir. Nüfuziyet noksanlığı, kaynaklı bölgenin tüm kesit alan boyunca yer almaması durumu olarak açıklanabilir. Yetersiz nüfuziyet nedeni olarak kaynaklı birleştirmenin kesit alanı küçülmüştür. Kesit alandaki azalmada kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerini önemli miktarda azaltmaktadır. Bu nedenle çekme testi sonuçlarının bu kadar düşük değerlerde kaldığı sonucuna varılmıştır.

Yinede lazer kaynağı ile birleştirme sırasında doğru bir şekilde belirlenecek kaynak parametreleri ile daha kaliteli bir birleştirme sağlanabilir. Bu sayede yapının mekanik özelliklerinde de iyileştirme gözlenecektir.

Gazaltı kaynağı ile yapılan işlemlerde, kaynakçının tecrübesi ve yeteneği büyük önem taşımaktadır. İyi bir kaynakçı ile yapılan kaynak işlemi yüksek kalitede bir sonuç verecektir. Ancak insan faktörüne bu kadar açık bir işlemde sabit bir kalite tutturulabilmesi de oldukça zor olacaktır.

Öte yandan lazer kaynağı yarı otomatik veya otomatik olarak gerçekleştirilebilir. Bu sayede insan faktöründen kaynaklanan hatalar en aza indirilebilir.

Lazer kaynağında doğru parametreler kullanılarak otomatize edilmiş işlemlerde sabit bir kalite seviyesi sağlanabilir. Bu şekilde üretim verimliliği artacak ve parça başına düşen maliyet kalemlerinin azalacağı sonucuna varılabilmektedir.

Yapılan bu çalışma ile yaygın olarak kullanılan bir malzeme olan galvanizli çelik sacların birleştirilmesi sırasında kullanılabilecek lazer kaynağı ve gazaltı kaynağının etkisinin anlaşılması kolaylaşacaktır.





THE EFFECT OF WELDING PARAMETERS ON WELDING QUALITY IN COMBINING GALVANIZED STEEL SHEET WITH LASER WELDING AND GAS METAL ARC WELDING

SUMMARY

In today's industrial production, welding is widely used during the joining of parts. It is an easy, fast and efficient production method especially at increasing production speeds. Due to these advantages it provides, it is considered as a production method that is needed in many areas.

In the welding process, which has many different methods, 2 types were used within the scope of this study. These methods are gas metal arc welding and laser welding.

On the other hand, 1 mm thick galvanized metal sheet, which is easily accessible industrially and used in many different areas from automotive to household appliances, was used as material.

Welding parameters determined for the samples in the joints made by gas metal arc welding can be listed as follows; welding wire diameter, shielding gas flow rate, welding speed, current and wire feed rate.

For the samples joined by laser welding, welding parameters were chosen as welding speed, power and pulse duration.

In order to understand the effect of the determined welding parameters on the welding quality, a welding parameter was changed at each stage and examined. During this change, other parameters were kept at a constant value in order to better understand the effect of the selected source parameter. In this way, the samples were prepared for the tests by using two different welding methods.

In order to increase the quality of the welding processes, the welding surfaces of the samples were cleaned of dirt and other residues. The samples were cut from 1 mm thick galvanized steel sheet in 30x100 mm dimensions. The 2 pieces were joined by butt welding on their 30 mm surfaces.

The samples, which were joined by gas arc welding and laser welding, were examined by radiographic examination. As a result of the examinations, porosity formation was observed in the weld zone in the samples prepared by gas metal arc welding. The relationship of this porosity formation with the welding parameters was investigated. In some samples, the presence of burnt areas was observed due to high heat input. On the other hand, welding defects called gas hole or clustered pore were also observed in the samples prepared by gas metal arc welding. In such cases, there is a decrease in the cross-sectional area of the welded region. This reduction results in a decrease in mechanical properties.

According to the radiographic results of the laser welding, some porosity is detected in the samples. However, the observed amount of porosity remains at acceptable levels considering the samples prepared by gas metal arc welding. According to the results

of the radiographic examination, it cannot be mentioned that there is a significant error in laser welding.

The prepared samples were subjected to tensile test in order to understand the mechanical properties of the welded joint.

In the tensile test, welded specimens are subjected to tensile force until rupture occurs. In order to be able to compare within the scope of the test, galvanized steel sheet metal that was not combined in any way was subjected to the tensile test. In this way, comparison of mechanical properties after welding can be done easily.

Samples joined by arc welding gave results that could be described as relatively good. Tests of all samples are plotted as tensile force-elongation and explained in detail in the relevant sections.

In the tensile test results, sample number 1 gave the worst result. When we look at the radiographic results of this sample, high porosity and gas hole formation were observed in the same way. Therefore, the errors determined in the radiographic examination reduced the weld cross-sectional area. Due to the reduced cross-sectional area, the corresponding sample gave poor results in the tensile test.

On the other hand, considering the tensile test data of sample number 8, it was observed that it withstands tension strength such as 350 MPa. This value can be defined as a value that can be considered good.

When the results of the samples joined with the laser welding are examined, it can be concluded that the observed values are quite low compared to the samples joined with the gas metal arc welding. Even for sample 8, which gave the best results among the samples prepared with laser welding, the tensile force value remained at a low level of 230 MPa.

The samples prepared by using both welding methods and subjected to the tensile test were also examined by macrographic analysis. During this examination, the surfaces that broke off as a result of the tensile test were examined.

When the rupture surfaces of the samples joined by gas metal arc welding were examined, the presence of blackened areas was observed in some regions. These areas can be specified as burned areas due to high heat input. In addition, errors such as insufficient penetration were not found in the macrographic examinations of the samples with high mechanical properties.

When we look at the rupture surfaces of the samples joined by laser welding, a significant lack of penetration was detected. The lack of penetration can be explained as the situation where the welded region is not located on the entire cross-sectional area. The cross-sectional area of the welded joint is reduced due to insufficient penetration. The reduction in cross-sectional area significantly reduces the mechanical properties of the welded joint. For this reason, it was concluded that the tensile test results remained at such low values.

However, with the welding parameters to be determined correctly during joining with laser welding, a higher quality joining can be achieved. In this way, improvement will be observed in the mechanical properties of the structure.

The experience and skill of the welder is of great importance in the operations performed with gas metal arc welding. Welding with a good welder will give a high

quality result. However, it will be very difficult to maintain a constant quality in a process that is so open to the human factor.

On the other hand, laser welding can be performed semi-automatically or automatically. In this way, errors caused by the human factor can be minimized.

A constant level of quality can be achieved in automated processes by using the right parameters in the laser source. In this way, it can be concluded that the production efficiency will increase and the cost per piece will decrease.

With this study, it will be easier to understand the effect of laser welding and gas metal arc welding, which can be used during the joining of galvanized steel sheets, which is a widely used material.





1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi günümüz koşullarında yüksek ve hızlı üretim miktarı ile önde gelen endüstri alanlarından biridir. Türkiye’de gerek otomobil üretimi gerekse de otomotiv yan sanayii ile bu sektörde önemli bir oyuncu olarak karşımıza çıkmaktadır. Yaygın olarak otomotiv endüstrisinde kullanılan galvanizli çelik sacların birleştirilmesi amacıyla kullanılan en yaygın yöntem, kaynaktır. Kullanılan farklı kaynak yöntemleri incelendiğinde lazer kaynağı sağladığı düşük ısı tesiri altındaki bölge nedeniyle önemli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak yapısı gereği kaynak işleminde ki yüksek ısı girdisi yaygın kullanım alanı bulan galvanizli sacların kaynak ile birleştirilmesi sırasında bazı problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Diğer yandan gazaltı kaynağı uzun yıllardır kullanımın getirdiği bilgi birikimi ve uygulama kolaylığı ile geniş bir alanda kullanılabilir. Doğru ve iş parçası çeşidine uygun olarak seçilen ortamlarda yapıldığında oldukça iyi ve kaliteli sonuçlar vermektedir.

Ancak bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bünyesinde barındırmaktadır. Bunların en başında gazaltı kaynağı ile yapılan birleştirmelerde ısının çok geniş bir alana yayılması ve bu alanı yapısal olarak etkilemesi gelmektedir. Dolayısıyla kaynak sonrasında iş parçasının metalürjik özelliklerinde de bazı değişimler görülebilmektedir.

Bir kaynakçı tarafından yapılan gazaltı kaynak yönteminde, kaynakçının tecrübesi ve kabiliyeti ortaya çıkan ürünün kalitesine doğrudan etki etmektedir. Bu ve benzeri nedenler dolayısıyla sahip olduğu avantajlara rağmen gazaltı kaynağı insan hatasına açık bir birleştirme yöntemi olarak tanımlanabilir.

Bu çalışma kapsamında yukarıda belirtilen lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı galvanizli çelik sacın birleştirilmesi sırasında kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında galvanizli çelik sac levhanın seçilme nedeni, bu malzemenin otomotivden beyazışya sektörüne kadar pek çok alanda kullanılmasıdır. Ayrıca söz konusu malzemeye erişim ve satın alma işlemleri oldukça kolaydır.

Galvanizli saclar bilindiğı üzere çinko banyosuna batırılmış çelik malzemelerdir. Çinko banyosu çeliğın hava ile temas etmesini engelleyerek korozyon oluşumuna karşı bir kalkan görevi görmektedir. Galvanizli çelik sac yapılar yüksek korozyon direnci nedeni ile kendine yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Ancak çinkonun sahip olduğu düşük ergime sıcaklığı, galvanizli sacların kaynaklı birleştirmeler sırasında, çinko kaplamanın buharlaşmasına ve sahip olduğu korozyon direncinin ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Bu durum, kaynaklı yapının kalitesini önemli ölçüde etkilemekte ve kaynağın güvenilirliğini zedelemektedir. Diğer yandan korozyon maruziyetine açık hale gelen yapının ömründe önemli oranda azalmaktadır.

Bu çalışma nihai olarak ortaya çıkan bu tip durumlara karşı bir çözüm önerme amacındadır. Bu sayede yaygın kullanımı olan galvanizli sacların ileri bir birleştirme yöntemi olan lazer kaynağı ve yaygın olarak kullanılan gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesi incelenecek, yöntemlerin otomotiv ve diğer endüstriyel alanlardaki kullanımının artırılması sağlanmaya çalışılacaktır.

Bu çalışma kapsamında galvanizli sacların lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı ile birleştirilmesi sırasındaki proses parametrelerinin kaynak kalitesine etkisi irdelenecek olup, bu işlemin daha verimli ve kaliteli olarak gerçekleştirilebilmesi amacıyla bazı önerilerde bulunulmaya çalışılacaktır.

Parametrelerin etkisinin daha net anlaşılabilmesi amacıyla üretilen kaynaklı numuneler çeşitli mekanik ve metalografik testlere tabi tutulacak, bu sayede kaynak parametrelerini etkisi gözlemlenecektir.

1.1 Tezin Amacı

Çalışmanın ilk aşamasında iki farklı kaynak yöntemi kullanılarak galvanizli sac malzemenin birleştirilmesi sağlanacaktır. Bu işlemler sırasında önceden belirlenmiş olan kaynak parametreleri kullanılarak, bu parametrelerin etkileri incelenmeye çalışılacaktır. Parametre değişimleri sırasında, parametreler sistematik bir şekilde değiştirilecektir.

Çalışma sonrasında görece yeni bir yöntem ile kullanımı eski olan bir yöntemin kaynak bölgesine olan etkisinin ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır.

Bu sayede endüstride yaygın kullanım alanı bulan bir malzeme olan galvanizli sacın farklı kaynak yöntemlerine uygunluğu tartışılacak ve doğru kaynak yöntemi ve kaynak parametrelerinin seçiminin önemi vurgulanmaya çalışılacaktır.





2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Otomotiv endüstrisi gibi alanlarda değişik kaynak yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlangıçta nokta direnç kaynağı yaygın olarak kullanılmakta iken günümüzde çok çeşitli birleştirme yöntemleri kendilerine uygulama alanları bulabilmektedir. Bir otomotivin birleştirilmesi sırasında 5000 noktaya kadar nokta direnç kaynağı uygulanabilmektedir (Chao, 2003). Bu kadar yaygın olarak kullanılmasında yöntemin otomatize edilebilmesi ve güvenilir olması sayılacak ilk nedenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Galvanizli sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Kaynak için gerekli olan yüksek akım değerleri ve uzun kaynak süresi kaynak elektrotlarının daha kısa ömürlü olmasına neden olmaktadır. Bu durum elektrotların bakım maliyetlerinin artması sonucunu doğurmuştur (Holliday, Parker, & Williams, 1996).

Ancak günümüz endüstriyel üretiminde yeni malzemelerin ortaya çıkması farklı ve daha teknolojik imalat yöntemlerine olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda farklı yöntemlerin yanı sıra lazer kaynağı da sağladığı avantajları ile yeni tip bir birleştirme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Zhang ve diğ. ise deneysel bir çalışmalarında galvanizli sacın nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi sırasında bir elektrodun ne kadar tekrar yapabileceğini incelemişlerdir. Çıkan sonuç ise 1200 kullanımdan sonra elektrot yüzeyinde genişlemelerin olduğu ve bu durumun da kaynak kalitesine kötü yönde etki ettiğini ortaya koymuşlardır (Xhang, Chen, & Zhang, 2008).

Bu gibi olumsuzluklar daha iyi ve işlevsel bir yöntem ihtiyacı doğurmuştur. Ki ve diğ. lazer kaynak işlemi sırasında ki anahtar deliği oluşumunu modellemek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada anahtar deliği oluşumu sırasında lazer ışınının yüzeylerden yansıdığını belirlemişlerdir. Bu sayede iş parçasına iletilen ısı miktarıda artmaktadır (Ki, Mohanty, & Mazumder, 2002). Özellikle derin nüfuziyete ihtiyaç duyulan işlemlerde, bu etki lazer kaynağına büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Lazer kaynağı endüstride çokça kullanılan bir yöntemdir. Özellikle galvanizli sacların yaygın şekilde kullanıldığı otomotiv endüstrisi bu alanların başında gelmektedir. Otomotiv endüstrisinde lazer kaynağının tercih edilme sebebi sağladığı avantajlardan kaynaklanmaktadır. Ağırlık azaltılmasına yardımcı olması, kaynaklı bölgenin temiz ve düzgün görünüşü ve temassız bir kaynak işleminin gerçekleştirilebilir olması lazer kaynağının avantajlarından ilk akla gelenler olarak sıralanabilirler. Ancak galvanizli saclarda bulunan çinko kaplama kaynak işlemlerinde bazı sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Çinko kaplama düşük buharlaşma sıcaklığına sahiptir. Kaynak işlemi sırasında çinko kaplama buharlaşır ve çeşitli sorunlara yol açar. Yüksek hızlı kamera ile yapılan bir araştırma da kaynak bölgesinin 4 mm uzağına kadar çinko buharlaşması gözlemlenebilmektedir (Schmidt, Otto, & Kageler, 2008).

Anahtar deliğinin kararlılığına zarar vermesinin yanında kaynak bölgesinde sıkışarak boşluk oluşumuna da neden olabilmektedir. Kim ve diğ. galvanizli çeliklerin lazer kaynak işlemi sırasında ki anahtar deliğinin davranışlarını incelemişlerdi (Kim, Oh, & Ki, 2015). Yaptıkları çalışma göstermiştir ki çinko kaplama buharlaşırken anahtar deliğinin stabil kalmasını zorlaştırmaktadır. Çinko kaplamaya etki eden yüksek basınçlar, kaynak banyosunda çeşitli etkilere yol açmaktadır. Sıçrama ve patlama şeklinde ortaya çıkan bu durum sonucunda kaynak bölgesinde porozite oluşumu gözlenmektedir. Bilindiği üzere oluşan porozite yapının mukavemetini düşürürken yorulma dayanımını da olumsuz etkilemektedir.

Tzeng yaptığı çalışmada göstermiştir ki bu tip problemler kullanılan lazer kaynağının çeşidine göre değişmemektedir (Tzeng, 2006). Otomotiv endüstrisinde lazer kaynak uygulamalarının nokta direnç kaynağının yerini alması için lazer kaynak çeşidinden bağımsız olarak bu tip problemlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Fabbro ve diğ. çinkonun buharlaşma sıcaklığının 50-100 bar aralığındaki basınçlarda, 1800-2000 K aralığında olduğunu belirlemişlerdir (Fabbro, Coste, Goebels, & Kielwasser, 2006).

Kim ve diğ. ayrıca anahtar deliğinin kaynak süresince davranışını incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda çinko kaplamanın buharlaşması nedeniyle anahtar deliğinin çok kararsız bir yapıda olduğunu ve anahtar deliği çapının değişkenlik gösterdiğini belirtmişlerdir (Kim, Oh, & Ki, A study of keyhole geometry in laser welding of zinc coated and uncoated steels using coaxial observation method, 2015).

Kim ve diğ. lazer ışığının konumunda önemli olduğunu düşünmüşler ve yaptıkları çalışmalarda, kaynak işlem sırasında oluşan anahtar deliğinin ön duvar yüzeyine lazer

ışının odakladıklarında çinko kaplamanın doğrudan ısıtılabilirdiğini farketmişlerdir (Kim, Oh, & Ki, Effect of keyhole geometry and dynamics in zero-gap laser welding of zinc-coated steel sheets, 2016). Bu durum çinko buharının 2939 K olan kritik sıcaklığa ulaşmasına neden olabilmektedir, referans çalışma olarak Martynyuk'un çalışmasına bakarak 2460 barın da kritik buhar değeri olduğunu belirtmişlerdir (Martynyuk, 1983).

Çinko kaplamanın buharlaşmayıp stabil kalması amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmasına karşın, lazer çeşidinin bu konudaki etkisine yönelik inceleme yapan oldukça az çalışma vardır. Hiraga ve diğ. lazer kaynak işleminde kullanılan lazer dalga boyunun, iş parçası tarafından absorbe edilen ışın dolayısıyla ısı miktarına etkisi olduğunu ortaya çıkarmışlardır (Hiraga, Inoue, Kamado, & Kojima, 2002).

Tan ve Shin, kaynak işlem sırasında eriyik içinde ki metal parçacıklarının gelen lazer ışınını absorbe edeceğini ve ışının bir kısmını yayacağını ifade etmişlerdir. Absorbe edilen ve yayılan ışın miktarının düşük dalga boyuna sahip lazerlerde daha az olacağını göstermişlerdir (Tan & Shin, 2014).

Farklı lazer kaynak oluşum yöntemlerinin kaynak kalitesine etkisi de araştırmacılar tarafından incelenen başka bir nokta olarak karşımıza çıkmaktadır. CO₂ lazer ve fiber lazer ile yapılan birleştirmelerde, fiber lazer ile yapılan işlemin daha yüksek çekme mukavemeti gösterdiği yapılan çalışma ile ortaya konmuştur (Mei, Yan, Yi, Chen, & Ge, 2013). Bu sonucun nedeni olarak CO₂ lazerin daha yüksek bir dalga boyuna sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek dalga boyu olan lazer ışınlarında enerji iş parçasına geçmek yerine plazma da soğurur.

Diğer yandan çalışmalara bakıldığında, araştırmacıların genellikle parametrelerin kaynak karakteristiği üzerine etkilerini anlamaya yöneliktir.

Bu kapsamda, Acherjee ve diğ. polikarbonların kaynak ile birleştirilmesi sırasında ki lazer transferini sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ile incelemişlerdir. Farklı kaynak parametreleri kullanılarak kaynak bölgesinde ki ısıalanı ve kaynak dikişi ölçümlerindeki değişiklikleri incelemişlerdir. Lazer gücü ve kaynak süresinin artırılması ile tüm kaynak çıktı davranışlarının arttığını görmüşlerdir (Acherjee, Kuar, Mitra, & Misra, 2012).

Akio ve diğ. 6061-T6 tipi alüminyum alaşımının lazer kaynağı ve bir gazaltı kaynağı çeşidi olan TIG kaynağı ile birleştirilmesinde ısı tesiri altındaki bölgedeki (ITAB)

sertlik dağılımı ve yumuşuma olan bölgeleri incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma ile lazer kaynağı ile yapılan birleştirmelerde ITAB'ın küçük bir alanda yer aldığını gözlemlemişlerdir. Bu duruma neden olarak da lazer ışınının enerjiyi küçük bir alana odaklamasını göstermişlerdir (Akio, Hirotaka, Hirota, Nobutaka, & Kojiro, 1999).

Lazer kaynaklı ferritik/östenitik çelik parçaların çekme mukavemetini inceleyen Anawa ve Olabi güç yoğunluğunda ki artışın ve kaynak hızında ki düşüşün, çekme mukavemetin de artış sağladığını gözlemlemişlerdir (Anawa & Olabi, 2008).

Katyama ve Mizutani ise yaptıkları çalışmalarda iki farklı lazer kaynak yöntemi kullanarak farklı alüminyum alaşımlarında oluşan kaynak hataları ve nüfuziyet karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışma porozite oluşumuna ve anahtar deliği oluşumunu incelemeye odaklanmaktadır. Çalışma göstermiştir ki kaynak hızı porozite oluşumunda etkin bir rol almaktadır. Ayrıca kaynak hızındaki artış anahtar deliği oluşumunda bölgenin daralmasına, bu daralma da oluşan porozitelerin sayıca azalmasına ve boyut yönünden küçülmelerini sağlamaktadır. Çalışma ayrıca farklı lazer kaynak yöntemlerinin porozite oluşumunda önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir (Katayama & Mizutani, Laser Weld ability of Aluminium Alloys, 2002).

Başka bir çalışmada ise iki farklı tip paslanmaz çelik (AISI 430F ve 440C) lazer kaynağı ile mikro çatlak oluşumu incelenmiştir. Çalışma sonucunda yapılan ön ısıtma ve kaynak sonrası yapılan ısıtma ile mikro çatlak oluşumundan kaçınılabileceği gösterilmiştir (Khan, Romoli, & Dini, 2013).

Lazer kaynak işleminde yüksek soğuma hızının lazer ile birleştirilmiş parçalarda ki artık gerilmeleri azalttığı belirlenmiştir (Wang, Zhang, & Li, 2016). Yapılan diğer bir çalışmada ise, lazer kaynağı ve gaz altı kaynağı kullanılarak bir karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma göstermiştir ki; yüksek soğuma hızı, toklukta artışa ve distorsiyon da azalmayı sağlamaktadır (Wei, Lin, Dong, Crowther, & Thompson, 2017).

Kaynak işleminde porozite oluşumu bir başka inceleme alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yan duvarlarda porozite oluşumunun, kaynak banyosunun şekline, ısı iletim yönüne ve katılaşma davranışı ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Özellikle kaynak dikişinde ki tanelerin büyüme yönü ile yüksek bir ilişki içinde olduğu görülmüştür (Zhu, Tang, He, Lu, & Cui, 2016). Seto ve diğ. x-ray görüntüleme ile anahtar deliği oluşumunun dinamik davranışını incelemişlerdir. Anahtar deliğinde oluşan stabil olmayan durumların porozite oluşumuna neden olduğunu saptamışlardır

(Seto, Katayama, & Matsunawa, High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior during high power CO₂ laser welding: effect of shielding gas on porosity formation, 2000).

Norris ve diğ. anahtar deliği oluşumunun bozulmasında kaynak şekli, iş parçasının malzemesi ve işlem için kullanılan lazer ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir (Norris, Robino, Hirschfeld, & Perricone, 2011). Lazer ışınının açısının porozite oluşumuna etkisi olduğu ortaya çıkarılmıştır (Seto, Katayama, & Matsunawa, Porosity formation mechanism and reduction method in CO₂ laser welding of stainless steel, 2002).

Son yıllarda lazer kaynak işleminin bir çeşidi olarak kullanılan eklemeli imalat alanında lazer uygulamaları yaygın olarak görülmektedir. Çalışmada bu yöntemle numune üretmenin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak bu yöntemle üretilen parçaların mekanik özelliklerinde yükleme yönüne veya üretim yönüne göre herhangi bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir (Y. Rosenthal, 2019).

Başka bir çalışmada ise lazer metal biriktirme işlemi ile üretilen malzemeler kullanılmıştır. Çalışma, tungsten tozu miktarı ile mikro yapı arasındaki ilişkiyi incelemeye çalışmıştır. Çalışma sonucunda tungsten karbürün mikroyapıda eşit ve düzgün bir dağılım gösterdiği ortaya çıkmıştır (A. Adeyemi, 2018).

Gaz altı kaynağı ile ilgili yapılan çalışmalara bakacak olursak karşımıza birçok yayın çıkmaktadır. Bu alanda deneysel çalışmaların yanında istatistiksel ve analiz kapsamında yapılan çalışmaların da olduğu görülmektedir.

Aluminyum alaşımlarının kaynağında kullanılan gazaltı kaynağına ait parametrelerinin optimizasyon amacıyla Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada akımın, maksimum çekme mukavemeti değerine etki eden en önemli faktör olduğu ortaya çıkmıştır (Haragopal, Reddy, Reddy, & Subrahmanyam, 2011). Taguchi yönteminin kullanıldığı başka bir çalışmada ise kaynaklı birleştirmelerde kaynak nüfuziyetine etki eden parametreler incelenmişlerdir. Yapılan çalışma göstermiştir ki; kaynak tel hızı en etkili parametre olurken, koruyucu gazın akış hızı ise etkisi en düşük parametre olmuştur (Aagakhani, Mehaddad, & Hayati, 2011). Prakash ve diğ. ise yine bu alanda yaptıkları çalışmada, gerilim, akım ve kaynak hızını en önemli 3 parametre olarak kabul etmişlerdir. Yaptıkları optimizasyon çalışması ile düşük karbonlu çeliklerde mekanik özellikleri bozmayan ideal parametreleri bulmaya çalışmışlardır (Prakash & Raju, 2016).

Genellikler gaz altı kaynağında yapılan çalışmalar göstermiştir ki, kaynak bölgesinin mukavemeti çoğunlukla kaynak şekli ile ilişkilidir. Bu kapsamda, Ravendra ve Parmar yaptıkları çalışmada matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Bu model yardımı ile kaynak dikişi şekli ve durumu üzerinden, kaynak nüfuziyeti ve kaynak ölçüleri ile gibi sonuçları tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu şekilde üretim sırasında kaynak koşullarının kontrolünün daha iyi bir şekilde yapılabileceğini düşünmüşlerdir (Raveendra & Parmar, 1987).

Son yıllarda geleneksel gazaltı kaynağı yöntemi yerine çeşitli lazer kaynak yöntemlerinin kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, üretim verimliliğini artırmak için gazaltı kaynak yöntemi olarak MAG kaynağı yerine yerel vakumlu elektron ışını kaynağı yönteminin kullanılması araştırılmıştır. Çalışma, lokal vakum elektron demeti kaynağı ile birleştirilen numunelerde, kaynak artık gerilmesi olan alanların daha dar bir alanda olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Ek olarak, deneyler ve simülasyonlar, MAG kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelerin, lokal vakum elektron ışını kaynağı ile birleştirilen numunelere göre daha yüksek artık gerilme değerlerine sahip olduğunu göstermiştir (G. Feng, 2021).

Günümüzde aynı malzemelerin birleştirilmesinin yanısıra farklı tipteki malzemenin birleştirilmesi de geniş bir uygulama alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak SA387 tipteki alaşımlı çelik ile paslanmaz çelik birleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kaynak parametreleri Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin kullanımı ile daha iyi bir darbe enerjisi değerine sahip olan kaynaklı birleştirme oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışma sonucunda kaynak işlemi sırasında kullanılan akım değerlerinin darbe enerjisi değerini etkileyen en önemli değişken olduğu sonucuna varılmıştır (Ramaraao, ve diğerleri, 2021).

Lazer kaynağı ve hibrit lazer ark kaynağının kullanımı da son yıllarda kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda HG785D çeliği lazer kaynağı ve lazer ark hibrit kaynağı ile birleştirilmiş ve ardından mikroyapı ve mekanik özellikler açısından incelenmiştir. Sonuç olarak hibrit yöntemde yüksek ısı girdisi nedeniyle farklı mikroyapılar gözlemlenmiştir. Ayrıca hibrit yöntemde kaynak bölgesinde daha düşük mikro sertlik ve daha yüksek darbe enerjisi değerleri gözlenmiştir (F. Liu, 2020).

Yapılan bir çalışmada ise galvanizli sacların gazaltı tandem kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak kalitesini arttırmak ve porozite oranının düşürülmesi amaçlanmıştır. Kaynak nüfuziyeti, kaynak derinliği gibi sonuçların oluşması için gerekli olan geometrik özellikler incelenmiştir. Tandem gazaltı kaynağı ile yapılan işlemlerde tek gazaltı kaynağı ile yapılan işlemlere göre doğru tel besleme hızı ile daha düşük porozite oranı sağladığı sonucuna varmışlardır. Mukavemet açısından bakıldığında ise, yapılan çekme testi sonuçlarına göre tandem gazaltı kaynağı ile hazırlanan numunelerin tek gazaltı kaynağı ile hazırlananlara göre daha yüksek mukavemet değerleri sağladığı sonucuna varmışlardır (Kam, Lee, Kim, Kim, & Kang, 2021).

Gazaltı kaynağı üzerine yapılan bir çalışmada, işlem sırasında iki koruyucu gaz kullanımının ark ve kaynak dikişi formasyonuna etkisi incelenmiştir. Koruyucu gaz olarak argon ve karbondioksit kullanılmıştır. İki farklı koruyucu gazın aynı anda kullanımı ile birleştirilmiş olan kaynaklı numunede, arkın ısı ve basınç dağılımının daha iyi olduğu gözlenmiştir. Bu şekilde kaynak bölgesinde kaynak metalinin her bölgeye ulaşımının kolaylaştığı gözlemlenmiştir (Zong, Chen, & Wu, 2020).

Mercan ve diğ. yaptıkları çalışmada, iki farklı alüminyum alaşımı olan AA5754 ve AA6013 malzemenin otomatik gazaltı kaynağı ile birleştirilmesi sırasındaki bağlantı özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sırasında kaynaklı bölgenin mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Farklı yapıdaki alüminyum alaşımlarının otomatik gazaltı kaynağı ile birleştirilmesinde artan akım değeri ile çekme mukavemetinde azalma olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca sabit akım altında ısı girdisinin artması sonucu olarak yapının korozyon direncinin azaldığını gözlemlemişlerdir (Mercan, Ayan, & Kahraman, 2020).

Lazer hibrit kaynağı üzerine yapılan başka bir çalışmada, ısı kaynağındaki değişikliklerin numune üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada lazer ışını ile elektrot ucu arasındaki mesafe ve lazer yönlendirme modu değiştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, lazer ışını ile elektrot ucu arasındaki mesafenin önemli olduğu ve bu mesafe ideal aralığın üzerinde bir değere ulaştığında ışıında saçılma meydana geldiği ve kaynak hatalarının oranında artış olduğu görülmüştür (S. Zhang, 2020).

Hibrit lazer-gazaltı kaynağı için yapılan başka bir çalışmada, kaynak işlemi sırasında oluşan damlacıkların ve elektrik sinyallerinin gerçek zamanlı olarak gözlemlenmesi

amaçlanmıştır. Bu durumu gözlemlemek için yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Çalışma, hem lazer gücünün hem de ark gücünün kaynak derinliğini ve kalitesini etkilediğini sonucuna varmıştır. Lazer ve ark arasında doğru bir mesafe ayarlayarak, anahtar deliği üzerinde sıçrayan damlacıkların daha az etkisi ile kaynağın kalitesinin olumlu etkileneceği sonucuna varılmıştır (F. Zhang, 2019).

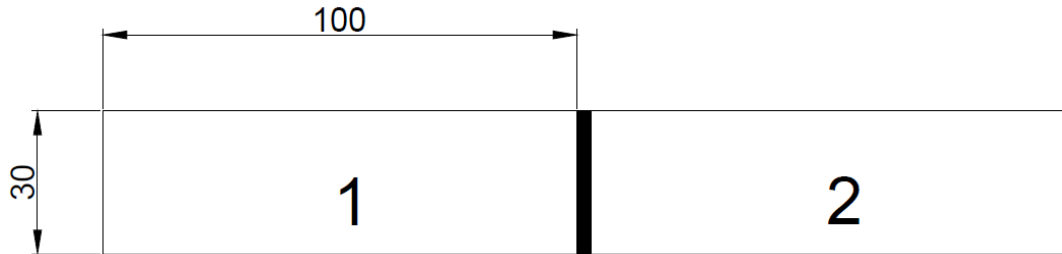


3. MATERİYAL VE YÖNTEMLER

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan malzeme ve bu malzemelerin birleştirilmesi sırasında kullanılan kaynak yöntemlerine ait bilgiler verilmektedir.

3.1 Materyal

Tezde endüstri de yaygın bir şekilde kullanılan galvanizli sac malzeme kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 1 mm kalınlıkta sac levha malzeme kullanılmıştır. Kullanılan malzeme piyasada bulunabilen ve yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Bu kapsamda sac levhadan 30x100 mm ölçülerinde parçalar kesilmiş ve birleştirme işleminde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Galvanizleme işlemi tez kapsamında yapılmamıştır. Kesilen parçalar ait teknik resim ve ölçüleri aşağıda görülebilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Test numunelerinin ölçüleri.

Galvanizli sac üretimine dair bilgiler şu şekilde açıklanmaktadır.

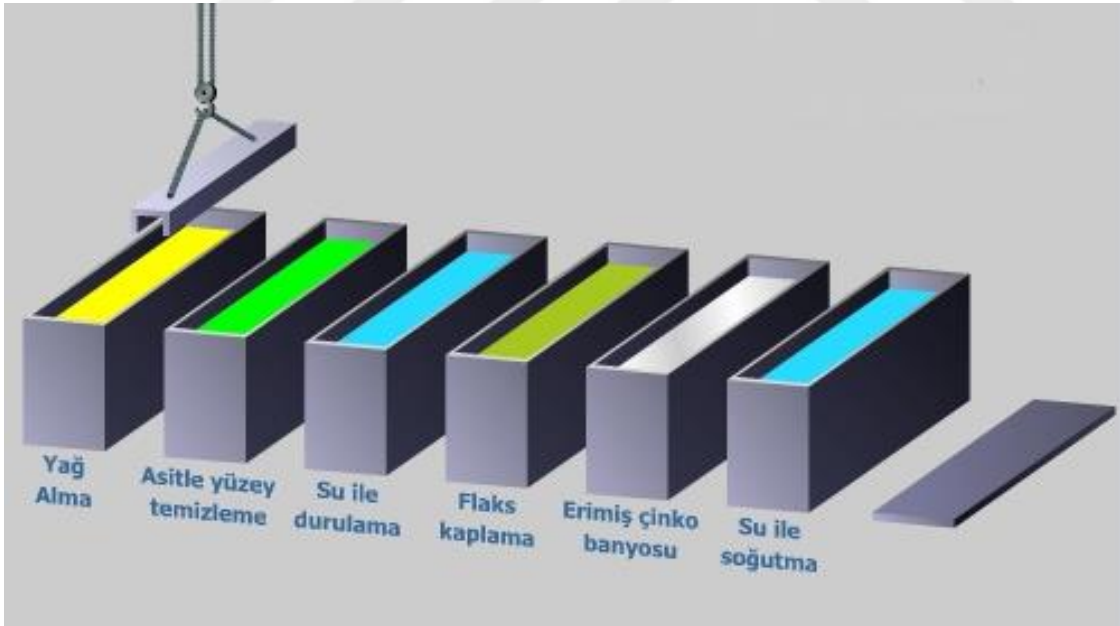
Galvanizleme, metali korozyondan korumak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Daha kalın bir ana metale ince bir çinko kaplama uygulayarak onu çevreleyen ortamdan korumaya yardımcı olur.

Sıcak daldırma galvanizleme, korozyona dayanıklı, çok katmanlı bir çinko-demir alaşımı ve çinko metali kaplaması üretmek için demir veya çeliğin ergimiş haldeki çinko banyosuna daldırılması işlemidir. İşlem sırasında çelik çinkoya daldırılırken çelikteki demir ile ergimiş haldeki çinko arasında metalurjik bir reaksiyon meydana

gelir. Bu reaksiyon bir difüzyon işlemidir, bu nedenle kaplama, parça boyunca tek tip bir kalınlık oluşturan tüm yüzeylere dik olarak oluşur.

Çeşitli kullanım alanlarında gördüğümüz ve kullandığımız çelik yapılarda gümüş benzeri bir renk görülür. Bu “gümüş” olarak algıladığımız yapı aslında çinkonun kaplamasıdır.

Sıcak daldırma galvanizleme işlemi, oldukça eski bir yöntemdir ve 1742'den beri kullanılmaktadır. Bu sayede onlarca yıldır makul bir maliyetle uzun ömürlü, bakım gerektirmeyen korozyon koruması sağlar. Nesiller boyu çeliği korumak için sıcak daldırma galvanizleme kullanılmış olsa da, galvanizleme süreci yeni teknolojiler ve yaratıcı kimyasallarla gelişmeye devam etmektedir. Sıcak daldırma galvanizleme işlemin üç ana adımda gerçekleşmektedir. Bunlar; yüzey hazırlama, galvanizleme ve son işlemdir. İşlem yapılış şekli itibarıyla basit bir proses olarak tanımlanabilmektedir. İşleme ait bir görsel Şekil 3.2’de görülebilmektedir. Burada görülen yağ alma, asitle yüzey temizleme ve su ile durulama işlemleri yüzey hazırlama olarak gruplanmaktadır. Diğer yandan flaks ile kplama ve ergimiş çinko banyosu galvanizleme olarak tanımlanırken, su ile soğutma aşaması son işlem olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.2 : Sıcak daldırma galvanizleme işlemine ait proses şeması (Galmetsan Web Page, 2021).

Galvanizleme işlemi gerçekleştirilmemiş çelik malzemeler korozyon etkilerine açık bir durumda kalmaktadır. Korozyondan korunma işlemi gerçekleştirilmemiş olan çelik yapılara ait örnekler Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Korozyona maruz kalmış çelik parça (Stainless Sructurals Web Page, 2021).

Galvanizleme işlemine ait olan ilk aşama yüzey hazırlama olarak adlandırılır. Buradaki asıl amaç yüzeyi tüm oksitlerden ve diğer kirletici kalıntılardan arındırmaktır. Mümkün olan en temiz çelik yapı elde edilmeye çalışılmaktadır. Galvanizleme işleminde çinko kaplama temiz olamayan yüzeylerle bir etkileşime girmez ve korozyon koruması sağlamaz. Bu nedenle yüzey temizliği oldukça önemli bir aşamadır. Yağ alma, çeşitli asitlerle yıkama ve suda durulama şeklinde yapılan bu işlemlerde çelik tüm istenmeyen artıklardan ve yabancı maddelerden arındırılır.

Sonraki aşama için tam olarak temizlenen çelik çinko banyosuna daldırılmaya hazırdır ve bu işlem galvanizleme olarak adlandırılmaktadır. Galvanizleme sırasında metal ergimiş halde bulunan çinkoya batırılır ve aralarında bir reaksiyon oluşması sağlanır.

Son aşama olan son işlemde ise çinkoya batırılmış olan çelik su ile soğutma işlemine alınır. Bazı durumlarda suyun içine çeşitli kimyasallarda eklenebilmektedir. Son olarak katı haldeki çinko damlacıkları mekanik olarak yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Bu işlemler sonucunda yüzeyi galvanizlenmiş olan çelik yapı korozyona karşı korunmuş olur.

3.2 Yöntem

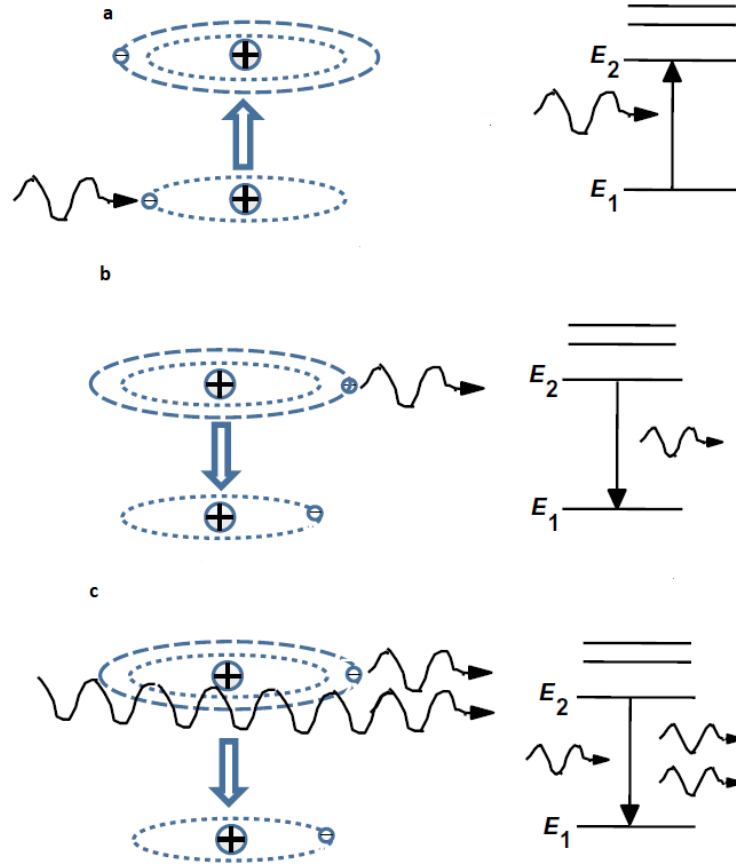
Bu çalışma kapsamında önceden belirtilmiş olan ölçülerde kesilen 1 mm kalınlıktaki galvanizli saclar iki ayrı kaynak yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak birleştirilmişlerdir. Lazer kaynak yöntemi ve gazaltı kaynak yöntemi bu kapsamda seçilerek uygulanmıştır. Bu yöntemlerin seçiminde, gazaltı kaynak yönteminin yağın bir şekilde kullanılması ve lazer kaynak yönteminin ise kendine yeni yeni kullanım alanları bulması önemli bir etken olarak düşünülmüştür. Bu kasamda gazaltı kaynak

yöntemi daha eski, lazer kaynak yöntemi ise daha yeni bir birleştirme yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.2.1 Lazer kaynağı

Lazer kelimesi İngilizce “ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” olarak adlandırılan işlemin baş harflerinden oluşmuştur. Türkçe çevirisi olarak “Işığın Uyarılmış Emisyonla Yükseltgenmesi” şeklinde çevrilmektedir. Kendine birçok farklı amaçla kullanım alanı bulabilen lazer, yaygın olarak birleştirme, markalama, lehimleme, delme ve şekil verme gibi alanlarda kullanılmaktadır.

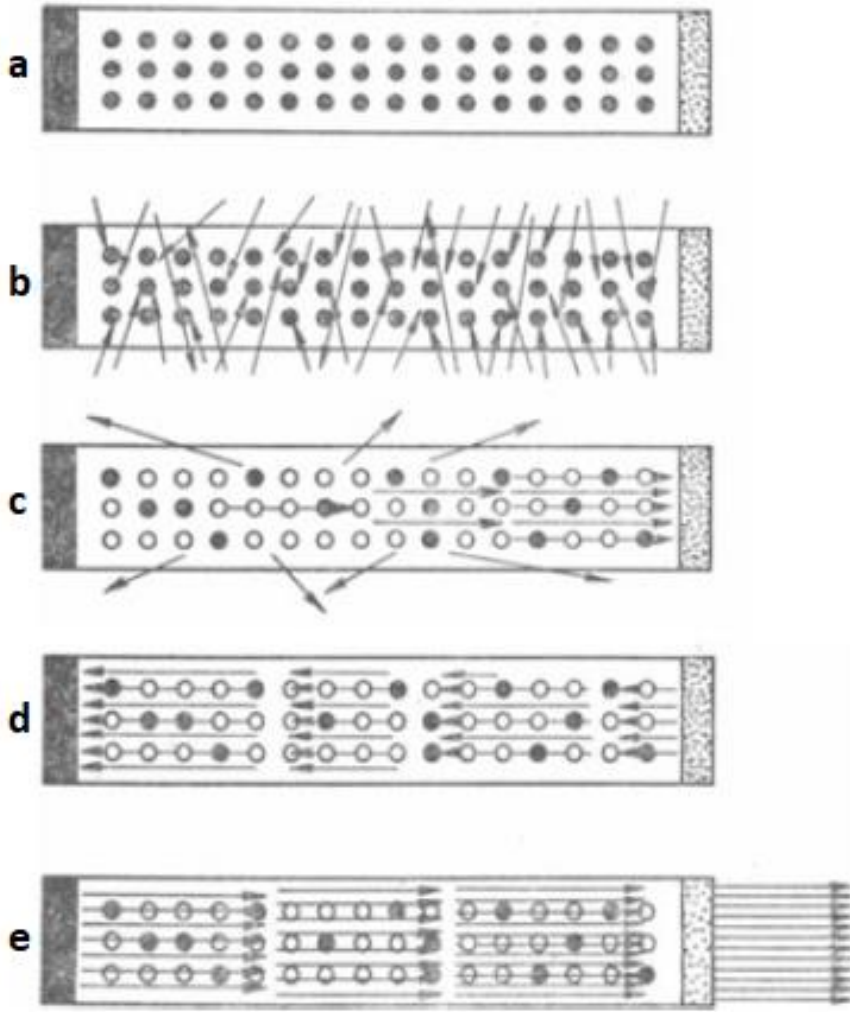
Lazerlerin çalışma prensibinde, atomların enerji seviyeleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu enerji seviyeleri arasında atomların hareketi sırasında ortama yaydığı fotonların odaklanması sonucu lazer ışını elde edilmektedir. Işığın ya da diğer bir deyişle lazerin atomlarla ilişkisi üç kavram ile açıklanabilir. Bunlar; absorpsiyon yada soğurma, floresan veya kendiliğinden emisyon ve son olarak uyarılmış emisyon. İlk aşama olan absorpsiyonda düşük enerji seviyesinde yer alan bir atom kendisine gönderilen enerjiyi soğurur ve bir üst enerji seviyesine çıkar diğer bir deyişle yükseltilir. İkinci aşama olan floresan ya da kendiliğinden emisyonda ise, kararlı yani daha düşük enerji seviyesinde yer almak isteyen atom düşük enerji seviyesine geçiş yapar ve bu esnada ortama foton yayar. Diğer aşama olan uyarılmış emisyonda ise, üst enerji seviyesinde yer alan atom, uygun formdaki bir foton ile etkileşime girer ve sonucunda daha düşük enerjili seviyeye iner. Bu aşamada da ortama foton salımı yapar. Bu sayede iki foton ortaya çıkar. Bu iki foton lazerin karakteristik özelliği olan aynı frekansa, aynı faza ve aynı yöne sahiptir. Bu işlemin çokça gerçekleştirilmesi ile de aynı frekansta ve aynı dalga boyunda yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer ışını elde edilir (Katayama, Fundamentals and Details of Laser Welding, 2020). Bu aşamaları Şekil 3.4’te görülebilir.



Şekil 3.4 : a) Absorbsiyon b) kendiliğinden emisyon c) uyarılmış emisyon (Katayama, Fundamentals and Details of Laser Welding, 2020).

Ancak işlevsel bir lazerde bu enerji seviyeleri 3' den fazla olarak yer almaktadır. İşlevsel bir lazer ışını üretimi sırasında, ışın karşılıklı aynalar arasında birçok kez yansıtılarak işlemler tekrarlanır ve sonucunda yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir lazer ışını elde edilmiş olur. Bu aşamalar sırasında kullanılan aynalardan bir taraftaki tam yansıtma sağlarken diğer taraftaki aynalar da küçük bir geçirgenlik vardır.

Bu aşamaların şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir. Burada yapıya dışarıdan verilen enerji ile ortam uyarılarak önce absorpsiyon daha sonrada kendiliğinden emisyon yayınma yada uyarılmış emisyon gerçekleşir. Bu işlemler sırasında aynalar yardımı ile ışının yoğunluğu artırılarak işlem sonuçlanmış olur.



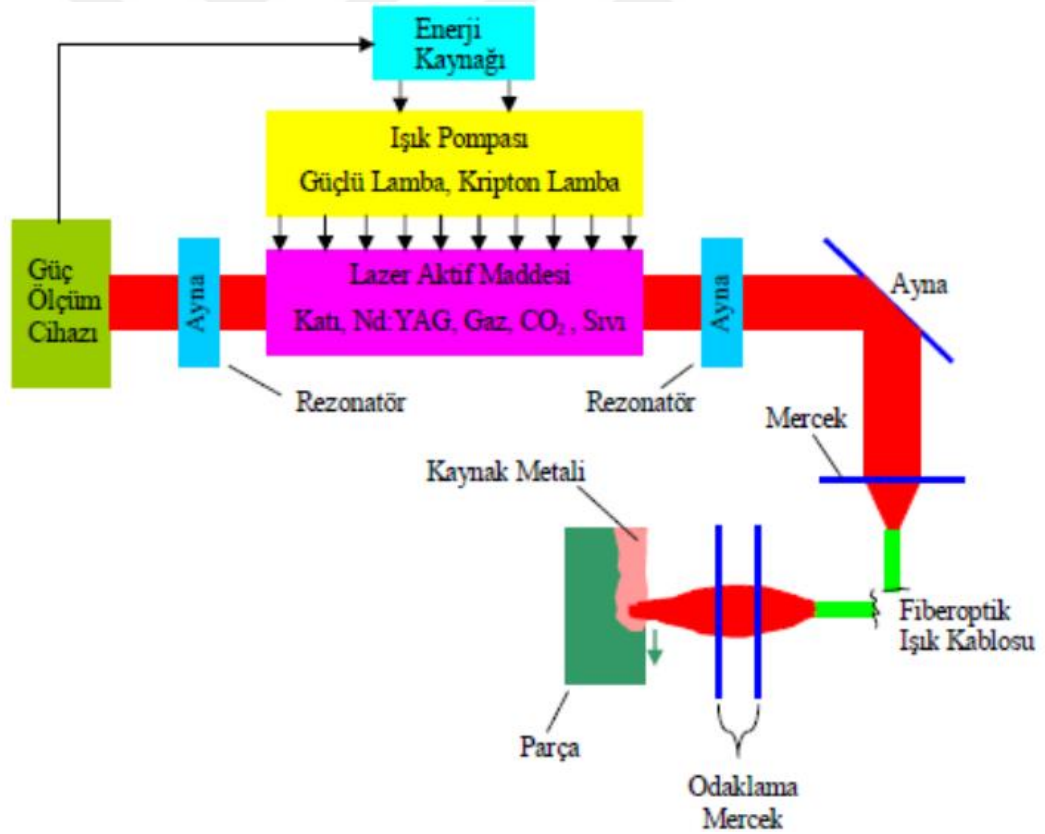
Şekil 3.5 : a) Kararlı durumdaki ortam b) enerji yollanması c) uyarılmış emisyon d) ışının yükseltgenmesi e) lazer ışını (Raveendra & Parmar, 1987).

Lazer ışınını endüstriyel uygulamalarına bakacak olursak karşımıza birçok alan çıkmaktadır. Endüstriyel lazerler kullanılan ortam, malzeme ya da frekans gibi özelliklerine göre adlandırılırlar. Lazerler en yaygın olarak 3 gruba ayrılırlar; katı, sıvı ve gaz lazerler. Bu lazer türlerinin kullanımı yapılacak işlemin spesifik ihtiyaçlarına göre belirlenerek seçilir. Bu farklı çeşitlerdeki lazerler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Lazer çeşitleri ve özellikleri.

Lazer Çeşidi	Ortalama Gücü	Lazer Ortamı	Sağladığı Avantaj
CO ₂ Lazer	45 kW	CO ₂ -N ₂ -He karışımı-Gaz	Yüksek enerji kolaylığı
Nd Yag Lazer	10 kW	Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ -Katı	Hızlı transfer edilmesi ve kolay kontrolü
Diyot Lazer	60 kW	InGaAsP-Katı	Kompaktlık
Disk Lazer	16 kW	Yb ³⁺ :YAG-Katı	Yüksek parlaklık
Fiber Lazer	120 kW	Yb ³⁺ :SiO ₂ -Katı	Kompaktlık

Lazer kaynak makinelerinin şematik bir gösterimi Şekil 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 : Lazer kaynak makinelerinin çalışma prensibinin şematik gösterimi (Özden & Gürsel, 2004).

CO₂ Lazer: Bu tipteki lazer çeşidinde boşluk içerisinde bir gaz karışımı kullanılır. Bu karışım uyarılarak elde edilen lazer ışını ile gerekli işlemler yapılabilir. Elde edilen

CO₂ ışını 10,6 µm değerindedir. Üretilcek lazer ışınının gücünü azaltması sebebiyle ortamdan nem uzaklaştırılır. Dervre kartı gibi yapıların delinerek işlenmesinde yaygın olarak kullanılır (Katayama, Very Easy Book of Laser Processing, 2019). Uzun süredir kullanılan bu lazer kaynak tipinde koruyucu gaz olarak argon kullanımı plazma oluşumunu kolaylaştırıcı etki göstermektedir. Geniş kullanım alanı bulan bu lazer kaynak tipi yerine, artık fiber veya diyet lazerleri kullanılmaya başlanmıştır.

Nd Yag Lazer: Bu lazer tipi ismini yapısında bulunan Neodimyum (Nd) elementinden alır. Flaş lambası ya da bir diyet ile uyarılan sistemden lazer ışını elde edilir. Derin nüfuziyete sahip olması gereken paslanmaz çelik malzemelerin kaynak ile birleştirilmesi sırasında 6-10 kW arası Nd Yag lazer kaynağı kullanılmaktadır. Yüksek enerji değerlerindeki bu tip kaynak makineleri yerine küçük işlemler için diğer tipteki lazer kaynak makineleri kullanılmaktadır.

Diyet Lazer: Bu tip lazerlerde akım bir yarı iletken doğru gönderilir ve daha sonra ışık n ve p tip bölgeler arasında oluşur. Işığın yansıtıcı aynalar arasında hareket etmesi ile yoğunluğu artırılmış olur. Diyet lazerler ayrıca yarı-iletken lazerler şeklinde de adlandırılmaktadır. Bu tip lazerlerin küçük ve kompakt olarak üretilmesi en büyük avantajlarıdır.

Disk Lazer: Bu tip lazerlerde, Nd Yag kullanılır. Ancak Nd Yag lazerlerin dezavantajlarından biri olan kötü ışın kalitesini ortadan kaldırabilmek için; Nd Yag bakır bir plakanın üzerine yerleştirilir. Şekli bir diske benzetilebilir. Fiber taşıma sistemli disk tipi lazer kaynak makineleri özellikle bazı parçaların kesilmesinde, işlenmesinde ve birleştirilmesi aşamasında kullanılmaktadır.

Fiber Lazer: Bu yapıda Yb⁺³ nadir toprak elementi katkılı yüksek saflıkta SiO₂ kuvars camı kullanılmaktadır. Yüksek ışın kalitesi, küçük ve hafif bir cihaza sahip olamsı gibi avatajları bulunur. Ayrıca, yüksek yoğunlukta ve yüksek enerjide ışın üretilmektedir. Birçok alanda kullanım alanı bulunan fiber lazer, özellikle son zamanlarda MAG kaynağı ile birlikte hibrit bir kaynak yöntemi olarak kullanılmaktadır.

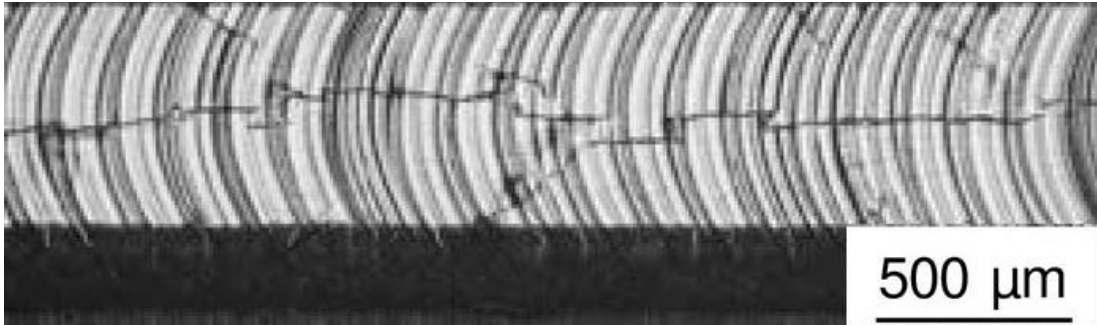
Lazer Kaynak Hataları

Lazer kaynağı ile birleştirmeler sırasında oluşabilen kaynak hataları aşağıda listelenmiş ve açıklanmıştır.

Katılaşma Çatlaması: Bu hatanın nedeni kaynak işlemi sonrasında soğuma esnasında yapının üzerine etkiyen gerilmelere gerekli dayanımı gösterememesinden kaynaklanmaktadır. Genellikle kaynak bölgesinin merkezine yakın bir şekilde dendrit sınırlarında ince bir film katmanı olarak düşük sıcaklıklarda katılaşan bir bölge oluşumu nedeniyle gerçekleşir. Bu düşük sıcaklık nedeniyle, yapı içerisindeki düşük ergime noktasına sahip alaşımların hızlı katılaşması tane sınırlarında ayrılmaya sebep olmaktadır (Şekil 3.7).

Özellikle iş parçası içerisindeki yüksek kükürt ve fosfor bu oluşuma neden olmaktadır. Bu elementlerin dışında östenitik faz oluşumunu destekleyen karbon, nikel gibi elementlerde bu oluşumu artırıcı etki gösterirler.

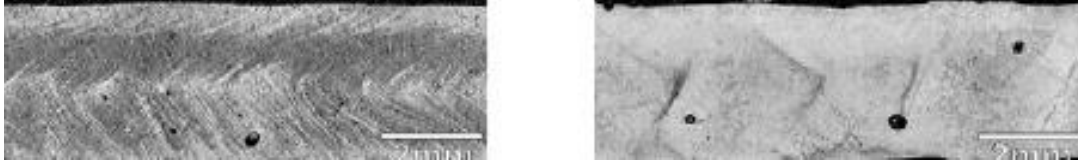
Kaynak hızı bu tip kaynak hatasının oluşumunda önemli bir etkene sahiptir. Yüksek kaynak hızı ile yapılan işlemlerde dar bir kaynak hattı oluşur. Bu durum katılaşma çatlığının oluşmasına neden olarak görülebilir. Ayrıca kaynak edilecek bölgenin yetersiz derecede temiz oluşu, bağlantı tipinin çeşidi gibi durumlarda bu kaynak hatasının oluşmasını arttıran sebeplerdir. Kötü temizlenmiş, iyi oturmeyen parçaların birleştirilmesi sırasında katılaşma çatlaması oluşması ihtimali, iyi temizlenmiş ve parçaların birbirine tam oturduğu durumlara göre daha yüksek olacaktır. Kaliteli bir kaynak işlemi gerçekleştirmek için kaynak öncesi hazırlıkların tam ve doğru yapılması önem arz etmektedir.



Şekil 3.7 : Katılaşma çatlamasına ait bir örnek (Bielenin, Schmidt, Schricker, & Bergmann, 2019).

Porozite: Kaynak işlemi sırasında gazların katılaşıp metalin içerisine hapsolmesi ile oluşur. Lazer ile kaynak işleminde belirli bir seviyeye kadar olan porozite kabul edilebilir. Kaynak öncesi hazırlıkların yeterli şekilde yapılmaması da porozite oluşumunu arttırmaktadır. Kaynak bölgesindeki kir, yağ gibi istenmeyen malzemelerin kaynak banyosu içerisinde sıkışması da bu hataya neden olabilmektedir. Lazer kaynak işlemi sırasında ki anahtar deliği oluşumu da poroziteye neden olabilmektedir. Eğer oluşan anahtar deliği stabil bir yapıda değil ise bu durum anahtar deliğinin çökmesine neden olur. Bu durumda çöken anahtar deliğinin içerisine hapsolan gaz porozite oluşumuna sebebiyet vermektedir.

Kaynak banyosunun genişletilerek ya da gazların dışarıya çıkabilmesi amacıyla kaynak süresinin arttırılması ile porozite bir miktar azaltılabilir. Tam nüfuziyetin olmadığı kaynak işleminde gazların sadece yüzeyden uzaklaşabilir. Bu durum düşük nüfuziyetli kaynakların, derin nüfuziyetli kaynak işlemine göre daha fazla porozite oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Porozite oluşumuna ait bir örnek (Kuo & Jeng, 2005).

Malzeme Özelliklerinde Değişim: Bu durum aslında bir kaynak hatası olarak tanımlanmasa da malzeme özelliklerinde ki değişim dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Lazer kaynak işlemi sonrasındaki lokal olarak iletilen yüksek enerji miktarı ve yüksek soğuma hızı malzemenin mikro yapısında değişimlere sebep olarak yapıyı daha kırılgan bir hale getirebilmektedir. Bu gibi sorunların ortadan kaldırılması amacıyla sertlik ve tokluk değerleri tespit edilmeli ve daha sonraki kaynak işlemleri sırasında uygun parametreler saptanmalıdır.

3.2.2 Gazaltı kaynağı

Gazaltı kaynak yöntemleri temel olarak kaynak ile birleştirme sırasında, kaynak bölgesinin koruyucu bir gaz yardımı ile örtülerek korunması şeklinde gerçekleşir. Buradaki amaç bu gaz örtüsü ile kaynak bölgesini istenmeyen dış etkenlerden koruyarak, kaynak kalitesinin arttırılmasıdır. Bu yöntem vasıtası ile pekçok metal farklı kombinasyon ve farklı pozisyonlarda kaynak ile birleştirilebilmektedir. Bu

kapsamda kullanılan çeşitli tipte koruyucu gazlar bulunmaktadır. Bu gazların seçilmesi kaynak edilecek malzemeye göre değişiklikler göstermektedir. Bu kapsamda örnek olarak aşağıdaki Çizelge 3.2’de bu gazların bir kısmı görülebilmektedir.



Çizelge 3.2 : Malzeme çeşidine göre koruyucu gazlar (ANIK & TÜLBENTÇİ, 2013).

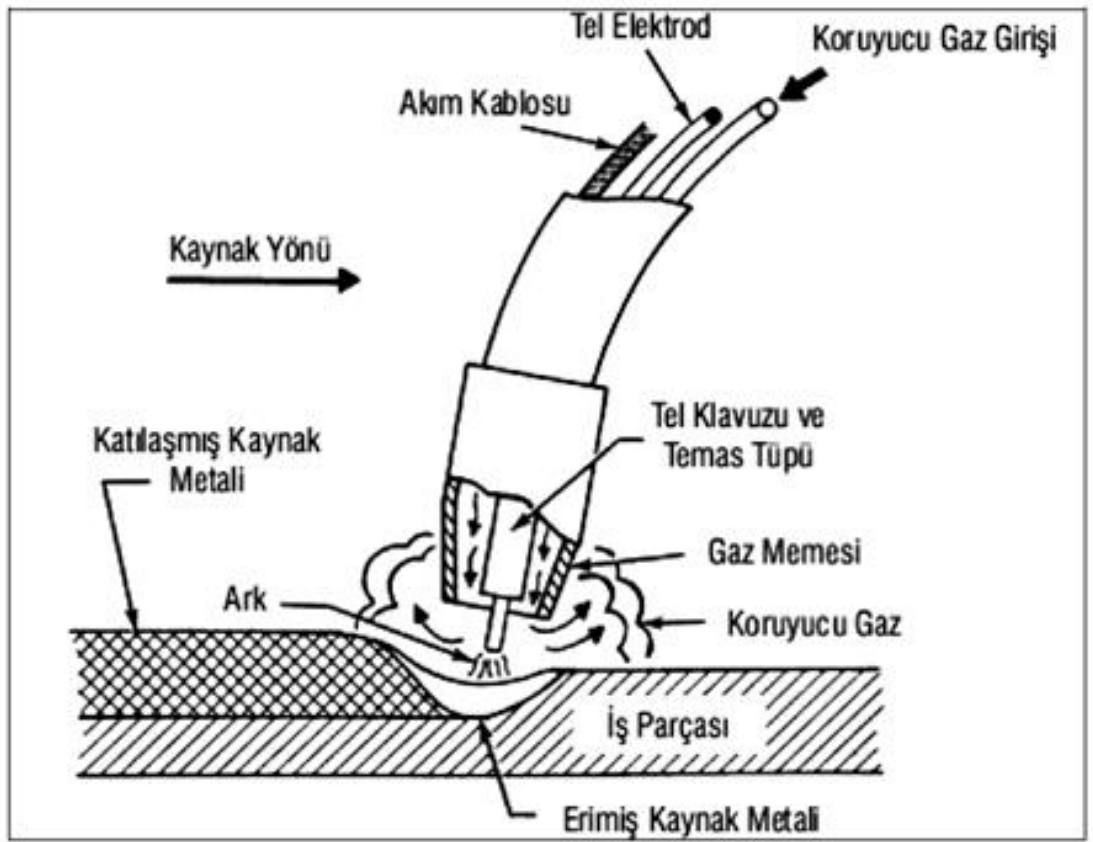
Gazın Cinsi	Gazın Bileşimi (%)					Kaynak Çeşidi			Kullanım Alanları
	CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	MIG	TIG	MAG	
Argon	-	-	99,99	-	-	X	X	-	Bütün Metaller
Argon S1	-	1	99	-	-	(X)	(X)	X	Yüksek Alaşımlı Çelikler
Argon S3	-	3	97	-	-	(X)	-	X	Alaşımlı Çelikler
Karışım Gaz	12-15	2-5	80-86	-	-	-	-	X	Yüksek Alaşımlı Çelikler Hariç Bütün Çelikler
Karışım Gaz	15	5	80	-	-	-	-	X	Bütün Çelikler
Karışım Gaz	4-6	-	83,5-91	-	-	-	-	X	Bütün Çelikler
Karışım Gaz	12-14	2-4	82-86	-	-	-	-	X	Bütün Çelikler
Karışım Gaz	15	5-6,5	85	-	-	-	-	X	Bütün Çelikler
Karışım Gaz	5	5	90	-	-	-	-	X	Bütün Çelikler
Karışım Gaz	5	-	63	2	2	-	-	X	Cr-Ni Gibi Özel Amaçlı Yapılarda Bakır ve Alüminyum Gibi Özel Amaçlı Yapılarda
Karışım Gaz	5	5	90	-	-	-	-	X	Yüksek Alaşımlı Çelikler Hariç Bütün Çelikler
CO ₂	99,7	-	-	-	-	-	-	X	19 Mn 5'e Kadar Bütün Çeliklerde

X: Kullanılabilir

(X) : Şartlı kullanılabilir

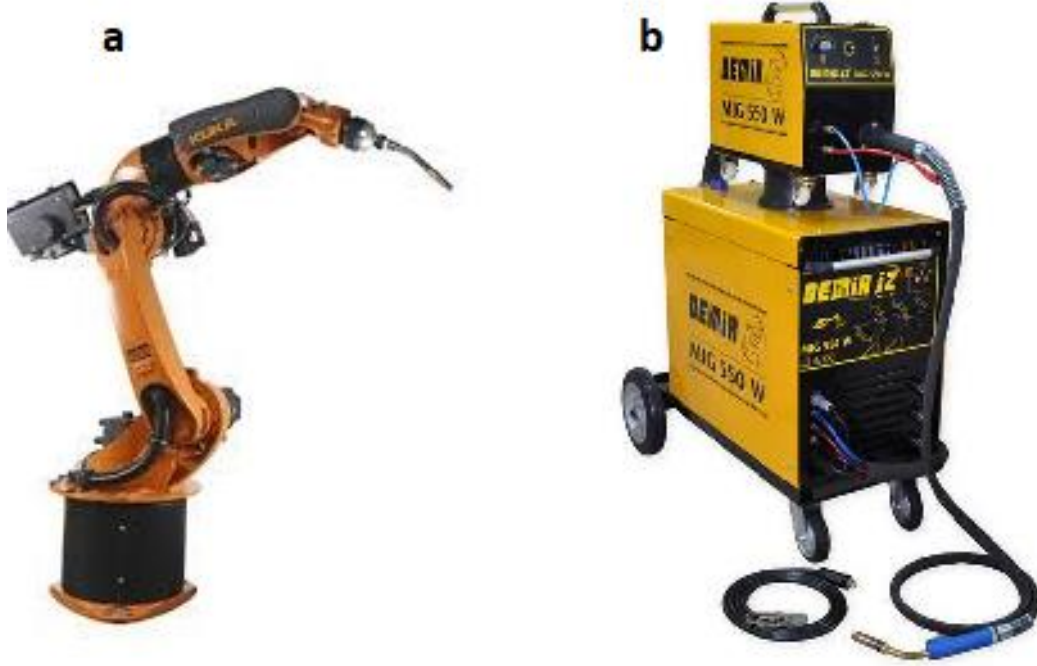
Gazaltı kaynak yöntemi birçok fiziksel olguyu içerisinde barındıran karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Isı akışı, ısı ve metal transfer ve plazma fiziği gibi konuları içerisinde barındırmaktadır. İlk ortaya çıkışı 1920li yıllar olsa da, endüstriyel olarak ticari kullanımı 1940ların sonu olarak karşımıza çıkmaktadır (O'Brien, 1991). Gazaltı kaynak işleminde tüketilebilir elektrod kullanılarak sürekli bir biçimde kaynak işlemi koruyucu gaz ile birlikte yapılmaktadır.

Temel olarak gazaltı kaynak makineleri enerji kaynağı, elektrot iletim mekanizması ve koruyucu gazdan oluşmaktadır. Gazaltı kaynak yöntemine ait şematik bir gösterim Şekil 3.9'da görülebilmektedir.



Şekil 3.9: Gazaltı kaynak yönteminin şematik gösterimi (mesanark.com, 2021).

Gazaltı kaynak yöntemi çeşitli metallerin birleştirilebilmesinin yanısıra oldukça ucuz bir yöntem olması ile de kendine yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Günümüzde pekçok üretim kısmında gazaltı kaynak yöntemi manuel ya da robotik olarak kullanılmaktadır. Manuel ve robotik gaz altı kaynak yöntemlerine ait resimler Şekil 3.10'da görülebilmektedir.



Şekil 3.10 : a) Robotik gazaltı kaynak makinesi (Gen Otomasyon Teknolojileri A.Ş., 2021) b) manuel gazaltı kaynak makinesi (Demir İz Elektrik, 2021).

Bu yöntemde ark oluşturulması amacıyla elektrot iş parçasına değdirilir ve sonrasında kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Özellikle manuel ile yapılan işlemde kaynakçının kabiliyeti ve tecrübesi büyük önem taşımaktadır. Doğru kaynak parametrelerinin ayarlanması hem kaynaklı yapının kalitesini hemde tüm parçanın kalitesini etkilemektedir. İnsan faktörünün kaliteye olan etkisinin azaltılması ve üretim hızının artırılması amacıyla robotik gazaltı kaynak makineleride kullanılmaya başlanmıştır.

Gazaltı kaynak işlemi sırasında elektrot ergiyerek birleştirme sağlanır. Bu mekanizmaya damla iletimi denir. Temel olarak üç temel sistemde açıklanabilir; kısa ark, sprey ark ve uzun ark.

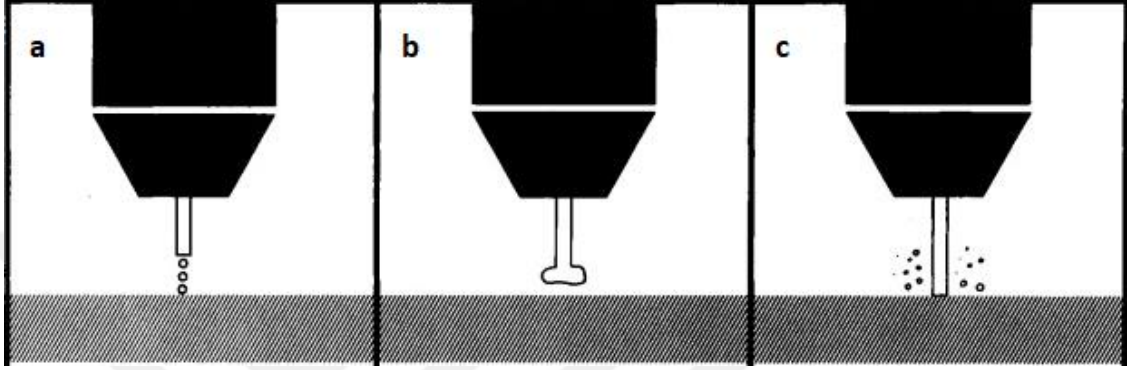
Kısa ark: Bu sistemde düşük enerji değerleri kullanılır. Saniyede 20-200 kere elektrod ile iş parçası arasında temas olur. Özellikle ince parçaların birleştirilmesinde kullanılan bu sistemde çeşitli pozisyonlarda kaynak işlemi yapılabilmektedir. Bu transfer modunda küçük çapta elektrotlar kullanılır.

Sprey ark: Adından da anlaşılacağı üzere malzeme aktarımı küçük boyuttaki sprey şeklindedir. Tel çapından daha küçük boyutta malzeme transferi şeklinde gerçekleşir.

Yöntemin avantajı az sıçrama yaratmasıdır. Özellikle düz ve yatay olarak konumlanmış kalın parçaların birleştirilmesi amacıyla kullanılır.

Uzun ark: Bu sistemde iş parçasına geçen malzemeler daha büyük boyutta ve damlacık şeklindedir. Karbon çeliklerinde kullanılan bu transfer modunda koruyucu gaz olarak CO₂ kullanılır.

Her üç transfer mekanizmasına ait gösterim Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 : Gazaltı kaynak yönteminde damla iletimi a) sprej ark b) uzun ark c) kısa ark (Barhorst & Cary, 1985).

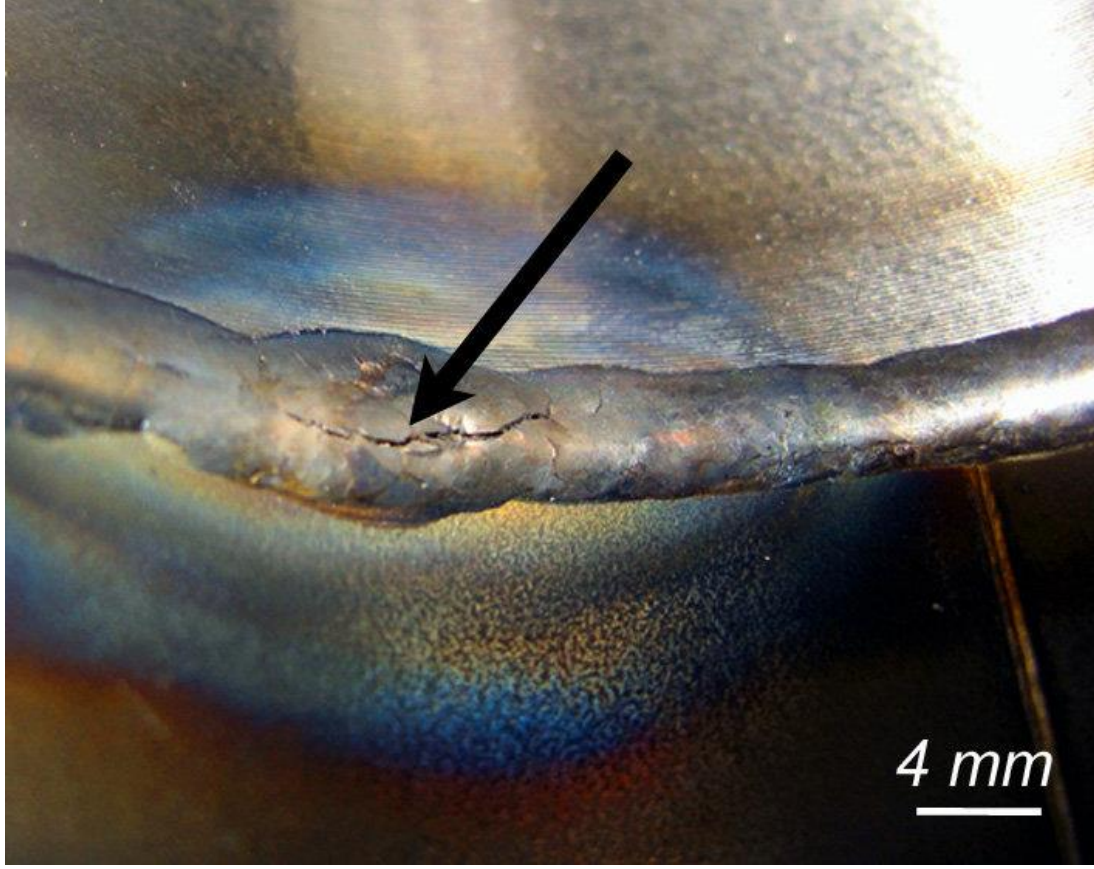
Gazaltı kaynak yönteminde teknik olarak kutuplama yöntemi kullanılmaktadır. Uygulamanın ihtiyacına göre iş parçası pozitif (+) ya da negatif (-) olarak kullanılabilir. Ancak uygulamada çoğunlukla kaynak torcunun pozitif (+) olarak kullanılması sağladığı avantajlardan dolayı yaygındır. Torcun pozitif (+) olarak kutuplanmasında kaynak nüfuziyeti daha iyi sonuçlar vermektedir. Bir diğer avantajı ise pozitif torcun iş parçası üzerindeki oksit tabakasını ortamdaki uzaklaştırmasıdır. Bu avantajlar çerçevesinde uygulamaların çoğunluğunda iş parçası negatif (-) kutup olarak çalışılmaktadır.

Gazaltı Kaynak Hataları

Gazaltı kaynağı kullanılarak birleştirilmiş parçalar da oluşabilecek kaynak hataları listelenmiş ve açıklanmıştır.

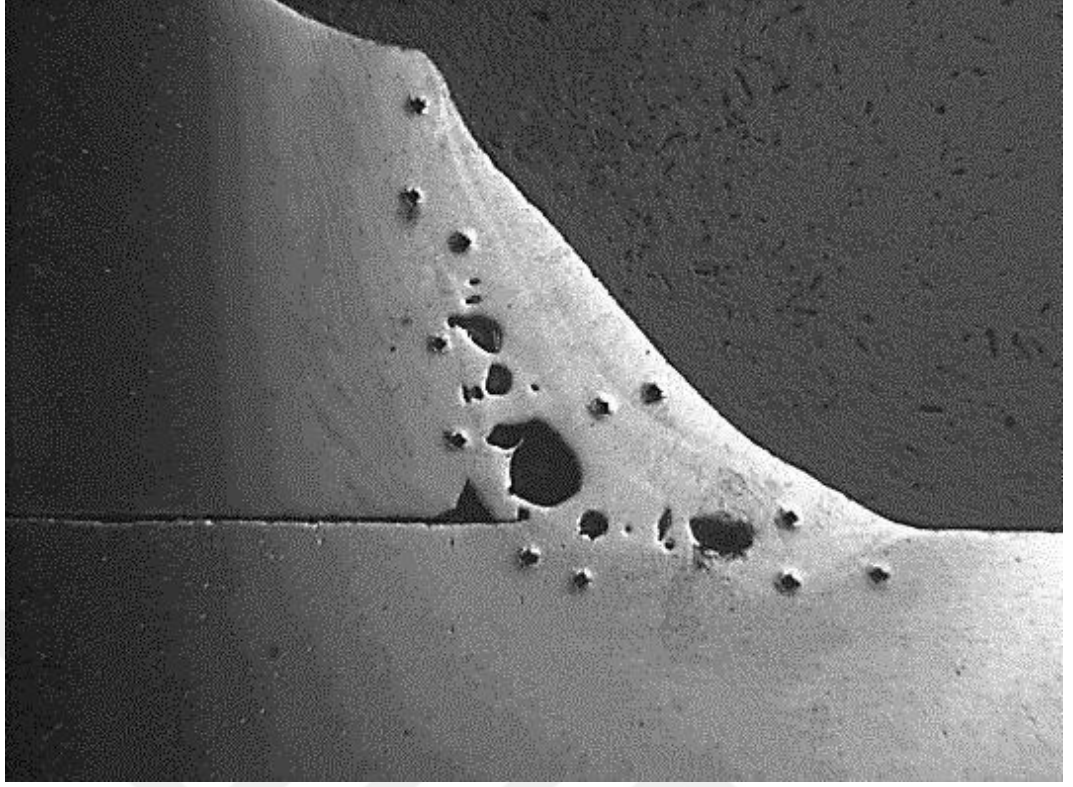
Çatlaklar: Yaygın olarak karşılaşılan bir kaynak hatasıdır. Hiçbir endüstriyel standart tarafından varlığı kabul edilebilir değildir. Yüzeyde, kaynak metalinde ya da ısıdan etkilenen bölgede gerçekleşebilir (Şekil 3.12). Nedenleri arasında tasarım hataları olabileceği gibi kaynak parametrelerinin yanlış değerlerde kullanımı da olabilir. İş parçasındaki kirlilik de çatlak oluşumunda neden olmaktadır. Kaynak işlemi sırasındaki yüksek enerji ile ısınan parçanın farklı hızlarda soğuması ve artık

gerilmelerin oluşmasında çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Doğru akım ve kaynak hızı kullanımının yanı sıra gerekli durumlarda yapılan ön ısıtma işlemi ile çatlak oluşumu ortadan kaldırılabilir.



Şekil 3.12 : Kaynak bölgesinde çatlak oluşumu (Rogalski, Swierczynska, Landowski, & Fydrych, 2020).

Porozite: Kaynak işlemi sırasında görülen bu hatanın nedeni kaynak banyosuna gazların hapsolarak ortamdan uzaklaşamaması ve katılaşma sırasında kaynaklı bölge içerisinde boşluklar oluşmasıdır (Şekil 3.13). Bu boşluklar ya da baloncuklar çatlak başlangıcı görevi görerek, yapının mukavemetini azaltırlar. Kaynak öncesi hazırlığın doğru bir şekilde yapılarak, kaynak bölgesinin temiz olması sağlanmalıdır. Koruyucu gazın yanlış çeşit ve debide kullanılması, uzun ark boyu ve kirli yüzey porozitenin oluşmasına ortam hazırlamaktadırlar.



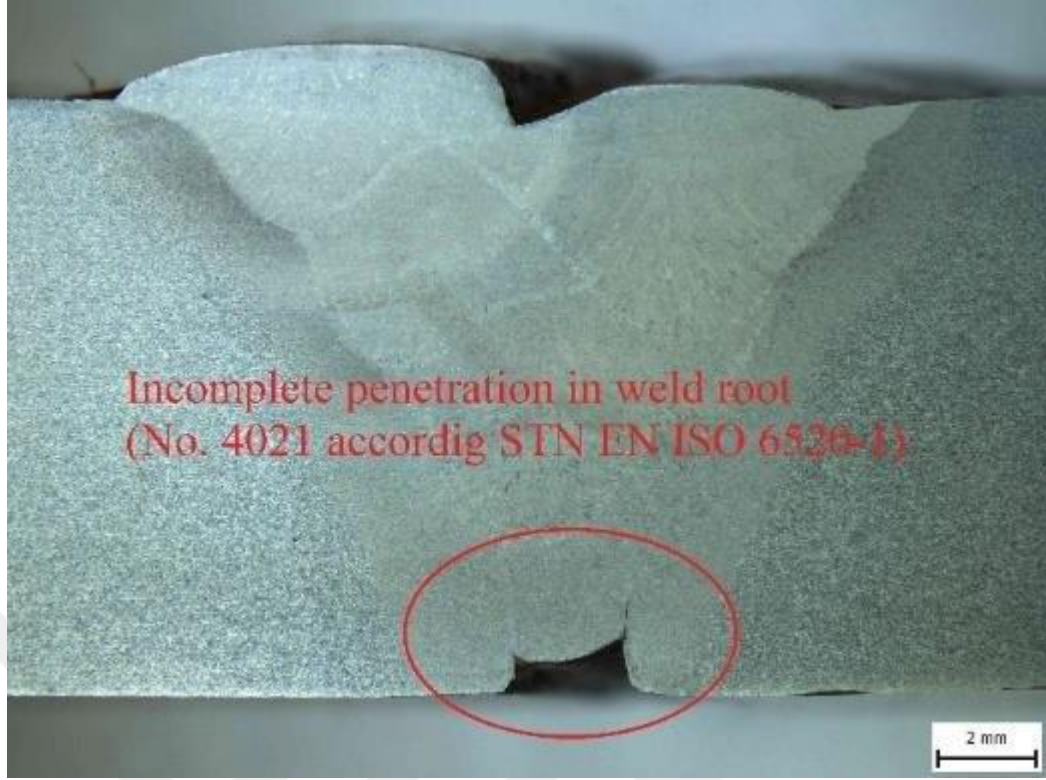
Şekil 3.13 : Kaynak bölgesinde porozite oluşumu (Shriniwas, 2013).

Yanma Oluğu: Kaynaklı bölgenin ucunda oluşan oluk yanma oluğu olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.14). Oluşan oluk nedeniyle kaynaklı yapının kesit alanı azalır ve bu durum dayanıma olumsuz bir etki oluşturur. Çok hızlı kaynak işleminin yapılması, yüksek akım kullanımı, yanlış açı ile kaynak işleminin gerçekleştirilmesi yanma oluğuna neden olmaktadır. Çok pasolu kaynak, gerekli ve uygun akım değerinin uygulanması gibi yöntemlerle oluşma riski azaltılabilmektedir.



Şekil 3.14 : Kaynak bölgesinde yanma oluğu oluşumu (Statkinov, Korostel, & Fricke, 2007).

Yetersiz Nüfuziyet: Kaynak ile doldurulması gereken bölgenin kaynak metali ile tam olarak doldurulamaması durumuna verilen isimdir (Şekil 3.15). Kaynak hızının fazla olması, kaynak ağzının yanlış hazırlanması düşük akım uygulanması gibi durumlarda ortaya çıkmaktadır. Doğru parametrelerin uygulanması ve doğru bir kaynak hızı ile bu hata ortadan kaldırılabilir. Burada ki amaç dolgu malzemesinin kaynak bölgesini tam olarak doldurabilmesi için gerekli zamanı ve ısıyı vermektir.



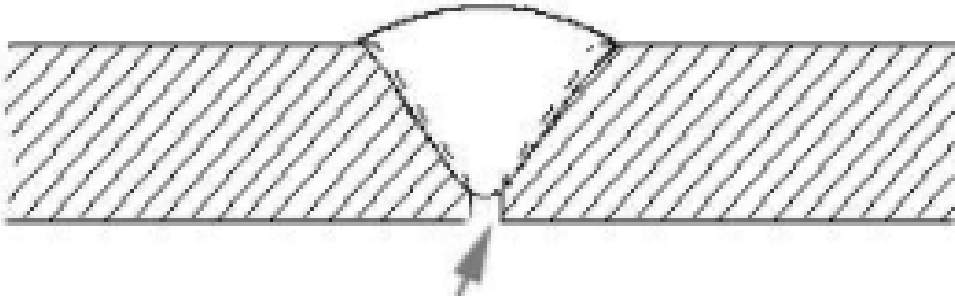
Şekil 3.15 : Kaynak bölgesinde yetersiz nüfuziyet oluşumu (Michal, Milos, Radoslav, & Ivo, 2017).

Sıçrama: Kaynaktan gelen parçaların sıçrayarak iş parçası yüzeyine yapışması ile oluşmaktadır (Şekil 3.16). Tam olarak ortadan kaldırılamamakla birlikte azaltılabilmektedir. Akım değerinin yüksek olması en temel sebebidir. Kaynak bölgesinin temiz olmamasıda sıçrama olasılığını arttırmaktadır. Akım değerini ayarlanması, kaynak öncesi hazırlığın doğru bir şekilde yapılması ile önemli oranda azaltılabilmektedir.



Şekil 3.16 : Kaynak bölgesinde sıçrama oluşumu (Al-Madani, Abdalla, Azoumi, & Elkoum, 2009).

Yetersiz Ergime: Bu hata ergimiş metalin kaynak bölgesinin tamamına ulaşamaması durumunda olmaktadır ve Şekil 3.17’de şematik bir gösterimi verilmiştir. Bu olay sonucunda kaynak bölgesi, kaynak metali ile tam olarak doldurulamaz ve boşluk oluşumu gözlenir. Akım değerinin doğru ayarlanması ve kaynak sırasının kontrolü ile engellenebilmektedir.



Şekil 3.17 : Kaynak bölgesinde yetersiz ergime oluşumu (Iowa State University, 2021).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER

Bu çalışma kapsamında iş parçası olarak 1 mm kalınlığında ve 30x100 mm ölçülerinde galvanizli saclar kullanılmıştır. Saclar lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı kullanılarak 30 mm yüzey doğrultusunda alın kaynağı şeklinde birleştirilmiştir. Daha sonrasında birleştirilmiş olan bu numuneler çeşitli testlere tabi tutulmuş ve sonuçlar irdelenmiştir.

4.1 Deney Parçalarının Hazırlanması

Levha halinde olan 1 mm kalınlıktaki galvanizli sac malzeme 30x100 mm ölçülerinde pres yardımıyla kesilmiştir. Bu parçalara ait resim Şekil 4.1’de görülebilmektedir.



Şekil 4.1 : 1 mm kalınlık ve 30x100 mm ölçülerindeki sac levha.

30x100 mm ölçülerinde hazırlanan parçalar 30 mm yüzey doğrultusunda lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı ile ayrı ayrı alın kaynağı biçiminde birleştirilmişlerdir. Ön hazırlık olarak parçaların birleştirilecek yüzeylerinin temizliği yapılmıştır.

4.2 Lazer Kaynak Yöntemi İle Parçaların Birleştirilmesi

Önceden kesilmiş olan 1 mm kalınlıktaki 30x100 mm ölçülerindeki sac parçalar lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmek üzere hazırlanmıştır. Kaynak işlemi öncesinde kaynak yüzeylerinin temiz ve kaynağa hazır olması sağlanmıştır. Birleştirme işleminde Şekil 4.2’de görülebilen lazer kaynak makinası kullanılmıştır.



Şekil 4.2 : Lazer kaynak makinesi.

Bu kapsamda hazırlanmış olan numuneler farklı parametreler kullanılarak birleştirilmiştir. Bu sayede her bir parametrenin kaynak kalitesi üzerinde ki etkisi incelenmiştir.

Lazer kaynak işlemi sırasında kaynak parametreleri olarak kaynak hızı, güç ve darbe süresi seçilmiştir. Her bir parametrenin etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla farklı değerler kullanılmış, bu sayede etki daha iyi bir şekilde ortaya konmuştur.

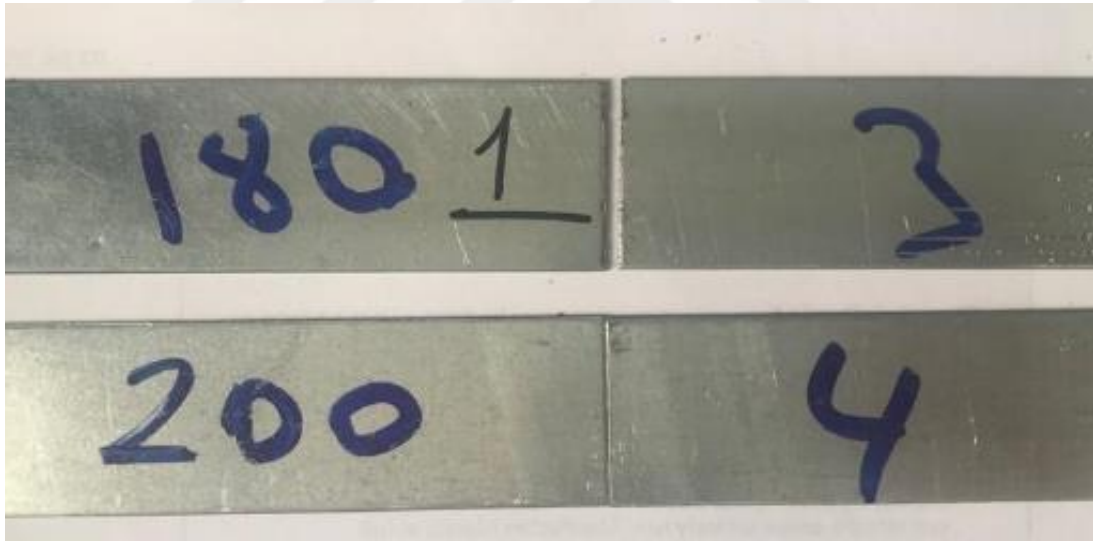
Lazer kaynak parametrelerine göre hazırlanmış olan numunelere ait bilgiler aşağıdaki çizelgede görülebilmektedir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Lazer kaynak parametreleri.

Numune Numarası	Kaynak Hızı (mm/s)	Güç (W)	Darbe Süresi (ms)
1	1	180	3
2	1	180	4
3	1	180	5
4	1	180	6
5	1	180	7
6	1	200	3
7	1	220	3
8	1	240	3
9	1	260	3
10	1.5	180	3

Her bir numuneden testler aşamasında kullanılmak üzere üçer adet hazırlanmış olup, testlerin tekrar edilebilirliğini sağlamak amacıyla sonuç değerlerinin ortalamaları alınmıştır.

Aşağıdaki resimde (Şekil 4.3), lazer kaynak işlemi öncesine ve kaynak işlemi sonrasına ait fotoğraflar görülebilmektedir.



Şekil 4.3 : Numunelerin lazer kaynak işlemi öncesi ve sonrasına ait görüntüleri.

Daha sonra hazırlanan numuneler çeşitli testlere tabi tutularak, kaynak parametrelerinin etkileri incelenmiştir.

4.3 Gazaltı Kaynak Yöntemi İle Parçaların Birleştirilmesi

Gazaltı kaynak yönteminin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, 1 mm kalınlıkta ve 30x100 mm boyutlarındaki numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler 30

mm ölçüsündeki kenerlarından alın kaynağı ile birleştirilmiştir. Bu işlem tecrübeli bir kaynakçı tarafından gerçekleştirilmiştir.

Gazaltı kaynak yönteminde (MAG), kaynak parametreleri şu şekilde seçilmiştir; kaynak tel çapı, koruyucu gaz debisi, kaynak hızı, akım ve tel besleme hızıdır.

Bu parametrelerin ayrı ayrı etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla, incelemeler sırasında bir parametre değiştirilirken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Bu sayede ilgili parametrenin etkisi ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Lazer kaynağında olduğu gibi herbir numuneden 3 adet hazırlanmış ve ortalama değerleri çalışmada kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerin birleştirilmesi sırasında kullanılan kaynak makinesine ait olan bir resim aşağıda görülebilmektedir (Şekil 4.4).



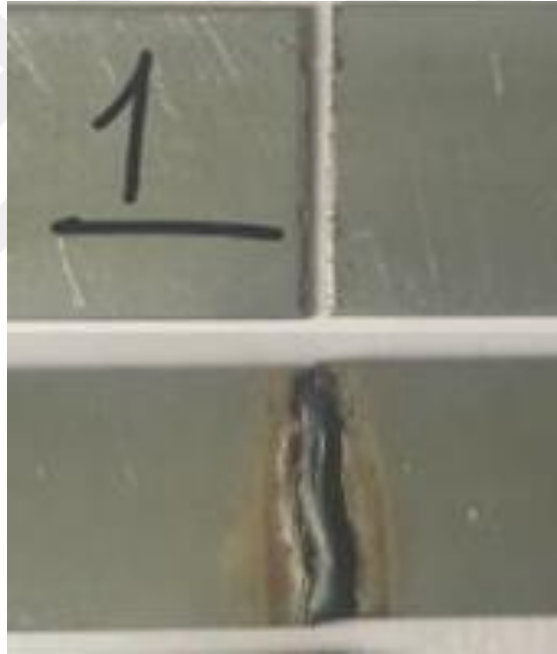
Şekil 4.4 : Gazaltı kaynak makinesi (Lincoln Electric, 2021).

Kaynak numunelerine ait parametreleri içeren Çizelge 4.1 aşağıda listelenmiştir.

Çizelge 4.1 : Gazaltı kaynak parametreleri.

Numune Numarası	Kaynak Tel Çapı (mm)	Koruyucu Gaz Debisi (l/dak)	Kaynak Hızı (mm/s)	Akım (A)	Tel Besleme Hızı (m/dak)
1	0.8	12	2	2.2	7
2	0.8	12	2	2.4	7
3	0.8	12	2	2.6	7
4	0.8	12	3	2.2	7
5	0.8	12	4	2.2	7
6	0.8	12	4	2.2	8
7	0.8	12	4	2.2	9
8	0.8	14	2	2.2	7
9	1.2	12	2	2.2	7

Gazaltı kaynağı ile numunelere ait kaynak öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 4.5'te görülebilmektedir.



Şekil 4.5 : Numunelerin gazaltı kaynak işlemi öncesi ve sonrasına ait görüntüleri.

Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş parçalar sonrasında çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Bu şekilde parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkisi anlaşılmıştır.

4.4 Radyografik Analiz

Radyografik test, x-ışınları ya da gama ışınları kullanılarak yapıların içerisindeki kusurların ortaya çıkarılması amacıyla kullanılan bir tahribatsız test yöntemidir.

Radyografik test aşamasında test parçası radyasyon kaynağı ile film arasına yerleştirilir. Gönderilen ışın farklı yoğunluktaki maddelerde farklı şekillerde geçmektedir. Boşluklar ya da farklı malzemeler farklı miktarlarda ışını soğuracak ve filme geçmesini engelleyecektir. Bu farklılıklarda daha sonra film yüzeyinde gözlemlenebilecektir. Malzeme içerisindeki süreksizlikler alınan radyasyon miktarını etkileyeceğinden film üzerinden siyah ve beyaz alanlar olarak gözlemlenir. Nitelikli ve yetişmiş personel tarafından filmler yorumlanarak hasarın ya da hatanın yeri saptanabilir. Radyasyonun geçtiği alanlar koyu olurken, bir süreksizlik olan bölgeler beyaz olarak gözlemlenecektir. Ayrıca test sonuçlarının kayıt altına alınabilmesi yöntemin bir avantajıdır.

Genellikle iki taraftan da erişilebilen parçaların incelenmesi sırasında kullanılmaktadır. Yöntem yavaştır ve ekipman ve yetişmiş personel ihtiyacından dolayı pahalıdır. Ancak yüksek güvenilirlikte kaynak içerisindeki hataları tespit edebiliyor olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Eğer x-ışını kullanılıyorsa, ışın x-ışını tüpü yardımı ile üretilirken, gama ışını radyoaktif bir izotop tarafından üretilir.

Kullanımı sırasında sağlık açısından oluşturabileceği tehlikeler nedeniyle yetkin personel tarafından gerekli koruma önlemleri ile birlikte kullanılması gerekmektedir.

Lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş olan tüm numuneler radyografik muayeneye tabi tutulmuşlardır. Tüm numuneler TS EN ISO 17636-1 standardına göre radyografik olarak test edilmişlerdir.

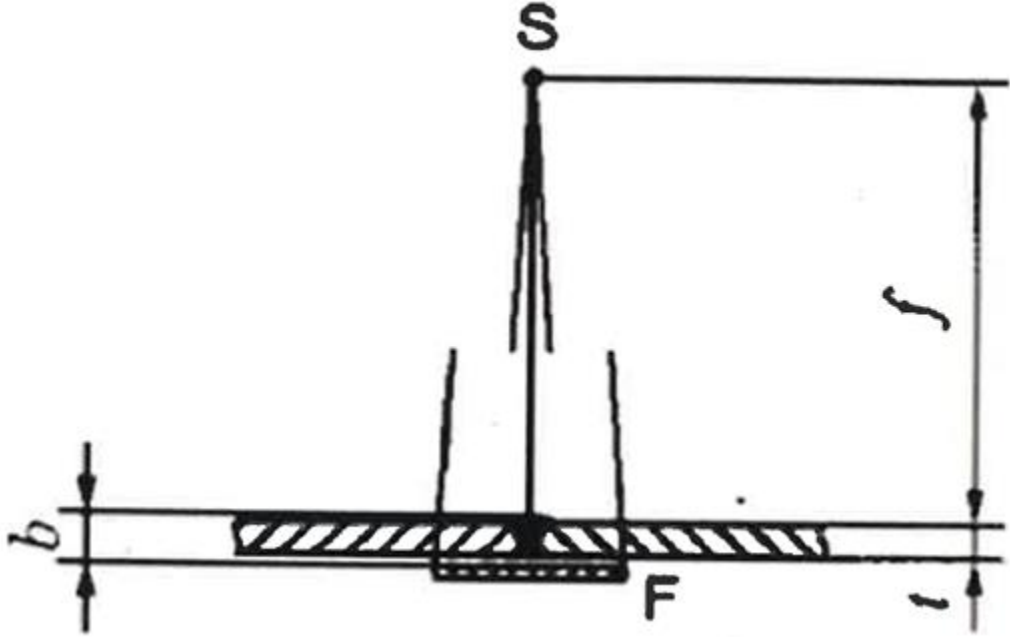
Daha sonra x-ray görüntüleri TS EN ISO 10675-1 standardına göre değerlendirilmişlerdir.

GE-ERSCO marka 52 MF4 CL 109000/01 sei numaralı radyografik test cihazı kullanılmıştır. Test, 100 kw, 6 mA ve 0.5x5.5 odak boyutu, 650 mm film-ışın kaynağı mesafesi MX 125 film tipi kullanılarak el ile gerçekleştirilmiştir. Test sırasında ışınlanma süresi 100 saniye olarak ayarlanmıştır. Test aşamasına ait olan resimler Şekil 4.6'da görülebilmektedir.



Şekil 4.6 : Radyografik test aşamasına ait görüntüler.

Ayrıca x-ray incelemesine ait şematik bir çizim Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Radyografik incelemeye ait şematik bir çizim (Radiographic Test Report, 2021).

Radyografik incelemeye ait şematik gösterimde S radyasyon kaynağını, t parça kalınlığını, f ışın kaynağı ile parça arasındaki mesafeyi, F test parçasını ve b de parçanın filme olan uzaklığı temsil etmektedir.

Numunelerin x ışını yardımı ile görüntülenmesinden sonra, numunelere ait filmler incelenerek kaynak bölgesi analiz edilmiştir.

4.5 Çekme Testi

Çekme testi üretimin tüm aşamalarında kullanılabilen veriler oluşturmaktadır. Birçok tasarım ve üretim işleminin ilk basamağı olarak gösterilebilir. Radyografik analizin aksine tahribatlı bir yöntemdir.

Malzemelerin çekme yükü altındaki davranışının anlaşılabilmesi amacıyla yapılır. Çekme testinde malzeme kopana kadar kuvvet uygulanır ve sonrasında elde edilen veriler yardımıyla çeşitli hesaplamalar yapılabilir. Numuneye uygulanan kuvvet ile birlikte kuvvet sonucunda oluşan uzama miktarları ölçülür ve kaydedilir.

Test prosedürleri uygulanacak malzemeye göre bazı değişiklikler içerebilmektedir. Yeni bir tasarım ve ar-ge aşamasında çekme testi altındaki malzeme davranışı oldukça önemlidir. Tasarım kriterlerinin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadırlar. Yapılacak olan hertürlü ürünün güvenilirliği malzemelere bağlıdır. Bu testler yardımı ile yüksek standartta üretim yapılması sağlanabilmektedir.

Lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş numuneler çekme testine tabi tutulmuşlardır. Çekme testi sırasında Shimadzu AG-IS 50 kN değerlerindeki çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme test cihazına ait bir resim aşağıda Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Shimadzu AG-IS 50 kN çekme testi (Shimadzu , 2021).

Çekme testi prosedüründe makineye yerleştirilen kaynaklı numune kopma gerçekleşene kadar çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır. Kopma sonrasında toplanan veriler ile herbir numuneye ait kuvvet-uzama grafikleri hazırlanmıştır.

4.6 Makrografik Analiz

Makrografik analiz, yüzeylerin büyük bölgeler halinde incelenmesi durumuna verilen isimdir. Genellikle numunelerin kırık ya da kopma yüzeylerinin incelenmesi sırasında kullanılmaktadır. Bu analizde yüzeyler düşük büyültme altında incelenir. Bu sayede varolan kusurların ortaya çıkarılması sağlanmış olur.

Kaynaklı yapılarda kaynak kalitesini belirlemede de kullanılır. Kaynak nüfuziyet eksikliği, gözenekli yapı gibi kaynak hataları makrografik analiz ile belirlenebilmektedir.

Çekme testi sonrasında kopma yüzeylerinin analiz edilmesi amacıyla parçalar makrografik teste tabi tutulmuştur. Bu kapsamda çekme testi sonrasında kopan parçaların kopma yüzeyleri büyütülerek fotoğraflanmışlardır.

Test aşamasında kullanılan parçaların boyutları mikroskopta incelenmek için büyük olduğu için parçalar kaynak yüzeyinden itibaren Metacut 251 hassas kesim makinesi ile 10 mm olarak kesilmiş ve bu küçük parçalar incelemeye tabi tutulmuşlardır. Yapılan makrografik inceleme sırasında NIKON SMZ745T model mikroskop kullanılmıştır. İlgili cihazlara ait resimler Şekil 4.9’da görülebilmektedir.



Şekil 4.9 : a) Nikon SMZ745T mikroskop (Nikon Mikroskop, 2021) b) metacut 251 hassas kesim makinesi (Kemet International, 2021).

Kopma yüzeylerinin incelenmesi ile kaynaklı birleştirmenin kalitesine dair çıkarımların yapılması kolaylaşmaktadır. Yetersiz nüfuziyet gibi hatalar kopma yüzeyi üzerinden anlaşılmakta ve bu tip hataların önlenmesi amacıyla gerekli işlemler gerçekleştirilebilmektedir.

5. TESTLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

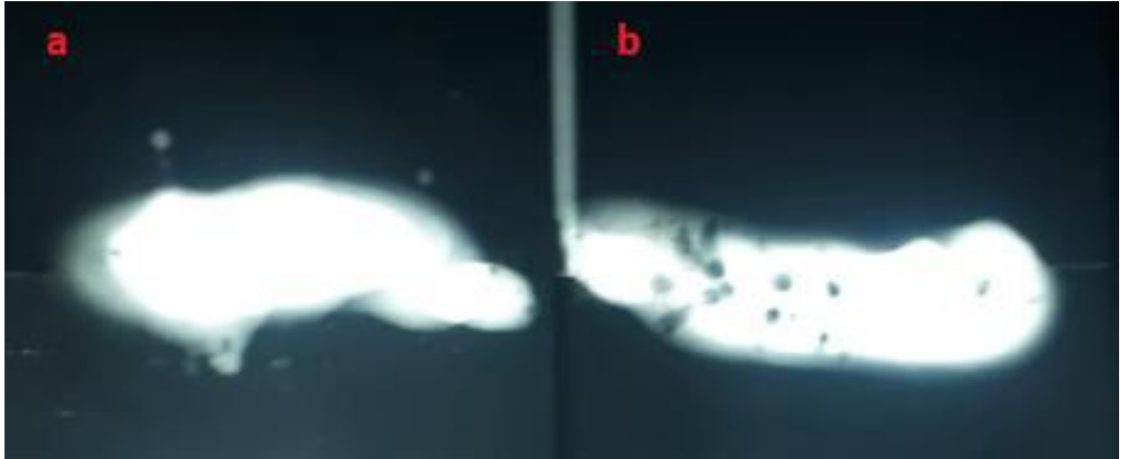
Kaynaklı numunelere yapılmış olan tahtibatlı ve tahribatsız muaynelere ait olan sonuçlar aşağıda ayrı ayrı olarak irdelenmiştir. Bu sayede her bir kaynak parametresine ait olan etki daha iyi bir şekilde ortaya çıkarılmıştır.

5.1 Radyografik Analiz Sonuçları

Radyografik sonuçlara bakacak olursak öncelikle tüm numunelerde belirli seviyede hataların varlığı saptanmıştır. Bu hataların bir kısmı kabul edilebilen seviyelerde bulunmaktadır.

Gazaltı kaynağına ait numunelere bakacak olursak görsel muayene de iyi kabul edilebilecek olan numunelerde dahi belirli seviyede kaynak hataları gözlenmiştir. Hataların çeşidine bakacak olursak gaz oluşu ve kaynak nüfuziyet eksikliği ilk sıralarda gelen hatalar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu kapsamda test numunelerinden 1 numaralı numunede porozite saptanmıştır. Bu hasar kaynaklı yapının dayanımına da olumsuz yönde bir etkide bulunmuştur. 2 numaralı numunede ise toplu gözenek oluşumu saptanmıştır. Kaynak bölgesinde gazların ortamdaki uzaklaşması için gerekli sürenin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu hatalara ilişkin olarak yapılan radyografik analizlerin filmlerine ait fotoğraflar aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 : Gazaltı kaynağına ait x-ray görüntüleri a) porozite b) toplu porozite.

3 numaralı numunede ise doğrusal gözenek oluşumu gözlenmiştir. Bu hatayı artan akım değerinin sebep olduğu düşünülmektedir.

4, 5, 6 ve 7 numaralı numunlerin incelenmesinde ise farklı seviyelerde olmakla birlikte nüfuziyet noksanlığının varlığı tespit edilmiştir. Bu nüfuziyet eksikliği kaynaklı bölgenin kesit alanında bir daralmaya sebebiyet vermektedir. Azalan kesit alan da kaynaklı bölgenin mukavemet değerlerinde olumsuz bir etki olarak karşımıza çıkmaktadır.

8 numaralı numuneye geldiğimizde ise hem nüfuziyet noksanlığı hemde toplu gözenek oluşumu gözlenmiştir. Bu durum bu numunenin kaynak kalitesinin çok iyi olmadığı sonucunu göstermektedir. 8 numaralı numuneye ait olan filme ait fotoğraf aşağıda Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 8 numaralı numuneye ait nüfuziyet noksanlığı ve toplu gözenek oluşumu gözlenen x-ray görüntüsü.

9 numaralı numuneye bakacak olursak ise toplu gözenek oluşumu gözlenmiştir.

Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunlerde ise genel olarak hataların varlığından söz edilmekle birlikte, bu çatlakların ya da hataların seviyesi düşük olarak gözlenmiştir. Bu kapsamda, lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan numunelerin radyografik analizi dikkate değer bir hata barındırmamaktadır. Lazer ile birleştirilmiş olan numunelerin radyografik görüntülerine ait bir fotoğrafla Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelere ait x-ray görüntüsü.

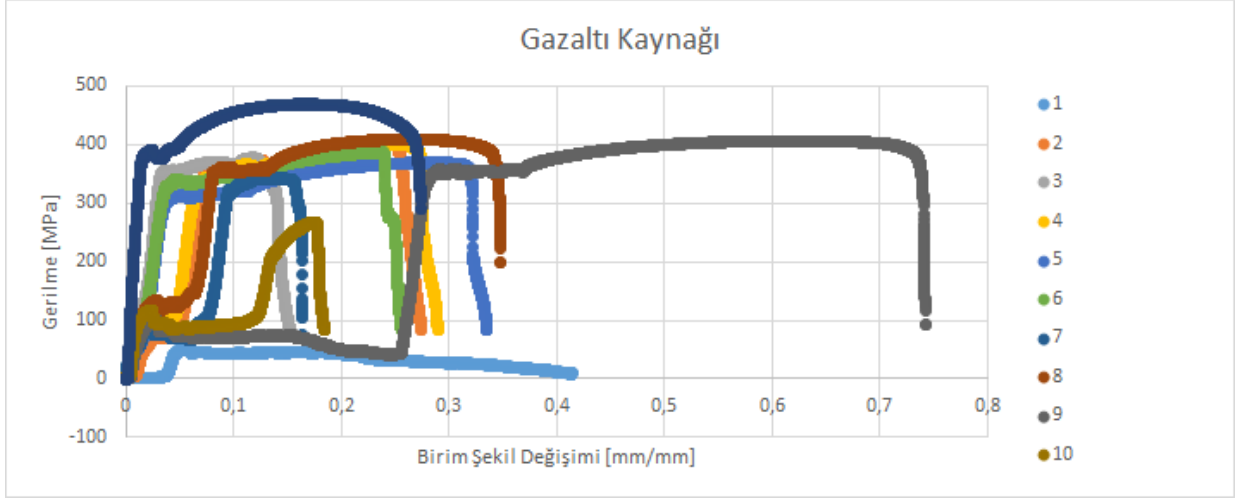
5.2 Çekme Testi Sonuçları

Gazaltı kaynağı ve lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan tüm numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Bu test kapsamında parçalar kopma gerçekleşene kadar çekme kuvvetine maruz bırakılmış ve çıkan sonuçlara göre kuvvet-uzama grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler yardımı ile kaynaklı birleştirmenin mukavemet değerleri gözlemlenmiştir. Ancak çekme testi sırasında bazı numunelerde çekme kafası kaymış ve grafikte paralel bölümler oluşmuştur. Bu bölümlerin grafikler incelenirken ihmal edilmesi gerekmektedir. Ayrıca kaynaklı yapının mukavemeti hakkında daha doğru bilgi edinilebilmesi amacıyla kaynaksız olarak galvanizli çelik sac malzeme de çekme testine sokulmuştur. Grafiklerde galvanizli çelik saca ait çekme testi sonuçları da görülebilmektedir.

Çekme testine ait olan sonuçlar lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı olarak ayrı ayrı verilecektir.

Gazaltı kaynağına ile birleştirilen numunelerin çekme testine ait ilk grafikte tüm numunelerin grafikleri verilmiş olup sonrasında belirli test numuneleri seçilerek kaynak parametrelerinin etkileri anlamlandırılmaya çalışılmıştır.

Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş numunelere ait gerilme-birim şekil değişimi grafiği Şekil 5.4'te görülebilmektedir.

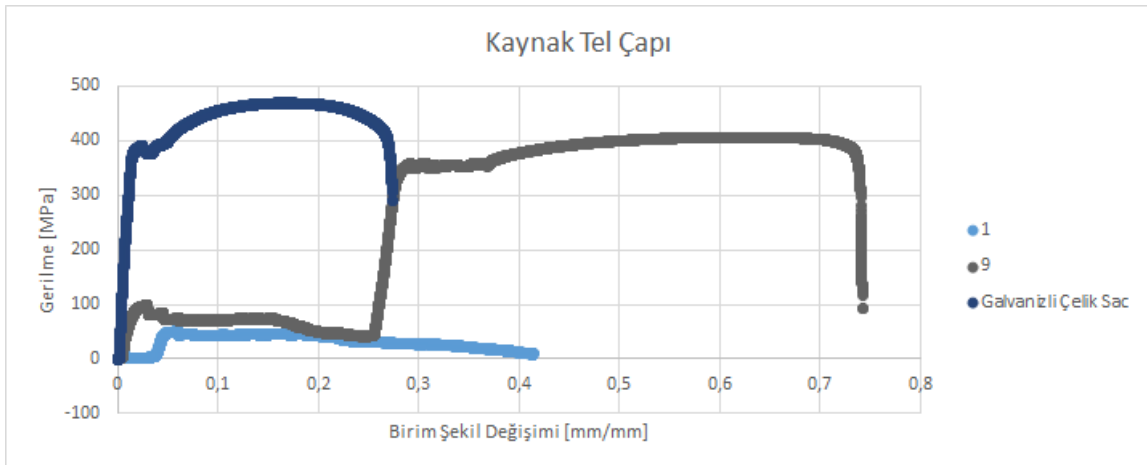


Şekil 5.4 : Gazaltı kaynağına ait tüm numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafiği.

Kaynak parametrelerinin kaynak kalitesine etkisinin incelenebilmesi için bir parametre değiştirilirken diğerleri sabit tutulmuştur.

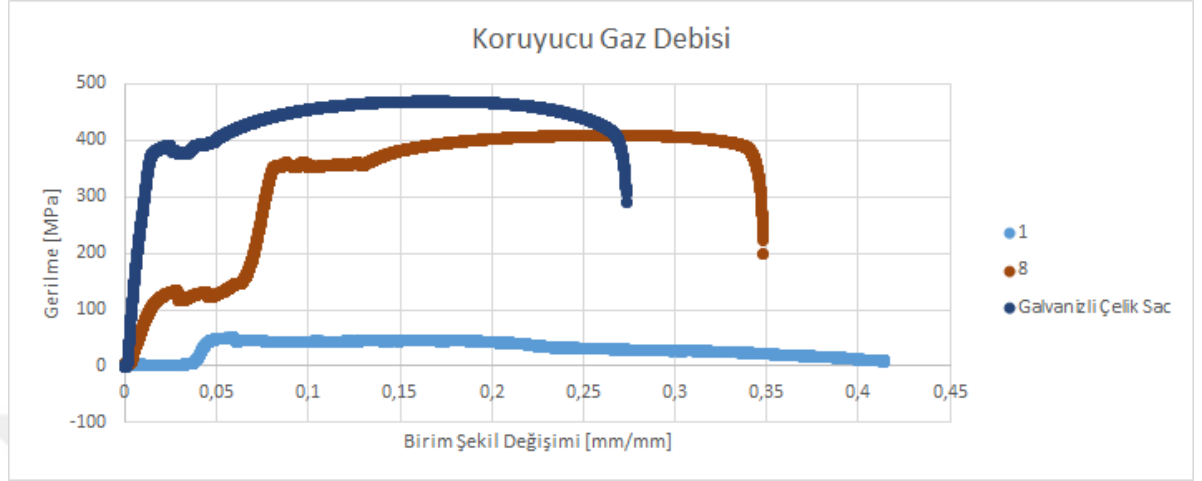
Bu şekilde hazırlanmış olan grafikler yardımıyla kaynak parametrelerinin etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır.

Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş numunelere kaynak telinin çapını etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla 1 ve 9 numaralı numuneler kullanılmıştır. 1 ve 9 numaralı numunelere ait grafik Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



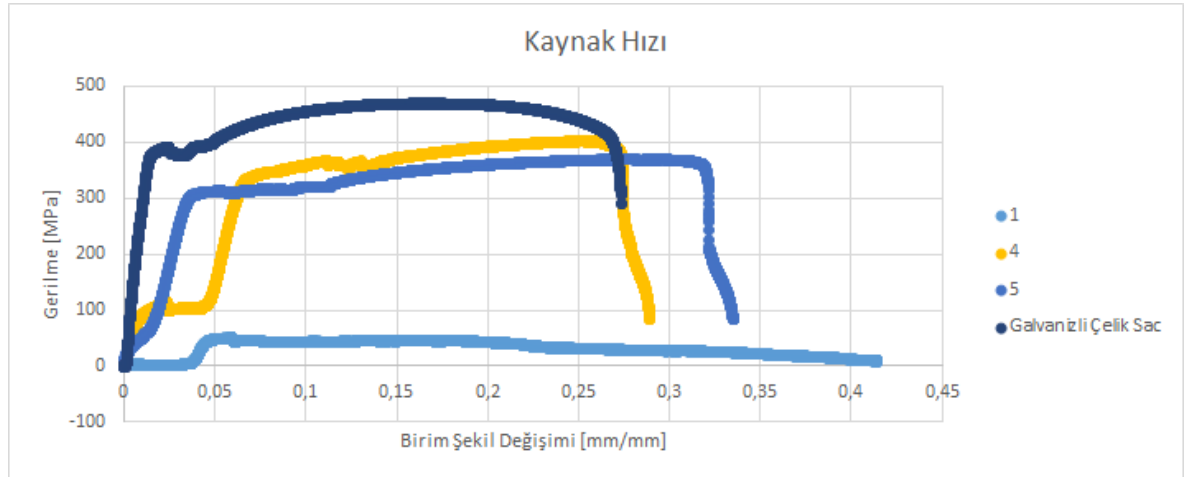
Şekil 5.5 : Kaynak tel çapının etkisi.

Koruyucu gaz debisinin etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla 1 ve 8 numaralı numuneler kullanılmıştır. Bu numunelere ait olan grafik Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



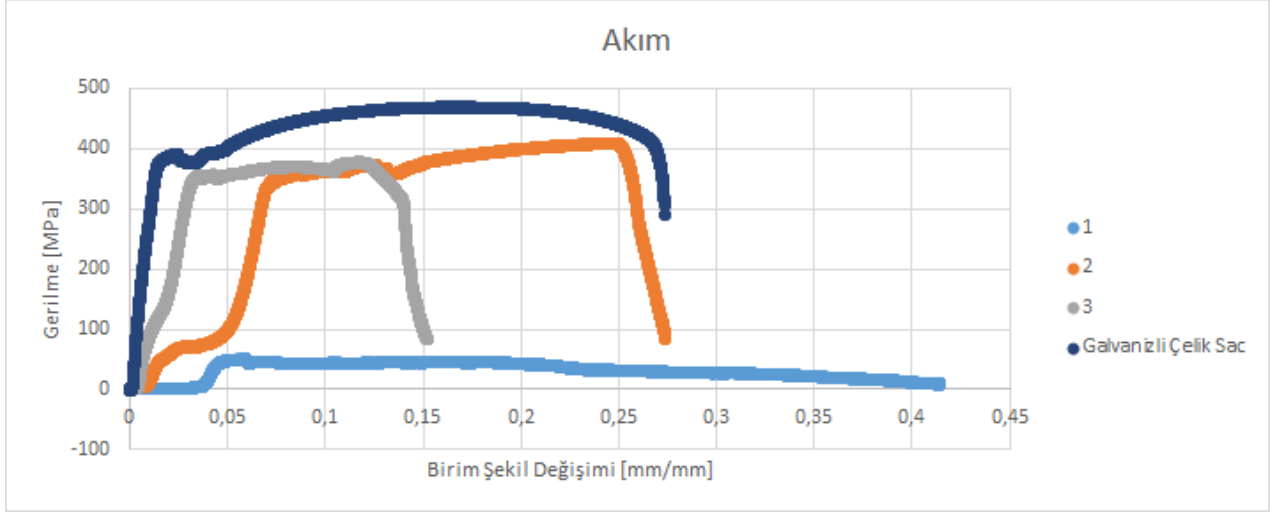
Şekil 5.6 : Koruyucu gaz debisinin etkisi.

Kaynak hızının etkisinin incelenmesi için 3 adet numune seçilmiştir. 1, 4 ve 5 numaralı numuneler kaynak hızının etkisinin incelenmesi için kullanılmışlardır (Şekil 5.7).



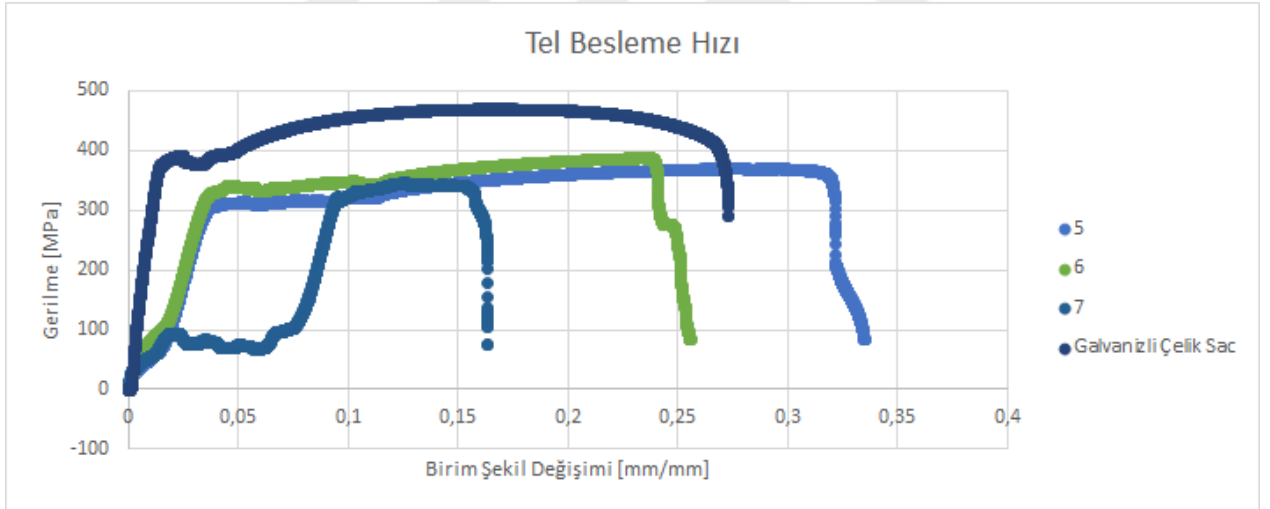
Şekil 5.7 : Kaynak hızının etkisi.

Akım kaynak işlemindeki çok önemli bir parametredir. Akımın etkisinin incelenmesi amacıyla 1, 2 ve 3 numaralı numunelere ait kuvvet-uzama grafiği Şekil 5.8'de görülebilmektedir.



Şekil 5.8 : Akımın etkisi.

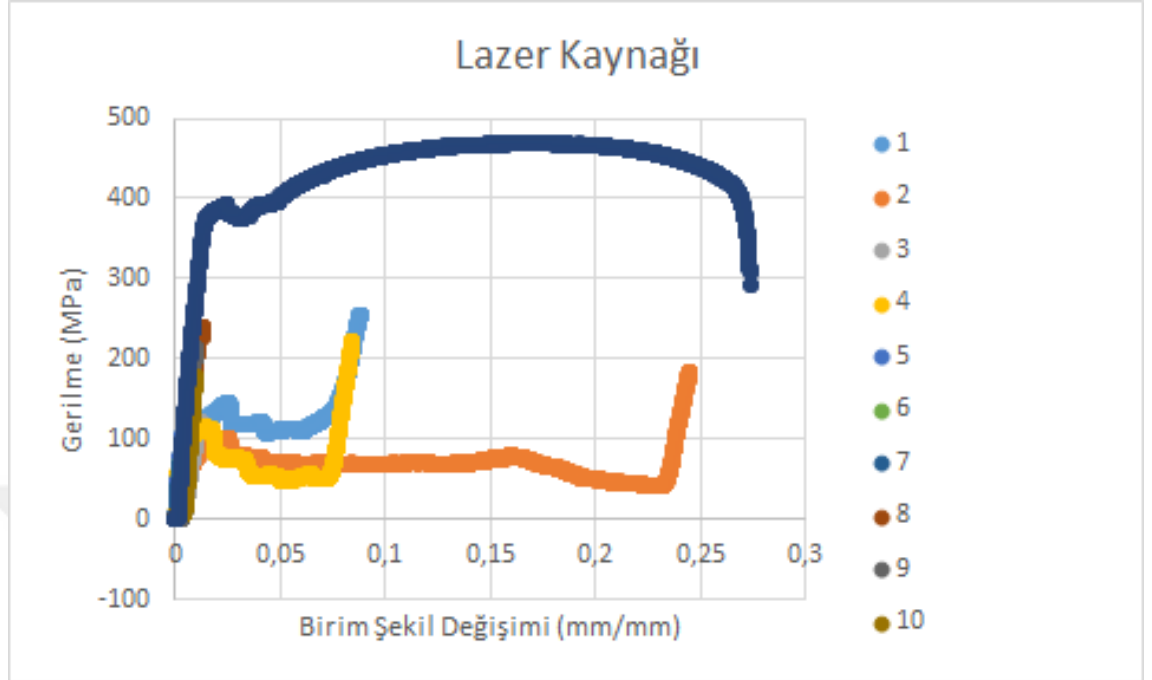
Son olarak ise tel besleme hızının etkisi incelenmiştir. Bu etkiyi inceleyebilmek amacıyla 5,6 ve 7 numaralı numuneler kullanılmıştır. İlgili numunelere ait olan grafik Şekil 5.9’da görülmektedir.



Şekil 5.9 : Tel besleme hızının etkisi.

Lazer kaynağına ait numunelerde ayrıca çekme testine tabi tutulmuşlardır. Tıpkı gazaltı kaynağında olduğu gibi çekme testi sırasında numune ile çekme kafası arasında kayma olmuştur. Grafikte yatayda paralel olan bölgeler incelemeye katılmamıştır. Kaynaklı bölgenin kalitesinin anlaşılabilmesi için ayrıca galvanizli sac malzemede grafiklere eklenmiş ve bir kıyas yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Lazer kaynağında ilk olarak tüm numunelerin birarada bulunduğu grafik Şekil 5.10’da gösterilmiştir.

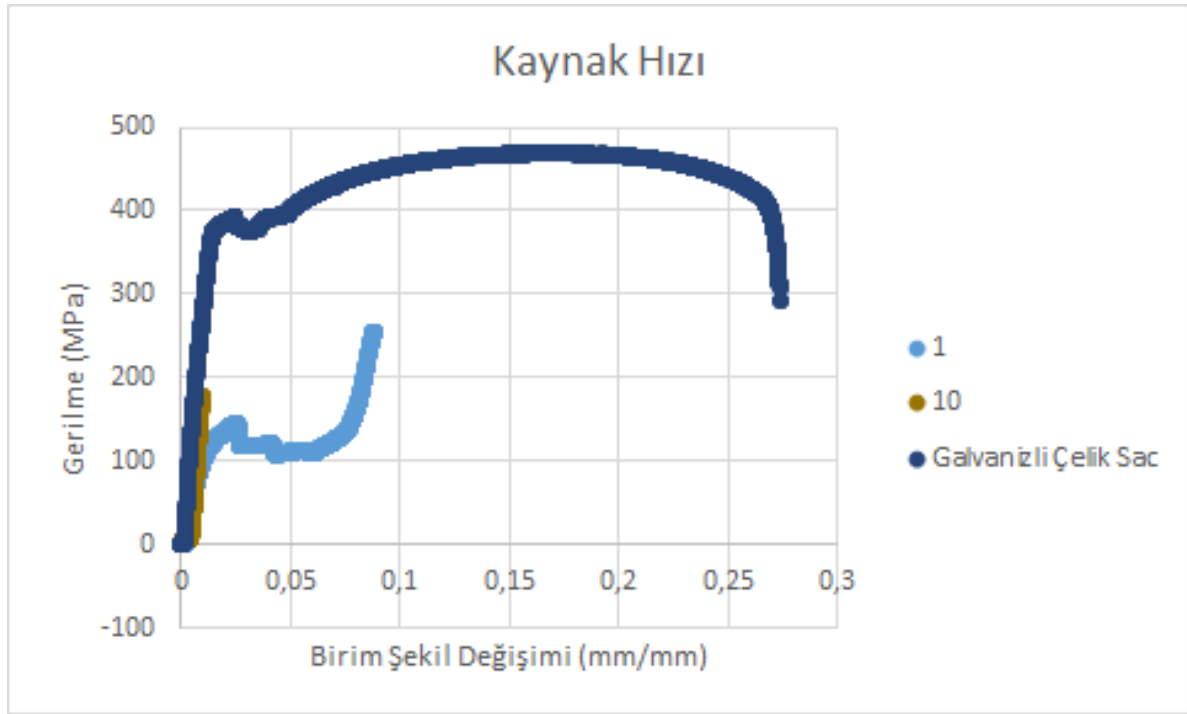


Şekil 5.10 : Lazer kaynağına ait tüm numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafiği.

Gazaltı kaynağında olduğu gibi lazer kaynağında da kaynak parametrelerinin etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla bir parametre değiştirilirken diğerleri sabit tutulmuştur. Bu sayede parametrenin kaynak kalitesine olan etkisi anlaşılmıştır.

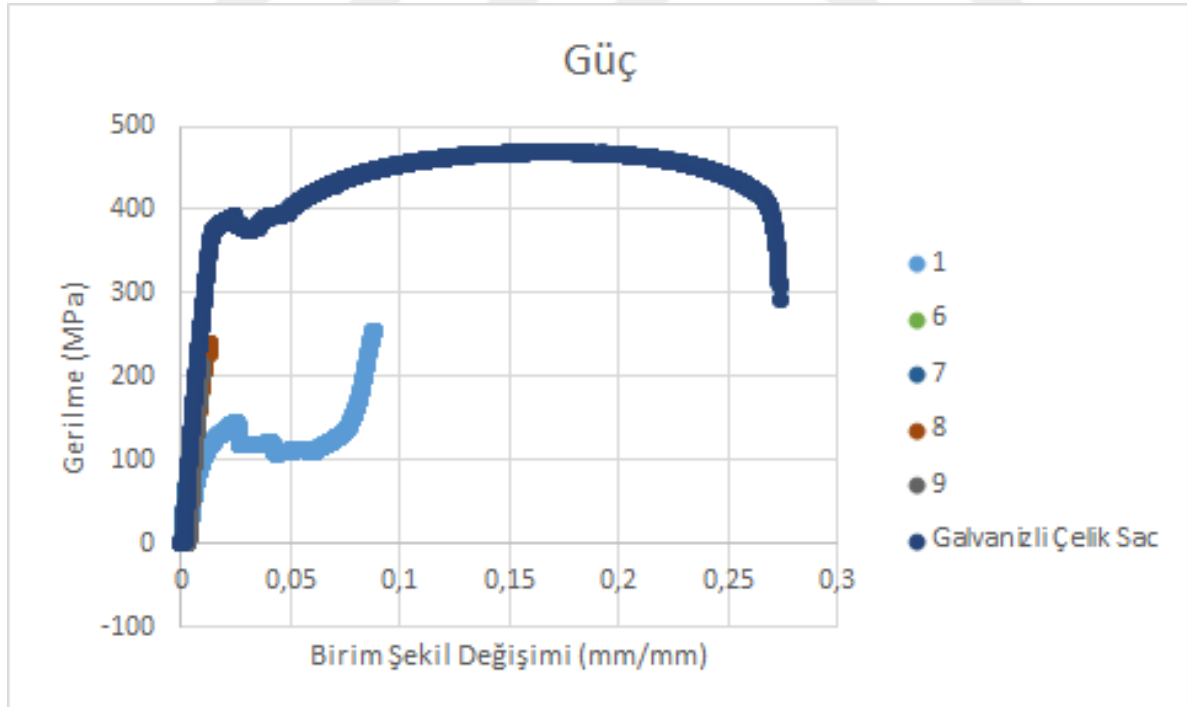
Kaynak hızının kaynak kalitesine etkisinin anlaşılması için 1 ve 10 numaralı numuneler çekme testinde kullanılmışlardır.

Şekil 5.11’de 1 ve 10 numaralı numunelere ait gerilme-birim şekil değişimi grafiği görülebilir.



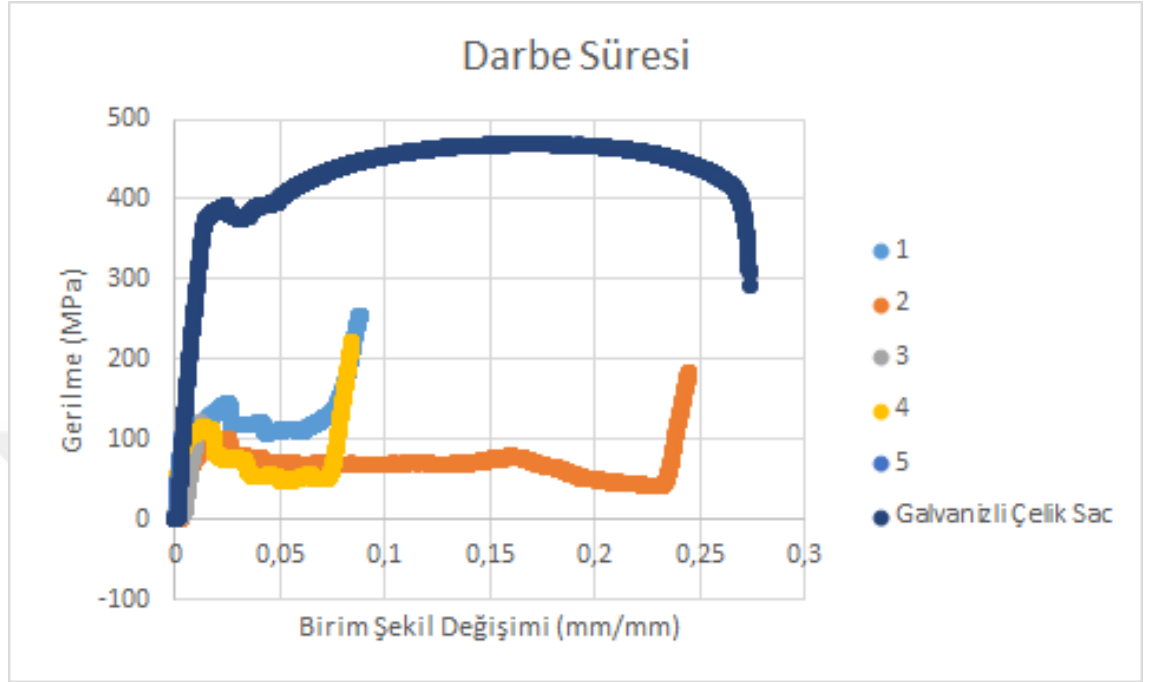
Şekil 5.11 : Kaynak hızının etkisi.

Şekil 5.12’de ise güç değerinin ortaya çıkan kaynaktaki etkisinin anlaşılması için 1, 6, 7, 8 ve 9 numaralı numuneler kullanılmıştır.



Şekil 5.12 : Güç değerinin etkisi.

Lazer kaynağında incelenen son kaynak parametresi ise darbe süresidir. Darbe süresinin etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı numuneler kullanılmış ve bu numunelere ait grafik Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : Darbe süresinin etkisi.

Her iki kaynak türü ile birleştirilmiş olan numunelerin test sonuçlarına ait yorumlamalar daha sonraki bölümlerde yapılacaktır.

5.3 Makrografik Analiz Sonuçları

Gazaltı kaynağı ve lazer kaynağı ile birleştirilmiş numuneler son olarak mikroskop yardımı ile makrografik analize sokulmuştur. Bu şekilde kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Bazı numunelerde kopma kaynak bölgesinden değilde iş parçasından gerçekleştiği için makrografik olarak incelenememiştir.

Kırılma yüzeyinin incelenmesi sırasında bazı numunelerde nüfuziyet eksikliği net olarak gözlenmiştir. Bu durum kesit kalınlığında incelmeye sebebiyet vererek kaynak bölgesinin dayanım değerlerinin düşürücü bir etkide bulunmuştur. Bu etki numunelere ait olan çekme test sonuçlarından da ayrıca gözlemlenebilmektedir.

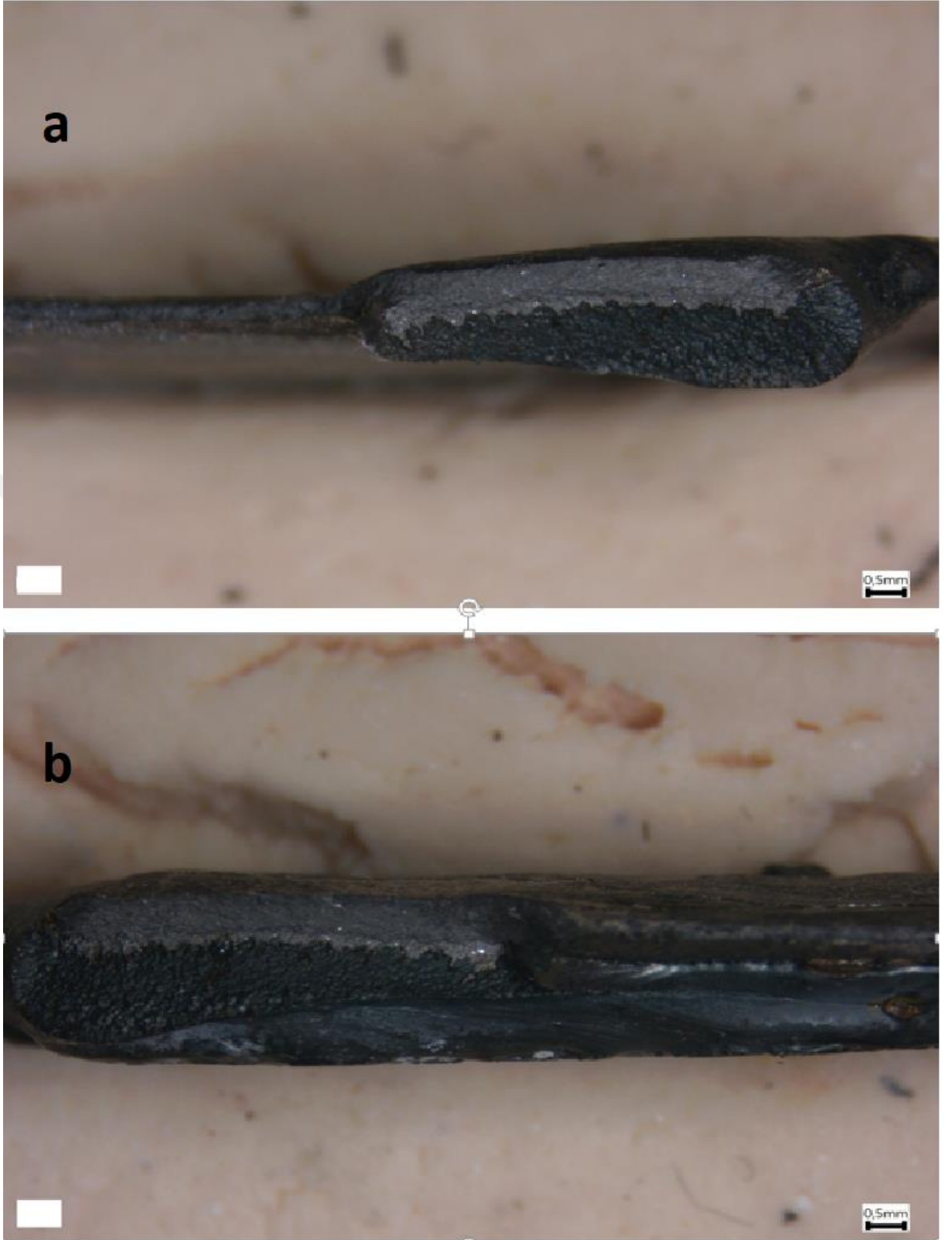
Gazaltı kaynağına ait görüntülere bakacak olursak ilk olarak Şekil 5.14'te 1 numaralı numuneye ait olan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 1 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

Yukarıdaki görüntüde açık bir şekilde kaynak yüzeyindeki yanmış bölgeler görülebilmektedir.

Şekil 5.15'te ise 2 numaralı numuneye ait 2 adet görüntü yer almaktadır. Görüntülerde açık bir şekilde yanma oluşan bölgeler kararmış bir şekilde görülmektedir.



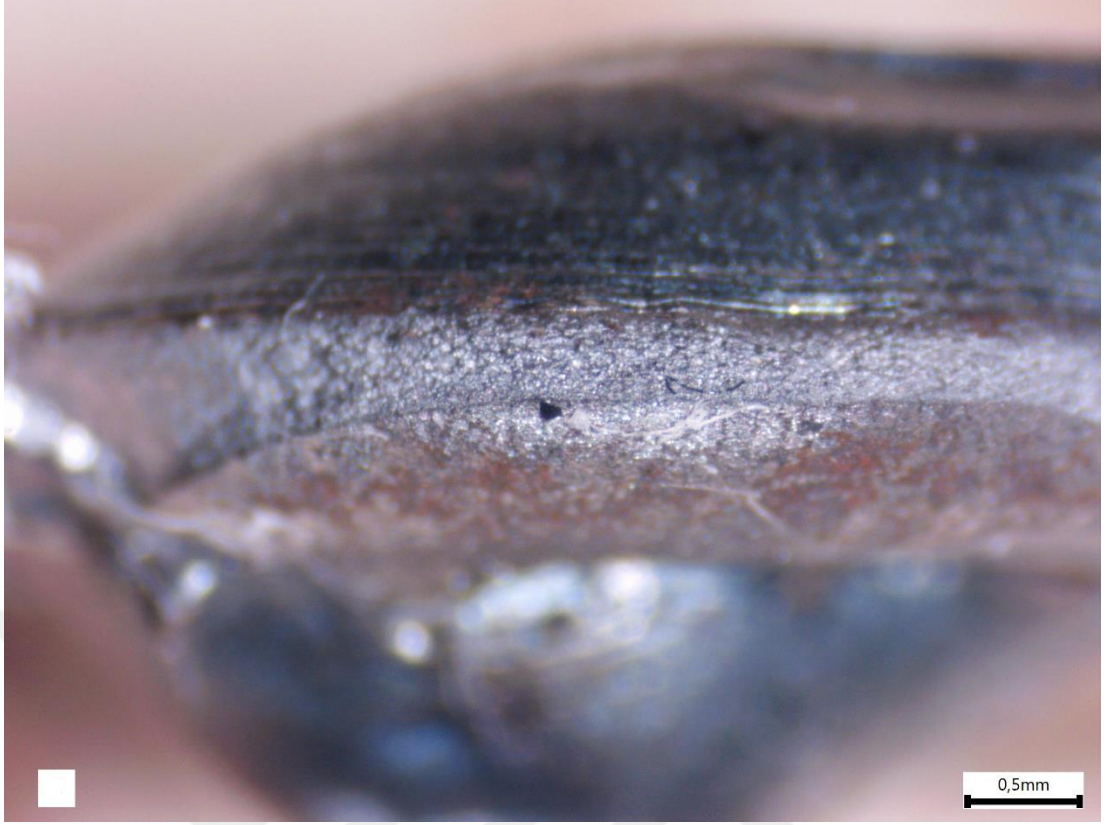
Şekil 5.15 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 2 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

7 numaralı numuneye ait olan görüntü Şekil 5.16’da gösterilmiştir.



Şekil 5.16 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 3 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

Aşağıdaki şekilde de 5 numaralı numuneye ait olan kopma yüzeyine ait resim görülebilmektedir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 5 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

Bir sonraki şekilde ise 6 numaralı numuneye ait olan kopma yüzeyine ait görüntü yer almaktadır (Şekil 5.18).



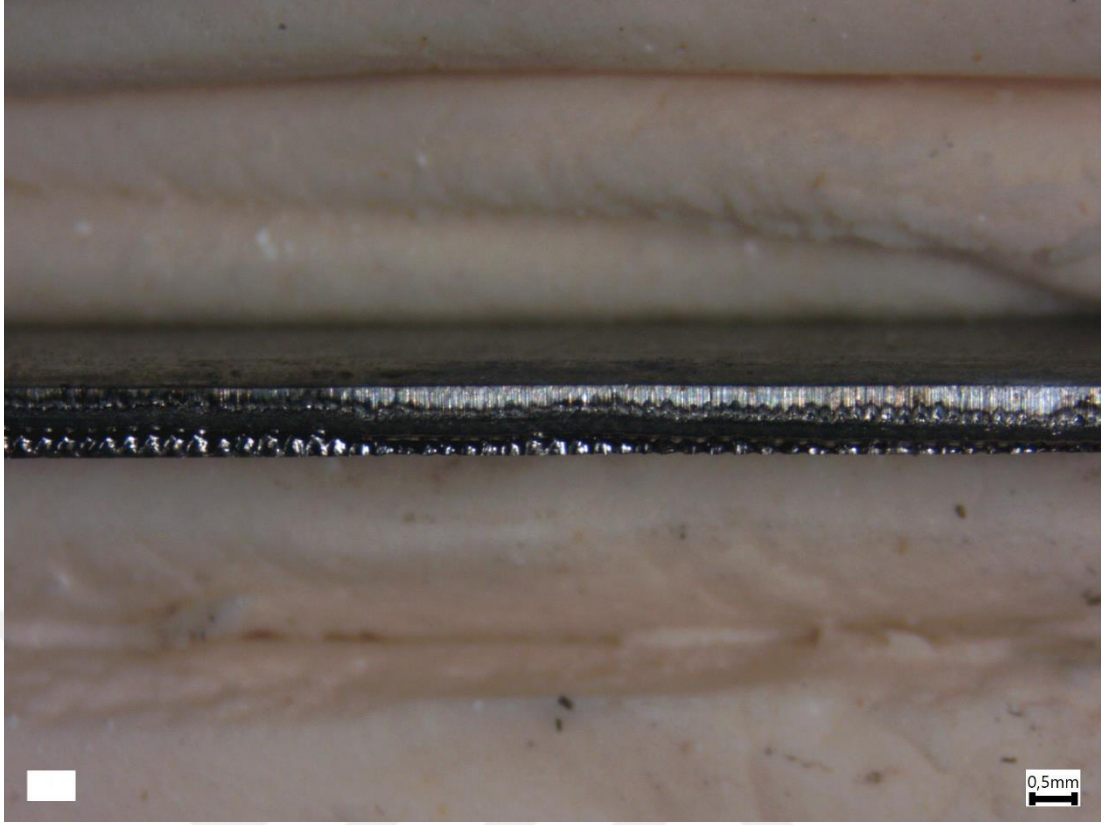
Şekil 5.18 : Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş 6 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

Gazaltı kaynağında olduğu gibi lazer kaynağı ile birleştirilmiş numuneler de mikroskop altında kopma yüzeylerinin incelenmesine tabi tutulmuşlardır.

Şekil 5.19’da lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan 1 numaralı numunenin kopma yüzeyine ait fotoğraf bulunmaktadır.

Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi kopma yüzeyinde yetersiz ergime gözlenmektedir.

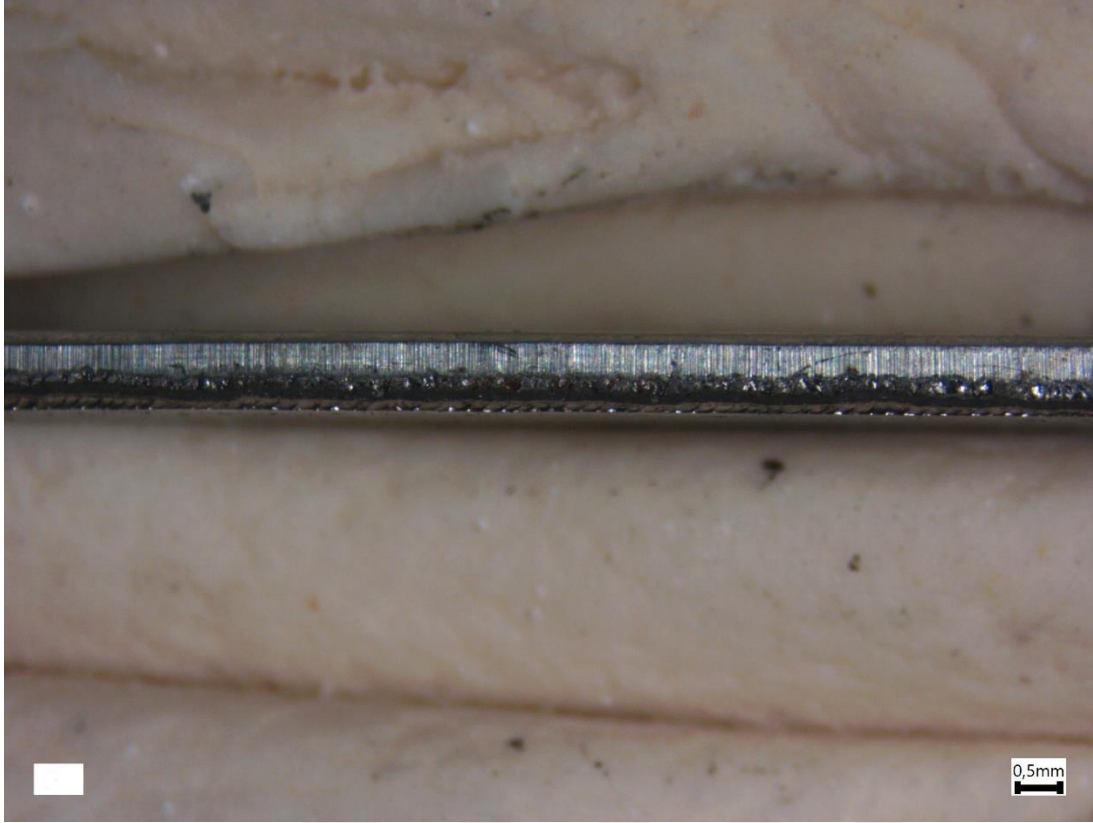
Bu durum kaynaklı birleştirmenin kalitesini düşürmekte ve parçanın dış yüklere karşı olan dayanıklılığını azaltmaktadır.



Şekil 5.19 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 1 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

Bir sonraki resimde ise 2 numaralı numuneye ait olan görüntü Şekil 5.20’de yer almaktadır.

Görüntü üzerinden takip edilebileceği gibi kaynak bölgesinde yetersiz nüfuziyet gerçekleşmiştir.



Şekil 5.20 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 2 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

Şekil 5.21’de lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan 3 numaralı numuneye ait makrografik fotoğraf yer almaktadır.

Nüfuziyet açısından kaynağın, parçanın kesit alanından ancak yarısına kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni olarak düşünülen durumlar deneylerin değerlendirildiği bölümde yer almaktadır.



Şekil 5.21 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 3 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

4 numaralı numuneye ait olan makrografik resim Şekil 5.22’de görülebilmektedir. Bu resimde kaynak nüfuziyetinin bir miktar artığı gözlenmektedir.

Ancak yinede kaliteli bir kaynak uygulamasından bahsedilebilmesi zordur. Kaliteli bir kaynak tüm kesit alanı boyunca ergimenin ve birleşmenin sağlandığı bir yapı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5.22 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 4 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

5 numaralı olan ve lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan numuneye ait makrografik resim Şekil 5.23'te görülmektedir.

Yetersiz nüfuziyet lazer kaynağı ile hazırlanmış olan numuneler için temel problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu resimde de yetersiz nüfuziyet açık bir şekilde gözlenmektedir.



Şekil 5.23 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 5 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

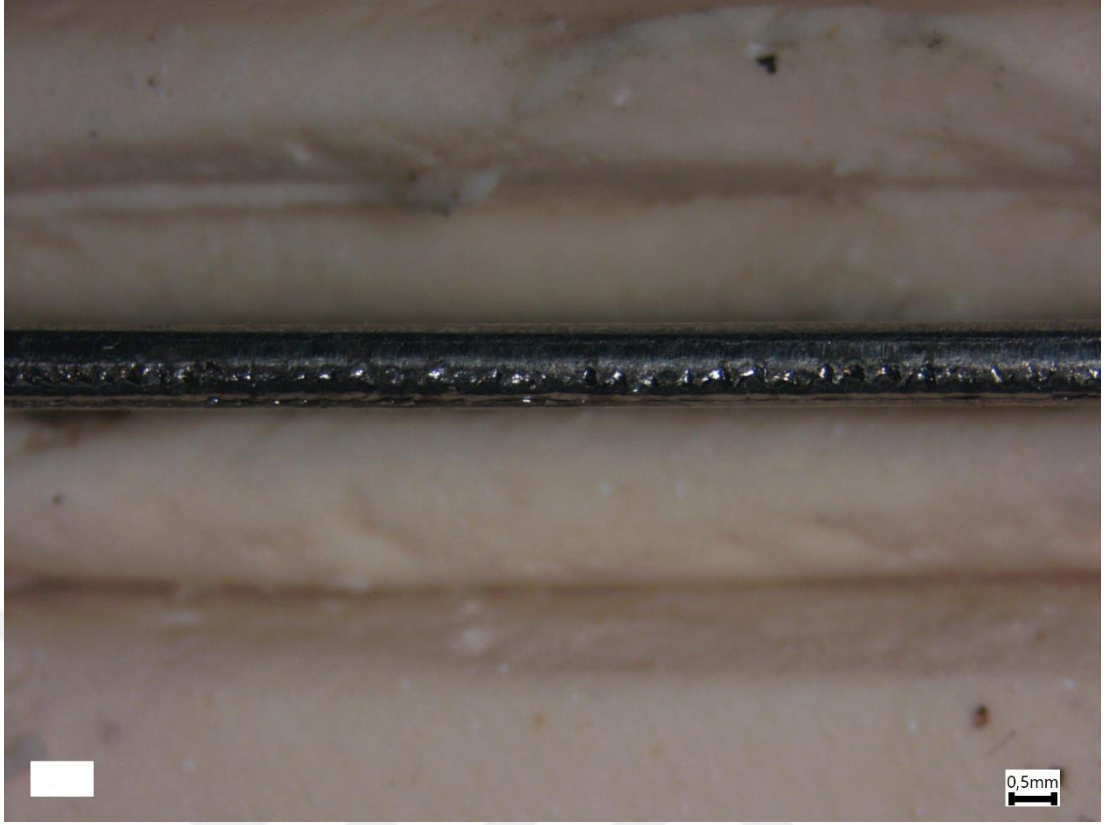
Şekil 5.24'te lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan 6 numaralı numune görülebilmektedir. Bu numunede kaynak nüfuziyetinin bir miktar artmış olduğu görülebilmektedir. Ancak yetersiz nüfuziyetin varlığı hala geçerlidir.



Şekil 5.24 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 6 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

7 numaralı numunede ise Şekil 5.25'te görüldüğü üzere kaynak kalitesi daha iyi bir durumda olduğu görülebilmektedir. Kaynak kesit alanın sonlarına doğru yaklaşmıştır. Bir iyileşme gözlemlendiği söylenebilir.

Ancak kaynak bölgesine yakından bakılacak olursa kararmış bölgeler varlığı gözlemlenecektir. Bu durum bölgede yüksek ısı nedeniyle bir miktar yanmanın olduğuna dair bir işaret olarak yorumlanabilir.



Şekil 5.25 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 7 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

8 numaralı lazer kaynaklı numune Şekil 5.26’da görülebilir. Kaynak nüfuziyetinde ki noksanlık ilk göze çarpan olgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak kaynak işleminin düzgün yapıldığı da gözlenmektedir.



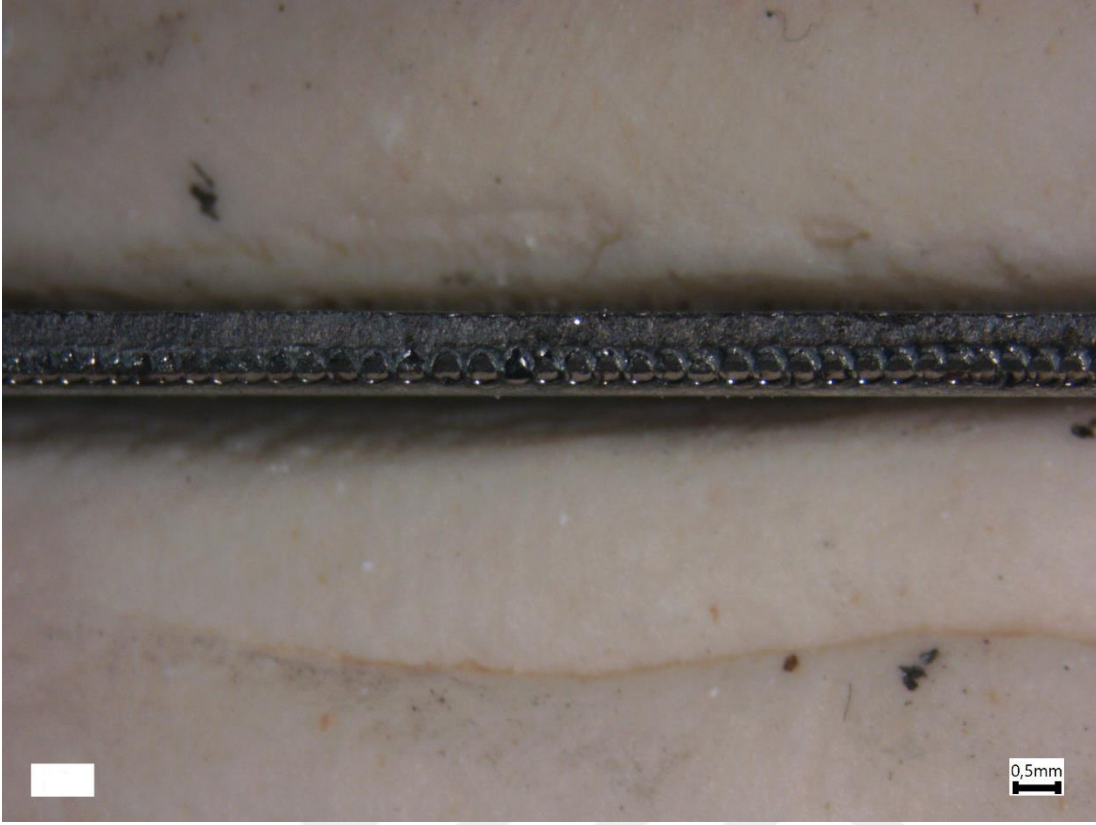
Şekil 5.26 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 8 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

Lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan 9 numaralı numune aşağıda görülebilmektedir (Şekil 5.27). Kopma yüzeyindeki girinti ve çıkıntılar kaynak nüfuziyetinin bir miktar iyi olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ancak nüfuziyet eksikliğinin olmadığı da söylenememektedir.



Şekil 5.27 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 9 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

Lazer kaynağı ile birleştirilmiş son numuneye ait olan 10 numaralı numune Şekil 5.28’de görülebilmektedir. Kaynak dikişinin net bir şekilde görülebildiği bu görüntüde kaynak nüfuziyet eksikliği bulunmaktadır. Ancak kaynak dikişi doğru ve kaliteli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bazı alanlarda görülen kararmalar, kaynak işlemi sırasında yüksek ısı nedeniyle yanma gerçekleşen bölgeleri göstermektedir.



Şekil 5.28 : Lazer kaynağı ile birleştirilmiş 10 numaralı numuneye ait kopma yüzeyi görüntüsü.

6. NUMUNELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın sonuçları kaynak yöntemi çeşidine göre lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı şeklinde ayrı ayrı olarak irdelenecektir.

Gazaltı kaynağı ile yapılan birleştirmelerin sonuçlarına bakılacak olursa, kaynak kalitesinin genel olarak iyi olduğu söylenebilmektedir.

Numunelerin incelenmesi sırasında kullanılan radyografik test yöntemi kaynak kalitesinin etkileyen temel problemler olan nüfuziyet eksikliği ve gözeneklilik ya da diğer bir deyişle porozitenin ortaya çıkarılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Numuneler ait olan röntgen görüntüleri incelendiğinde, görsel olarak en iyi durumdaki numunede dahi çeşitli seviyelerde kaynak hataları gözlenmiştir.

Çalışmada tel besleme hızının porozite ve diğer kaynak hatalarına olan etkisinin incelenebilmesi için tel besleme hızı değiştirilirken diğer parametreler sabit bırakılmıştır. Bu kapsamda 5, 6 ve 7 numaralı numuneler incelenmiştir. Radyografik inceleme sonuçlarına göre kaynak nüfuziyet eksikliği temel hata olarak görülmektedir.

Kaynak teli besleme hızının artması ile kaynak telinin kaynak işlemi sırasında ergimesi için gerekli olan süreye ulaşamadığı görülmüştür. Bu yetersiz ergime süresi kaynaklı olarak kaynak nüfuziyetinde eksiklik oluşmuştur. Tel besleme hızının iş parçası çeşidine göre belirlenmesi gereken hızın üstüne çıktığı durumlarda kaynak nüfuziyeti de aynı şekilde azalmaktadır.

Tel besleme hızındaki değişim kaynak işlemini belirleyen diğer parametrelerde de değişikliğe sebep olmaktadır. Akım yoğunluğu, ergime gücü ve kaynak bölgesinin profili, tel besleme hızı ile oldukça yüksek bir ilişki içerisinde.

Koruyucu gaz debisi incelenen bir başka parametredir. Bunun için 1 ve 8 numaralı numuneler kullanılmıştır. 1 numaralı numune için 12 l/dak ve 8 numaralı numune için 14 l/dak debide koruyucu gaz kullanılmıştır. 8 numaralı numunede kümelenmiş porozite gözlemlenmiştir. Diğer yandan 1 numaralı numunede ise porozite varlığı

tespit edilmektedir. Gaz akış hızındaki artış, kaynak havuzunda gaz sıkışmasına ve gözenekliliğin artmasına neden olmuştur.

Kaynak hızının etkisini anlamak için 1, 4 ve 5 numaralı numuneler kullanılmıştır. Bu kısımda 2, 3 ve 4 mm/sn olmak üzere 3 farklı kaynak hızı kullanılmaktadır. Gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş numunelere ait kaynak işlemi deneyimli bir kaynakçı tarafından yapılmıştır. X-ray filmlerine göre 2 mm/s ile kaynak yapıldığında kaynak bölgesinde ergime ve yanma gözlemlenmiştir, buna ek olarak porozite varlığı gözükmemektedir. Kaynak kalitesi 3 mm/sn kaynak hızı ile hazırlanmış numunede daha iyidir. Ancak bu durumda da bir miktar gözeneklilik gözlenmektedir. 4 mm/sn hızında gerçekleştirilen işlemde malzemenin ergimesi için gereken süre yetersiz olduğundan nüfuziyet eksikliği görülmüştür. Kaynak hızındaki değişiklik, kaynak akımında değişikliğe neden olur. Bu durum dolaylı olarak kaynak nüfuziyetini etkiler. Gerekenden daha düşük bir kaynak hızı kaynak nüfuziyeti eksikliğine neden olurken, yüksek kaynak hızı kaynak kaynak nüfuziyeti üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Ayrıca koruyucu gaz, yüksek kaynak hızlarında görevini yerine getirememektedir. Bu gibi durumlarda kaynak bölgesinin koruyucu gaz tarafından korunması sağlanamamaktadır. Uzun vadede oksidasyon oluşması gözlemlenebilir.

Diğer önemli parametrelerden biri de akımdır ve bunun etkisini anlamak için 1, 2 ve 3 numuneler incelenmiştir. Akım, kaynak işlemi sırasında oluşan ısı ile ilgilidir. Düşük akım uygulanan durumlarda yetersiz ısı üretimi nedeniyle yetersiz ergime oluşmaktadır. Öte yandan yüksek akım uygulanması sıcaklığın hızla artmasına ve galvaniz kaplamanın buharlaşmasına ve çeliğin korozyona açık olmasına neden olur. Ayrıca buharlaşan çinko kaplama nedeniyle yüksek akım değerlerinde porozite artar. Kaynak nüfuziyetini etkileyen en önemli parametre kaynak akımıdır. Kaynak akımı için gerekli olan kaynak hızından daha hızlı gerçekleştirilen kaynak işlemi, kaynak bölgesinde ergime eksikliği oluşmasına neden olur.

Son parametre kaynak telinin çapıdır. 1 numaralı numune ve 9 numaralı numuneyi kaynak ile birleştirilmesi sırasında iki farklı çapta tel kullanılmıştır. Tel çapları sırasıyla 0.8 mm ve 1.2 mm'dir. Aynı akım seviyesinde büyük ve küçük olarak 2 farklı çap değerine sahip kaynak telleri test edildiğinde, daha küçük çapın kaynak bölgesinde daha iyi bir şekilde birleşme özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Çünkü telin çapı ergime gücünü etkiler ve ince teller aynı akım değerinde daha yüksek ergime gücüne sahiptir. Her iki telin kesitleri incelendiğinde çapı daha küçük olan telin daha az kesit

alanına sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, aynı Volt/Amper gücünde, daha ince tel bölümleri özel olarak (birim bölüm başına) daha yüksek akımla yüklenir. Bu yoğun akımın bir sonucu olarak, kaynak için daha küçük çap kullanıldığında kaynaklı bölgenin daha iyi bir şekilde birleşme oranı oluşturduğu görülmektedir. Ancak her kaynak teli çapı için bir maksimum akım yoğunluğu değeri vardır ve bu değerden daha yüksek akım değerlerinin kullanılması kaynak işlemini kararsız ve değişken hale getirir. Bu nedenle akım belirli bir değere ulaştığında kaynak telinin çapının arttırılması gereklidir. Çalışmada daha büyük çaplı bir tel ile kaynak yapılan 9 numaralı numunede, nüfuziyet eksikliği oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir. Küçük iş parçası kalınlığı için kaynak telinin çapı küçük seçilmelidir.

Lazer kaynak parçaları da ayrıca radyografik incelemeye sokulmuştur. Deney parametreleri olarak kaynak hızı, gücü ve darbe süresi seçilmiştir. Lazer kaynak işlemi bir teknisyen tarafından yarı otomatik bir makine ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak hızı değerleri 1 mm/sn ve 1.5 mm/sn olarak ölçülmüştür. X-ışını filmleri, lazer kaynağındaki gözeneklilik ve diğer kaynak kusurlarının gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş numunelerden daha az olduğunu göstermektedir. Ancak çinko kaplamanın düşük kaynama sıcaklığından dolayı lazer ile birleştirilmiş olan numunelerde de bazı gözenekler gözlenmektedir. Kaynak işlemi sırasında gücün artmasıyla (numune 6, 7, 8, 9 ve 1) porozite oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Yüksek güç ile kaynak havuzunun katılaşması için gereken süre artar. Bu uzun süre kaynak bölgesindeki gazların buharlaşması için yeterli süreyi sağlar. Kaynaklı birleştirme sırasında güç değerindeki artış, kaynaklı yapının çekme mukavemetini etkileyen bir diğer faktördür. Artan güç değerleri yapıya daha fazla ısı girişi anlamına gelir. Bu durum, birleştirilen malzemenin mekanik özelliklerinde azalmaya ve kaynaklı numunenin dayanım değerlerinde bozulmaya neden olur.

Güçte herhangi bir değişiklik olmaksızın kaynak hızının artması, porozite oluşumunun artmasına neden olur. Çünkü lazer kaynak hızının artması ile birim alan başına alınan enerji miktarı azalacaktır. Bu durumda kaynak havuzunun katılaşması hızlanacak ve gazlar kaynak havuzunda sıkışacaklardır (numune 1 ve 10). Bu gazlar kaynaktaki porozitede bir artış olarak görünecektir.

Bunun yanı sıra lazer kaynak işleminde kaynak hızının artması, kaynak yapılan bölgenin morfolojisini değiştirmektedir. Bu durum sertlikte artışa neden olur. Yüksek sertlik değerleri genellikle çekme mukavemetinde bir artış olarak ortaya çıkar. Kaynak

hızının artması ile soğuma hızında bir artış gözlenmektedir. Bu durumda kaynak bölgesinde daha ince taneli bir yapı oluşumu gözlenir. Bu ince taneli yapı, mukavemet değerlerinde bir artış olarak karşımıza çıkmaktadır.

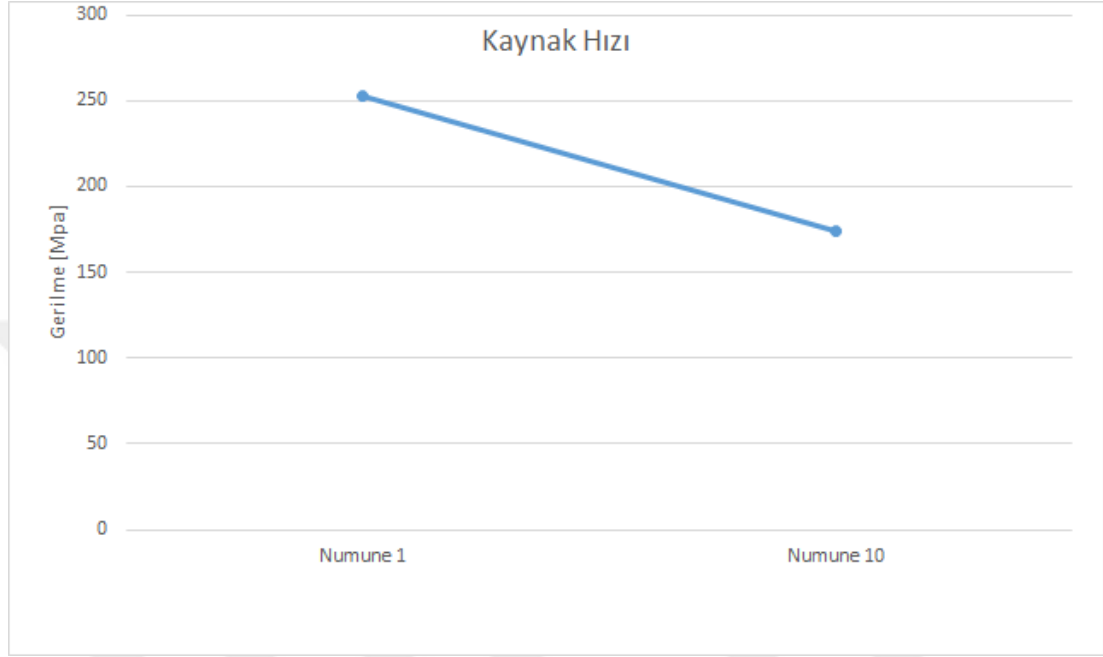
Darbe süresi, lazer ışınının iş parçası ile ne kadar süreyle temas halinde olduğunu gösteren bir parametredir. Darbe süresindeki artış, aktarılan enerji miktarında artış olarak karşılık bulur. Bu durum kaynak bölgesinin ısıdan etkilenen bölgesini arttırır. Yüksek darbe süresi değerlerinde ITAB genişlemesi görülür. Bu durum çekme mukavemetinde ve diğer mekanik özelliklerde azalma olarak kendini gösterir. Darbe süresinin artması, iş parçasına aktarılan 1 birim enerji için gereken sürenin daha uzun olması anlamına gelir. Bu durumda malzemenin katılaşması için gereken süre daha uzun olacağından kaynak bölgesindeki gazların yayılması için daha fazla süre sağlanacaktır. Bu durumun porozite oluşumunu azalttığı şeklinde yorumlanabilir (numune 1, 2, 3, 4 ve 5).

Hem lazer kaynağı hem de gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş olan tüm numuneler çekme test cihazında test edilmiştir. Testler sonucunda numuneler ait olarak gerilme-birim şekil değişimi grafikleri oluşturulmuştur. Grafikler ayrıca kaynak parametrelerinin dayanım üzerindeki etkisini göstermek için parametrelere göre de düzenlenmiş ve ilgili bölümde gösterilmiştir. Lazer kaynağı ile birleştirilen numunelere ait olan gerilme-birim şekil değişimi grafikleri incelendiğinde, görüldüğü gibi bazı numunelerin değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu değerler, parametrelerin etkilerinin açıklanması sırasında detaylı olarak gösterilmiştir.

Test sırasında, çekme işleminin sıkıştırma kafası ile malzeme arasında bir miktar kayma gösterdiği durumlar olmuştur. Bu durumlar kuvvet değerinin değişmediği paralel bölgeler olarak grafiklerde görülmektedir. Ayrıca grafiklerin yorumlanması sırasında dikkate alınmamıştır.

Lazer kaynağı ile birleştirilen numunelere bakıldığında kaynak kalitesinin iyi olduğu söylenebilir. Ancak çekme testi sonuçları kaynakla birleştirilen bölgelerin dayanım değerlerinin ana metalin dayanım değerlerinin altında değerler verdiğini göstermektedir. Lazer kaynağı ile yapılan birleştirmelerde en yüksek dayanım değerine sahip olan 1 numaralı numunede değer 200 MPa değerine yaklaşmaktadır. 200 MPa değeri testlerde en yüksek değer olmasına rağmen galvanizli çelik sacın 400 MPa olan dayanım değerinden daha düşük kalmaktadır. Parametrelerin etkilerine ayrı

ayrı bakacak olursak kaynak hızındaki artış dayanım değerinde azalmaya neden olmuştur. Bu durumun nedeni, malzemenin yüksek kaynak hızında ergitilmesi için gereken ısı miktarının tam olarak iletilmemesi gösterilebilir. Yüksek kaynak hızı ile birim zamanda iletilen ısı miktarı azalacaktır. Bu durum mukavemette bir azalma olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 6.1).

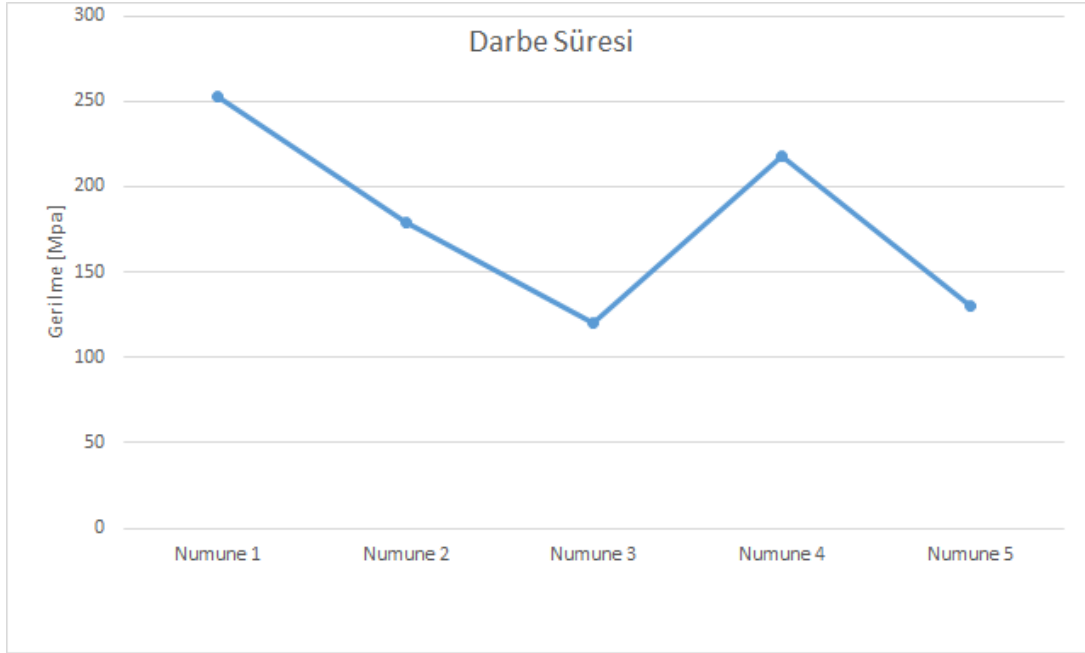


Şekil 6.1 : Lazer kaynağında kaynak hızı ile gerilme ilişkisi.

Parametrelere göre hazırlanmış olan grafikler yakından incelendiğinde güç değerlerindeki değişimin dayanım değerlerine etkisi görülebilmektedir. Artan güç değeri ile malzemeye aktarılan enerji miktarı doğru orantılı olarak artar. 1 numaralı numunede düşük güç nedeniyle yetersiz ergime meydana gelmiş ve bu durum düşük dayanım değeri ile kendini göstermiştir. Ancak optimum değer civarında olan 7 ve 8 numaralı numunelere bakıldığında mukavemet değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Daha yüksek değerler uygulanırsa, yüksek ısı girdisi nedeniyle malzemenin morfolojik yapısında bir değişiklikle dayanım değerlerinde bir azalma gözlemlenmesi beklenmektedir.

Darbe süresinin kaynak bölgesinin mukavemeti üzerindeki etkisine baktığımızda, artan temas süresinin mukavemet değerlerinde bir miktar azalmaya neden olduğu ortaya çıkmaktadır (Şekil 6.2). Bu durumun nedeni, temas süresinin uzun olması ve

aktarılan ısı miktarındaki orantılı artış ve bunun sonucunda ITAB'ın büyümesi ile gösterilebilir.

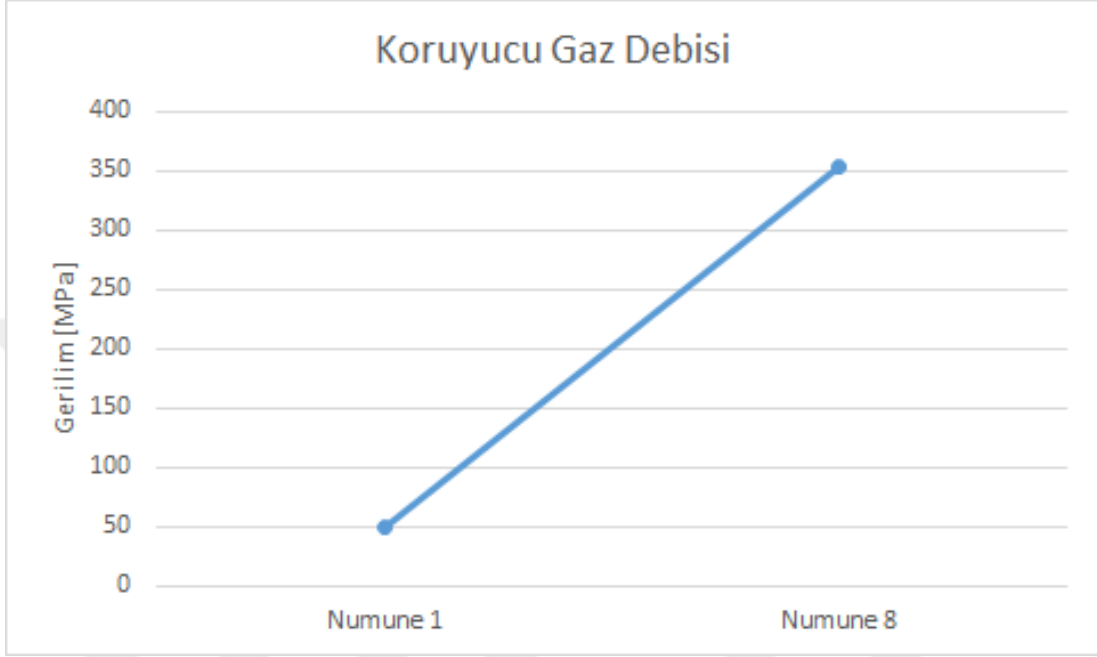


Şekil 6.2 : Lazer kaynağında darbe süresi ile gerilme ilişkisi.

Lazer kaynaklı numunelerin testlerinde olduğu gibi, gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş olan numunelerde de çekme test makinesinin çekme kafası ile numune arasında bir miktar kayma olmuştur. 1 numaralı numune, çekme testinde kaynak kalitesinin düşük olduğunu ispatlamıştır. Dayanabileceği en yüksek mukavemet değerleri 50 MPa'nın altında kalmıştır. Özellikle 8 ve 9 numaralı numunelerde elde edilen 350 MPa civarındaki dayanım değerleri oldukça başarılı sonuçlardır. Ancak hiçbir test numunesi galvanizli sacın dayanabileceği 380 MPa değerlerine ulaşamamıştır. Gazaltı kaynağı için 5 farklı parametre incelenmiştir. Bu parametrelere ait numunelerin gerilme- birim şekil değişimi grafikleri ayrı ayrı gösterilmiştir.

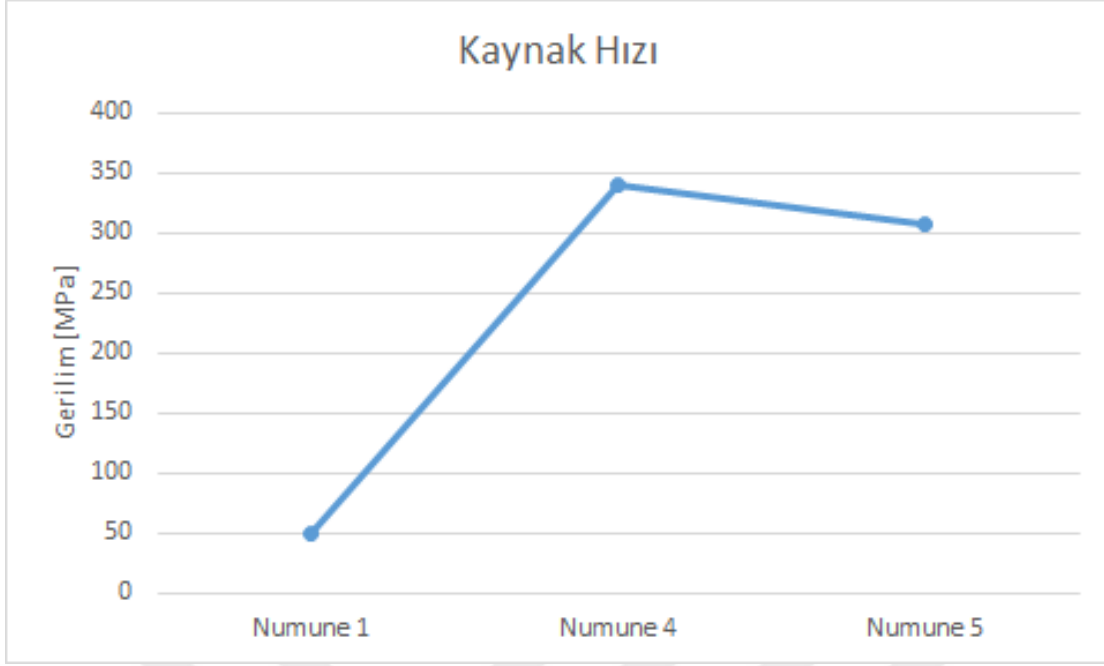
Kaynak teli çapının dayanım değerlerine etkisi göz önüne alındığında çapın artmasının dayanım değerinde bir azalmaya neden olduğu görülebilmektedir. Ancak üretilen numunede yetersiz ergime gözlemlendiğinden, küçük çaplı kaynak teli ile çekme mukavemet değeri daha düşük bulunmuştur. Küçük çaplı kaynak teli aynı akım değerinde daha yüksek ergime gücüne sahip olacağından, test öncesi daha küçük çaplı telin daha iyi bir değer vermesi beklenmekteydi.

Koruyucu gaz debisi, kaynak kalitesine etki eden diğer bir parametredir. Bu parametrenin etkisine baktığımızda koruyucu gaz miktarının artmasıyla dayanım değerlerinde bir iyileşme gözlemlenmiştir ve bu durum Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Bu durumun nedeni, kaynak bölgesinin dış etkenlere karşı daha iyi korunması olarak gösterilebilir. Kaliteli bir kaynak işlemi için yeterli koruyucu gaz debisi sağlanmalıdır.



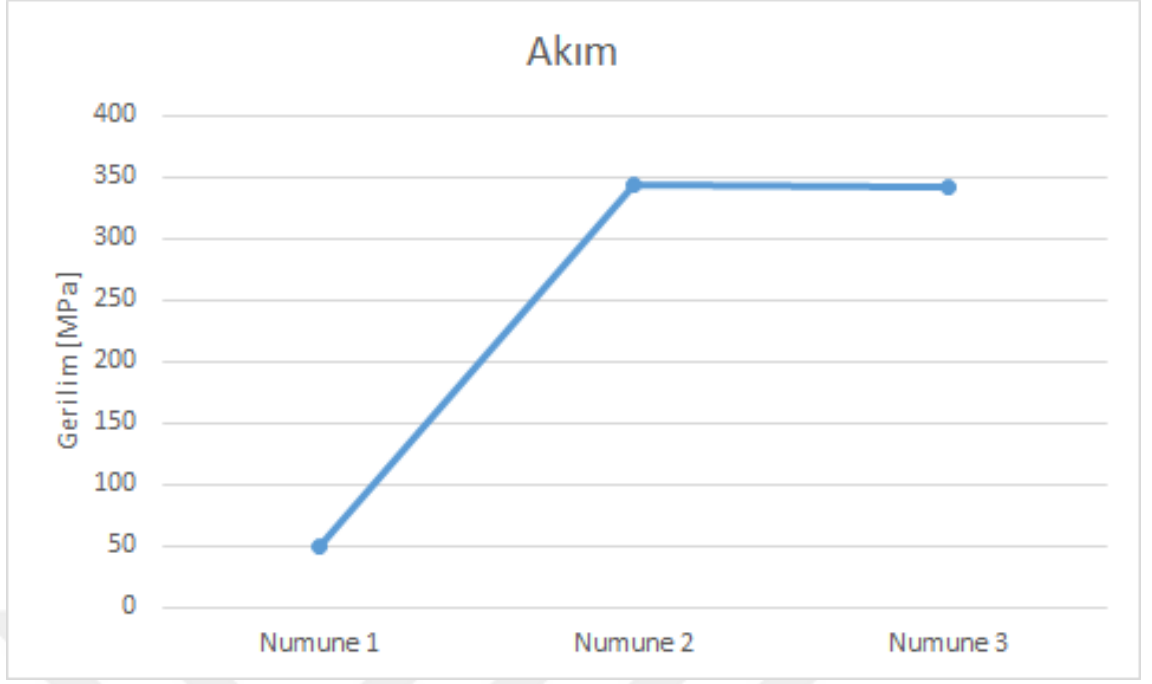
Şekil 6.3 : Gazaltı kaynağında koruyucu gaz debisi ile gerilme ilişkisi.

Kaynak hızı, kaynak kalitesini belirleyen önemli bir parametredir. Düşük kaynak hızlarında malzemede yüksek ergime meydana gelir ve malzeme zarar görür. Yüksek kaynak hızlarında yapılan işlemler yetersiz ergime ile sonuçlanır. Düşük kaynak hızı ile birleştirilen 1 numaralı numunede delikler oluşmuş ve mukavemet değerleri düşmüştür. 4 ve 5 numaralı numunelerde sırasıyla orta ve yüksek hızlı birleştirme yapılmıştır. Grafikte (Şekil 6.4) görüldüğü gibi yüksek hızlı kaynak işleminde mukavemet değerleri orta hızlı kaynak işlemine göre biraz daha düşüktür. Bu sonuçtan da anlaşılacağı gibi, yüksek mukavemet değerlerine ulaşmak için kaynak hızı optimum değerlerde uygulanmalıdır.



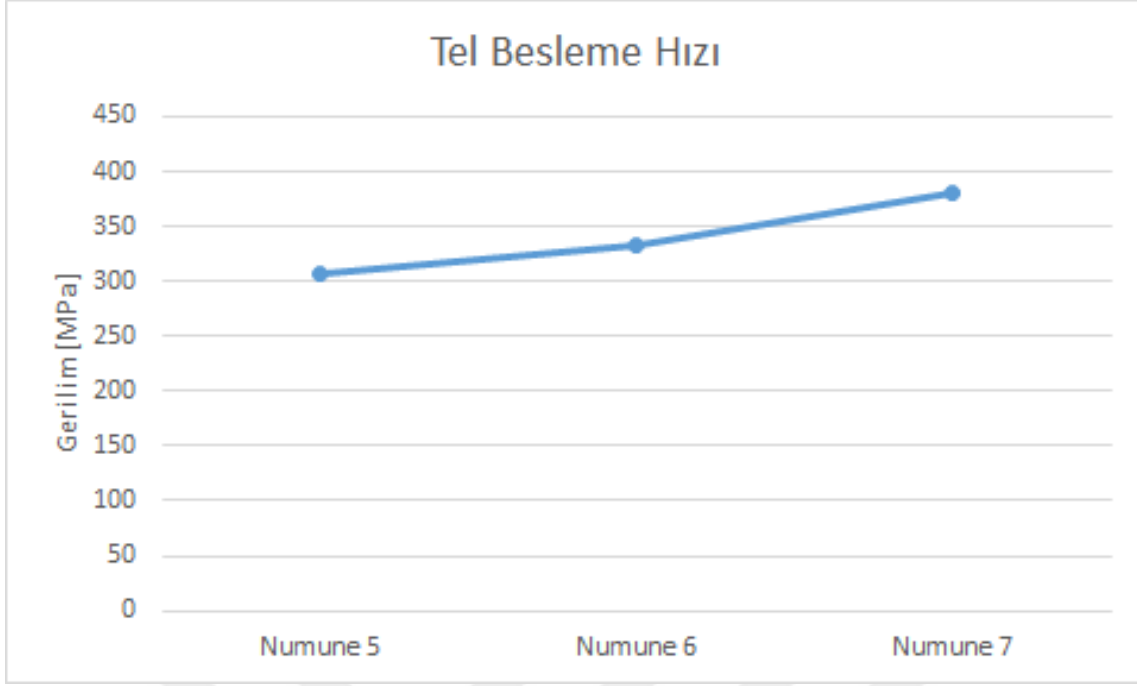
Şekil 6.4 : Gazaltı kaynağında kaynak hızı ile gerilim ilişkisi.

Akım, kaynak işlemi sırasında üretilen ısı miktarı ile ilgili olduğu için önemli bir parametredir. 1 numaralı örnekte görüldüğü gibi yetersiz akım nedeniyle yetersiz miktarda ergime oluşumu gözlenmiştir. Bu durum, mukavemet değerlerinde bir azalma olarak görülmektedir. 2 ve 3 numaralı numunelerin mevcut değerleri nispeten daha ideal değerlerdir. Bu sonuçlar, mukavemet değerlerindeki yüksek değerlerden de anlaşılabilir. 2 ve 3 numaralı numunelerin testlerinde ulaşılan mukavemet değerleri yaklaşık olarak aynıydı ve 350 MPa'dan biraz fazla ölçülmüştür (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 : Gazaltı kaynağında akım ile gerilim ilişkisi.

Tel besleme hızı yüksek olduğunda kaynak malzemesinin yığılmasına, düşük olduğunda ise yetersiz kaynak malzemesine neden olur. Test sonuçlarına bakacak olursak 5 numaralı numunenin dayanım değeri diğer numunelere göre daha düşüktür (Şekil 6.6). Bu durum, düşük kaynak teli hızı ve buna bağlı olarak yetersiz bağlantı ile açıklanabilir. Diğer 2 numunede ise (6 ve 7 numaralı numuneler) tel besleme hızı yeterli olduğu için daha yüksek çekme kuvvetine dayanmaları grafiklerden görülebilmektedir.



Şekil 6.6 : Gazaltı kaynağında tel besleme hızı ile gerilim ilişkisi.

Bu sonuçlara göre doğru parametrelerle gazaltı kaynağı ile kaliteli bir kaynak işlemi yapılabilmektedir. Lazer kaynağında kaynak bölgesinin biraz daha zayıf olduğu görülmektedir. Lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler çoğunlukla iyi kalitede sonuçlar vermiştir. Öte yandan gazaltı kaynağı ile yapılan birleştirmelerde kaynakçının kabiliyeti büyük önem taşımaktadır. Bu durum, gazaltı kaynağında kaynak kalitesinin insan faktöründen etkilenmeye daha yatkın hale getirir.

Lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan numunelere ait makrografik inceleme sonuçları şu şekilde açıklanabilir.

İlgili bölümde paylaşılan fotoğraflara bakılacak olursa, lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan numunelerdeki en temel ve yaygın sorunun yetersiz ergime olduğu görülebilmektedir.

Numunelerde ayrıca kopma yüzeyinde kararmış bölgelerin olduğu da gözlenmiştir. Lazer kaynağında, bilindiği üzere lokal bir alana yüksek yoğunlukta bir ısı girdisi sağlanmaktadır. Ancak bu yüksek ısı girdisi kaynaklı olarak kopma yüzeylerinde yanma gerçekleşmiş alanlar oluşmuştur.

Görsel olarak yapılan ilk gözlemlerde lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak kalitesinin iyi olacağı öngörülmüştür. Ancak yapılan testler sonucunda kaynak

bölgesinde ve kopma yüzeyinde ortak olan ve daha önce belirtilmiş olan hatalar vardır. Bu hataların düzeltilmesi amacıyla, uygulanan kaynak parametrelerinin düzenlenmesi ve daha uygun parametrelerin belirlenmesi ihtiyacı vardır.

Yanma bölgeleri özellikle 7 numaralı numunede açık bir şekilde görülebilmektedir.

Diğer yandan gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş olan numunelere bakacak olursak, tespit edilmiş olan kaynak hataları radyografik test ile belirlenmiş olan hatalarla paralellik göstermektedir.

1 numaralı numune için yapılmış olan radyografik test sonucunda tespit edilmiş olan porozite, makrografik test için yapılmış görüntülemelerde de tespit edilebilmektedir. Ayrıca 2 numaralı numuneye ait olan resimlere dikkatli bakılırsa, tıpkı lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde de gözlemlenen kararmış bölgelerin varlığı tespit edilebilmektedir. Radyografik muayene sırasında tespit edilen toplu gözenek oluşumu kopma yüzeyinde de boşluklar olarak kendini göstermiştir.

Diğer yandan 6 numaralı numuneye dikkat edilirse, radyografik muayene sırasında nüfuziyet noksanlığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde kopma yüzeyine ait olan resimlerde kaynağın, tüm bölgeyi kaplayamadığı görülebilmektedir.

Sonuç olarak makrografik analizde incelenen kopma yüzeylerinin sonuçları, radyografik muayeneye ait olan sonuçlar ile paralellik göstermektedir.



7. SONUÇLAR

Çalışma, lazer kaynağı ve gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş galvanizli çelik saclarda kaynak parametrelerinin porozite oluşumu ve mekanik özelliklere etkisini araştırmak üzere yapılmıştır. Bu çalışmada lazer kaynağının işlem parametreleri kaynak hızı, gücü ve darbe süresi olarak seçilmiştir. Diğer kaynak yöntemi olan gazaltı kaynağı için ise kaynak parametreleri olarak kaynak teli çapı, koruyucu gaz debisi, kaynak hızı, akım ve tel besleme hızı seçilmiştir.

Belirtilen kaynak parametreleri doğrultusunda birleştirilen numuneler radyografik test, çekme testi ve makrografik test ile incelenmiştir.

Hazırlanan numunelerin radyografik muayeneye ait görüntüleri her bir kaynak yöntemi için ayrı ayrı olarak incelenmiştir. Radyografik muayene sonucunda, gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş olan numuneler için porozite ve diğer bazı kaynak kusurlarının ana problemler olduğu görülmektedir. Özellikle 3 numaralı numunede yer alan doğrusal gözenek oluşumunun akım değerinin artışı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Nüfuziyet noksanlığı olan 4, 5, 6 ve 7 numaralı numunelerde ise dayanım değerlerinde de düşüş olduğu gözlenmiştir. 8 numaralı numune ise birçok kaynak hatası barındırmaktadır. Hem nüfuziyet eksikliği hemde kaynak bölgesinde yer alan toplu gözenek oluşumu, işlemin yetersizliğini bize göstermektedir. Bu numune için kaynak parametrelerinin uygun olmadığı açık bir gerçektir.

Kaynak telinin çapının etkisinin incelendiği 9 numaralı numunede ise daha büyük çaptaki telin daha iyi bir sonuç verdiği gözlenmiştir.

Koruyucu gazın kaynak bölgesinin kalitesi ile olan yüksek ilişkisi bilinen bir olgudur. Koruyucu gaz debisinin artışı ile kaynak bölgesi dış etkenlerden daha iyi korunmuş ve bu sonuç çekme testi ve radyografik incelemeye ait sonuçlarda da görülmüştür.

Kaynak hızının etkisinin incelendiği durumda ise düşük kaynak hızının yetersiz kaldığı anlaşılmış ve durum 1 numaralı numune ile de ortaya konmuştur. Kaynak

hızının ideal olması kaynak oluşumu için gerekli olan ısıнын ortama verilebilmesi için yeterli zamanı sağlamaktadır.

Akım değerinde ise yüksek akım değeri uygulanan numunede yanma durumu gözlenmiştir. Düşük olarak uygulanan akım değerinde ise yetersiz ergime oluşmuştur. Bu konu ile ilgili olarak sonuçlar çekme testinde açıkça görülebilmektedir.

Tel besleme hızı ise gazaltı kaynağı için incelenen son parametredir. Burada yüksek tel besleme hızında, kaynak telinin yığıldığı gözlenmiştir. Düşük değerlerde ise yetersiz kaynak metali oluşmuş ve çekme kuvvetine karşı olan değerler düşmüştür.

Diğer yandan lazer kaynağında ise gücün etkisi ilk olarak incelenmiştir. Güç değerinde ki artış ile kaynaklı yapıdaki porozite oluşumu arasında negatif bir ilişki olduğu sonucuna varılabilmektedir. Yani artan güç değeri ile porozite miktarında azalma görülmektedir.

Gücün sabit tutulduğu ancak kaynak hızının arttırıldığı durumlarda ise yüksek kaynak hızında birleşme bölgesinde morfolojik bazı değişikliklerin oluşması kaçınılmazdır. Bu durumda kaynak hızı artışı ile soğuma hızında artış beklenmektedir. Bu durumun sonucu olarak ince taneli bir yapı oluşması beklenmekte ve mukavemet değerlerinde artış gözlenmektedir.

Darbe süresi artışı ile ısıdan etkilen alanda büyüme gözlenmektedir. Darbe süresinin artması ile porozite oranında azalma görülmektedir. Bu durum, artan etkileşim süresi ile ortamda bulunan gazların uzaklaşması için gerekli sürenin artmasını sağlayacaktır. Sonuç olarak porozitenin azalması beklenmektedir.

Makrografik analizlerde ise, gazaltı kaynağı ile yapılan birleştirmelerde kopma yüzeyinde yanmış alanlar gözlenmiştir. Bu durum yüksek ısı girdisi ile açıklanabilmektedir. Doğru parametre ve tecrübeli bir kaynakçı ile iyi bir birleştirme sağlanabilmektedir.

Diğer yandan lazer kaynağı ile birleştirilen numunelere bakacak olursak, kopma yüzeyinden de açıkça görülebileceği gibi nüfuziyet noksanlığı büyük bir problem olarak yer almaktadır. Neredeyse tüm numunelerde bir miktar nüfuziyet eksikliği vardır. Bu durumun sonucu olarak kaynaklı birleştirmenin kesit alanı düşmekte ve mekanik özellikleride azalmaktadır.

Gazaltı kaynağı ile yapılan birleştirmelerin mekanik özellikler açısından lazer kaynağı ile yapılanlara göre daha güçlü olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yük-uzama grafiklerinden kolaylıkla görülebilmektedir.

Sonuç olarak, galvanizli sacların kaynağında gazaltı kaynağının kullanılması, yapıya mekanik özellikler açısından fayda sağlamaktadır. Ancak gazaltı kaynağı ile birleştirme sırasında ısıdan etkilenen bölgenin daha geniş olmasının galvaniz kaplamaya daha fazla zarar verdiğı yadsınamaz bir gerçektir. Bu, gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş numuneler için korozyon direncinin daha kötü olacağı sonucuna götürür. Kaynak bölgesindeki gazların neden olduğu poroziteyi azaltmak için kaynak havuzundaki gazların tahliyesi için yeterli zamanı sağlayacak kaynak parametreleri dikkatli seçilmelidir.

Diğer yandan lazer kaynağı ile yapılan işlemlerde parametrelerin daha doğru bir seviyeye getirilmesi gerekmektedir. Bu sayede lazer kaynağı ile de iyi kalitede birleştirme işlemi yapılabilecektir.

Lazer kaynağı doğası gereğı yüksek ısı girdisini küçük bir alana odaklamaktadır. Dolayısıyla galvaniz kaplamanın buharlaşacağı ve koruyucu tabakanın hasar görebileceğı alanda azalacaktır. Korozyona karşı korunma düzeyinin iyi olması amacıyla galvanizli sacların lazer kaynağı ile birleştirilmesinin büyük fayda sağlayacağı söylenebilir.

Endüstride yaygın bir şekilde kullanılan galvanizli sacların çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi konusunda çalışan kişilerin, lazer kaynağının ve gazaltı kaynağının sağladığı avantaj ve dezavantajları ayrı ayrı düşünerek karar vermeleri tasarladıkları yapının kalitesini belirleyecektir.



KAYNAKLAR

- A. Adeyemi, E. A.** (2018). Microstructural Evolution of Laser Metal Deposited 17- 4 PH SS-Tungsten Composite with Varying Volume Percent Tungsten. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII : Welding Equipment and Technology*, 29, 41-46.
- Aagakhani , M., Mehرداد, E., & Hayati , E.** (2011). Parametric Optimization of GMAW Process by Taguchi Method on Weld Dilution. *International Journal of Modeling and Optimization*, 1(3).
- Acherjee, B., Kuar, A. S., Mitra, S., & Misra , D.** (2012). Modeling and analysis of simultaneous laser transmission welding of polycarbonates using an FEM and. *Optics and Laser Technology*, 44, 995-1006.
- Akio, H., Hirotaka, T., Hirota, Y., Nobutaka, K., & Kojiro, F.** (1999). Quantitative Evaluation of Softened Regions In Weld Heat. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 30, 2115-2120.
- Al-Madani, F., Abdalla, A., Azoumi, M., & Elkoum, S.** (2009). Corrosion of 316 Ti Motor-Pump Casing in Deep Water Wells Due to Welding Defects. *NACE International*.
- Anawa, E., & Olabi, A.** (2008). Optimization of tensile strength of ferritic/austenitic laserwelded Components. *Optics and Lasers in Engineering*, 46, 571-577.
- ANIK, S., & TLBENTI, K.** (2013). *Kaynak Teknolojisi III - Gazaltı Kaynak Teknięi*. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı.
- Barhorst, S., & Cary, H.** (1985). Synergic pulsed GMAW- in perspective. *Welding for challenging enviroments* (s. 11-20). içinde Ontario: Elsevier Ltd.
- Bielenin, M., Schmidt, L., Schricker, K., & Bergmann, J.** (2019). Prevention of solidification cracking by use of a diode laser superposition in pulsed laser bean welding. *High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics and Systems VIII*. San Fransisco.
- Chao, Y.** (2003). Failre mode of spot welds:interfacial versus pullout. *Sci.Technol.Weld.Join*, 133-137.
- F. Liu, C. T.** (2020). A Comparative Study on Microstructure and Mechnaical Properties of HG785D Steel Joint Produced by Hybrid laser-MAG Welding and Laser Welding. *Optics & Laser Technology*, 128.
- F. Zhang, S. L.** (2019). Stability Evaluation of Laser-MAG Hybrid Welding Process. *Optics & Laser Technology*, 116, 284-292.
- Fabbro, R., Coste, F., Goebels, D., & Kielwasser, M.** (2006). Study of CW Nd-Yag laserwelding of Zn-coated steel sheets. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 39(2), 401-409.
- G. Feng, Y. W.** (2021). Comparison of Welding Residual Stress and Deformation Induced by Local Vacuum Elektron Beam Welding and Metal Active Gas Arc Welding in a Stainless Steel Thick-plate Joint. *Journal of Materials Research and Technology*.

- Haragopal, G., Reddy, P., Reddy, G., & Subrahmanyam, J.** (2011). Parameter design for MIG Welding of AL-65032 alloy using Taguchi technique. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 844-850.
- Hiraga, H., Inoue, T., Kamado, S., & Kojima, Y.** (2002). Effects of the shielding gas and laser wavelength in laser welding magnesium alloy sheets. *Weld. Int.*, 16(6), 442-450.
- Holliday, R., Parker, J., & Williams, N.** (1996). Relative contribution of electrode tip growth mechanism in spot welding zinc coated steels. *Welding Int.*, 186-193.
- Kam, D., Lee, T., Kim, D., Kim, J., & Kang, M.** (2021). Weld quality improvement and porosity reduction mechanism of zinc coated steel using tandem gas metal arc welding (GMAW). *Journal of Materials Processing Technology*, 294, 117-127.
- Katayama, S.** (2019). *Very Easy Book of Laser Processing*. The Nikkan Kogyo Shimbun Ltd.
- Katayama, S.** (2020). *Fundamentals and Details of Laser Welding*. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Katayama, S., & Mizutani, M.** (2002). Laser Weld ability of Aluminium Alloys. *Trans JWRI*, 31, 147-155.
- Khan, M., Romoli, L., & Dini, G.** (2013). Laser beam welding of dissimilar ferritic/martensitic stainless steels in a butt joint configuration. *Optics and Laser*, 49, 125-136.
- Ki, H., Mohanty, P., & Mazumder, J.** (2002). Multiple reflection and its influence on keyhole evolution. *Journal of Laser Appl.*, 39-45.
- Kim, J., Oh, S., & Ki, H.** (2015). A study of keyhole geometry in laser welding of zinc coated and uncoated steels using coaxial observation method. *Journal of Material Processing Tech.*, 451-462.
- Kim, J., Oh, S., & Ki, H.** (2015). Study of keyhole geometry in laser welding of zinc-coated and uncoated steels using a coaxial observation method. *J. Mater. Process. Technol.*, 225, 451-462.
- Kim, J., Oh, S., & Ki, H.** (2016). Effect of keyhole geometry and dynamics in zero-gap laser welding of zinc-coated steel sheets. *J. Mater. Process. Technol.*, 232, 131-141.
- Kuo, T., & Jeng, S.** (2005). Porosity reduction in Nd-YAG laser welding of stainless steel and inconel alloy by using a pulsed wave. *Journal of Physics D Applied Physics*, 38, 722-728.
- Martynyuk, M.** (1983). Critical-point parameters of metals. *Zh Fiz Khim*, 810-821.
- Mei, L., Yan, D., Yi, J., Chen, G., & Ge, X.** (2013). Comparative analysis on overlap welding properties of fiber laser and CO₂ laser for body-in-white sheets. *Mater. Design*, 49, 905-912.
- Mercan, E., Ayan, Y., & Kahraman, N.** (2020). Investigation on joint properties of AA5754 and AA6013 dissimilar aluminum alloys welded using automatic GMAW. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(4), 723-731.
- Michal, B., Milos, M., Radoslav, K., & Ivo, H.** (2017). Ultrasonic Testing of Butt Weld Joint by TOFD Technique. *Manufacturing Technology*, 17(6), 842-847.
- Norris, J., Robino, C., Hirschfeld, D., & Perricone, M.** (2011). Effects of laser parameters on porosity formation: investigating millimeter scale continuous wave Nd: YAG laser welds. *Weld J.*, 90, 198-203.

- O'Brien, R.** (1991). *Welding Handbook: Welding Processes*. Miami: American Welding Society.
- Özden, H., & Gürsel, K.** (2004). Gemi İnşaatı ve Deniz Yapılarında Lazer İşin İmalat Yöntemlerinin Uygulanması. *Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu*. İstanbul.
- Prakash, A., & Raju, S.** (2016). Parametric Optimization of MIG Welding on 316L Austenitic Stainless Steel by Grey-based Taguchi Method. *Procedia Technology*, 25, 1038-1048.
- Radigraphic Test Report.** İstanbul: Gedik Eğitim ve Sosyal Yardım Vakfı İktisadi İşletmesi (2021).
- Ramarao, M., King, M., Sivakumar, A., Manikandan, V., Vijayakumar, M., & Subbiah, R.** (2021). Optimizing GMAW parameters to achieve high impact strength of the dissimilar weld joints using Taguchi approach. *Materialstoday: Proceedings*.
- Raveendra, J., & Parmar, R.** (1987). Mathematical models to predict weld bead geometry for flux cored arc welding. *Journal of Metal Construction*, 19.
- Rogalski, G., Swierczynska, A., Landowski, M., & Fydrych, D.** (2020). Mechanical and Microstructural Characterization of TIG Welded Dissimilar Joints between 304L Austenitic Stainless Steel and Incoloy 800HT Nickel Alloy . *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 10(559).
- S. Zhang, Y. W.** (2020). Effects of Heat Source Arrangements on Laser-MAG Hybrid Welding Characteristics and Defect Formation Mechanism of 10CrNi3MoV Steel. *Journal of Manufacturing Process*, 58, 563-573.
- Schmidt, M., Otto, A., & Kageler, C.** (2008). Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets. *CIRP Ann.-Manuf.Techn.*, 213-216.
- Seto, N., Katayama, S., & Matsunawa, A.** (2000). High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior during high power CO2 laser welding: effect of shielding gas on porosity formation. *J. Laser Appl.*, 12, 245-250.
- Seto, N., Katayama, S., & Matsunawa, A.** (2002). Porosity formation mechanism and reduction method in CO2 laser welding of stainless steel. *Weld. Int.*, 16, 451-460.
- Shriniwas, R.** (2013). *Study and Development of a Computer Assistance in Selection of Fatigue Design Recommendations for Welded Joints*. Nashik: K. K. Wagh Institute of Engineering Education & Research .
- Sobolev, N.** (1970). *Laser and Its Future*.
- Statkinov, E., Korostel, V., & Fricke, W.** (2007). UIT Application for Angular Distortion Compensation in Welded T-joints. *Annual Assembly of International Institute of Welding*.
- Tan, W., & Shin, Y.** (2014). Analysis of multi-phase interaction and its effects on keyhole dynamics with a multi-physics numerical model. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 47(34).
- Tzeng, Y.** (2006). Gap-free lap welding of zinc-coated steel using pulsed CO2 laser. *Int.J.of Advanced Manufacturing Technologies*, 641-647.
- Url-1** < <https://www.demirizelektrik.com.tr/tr-gazalti-kaynak-makinasi-550w.html> >, erişim tarihi 28.06.2021.
- Url-2** < <https://galmetsan.com.tr/sicak-daldirma-galvanizleme-islemleri/> >, erişim tarihi 14.05.2021.
- Url-3** < <http://www.genotomasyon.com/icerik/312/robotik-kaynak-sistemleri> >, erişim tarihi 28.06.2021.

- Url-4** < <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.xhtml> >, erişim tarihi 23.05.2021.
- Url-5** < <https://www.kemet-international.com/sg/products/metallography/abrasive-cut-off-machines> >, erişim tarihi 24.05.2021.
- Url-6** < <https://www.lincolnelectric.com/en-gb/support/process-and-theory/Pages/pulsed-mig-detail.aspx> >, erişim tarihi 30.03.2021.
- Url-7** < <http://www.mesanark.com/mig-mag-kayna-makinalari-hakkinda-teknik-bilgi.asp> >, erişim tarihi 29.06.2021.
- Url-8** < <http://www.nikonmikroskop.com/content.php?cid=254> >, erişim tarihi 25.05.2021.
- Url-9** < <https://www.shimadzu.eu/sites/shimadzu.seg/files/100th.c.pdf> >, erişim tarihi 25.05.2021.
- Url-10** < <https://www.stainless-structurals.com/blog/preventing-galvanic-corrosion-on-stainless-steel-profiles/> >, erişim tarihi 26.05.2021.
- Wang, H., Zhang, Y., & Li, S.** (2016). Laser welding of laminated electrical steels. *J. Mater. Process. Technol.*, 230, 99-108.
- Wei, G., Lin, L., Dong, S., Crowther, D., & Thompson, A.** (2017). Comparison of microstructure and mechanical properties of ultra-narrow gap laser and gas-metal-arc welded S960 high strength steel. *Opt. Lasers Eng.*, 91, 1-15.
- Xhang, X., Chen, G., & Zhang, Y.** (2008). Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phases steels. *Materials Design*, 279-283.
- Y. Rosenthal, Y. A.** (2019). On Laser Powder-bed Fusion of Additively Manufactured AlSi10Mg Alloy: Tensile Properties and Structure Karakteriation. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII : Welding Equipment and Technology*, 30, 5-12.
- Zhu, C., Tang, X., He, Y., Lu, F., & Cui, H.** (2016). Characteristics and formation mechanism of sidewall pores in NG-GMAW of 5083 Al-alloy. *J. Mater. Process. Technol.*, 238, 274-283.
- Zong, R., Chen, J., & Wu, C.** (2020). A comparison of double shielded GMAW-P with conventional GMAW-P in the arc, droplet and bead formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 285.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Başar YAVUZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme ve İmalat Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Piri Reis Üniversitesi Öğretim Görevlisi- 2016

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yavuz, B. , Vural, M.** 2021. Comparative Study Regarding the Welding Behavior of Galvanized Steel Using Laser Welding and Gas Metal Arc Welding Processes, *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XII, Welding Equipment and Technology*, (Accepted 28.06.2021)

