
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ALÜMİNYUM 6061 T6 ÖZELLİĞİNDEKİ MALZEMENİN ELEKTRON IŞIN KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Murat ATKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat ATKAYA
19/04/2021

ALÜMİNYUM 6061 T6 ÖZELLİĞİNDEKİ MALZEMENİN ELEKTRON IŞIN KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat ATKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2021

ÖZET

Elektron ışın kaynağı yöntemi birleştirme işleminin 6 mm kalınlığındaki Al6061-T6 malzemeye etkileri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda üç boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli geliştirilmiş ve ANSYS 20 R1 aracılığıyla ile derlenip, çözülmüştür. Hazırlanan model, sayısal ve deneysel olarak elde edilen ısıl etkilenmiş bölgelerin, boyutları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu çalışmada üç farklı işlem parametresi olarak voltaj, akım ve hız parametreleri incelenmiştir. Voltaj parametresinde 54kV'dan başlayarak belirli artışlar ile 60 kV'a kadar voltaj değerleri kullanılarak analiz ile çözümlenmiş ve elektron ışın kaynağı uygulanmıştır. Akım parametresi 40mA'den başlayarak 44mA'e kadar çözümlenmiş ve kaynak işlemi uygulanmıştır. Son olarak ise diğer parametreler sabit tutulup hız parametresi 27 mm/s'den 33 mm/s'ye kadar hem analiz ile çözümlenmiş hem de elektron ışın kaynağı uygulanmıştır. Akımın etkisine bağlı olarak HAD modeline göre 60 kV ve 30 mm/s kaynak hızında 42 mA üzerinde ışın akımı kullanılarak kalınlığın tamamının ergitilebildiğini, deneysel çalışmalarda ise 44 mA'dan fazla ışın akımı kullanılmasını numunenin alt yüzeyinde kusurlara neden olabileceği gösterilmektedir. Bu veriler eşiğinde Taguchi Metodu kullanılarak Minitab 18.0 programı aracılığı ile parametrelerin etkileri incelenmiştir. Bütün bu çalışmalar sonucunda, yüzey kalitesine bağlı olarak, 6 mm kalınlığa sahip Al 6061-T6 malzemesi için elektron ışın kaynağı işleminin belirlenen en uygun parametre setinin 60 kV, 30 mm/s ve 42 mA olduğu belirlenmiştir. Makro yapı analizi sonucunda, ısıdan etkilenen dar bir bölge olduğu görülmüş ve temel malzeme ile ısıdan etkilenen bölge arasında hiçbir belirgin sınır görülememiştir. Bu durum hem analiz hem de test ile 11% oranında hata ile doğrulanmıştır. Ayrıca tüm bu verileri desteklemek ve elektron ışın kaynağı parametre setinin uygunluğunu doğrulamak için mikro sertlik ve çekme testleri de bu çalışmada incelenmiştir.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Al6061, Elektron Işın Kaynağı, Isıl Etkilenmiş Bölge, Kaynaklı Birleşimler
Sayfa Adedi	:	91
Danışman	:	Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

INVESTIGATIONS OF WELDABILITY OF ALUMINUM 6061 T6 CONDITIONS MATERIAL WITH ELECTRON BEAM WELDING PROCESS

(M. Sc. Thesis)

Murat ATKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2021

ABSTRACT

The effects of Electron Beam Welding of Al6061-T6 plate with 6 mm thickness was investigated numerically and experimentally. For the numerical study, 3D Computational Fluid Dynamics (HAD) model has been developed, compiled and solved with ANSYS 20 R1. The model was validated numerically and experimentally by comparing the size of the thermally affected areas. In this study, three different process parameters, voltage, current and speed parameters, were examined. In the voltage parameter, voltage values starting from 54kV with certain increases up to 60 kV have been shown by analysis and electron beam welding has also been applied on tensile specimen. The current parameter has been applied starting from 27mA up to 33mA. Finally, the other parameters were kept constant and the speed parameter was applied from 27 mm/s to 33 mm/s by both analysis and electron beam welding method. Depending on the effect of the electron beam current, the entire thickness can be melted by using a beam current over 30 mA at 60 volts and 30 mm/s welding speed according to the CFD model, and experimental studies show that using a beam current of more than 44 mA may cause defects on the bottom surface of the sample.

At the threshold of these data, the effects of the parameters were investigated by using the Taguchi Method with Minitab 18.0 software. As a result of the studies, the electron beam source suitable parameter for the 6 mm thickness Al 6061-T6 material was determined as 60 volts, 30 mm / s and 42 mA, depending on the surface quality. The macrostructure analysis shows that there is a narrow heat affected zone and that barely clear boundaries can be seen between the base material and the heat affected zone. This situation was confirmed with 11% error both by analysis and test. In addition, micro hardness and tensile test were also examined in this study to verify the most appropriate electron beam source parameters to support all these data.

Science Code : 91438
Key Words : Al6061, Electron Beam Welding, Heat Affected Zone, Welded Joints
Page Number : 91
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başlatılmasında, yürütülmesinde ve tamamlanmasında bana destek olan, yol gösteren, sadece bilgi ve birikimleri ile değil ayrıca insani yönleri ile de gelecekteki yaşantımda bana örnek olan değerli hocam Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Kaynak işlemlerinin yapılmasına, mekanik ve metalürjik testlerin yapılmasın imkân sağlayan Türk Havacılık ve Uzay Sanayi Anonim Şirket'ine ve hem sanayi danışmanım, hem de şefim olan Emre KAYNAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Kaynak sonrası gerekli testlerin yapılması esnasında verdiği destekten dolayı Sedat URAL'a teşekkürü borç bilirim.

Simülasyon modellerinin kurulumu ve fonksiyonların yazılması sırasında yardımlarından dolayı Mohammed ABDELMOULA'ya minnetimi sunarım.

Hayatta her daim yanımda olan, hiçbir zaman vazgeçmeme izin vermeyen dünya iyisi annem Nurhan ATKAYA'ya, babam Zafer ATKAYA'ya ve ablam Yağmur ÇEKİNGEN'e teşekkürü borç bilirim.

Son olarak hayatımın her aşamasında katkısı ve yardımı olan, yüksek lisans çalışmasının yapılması için büyük özveride bulunan eşim Tuğçe ÖZYOL ATKAYA'ya sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI 5

2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması 7

2.1.1. Döküm alüminyum ve alaşımları 7

2.1.2. Dövme alüminyum ve alaşımları 8

2.2. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri 8

2.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynaklanması 10

2.3.1. TIG kaynağı 12

2.3.2. MIG kaynağı 13

2.3.3. Elektrik ark kaynağı 13

2.3.4. Oksi asetilen kaynağı 14

2.3.5. Plazma ark kaynağı 14

2.3.6. Lazer kaynağı 15

2.3.7. Difüzyon kaynağı 16

2.3.8. Sürtünme kaynağı 17

3. ELEKTRON IŞIN KAYNAĞI 19

Sayfa

3.1. Elektron Işın Kaynağı Parametreleri 21
3.1.1. Operasyon mesafesi 21
3.1.2. Odak mesafesi ve konumu 21
3.1.3. Gerilim 23
3.1.4. Işın akımı 23
3.1.5. Lens akımı 23
3.1.6. Osilasyon 23
3.1.7. Işın titreşimi 25
3.1.8. Kaynak hızı 25
3.1.9. Çalışma basıncı 26
3.1.10. Işın yoğunluğunun etkisi 26
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 27
5. ANALİZSEL ÇALIŞMALAR 33
5.1. Model Kurulumu 33
5.1.1. Isı transferi modeli 33
5.1.2. Ergime ve katılaşma 34
5.2. Model Geometrisi ve Hesaplamalı Alan 35
5.3. Nümerik Sonuçlar 37
5.3.1. Model doğrulama ve element yoğunluğu analizi 37
5.3.2. Parametrelere göre hesaplanan değerler 38
5.4. Deney Tasarımı 56
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 61
6.1. Numune Hazırlıma Süreçleri 61
6.1.1. Deney numunelerinin belirlenmesi 61
6.1.2. Numunenin üretilmesi 62
6.2. Elektron Işın Kaynağı Süreci 64

Sayfa

6.2.1. Belirlenen parametrelerin denenmesi 64
6.2.2. Numunenin fikstürlenmesi 66
6.3. Test İşlemleri 68
6.3.1. Radyografi testleri 68
6.3.2. Mikro sertlik testleri 70
6.4. Çekme Testleri 77
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER 81
KAYNAKLAR 85
EKLER 89
ÖZGEÇMİŞ 90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Alüminyum saflık yüzdeleri 5

Çizelge 2.2. Saf alüminyum elementinin malzeme fiziksel özellikleri 5

Çizelge 2.3. Alüminyum malzeme özellikleri 6

Çizelge 2.4. Alüminyum 6061 kimyasal kompozisyonu 9

Çizelge 2.5. Alüminyum 6061 malzemenin ısıl işlem şartlarına göre değişen mekanik özellikleri 9

Çizelge 2.6. Alüminyum 6061-T6 alaşımlı malzemenin mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi 10

Çizelge 2.7. Alüminyum kaynak yöntemleri 12

Çizelge 5.1. Çalışılması belirlenen parametreler 39

Çizelge 5.2. Alüminyum 6061 T6 malzeme özellikleri 53

Çizelge 5.3. Taguchi analizine göre yapılan varyans analiz tablosu 59

Çizelge 6.1. ASTM E8/E8M-16a numune boyutları 62

Çizelge 6.2. Denenen parametreler ve yorumları 66

Çizelge 6.3. Yarım kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerleri .. 75

Çizelge 6.4. Tam kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerleri 76

Çizelge 6.5. Çekme testine tabi tutulan numuneler ve parametreleri 78

Çizelge 6.6. Çekme testi sonuçları 79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kaynaklı parçalardaki ısı bölgeleri 11

Şekil 2.2. TIG kaynağı şematik gösterimi 12

Şekil 2.3. MIG kaynağı şematik gösterimi 13

Şekil 2.4. Plazma ark kaynağı şematik gösterişi 15

Şekil 2.5. Lazer kaynak şematik gösterimi 16

Şekil 2.6. Sürtünme kaynağının işlem sıralamaları 17

Şekil 3.1. Elektron ışın kaynağı makinesinin şematik gösterimi 20

Şekil 3.2. İş parçası içinde elektron ışınının enerji dönüşümü 21

Şekil 3.3. Odak mesafesi ve konumu 22

Şekil 3.4. Farklı odak konumları 22

Şekil 3.5. Osilasyon tipleri - üstten görünüm 24

Şekil 3.6. Osilasyon tipleri - kesitten görünümü 25

Şekil 3.7. Güç yoğunluğu 26

Şekil 4.1. Kaynak merkezine olan uzaklığa göre sertlik değişimi 29

Şekil 5.1. Analizde kullanılan model 36

Şekil 5.2. Analizde kullanılan hesaplamalı alan 36

Şekil 5.3. Analizde kullanılan elementlerin özellikleri 37

Şekil 5.4. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması 38

Şekil 5.5. Parametre – 1: 54 kV - 40 mA - 27 mm/s 40

Şekil 5.6. Parametre – 2: 54kV – 40 mA – 30 mm/s 40

Şekil 5.7. Parametre – 3: 54kV – 40 mA – 33 mm/s 41

Şekil 5.8. Parametre – 4: 54kV – 42 mA – 27 mm/s 41

Şekil 5.9. Parametre – 5: 54kV – 42 mA – 30 mm/s 42

Şekil 5.10. Parametre – 6: 54kV – 42 mA – 33 mm/s 42

Şekil 5.11. Parametre – 7: 54kV – 44 mA – 27 mm/s 43

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.12. Parametre – 8: 54kV – 44 mA – 30 mm/s 43

Şekil 5.13. Parametre – 9: 54kV – 44 mA – 33 mm/s 44

Şekil 5.14. Parametre – 10: 57kV – 40 mA – 27 mm/s 44

Şekil 5.15. Parametre – 11: 57kV – 40 mA – 30 mm/s 45

Şekil 5.16. Parametre – 12: 57kV – 40 mA – 33 mm/s 45

Şekil 5.17. Parametre – 13: 57kV – 42 mA – 27 mm/s 46

Şekil 5.18. Parametre – 14: 57kV – 42 mA – 30 mm/s 46

Şekil 5.19. Parametre – 15: 57kV – 42 mA – 33 mm/s 47

Şekil 5.20. Parametre – 16: 57kV – 44 mA – 27 mm/s 47

Şekil 5.21. Parametre – 17: 57kV – 44 mA – 30 mm/s 48

Şekil 5.22. Parametre – 18: 57kV – 44 mA – 33 mm/s 48

Şekil 5.23. Parametre – 19: 60kV – 40 mA – 27 mm/s 49

Şekil 5.24. Parametre – 20: 60kV – 40 mA – 30 mm/s 49

Şekil 5.25. Parametre – 21 60kV – 40 mA – 33 mm/s 50

Şekil 5.26. Parametre – 22 60kV – 42 mA – 27 mm/s 50

Şekil 5.27. Parametre – 23 60kV – 42 mA – 30 mm/s 51

Şekil 5.28. Parametre – 24 60kV – 42 mA – 33 mm/s 51

Şekil 5.29. Parametre – 25 60kV – 44 mA – 27 mm/s 52

Şekil 5.30. Parametre – 26 60kV – 44 mA – 30 mm/s 52

Şekil 5.31. Parametre – 27 60kV – 44 mA – 33 mm/s 53

Şekil 5.32. Ortalama değerlere göre parametre etkileşim grafiği 56

Şekil 5.33. Standart sapma değerlerine göre parametre etkileşim grafiği 57

Şekil 5.34. Ortalama değerle göre etki grafiği 57

Şekil 5.35. Standart sapma değerlerine göre etki grafiği 58

Şekil 5.36. Ortalama değerle göre etki grafiği 58

Şekil 5.37. Ortalama değerle göre etki grafiği 59

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.1. ASTM E8/E8M – 16a düz tip numune boyutlandırma..... 61

Şekil 6.2. Numune üretim süreci..... 62

Şekil 6.3. Ekstra numunelerdeki kaynak yönleri 71

Şekil 6.4. Ekstra örneklerin kesim eksenleri..... 71

Şekil 6.5. Yarım kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerleri grafiği 75

Şekil 6.6. Tam kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerleri grafiği 77

Şekil 6.7. En iyi parametre çekme sonuçları..... 79

Şekil 7.1. Kaynak parametrelerinden akımın ergime üzerindeki etkisi 82

Şekil 7.2. Kaynaklı parçaların üstten ve alttan görünüşü..... 82

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Fazla enerji kullanımında çentik etkisi yaratılmasına örnek 54

Resim 5.2. Fazla enerji kullanımında düzlemselliğin kaybolmasına örnek..... 54

Resim 5.3. Örnek anahtar deliği şeklindeki kaynak görseli..... 55

Resim 6.1. Alkalin banyosu makinesi..... 63

Resim 6.2. Alkalin banyo sonrası 63

Resim 6.3. Freze işlemi sonrası numunelerin görünüşü 64

Resim 6.4. Levha denemeleri önden görünüş..... 65

Resim 6.5. Levha denemeleri arkadan görünüş..... 65

Resim 6.6. Kullanılan mengene ve numunenin mengenedeki görünüşü..... 67

Resim 6.7. Kullanılan mengenenin uzaktan görünüşü..... 67

Resim 6.8. Radyografi parametreleri 68

Resim 6.9. Baskı yüzeyi üzerindeki numuneler..... 68

Resim 6.10. Radyografi baskı makinesi 69

Resim 6.11. Numunelerin toplu resmi – 1 69

Resim 6.12. Numunelerin toplu resmi – 2 70

Resim 6.13. En iyi parametrelerin tek çekildiği radyografi sonucu 70

Resim 6.14. Numunelerin kesim işlemi sırasındaki görünümü 72

Resim 6.15. Numunelerin kesim işlemi sonrasındaki görünümü 72

Resim 6.16. Bakalite konulan örnekler..... 73

Resim 6.17. Keller's Etching Solution..... 73

Resim 6.18. Sertlik cihazı ölçüm kalibrasyonu ve sonucu 74

Resim 6.19. Yarım yapılan kaynağın mikroskop altındaki görünüşü..... 74

Resim 6.20. Tam yapılan kaynağın mikroskop altındaki görünüşü..... 76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
°	Derece
cm	Santim
Hz	Hertz
kN	Kilo Newton
mA	Mili Amper
mm	Mili metre
MPa	Mega Pascal
mV	Mili Volt
N	Newton
s	Saniye

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ANSI	American National Standarts Institute
BM	Base Material (Ana Malzeme)
CFD	Computational Fluid Dynamic
EBW	Electron Beam Welding (Elektron Işın Kaynağı)
FZ	Fusion Zone (Füzyon Bölgesi)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HAZ	Heat Affected Zone (Isıl Etkilenmiş Bölge)
MIG	Metal Inert Gas (Metal Asal Gaz)

1. GİRİŞ

Üretim teknolojileri ve malzeme bilimi her geçen gün gelişim göstermektedir. Bu gelişime neden olan ise kendini geliştirmekte olan sanayinin ihtiyaçlarıdır. Bu gelişmelerin sağlanmasında hem sanayi hem de akademik çalışmalar öncülük etmektedir. İlerleyen teknoloji ile beraber hava araçlarından biri olan helikopterlerin ağırlığını azaltmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Helikopterlerin kuyruk şaftlarının malzemesi olan alüminyumlu alaşımlı parçaların herhangi bir bağlayıcı kullanmadan kaynaklanabilmesi öncelikli hedef haline gelmiştir. Sadece kuyruk şaftlarında değil, tek parça üretilmesi zor veya imkânsız olan parçaların ayrı olarak üretilip daha sonra kaynaklanması oldukça önem arz etmektedir.

Kaynak işlemi sırasında özellikle kaynak uygulanan malzeme, büyük sıcaklık farklarından oluşan ısıl gerilmelere, fazla miktarda karbon geçişine, metalürjik düzensizliklere ve atmosferin zararlı etkilerine maruz kalmaktadır. Bu sorunlar, kaynaklı yapının çalışma şartlarında, özellikle değişken yükler karşısında, beklenmedik hasarlar oluşturmaktadır [1, 2]. Alüminyum malzemelerde oksitlenmelere olan yatkınlık; hidrojenin ergimiş alüminyumdaki çözünürlüğü ve diğer metallerle bağ kurmaktan kaynaklanan süreksizliklerce artış gösterir [3].

Füzyon kaynağı alüminyum ve alaşımlarının kaynağında en çok kullanılan yöntem olmasına rağmen yöntemin gaz boşlukları, oksitlenmeler, katılaşmadan kaynaklı çatlaklar ve ısıl etkilenmiş bölgede oluşan mukavemet kayıpları gibi birçok eksisi vardır [4].

Anlaşılacağı üzere alüminyum malzemenin kaynaklanmasında birçok kaygı unsuru bulunmaktadır. Kaynak bölgesinde oluşan bu unsurları engellemek için yüksek enerji yoğunluğuna sahip ışın kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Bu bağlamda havacılık sektöründe oldukça fazla kullanılan elektron ışın kaynağının geliştirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Günümüzde alüminyum ve alaşımlarının kaynaklanması konusunda yapılan hem akademik hem de sanayi alanındaki çalışmaların birçoğunda elektron ışın kaynağı kullanılmaktadır.

Elektron ışın kaynağı yönteminde kullanılan bütün parametreler direkt olarak elektriksel değerler olduğu için, kaynak işlemi insandan bağımsız olarak yapılır. Kaynak bölgesine uygulanan enerji fazla miktarda olmasına rağmen çok küçük bir bölgeye odaklı olduğundan

ısıl gerilmeler ve kaynak işleminden kaynaklanan çarpılmalar düşük seviyelerdedir. Elektron ışın kaynağı vakum altında yapıldığından, kaynak bölgesi atmosferde bulunan oksijen ile temas ederek oluşan oksitlenmeden ve hidrojen ile bağ oluşturup hidrojen kırılganlığından korunmuş olur. Elektron ışın kaynağı yönteminde herhangi bir ilave malzeme gereği yoktur.

Elektron ışın kaynağı yöntemi 1900'lü yılların ortasında geliştirilmeye başlamasına rağmen 2000'li yıllarda birçok sanayi dalında kullanılmaya başlanılmıştır. Özellikle otomotiv, imalat, havacılık ve uzay sanayileri gibi farklı alanlarda farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır. Kaynak işlemleri ile ilgili uygulamalar ve akademik çalışmalar halen eksik olup bu çalışmalar uygun parametrelerin belirlenmesinde oldukça önem arz etmektedir [3,5,6].

Bu çalışmada geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmesi zor olan ve havacılıkta sıkça kullanılan alüminyum 6061 alaşımının, yenilikçi ve alternatif bir yöntem olan elektron ışın kaynağı yöntemi ile kaynaklanması incelenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde, akım (mA), voltaj (kV) ve hız (mm/s) değişken parametre olarak kullanılmıştır. Kaynak işlemi için sonlu elemanlar yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği için kullanılan Ansys - Fluent yazılımı içinde kullanıcı tanımlı fonksiyon yazılarak ön sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen en uygun parametre setleri ile kaynaklı malzemelerin radyografik olarak kontrolleri yapılmıştır. Mikro sertlik testleri ve çekme testleri icra edilmiştir. Deneysel çalışmalar ile elde edilen veri ve sonuçlar, daha önce incelenen kaynaklar ışığında değerlendirilerek yorumlanmıştır. Çalışmanın bu konuyla ilgili ileride yapılacak diğer araştırmalara yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

Tez yedi kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım giriş bölümü olup, bu bölümde problem, problem için yapılan hazırlıklar ve çalışmalar başlıklar halinde tanıtılmaktadır. İkinci kısımda, alüminyum ve alaşımları hakkında kısaca bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, alüminyum ve alaşımlarının kaynaklanmasından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümün devamında ise bu yöntemler arasındaki en uygun yöntem olan elektron ışın kaynağının temel prensipleri, avantajları ve diğer kaynak yöntemlerine göre üstünlüklerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, tez konusu ile ilgili yapılan literatür çalışmalarından kısaca bahsedilmiştir. Beşinci bölümde ise malzemenin Ansys– Fluent yazılımı ile hesaplamalı akışkanlar yöntemi ile ön analiz çalışmalarından bahsedilmiştir. Ayrıca belirlenen parametre setlerinin hem Taguchi metodu ile hem de varyans analizi ile etkileri kontrol edilmiştir. Altıncı bölümde, parçanın

numune üretiminden başlayarak hangi aşamalardan geçtiği ve deneysel çalışmalardan bahsedilmektedir. Altıncı kısımın devamında ise kullanılan bilimsel yöntem ve uygulama metotları anlatılmıştır. Yedinci kısımda elde edilen sonuçlar verilmiş ve bu sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Yedinci kısımın devamında genel olarak sonuçlar verilmiş ve önerilerde bulunulmuştur. Son kısımda ise tezde yararlanılan kaynaklar verilmiştir. Tez, ekler ve özgeçmiş verilerek tamamlanmıştır.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum 1800'lü yılların başlarında Sir Humphrey Davy tarafından bulunmuştur. Alüminyum element yapısı gereği doğada bileşik olarak bulunur [4]. Bu bileşiklerden en önemlisi ve en verimlisi boksittir. Standart olarak, yüksek verimli bir boksit bileşimi %45'den daha çok alümina, %12'den daha az demir oksit ve %8'den ise daha az silisyum içerir [7].

ANSI standartlarına göre alüminyum elementinin saflık yüzdeleri Çizelge 2.1'de görülebilir [7].

Çizelge 2.1. Alüminyum saflık yüzdeleri

Alüminyum, %	Saflık Yüzdesi
99,5000 – 99,7900	Ticari Saflık
99,8000 – 99,9490	Yüksek Saflık
99,9500 – 99,9959	Süper Saflık
99,6000 – 99,9990	Ekstrem Saflık
> 99,9990	Ultra Saflık

Saf alüminyum elementinin malzeme fiziksel özelliklerine ise Çizelge 2.2'den ulaşılabilir [7].

Çizelge 2.2. Saf alüminyum elementinin malzeme fiziksel özellikleri

		Saflık, %				
Özellik	Birim	99,999	99,990	99,800	99,500	99,000
Ergime Sıcaklığı	°C	-	660,2	-	-	657
Kaynama Sıcaklığı	°C	-	2480	-	-	-
Gizli ergime ısısı	cal/g	-	94,6	-	-	93,0
Spesifik ısı	cal/g	-	0,2226	-	-	0,2297
Yoğunluk	g/cm^3 (20°C)	2,7	2,7	2,71	2,71	-
Elektriksel Direnç	μΩ-cm, (20°C)	2,63	2,68	2,74	2,8	2,87
Direncin sıcaklık katsayısı	-	-	0,0042	0,0042	0,0041	0,0040
Termal genleşme katsayısı	x10^6, (20-100°C)	-	23,86	23,5	23,5	23,5
Isıl İletkenlik	-	-	0,57	0,56	0,55	0,54
Elastisite Modülü	N/mm^2	-	68258	-	-	68948

Alüminyum ve alüminyum içeren alaşımlar, demir elementi içeren alaşımlardan sonra en çok kullanılan endüstriyel malzemelerdendir. Alüminyumun bu kadar sık ve geniş alanda kullanılmasının birçok nedeni vardır. Bu nedenlerden bahsetmek gerekirse malzeme olarak alüminyumun;

- Yoğunluğu düşüktür, bu nedenle hafiftir. (Alüminyum özgül ağırlığı: 2.7 g/cm3)
- Elektrik etkenliği oldukça yüksektir, elektrik iletkenliği bakırdan azdır ancak spesifik elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliği göz önüne alındığında bakırdan hem daha üstündür hem de daha ucuzdur.
- Isıl işlem kabiliyeti yüksektir. En sık kullanılan ısıl işlem ise yaşlandırma sertleştirmesidir.
- İşlenebilirliği yüksektir.
- Tokluğu (mukavemet / yoğunluğu) yüksektir.

Bütün bu özelliklere ek olarak ilerleyen bölümlerde de kullanılmak üzere alüminyum malzemenin bazı mekanik özellikleri Çizelge 2.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Alüminyum malzeme özellikleri

Elastiklik modülü (kN/mm^2)	Çekme mukavemeti (N/mm^2)	Akma Dayanımı (N/mm^2)	Kopma uzaması (%)	Kopma büzülmesi (%)	Sertlik (HB)
65-70	70-140	20-30	30-50	80-95	5-15

Aşındırıcı ortamlarda alüminyumun yüzeyi oksit tabakası ile kaplanarak, alüminyumun korozyona dayanıklılığı sağlanır. Bu özelliğinden dolayı alüminyum pek çok zorlu koşullarda kullanılabilir. Aşağıda alüminyum ve alüminyum alaşımlarının sanayinin her bölümünde geniş bir kullanım imkanı yaratan bazı spesifik özellikleri bulunmaktadır [8].

- Hafiflik: Çok az sayıda malzeme alüminyumdan daha az öz kütleye sahiptir ve bu malzemeler sanayi ortamında daha seyrek kullanılan malzemelerdir. Çeliğin öz kütlesi alüminyum öz kütlesine göre neredeyse üç kat daha fazladır. Titanyum malzeme ise alüminyuma kıyasla %60 daha fazla öz kütleye sahiptir
- Şekillenebilirlik: Alüminyum malzeme neredeyse bilinen bütün yöntemler ile üretilebilir veya şekillendirilebilir.

- Mekanik çeşitlilik: Alüminyum üretim yöntemine göre çok fazla sayıda mekanik özelliğe sahip olabilmektedir. Üretim yöntemine bağlı olarak, çekme mukavemet değeri yaklaşık 700 MPa'a kadar uzanan geniş bir dayanım aralığı vardır.
- İyi dayanım/ağırlık oranı: Düşük öz kütle ve yüksek dayanım özelliklerinden dolayı bazı alüminyum çeşitleri, sadece yüksek alaşımlı ve gücü mekanik yöntemler ile arttırılmış çelikler ve titanyum malzemeler ile elde edilebilecek kadar iyi mukavemet/ağırlık oranına sahiptir.
- Düşük sıcaklıklarda avantajlı mekanik özellikler: Alüminyum çok düşük sıcaklıklarda kırılgan bir yapı göstermez. Tersine çoğu alüminyum alaşımının malzeme mekanik özellikleri sıcaklık düştükçe daha iyiye gider.
- Yüksek aşınma dayanımı: Alüminyum atmosfer koşullarına bağlı olarak korozyona uğrayıp çürümez. Ayrıca alüminyum kimyasal etmenlere karşı oldukça dirençlidir.
- Isıl ve elektriksel iletkenlik: Alüminyum ve alaşımları elektriği oldukça iyi iletir. Ayrıca diğer malzemelerden daha iyi ısıl iletkenlik sağlar. Isıl iletkenlik bazında, yalnızca gümüş, altın ve bakır alüminyumdan daha iyi ısıl iletken malzemelerdir.

2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları üretim yöntemlerine bağlı olarak dövme ve döküm alaşımları diye iki ana gruba ayrılır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup, kolayca şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısıl işlem uygulanabilmektedir. Alüminyumda en çok uygulanan ısıl işlem uygulaması ise yaşlanma sertleştirilmesidir. Isıl işlem uygulanamayan alaşımlara ise katı eriyik, deformasyon ve dağılım sertleşmesi yöntemleri uygulanarak mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir [9].

2.1.1. Döküm alüminyum ve alaşımları

Daha önce de değinildiği üzere alüminyum üretim yöntemine göre dövme ve döküm alaşımları olarak iki genel gruba ayrılır. Bu gruplar kendi aralarında, alaşımın kimyasal düzenine göre alt sınıflara ayrılır. Daha sonra ise alüminyum ve alaşımları ısıl işlem

kondisyonlarına göre sınıflandırılır [4]. Bu gruplandırmaları Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan "Alüminyum Üreticiler Birliği" standardize etmiştir. Bu standardizasyon American National Standards Institute (ANSI) tarafından yapılmıştır yapılan H35.1 numaralı standardın kapsamındadır [10].

2.1.2. Dövme alüminyum ve alaşımları

Bir önceki bölümde de bahsedilen The Aluminum Association (AA), tarafından oluşturulan sisteme uygun olarak yine daha önce bahsedilen ANSI tarafından yazılmış H35.1 sayılı standart içerisinde dövme alüminyum alaşımları da adlandırılmıştır [10]. Yine dövme alüminyum alaşımları da dökme alüminyum alaşımlarında ki gibi dört haneli rakamlar ile gösterilir.

2.2. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri

Alüminyumun ve alüminyum alaşımlarının ısıl işlem kondisyonları da yine harf ve rakamlar içeren bir sistem ile sınıflandırılmaktadır. Bu gruplandırma ingot döküm malzemeler dışında dövme ve döküm alüminyum ve alüminyum alaşımlarının tamamı için kullanılır. Bu gruplandırmayı gösteren harf ve rakamlar, alaşım grup gösteriminden sonra gelir. Bu gösterimler birbirilerinden tire ile ayrılır. İlk ısıl işlem durumu tek harfle gösterilir ve gerekli olduğu durumlarda diğer ısıl işlem şartları devam eden rakamlarla gösterilir. Temel temper şartlarından pekleştirme (H) türlerini ve en sonda ise ana ısıl işlem koşullarının (T) türlerini ifade etmektedir [10].

Bu grupta en uygun ısıl işlem yapılabilen ve sıklıkla kullanılan alaşım Alüminyum 6061'dir. Bu malzemenin şekil alabilme yeteneği, kaynaklanabilirliği, üzerinden talaş kaldırma yeteneği ve aşınma direnci diğer ısıl işlem uygulanan böylelikle yaşlandırılan alaşımlardan daha iyidir. Bu malzemeler kararlı yapıda olmaları ve çözünme ısıl işleminde çok iyi şekil alabilmeleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Şekil alabilme, ısıl işlemde su verme işleminden sonra malzeme üzerinde devam ettirilebilir ve gerekli olan dayanım değerleri, malzemeye sonrasında 160-180 ºC'de çökelme ısıl işlemi uygulanması ile elde edilir [11]. Daha iyi mekanik özelliklerinden dolayı uçak ve uzay yapılarında ve donanımlarında, kara araçlarında, demiryolu vasıtalarında vb. sanayi sektörünün farklı kısımlarında kullanılan bu

malzemeler, ayrıca ısıl işlemle farklı sertlikler elde edilen alaşımlar arasında şekillendirmeye en elverişli alaşımlardır [12].

Tez çalışmasında kullanılan alüminyum 6061 T6 malzemesinin kompozisyonuna, mekanik ve malzeme özellikleri Çizelge 2.4'de sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Alüminyum 6061 kimyasal kompozisyonu

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Alüminyum 6061	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	Kalan

Bu tezde kullanılan alüminyum malzemenin ısıl işlem şartlarına göre değişen mekanik özellikleri Çizelge 2.5'de belirtilmiştir [13].

Çizelge 2.5. Alüminyum 6061 malzemenin ısıl işlem şartlarına göre değişen mekanik özellikleri

Isıl İşlem Türü	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama Oranı, %		Brinell Sertliği	Kesme Dayanımı
	MPa	MPa	Kalınlık: 1,6 mm	Kalınlık: 1,3 mm	500 kg, 10 mm, 30 s	MPa
O	124	55	25	30	30	83
T4, T451	241	145	22	25	65	165
T6, T651	310	276	12	17	95	207

Bu tezde kullanılan alüminyum malzemenin sıcaklık şartlarına göre değişen mekanik özellikleri Çizelge 2.6'da belirtilmiştir [13].

Çizelge 2.6. Alüminyum 6061-T6 alaşımlı malzemenin mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Sıcaklık (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Sınırı (MPa)	Uzama %
-196	414	324	22
-80	338	290	18
-28	324	283	17
24	310	276	17
100	290	262	18
149	234	214	20
204	131	103	28
260	51	34	60
316	32	19	85
371	24	12	95

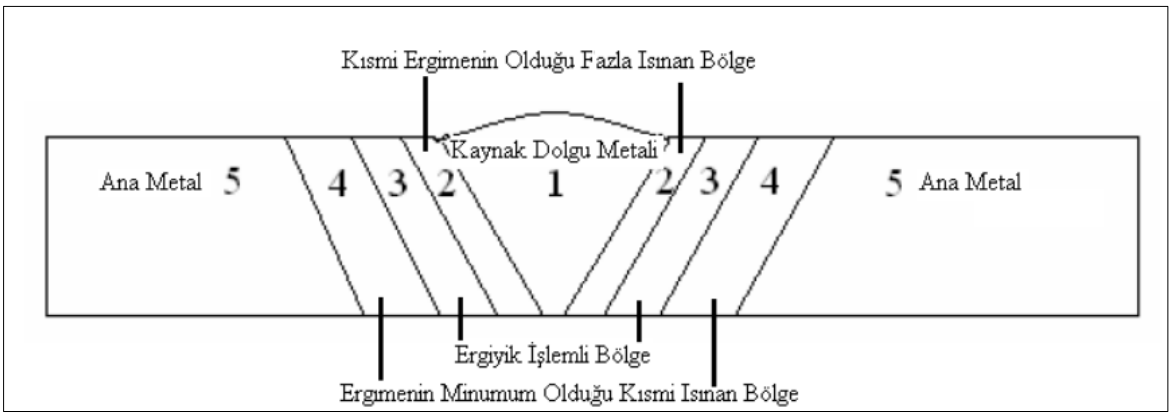
Bu çalışmada bahsedilen mekanik özellikler arasında ön plana çıkan alüminyum alaşımı olan AA - 6061 T6 alaşımı kullanılmıştır.

2.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynaklanması

Dövme alüminyum malzemelerinden ısıl işlem uygulanmayan 1, 3 ve 5 serileri, gaz altında uygulanan kaynak işlemleri ile en kolay kaynaklanabilen grupta yer almaktadırlar. Isıl işlem uygulanabilen 2 ve 4 serisi alaşımlar ise özel kaynak teknikleri ile kaynatılabilirler. Yüksek dayanımlı ısıl işlem yapılabilen 7000 serisi alüminyum malzemelerin 7075 ve 7178 serilerindeki kaynak işlemi oldukça sorunlu olmaktadır. Bu alaşımlarda, ısının tesiri altındaki bölgedeki (ITAB) sertlik, kaynatılan ana metale göre daha yüksek olabilmektedir. Ayrıca kaynaklandıklarında, yüksek sıcaklıklardan ötürü çatlama meydana gelme olasılığı oldukça yüksektir.

Kaynaklı alüminyum malzemelerinde sertleştirme işlemi olarak da kabul edilen yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının kaynaklanabilirlik yeteneğinin azalmasının temel nedeni, ana metalin dışında Şekil 2.1'den de görülebileceği üzere yapısal farklılıklar gösteren 4 farklı ana bölgenin olması olarak söylenebilir. Bölgesel yapı farklılıkların etkilerini elimine etmek oldukça zordur. Kaynak işlemi sırasında ana malzemeye olan ısı girdisi, dövme işlemi ile oluşan sertleşmenin etkilerini ve uygulanan ısıl işlem özelliklerini kısmen ya da tamamen yok eder. Bu gibi durumlarda ısı tesiri altındaki bölgelerin ve onlara komşu olan bölgelerin, yapısındaki değişiklikler nedeni ile akma dayanımları düşer.

Özellikle 6000 ve 7000 serilerine kaynak prosesi uygulandığında, 1. ve 3. bölgelerde ısı farklarından ötürü çatlama olma olasılığı oldukça yüksektir [14,15].



Şekil 2.1. Kaynaklı parçalardaki ısı bölgeleri

Bu bölgeleri açıklamak gerekirse;

1. Kaynak ek dolgu malzemesi
2. Fazla ısınmış bölge (kısmî ergime)
3. Ergiyik bölge
4. Malzemede kaynaklamış bölgenin yanı sıra sıcaklıkların 200-300°C'ye vardığı ısıl etkilenmiş bölge, bu bölgede malzeme kısmi olarak ergiyebilir. Bu nedenle büyük ölçüde malzemede çökelmeler yani fazla yaşlanmalar meydana gelir. Bu sebeple ise bu bölgelerde yumuşamalar meydana gelebilir.
5. Alüminyum ve alaşımlarının kaynaklarında sıcaklığın 180°C'yi geçmediği ve kaynak işleminin etkisiz olduğu bölge.

Alüminyum ve alaşımlarının kaynaklanmasında kullanılan kaynak yöntemleri pratikliklerine göre Çizelge 2.7'deki gibi sıralanmıştır [14].

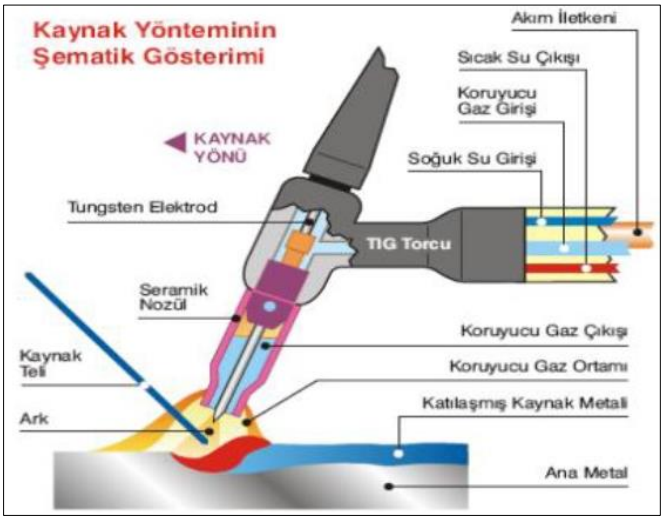
Çizelge 2.7. Alüminyum kaynak yöntemleri

Kaynak Yöntemi	Minimum Kalınlık (mm)	Maksimum Kalınlık (mm)
MIG	1,6	25
TIG	0,5	25
Oksi – Asetilen	0,8	25
Örtülü Elektrot	3,0	25
Direnç Nokta	Folyo	4,75
Direnç Dikiş	0,25	4,75
Basınç Alım	0,4	20
Basınç Bindirme	Folyo	6
Ultrasonik	Folyo	3
Elektron Işın	0,6	160
Sert Lehimleme	0,15	2

Alüminyum ve alaşımlarında yaygın kullanılan kaynak işlemleri aşağıdaki gibidir:

2.3.1. TIG kaynağı

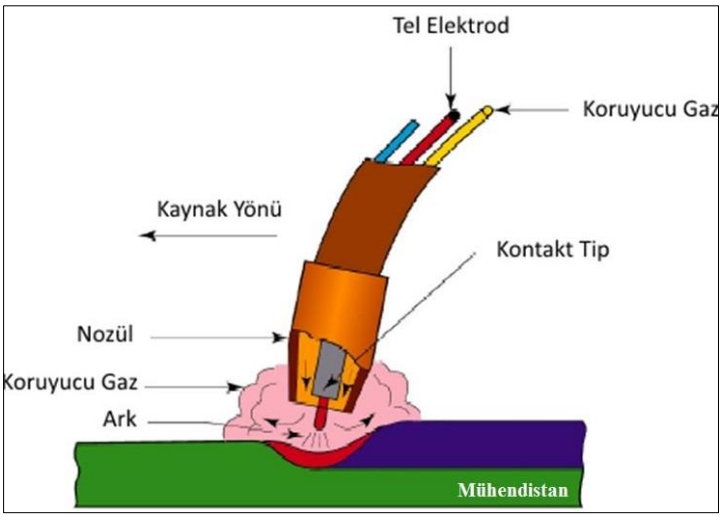
Günümüzde TIG kaynak yöntemi, alüminyum ve alaşımlarının kaynaklanmasında oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle 1xxx, 4xxx ve 5xxx serisi alüminyum alaşımlarında özellikle TIG kaynağı kullanılmaktadır. TIG kaynak yöntemi; ergitme esaslı olup buna karşın dolgu oranı düşük bir kaynak yöntemidir. Ancak ısı girdisi bölgesel olduğundan ısıl iletkenliği yüksek olan alüminyum ve alaşımlarının kaynağı sırasında çarpılmaları en aza indirdiği için tercih edilen bir gaz altı kaynak yöntemidir [16]. Şematik olarak gösterimi Şekil 2.2'de gösterilmektedir [17].



Şekil 2.2. TIG kaynağı şematik gösterimi

2.3.2. MIG kaynağı

Koruyucu gaz ile beraber uygulanan kaynak yöntemlerinden biri de MIG kaynağıdır. Alüminyum 5000 serisi alaşımlarının ergime kaynağının pek çoğu MIG kaynağı ile yapılır. Özellikle Al 5183 ve Al 5356 alaşımlarında MIG kaynağı oldukça fazla kullanılır. MIG kaynağı yöntemi ile ısı etkisine maruz kalan bölge ark kaynağı ve oksi asetilen gibi kaynak yöntemlerinkinden daha kısıtlı bir alana nüfuz etmektedir. Ayrıca kaynak hızı da daha yüksektir [11]. MIG kaynağında kaynak makinesinin ucundan yarı otomatik ya da tam otomatik bir şekilde devamlı olarak ilerleyen ilave metal (ergiyen elektrot) ile kaynak yapılmaktadır. MIG kaynağında ark, helyum ve argon gibi soy gaz atmosferi altında yapılmaktadır. Kullanılan koruyucu gazlar soy gaz oldukları için tepkime oluşturmazlar. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında, en iyi birleştirme kalitesi MIG kaynak yönteminde elde edilir. Şekil 2.3'de MIG (Metal Inert Gaz) kaynak yönteminin şematik görüntüsü sunulmaktadır [18].



Şekil 2.3. MIG kaynağı şematik gösterimi

2.3.3. Elektrik ark kaynağı

Özellikle 4xxx serisi alüminyum malzemelerde, elektrotla elektrik ark kaynağı diğer kaynak yöntemlerine göre birçok avantaj sağladığı için oldukça yaygın bir kullanım alanı vardır. Bu yöntemde, kaynak işlemi için uygun şartlardaki elektrik akımı, bu iş için yapılan kaynak makinesi tarafından sağlanır [19].

2.3.4. Oksi asetilen kaynağı

Genellikle kalın parçalarda uygulanan bu kaynak türü dökümle üretilen alüminyum alaşımlarında birçok avantaj ve dezavantajlar barındırır. Oksi-asetilen gaz ergitme kaynağının avantajları şöyle sayılabilir [14];

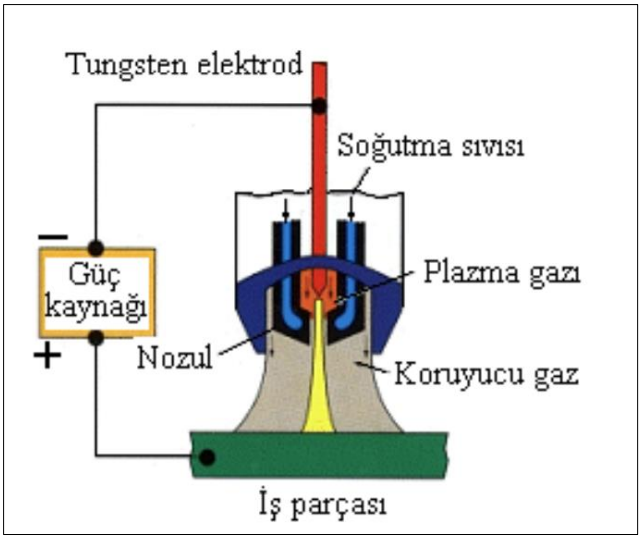
- Ucuz, basit ve kolay taşınabilir teçhizatlı olmaları,
- Özellikle kalın sacların çok pasolu kaynağında kullanılması,
- Dikişlerin sıcak olarak çekiçlenebilmesi olanağı ki, böylece mükemmel düz ve kolay temizlenebilir yüzeyler elde edilmesidir.

Dezavantajları ise [14];

- Cürufların temizlenmesi gibi pahalı kaynak sonrası işlemler gerektirmesi,
- Dikişin her iki yanında ITAB'da, ıslah edilmiş veya sertleştirilmiş alüminyum ve alaşımlarında iş parçası düzeyinde zayıf mukavemetli bölgeler oluşturmasıdır.

2.3.5. Plazma ark kaynağı

Plazma ark kaynağı tıpkı TIG kaynağı gibi özellikle 1xxx, 4xxx ve 5xxx serisi alüminyum alaşımlarının kaynaklanmasında kullanılmaktadır. Plazma ark kaynağı, çok yüksek bir sıcaklığa ısıtılarak iyonize olmuş ve elektrik iletkenliği kazanmış bir gaz olan plazma gazı sayesinde elektrik arkının tungsten elektrotun ucundan parçaya transfer edildiği ve böylece arkın oluşturulduğu bir koruyucu ark yöntemidir. Arkı oluşturan plazma ısısı malzemeyi ergitmektedir. Plazma kaynak mekanizması, tungsten elektrot ve iş parçası arasında oluşturulan ark şeklinde bakıldığında, TIG kaynak mekanizmasına benzemektedir. Ancak elektrotun torçtaki konumu, kaynağın mekanizması ve arkın iletim şekli ile tamamen farklılık göstermektedir [20]. Plazma arkının şematik olarak görünüşü Şekil 2.4'de görülmektedir [21].



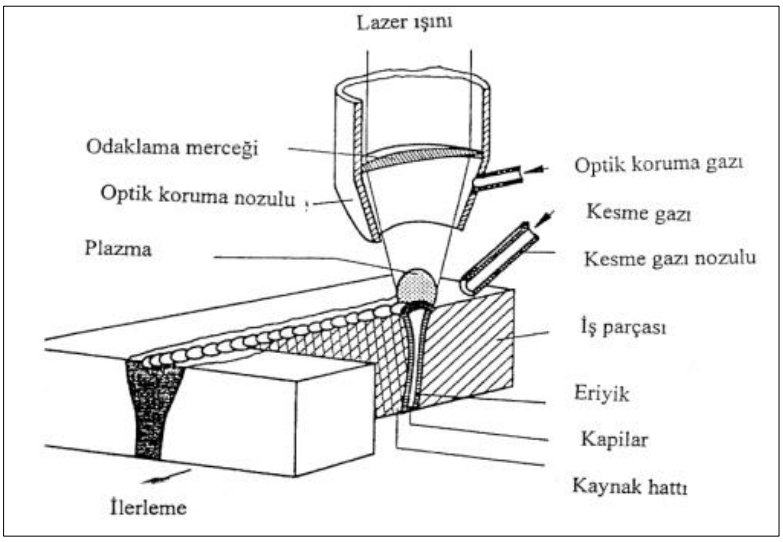
Şekil 2.4. Plazma ark kaynağı şematik gösterişi

2.3.6. Lazer kaynağı

Lazer kelimesinin İngilizce anlamı "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Uyarılmış Radyasyon Emisyonu ile Işık Amplifikasyonu) kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Lazer kaynağı, lazer ışınının mikron seviyesinde iyi odaklanabilmesi ile tungsten gibi yüksek sıcaklıklarda (3400°C) ergiyen metalleri oldukça kolay bir şekilde ergitebilmektedir. Lazer ışının oldukça dar bir alana etki etmesi, dar bir ısıl etkilenmiş bölge oluşmasına neden olur. Alüminyum ve alaşımlarından genellikle 2000,6000 ve 7000 serilerinin kaynaklanmasında lazer kaynağı kullanılmaktadır. Uygulamada alüminyum ve alaşımlarının yüksek ısı iletme özelliğinden ötürü alüminyum alaşımlarının kaynağında oldukça geniş bir yer kaplamaktadır. Ancak alüminyumun iyi yansıtma özelliğinden kaynaklı lazer ışınlarının enerjisinin kullanımını oldukça sınırladığından, alüminyum ve alaşımlarının lazer kaynağıyla ile birleştirilmesi oldukça güçtür [11]. Bu güçlüklerin arasında yüksek ısı girdisi nedeni ile oluşan parça içyapısındaki istenmeyen değişiklikler, yüzeyde lokal sertleşmeler ve tanecik büyümesinden kaynaklı mukavemet değişimleri bu kaynak yöntemindeki en sık karşılaşılan güçlüklerdendir.

Kaynağın malzemeye nüfuziyeti, güç yoğunluğu ve kaynak hızına bağlıdır. Malzemeye uygulanan güç yoğunluğu artıkça ve kaynak hızı azaldıkça nüfuz derinliği artar. Malzemeye en uygun olan işleme parametrelerini belirlemek için pratik uygulamalarda teorik

çalışmalardan, denemelerden ve geçmişte yapılan deneyimlerden faydalanılır. Şekil 2.5'de lazer kaynağının şematik resmi görülmektedir [22].



Şekil 2.5. Lazer kaynak şematik gösterimi

2.3.7. Difüzyon kaynağı

Difüzyon kaynağı benzer veya farklı metaller arasında yüksek kaliteli bağ oluşumu için kullanılan önemli bir katı hal birleştirme işlemidir. Bu birleştirme yöntemi, geleneksel kaynaklarda oluşan kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini bozan beklenmedik fazların oluşumunu içermez. Difüzyon kaynağında karmaşık şekilli parçaları birleştirmek mümkündür. Genellikle farklı malzemelerin kaynaklanılmasında kullanılan bu yöntem alüminyum ve alaşımlarında genel olarak 2xxx ve 5xxx serilerinin kaynaklanılmasında kullanılır. Difüzyon kaynağını gerçekleştirmek için iki şart yerine getirilmelidir:

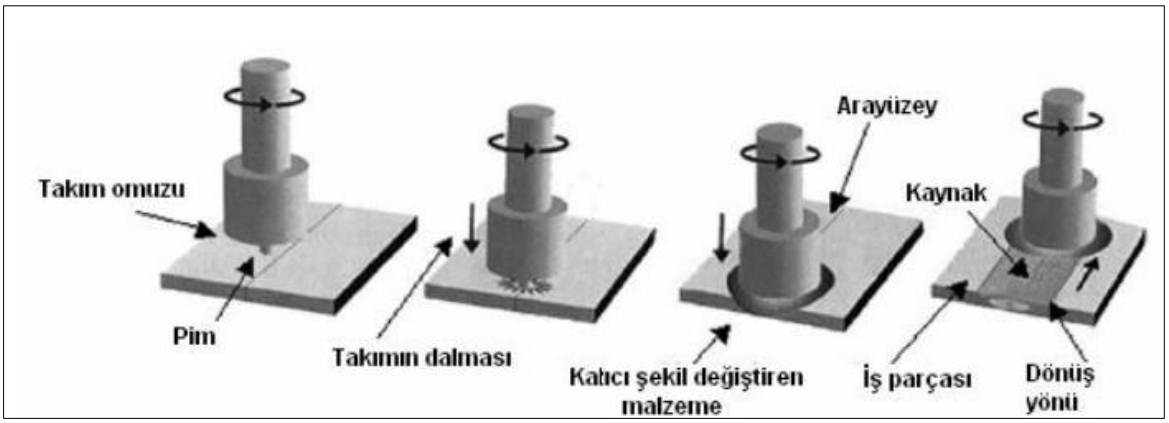
1. Birleştirilmesi planlanan iki malzemenin de yüzeyleri arasında olabildiğince yakın temas sağlanmalıdır.
2. Yeteri kadar difüzyon katsayısı sağlamak amacıyla malzemelere birbirilerine doğru gerekli itme kuvveti uygulanmalıdır.

Kaynaklanacak malzemelerin yüzeyleri arasındaki temas, genellikle oksit tabakalarının açığa çıkması ve yer değiştirmesini sağlamaktadır, bununla birlikte yüzeylerde bulunan diğer

düzensizliklerin etkisinden kurtulmak amacıyla malzemelere gerekli basma kuvveti uygulanmalıdır.

2.3.8. Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağı özellikle 2000 ve 7000 serileri alüminyum ve alaşımları için sıklıkla kullanılır. Sürtünme kaynağının uygulanışı temelde oldukça kolaydır. İki malzeme belirli şekillerde sabitlenir ve tarama başlığına benzer bir uç belirlenen bir devirde dönerek kaynak yapılacak malzemelere temas ettirilir. Kaynak ucu, kaynak yapılacak olan düzlem boyunca dönerek levhaları kaynak için gerekli olan ısıya ulaştırır. Bu sayede iki levha arasındaki birleşme sağlanır. Kaynak ucu bu işlem sırasında iki temel görev üstlenmektedir. Birincil görevi kaynak yapılacak malzemeyi gerekli sıcaklığa getirmektir. Bir diğer görevi ise kaynak yönü boyunca hareket edip dönerek iki levhanın birleşmesini sağlamaktır. Şekil 2.6'da sürtünme kaynağının temel şematik gösterimi yapılmıştır [23].



Şekil 2.6. Sürtünme kaynağının işlem sıralamaları

Literatürden de anlaşılacağı üzere, alüminyum alaşımlarının kaynağının en temel üç sorunu şunlardır.

1. Katılaşma çatlaması,
2. ITAB ve / veya kısmi erimiş bölgede yumuşama veya yapı bozulması ve
3. Kaynak sonrası elde edilen mekanik özelliklerdir.

Yukarıda bahsedilen dezavantajlar ile birlikte ayrıca hidrojen gazı yüzünden oluşan gözeneklilik hatalarını en aza indirmek için bazı önlemler alınmalıdır. Bu önlemlere örnek olarak; ana malzeme ve dolgu teli kaynak işlemine başlamadan önce dikkatli bir şekilde temizlenmelidir.

Kullanılan kaynak çeşidinden bağımsız olarak, kullanılabilir kaynaklı yapıyı elde etmek için kaynak işlemindeki parametrelerin dikkatli ve belirli ön çalışmalar eşliğinde seçilmesi oldukça önemlidir. Kaynak işlemlerinin parametreleri; ana malzeme üzerinde sıcak çatlama veya kontrolsüz sıvılaşmaya engel olmak ve ayrıca ısı etkisi altındaki bölge veya kısmen ergimiş bölge problemlerinin baskın bir şekilde etkilediğinden işlem parametreleri dikkatli seçilmelidir. Bu işlem parametreleri yalnızca kaynak kusurlarına göre değil, aynı zamanda kaynaklı malzemenin mikro yapıları, mukavemet ve sertlik özellikleri de göz önüne alınarak sistematik olarak en uygun işlem parametreleri elde edilmelidir. Sıcak haldeki malzemenin çatlaması, alüminyum kaynak işlemlerinde en sık görülen ve en çok endişe veren kusurlardan biridir.

Alüminyum alaşımlı kaynaklarda ısı tesiri altındaki bölgenin davranışı, ana malzemenin durumuna bağlıdır. Hem ısıl işlem uygulanan alaşımlar hem de ısıl işlem uygulanmayan alaşımlar, kaynaklı durumda ITAB'da sertlik ve mukavemet kaybına uğrar. Isıl işlem uygulanmış alüminyum alaşımlarında, kaynak sırasında ısı etkisi ile aşırı yaşlanma nedeniyle sertleşen tanecikler olması gerekenden daha çok büyüyerek (kabalaşarak) kaynak bölgesinde yumuşamalara ve mukavemet kayıplarına neden olur. Kaynak sonrasında uygulanan ısıl işlemler, doğrudan ısı tesiri altındaki bölgelerin kaynaklanmamış gibi özelliklerini yüksek oranda geri kazanmasına yardımcı olamaz. Bu durum klasik olarak kaynak sonrası çözelti işlemini ve hemen ardından yaşlanma işlemini gerektirir. Isıl işlem görmüş alüminyum alaşımları için yaşlandırma koşulu olan “T6” koşullarında kaynak uygulamak daha iyi bir yöntem olarak kabul edilir. Bu ısıl işlem durumu sayesinde ısı tesiri altındaki bölge önemli ölçüde yaşlanmaz ve kaynak sonrası yaşlandırma işlemlerinden oldukça tatmin edici sonuçlar elde edilebilir. İlerleyen bölümde alüminyum ve alaşımlarının günümüzde en çok revaçta görülen kaynak yöntemi olan elektron ışın kaynağının çalışma prensiplerinden ve ana hatlarıyla kaynak işleminin değişkenlerinden bahsedilecektir.

3. ELEKTRON IŞIN KAYNAĞI

Elektron ışın kaynağının bulunuşu doğrudan nükleer endüstrinin ihtiyaçları ile birlikte ortaya çıkmıştır. 1950'lerden itibaren, nötronları yakalamadaki etkinlikleri nedeniyle reaktif malzemelere ilgi vardı. Bu reaktif malzemeler, tantal, zirkonyum, vanadyum, berilyum, molibden, tungsten ve alaşımları örnek olarak gösterilebilir. Bu malzemelerin kullanımı ancak uygun bir birleştirme teknolojisi olmadan hiçbiri tatmin edici şekilde kullanılamazdı. Tüm bu malzemelerin ortak bir özelliği vardı; 300°C'yi aşan sıcaklıklarda hepsi oksijen ve nitrojen ile son derece reaktifti. Safsızlık seviyeleri metalin mukavemetini ve sünekliğini etkilemektedir. Bu nedenle, kaynakla ilgili işlemlerin atmosferden bağımsız yapılması gerekmektedir. Önce TIG ve MIG benzeri kaynak yöntemleri ile başlangıçta sınırlı bir başarı elde edildi [24- 27].

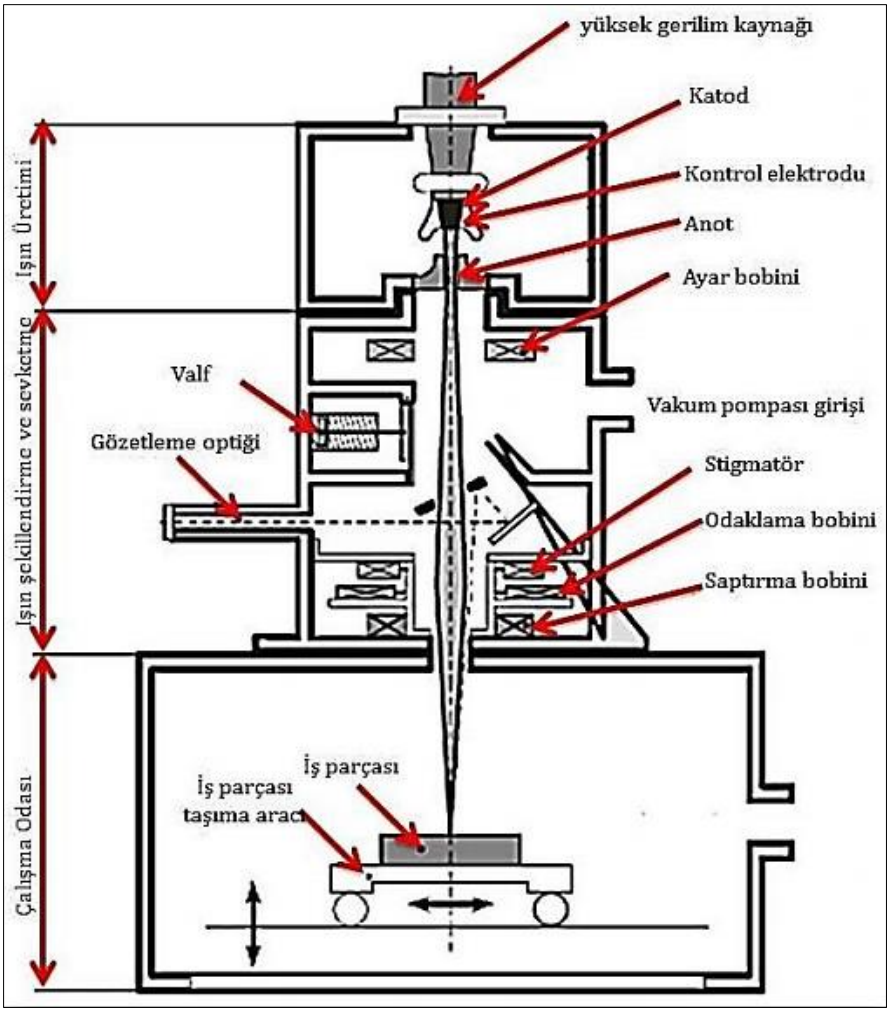
TIG ve MIG kaynak yöntemlerinin uygulamaya geçmesinden sonra vakum ortamında kaynak yapılması daha verimli olduğu için elektron ışın kaynağı yöntemi geliştirilmiştir. Modern elektron ışın kaynağı makinesi üç ana bileşenden oluşmaktadadır: ışın üreteci, ışın işleme mekanizması ve çalışma odası. Bu bileşenlerin her biri ayrı vakum sistemleri olabilmektedir. Bir elektron ışın kaynak makinesinin bileşenleri şematik olarak Şekil 3.1'de gösterilmiştir [28]. Ayrıca Şekil 3.2, iş parçası içindeki elektron ışınının enerji dönüşümünü göstermektedir [29]. Yüksek oranda hızlandırılmış elektronlar iş parçasına çarptığında kinetik enerjilerini ısı dağılımı yoluyla serbest bırakırlar. Birincil elektronların bazıları, x-ışınları ile birlikte geri saçılmaya ve ikincil elektronlara maruz kalır [24, 26].

Sıkıştırılmış elektron demetinin etkisi, iş parçasına yalnızca birkaç mikron nüfuz etmektedir. Kinetik enerji, ısı biçiminde verimli bir şekilde iş parçasına verilir. Etki noktasındaki yüksek enerji yoğunluklu ışın, metalin buharlaşmasına neden olarak, tüm kaynak derinliği için sıvı metalden kabukla çevrili bir anahtar deliği şeklinin oluşmasına izin verir. Elektron ışını kaynak hattı boyunca ilerlerken, aynı anda meydana gelen üç etkinin birleşimiyle bir kaynak oluşturulur. Bu üç etki şöyle sıralanabilir:

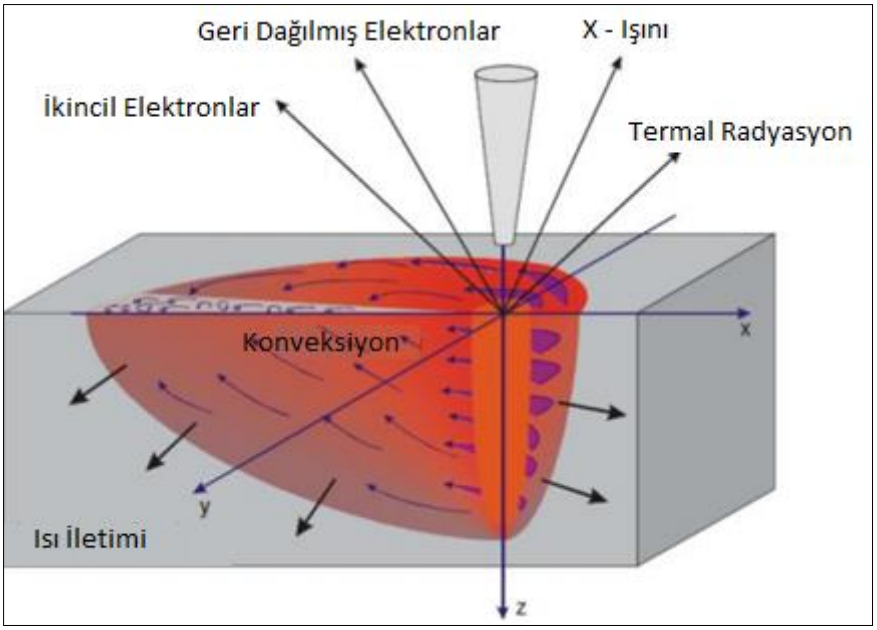
1. Deliğin ilerleyen tarafındaki metal buharlaşır ve buharlaşmış metal daha sonra üzerinde ergimiş metal oluşturmak için yoğunlaşır.
2. Deliğin arka tarafı: deliğin ön tarafındaki ergimiş metal, deliğin arka tarafına akar.

3. Oluşan ergimiş metal sürekli olarak deliği doldurur ve elektron ışını ilerledikçe katılaşır.

Günümüz şartlarında modern yüksek vakumlu, yüksek gerilim makinelerinde alüminyumda 15 cm ve çelikte 7,5 cm penetrasyon derinlikleri mümkündür.



Şekil 3.1. Elektron ışın kaynağı makinesinin şematik gösterimi



Şekil 3.2. İş parçası içinde elektron ışınının enerji dönüşümü

3.1. Elektron Işın Kaynağı Parametreleri

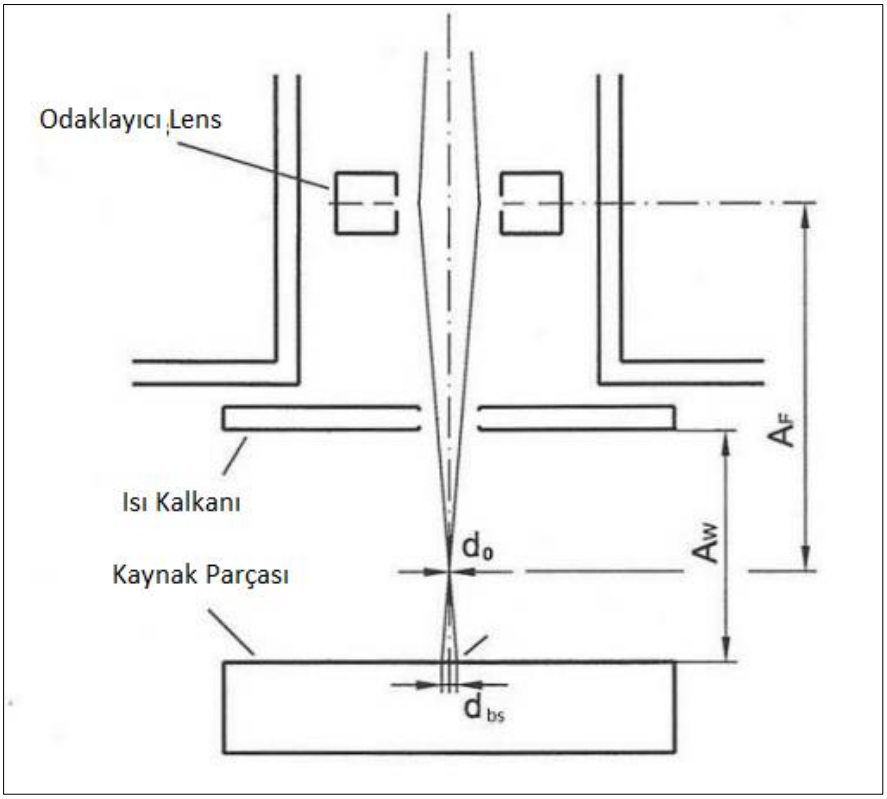
Elektron ışın kaynağı prosesi birçok parametre barındırır. Bu parametreler işlemin tekrarlanabilirliği ve kararlılığı için oldukça önemlidir. Bu bölümün alt başlıklarında bu parametrelerden bahsedilmiştir.

3.1.1. Operasyon mesafesi

İş parçasının yüzeyi ile cihazın sabit bir referans yüzeyi yani odak lens merkezi arasındaki mesafedir. (bkz. Şekil 3.3 – A_w ile gösterilen yer). Işının yakınsaması nedeniyle, kontrollü deneylerde karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için çalışma mesafesi sabit tutulmalıdır.

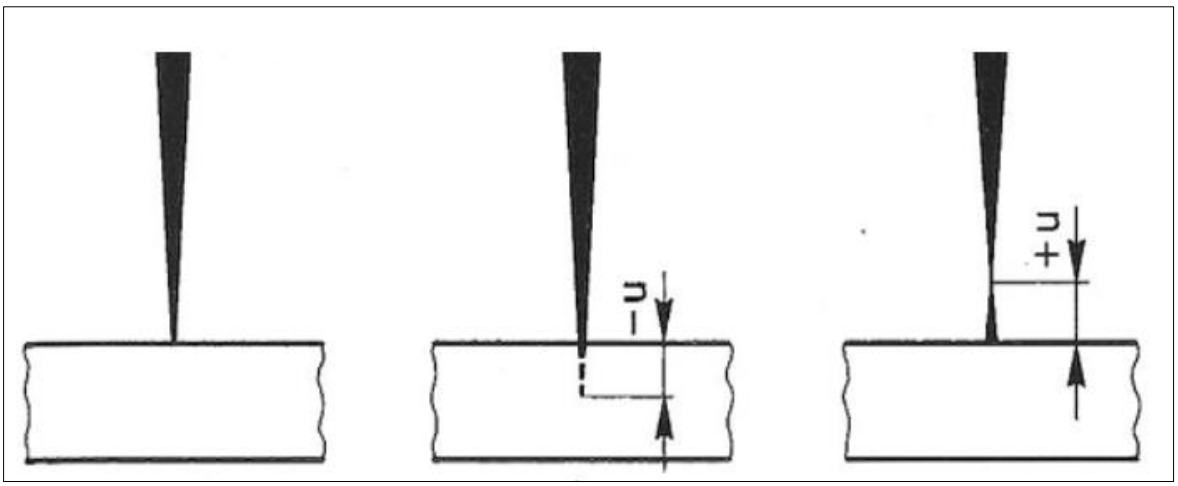
3.1.2. Odak mesafesi ve konumu

Şekil 3.3'de gösterildiği üzere odaklayıcı lens ile ışının odak noktası (d0) arasındaki mesafe A_F ile gösterilmektedir [30].



Şekil 3.3. Odak mesafesi ve konumu

Odak konumu (u) terimi, iş parçası yüzeyinin konumu ile ilgili olarak ışının odak noktasının (d0'da) konumunu tanımlamak için kullanılır (Şekil 3.4). Odak noktası konumu mili amper (mA) cinsinden verilir. Negatif bir değer, yüzeyin altında bir odak noktasına, pozitif bir değer ise yüzeyin üzerinde bir odak noktası olarak konumlandırılır [30]. (Bkz. Şekil 3.4)



Şekil 3.4. Farklı odak konumları

Odak noktasının, erimiş halde bulunan kaynak havuzundaki basınç üzerinde önemli etkisi vardır. İyi seçilmeyen bir odak noktası, ışının kararsızlığından ötürü kaynak yapılması gereken bölgeler yerine daha geniş bir alanda ve daha az odaklı olarak kaynak yapılmasına neden olur. İnce yani düşük et kalınlığındaki malzemelerin kaynaklanmasında odak konumu belirleyici parametre değildir. Ayrıca aynı şekilde yüksek hızlarda yapılan kaynaklar için de odak konumu kaynak sürecini önemli ölçüde etkilemez. Kaynak edilecek malzeme kalınlığı arttıkça odak noktası daha önemli hale gelmektedir [31].

3.1.3. Gerilim

Gerilim kilovolt (kV) cinsinden katot ve anot arasındaki elektrik potansiyelidir. Hızlanan voltaj, elektronların hızını doğrudan etkiler. Odak noktasında daha küçük bir ışın spot çapı elde etmek için daha yüksek bir hızlanma voltajı kullanması ve bir düşük ışın akımı kullanması ışının kaynak hızına yetişmesi için oldukça sık kullanılan bir yöntemdir. Genellikle 60kV, 120kV veya 150kV hızlanma voltajı kullanılır; 200 kV'a kadar mümkündür [32].

3.1.4. Işın akımı

Işın demetindeki elektrik yükünün akışının mili amper (mA) cinsinden değeridir. Voltajla birleştirilen ışın akımı, ışın gücünü ortaya çıkarır ve kaynak sonucunu önemli ölçüde etkiler. Optimum ışın akımı, kaynağın hem yüzey hem de kök tarafında düzgün bir kaynaklama için önemlidir [32].

3.1.5. Lens akımı

Işını mA cinsinden odaklamak için gerekli olan lensteki akım olarak tanımlanır.

3.1.6. Osilasyon

Elektron demetinin elektromanyetik kuvvetler tarafından periyodik olarak sapması olarak tanımlanır. Işın demetinin salınımı için parametreler şunlardır:

- Şekil – Çember, parabol, düz, balık şekli vb.

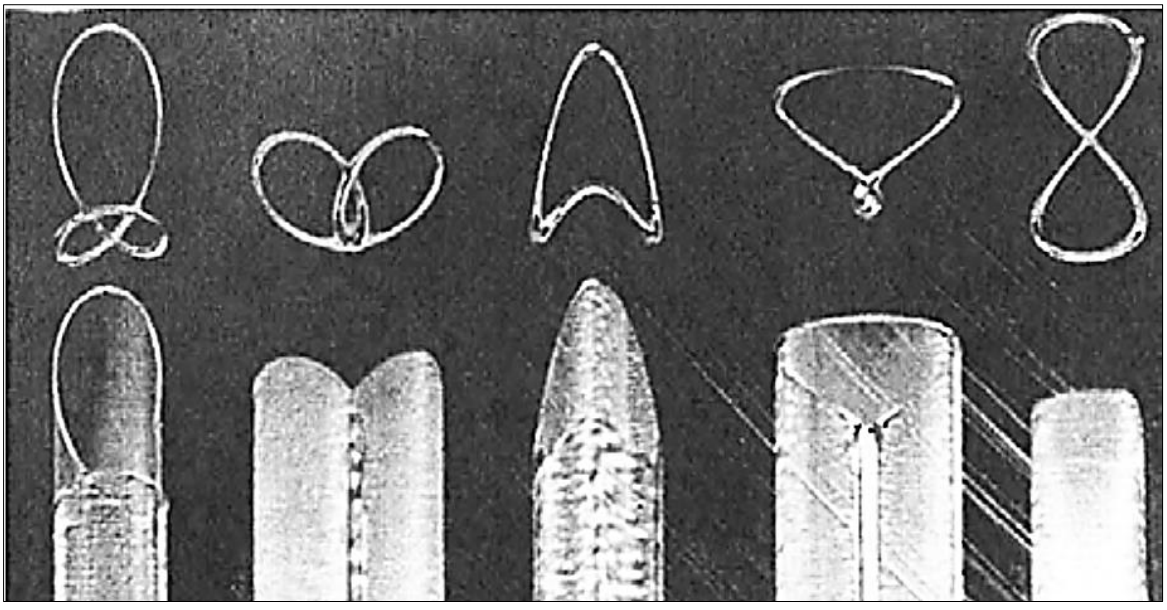
- Genlik – Yatay ve düşey yöndeki milimetre cinsinden salınım.
- Frekans – Işının saniyede kaç kere salınım yapması ile ilgili parametredir (Hz).

Kaynak işlemi esnasında kaynak kesitinde anahtar deliğini şeklini sabitlemek ve kaynak dikişinin tepesini düzeltmek için farklı oryantasyonlarda osilasyon şekilleri kullanılır.

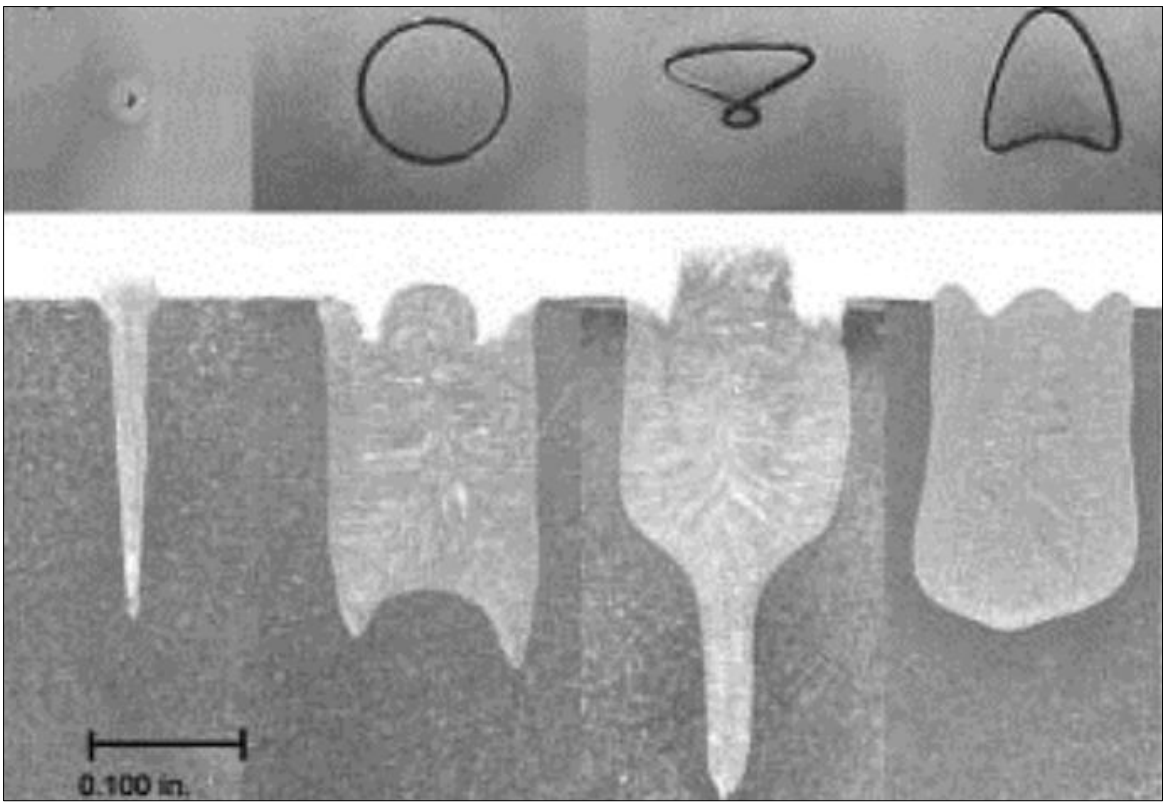
Osilasyon;

- Eksik füzyonlardan kaçınılmasında,
- Düşük ergime noktasına sahip alaşımlarda gözenekleri azaltılmasında,
- Ergitme havuzunun yaygın bir yüzeyde hareket etmesine yardımcı olur.

Salınımlı bir ışın demetinin yanı sıra salınımsız bir ışın demeti ile aynı kaynak derinliğine ulaşmak için ışın gücünün yükseltilmesi gerekmektedir. Genlik ne kadar yüksekse, ışın gücü o kadar yüksek olmalıdır. Şekil 3.5 ve 3.6, çeşitli amaçlar için kullanılabilen bazı farklı osilasyon şekillerini göstermektedir [33, 34].



Şekil 3.5. Osilasyon tipleri - üstten görünüm



Şekil 3.6. Osilasyon tipleri - kesitten görünümü

3.1.7. Işın titreşimi

Işın akımının bilinçli ve periyodik değişimi olarak tanımlanmaktadır. Işın titreşimi için parametreler şunlardır:

- mA cinsinden maksimum ışın akımı
- mA cinsinden minimum ışın akımı
- Hz cinsinden darbe frekansı

3.1.8. Kaynak hızı

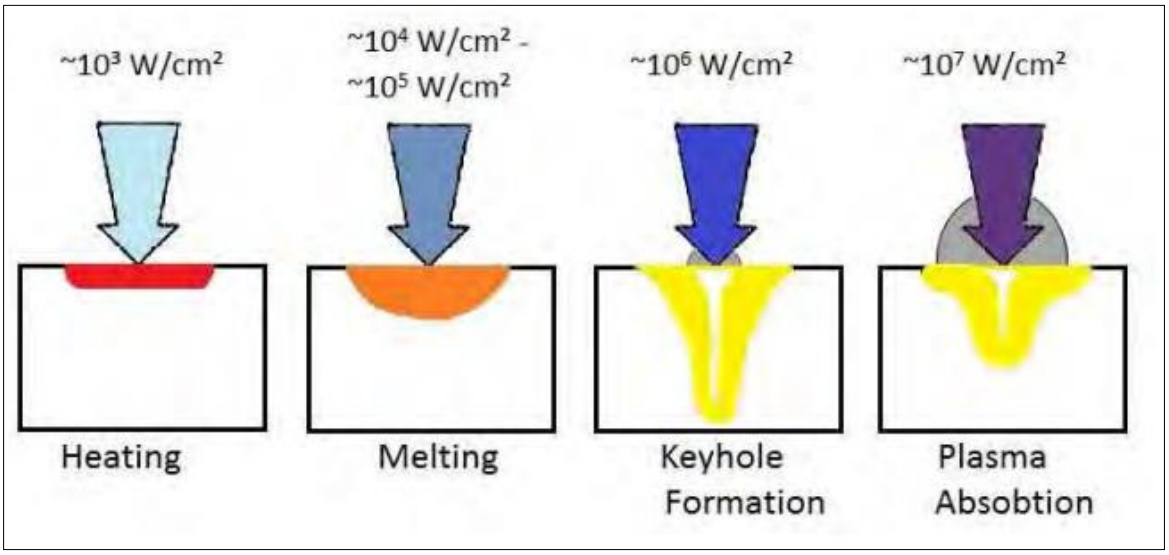
İş parçasının yüzeyine göre demetin bağıl hızı mm/s cinsinden tanımlanır. Kaynak hızı, hızlanma gerilimi ve ışın akımı ile birlikte birim uzunluk başına enerjiyi tanımlar. Kaynak hızının her zaman bir üst ve bir alt sınırı vardır. Alt sınır, kaynak dikişinin parçanın en altında bulunan kaynak havuzuna erişmesi ile belirlenir. Bu duruma tam penetrasyon denir. Üst hız sınırının üzerinde dikişte gözenekler, boşluklar ve çatlaklar meydana gelir.

3.1.9. Çalışma basıncı

Kaynak sırasında vakum ortamındaki vakum değeri olarak tanımlanır. Kaynak işlemi sırasında bulunan ortamın vakum değeri işlemin aynı parametreler ile aynı şekilde tekrarlanabilirliği açısından oldukça önemlidir.

3.1.10. Işın yoğunluğunun etkisi

Işın kaynağının güç yoğunluğu aralığı, kaynak işleminde oldukça önemli bir parametredir. Bu parametre sayesinde malzemenin ısıtılmasından, malzemenin doğrudan buharlaşmasına kadar olan uygulamalar gerçekleştirilebilir. Şekil 3.7'de yaklaşık güç yoğunluğu değerlerinin malzemedeki farklı etkilerle ilişkileri gösterilmektedir [35].



Şekil 3.7. Güç yoğunluğu

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Konuyla ilgili yapılan çalışmaların birçoğu aşağıda verilmiştir. Bu çalışmalar; genellikle alüminyum malzemelerin kaynaklanması ve elektron ışın kaynağı işlemi için farklı parametre odaklı çalışmaların sonuçlarını gösterecek şekilde verilmiştir.

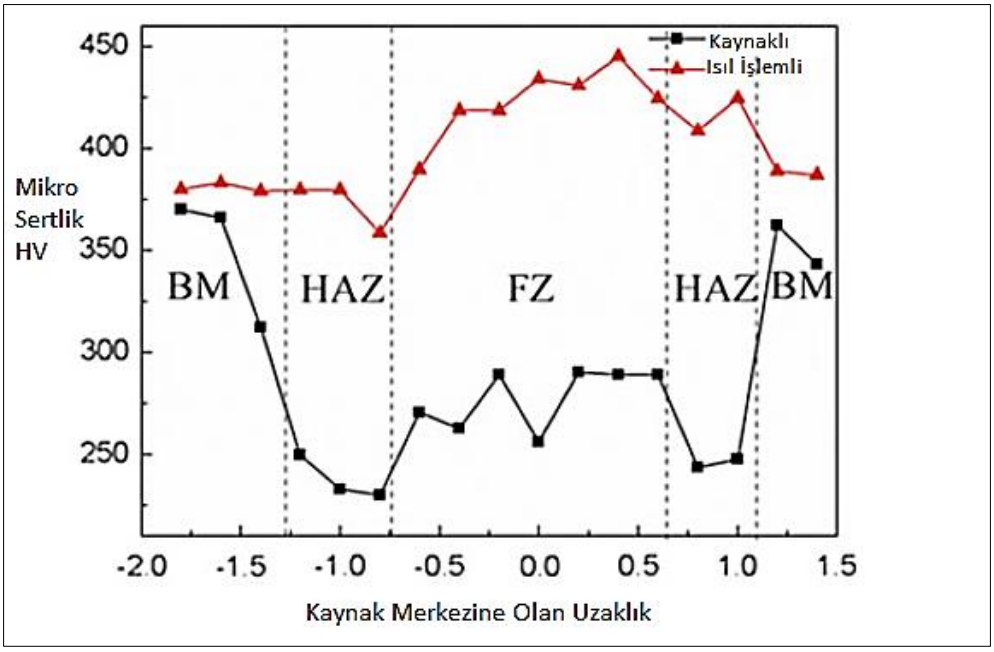
M. Nasr El Deen ve diğerleri, 5mm kalınlığında AISI 304 çeliği ile AISI 1020 düşük karbonlu iki farklı çelik malzeme için üç ana kaynak parametresi incelemiştir. Bu parametreler; akım, odak akımı ve kaynak hızıdır. Diğer parametreler sabit tutularak her bir parametre bağımsız olarak değiştirilmiştir. Akımın enerji girişinin değeri ve kaynak yapılan bağlantının ortaya çıkan karakteristiği üzerinde büyük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerin optimizasyonu, elde edilen mikro yapı ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bunların sonucunda; 5 mm kalınlıktaki en uygun kaynak hızını 5 mm/s, akım değerini 5 mA ve odaklanma akım değerini ise 19mA olarak elde etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda kaynak akımı ve kaynak hızı, kaynak bölgesine ısı girdisini ve dolayısıyla kaynak yüzeyinin katılaşmasından sonra elde edilen yapı ve kaliteyi kontrol eden baskın kaynak parametreleri olarak sunulmuştur [6].

Sanjib ve çalışma arkadaşları, CuCrZr Alaşım plakanın elektron ışın kaynak parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Elektron ışın kaynağının, beş temel parametresini incelemişlerdir. Bu parametreleri mekanik dayanım ve süneklik özellikleri ile ilişkilendirerek en uygun parametre setini bulmak üzere çalışmışlardır. Çalışmalarında hızlanma voltajı, elektron demetinin akımı, ilerleme hızı, salınım genliği ve salınım frekansı parametreleri incelenmiş olup çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama yüzdesi değerlerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, herhangi bir mukavemet kaybı olmadan ve malzemenin süneklik değeri için gerekli optimizasyonu yapmak adına yüksek voltaj ve akım seviyeleri ile birlikte düşük kaynak hızı, düşük salınım genliği ve yüksek frekans değerine ihtiyaç olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışma sonunda elde edilen parametreler ise şunlardır; 70 kV, 90 mA, 1000 mm/dakika olarak temel parametreler elde edilmiştir. Ayrıca osilasyon genliği olarak 0.5 mm ve frekans olarak 900 Hz değerleri elde edilmiştir. Elektron ışın kaynağında CuCrZr plakasının kalınlığından kaynaklı CuCrZr'nin mukavemeti, elektron ışın kaynağı sırasında tane büyümesi ve yoğun ısı oluşumu nedeniyle ana metale kıyasla önemli ölçüde azalım göstermiştir. Özellikle

çekme mukavemetinde oluşan %42'lik azalma ve uzama değerindeki %50 azalma malzemede parametre optimizasyonu sonucunda dahi mekanik özelliklerde belirgin bir azalma göstermiştir [36].

Sravanthi ve çalışma arkadaşları, elektron ışını kaynağının yüksek kaynak akımları ve voltajlarında iki farklı malzeme olan alüminyum 6061 alaşımı ve galvanizli yumuşak çeliğin mekanik dayanımı ve korozyon davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, farklı voltajlarda ve işleme hızlarında iki alüminyum alaşımı, yumuşak çelik üzerine pozisyonlandırılarak imal etmişlerdir. Kaynak akımı, sıçrama oluşturmayacak şekilde maksimum penetrasyon elde etmek ve sağlam bağlantılar oluşturmak için yeterli ısı üretilmesi amacıyla 60 mA olarak seçilmiştir. Ayrıca ilerleme hızı olarak 750 mm/dakika ve gerilim olarak da 30 kV seçilmiştir. Bu çalışma sonucunda, kaynak dikişi-yumuşak çelik ara yüzünde kalın Al-Fe metaller arası katman oluşumunun her iki ana malzemede de mekanik hatalar ve korozyona neden olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca bu çalışma, galvanizli çelik malzemeden gelen Al – Fe – O partikülleri ile alüminyum 6061'de gelen Al – Mg – Si çökeltileri arasındaki galvanik reaksiyonların sonucunda kaynak ara yüzünde taneler arası korozyona neden olduğunu açıkça gözükmektedir [37].

Xinxu ve diğerleri, elektron ışın kaynak parametrelerinin GH4738 alaşımının mikro yapı, kaynak penetrasyon derinliği ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırmıştır. Metal malzemelerin kaynaklanabilirliği, kaynak sonrası ısıl işlem çatlamasına yatkınlık nedeniyle oldukça sınırlı olduğu gözlenmiştir. Xinxu ve diğerleri çalışmasında ısıl işlemin GH4738 alaşımının mikro sertliği üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, kaynak hızı 30 mm/s olduğunda, kaynaklarda belirgin çatlaklar görülmüştür. Ancak kaynak hızı 20 mm/s'nin altına düştüğünde kaynaklarda çatlak oluşmadığı gözlenmiştir. Kaynak hızı 10 mm/s olduğunda daha geniş bir kaynak bölgesi oluştuğu gözlenmiştir. GH4738 malzemesi 20 mm/s ilerleme hızında işlem yapılmamış metale göre 80% oranında mekanik özelliklerin korunması ile oldukça iyi mekanik özellikler göstermiştir. Kaynak alanında ana metale göre daha düşük mikro sertlik değeri elde edilmiştir. Kaynak ve ana metal kalınlığı arasındaki ısıdan etkilenen bölge yaklaşık 0,5 milimetre olarak belirtilmiştir. Bu bölge ise mikro sertlik değerinin en düşük olduğu bölge olarak gözlenmiştir. Ayrıca, ısıl işlemden sonra mikro sertlikte belirgin bir artış olmuştur. Bu değişim Şekil 4.1'de açıkça gözükmektedir [38].



Şekil 4.1. Kaynak merkezine olan uzaklığa göre sertlik değişimi

Sobih ve arkadaşları "Grey İlişki Yöntemi" kullanılarak 2219 Alüminyum alaşımı için elektron ışın kaynağı parametrelerinin optimizasyonunu incelemişlerdir. 2219 alüminyum alaşımının en iyi kaynak parçası geometrisini ve mekanik özelliklerini bulmak için "Grey ilişkisel analiz" ile birlikte "Taguchi" yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada işlem parametreleri olarak tarama boyutu, ışın akımı, kaynak hızı ve odaklanma akımı gibi parametreler incelenmiştir. Bu parametrelerin sonuçlarını, mekanik ölçümler ile akma dayanımı, sertlik, penetrasyon derinliği ve akım genişliği ile incelemişlerdir. 10 mm/s'de kaynak hızı; 18 mA ışın akımı; 90 mA odak akımı, olarak elde edilmiştir. Doğrulama için deneysel çalışmaların sonuçları, elektron ışın kaynağı işleminin performans özelliklerinin, akma mukavemetinin, sertliğinin, penetrasyon derinliğinin, kaynak genişliğinin elektron ışın kaynağı parametrelerinin Taguchi metodunu kullanarak optimum kombinasyonu sayesinde iyileştirildiğini belirtmişlerdir. Taguchi metodunun sonucunda malzemenin voltaj parametrelerini değiştirerek en uygun değerin malzemede 21% oranında mukavemet kaybı ile elde edilebildiği görülmüştür. Ancak belirlenen parametreler arasındaki en zayıf noktanın ışın çapı olduğu ve bu parametre ne kadar iyileştirilirse iyileştirilsin en uygun durumda 33% oranında mukavemet kaybına neden olduğunu belirtmişlerdir [3].

Luo ve arkadaşları, teorik modelleme ve deneyleri birleştirerek elektron ışın kaynağı için ışın salınımının optimizasyon olasılığını araştırmışlardır. Dairesel ışın taramasının elektron

ışın kaynak işleminin kararlılığını nasıl etkilediğine dair net bir fiziksel resmin geliştirildiğini iddia etmişlerdir. Elektron ışın kaynağı için üç boyutlu anahtar deliği ve kaynak havuzu dinamiklerini simüle edebilen yeni matematiksel model geliştirmişlerdir. Çalışmayı yaparken en uygun parametrelerin 140 kV, 50 mA ve ışın çapını 0.4 mm olarak belirlemişlerdir. Elektron ışın kaynağı yöntemi ile titanyum alaşımlarının kaynaklanması sırasında tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığını ve iyi parametreler elde ettiklerini belirtmişlerdir [5].

Elseddig ve diğer araştırmacılar, AA1350 alüminyum alaşımının elektron ışın kaynağını deneysel olarak incelenmiştir. Daha önce belirtilen kaynak parametrelerinin nihai çekme dayanımı üzerindeki etkilerinin bir kaynak çıktısı olarak ve bir yanıt olarak değerlendirildiğini ve çekme dayanımını maksimize etmek amacıyla kaynak parametrelerinin optimum kombinasyonlarının tahminini araştırmışlardır. Deneyler her bir parametrenin değişken seçilip diğer üç parametrenin sabit tutularak icra edilmesine dayanmaktadır. Buna göre, 27 adet AA1350 alüminyum alaşımlı sac malzeme, her biri aynı parametre ile farklı uzaklıklardan üç set halinde kaynaklanarak, karşılaştırmalı olarak incelenmişlerdir. AA1350 alüminyum alaşımını birleştirirken elektron ışın kaynağı parametrelerini belirleyerek, yüksek kaynak mukavemeti ve dar bir ısı etkili bölge elde edebildiklerini beyan etmişlerdir. Elektron ışın kaynağı tekniği ile elde edilen kaynaklı bağlantının nihai çekme dayanımı, diğer alüminyum alaşımlarına göre görece olarak daha zayıf kaynaklama özelliğine sahip AA1350 alaşımı, kaynaksız AA1350 malzemenin mukavemetinin %90'ından fazlasını sağlayabildiklerini görmüşlerdir. Elektron ışın kaynağı bölgesindeki kaynak bölgesi, elektron ışınının ilerlemesi sırasında kristalleşme ve yeniden kristalleşme süreçleri nedeniyle, gerinimle sertleştirilmiş ana metale göre en düşük sertlik değerini göstermiştir [39].

Thomas E Yost, Al6061 alüminyum alaşımının kaynağı sırasında elektron ışını kaynağının ilerleme hızı, demet modeli - çapı ve dolgusu ve kullanılan ek malzemenin etkilerinin etkilerini araştırmıştır. Çalışmalarında hızın kaynak penetrasyonununu etkilediğini belirtmiştir. Anahtar deliği kolonundaki türbülansın hangi noktada füzyon bölgesindeki kusurları arttırdığını anlamak için daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmiştir. Hızdaki fazla artış, penetrasyondaki azalmayı telafi etmek için voltaj değerinde de bir artış gerektirdiğini belirtmişlerdir. Salınımlı ışın demeti modeli, yüksek ergime sıcaklığına sahip

alaşımlarda derin penetrasyon kaynaklarının yaşadığı gözeneklilikte bir azalma sağlamadığı sonucuna varmışlardır [40].

Hajitabar ve Moosavy, elektron ışını kaynak akımı değişimlerinin Nb-1Zr gelişmiş alaşımın mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elektron ışını kaynak akımı değişikliklerinin Nb bazlı alaşımın mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 3 mm kalınlıktaki levhalarda 20, 24, 30 ve 35 mA elektrik akımı için 4 farklı değerde elektron ışın kaynağı uygulamışlardır. Farklı kaynak bölgeleri, geometri ve kaynak penetrasyon derinliği ile ısı girdisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Kaynağın çekme ve mikro sertlik değerleri dahil olmak üzere mekanik özellikleri ile çalışmalarını doğrulamışlardır. 30 mA kaynak akımına sahip bir numunedeki sonuçların, penetrasyon derinliği için uygun değer koşulları, mikro yapı, mekanik özellikler ve kaynak geometrisinin elde edildiğini belirtmişlerdir. Isıdan etkilenen bölgede, büyük oranda yeniden kristalleşme ve tane büyümesi meydana geldiğini belirtmişlerdir. Niyobyumun yüksek termal iletkenliği nedeniyle, ITAB boyutu nispeten büyük olduğu gözlemişlerdir. Sertlik profili, kaynak bölgesi ve ITAB sertliğinin, verilen ısı nedeniyle sertleştirme etkisinin ortadan kaldırılması ile birlikte ana metalin sertliğinden önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermişlerdir. 30 mA akımlı bir numune için kaynağın çekme mukavemetini, ana metalin gerilme mukavemetinin %53'ü olan 281 MPa olarak elde etmişlerdir ve kaynak ısıdan etkilenen bölgeden yani ITAB'dan kırıldığı görülmüştür [41].

Literatür taraması ve sektörden edinilen tecrübeler sonucunda, Al6061-T6'nın elektron ışını kaynağının havacılık için tercih edilen teknolojilerden biri olmasına rağmen, yüksek güç yoğunluğu nedeniyle sertlik ve mukavemet azalması gibi bazı dezavantajları olduğu bulunmuştur. Bu nedenle EIK kullanılarak elde edilen Al6061 kaynak bölgesinin sertlik değeri ile ilgili çalışmalara ihtiyaç vardır. Bunların dışında, salınım genliği ve frekansı gibi ikincil kaynak girdi parametrelerinin yanı sıra gerilim, akım ve kaynak hızı gibi birincil parametrelerin etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bütün bu veriler eşliğinde, daha az deneme yapılması amaçlanarak hazırlanan teorik bir model ile analiz çalışmaları sürdürülmesi gerektiği görülmektedir. Bu teorik çalışma sayesinde oldukça maliyetli olan bu parametre denemelerini olabildiğince az icra ederek hem zaman hem de maliyet olarak iyileştirilmeye yol açması beklenilmektedir.

Elektron ışın kaynağı sürecini etkileyen daha birçok kaynak, tezgâh, ortam veya hazırlık parametresi vardır. Bütün bu literatür bilgisi ışığında bu çalışma kapsamında elektron ışın kaynaklı bölgedeki elektron ışın kaynağı giriş parametrelerinin etkilerinin araştırılması için çalışılmıştır. Bu çalışmada ayrıca teorik olarak hazırlanan model ile birlikte yakınsama yapılarak belirtilen parametrelerin etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılmak üzere kaynak hız, akım ve gerilim parametreleri hem analitik olarak hem de deneysel olarak incelenmiştir. Kaynaklı malzemelerde, hem mikro sertlik ölçümleri hem de çekme testleri icra edilmiştir. Bu çekme testi sonuçlarında uzama, akma ve kopma mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar ana malzeme ile karşılaştırılmış olup, sonuçlar kısmına karşılaştırmalı olarak eklenmiştir.

5. ANALİZSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Model Kurulumu

Elektron ışın kaynağından iş parçasına ısı transferi, ANSYS FLUENT programındaki ısı transfer modülü kullanılarak geliştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelinde simüle edilmiştir. Ek olarak, Juan ve arkadaşlarına göre elektron ışını, ısı kaynağı ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme özellikleri için kullanıcı tanımlı bir fonksiyon ile hesaplamalar yapılmıştır [42]. Bu kullanıcı tanımlı fonksiyon "Visual Basic" programında yazılmış ve ANSYS Fluent aracılığı ile derlenmiştir. Ayrıca, bu model kurulurken katılaşma ve ergimeden elde edilen penetrasyon derinliği ölçme amaçlı kullanılmıştır.

5.1.1. Isı transferi modeli

Elektron ışını kaynağından numuneye aktarılan ısı, enerji denklemi ile aşağıdaki gibi tanımlanabilir [43.44];

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(\mathrm{K}\,\nabla\,\mathrm{T}) + S_h \tag{5.1}$$

T,ρ, C_p ve K sırasıyla sıcaklık, yoğunluk, özgül ısı ve termal iletkenliktir. Modelde kullanılan Alüminyum 6061 T6 için malzeme özelliklerine göre sıcaklığın bir fonksiyonudur [46]. Daha önce anlatıldığı gibi, denklem 5.1'de S_h terimi ile tanımlanan elektron ışını ısı kaynağı şu şekilde ifade edilebilir:

$$S_h = AI_o\alpha\,\exp(-2\,\frac{(x-v_x t)^2+(y-v_y t)^2}{\omega^2} - \alpha z) \tag{5.2}$$

A malzeme soğurma olduğunda, α etkili soğurma katsayısı, I_o lazer yoğunluğudur ve ω lazer karakteristik yarıçapıdır ve H. Fujii ve arkadaşlarına göre [45]:

$$I_o = \frac{2P}{\pi\,\omega^2} \tag{5.3}$$

$$P = \mathrm{I} * \mathrm{V} \tag{5.4}$$

$$\omega = \frac{D_b}{2*2.146} \quad (5.5)$$

D_b, elektron ışını çapı, P elektron ışını gücü, I akım ve V elektron ışını voltajıdır. Bu çalışmada sırasıyla denklem 5.6 ve 5.7'de görülebileceği gibi hem başlangıç koşulu hem de sınır koşulları dikkate alınmıştır.

$$T(x,y,z)_{t=0} = T_0 \quad (5.6)$$

$$-k(\frac{\partial T}{\partial z}) = \dot{S_h} - h_{cov}(T_a - T_s) - \sigma\mathcal{E}(T_a^4 - T_s^4) \quad (5.7)$$

Bu denklemde;

- T_0 oda sıcaklığıdır ve 300 K olarak ayarlandığında,
- h_{cov} ısı konveksiyon katsayısıdır,
- T_a kaynaklı malzemenin başlangıç sıcaklığıdır,
- T_s çevre sıcaklığıdır,
- Ɛ radyasyon katsayısıdır ve
- σ Stefan-Boltzmann sabitidir.

5.1.2. Ergime ve katılaşma

Bu çalışmada ergime ve katılaşma davranışları, ısı transferi hesabına katılarak hesaplanmıştır. Entalpi tekniği, kaynak işlemi sırasında meydana gelen ergime ve katılaşmayı tanımlamak için kullanılmıştır. Entalpi tekniği esas olarak malzemenin entalpisine dayanmaktadır. Entalpi, malzemedeki toplam ısı içeriği olarak ifade edilebilir ve bu ısı, sistemin iç enerjisi artı basınç ve hacim ürününe eşittir. Ayrıca, malzemedeki hassas ısı miktarı ve gizli ısı içeriği olarak da ifade edilebilir, bu nedenle:

$$H = U + P * V \text{ veya} \quad (5.8)$$

$$H = h + \Delta H \quad (5.9)$$

Bu denklemlerde “U” iç enerji olduğunda, “P basınçtır, “V” hacimdeki değişimdir, h duyulur ısıdır ve ΔH gizli ısıdır.

$$h = h_{ref} + c_p \Delta T \tag{5.10}$$

$$\Delta H = \beta * L \tag{5.11}$$

Burada h_{ref}, L, c_p ve β sırasıyla malzemedeki referans entalpi, gizli ısı, özgül ısı ve sıvı fraksiyonudur. Sıvı fraksiyon β şu şekilde hesaplanabilir:

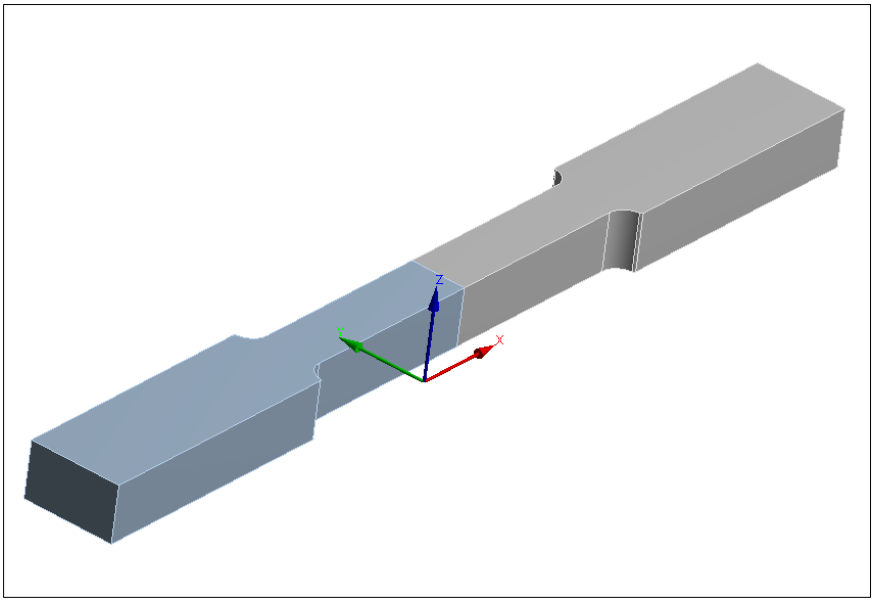
$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \tag{5.12}$$

Enerji denkleminin 5.1 çözümü ile sıcaklık “T” hesaplanarak, “β” hesaplanabilir. Daha sonra β malzemedeki ergime veya katılaşmayı tanımlamak için kullanılabilir. Bu şekilde zamana bağlı iterasyon yapılarak denklemler çözülmüştür.

Simülasyon için yazılan kullanıcı tanımlı fonksiyonun bilgisayar dili “Visual Basic” kodları Ek-3’de verilmiştir.

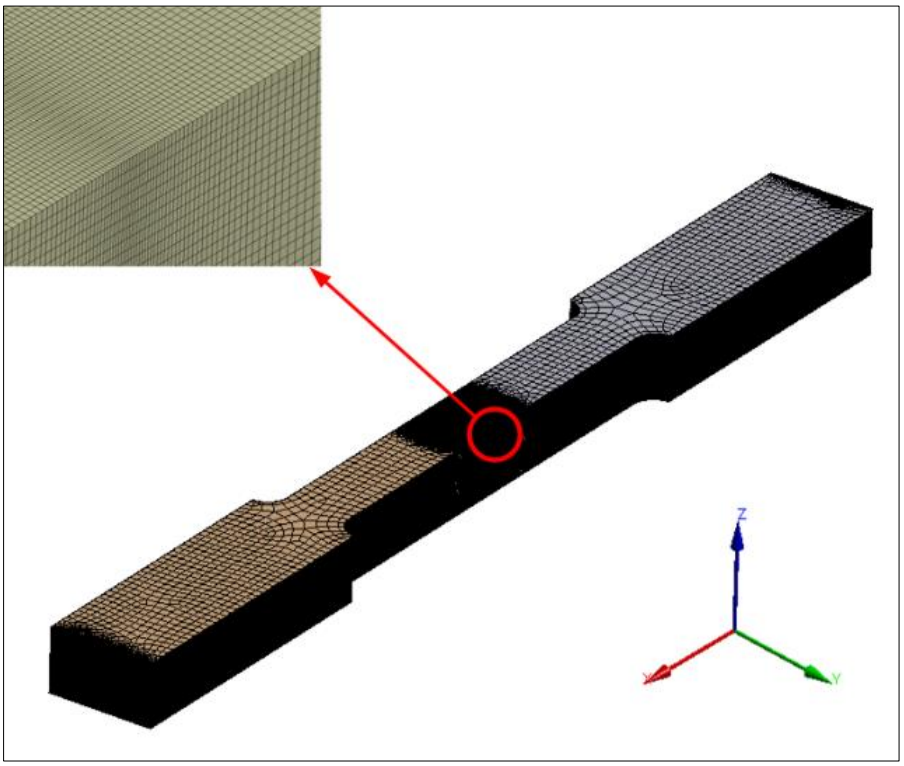
5.2. Model Geometrisi ve Hesaplamalı Alan

Analizde ASTM E8/E8M-16a'ya göre standart bir çekme testi numunesi olarak kullanılan model Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, gerçek süreci deneysel olarak simüle etmek için model iki özdeş yarıya dilimlenmiştir. Deney düzeneğinde, numune ikiye bölünmüş ve ardından elektron ışını kaynağı kullanılarak kaynaklanmıştır.



Şekil 5.1. Analizde kullanılan model

Model için hesaplama alanı Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Analizde kullanılan hesaplamalı alan

Bu model yaratılırken toplamda “460640” adet element ve “1976834” tane “düğüm (nodes)” kullanılmıştır. Burada kullanılan elementlerin (mesh) özellikleri Şekil 5.3’de belirtilmiştir.

Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default
Sizing	
Use Adaptive Sizi...	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Di...	0.10074 m
Average Surface ...	9.1562e-005 m²
Minimum Edge L...	3.6486e-004 m
Statistics	
Nodes	1976834
Elements	460640

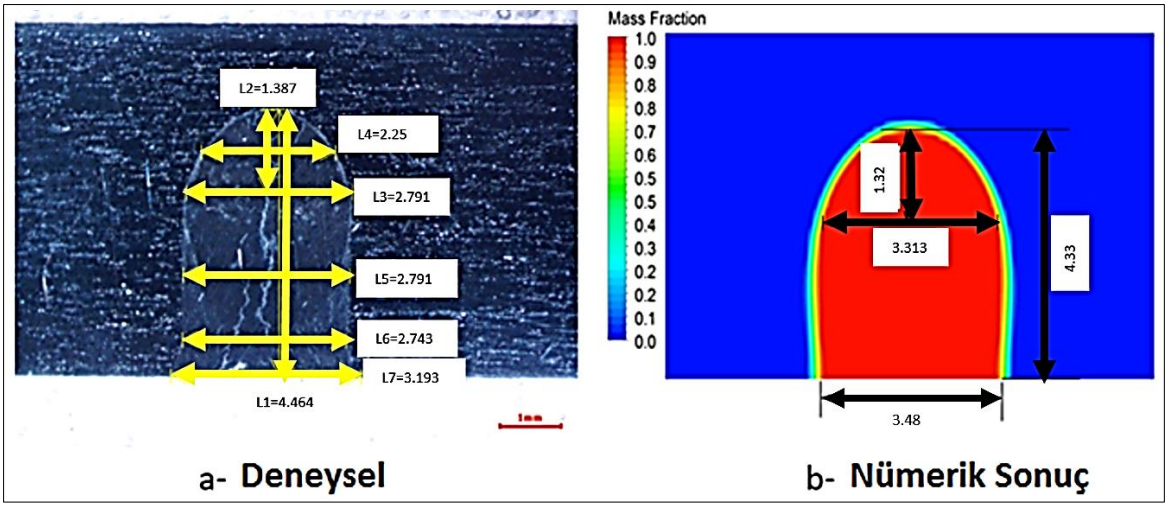
Şekil 5.3. Analizde kullanılan elementlerin özellikleri

5.3. Nümerik Sonuçlar

Bölüm 5.1'de açıklanan ısı transferi, katılaşma ve ergime denklemlerini içeren denklemler ANSYS FLUENT 20 R1 kullanılarak çözülmüştür. Işın çapı ve kaynak hızı gibi elektron ışın kaynak parametrelerini içeren bir kullanıcı tanımlı fonksiyon kodu derlenerek çözülmüştür. Ayrıca, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak malzeme özellikleri de tanımlanmıştır.

5.3.1. Model doğrulama ve element yoğunluğu analizi

Modeli doğrulamak için modelden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elektron ışını kullanılarak kaynak yapmak için bir çekme numunesi hazırlanmış ve kaynak işleminden sonra erimiş bölgenin üst yüzeyi, aşağıdaki Şekil 5.4.'de görülebileceği gibi Ansys yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Hem deneysel hem de sayısal sonuçlarda ergimiş bölgenin boyutları karşılaştırılarak, elde edilen maksimum hatanın 11,7% olduğu görülmüştür. Bu sonuçla sayısal modelin, kaynak parametrelerinin etkisinin araştırılması için kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 5.4. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

5.3.2. Parametrelere göre hesaplanan değerler

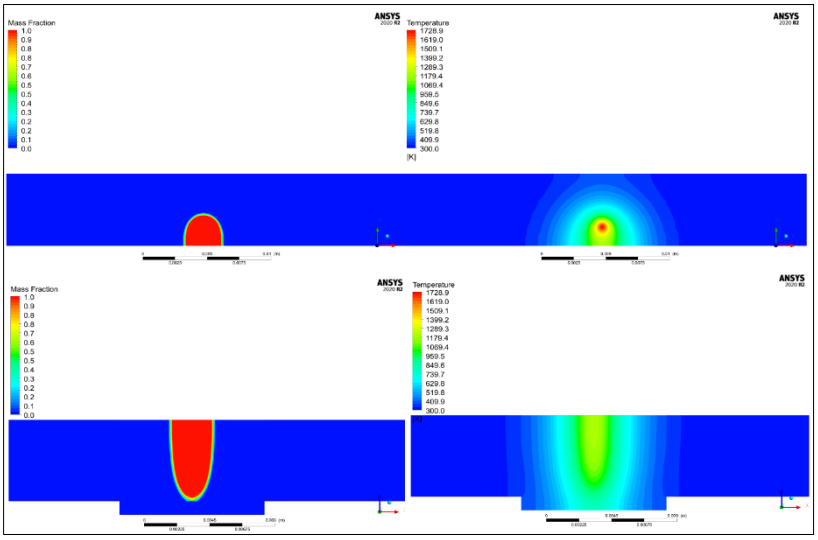
Model doğrulaması yapıldıktan sonra her bir parametre için kullanıcı tanımlı kod çalıştırılmış ve kaynak modellemesi simüle edilmiştir. Belirli aralıklar ile belirlenen parametreler Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Çalışılması belirlenen parametreler

Set Numarası	Volt	Akım	Hız	Maksimum Sıcaklık	Ergimiş Havuz Genişliği
	[kV]	[mA]	[mm/s]	[°C]	[mm]
1	60	40	30	1847,3	3,6
2	60	44	30	2002	4
3	60	42	30	1924,7	3,7
4	60	40	33	1818,2	3,4
5	60	44	33	1970,1	3,7
6	60	42	33	1894,2	3,5
7	60	40	27	1887,7	3,7
8	60	44	27	2046,5	4,3
9	60	42	27	1967,1	4
10	57	40	30	1769,9	3,4
11	57	44	30	1916,9	3,7
12	57	42	30	1843,4	3,5
13	57	40	33	1742,3	3,2
14	57	44	33	1886,6	3,5
15	57	42	33	1814,4	3,3
16	57	40	27	1808,3	3,7
17	57	44	27	1959,2	3,8
18	57	42	27	1883,8	3,7
19	54	40	30	1692,6	2,7
20	54	44	30	1831,8	3,4
21	54	42	30	1762,2	3,2
22	54	40	33	1666,4	2,5
23	54	44	33	1803,1	3,1
24	54	42	33	1734,7	3
25	54	40	27	1728,9	2,9
26	54	44	27	1871,8	3,6
27	54	42	27	1800,4	4

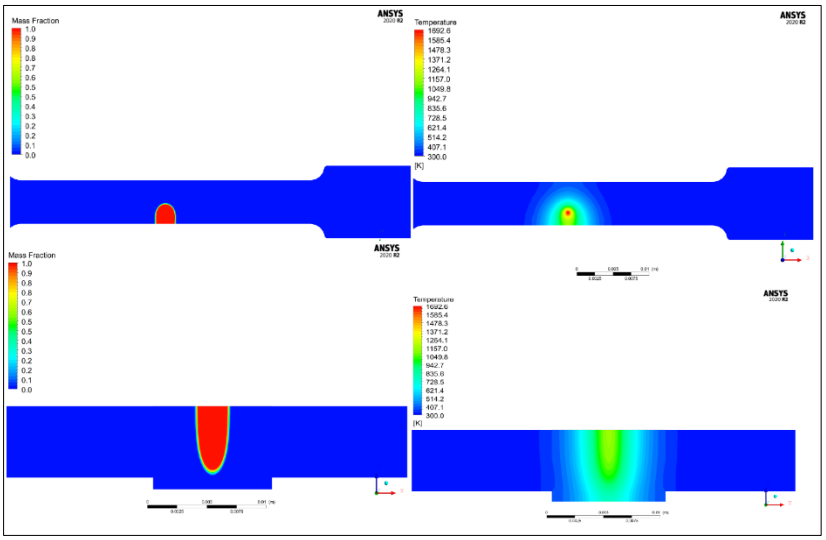
Süre gelen şekillerde benzetim sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlarda ışın malzemenin tam ortasındayken ergime alanı ve bölgelerin sıcaklıkları ayrı ayrı görülebilir. Ayrıca bu sonuçların her biri ayrı ayrı Ek-4'de paylaşılmıştır. Parametreler tablo halinde sunulmuştur.

Şekil 5.5'de 54 kV, 40 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1728,9 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 2,9 mm olarak gözlenmiştir.



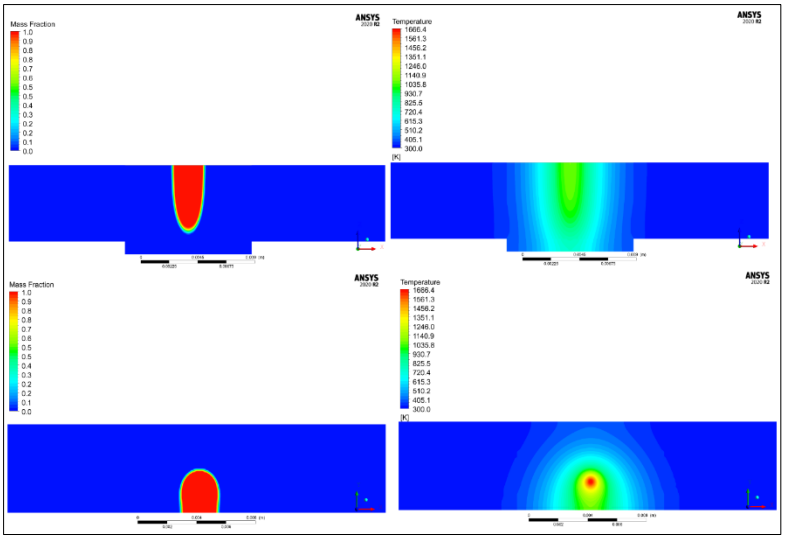
Şekil 5.5. Parametre – 1: 54 kV - 40 mA - 27 mm/s

Şekil 5.6'da 54 kV, 40 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1692,6 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 2,7 mm olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.6. Parametre – 2: 54kV – 40 mA – 30 mm/s

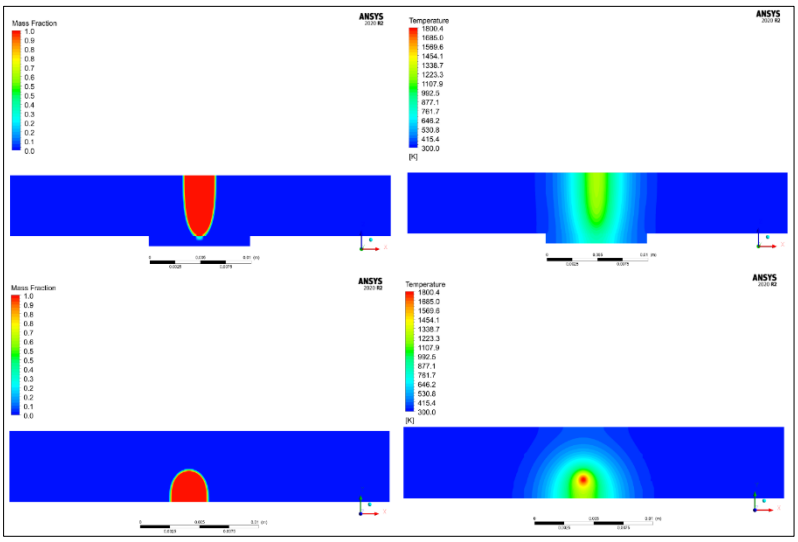
Şekil 5.7'de 54 kV, 40 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1666,4 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 2,5 mm olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.7. Parametre – 3: 54kV – 40 mA – 33 mm/s

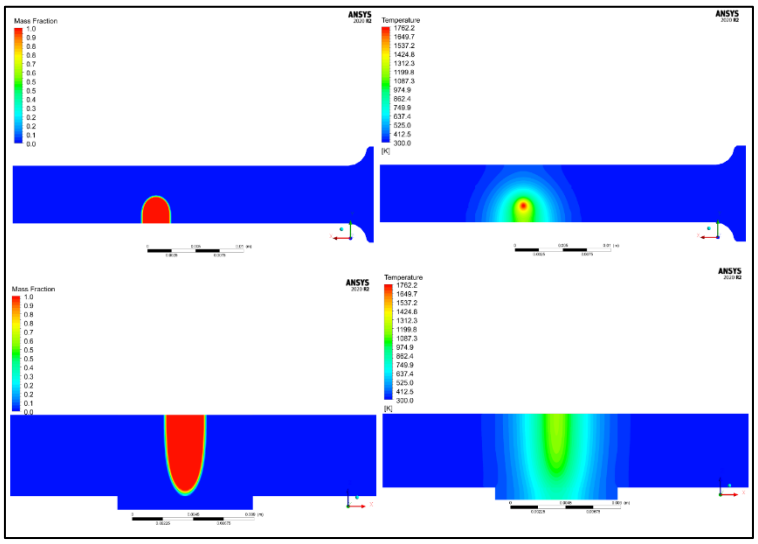
Burada görülmektedir ki akım ve voltaj sabit tutulup kaynak hızı değişken olarak tanımlandığında kaynak kesit yüzeyindeki sıcaklık düşmeye başlamış olup ergiyik havuz da bununla beraber azalmıştır.

Şekil 5.8'de 54 kV, 42 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1800,4 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 4 mm olarak gözlenmiştir.



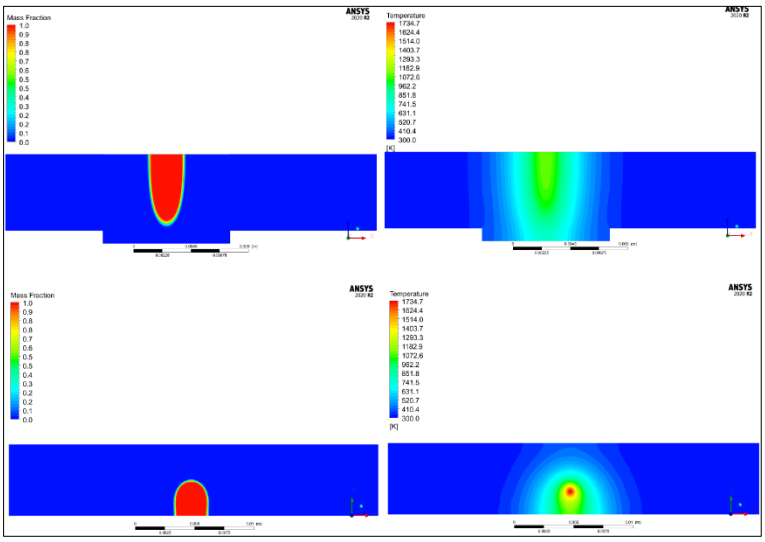
Şekil 5.8. Parametre – 4: 54kV – 42 mA – 27 mm/s

Şekil 5.9'da 54 kV, 42 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1800,4 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,2 mm olarak gözlenmiştir.



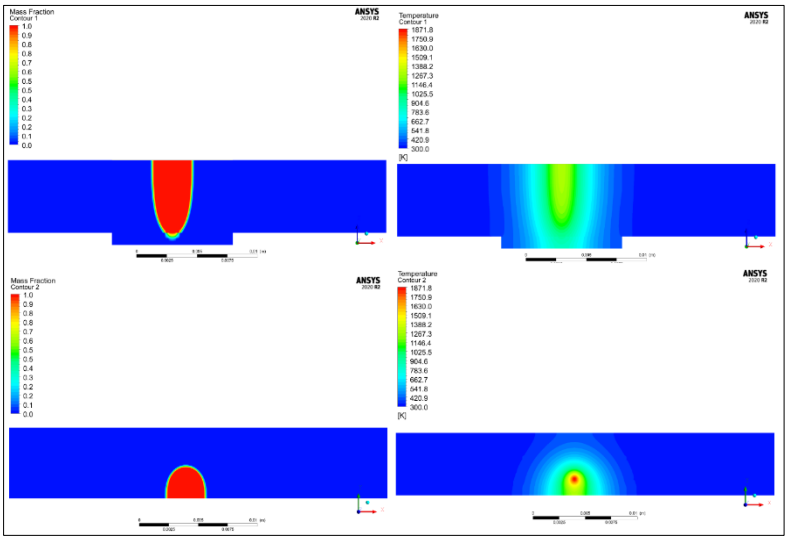
Şekil 5.9. Parametre – 5: 54kV – 42 mA – 30 mm/s

Şekil 5.10'da 54 kV, 42 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1800,4 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3 mm olarak gözlenmiştir.



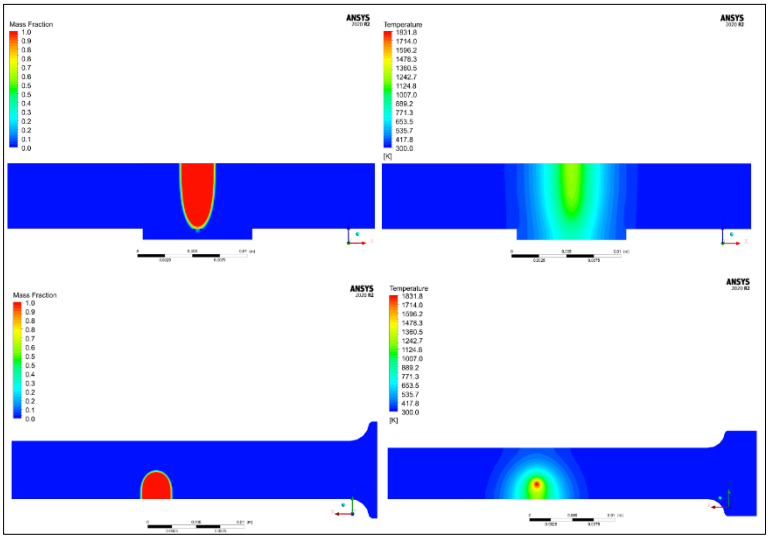
Şekil 5.10. Parametre – 6: 54kV – 42 mA – 33 mm/s

Şekil 5.11'de 54 kV, 44 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1871,8 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,6 mm olarak gözlenmiştir.



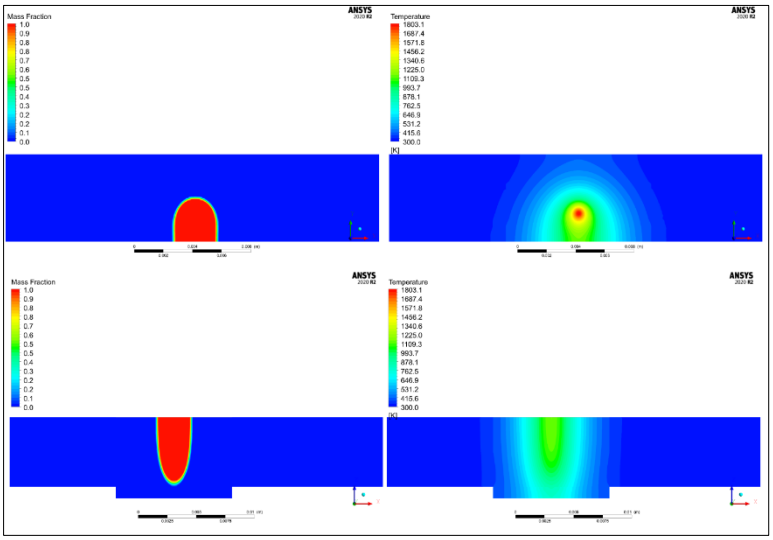
Şekil 5.11. Parametre – 7: 54kV – 44 mA – 27 mm/s

Şekil 5.12'de 54 kV, 44 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1831,8 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,4 mm olarak gözlenmiştir.



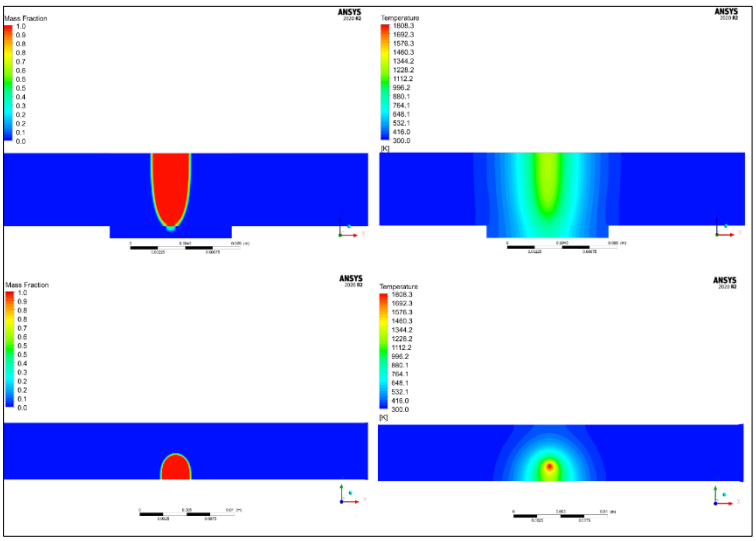
Şekil 5.12. Parametre – 8: 54kV – 44 mA – 30 mm/s

Şekil 5.13'de 54 kV, 44 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1803,1 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,4 mm olarak gözlenmiştir.



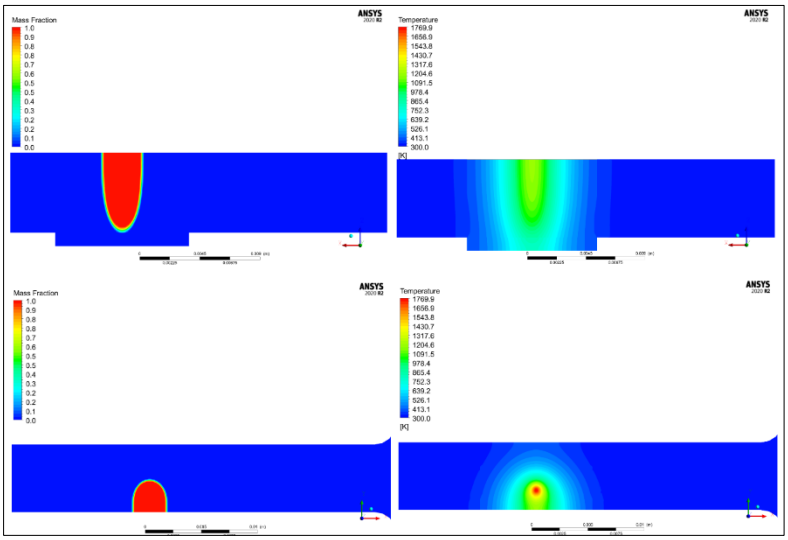
Şekil 5.13. Parametre – 9: 54kV – 44 mA – 33 mm/s

Şekil 5.14'de 57 kV, 40 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1808,3 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,7 mm olarak gözlenmiştir.



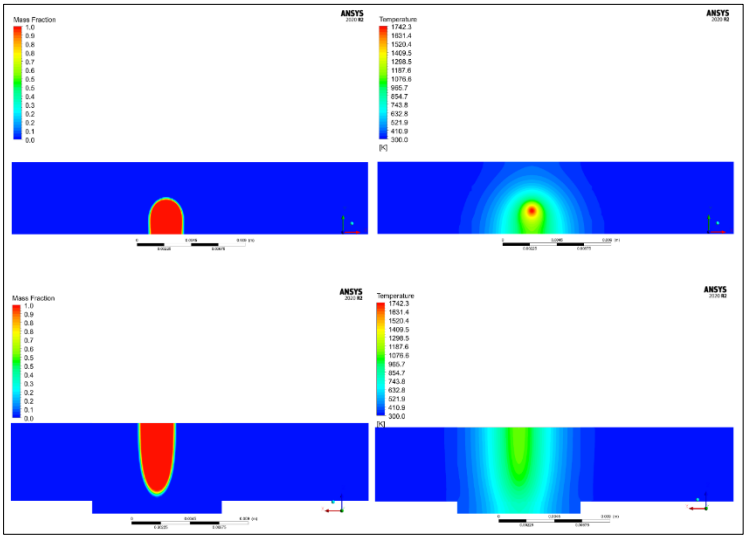
Şekil 5.14. Parametre – 10: 57kV – 40 mA – 27 mm/s

Şekil 5.15'de 57 kV, 40 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1769,9 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,4 mm olarak gözlenmiştir.



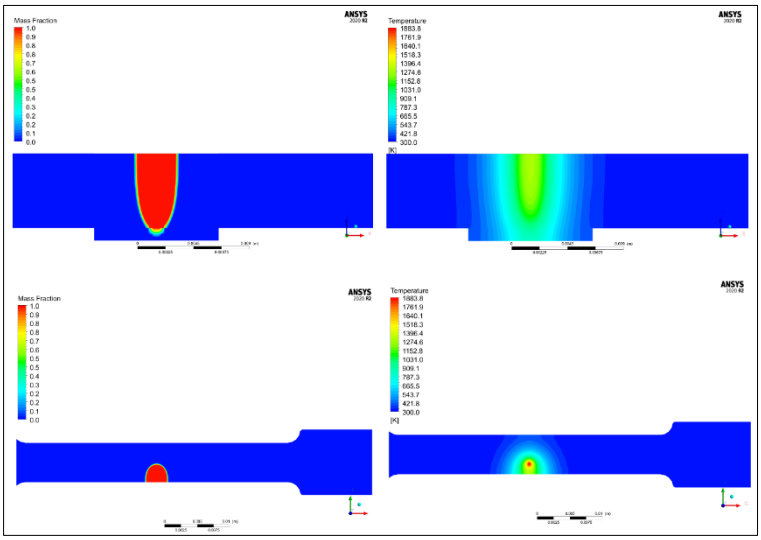
Şekil 5.15. Parametre – 11: 57kV – 40 mA – 30 mm/s

Şekil 5.16'da 57 kV, 40 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1742,3 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,2 mm olarak gözlenmiştir.



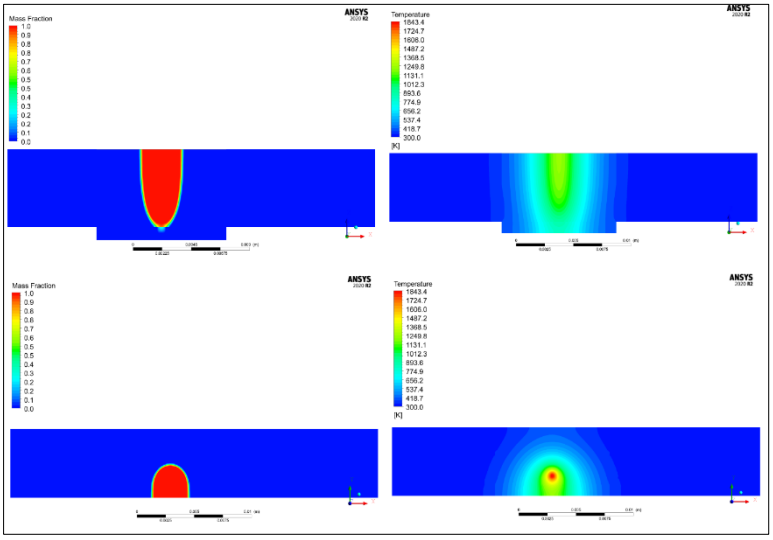
Şekil 5.16. Parametre – 12: 57kV – 40 mA – 33 mm/s

Şekil 5.17'de 57 kV, 42 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1883,8 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,7 mm olarak gözlenmiştir.



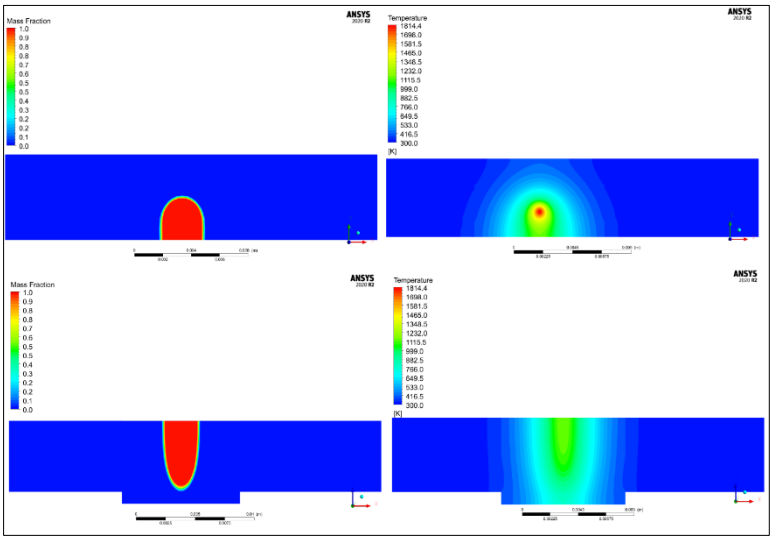
Şekil 5.17. Parametre – 13: 57kV – 42 mA – 27 mm/s

Şekil 5.18'de 57 kV, 42 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1843,4 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,5 mm olarak gözlenmiştir.



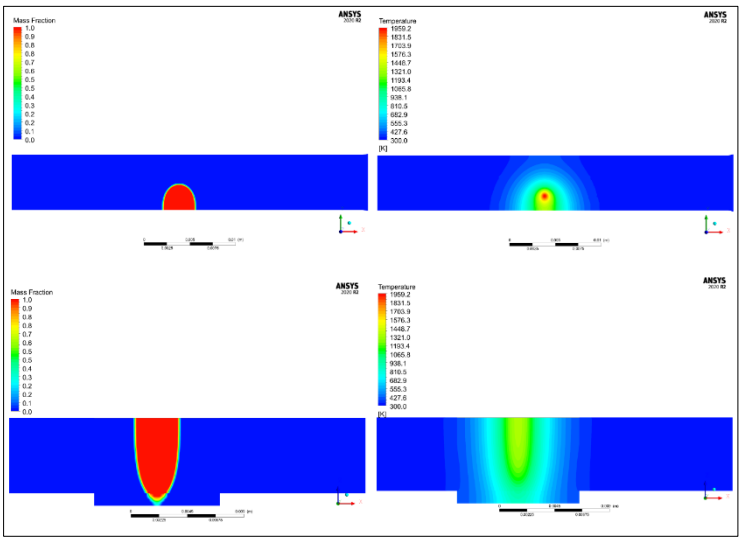
Şekil 5.18. Parametre – 14: 57kV – 42 mA – 30 mm/s

Şekil 5.19'da 57 kV, 42 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1814,4 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,3 mm olarak gözlenmiştir.



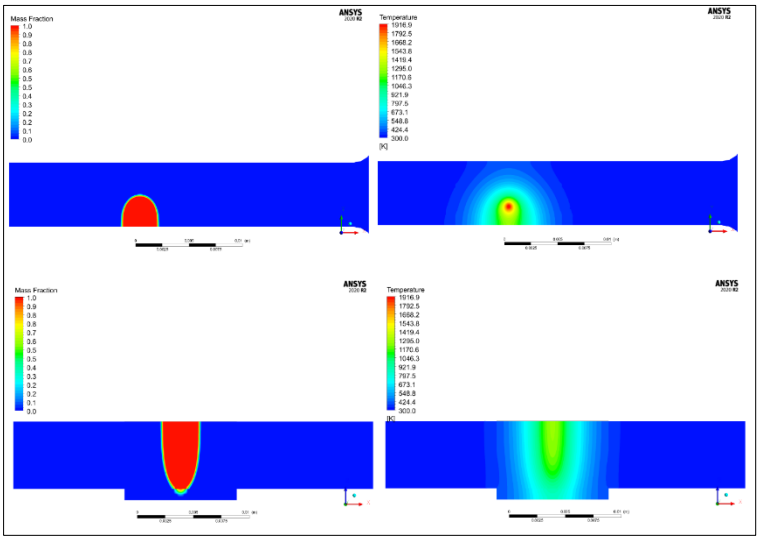
Şekil 5.19. Parametre – 15: 57kV – 42 mA – 33 mm/s

Şekil 5.20'de 57 kV, 44 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1959,2 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,8 mm olarak gözlenmiştir.



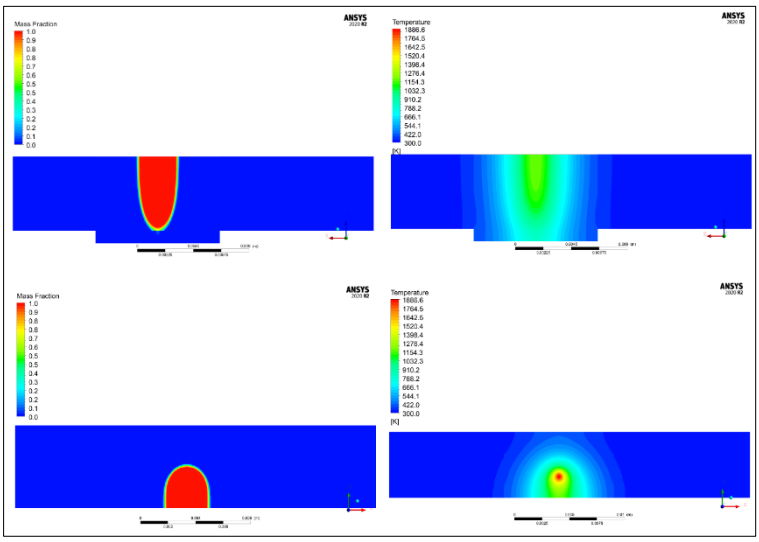
Şekil 5.20. Parametre – 16: 57kV – 44 mA – 27 mm/s

Şekil 5.21'de 57 kV, 44 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1916,9 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,7 mm olarak gözlenmiştir.



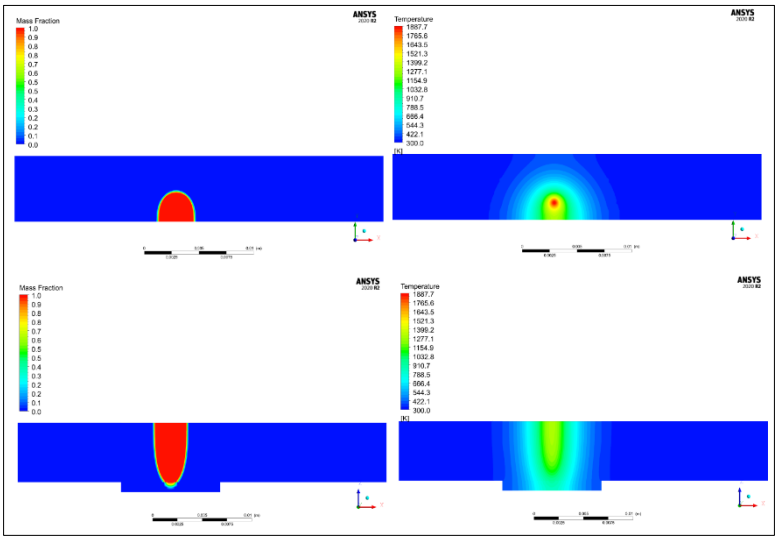
Şekil 5.21. Parametre – 17: 57kV – 44 mA – 30 mm/s

Şekil 5.22'de 57 kV, 44 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1886,6 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,5 mm olarak gözlenmiştir.



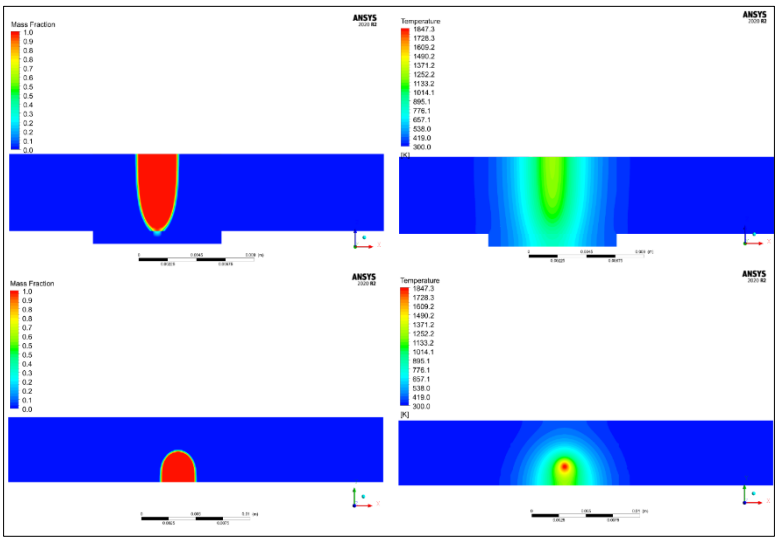
Şekil 5.22. Parametre – 18: 57kV – 44 mA – 33 mm/s

Şekil 5.23'de 60 kV, 40 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1887,7 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,7 mm olarak gözlenmiştir.



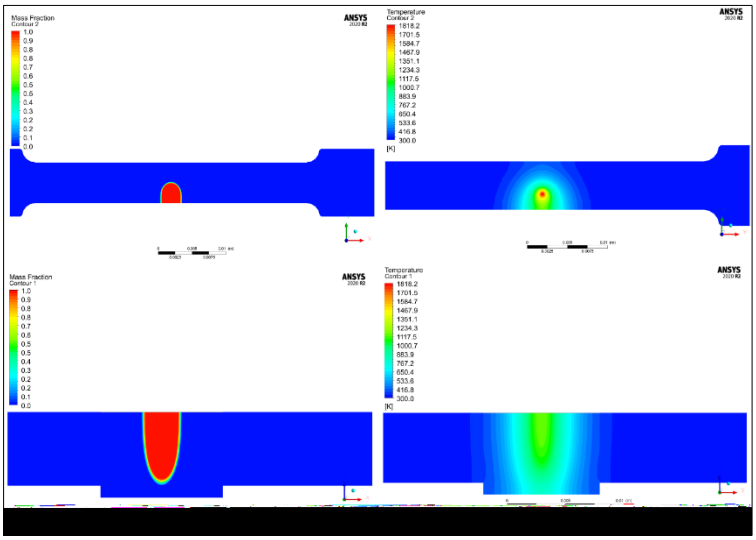
Şekil 5.23. Parametre – 19: 60kV – 40 mA – 27 mm/s

Şekil 5.24'de 60 kV, 40 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1847,3 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,6 mm olarak gözlenmiştir.



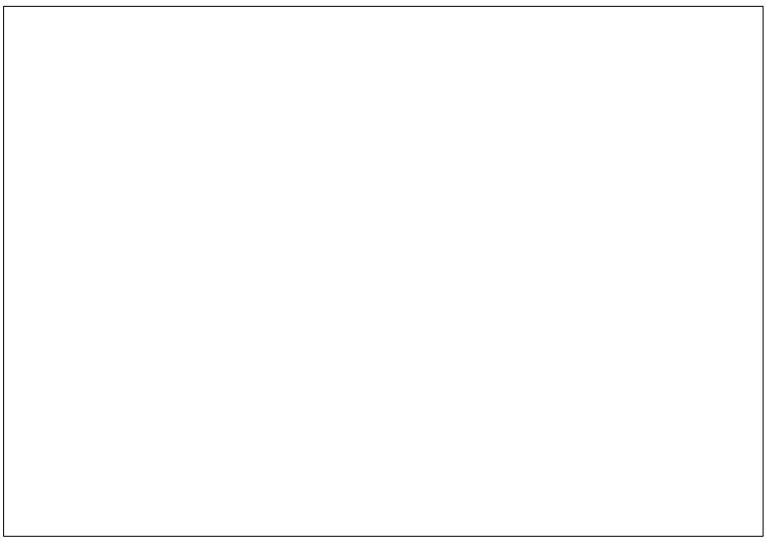
Şekil 5.24. Parametre – 20: 60kV – 40 mA – 30 mm/s

Şekil 5.25’de 60 kV, 40 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1818,2 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,4 mm olarak gözlenmiştir.



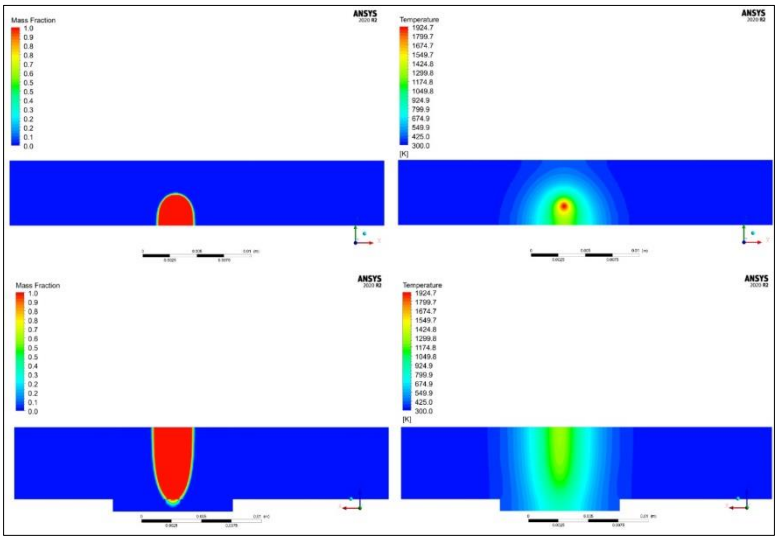
Şekil 5.25. Parametre – 21 60kV – 40 mA – 33 mm/s

Şekil 5.26’da 60 kV, 42 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1967,1 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 4 mm olarak gözlenmiştir.



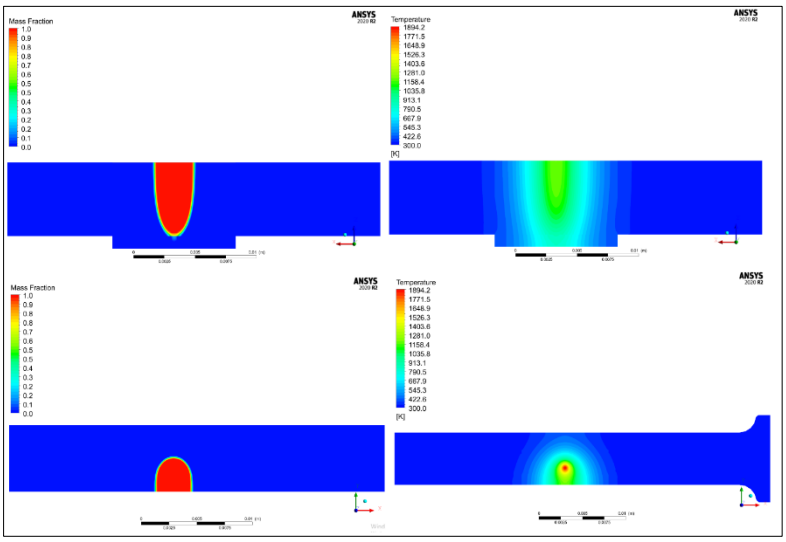
Şekil 5.26. Parametre – 22 60kV – 42 mA – 27 mm/s

Şekil 5.27'de 60 kV, 42 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1924,7 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,7 mm olarak gözlenmiştir.



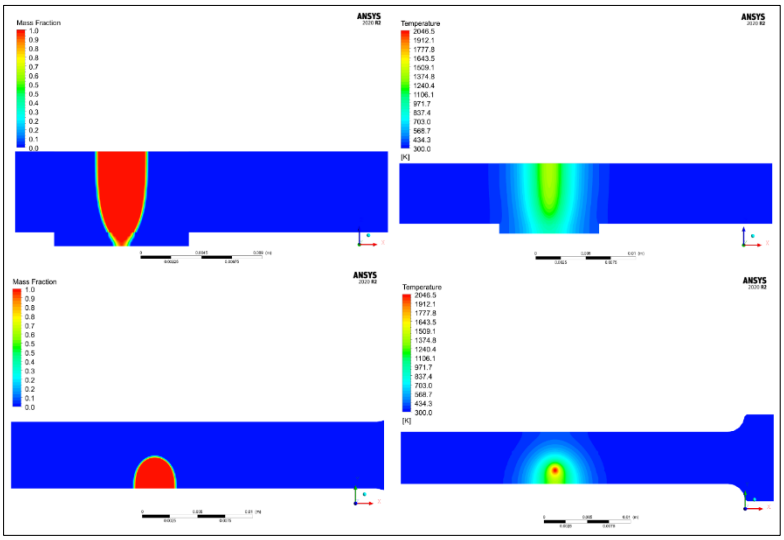
Şekil 5.27. Parametre – 23 60kV – 42 mA – 30 mm/s

Şekil 5.28'de 60 kV, 42 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1894,2 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,5 mm olarak gözlenmiştir.



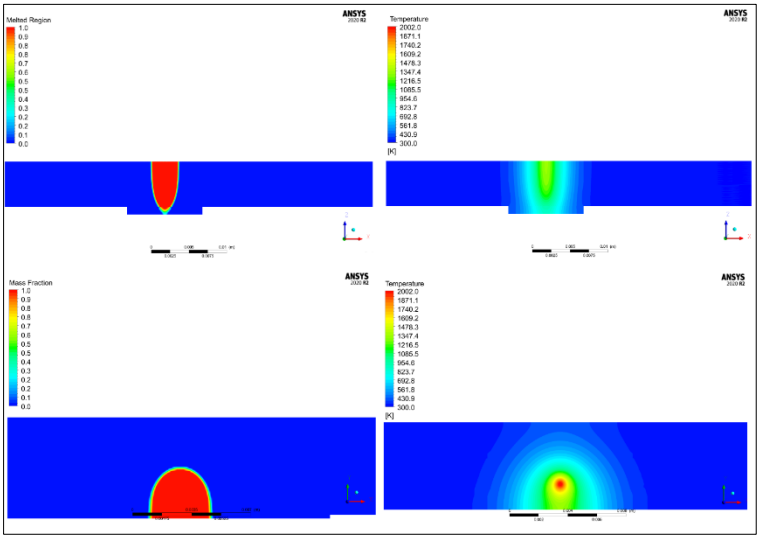
Şekil 5.28. Parametre – 24 60kV – 42 mA – 33 mm/s

Şekil 5.29'da 60 kV, 44 mA ve 27 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 2046,5 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 4,3 mm olarak gözlenmiştir.



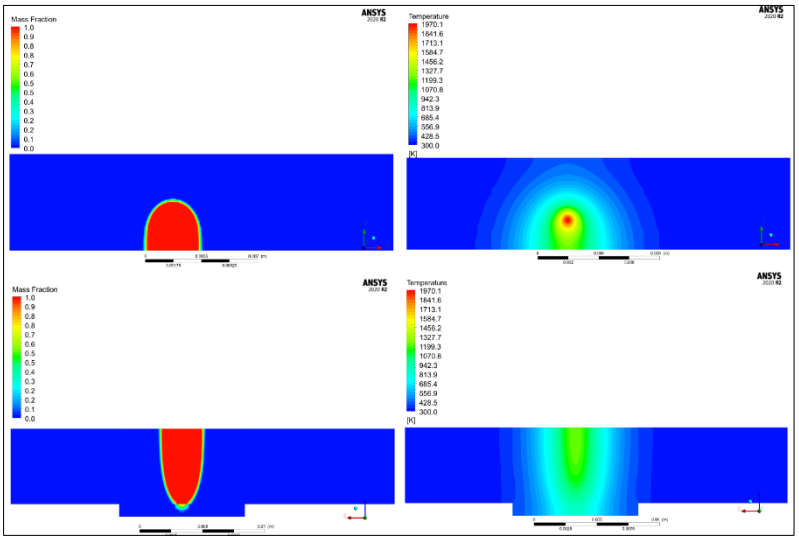
Şekil 5.29. Parametre – 25 60kV – 44 mA – 27 mm/s

Şekil 5.30'da 60 kV, 44 mA ve 30 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 2002 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 4 mm olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.30. Parametre – 26 60kV – 44 mA – 30 mm/s

Şekil 5.31'de 60 kV, 44 mA ve 33 mm/s işlem parametreleri için yüzey sıcaklık değeri ve ergimiş havuz genişlikleri gözükmektedir. Sıcaklık maksimum 1970,1 °C olarak gözükmektedir. Ergimiş bölgenin genişliği yaklaşık 3,7 mm olarak gözlenmiştir.



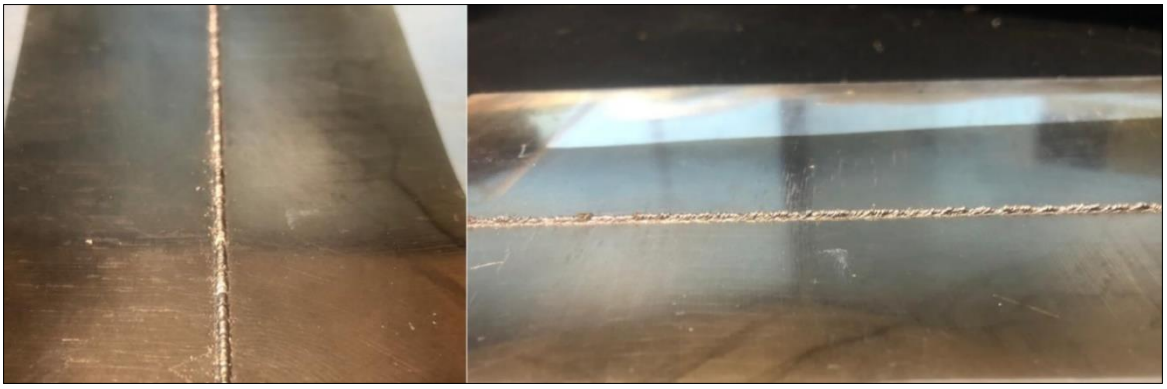
Şekil 5.31. Parametre – 27 60kV – 44 mA – 33 mm/s

Isıl analizlerin sonuçları 7. Bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir. Ancak sonuçlar açıkça gösteriyor ki kaynak esnasında gücü arttırmak, parça yüzeyinde neredeyse malzemeyi buharlaştıracak sıcaklıklara neden olmaktadır. (Alüminyum 6061 T6 buharlaşma sıcaklığı 2425 °C Bkz. Çizelge 5.2 [8])

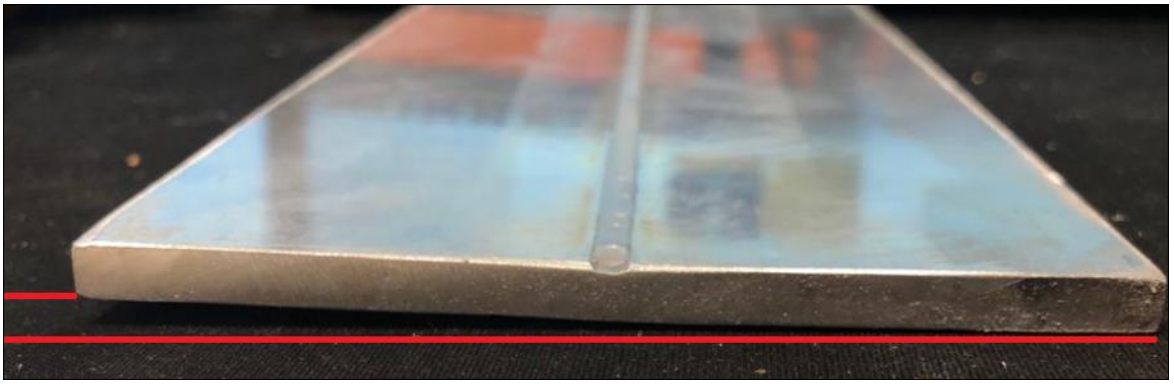
Çizelge 5.2. Alüminyum 6061 T6 malzeme özellikleri

Malzeme	Ergime Sıcaklığı [°C]	Buharlaşma Sıcaklığı [°C]	Özgül Isı [J/kg*K]	Termal İletkenlik Katsayısı	Yayınım Katsayısı [□]	Termal Uzama Katsayısı [1/10^6*K]
Alüminyum 6xxx Serisi	630	2425	940	188	0,02-0,4	236

Bu durum birçok farklı üretim problemlerine yol açmaktadır. Kaynak esnasında yüzeyin altına geçip, buharlaşıp daha sonra yoğunlaşarak yüzeye yapışan malzemeler yüzey üzerinde çentik etkisi yaratabilecek deformasyonlara neden olmaktadır (Bkz. Resim 5.1). Ayrıca yüksek sıcaklık malzemede işlem sonrası olan soğuma esnasında iki parça arasındaki düzlemselliğin kaybolmasına neden olmaktadır.(Bkz. Resim 5.2)

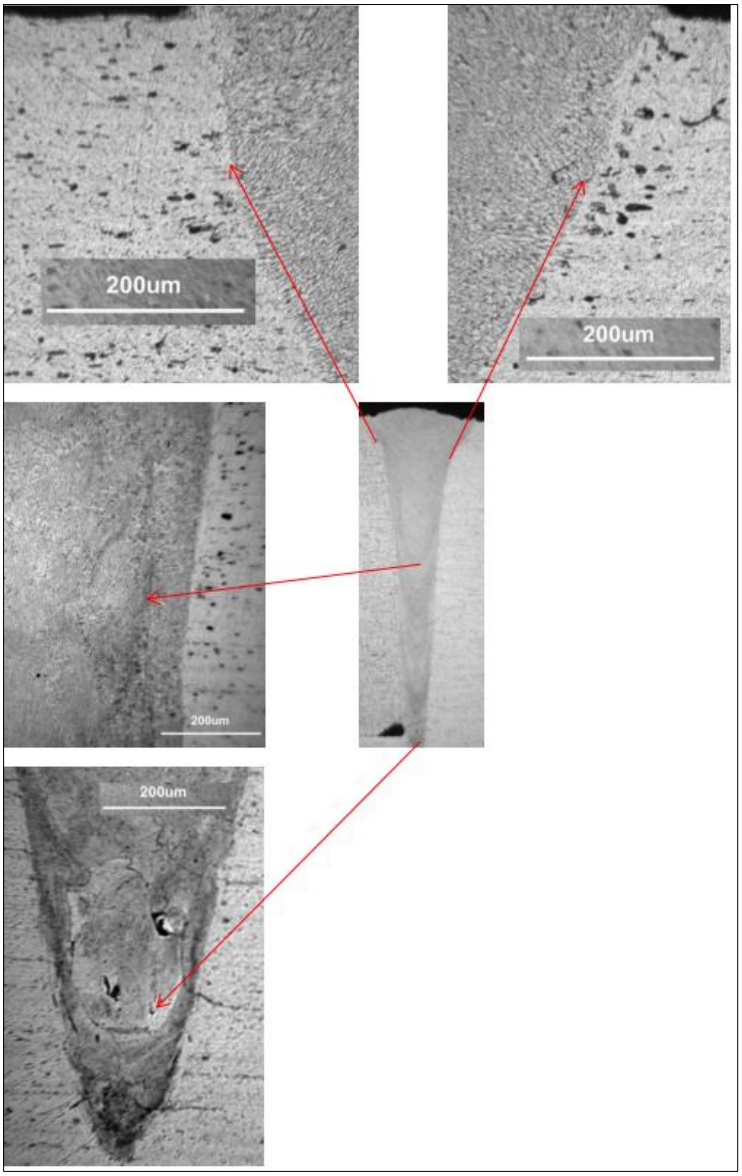


Resim 5.1. Fazla enerji kullanımında çentik etkisi yaratılmasına örnek



Resim 5.2. Fazla enerji kullanımında düzlemselliğin kaybolmasına örnek

Bu aşamada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise kaynaklı birleşimde oluşan ısıl etkilenmiş bölgelerdir. Bilindiği üzere elektron ışın kaynağı işleminde anahtar deliği şeklinde bir ısıl etkilenmiş bölge beklenmektedir. Buna örnek olarak Resim 5.3 incelenebilir [40].



Resim 5.3. Örnek anahtar deliği şeklindeki kaynak görseli

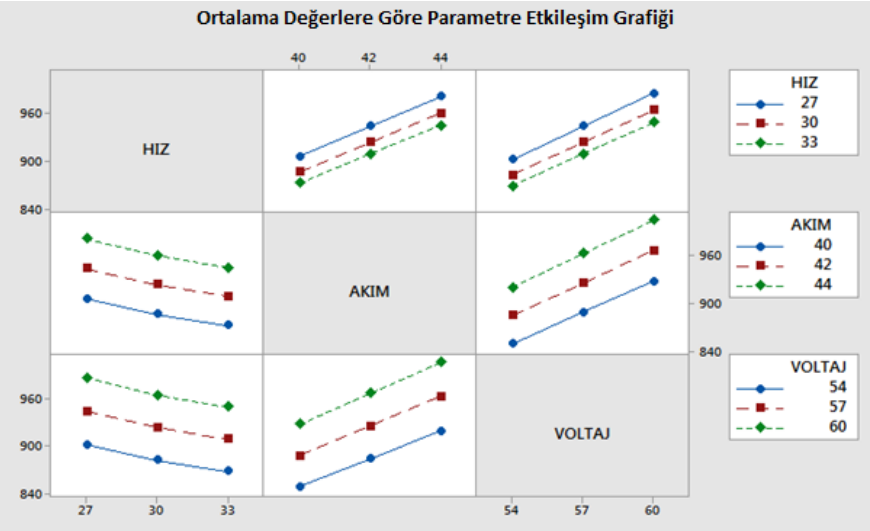
Thomas E Yost, ısı girdisi ne kadar fazla olursa ikincil ısıl etkilenmiş bölgenin genişliğinin fazla olduğunu belirtmiştir. Isıl etkilenmiş bölgeler arasındaki yapısal değişim ne kadar fazla ise kopma mukavemetine etkisinin de o kadar olduğu belirtmiştir. Buna ilaveten ısı girdisi arttığı zaman kaynaklı birleşimlerin yüzeylerinde yanma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca şekil 5.32'de de görüldüğü üzere kaynak dikişinde boncuk şeklinde malzemenin alt kısmında sarkmalar oluştuğu gözlenmiştir. Bunun nedeni daha önce de bahsedildiği üzere elektron ışın kaynağında akım hızındaki artışın kaynak dikiş genişliğine ve nüfuziyetine etkisine atfedilebilir. Wei vd., 2000 yılında yaptığı çalışmada akım hızındaki artışın kaynak bölgesinde buharlaşma, yanma veya kaynak dikişinin malzemenin alt yüzeyine doğru sarkmalara neden olduğu belirtmiştir. Kaynak bölgesindeki ısı tesiri altındaki bölge

oluşumuna; kaynaklanan parçanın boyutlarının, kaynak yapılan yüzeyin şeklinin, kaynak yapılacak yüzeyin düzlemselliğinin, yüzey pürüzlülüğünün ve kaynak bölgesine verilen enerjinin doğrudan etkili olduğu hem literatür çalışmaları hem de analiz sonuçları ile görülmektedir [40, 47, 48].

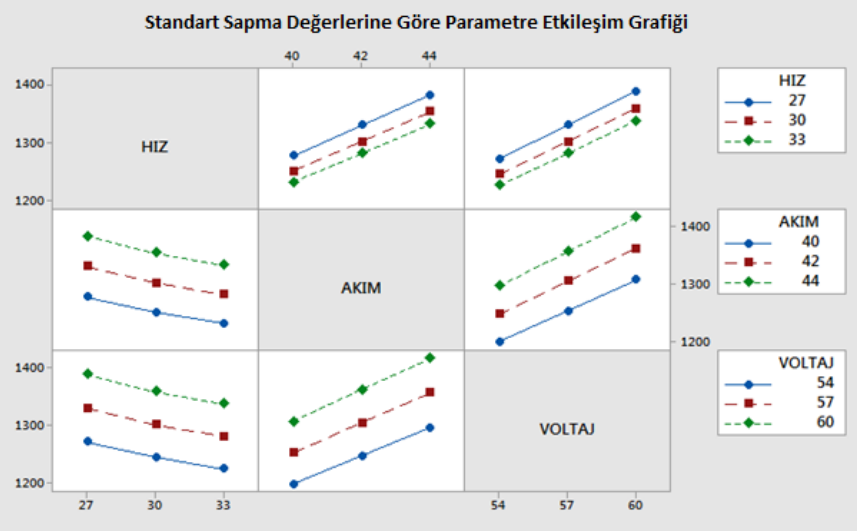
5.4. Deney Tasarımı

Çizelge 5.1'de bahsedilen, analiz sonucunda elde ettiğimiz maksimum sıcaklık ve ergimiş havuz genişliği değerleri ışığında hem deney tasarımı hem de varyans analizi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı için Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi deney tasarım metodu üç faktörlü ve üç seviyeli olarak hesaplanmıştır. Normal şartlarda üç faktörlü ve üç seviyeli bir deney için 3^3=27 deney seti hazırlamak gerekmektedir. Taguchi'nin deney tasarım metodu ile ortogonal dizinler kullanması deneylerdeki baskın parametrelerini görülmesine imkan sağlar. Deney tasarımı analizi ve varyans analizlerinin yapılması için Minitab 18.0 yazılımı kullanılmıştır.

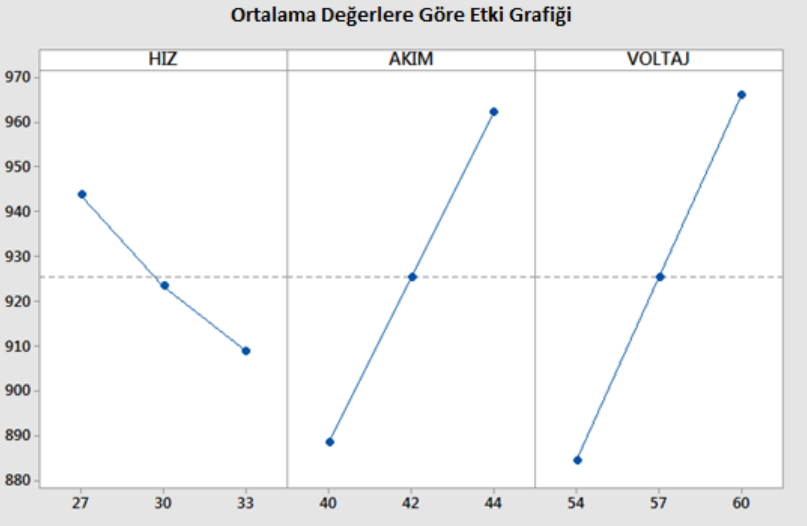
Bu bilgiler doğrultusunda, aşağıdaki sıra gelen şekillerde ortalama ve standart sapmaya göre sıcaklığın etkileri görülmektedir.



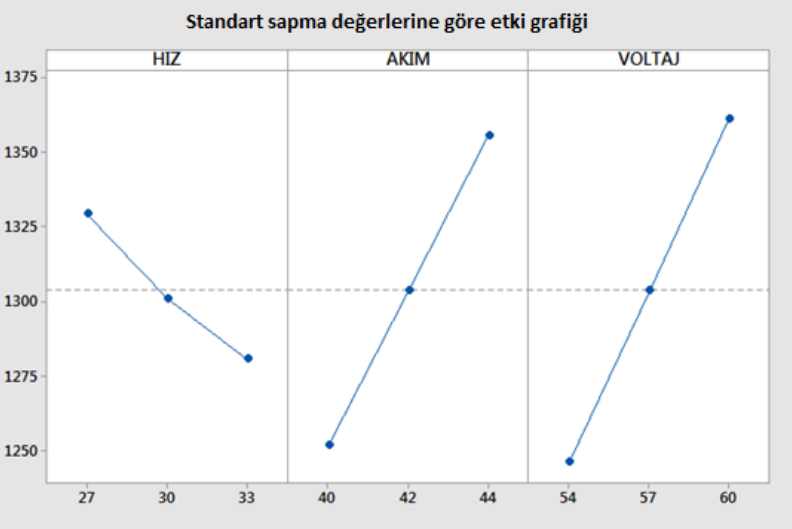
Şekil 5.32. Ortalama değerlere göre parametre etkileşim grafiği



Şekil 5.33. Standart sapma değerlerine göre parametre etkileşim grafiği

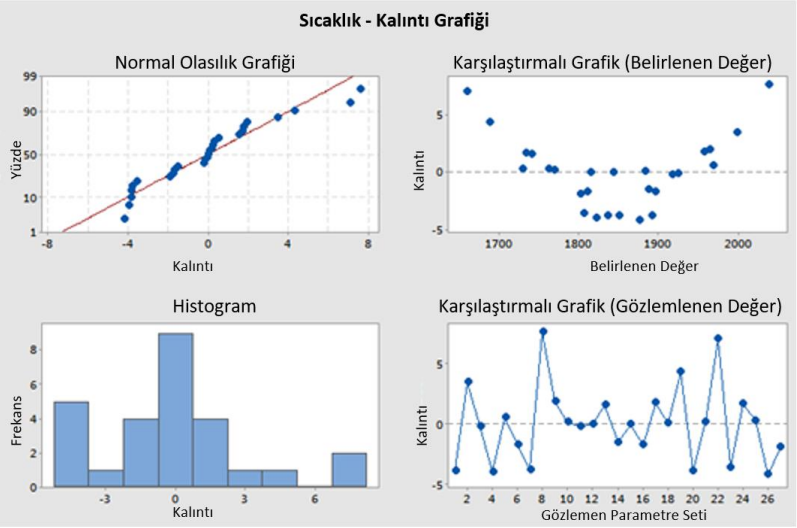


Şekil 5.34. Ortalama değerle göre etki grafiği

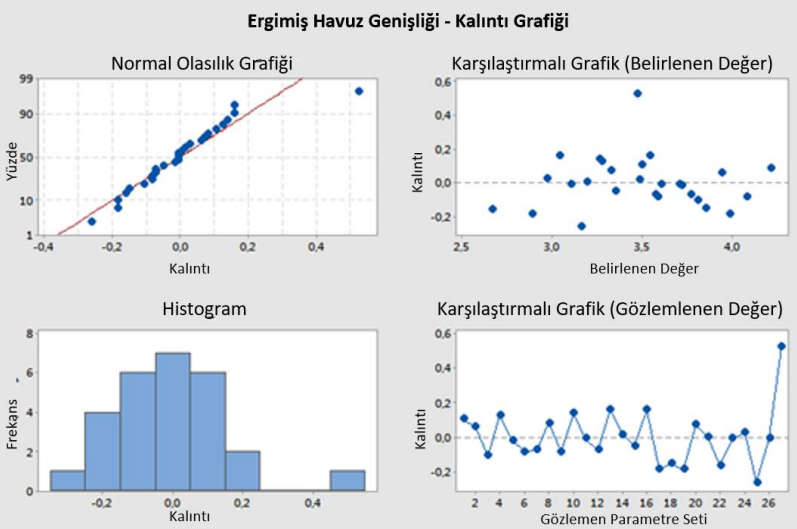


Şekil 5.35. Standart sapma değerlerine göre etki grafiği

Taguchi çalışmasının akabinde sıcaklık – kalıntı ve ergime havuzu – kalıntı grafikleri için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları sırasıyla Şekil 5.36 ve 5.37 gösterilmiştir.



Şekil 5.36. Ortalama değerle göre etki grafiği



Şekil 5.37. Ortalama değerle göre etki grafiği

Bütün bu çalışmaların sonucunda yapılan Taguchi analizine göre yapılmış olan varyans analizi sonuçları Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Taguchi analizine göre yapılan varyans analiz tablosu

Varyans Analizi (ANOVA)					
Parametre İsmi	Dağılım	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Ortası	F - Değeri	P - Değeri
Hız	9,12%	21804	10902,1	858,06	0,00
Akım	40,86%	97741	48870,5	3846,41	0,00
Voltaj	49,91%	1119381	59690,6	4698,02	0,00
Hata	0,11%	254	12,7		
Toplam	100,00%				

Varyans analizinden görülebileceği üzere bu çalışmada akım ve voltaj parametrelerinin baskın olduğu açıkça gözükmektedir. Bu çalışma kapsamında analizin doğruluğunu göstermek ve çalışmayı çeşitlendirmek adına bütün parametrelerin kaynaklı numune işlemleri icra edilmiştir. Ancak açıkça gözükmektedir ki "hız" parametresi değişken olarak dikkate alındığında penetrasyon derinliği dışındaki etkisinin oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür.

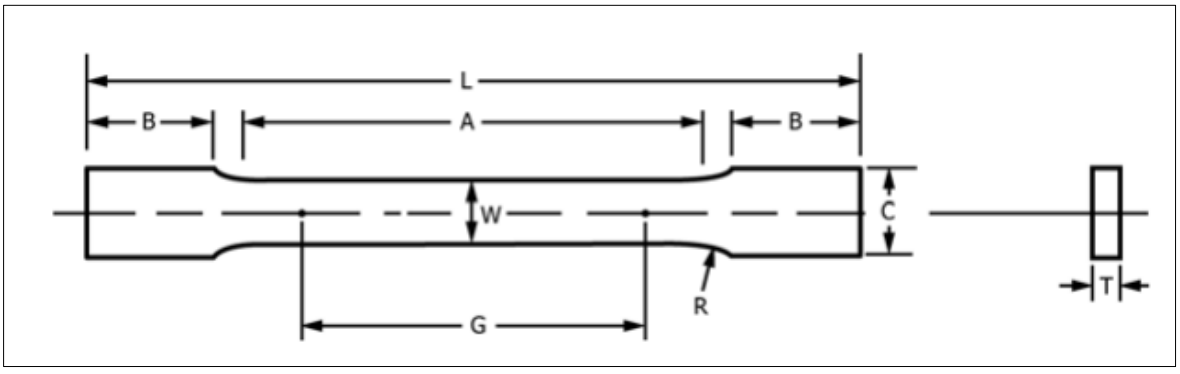
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan kaynak işlemi için kullanılan malzeme, numune hazırlama süreçleri, yöntemleri ve araçları tanıtılmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere kaynak yapılacak malzemenin seçiminde havacılık endüstrisindeki yaygın kullanım göz önüne alınmıştır. Bu nedenle daha önce de farklı kaynaklama yöntemleri ile birleştirmesi yaygın olan ve korozyon direncine sahip olan 6XXX serisi alüminyum alaşımları içerisinde en yüksek dayanıma sahip alaşımlardan biri olan Al6061 kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için Steigerwald marka 70 kV model elektron ışın kaynağı makinesi kullanılmıştır. Analizin yönlendirmesi ve elektron ışın kaynağı tezgâhında yapılan çalışmalar sonucunda kaynak parametrelerinin etkileri ayrı ayrı belirlenmiş ve incelenmiştir. Aşağıdaki bölümlerde sunulan deneysel çalışmalarla en uygun parametrelerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

6.1. Numune Hazırlıma Süreçleri

6.1.1. Deney numunelerinin belirlenmesi

Boyutlar için ASTM E8/E8M-16 standardına göre numuneler kesilip hazırlanmış, kaynak işlemleri gerçekleştirilmiş ve bu standarda göre çekme testleri yapılmıştır (Şekil 6.1, Çizelge 6.1) [49].



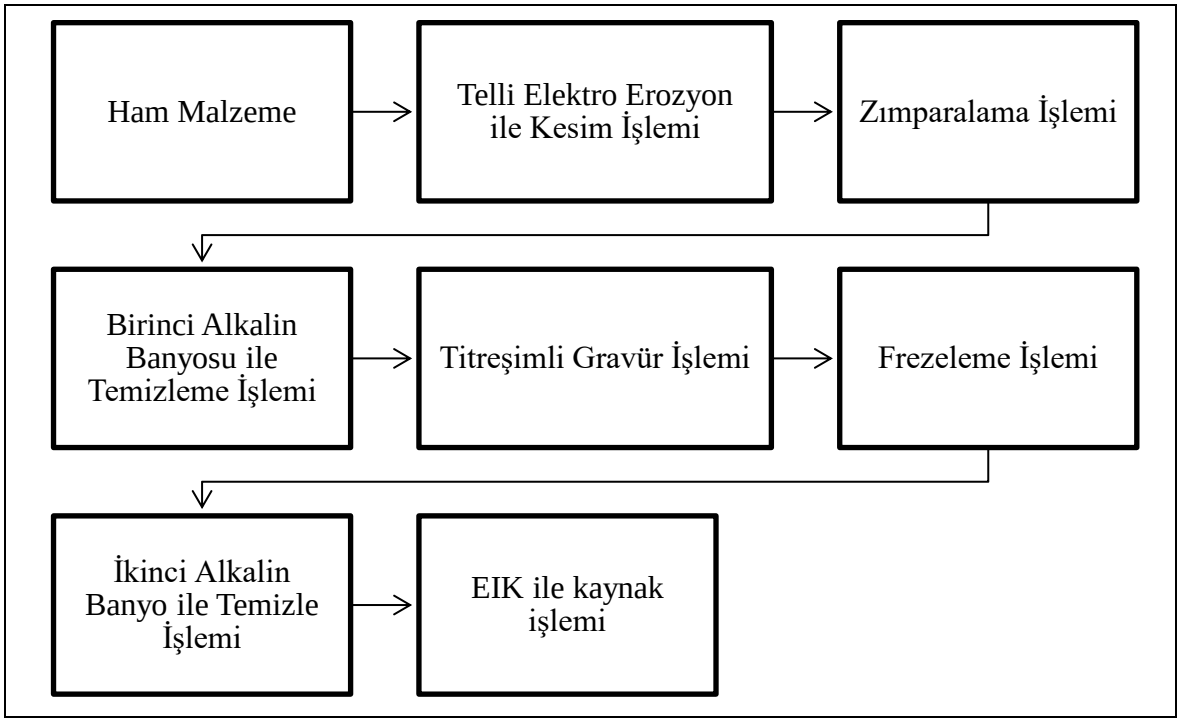
Şekil 6.1. ASTM E8/E8M – 16a düz tip numune boyutlandırma

Çizelge 6.1. ASTM E8/E8M-16a numune boyutları

Çekme Deney Numunesi [mm]	
Kalınlık	6
Boy [G]	25.0 ± 0.1
Genişlik [W]	6.0 ± 0.1
Dip Radyus [R]	6
Tüm Boy [L]	100
Düşürülmüş Kesit Uzunluğu [A]	32
Bağlama Çenesi Uzunluğu [B]	30
Bağlama Çenesi Kalınlığı [C]	10

6.1.2. Numunenin üretilmesi

Numune üretilmesi için düşünülen 3 farklı parametreye ait 3'er farklı parametre değerleri kullanılarak her bir parametre setinden 4'er adet olmak üzere 108 adet örnek üretilmiştir. Numunelerin üretilmesinde Şekil 6.2'deki gibi üretim süreci izlenmiştir.



Şekil 6.2. Numune üretim süreci

Bu şemaya göre parçalar ham malzeme halinde iken önce numunenin boyutlandırılması için telli elektro erozyon tezgâhı ile nihai ölçüler elde edilmiştir. Bu işlem için kullanılan tel erozyon tezgâhı Agie Charmiles marka olup CUT E 600 modelidir. Kesim sırasında yüzeyin

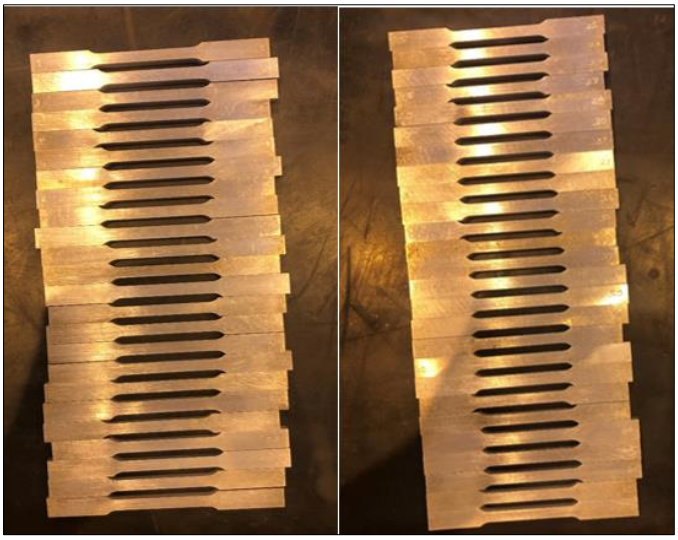
hassas çıkması için 5 mm/dakika ilerleme hızıyla su içerisinde kesim yapılmıştır. Bu aşamadan sonra üç aşamalı olarak önce #200 sonrasında #300 ve #500 numaralı zımparalar ile zımparalama işlemi el ile gerçekleştirilmiştir.

Daha sonrasında ise numunelerin üzerindeki talaş tozları ve benzeri pislikleri ortadan kaldırmak için alkalin banyosuna tabi tutulmuştur. Alkalin banyosu 46 °C'de olup Dolphin markadır. Alkalin banyosu makinesinin resmi Resim 6.1'de görülebilir.



Resim 6.1. Alkalin banyosu makinesi

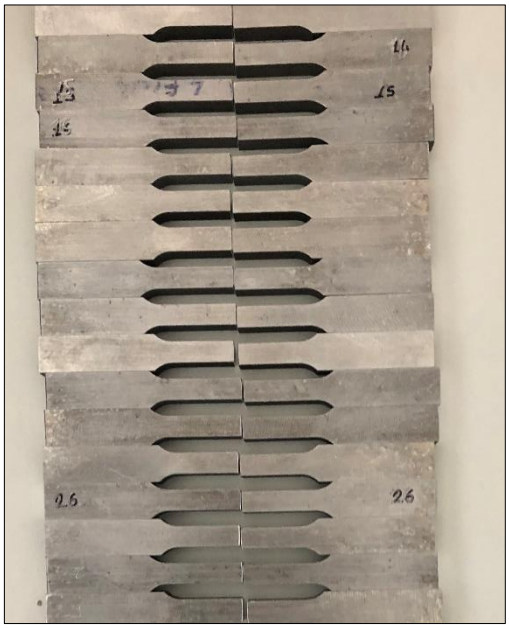
Alkalin banyo sonrası numuneler Resim 6.2'de görülebilir.



Resim 6.2. Alkalin banyo sonrası

Alkalin banyo sonrasında her bir numuneye 1'den başlayarak 108'e kadar numara verilmiştir. Bu işlem titreşim ile gravürleme kalemi olan "RED ROOSTER" marka "RRI-9010" modelli gravürleme gereci kullanılarak numaralandırılmıştır. Bu numaralandırılmanın nedeni takibini kolaylaştırmaktır.

Deney numunelerinin kaynak işleminin yapılabilmesi için freze işlemi "Breton Raptor 1200/2T" marka freze tezgâhı ile ikiye kesilmiştir. Aynı şekilde bu işlem sonrasında da alkalin banyosu yapılmış olup numuneler elektron ışın kaynağı işlemine hazır hale gelmiştir. Resim 6.3'de numunelerin ikiye kesilmiş görülmektedir.



Resim 6.3. Freze işlemi sonrası numunelerin görünüşü

Bütün bu numune hazırlık işlemlerinden sonra parçalar elektron ışın kaynağı sürecine hazır hale gelmiştir.

6.2. Elektron Işın Kaynağı Süreci

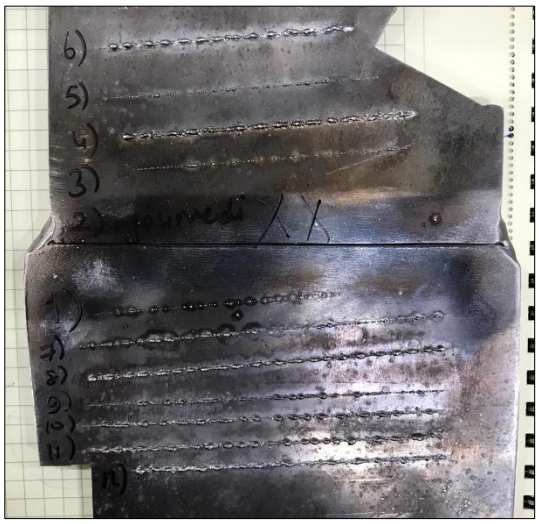
6.2.1. Belirlenen parametrelerin denenmesi

Simülasyon sonucu elde edilen veriler değerlendirilerek bir kaynak parametre seti oluşturulmuştur. Kaynak parametre setini oluştururken aynı kalınlıktaki (6 mm) aynı malzemeden uzun bir levha üzerine denemeler yapılmıştır. Bu denemeler daha önceki

tecrübelerden gelen bilgiler ile denenmiş olup, bu tez kapsamında yazılan kod ile de denendikten sonra kaynak işlemine geçilmiştir. Bu denemeler Resim 6.4 ve 6.5'de görülebilir.



Resim 6.4. Levha denemeleri önden görünüş



Resim 6.5. Levha denemeleri arkadan görünüş

Bu denemeler sırasında kullanılan parametreler ve bunlara yapılan yorumlar Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Denenen parametreler ve yorumları

Deneme Numarası	Volt [kV]	Akım [mA]	Hız [mm/s]	Yorum
1	60	38	30	Levha arkasına geçmedi
2	60	20	15	Levha arkasına geçmedi
3	60	40	30	Levha arkasına neredeyse geçti
4	60	40	20	Levha arkasına çok geçti
5	60	40	28	Levha arkasına neredeyse geçti
6	60	40	25	Levha arkasına çok geçti
7	60	42	30	Kullanılabilir
8	60	44	30	Levha arkasına çok geçti
9	60	42	29	Levha arkasına çok geçti
10	60	43	29	Levha arkasına çok geçti
11	60	42	28	Kullanılabilir
12	60	43	28	Kullanılabilir

Analiz sonuçlarına göre parametre setleri belirlenmiştir ve bu parametrelere göre kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler önceki bölümde Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Belirlenen 27 adet parametre setine ait her bir parametre için 4 adet numune üretilmesi kararlaştırılmıştır. Toplam 108 adet numune kaynak işlemi için belirlenmiştir.

6.2.2. Numunenin fikstürlenmesi

Kaynak işlemi sırasında numunelerin sabitlenmesi ve her bir parçanın alın alına birleştirilmesi için konik olarak birbirini iten ve numunelerin birbiri üzerine çıkmaması için yüzeyden basmayı sağlayan bir mengene tasarlandı ve üretildi (Resim 6.6 ve 6.7).



Resim 6.6. Kullanılan mengene ve numunenin mengenedeki görünüşü



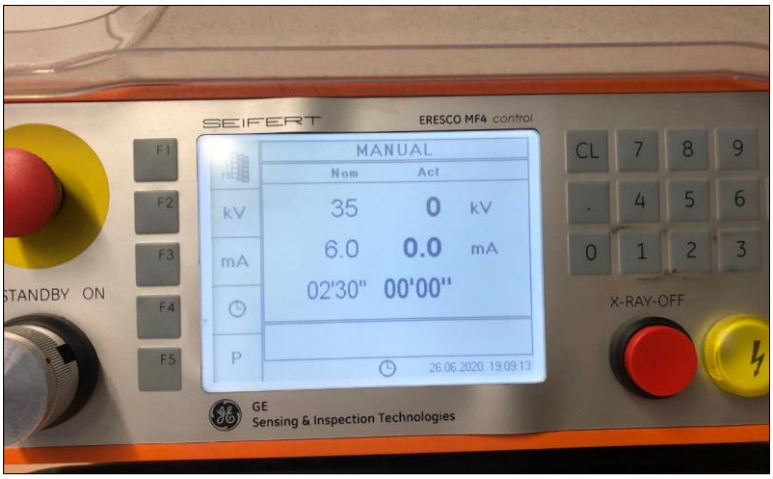
Resim 6.7. Kullanılan mengenenin uzaktan görünüşü

Numuneler taşınması sırasında veya sabitlenmesi sırasında birbirilerinden kopmaması için mikro punta işlemine tabi tutulmuştur. Fikstürleme işlemi her bir parça için ayrı ayrı yapılmış olup her numune için en uygun sıkma torku ile sıkılmıştır. Numunelerin başına ve sonuna parçalar eklenmiş olup kaynak işlemi sırasında kaynak girişi ve çıkışında kaynaklama işleminde ısının kontrolünün optimum bir şekilde uygulanması sağlanmıştır. Numuneler uygun bir şekilde fikstürlendikten sonra kaynak işlemine geçilmiştir.

6.3. Test İşlemleri

6.3.1. Radyografi testleri

Parçalar kaynaklandıktan sonra her bir numunenin radyografisi çekilerek bu parçaların içerisindeki kaynak boşluklarına bakılmıştır. Radyografi çekilirken kullanılan cihaz "GE Sensing & Inspection Technologies" marka ve "Bauartkennzeichen Bfs 01/04R" modeli kullanılmıştır. Bilindiği üzere radyografi ölçümlerinde kullanılan parametreler malzemenin özelliklerine ve kalınlıklarına göre değişkendir ve ölçümün doğru yapılmasında oldukça önem arz etmektedir. Bu parametreler daha önceden doğrulanmış örneklerle belirlenmiştir (Bkz. Resim 6.8). Radyografi için hazırlanan numunelerin baskı yüzeyi üzerindeki görüntüsü Resim 6.9'da gösterilmektedir.

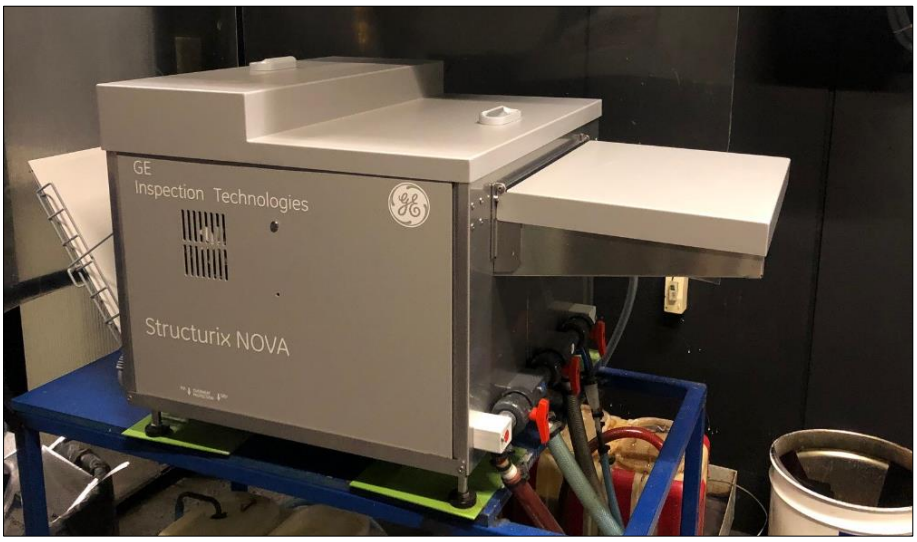


Resim 6.8. Radyografi parametreleri



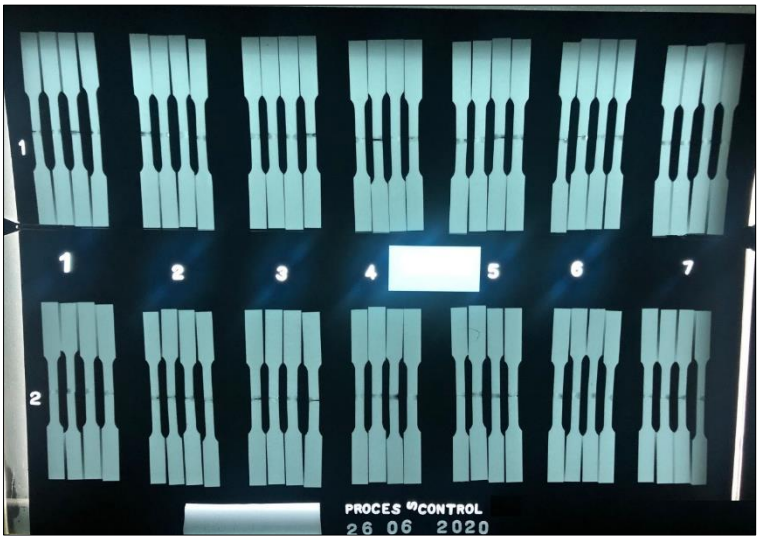
Resim 6.9. Baskı yüzeyi üzerindeki numuneler

Radyografisi çekilen bu örnekler “GE Inspection Technologies” marka ve “Structurix NOVA” modeli ile karanlık odada bastırılmıştır (Resim 6.10).

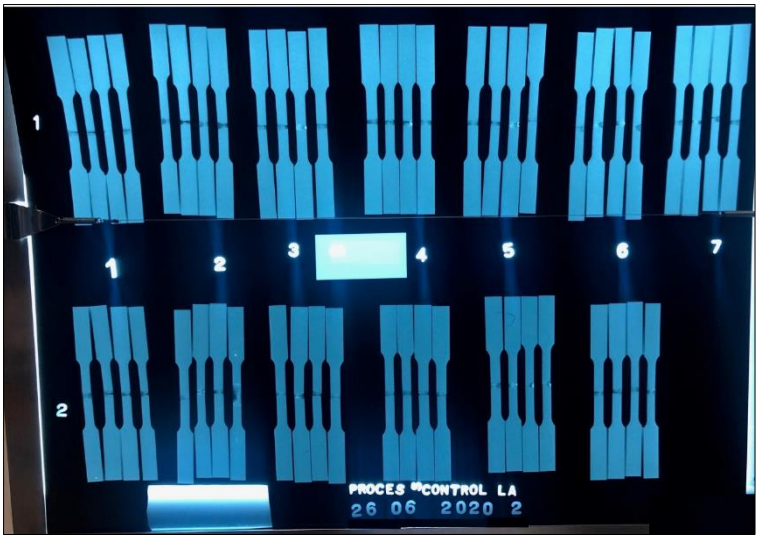


Resim 6.10. Radyografi baskı makinesi

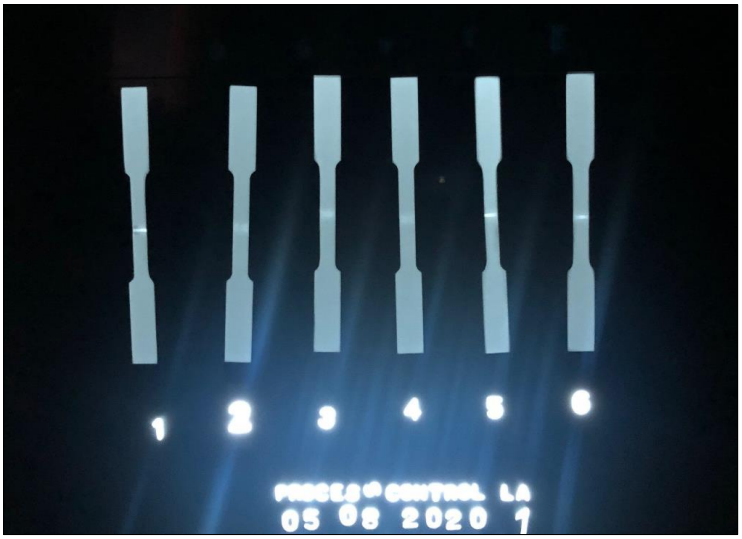
Radyografi muayene sonuçları Ek-1’de sunulmaktadır. Toplu çekilen iki adet radyografi resmi ve en uygun parametre olarak gözüken parçaların radyografisi Resim 6.11, 6.12, ve 6.13’deki gibidir.



Resim 6.11. Numunelerin toplu resmi – 1



Resim 6.12. Numunelerin toplu resmi – 2



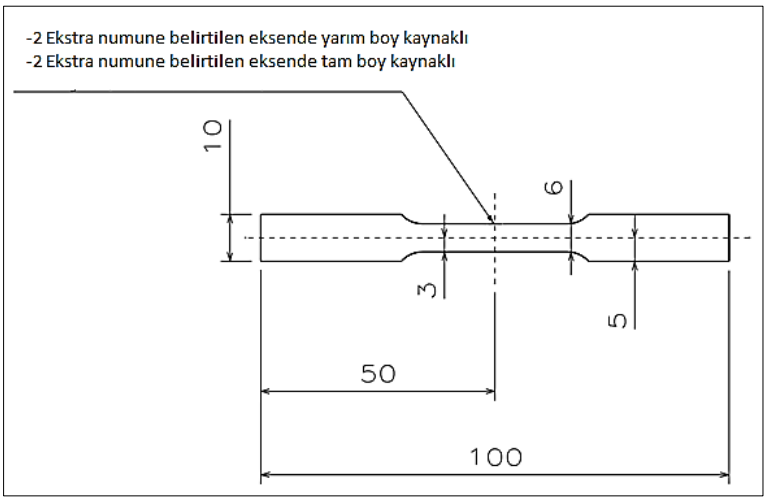
Resim 6.13. En iyi parametrelerin tek çekildiği radyografi sonucu

Analiz sonuçları ve radyografi sonuçları göre en iyi parametre olarak öngörülen 60 kV, 42mA ve 30 mm/s parametre değerlerine sahip olan parametredeki numunelerden iki tanesi mikro sertlik testlerinde kullanılmak üzere belirlenmiştir.

6.3.2. Mikro sertlik testleri

Bu işlemler için dört ekstra numune üretilmiştir. Bu numunelerin ikisine yarısına kadar kaynak yapılmıştır diğer ikisine ise tamamına kaynak yapılmıştır. Bu kaynak yönteminin

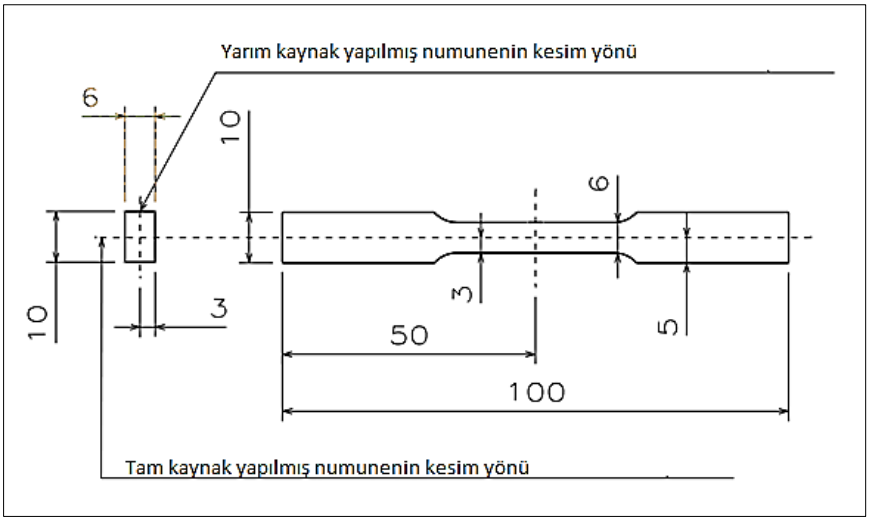
analiz kısmında da bahsedilen kodun doğrulanması için gerekli olduğu görülmüştür. Şekil 6.3 kaynak yollarını göstermektedir.



Şekil 6.3. Ekstra numunelerdeki kaynak yönleri

Sertlik numunesinin hazırlanması

Sertlik testleri için numuneler iki farklı şekilde su jeti ile numune eksenine paralel ve numune eksenine dik şekilde kesilmiştir. Bu işlem için kullanılan su jeti tezgahı "TCI Cutting" marka olup "5XBP Series" modeldir. Kesim yönleri Şekil 6.4'de belirtilmiştir. Tezgah parametresi olarak burada 25 mm/saniye ilerleme hızı ve 250 MPa su jeti basıncı ayarlanmıştır.



Şekil 6.4. Ekstra örneklerin kesim eksenleri

Kesim işlemi belirtildiği gibi “TCI Cutting 5XBP” makinesinde yapılmış olup, kesim öncesindeki ve sırasındaki fotoğrafları Resim 6.14 ve 6.15’de gösterilmiştir.



Resim 6.14. Numunelerin kesim işlemi sırasındaki görünümü



Resim 6.15. Numunelerin kesim işlemi sonrasındaki görünümü

Elektron demeti kaynak işleminden kaynaklanan ısıdan etkilenen bölgeyi numune üzerinde görmek için kesim işleminden sonra bir takım işlemler uygulanmalıdır. Bu işlemler sırasıyla;

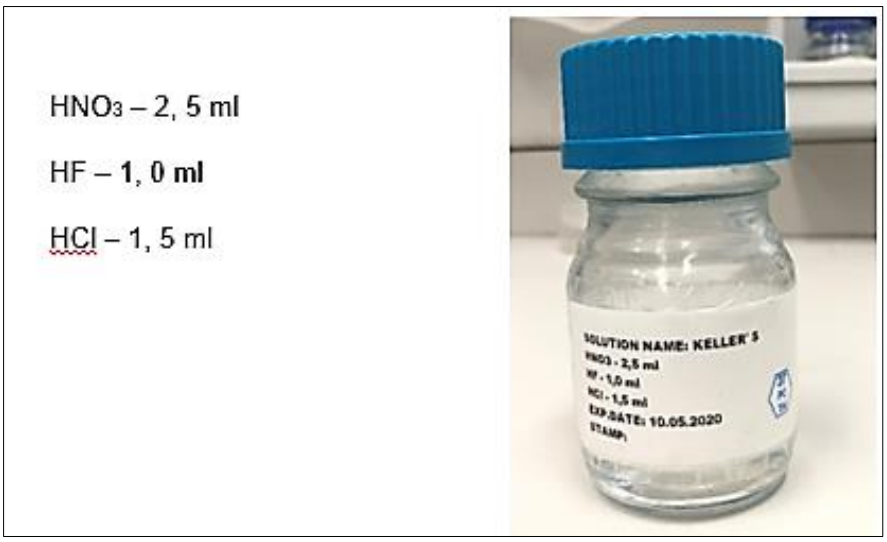
1. Kesme (Soğuk bakalit numune tutucuya koymak için),
2. Numunelerin her bir parçasını ayrı ayrı soğuk bakalite alma,
3. Parlatma işlemi uygulama.

Numunelerin uzunluğu bakalit numune tutucuya konulamayacak kadar uzun olduğu için numuneler bakalit boyutlarında uzun kenarlarından kesilmiştir. Bu işlemden sonra ortaya çıkan örnekler Resim 6.16'daki gibidir.



Resim 6.16. Bakalite konulan örnekler

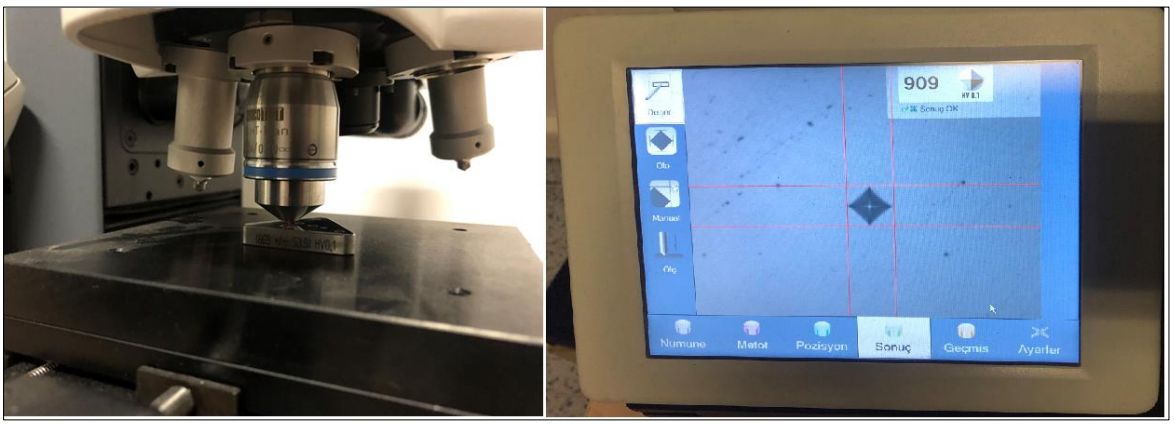
Bakalit işlemi sonrası numuneler parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem "Struers Laboforce – 100" isimli makinede yapılmıştır. Aşındırma işleminden sonra örnekler "Keller's Etching Solution" ismi verilen çözelti ile temizlenmiştir. Bu sırada kullanılan çözelti içeriği ve son kullanım tarihi Resim 6.17'de belirtilmiştir.



Resim 6.17. Keller's Etching Solution

Sertlik testleri

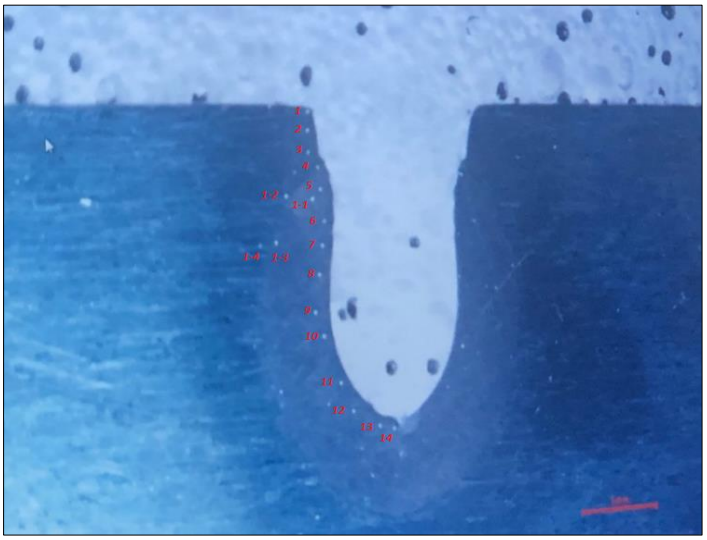
Parlatma işleminden sonra numunelerden elde edilen ısıl etkilenmiş bölge ile ilgili bulgular “Bölüm 5 – Analizsel Çalışmalar” altında belirtilmiştir. Her iki numune için de sertlik ölçümleri “Emco-Test Hardness Measurement” cihazında yapılmış olup. Resim 6.18’deki gibi kalibre edilmiştir.



Resim 6.18. Sertlik cihazı ölçüm kalibrasyonu ve sonucu

Her bir sertlik ölçümü Ek-2’de gösterilmiştir. Yarım ve tam kaynak operasyonunun sonuçlarını özetlemek gerekirse:

Resim 6.19 yarım yapılan kaynağın mikroskop altındaki görünüşünü içerir.

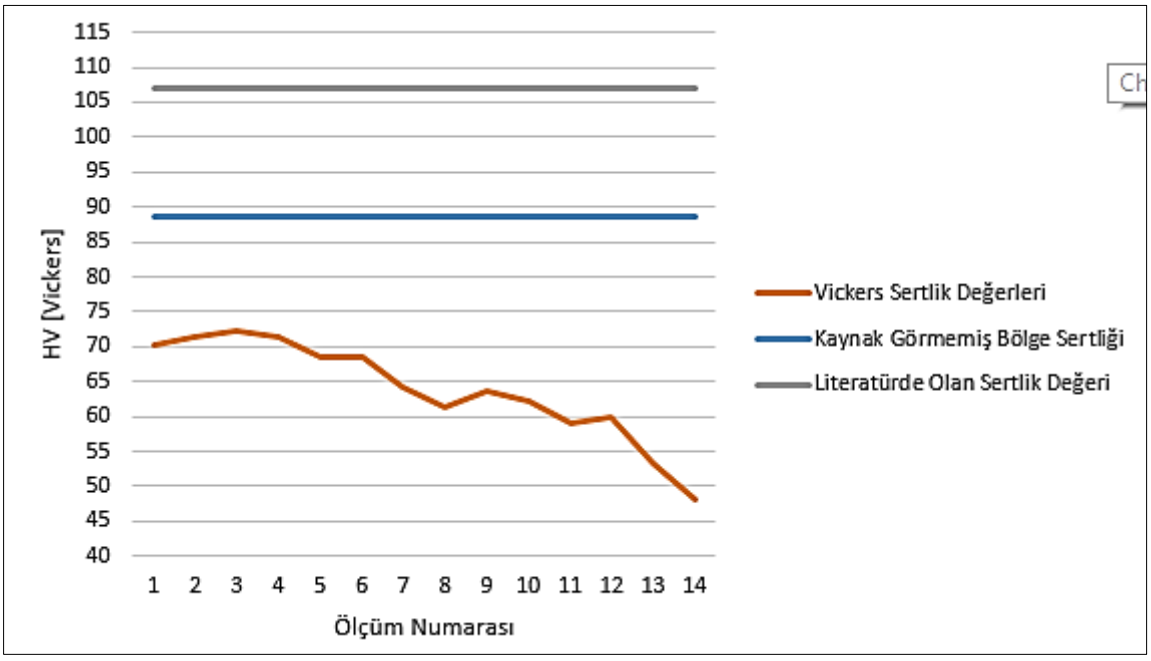


Resim 6.19. Yarım yapılan kaynağın mikroskop altındaki görünüşü

Çizelge 6.3 yarım kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerlerini ve Şekil 6.5 grafiğini içermektedir.

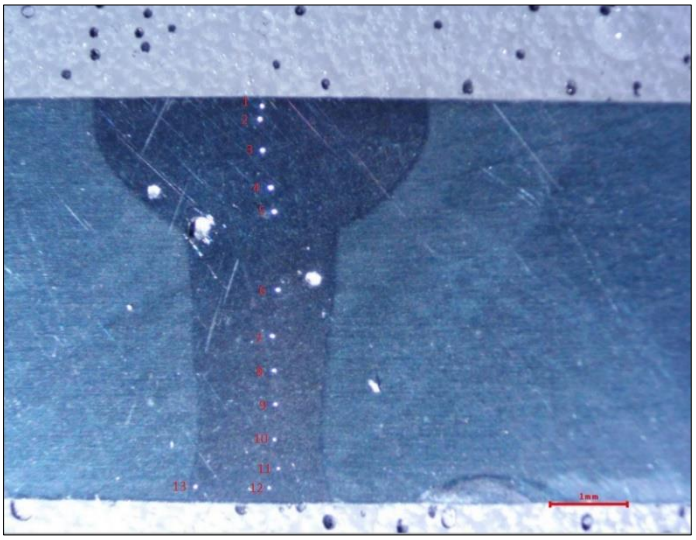
Çizelge 6.3. Yarım kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerleri

Ölçüm Numarası	HV [Vickers]
1	70,3
2	71,4
3	72,2
4	71,5
5	68,6
6	68,5
7	64,1
8	61,3
9	63,7
10	62,1
11	59,1
12	60
13	53,2
14	48,2
Kaynak Görmemiş Bölge Sertliği HV	88,5
Literatürde olması gereken yüzey sertliği [50]	107
1-1	66
1-2	66,2
1-3	71
1-4	94



Şekil 6.5. Yarım kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerleri grafiği

Resim 6.20 Tam yapılan kaynağın mikroskop altındaki görünüşünü içerir.

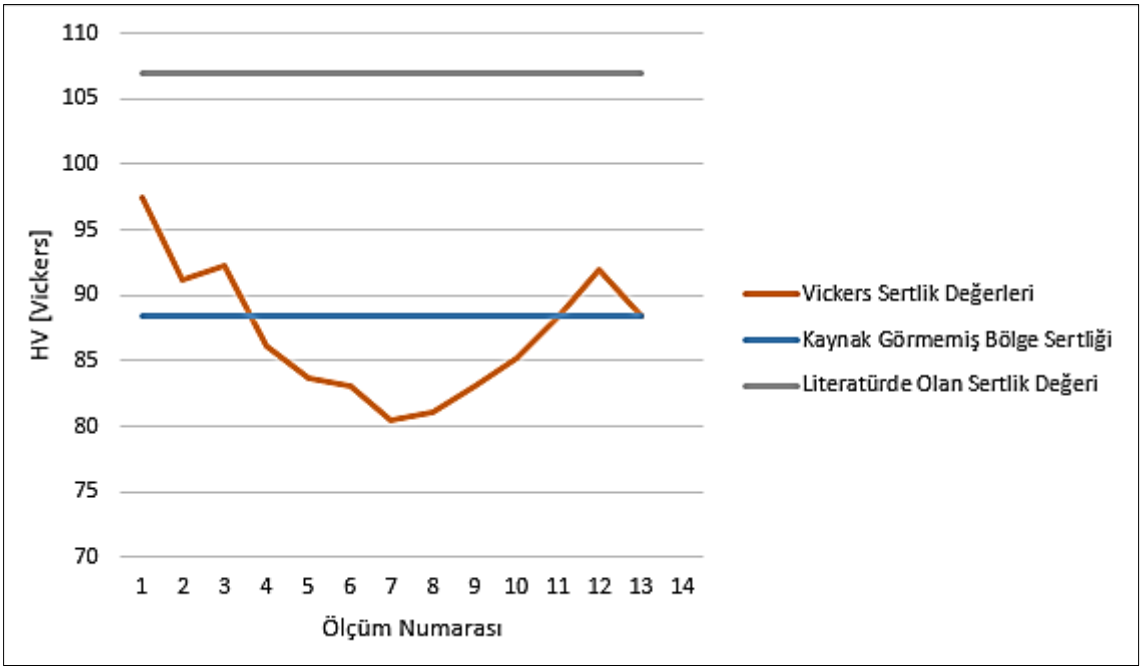


Resim 6.20. Tam yapılan kaynağın mikroskop altındaki görünüşü

Çizelge 6.4 tam kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerlerini ve Şekil 6.6 grafiğini içermektedir.

Çizelge 6.4. Tam kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerleri

Ölçüm Numarası	HV [Vickers]
1	97,4
2	91,2
3	92,2
4	86,2
5	83,7
6	83,1
7	80,4
8	81
9	83,1
10	85,2
11	88,5
12	91,9
13	88,5
Kaynak Görmemiş Bölge Sertliği HV	88,5
Literatürde Olması Gereken Sertlik [50]	107



Şekil 6.6. Tam kaynak yapılan numune üzerindeki noktalardaki sertlik değerleri grafiği

Sertlik testlerinin sonuçları 7. Bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir. Ancak sonuçlar açıkça gösteriyor ki kaynaklı parçaya ısıl işlem uygulanmaması durumunda sertlik değerleri neredeyse 10% düşüş görülmektedir. Bu aşamada sertlik kıyaslamasında yarım kaynaklı parçayı almamak daha doğru bir görüş olacaktır. Bunun nedeni kaynağı son uygulandığı yerdeki ısı birikimi fazla olduğundan hem çatlamaya neden olmuştur hem de lokal olarak ergimeden ötürü yumuşaklıklar oluşacaktır. Bununla beraber soğuma sürelerindeki farklılıklar ve ısıya maruz kalma süresi parçadaki malzemenin mikro yapısındaki parçacıkların büyümesine neden olmuştur. Yarım kaynaklı malzeme analiz sonucunun doğrulanması için ısıl modelde kullanılması daha doğru olacaktır.

6.4. Çekme Testleri

Çekme testleri ASTM E8/E8M standartlarına göre “INSTRON 5985, TENSILE TESTER, S/N 5985L2121 (T440120259)” makinesinde yapılmıştır. Ekstansometre olarak ise “INSTRON 2630-106 MANUAL CLAMP, EXTONSOMETER, CLASS B2” kullanılmıştır.

Çekme testlerinde farklı kaynak parametrelerinin de denenmesi adına radyografi sonucunda kaynak boşluğu az olan numunelerden seçilmiş olanları da çekme testine tabi tutulmuştur. Numune numaraları ve parametrelerinin neler olduğu Çizelge 6.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. Çekme testine tabi tutulan numuneler ve parametreleri

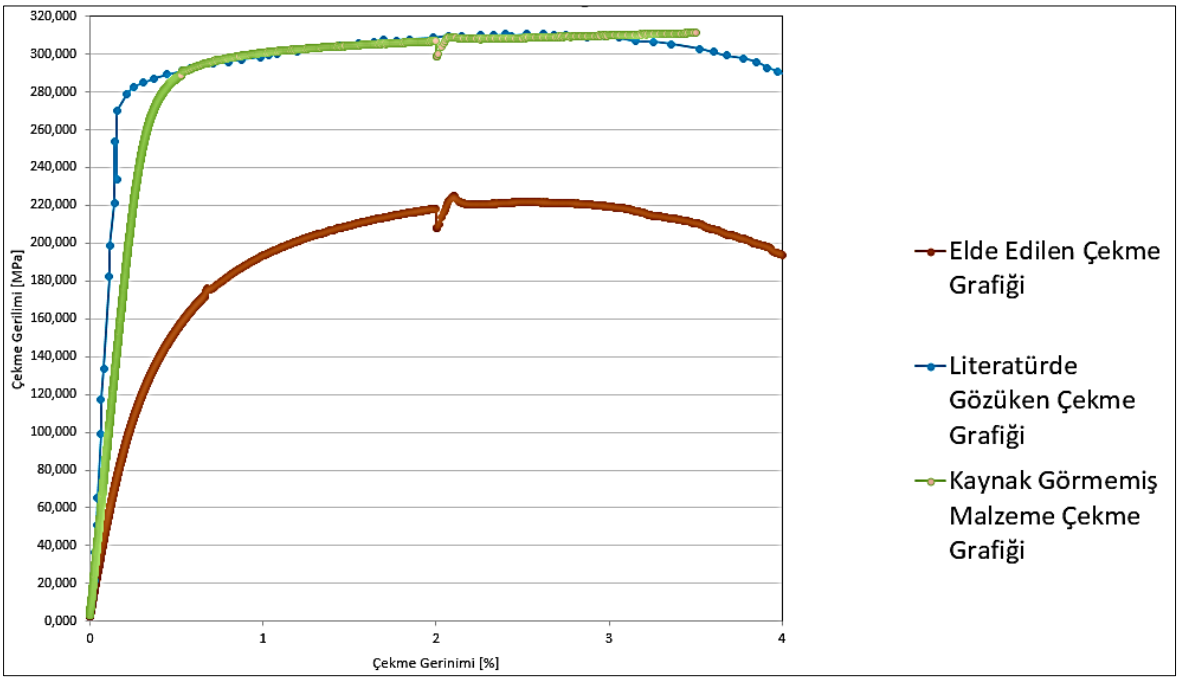
	Parametreler			Numune Numarası		Radyografi Sırası
#	kV	mA	mm/s	#1	#2	#
1	60	40	30	109	93	2-2-2
2	60	42	30	67	52	1-1-2
3	60	42	33	11	24	1-1-1
4	60	42	27	46	30	1-2-1
5	57	40	30	99	92	1-1-7
6	54	40	30	94	45	2-1-1
7	54	44	33	110	36	2-1-5
8	54	42	33	35	Ölçüm Hatası	2-2-4

Yapılan çalışmaların kıyaslanabilmesi için kaynaklanmamış malzemenin de çekme testi yapılmıştır. EK-3'de her biri numune numarası ile ayrı ayrı gösterilmiştir. Çekme testlerinin sonuçları Çizelge 6.6'da özetlenmiştir. Bu çizelgede sıralama çekme mukavemet değerlerine göre yapılmıştır.

Çizelge 6.6. Çekme testi sonuçları

#	Elastisite Modülü [GPa]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Uzama [%]	Kırıldığındaki Yük [kN]	Uygulanan Parametreler
1	86,081	317,31	18,2	18,04	Kaynaklanmamış Numune
2	32,465	234,89	6,07	2,85	60kV - 42mA - 30 mm/s
3	34,186	206,86	2,99	4,97	60kV - 42mA - 27 mm/s
4	61,318	206,72	2,4	4,98	57kV - 40mA - 30 mm/s
5	28,823	204,78	8,72	5,37	60kV - 42mA - 33 mm/s
6	57,983	200,97	8,87	6,1	60kV - 42mA - 33 mm/s
7	39,618	199,67	2,36	6,48	60kV - 42mA - 27 mm/s
8	30,867	189,28	2,17	6,75	60kV - 40mA - 30 mm/s
9	30,876	184,47	11,09	4,58	60kV - 42mA - 30 mm/s
10	34,027	178,23	2	4,31	54kV - 44mA - 33 mm/s
11	26,554	167,02	10,44	2,72	57kV - 40mA - 30 mm/s
12	84,515	159,54	10	0,28	54kV - 42mA - 33 mm/s
13	62,341	157,56	2,17	0,31	54kV - 40mA - 30 mm/s
14	43,944	151,48	2,76	3,19	60kV - 42mA - 30 mm/s
15	14,805	77,02	7,94	5,72	60kV - 40mA - 30 mm/s
16	17,128	68,22	7,36	3,98	54kV - 44mA - 33 mm/s
17	8,952	38,23	9,52	0,13	54kV - 40mA - 30 mm/s

Ayrıca Şekil 6.7'de en uygun parametre olarak seçilen kaynaklı malzemenin çekme testi sonuçları grafik olarak gözükmektedir.



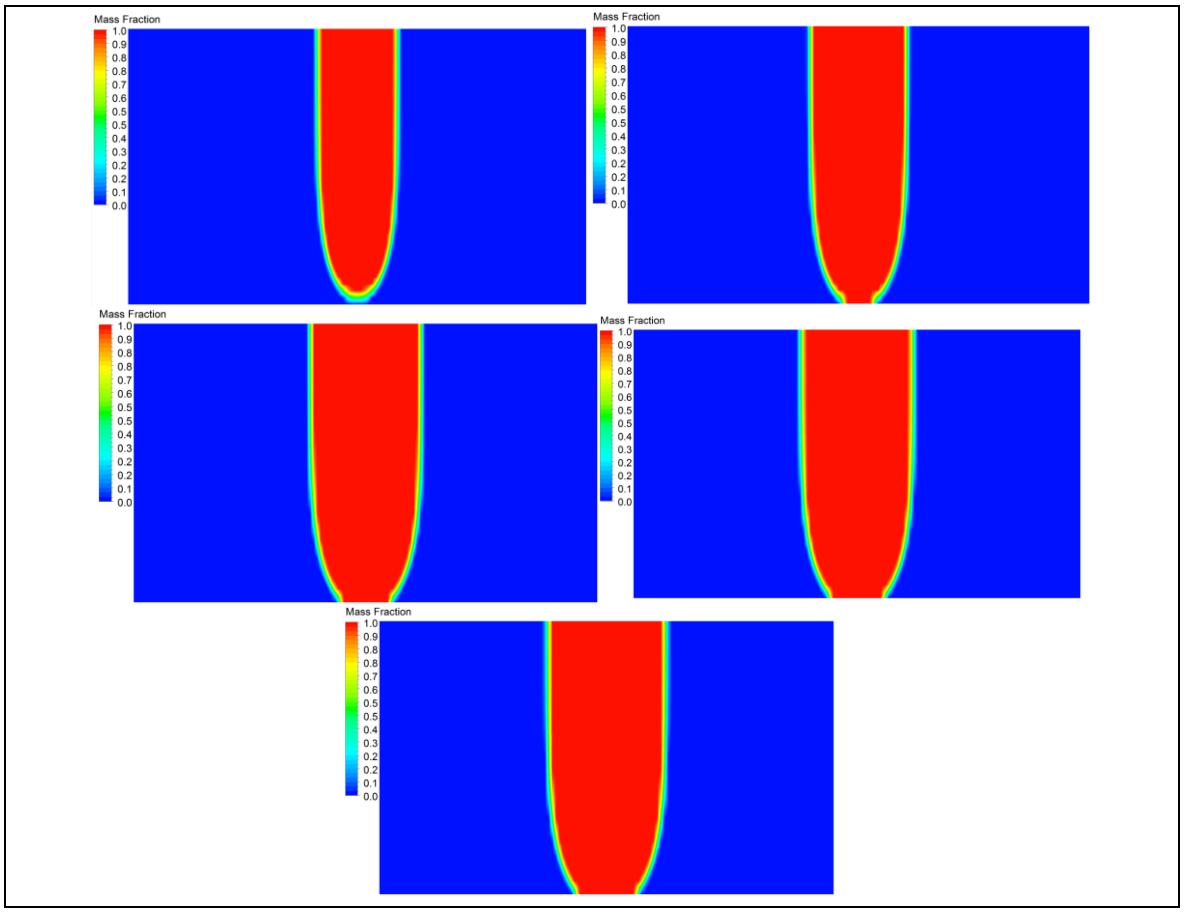
Şekil 6.7. En iyi parametre çekme sonuçları

Çekme testlerinin sonuçları 7. Bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir. Ancak sonuçlar açıkça gösteriyor ki kaynaklı parçanın çekme testi sonuçları, hiçbir işlem uygulanmamış parça ile kıyaslandığında neredeyse %26 düşüş görülmektedir. Çekme mukavemeti değerindeki bu düşüsün temel nedeni hem kaynak öncesi hem de kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmamasından kaynaklandığı öngörülmektedir.

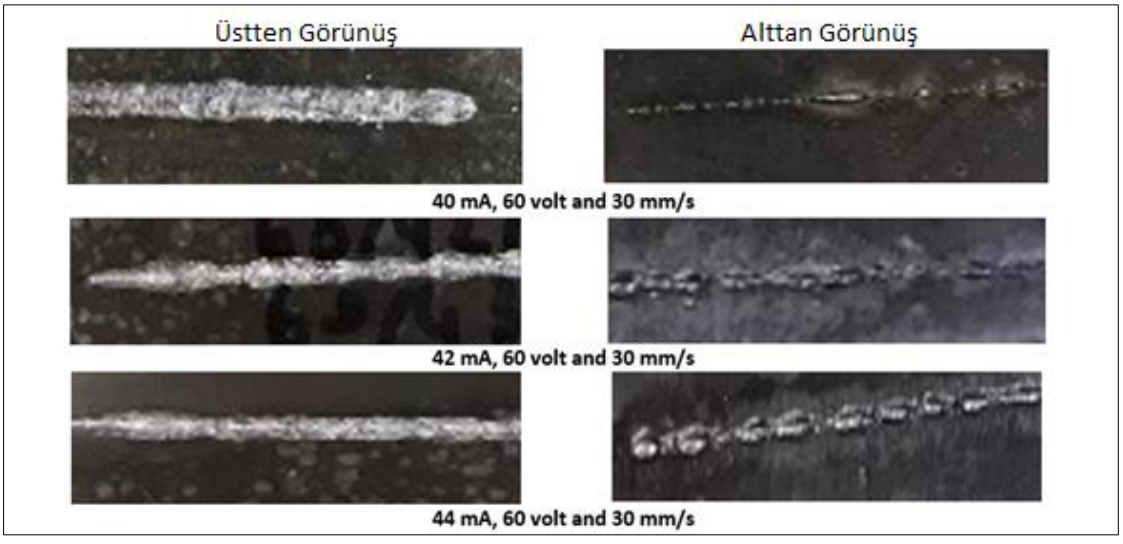
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelinden elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel çalışma boyunca kılavuz olarak kullanılmıştır. Elektron ışın kaynağı işlemi için akımın, gerilimin ve kaynak hızının değeri, numunenin tüm kalınlığını ergitebilmesi için hazırlanan kullanıcı tanımlı fonksiyon modeli üzerinden incelenmiştir. Şekil 7.1 hem gerilimin hem de kaynak hızının sırasıyla 60kV ve 30 mm/s'de sabitlendiği ve akımın değiştirildiği hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelinden sonuçları özetlemektedir. 30 mA akım kullanarak, elektron ışını Şekil 7.1 sol üstte gösterildiği gibi tüm kalınlığı ergitemez. Akımı 35 mA ‘ya yükselterek, elektron ışını sadece numune kalınlığına nüfuz edebilir. 40 mA kullanıldığında, akım tüm kalınlığı ergitebilir ancak numunenin altındaki ergiyik genişliği dardır ve bu durum kaynak kalitesini etkileyecektir. Akımın 42 ve 44 mA‘ya yükseltilmesi, görülebildiği gibi numunenin altındaki ergimiş malzeme kalınlığın artmasına neden olmuştur, ancak fazla ergime ise numunenin altındaki yüzey kalitesini etkileyebilir. Bu çalışma için 40 mA ve üzeri akım değerinin kullanılmasının önerildiği ve deneysel test yapılarak en iyi akım değerinin doğru bir şekilde belirlenebileceği sonucuna varılmıştır. Ek olarak varyans analizinden görülebileceği üzere bu çalışmada akım ve voltaj parametreleri baskın olduğu açıkça gözükmektedir. Açıkça gözükmektedir ki “hız” parametresi değişken olarak dikkate alındığında penetrasyon derinliği dışında etkisinin oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışma için, 6 mm kalınlığında bir Alüminyum 6061 T6 alaşımı (MMPDS-08 / AMS 4026), çalışmada bahsedildiği gibi ASTM E8 / E8M-16a'ya göre çekme testi şeklinde kaynak numunesini hazırlamak için kullanıldı. Örnekler daha sonra elektron ışın kaynağı işlemi için hazır olmak üzere gerekli işlemlerden geçirilmiştir. Işın akımı, ışın gerilimi ve kaynak hızı gibi işlem parametrelerinin etkisi sayısal modelden elde edilen sonuçlar yardımıyla incelenmiştir. Aşağıdaki Şekil 7.2’de 40, 42 ve 44 mA farklı akım değerlerinde kaynaklı numunelerin üst ve alt yüzeyini göstermektedir. Şekil 7.2'de gösterildiği gibi, test edilen numuneler için kaynak yolunda hiçbir kusur görülmez. 40 mA kullanıldığında, alt yüzeyde çok küçük kusurlar görülebilir. Akımı 40 mA'nın üzerine çıkardığınızda kusurlar artmıştır. Bu nedenle, bu numuneler için en uygun parametrelerin, üst ve alt yüzeydeki görsel incelemeye dayalı olarak 42 mA, 60 volt ve 30 mm/s olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 7.1. Kaynak parametrelerinden akımın ergime üzerindeki etkisi



Şekil 7.2. Kaynaklı parçaların üstten ve alttan görünüşü

Isıl analiz sonuçlarından esinlenerek yapılan çalışmalardan yola çıkarak mikro sertlik ve çekme testleri icra edilmiştir. Çekme testlerinden de en iyi parametrenin 60 volt, 42 mA ve

30 mm/s olduğu açıkça görülmektedir. Çekme dayanımında 24%'lük bir azalma olmasının nedenlerinin araştırılması gerekliliği ile beraber, en yakın parametre setinden 13% daha iyi çekme mukavemeti sağlanmıştır. Belirli bir mukavemet seviyesinin üstündeki numunelere bakıldığında uzama miktarı en az olan numunenin en iyi mukavemet değerini vermesi ise parçanın kaynaklandığı bölgede ısıl işlem gibi davranması nedenli olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, Al6061-T6'nın elektron ışın kaynağı işlemi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. ANSYS FLUENT 20 R1 kullanılarak yazılan, derlenen ve çözülen bir UDF aracılığıyla elektron ışın kaynağı sürecini simüle etmek için bir HAD modeli geliştirilmiştir. HAD modelinden elde edilen sonuçlar, ergimiş bölge sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Hazırlanan modelden elde edilen sonuçlar deneysel çalışma boyunca kılavuz olarak kullanılmıştır. Bu çalışmanın ana sonuçları şu şekilde özetlenmiştir:

1. Elektron ışın kaynağı işlemindeki en baskın kaynak parametresinin, akım değeri olduğu belirlenmiştir. Kaynağın akım değeri 42 mA'ya doğru arttırıldığında kaynağın dikiş genişliği ve derinliğinin de arttığı tespit edilmiştir. Kaynak dikişinde; kaynak akımı gerektiğinden fazla arttırıldığında yanma oluğu, malzemenin altından sarkma, boncuklanma gibi hataların oluştuğu gözlendi.
2. Kaynaklı çekme deneylerinde, bütün numune gruplarında hasarlar ve kopmalar, kaynaklı bölgenin ısıl etkilenmiş yerlerinden gerçekleşmiştir.
3. Kaynak bölgesinin en yüksek sertlik değerini ise kaynağın başladığı yüzeydeki kaynak dikişinin yakınlarında meydana gelmiştir. Kaynak dikişi boyunca paralel olarak alınan kesitten elde edilen mikro sertlik değerlerinin görüldüğü üzere, kaynak dikişinin sertlik değerleri malzeme yüzeyinden aşağıya doğru azaldığı gözlendi. Diğer kaynak birleşimlerde olduğu gibi kaynak bölgesinde sertlik azalırken ITAB'da gevreklik ve sertlik artışı gözlemlenmiştir.
4. CFD modeline göre 60 kV, 30 mm / s ve 35 mA'dan fazla ışın akımı kullanmak numune kalınlığını ergitebilir.
5. Varyans analizinden görülebileceği üzere bu çalışmada akım ve voltaj parametrelerinin baskın olduğu belirlenmiştir. Hız parametresi değişken olarak dikkate alındığında penetrasyon derinliği dışında etkisinin oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür.
6. 60 volt, 30 mm/s ve 42 mA'dan fazla ışın akımı kullanarak deneysel çalışmayı oluşturan, numunenin altında kusurlara neden olabilir. Bu nedenle, 6 mm kalınlıktaki Al 6061-

T6'nın EIK için en uygun parametreler, iyi yüzey kalitesi elde etmek için 60 kV, 30 mm/s ve 42 mA'dır.

7. Kaynak alanı için SEM analizi, elektron ışını kaynağı işleminden sonra dar bir ısıdan etkilenen bölgenin elde edildiğini göstermektedir. Temel malzeme ile ısıdan etkilenen bölge arasında ilk ısıl bölge için belirgin bir sınır görülmektedir ancak diğer ısıl bölgeler için belirgin sınır görülmemektedir.
8. Çekme dayanımındaki azalmanın temel olarak elektron ışın kaynağı yönteminde, çekme artık gerilmeleri oluşturduğu görülmüştür.
9. Literatürde görülen çekme mukavemet değerleri azalma eğilimi göstermektedir. Bu çalışma için hazırlanan ve uygulanan analiz ile uygun parametreler elde edilmiştir. Bu parametreler kullanılarak uygulanan kaynak işlemi sonrası elde edilen mukavemet değerleri, literatüre göre nispeten daha az azalma eğilimi göstermiştir. Ancak bazı kaynaklarda daha iyi elde edilen çekme mukavemet değerlerinin temel nedeni, işlem öncesi ve sonrası gerilim giderme veya belirli yüzey işlemleri kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.
10. AA 6061 tarafındaki kısmen deforme olmuş bölgedeki mikro sertliğin düşük olmasından dolayı çekme testi sonucunda kırılmaların bu bölgede olduğu tespit edildi.

Bütün bu sonuçları göz önünde bulundurarak ilerleyen çalışmalarda aşağıdaki unsurların incelenmesinin faydalı olacağı ve çalışmalara daha doğru yön vereceği düşünülmektedir.

1. Alüminyum kaynağında ön tavlama işlemi ve kaynak sonrası gerilim azaltmak için gerilim giderme işlemleri eşliğinde yapılacak olan kaynak işleminde kaynak bölgesinin mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenebilir. Bunula beraber kaynak bölgesi üzerine uygulanacak diğer ısıl işlem yöntemleri uygulamanın, artık gerilmeye etkisi incelenebilir.
2. Elektron ışın kaynağında farklı odaklama ayarlarının kaynaklanabilirliği ve kaynak bölgesine olan etkileri araştırılabilir.
3. Kaynak makinesinin osilasyon hareketi yapmasının kaynak bölgesi üzerindeki mekanik ve metalürjik etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Nelson T. W., Lippold, J. C., Mills, M. J., (2000). Nature and Evolution of The Fusion Boundary in Ferritik-Austenitic Dissimilar Weld Metals, Part, 2, On cooling transformations, *Welding Journal*, 79(10), 267-277.

2. Barnhouse, E. J., and Lippold, J. C. (1998). Microstructure/property relationships in dissimilar welds between duplex stainless steels and carbon steels. *Welding Journal-New York-*, *77*, 477.

3. Sobih, M., Elseddig, Z., Almazy, K., Youssef, A., and Sallam, M. (2012). Optimization of EBW parameters for 2219 al-alloy using grey relation method. In *Advanced Materials Research* (591, 507-514). Kapellweg: Trans Tech Publications Ltd.

4. Mathers, M. G. (2002). *The welding of aluminium and its alloys*. Cambridge: Woodhead publishing, 1-34.

5. Luo, M., Hu, R., Liu, T., Wu, B., and Pang, S. (2018). Optimization possibility of beam scanning for electron beam welding: Physics understanding and parameters selection criteria. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 1313-1326.

6. Nasr El-Deen, M., Shamekh, M. E., Elthalabawy, W., and Sallam, M. T. (2016). Optimization of Electron Beam Welding Parameters of Dissimilar Joint of Aisi 304 Stainless Steel and Aisi 1020 Low Carbon Steel. In *The 17th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering* (17, 1-15). Cairo: Military Technical College.

7. Totten, G. E. and Mackenzie, D. S. (Editors). (2003). In *Handbook of aluminum (volume 1): Physical metallurgy and processes* New York: Marcel Dekker, Inc., 1-31.

8. Kutz, M. (Editor). (2015). *Mechanical engineers' handbook, volume 1: Materials and engineering mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 59-116.

9. Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S., and Picu, R. C. (2010). Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. *Materials & Design*, 31(2), 972-975.

10. American National Standards Institute, (ANSI). (2006). American national standard alloy and temper designation systems for aluminum. *ANSI H35.1 (M)-2006*. Washington, 1-11.

11. Büyükarslan, S. (2006). *Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 10-24.

12. Öksüz, C. (1996). *Yüksek Mukavemetli (2024, 6061, 7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Suverme Duyarlılığı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 21.

13. Cayless, R. B. C. (2013). Alloy and temper designation systems for aluminum and aluminum alloys. *ASM Handbook*, 2, 15-28.

14. Oğuz, B. (1990). *Demir Dişi Metallerin Kaynağı*, Türkiye: Oerlikon Yayını, 864.

15. Sarsılmaz, F. (2008). *Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması,* Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 25-27.

16. Ayvaz, M., ve Çetinel, H. (2011). Farklı Alüminyum Alaşımlarının Tig Kaynak Yöntemi ile Kaynatılması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi-Welding of Different Aluminium Allyos by Tig Welding Method and The Analysis of Their Mechanical Characteristics. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 39-46.

17. İnternet: TIG Kaynağı Şematik Gösterimi URL: https://cakiroglupaslanmaz.com/?p=135, Son Erişim Tarihi: 05.01.2021.

18. İnternet: MIG Kaynağı Şematik Gösterimi URL: https://muhendistan.com/kaynak-nedir-cesitleri-nelerdir/, Son Erişim Tarihi: 05.01.2021.

19. Kadayıfçı, A. Z. (2013). *Benzer ve farklı türden alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 16-22.

20. Orhan, A. (2008). *Gaz Tungsten Ark Kaynak Yöntemiyle Üretilen Fe Esaslı Kaplama Tabakalarının Aşınma ve Mikroyapı Karakteristiklerinin Araştırılması,* Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 91-92

21. İnternet: Plazma Ark Kaynağı Şematik Gösterimi URL: http://tgsgaz.com/hizmet-plazma-ark-kaynagi--62.html, Son Erişim Tarihi: 05.01.2021.

22. Özcan, M., Tarakçıoğlu, N. ve Kahramanlı, Ş., (2004). Sac Malzemelerin Lazer Kaynak Parametreleri, *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik Online Dergi*, 3(1), 15-17.

23. Özarpa, C. (2005). *Al 2024-0 ve Al 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 29-40.

24. Weber, C. M., Funk, E. R. and McMaster, R. C. (Editor). (1972). Penetration mechanism of Partial Penetration Electron Beam Welding. *Proceedings of the Electron Beam Welding Symposium*, November 7 and 8. Department of Welding Engineering, Ohio State University, USA.

25. Bakish, R. and White, S., (1964). *Handbook of Electron Beam Welding*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 212-258.

26. Olson, D. L., Siewert, T., Liu, S., and Edwards, G. (1993). Welding, brazing and soldering, *ASM Handbook*. 6, 481-532.

27. Meleka, A. H. (1971). *Electron-beam Welding: Principles and Practice*. United Kingdom: McGraw-Hill, 332.

28. Althouse, A. D., Turnquist C. H., Bowditch, W. A., and Bowditch, K. E., (2004). *Modern Welding*, (10th Edition) USA: Illinois, 98-99.

29. İnternet: Korea Aerospace University, Electron Beam Welding [online] 2009 URL: http://mercurt.kau.ac.kr/welding/Welding%20Technology%20I%20-%20Welding%20Processes/Chapter%209%20-%20Electron%, Son Erişim Tarihi: 05.01.2021.

30. Wiednig, C. A. (2013). *Electron Beam Welding Alloy 625*. Diploma Thesis, Institute for Materials Science and Welding Graz University of Technology, Austria, 14.

31. M. Dobner, (1996). *Untersuchungen zum Elektronenstrahlschweißen dickwandiger Bautelle*, Technische Hochschule, Aachen, Deutschland, 72-84.

32. H. Schultz, (2000). *Elektronenstrahlschweißen*, (2nd Edition). Düsseldorf: DVS-Verlag GmbH, 232.

33. Schubert, G. (2009). Electron beam welding–Process, applications and equipment. In *Proceedings of the IIW International Conference on Advances in Welding and Allied Technologies,* 283-288.

34. Reisgen, U., and Olschok, S. (2011). Fachbeiträge-Elektronenstrahlschweißen in Zwangspositionen. *Schweissen und Schneiden*, 63(7), 365.

35. Wedding, C., Lochbichler, C., Enzinger, N., Beal, C. and Sommitsch, C. (2014). Disimilar Electron Beam Welding of Nickel Base Alloy 625 and 9% Cr Steel. *1st International Conference on Structural Integrity*, ICONS-2014, Kalpakkam, India, 184-194.

36. Jaypuria, S., Doshi, N., and Pratihar, D. K. (2018). Effects of welding parameters on mechanical properties in electron beam welded CuCrZr alloy plates. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (338(1), p. 012013). Bristol: IOP Publishing.

37. Sravanthi, S. S., Acharyya, S. G., Joardar, J., and Chaitanya, V. N. S. K. (2020, March). A Study on Corrosion Resistance and Mechanical Performance of 6061 Aluminium Alloy: Galvanized Mild Steel Electron Beam Welds at Varying Welding Parameters. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(4), 881-895.

38. Li, X., Zhang, Y., Li, P., and Lv, S. (2018, July). The Effects of Electron Beam Welding Parameters on Microstructure and Properties of GH4738 Alloy. In *Chinese Materials Conference* (123-131). Singapore: Springer.

39. Elseddig, Z. A., Sobih, M., Almazy, K., and Sallam, M. T. (2010, May). Experimental investigation of electron beam welding of AA1350 aluminum alloy. In *The 14th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering* (14, 1-11). Cairo: Military Technical College.

40. Yost, T., and Liu, S. (2015). *Effects Of Select Parameters On Electron Beam Welding Of Al6061-T6 Alloy*. Doctoral Dissertation, Colorado School of Mines, Colorado, 5-110.

41. Hajitabar, A., and Naffakh-Moosavy, H. (2018). The effect of FexNby (x= 2,7 and y= 1, 6) intermetallics on microstructure and mechanical properties of electron beam welded Nb-1Zr refractory alloy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 76, 192-203.

42. Valencia, J. J., and Quested, P. N. (2013). Thermophysical properties. *ASM Handbook*, 15, 468–481.

43. Moser, D., Fish, S., Beaman, J., and Murthy, J. (2014). Multi-layer computational modeling of selective laser sintering processes. In *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

44. ANSYS Inc., (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide*, Release 18.2. 15317, 373–464.

45. Fujii, H., Cui, L., Maeda, M., and Nogi, K. (2006). Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 419(1-2), 25-31.

46. Frigaard, Ø., Grong, Ø., and Midling, O. T. (2001). A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(5), 1189-1200.

47. Wei, P. S., Kuo, Y. K., and Ku, J. S. (2000). Fusion zone shapes in electron-beam welding dissimilar metals. *Journal Heat Transfer*, 122(3), 626-631.

48. Eroğlu, M., (1997). *Düşük Karbonlu Bir Çelikte Kaynak Enerji Girişimi ve Başlangıç Tane Boyutunun Kaynak Bölgesinin İç Yapı ve Meaknik Özelliklere Olan Etkisi*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 110.

49. American Society for Testing and Materials (ASTM), (2016). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. *ASTM E8 / E8M – 16*, West Conshohocken, PA, 1-30.

50. Tan, C. F., and Radzai, S. M. (2009). Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-T6. *Chiang Mai Journal of Science*, 36(3), 276-286.

EKLER

(Ekler Tezin arka kapağında CD ortamında verilmiştir.)



GAZİ GELECEKTİR..