



**T.C.**

**HİTİT ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Ti-6Al-4V ALAŞIMININ TEL ARK EKLEMELİ İMALAT  
SÜRECİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

**Doktora Tezi**

**Mustafa Çağrı ÖZKADER**

**Çorum - 2024**



**Ti-6Al-4V ALAŞIMININ TEL ARK EKLEMELİ İMALAT  
SÜRECİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

**Mustafa Çağrı ÖZKADER**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Doktora Tezi**

**TEZ DANIŞMANI**

**Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU**

**İkinci Danışman: Doç. Dr. Öncü AKYILDIZ**

**Çorum 2024**

Mustafa Çağrı ÖZKADER tarafından hazırlanan “Ti-6Al-4V Alaşımının Tel Ark Eklemeli İmalat Sürecinin Modellenmesi ve Analizi” adlı tez çalışması 26/06/2024 tarihinde aşığıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ata MUĞAN .....

Başkan

Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU .....

Danışman

Doç. Dr. Ahmet MERAM .....

Üye

Doç. Dr. Cengiz BAĞCI .....

Üye

Doç. Dr. Yusuf KANCA .....

Üye

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve ..... sayılı kararı ile Mustafa Çağrı ÖZKADER' in Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Osman ÇUBUK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Mustafa Çağrı ÖZKADER



# Ti-6Al-4V ALAŞIMININ TEL ARK EKLEMELİ İMALAT SÜRECİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Mustafa Çağrı ÖZKADER

ORCID: 0000-0003-3351-7789

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Doktora Tezi

Haziran 2024

## ÖZET

Tel ark eklemeli imalat (TAEİ) sırasında malzemeleri ergitmek için ısı enerjisi kullanılır. Ancak kullanılan bu ısı katmanların çevrimli olarak oluşturulması sırasında, üniform olmayan tekrarlı termal değişimlere yol açmakta ve dolayısıyla metalik malzemelerin mikroyapısının süreç boyunca değişmesine neden olabilmektedir. Bunun yanında TAEİ ile üretilen parçalarda, maruz kaldıkları termal yüklemeye bağlı olarak yüksek mertebelerde arzu edilmeyen kalıntı gerilmeler ve deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, TAEİ süreçlerinde gerçekleşen fiziksel etkileşimlerin anlaşılıp, süreç kontrolünün sağlanması için gerçekleştirilecek çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Bu motivasyonla hazırlanan tez çalışması kapsamında, Ti-6Al-4V alaşımından TIG-TAEİ yöntemiyle üretilen parçalarda, literatürdeki güncel yaklaşım, gözlem ve bulgular dikkate alınarak, süreç-yapı-özellik ilişkilerinin anlaşılmasına olanak sağlayacak, termal-mikroyapısal-mekanik (TMM) sonlu elemanlar yöntemi (SEY) benzetim modellerinin geliştirilmesine ve deneysel olarak doğrulanmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, ilk olarak süreç benzetim modellerinin geliştirilmesi ve doğrulanmasında kullanılacak laboratuvar ölçekli özgün bir TIG-TAEİ cihazı mekanik, elektronik ve yazılımsal olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu cihaz kullanılarak, farklı ısı girdileri, katman sayıları ve tarama desenleriyle numuneler üretilmiş, bunların boyutları ve sınır koşulları dikkate alınarak TMM sonlu elemanlar benzetim modelleri geliştirilmiştir. Benzetim modellerinin geliştirilmesinde ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılıp, Python makroları ve Fortran kullanıcı alt programları yardımı ile çeşitli model bileşenlerinin (sınır koşulları, eleman aktifleştirme tanımlamaları, hareketli ısı kaynağı modeli, malzemenin mikroyapısal ve mekanik özellikleri vb.) esnek ve parametrik bir yapıda tanımlanabildiği bir SEY modeli oluşturulmuştur. Termal modelde iletim, taşınım ve

radasyonla ısı transferleri dikkate alınıp ısı kaynağının tanımlanmasında TIG kaynağı için modifiye edilmiş bir Goldak ısı kaynağı modeli kullanılmıştır. TAEİ işlemi boyunca sıcaklık değişimlerine bağlı olarak meydana gelen mikroyapısal dönüşümlerin tahmini için hem difüzyonlu hem de difüzyonsuz katı hal faz dönüşümlerini hesaba katan bir model dikkate alınmış, böylece  $\alpha$  ve  $\beta$  faz oranlarının imalat süreci boyunca değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, hesaplanan fazların oranları ve mikrosertlik değerleri dikkate alınarak karışımlar kuralı yardımı ile parçaların mikrosertlik değerlerindeki değişimler hesaplanmıştır. Termal değişimlerin malzemenin mekanik davranışına etkilerinin incelenmesi için tamamıyla bağlaşıklık modelleme tekniği uygulanmıştır. Bununla birlikte mikroyapısal değişimlerin malzemenin akma davranışına etkisi fazların hesaplanan hacim oranlarını ve akma değerlerini dikkate alan karışımlar kuralı ve Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak benzetim modellerine dahil edilmiştir. Doğrulama çalışmaları öncelikle iki farklı ısı girdisiyle üretilen tek katlı duvar yapılı numuneler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak iki farklı noktadan termokupullarla zamana bağlı olarak ölçülen deneysel sıcaklık değerleri, numunelerin kesitleri üzerinden ölçülen eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutları, yine numunelerin kesitleri üzerinden ölçülen sertlik değerleri ve bir kenarı ankastre olarak mesnetlenmiş altlık plaka üzerinden ölçülen yer değiştirme sonuçları sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra modelin çok katlı yapılar için de doğru sonuçlar üretebildiğini göstermek adına eş yönlü ve zikzak tarama desenleriyle üretilen 5 katlı duvar yapılı numuneler dikkate alınarak benzer doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Doğrulama çalışmaları sonucunda geliştirilen benzetim modelleri ile hesaplanan sıcaklık değerlerinin, eriyik havuzu boyutlarının, sertlik değerlerinin ve yer değiştirme sonuçlarının deneysel verilerle oldukça tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum geliştirilen benzetim modellerinin TAEİ ile imal edilen parçaların süreç-yapı-özelliklerinin incelenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kavramlar:** Eklemeli imalat teknolojileri, Tel ark eklemeli imalat yöntemi, Termal-mikroyapısal-mekanik modelleme, Süreç benzetimi, Ti-6Al-4V, Sonlu elemanlar yöntemi

**Bilim Kodu:** 91415, 91419, 91433, 91448

# **MODELING AND ANALYSIS OF THE WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS OF Ti-6Al-4V ALLOY**

Mustafa Çağrı ÖZKADER

ORCID: 0000-0003-3351-7789

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Doctor of Philosophy Thesis

June 2024

## **ABSTRACT**

Heat energy is used to melt materials during Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). However, the applied heat leads to non-uniform, repeated thermal variations during the cyclic formation of layers which can cause changes in the microstructure of metallic materials throughout the process. Besides, high levels of undesirable residual stresses and deformations may occur on parts fabricated with WAAM depending on the thermal loading to which they are exposed. Therefore, studies to be carried out for understanding the physical interactions occurring during WAAM processes and ensuring the process control is of great importance.

Within the scope of this thesis prepared with this motivation, studies have been carried out on the development and experimental verification of thermal-microstructural-mechanical (TMM) finite element method (FEM) simulation models that enable understanding of the process-structure-property relationships in parts to be produced from Ti-6Al-4V alloy by the TIG-WAAM method, taking into account the latest approaches, observations, and findings in the literature. In this context, firstly, an in-house laboratory-scale TIG-WAAM device to be used in the development and validation of process simulation models was designed and manufactured considering mechanical, electronic, and software aspects. Using this device, samples are produced with different heat inputs, layer numbers and scanning patterns, and considering their dimensions and boundary conditions, TMM finite element simulation models are developed. The ABAQUS finite element software is used to develop the simulation models, and with the help of Python macros and Fortran user subroutines, a finite element model is created where various model components (boundary conditions, element activation definitions, moving heat source model, microstructural and mechanical properties of the material, etc.)

could be defined in a flexible and parametric structure. In the thermal model, heat transfer through conduction, convection, and radiation is considered, and a modified Goldak heat source model is used to define the TIG welding heat source. For predicting the microstructural transformations occurring due to temperature variations during the WAAM process, a microstructural model that accounts for both diffusional and diffusionless solid-state phase transformations is considered which allows for the investigation of the changes in the  $\alpha$  and  $\beta$  phase fractions throughout the manufacturing process. Additionally, by considering the calculated fractions and microhardness values of the phases, the change in the microhardness of the parts is calculated using the rule of mixtures. The effect of thermal variations on the mechanical behavior of the material is considered using a fully coupled modeling technique. Additionally, the effect of microstructural changes on the material's yield behavior is included into the simulation models using the Johnson-Cook material model and the rule of mixtures that considers the calculated volume fractions and yield values of the phases. Validation studies are performed firstly on single-layer wall samples produced with two different heat inputs. In this context, experimentally measured temperature values over time at two different points using thermocouples, dimensions of the melt pool and heat-affected zones and hardness values measured from the cross-sections of the samples, and displacement measurements measured from the clamped base plate are compared with the values calculated using the finite element analyses. Subsequently, similar validation studies are performed on five-layer wall samples produced with unidirectional and zigzag scanning patterns to demonstrate that the model can also produce accurate results for the multi-layer structures. The validation studies show that, the temperature values, melting pool dimensions, hardness values, and displacement results calculated using the developed simulation models are in close agreement with the experimental data.

**Key Terms:** Additive manufacturing technologies, Wire arc additive manufacturing method, Thermal-microstructural-mechanical modeling, Process simulation, Ti-6Al-4V, Finite element method

**Science Code:** 91415, 91419, 91433, 91448

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sırasında her zaman yanımda olan, sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübelerini aktarmaktan hiçbir zaman geri durmayan ve çalışmanın tüm sürecinde desteklerini daima hissettiğim çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Tüm doktora süreci boyunca ve bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sırasında yol gösterici yaklaşımı ile beni her zaman destekleyen ve cesaretlendiren ikinci danışmanım Doç. Dr. Öncü AKYILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sırasında değerli görüşlerini esirgemeyen kıymetli jüri üyeleri Doç. Dr. Cengiz BAĞCI, Doç. Dr. Yusuf KANCA'ya ve tez savunması sırasında verdikleri kıymetli önerileri için Doç. Dr. Ahmet MERAM'a ve Prof. Dr. Ata MUĞAN'a teşekkür ederim.

Çalışma boyunca desteğini daima hissettiğim HÜBTUAM Müdürü sayın hocam Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ'a ve Doç. Dr. İbrahim BİLİCİ'ye desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında ihtiyaç duyduğum her anda yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Merve Tunay TOZLU'ya ve Arş. Gör. Selçuk KIZILCAOĞLU'na, metalografik görüntülemeler konusunda tecrübelerini aktarmaktan hiçbir zaman çekinmeyen Arş. Gör. Duygu CANDEMİR'e yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım sürecinde her an yanımda olan ve sahip oldukları hayat tecrübeleri ile beni her zaman motive eden, kıymetli arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Reşit HABOĞLU'na, Doç. Dr. Celal Utku DENİZ'e ve Dr. Öğr. Üyesi Sertaç Samed SEYİTOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemdeki en büyük destekçim babam Yücel ÖZKADER'e, kayıtsız şartsız her zaman yanımda olan annem Serpil ÖZKADER'e ve kardeşim Elif Nur BAL'a fedakarlıkları, destekleri ve her koşulda yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

Hayatıma girdiği günden beri her anımda yanımda olan, varlığı ile bana güç veren, çalışmalarım sırasında tüm stresli anlarımda kapıldığım umutsuzluktan beni çekip çıkartan, hayatıma neşe katan, kıymetli eşim Kübra ÖZKADER'e canı gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu tez çalışmasının en yoğun dönemlerinde heyecanıma heyecan katan ve çalışmanın tamamlanma süreçlerinde henüz Dünya'ya gözlerini açarak hayatımızı anlamlandıran biricik kızım Eylül ÖZKADER'e yaşattığı mutluluktan dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122M355 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Dr. Mustafa Çağrı ÖZKADER

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
GİRİŞ.....	1

### 1. BÖLÜM

#### EKLEMELİ İMALAT

1.1. Metal Olmayan Malzemelerin Eklemeli İmalatında Kullanılan Yöntemler.....	12
1.1.1. Bağlayıcı püskürtme.....	12
1.1.2. Malzeme püskürtme.....	13
1.1.3. Malzeme ekstrüzyonu.....	13
1.1.4. VAT fotopolimerizasyonu.....	14
1.1.5. Tabaka laminasyonu.....	15
1.2. Metal Malzemelerin Eklemeli İmalatında Kullanılan Yöntemler.....	16
1.2.1. Toz yatağında füzyon (TYF).....	16
1.2.2. Yönlendirilmiş enerji yığma (YEY).....	19
1.3. Tel Ark Eklemeli İmalat (TAEİ).....	22

### 2. BÖLÜM

#### LABORATUVAR ÖLÇEKLİ BİR TIG-TAEİ CİHAZININ TASARIM VE ÜRETİMİ

2.1. TIG-TAEİ Sisteminin Mekanik Bileşenlerinin Tasarım ve Üretimi.....	31
2.2. TIG-TAEİ Cihazının Kontrol Sisteminin Tasarım ve Üretimi.....	37

### 3. BÖLÜM

#### TAEİ İLE ÜRETİM SÜRECİNİN MODELLENMESİ

3.1. Sonlu Elemanlar Modeli.....	43
3.2. Isı Kaynağı Modeli.....	48
3.3. Mikroyapısal Model.....	52
3.4. Mekanik Model.....	57

### 4. BÖLÜM

#### BENZETİM MODELLERİNİN DENEYSEL DOĞRULAMASI VE BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Deneysel Doğrulama Çalışmalarında Dikkate Alınan Senaryolar ve Doğrulama Numunelerinin Üretimi .....	61
4.2. Deneysel Doğrulamada Dikkate Alınan Senaryolar İçin Sonlu Elemanlar Modellerinin Oluşturulması .....	68
4.3. Benzetim Model Sonuçlarının Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması .....	76
4.3.1. Sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.....	76
4.3.2. Eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölge boyutlarının karşılaştırılması .....	84
4.3.3. Sertlik değerlerinin karşılaştırılması .....	89
4.3.4. Yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırılması .....	99
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>106</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>109</b>

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 1.1.</b> Geleneksel yöntemlerle eklemeli imalat arasındaki temel farklar.....	10
<b>Tablo 1.2.</b> LENS yöntemi ile TAEİ imalat yönteminin karşılaştırılması.....	23
<b>Tablo 4.1.</b> Ti-6Al-4V alaşımın TAEİ ile üretiminde kullanılan örnek imalat parametreleri.....	62
<b>Tablo 4.2.</b> Tek kat ve 5 kat duvar yapılı numunelerin üretim süreleri .....	66
<b>Tablo 4.3.</b> Ti-6Al-4V alaşımından TAEI yöntemi ile üretilen numunelerin boyutları .....	66
<b>Tablo 4.4.</b> Çözüm ağı yakınsama testinde kullanılan eleman sayıları .....	69
<b>Tablo 4.5.</b> Ti-6Al-4V alaşımının sıcaklığa bağlı termal ve mekanik özellikleri.....	74
<b>Tablo 4.6.</b> Termal modelin oluşturulmasında kullanılan parametreler .....	75
<b>Tablo 4.7</b> Kroll çözeltisi bileşenleri ve dağlamada kullanılan bileşen oranları.....	85

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Eklemeli imalat ile parçaların üretim süreci.....	9
Şekil 1.2. ASTM' ye göre eklemeli imalatın sınıflandırılması .....	11
Şekil 1.3. Bağlayıcı püskürme yöntemi ile üretim .....	12
Şekil 1.4. Malzeme püskürme yöntemi ile üretim .....	13
Şekil 1.5. Malzeme püskürme yöntemi ile üretim .....	14
Şekil 1.6. VAT fotopolimerizasyonu ile üretimin şematik gösterimi .....	15
Şekil 1.7. Tabaka laminasyonu ile eklemeli imalat.....	15
Şekil 1.8. Toz yatağında füzyon ile eklemeli imalatın şematik gösterimi .....	17
Şekil 1.9. TYF yöntemi ile parça üretiminin şematik gösterimi .....	18
Şekil 1.10. YEY yöntemi ile üretiminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 1.11. LENS ile üretimde farklı toz besleme yöntemleri.....	20
Şekil 1.12. Elektron ışın demeti kullanılan YEY Eİ ile parça üretim süreci.....	21
Şekil 1.13. Tel ark eklemeli imalatla üretim süreci.....	24
Şekil 1.14. TAEİ koruyucu gaz kalkanı .....	25
Şekil 1.15. TAEİ yönteminin ana bileşenleri .....	25
Şekil 1.16. TAEİ yönteminde kullanılan kaynak türleri .....	26
Şekil 2.1. TIG TAEI sisteminde kullanılan kartezyen robot tasarımı örnekleri.....	32
Şekil 2.2. TIG-TAEI sisteminde kullanılan kartezyen robotun katı model çizimleri .....	33
Şekil 2.3. TIG-TAEI sistemi ana giriş ve taşıyıcı sistem yapısı.....	33
Şekil 2.4. Döner başlık sisteminin tasarımı .....	35
Şekil 2.5. TIG-TAEİ sistemi kontrol şeması.....	38
Şekil 2.6. CMG WAAM yazılımı ekran görüntüsü .....	39
Şekil 3.1. TAEİ süreçlerinde meydana gelen fiziksel olayların genel bir özeti.....	41
Şekil 3.2. Termal, mekanik ve metalürjik alanlar arasındaki etkileşimler .....	42
Şekil 3.3. Bağlaşık termal-mikroyapısal-mekanik sonlu elemanlar modelinin akış şeması ....	43

<b>Şekil 3.4.</b> Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için tanımlanan girdiler.....	44
<b>Şekil 3.5</b> Python makroları ile sonlu elemanlar modelinin oluşturulması .....	45
<b>Şekil 3.6.</b> Etkinleştirilmemiş eleman metodu.....	46
<b>Şekil 3.7.</b> Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı modeli.....	49
<b>Şekil 3.8.</b> TAEİ sürecine adapte edilmiş ısı kaynağı modeli.....	50
<b>Şekil 3.9.</b> Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı ve adapte edilmiş ısı kaynağı modellerinden elde edilen sonuçlarının deneysel ölçümle karşılaştırılması .....	51
<b>Şekil 3.10.</b> Ti-6Al-4V alaşımının içyapısında sıcaklığa bağlı oluşan fazlar .....	53
<b>Şekil 3.11.</b> Ti-6Al-4V alaşımının katı hal faz dönüşümleri için akış şeması).....	54
<b>Şekil 4.1.</b> Model geliştirme ve doğrulama süreci.....	60
<b>Şekil 4.2.</b> Doğrulama numunelerinin boyutları ve yerleşimleri.....	63
<b>Şekil 4.3.</b> Doğrulama numunelerinin üretiminde kullanılan tarama desenleri.....	64
<b>Şekil 4.4.</b> Sonlu elemanlar modeli için oluşturulan geometriler.....	68
<b>Şekil 4.5.</b> TK1 noktasında çözüm ağı yakınsama testi termal analiz sonuçları .....	70
<b>Şekil 4.6.</b> TK2 noktasında çözüm ağı yakınsama testi termal analiz sonuçları .....	70
<b>Şekil 4.7.</b> DP Noktasında çözüm ağı yakınsama testi termal analiz sonuçları .....	71
<b>Şekil 4.8.</b> 120 A kaynak akımı ile üretilen numunede termal model ve bağlaşık TMM modelden elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması .....	72
<b>Şekil 4.9.</b> 100 A kaynak akımı ile üretilen numunede termal model ve bağlaşık TMM modelden elde edilen sıcaklık sonuçları .....	72
<b>Şekil 4.10.</b> 100 A kaynak akımı ile üretilen numunede çözüm ağı yakınsama testi yer değiştirme sonuçları.....	73
<b>Şekil 4.11.</b> Analizlerde kullanılan 4x8 yapıdaki çözüm ağı yapısı.....	74
<b>Şekil 4.12.</b> Termokupl doğrulama sonuçları.....	77
<b>Şekil 4.13.</b> 120 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapının üretimi sırasında ölçülen ve SEY analizi ile hesaplanan sıcaklıklar .....	78
<b>Şekil 4.14.</b> 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapının üretimi sırasında ölçülen ve SEY analizi ile hesaplanan sıcaklıklar .....	79

<b>Şekil 4.15.</b> Eş yönlü tarama deseninde üretilen 5 katlı duvar yapının üretimi sırasında ölçülen ve SEY analizi ile hesaplanan sıcaklıklar .....	79
<b>Şekil 4.16.</b> Zikzak tarama deseninde üretilen 5 katlı duvar yapının üretimi sırasında ölçülen ve SEY analizi ile hesaplanan sıcaklıklar .....	80
<b>Şekil 4.17.</b> Zikzak tarama deseni ile üretimde gaz kalkanının değişken konumları .....	82
<b>Şekil 4.18.</b> 100 A ile üretilen 5 katlı duvar yapı numunelerde sıcaklık dağılımı.....	84
<b>Şekil 4.19.</b> Sonlu elemanlar analizinden elde edilen EH ve ITAB boyutlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması .....	88
<b>Şekil 4.20.</b> Doğrulama numuneleriyle aynı yerden kesilen geometrik model üzerinde hesaplanan sıcaklık mikroyapı ve sertlik dağılımı .....	90
<b>Şekil 4.21.</b> Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sertlik değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....	91
<b>Şekil 4.22.</b> Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sertlik değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....	92
<b>Şekil 4.23.</b> 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapı numuneden SEM görüntüsü alınan bölgeler .....	93
<b>Şekil 4.24.</b> 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapı numuneden alınan SEM görüntüleri .....	94
<b>Şekil 4.25.</b> 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapı numunenin ITAB içerisinde kalan 2 numaralı bölgesinin mikroyapı görüntüleri .....	95
<b>Şekil 4.26.</b> Zikzak yağma deseni ile üretilen numunede üretim işlemi boyunca en alt katmanın orta bölgesindeki bir integrasyon noktasında hesaplanan sıcaklık ve $\alpha$ , $\beta$ faz oranları.....	97
<b>Şekil 4.27.</b> Zikzak yağma deseni ile üretilen numunede üretim işlemi boyunca en alt katmanın orta bölgesindeki bir elemanın integrasyon noktasında hesaplanan faz oranları ve sertlik değerleri .....	98
<b>Şekil 4.28.</b> Tek katlı duvar yapı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme dağılımı .....	101
<b>Şekil 4.29.</b> Beş katlı duvar yapı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme dağılımı .....	101
<b>Şekil 4.30.</b> Tek katlı duvar yapı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme sonuçlarının deneysel ölçümlerle karşılaştırılması .....	102

**Şekil 4.31.** 5 katlı duvar yapılı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme sonuçlarının deneysel ölçümlerle karşılaştırılması ..... 103

**Şekil 4.32.** 5 katlı duvar yapılı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme sonuçları ..... 105



## RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
<b>Resim 2.1.</b> TIG – TAEİ üretim sistemi için üretilen kartezyen robotun genel görüntüsü .....	34
<b>Resim 2.2.</b> TIG TAEİ sisteminde kullanılan tel sürme mekanizması.....	35
<b>Resim 2.3.</b> Tasarlanan döner başlık sisteminin görüntüsü.....	36
<b>Resim 2.4.</b> Üretimi tamamlanan TIG-TAEİ cihazının genel görüntüsü .....	37
<b>Resim 2.5.</b> Tasarlanan TIG-TAEİ cihazı ile üretilen deneme numunesi örnekleri .....	40
<b>Resim 4.1.</b> Deneysel doğrulamalarda kullanılan numuneler için altlık plaka ve ölçüleri .....	62
<b>Resim 4.2</b> Farklı gaz akış hızlarında oluşan duvar yapı görüntüleri.....	65
<b>Resim 4.3.</b> TIG-TAEİ ile üretilen, tek kat ve 5 kat duvar yapılı doğrulama numunelerinin görüntüleri.....	67
<b>Resim 4.4.</b> Deney numunelerinin görünümü.....	76
<b>Resim 4.5.</b> Termokupl doğrulamasında kullanılan su banyosu ve veri toplama sistemi .....	77
<b>Resim 4.6.</b> Tek katlı duvar yapılar üzerinden alınan sertlik ve mikroyapı numuneleri .....	85
<b>Resim 4.7.</b> 5 katlı duvar yapılar üzerinden alınan sertlik numuneleri .....	85
<b>Resim 4.8</b> Altlık plakaların üretim sistemine sabitlenmesi ve üretim sonrasında meydana gelen yer değiştirmelerin ölçümü.....	100

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$a_f$	Elipsoidal ısı kaynağının ön bölgesindeki yarı uzunluğu
$a_r$	Elipsoidal ısı kaynağının arka bölgesindeki yarı uzunluğu
$b$	Elipsoidal ısı kaynağının yarı genişliği
$c$	Elipsoidal ısı kaynağının yarı derinliği
$dl$	Aktif elemanın uzunluğu
$f_f$	Isı kaynağının ön bölgesindeki ağırlıklandırma oranı
$f_r$	Isı kaynağının arka bölgesindeki ağırlıklandırma oranı
$H_{\alpha w}$	Widmanstätten alfa fazının sertlik değeri
$H_{\alpha m}$	Martensit alfa fazı sertlik değeri
$H_{\beta}$	Beta fazın sertlik değeri
$h_k$	Kaynak dikişi yüksekliği
$h$	Isı taşınım katsayısı
$I$	Akım
$Q$	Isı miktarı
$Q_{tel}$	Tel malzeme üzerine uygulanan ısı miktarı
$Q_{altlık}$	Altlık malzeme üzerine uygulanan ısı miktarı
$T$	Yüzey sıcaklığı
$T_{\infty}$	Ortam sıcaklığı
$T_{ms}$	Martensitik dönüşümün başladığı sıcaklık
$T_{ref}$	Referans sıcaklık
$T_{IG}$	Taneler arası çekirdeklenme sıcaklığı
$t^*$	Fiktif zaman
$t_{crit}$	Dönüşüm sıcaklığının bire eşit olduğu zaman
$tl$	Aktif elemanın yüksekliği
$U$	Kaynak makinası tarafından uygulanan gerilim

$X_{\alpha m}$	Martensit-alfa faz oranı
$X_{\beta}$	Beta faz oranı
$X_{\alpha}^{eq}$	Alfa fazlarının denge oranı
$x$	Kartezyen x koordinatı
$v$	Hız
$y$	Kartezyen y koordinatı
$z$	Kartezyen z koordinatı
$w_k$	Kaynak dikişinin genişliği
$\sigma$	Stefan-Boltzmann sabiti
$\varepsilon$	Yüzey emisyonu
$T_{\beta}^{trans}$	$\beta$ -dönüşüm sıcaklığı
$\alpha$	Alfa fazı
$\beta$	Beta fazı
$\alpha_m$	Masif alfa fazı
$\alpha_{gb}$	Tane sınırı alfa fazı (Grain boundary)
$\alpha_w$	Widmanstätten alfa fazı
$\eta$	Emilim verimi
$\alpha_c$	Koloni alfa fazı
$\alpha_B$	Sepet örgüsü alfa fazı (Basketwave)
$\varepsilon_e$	Elastik birim şekil değişimi
$\varepsilon_p$	Plastik birim şekil değişimi
$\varepsilon_T$	Termal birim şekil değişimi
$\alpha_T$	Termal genişleme katsayısı
$\alpha_{\alpha}$	Alfa fazı genişleme katsayısı
$\alpha_{\beta}$	Beta fazı genişleme katsayısı

## Kısaltmalar

AC	Alternatif akım (Alternative current)
BDD	Bilgisayar destekli dizayn
CMG	Hesaplamalı mekanik grubu (Computational Mechanics Group)
CNC	Bilgisayarlı numerik kontrol (Computer numeric control)
DC	Doğru akım (Direct current)
EBM	Ergiyik biriktirmeli modelleme
EBF <sup>3</sup>	Elektron ışın demeti ile serbest biçimli imalat
ED	Elektron demeti
EH	Eriyik havuzu
Eİ	Eklemeli imalat
ITAB	Isı tesiri altındaki bölge
JC	Johnson-Cook
JMAK	Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov
Kg	Kilogram
m	Metre
MIG	Metal inört gaz
MIG-TAEİ	Metal inört gaz – tel ark eklemeli imalat
mm	Milimetre
MPEİ	Mürekkep püskürtmeli eklemeli imalat
PAK	Plazma ark kaynağı
Sa	Saat
SE	Sonlu elemanlar
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
TAEİ	Tel ark eklemeli imalat
TIG	Tungsten inört gaz

TIG-TAEİ	Tungsten inört gaz – tel ark eklemeli imalat
TK1	1 numaralı Termokupl noktası
TK2	2 numaralı Termokupl noktası
TMM	Termal-mikroyapısal-mekanik
TTT	Zaman sıcaklık dönüşüm (TimeTemperature-Transformation)
TYF	Toz yatağında füzyon
UV	Ultraviole
WAAM	Tel ark eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing)
YEV	Yönlendirilmiş enerji yığıma



## GİRİŞ

Teknolojide yaşanan gelişmeler ve endüstride meydana gelen hızlı değişimler, gelişmiş üretim yöntemlerine olan ihtiyacı artırmış ve araştırmacıları, daha verimli, daha hızlı ve daha hassas imalat tekniklerini geliştirmeye yönlendirmiştir. Endüstri 4.0 kavramının gündeme gelmesi ile birlikte, bilgisayarla tümleşik imalat sistemlerinin gelişimi ivme kazanmış ve bilgisayarlar günümüzde üretim sistemlerinin vazgeçilmez parçaları haline almıştır. Bu noktada, bilgisayar destekli üretim metodlarından biri olan eklemeli imalat (Eİ), son zamanlarda oldukça popüler hale gelen yenilikçi bir üretim metodu olarak karşımıza çıkmaktadır (N. Kumar vd., 2022).

Katmanlar halinde biriktirilen malzemelerin bir araya getirilmesiyle objelerin oluşturulduğu eklemeli imalat, birçok sektörde kullanım alanı bulan ve üretimde paradigma değişikliğine sebep olan bir üretim teknolojisidir. Bu yöntemle karmaşık geometriye sahip parçaların polimerden seramiğe, metale ve hatta beton ve alçı gibi yapı malzemelerine kadar çok çeşitli hammaddeler kullanılarak minimum atıkla, hızlı ve ekonomik olarak üretilmesi mümkündür. Ayrıca, katmanlı üretim ya da 3 boyutlu (3B) baskı olarak da bilinen bu yöntem, bilgisayarlı tasarım ve üretim süreçlerine dayanan altyapısı sayesinde diğer üretim süreçlerine bağımlı olmadan (kalıp imalatı vb.), keyfi geometrilere sahip parçaların üretimine olanak vermektedir. Üretimde sağladığı bu esneklik sayesinde Eİ geleneksel metodlarla üretilmeyen parçaların imalatında tasarımcılara büyük kolaylıklar sunmakta ve bu yönüyle metal malzemelerin üretiminde de yaygın olarak tercih edilmektedir (N. Kumar vd., 2022).

Metal malzemelerin eklemeli imalatı, kullanılan enerji kaynağına, malzemelerin birleştirilme tekniğine, ya da kullanılan hammaddenin türüne göre farklı birçok teknikle gerçekleştirilebilir. Yönlendirilmiş enerji yağma (YEY), metallerin eklemeli imalatında yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, önceden belirlenen rotalarda hareket eden yönlendirilmiş bir ısı kaynağı ile (lazer ışını, elektron ışını veya elektrik arkı) hammaddeler (toz ya da tel formunda) ergitilmekte ve bu ergiyik hammadde birbirine eklenerek parçalar üretilmektedir (Lockett vd., 2017; Singh vd., 2022).

YEY Eİ farklı enerji kaynakları ve farklı formlarda hammaddeler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu noktada YEY, kullanılan enerji kaynağı ve/veya hammadde formuna göre farklı isimlerle adlandırılan alt yöntemlere ayrılmaktadır. Bu alt yöntemlerden biri olan tel beslemeli ark ergitmeli Eİ ya da kısaca tel ark eklemeli imalat (TAEİ) son yıllarda oldukça popüler hale gelen bir eklemeli imalat yöntemidir (Lindgren, 2006; Chiumenti vd., 2010; Lundbäck ve Lindgren, 2011; Nagasai vd., 2022). TAEİ, tel formundaki malzemelerin, bir elektrik ark kaynağı yardımı ile ergitilerek bir altlık üzerine katmanlar halinde biriktirilmesi ile gerçekleştirilir (Chandrasekaran vd., 2020). Bu yöntemde kullanılan elektrik arkı, metal inört gaz (MIG) kaynağı, tungsten inört gaz (TIG) kaynağı veya plazma ark kaynağı (PAK)

cihazları kullanılarak sağlanabilir ve yöntem kullanılan kaynak tekniğine bağlı (TIG-TAEİ, MIG-TAEİ gibi) olarak isimlendirilir (Williams vd., 2016; Lockett vd., 2017; Rosli vd., 2021).

TAEİ ile üretimde, kaynak torçu, robotik bir sistem yardımı ile üretilecek parça geometrisine göre belirlenen koordinatlarda hareket ettirilir ve bu sırada elektrik arkıyla ortaya çıkan ısı kullanılarak kaynak teli ergitilir. Böylece, ergiyik malzeme katmanlar halinde, belirlenen bölgelerde yığılarak hedeflenen parça ortaya çıkartılmış olur. Bu yöntem, kullanılan kaynak tekniğine ve tel çapına bağlı olarak yüksek üretim hızlarına imkan tanır. Bu yönüyle diğer eklemeli imalat yöntemleriyle kıyaslandığında karmaşık geometrilere sahip, içi dolu metal parçaların, TAEİ ile daha kısa sürede, homojen yoğunluk ve nispeten iyi mekanik özelliklerde, %70'e varan daha düşük maliyetle üretimi mümkündür (V. Kumar vd., 2023). Ayrıca, TAEİ, nispeten daha düşük maliyetlerle kurulabilen alt yapısı sayesinde (bir kaynak makinesi ve bir robotik hareket sistemiyle) son yıllarda hızlı bir gelişme göstererek sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve birçok araştırmacı tarafından derinlemesine araştırılan bir üretim metodu haline almıştır (Khan ve Madhukar, 2020; Veiga vd., 2022).

Metal malzemelerin geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesinde dövme, döküm ya da hassas döküm gibi üretim yöntemleri kullanılırken bu malzemelere net şekil verilebilmesi için de talaşlı imalat gibi ikincil işlemler uygulanır. Ancak, uygulanan bu ikincil işlemler, özellikle karmaşık geometrilerin hassas olarak işlenmesi gerektiği durumlarda maliyeti önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, talaşlı imalat gibi malzeme eksiltelen üretim yöntemlerinde parçaların üzerinden çok miktarda talaş uzaklaştırılmakta bu da malzeme, zaman ve enerji kaybına yol açmaktadır (Manoj vd., 2019). Mühendislik uygulamalarında kullanılan makine parçalarının büyük bir bölümü çelik ve alüminyum türevlerinin şekillendirilmesi ile imal edilir. Ancak havacılık, otomotiv, sağlık ürünleri gibi yüksek teknoloji barındıran uygulamalarda, çeliğe göre üstün özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada sahip olduğu mukavemet/yoğunluk oranı göz önüne alındığında, titanyum alaşımları, ileri teknoloji uygulamaları için cazip bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır. Ti-6Al-4V, mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan titanyum alaşımı türüdür. Yüksek dayanım, düşük yoğunluk, iyi çekme ve sürünme dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı nedenleriyle, dünyadaki titanyum alaşımı tüketiminin yarısından fazlasını Ti-6Al-4V oluşturmaktadır (Gope vd., 2018; Okulov vd., 2018). Titanyum alaşımlarının, sahip olduğu fiziksel ve yapısal özellikler bu parçaların talaşlı imalat gibi yaygın kullanılan yöntemlerle şekillendirilmesinde bazı sınırlamaları beraberinde getirmektedir. Özellikle düşük termal iletkenliğe ve özgül ısıya sahip olmaları nedeniyle, titanyum alaşımlarının talaşlı imalatı sırasında yüksek kesme sıcaklıkları meydana gelmekte, bu da kesici takımların çok çabuk aşınması ile sonuçlanmaktadır. Bu noktada Eİ özellikle karmaşık geometri parçaların, zor işlenebilen titanyum alaşımlarından imal edilmesinde iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır (Nguyen vd., 2022).

TAEİ ile üretimde en çok MIG ve TIG kaynak metotları kullanılmaktadır. Bununla birlikte titanyum alaşımları gibi kimyasal aktivite ve oksidasyon duyarlılığı yüksek metallerin

imalatında düşük ısı girdisi ile üretime imkan vermesi, daha iyi mekanik özellikler ve yüzey kalitesi sağlaması nedeniyle TIG kaynağı çok daha yaygın olarak tercih edilmektedir (Wan vd., 2016; Q. Yang vd., 2016; Vempati vd., 2018; Ferro vd., 2020; Navarro vd., 2022;). Ancak TAEİ süreçlerinde, hangi kaynak türü kullanılırsa kullanılsın katmanların oluşturulabilmesi için malzemelerin ergime sıcaklığına kadar ısıtılması gerekir. Bu nedenle TAEİ sırasında metal parçaların yüksek sıcaklık değişimlerine maruz kalması kaçınılmaz bir durumdur. Bu durumun sonucu olarak TAEİ sunduğu birçok avantajın yanı sıra kontrolsüz sıcaklık değişimleri; kalıntı gerilmeler, çarpılma ve içyapı belirsizlikleri gibi problemleri de beraberinde getirmektedir (Lin vd., 2023). Örneğin; Ti-6Al-4V bir  $\alpha + \beta$  alaşımı olup içyapısı oda sıcaklığında yaklaşık olarak %90  $\alpha +$  %10  $\beta$  fazlarından oluşmaktadır. Bununla beraber malzemenin sıcaklığı dönüşüm sıcaklıklarının üzerine çıktığında bu oranlar değişmekte ve farklı içyapı oluşumları gözlenmektedir. Benzer şekilde soğuma sürecinde, soğuma hızına bağlı olarak alaşımın içyapısında farklı faz dönüşümleri meydana gelebilmektedir. Bu bağlamda, Ti-6Al-4V alaşımının süreç boyunca değişen mikroyapısı (faz oranları ve yapıdaki dağılımı, tane yapısı vb.) malzemenin mekanik özellik ve davranışlarına etki etmekte ve homojen olmayan mekanik özelliklerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ sürecinde meydana gelen termal, mikroyapısal ve mekanik değişimlerin iyi biliniyor olması üretim sonunda ortaya çıkan parçaların özelliklerinin tahmin edilebilmesi ve istenilen özelliklerde malzeme üretimi için son derece önemlidir (Le vd., 2022). Bu noktada, TAEİ süreçleri üzerine gerçekleştirilecek çalışmalar, yöntemin geliştirilmesi ve sistematığının yeterince anlaşılacak yeni uygulama alanlarının ortaya konulması konusunda kilit rol oynamaktadır. Bu bağlamda TAEİ ile üretilen parçaların termal, mikroyapısal ve mekanik özellik ve davranışlarının araştırılması amacıyla gerçekleştirilen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların literatürde özellikle son yıllarda yoğunlaşmaya başladığı görülmektedir (Raut ve Taiwade, 2021; Treutler ve Wesling, 2021; B. Kumar ve Manikandan, 2022). Bu alandaki ilk çalışmalar çoğunlukla ticari olarak yaygın kullanılan ve çeşitli alaşımların imalatına izin veren MIG-TAEİ süreçlerinin incelenmesine yönelmiştir. Öte yandan, büyük ebatlı parçaların görece hassas şekilde imalatında ve tamirinde avantajları ile öne çıkan TIG-TAEİ yöntemine ilgi son yıllarda artmıştır (Manoj vd., 2019; Raut ve Taiwade, 2021). Özellikle TAEİ yönteminin yaygınlaşması ile Ti-6Al-4V alaşımının bu yöntem ile üretimi üzerine gerçekleştirilen çalışmaların sayısı da gün geçtikçe artmaktadır (Lin vd., 2021). Bu kapsamda; Lin vd. (2023) Ti-6Al-4V alaşımının MIG-TAEİ ile üretimi sırasında meydana gelen çoklu termal döngülerin malzemenin tane yapısı ve mekanik özelliklerinde oluşturduğu etkileri gözlemlemek üzere bir termal-mekanik simülasyon sisteminde çeşitli deneysel araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Başka bir çalışmada Xian vd., (2022) Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ ile üretimi sırasında farklı ısı girdileri ile üretilen parçaların mikroyapı ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Yi vd., (2020) ise Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ ile üretimi sırasında soğuma hızının parçaların mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini araştıran bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Guo vd., (2024) yine Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ ile üretimi sırasında katmanlar arası soğuma sürecinde karbondioksit gazı

uygulandığında malzemede meydana gelen faz yapıları, tane büyümesi ve mikrosertlik değerlerindeki değişimleri incelemişlerdir. Eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölge boyutlarının belirlenmesine yönelik yapılan bir çalışmada ise Ho vd., (2019) Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ ile üretimi sırasında oluşan kaynak havuzu ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutlarını belirlemek ve bu bölgede meydana gelen değişimleri gözlemlemek için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Q. Wu vd., (2017a) Ti-6Al-4V parçaların TIG-TAEİ ile üretimi sırasında oluşan eriyik havuzu boyutunun malzemelerin mikroyapı ve çekme dayanımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, B. Wu vd. (2017) TIG-TAEİ yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşımı kullanılarak üretilen parçalarda işlem sürecinde biriken ısının, ark karakteristiği ve malzeme birikme davranışı ve yığılan katmanların geometrisi üzerine etkisini araştırmak üzere çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Eklemeli imalat sırasında malzemelerin yığılma şekli üretilen parçaların özelliklerini değiştiren parametrelerden birisidir. Bu kapsamda Y. Zhou vd. (2020) Ti-6Al-4V alaşımı kullanılarak TIG-TAEİ yöntemi ile üretilen parçalarda malzeme biriktirme stratejilerinin işlem sırasında meydana termal döngülere, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. J. Wang vd., (2018) başka bir çalışmada TIG-TAEİ ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarda malzeme biriktirme parametrelerinin ve üretim yönünün tane morfolojisi üzerine etkisini gözlemlemek üzere deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, Q. Wu vd., (2017b) Ti-6Al-4V alaşımı kullanarak değişken malzeme yığılma yönlerinde TIG-TAEİ ile üniform yapıların elde edilmesine yönelik üretim parametrelerinin belirlenmesi için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. J. Wang vd., (2020a) TIG-TAEİ yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşımının içyapısında eş eksenli birincil- $\beta$  tanelerinin elde edilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Başka bir çalışmada J. Wang vd. (2020b) TIG-TAEİ yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşımından ürettikleri parçalara 5 farklı koşulda ısıl işlem uygulamış, TAEİ ile üretilen malzemelerin mekanik ve içyapılarında ısıl işlem ile meydana gelen değişimleri gözlemlemişlerdir. Öte yandan literatürde Ti-6Al-4V alaşımının diğer kaynak türleri ile gerçekleştirilen TAEİ süreçleri ve bu süreçlere etki eden parametrelerin belirlenmesine yönelik çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Buna göre yapılan çalışmalarda; S. Zhou vd., (2022) TAEİ'de ısı kaynağı olarak MIG kaynağının özel bir uygulaması olan soğuk metal transfer tekniğinin kullanılması durumunda metal biriktirme sürecine işlem parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. C. Wang vd., (2021) başka bir çalışmada yüksek yığılma hızlarında, kullanılan tel çapının Ti-6Al-4V'ün PAK-TAEİ ile üretim süreçlerine etkisini araştırarak malzeme bünyesinde biriken ısı, yığılma oranı ve tel çapı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Syed vd. (2021) Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ ile üretiminde malzeme yığılma stratejisinin üretilen numunelerin çekme ve yorulma davranışları üzerine etkisini araştırmışlardır. Yine Syed vd., (2023) başka bir çalışmada PAK-TAEİ ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının gerinim kontrollü test koşullarında döngüsel deformasyon davranışını ve yorulma özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı oryantasyon ve farklı ısı yoğunluklarında ürettikleri deney numunelerine çeşitli gerinim değerlerinde yorulma testleri uygulamışlardır. Kashaev vd., (2024) TAEİ yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V'ün yorulma ömrünün belirlenmesi adlı çalışmalarında soğuk metal transfer kaynağı kullanılarak TAEİ ile üretilen numuneler üzerinde yorulma testleri gerçekleştirerek,

TAEİ ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçaların yorulma ömürlerinin tahmin edilmesine yönelik bağıntılar ortaya koymuşlardır. Akgun vd., (2021) gerçekleştirdikleri deneysel bir çalışmada Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ ile üretimi sırasında meydana gelen gözenekli yapıların üretilen parçaların yorulma davranışları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bermingham vd., (2018) ise TAEİ ile koruyucu gaz atmosferi dışında üretilen Ti-6Al-4V parçaların oksidasyon hassasiyeti başlıklı çalışmalarında farklı gaz atmosferi şartlarında gerçekleştirilen üretimlerde Ti-6Al-4V alaşımının yapısında meydana gelen oksidasyon oluşumunu ve etkilerini araştırmışlardır.

Bu noktada literatürdeki çalışmalar genel olarak ele alındığında tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretimin geniş bir parametre uzayında ele alınması gereken karmaşık ve çok kapsamlı bir süreci içerdiği sonucuna varılmaktadır. Tel ark eklemeli imalat ile parçaların üretiminde ilerleme hızı, tel besleme hızı, yağma oranı, katmanlar arası geçiş sıcaklığı, ısı girdisi, ortam koşulları malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi birçok parametre etkilidir. Öte yandan TAEİ sürecinde katmanların oluşturulması sırasında tekrarlı olarak ötelenen ısı kaynağının tesiri altına giren her bölgede, eritme sonrası katılaşma ve katı hal metalürjik faz dönüşümleri nedeniyle mikroyapı değişimleri gerçekleşir. Ayrıca katmanlar eklenirken meydana gelen hızlı ısınma ve soğuma çevrimleri üretilen iş parçasında ve üretildiği altlıkta görece büyük mertebelere ulaşan lokal sıcaklık değişimleri (Fachinotti vd., 2012; Marimuthu vd., 2013; Vastola vd., 2016), kalıntı gerilme ve çarpılmaların oluşmasına neden olmaktadır (Afkhami vd., 2022; B. Kumar ve Manikandan, 2022). Üstelik her bir malzeme noktasındaki termal geçmiş, mikroyapı ve kalıntı gerilmeler, süreç değişkenlerine (örneğin güç, hız, tel besleme hızı vb.), parça geometrisine ve tarama stratejisine göre farklılık gösterebilmektedir. Bununla birlikte farklı parametrelerinin araştırılması sırasında çoğu zaman her bir parametre için yeni deney numunelerinin üretilmesi gerekmektedir. Buda hem titanyum alaşımları gibi pahalı malzemelerle çalışmayı maliyetli duruma getirmekte hem de çalışma için gereken zamanı artırmaktadır. Tüm bu nedenler göz önüne alındığında TAEİ ile üretim sırasında malzemeler üzerinde meydana gelen anlık değişimlerin deneysel olarak gözlemlenmesi çok zor ve parametre sayısı dikkate alındığında çok pahalı ve zaman alıcıdır. Bu noktada, TIG-TAEİ süreçlerinin sayısal benzetim modelleri, termal, mikroyapısal, mekanik davranışların imalat süreci boyunca tahmin ve kontrol edilebilmesi için iyi bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır (Fachinotti vd., 2012; Marimuthu vd., 2013; Tozlu, 2022). Bu nedenle özellikle TAEİ yönteminin popülerliğini arttırdığı son yıllarda bu süreçlerin sayısal benzetimleri ile ilgili çalışmalar ivme kazanmıştır (Raut ve Taiwade, 2021; Treutler ve Wesling, 2021; B. Kumar ve Manikandan, 2022). Bu bağlamda TAEİ süreçlerinin sayısal olarak modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) yaygın şekilde kullanılmakta olup çeşitli metallerin termo-mekanik davranışlarının incelenmesi üzerine son yıllarda çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Öte yandan Ti-6Al-4V alaşımı özelinde TAEİ süreçlerinin termal, mekanik ve mikroyapısal analizi ile ilgili diğer metal malzemelere kıyasla kısıtlı sayıda çalışma mevcut olup bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir (B. Kumar ve Manikandan, 2022). Burada, TAEİ kaynak işlemine dayanan bir yöntem olup, her iki süreç boyunca malzemelerin birbirleri üzerine eklenmesi sırasında

benzer fiziksel olaylar gerçekleşmektedir. Bu nedenle, diğer YEY yöntemlerine benzer şekilde TAEİ süreçlerinin benzetim modellerinin geliştirilmesinde genellikle hesaplamalı kaynak mekaniği modellerinden faydalanılmaktadır (Lindgren vd., 2016). Buna göre; Z. Wang vd., (2017) Ti-6Al-4V'nin TIG-TAEİ yöntemi ile üretimi sürecinde meydana gelen gerilme ve termal alan değişimlerini termal-mekanik SEY modeli kullanarak incelemişlerdir. Bir diğer çalışmada, C. Wang vd., (2021) plazma ark kaynağı temelli TAEİ ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımında tel çapının ve besleme hızının biriktirme hızı ve erime özelliklerine etkisini deneysel ve Gaussian ısı dağılımı modeli kullanarak SEY ile incelemişlerdir. Q. Wu vd., (2019) TIG-TAEİ sürecinde farklı yığılma desenleri kullanarak üretilen Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşımalarında meydana gelen çarpılmaları termal-mekanik SEY modeli ile analiz etmiş ve sonuçlarını aynı şartlarda gerçekleştirdikleri deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırarak parça boyunun kısaltılması ile kalıntı gerilmelerin ve çarpılmaların minimize edilebileceği sonucuna varmışlardır. Murgau vd., (2019) Ti-6Al-4V alaşımı kullanılan TIG-TAEİ üretim süreci ile ilgili termal-mikroyapısal benzetim modelleri geliştirmiş ve üretilen parçanın nihai içyapısını tahmin eden bir model ortaya koymuşlardır. Ayrıca doğrulama amacıyla deneysel çalışmalar da gerçekleştirmişlerdir. Sun vd., (2021a) Ti-6Al-4V alaşımının tel beslemeli lazer ergitmeli imalatı sırasında meydana gelen katı hal faz değişimlerini Baykasoglu vd., (2018; 2020) tarafından geliştirilen termal-mikroyapısal modelleri kullanarak incelemiş ve deneysel doğrulamasını yaparak süreç parametrelerini optimize etmenin önemini göstermişlerdir. Başka bir çalışmalarında Sun vd. (2021b) lazer-TAEİ sürecinde meydana gelen faz dönüşümünü süreç modelinden elde edilen termal geçiş profili ile birleştirmiş ve 3B hücresel otomasyon metodu ile tahmin ederek doğrulamışlardır. Donoghue vd., (2020) TIG-TAEİ sürecinde katmanlar arası haddemele işleminin içyapıya etkisini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemiş ve geliştirilen modeli deneysel olarak doğrulamışlardır. Y. Zhou vd., (2020) TIG-TAEİ ile farklı yığılma yönlerinde üretilen Ti-6Al-4V parçalarda meydana gelen termal döngüleri sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Ayrıca bu çalışma dahilinde malzemelerde meydana gelen mekanik ve mikroyapısal değişimleri deneysel olarak araştırmışlardır. Bielik, (2020) Ti-6Al-4V alaşımının PAK-TAEİ ile üretimi sırasında meydana gelen termal ve mekanik değişimleri sayısal olarak modellemiş ve bu modelleri doğrulamak için deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Hönnige vd., (2018) PAK-TAEİ ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların birleşim noktalarında meydana gelen kalıntı gerilmeleri sonlu elemanlar metodu yardımı ile incelemişlerdir. Mathews vd., (2024) TAEİ ile üretilen büyük Ti-6Al-4V parçalarda meydana gelen kalıntı gerilme birikimini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Ahmad vd., (2018) gerçekleştirdikleri çalışmada Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ sürecinde meydana gelen iç gerilmeleri tahmin eden bir model geliştirmiş ve bu modeli deneysel olarak doğrulamışlardır. Ayrıca, Ahmad vd., (2022) değişik yığılma stratejilerinin Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ sürecindeki kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerini termal-mekanik SEY modelleri ile incelemişlerdir.

Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ sũreçlerinin benzetimine yœnelik literatũrde bulunan ve œzeti yukarıda verilen çalışmalar değerlendirildiğinde, TAEİ sırasında meydana gelen değişimlerin termal-mekanik veya termal-mikroyapısal sũreçlerin modellenerek incelendiği gœrũlmektedir. Ancak, Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ sũreçlerinde termal, mikroyapısal ve mekanik alanlarda birçok fiziksel olay eş zamanlı olarak meydana gelmektedir. Bu noktada, Ti-6Al-4V alaşımının kullanıldığı ve eklemeli imalat sũreçlerinin modellendiği çeşitli çalışmalarda, mikroyapısal katı hal dœnũřũmlerinin dikkate alınmaması halinde kalıntı gerilme ve Şekil değiştirmelerin sayısal modeller kullanılarak tutarlı Şekilde tahmin edilemeyeceği gœsterilmektedir. Örneğin, Denlinger ve Michaleris, (2016) gerçekteştirdikleri çalışmalarda toz beslemeli elektron ışını temelli YEY yœntemi ile Ti-6Al-4V alaşımının imalat sũrecinde meydana gelen çarpılma ve kalıntı gerilmeleri termal-mekanik bir model kullanarak incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlara gœre sayısal modellerin hem çarpılmaları hem de artık gerilmeleri deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında %500'e varan mertebelerde yũksek tahmin ettiğini gœstermiřler ve bu bağlamda katı hal dœnũřũmlerini modellemelerde dikkate alınmanın œnemini vurgulamışlardır. Başka bir çalışmada, Lindgren vd., (2016) kaynak temelli Eİ sũreçlerinde tutarlı sonuçlar elde edilebilmesinde faz dœnũřũmlerinin dikkate alınmasının œnemini tartışmıştır. Yine Tunay vd., (2023) tarafından YEY sũreçleri ũzerine gerçekteştirilen başka bir çalışmada mekanik davranışın incelenmesinde mikroyapıdaki değişimlerin gœz œnũne alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu noktada literatũrdeki çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve konu ile ilgili sunulan bu œneriler genel olarak değerlendirildiğinde YEY eklemeli imalatın doğru benzetimleri için mikroyapısal değişimlerin gœz ardı edilemeyeceği sonucuna varılmaktadır. Bu noktada bahsi geçen sũrelerde benzer fiziksel olayların meydana geldiği dũřũnũldũęũnde Ti-6Al-4V alaşımının (bir YEY ũretim tũrũ olan) TAEİ sũreçlerinin benzetiminde mikroyapısal etkilerin dikkate alınmasının œnemi ortaya çıkmaktadır. Benzer Şekilde, TAEİ sũreçlerinde meydana gelen termal, mekanik ve mikroyapısal değişimlerin geniş bir parametre uzayında tutarlı Şekilde ortaya konulabilmesi için modelleme parametrelerinin (ısı kaynağı modeli, sınır koşulları, malzeme œzellikleri, geometri vb.) uygun Şekilde seçilmesi oldukça kritik œneme sahiptir (Fachinotti vd., 2012; Marimuthu vd., 2013).

TAEİ sũrecinin analizi ile ilgili yukarıda œzetlendięi gibi bazı termo-mekanik ve termo-mikroyapısal modelleme çalışmaları olsa da farklı sũre parametreleri için tutarlılığı deneysel olarak gœsterilmiř 3 boyutlu bir sũre benzetim modelinin TIG-TAEİ sũreci œzeline geliştirilmesi ile ilgili literatũrde kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca TIG-TAEİ sũrecindeki termal, mikroyapısal ve mekanik etkileşimleri kapsamlı bir Şekilde ele alan ve farklı sũre parametreleri için doğrulanmış bir termal-mikroyapısal-mekanik (TMM) benzetim modeli literatũrde mevcut değildir. Tũm bu durumlar gœz œnũne alınarak hazırlanan bu tez çalışması kapsamında Ti-6Al-4V alaşımından TIG-TAEİ yœntemiyle ũretilecek parçalarda sũre-yapı-œzellik ilişkilerinin anlaşılmasına katkı sağlayacak, deneysel olarak doğrulanmış tamamen bağlaşık TMM SEY benzetim modellerinin geliştirilmesine yœnelik kapsamlı çalışmalar gerçekteştirilmiştir. Bu amaçla çalışmanın ilk aşamasında laboratuvar œlekli bir

TIG-TAEİ sistemi geliştirilerek üretilmiştir. Bu sayede deneysel doğrulamalarda kullanılacak numunelerin üretimi için bir alt yapı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu altyapı kullanılarak farklı senaryolar için (farklı ısı girdileri, katman sayısı ve tarama deseni) çeşitli deney numuneleri imal edilmiştir. İlerleyen süreçte üretilen numunelerin boyutları ile sınır koşulları dikkate alınarak TMM sonlu elemanlar benzetim modellerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Benzetim modellerinin geliştirilmesinde ABAQUS paket programından yararlanılmıştır. Bu kapsamda ABAQUS Python makroları ve Fortran kullanıcı alt programları yardımı ile çeşitli modelleme bileşenlerinin (sınır koşulları, eleman aktifleştirme tanımlamaları, hareketli ısı kaynağı modeli, malzemenin mikroyapısal ve mekanik özellikleri vb.) esnek ve parametrik bir yapıda tanımlanabildiği bir SEY modeli oluşturulmuştur. Benzetim modellerinde iletim, taşınım ve radyasyonla ısı transferleri dikkate alınıp ısı kaynağının tanımlanmasında TIG kaynağı için modifiye edilmiş bir Goldak ısı kaynağı modeli kullanılmıştır. Ayrıca bağlaç termal-mekanik modele mikroyapısal hesaplama algoritmaları entegre edilerek tümüyle bağlaç bir TMM model ortaya konulmuştur. TAEİ işlemi boyunca sıcaklık değişimlerine bağlı olarak meydana gelen mikroyapısal dönüşümlerin tahmini için hem difüzyonlu hem de difüzyonsuz katı hal faz dönüşümlerini hesaba katan bir model dikkate alınmış, böylece  $\alpha$  ve  $\beta$  faz oranlarının imalat süreci boyunca değişimleri incelenmiştir. Bunun yanında, hesaplanan fazların oranları ve mikrosertlik değerleri dikkate alınarak karışımlar kuralı yardımı ile parçaların mikrosertlik değerlerindeki değişimler hesaplanmıştır. Mikroyapısal değişimlerin malzemenin akma davranışına etkisi hesaplanan fazların oranları ve akma değerleri dikkate alınarak karışımlar kuralı yardımı ile Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak benzetim modellerine dahil edilmiştir. Geliştirme süreci tamamlanan modeller, deneysel yöntemlerden elde edilen veriler kullanılarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Bu amaçla öncelikle iki farklı ısı girdisiyle üretilen tek katlı duvar yapılı numuneler dikkate alınarak çeşitli başlıklarda doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak iki farklı noktadan termokuplarla zamana bağlı olarak ölçülen deneysel sıcaklık değerleri, numunelerin kesitleri üzerinden ölçülen eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutları, yine numunelerin kesitleri üzerinden ölçülen sertlik değerleri ve bir kenarı ankastre olarak mesnetlenmiş altlık plaka üzerinden ölçülen yer değiştirme sonuçları sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonrasında ise modelin çok katlı yapılar için de doğru sonuçlar üretebildiğini göstermek adına eş yönlü ve zikzak tarama desenleriyle üretilen 5 katlı duvar yapılı numuneler dikkate alınarak benzer doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen parametrik deneysel doğrulama çalışmalarında benzetim modelleri ile hesaplanan sıcaklık değişimlerinin, kaynak havuzu boyutlarının, sertlik ve yer değiştirme değerlerinin deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür.

# 1. BÖLÜM

## EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalat 1980'li yıllarda uygulanmaya başlanan ve 20. yüzyılda popüler hale gelen dijital bir üretim tekniğidir. 3 boyutlu baskı adıyla da bilinen bu yöntem, malzemelerin belirli hatlar boyunca yığılarak katmanlar halinde üretildiği bir hızlı prototipleme yöntemidir (Gu vd., 2012; Benakis vd., 2020; Freire vd., 2020; S. Chen vd., 2022; Murugan vd., 2022).

Eklemeli imalatta katmanları oluşturan hammaddeler, üretilecek parçaların geometrilerine bağlı olarak sayısal kontrollü cihazlar yardımı ile birbiri üzerine eklenir. Bu işlem henüz imalata başlamadan, bilgisayar ortamında oluşturulan 3 boyutlu (3B) tasarım modellerine ve bu modeller kullanılarak belirlenen işlem komutlarına göre gerçekleştirilir. Bu nedenle Eİ bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim faaliyetlerini içeren bir işlemler bütünüdür. 3 boyutlu baskı yolu ile parçaların üretim sürecine ait işlem adımları Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.1.** Eklemeli imalat ile parçaların üretim süreci

Eklemeli imalat ile bir parçanın üretim süreci genellikle 3B bir tasarım yazılımında parçanın katı modelinin hazırlanması ile başlar. Ardından tasarlanan bu model dilimleyici adı verilen programlar yardımı ile g-kodu olarak bilinen kontrol komutlarına dönüştürülür. Dilimleyici programlar katı modelleri, üretimde kullanılacak katman kalınlığına göre yükseklik boyunca dilimlere ayırarak üretim kodlarına çevirir. Son olarak bu üretim kodları TAEİ sistemini kontrol eden bilgisayar/kontrol paneline girdi olarak verilir ve üretim sistemi bu kodlara göre belirlenen koordinatlara hareket ederek istenilen geometrilerde parçaların oluşturulmasını sağlar (Lin vd., 2021; Dezaki vd., 2022). Eklemeli imalat ile 3 boyutlu model dosyası bulunan bir parçanın istenilen bölümü kısmi olarak da üretilebilir. Bu sayede Eİ ile hasar görmüş parçaların deforme olan kısımlarının onarımı da mümkündür.

Geleneksel yöntemlere kıyasla üretimde sağladığı esneklik, neredeyse yok denilecek kadar düşük atık üretimi, daha düşük üretim zamanı gibi avantajları nedeniyle eklemeli imalat ileri teknoloji uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen bir üretim yöntemidir. Tablo 1.1’ de geleneksel yöntemlerle eklemeli imalat arasındaki temel farklar verilmiştir.

**Tablo 1.1.** Geleneksel yöntemlerle eklemeli imalat arasındaki temel farklar (Rouf vd., 2022)

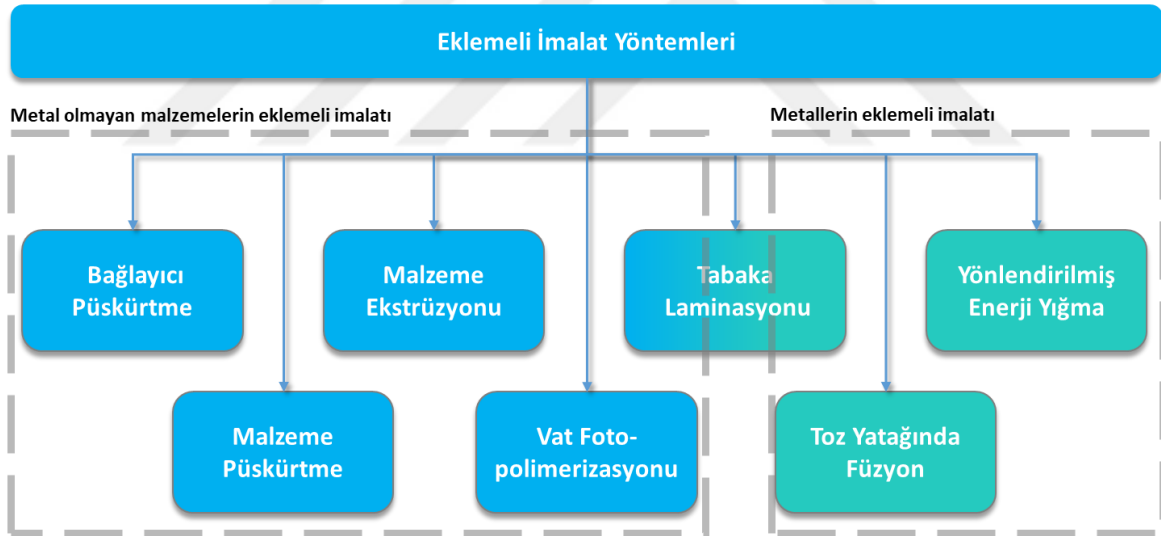
<b>Kriter</b>	<b>Eklemeli imalat</b>	<b>Geleneksel üretim yöntemleri</b>
<b>Prototip üretimi</b>	Özel hazırlık ve ekipman gerektirmez.	Parçaya göre ekipman ve hazırlık gerektirir.
<b>Kaynak kullanım verimi</b>	Çok yüksek kaynak verimliliği ile üretim mümkündür.	Çok fazla kaynak tüketilir.
<b>Büyük ölçekli üretim</b>	Daha hızlı ve doğru üretim mümkündür.	Daha yavaş ve hata oranı yüksektir.
<b>Karmaşık yapıli üretim</b>	Metalden polimere çeşitli malzemelerle karmaşık parçaların üretimi mümkündür.	Karmaşık parçaların üretimi sınırlıdır.
<b>Üretilen parça boyutları</b>	Baskı yatağının alanı ile sınırlıdır.	Daha büyük parçaların üretimi mümkündür.
<b>Özelleştirilebilme</b>	Tek seferlik üretim için bile oldukça verimlidir.	Her üretim için özel ekipman gerekir.
<b>Maliyet</b>	Yatırım maliyetleri yüksektir Fakat her geçen gün düşmeye devam etmektedir.	İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
<b>Malzeme ve enerji kaybı</b>	Malzeme ve enerji tasarrufu sağlar.	Atık malzeme ve enerji miktarı yüksektir.
<b>Tekrar üretilebilirlik</b>	Aynı parçayı uzun zaman sonra bile tekrar tekrar üretmek mümkündür.	Aralıklı üretimde tekrar üretilebilirlik oranı daha düşüktür.

Eklemeli imalat daha düşük atıkla daha kısa zamanda üretime olanak vererek üretim maliyetlerinde %50’ ye varan tasarruf sağlar. Bu bağlamda 3 boyutlu baskı teknolojisi uygun maliyetli, pratik, yaratıcı ve güvenli bir üretim yöntemi olarak kabul edilir. Özellikle son yıllarda yaşanan teknolojik ilerlemelerle nihai parçaların net ölçülerle doğrudan Eİ ile üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Bununla beraber geliştirilen yeni üretim cihazları son derece hassas ölçülerle ve düşük geometrik toleranslarla parçaların üretimine olanak sağlamıştır. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında Eİ kullanıcılara son derece üstün avantajlar sunmaktadır. Bu noktada sunduğu avantajları nedeniyle özellikle son yıllarda

yaygınlaşan Eİ otomotiv, havacılık, savunma, tıp ve elektronik gibi çeşitli alanlarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Vora vd., 2022; Rouf vd., 2022).

Eklemeli imalatta başlangıçta hammadde olarak polimer malzemeler kullanılmıştır. Bununla birlikte yeni malzeme ekleme tekniklerinin ortaya çıkmasıyla metaller, seramikler ve kompozitler de polimerlerin yanında 3 boyutlu baskı için yaygın olarak kullanılan hammaddeler arasında yerini almıştır. Yeni hammaddelerin kullanılmaya başlanması ve farklı ihtiyaçların ortaya çıkması ile birlikte birçok eklemeli imalat tekniği geliştirilmiştir (M. Srivastava vd., 2023). Bu nedenle günümüzde farklı malzeme ve enerji türleri kullanılarak geliştirilen çok sayıda Eİ yöntemi bulunmakta ve ilerleyen teknoloji ile birlikte yeni yöntemler geliştirilmeye devam edilmektedir.

Eklemeli imalat, kullanılan malzeme ya da birleştirme tekniği veya kullanılan enerji türü gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte Amerikan Test ve Malzeme Derneği (American Society for Testing and Materials ASTM)'ne göre eklemeli imalat 7 ana kategoriye ayrılmaktadır (M. Srivastava vd., 2023). Buna göre Şekil 1.2'de ticari olarak kullanılan farklı türdeki eklemeli imalat yöntemleri verilmiştir.



Şekil 1.2. ASTM'ye göre eklemeli imalatın sınıflandırılması

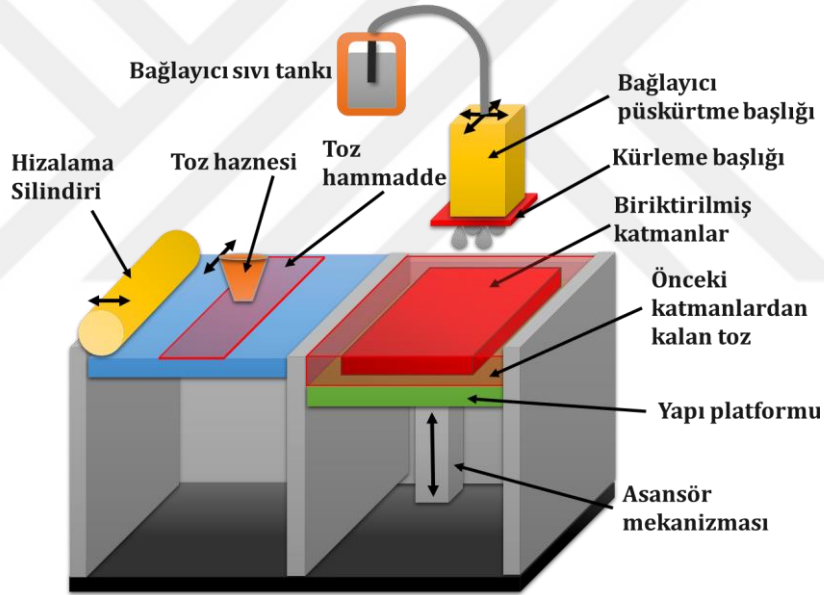
Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemleri birleştirme tekniği göz önüne alınarak metal ve metal olmayan malzemelerin eklemeli imalatı olmak üzere 2 temel başlıkta aşağıda ele alınmıştır.

## 1.1. Metal Olmayan Malzemelerin Eklemeli İmalatında Kullanılan Yöntemler

Metal olmayan malzemelerin eklemeli imalatında çoğunlukla bağlayıcı püskürtme; malzeme püskürtme, vat fotopolimerizasyonu ve tabaka laminasyonu yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerden bağlayıcı püskürtme ve tabaka laminasyonu oldukça sınırlı uygulama alanına sahiptir (Sampaio vd., 2023). İlerleyen bölümlerde bahsedilen bu yöntemlerle ilgili genel bilgiler verilmiştir.

### 1.1.1. Bağlayıcı püskürtme

Bağlayıcı püskürtme yöntemi, toz formundaki hammaddenin katmanlar halinde yayıldığı ve bu tozun polimer yapılı bir bağlayıcı yardımı ile istenen geometride sabitlenerek birleştirildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. Şekil 1.3'te yöntemin bileşenleri şematik olarak verilmiştir.



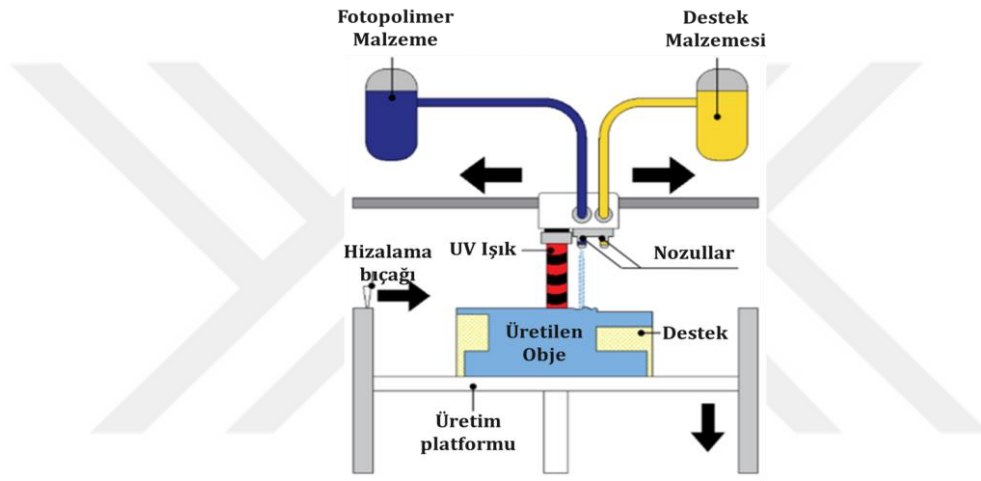
Şekil 1.3. Bağlayıcı püskürtme yöntemi ile üretim

Bu yöntemde püskürtülen yapıştırıcı, hem ilgili katmanının oluşturulmasını hem de her katmanı bir önceki katmana yapıştırarak 3 boyutlu bir yapının oluşturulmasını sağlar. Öte yandan katman yüksekliği arttıkça üretilen malzeme etrafında yapıştırılmayan tozlar da bulunur. Sonuç olarak üretimi tamamlanan parça bir toz birikintisi içerisinde kalır ve bu toz birikintisinin işlem sonunda temizlenmesi gerekir. Kullanılan hammadde ve yapıştırıcıya bağlı olarak toz giderme işleminden önce yapıştırıcının kürlenmesi gerekebilir. Bu durumda üretilen parçalara sıcaklık uygulanabilir. Bununla birlikte bu yöntemle üretilen parçalar mekanik özellikleri yönüyle çoğu durumda son kullanıma uygun değildir. Bu nedenle üretim işleminden

sonra parçalara istenilen mekanik özellikleri kazandırmak amacıyla genellikle sinterleme veya infiltrasyon adı verilen işlemler uygulanır (Mostafaei vd., 2021).

### 1.1.2. Malzeme püskürtme

Mürekkep püskürtmeli eklemeli imalat (MPEİ) olarak da bilinen bu yöntemde ultraviyole ışığa (UV) duyarlı sıvı foto-polimer damlacıklar piezzo baskı kafaları kullanılarak belirlenen rotalarda biriktirilir ve biriktirilen polimer malzemeler UV ışınları kullanılarak sertleştirilir (Yap vd., 2017). Şekil 1.4'te MPEİ ile üretim süreci şematik olarak verilmiştir.



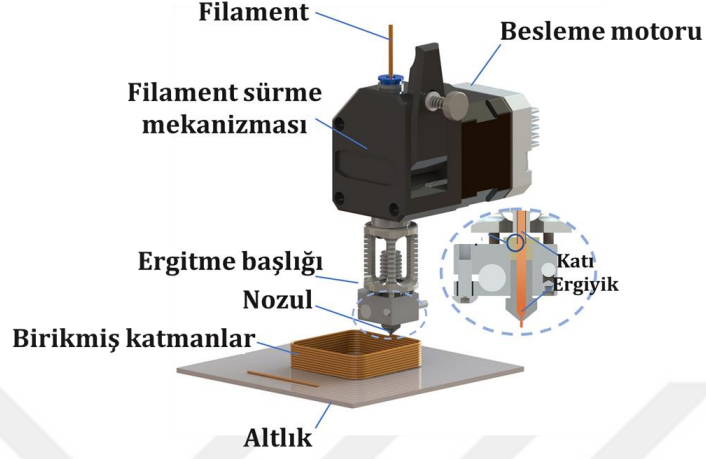
Şekil 1.4. Malzeme püskürtme yöntemi ile üretim (A. Srivastava vd., 2023)

Malzeme püskürtmeli eklemeli imalat tekniğinde kullanılan donanımın yapısı geleneksel 2 boyutlu yazıcılar ile büyük benzerlik gösterir. Bu nedenle MPEİ ile basit bir yazıcı gibi laboratuvara ya da özel bir alana gerek duymadan ofis ortamında üretim yapmak mümkündür. Kullanım açısından sağladığı bu büyük kolaylık yöntemin son yıllarda oldukça popüler hale gelmesine olanak sağlamıştır (H. Yang vd., 2017).

### 1.1.3. Malzeme ekstrüzyonu

Malzeme ekstrüzyonu ile Eİ aynı zamanda ergiyik biriktirmeli modelleme (FDM) olarak da bilinir. Bu yöntem ilk olarak termoplastik hammaddeler ile 1990'lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Malzeme ekstrüzyonu ile üretimde hammadde olarak çoğunlukla ince, filament şeklinde malzemeler kullanılır. Bu yöntemde katmanlar, filamentin bir nozul içerisinden geçirilerek, belirlenen rotalarda yığılması ile oluşturulur. Malzeme ekstrüzyonu polimer malzemelerin eklemeli imalatında son yıllarda yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir.

Polimerlerin dışında seramik vb. malzemelerin üretiminde de çoğu zaman bu metot tercih edilir (Umaras ve Tsuzuki, 2017; J. Li vd., 2019).

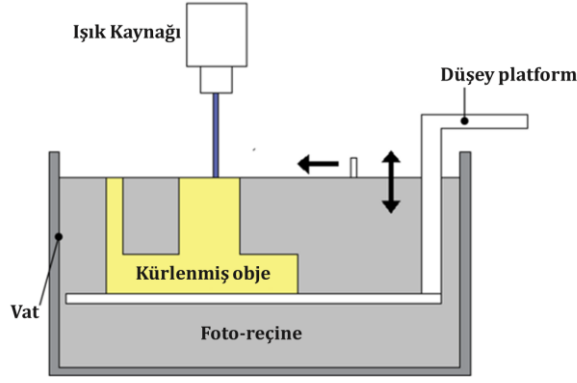


**Şekil 1.5.** Malzeme püskürme yöntemi ile üretim (Xu vd., 2023)

Bu yöntemde malzeme biriktirme işleminde kullanılan ana bileşenler Şekil 1.5'te verilmiştir. Burada metal bir nozul, ısıtıcı rezistanslar yardımı ile filament olarak kullanılan malzemenin ergime sıcaklığına kadar ısıtılır. Filament malzeme bir besleme mekanizması yardımı ile bu nozul içerisine işleme uygun olarak seçilen hız ve miktarlarda kontrollü olarak beslenir. Baskı başlığı olarak adlandırılan ve filamentin eriten bu sistem robotik bir yapıya bağlıdır. Bu sayede dilimleme yazılımı ile üretilen üretim dosyasına göre baskı başlığı hareket ettirilerek polimer malzemenin belirlenen rotalarda yığılması sağlanır. Ergiyik malzemenin soğuması ile katmanlar birbirine bağlanır ve sonuç olarak üretilecek parça inşa edilmiş olur.

#### **1.1.4. VAT fotopolimerizasyonu**

VAT fotopolimerizasyonu ya da diğer adıyla stereolitografi görünümü ile eklemeli imalatta hammadde olarak UV ışığa duyarlı reçineler kullanılır. Bu yöntemde reçinenin kürleşerek katmanları oluşturması için UV lazerler ya da projektörler kullanılır. Şekil 1.6'da VAT polimerizasyonu ile üretim işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Buna göre yöntem bir reçine tankı, ışık kaynağı ve düşey yönde hareket edebilen bir platformdan oluşur.

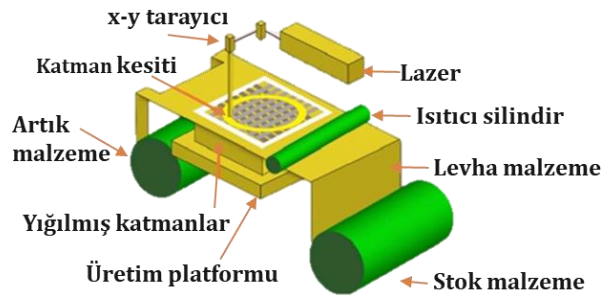


**Şekil 1.6.** VAT fotopolimerizasyonu ile üretimin şematik gösterimi (A. Srivastava vd., 2023)

Bu metot ile üretim sırasında cihazın UV ışık kaynağı üretilecek katmanın geometrisine göre reçine üzerinde belirli bölgeleri aydınlatır. UV ışığa duyarlı reçine bu bölgelerde sertleşerek katılaşır, böylece katmanları oluşturur. Bu işlem parçanın yüksekliği boyunca katman-katman devam eder ve sonuç olarak tüm katmanlar birbirine eklenerek nihai parça elde edilir (Mukhtarkhanov vd., 2020; Warsi vd., 2021).

### 1.1.5. Tabaka laminasyonu

Tabaka laminasyonu ince şerit malzemelerin birbiri üzerine çeşitli birleştirme yöntemleri ile eklenerek katmanlar halinde parçaların oluşturulduğu bir Eİ metodudur.



**Şekil 1.7.** Tabaka laminasyonu ile eklemeli imalat (Rajora vd., 2022)

Bu yöntemde hammadde olarak kullanılan şerit malzemeler birbiri üzerine eklenir ve ardından istenilen geometriye göre lazer vb. bir araç ile kesilerek şekil verilir. Tabaka laminasyonunda hammadde olarak çoğunlukla kağıt ve plastik malzemeler veya ince metal levhalar kullanılır. Bu yönüyle tabaka laminasyonu hem metallerin hem de metal dışı malzemelerin eklemeli imalatında tercih edilmektedir (Sampaio vd., 2023).

## 1.2. Metal Malzemelerin Eklemeli İmalatında Kullanılan Yöntemler

Endüstriyel uygulamalarda metal malzemeler çoğunlukla döküm, dövme ya da ekstrüzyon gibi yöntemlerle yarı mamul olarak üretilir ve ardından talaşlı imalat gibi ikincil işlemlerle şekillendirilerek nihai formuna getirilir. Bu yöntem metallerin şekillendirilmesinde uzun yıllardır kullanılsa da özellikle karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte malzemelerin yarı mamul haline getirilmesinde çoğu zaman kalıplar kullanılır. Bu durum yüksek sayılarda üretilen parçalar için sorun teşkil etmese de az sayıda üretimin söz konusu olduğu durumlarda çok yüksek maliyetlerle karşılaşılmasına yol açabilmektedir (Ungethüm vd., 2020).

Eklemeli imalat, özellikle malzeme tüketimi yönünden geleneksel üretim yöntemleri ile kıyaslandığında metallerin imalatı için oldukça pratik ve etkili bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle eklemeli imalatta polimerlerden sonra hammadde olarak en çok metal malzemeler kullanılmaktadır. Bu noktada Eİ çelik, alüminyum, titanyum ve nikel alaşımları gibi metal malzemelerin üretiminde uzun yıllardır uygulanan bir üretim tekniğidir. Bununla birlikte özellikle titanyum ve alüminyum gibi pahalı alaşımların üretiminde talaş/parça ağırlık oranı nedeniyle talaşlı imalata göre çok daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yönüyle eklemeli imalatın ilerleyen dönemlerde geleneksel üretim yöntemlerinin yerini alması araştırmacılar tarafından son derece olası bir durum olarak öngörülmektedir (S. Chen vd., 2022; Madhavadas vd., 2022).

Eklemeli imalatın popüler hale gelmesi ile birlikte metal malzemelerin bu metotla üretimi için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Tabaka laminasyonu, toz yatağında füzyon ve yönlendirilmiş enerji yığılma metotları metallerin eklemeli imalatında öne çıkan üretim teknikleridir. Bununla birlikte bu yöntemlerden toz yatağında füzyon (TYF) ve yönlendirilmiş enerji yığılma (YEY) metotları metal malzemelerin imalatında en çok kullanılan eklemeli imalat yöntemleridir (McNamara vd., 2022). Son yıllarda oldukça yaygın kullanım alanı bulan bu iki Eİ yönteminin her ikisinde de katmanların oluşturulması için odaklanmış bir enerji kaynağı kullanılır. Bununla birlikte iki yöntem arasındaki temel fark katmanların oluşturulması sırasında ortaya çıkmaktadır. YEY yönteminde katmanların oluşturulması için toz ya da tel formundaki hammadde bir nozul yardımı ile metal bir altlık üzerine doğrudan ergitilerek biriktirilirken TYF yönteminde bir toz yatağı içerisinde serilmiş halde bulunan hammaddenin seçmeli olarak ergitilmesi ile katmanların oluşturulması sağlanır (Chua vd., 2024). Malzeme yığılma tekniğindeki bu farklılık iki yöntemde de birbirine göre üstün özellikler kazandırmaktadır.

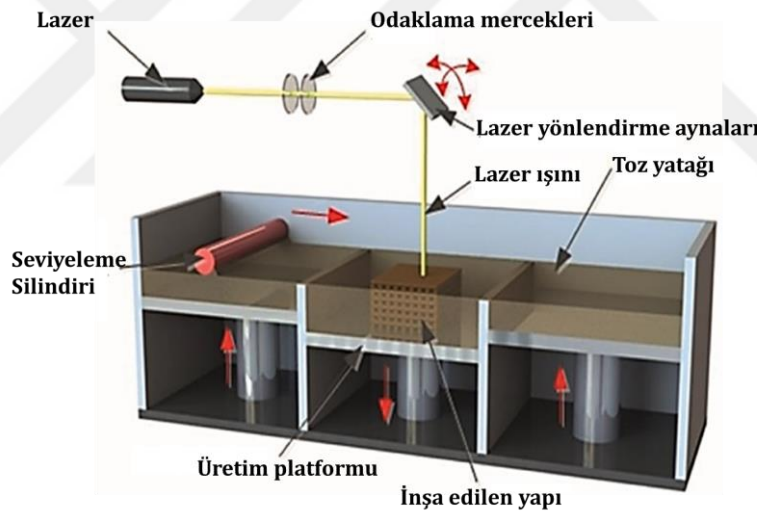
### 1.2.1. Toz yatağında füzyon (TYF)

Toz yatağında füzyon, toz formundaki hammaddenin odaklanmış bir enerji kaynağı yardımı ile katman-katman ergitilerek bir araya getirildiği ve bu teknikte parçaların üretildiği bir eklemeli

imalat yöntemidir. Bu yöntemde toz hammadde bir tabla üzerine serilmekte, hareketli bir enerji kaynağı kullanılarak üretilecek parçanın kesitine göre hammaddenin ergitilmesi sağlanmaktadır.

Toz yatağında füzyon karmaşık geometrili şekiller için net şekilde üretime imkan veren bir Eİ tekniğidir. Bu sayede kullanıcılara metallerin imalatında zaman ve iş gücü tasarrufu gibi önemli birçok avantaj sunmaktadır. Bu avantajları nedeniyle TYF yöntemi uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan ve iyi bilinen bir eklemeli imalat yöntemi haline almıştır (Zhang vd., 2023).

TYF yönteminde ısı kaynağı olarak lazer ya da elektron ışın demeti (ED) kullanılmaktadır. Bu noktada yöntem kullanılan ısı kaynağı türüne göre lazer-TYF ya da ED-TYF olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte Lazer-TYF yöntemi literatürde seçmeli lazer sinterleme, doğrudan metal lazerle ergitme ya da doğrudan metal lazer sinterleme olarak da isimlendirilmektedir (Taghian vd., 2023). TYF ile üretimde malzemelerin ergitilmesinde kullanılan ısı kaynağı türleri farklı olsa da hem Lazer-TYF hem de ED-TYF yönteminde temel olarak Şekil 1.8'de şematik olarak gösterilen aynı üretim teknolojisi kullanılmaktadır.

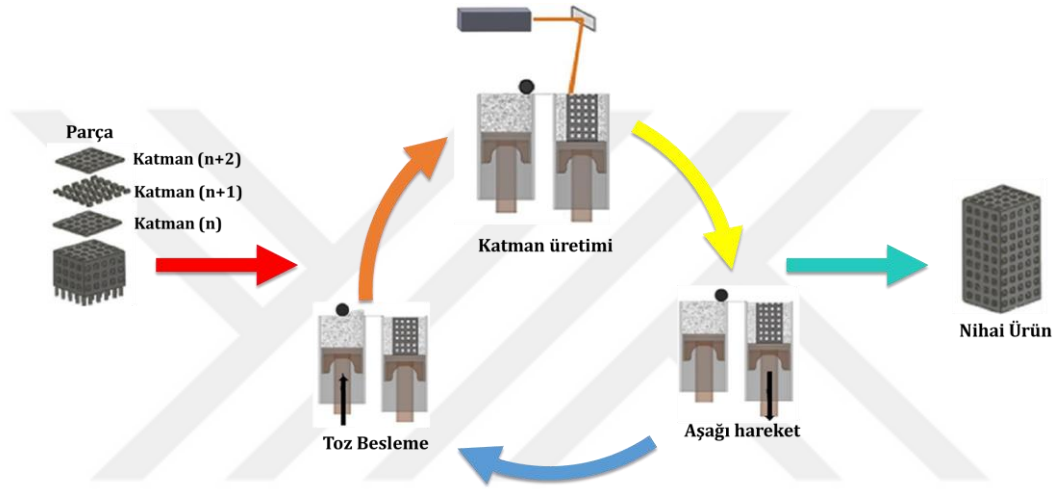


**Şekil 1.8.** Toz yatağında füzyon ile eklemeli imalatın şematik gösterimi (Taghian vd., 2023)

Bir TYF Eİ cihazı enerji kaynağı, tarama hareket mekanizması, toz besleyici ve serme silindiri, yükseltme mekanizması ve kapalı atmosfer ortamı olmak üzere 5 temel bileşenden oluşur. Burada enerji kaynağı daha önce de belirtildiği gibi toz formundaki malzemelerin ergitilmesinde kullanılır. TYF cihazlarında enerji kaynağı düşük toleranslarla hareket edebilen hassas bir hareket mekanizması üzerine sabitlenir. Bu sayede hareket mekanizmasının üretilecek geometri üzerinde toz tabakasını taramasıyla malzemeler eritilir. Toz besleyici hammaddenin her katmanda toz yatağına gönderilmesini sağlar. Toz yatağına beslenen toz, serme silindiri yardımı ile hizalanarak düzlenir. Böylece her katta homojen bir toz tabakası

oluşturulur. Tüm bu işlemler kapalı bir ortamda gerçekleştirilir böylece çevre şartları kontrol edilerek istenen malzeme özelliklerinin elde edilmesi sağlanır (Gisario vd., 2019). TYF yöntemi ile bir parçanın üretim aşamaları Şekil 1.9' da şematik olarak gösterilmiştir.

Malzemelerin TYF yöntemi ile üretimi diğer yöntemlerle benzer şekilde, Şekil 1.1' de verilen işlem adımları takip edilerek gerçekleştirilir. Bunun için tasarlanan 3 boyutlu modeller STL formatına dönüştürülür ve STL dosyaları kullanılarak dilimleme yazılımları yardımı ile model katmanlara ayrılır. Böylece parçanın üretim dosyası oluşturularak kayıt edilir. Ardından üretim dosyaları TYF Eİ cihazının bilgisayarında çağırılarak üretim işlemi başlatılır.



**Şekil 1.9.** TYF yöntemi ile parça üretiminin şematik gösterimi (Gisario vd., 2019)

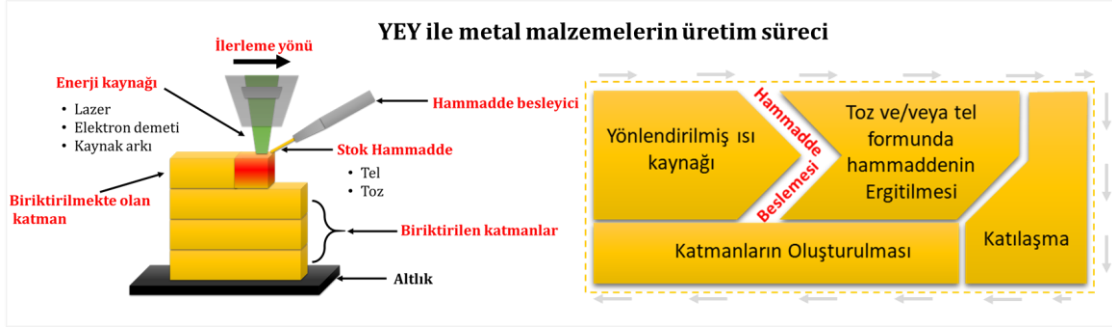
İşlemin ilk adımında toz hammadde cihazın üretim platformu üzerine bir rulo veya kazıyıcı yardımı ile yayılır. Daha sonra üretilecek parçanın ilk katmandaki 2 boyutlu kesiti, toz malzemeyi sinterlemek veya ergitmek üzere bir enerji kaynağı (lazer ya da elektron ışını demeti) tarafından taranır. Tarama işlemi sırasında, toz taneleri ergiyerek birbirleriyle kaynaşır böylece parçanın ilk katmanı oluşturulmuş olur. İlk katmanın oluşturulmasının ardından üretim platformu katman kalınlığı kadar aşağı hareket ettirilir ve bir üst katmandaki malzeme kesitinin oluşturulması için mevcut katmanın üzerine başka bir toz katmanı istiflenir. Bu işlem zinciri parçanın üretimi tamamlanana kadar tekrar ederek devam eder. İşlem sırasında tabla üzerine serilen tozun ergitilmeyen kısmı inşa edilen yapı için destek görevi görür. Bu yönüyle içi boş yapıların tek aşamada, ilave herhangi bir işleme ya da malzemeye gerek duymadan üretilmesinde TYF yöntemi büyük bir avantaja sahiptir (Chowdhury vd., 2022; Patel ve Pandey, 2023). Ayrıca bu yöntem karmaşık geometrili parçaların yüksek çözünürlükle hassas ölçülerde üretilmesi noktasında da diğer yöntemlere göre çok daha üstün özelliklere sahiptir.

### 1.2.2. Yönlendirilmiş enerji yığma (YEY)

Yönlendirilmiş enerji yığma, metal malzemelerin üretiminde uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan bir eklemeli imalat yöntemidir. YEY yöntemi araştırmacılar tarafından yoğun olarak çalışılan ve bu nedenle gelişimini günden güne devam ettiren popüler bir araştırma konusudur. Bu nedenle yeni teknolojilerin gelişmesiyle birlikte malzemelerin YEY yöntemi ile üretimi her geçen gün daha hızlı ve daha kolay hale gelmektedir. Bu yöntem sahip olduğu üretim yetenekleri sayesinde özellikle büyük karmaşık parçaların imalatında diğer tüm yöntemleri geride bırakmaktadır. YEY yöntemi TYF yöntemine göre 10 kat daha yüksek yığma oranına sahiptir. Bu nedenle içi tamamen dolu yüksek ve geniş malzemelerin üretiminde TYF yöntemine göre çok daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Gisario vd., 2019; Saboori vd., 2019; J. Liu vd., 2020; Dezaki vd., 2022).

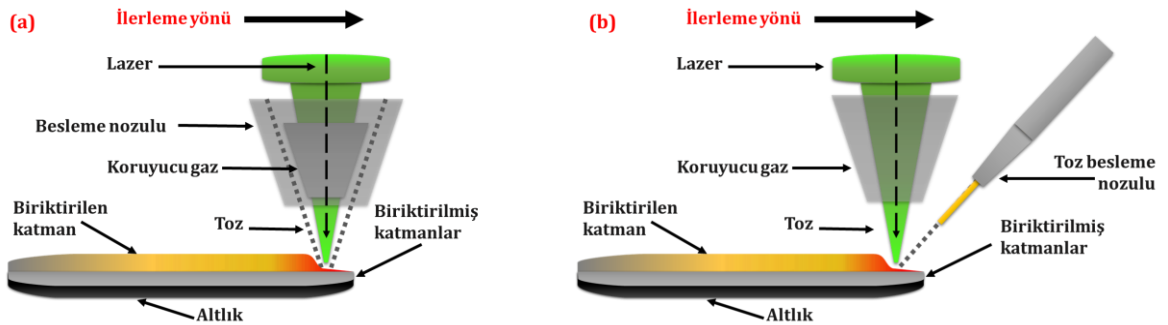
Yönlendirilmiş enerji yığma metodunda üretim metal bir altlık üzerinde gerçekleştirilir. Bununla birlikte bu yöntemde hammadde yalnızca altlığın istenilen bölgelerinde biriktirilir. Bu sayede daha önce şekillendirilmiş metal malzemeler üzerinde istenilen bölgelerde yeni katmanlar üretmek de mümkündür. Buradan yola çıkılarak sıfırdan parça oluşturmanın yanı sıra YEY yöntemi ile hasarlı parçaların onarımı da gerçekleştirilebilir. Öte yandan benzer şekilde bu yöntemle düşük dayanımlı malzemelerin yüzeylerinde daha dayanıklı malzemeler biriktirerek yüzey özellikleri iyileştirilebilir. Ayrıca YEY kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üretilebilir, ucuz malzemeler üzerinde aşınmaya karşı kaplama ve giydirme uygulamaları da gerçekleştirilebilir. Bu yetenekleri sayesinde uygulanabilir olduğu durumlarda YEY metodu kullanılarak parçaların üretim ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi de mümkündür (Shamsaei vd., 2015; Saboori vd., 2019; Hirono vd., 2024). Yönlendirilmiş enerji yığma yöntemi tüm bu kabiliyetleri nedeniyle havacılıkta türbin kanatları, motor bağlantı parçaları, tıbbi uygulamalarda implantlar, protezler, otomotiv sektöründe dişliler, dişli kutuları gibi kritik parçaların yekpare üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dezaki vd., 2022).

YEY yönteminde malzemeler tabandan başlanarak katmanlar halinde yukarı yönde eklenerek üretilir. Bu amaçla hammadde olarak kullanılan metal malzemeler bir enerji kaynağının odak noktasına doğrudan beslenerek ergitilir ve ergiyen metal belirlenen rotalarda katman-katman biriktirilir. Böylece diğer eklemeli imalat yöntemlerinde de olduğu gibi katmanların birbiri ile birleşmesi sonucunda parça üretilmiş olur. Şekil 1.10' da YEY yöntemi ile parçaların üretim süreci şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.10. YEY yöntemi ile üretiminin şematik gösterimi

YEY yönteminde enerji kaynağı olarak lazer ışını, elektron ışınları ya da elektrik arkı kullanılır. Bununla birlikte bu yöntemde katmanlar toz veya tel formundaki hammaddeler kullanılarak üretilebilir. YEY ile eklemeli imalat, kullanılan enerji türü ve hammadde formuna bağlı olarak farklı isimlerle adlandırılmaktadır. Bu noktada lazer metal biriktirme (LMD) ya da yaygın olarak bilinen diğer adı ile lazerle şekillendirme (LENS), lazerle katı şekillendirme (LSF), yönlendirilmiş ışıkla üretim (DLF), 3D lazer kaplama ve tel ark eklemeli imalat (TAEİ) gibi çeşitli isimlerle anılan YEY yöntemleri bulunmaktadır (Dezaki vd., 2022; Svetlizky vd., 2022). YEY yönteminde toz formundaki metal hammaddelerin ergitilmesinde genellikle lazer ışını kullanılır. Bu durumda bu yöntem LENS (laser engineered net shaping) işlemi olarak bilinir. LENS işleminde metal tozları bir nozul yardımı ile lazer kaynağının etrafından veya eriyik havuzunun yan tarafından lazer ışınının odak noktasına beslenerek ergitilir ve altlık üzerinde biriktirilir. Bu işlem üretilecek parçanın yüksekliği boyunca katman-katman tekrar edilir ve sonuçta istenilen parça üretilmiş olur. (Gu vd., 2012). LENS sistemlerinde hammadde olarak kullanılan tozun besleme şekli yöntemin üretim hassasiyetini değiştirmektedir. Şekil 1.11'de farklı toz besleme yöntemleri şematik olarak gösterilmiştir (Gong vd., 2021).

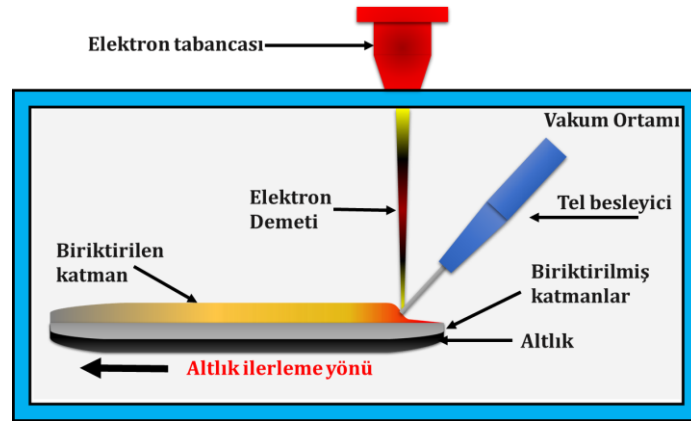


Şekil 1.11. LENS ile üretimde farklı toz besleme yöntemleri (a) merkezden besleme (b) yandan besleme

LENS ile üretim sırasında toz hammadde lazerin yan tarafından beslenildiğinde genellikle dikdörtgen olarak yığıma bölgesine dökülür. Bu nedenle malzeme her zaman lazerin odak noktasına ulaşmayabilir. Buna karşın merkezden beslemeli sistemlerde metal tozu doğrudan lazerin odak noktasına püskürtülür. Bu yüzden yandan beslemeli sistemlerde yüzey kalitesi ve üretim toleransı merkezden beslemeli yöntemlere göre daha düşüktür (Gong vd., 2021). Bununla birlikte tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı, toz akış hızı ve lazer gücü, yapı kalitesini etkileyen ana işleme parametrelerinden bazılarıdır ve kaliteli parçaların üretimi için bu parametrelerin optimizasyonu oldukça önemlidir. LENS sistemlerinde üretim sırasında boyutsal doğruluğun kontrol edilmesi için geri besleme sensörleri de kullanılabilir. Bu sayede bu yöntemle malzemelerin net şekle yakın ölçülerde üretilmesi mümkündür.

LENS ile imalatta tüm işlemler argon gazı ile oluşturulan koruyucu atmosfer altında gerçekleştirilir. Argon gazı aynı zamanda tozların taşınmasını da sağlar. Bu yöntem ile birden fazla besleme nozulu kullanılarak farklı metal tozları aynı anda yığıma bölgesinde biriktirilebilir. Bu sayede LENS ile bi-metallerin ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretimi gerçekleştirilebilir (Oniuke vd., 2018).

YEY yönteminde enerji kaynağı olarak elektron ışın demeti de kullanılabilir. Bu durumda yöntem elektron ışın demeti ile serbest biçimli imalat (EBF<sup>3</sup>) olarak adlandırılır. Bu yöntem yüksek enerji verimliliği, yüksek biriktirme oranı, büyük parça boyutu ve parça yoğunluğu gibi birçok önemli avantaja sahiptir. Parçaların EBF<sup>3</sup> ile üretiminde hammadde olarak tel formunda malzemeler kullanılır. Buna göre Şekil 1.12'de EBF<sup>3</sup> yöntemi ile parça üretim süreci şematik olarak gösterilmiştir (Jiang vd., 2023).



Şekil 1.12. Elektron ışın demeti kullanılan YYY Eİ ile parça üretim süreci

Bu yöntemde parçalar yandan beslemeli LENS yöntemine benzer şekilde üretilir. Ancak burada kullanılan hammaddenin tel olmasının yanı sıra LENS yönteminden farklı olarak tüm işlem vakum ortamında gerçekleştirilir.

Yönlendirilmiş enerji yığma ile parçaların şekillendirilmesinde kullanılan en yaygın yöntem LENS'tir. Bu yöntemle yüksek hassasiyet ve doğrulukta parçalar üretmek mümkündür ancak yöntemin enerji verimliliği oldukça düşüktür. Öte yandan elektron ışın demeti ile üretimde enerji verimliliği daha yüksektir ancak bu yöntemde de tüm süreç vakum ortamı gerektirir. Bununla birlikte bu iki yöntemin de ilk yatırım maliyeti son derece yüksektir. Tüm bunlara ek olarak bu yöntemlerde üretilecek parçaların boyutları cihaz tablası ile sınırlıdır. (Z. Liang vd., 2024).

Yönlendirilmiş enerji yığma yönteminde kullanılan bir diğer enerji kaynağı elektrik arkıdır. Bu yöntemde malzemeleri ergetmek için gerekli ısı bir elektrik ark kaynağından sağlanır. Bununla birlikte katmanların oluşturulmasında tel formundaki hammaddeler kullanılır. Bu yöntem genel olarak tel ark eklemeli imalat (TAEİ) olarak bilinir. TAEİ düşük ilk yatırım maliyeti, ucuz parça üretimi, düşük atık miktarı ve tüm bunlara ek olarak daha düşük üretim süresi gibi birçok avantaja sahiptir. YEY ile imalatta özellikle yüksek ergime noktasına sahip metaller için, sağladığı yüksek üretim hızı ve iyi doluluk gibi özellikler nedeniyle tel formundaki malzemelerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu nedenle TAEİ son zamanlarda dikkatleri üzerine çeken ve yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemi haline almıştır. Bu yöntemle net şekle yakın ölçülerde büyük boyutlu parçaların yüksek hızlarla üretilmesi mümkündür. Bunun yanında TAEİ ile yüksek biriktirme hızı, homojen yoğunluk ve nispeten iyi mekanik özellikte ürünler üretilir. Bu avantajları nedeniyle TAEİ yöntemi özellikle otomotiv, uzay ve medikal uygulamalarında titanyum ve alüminyum gibi pahalı malzemelerin imalatı için yaygın olarak tercih edilmektedir (Rosli vd., 2021). Ayrıca yöntemin popüler hale gelmesiyle birlikte TAEİ birçok araştırmacı tarafından araştırılan ve özellikle son yıllarda hızlı teknolojik gelişmeler gösteren bir üretim metodu haline almıştır.

### **1.3. Tel Ark Eklemeli İmalat (TAEİ)**

Tel ark eklemeli imalat, geleneksel metal kaynağı yöntemlerini temel alan bir eklemeli imalat yöntemidir. TAEİ başlangıçta alüminyum gibi demir dışı malzemelerin üretimi için geliştirilmiş olsa da düşük atık üretimi ve yüksek enerji verimliliği nedeniyle son zamanlarda diğer metallerin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemde parça üretim hassasiyeti, toz yataklı sistemlerle elde edilenlerden daha düşük, buna karşın biriktirme oranı önemli ölçüde daha yüksektir. Bu durum büyük metalik parçaların %40-60 aralığında daha kısa sürede üretilmesine olanak tanır. Bu nedenle TAEİ diğer metal eklemeli imalat yöntemlerine göre çok daha ekonomik bir üretim metodudur (Rodrigues vd., 2019; Ungethüm vd., 2020; Çam, 2022). Metallerin eklemeli imalatında yaygın olarak kullanılan LENS yöntemi ile TAEİ imalat yöntemi arasındaki farklılıklar Tablo 1.2'de verilmiştir.

TAEİ, çeşitli metal alaşımları ile geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle lazer ışınlarını yüksek oranda yansıtarak LENS işlemini oldukça verimsiz hale getiren alüminyum, bakır ve

magnezyum gibi bazı metal alaşımlarının üretiminde bu yöntem yaygın olarak tercih edilmektedir (Y. Li vd., 2022). Öte yandan bu malzemelerin elektron ışını demeti kullanılan YEY yöntemleri ile imalatı yöntemin vakum ortamı gerektirmesinden dolayı yalnızca belirli boyutlarda parça üretimine izin vermektedir. Bu nedenle TAEİ özellikle büyük boyutlu çelik parçaların eklemeli imalatında son derece avantajlı bir tekniktir (Evans vd., 2022). Bunun yanında titanyum ve nikel alaşımlarının üretiminde de TAEİ en efektif eklemeli imalat metodu olarak karşımıza çıkmaktadır.

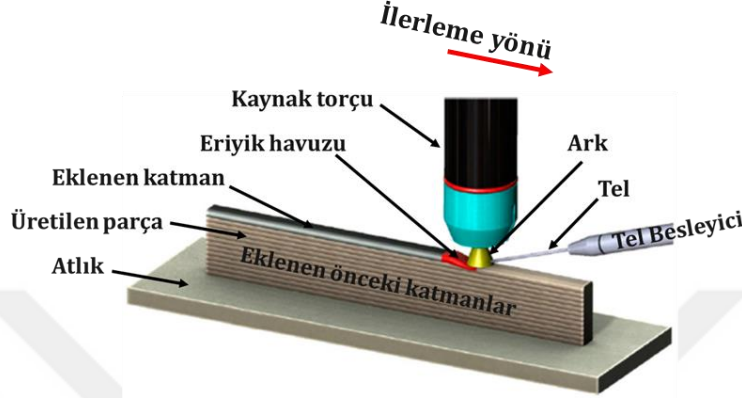
**Tablo 1.2.** LENS yöntemi ile TAEİ imalat yönteminin karşılaştırılması (J. Liu vd., 2020)

Kriter	LENS Yöntemi	TAEİ Yöntemi
Yığıma oranı	0.1-0.2 kg/sa (Düşük)	4 kg/sa (Yüksek)
Kullanım oranı	% 10-60	% 90
Uygulanabilir malzemeler	Titanyum alaşımları, alaşımlı çelikler	Titanyum, alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları çelikler vb.
Hassasiyet	0.05 mm	0.2 mm
Üretim kapasitesi	Kompleks küçük parçalar	Küçükten büyüğe genel boyutlar
Üretim maliyeti	Yüksek	Düşük
İlk yatırım maliyeti	Yüksek	Düşük

Eklemeli imalatın geçmişi 1980'li yıllara dayandırılrsa da aslında TAEİ ile ilk üretim 1925 yılında metal süs eşyalarının imalatı için gerçekleştirilmiştir. Ancak yöntemin literatürde bir üretim metodu olarak kabulü 1990'lı yılları bulmuştur. Bununla birlikte bu yöneme ilgi son 10-15 yılda önemli ölçüde artmış dolayısıyla TAEİ yöntemlerinin gelişimi ve kullanımı son zamanlarda büyük ölçüde hız kazanmıştır. Özellikle tel ark eklemeli imalatta kullanılan ark kaynak cihazlarının birçok atölyede kolayca bulunabilir olması ve lazer üreteçlerine kıyasla çok daha düşük maliyetlerle temin edilebilir hale gelmesi araştırmacıların dikkatlerini bu yöntem üzerine toplamıştır (Çam, 2022; j. Liu vd., 2020).

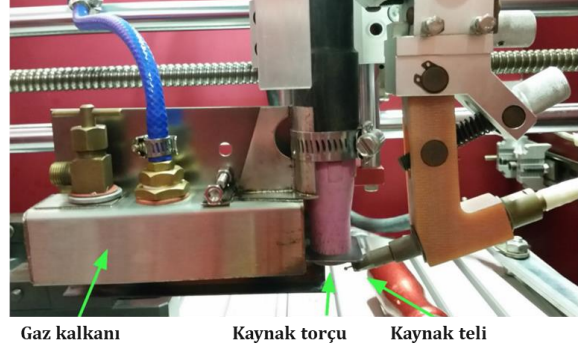
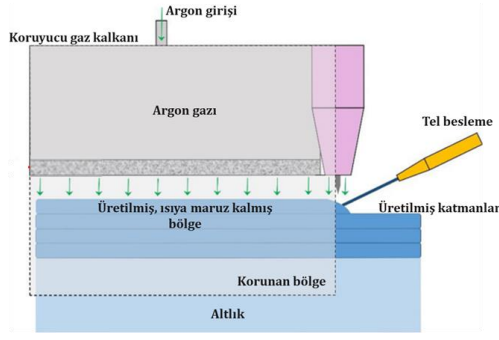
Diğer YEY yöntemlerinde olduğu gibi TAEİ yöntemi ile de hasar görmüş metal malzemelerin onarımı mümkündür. Bununla birlikte bu yöntemle katmanlar arasında tel malzeme değiştirilerek ya da çoklu tel besleyiciler kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretimleri de gerçekleştirilebilir. Özellikle tel değiştirme işleminin kolay olması nedeniyle TAEİ büyük boyutlu fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretiminde diğer tüm yöntemlere kıyasla çok daha ekonomik bir çözüm sunmaktadır (Chandrasekaran vd., 2020).

Tel ark eklemeli imalat, tel formundaki malzemelerin bir elektrik ark kaynağı yardımı ile ergitilerek katmanlar halinde bir altlık üzerine biriktirilmesi ile gerçekleştirilir (Chandrasekaran vd., 2020). Buna göre yöntemin uygulama süreci Şekil 1.13'de şematik olarak gösterilmiştir.



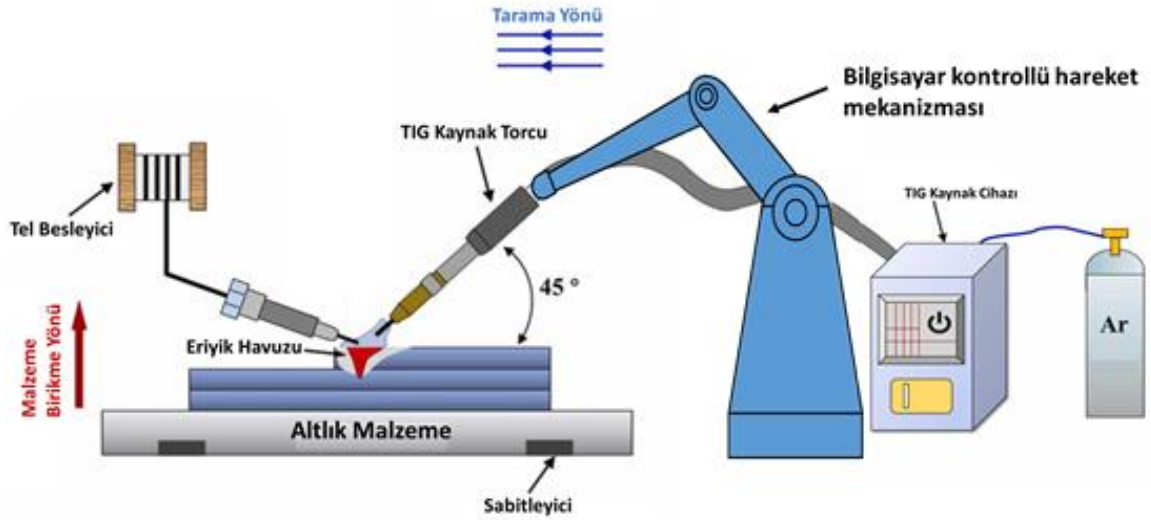
**Şekil 1.13.** Tel ark eklemeli imalatla üretim süreci (Rodrigues vd., 2019)

TAEİ ile metallerin ergitilmesi sırasında yüksek sıcaklık kullanılır. Buna karşın metaller yüksek sıcaklık altında atmosferin etkilerine karşı dayanıksız hale gelir. Bu nedenle tel ark eklemeli imalat koruyucu gaz ortamında gerçekleştirilir. Bu noktada koruyucu gaz atmosferi sağlamak için TAEİ sırasında 2 farklı tasarım kullanılır. Bu tasarımların birinde üretim işlemi tüm sistemin içerisinde bulunduğu kapalı bir gaz odasında gerçekleşirken diğer tasarımda kaynak işlemi için hali hazırda mevcut olan (gaz kalkanı gibi) koruma mekanizmaları kullanılmaktadır. TAEİ yönteminde kullanılan kaynak yöntemleri soy gaz atmosferinde gerçekleştirilir. Bu yöntemlerde çoğunlukla argon gazı kullanılır. Argon gazı kaynak torçunun dış çeperinden kaynak bölgesine doğru gönderilir. Bu şekilde elektrik arkı nedeniyle yüksek sıcaklığa maruz kalan metal bölgesi soy gazlarla kaplanarak atmosferin etkilerinden korunmuş olur. Ancak TAEİ sırasında üretim işlemi çoğunlukla bir hat boyunca devam eder. Bu nedenle kaynak torçu malzeme yığılma bölgesinden uzaklaştığında geride bıraktığı metal bölge halen sıcak kalır. Bu sıcaklık nedeniyle torçun arka tarafında kalan kısım atmosfere karşı korumasız durumdadır. Bu noktada korumasız kalan bu bölgeyi atmosferden izole etmek amacıyla koruyucu gaz kalanı adı verilen bir ekipman kullanılır (B. Kumar vd., 2023b). TAEİ işlemlerinde kullanılan koruyucu gaz kalanı Şekil 1.14 (a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 1.14 (b)'de ise bu prensiple üretilen örnek bir koruyucu gaz kalkanını gösterilmiştir.



**Şekil 1.14.** TAEİ koruyucu gaz kalkanı a) şematik gösterim b) üretilmiş örnek tasarım (Birmingham vd., 2018)

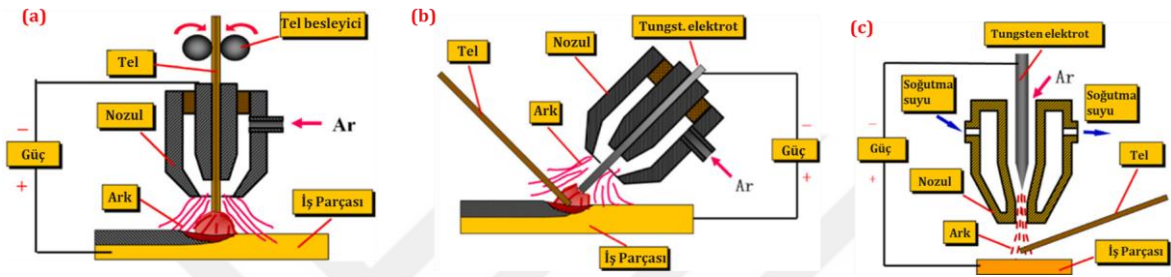
TAEİ ile üretimde koruyucu gaz kalkanının üzerine montajlandığı kaynak torçu robotik bir sistem yardımı ile hareket ettirilir ve bu sırada kaynak arkıyla ortaya çıkan ısı kullanılarak kaynak teli ergitilir. Böylece ergiyik malzeme katmanlar halinde belirlenen bölgelerde yığılarak hedeflenen parça ortaya çıkartılmış olur. Şekil 1.15'de TAEİ imalat yönteminin ana bileşenleri görülmektedir.



**Şekil 1.15.** TAEİ yönteminin ana bileşenleri (D. Liu vd., 2022)

Tel ark eklemeli imalatta ısı kaynağı olarak; metal inört gaz (MIG) kaynağı, tungsten inört gaz (TIG) kaynağı ve plazma ark kaynağı (PAK) kullanılabilir (Williams vd., 2016; Lockett vd., 2017; Rosli vd., 2021). Ancak bunlardan metal inert gaz (MIG) ve tungsten inert gaz (TIG) kaynak yöntemleri eklemeli imalatta çok daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu iki metot

arasındaki en temel fark MIG kaynağında elektrot olarak kaynak teli kullanılırken TIG kaynağında tungstenden üretilmiş, ergimeyen bir elektrotun kullanılmasıdır. Bununla birlikte bu farkın sağladığı üstünlükler nedeniyle TIG kaynağı ile metallerin daha kaliteli, daha çapaksız ve hassas üretimi mümkündür. Özellikle titanyum alaşımları gibi kimyasal aktivitesi ve duyarlılığı yüksek metallerin eklemeli imalatında çoğunlukla helyum ya da argondan ya da bu gazların karışımından oluşan soy gaz atmosferi altında gerçekleştirilen tungsten inört gaz (TIG) kaynağı tercih edilir (Wan vd., 2016; Vempati vd., 2018; Ferro vd., 2020; Navarro vd., 2022). Şekil 1.16’da TAEİ süreçlerinde kullanılan kaynak yöntemleri gösterilmiştir.



**Şekil 1.16.** TAEİ yönteminde kullanılan kaynak türleri (a) MIG kaynağı (b) TIG kaynağı (c) PAK kaynağı (Y. Li vd., 2022)

MIG kaynağı ile hemen hemen tüm metal malzemelerin kaynağı mümkündür. Bu yöntem yüksek ergitme verimliliği ve yığılma oranına sahiptir. MIG kaynağında kaynak elektrotu olarak, dolgu malzemesi görevi de gören tel hammadde kullanılır. Bu kaynak yönteminde tel otomatik bir sürme mekanizması tarafından kaynak bölgesine beslenir. Otomatik tel besleme ünitesine sahip olması ve elektrot olarak doğrudan kaynak telinin kullanılması bu yöntemi TAEİ için oldukça pratik hale getirmektedir. Bu nedenle TAEİ yöntemleri ile ilgili çalışmaların birçoğunda MIG kaynağı tercih edilmektedir (Y. Li vd., 2022).

Plazma ark kaynağı, tungsten elektrot kullanılan ve TIG kaynağına benzeyen bir kaynak yöntemidir. Ancak TIG kaynağından farklı olarak, bu yöntemde elektrik arki tungsten elektrot ve iş parçası arasında değil, daraltılmış ve iyonize edilmiş bir gaz akımı (plazma) içerisinde oluşur. Bu sayede, TIG kaynağına kıyasla daha yüksek sıcaklıklara ve enerji yoğunluğuna ulaşılır. Plazma ark kaynağı düşük maliyeti ve yüksek biriktirme oranları nedeniyle, düşük ila orta karmaşıklığa sahip büyük parçaların imalatı için tercih edilen bir yöntemdir (Artaza vd., 2020a).

TIG kaynağı %83'e varan yüksek kaynak verimi nedeniyle TAEİ işlemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemde eklenen malzeme dışarıdan beslenen tel formundaki ilave malzeme sayesinde sağlanır. TIG kaynağında iyi bir yığılma işlemi için uygun kaynak akımı ve koruyucu gaz atmosferi vazgeçilmez kavramlardır. TIG kaynağı ile gerçekleştirilen TAEİ

işlemlerinde koruyucu gaz olarak çoğunlukla argon tercih edilir. Bu yöntem alüminyum dışındaki metaller için genellikle doğru akım (DC) kullanılarak gerçekleştirilir. Yalnızca alüminyumun TIG kaynağında alternatif akım (AC) tercih edilir.

TIG kaynağının TAEİ' de kullanılmasının avantajlarından bir diğeri kaynak işleminde ergimeyen elektrot kullanılmasıdır. Bu sayede kaynak işlemi sırasında altlık ve elektrot arasında kalan ark boşluğu diğer metotlara göre çok daha kontrollü olarak ayarlanabilmekte, işlem boyunca bu boşluğun belirli aralıklarda kalması sağlanabilmektedir. Bu durum ergiyen elektrot kullanılan yöntemlerle kıyaslandığında daha stabil elektrik arkının oluşumuna imkan sağladığından TIG yöntemi ile yüzeyi daha temiz, daha pürüzsüz ve çukursuz yapılar üretmek mümkündür (Benakis vd., 2020).

TAEİ'de TIG kaynağı kullanımının uygulama yönünden en büyük dezavantajı ilave metalin harici bir besleme ünitesi tarafından kaynak bölgesine sürülüyor olmasıdır. TIG-TAEİ'de kaynak işlemi sırasında üretilen yapıyı oluşturan tel malzemenin torçun hareketi ile aynı doğrultuda ve arkın merkezine doğru beslenilmesi gerekir. Bu durum harici bir besleyici ile sürülen telin sürekli ark merkezine doğru yönlendirilmesi noktasında bir takım zorlukları da beraberinde getirebilmektedir. Örneğin karmaşık geometrili parçalarda tel besleyicinin sürekli hareket yönünü takip ederek telin bu doğrultuda yönlendirilmesi, bunun için de özel donanım ve yazılımların geliştirilmesi gerekebilmektedir. (X. Wang vd., 2019; Treutler ve Wesling, 2021; N. Kumar vd., 2022).

Diğer YEY yöntemlerinde olduğu gibi, TIG-TAEİ sürecinde de ortaya çıkan bir diğer problem malzemeleri ergitmek için kullanılan yüksek ısı ve bu ısının süreç boyunca malzeme üzerinde depolanmasıdır. Metal malzemeler yüksek sıcaklık altında başlangıçtaki özelliklerini kaybeder, özellikle kontrolsüz sıcaklık değişimleri malzeme özelliklerinin de kontrolsüz olarak değişmesine sebep olur. Ayrıca işlem sırasında malzeme üzerinde meydana gelen çevrimsel yüksek termal gradyanlar, metaller üzerinde kalıntı gerilmelerin ve çarpılmaların meydana gelmesine yol açar. Buda üretilen parçanın geometrik ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

TAEİ ile üretim sürecinde malzeme üzerinde depolanan ısının etkilerinin azaltılması için her katman tamamlandıktan sonra yeni katmanın üretimine başlanılmadan önce belirli bir süre beklenir. Bu sırada kaynak arkı kapalı durumdadır. Bu nedenle parçaya ısı girdisi uygulanmadığından bekleme süresince malzemenin sıcaklığı düşmektedir. İki katman arasındaki bu süre katmanlar arası bekleme süresi ya da boşta bekleme süresi olarak adlandırılır. Katmanlar arası bekleme süresi üretimde kullanılan güç yoğunluğu, malzeme özellikleri ve üretilen parçanın geometrisi gibi parametreler göz önünde bulundurularak belirlenir (Montevicchi vd., 2018b, 2018a; Dong vd., 2023).

TAEİ havacılık ve uzay, savunma ve silah endüstrisi, denizcilik ve gemi yapımı, otomotiv sektörü ve biyomedikal mühendisliği gibi kritik alanlarda çok geniş bir uygulama yelpazesine

sahiptir. Bununla birlikte yukarıda bahsedilen bu sektörlerde yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımları TAEİ uygulamalarında özel bir öneme sahiptir.

Titanyum ve alaşımları, çelik veya alüminyum gibi yaygın olarak bulunabilen diğer metallere kıyasla zorlu çalışma şartları altında üstün bir mekanik performans sunar. Öte yandan titanyum alaşımları düşük ısı iletkenliğine ve düşük özgül ısıya sahiptir. Bu durum titanyuma kullanım yönünden üstün özellikler sağlasa da bu parçaların geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesi sırasında bir takım zorlukları da beraberinde getirir (Baufeld vd., 2010; Brandl vd., 2011a; Nguyen vd., 2022). Örneğin titanyumun sıcak deformasyon ile şekillendirilmesi yüksek oksidasyon, düşük elastisite modülü ve düşük termal iletkenlik gibi nedenlerle oldukça zordur. Öte yandan talaşlı imalat sırasında titanyum oksijen ile reaksiyona girer ve yüzeyde sert bir oksit tabakası oluşturur. Bunun yanında titanyumun talaşlı imalatı sırasında takım ve parça üzerinde oluşan ısı yeterince hızlı uzaklaştırılmadığından kesici takım ömrü son derece kısadır. Daha önce belirtildiği gibi, titanyum yüksek sıcaklıklarda oksidasyona son derece yatkındır. Buna karşın bu alaşımın döküm yöntemi ile özel ekipmanlar kullanarak üretimi mümkündür. Ancak dökümün hem her farklı parçada yeni kalıp gerektirmesi hem de bu kalıp maliyetine ek olarak ilave donanım gerektirmesi üretim maliyetlerini oldukça yükseltmektedir. Bununla beraber döküm yoluyla üretilen titanyum parçalar yüksek viskozite nedeniyle boşluklu katılaşmaya oldukça eğilimlidir. Bu nedenle çoğu zaman kendilerinden beklenen performansı karşılamada başarısız olabilmektedir. Öte yandan titanyumun dövme işlemi de döküm işlemine benzer şekilde özel ekipmanlarla gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte karmaşık parçaların dövme ile üretimi oldukça zordur. Oysa tüm bu durumların aksine TAEİ ile titanyum malzemelerin üretimi görece basit ve düşük maliyetlidir. Bu yöntemle parçaların üretiminde standart Eİ donanımının dışında herhangi ek bir ekipmana ihtiyaç duyulmaz. Bu sayede kalıp vb. herhangi bir ara ekipmana ihtiyaç duyulmadan net şekle yakın parçalar üretilebilir. Özetle eklemeli imalat titanyum ve alaşımlarının üretiminde geleneksel üretim yöntemlerine göre oldukça düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir iyi bir alternatiftir (Lin vd., 2021; Nguyen vd., 2022). Öte yandan, titanyum alaşımlarının üretiminde kolay uygulanabilir olması, düşük maliyeti ve sağladığı iyi mekanik özellikler nedeniyle TIG-TAEİ yöntemi en çok tercih edilen Eİ yöntemlerden biridir (Short, 2009; Gope vd., 2018). Ancak özellikle Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ ile üretiminde bazı belirsizlikler ve zorlayıcı unsurlar bulunmaktadır. Bunların başlıcaları takip eden satırlarda tartışılmıştır.

Ti-6Al-4V  $\alpha$  ve  $\beta$  adı verilen fazlardan oluşur. Oda şartlarında Ti-6-Al-4V alaşımının yapısında %90  $\alpha$ , %10  $\beta$  fazı bulunur. Öte yandan bu fazların oranı sıcaklığa bağlı olarak değişir, bununla birlikte Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri doğrudan malzemenin iç yapısına bağlıdır. Bu durum parçalara istenilen iç yapı ve mekanik özellikleri kazandırabilmek için titanyumun farklı sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulabileceği anlamına gelir. Ancak bu durum kontrolsüz gerçekleşen termal değişimlerin malzeme özellikleri üzerinde olumsuz etkilerinin olabileceğinin de göstergesidir. Ti-6Al-4V alaşımının iç yapısı yaklaşık 1000°C'nin üzerindeki

sıcaklıklarda %100 beta fazlarından oluşur. Buna karşın malzeme bu sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklara soğumaya başladığında içyapısında soğuma sıcaklığına bağlı olarak yatay bantlar halinde alfa kolonileri, sepet örgüsü yapıları alfa plakaları ve masif/martensit alfa adı verilen faz yapıları oluşmaya başlar. Ti-6Al-4V alaşımının yapısında görülebilen bu fazların her biri farklı mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle fazların içyapıdaki oranlarının ısıtmadan önceki oranlardan farklı olması malzeme özelliklerinde büyük değişikliklerin olabileceği anlamına gelmektedir (Lin vd., 2021). Titanyum alaşımlarının kaynak edilebilme özellikleri oldukça iyidir. Ancak yukarıda anlatılan termal etkilerden dolayı kaynak sırasında meydana gelecek kontrolsüz termal değişimler üretim işlemi sonrasında oluşacak yapının özelliklerini belirsiz hale getirir. Bu nedenle TAEİ yöntemi ile kontrolsüz ve optimize edilmemiş üretim parametreleri ile üretilecek parçaların arzu edilen mekanik ve mikroyapısal özelliklerin sağlanmama riski yüksektir.

TIG-TAEİ yöntemi uygulanırken metallerin ergime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtılarak birleştirilmesi amaçlanır. Bu bağlamda metallerin birleştirilmesi amacıyla uygulanan ısı metaller üzerinde bir eriyik havuzu oluşturur ve birleşme bu bölgede sağlanır. Öte yandan metal malzemeler sıcaklığı iletir. Bu nedenle birleşme bölgesine uygulanan ısı metal malzemelerin ısı iletkenlikleri nedeni ile eriyik havuzuna belirli bir mesafede bulunan ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) adı verilen metal yapının tamamına yayılarak bu bölgelerde farklı sıcaklık mertebelerinde etkili olur. Malzemelerin sıcaklıkları yükseldikçe soğuma hızı da yükselir. Bu nedenle Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ ile üretimi sırasında malzeme üzerinde çevrimli ve kontrolsüz yüksek termal değişimler meydana gelir. Bununla birlikte eklemeli imalat sırasında katmanlar arasında sıcaklığın artmasıyla daha ince yapıları taneler ortaya çıkarak daha sert yapılar oluşabilir. Sonuç olarak tüm bu sebeplerden dolayı üretilen parçanın yapısında farklı bölgelerde farklı özelliklere sahip anizotropik bölgeler meydana gelebilir (Kawalkar vd., 2021). Öte yandan makine parçaları malzemelerin katalog verileri veya deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak boyutlandırılır. Çoğu zaman mukavemet hesaplamalarında kullanılan bu değerlerin parçanın her noktasında eşit olduğu kabul edilir. Bu noktada malzemelerin farklı bölgelerinde değişken mekanik özellikler sergilemesi yapılan tasarımın güvenli yükleme bölgelerinde kalıp kalmayacağı konusunda çelişkileri de beraberinde getirir.

TIG-TAEİ sırasında uygulanan ısı enerjisinin neden olduğu bir diğer problem malzeme üzerinde meydana gelen kalıntı gerilmelerdir. Özellikle üretim sırasında ergitme ve sonrası hızlı katılaşma çevrimlerinde ortaya çıkan ve homojen olmayan termal gradyanlar nedeniyle malzemenin mekanik özellikleri TAEİ sürecinde sürekli değişir ve parçada yüksek mertebelerde çarpılmalar ve kalıntı gerilmeler oluşabilir. Hatta imalat parametrelerinin uygun seçilmemesi parçada çatlak ve hasar oluşmasına neden olabilir. İmalat sonrası parçalara ısı işlemleri uygulanarak istenilmeyen kalıntı gerilmeler giderilebilse de, çarpılma ve çatlakların giderilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Ayrıca bu yöntemin büyük boyutlu parçaların

tamirinde kullanılabileceği düşünöldüğünde ısı işlem bu problemlerin giderilerek arzu edilen özelliklerin elde edilmesi için her zaman etkin bir çözüm sunmayabilir.

Yukarıda verilen durumlar dikkate alındığında arzu edilen mikroyapısal ve mekanik özelliklere sahip parçaların TIG-TAEİ yöntemi ile üretilmesi için tüm süreç parametrelerinin (bekleme süresi, ilerleme hızı, güç yoğunluğu, tarama deseni vb.) uygun şekilde belirlenmesi oldukça kritiktir. Bu durum TIG-TAEİ süreçlerinin optimizasyonu ile ilgili gerçekleştirilecek araştırmaların önemini ön plana çıkarmaktadır.



## 2. BÖLÜM

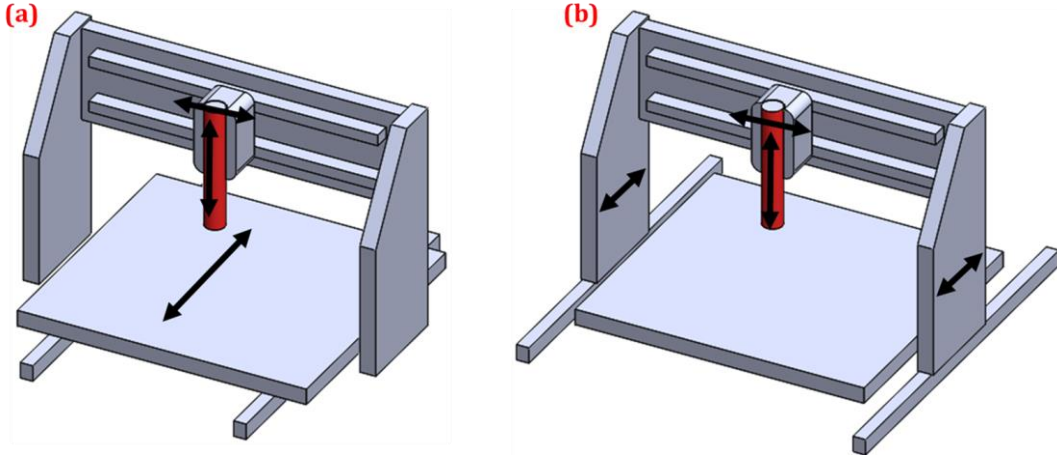
### LABORATUVAR ÖLÇEKLİ BİR TIG-TAEİ CİHAZININ TASARIM VE ÜRETİMİ

Ticari olarak üretilen TAEİ sistemleri çoğunlukla makine parçalarının üretiminde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle endüstride kullanılan sistemler genellikle büyük ebatlı ve yüksek maliyetlidir. Öte yandan deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere üretilen numuneler ticari ürünlere kıyasla çok daha düşük ölçülere sahiptir ve büyük kapasiteli cihazlara ihtiyaç duymadan da üretilebilmektedir. Bu noktada ticari sistemlere alternatif olarak tasarlanacak laboratuvar ölçekli bir TAEİ sistemi bu konuda gerçekleştirilecek araştırmaların maliyetini düşürecek ve araştırma alt yapısını güçlendirecektir. Buradan hareketle bu tez çalışması kapsamında, geliştirilen TAEİ süreç modellerinin doğrulama çalışmalarında kullanılmak üzere, laboratuvar ölçekli özgün bir TIG-TAEİ cihazı tasarlanmış ve üretilmiştir.

Cihazın tasarım ve üretimi 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada sistemin tüm bileşenlerini üzerinde bulunduran mekanik sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. İkinci aşamada ise üretilen sistemin sayısal olarak kontrol edilmesini sağlayan kontrol kartı ve arayüz programı hazırlanarak sisteme entegre edilmiştir. Buna göre tez çalışması kapsamında geliştirilen TAEİ cihazının üretim ve tasarım aşamaları aşağıda tartışılmıştır.

#### 2.1. TIG-TAEİ Sisteminin Mekanik Bileşenlerinin Tasarım ve Üretimi

Geliştirilen TIG – TAEİ sistemi bir TIG kaynak cihazı ve bir kartezyen robot ile diğer yardımcı donanımlardan oluşmaktadır. Tasarlanan sistemde kaynak torçu kartezyen robot yardımı ile hareket ettirilmekte, bu sırada kaynak arkıyla ortaya çıkan ısı kullanılarak kaynak teli belirlenen hatlar boyunca ergitilmektedir. Burada hareketi sağlamak için kullanılan kartezyen robot aynı zamanda cihazın ana şase yapısını da oluşturmaktadır. Bu nedenle sistemin geliştirilmesine kartezyen robotun tasarımı ile başlanılmıştır. Bu noktada cihazın tasarımına başlanılmadan önce literatürde yapılmış benzer çalışmalar incelenmiş, avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda 2 temel tasarım ile karşılaşılmıştır. Bu tasarımlardan ilki sabit iki kolon üzerinde düşey ve yatay hareket eden eksenlerle ileri geri hareket eden bir tabladan oluşmaktadır. Diğer tasarım ise sabit 2 kolon-kiriş sistemi üzerinde kurulmuş 3 eksenli hareket edebilen bir köprülü yapıdan oluşmaktadır. Bahsedilen tasarımlar Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.1 (a)'da görülen tasarımda üzerine biriktirme işlemi yapılan altlık malzeme, bir tabla üzerinde, y eksenli boyunca hareket etmektedir. Şekil 2.1 (b)'de gösterilen ikinci tasarımda ise altlığı üzerinde taşıyan tabla sabitken, tüm hareketi kaynak torçunun bağlı olduğu köprülü yapı gerçekleştirmektedir.



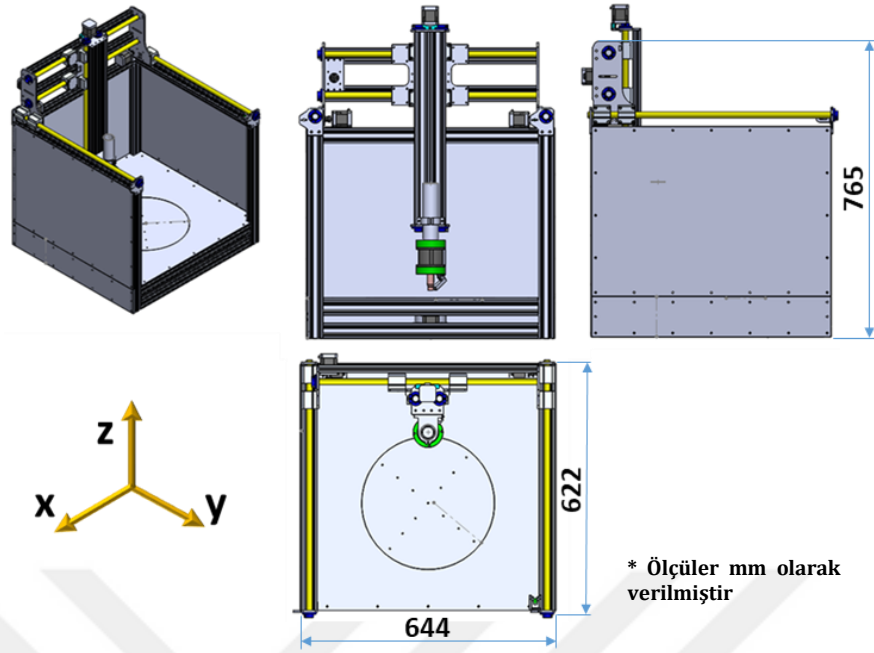
**Şekil 2.1.** TIG TAEİ sisteminde kullanılan kartezyen robot tasarımları örnekleri, (a) hareketli tabla, (b) sabit tabla

Bilindiği üzere TAEİ süreçlerinde kaynak işlemi sırasında malzemeler ergimekte ve bir eriyik havuzu oluşmaktadır. Burada ergimiş metali üzerinde bulunduran altlığın hareket etmesi sıvı haldeki eriyik havuzunda çalkantılar oluşturmaktadır, bu da işlem sonucunda ortaya çıkan geometride bozulmalara yol açmaktadır (Ayan ve Kahraman, 2021). Bu nedenle tez çalışması kapsamında tasarlanan sistemde Şekil 2.1 (b)'de verilen, sabit tablalı kartezyen robot yapısı tercih edilmiştir.

Üretilen TIG-TAEİ cihazı aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

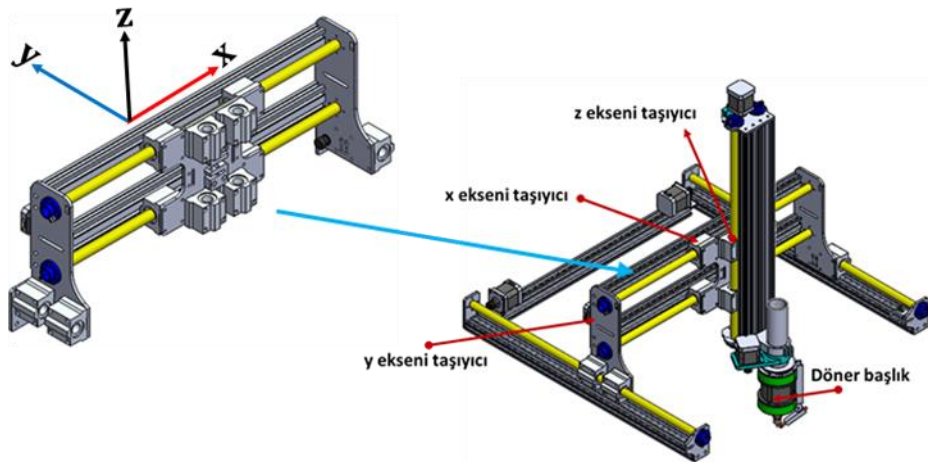
- Temel hareketleri sağlayan x,y,z eksen taşıyıcıları
- Tel beslemesini sağlayacak tel sürücü
- Tel besleyicinin kaynak torçu etrafında açılabilir hareketini sağlayan döner başlık
- Kaynak torçu
- Kaynak cihazı
- Kontrol ünitesi
- Kontrol yazılımı

Yukarıda bileşenleri verilen Eİ sisteminin üretimine başlanılmadan önce SolidWorks yazılımı ile tasarımlar yapılarak boyutsal kontroller sağlanmıştır. Buna göre tasarımı gerçekleştirilen TIG-TAEİ cihazına ait katı model çizimleri Şekil 2.2 'de gösterilmiştir.



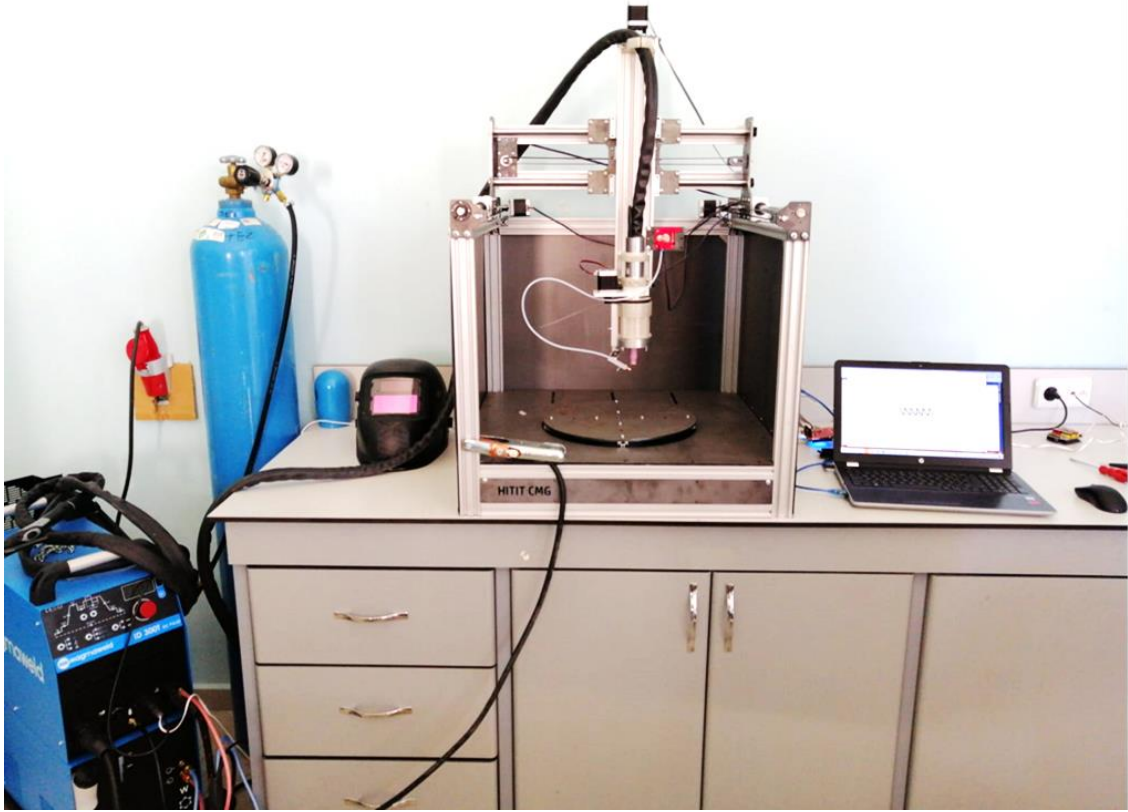
**Şekil 2.2.** TIG-TAEI sisteminde kullanılan kartezyen robotun katı model çizimleri

Tasarlanan TIG-TAEİ sisteminde temel hareketleri sağlayan x,y,z eksen taşıyıcıları lazer kesimle şekillendirilen çelik saclar ve bu saclarla birleştirilen sigma profillerden oluşturulmuştur. Şekil 2.3'te görülmekte olarak taşıyıcı sistemde malzeme yığma hareketi x ve y eksenleri ile sağlanırken katman yüksekliği z eksenı sayesinde oluşturulmaktadır. Y eksenı, makine iskeletine montajlanan indüksiyonlu miller ve bu miller üzerinde lineer rulmanlar sayesinde hareket eden ana kirişten oluşmaktadır. X ve Z eksenleri ise bu ana kiriş üzerinde yatay ve düşey hareket eden mil-rulman sistemi ve bunları birleştiren bir sac levha ile oluşturulmuştur.



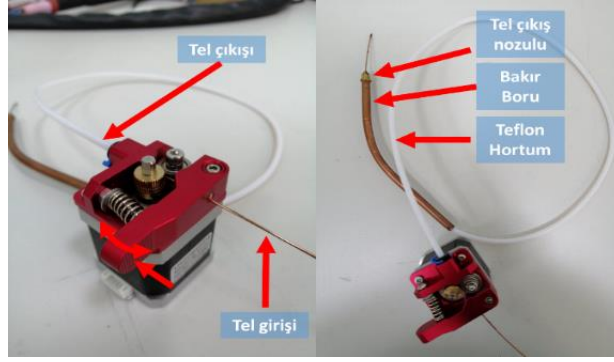
**Şekil 2.3.** TIG-TAEI sistemi ana kiriş ve taşıyıcı sistem yapısı

Taşıyıcı sistemi üzerinde bulunduran ana giriş, sigma profillerden oluşan kübik bir çerçeve üzerine oturtulmuştur. Bu sayede hem TIG-TAEİ sistemine bir iskelet oluşturulmuş hem de altlığın tutturulacağı makine tablasının sabitlenebilmesi için bir şase yapısı meydana getirilmiştir. Makine iskeletini oluşturan bu çerçevenin arka ve yan yüzeyleri sac plakalarla kapatılmıştır. Böylece hem kaynak bölgesine olan kontrolsüz hava akımının önüne geçilmesi hem de makine gövdesinin daha rijit bir yapıya sahip olması amaçlanmıştır. Tez çalışması kapsamında tasarlanan ve yukarıdaki tasarım aşamaları doğrultusunda üretilen sistem Resim 2.1’de genel hatları ile görülmektedir.



**Resim 2.1.** TIG – TAEI üretim sistemi için üretilen kartezyen robotun genel görüntüsü

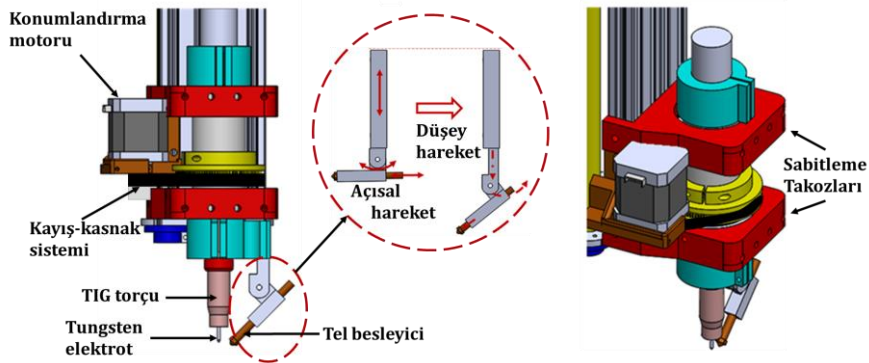
TIG kaynak yöntemi ergimeyen elektrot kullanılan bir kaynak metodudur. Bu nedenle ilave metal, kaynak torçunun yan tarafından kaynak bölgesine sürülerek sağlanmaktadır. Malzeme biriktirme işleminin gerçekleştirilmesi için gerekli tel sürme hareketi tasarlanan bir tel besleme ünitesi ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre tasarlanan tel sürme mekanizması Resim 2.2’ de görülmektedir.



**Resim 2.2.** TIG TAEI sisteminde kullanılan tel sürme mekanizması

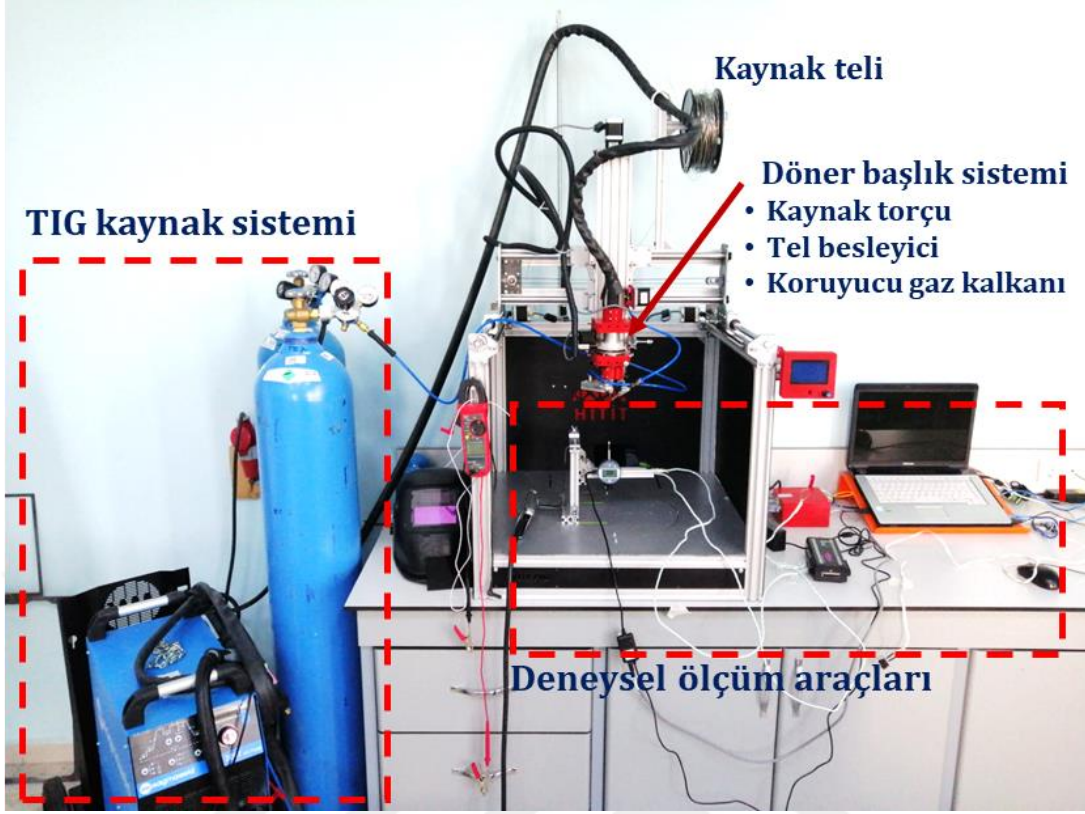
Tel sürme işlemi bir step motor ve dişli-kasnak grubundan oluşturulmuştur. Bu yöntem polimer filament baskısı yapan eklemeli imalat cihazlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle tel sürücü, bir filament ekstruder ünitesi revize edilerek oluşturulmuştur. Bu ünitenin devamına yüksek sıcaklığa dayanabilen bir teflon hortum eklenmiştir. Böylece kaynak telinin hareket eksenini aynı doğrultuda ilerlemesini sağlayacak bir kılavuz oluşturulmuştur. Bu kılavuzun kaynak bölgesine yaklaştığı bölüm bakır bir boru ile yüksek sıcaklıktan ayrılmıştır. Söz edilen bakır borunun çıkış kısmı filamentli bir 3D yazıcı nozulunun çıkışı genişletilerek sonlandırılmıştır. Böylece tel besleyici ile sürülen telin kaynak bölgesine odaklanabilmesi sağlanmıştır.

Bilindiği gibi kaynak işlemlerinde malzeme yığılma yönü ergimiş metal ile oluşturulan kaynak dikişini etkilemektedir. Öte yandan farklı biriktirme yönlerinde malzeme eklenmeye çalışıldığında tel besleyicinin de bu yöne göre konumlandırılması gerekmektedir. Buradan yola çıkılarak, tasarlanan tel besleyicinin TAEİ robotu üzerine montajı için bir döner başlık sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarlanan döner başlık; rulmanlı yataklar, otomasyon tipi torç, bu torç için yataklama borusu, sabitleme takozları ve tahrik sisteminden oluşmaktadır. Sisteminin genel görüntüsü Şekil 2.4'te verilmiştir.



**Şekil 2.4.** Döner başlık sisteminin tasarımı





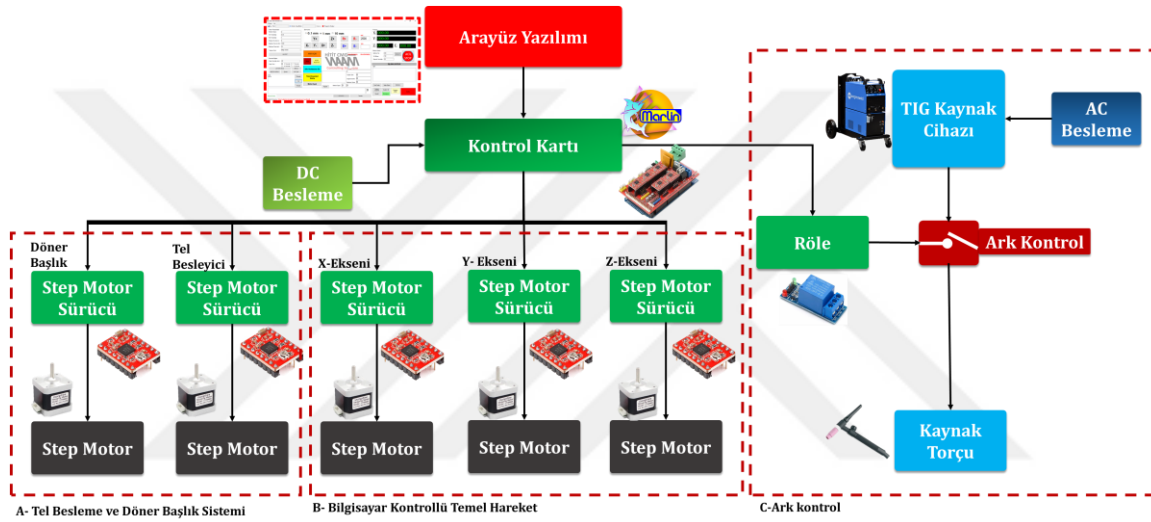
**Resim 2.4.** Üretimi tamamlanan TIG-TAEİ cihazının genel görüntüsü

Yukarıda anlatılan mekanik bileşenlere ek olarak tez çalışması kapsamında TAEİ sistemi ile numuneler üretilerek deneysel çalışmalar gerçekleştirileceğinden sistemin tablasına birim şekil değişimi ölçümü, sıcaklık ölçümü vb. sensörlerin montajlanmasını kolaylaştıracak ve altlık malzemenin sabitlenmesine imkan verecek bir tutucu sistemi de üretilerek montajlanmıştır. Böylece üretim sırasında malzemeler üzerinde meydana gelen değişimlerin gözlemlenmesi mümkün hale getirilmiştir.

## **2.2. TIG-TAEİ Cihazının Kontrol Sisteminin Tasarım ve Üretimi**

TIG-TAEİ cihazları temel olarak, bilgisayar kontrollü bir hareket mekanizmasına bir TIG kaynak sistemi entegre edilerek oluşturulur (Kawalkar vd., 2021). Daha önce de bahsedildiği gibi, TIG kaynağında ergimeyen elektrot kullanılır. Bu nedenle kaynak sırasında ilave dolgu metalinin dışarıdan beslenmesi gerekir. Bunun için bu iki temel bileşene ilave olarak bir tel sürme mekanizması da sisteme eklenir. Böylece sistemi oluşturan bu üç bileşen bir arada çalışarak belirlenen geometride parçayı oluşturur. Anlatılan bu sürecin senkronize bir şekilde gerçekleşebilmesi için birden fazla bileşenden oluşan bu sistemin bir elektronik kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmesi gerekir.

Üretilen TIG-TAEİ sisteminde tüm hareketli parçalar step motorlar tarafından tahrik edilmektedir. Step motorlara hareket verebilmek için step motor sürücüler kullanılmaktadır. Bu sürücüler kendilerine gelen hareket komutlarına göre dönüş yönü ve hıza bağlı olarak kontrol ettiği motorların hareketini sağlamaktadır. Öte yandan sistemde tel malzemenin ergitilmesi için kullanılan kaynak arkı, bir röle kartı kullanılarak tetiklenmektedir. Tasarlanan sistemde motorların kontrolü için kullanılan step motor sürücüleri ve röle kartı, bir kontrol kartına bağlanmıştır. Böylece TIG-TAEİ sistemi bilgisayar ile haberleşebilir hale getirilmiştir. Buna göre çalışma kapsamında üretilen cihaz için geliştirilen kontrol sistemi Şekil 2.5'te şematik olarak verilmiştir.

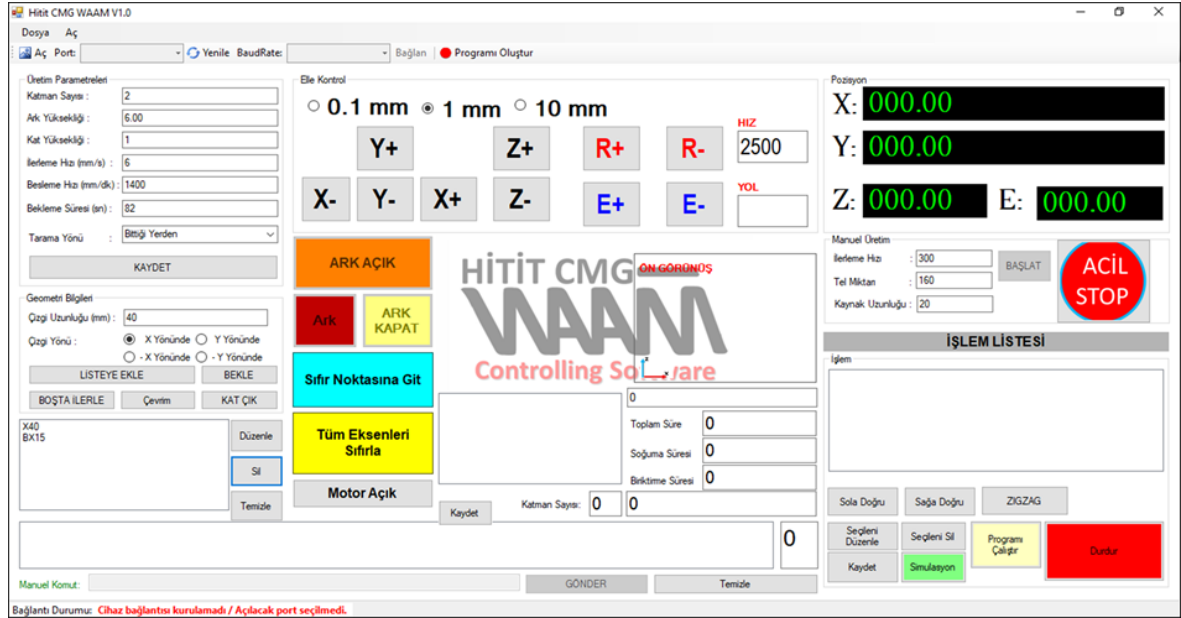


**Şekil 2.5.** TIG-TAEİ sistemi kontrol şeması

TAEİ cihazının kontrol kartı bir Arduino Mega mikrokontrollör kartı programlanarak üretilmiştir. Arduino Mega, üzerinde Atmel firmasına ait bir mikro kontrolcü bulunduran, bilgisayar ile usb üzerinden haberleşebilen bir elektronik kontrol kartıdır. Bu kart, içerisine yüklenen yazılıma bağlı olarak kendisine gönderilen komutları yerine getirmekte ayrıca bilgisayar ile elektronik cihazlar arasında haberleşmeyi de sağlayabilmektedir. Belirtilen bu işlemleri gerçekleştirebilmesi için Arduino Mega kontrol kartı içerisine 3 boyutlu yazıcılarda yaygın olarak kullanılan açık kaynak kodlu Marlin yazılımı modifiye edilerek gömülmüştür. Marlin yazılımı kullanıcı tarafından G kodu olarak gönderilen komutları ayrıştırmakta ve hangi motora kaç adım gitmesi gerektiği bilgisini hesaplayarak motor sürücülerine hareket sinyallerini göndermektedir. Ayrıca gelen kodlardan ark rölesinin tetikleme ve kapatma işlemleri gibi yan işlemlerin de gerçekleştirilmesi için sinyaller üretmektedir.

Bilindiği gibi kontrol ünitesine gönderilen g-kodları belirli bir algoritmaya göre oluşturulmaktadır. Ayrıca bu kodların Arduino kartına iletilmesi için de bir makine-insan

arayüzüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçtan yola çıkılarak TIG-TAEI sisteminin bilgisayar aracılığıyla kontrol edilmesini sağlayacak bir bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır. HİTİT CMG WAAM v1.0 (Computational Mechanics Group, Wire Arc Additive Manufacturing) adı verilen bu bilgisayar arayüzüne ait ekran görüntüsü Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6. CMG WAAM yazılımı ekran görüntüsü

Geliştirilen yazılım seri port aracılığı ile Arduino Mega Kartına bağlanmakta ve oluşturduğu g-kodlarını sıra ile bu karta göndermektedir. G kodları, biriktirme geometrisi oluşturma aracı ile programa girilen rotalara bağlı olarak otomatik bir şekilde oluşturulmaktadır. Bu aşamada kullanıcının hareketin hangi yönde ve kaç mm uzunluğunda olacağını liste olarak programa girmesi ve program oluştur butonuna basması g-kodlarının oluşturulması için yeterlidir. Ayrıca üretilecek yapı için ilerleme hızı, besleme hızı, ark yüksekliği vb. parametreler yapılandırma dosyası olarak kaydedilebilmekte ve gerektiğinde kayıtlardan çağırılabilir. Otomatik olarak gerçekleştirilen bu işlemlere ek olarak program arayüzüne pozisyonlama için elle kontrole imkan veren komut butonları eklenmiştir. Böylece makinenin kullanıcı tarafından manuel olarak da hareket ettirilebilmesi sağlanmış, parça sıfır alma ya da kaldığı yerden devam ettirme gibi işlemler için isteğe bağlı pozisyonlama kolaylaştırılmıştır.

Yukarıda anlatılan bu kontrol sistemi, Bölüm 2.1’de üretim aşamaları anlatılan mekanik sistem ile entegre edilmiştir. Böylece TIG-TAEİ ile üretim prensiplerine uygun olarak tel formundaki malzemenin, bilgisayar aracılığı ile üretilen kontrol komutları yardımı ile katmanlar halinde belirlenen bölgelerde yığılması sağlanmıştır.

TAEİ sisteminin üretiminin tamamlanmasının ardından cihazın yazılımsal olarak ayar ve kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla cihazın harekete bağlı olan hız, konum hassasiyeti gibi parametreleri ölçülerek bu değerler kontrol kartında bulunan yazılım üzerinden kalibre edilmiştir. Böylece sistemin verilen kodlarla tanımlanan hız ve konum komutlarına uygun olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Ayar sürecinin tamamlanmasının ardından deneylerde kullanılması planlanan Ti-6Al-4V plaka boyutlarıyla aynı boyutlarda altlık malzemeler hazırlanarak kaynak arkı oluşturma ve malzeme yığıma denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu noktada Ti-6Al-4V alaşımının kaynak davranışı, ilerleme hızı, kaynak akımı ve besleme hızı gibi parametreler göz önüne alınarak geliştirilen tel ark eklemeli imalat cihazı ile deneme üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Kaynak arkının stabil ve işlem boyunca kesintisiz olarak sürdürülebildiğinin ve bu sırada ilave metal malzemenin kaynak bölgesine uygun şekilde sürülebildiğinin kontrolü için Resim 2.5'te bazı örnekleri görülen çok sayıda üretim denemesi yapılmış, bu sayede arzu edilen kalitede üretime izin veren ve doğrulama süreçlerinde dikkate alınabilecek süreç parametreleri elde edilmiştir. Böylece deneme numunelerinden elde edilen verilerden faydalanılarak tez çalışması kapsamında üretilen ve ilerleyen bölümlerde detayları sunulacak tüm deney numuneleri geliştirilen bu laboratuvar ölçekli TIG-TAEİ cihazı kullanılarak imal edilmiştir.



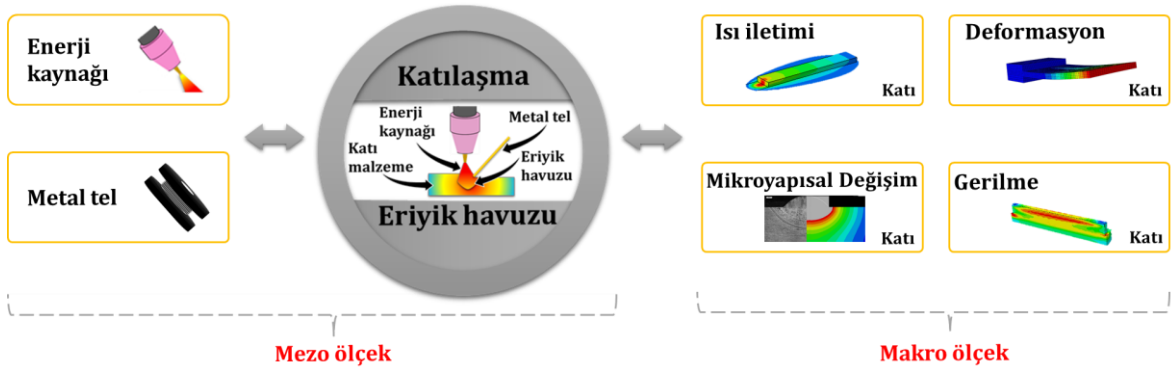
**Resim 2.5.** Tasarlanan TIG-TAEİ cihazı ile üretilen deneme numunesi örnekleri

### 3. BÖLÜM

#### TAEİ İLE ÜRETİM SÜRECİNİN MODELLENMESİ

Parçaların katmanlar halinde üretildiği TAEİ yönteminde, her yeni katmanın oluşturulması sürecinde kontrolsüz ısınma ve soğuma çevrimleri meydana gelir. Önceki bölümlerde de tartışıldığı gibi, bu çevrimsel süreçlerde yüksek sıcaklığa maruz kalan metal malzemelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri dikkate değer mertebelerde değişime uğrar. Bu değişimlerin deneysel olarak anlık takibi oldukça zor, hatta bazı durumlarda (Örneğin işlem sırasında içyapıda meydana gelen değişimler gibi) bu değişimlerin hassas şekilde anlık olarak incelenmesi günümüz teknolojisi ile olanaksızdır. Bu noktada sonlu elemanlar yöntemi, özellikle büyük ölçekli parçaların TAEİ ile üretimi sırasında meydana gelen termal, mikroyapısal ve mekanik davranışların incelenmesinde oldukça faydalı bir makro ölçek modelleme yöntemidir. Buradan hareketle, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen benzetim modelleri ile TIG-TAEİ sürecinde meydana gelen termal, mikroyapısal ve mekanik değişimlerin incelenmesi için bir nevi sürecin dijital ikizi oluşturulmaya çalışılmıştır

TAEİ süreçlerinin SEY ile benzetim modellerinde genellikle hesaplamalı kaynak mekaniği modellerinin ileri versiyonları kullanılır (Chiumenti vd., 2010; Lindgren, 2006; Lundbäck ve Lindgren, 2011; Saracıbar vd., 2014). Bununla birlikte TAEİ sürecinde, kaynak işleminde de olduğu gibi termal, mekanik ve metalürjik birçok fiziksel olay meydana gelir. Bu noktada Şekil 3.1'de TAEİ süreçlerinde meydana gelen fiziksel olayların genel bir özeti gösterilmiştir.

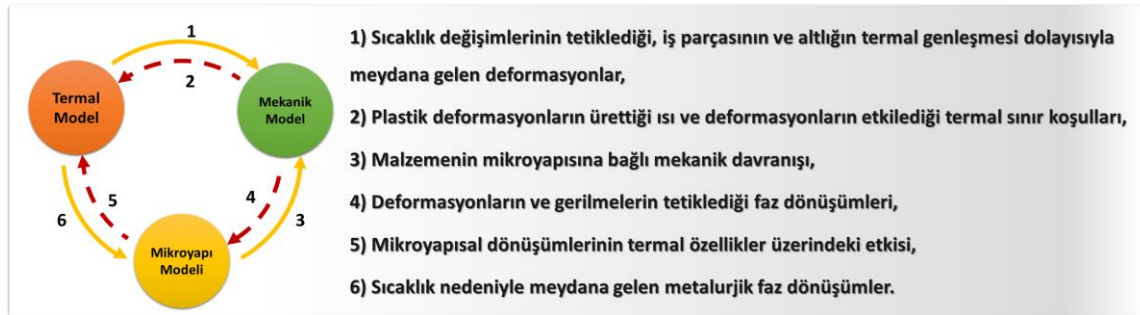


**Şekil 3.1.** TAEİ süreçlerinde meydana gelen fiziksel olayların genel bir özeti (Lindgren, 2006; Shamsaei vd., 2015; Thompson vd., 2015)

Fiziksel olaylar modellenirken meydana gelen değişimler mikro ölçekten makro ölçeğe kadar çeşitli ölçek seviyelerinde ele alınır. Bu ölçekler arasındaki sınırlar araştırma konularına ve araştırmacıların bakış açılarına bağlıdır. Mühendislik alanındaki araştırmalar genel olarak

makro, meso ve mikro ölçeklerde gerçekleştirilir ve meydana gelen fiziksel olayların analizi için bu ölçeklere dayalı yaklaşımlara göre çeşitli modeller önerilir (Tsuji, 2007). Buna göre Şekil 3.1'deki gösterimde enerji kaynağı, eriyik havuzu ve katılaşma evresi arasındaki karşılıklı etkileşimler mezo ölçekte modelleme kapsamında, katı haldeki olaylar ise makro ölçekli modelleme kapsamında ele alınır (Antony vd., 2014; Attar ve Körner, 2011; Dai ve Gu, 2016; J. Ding vd., 2014; He ve Mazumder, 2007; Khairallah ve Anderson, 2014; Körner vd., 2011; Masmoudi vd., 2015; Yin ve Felicelli, 2010). Mezo ölçek modelleme oldukça doğru sonuçlar veren, buna karşın çok fazla hesaplama yükü gerektiren bir tekniktir. Bu nedenle çoğu zaman uygulamada yalnızca düşük boyut ve zaman ölçeklerinde tercih edilir. Bu noktada özellikle büyük boyutlu parçaların analizlerinde mezo ölçek modellerden elde edilen sonuçlara ve deneysel ölçümlere dayanarak geliştirilen makro ölçek modelleme teknikleri kullanılır. Bu nedenle metallerin eklemeli imalat süreçlerinin benzetiminde çoğunlukla makro ölçek modelleme teknikleri tercih edilir. Metal Eİ süreçlerinin klasik makro ölçekli modellerinde ergimiş bölgedeki metal akışı ile ilgili detaylar genellikle hesaba katılmaz ve ısı kaynağı nedeniyle oluşan ısı üretimi, ısı girdisi modelleri kullanılarak benzetilir (Anca vd., 2011; Neela ve De, 2009; Peyre vd., 2008; Wang ve Felicelli, 2006; Ye vd., 2006).

TAEİ süreçlerinin makro ölçek benzetim modellerinin gerçeğe en yakın sonuçları verecek şekilde geliştirilebilmesi için süreç boyunca meydana gelen fiziksel alan problemlerinin etkileşimli olarak çözülmesi gerekir. TAEİ süreçlerinin TMM benzetim modelleri oluşturulurken dikkat edilmesi gereken etkileşimler Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



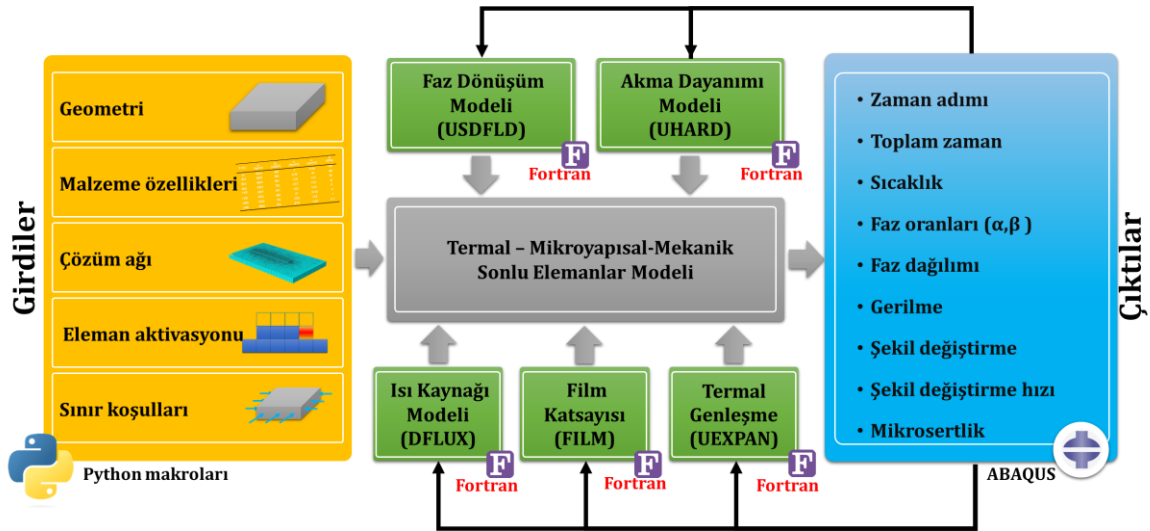
**Şekil 3.2.** Termal, mekanik ve metalürjik alanlar arasındaki etkileşimler

Burada kesikli çizgilerle gösterilen etkileşimler TAEİ sürecinin benzetim modellerinde hesap yükünü azaltmak için genellikle ihmal edilir. Buna göre Şekil 3.2'de verilen etkileşimlerden, (2) ve (5), gizli ısı ve plastik şekil değişiminin neden olduğu termal etkilerin ısı kaynağının etkisiyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek mertebede olmasından; (4) numaralı etkileşim ise deformasyonların neden olduğu faz dönüşümlerinin termal etkilerin neden olduğu faz dönüşümlerinin yanında düşük mertebede olmasından dolayı ihmal edilebilir (Lindgren, 2006; Longuet vd., 2009).

### 3.1. Sonlu Elemanlar Modeli

TMM modellerinin geliştirilmesinde makro ölçek modelleme teknikleri dikkate alınarak, sonlu elemanlar yöntemini (SEY) temel alan ABAQUS paket programı kullanılmıştır. ABAQUS, model tanımlamalarının kullanıcı ara yüzü üzerinden görsel olarak yapılabildiği, bunun yanında tüm bu işlemlerin Python makroları adı verilen komut dizeleri ile de gerçekleştirilebildiği bir programdır. Ayrıca ABAQUS kullanıcı alt programı adı verilen Fortran program parçacıklarını tanıyarak problemlerin çözümü sırasında zamana veya farklı parametrelere bağlı değişen girdilerin tanımlanabilmesine de imkan vermektedir. Bu imkana ek olarak kullanıcı alt programları ile gerekli hesaplama algoritmaları tanıtılarak programın hesaplama kabiliyetleri içerisinde bulunmayan analizlerin yapılabilmesi de mümkündür (örneğin SEY çözümünden alınan çıktılara bağlı mikroyapısal hesaplamalar gibi).

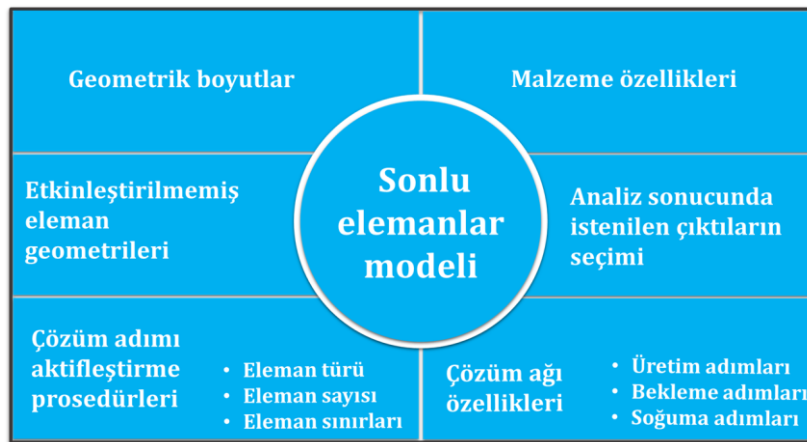
Bu noktada benzetim modelleri geliştirilirken eklemeli imalat sürecinde zamana bağlı meydana gelen karmaşık fiziksel değişimlerin tanımlanmasında ABAQUS'un makro ve kullanıcı alt programı çalıştırabilme özelliği etkin şekilde kullanılmıştır. Bu sayede TIG-TAEİ süreçlerinin parametrik olarak analiz edilmesine imkan veren, farklı parametre ve geometrilere kolayca uyarlanabilen bir model geliştirilmiştir. Bu bağlamda tez çalışması kapsamında geliştirilen TMM modelde sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve başlangıç koşullarının tanımlanması için Python makroları; mikroyapısal modelin oluşturulması, ısı kaynağının, malzemenin mikroyapıya bağlı özelliklerinin ve bazı sınır koşullarının tanımlanması için ise Fortran kullanıcı alt programları kullanılmıştır. Buna göre TAEİ süreçlerinin analizi için geliştirilen TMM benzetim modellerine ait akış şeması genel hatları ile Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Bağlı termal-mikroyapısal-mekanik sonlu elemanlar modelinin akış şeması

Eklemeli imalat süreçlerinin sonlu elemanlar modeli oluşturulurken çok sayıda parametrenin programa girilmesi ve her katman için çözüm-zaman adımı tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. Ancak bu noktada özellikle her katmanda ve her çözüm adımında tanımlanması gereken tekrarlı parametrelerin program ara yüzü kullanılarak elle tanımlanması oldukça zordur. Bununla birlikte aynı modelin farklı parametrelerle defalarca çalıştırılması gibi ihtiyaçlar göz önüne alındığında kullanılacak model parametrelerinin her bir analiz için yeniden elle tanımlanması kullanıcıyı çok büyük bir iş yükü ile karşı karşıya bırakmaktadır. Buradan hareketle tez çalışması kapsamında Python dili kullanılarak geliştirilen sonlu elemanlar model kodları, birçok parametrenin tek bir adımda otomatik olarak ABAQUS programına aktarılmasını mümkün hale getirmiştir. Bu sayede model çok kısa süreler içerisinde modifiye edilebilmektedir. Geliştirilen model bu yönüyle parametrik çalışmaların kolayca gerçekleştirilebilmesine de olanak sağlamaktadır.

Ti-6Al-4V alaşımının tel ark eklemeli imalat sürecine yönelik geliştirilen benzetim modellerinde kullanılacak geometri ve malzeme bilgileri, çözüm ağı yapısı, sınır koşulları ve işlem süreleri gibi parametreler oluşturulan Python komutları ile ABAQUS'e tanıtılmıştır. TAEI sırasında malzemelerin ısıtılması için kullanılan hareketli ısı kaynağı ABAQUS'ün DFLUX kullanıcı alt programı kullanılarak hazırlanan ısı kaynağı modeli ile tanımlanmıştır. Bununla birlikte işlem süresince meydana gelen mikroyapısal değişimler ABAQUS'ün USDFLD kullanıcı alt programı içerisinde geliştirilen mikroyapısal model ile hesaplanmıştır. Ayrıca içyapıya bağlı sertlik değerleri de yine bu altprogram içerisinde hesaplanmıştır. Öte yandan geliştirilen modelde mikroyapının mekanik özelliklere etkisini dikkate alabilmek amacıyla da ABAQUS'ün UHARD kullanıcı alt programı kullanılmıştır. Bu bağlamda model geliştirme çalışmaları kapsamında öncelikle Şekil 3.4'de verilen başlıklardaki girdileri ABAQUS programına tanıtan Python makroları hazırlanmıştır. Bu sayede analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli parametrik olarak tanımlanarak kolayca düzenlenebilir hale getirilmiştir.

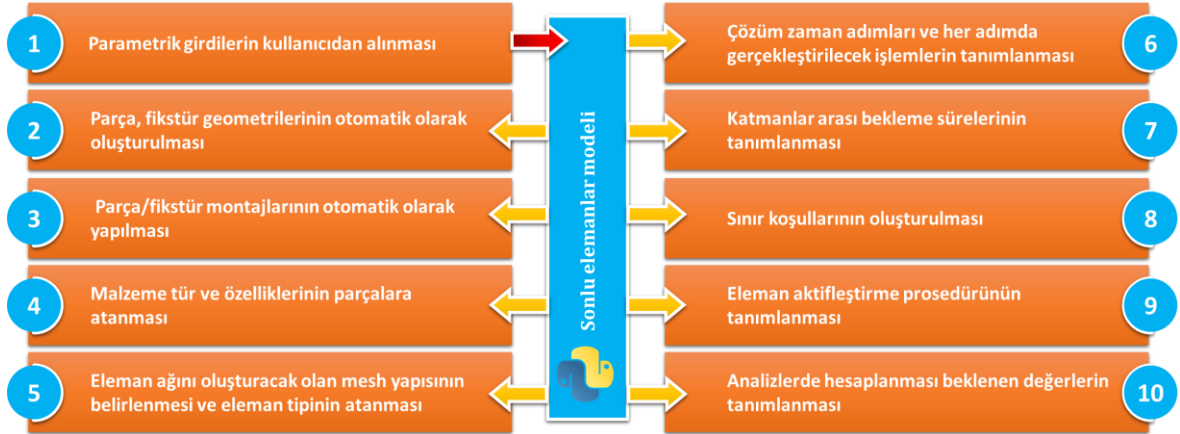


**Şekil 3.4.** Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için tanımlanan girdiler

Şekil 3.4'te başlıklar halinde verilen model parametreleri aşağıdaki bilgileri içermektedir.

- Geometrik boyutlar: Altlık malzeme, biriktirilen malzeme ve fikstürlerin en, boy ve yüksekliği, altlığın fikstürlere uzaklığı, biriktirilen malzemenin altlık üzerinde yerleşimi, katman sayısı bilgilerini içerir.
- Malzeme özellikleri: Malzeme yoğunluğu, elastik ve plastik özellikleri, ısı iletim ve taşınım katsayıları ile termal genişleme katsayılarını içermektedir. Bu katsayılar Fortran altprogramları kullanılarak sıcaklık ve zamana bağlı olarak da tanımlanabilmektedir.
- Çözüm ağı özellikleri: Çözüm ağı (mesh) eleman boyutlarını, mesh boyutlarını ayıran sınırları ve eleman türlerini içermektedir.
- Çözüm adımı tanımları: Çözüm adımları ve bu adımlara ait zaman periyotları, katmanlar arası bekleme adımları ve bu adımlara ait zaman periyotlarını belirlemektedir.
- Etkinleştirilmemiş elemanları kapsayan geometriler: Zamanla probleme dahil olacak olan,  $t=0$  zamanında model içerisinde bulunmayan, altlık üzerine biriktirilerek inşa edilen yapı geometrisi üzerinde bulunan eleman koordinatlarını içermektedir.
- Çözüm adımlarının aktifleştirme prosedürleri: Etkinleştirilmemiş elemanların probleme dahil olma süreçlerini yöneten, zamana ve konuma bağlı aktifleştirme komutlarının oluşturulması için kullanılan tarama deseni ve tarama hızı bilgilerini içermektedir.

Buna göre hazırlanan Python makroları yukarıdaki girdileri kullanarak Şekil 3.5'de verilen işlemleri sırayla gerçekleştirmektedir.

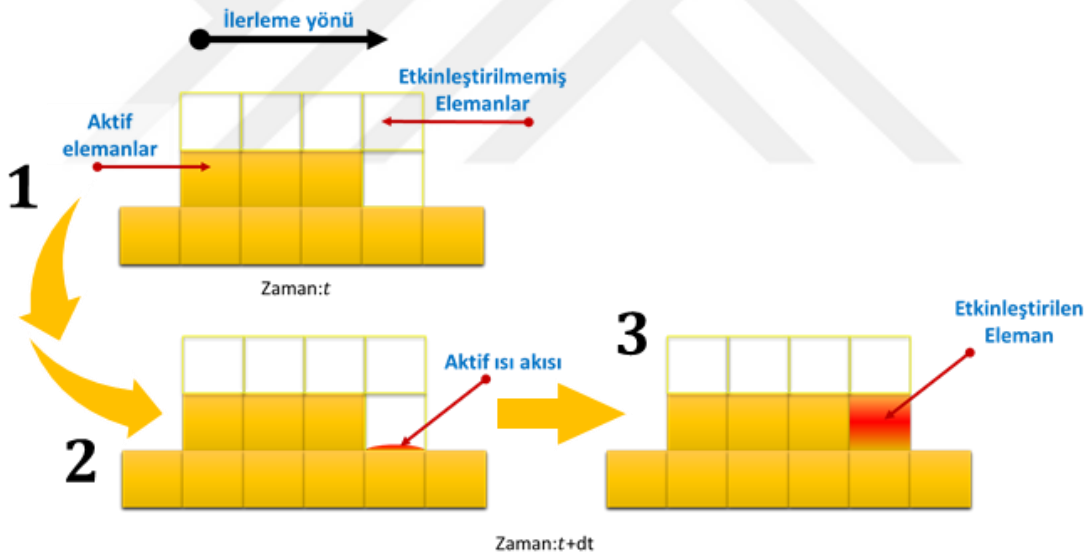


Şekil 3.5 Python makroları ile sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Geliştirilen modelde yukarıda söz edilen tüm işlemler Python makrolarını içeren tek bir program dosyası çağırılarak otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Böylece sonlu elemanlar modelinin oluşturulması sırasında tekrar tekrar gerçekleştirilmesi gereken işlemlerle ilgili kullanıcı yükü ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca bu yöntemle manuel olarak modellenmesi saatler

hatta günler alacak çok yüksek sayıda katmandan oluşan TAEİ ile üretilmiş parçaların sonlu elemanlar modelinin kolayca oluşturulmasına imkan sağlamıştır.

TAEİ sırasında gerçekleştirilen katmanların oluşturulması işlemi eleman aktifleştirme tekniği ile modele tanıtılmıştır. Bu noktada, bu tanımlamalar yapılırken süreç benzetim modellerinde göz önünde bulundurulması gereken en önemli 2 konudan biri eklenen malzeme özelliklerinin doğru zamanda probleme dahil edilmesi, diğeri ise zamana ve sıcaklığa bağlı olarak değişen sınır koşulları ile malzeme özelliklerinin üretim sürecine uygun olarak tanımlanabilmesidir. Bilindiği gibi TAEİ ile üretim sürecinde eklenen her yeni malzeme hem parça geometrisini hem de sınır koşullarını değiştirmektedir. Bu noktada Eİ süreçlerinin benzetiminde malzeme biriktirme işleminin aslına uygun olarak modellenebilmesi için literatürde doğan eleman tekniği (diğer adıyla etkinleştirilmemiş eleman yöntemi) veya ölü doğan (ing born-dead) eleman tekniği gibi farklı metotlar bulunmaktadır (Shen vd., 2022; Ghafoori vd., 2023; Mishra vd., 2023; Sampaio vd., 2023). Bu bağlamda geliştirilen SEY modellerinde literatürde de yaygın olarak kullanılan etkinleştirilmemiş eleman tekniği tercih edilmiştir. Şekil 3.6'da bu metodunun uygulanması ile ilgili süreç şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.6. Etkinleştirilmemiş eleman metodu

Bu yöntemde problemin geometrisine bağlı olarak belirlenen elemanlar analizin başında pasif durumda olup geometrik modelde bulunmazken analiz sürecinin ilerlemesiyle belirli bir kurala göre aktif hale getirilmektedir. Bu kural, zamana ve ısı kaynağının hareket yönüyle ilişkili tarama şekline bağlı olarak belirlenmektedir. Bu sayede farklı yön ve şekillerde, farklı hızlarda malzeme yığıma senaryolarının sonlu elemanlar analizi de mümkün olmaktadır. Etkinleştirilmemiş elemanların aktifleştirilmesi prosedürü ABAQUS programı içerisindeki

“STEP” tanımlama fonksiyonu ve “MODEL CHANGE” komutları ile gerçekleştirilmiştir. STEP tanımlama fonksiyonu ile elemanların kaç adımda hangi işlevi yerine getireceği belirlenmiş, “MODEL CHANGE” komutu ile sırası gelen elemanın aktifleştirilmesi sağlanmıştır. Problemin toplam çözüm adımı sayısı inşa edilen yapının yığılma yönündeki uzunluğu ve ısı kaynağının bu yönde, ark merkezinden ön tarafa doğru etki ettiği bölgenin uzunluğu göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Bu sayede TAEİ süreci ile benzer şekilde, analizin başında hiçbir eleman yokken malzeme eklendikçe zamana bağlı olarak yeni elemanlar geometriye eklenerek çözüme dahil edilmiştir.

Elemanların etkinleştirilmesi prosedürü belirlenirken göz önüne alınması gereken önemli parametrelerden birisi katmanlar arası bekleme süresidir. TAEİ yönteminde katmanların oluşturulurken uygulanan ısı akısı, parçalar üzerinde ısı birikimine neden olur. Bu ısı birikiminin azaltılması için 2 katman arasında üretime başlanılmadan önce belirli bir süre beklenir. Bu süre, ısınma-soğuma periyotları üzerinde etkili olduğundan parçaların üzerinde meydana gelen termal dağılımı da değiştirmektedir (Cambon vd., 2022; Ma vd., 2023). Özellikle titanyum alaşımları gibi iç-yapıdaki faz oranlarının sıcaklıkla ve soğuma hızı ile değiştiği çok fazlı malzemelerde katmanlar arası bekleme süresi malzeme içyapısını doğrudan etkilemektedir. Bu durum göz önüne alınarak, geliştirilen sonlu elemanlar modeline her katmanın üretiminden sonra, süresi problem parametreleri arasında tanımlanan bekleme adımları eklenmiştir. Böylece TAEİ sürecine benzer şekilde, her katmanın sonunda, yeni katmanın üretime geçilmeden malzemeler belirli bir süre soğumaya bırakılmaktadır.

TIG-TAEİ yönteminin benzetiminde çözüm adımlarının belirlenmesi sırasında göz önüne alınacak bir diğer konu soğuma sürecidir. Üretim tamamlanarak ısı kaynağı ortamdaki uzaklaştıktan sonra metal malzemeler oksidasyondan korunmak için belirli bir süre argon ortamında daha sonra açık havada soğumaya bırakılır. Bu durumda argon gazının akışı zorlanmış konveksiyon meydana getirir ve metal malzemeler bu aşamada daha hızlı soğur. Bu nedenle modelde soğuma adımları tanımlanırken bu 2 aşamalı soğuma durumu göz önünde bulundurulmuş ve soğuma adımları kademeli olarak modele dahil edilmiştir.

TMM benzetim süreç modellerinde sıcaklık ve sıcaklık-mikroyapı ilişkili mekanik davranışların eş zamanlı şekilde dikkate alınabilmesi için tamamen bağlaşıklık modelleme yaklaşımı dikkate alınmıştır. Geliştirilen benzetim modellerinde mikroyapısal ve mekanik hesaplamalar gerçekleştirirken malzeme üzerinde meydana gelen sıcaklık verileri kullanılmaktadır. Bu noktada modelin doğru ve tutarlı sonuçlar üretebilmesi büyük oranda sıcaklık değerlerinin doğru hesaplanmasına bağlıdır. Bilindiği gibi termal-mekanik problemlerin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümünü termal problemlere kıyasla oldukça uzun hesaplama süreleri gerektirir. Öte yandan geliştirilen termal ve mikroyapısal modelin kalibrasyonu ve doğrulanabilmesi için başlangıçta yalnızca sıcaklık probleminin çözülmesi ve buradan elde edilen sonuçlarla mikroyapısal model kodlarının çalıştırılması yeterlidir. Bu nedenle TIG-TAEİ süreçlerinin modellenmesinde öncelikle termal-mikroyapısal bir model

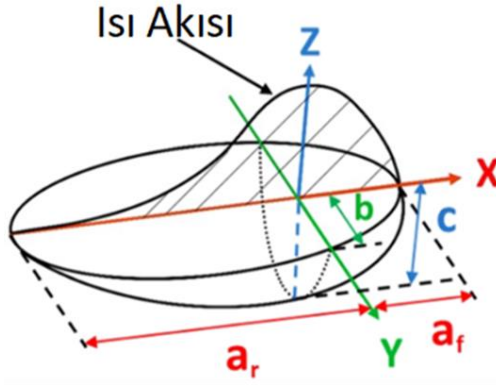
geliştirilmiş burada tutarlı sonuçlar elde edildikten sonra mekanik davranışın incelenmesi amacıyla tamamen bağışık bir termal-mikroyapısal-mekanik geliştirilmiştir. Bu sayede modellerinin kalibrasyonu sürecinde sıcaklık, mikroyapı ve sertlik değerlerinin doğrulanmasında çok daha kısa sürede sonuç veren termal-mikroyapısal model kullanılarak hesaplama zamanından tasarruf edilmiştir. Burada termal-mikroyapısal model sonuçlarının TMM modeller ile de elde edilebildiği ayrıca gösterilmiştir.

Bağışık TMM modellerin çözüm ağıının (mesh) oluşturulmasında sekiz düğüm noktalı, 3 boyutlu, integrasyon sayısı indirgenmiş, bağışık yer değıştirme ve sıcaklık (C3D8RT) eleman tipi kullanılmıştır. Çözüm ağıında indirgenmiş integrasyon metodunun tercih edilmesinden dolayı oluşabilecek “hourglassing etkisinin” önüne geçmek için ABAQUS’ün kullanıcılarına sunduğu “Enhanced” konfigürasyonu aktif hale getirilmiştir. Termal modellerde ise 8 düğümlü doğrusal DCC3D8 ısı transferi elemanları kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar analizinde problemlerin daha düşük eleman boyutları ile daha fazla parçaya bölündüğü çözüm ağıları kullanılarak daha doğru sonuçların elde edilebildiği bilinmektedir. Ancak düşük eleman boyutlarının kullanımı hesaplama sürelerini önemli derecede uzattığından kullanılacak eleman sayısının uygun zaman-çözüm ilişkisi içerisinde optimum düzeyde seçilmesi son derece önemlidir. Bu noktada modelde kullanılacak optimum eleman sayısını belirlemek amacıyla yığılan yapı ve altlık plaka üzerinde kullanılan eleman sayıları değıştirilerek farklı eleman boyutlarında yakınsama testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde sonuçların birbirine yakınsadığı en düşük eleman sayısı kombinasyonu optimum çözüm ağı olarak kabul edilmiştir. (Çözüm ağı yakınsama testleri ile ilgili sonuçlar 4. Bölümde detaylı olarak verilmiştir.)

### **3.2. Isı Kaynağı Modeli**

TAEİ, hareketli bir ısı kaynağının belirli bir rota üzerinde yönlendirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu nedenle TAEİ süreçlerinin modellenmesinde termal alan ile ilgili problemin doğru şekilde çözümü oldukça önemlidir. Bu noktada en önemli konulardan biri ısı kaynağının doğru şekilde modellenmesidir. Eklemeli imalat uygulamalarında genellikle kaynaklı üretim işlemlerinin modellenmesinde kullanılan ısı kaynağı modelleri optimize edilerek kullanılır. TAEİ süreçlerindeki ısı girdisinin modellenmesinde ise çoğunlukla çift elipsoid ısı kaynağı, dikdörtgen ısı kaynağı, Gaussian ısı kaynakları kullanılmaktadır (Heigel vd., 2015; Lindgren vd., 2016; D. Ding vd., 2021; Giarollo vd., 2022, N. Kumar vd., 2022). Bunlardan en yaygın kullanılan geometrik yapısı Şekil 3.7’de verilen Goldak’ın çift elipsoidal ısı kaynağı modelidir.



**Şekil 3.7.** Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı modeli (Xian vd., 2022)

Elektrik ark kaynağında elektrik enerjisi, kaynak elektrotu ile iş parçası arasında oluşan elektrik arki sayesinde ısı enerjisine dönüşür. Büyüklüğü, uygulanan kaynak akımı ve gerilimine bağlı olan bu ısı, Goldak ısı kaynağı modeline göre kaynak arkının geometrisinden dolayı arkın merkezinden öndeki noktalarda dairesele yakın, arkın merkezinden geride kalan noktalarda ise ön bölgeye göre daha uzun ve kuyruklu bir yapıda, merkezi arkın merkezi olan bir elipsoid formunda etkili olur. Bu noktada Şekil 3.7’de verilen geometride  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$ ,  $c$  ölçüleri sırasıyla elipsoidin ön ve arka bölgede yarı uzunlukları, yarı genişliği ve yarı derinliği ile ilgili boylamsal ölçüleri ifade etmektedir (Xian vd., 2022). Bu ölçüler; kaynak dikişinin genişliği  $w_k$  ve yüksekliği  $h_k$  olmak üzere  $a_f = 0,5w_k$ ,  $a_r = 2w_k$ ,  $b = w_k$ ,  $c = h_k$  ifadeleri ile hesaplanabilir (Abusalma vd., 2022).

Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı modeline göre malzemeler üzerine  $x$ ,  $y$  ve  $z$  doğrultularında meydana gelen ısı akısı  $q(x,y,z)$  ark merkezinin ön ve arka bölgelerinde sırası ile 3.1 ve 3.2 eşitlikleri ile hesaplanır.

$$q_f(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q}{\pi^{1/2} a_f bc} e^{-3(x/a_f)^2} e^{-3(y/b)^2} e^{-3(z/c)^2} \quad (3.1)$$

$$q_r(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{\pi^{1/2} a_r bc} e^{-3(x/a_r)^2} e^{-3(y/b)^2} e^{-3(z/c)^2} \quad (3.2)$$

Bu eşitliklerde  $f_f$  ve  $f_r$  değerleri ( $f_f + f_r = 2$  koşulunu sağlamak üzere) elipsoidin ön ve arkasındaki ağırlıklandırma oranını,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  parametreleri  $v$  hızıyla hareket eden ısı üretimi değerinin maksimum değere ulaştığı merkez değerden ölçülen koordinatlarını ifade etmektedir (Xian vd., 2022).

Burada elipsoidin ağırlıklandırma oranları  $f_f$  ve  $f_r$ , elipsoidin ön ve arka bölgedeki yarı genişlikleri  $a_f$ ,  $a_r$  parametreleri kullanılarak 3.3 ve 3.4 eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Mi vd., 2014).

$$f_f = \frac{2}{1 + \frac{a_r}{a_f}} \quad (3.3)$$

$$f_r = \frac{2}{1 + \frac{a_f}{a_r}} \quad (3.4)$$

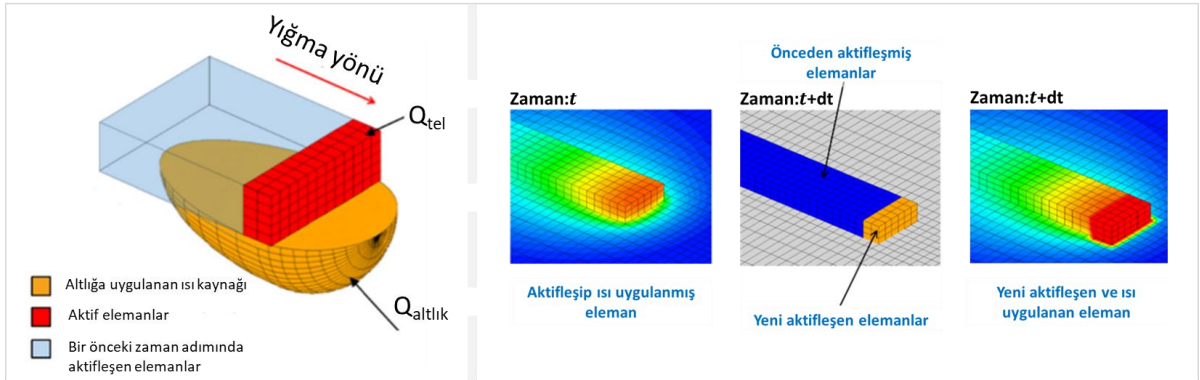
Öte yandan hesaplanan ağırlıklandırma oranları  $f_f$  ve  $f_r$  değerleri ile  $a_f$  ve  $a_r$  parametreleri arasında 3.5 eşitliğinde verilen oran sağlanmalıdır (Mishra vd., 2023).

$$\frac{f_f}{a_f} = \frac{f_r}{a_r} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.1 ve 3.2' de verilen  $Q$  değeri kaynak makinası tarafından sisteme verilen toplam ısı gücü temsil etmektedir. Bu noktada sisteme verilen toplam  $Q$  ısı miktarı 3.6 eşitliği ile hesaplanır. Burada  $\eta$  emilim verimi,  $U$  kaynak makinası tarafından uygulanan gerilim,  $I$  ise akım değeridir.

$$Q = \eta \times U \times I \quad (3.6)$$

Literatürde çift elipsoidal ısı kaynağı kullanılarak eklemeli imalat süreçlerinin benzetimine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak son yıllarda TAEİ süreçlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi üzerine yapılan çalışmalarda ısı kaynağının tanımlanmasına yönelik yeni yaklaşımlar ortaya konulmuş ve güncel çalışmalarda bu yeni yaklaşımın daha tutarlı sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Burada söz edilen yeni ısı kaynağı yaklaşımına göre kaynak bölgesine uygulanan enerjinin yarısı altlık malzeme üzerinde harcanırken uygulanan ısının diğer yarısı kaynak telinin ergitilmesi için kullanılmaktadır (Béraud vd., 2022; Chergui vd., 2021;2022; Ling vd., 2023; Montevecchi vd., 2016, 2017). Temel olarak yine Goldak'ın çift elipsoidal ısı kaynağı modeline dayanan ancak TAEİ sürecine göre adapte edilmiş bu yeni ısı kaynağı modeli Şekil 3.8'de şematik olarak verilmiştir.



**Şekil 3.8.** TAEİ sürecine adapte edilmiş ısı kaynağı modeli (Chergui vd., 2022)

Buna göre geliştirilen termal modelde kaynak makinesi tarafından sisteme verilen toplam ısı güç  $Q$ , ilave dolgu metali olan kaynak telini eritmek için kullanılan güç  $Q_{tel}$ , altlık üzerine etkiyen güç  $Q_{altlık}$  olmak üzere 3.7 ve 3.8 eşitlikleri ile hesaplanır.

$$Q = Q_{tel} + Q_{altlık} \quad (3.7)$$

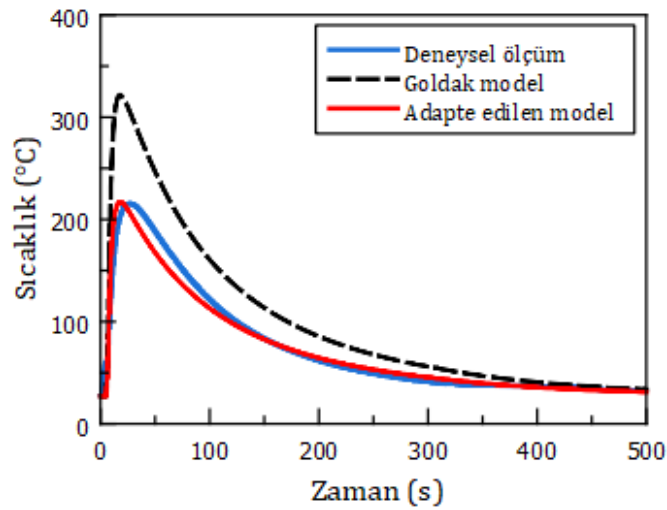
$$Q_{tel} = Q_{altlık} = \frac{Q}{2} \quad (3.8)$$

TAEİ sürecine adapte edilen bu ısı kaynağı modelinde de altlık malzeme üzerine meydana gelen ısı akısı önceki modellerde olduğu gibi 3.1 ve 3.2 eşitliklerinde verilen Goldak'ın çift elipsoidal ısı kaynağı denklemleri ile tanımlanmaktadır. Modelde ısı kaynağının kaynak teli üzerinde harcanan kısmı ise 3.9 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$q_{tel} = \frac{Q_{tel}}{w \cdot dl \cdot tl} \quad (3.9)$$

Burada  $w$  eklenen malzemenin toplam genişliği,  $dl$  uzunluğu ve  $tl$  eklenen malzemenin toplam yüksekliğini ifade etmektedir. Geliştirilen benzetim modellerinde malzeme ekleme işlemi tanımlanan çözüm adımlarına göre gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda 3.9 eşitliğinde bahsedilen malzeme boyutları yalnızca her çözüm adımında yeni aktif hale gelen elemanlar üzerine uygulanacak şekilde tanımlanmıştır. Böylece ilave metal üzerine uygulanan ısı akısı her yeni malzeme eklenen zaman aralığında aktif duruma geçen elemanların birim hacmine uygulanacak şekilde dikkate alınmıştır.

Model geliştirme çalışmaları sırasında bu iki ısı kaynağı modeli arasındaki farkı gözlemlemek amacıyla TAEİ ile üretilmiş tek katlı duvar yapıları için aynı parametrelerle termal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.9'da verilmiştir.



**Şekil 3.9.** Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı ve adapte edilmiş ısı kaynağı modellerinden elde edilen sonuçlarının deneysel ölçümle karşılaştırılması

Buna göre Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı modeli ile gerçekleştirilen analizde elde edilen maksimum sıcaklık değeri numunelerin üretimi sırasında ölçülen sıcaklık değerlerinden çok daha yüksek hesaplanmıştır. Öte yandan önerilen yeni model yaklaşımıyla gerçekleştirilen analizlerde deneysel verilerle oldukça tutarlı sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Buradan hareketle benzetim modellerinin geliştirilmesinde bu yeni ısı kaynağı yaklaşımının kullanılmasına karar verilmiştir.

TAEİ işlemi çoğu durumda atmosfere açık ortamda ve argon gazı ile çevrili bir ark yardımı ile gerçekleştirilir. Bu nedenle meydana gelen hava ve gaz akışı sebebiyle taşınım ile olan ısı transferi de 3.10 eşitliği ile hesaba katılmaktadır.

$$q_{con}(\mathbf{x}, t) = h(T - T_{\infty}) \quad (3.10)$$

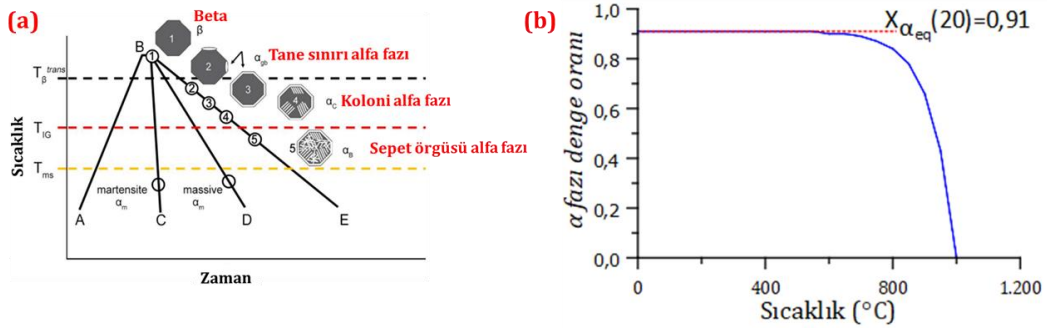
Burada  $h$  ısı taşınım katsayısı,  $T$  parçanın yüzey sıcaklığını ve  $T_{\infty}$  ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir. Ayrıca radyasyon nedeniyle olan ısı kaybı da Stefan-Boltzmann yasasına bağlı olarak 3.11 eşitliği ile göz önünde bulundurulmuştur.

$$q_{rad}(\mathbf{x}, t) = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{\infty}^4) \quad (3.11)$$

Burada  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabitini ve  $\varepsilon$  yüzey emisyonunu temsil etmektedir (Heigel vd., 2015; Q. Yang vd., 2016). Sıcaklığın değişmesiyle malzemelerin film katsayılarının değiştiği bilinmektedir. Bu noktada film katsayılarının sıcaklığa bağlı olarak tanımlanabilmesi için ABAQUS'ün FILM kullanıcı alt programları kullanılmıştır.

### 3.3. Mikroyapısal Model

Ti-6Al-4V kütlece %6 alüminyum ve %4 vanadyum içeren bir  $\alpha + \beta$  (hegzagonal sıkı paket  $\alpha$  faz ve hacim merkezli kübik  $\beta$  faz) titanyum alaşımıdır. Bu alaşım farklı sıcaklık aralıklarında farklı kristal yapılar da bulunur, bir başka deyişle alotropik özellik sergiler. Ti-6Al-4V oda sıcaklığında %90  $\alpha$  ve %10  $\beta$  fazı içerir. Bununla beraber TAEİ sırasında ortaya çıkan termal döngülere bağlı olarak Ti-6Al-4V'nin içyapısında değişimler gerçekleşir (Murgau vd., 2012). Sıcaklığa ve soğuma hızına bağlı olarak ortaya çıkabilecek olası durumlar Şekil 3.10 (a)'da gösterilmiştir. Buna göre Ti-6Al-4V alaşımının ısıtılması sırasında malzemenin sıcaklığı AB yolunu izleyerek 1000°C'nin ( $\beta$ -dönüşüm sıcaklığı  $T_{\beta}^{trans}$  olarak bilinen 1273 K) üzerine çıktığında içyapıdaki  $\alpha$  fazlarının tamamı  $\beta$  fazına dönüşür. Isınma sırasında sıcaklık 1000 °C'ye ulaşana kadar yapı farklı oranlarda da olsa  $\alpha + \beta$  fazlarından oluşmaya devam eder. Şekil 3.10 (b)'de  $\alpha$  faz oranının sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde sıcaklığın artışıyla birlikte yaklaşık 650-670 °C civarında  $\alpha$  faz oranının düşmeye başladığı görülmektedir. Bu sıcaklık  $\alpha$  fazının dönüşüm başlama sıcaklığı olarak kabul edilebilir. Buna göre  $\alpha$  fazının mikroyapıdaki oranı bu sıcaklıktan itibaren azalmakta ve sıcaklık (tüm yapının  $\beta$  fazına dönüştüğü) 1000 °C'ye ulaştığında ise 0 değerini almaktadır.

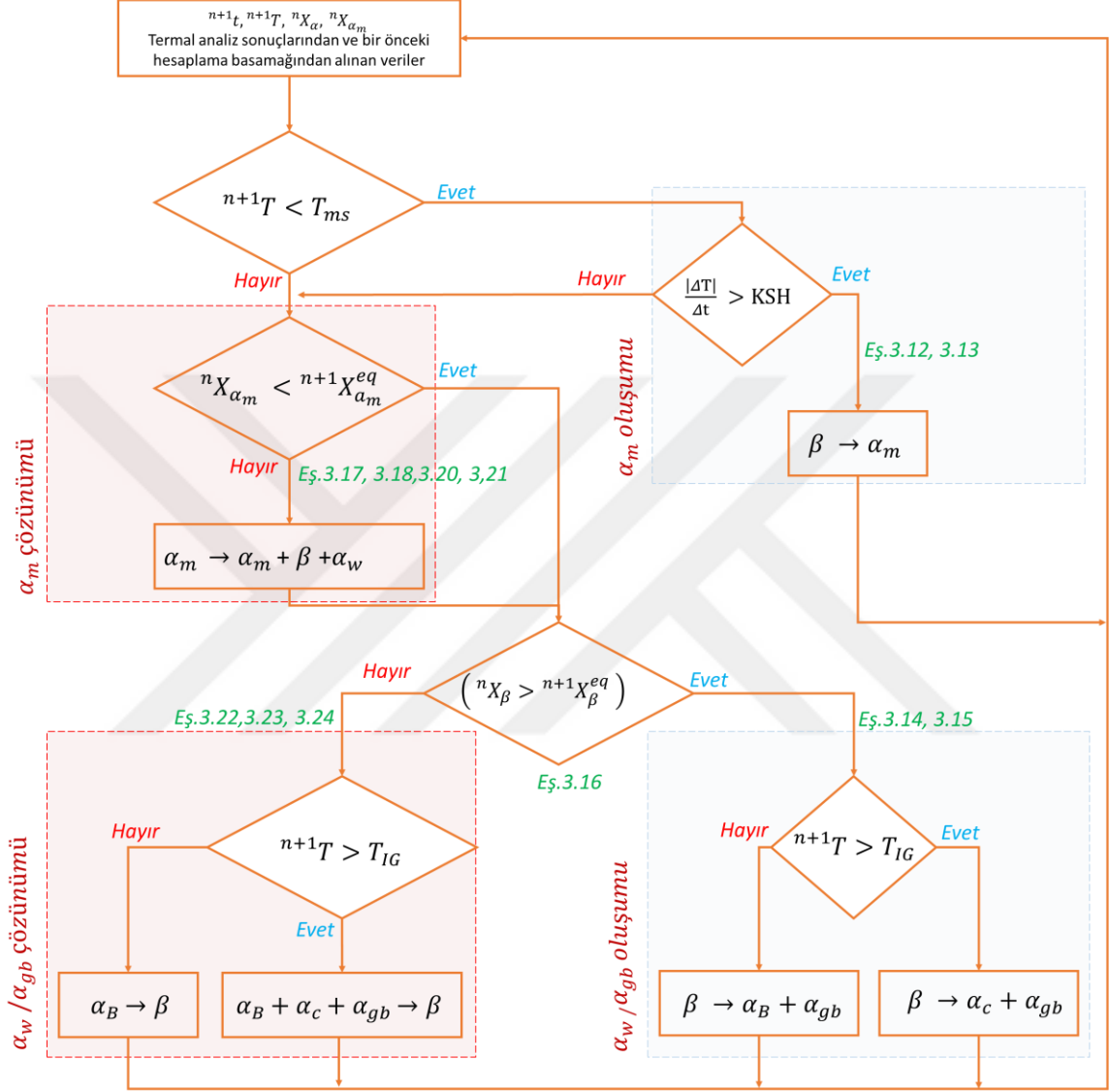


**Şekil 3.10.** Ti–6Al–4V alaşımının içyapısında sıcaklığa bağlı (a) oluşan fazlar (b)  $\alpha$  fazı denge diyagramı (Kelly,2004; Baykasoglu vd., 2018;)

Öte yandan Ti–6Al–4V alaşımının soğuması sırasında da çeşitli faz dönüşümleri gerçekleşir. Bu noktada soğuma hızına bağlı olarak alaşımın 3.10 (a)'da gösterilen BC, BD ya da BE yollarından birisini izleyerek soğuması sırasında  $\beta$ -fazında  $\alpha$  taneleri çekirdeklenir ve büyür. Soğuma durumunda  $\beta$  katı fazı  $\beta$  dönüşüm sıcaklığına kadar kararlıdır. Ancak sıcaklık,  $\beta$  dönüşüm sıcaklığının altına düştüğünde bu yapı  $\alpha$  fazına dönüşmeye başlar. Eğer soğuma hızı yüksek ise (BC veya BD yolları) masif/martensit ( $\alpha_m$ ) fazları oluşabilir. Bu noktada  $\alpha_m$  fazlarının oluşumunda sıcaklığın martensitik dönüşüm sıcaklığının ( $T_{ms}$ ) altında olması, ayrıca soğuma hızının da masif  $\alpha$  ve martensit  $\alpha$  için sırasıyla  $20^\circ\text{C}/\text{s}$  ve  $410^\circ\text{C}/\text{s}$ 'nin üzerinde olması gerekir. Kritik soğuma hızı olarak adlandırılan bu değerlerin altındaki yavaş soğuma hızlarında ise (BE yolu)  $\beta$  fazı tane sınırı ( $\alpha_{gb}$ ) ve/veya Widmanstätten ( $\alpha_w$ ) alfa fazlarına dönüşür. Widmanstätten alfa fazları, taneler arası çekirdeklenme sıcaklığına ( $T_{IG}=827^\circ\text{C}$ ) bağlı olarak koloni ( $\alpha_c$ ) ve sepet örgüsü ( $\alpha_b$ ) alfa olarak ikiye ayrılır. Sıcaklığın  $T_{IG}$  değerinin üzerinde olduğu durumda  $\alpha_c$ , altında olduğu durumda  $\alpha_b$  fazı oluşur. Bu tanımlamalar ışığında TAEİ işlemi sırasında mikroyapıda meydana gelen faz dönüşümleri ve bu dönüşümler sonucunda yapıda bulunan fazların oranı sıcaklık değişimlerine bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

Eklemeli imalat sırasında meydana gelen içyapının tahmin edilebilmesi üretilen parçaların özelliklerinin belirlenebilmesi açısından son derece önemlidir. Ancak çalışma kapsamında SEY modellerin geliştirilmesinde kullanılan ABAQUS paket programı malzemelerin mikroyapılarıyla ilgili dahili hesaplama yeteneğine sahip değildir. Öte yandan ABAQUS, kullanıcılara USDFLD adında bir kullanıcı alt programı sunmaktadır. Bu alt program her bir zaman adımında ABAQUS tarafından hesaplanan sıcaklık verilerini bir değişken içerisine atmakta ve bu değişken içerisindeki sıcaklık bilgisinin istenilen hesaplamalarda kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Bu noktada TMM benzetim modellerinin geliştirilmesi sırasında mikroyapısal hesaplamaların yapılabilmesi için ABAQUS'ün bu özelliği kullanılmıştır. Bu sayede TAEİ sırasında meydana gelen sıcaklık değişimlerine bağlı olarak mikroyapıdaki faz oranlarını hesaplayabilen bir model geliştirilmiştir. Mikroyapısal modelleme çalışmalarında Baykasoglu vd., (2018; 2020) tarafından geliştirilen algoritmalarından faydalanılmıştır Bu

bağlamda, geliştirilen benzetim modellerinde kullanılan mikroyapısal modelin algoritmasını özetleyen akış şeması Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Ti-6Al-4V alaşımının katı hal faz dönüşümleri için akış şeması (Baykasoglu vd.,2020)

Buna göre mikroyapısal modelde soğuma sırasında her fazın hacimsel oranlarını hesaplamak için soğuma hızı ile bağlantılı olarak mevcut sıcaklık martensit başlangıç sıcaklığı ile karşılaştırılmıştır. Bu noktada sıcaklığın martensit dönüşüm sıcaklığının altında ve soğuma hızının 410 °C/s'den (veya 20 °C/s'den) yüksek olduğu durumlarda, martensit (veya masif) faz dönüşümleri (difüzyon kontrollü olmayan faz dönüşümleri) dikkate alınarak hacimsel faz

oranlarını hesaplamak için 3.12 ve 3.13 eşitliklerinde verilen Koistinen–Marburger denklemleri kullanılmıştır (Koistinen & Marburger, 1959).

$$X_{\alpha_m}^{n+1} = \left(1 - \exp(-b_{KM}(T_{ms} - T))\right) (X_{\beta}^n + X_{\alpha_m}^n) \quad \frac{|\Delta T|}{\Delta t} > 410^0 \text{ Cs}^{-1} \quad (3.12)$$

$$X_{\alpha_m}^{n+1} = \left(1 - \exp(-b_{KM}(T_{ms} - T))\right) (X_{\beta}^n + X_{\alpha_m}^n - X_{\beta}^{eq}) \quad 410^0 > \frac{|\Delta T|}{\Delta t} > 20^0 \text{ Cs}^{-1} \quad (3.13)$$

Burada  $b_{KM}$  parametresi (0,005) bir malzeme sabitidir,  $X_{\alpha_m}^{n+1}$  dönüşen martensitin oranını,  $X_{\alpha_m}^n$  dönüşümün başlangıcındaki martensit faz oranını,  $X_{\beta}^n$  ise  $\beta$  fazının dönüşümün başlangıcındaki mevcut hacimsel oranını,  $T$  anlık sıcaklığı,  $T_{ms}$  (850 °C) martensitik dönüşümün başladığı sıcaklığı temsil etmektedir (Tozlu, 2022).

Öte yandan, sıcaklığın  $T_{ms}$ 'nin üzerinde veya  $T_{ms}$ 'nin altında ve soğuma hızının 20 °C/s'den düşük olduğu durumlarda,  $\beta$  fazının  $\alpha_{gb}$  veya  $\alpha_w$  fazlarına dönüştüğü difüzyon kontrollü faz dönüşümlerine karşılık gelen hacimsel faz oranlarını hesaplamak için 3.14 ve 3.15 eşitliklerinde verilen Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) denklemleri kullanılmıştır (Kolmogorov, 1937; W. Johnson ve Mehl, 1939; Avrami, 1941).

$${}^{n+1}X_{\alpha_{gb}} = \left(1 - \exp\left(-k_{gb} (t_{c_{gb}} + \Delta t)^{N_{gb}}\right)\right) ({}^nX_{\beta} + {}^nX_{\alpha}) {}^{n+1}X_{\alpha}^{eq} - {}^nX_{\alpha_w} \quad (3.14)$$

$$t_{c_{gb}} = \left(-\ln\left(1 - \frac{{}^nX_{\alpha}}{{}^{n+1}X_{\alpha}^{eq} ({}^nX_{\beta} + {}^nX_{\alpha})}\right)\right) / k_{gb} \quad {}^{1/N_{gb}}$$

$${}^{n+1}X_{\alpha_w} = \left(1 - \exp\left(-k_w (t_{c_w} + \Delta t)^{N_w}\right)\right) ({}^nX_{\beta} + {}^nX_{\alpha}) {}^{n+1}X_{\alpha}^{eq} - {}^nX_{\alpha_{gb}} \quad (3.15)$$

$$t_{c_w} = \left(-\ln\left(1 - \frac{{}^nX_{\alpha}}{{}^{n+1}X_{\alpha}^{eq} ({}^nX_{\beta} + {}^nX_{\alpha})}\right)\right) / k_w \quad {}^{1/N_w}$$

Burada  ${}^{n+1}X_{\alpha_{gb}}$  ve  $X_{\alpha_w}$ , sırasıyla dönüşen tane sınırı ve Widmanstätten alfa hacim oranlarını  $t_{c_{gb}}$  ve  $t_{c_w}$  ise dönüşümün başlangıcından itibaren geçen süreyi temsil etmektedir.  $k_{gb}$ ,  $k_w$ ,  $N_{gb}$  ve  $N_w$  ise zaman-sıcaklık-dönüşüm ( $TTT$ ) diyagramlarından belirlenen malzeme parametreleridir.  $X_{\alpha}^{eq}$  ise belirli bir sıcaklıkta difüzyon kontrollü  $\alpha$  fazlarının denge oranıdır ve 3.16 eşitliği ile hesaplanmıştır (Marion vd., 2014; Irwin vd., 2016).

$$X_{\alpha}^{eq}(T) = 0.91 \left(1 - \exp\left(0.013(T_{\beta}^{trans} - T)\right)\right) \quad (3.16)$$

Isınma sırasında, masif fazın miktarı deneysel gözlemlere dayanarak belirlenmiş beklenen değerinden (Mur ve vd., 1996) yüksekse, masif faz 3.17 eşitliğinde verilen ayrık JMAK formülasyonuna göre, Widmanstätten  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarını oluşturarak denge değerine çözünür (Baykasoğlu vd., 2020).

$${}^{n+1}X_{\alpha_m} = {}^{n+1}X_{\alpha_m}^{eq} + (\exp(-k_m(t_c + \Delta t)^{N_m}))({}^nX_{\alpha_m} + {}^nX_{\beta} - {}^{n+1}X_{\alpha_m}^{eq}) \quad (3.17)$$

$$X_{\alpha_m}^{eq}(T) = 0.5 \left( 1 + \tanh \left( \frac{750 - T}{80} \right) \right)$$

Burada  $k_m$  ve  $N_m$  değerleri sıcaklığa bağlı olarak tanımlanan katsayılardır ve 3.18 de verilen eşitliklere göre belirlenir (Mur ve vd., 1996).

$$k_m(T) = \begin{cases} -4,58 \times 10^{-5}T + 1.04 & T < 500 \text{ }^\circ\text{C} \\ 5,40 \times 10^{-5}T + 0.99 & T > 500 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$N_m(T) = \begin{cases} 4,39 \times 10^{-3}T - 1.09 & T < 500 \text{ }^\circ\text{C} \\ 7,33 \times 10^{-4}T + 0.74 & T > 500 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

Buna göre dönüşen martensit oranı 3.17 ve 3.18 eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta X_{\alpha_m} = {}^nX_{\alpha_m} - {}^{n+1}X_{\alpha_m} \quad (3.19)$$

3.19 eşitliği ile hesaplanan çözünmüş martensit oranı ilgili sıcaklıktaki denge değerleri ile orantılı olarak  $\alpha_w$  ve  $\beta$  fazlarına eklenmiştir.

$${}^{n+1}X_{\alpha_w} = {}^nX_{\alpha_w} + \Delta X_{\alpha_m} (1 - {}^{n+1}X_{\beta}^{eq}) \quad (3.20)$$

$${}^{n+1}X_{\beta} = {}^nX_{\beta} + \Delta X_{\alpha_m} {}^{n+1}X_{\beta}^{eq} \quad (3.21)$$

Eğer mevcut toplam difüzyonel  $\alpha$  faz fraksiyonu,  $X_{\alpha}$  denge değeri olan  $X_{\alpha}^{eq}$  'dan yüksekse,  $\alpha$  fazları  $\beta$  fazına ayrışırlar. Bu durum, ısıtma sırasında gerçekleşir ve Kelly tarafından önerilen ve 3.22 eşitliklerinde verilen parabolik  $\beta$  büyüme hızı fonksiyonu kullanılarak değerlendirilir (Kelly, 2004).

$${}^{n+1}X_{\alpha} = \begin{cases} 1 - {}^{n+1}X_{\beta}^{eq} f_{diss}(T) \sqrt{(t^* + \Delta t)} & 0 < t^* + \Delta t < t_{crit} \\ 1 - {}^{n+1}X_{\beta}^{eq} & t^* + \Delta t > t_{crit} \end{cases}$$

$$t^* = \left( \frac{{}^nX_{\beta}}{{}^{n+1}X_{\beta}^{eq} f_{diss}(T)} \right)^2 \quad (3.22)$$

$$t_{crit} = \left( \frac{1}{f_{diss}(T)} \right)^2$$

$$f_{diss}(T) = 2,2 \times 10^{-31} T^{9,89}$$

Burada,  $t^*$  bir fiktif zaman ve  $t_{crit}$  ise dönüşüm reaksiyonunun 1'e eşit olduğu zamandır.

Buna göre geliştirilen modelde çözünen  $\alpha$ 'nın koloni veya sepet örgüsü morfolojilerinden hangisinden alınacağı  $T_{IG}$  sıcaklığına bağlı olarak belirlenmiştir. Bu noktada eğer mevcut sıcaklık  $T_{IG}$ 'den düşükse, o zaman sadece  $\alpha_B$  fazı çözünür; aksi takdirde ise hem  $\alpha_B$  fazı hem de  $\alpha_C$  fazı aşağıdaki denklemlere göre çözünür. Bu durum göz önüne alınarak çözünen  $\alpha$  fazı oranları 3.23 ve 3.24 eşitlikleri ile hesaplanmıştır.

$${}^{n+1}X_{\alpha_C} = \frac{{}^{TIG}X_{\alpha_C}}{{}^{TIG}X_{\alpha}} {}^{n+1}X_{\alpha} \quad (3.23)$$

$${}^{n+1}X_{\alpha_B} = \frac{{}^{TIG}X_{\alpha_B}}{{}^{TIG}X_{\alpha}} {}^{n+1}X_{\alpha} \quad (3.24)$$

Burada  ${}^{TIG}X_{\alpha_C}$ ,  ${}^{TIG}X_{\alpha_B}$  ve  ${}^{TIG}X_{\alpha}$ ,  $T = T_{IG}$  sıcaklığındaki koloni, sepet örgüsü ve toplam  $\alpha$  oranlarıdır. Tüm Widmanstatten  $\alpha$  fazları tüketildikten sonra  $\alpha_{GB}$  fazı çözünmeye başlar. Faz dönüşümleri sırasında, her zaman adımında  $X_{\alpha_W} = X_{\alpha_B} + X_{\alpha_C}$  eşitliği sağlanmalıdır. Yukarıda anlatılan yöntemlerle, parça içerisinde sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen mikroyapısal dönüşümler sonucunda oluşan hacimsel faz oranı dağılımı elde edilir.

Mikroyapıda meydana gelen değişimlerin malzeme özelliklerini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Sertlik mikroyapıya bağlı olarak değişen bu özelliklerden birisidir. Bu nedenle malzemelerin içyapılarında meydana gelen değişikliklerin takip edilmesinde sertlik değerleri dikkate alınabilir. Bir malzemenin içyapısını oluşturan her bir fazın sertlik değeri ve fazların hacimsel oranları biliniyorsa, malzemenin sertliği karışımlar kuralı ile hesap edilebilir. Buna göre, alaşımın mikrosertlik değeri 3.25 eşitliği ile hesaplanmıştır (Baykasoğlu vd., 2020).

$$H = X_{\alpha_W}H_{\alpha_W} + X_{\alpha_m}H_{\alpha_m} + X_{\beta}H_{\beta} \quad (3.25)$$

Burada,  $H$  malzemenin mikro sertlik değeri,  $H_{\alpha_W}$ ,  $H_{\alpha_m}$  ve  $H_{\beta}$  değerleri  $\alpha_W$  (300 HV),  $\alpha_m$  (427 HV) ve  $\beta$  (140 HV) fazlarının sertlik değerleridir (Crespo, 2011; Hahn vd., 2007; Liu ve Shin, 2019).

### 3.4. Mekanik Model

TAEİ işlemi sırasında meydana gelen toplam birim şekil değişimi 3.26 eşitliği ile ifade edilebilir:

$$\varepsilon_{Toplam} = \varepsilon_e + \varepsilon_T + \varepsilon_p + \varepsilon_{Tr} \quad (3.25)$$

Burada  $\varepsilon_e$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_T$  aynı sırayla elastik, plastik, termal birim şekil değişimlerini,  $\varepsilon_{Tr}$  ise katı hal faz dönüşümlerinin neden olduğu hacimsel şekil değişimini ifade etmektedir. Öte yandan elastik şekil değişimi ile ilgili Cauchy gerilmesi Hooke kanunu kullanılarak 3.27 eşitliği ile tanımlanabilir:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon_e\} \quad (3.26)$$

Burada  $\sigma$ , Cauchy gerilmesi,  $D$  ise sıcaklığa bağlı elastik modülü ve Poisson oranı ile ilgili elastik sabitleri içeren sertlik matrisidir. Öte yandan termal birim şekil değiştirmeler ise 3.28 eşitliğindeki gibi hesaplanabilir:

$$\varepsilon_T = \int_{T_{ref}}^T \alpha_T(T) dT \quad (3.27)$$

Buna göre  $T_{ref}$  referans sıcaklık,  $\alpha_T$  ise sıcaklığa bağlı termal genişleme katsayısıdır. Öte yandan, termal genişleme katsayısı karışımlar kuralına göre aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Babu vd., 2019)

$$\alpha_{\alpha+\beta} = X_\alpha \alpha_\alpha + X_\beta \alpha_\beta \quad (3.29)$$

3.29 eşitliğinde  $X_\alpha$  ve  $X_\beta$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının hacimsel oranları  $\alpha_\alpha$  ve  $\alpha_\beta$  ise fazların termal genişleme katsayılarıdır.

TAEİ işlemi boyunca meydana gelen faz dönüşümlerine bağlı olarak Ti-6Al-4V malzemesinin akma dayanımındaki değişim hesaplanabilmektedir. Malzemelerin plastik davranışının modellenmesinde genellikle deneysel ve fiziksel tabanlı yaklaşımlar dikkate alınmaktadır. Fiziksel temelli malzeme modellerini geliştirmek için deneysel temelli yaklaşımlara göre daha fazla deney ve analize ihtiyaç duyulmaktadır. Deneysel temelli modellemelerde ise işlem sırasında meydana gelen fiziksel süreçler önemsenmeden model parametreleri ve denklemleri deneysel verilerle uydurularak tanımlanır. Ti-6Al-4V alaşımının akma davranışının tanımlanması için kullanılan modeller arasında deneysel temelli bir yaklaşıma sahip olan Johnson-Cook (JC) malzeme modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. JC akma gerilmesi modeli 3.30 eşitliği ile ifade edilir (G. Johnson ve Cook, 1983):

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B\varepsilon_p^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left\{ 1 - \left[ \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right]^m \right\} \quad (3.30)$$

Burada  $T$  malzemenin her adımdaki sıcaklığı,  $T_m$  malzemenin ergime sıcaklığı (1600°C),  $T_0$  ortam sıcaklığı,  $\varepsilon_p$  plastik birim şekil değiştirme,  $\dot{\varepsilon}_p$  plastik birim şekil değiştirme hızı ve  $\dot{\varepsilon}_0$  ise referans birim şekil değiştirme hızıdır.  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$ ,  $m$  katsayıları ise gerilme akışı için malzeme sabitleridir. Bunlardan  $A$  katsayısı  $\alpha$  için 889,65 ve  $\beta$  için 296,55MPa olarak alınabilir.  $B, C, n$  ve  $m$  değerleri ise hesaplamalarda her iki faz için de sırasıyla 683,1MPa, 0,035, 0,47 ve 1 olarak göz önüne alınmıştır (Tunay vd., 2023). JC malzeme modeli büyük birim şekil değişimlerine, yüksek deformasyon hızlarına ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerin akma davranışını modellemek için kullanılabilir. Bu çalışmada da Ti-6Al-4V alaşımının faz dönüşümlerinin akma gerilmesi üzerindeki etkisini dikkate almak için JC malzeme modeli kullanılmıştır. Bunun için her bir fazın bireysel akma gerilmesi ve malzeme yapısındaki oranlarına bağlı olarak karışım kuralı ile malzemenin akma gerilmesi belirlenmiştir. Buna göre

karışımlar kuralı ile malzemenin akma gerilmesi 3.31 eşitliği ile hesaplanmıştır (Fan vd., 2005; Pan vd., 2016).

$$\sigma_{\alpha+\beta} = X_{\alpha}\sigma_{\alpha} + X_{\beta}\sigma_{\beta} \quad (3.28)$$

Burada  $X_{\alpha}$  ve  $X_{\beta}$  yapıdaki  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının oranı  $\sigma_{\alpha}$  ve  $\sigma_{\beta}$  ise fazların akma dayanımlarıdır. Akma dayanımlarının hesaplanmasında ABAQUS programının UHARD kullanıcı alt programından faydalanılmıştır.

Tİ-6Al-4V alaşımının yapısında bulunan  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının kafes yapıları hacimsel olarak birbirine yakın olduğundan hacimsel şekil değişimi küçük mertebelerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle mekanik model geliştirilirken hacimsel şekil değişimleri ihmal edilmiştir (Ahn vd.,2017; Teixeira vd., 2022).

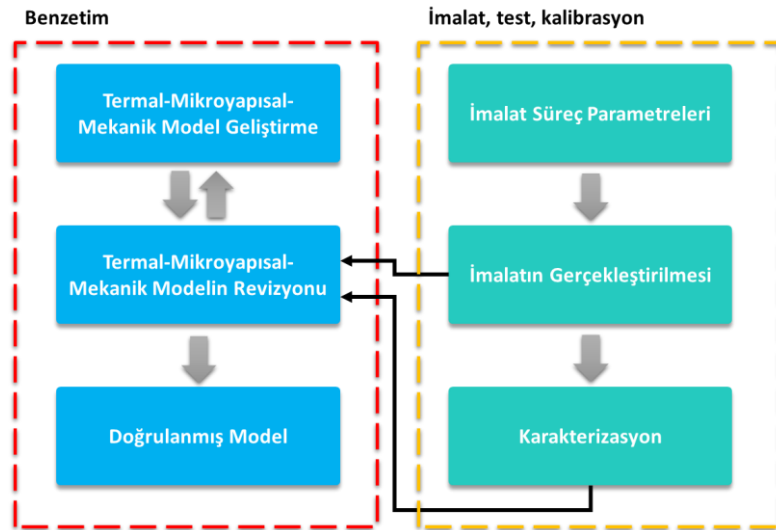


## 4. BÖLÜM

### BENZETİM MODELLERİNİN DENEYSEL DOĞRULAMASI VE BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sonlu elemanlar yöntemi çeşitli süreç problemlerinin küçük parçalara ayrılarak, matematiksel hesaplamalar aracılığıyla çözüldüğü bir benzetim yöntemidir. Bu yöntemde, problemler kullanıcı tarafından tanımlanan parametreler dikkate alınarak analiz edilir ve tüm hesaplamalar bu parametreler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu noktada SEY modellerinden doğru sonuçların elde edilebilmesi problemin ve problem parametrelerinin benzetim modellerine doğru tanımlanabilmesi ile yakından ilişkilidir.

SEY ile mühendislik problemlerinin herhangi bir numuneye ya da deneysel ölçüme gerek duymadan çözümü mümkündür. Ancak fiziksel süreçlerin benzetimi için geliştirilen her yeni modelin deneysel çalışmalarla doğrulanması gerekir. Doğrulama çalışmalarında, modellerden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla örtüşme durumu değerlendirilir ve elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olması durumunda modelin güvenilirliği ortaya konulmuş olur. Bu bağlamda, tez kapsamında geliştirilen Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ süreç benzetim modelleri için gerçekleştirilecek deneysel doğrulama çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Buradan hareketle çalışma kapsamında geliştirilen modeller için Şekil 4.1'de gösterilen akış şemasına göre kalibrasyon ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Model geliştirme ve doğrulama süreci

Geliştirilen sonlu elemanlar modelinin doğrulama çalışmalarında, modelin hesaplama kabiliyetleri göz önünde bulundurularak; sıcaklık geçmişi, mikroyapı, sertlik, ITAB, eriyik havuzu boyutları ve yer değiştirme değerleri ele alınmıştır.

Bilindiği gibi TAEİ' de eriyik havuzu ve ITAB, elektrik arkının altlık ve kaynak torçu arasında gerçekleştiği ilk katmanda belirgin şekilde gözlemlenebilir. Bu noktada, benzetim modelleri ile hesaplanan ITAB ve eriyik havuzu boyutlarının doğrulanmasında tek katlı yapıların kullanımı yaygın olarak başvurulan bir yöntemdir (Brandl vd., 2011b; Gudur vd., 2021). Öte yandan, TAEİ sürecinde, katmanların üretimi esnasında metallere uygulanan ısı, her katmanda farklı sıcaklık gradyanlarının ortaya çıkmasına neden olur. Bununla birlikte yeni katmanların yığılmasıyla meydana gelen termal döngüler önceki katmanları da etkileyebilir. Bu durum her katmanın üretimi sırasında ya da sonrasında parçanın mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin de değişmesine yol açar. Bu nedenle TIG-TAEİ sürecinin bir bütün olarak modellenebilmesi açısından, geliştirilen modelin ilk katmandaki ITAB vb. boyutlarının yanı sıra her katmanda ortaya çıkan termal davranışı ve malzeme özelliklerini de doğru tahmin etmesi beklenmektedir. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, benzetim modellerinin doğrulama çalışmalarında tek katlı ve çok katlı yapıların kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Doğrulama çalışmalarında kullanılmak üzere toplam 4 deney numunesi üretilmiştir. Bu numunelerden 2 tanesi 2 farklı güç yoğunluğunda tek kat duvar yapılı olarak, diğer 2 numune ise farklı tarama desenlerinde aynı üretim parametreleri ile 5 katlı olarak imal edilmiştir. Böylece geliştirilen modellerin farklı üretim koşullarında meydana gelen değişimleri doğru tahmin edebilme durumu araştırılmıştır. Ayrıca farklı üretim parametrelerinin üretim sürecine etkisi de bu sayede değerlendirilmiştir.

Numunelerin üretimi sırasında doğrulama çalışmalarında kullanılmak üzere altlık plakalar üzerinden sıcaklık ve yer değiştirme ölçümleri alınmıştır. Bunun yanında üretilen deney numunelerinden sertlik ve metalografik görüntüleme numuneleri çıkartılarak sertlik değerleri ve mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Bu doğrultuda zamana bağlı olarak ölçülen deneysel sıcaklık değerleri, numunelerin kesitleri üzerinden ölçülen eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutları, yine numunelerin kesitleri üzerinden ölçülen sertlik değerleri ve bir kenarı ankastre olarak mesnetlenmiş altlık plaka üzerinden ölçülen yer değiştirme sonuçları sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılarak modellerin doğrulaması yapılmıştır.

#### **4.1. Deneysel Doğrulama Çalışmalarında Dikkate Alınan Senaryolar ve Doğrulama Numunelerinin Üretimi**

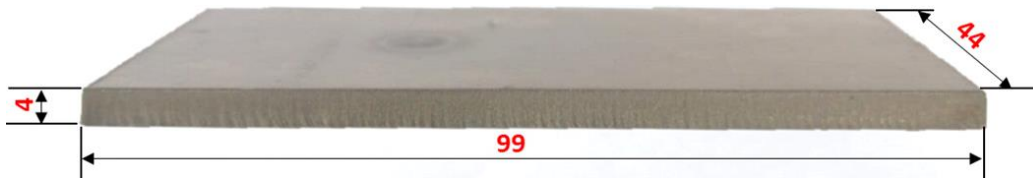
TMM modellerin kalibrasyon ve doğrulamalarında kullanılan deney numuneleri tez çalışması kapsamında tasarlanan laboratuvar ölçekli TIG-TAEİ cihazı kullanılarak üretilmiştir. Bu noktada, ilk aşamada, kullanılacak plaka boyutları, tel çapı ve üretim parametrelerini

belirlemek amacıyla literatürde yapılan çeşitli çalışmalar incelenmiştir. Buna göre Ti-6Al-4V alaşımının eklemeli imalatında farklı kalınlık ve boyutlarda altlık malzeme ve kaynak teli, buna bağlı olarak da farklı üretim parametreleri kullanıldığı görülmüştür. Tablo 4.1’de Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ yöntemi ile üretiminde kullanılan örnek parametreler ve kullanılan malzeme boyutları verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Ti-6Al-4V alaşımın TAEİ ile üretiminde kullanılan örnek imalat parametreleri

Altık Ölçüleri (Ti-6Al-4V)	Tel Çapı (Ti-6Al-4V)	İlerleme Hızı	Tel Besleme Hızı	Kaynak Akımı	İlgili Çalışma
300 x 200 x 7 mm	1,2-2,4 mm	270 mm/dak	5400 - 6000 mm/ dak	200 - 300 A	C. Wang vd., 2021
Belirtilmemiş	1,2 mm	300 mm/dak	2400 mm/ dak	145 A	Ahmad vd., 2022
200 x 50 x 6 mm	1,2 mm	250-350 mm/dak	2000 mm/ dak	120-140 A	J. Wang vd., 2018
Belirtilmemiş	1,0 mm	50 mm/dak	1500 mm/ dak	75 A	Birmingham, 2018

Tablo 4.1’de verilen örnekler incelendiğinde numune üretiminde kullanılan parametrelerin geniş bir aralığa sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılan literatür araştırmasına dayanarak çalışmalarda kullanılan parametre uzayının ve malzeme boyutlarının çok daha geniş bir aralık içerisinde bulunduğunu söylemek mümkündür. Buradan yola çıkılarak -temin edilebilme durumları da göz önünde bulundurulduğunda- deneylerde 4 mm kalınlığında Ti-6Al-4V plakaların ve 1 mm çapında Ti-6Al-4V tellerin kullanılmasına karar verilmiştir. Titanyum alaşımlarının maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle optimum ölçülerde plaka ve tel tüketimine özen gösterilmiştir. Bu amaçla deneysel doğrulama çalışmalarında görüntüsü Resim 4.1’de verilen, 99 x 44 x 4 mm boyutlarında Ti-6Al-4V plakalar kullanılmıştır.

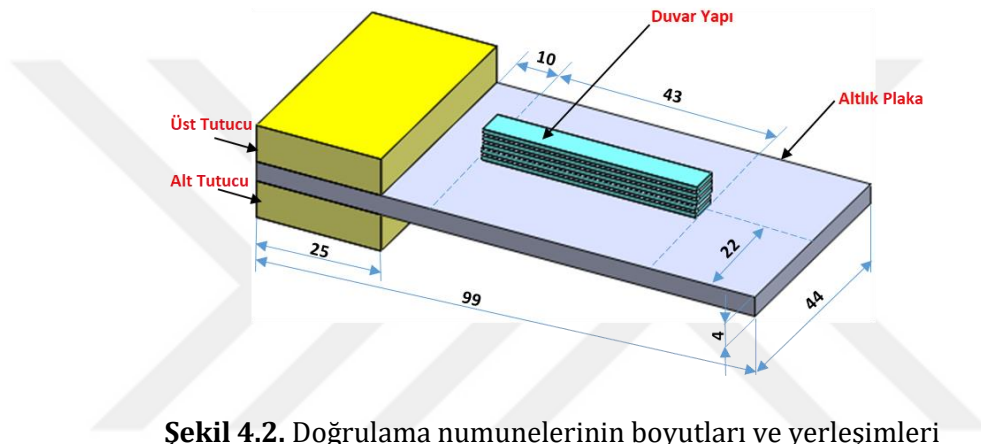


**Resim 4.1.** Deneysel doğrulamalarda kullanılan numuneler için altlık plaka ve ölçüleri

Deneylerde kullanılan altlık malzemeler 1000 x 500 x 4 mm ölçülerinde sertifikalı olarak temin edilen Ti-6Al-4V levhadan su jeti yardımı ile kesilerek 99 x 44 x 4 mm ölçülerinde plakalar haline getirilmiştir. Malzeme biriktirme işleminde kullanılan Ti-6Al-4V kaynak teli ise yine

sertifikalı olarak, bir kasnağa sarılı bobin formunda temin edilmiştir. Bu sayede malzeme yığma işleminin kesintisiz olarak gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Su jeti ile boyutlandırılarak üretime hazır hale getirilen altlık plakaların üzerine 40-43 mm aralığındaki uzunluklarda, tek katlı ve 5 katlı duvar yapıları inşa edilmiştir. Numunelerin üzerine inşa edildiği altlık plakaları, deney sistemine, 25 mm genişliğinde 2 tutucu arasında sıkıştırılarak ve 25 mm uzunluğundaki kısmının tamamı tutucular arasında kalacak şekilde sabitlenmiştir. Duvar yapıları tutuculardan 10 mm uzakta ve plakanın tam orta hattında biriktirilmiştir. Kullanılan altlık plaka ve tutucular ile üretilen duvar yapılarının boyutları ve yerleşimleri genel hatları ile Şekil 4.2’de verilmiştir.

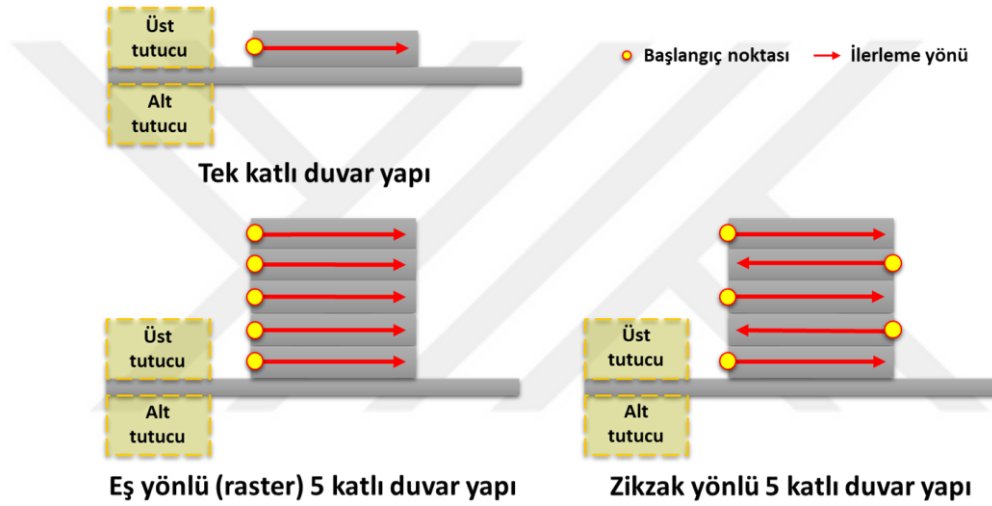


Şekil 4.2. Doğrulama numunelerinin boyutları ve yerleşimleri

Buna göre, sonlu elemanlar modelinin kalibrasyonu ve doğrulamasında kullanılacak tek katlı ve 5 katlı numuneler bu boyutlar göz önünde bulundurularak inşa edilmiştir. Tek katlı numunelerin üretiminde 2 farklı kaynak akımı ve ilerleme hızı kullanılmış böylece 2 farklı güç yoğunluğunda 2 farklı numune üretilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi TAEİ işlemi için literatürde çok geniş bir parametre aralığı bulunmaktadır. Buna göre yapılan ön çalışmalardan elde edilen tecrübe ile altlık malzeme kalınlığı, tel çapı, ilerleme hızı ve oluşan geometri durumu da göz önünde bulundurularak tek katlı birinci numune 120 A kaynak akımı ve 300 mm/dk ilerleme hızı ile, ikinci numune ise 100 A kaynak akımı ve 360 mm/dk ilerleme hızı ile üretilmiştir. Her iki numune için tel besleme hızı 1400 mm/dk olarak belirlenmiştir. Buna göre birinci numunede yaklaşık 187 mm tel kullanılırken ikinci numunede 153 mm tel kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde malzeme yığma işlemi tutucuların bulunduğu taraftan plakanın serbest ucuna doğru gerçekleştirilmiştir.

5 katlı numunelerin üretimi, tek katlı deney numunelerinden elde edilen tecrübeler ve deneysel ölçüm sonuçları göz önünde bulundurularak 100 A kaynak akımı ve 360 mm/dk ilerleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Tel besleme hızı ise tek katlı numunelerle aynı şekilde 1400 mm/dk olarak belirlenmiştir. Buna göre numunelerin üretimi sırasında yaklaşık 765 mm

Ti-6Al-4V tel kullanılmıştır. Çok katlı deney numuneleri, bu üretim parametreleri sabit tutularak eş yönlü (raster) ve zikzak yönlü yığma deseni ile üretilmiştir. Böylece farklı tarama desenlerinde modelin hesaplama kabiliyetleri de test edilmiştir. Buna göre tüm numunelerde malzeme yığma işlemi plakanın tutuculara yakın olan kısmından başlatılmıştır. Bununla beraber eş yönlü tarama ile üretilen numunede yığma işlemi her katmanda başlangıç noktasına dönülerek, tutuculara yakın taraftan serbest tarafa doğru gerçekleştirilmiştir. Zikzak deseninde ise yine tutucuya yakın taraftan yığmaya başlanılmış, ancak ilk katmandan sonraki her katmanın başlangıç noktası bir önceki katmanın bitiş noktası olacak şekilde devam ettirilmiştir. Buna göre numunelerin üretiminde kullanılan tarama desenleri Şekil 4.3'de şematik olarak verilmiştir.



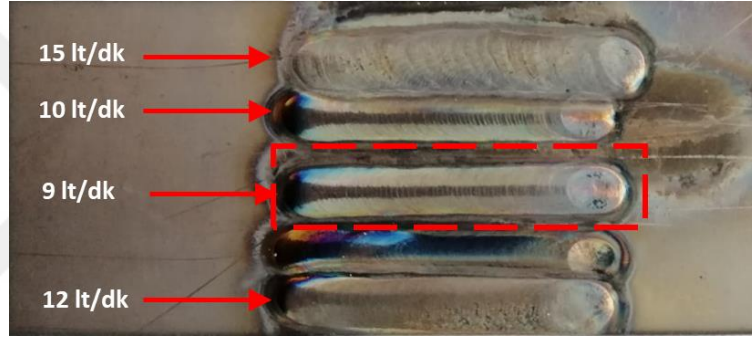
**Şekil 4.3.** Doğrulama numunelerinin üretiminde kullanılan tarama desenleri

Ti-6Al-4V alaşımının TIG kaynağında seryum katkılı tungsten elektrotlar kullanılmaktadır (Cai vd., 2020; Oberloier vd., 2022). Bu doğrultuda, doğrulama çalışmaları kapsamında üretilen numunelerde de kaynak elektrotu olarak 2,4 mm çapında seryum katkılı (gri işaretli) tungsten elektrotlar kullanılmıştır. Numunelerin üretimi sırasında kaynak elektrotu, ark boşluğu oluşturmak amacıyla altlık plakaya 5 mm mesafeye kadar yaklaştırılmıştır. 5 katlı numunelerde bu mesafe eklenen her katmandan sonra 0,75 mm artırılmış, böylece kaynak torçu, üretilen yapı kadar yukarı yükseltilerek ark boşluğu sabit tutulmuştur.

Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ ile üretim sürecinde önemli konulardan biri, alaşımın yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon yatkınlığıdır. Yüksek sıcaklıklarda atmosferde bulunan oksijen TAEİ sırasında Ti-6Al-4V ile reaksiyona girerek alaşımın yapısını, dolayısı ile mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Birmingham vd., 2018). Bu nedenle malzemenin yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerinin bir koruyucu atmosfer yardımı ile oksijen ve diğer elementlerden korunması gerekmektedir. Bu amaçla deney numunelerinin

üretimi sırasında torç gazına ek olarak, kaynak bölgesinden 10 mm yukarıda bulunan bir koruyucu gaz kalkanı ile malzeme yığılan bölgede ilave bir argon gazı atmosferi oluşturulmuştur.

TAEİ'de kullanılan koruyucu gazın akış hızı ile ilgili yapılan literatür araştırmasında, 0,75 lt/dk ile 20 lt/dk arasındaki çok çeşitli değerlerde gaz debilerinin kullanıldığı görülmüştür (Q. Wu vd., 2017a; Mishurova vd., 2020; Ty vd., 2022). Öte yandan bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen numune üretim denemeleri sırasında argon gazı besleme hızının kaynak geometrisini ve yüzey kalitesini önemli ölçüde değiştirdiği tespit edilmiştir. Burada argon akış hızının fazla olduğu durumlarda kaynak bölgesine hızla gelen gaz, sıvı haldeki eriyik metali dağıtarak kontrolsüz bir yapının oluşumuna sebep olmakta ayrıca malzemenin yüzeyinde dalgalanmalar oluşturmaktadır. Bu noktada Resim 4.2'de farklı koruyucu gaz debilerinde yığılan yapıların görüntüleri verilmiştir.



**Resim 4.2** Farklı gaz akış hızlarında oluşan duvar yapı görüntüleri

Buna göre 9 lt/dk'nın üzerindeki akış hızlarında yayvan, doğrusal olmayan ve yüzeyi gözenekli kaynak dikişleri elde edilirken akış hızı 9 lt/dk seviyesine indirildiğinde daha kararlı ve doğrusal, yüzeyi gözeneksiz duvar yapılarının elde edildiği görülmektedir. Bu bağlamda üretim çalışmalarında optimum argon gazı debisi 9 lt/dk olarak belirlenmiş ve numunelerin üretiminde bu değer kullanılmıştır. Koruyucu gaz beslemesi kaynak işlemi ile başlatılmış ve üretimin sonunda ilk soğuma periyodu tamamlanana kadar kesilmeden devam ettirilmiştir. Ayrıca 5 katlı numunelerin üretiminde katmanlar arası bekleme periyotlarında da gaz akışı ara verilmeden devam ettirilmiştir. Böylece işlem sonunda halen sıcak olan kaynak bölgesi atmosferin olumsuz etkilerinden korunmuştur. Kaynak bölgesine beslenen gazın akışı sıcak malzeme yüzeyinde konveksiyon ile ısı transferine neden olmakta bu da metallerin daha hızlı soğumasına yol açmaktadır. Buna göre deney numunelerine tüm katmanların tamamlanmasının ardından argon gaz akışı kapatılmadan 300 saniye boyunca hızlı soğutma uygulanmıştır. 300 saniyelik hızlı soğuma periyodunun sonunda ise numuneler, sakin hava ortamında plaka sıcaklığı 40°C'nin altına düşene kadar soğumaya bırakılmıştır. Deney

numunelerinin üretimi, soğutma periyodları dahil, tek katlı numuneler için ortama 450 saniye, 5 katlı numuneler içinse ortalama 1100 saniyede tamamlanmıştır. Numunelerin üretimi için geçen süreler Tablo'4.2 de detaylı olarak verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Tek kat ve 5 kat duvar yapı numunelerin üretim süreleri

	Tek katlı duvar yapı		5 katlı duvar yapı	
	120 A	100A	Eş yönlü	Zikzak
1 katmanın yığılması için geçen süre (sn)	8,7	6,7	6,7	6,7
Bekleme süresi (sn)	-	-	90 x 4	90 x 4
Hızlı soğuma süresi (sn)	300	300	300	300
Toplam süre (sn)	450	450	1100	1100

Üretim işlemi sonunda üretilen numunelerin boyutları bir kumpas yardımı ile ölçülmüştür. Buna göre tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen doğrulama numunelerinin boyutları Tablo 4.3' de, üretilen numunelerin görüntüleri ise Resim 4.3'te verilmiştir.

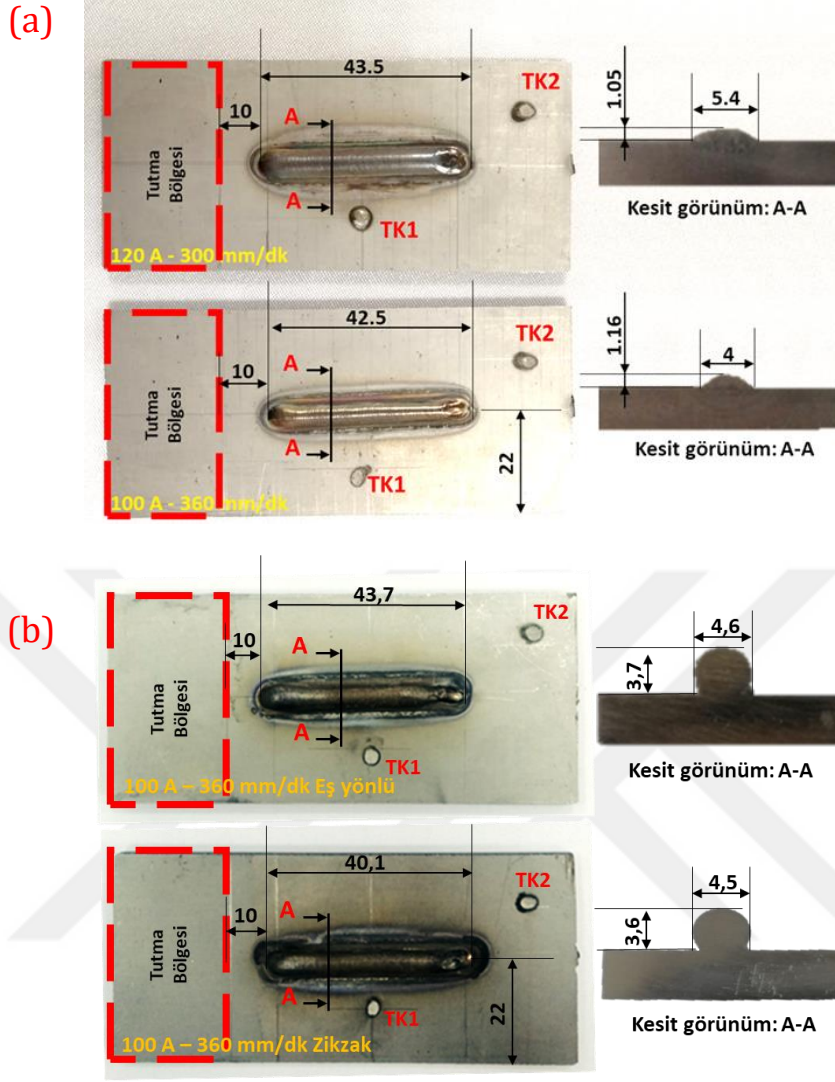
**Tablo 4.3.** Ti-6Al-4V alaşımından TAEI yöntemi ile üretilen numunelerin boyutları

No	Tarama Deseni	Kaynak Akımı (A)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Doğrusal Isı Girdisi (kJ/m)	Tel Besleme Hızı (mm/dk)	Tel Uzunluğu (mm)	Plaka Ölçüleri (mm)	Gaz Kalkanı Debisi (lt/dk)	İnşa Edilen Yapı Ölçüleri (mm)
1	Tek kat	120	300	144	1400	187	44,3 x 99 x 4	9	43,5 x 5,4 x 1,05
2	Tek kat	100	360	100	1400	153	44,3x98,85x4	9	42,5 x 4,0 x 1,16
3	5 Kat Eş yön	100	360	100	1400	765	44,3 x 99 x 4	9	43,7x4,60x 3,75
4	5 Kat Zikzak	100	360	100	1400	765	44,3 x 99 x 4	9	40,1 x 4,5 x 3,6

Tablo 4.3'de verilen ve numuneler üzerine aktarılan ısı enerjisinin bir ölçüsü olan doğrusal ısı girdisi;

$$\frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad (4.1)$$

4.1 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Burada  $\eta$  kaynak verimi,  $V$  kaynak voltajı,  $I$  kaynak akımı,  $v$  ise torç ilerleme hızıdır.



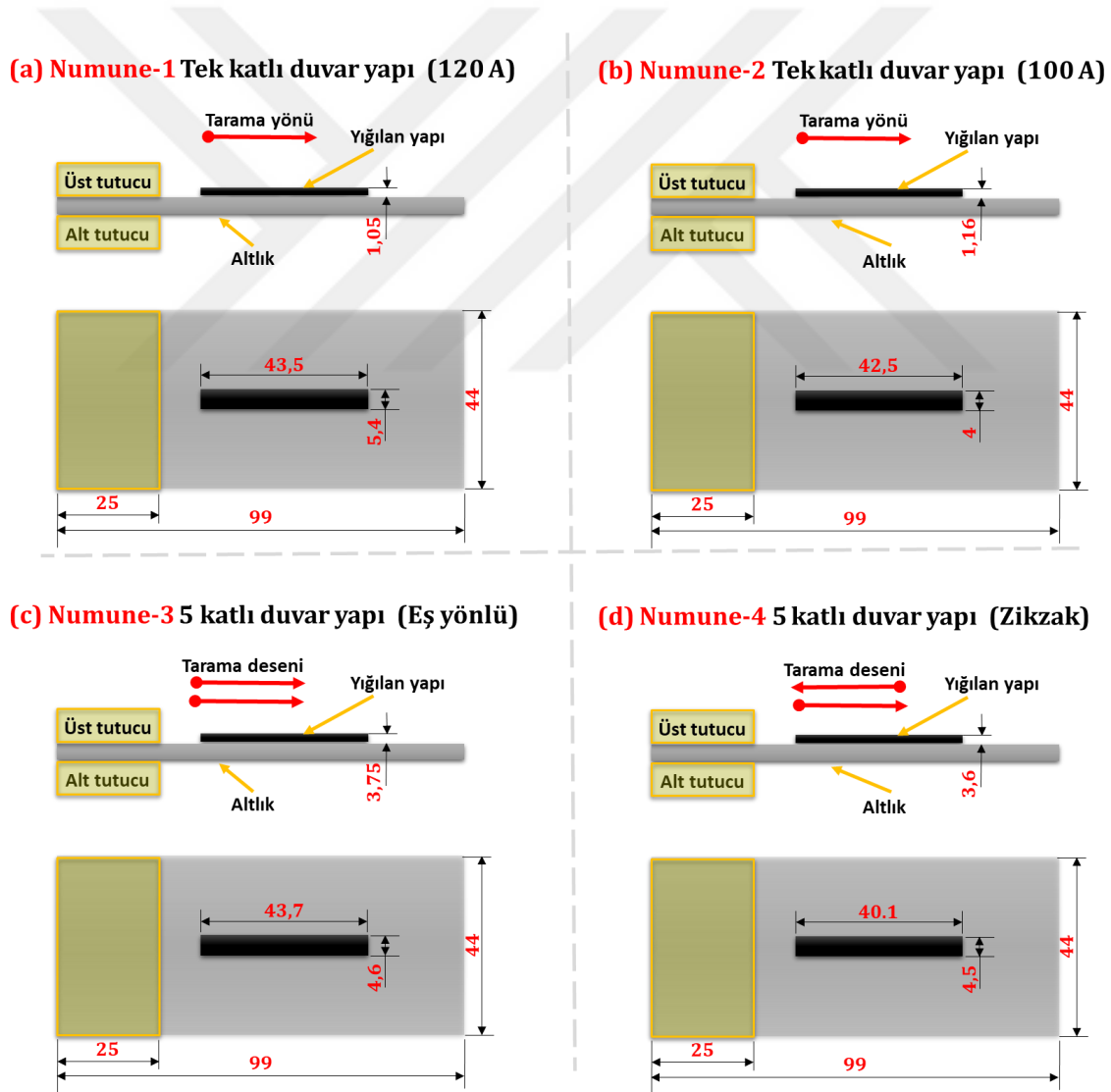
**Resim 4.3.** TIG-TAEİ ile üretilen, (a) tek kat (b) 5 kat duvar yapıları doğrulama numunelerinin görüntüleri

Üretilen numunelerin Resim 4.3'te verilen boyutları genel olarak değerlendirildiğinde düşük ısı girdisi (100A kaynak akımı) ile üretilen numunelerde daha yüksek ve daha dar kaynak dikişi elde edilirken, yüksek ısı girdisi (120A kaynak akımı) ile üretilen numunede daha geniş ancak yüksekliği daha düşük kaynak dikişleri elde edilmiştir. Çünkü yüksek ısı girdisi ile üretilen numunede kaynak akımı yüksek, ilerleme hızı daha düşüktür. Bu nedenle üretim sırasında daha yavaş ilerleyen ısı kaynağı yüksek güç ile birlikte eriyen metalin yan kısımlara doğru daha fazla yayılmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak da sonuçta daha geniş ve daha düşük yükseklikte bir yapı meydana gelmektedir. Literatürde aynı malzeme ve benzer parametrelerle gerçekleştirilmiş çalışmalar bulunmasa da kullanılan ısıl gücün kaynak geometrisi üzerine etkilerini farklı malzeme ve parametrelerle araştıran çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bununla birlikte bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar da kaynak gücü ile dikiş

genişliği arasında doğru, dikiş yüksekliliği arasında ters orantılı bir ilişkinin bulunduğunu göstermektedir (Abe vd., 2020; C. Chen vd., 2019).

#### 4.2. Deneysel Doğrulamada Dikkate Alınan Senaryolar İçin Sonlu Elemanlar Modellerinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında geliştirilen sonlu elemanlar modeli parametrik kod yapısına sahiptir. Bu sayede analiz edilmek istenilen her yeni parçanın sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için geometri ve üretim parametrelerini bilgisayar hafızasında tutan değişkenlerin revize edilmesi yeterlidir. Bu noktada, modeller Şekil 4.4'de verilen ölçülere göre aşağıdaki oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. Sonlu elemanlar modeli için oluşturulan geometriler (a) tek katlı-120 A (b) tek katlı-100 A (c) 5 katlı-eş yönlü (d) 5 katlı-zikzak

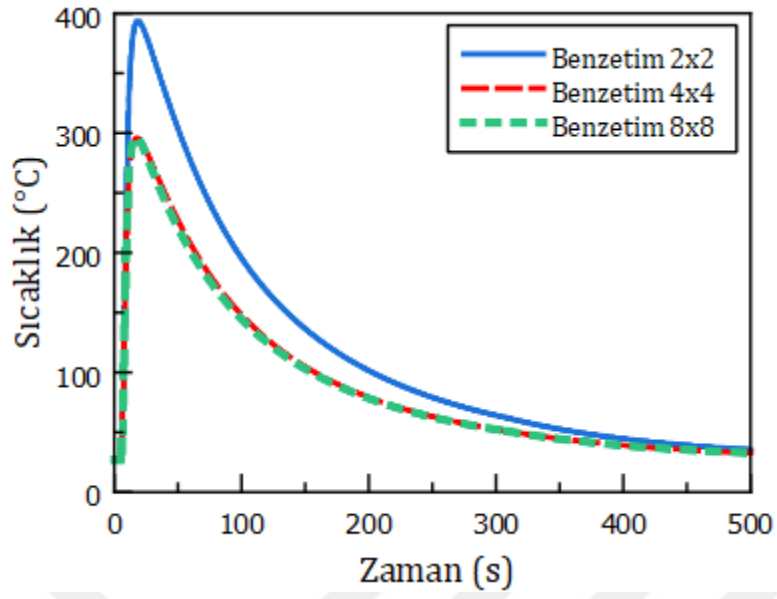
TAEİ ile üretilen metal malzemelerin üretim yönünde kesit görüntüsü alındığında çoğu durumda kubbe biçimli yarı dairesel yapılarla karşılaşılır. Ancak birden fazla katmandan oluşan bir duvar üzerinde her bir katmanda oluşan yapının geometrisini ve ölçülerini belirlemek çoğu zaman zor ve zahmetli bir işlemdir. Bu nedenle kaynak geometrisinin dikdörtgen kesitli olarak modellenmesi yaygın olarak kullanılan ve literatürde kabul gören bir yöntemdir (Montevecchi vd., 2016; Abusalma vd., 2022; Chergui vd., 2022). Buradan yola çıkılarak duvar yapıların modellenmesinde dikdörtgen kesitli geometriler kullanılmıştır. Buna göre deney numunelerinin geometrik modelleri Şekil 4.4’de verilen ölçülere göre ABAQUS’e tanıtılmıştır.

Bilindiği gibi sonlu elemanlar analizleri geometrik model verileri kullanılarak oluşturulan çözüm ağları üzerinden gerçekleştirilir. Bu noktada sonlu elemanlar analizinde düşük eleman boyutları ile daha fazla parçaya bölünmüş çözüm ağları kullanıldığında daha doğru sonuçların elde edilebileceği de bilinmektedir. Ancak çok küçük elemanların kullanılması hesaplama sürelerini ciddi derecede uzatırken çözümde anlamlı bir değişikliğe neden olmayabilir. Bu noktada geliştirilen modelde yığılan yapı ve altlık plaka üzerinde kullanılan eleman sayıları yükseklik boyunca kabadan inceye doğru değiştirilerek farklı eleman boyutlarında elde edilen sonuçlarla ilgili yakınsama testleri gerçekleştirilmiştir. Yakınsama testlerinde önceki bölümlerde TMM modelle birlikte zaman tasarrufu sağlamak amacıyla mekanik etkilerin göz ardı edildiği termal-mikroyapısal model kullanılmıştır. Bu amaçla 120 A kaynak gücü ile üretilen numunenin model parametreleri göz önüne alınarak, farklı mesh yapılarında 8 düğümlü doğrusal DCC3D8 ısı transferi elemanları kullanılarak termal analizler gerçekleştirilmiştir. Buna göre yakınsama testlerinde çözüm ağı oluşturulurken kullanılan eleman sayısı kombinasyonları Tablo 4.4’de verilmiştir.

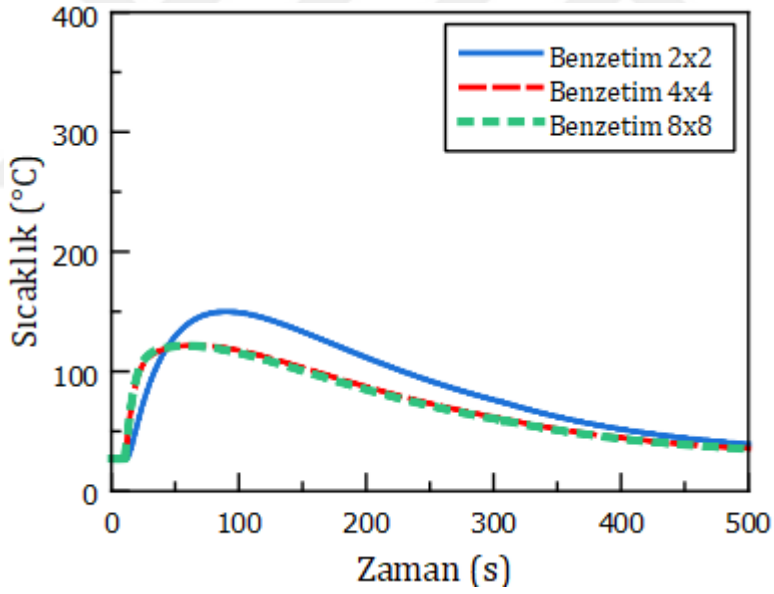
**Tablo 4.4.** Çözüm ağı yakınsama testinde kullanılan eleman sayıları

Analiz kodu	Tek duvar eleman sayısı			Altlık plaka eleman sayısı		
	En	Boy	Yükseklik	En	Boy	Yükseklik
SEA- 2x2	12	87	2	24	48	2
SEA- 4x4	12	87	4	24	48	4
SEA- 8x8	12	87	8	24	48	8

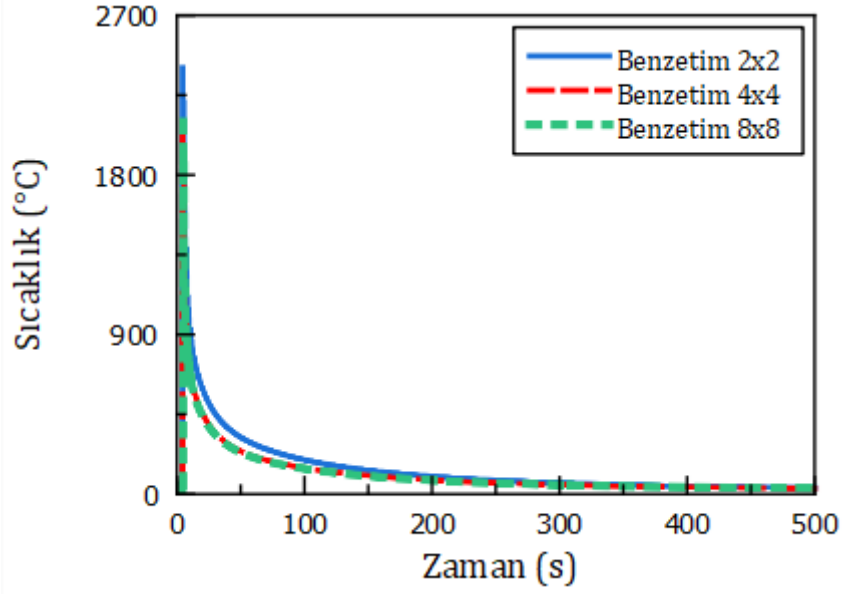
Bu testlerde sonuçların birbirine yakınsadığı en düşük eleman sayısı kombinasyonu optimum çözüm ağı olarak kabul edilmiştir. Buna göre Tablo 4.4’de verilen eleman sayıları ile gerçekleştirilen yakınsama testlerinde numune üzerindeki farklı noktalardan elde edilen sıcaklık sonuçları Şekil 4.5-7’de verilmiştir.



Şekil 4.5. TK1 noktasında çözüm ağı yakınsama testi termal analiz sonuçları



Şekil 4.6. TK2 noktasında çözüm ağı yakınsama testi termal analiz sonuçları

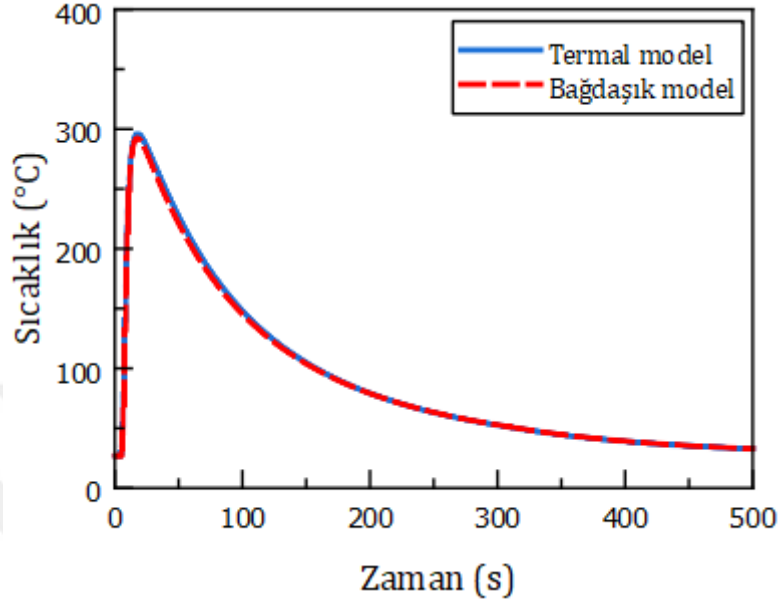


**Şekil 4.7.** DP Noktasında çözüm ağı yakınsama testi termal analiz sonuçları

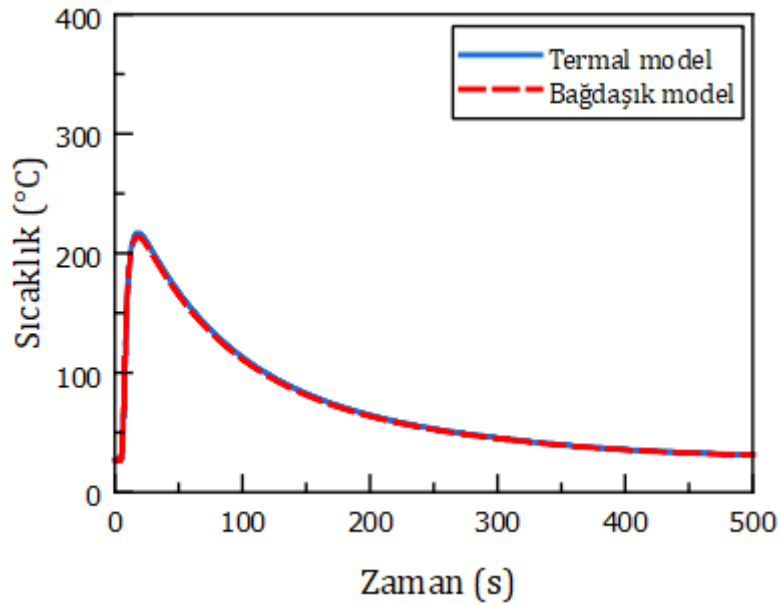
Burada TK1 ve TK2 noktaları, üretim sırasında numune üzerinde kullanılan termokupl ölçüm noktalarıdır. DP ile gösterilen nokta ise üretilen duvar yapının tam orta, en üst yüzeyini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde her üç noktadan alınan sıcaklık değerlerinin 4x4 eleman kombinasyonundan itibaren benzer sonuçlar vermeye başladığı tespit edilmiştir. Buna göre hem duvar yapının hem de altlık plakasının yükseklik boyunca 4 elemana bölünmesiyle oluşturulan çözüm ağı yapısının problemin çözümü için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçtan yola çıkılarak tüm analizlerde tek duvar yapı için yükseklik boyunca minimum 4 eleman kullanılmıştır. Altlık plakada ise daha hassas çözüm istenen durumlarda minimum 8, genel davranışın incelendiği durumlarda ise minimum 4 eleman kullanılarak çözüm ağı yapısı oluşturulmuştur. Bununla birlikte yüksek sıcaklığın etkili olduğu duvar yapıya yakın bölgelerde eleman yapısı daha da küçültülerek bu bölgelerde çözümün hassaslaştırılması sağlanmıştır.

Termal-mikroyapısal (TM) model ile belirlenen optimum çözüm ağı yapısının TMM model için de yakın sonuçlar üretilip üretilmediği kontrol edilmiştir. Bu amaçla, yakınsama testlerinde kullanılan aynı çözüm ağı yapısı kullanılarak, aynı 2 problem hem TM hem de TMM modellerle çözülmüştür. Bağlaşik TMM modellerin çözüm ağının (mesh) oluşturulmasında sekiz düğüm noktalı, 3 boyutlu, integrasyon sayısı indirgenmiş, bağlaşik yer değiştirme ve sıcaklık (C3D8RT) eleman tipi kullanılmıştır. Çözüm ağında indirgenmiş integrasyon metodunun tercih edilmesinden dolayı oluşabilecek "hourglassing" etkisinin önüne geçmek için ABAQUS'ün kullanıcılarına sunduğu "Enhanced" konfigürasyonu ayrıca aktif hale getirilmiştir. Buna göre 4x4'lük ağ yapısı kullanılarak 120 ve 100 A ile tek katlı üretilen numunelerin bağlaşik modeller kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yakınsama durumu açısından

termal modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.8 ve 4.9'da 'de verilmiştir.



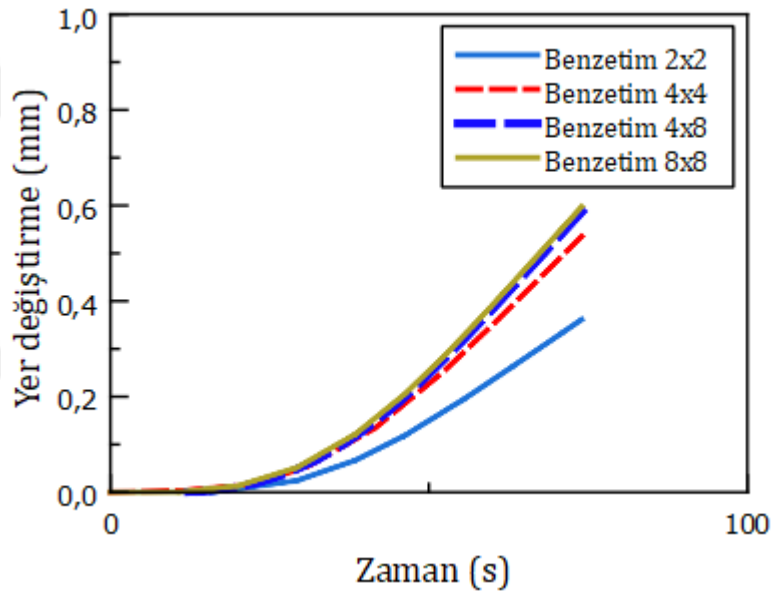
Şekil 4.8. 120 A kaynak akımı ile üretilen numunede termal model ve bağdaşık TMM modelden elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.9. 100 A kaynak akımı ile üretilen numunede termal model ve bağdaşık TMM modelden elde edilen sıcaklık sonuçları

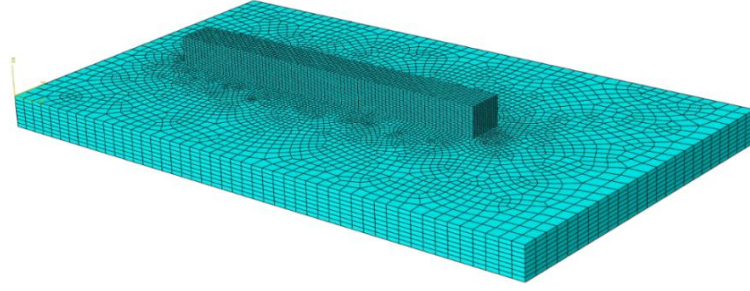
Şekil 4.8 ve 4.9’da verilen eğriler değerlendirildiğinde her iki numune için hem termal hem de bağlaşıklık TMM modellerden elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Buna göre bahsedilen çözüm ağı yapısının TMM model için termal model ile yakın sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Öte yandan geliştirilen TMM modellerin yer değiştirme sonuçları için de yakınsama durumu kontrol edilmiştir. Bu amaçla 100 A kaynak akımı ile üretilen numune dikkate alınarak farklı çözüm ağı yapılarında mekanik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde altlık plakanın uzun ön kenarının, alt noktalarından alınan yer değiştirme sonuçlarına göre modelin yakınsama durumu değerlendirilmiştir. Buna göre farklı çözüm ağı yapılarında elde edilen yer değiştirme sonuçları Şekil 4.10’da verilmiştir.



**Şekil 4.10.** 100 A kaynak akımı ile üretilen numunede çözüm ağı yakınsama testi yer değiştirme sonuçları

Bu noktada, termal analizlerde hassas çözüm istenen durumlar için önerilen, duvar yapının yükseklik boyunca 4’e, altlık plakanın da yükseklik boyunca 8’e bölündüğü çözüm ağı yapısı yer değiştirme sonuçları için de yakın sonuçlar üretmiştir. Sonuç olarak analizlerde kullanılan ve 4x8 yapıda C3D8RT elemanlarla oluşturulan temel çözüm ağı yapısı Şekil 4.11’de verilmiştir.



**Şekil 4.11.** Analizlerde kullanılan 4x8 yapıdaki çözüm ağı yapısı

Geometri ve çözüm ağı yapısı oluşturulan modellerde analizi gerçekleştirilen Ti-6Al-4V alaşımının sıcaklığa bağlı özellikleri (yoğunluk, özgül ısı  $C_p$ , termal iletkenlik katsayısı  $k$  ve elastisite modülü  $E$ ) Tablo 4.5'te verilmiştir. Burada bahsedilen malzeme özellikleri Python makroları yardımı ile ABAQUS programında tanımlanmıştır.

**Tablo 4.5.** Ti-6Al-4V alaşımının sıcaklığa bağlı termal ve mekanik özellikleri (Q. Yang vd., 2016; Baykasoglu vd., 2018; Ganeriwala vd., 2019; Baykasoğlu vd., 2020; Tozlu,2022).

$T (^{\circ}C)$	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$C_p$ ( $J/kg^{\circ}C$ )	$k$ ( $W/m^{\circ}C$ )	$E$ ( $GPa$ )
20	4420	546	7	110
205	4395	584	8.75	100
500	4350	651	12.6	76
995	4282	753	22.7	15
1100	4267	641	19.3	5
1200	4252	660	21	4
1600	4198	732	25.8	1
1650	3886	831	83.5	0.1

\* Ti-6Al-4V alaşımının Poisson oranı  $\nu = 0.34$  sabit olarak alınmıştır.

Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ süreçlerinin analizinde, üretim esnasındaki ısınma ve sonrasındaki soğuma periyodu boyunca meydana gelen ısı taşınımı göz önüne alabilmek için probleme sınır şartları tanımlanmıştır. Bu bağlamda modelin termal kalibrasyonu sırasında literatürde kullanılan çeşitli taşınım katsayıları deneyerek doğru sıcaklık dağılımını veren taşınım katsayı seti tespit edilmiştir. Buna göre üretim periyodunda altlığın alt yüzeyinde  $4,0 W/m^2K$ , üst yüzeyinde  $8,5 W/m^2K$  ve ısıya maruz kalan bölgede  $12,0 W/m^2K$  olarak tanımlanmıştır (Montevecchi vd., 2016). Ayrıca ortam sıcaklığı deneysel çalışmalara paralel şekilde  $27^{\circ}C$  kabul edilmiş ve bu değer başlangıç sıcaklığı olarak modele tanıtılmıştır.

Problemin çözümü, ısı kaynağının geometrisi göz önüne alınarak belirlenen çözüm adımı sayısına göre, tek katlı yapılarda toplam 17, 5 katlı yapılarda toplam 97 çözüm adımından oluşturulmuştur.

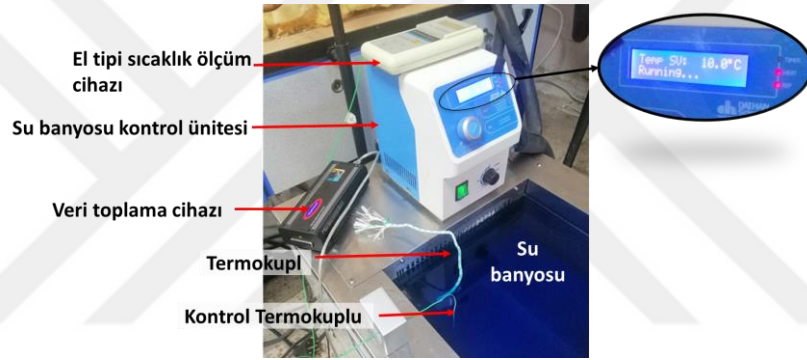
TIG-TAEİ sürecinde malzemelere uygulanan ısı akısı, detayları 3. Bölümde verilen adapte edilmiş Goldak ısı kaynağı modeli ile ABAQUS programına tanıtılmıştır. Bu amaçla hazırlanan DFLUX kullanıcı alt programındaki ısı kaynağı parametreleri üretilen numune boyutlarına göre revize edilmiştir. Buna göre numunelerinin üretiminde kullanılan ısı kaynağının benzetiminde Tablo 4.6'da verilen model parametreleri kullanılmıştır.

**Tablo 4.6.** Termal modelin oluşturulmasında kullanılan parametreler

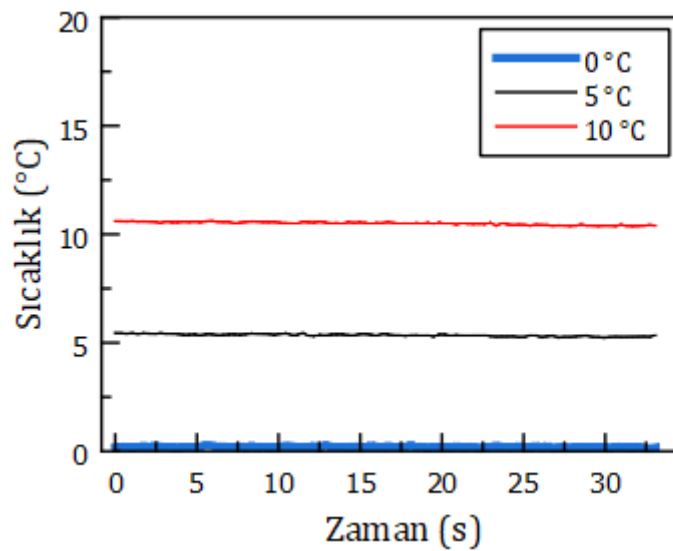
Parametre	Tek Katlı Duvar Yapı		5 Katlı Duvar Yapı	
	Numune-1	Numune-2	Numune-3	Numune-4
<b>Tarama deseni</b>	<b>Tek kat</b>	<b>Tek kat</b>	<b>Eş yönlü</b>	<b>Zikzak</b>
<b>Kaynak verimi (<math>\eta</math>) (%) *<sup>1</sup></b>	60	60	60	60
<b>Kaynak akımı (<math>I</math>) (Amper)</b>	120	100	100	100
<b>Güç (<math>Q</math>) (Watt)</b>	1200	990	990	990
<b>Torç ilerleme hızı (<math>v</math>) (mm/s)</b>	5	6	6	6
<b>Kaynak dikişi genişliği (<math>w</math>) (mm)</b>	5,4	4	4,6	4,5
<b>Kaynak dikişi yüksekliği (<math>h</math>) (mm)</b>	1,05	1,16	3,75	3,6
<b>Isı kaynağı model parametreleri</b>				
<b><math>a_f (w/2)</math> *<sup>2</sup></b>	2,7	2	2,3	2,25
<b><math>a_r (w * 2)</math> *<sup>2</sup></b>	10,8	8	9,2	9
<b><math>b (= w)</math> *<sup>2</sup></b>	5,4	4	4,6	4,5
<b><math>c (= h)</math> *<sup>2</sup></b>	1,05	1,16	0,75	0,72
<b><math>f_f \left( \frac{2}{1 + \frac{a_r}{a_f}} \right)</math> *<sup>2</sup></b>	0,4	0,4	0,4	0,4
<b><math>f_r \left( \frac{2}{1 + \frac{a_f}{a_r}} \right)</math> *<sup>2</sup></b>	1,6	1,6	1,6	1,6
<b>Hızlı soğutma için geçen süre (sn)</b>	300	300	300	300
<b>Toplam işlem süresi (sn)</b>	450	450	1100	1100
* <sup>1</sup> (Karpagaraj vd., 2020), * <sup>2</sup> (Abusalma vd., 2022)				



Sıcaklık ölçümlerinde rulo halinde satın alınan K tipi termokupllar ve IOtech marka bir veri toplama cihazı kullanılmıştır. Bu termokupllar ve termokuplların bağlandığı veri toplama cihazı, deneylere başlanılmadan önce kalibrasyon sertifikası bulunan bir su banyosu ve el tipi sıcaklık ölçüm cihazı kullanılarak doğrulanmıştır. Bu amaçla su banyosunun ısı kontrol ünitesi sırasıyla; 0, 5 ve 10 °C sıcaklıklara ayarlanmış ve ölçümlerde kullanılacak termokupllar su banyosuna daldırılmıştır. Su sıcaklık değerleri hem cihazın kontrol ünitesi üzerinden hem de kalibre edilmiş el tipi ikinci bir sıcaklık ölçüm cihazı üzerinden takip edilmiştir. Buna göre ölçüm sırasında sıvı sıcaklığı 0-0,5°C'lik sapmalarla sabit tutulmuştur. Bu şekilde su banyosundaki sıvı sıcaklığı 0 - 5 ve 10 °C için yaklaşık 30 saniye boyunca ayrı ayrı ölçülerek kayıt edilmiştir. Termokuplların doğrulamasında kullanılan su banyosu ve veri toplama sistemleri Resim 4.5'te termokupllar ile elde edilen ölçüm sonuçları ise Şekil 4.12'de verilmiştir.



**Resim 4.5.** Termokupl doğrulamasında kullanılan su banyosu ve veri toplama sistemi

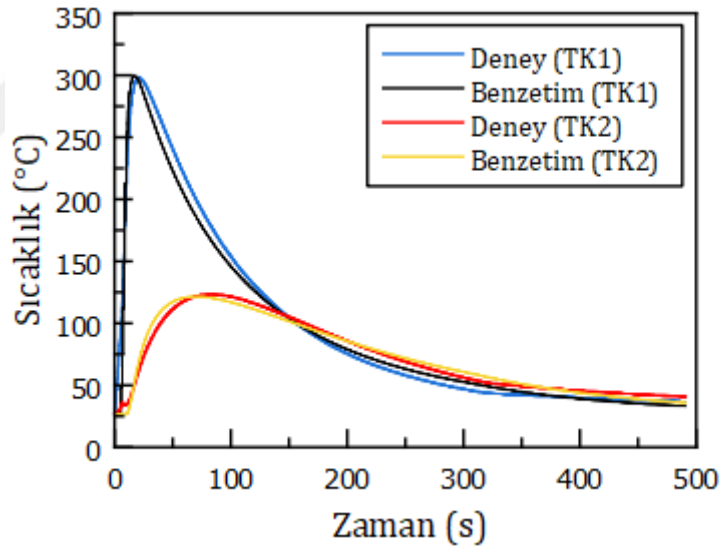


**Şekil 4.12.** Termokupl doğrulama sonuçları

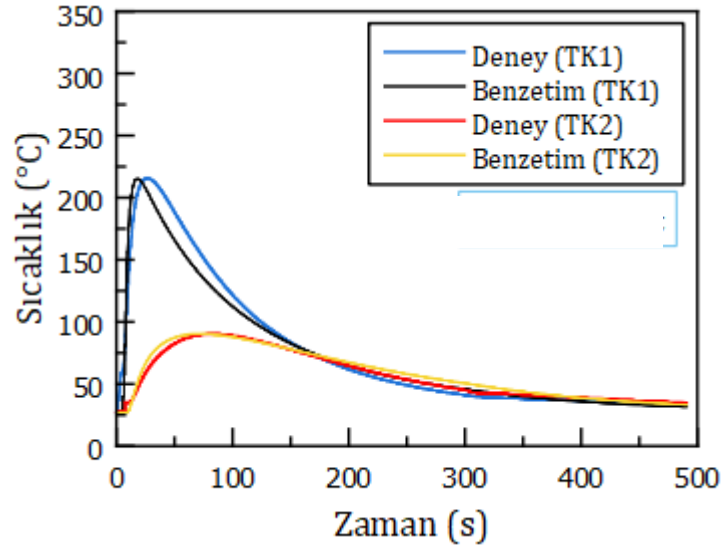
Buna göre, Şekil 4.12’de verilen eğrilerin x-ekseni boyunca 0, 5 ve 10 °C seviyelerinde 0,2°C’lik sapmalarla dalgalandığı görülmüştür. Bununla beraber bu dalgalanmalar su banyosunda ve yine kalibre edilmiş el tipi sıcaklık ölçüm cihazında da aynı oranda gözlemlenmiştir. Bu bağlamda deneylerde kullanılacak veri toplama cihazı ve termokuplların sıcaklığı doğru ölçtüğü tespit edilmiştir.

Numunelerin üretim sürecinde ortam koşullarını takip edebilmek amacıyla veri toplama sistemine ekstra bir termokupl bağlanmış ve herhangi bir cisme temas etmeden serbest olarak ölçüm alması sağlanmıştır. Buna göre numunelerin üretimi sırasında ortam sıcaklığı tüm numuneler için yaklaşık olarak 27°C ölçülmüştür.

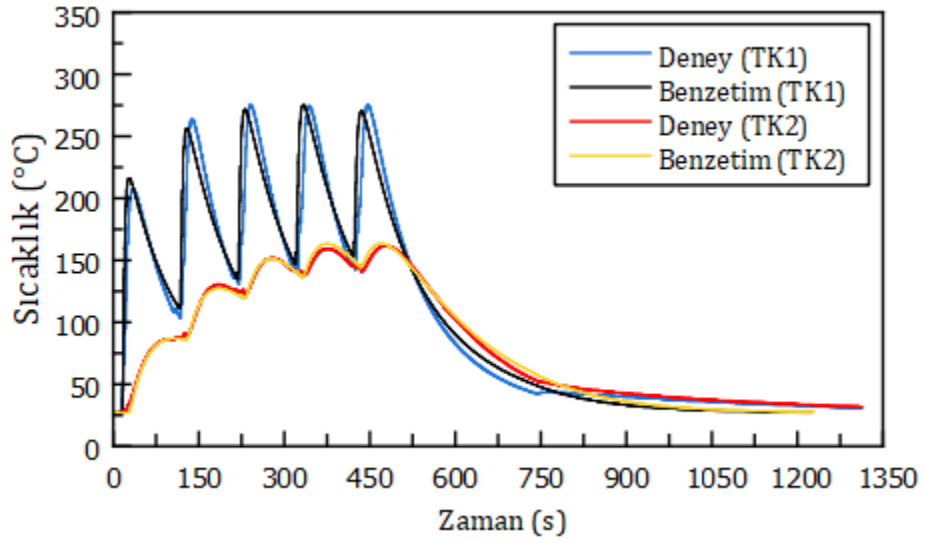
Daha önce de belirtildiği gibi doğrulama numunelerinin üretiminde 4 farklı numuneden toplamda 8 farklı sıcaklık ölçümü alınmıştır. Sıcaklık ölçümünde kullanılan termokuplların plakaların üzerinde TK1 ve TK2 ile işaretlenen konumları Resim 4.4 (b)’de verilmiştir. Bu bağlamda, numunelerin üretimi sırasında TK1 ve TK2 noktalarından ölçülen sıcaklık değerleri ve benzetim modellerinden elde edilen sıcaklık sonuçları Şekil 4.13-16’daki grafiklerde karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



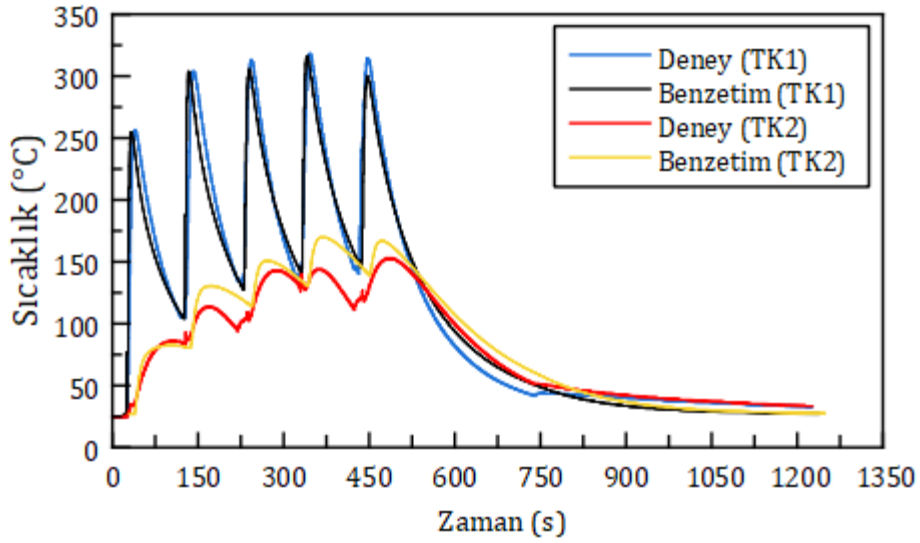
**Şekil 4.13.** 120 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapının üretimi sırasında ölçülen ve SEY analizi ile hesaplanan sıcaklıklar



**Şekil 4.14.** 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapının üretimi sırasında ölçülen ve SEY analizi ile hesaplanan sıcaklıklar



**Şekil 4.15.** Eş yönlü tarama deseninde üretilen 5 katlı duvar yapının üretimi sırasında ölçülen ve SEY analizi ile hesaplanan sıcaklıklar



**Şekil 4.16.** Zikzak tarama deseninde üretilen 5 katlı duvar yapının üretimi sırasında ölçülen ve SEY analizi ile hesaplanan sıcaklıklar

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de tek katlı duvar yapıların üretimi sırasında TK1 ve TK2 noktalarından alınan sıcaklık ölçümleri ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sıcaklık değerleri görülmektedir. Buna göre grafiklerde verilen sıcaklık eğrileri değerlendirildiğinde; her iki numune için de hem TK1 hem de TK2 ölçüm noktalarında, geliştirilen TMM modeline bağlı sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan maksimum sıcaklık değerlerinin deneysel ölçümlerde elde edilen değerlerle son derece tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, her iki numune için de, deneysel olarak elde edilen ısınma profillerinin SEY analizleri ile hesaplanan profillere oldukça benzer trendlerde olduğu görülmüştür. Öte yandan grafiklerin soğuma periyodunu içeren bölümlerinde eğriler arasında bir miktar fark görülse de her iki yöntemde de elde edilen eğriler benzer trendlere sahiptir ve hesaplanan son sıcaklık değerleri birbiri ile örtüşmektedir.

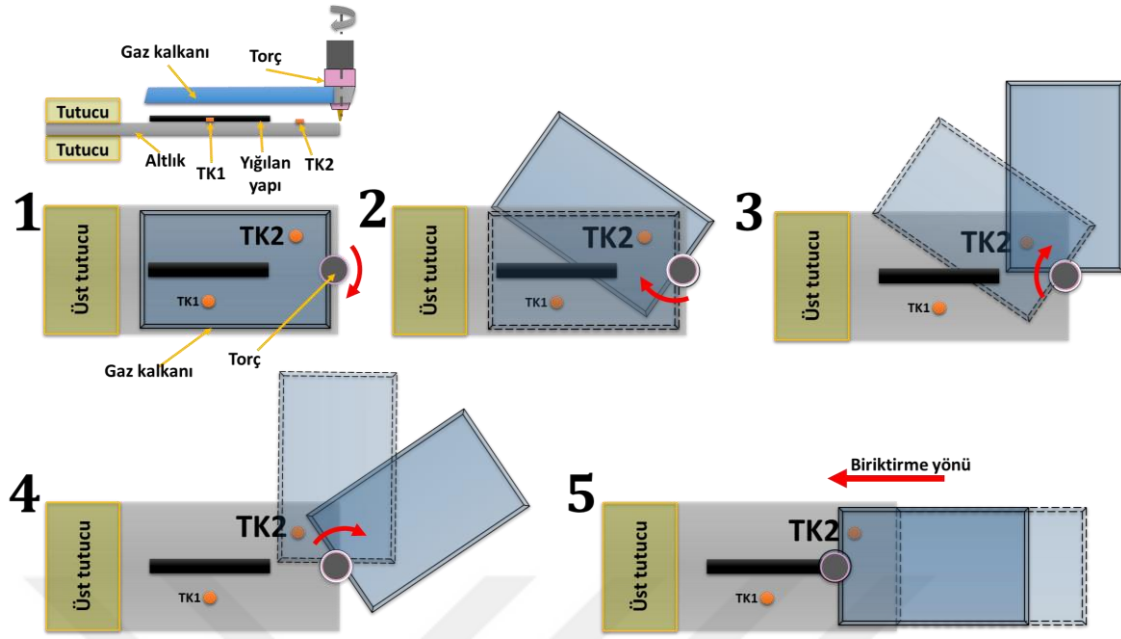
Diğer yandan, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilen grafiklerde 5 katlı duvar yapıların üretimi sırasında TK1 ve TK2 noktalarında deneysel olarak ölçülen ve bu noktalar için SEY analizleri ile hesaplanan sıcaklık değerleri görülmektedir. Buna göre, verilen grafiklerde tek katlı yapılardan farklı olarak 5 farklı ısınma-soğuma eğrisi ve 5 farklı tepe noktası dikkat çekmektedir. Bununla birlikte literatürde benzer çalışmalarda sunulan sıcaklık-zaman profillerinin bu çalışma kapsamında edilen profillerle benzerlik gösterdiği görülmektedir (Abe vd., 2020; Chergui vd., 2021).

Bilindiği gibi, TAEİ sırasında parçalar üzerinde ısı birikimini önlemek amacıyla her bir katman üretildikten sonra yeni bir katman eklenmeden önce belirli bir süre beklenilmektedir. Katmanlar arası bekleme süresi adı verilen bu zaman zarfında ısı kaynağı parçadan uzaklaşmakta, malzemeler soğumaya bırakılmaktadır. Bu nedenle soğumaya başlayan

plakalardan ölçülen sıcaklık değerleri yeni bir katmanın üretimi başlayana kadar geçen zaman içerisinde düşmektedir. Öte yandan bekleme süresi sonunda, yeni katmanın üretimine başlanmasıyla parçalar yeniden ısınmakta böylece sıcaklık yeniden yükselerek yeni bir tepe noktası oluşturmaktadır. Bu olaylar tüm katmanların üretimi tamamlanana kadar zincirleme olarak devam etmekte, bu nedenle işlemin başlangıcından itibaren, katman sayısı kadar ısınma-tepe noktası-soğuma eğrisinden oluşan bir sıcaklık profili meydana gelmektedir. Bu bağlamda, 5 katlı yapılar için grafiklerde verilen hem sayısal analiz hem de deneysel ölçüm sonuçlarının tarif edilen fiziksel olaylarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Doğrulama deneylerinde elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde hem tek katlı hem de 5 katlı duvar yapılarında, TK1 ve TK2 noktalarında deneysel olarak ölçülen ve SEY analizleri ile hesaplanan sıcaklık değerlerinin benzer profillerde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte hesaplanan maksimum sıcaklık değerlerinin hem tek katlı her iki numunede hem de eş yönlü tarama deseni ile üretilen 5 katlı duvar numunede TK1 ve TK2 noktalarında, zikzak tarama deseni ile üretilen numunede ise TK1 noktasında deneysel ölçümlerle son derece tutarlı olduğu görülmektedir. Ancak zikzak tarama deseni ile üretilen numunenin TK2 noktasında, SE analizlerinde hesaplanan maksimum sıcaklık değerleri ile deneysel ölçümlerden elde edilen değerler arasında ortalama 15°C civarında fark bulunduğu görülmektedir. Buna göre geliştirilen TMM benzetim modelleri, zikzak-TK2 noktası dışında Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ ile üretim sürecinde malzemelerin sıcaklık geçmişini oldukça düşük hatalarla tahmin edebilmekte, deneysel verilerle son derece tutarlı sonuçlar üretmektedir. Zikzak-TK2 noktasında ise üretim esnasında kullanılan koruyucu gaz ile ilişkili sınır koşulları çevrimsel süreçte bölgesel olarak bir miktar farklılık göstermekte bu da deneysel ve sayısal sonuçlar arasında fark oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedeni aşağıda tartışılmıştır.

Deney numunelerinin imal edildiği üretim sisteminde kullanılan koruyucu gaz kalkanı her durumda kaynak torçunun arka bölgesinde kalacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede kaynak doğrultusu değişse bile koruyucu gaz akışının her zaman yüksek sıcaklıktaki kaynak bölgesine odaklanması amaçlanmıştır. Bu amacın yerine getirilebilmesi için gaz kalkanı, kısa kenarı üzerinde bulunan bir eksen üzerinde kaynak torçuna sabitlenmiş, kaynak doğrultusu değiştikçe torç ile birlikte doğrusal ve dairesel olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Bahsedilen tasarım Şekil 4.17'nin 1 numaralı adımında şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.17. Zikzak tarama deseni ile üretimde gaz kalkanının değişken konumları

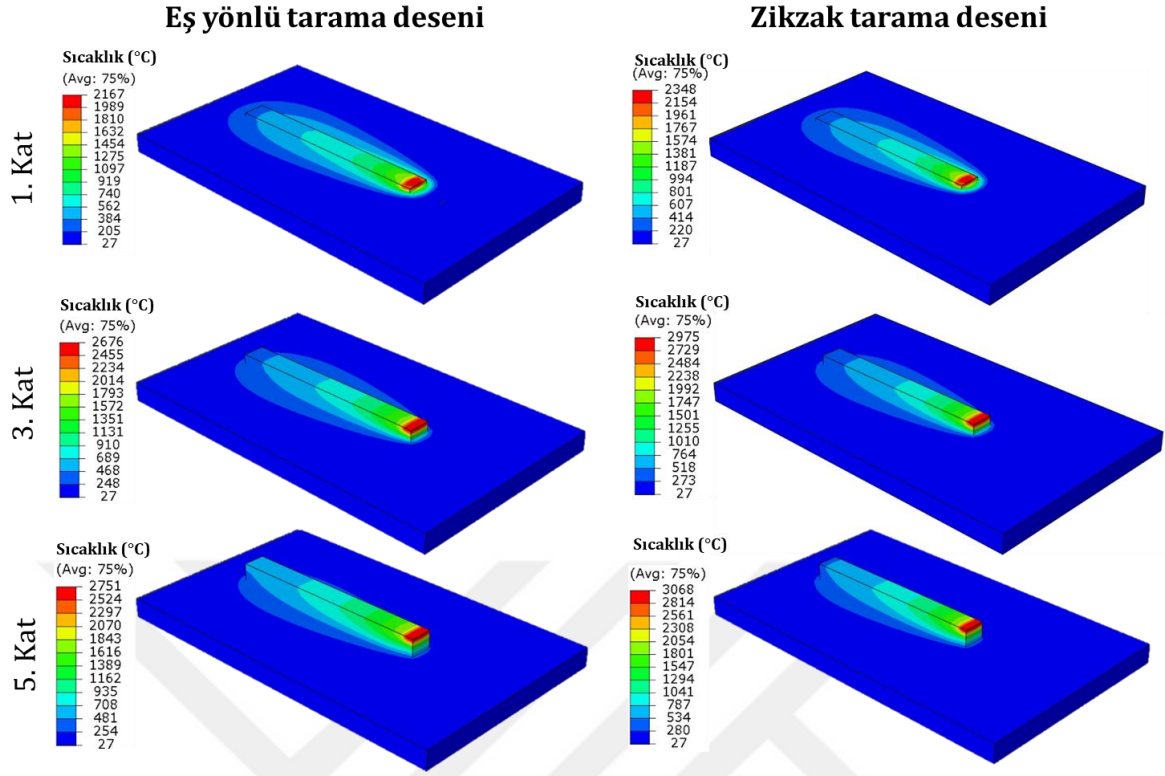
Zikzak tarama deseninde malzeme yığma yönü ve buna bağlı olarak koruyucu gaz kalkanının altlık plaka üzerindeki konumu her katmanda değişmektedir. Şekil 4.17’de ilk katmandan sonra gaz kalkanının altlığa göre konumu adım adım gösterilmiştir. Buna göre soldan sağa doğru malzeme yığılan ilk katmanın sonunda 1 numaralı durumda bulunan koruyucu kalkan, tarama yönünün değişmesi ile sağa doğru dönmekte, bu dönüş sırasında 2,3,4 numaralı rotaları izlemekte ve en sağ konumda durmaktadır. Öte yandan sıcaklık ölçümü alınan bölgelerden TK2 noktası, bu hareket sırasında gaz kalkanının merkezinde, gaz akışının tam altında kalmaktadır. Ayrıca yığma işlemi başladıktan sonra koruyucu gaz akışı bu bölge üzerinden hareket ederek ilerlemekte dolayısı ile koruyucu gaz ile ilişkili sınır koşullarını hem dönerken hem de ilerlerken sürekli değiştirmektedir. Özellikle sıcaklık ölçümünün malzemenin yüzeyinden alınması ve koruyucu gaz akışının bu yüzeyde sürekli değişmesi benzetim modellerinde kullanılacak sınır koşullarını da değiştirmekte ancak bu durum SEY modellerinde dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle zikzak deseni ile üretilen numunede TK2 noktasında hesaplanan değerlerle deneysel ölçüm sonuçları arasında ortalama 15°C’lik fark oluşmaktadır.

Sonuç olarak sıcaklık verileri ile ilgili doğrulama çalışmalarından elde edilen bulgular, geliştirilen modelin Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ ile üretimi sürecinde sıcaklık geçmişinin hesaplanmasında kullanılabileceğini, geliştirilen modele dayalı SEY analizlerinden elde edilen sonuçların deneysel ölçümlerle örtüştüğünü ve modelin süreç boyunca meydana gelen sıcaklık profili ile aynı trendlerde sıcaklık değerleri hesapladığını ortaya koymuştur. Ayrıca doğrulama çalışmalarında benzetim modellerinin farklı doğrusal ısı girdisi, farklı katman yükseklikleri ve farklı tarama desenlerinde üretilen numunelerin farklı noktalarında ölçülen sıcaklık verileriyle

uyumlu sonuçlar üretmesi geliştirilen modelin değişen işlem şartları ve farklı parametrelerle de uygun sonuçlar ürettiğini ve bu sayede modelin sıcaklıkla ilgili genel davranışı yansıttığını göstermiştir.

Tez çalışması kapsamında, doğrulama çalışmaları sırasında deneylerden ve SEY analizlerinden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak kullanılan farklı ısı girdisi, katman yüksekliği ve tarama deseninin malzemelerin sıcaklık dağılımına etkileri de değerlendirilmiştir. Bu noktada deneysel çalışmalarda kullanılan 5 katlı numunelerin üretiminde 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapıyla aynı parametreler kullanılmıştır. Bununla birlikte çok katmanlı numunelerde her katman arasında 90 saniye bekleme süresi uygulanmıştır. Ancak buna rağmen 5 katlı deney numuneleri üzerinde TK1 ve TK2 noktalarında sıcaklık değerleri tek katmanlı yapıya göre daha yüksek ölçülmüştür. 5 katlı numunelerin 1. , 3. ve 5. Katmanların biriktirme işleminin hemen sonunda meydana gelen sıcaklık dağılımları Şekil 4.18'de verilmiştir. Özellikle ilerleyen katmanlarda bu değerlerin daha yüksek değerlerde olduğu, dolayısıyla katman sayısı arttıkça malzeme üzerinde biriken ısı miktarının da giderek arttığı hem deneysel hem de SEY analiz sonuçlarında tespit edilmiştir. Bununla birlikte Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilen grafiklerde 5 katlı numunelerin ilk 3 katmanında altlık üzerinden ölçülen maksimum sıcaklık değerlerinin 4 ve 5. katmanlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Çünkü Ti-6Al-4V'nin TAEİ ile üretimi sırasında katman yüksekliği arttıkça altlık ile ısının uygulandığı nokta arasındaki mesafenin uzaması iletilen ısı miktarını azaltmaktadır. Bu nedenle katman sayısı arttıkça altlık üzerinde aynı noktada ölçülen sıcaklık değerleri azalmaktadır (B. Wu vd., 2017).

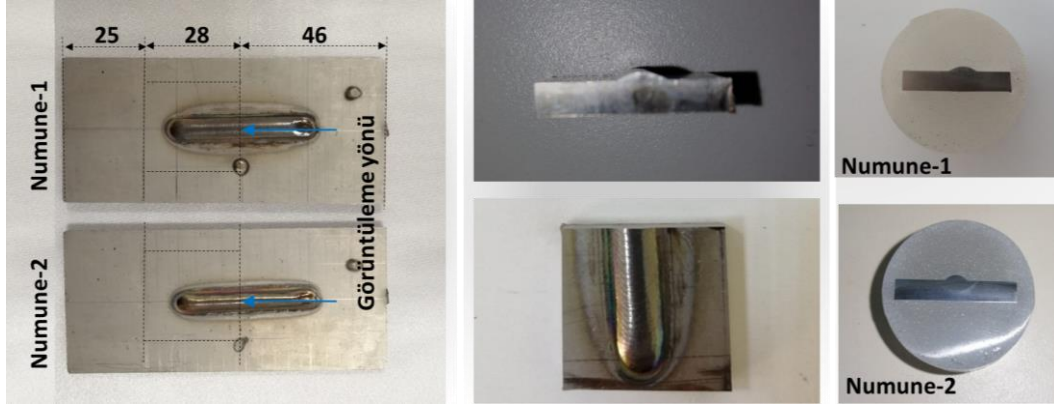
Doğrulama numunelerinin üretiminde kullanılan parametrelerden bir diğeri katmanların oluşturulmasında kullanılan tarama desenidir. Buna göre farklı tarama desenleri ile üretilen 5 katlı numunelerden zikzak deseni ile üretilende maksimum sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun oluşmasında ortaya çıkan yapının geometrik boyutları ve zikzak tarama deseninde yığılma işleminin başlangıç noktasının imalat süreci içerisindeki değişimi etkili olmaktadır.



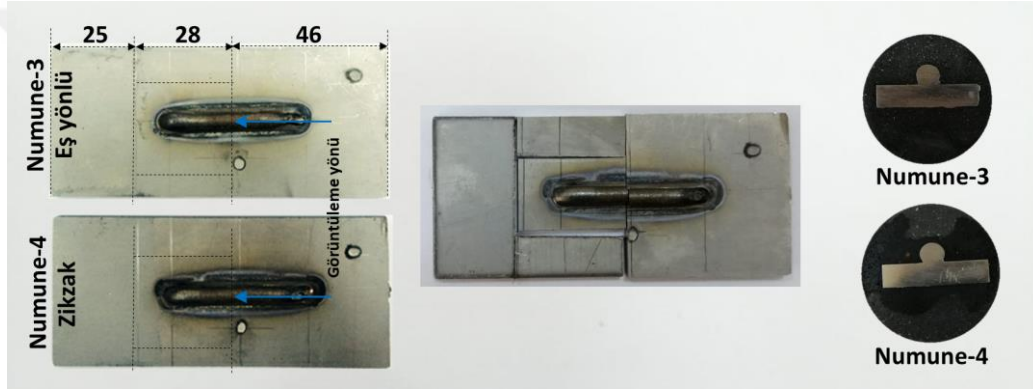
**Şekil 4.18.** 100 A ile üretilen 5 katlı duvar yapılı numunelerde sıcaklık dağılımı

#### 4.3.2. Eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölge boyutlarının karşılaştırılması

Geliştirilen benzetim modelleri, TIG-TAEİ işleminde meydana gelen eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölge (ITAB) boyutlarını tahmin edilebilmektedir. Metal malzemelerin TAEİ ile üretimi sırasında kaynak işlemi uygulanan bölge ile birlikte bu bölgenin çevresi de ısıdan etkilenir ve dolayısıyla bu bölgelerde farklı fazlar oluşur. Buradan hareketle benzetim modelleri ile hesaplanan eriyik havuzu ve ITAB boyutlarının doğrulanmasında kaynak bölgesinde meydana gelen mikroyapının metalografik görüntüleri kullanılmıştır. Buradan yola çıkarak doğrulama çalışmalarında kullanılmak üzere, tek katlı duvar yapılı numunelerden mikroyapı numuneleri hazırlanmıştır. Ayrıca bu işlem sırasında mikroyapısal modelin doğrulanmasında kullanılacak sertlik ölçüm numuneleri de hazırlanmıştır. Bu amaçla, üretilen deney numuneleri soğutmalı abrasif bir kesici yardımı ile kesilerek bakalite alınabilecek ölçülere boyutlandırılmıştır. Uygun ölçülere getirilen parçalar bakalite alınarak sabitlenmiştir. Buna göre hazırlanan tek katlı ve 5 katlı duvar yapılı parçalardan alınan mikroyapı ile sertlik numunelerinin kesim bölgeleri ve bu numunelerin bakalite alınmış görüntüleri Resim 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.



**Resim 4.6.** Tek katlı duvar yapılar üzerinden alınan sertlik ve mikroyapı numuneleri



**Resim 4.7.** 5 katlı duvar yapılar üzerinden alınan sertlik numuneleri

Metal malzemelerin mikroyapılarının optik mikroskop ile görüntülenebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Titanyum alaşımlarının dağlanmasında Kroll çözeltisi kullanılmaktadır. Bu nedenle numuneler saf su, nitrik asit ve hidroflorik asit kullanılarak hazırlanan Kroll çözeltisi ile dağlanmıştır (J. Wang vd., 2018). Hazırlanan çözeltinin bileşen oranları Tablo 4.7’de verilmiştir.

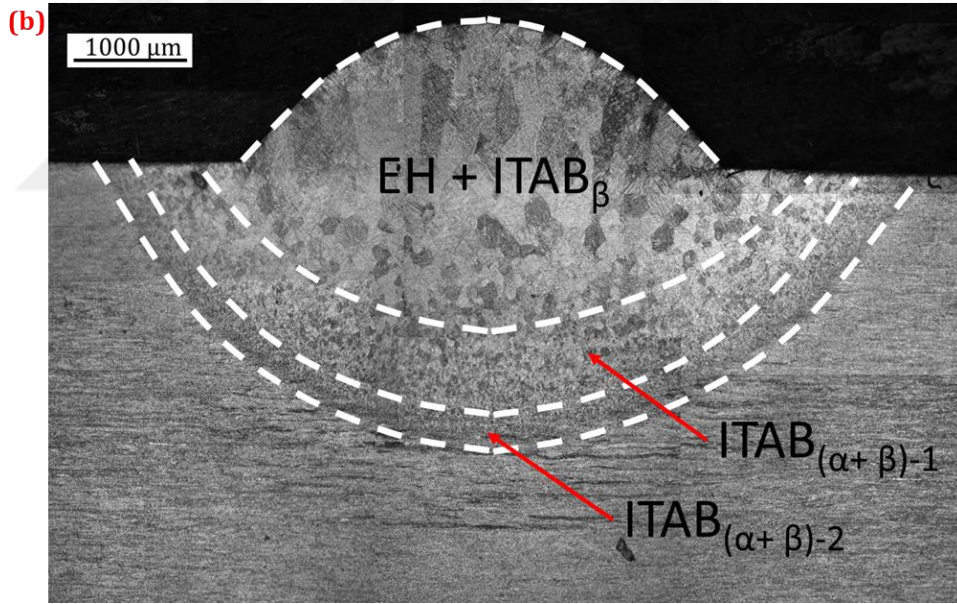
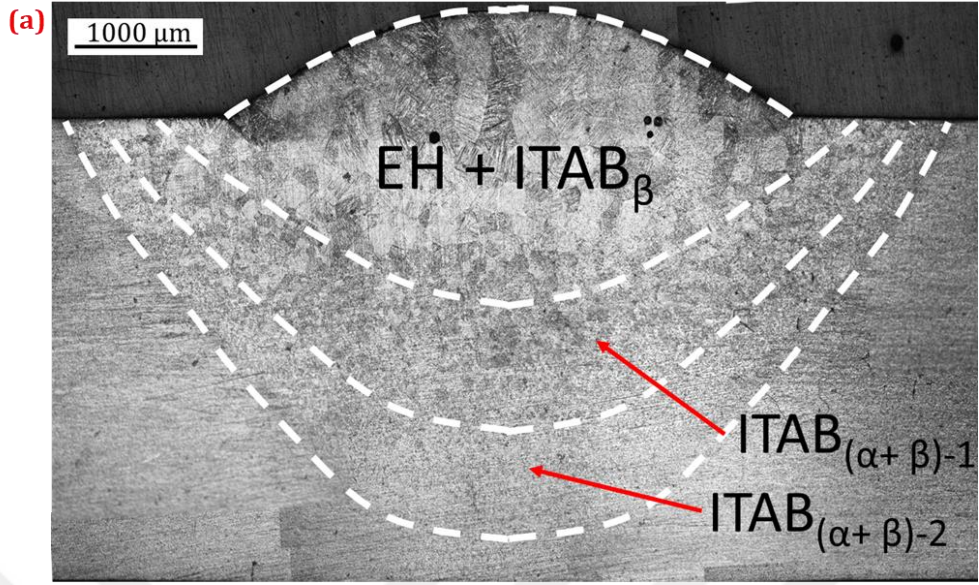
**Tablo 4.7** Kroll çözeltisi bileşenleri ve dağlamada kullanılan bileşen oranları

	% Hacim	Kullanılan miktar (ml)
Saf su	94	10
HF	2	0,21
HNO <sub>3</sub>	4	0,44

Metal malzemelere dağlama işlemi uygulanmadan önce görüntü alınacak yüzeylerin parlatılması gerekmektedir. Bu amaçla bakalite alınmiş her iki numuneye de sırasıyla 180-360-600-800-1000 ve 1200 grid numaralı zımparalarla ve ardından 6 mikron parçacıklı elmas pasta ile parlatma işlemi uygulanmıştır. Ardından numuneler 4 dakika boyunca Kroll zeltisine daldırılarak dağlama işlemi tamamlanmıştır. Yukarıdaki bölümlerde de belirttiği gibi, ITAB ve eriyik havuzu boyutlarının doğrulanmasında tek katlı duvar yapılı numunelerin kullanılması planlanmıştır. Bu nedenle, yalnızca tek katlı numuneler Nikon Eclipse lv150N optik mikroskobu kullanılarak metalografik olarak incelenmiştir.

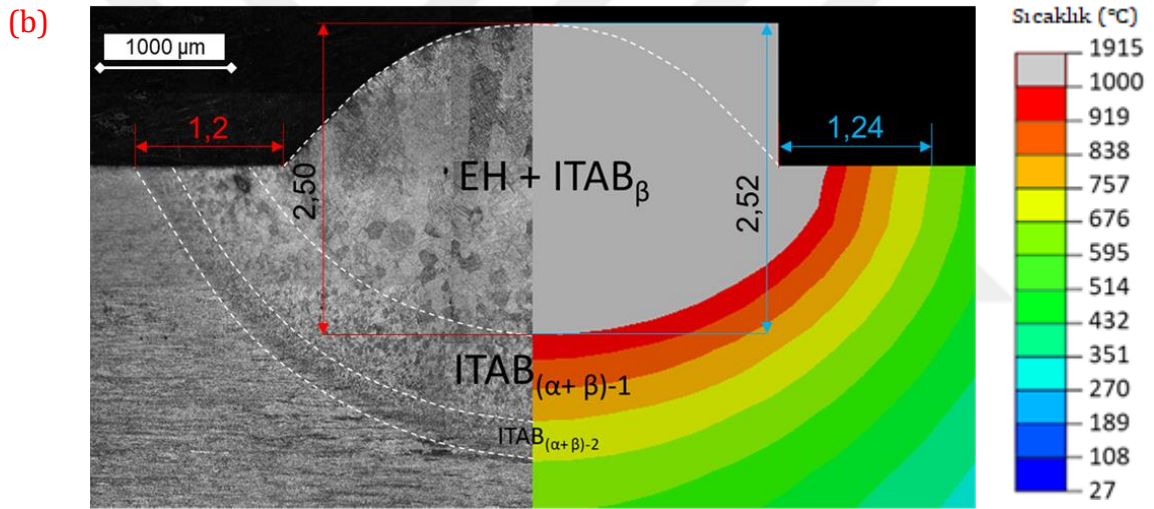
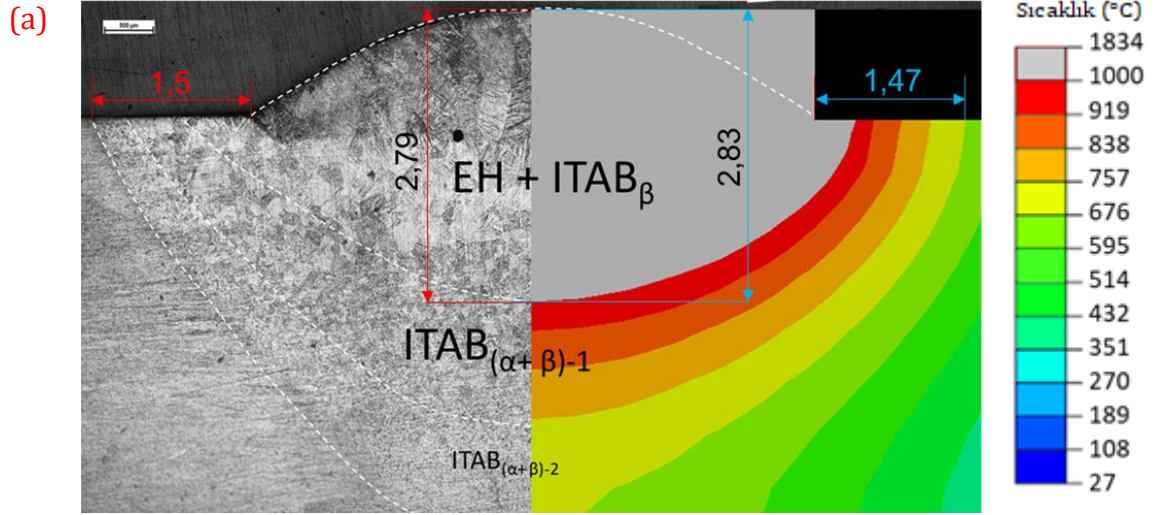
Deney numunelerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, her iki numunede de ısı kaynağına yakın bölgelerde tane boyutunda ve şeklinde belirgin değişimler bulunan alanların varlığı dikkat çekmektedir. Bilindiği gibi kaynak işleminde ergime bölgesine uygulanan ısı eriyik havuzu (EH) ile birlikte bu bölgeye belirli mesafede bulunan bir alana da etki eder. ITAB adı verilen bu bölge içerisinde oluşan sıcaklık farkı bu alanda malzemenin içyapısında bölgesel değişiklere yol açar. Buradan yola çıkılarak ve görüntüler üzerindeki farklı yapıların oluşturduğu kontrast farkları da dikkate alınarak Resim 4.8'de sunulan mikroyapı görüntüleri üzerinde ısıdan etkilenen bölgeler tespit edilerek işaretlenmiştir.

Resim 4.8'de verilen görüntüler üzerinde kontrast farkı oluşturan ve EH+ ITAB $_{\beta}$ , ITAB $_{(\alpha+\beta)-1}$ , ITAB $_{(\alpha+\beta)-2}$  olarak adlandırılan 3 farklı bölgenin varlığı dikkat çekmektedir. Burada EH malzemenin işlem sırasında solidus çizgisinin üzerindeki sıcaklıklara çıkan yani ergiyen bölgesini, ITAB $_{\beta}$  ise solidus çizgisinin altında ancak beta transus ( $T_{\beta}$ ) sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara kadar çıkan bölgesini ifade eder. Her iki bölge de kolonsu tanelerden oluştuğu için görüntüler üzerinden bu iki bölgenin birbirinden ayırt edilmesi zordur ve bu nedenle bu bölgeler birlikte işaretlenmektedir (Brandl vd., 2011a). ITAB $_{(\alpha+\beta)}$  bölgeleri ise sıcaklığın  $T_{\beta}$  sıcaklığının altında değerler aldığı,  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının bir arada kararlı olduğu ve görüntüler üzerinde altlıktan ayırt edilebilen bölgelerdir. İşlem sıcaklığına göre yapısal olarak birbirinden ayırt edilebilen iki ITAB $_{(\alpha+\beta)}$  bölgesi olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre bu bölgeler işlem sıcaklığı  $T_{\beta}'$ ya yakın değerlerler alıyorsa birincil  $\alpha+\beta$  (primer),  $T_{\beta}'$ dan uzak değerlerler alıyorsa ikincil  $\alpha+\beta$  (sekonder) bölgeleri olarak adlandırılır. Bu bölgeler sırası ile ITAB $_{(\alpha+\beta)1}$  ve ITAB $_{(\alpha+\beta)2}$  etiketleri ile Resim 4.8 üzerinde işaretlenmiştir.



**Resim 4.8.** Tek katlı duvar yapıları numunelerin içyapı görüntüleri (a) yüksek ısı giridisi ile üretilen (120 A) (b) düşük ısı giridisi ile üretilen (100A)

Buna göre Şekil 4.19'da, üretilen doğrulama numuneleri üzerinden alınan mikroyapı görüntüleri ve termal analizlerden elde edilen sıcaklık dağılımı ve bunlara bağlı olarak belirlenen eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölge boyutları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.19.** Sonlu elemanlar analizinden elde edilen EH ve ITAB boyutlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (a) 120 A kaynak akımı ile üretilen numune (b) 100 A kaynak akımı ile üretilen numune

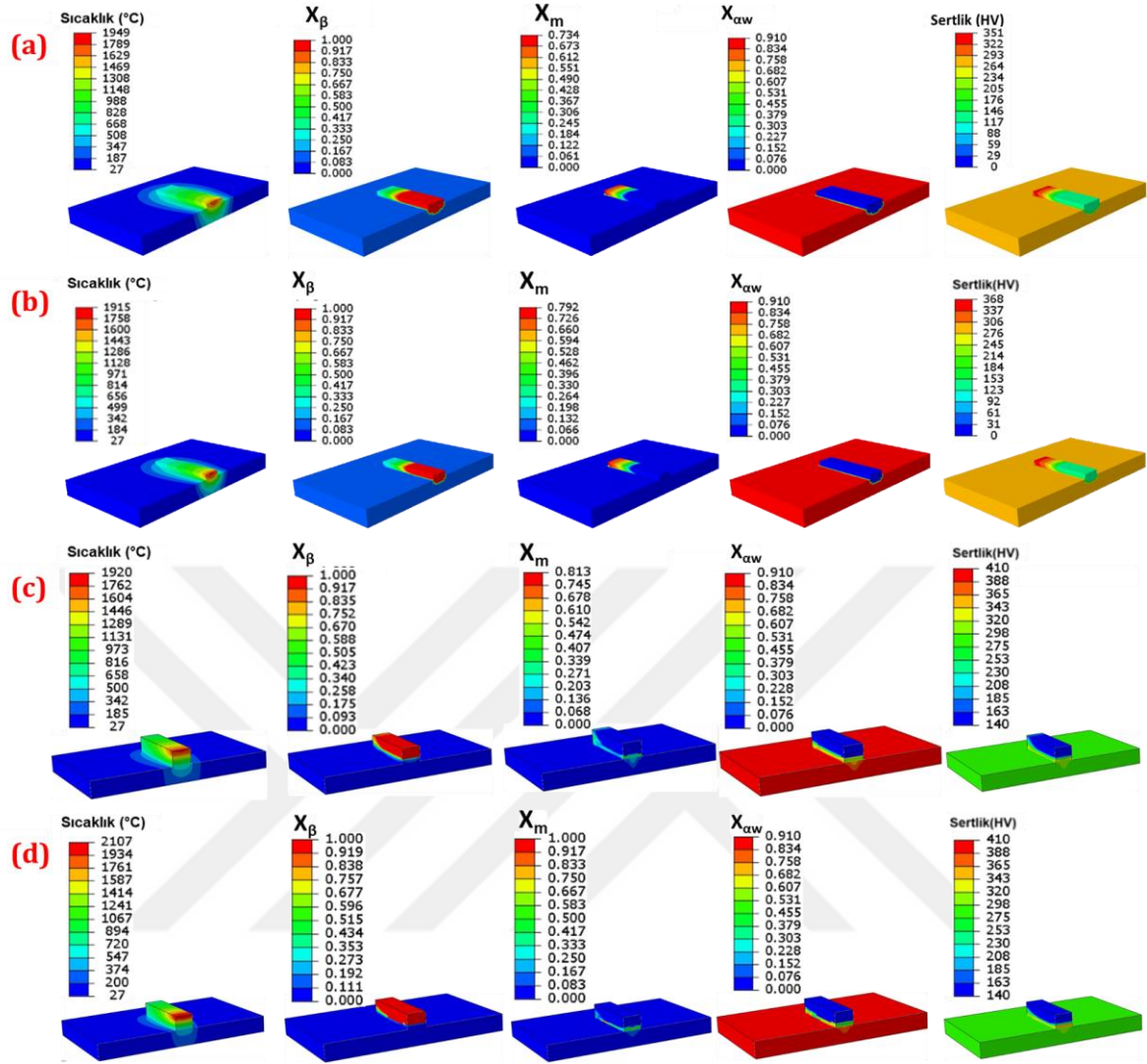
Yukarıda yapılan tariflere dayanarak ısıdan etkilenen bölge ve eriyik havuzu, imalat sırasında malzemenin faz dönüşüm sıcaklarının üzerindeki sıcaklıklara kadar ısınan bölgeleri olarak da tanımlanabilir. SEY analizlerinde, faz dönüşüm sıcaklıklarına karşılık gelen eş sıcaklık konturları takip edilerek eriyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölgeler ve bu bölgelerin boyutları belirlenebilir. Buna göre Şekil 4.19'da  $T_{\beta}$  eş sıcaklık konturunun üzerinde kalan bölgenin mikrograf üzerinde işaretlenmiş olan EH+ITAB bölgesi ile benzer geometride olduğu görülmektedir. Aynı şekilde  $T_{\beta}$  eş sıcaklık konturunun altında ve  $\alpha$  fazının dönüşüm sıcaklığı olarak kabul edilen 676 °C eş sıcaklık konturunun üstünde kalan bölgenin de mikrograf

üzerinde işaretlenmiş olan  $ITAB_{(\alpha+\beta)}$  bölgesi ile benzer geometriye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, SEY analiz sonuçlarına göre  $ITAB_{(\alpha+\beta)-1}$  ve  $ITAB_{(\alpha+\beta)-2}$  bölgeleri 757 °C eş sıcaklık konturu ile birbirinden ayrılmaktadır. Şekil 4.19. (a) ve (b)'de verilen sayısal ve deneysel ölçüm sonuçları birbirine çok yakın değerlerdedir. Bu bağlamda geliştirilen modelin ısıdan etkilenen bölgeyi yüksek tutarlılıkla tahmin edebildiği söylenebilir.

#### 4.3.3. Sertlik değerlerinin karşılaştırılması

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, geliştirilen TMM modelleri sıcaklığa bağlı olarak Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısında meydana gelen faz oranlarını hesaplayabilmektedir. Bilindiği gibi mikroyapıda meydana gelen değişiklikler malzeme özelliklerini doğrudan etkiler. Bu noktada sertlik, mikro yapıya bağlı olarak değişen bu özelliklerden birisidir. Bununla beraber bir malzemenin yapısında bulunan her bir fazın sertlik değeri ve bu fazların yapıdaki oranları biliniyorsa bu malzemenin toplam sertliği karışımlar kuralı ile hesaplanabilir, buradan yola çıkarak da malzemelerin içyapılarında meydana gelen değişimlerin takip edilmesinde sertlik değerleri dikkate alınabilir (Baykasoğlu vd., 2020).

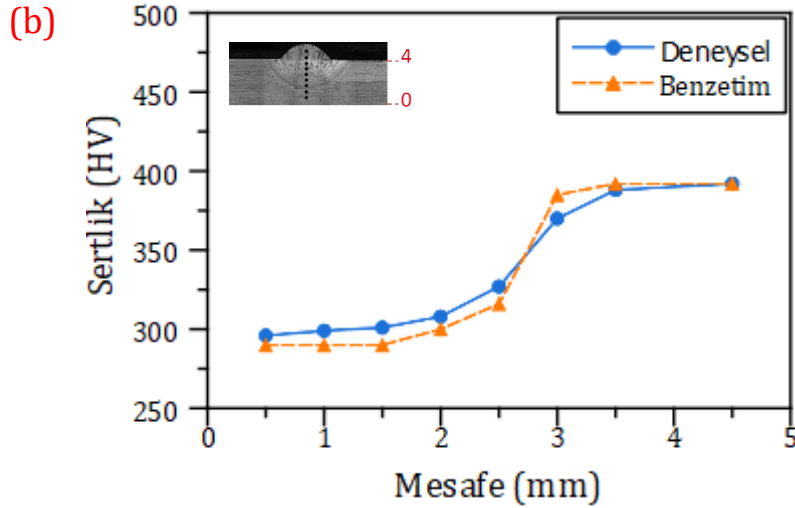
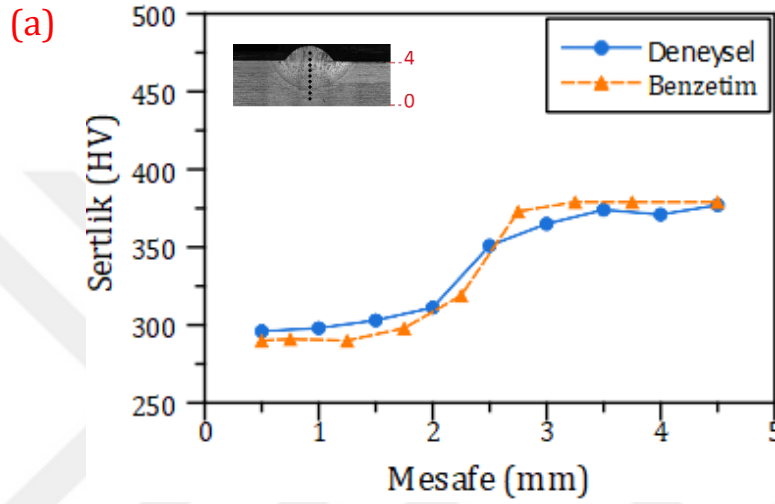
Tez çalışması kapsamında geliştirilen mikroyapısal modelde sıcaklık verileri kullanılarak faz oranları belirlenmekte, bu faz oranlarına bağlı olarak da üretilen nihai ürünün tüm noktalarında sertlik değerleri hesaplanmaktadır. Bu bağlamda faz oranlarının doğru hesaplanması durumunda elde edilen sertlik değerlerinin de doğru elde edilmesi beklenilmektedir. Buna göre Şekil 4.20'de bakalite alınan numunelerle aynı yerden kesilen geometrik model üzerinde hesaplanan sıcaklık, mikroyapı ve sertlik dağılımı sonuçları verilmiştir. Şekilde verilen sıcaklık, mikroyapı ve sertlik değerleri birbiri ile ilişkili olarak incelendiğinde sıcaklığın 1000 °C'nin üzerine çıktığı bölgelerde içyapının tamamen  $\beta$  fazından oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte özellikle tek katlı duvar yapılarında, işlemin hemen başında ısınan ve hızla soğuyan uç kısımların yüksek oranda martensitten oluştuğu dikkat çekmektedir.



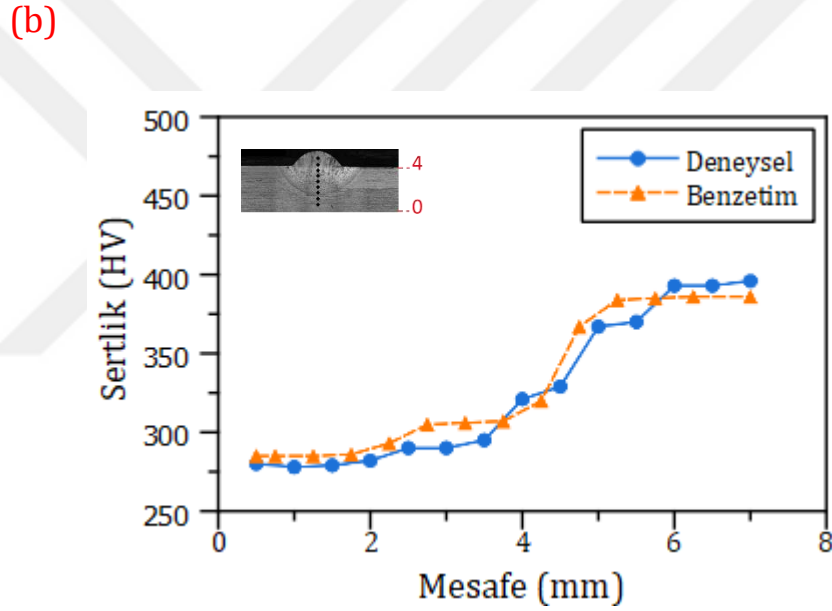
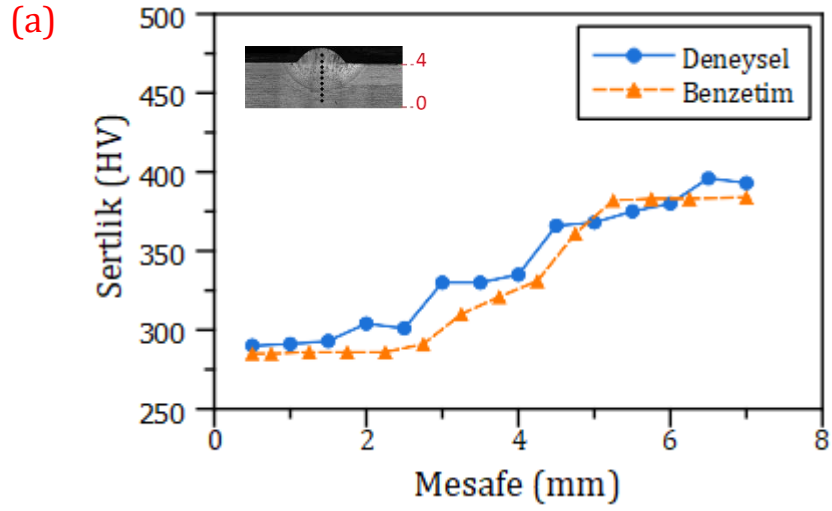
**Şekil 4.20.** Doğrulama numuneleriyle aynı yerden kesilen geometrik model üzerinde hesaplanan sıcaklık mikroyapı ve sertlik dağılımı, (a) 120 A ile üretilen tek katlı duvar yapısı (b) 100 A ile üretilen tek katlı duvar yapısı (c) eş yönlü tarama deseni ile üretilen 5 katlı duvar yapısı (d) zikzak tarama deseni ile üretilen 5 katlı duvar yapısı

Şekil 4.20’de verilen sonuçlarda malzemelerin içyapılarında meydana gelen değişikliklerin sertlik değerleri üzerine etkisi açıkça gözlemlenmektedir. Bu noktada numuneler üzerinde en yüksek sertlik martensit fazından oluşan bölgelerde, en düşük sertlik ise  $\beta$  fazından oluşan bölgelerde görülmektedir. Buradan yola çıkılarak, geliştirilen model ile hesaplanan faz oranlarının doğrulanmasında ucuz, pratik ve kolay erişilebilir bir yöntem olan sertlik deneylerinden faydalanılmıştır. Bu bağlamda hem tek katlı hem de 5 katlı duvar yapıları numuneler üzerinden Metkon DUROLINE-M mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak Vickers ölçüğünde 1000 gf yük altında 10 saniye yük uygulanarak sertlik değerleri ölçülmüştür.

Sertlik değerleri deney numunelerinin en alt noktasından başlanarak yaklaşık 0,5 mm aralıklarla numunenin orta noktasına denk gelen bir çizgi boyunca aşağıdan yukarıya doğru ölçülmüştür. Bununla birlikte her yükseklikte 3 adet ölçüm alınmış olup bu değerlerin ortalamaları o noktanın sertlik değeri olarak hesaplanmıştır. Ayrıca SEY analiz sonuçları da modelin deney numuneleriyle aynı yüze denk gelen kesitleri üzerinden alınmıştır. Buna göre tek katlı ve 5 katlı deney numunelerinden elde edilen sertlik değerleri Şekil 4.21 ve 4.22'de verilmiştir.



**Şekil 4.21.** Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sertlik değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (a) 120 A ile üretilen tek katlı duvar yapı (b) 100 A ile üretilen tek katlı duvar yapı

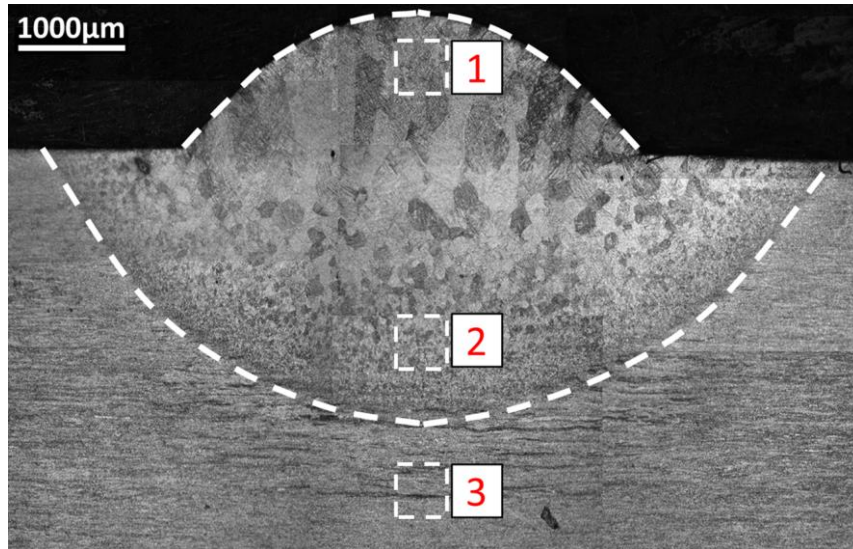


**Şekil 4.22.** Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sertlik değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (a) eş yönlü tarama deseni ile üretilen 5 katlı duvar yapı (b) zikzak tarama deseni ile üretilen 5 katlı duvar yapı

Verilen grafikler genel olarak değerlendirildiğinde ölçüm alınan hat boyunca tüm numunelerin sertlik değerlerinin atlık plakının ITAB'a (~2-2,5 mm) yakın bölgelerinden itibaren artmaya başladığı ve bu artışın duvar yapı boyunca devam ettiği görülmektedir. Bu noktada, Ti-6Al-4V alaşımının TAEİ süreçlerine yönelik literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde benzer parametrelerle üretilen numunelerde benzer sertlik değerlerinin elde edildiği dikkat çekmektedir. Bu bağlamda Artaza vd., (2020b) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada TAEİ ile Ti-6Al-4V alaşımından üretilen parçada ölçülen sertlik değerlerinin altlık plakının ısıdan

etkilenen bölgesinde ve üretilen yapıda altlık malzemeye göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Yine Omoniyi vd., (2023) tarafından yapılan bir çalışmada TIG kaynağı yöntemi ile üretilen numunelerde en yüksek sertliğin kaynak bölgesinde ölçüldüğü gösterilmiştir. Mehdi vd., (2016) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise Ti-6Al-4V alaşımından TIG kaynağı ile üretilen parçada sertlik değerlerinin kaynak bölgesinin merkezinden altlık plakaya doğru gidildikçe azaldığı tespit edilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımının TIG kaynağı üzerine gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise Tolvanen ve Pederson, (2024) sertlik değerlerinin altlık plakada en düşük, ITAB bölgesinde biraz yüksek kaynak bölgesinde ise en yüksek değerlerde olduğunu göstermektedir. Bu noktada literatürdeki veriler göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, tez çalışması kapsamında elde edilen sertlik profilinin diğer çalışmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

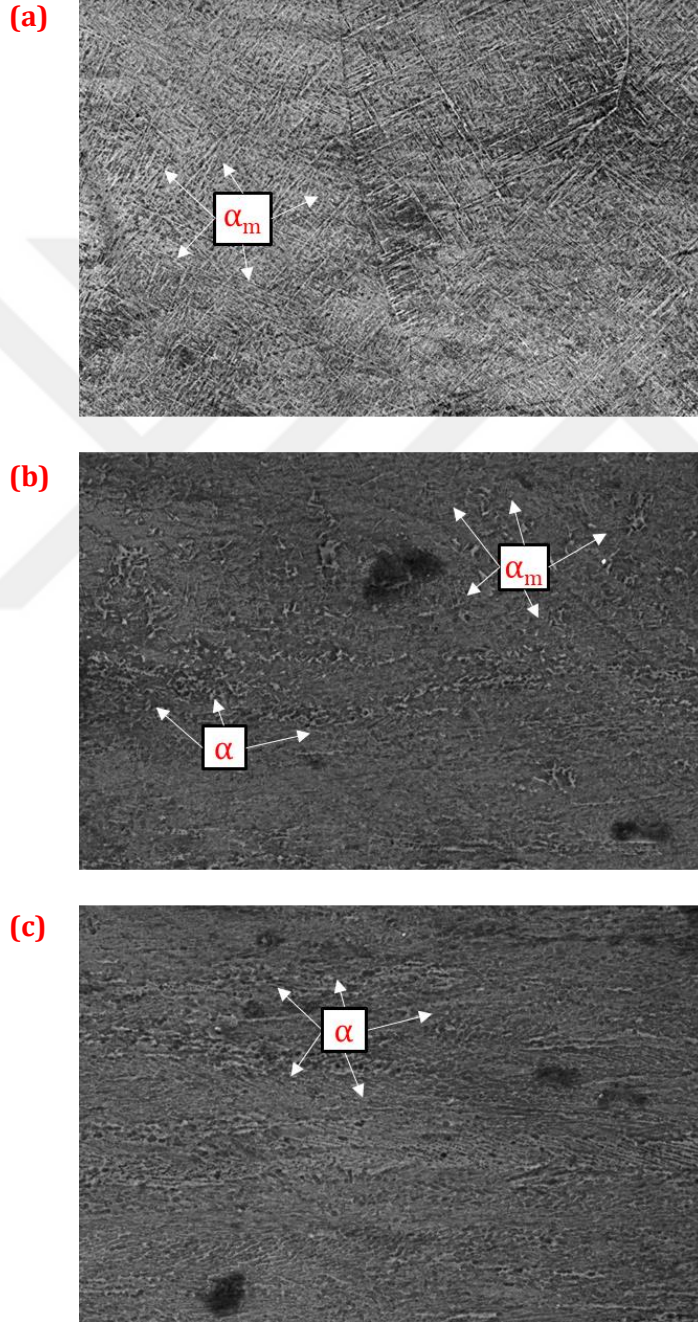
Yüksek soğuma hızına bağlı olarak ortaya çıkan masif/martensitik  $\alpha_m$  fazı Ti-6Al-4V alaşımın içyapısında bulunan en sert fazdır. Omoniyi vd., (2023)'e göre TAEİ işlemi sırasında TIG kaynak arkı nedeniyle sıcaklığı 1000°C'nin üzerine çıkan eriyik havuzunun kritik soğuma hızı olan 410°C/s'nin veya 20°C/s'nin üzerindeki hızlarla soğuyan bölgelerinde büyük oranda  $\alpha_m$  fazı oluşur ve bu da eriyik havuzu içerisinde bulunan bölgelerde yüksek sertliğe neden olur. Buna göre TIG-TAEİ ile Ti-6Al-4V alaşımından üretilen parçalarda en yüksek sertlik değerinin elde edildiği bölgelerde mikroyapının büyük oranda  $\alpha_m$  fazlarından oluşması beklenir. Buradan hareketle bu durumun doğrulanması amacıyla tez çalışması kapsamında 100 A kaynak akımı kullanılarak üretilen tek katlı duvar yapılı numune üzerinden ve yaklaşık konumları Şekil 4.23'de gösterilen 3 farklı bölgeden taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile içyapı görüntüleri alınmıştır.



**Şekil 4.23.** 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapılı numuneden SEM görüntüsü alınan bölgeler

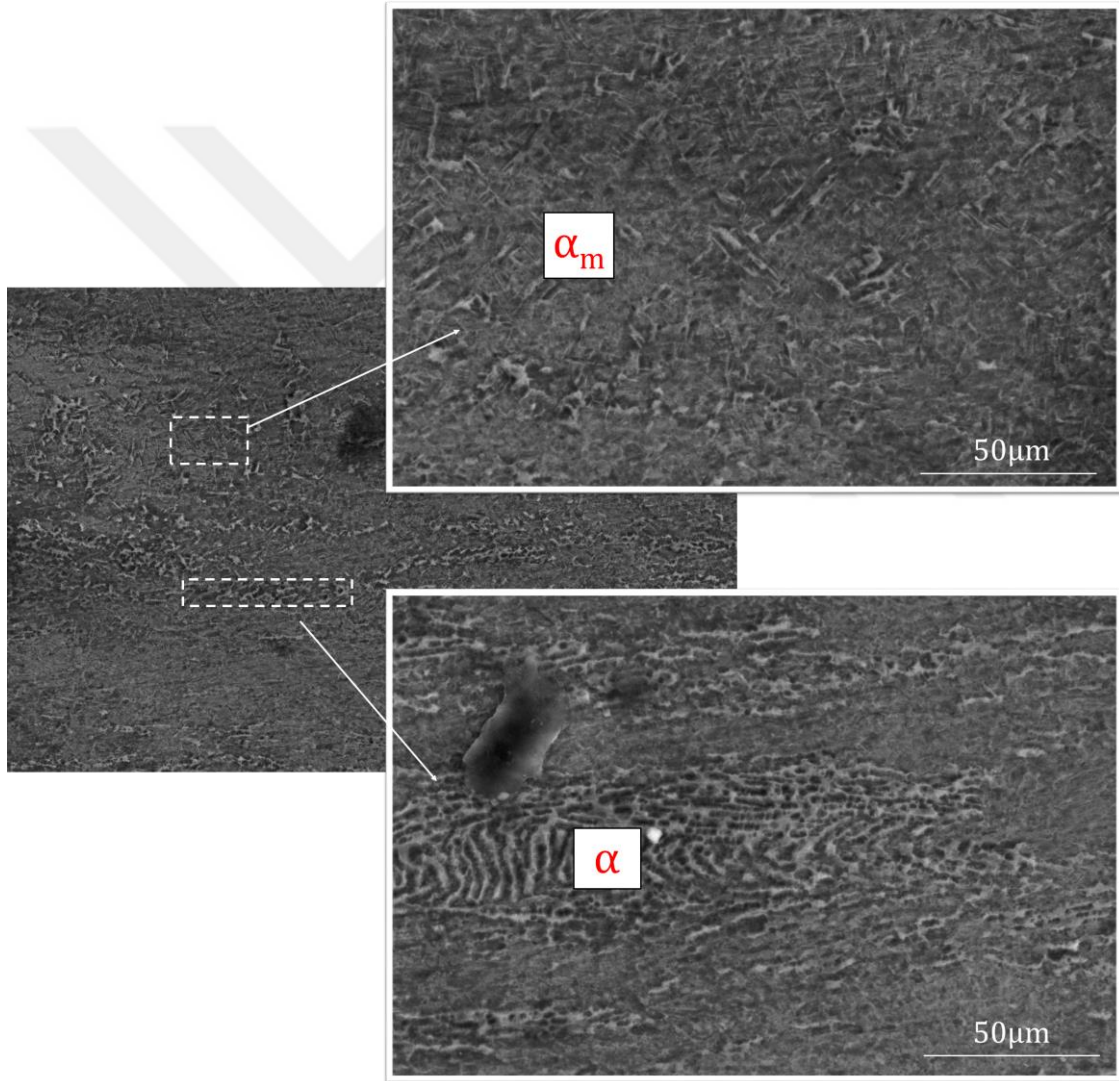
Şekil 4.23'de 1 numara ile etiketlenen bölge üretilen duvar yapının en üstüne yakın kısmını, 2 numara ile etiketlenen bölge ITAB bölgesini ısıdan etkilenmeyen bölgeden ayıran çizginin üstündeki bölgeyi, 3 numara ise bu çizginin altında kalan bölgeyi işaret etmektedir.

Buna göre Şekil 4.23'de gösterilen bölgelerden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.24'de verilmiştir.



**Şekil 4.24.** 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapılı numuneden (a) 1 numaralı (b) 2 numaralı (c) 3 numaralı bölgelerden alınan SEM görüntüleri

Görüntüler FEI marka Quanta 450 FEG model taramalı elektronik mikroskobu ile 1000x büyütme ile elde edilmiştir. Buna göre Şekil 4.24 (a)'da verilen ve üretilen numunede duvar yapının en üst bölgesine denk gelen görüntüde yapının büyük oranda  $\alpha_m$  fazlarından oluştuğu görülmüştür. Öte yandan ITAB'ın altında kalan ve altlık üzerine denk gelen Şekil 4.24 (c)'deki görüntüde ise mikroyapıda  $\alpha_m$  fazlarına rastlanılmadığı dikkat çekmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.24 (b)'deki altlık plakaya yakın ancak ITAB içerisinde kalan ve detay görüntüsü Şekil 4.25'de verilen içyapı görüntülerinde metalin yapısında diğer fazlarla birlikte düşük oranda da olsa  $\alpha_m$  fazlarının varlığı dikkat çekmektedir.



**Şekil 4.25.** 100 A kaynak akımı ile üretilen tek katlı duvar yapılı numunenin ITAB içerisinde kalan 2 numaralı bölgesinin mikroyapı görüntüleri

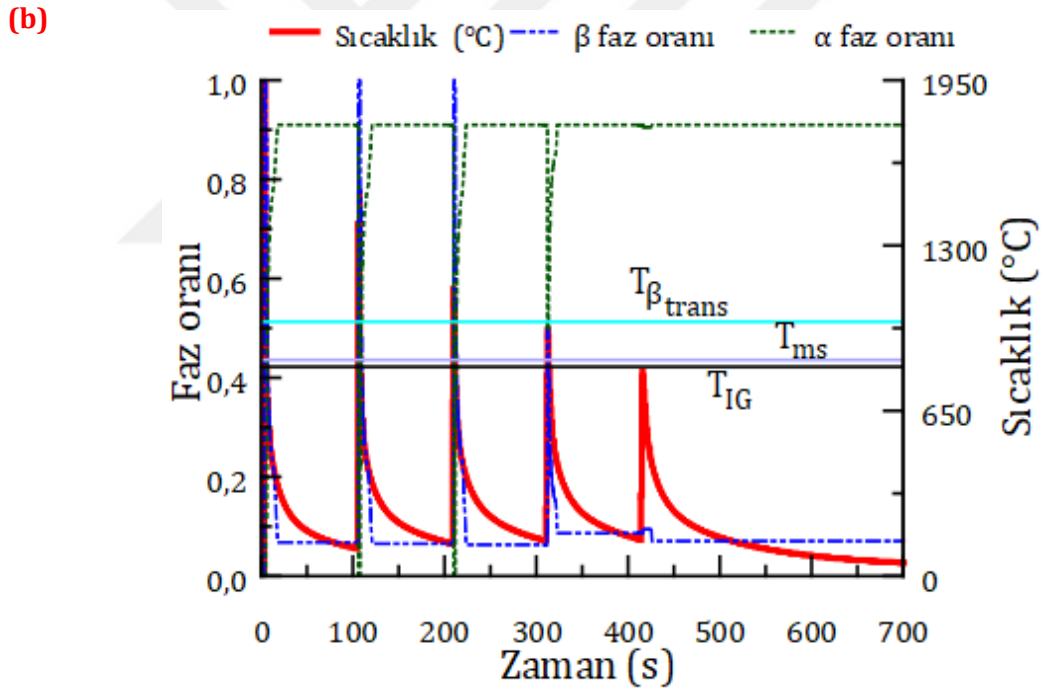
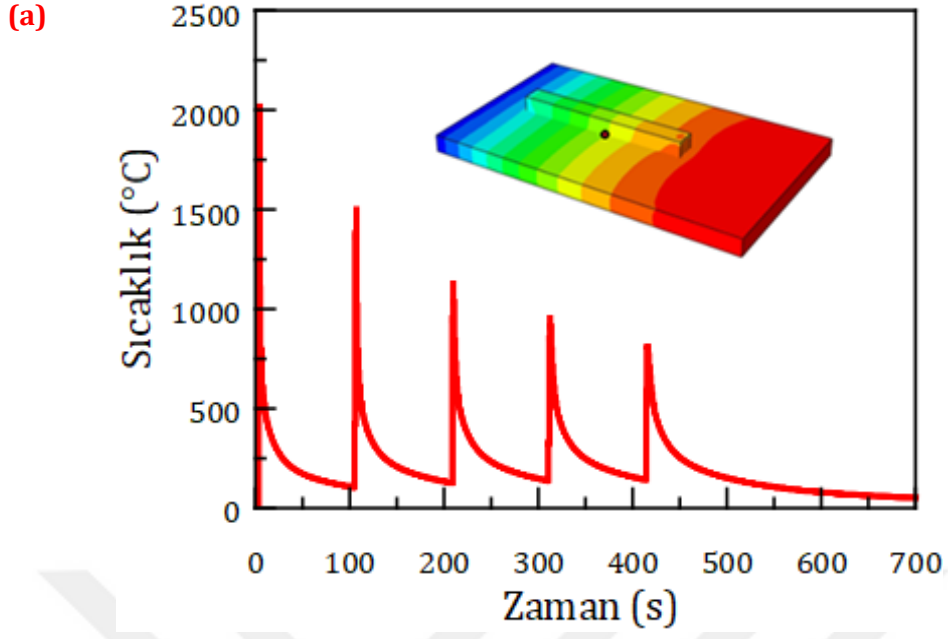
SEM görüntüleri ve sertlik ölçümleri birlikte değerlendirildiğinde, elde edilen bulguların SEY analizlerini destekler nitelikte olduğu ve sertliğin en yüksek olduğu bölgelerde yapının büyük oranda  $\alpha_m$  fazlarından oluştuğu,  $\alpha_m$  oranının düştüğü bölgelerde ise sertlik değerlerinin de düşüşe geçtiği görülmüştür. Bununla birlikte  $\alpha_m$  fazı bulunmayan bölgelerde ise metalin sertliği en düşük değerlerde ölçülmüştür.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'deki grafiklerde verilen sertlik değerleri karşılaştırıldığında, deneysel ölçümlerde sertliğin yükselişe geçtiği bölgelerde, sayısal verilerle deneysel veriler arasında bir miktar fark oluştuğu dikkat çekmektedir. Bu durumun geliştirilen termal-mikroyapısal model kabullerinden (tane boyutunun dikkate alınmaması, literatürdeki veri eksikliğinden martensit ve masif fazlarının tek bir faz olarak kabul edilmesi, eriyik havuzunun katı olarak modellenmesi, faz dönüşümüne mekanik etkilerin dâhil edilmemesi, geometrik faktörler vb.) kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bununla beraber deneysel verilerde sertliğin artış gösterdiği noktalarda SEY analiz sonuçlarında da (birebir aynı değerlerde olmasa da) benzer artış ve azalış eğiliminde sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Buradan yola çıkarak geliştirilen benzetim modellerinin TIG-TAEİ ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarda sertlik eğilimini ve buna bağlı olarak faz oranlarını doğru hesapladığı söylenebilir.

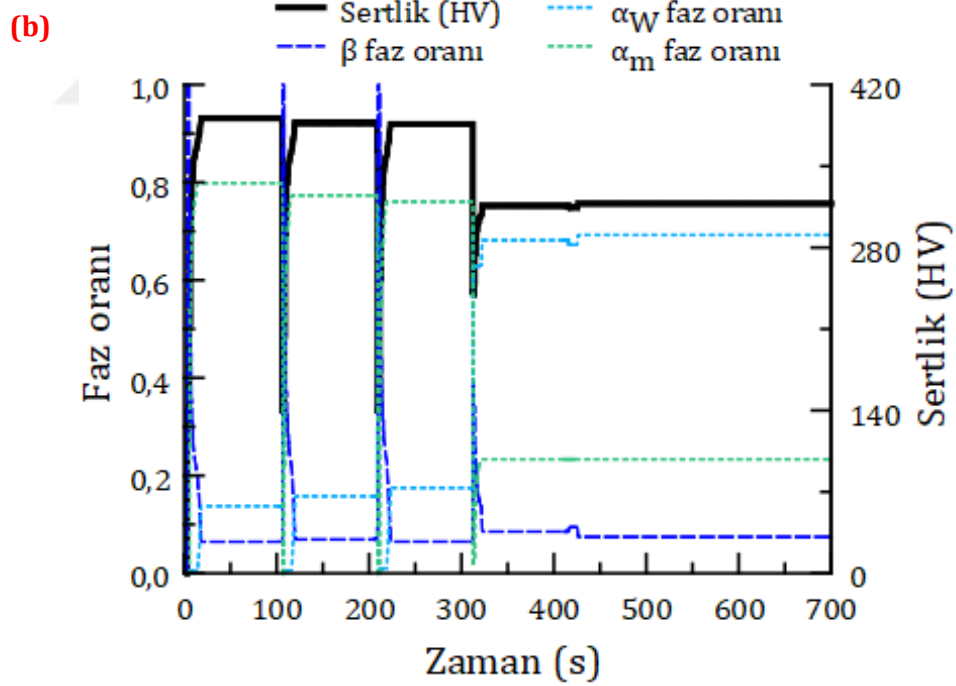
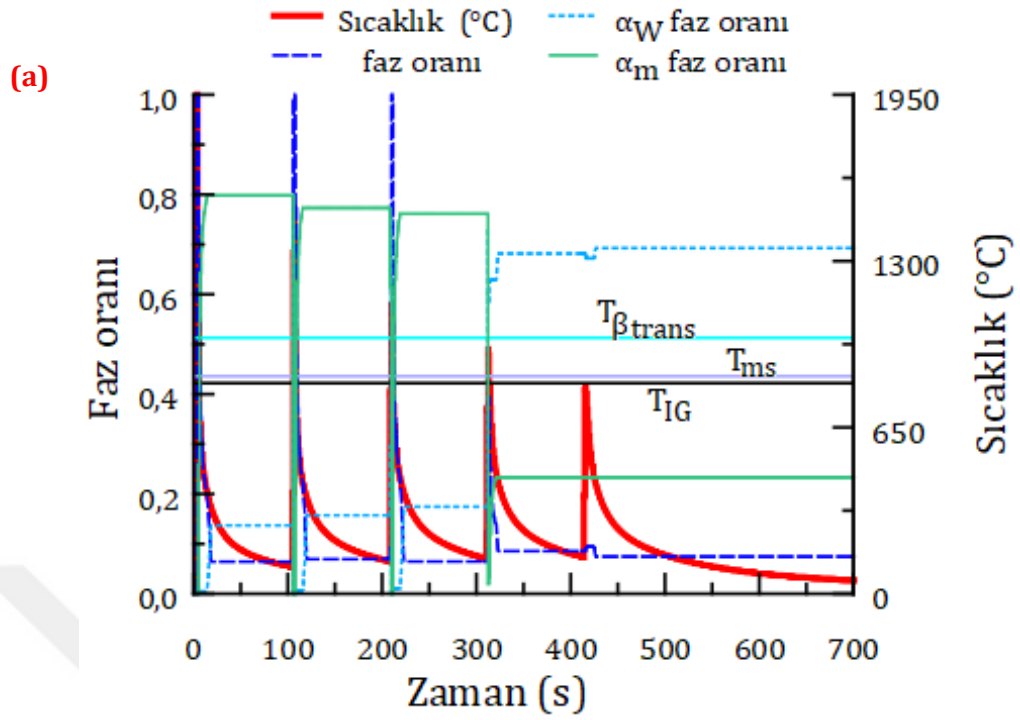
Çalışma kapsamında, geliştirilen ve doğrulaması tamamlanan mikroyapısal model kullanılarak Ti-6Al-4V alaşımının TIG-TAEİ sürecinde meydana gelen mikroyapısal değişimler incelenmiştir. Bu amaçla 100 A kaynak akımıyla zikzak tarama deseninde üretilen doğrulama numunesi için, numunenin en alt katmanın orta bölgesindeki bir elemanın integrasyon noktasında hesaplanan sıcaklık, faz oranı ve sertlik değerleri ele alınmıştır. Bu kapsamda numuneden elde edilen bu değerler Şekil 4.26' ve Şekil 4.27'de verilmiştir.

Buna göre Şekil 4.26 (a)'da zikzak tarama deseni ile üretilen 5 katlı duvar yapılı numunenin seçilen integrasyon noktasında işlem boyunca meydana gelen sıcaklık değişimi, Şekil 4.26 (b)'de ise bu noktada numunenin içyapısındaki  $\alpha$  ve  $\beta$  faz oranlarının zamanla değişimi gösterilmiştir.

Önceki bölümlerde tartışıldığı gibi  $\beta$  dönüşüm sıcaklığından ( $T_{\beta trans} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) daha yüksek sıcaklıklarda  $\alpha$  fazları tümüyle  $\beta$  fazına dönüşmektedir. Buna göre Şekil 4.26 (b)'de, sıcaklık ölçümü alınan noktada ilk 3 katmanın üretimi sırasında sıcaklık değeri  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerine çıkmakta ve bu noktada mikroyapı tamamen  $\beta$  fazından oluşmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımının soğuması sırasında  $\beta$  fazı soğuma hızına bağlı olarak  $\alpha_m$  ya da  $a_w$  formlarına dönüşebilir. Buna göre Şekil 4.27 (a)'da 5 çevrim boyunca sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen  $\alpha_m$ ,  $a_w$ ,  $\beta$  faz oranları, Şekil 4.27 (b)'de ise bu faz oranlarına bağlı olarak hesaplanan mikrosertlik değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



**Şekil 4.26.** Zikzak yağma deseni ile üretilen numune üretim işlemi boyunca en alt katmanın orta bölgesindeki bir integrasyon noktasında hesaplanan (a) sıcaklık (b)  $\alpha$ ,  $\beta$  faz oranları



**Şekil 4.27.** Zikzak yığma deseni ile üretilen numunede üretim işlemi boyunca en alt katmanın orta bölgesindeki bir elemanın integrasyon noktasında hesaplanan faz oranları ve sertlik değerleri (a)  $\alpha_m$ ,  $\alpha_w$ ,  $\beta$ , oranları (b) sertlik değerleri

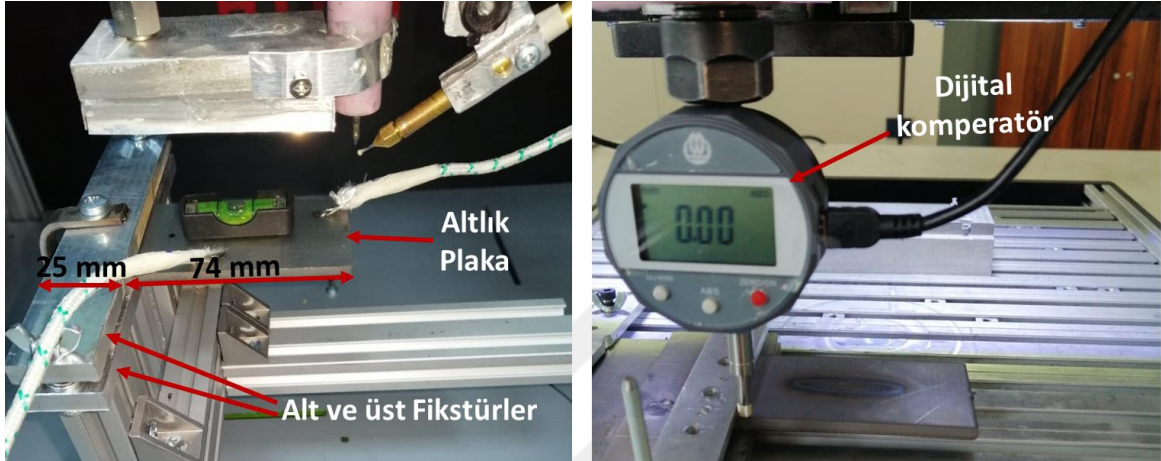
Şekil 4.27 (a)'da görüldüğü gibi ilk 3 çevrimde meydana gelen yüksek soğuma hızları difüzyonsuz faz dönüşümlerine yol açarak,  $\beta$  fazının büyük oranda  $\alpha_m$  fazına dönüşmesine neden olmaktadır. Soğuma hızı 20 °C/s'nin altında kaldığında ise difüzyon kontrollü faz dönüşümü meydana gelerek kalan  $\beta$  fazı yaklaşık %17 oranında  $\alpha_w$  fazına dönüşmektedir. 3. çevrimden sonraki tepe sıcaklık değerleri  $T_{\beta trans}$  'un altında kalmaktadır. Bu noktada, 4. ısınma basamağında mevcut  $\alpha_m$  fazın büyük bir bölümü  $\alpha_w$  fazına, bir bölümü de  $\beta$  fazına dönüşerek,  $X_{\alpha_w} \sim 0,58$  ve  $X_{\beta} \sim 0,40$  oranlarına ulaşır. Takip eden 4. soğuma basamağında mevcut  $\beta$  fazı difüzyonsuz masif faz dönüşümü ile bir miktar  $\alpha_m$  fazına dönüşerek bu noktadaki nihai değerine  $X_m \sim 0,23$  ulaşır. Ayrıca bu soğuma basamağında difüzyonlu faz dönüşümü de meydana gelerek  $\alpha_w$  faz oranı kısmi bir artış ile  $X_{\alpha_w} \sim 0,68$  nihai değerine ulaşır. 5. Isınma-soğuma çevriminde ise önce ısınma basamağında yapıdaki  $\alpha_w$  fazlarının düşük bir miktarı  $\beta$  fazına dönüşmekte, takip eden soğuma basamağında da yapıdaki  $\beta$  fazlarının bir kısmı tekrar  $\alpha_w$  fazına dönüşmektedir. Bununla birlikte 4. ısınma-soğuma çevriminden sonra martensitik/masif fazların dönüşümü için gerekli koşullar oluşmadığından 4. soğuma basamağı sonundaki  $\alpha_m$  faz oranları 5. çevrimde değişmemektedir.

Şekil 4.27 (b)'de, ilgili ölçüm noktasında hesaplanan sertlik değerlerinin mikroyapıdaki faz oranları ile birlikte zamana göre değişimi verilmiştir. Buna göre verilen grafikte, üretilen parça üzerinde en yüksek sertlik değerinin martensitik/masif fazların yüksek oranda oluştuğu ilk 3 ısınma-soğuma çevriminde hesaplandığı, yapının tamamen beta fazından oluştuğu ısınma periyodunda ise sertlik değerinin  $\beta$  fazının sertlik değeri olan 140 HV değerine düştüğü görülmüştür. Ayrıca faz oranlarındaki değişimin düşük seviyelerde gerçekleştiği süreçlerde malzemenin sertlik değerlerinde de düşük değişimlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Buna göre martensitik faz oranının en yüksek olduğu ilk 3 soğuma basamağının sonunda sertlik değeri 390 HV'ye ulaşırken, sonraki süreçte meydana gelen faz dönüşümleri neticesinde düşen martensitik oranına bağlı olarak bu noktanın sertlik değeri 320 HV olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.4. Yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında geliştirilen modelin doğrulanmasında ayrıca parçalar üzerinde meydana gelen yer değiştirme değerleri kullanılmıştır. Bu noktada çalışma kapsamında üretilen doğrulama numuneleri TIG-TAEİ sistemine bir ucu ankastre olarak bağlanmıştır. Bu sayede üretim esnasında uç kısımda meydana gelecek deformasyonlara müsaade edilmiştir. Böylece malzemelerin sıcaklık altındaki yer değiştirme davranışlarını incelemek için uygun şartlar oluşturulmuştur. Bu amaçla deney numunelerinin altlık plakaları üretim sistemine kısa sol kenar tarafından, 25 mm uzunluğundaki kısmı fikstürler arasında kalacak şekilde sıkıştırılarak sabitlenmiştir. Ardından bu plakaların üzerine malzeme yığılarak imalat işlemi gerçekleştirilmiştir. Malzeme tamamen soğuduktan sonra altlık plakaların uzun kenarları boyunca z ekseninde meydana gelen yer değiştirme miktarları ölçülmüştür. Bu ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için bir CNC tezgahın iş mili bölümüne bağlanan, bilgisayar ile

haberleşebilen, dijital bir komperatör kullanılmıştır. Kurulan sistemin doğrulaması ve sıfır noktasının belirlenmesi amacıyla üzerine üretim yapılmamış altlık plakalar kullanılarak ayar işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece bilgisayar ile kontrol edilen, eşit mesafelerde ve doğrusal olarak hareket edebilen dijital bir ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan ölçüm sistemine ait görüntüler Resim 4.8'de verilmiştir.

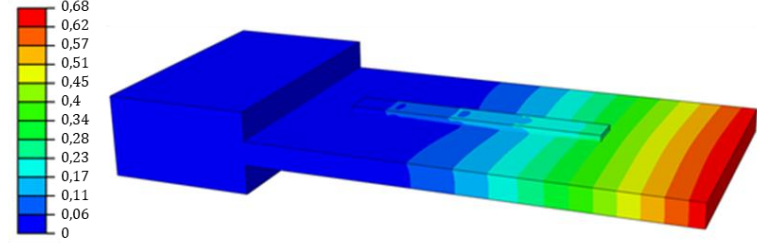


**Resim 4.8** (a) Altlık plakaların üretim sistemine sabitlenmesi ve (b) üretim sonrasında meydana gelen yer değiştirmelerin ölçümü

Buradan yola çıkarak doğrulama çalışmalarında kullanılan tek katlı ve 5 katlı yapıların uzun kenarlarından Resim 4.8'de gösterilen yöntemle yer değiştirme değerleri ölçülmüş ve elde edilen değerler TMM modelleri ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre Şekil 4.28 ve 4.29'da geliştirilen bağlaşıklık TMM model ile tek katlı ve 5 katlı numunelerin mekanik analizlerden elde edilen yer değiştirme sonuçlarının numuneler üzerindeki dağılımı, Şekil 4.30 ve 4.31'de ise sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırıldığı grafikler verilmiştir.

### 120A Tek kat

Yer değiştirme (mm)



### 100A Tek kat

Yer değiştirme (mm)

0.55
0.5
0.45
0.4
0.36
0.31
0.26
0.21
0.16
0.11
0.06
0.02
0

Şekil 4.28. Tek katlı duvar yapılı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme dağılımı

### 100A Eş yönlü

Yer değiştirme (mm)

1.71
1.56
1.41
1.27
1.12
0.98
0.83
0.69
0.54
0.39
0.25
0.1
0

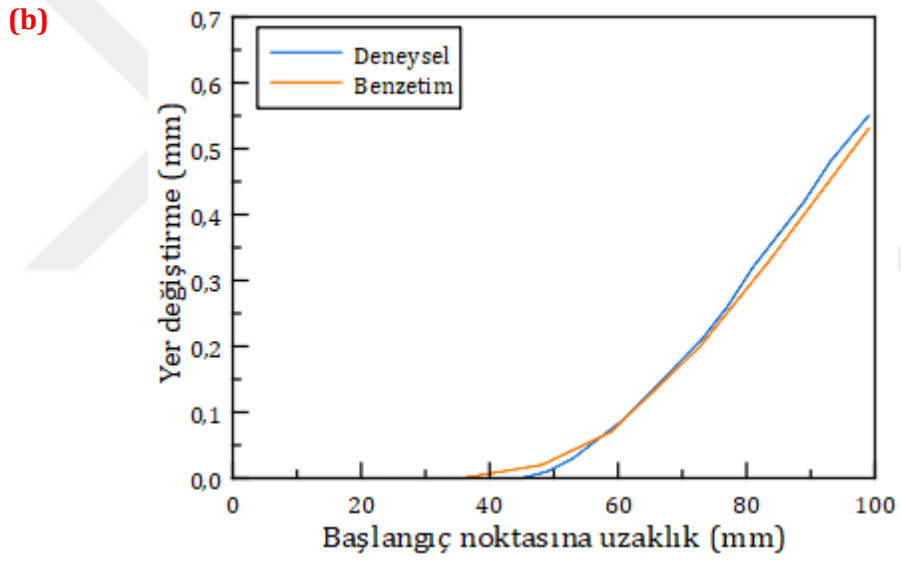
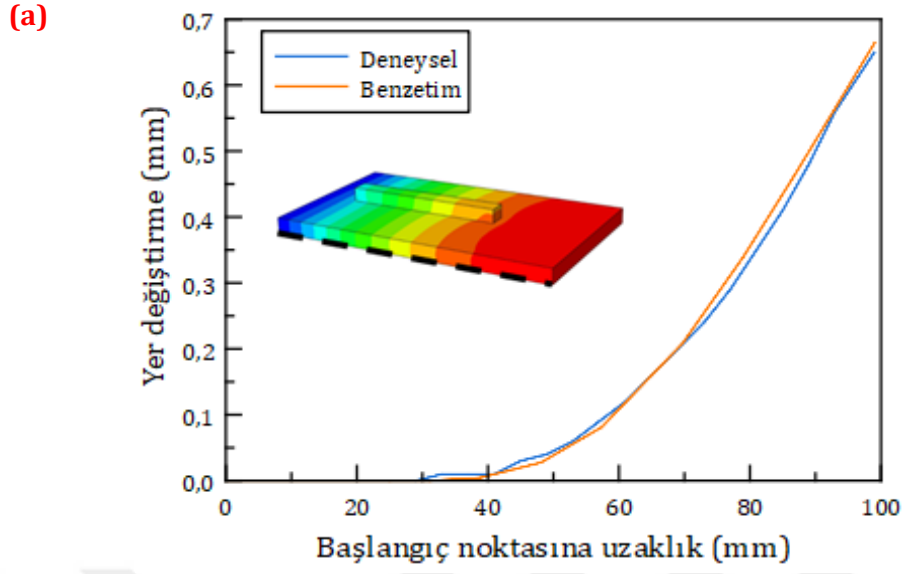
### 100A Zikzak

Yer değiştirme (mm)

1.74
1.59
1.44
1.29
1.15
1.00
0.85
0.70
0.55
0.40
0.25
0.1
0

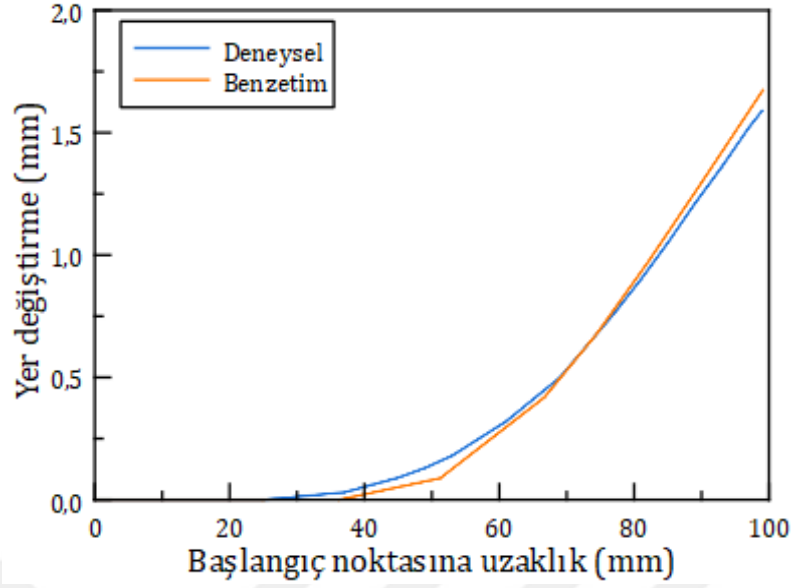
Şekil 4.29. Beş katlı duvar yapılı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme dağılımı

101

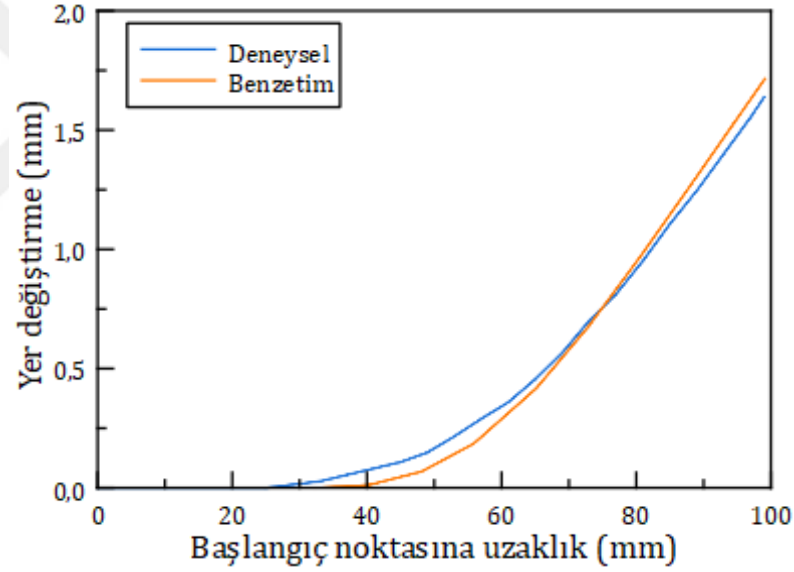


**şekil 4.30.** Tek katlı duvar yapılı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme sonuçlarının deneysel ölçümlerle karşılaştırılması (a) 120 A ile üretilen numunede (b) 100 A ile üretilen numunede

(a)



(b)



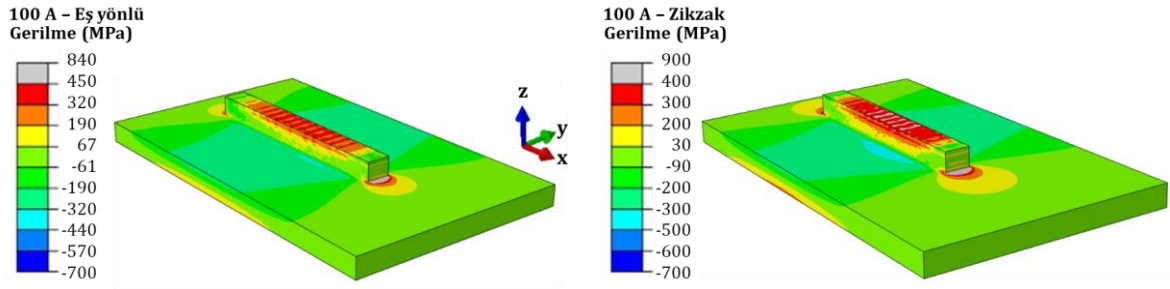
**Şekil 4.31.** 5 katlı duvar yapılı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme sonuçlarının deneysel ölçümlerle karşılaştırılması (a) eş yönlü tarama deseni ile üretilen numunede (b) zikzak tarama deseni ile üretilen numunede

Şekil 4.28-4.29’da verilen deplasman dağılımları ve Şekil 4.30 ve 4.31’de verilen grafikler incelendiğinde hem deneysel ölçümlerde hem de benzetim modellerinden elde edilen sonuçlarda tüm numunelerin altlık plakalarının, fikstür bölgelerinden itibaren +z eksen yönünde şekil değiştirdiği ve bu deplasman değerlerinin plakaların serbest taraftaki uçlarında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca şekil değiştirme miktarlarının parçalar üzerindeki dağılımı ele alındığında plakaların serbest taraflarında yukarı doğru, iç bükey bir

geometrinin oluştuğu dikkat çekmektedir. Yapılan literatür araştırmasında her ne kadar doğrudan TAEİ yöntemi ile gerçekleştirilen benzer bir çalışmaya ulaşilamasa da YEY yönteminin başka bir alt türü olan LENS yöntemi ile gerçekleştirilmiş benzer çalışmalarda elde edilen sonuçların tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu ve çalışmalarda üretilen parçaların benzer mekanik davranışlar sergilediği görölmektedir. Bu kapsamda X. Liang vd., (2018) tarafından Ti-6Al-4V alaşımı kullanılarak LENS yöntemi ile tek tarafından mesnetlenmiş plakalar üzerine üretilen duvar yapılı numunelerde altlık üzerinde meydana gelen maksimum yer değiştirmenin malzemelerin uç noktalarında oluştuğu gösterilmiştir. Lu vd., (2019) tarafından gerçekleştirilen ve LENS eklemeli imalat yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşımından bir ucu mesnetli çok katlı duvar yapıların üretildiği başka bir çalışmada yine altlık üzerindeki maksimum deformasyon miktarı plakanın serbest tarafında ve uç kısma yakın bölgelerinde belirlenmiştir. Bandari vd., (2020) tarafından Ti-6Al-4V parçaların üretiminde katmanlar arası soğuma süresinin çarpılma ve mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı bir diğer çalışmada ise yine altlık plakanın sabitlendiği noktadan itibaren deformasyon miktarının +z yönünde serbest uca doğru artan bir profil izlediği ve plakanın serbest uç tarafında maksimum değerine ulaştığı gösterilmektedir.

TIG-TAEİ işlemi sırasında malzemelere uygulanan ısı nedeniyle meydana gelen termal çevrimler, üretilen parçalarda termal genleşme veya büzölmelere neden olur. Bununla birlikte metal malzemelerin boyutları bu genleşme ve büzölmeler nedeniyle sıcaklığa bağlı olarak değişir. Öte yandan TAEİ işlemi sırasında malzemelerde yüksek mertebelerde ortaya çıkan bu Şekil değişimleri, sınır koşullarının etkisiyle malzemeler üzerinde gerilmeler meydana getirir. Bu gerilmeler malzemenin akma sınırını aştığında, yapı üzerinde plastik Şekil değişimlerinin oluşmasına yani bir başka değişle parçalarda kalıcı deformasyonların meydana gelmesine neden olur.

Düz duvar yapıların üretim sürecinde, ısınma basamaklarında metalin ısıdan etkilenen bölgelerinde termal genleşmeler meydana gelir. Ancak bu genleşme altlık plaka ve yapının nispeten soğuk olan alt katmanları tarafından engellenir. Bunun sonucunda ilgili bölgelerde basma gerilmeleri oluşur. Soğuma basamaklarında ise yüksek mertebelerde termal büzölme ve yine bu büzölmenin altlık tarafından sınırlandırılmasından dolayı yapı içinde yüksek mertebelerde çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu noktada Şekil 4.32'de, geliştirilen benzetim modelleri tarafından, son soğuma periyodunun sonunda 5 katlı deney numuneleri için malzeme yığma doğrultusu olan x-yönünde hesaplanan gerilmelerin üretilen yapılardaki dağılımları verilmiştir.



**Şekil 4.32.** 5 katlı duvar yapılı numunelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme sonuçları

Buna göre Şekil 4.32’de hem eş yönlü hem de zikzak tarama deseninde üretilen numuneler için verilen gerilme dağılımları incelendiğinde, üretilen yapıların soğuma periyodu sonunda orta bölgelerinde meydana gelen çekme gerilmeleri görülmektedir. Bununla birlikte yapı üzerinde meydana gelen çekme gerilmelerinin, her iki numune için de basma gerilmelerine göre daha yüksek mertebelerde olduğu ve bu gerilmelerinin duvarın en üst kısmında maksimum değerinde olduğu dikkat çekmektedir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Ti-6Al-4V alaşımından TIG-TAEİ yöntemiyle üretilen parçalarda, üretim süreci boyunca meydana gelen termal değişimlerin ve bu değişimlerin etkilediği mikroyapı ile mekanik özellik ve davranışların tahmininde kullanılacak tamamen bağışık SEY benzetim modellerinin geliştirilmesi amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmalarında ABAQUS paket programı kullanılmıştır. Geliştirilen benzetim modellerinde geometri, malzeme özellikleri, sınır koşulları gibi bilgiler hazırlanan Python makroları ile, hareketli ısı kaynağı ve mikroyapı dönüşüm algoritmaları ise Fortran kullanıcı alt programları ile sonlu elemanlar modeline tanımlanmıştır. Python ve Fortran komutları oluşturulurken tüm süreç parametreleri birbiri ile ilişkişel olarak tanımlanmıştır. Bu sayede, yalnızca geometri ve üretim parametreleri değiştirilerek kısa sürede revize edilebilen, esnek bir model yapısı ortaya konulmuştur.

Benzetim modellerinin geliştirilmesi sırasında literatürde TAEİ sürecinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan Goldak'ın çift elipsoidal ısı kaynağı modelinin olduğu hali ile kullanılmasının TAEİ süreci ile ilgili termal değişimleri tahmin etmede yetersiz geldiği ve sıcaklık değerlerini doğru tahmin edemediği tespit edilmiştir. Bu noktada geliştirilen benzetim modellerinde literatürdeki güncel çalışmalarda da kullanılan Goldak'ın çift elipsoidal ısı kaynağı modelinin TIG-TAEİ sürecine adapte edilmiş bir versiyonu kullanılmış ve bu modelin deneysel sonuçlarla daha iyi örtüştüğü gözlemlenmiştir.

TAEİ işlemi boyunca sıcaklık değişimlerine bağılı olarak meydana gelen mikroyapısal dönüşümlerin tahmini için hem difüzyonlu hem de difüzyonsuz katı hal faz dönüşümlerini hesaba katan bir model kullanılmış, böylece  $\alpha$  ve  $\beta$  faz oranlarının imalat süreci boyunca değişimleri incelenmiştir. Ayrıca hesaplanan faz oranları ve bu fazların literatürdeki sertlik verileri ile karışımlar kuralı uygulanarak, malzemenin sertlik değerini de tahmin edilebilen bir model ortaya konulmuştur. Termal değişimlerin malzemenin mekanik davranışına etkilerinin incelenmesi için benzetim modellerinde tamamıyla bağışık modelleme tekniği uygulanmıştır. Bununla birlikte mikroyapısal değişimlerin malzemenin akma davranışına etkisi hesaplanan fazların oranları ve akma değerleri dikkate alınmış, karışımlar kuralı yardımı ile Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak benzetim modellerine dahil edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, geliştirilen modelin deneysel olarak doğrulanabilmesi amacıyla laboratuvar ölçekli bir TAEİ cihazının tasarım ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Cihazın mekanik aksamı, kontrol sistemi ve bilgisayar yazılımı tez çalışması kapsamında özgün olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu sayede, laboratuvar ölçekli, üzerinde deneysel ölçüm araçları bulunduran bir sistem geliştirilerek, deneysel doğrulama çalışmalarında kullanılacak deney numuneleri üretilmiştir. Numunelerin üretimi sırasında süreç boyunca değişen sıcaklık vb. değerler ölçülerek kayıt edilmiştir. Bu ölçümler benzetim modellerinin kalibrasyonu ve

doğrulaması için kullanılmıştır. TAEİ sürecinin benzetim modellerinden elde edilen değerler, numunelerin üretimi sırasında elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Böylece geliştirilen modelin süreç boyunca değişen özellikleri tahmin etmedeki başarısı ortaya konulmuştur. Buna göre;

Geliştirilen SEY modelinden elde edilen sıcaklık profilleri ve maksimum sıcaklık değerlerinin deneysel ölçümlerde elde edilen değerlerle tutarlı olduğu görülmüştür. Bu durum, geliştirilen benzetim modellerinin, TAEİ sürecinde meydana gelen sıcaklık değişimlerini yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini göstermiştir.

TAEİ sürecinde, önemli konulardan bir tanesi ısı tesiri altındaki bölgenin boyutlarıdır. Geliştirilen benzetim modelleri ile zamana bağlı sıcaklık verileri kullanılarak ITAB boyutları tahmin edilebilmektedir. Bu noktada SEY analizlerinden elde edilen eriyik havuzu boyutları ve sıcaklık bantları, deney numunelerinin metalografik görüntüleri ile karşılaştırıldığında her iki yöntemde de eriyik havuzu ve ITAB yüksekliğinin benzer sonuçlar verdiği, metalografik görüntülerde kontrast farkına dayanarak tespit edilen geçiş bölgelerinin de analizlerde elde edilen sıcaklık bantları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Elde edilen bu uyumlu sonuçlar modelin ITAB bölgesini doğru tahmin edebildiğini göstermiştir.

Sonlu elemanlar modelinden elde edilen sertlik değerlerinin deneysel ölçümlerden elde edilen değerlerle oldukça uyumlu ve aynı trendlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, deneysel sonuçlarla, modelden elde edilen sonuçlar arasında bazı bölgelerde sayısal farklılıklar görülmüştür. Bu durumun, detayları tez metni içerisinde verilen, termal-mikroyapısal model kabullerinden kaynaklı olarak olduğu değerlendirilmektedir. Ancak, analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla genel anlamda uyumlu olması geliştirilen modelin sertlik değişiminin tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir.

Ayrıca model doğrulama çalışmaları kapsamında numuneler üzerinde yer değiştirme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, hem SEY analizlerinden, hem de deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçların birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum geliştirilen modellerin TAEİ ile üretim sürecinde parçalar üzerinde meydana gelene mekanik değişiklikleri tutarlı şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir.

Model doğrulama çalışmalarında farklı güç yoğunluklarında 2, zikzak ve eş yönlü olmak üzere farklı tarama desenlerinde 2 tane olmak üzere 4 farklı doğrulama numunesi kullanılmıştır. Bu sayede, yapılan kalibrasyon sonucunda modelin farklı üretim parametreleriyle de doğru sonuçlar üretebildiği gösterilmiştir. Yukarıda verilen tüm sonuçlar üretilen her numunede de ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Buna göre geliştirilen modelin farklı parametrelerle üretilen numuneler için de uyumlu sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu durum, geliştirilen benzetim modellerinin Ti-6Al-4V alaşımından TIG-TAEİ yöntemiyle üretilen parçalarda meydana gelen termal-mekanik-mikroyapısal değişimleri ve bunlara bağlı malzeme özelliklerini yüksek doğrulukta tahmin edebildiğini göstermiştir.

Doğrulama çalışmaları sırasında gerçekleştirilen deneyler ve bu deneylere aynı doğrultuda yapılan SEY analizleri, üretim parametrelerinin malzemeler üzerinde önemli değişiklikler oluşturduğunu göstermiştir. Bu noktada geliştirilen model, üretim parametrelerinin optimize edilerek istenilen yapıdaki malzemelerin TIG-TAEİ ile üretimine önemli katkılar sağlayabilir. Ayrıca, benzetim modelleri araştırmacılara TIG-TAEİ sürecinde meydana gelen değişimleri deneysel çalışmaya gerek kalmadan, geniş bir parametre aralığında ele alma imkanı sunmaktadır. Bu yönüyle geliştirilen model TIG-TAEİ sürecinin araştırılmasında ucuz ve pratik bir alternatif sunduğundan, konu ile ilgili yapılan çalışmaların yaygınlaşmasına katkı sağlayabilir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen modellerde süreç boyunca değişen özelliklerin geometriden bağımsız olarak ele alınabilmesi amacıyla doğrulama çalışmalarında duvar yapılı geometriler dikkate alınmıştır. Ancak TAEİ süreçlerinde değişik geometrilerde çok farklı parçaların üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu noktada gelecek çalışmalarda farklı geometrilerdeki parçalarla analizler gerçekleştirilerek malzeme davranışları incelenebilir.

TAEİ yönteminde kullanılan kaynaklı birleştirmenin doğası gereği üretilen yapıların geometrilerinde bozulmalar meydana gelebilmektedir. Öte yandan kaynak işleminde biriktirilen malzemeler üst bölgelerde kavisli yapılar oluşturarak katılaşmaktadır. Geliştirilen modellerde üretilen duvar yapıların dikdörtgen kesitli düzgün geometri olarak üretildiği kabul edilmiştir. Bu noktada, gelecekte lazerle tarama vb. optik yöntemler kullanılarak üretilen yapıların gerçek geometrileri elde edilerek geliştirilen benzetim modellerinin doğrulama çalışmaları tekrar edilebilir bu şekilde literatürde de yaygın olarak kullanılan dikdörtgen modelleme tekniğinin etkinliği araştırılabilir.

Geliştirilen benzetim modellerinde yalnızca katı hal faz dönüşümleri dikkate alınmıştır. Bunun yanında malzemenin davranışına etki eden gerilmenin neden olduğu faz dönüşümleri, tane yapısı, ve iç yapı hataları gibi faktörler geliştirilen benzetim modellerinde dikkate alınmamıştır. Gelecekte bu gibi faktörler modellere dahil edilerek benzetim modelinin hesaplama performansı iyileştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Abe, T., Kaneko, J., & Sasahara, H. (2020). Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101357>
- Abusalma, H., Eisazadeh, H., Hejripour, F., Bunn, J., & Aidun, D. K. (2022). Parametric study of residual stress formation in Wire and Arc Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 75(September 2021), 863–876. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.043>
- Afkhami, S., Javaheri, V., Dabiri, E., Piili, H., & Björk, T. (2022). Effects of manufacturing parameters, heat treatment, and machining on the physical and mechanical properties of 13Cr10Ni1.7Mo2Al0.4Mn0.4Si steel processed by laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*, 832(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142402>
- Ahmad, B., van der Veen, S. O., Fitzpatrick, M. E., & Guo, H. (2018). Measurement and modelling of residual stress in wire-feed additively manufactured titanium. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 34(18), 2250–2259. <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1528747>
- Ahmad, B., Zhang, X., Guo, H., Fitzpatrick, M. E., Neto, L. M. S. C., & Williams, S. (2022). Influence of Deposition Strategies on Residual Stress in Wire + Arc Additive Manufactured Titanium Ti-6Al-4V. *Metals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/met12020253>
- Ahn, J., He, E., Chen, L., Wimpory, R. C., Dear, J. P., & Davies, C. M. (2017). Prediction and measurement of residual stresses and distortions in fibre laser welded Ti-6Al-4V considering phase transformation. *Materials & design*, 115, 441-457.
- Akgun, E., Zhang, X., Biswal, R., Zhang, Y., & Doré, M. (2021). Fatigue of wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V in presence of process-induced porosity defects. *International Journal of Fatigue*, 150(May). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106315>
- Anca, A., Fachinotti, V. D., Escobar-Palafox, G., Cardona, A. 2011. "Computational Modelling of Shaped Metal Deposition". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 85, 84–106.
- Antony, K., Arivazhagan, N., & Senthilkumaran, K. (2014). Numerical and Experimental Investigations on Laser Melting of Stainless Steel 316L Metal Powders. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(3), 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.04.001>
- Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Tabernero, I., Larrañaga, O., & Lamikiz, A. (2020a). Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 15454–15466. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.012>
- Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Tabernero, I., Larrañaga, O., & Lamikiz, A. (2020b). Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 15454-15466.
- Attar, E., & Körner, C. (2011). Lattice Boltzmann Model for Thermal Free Surface Flows with Liquid-Solid Phase Transition. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(1), 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.09.006>
- Avrami, M. (1941). Granulation, Phase Change, and Microstructure Kinetics of Phase Change. III. The *Journal of Chemical Physics*, 9(2), 177–184. <https://doi.org/10.1063/1.1750872>
- Ayan, Y., & Kahraman, N. (2021). Wire Arc Additive Manufacturing of Low-Carbon Mild Steel Using Two

Different 3D Printers. *Physics of Metals and Metallography*, 122(14), 1521–1529. <https://doi.org/10.1134/S0031918X21140039>

Babu, B., Lundbäck, A., & Lindgren, L.-E. (2019). Simulation of Ti-6Al-4V Additive Manufacturing Using Coupled Physically Based Flow Stress and Metallurgical Model. *Materials*, 12(23), 3844. <https://doi.org/10.3390/ma12233844>

Bandari, Y. K., Lee, Y. S., Nandwana, P., Richardson, B. S., Adediran, A. I., & Love, L. J. (2020). Effect of inter-layer cooling time on distortion and mechanical properties in metal additive manufacturing. *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2018, Lmd*, 425–437.

Benakis, M., Costanzo, D., & Patran, A. (2020). Current mode effects on weld bead geometry and heat affected zone in pulsed wire arc additive manufacturing of Ti-6-4 and Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 60(October), 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.018>

Baufeld, B., Biest, O. Van der, & Gault, R. (2010). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*, 31(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.032>

Baykasoglu, C., Akyildiz, O., Candemir, D., Yang, Q., & To, A. C. (2018). Predicting Microstructure Evolution during Directed Energy Deposition Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 140(5), 1–11. <https://doi.org/10.1115/1.4038894>

Baykasoğlu, C., Akyildiz, O., Tunay, M., & To, A. C. (2020). A process-microstructure finite element simulation framework for predicting phase transformations and microhardness for directed energy deposition of Ti6Al4V. *Additive Manufacturing (C. 35)*. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101252>

Béraud, N., Chergui, A., Limousin, M., Villeneuve, F., & Vignat, F. (2022). An indicator of porosity through simulation of melt pool volume in aluminum wire arc additive manufacturing. *Mechanics and Industry*, 23, 1–8. <https://doi.org/10.1051/meca/2021052>

Birmingham, M. J., Thomson-Larkins, J., St John, D. H., & Dargusch, M. S. (2018). Sensitivity of Ti-6Al-4V components to oxidation during out of chamber Wire + Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 258, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.014>

Bielik, M. (2020). Thermo-mechanical analysis of plasma-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V components using Simufact Welding 8.0 (Doctoral dissertation, Wien).

Brandl, E., Michailov, V., Viehweger, B., & Leyens, C. (2011a). Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads. *Surface and Coatings Technology*, 206(6), 1120–1129. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.095>

Brandl, E., Michailov, V., Viehweger, B., & Leyens, C. (2011b). Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part II: Hardness and dimensions of single beads. *Surface and Coatings Technology*, 206(6), 1130–1141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.094>

Cai, X., Dong, B., Yin, X., Lin, S., Fan, C., & Yang, C. (2020). Wire arc additive manufacturing of titanium aluminide alloys using two-wire TOP-TIG welding: Processing, microstructures, and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 35(May), 101344. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101344>

Cambon, C., Bendaoud, I., Rouquette, S., & Soulié, F. (2022). A WAAM benchmark: From process parameters to thermal effects on weld pool shape, microstructure and residual stresses. *Materials Today Communications*, 33(March). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104235>

Chandrasekaran, S., Hari, S., & Amirthalingam, M. (2020). Wire arc additive manufacturing of functionally graded material for marine risers. *Materials Science and Engineering: A*, 792(June), 139530.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139530>

Chen, C., Fan, C., Cai, X., Lin, S., Liu, Z., Fan, Q., & Yang, C. (2019). Investigation of formation and microstructure of Ti-6Al-4V weld bead during pulse ultrasound assisted TIG welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 46(92), 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.014>

Chen, S., Gao, H., Zhang, Y., Wu, Q., Gao, Z., & Zhou, X. (2022). Review on residual stresses in metal additive manufacturing: formation mechanisms, parameter dependencies, prediction and control approaches. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 2950–2974. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.054>

Chergui, A., Beraud, N., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2021). Finite element modeling and validation of metal deposition in wire arc additive manufacturing. *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III: Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2020, June 2-4, 2020*, 61–66.

Chergui, A., Villeneuve, F., Béraud, N., & Vignat, F. (2022). Thermal simulation of wire arc additive manufacturing: a new material deposition and heat input modelling. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 16(1), 227–237. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00824-7>

Chiumenti, M., Cervera, M., Salmi, A., Agelet de Saracibar, C., Dialami, N., & Matsui, K. (2010). Finite element modeling of multi-pass welding and shaped metal deposition processes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(37–40), 2343–2359. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.02.018>

Chowdhury, S., Yadaiah, N., Prakash, C., Ramakrishna, S., Dixit, S., Gupta, L. R., & Buddhi, D. (2022). Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2109–2172. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.121>

Chua, C., Liu, Y., Williams, R. J., Chua, C. K., & Sing, S. L. (2024). In-process and post-process strategies for part quality assessment in metal powder bed fusion: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 73(November 2023), 75–105. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.01.004>

Crespo, A. (2011). Modelling of heat transfer and phase transformations in the rapid manufacturing of titanium components. *Convection and conduction heat transfer*, 315–340.

Çam, G. (2022). Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Materials Today: Proceedings*, 62(xxxx), 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.137>

Dai, D., & Gu, D. (2016). Influence of Thermodynamics within Molten Pool on Migration and Distribution State of Reinforcement During Selective Laser Melting of AlN/AlSi10Mg Composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 100, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.004>

Denlinger, E. R., & Michaleris, P. (2016). Effect of Stress Relaxation on Distortion in Additive Manufacturing Process Modeling. *Additive Manufacturing*, 12, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.011>

Dezaki, M. L., Serjouei, A., Zolfagharian, A., Fotouhi, M., Moradi, M., Ariffin, M. K. A., & Bodaghi, M. (2022). A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process. *Advanced powder materials*, 1(4), <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100054>

Ding, D., Zhang, S., Lu, Q., Pan, Z., Li, H., & Wang, K. (2021). The well-distributed volumetric heat source model for numerical simulation of wire arc additive manufacturing process. *Materials Today Communications*, 27(May), 102430. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102430>

Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Williams, S., Wang, F., & Almeida, P. S. (2014). A computationally

efficient finite element model of wire and arc additive manufacture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1–4), 227–236. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5261-x>

Dong, W., Jimenez, X. A., & To, A. C. (2023). Temperature-dependent modified inherent strain method for predicting residual stress and distortion of Ti6Al4V walls manufactured by wire-arc directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103386>

Donoghue, J., Davis, A. E., Daniel, C. S., Garner, A., Martina, F., Quinta da Fonseca, J., & Prangnell, P. B. (2020). On the observation of annealing twins during simulating  $\beta$ -grain refinement in Ti–6Al–4V high deposition rate AM with in-process deformation. *Acta Materialia*, 186, 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.009>

Evans, S. I., Wang, J., Qin, J., He, Y., Shepherd, P., & Ding, J. (2022, October). A review of WAAM for steel construction—Manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions. In *Structures* (Vol. 44, pp. 1506-1522). Elsevier

Fachinotti, V. D., Cardona, A., Baufeld, B., & Van Der Biest, O. (2012). Finite-element modelling of heat transfer in shaped metal deposition and experimental validation. *Acta Materialia*, 60(19), 6621–6630. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.08.031>

Fan, Y., Cheng, P., Yao, Y. L., Yang, Z., & Eglund, K. (2005). Effect of Phase Transformations on Laser Forming of Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of Applied Physics*, 98(1). <https://doi.org/10.1063/1.1944202>

Ferro, P., Berto, F., Bonollo, F., Romanin, L., & Salemi, G. (2020). Post welding heat treatment improving mechanical properties on Ti-6Al-4V. *Procedia Structural Integrity*, 26, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.003>

Freire, B., Babcinski, M., Ferreira, L., Señaris, B., Vidal, F., & Neto, P. (2020). Direct energy deposition: A complete workflow for the additive manufacturing of complex shape parts. *Procedia Manufacturing*, 51, 671–677. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.094>

Ganeriwala, R. K., Strantza, M., King, W. E., Clausen, B., Phan, T. Q., Levine, L. E., ... & Hodge, N. E. (2019). Evaluation of a thermomechanical model for prediction of residual stress during laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 27, 489-502.

Ghafoori, E., Dahaghin, H., Diao, C., Pichler, N., Li, L., Mohri, M., Ding, J., Ganguly, S., & Williams, S. (2023). Fatigue strengthening of damaged steel members using wire arc additive manufacturing. *Engineering Structures*, 284(March). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115911>

Giarollo, D. F., Mazzaferro, C. C. P., & Mazzaferro, J. A. E. (2022). Comparison Between Two Heat Source Models for Wire-Arc Additive Manufacturing using GMAW Process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03307-8>

Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., & Mehrpouya, M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 53(September), 124–149. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>

Gong, G., Ye, J., Chi, Y., Zhao, Z., Wang, Z., Xia, G., Du, X., Tian, H., Yu, H., & Chen, C. (2021). Research status of laser additive manufacturing for metal: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 855–884. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.050>

Gope, D. K., Kumar, U., Chattopadhyaya, S., & Mandal, S. (2018). Experimental investigation of pug cutter embedded TIG welding of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(6), 2715–2721. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0528-7>

Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 57(3), 133–164.

<https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>

Gudur, S., Nagallapati, V., Pawar, S., Muvvala, G., & Simhambhatla, S. (2021). Materials Today : Proceedings A study on the effect of substrate heating and cooling on bead geometry in wire arc additive manufacturing and its correlation with cooling rate. 41, 431–436.

Guo, X., Chu, Z., Shao, D., Li, P., & Wu, B. (2024). Wire-arc directed energy deposition of Ti-6Al-4V alloy using CO<sub>2</sub> active interpass cooling: phase composition, grain orientation, texture strength, dislocation density and mechanical property. *Journal of Materials Research and Technology*, 28(October 2023), 3196–3206. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.262>

Hahn, J. D., Shin, Y. C., & Krane, M. J. M. (2007). Laser transformation hardening of Ti-6Al-4V in solid state with accompanying kinetic model. *Surface engineering*, 23(2), 78-82.

He, X., & Mazumder, J. (2007). Transport phenomena during direct metal deposition. *Journal of Applied Physics*, 101(053113). <https://doi.org/10.1063/1.2710780>

Heigel, J. C., Michaleris, P., & Reutzel, E. W. (2015). Thermo-Mechanical Model Development and Validation of Directed Energy Deposition Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 5, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.10.003>

Hirono, Y., Mori, T., Sugimoto, S., & Miyata, Y. (2024). CIRP Annals - Manufacturing Technology Investigation on influence of thermal history on quality of workpiece created by directed energy deposition. 00, 10–13.

Ho, A., Zhao, H., Fellowes, J. W., Martina, F., Davis, A. E., & Prangnell, P. B. (2019). On the origin of microstructural banding in Ti-6Al4V wire-arc based high deposition rate additive manufacturing. *Acta Materialia*, 166, 306–323. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.038>

Hönnige, J. R., Colegrove, P. A., Ahmad, B., Fitzpatrick, M. E., Ganguly, S., Lee, T. L., & Williams, S. W. (2018). Residual stress and texture control in Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured intersections by stress relief and rolling. *Materials and Design*, 150, 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.065>

Irwin, J., Reutzel, E. W., Michaleris, P., Keist, J., Nassar, A. R. 2016. "Predicting Microstructure from Thermal History during Additive Manufacturing for Ti-6Al-4V". *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 138(11), 1–11.

Jiang, J., Zhang, S., Tao, X., Peng, D., Yao, M., & Yi, C. (2023). Materials Science & Engineering A Creep behavior of Ti – 6Al – 4V fabricated by electron beam directed energy deposition. 886(June).

Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1983). A Computational Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain, High Strain Rates and High Pressures. the Seventh International Symposium on Ballistics, 541–547.

Johnson, W. A., & Mehl, R. F. (1939). Reaction Kinetics in Processes of Nucleation and Growth. *Transactions of the AIME*, 135, 416–458. *Transactions of the AIME*, 135, 416–458.

Karpagaraj, A., Rajesh Kumar, N., Sankaranarayanan, K., Siva Shanmugam, N., & Cheepu, M. (2020). Simulation and Experimental Studies on Arc Efficiency and Mechanical Characterization for GTA-Welded Ti-6Al-4V Sheets. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(11), 9639–9650. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04876-x>

Kashaev, N., Odermatt, A., Vázquez, L., & Álvarez, P. (2024). Fatigue life assessment of WAAM-processed Ti-6Al-4V. *Procedia Structural Integrity*, 54(2023), 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.094>

Kawalkar, R., Dubey, H. K., & Lokhande, S. P. (2021). Wire arc additive manufacturing: A brief review on

advancements in addressing industrial challenges incurred with processing metallic alloys. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1971–1978. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.329>

Khairallah, S. A., & Anderson, A. (2014). Mesoscopic Simulation Model of Selective Laser Melting of Stainless Steel Powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2627–2636. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.001>

Khan, A. U., & Madhukar, Y. K. (2020). An Economic Design and Development of the Wire Arc Additive Manufacturing Setup. *Procedia CIRP*, 91, 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.166>

Kelly, S. M. 2004. "Thermal and Microstructure Modeling of Metal Deposition Processes with Application to Ti-6Al-4V by".

Koistinen, D., & Marburger, R. (1959). A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels. *Acta Metallurgica*, 7, 59–60.

Kolmogorov, A. N. (1937). On the Statistical Theory of the Crystallization of Metals. *Bull. Acad. Sci. USSR*, 1, 355–359.

Körner, C., Attar, E., & Heintl, P. (2011). Mesoscopic Simulation of Selective Beam Melting Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), 978–987. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.016>

Kumar, N., Bhavsar, H., Mahesh, P. V. S., Srivastava, A. K., Bora, B. J., Saxena, A., & Dixit, A. R. (2022). Wire Arc Additive Manufacturing – A revolutionary method in additive manufacturing. *Materials Chemistry and Physics*, 285(March), 126144. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126144>

Kumar, B., M. D., & Manikandan, M. (2022). Assessment of Process, Parameters, Residual Stress Mitigation, Post Treatments and Finite Element Analysis Simulations of Wire Arc Additive Manufacturing Technique. *Metals and Materials International (C. 28, Sayı 1, ss. 54–111)*. Korean Institute of Metals and Materials. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01015-5>

Kumar, V., Singh, A., Bishwakarma, H., & Mandal, A. (2023). Simulation of Metallic Wire-Arc Additive Manufacturing (Waam) Process Using Simufact Welding Software. *Journal of Manufacturing Engineering*, 18(2), 080–085. <https://doi.org/10.37255/jme.v18i2pp080-085>

Kumar, B., M., Sathiya, P., & Senthil, S. M. (2023). A critical review of wire arc additive manufacturing of nickel-based alloys: principles, process parameters, microstructure, mechanical properties, heat treatment effects, and defects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (C. 45, Sayı 3)*. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04077-1>

Le, V. T., Nguyen, H. D., Bui, M. C., Pham, T. Q. D., Le, H. T., Tran, V. X., & Tran, H. S. (2022). Rapid and accurate prediction of temperature evolution in wire plus arc additive manufacturing using feedforward neural network. *Manufacturing Letters*, 32, 28–31. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.02.003>

Li, J. L. Z., Alkahari, M. R., Rosli, N. A. B., Hasan, R., Sudin, M. N., & Ramli, F. R. (2019). Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing. *International Journal of Automation Technology*, 13(3), 346–353. <https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346>

Li, Y., Su, C., & Zhu, J. (2022). Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. *Results in Engineering*, 13(September 2021), 100330. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>

Liang, X., Cheng, L., Chen, Q., Yang, Q., & To, A. C. (2018). A modified method for estimating inherent strains from detailed process simulation for fast residual distortion prediction of single-walled structures fabricated by directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 23(July), 471–486.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.029>

Liang, Z., Liao, Z., Zhang, H., Li, Z., Wang, L., Chang, B., & Du, D. (2024). Generation and Suppression of Pendant Droplet Oscillation in Electron Beam Directed Energy Deposition. *Engineering*.

Lin, Z., Goulas, C., Li, Y., Fa, Y., Qiao, L., Sun, Z., Cao, R., Ya, W., & Yu, X. (2023). The effect of multiple thermal cycles on Ti-6Al-4V deposits fabricated by wire-arc directed energy deposition: Microstructure evolution, mechanical properties, and corrosion resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 947, 169614. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169614>

Lin, Z., Song, K., & Yu, X. (2021). A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes* (C. 70, ss. 24–45). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>

Lindgren, L. E. (2006). Numerical modelling of welding. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(48–49), 6710–6736. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.08.018>

Lindgren, L. E., Lundbäck, A., Fisk, M., Pederson, R., & Andersson, J. (2016). Simulation of additive manufacturing using coupled constitutive and microstructure models. *Additive Manufacturing*, 12, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.005>

Ling, Y., Ni, J., Antonissen, J., Ben Hamouda, H., Vande Voorde, J., & Abdel Wahab, M. (2023). Numerical prediction of microstructure and hardness for low carbon steel wire Arc additive manufacturing components. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 122(October 2022), 102664. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102664>

Liu, J., Xu, Y., Ge, Y., Hou, Z., & Chen, S. (2020). Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(1–2), 149–198. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>

Liu, D., Wu, D., Wang, R., Shi, J., Niu, F., & Ma, G. (2022). Formation mechanism of Al-Zn-Mg-Cu alloy fabricated by laser-arc hybrid additive manufacturing: Microstructure evaluation and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102554>

Lockett, H., Ding, J., Williams, S., & Martina, F. (2017). Design for wire + Arc additive manufacture: Design rules and build orientation selection. *Journal of Engineering Design*, 28(7–9), 568–598. <https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1365826>

Longuet, A., Robert, Y., Aeby-Gautier, E., Appolaire, B., Mariage, J. F., Colin, C., & Cailletaud, G. (2009). A Multiphase Mechanical Model for Ti-6Al-4V: Application to the Modeling of Laser Assisted Processing. *Computational Materials Science*, 46(3), 761–766. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.05.012>

Lu, X., Lin, X., Chiumenti, M., Cervera, M., Hu, Y., Ji, X., Ma, L., & Huang, W. (2019). In situ measurements and thermo-mechanical simulation of Ti-6Al-4V laser solid forming processes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 153–154(January), 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.043>

Lundbäck, A., & Lindgren, L. E. (2011). Modelling of metal deposition. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(10), 1169–1177. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2011.05.005>

Ma, D., Xu, C., Sui, S., Tian, J., Guo, C., Wu, X., Zhang, Z., Shechtman, D., & Remennik, S. (2023). Enhanced strength-ductility synergy in a wire and arc additively manufactured Mg alloy via tuning interlayer dwell time. *Journal of Magnesium and Alloys*, 11(12), 4696–4709. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.01.015>

Madhavadas, V., Srivastava, D., Chadha, U., Aravind Raj, S., Sultan, M. T. H., Shahar, F. S., & Shah, A. U. M. (2022). A review on metal additive manufacturing for intricately shaped aerospace components. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (C. 39, ss. 18–36). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.005>

- Manoj, A., Rao, M. A., Basha, M. M., Basha, S. M., & Sankar, M. R. (2019). State of art on wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2608–2615. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.551>
- Marimuthu, S., Clark, D., Allen, J., Kamara, A. M., Mativenga, P., Li, L., & Scudamore, R. (2013). Finite element modelling of substrate thermal distortion in direct laser additive manufacture of an aero-engine component. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 227(9), 1987–1999. <https://doi.org/10.1177/0954406212470363>
- Marion, G., Cailletaud, G., Colin, C., & Mazière, M. (2014, October). A finite element model for the simulation of direct metal deposition. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (pp. 834-841). AIP Publishing.
- Masmoudi, A., Bolot, R., & Coddet, C. (2015). Investigation of the Laser-Powder-Atmosphere Interaction Zone during the Selective Laser Melting Process. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.05.008>
- Mathews, R., Karandikar, J., Tyler, C., & Smith, S. (2024). Residual stress accumulation in large-scale Ti-6Al-4V wire-arc additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 121, 180–185. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.247>
- McNamara, K., Ji, Y., Lia, F., Promopattum, P., Yao, S. C., Zhou, H., Wang, Y., Chen, L. Q., & Martukanitz, R. P. (2022). Predicting phase transformation kinetics during metal additive manufacturing using non-isothermal Johnson-Mehl-Avrami models: Application to Inconel 718 and Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102478>
- Mehdi, B., Badji, R., Ji, V., Allili, B., Bradai, D., Deschaux-Beaume, F., & Soulié, F. (2016). Microstructure and residual stresses in Ti-6Al-4V alloy pulsed and unpulsed TIG welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 231, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.018>
- Mi, G., Wei, Y., Zhan, X., Gu, C., & Yu, F. (2014). A coupled thermal and metallurgical model for welding simulation of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2434–2443. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.011>
- Mishra, R., Imam, M., Chinthapenta, V., & Mastanaiah, P. (2023). Thermo-mechanical modelling of the wire arc based additively manufactured Inconel 625 superalloy. *Materials Today: Proceedings*, May. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.142>
- Mishurova, T., Sydow, B., Thiede, T., Sizova, I., Ulbricht, A., Bambach, M., & Bruno, G. (2020). Residual stress and microstructure of a Ti-6Al-4V wire arc additive manufacturing hybrid demonstrator. *Metals*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/met10060701>
- Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., & Campatelli, G. (2016). Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process. *Procedia CIRP*, 55, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.024>
- Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., & Campatelli, G. (2017). Finite Element mesh coarsening for effective distortion prediction in Wire Arc Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 18, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.010>
- Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., & Campatelli, G. (2018a). Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement. *Manufacturing Letters*, 17, 14–18. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.06.004>
- Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., & Campatelli, G. (2018b). Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique. *Additive Manufacturing*, 21(December

2017), 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.007>

Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2021). Progress in Materials Science Binder jet 3D printing — Process parameters , materials , properties ., Progress in Materials Science, 119(June 2020), 100707. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>

Mukhtarkhanov, M., Perveen, A., & Talamona, D. (2020). Application of stereolithography based 3D printing technology in investment casting. Micromachines, 11(10). <https://doi.org/10.3390/mi11100946>

Mur, F. G., Rodríguez, D., & Planell, J. A. (1996). Influence of tempering temperature and time on the  $\alpha'$ -Ti-6Al-4V martensite. Journal of alloys and compounds, 234(2), 287-289.

Murgau, C. C., Pederson, R., & Lindgren, L. E. (2012). A Model for Ti-6Al-4V Microstructure Evolution for Arbitrary Temperature Changes. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 20(5), 055006. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/20/5/055006>

Murgau, C. C., Lundbäck, A., Akerfeldt, P., & Pederson, R. (2019). Temperature and microstructure evolution in Gas Tungsten Arc Welding Wire Feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V. Materials, 12(21). <https://doi.org/10.3390/ma12213534>

Murugan, D., P., Vijayananth, S., Natarajan, M. P., Jayabalakrishnan, D., Arul, K., Jayaseelan, V., & Elanchezhian, J. (2022). A current state of metal additive manufacturing methods: A review. Materials Today: Proceedings, 59(xxxx), 1277–1283. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.503>

Nagasai, B. P., Malarvizhi, S., & Balasubramanian, V. (2022). Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 36, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.005>

Navarro, M., Matar, A., Diltemiz, S. F., & Eshraghi, M. (2022). Development of a low-cost wire arc additive manufacturing system. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 6(1). <https://doi.org/10.3390/jmmp6010003>

Neela, V., & De, A. (2009). Three-Dimensional Heat Transfer Analysis of LENS Process Using Finite Element Method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 45(9–10), 935–943. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2024-9>

Nguyen, H. D., Pramanik, A., Basak, A. K., Dong, Y., Prakash, C., Debnath, S., Shankar, S., Jawahir, I. S., Dixit, S., & Buddhi, D. (2022). A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties. Journal of Materials Research and Technology, 18, 4641–4661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>

Oberloier, S., Holmes, W. J., Reich, L. A., & Pearce, J. M. (2022). Particle Swarm Optimization of Printing Parameters for Open-source TIG-based Metal 3D Printing. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 1(4), 100050. <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2022.100050>

Okulov, I. V., Bönisch, M., Okulov, A. V., Volegov, A. S., Attar, H., Ehtemam-Haghighi, S., Calin, M., Wang, Z., Hohenwarter, A., Kaban, I., Prashanth, K. G., & Eckert, J. (2018). Phase formation, microstructure and deformation behavior of heavily alloyed TiNb- and TiV-based titanium alloys. Materials Science and Engineering: A, 733(March), 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.047>

Omoniyi, P. O., Mahamood, R. M., Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., Akinlabi, S. A., & Akinlabi, E. T. (2023). TIG welding of Ti6Al4V: Effect of Ti6Al4V ELI as filler metal. Archives of Metallurgy and Materials, 769-773. <https://doi.org/10.24425/amm.2023.142460>

Onuikwe, B., Heer, B., & Bandyopadhyay, A. (2018). Additive manufacturing of Inconel 718—Copper alloy

- bimetallic structure using laser engineered net shaping (LENSTM). *Additive Manufacturing*, 21(November 2017), 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.007>
- Pan, Z., Liang, S. Y., Garmestani, H., & Shih, D. S. (2016). Prediction of Machining-Induced Phase Transformation and Grain Growth of Ti-6Al-4 V Alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1–4), 859–866. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8497-4>
- Patel, D., & Pandey, A. (2023). Powder bed fusion of aluminium alloys: A review of experimental explorations - Microstructure, mechanical properties, and recent advances. *Materials Today: Proceedings*, 82, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.228>
- Peyre, P., Aubry, P., Fabbro, R., Neveu, R., & Longuet, A. (2008). Analytical and Numerical Modelling of the Direct Metal Deposition Laser Process. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 025403.
- Rajora, A., Kumar, R., Singh, R., Sharma, S., Kapoor, S., & Mishra, A. (2022). 3D Printing: a Review on the Transformation of Additive Manufacturing. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 14(4), 35–47. <https://doi.org/10.22159/ijap.2022v14i4.44597>
- Raut, L. P., & Taiwade, R. V. (2021). Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 4768–4791. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05871-5>
- Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
- Rosli, N. A., Alkahari, M. R., bin Abdollah, M. F., Maidin, S., Ramli, F. R., & Herawan, S. G. (2021). Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 2127–2145. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.002>
- Rouf, S., Malik, A., Singh, N., Raina, A., Naveed, N., Siddiqui, M. I. H., & Haq, M. I. U. (2022). Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 258–274. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.001>
- Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. (2019). Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(16). <https://doi.org/10.3390/app9163316>
- Sampaio, R. F. V., Pragana, J. P. M., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., Nielsen, C. V., & Martins, P. A. F. (2023). Modelling of wire-arc additive manufacturing – A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6(May). <https://doi.org/10.1016/j.aime.2023.100121>
- Saracibar, C. A. De, Chiumenti, M., Lundbäck, A., & Cervera, M. (2014). Shaped Metal Deposition Processes. *Encyclopedia of Thermal Stresses*, 7(December), 4346–4355. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7>
- Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., & Thompson, S. M. (2015). An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, 8, 12–35. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.002>
- Shen, H., Lin, J., Zhou, Z., & Liu, B. (2022). Effect of induction heat treatment on residual stress distribution of components fabricated by wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 75(October 2021), 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.018>
- Singh, N., S., Deoghare, A. B., & Nirsanametla, Y. (2022). Study of thermal behavior during the directed energy deposition (DED) of Ti6Al4V alloy using finite element modeling (FEM). *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.238>

Short, A. B. (2009). Gas tungsten arc welding of  $\alpha + \beta$  titanium alloys: A review. *Materials Science and Technology*, 25(3), 309–324. <https://doi.org/10.1179/174328408X389463>

Srivastava, M., Rathee, S., Tiwari, A., & Dongre, M. (2023). Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour. *Materials Chemistry and Physics*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126988>

Srivastava, A. K., Kumar, A., Kumar, P., Gautam, P., & Dogra, N. (2023). Research Progress in metal additive manufacturing: Challenges and Opportunities. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01661-6>

Sun, W., Shan, F., Zong, N., Dong, H., & Jing, T. (2021a). A simulation and experiment study on phase transformations of Ti-6Al-4V in wire laser additive manufacturing. *Materials and Design*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109843>

Sun, W., Shan, F., Zong, N., Dong, H., & Jing, T. (2021b). "Simulation of solidified  $\beta$  grain for Ti-6Al-4V during wire laser additive manufacturing by three-dimensional cellular automaton method". *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 29(6), 065006.

Svetlizky, D., Zheng, B., Vyatskikh, A., Das, M., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J., & Eliaz, N. (2022). Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials. *Materials Science and Engineering: A*, 840(March), 142967. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142967>

Syed, A. K., Plaskitt, R., Hill, M., Pinter, Z., Ding, J., Zboray, R., Williams, S., & Zhang, X. (2023). Strain controlled fatigue behaviour of a wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 171(October 2022), 107579. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107579>

Syed, A. K., Zhang, X., Caballero, A., Shamir, M., & Williams, S. (2021). Influence of deposition strategies on tensile and fatigue properties in a wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 149(February), 106268. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106268>

Taghian, M., Hossein, M., Lannunziata, E., Del, G., Iuliano, L., & Saboori, A. (2023). Laser powder bed fusion of metallic components : Latest progress in productivity , quality , and cost perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, 27(November), 6484–6500. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.049>

Teixeira, J., Maréchal, D., Wimpory, R. C., Denis, S., Lefebvre, F., & Frappier, R. (2022). Formation of residual stresses during quenching of Ti17 and Ti-6Al-4V alloys: Influence of phase transformations. *Materials Science and Engineering: A*, 832, 142456.

Thompson, S. M., Bian, L., Shamsaei, N., & Yadollahi, A. (2015). An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part I: Transport Phenomena, Modeling and Diagnostics. *Additive Manufacturing*, 8, 36–62. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.001>

Tolvanen, S., & Pederson, R. (2024). Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Welds Produced with Different Processes.

Tozlu, M. T. (2022). Ti-6Al-4V Alaşımının Toz Beslemeli Lazer Yönlendirilmiş Enerji Yığılma Eklemeli İmalat Sürecinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Benzetimi. Doktora Tezi, Hitit Üniversitesi, Çorum.

Treutler, K., & Wesling, V. (2021). The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/app11188619>

Tsuji, Y. (2007). Multi-scale modeling of dense phase gas - particle flow. 62, 3410–3418. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.090>

Tunay, M., Baykasoğlu, C., Akyıldız, O., & C. To, A. (2023). A fully coupled thermal-microstructural-

- mechanical finite element process model for directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V. *Science and Technology of Welding and Joining*, 28(2), 118-127. <https://doi.org/10.1080/13621718.2022.2127211>
- Ty, A., Balcaen, Y., Mokhtari, M., & Alexis, J. (2022). Influence of deposit and process parameters on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V obtained by DED-W (PAW). *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 2853-2869. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.169>
- Umaras, E., & Tsuzuki, M. S. G. (2017). Additive Manufacturing - Considerations on Geometric Accuracy and Factors of Influence. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14940-14945. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2545>
- Ungethüm, T., Spaniol, E., Hertel, M., & Füssel, U. (2020). Analysis of metal transfer and weld geometry in hot-wire GTAW with indirect resistive heating. *Welding in the World*, 64(12), 2109-2117. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00986-0>
- Vastola, G., Zhang, G., Pei, Q. X., & Zhang, Y. W. (2016). Modeling the Microstructure Evolution During Additive Manufacturing of Ti6Al4V: A Comparison Between Electron Beam Melting and Selective Laser Melting. *Jom*, 68(5), 1370-1375. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1890-5>
- Veiga, F., Suarez, A., Aldalur, E., & Artaza, T. (2022). Wire arc additive manufacturing of invar parts: Bead geometry and melt pool monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 189(June 2021), 110452. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110452>
- Vempati R., S., Brahma Raju, K., & Venkata Subbaiah, K. (2018). Optimization of Welding Parameters of Ti 6al 4v Cruciform shape Weld joint to Improve Weld Strength Based on Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4948-4957. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.072>
- Vora, J., Parmar, H., Chaudhari, R., Khanna, S., Doshi, M., & Patel, V. (2022). Experimental investigations on mechanical properties of multi-layered structure fabricated by GMAW-based WAAM of SS316L. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2748-2757. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.074>
- Wan, L., Huang, Y., Lv, S., Huang, T., Li, C., & Feng, J. (2016). Narrow-gap tungsten inert gas welding of 78-mm-thick Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 32(15), 1545-1552. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1131941>
- Wang, Z., Stoica, A. D., Ma, D., & Beese, A. M. (2017). Stress relaxation behavior and mechanisms in Ti-6Al-4V determined via in situ neutron diffraction: Application to additive manufacturing. *Materials Science and Engineering A*, 707, 585-592. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.071>
- Wang, J., Lin, X., Wang, J., Yang, H., Zhou, Y., Wang, C., Li, Q., & Huang, W. (2018). Grain morphology evolution and texture characterization of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Journal of Alloys and Compounds*, 768, 97-113. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.235>
- Wang, J., Lin, X., Li, J., Xue, A., Liu, F., Huang, W., & Liang, E. (2020a). A study on obtaining equiaxed prior- $\beta$  grains of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A (C. 772)*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138703>
- Wang, J., Lin, X., Wang, M., Li, J., Wang, C., & Huang, W. (2020b). Effects of subtransus heat treatments on microstructure features and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 776(November 2019), 139020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139020>
- Wang, L., & Felicelli, S. (2006). Analysis of thermal phenomena in LENSTM deposition. *Materials Science and Engineering A*, 435-436, 625-631. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.087>

- Wang, X., Wang, A., Wang, K., & Li, Y. (2019). Process stability for GTAW-based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 25(5), 809–819. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2018-0046>
- Wang, C., Suder, W., Ding, J., & Williams, S. (2021). The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116842>
- Warsi, R., Kazmi, K. H., & Chandra, M. (2021). Mechanical properties of wire and arc additive manufactured component deposited by a CNC controlled GMAW. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.114>
- Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire + Arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 32(7), 641–647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
- Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., & Fei, Z. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>
- Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Fan, H., Shi, X., Fu, J., & Ma, S. (2017a). Effect of molten pool size on microstructure and tensile properties of wire arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, 10(7), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma10070749>
- Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Shi, X., Ma, Q., Tang, S., Fan, H., & Ma, S. (2017b). Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(16), 1881–1886. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1364860>
- Wu, Q., Mukherjee, T., Liu, C., Lu, J., & DebRoy, T. (2019). Residual stresses and distortion in the patterned printing of titanium and nickel alloys. *Additive Manufacturing*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100808>
- Xian, G., Oh, J. mok, Lee, J., Cho, S. M., Yeom, J. T., Choi, Y., & Kang, N. (2022). Effect of heat input on microstructure and mechanical property of wire-arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy. *Welding in the World (C. 66, Sayı 5, ss. 847–861)*. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01248-3>
- Xu, X., Ren, H., Chen, S., Luo, X., Zhao, F., & Xiong, Y. (2023). Review on melt flow simulations for thermoplastics and their fiber reinforced composites in fused deposition modeling. *Journal of Manufacturing Processes*, 92(February), 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.039>
- Yang, H., Lim, J. C., Liu, Y., Qi, X., Yap, Y. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., & Wei, J. (2017). Performance evaluation of ProJet multi-material jetting 3D printer. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(1), 95–103. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1242915>
- Yang, Q., Zhang, P., Cheng, L., Min, Z., Chyu, M., & To, A. C. (2016). Finite element modeling and validation of thermomechanical behavior of Ti-6Al-4V in directed energy deposition additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 12, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.012>
- Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., & Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering*, 50, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>
- Ye, R., Smugeresky, J. E., Zheng, B., Zhou, Y., & Lavernia, E. J. (2006). Numerical Modeling of the Thermal Behavior during the LENS® Process. *Materials Science and Engineering A*, 428(1–2), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.079>
- Yi, H. J., Kim, J. W., Kim, Y. L., & Shin, S. (2020). Effects of Cooling Rate on the Microstructure and Tensile Properties of Wire-Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V Alloy. *Metals and Materials International*,

26(8), 1235–1246. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00563-1>

Yin, H., & Felicelli, S. D. (2010). Dendrite Growth Simulation During Solidification in the LENS Process. *Acta Materialia*, 58(4), 1455–1465. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.10.053>

Zhang, L. C., Chen, L. Y., Zhou, S., & Luo, Z. (2023). Powder bed fusion manufacturing of beta-type titanium alloys for biomedical implant applications: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 168099. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168099>

Zhou, S., Xie, H., Ni, J., Yang, G., Qin, L., & Guo, X. (2022). Metal transfer behavior during CMT-based Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 82(July), 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.063>

Zhou, Y., Qin, G., Li, L., Lu, X., Jing, R., Xing, X., & Yang, Q. (2020). Formability, microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V deposited by wire and arc additive manufacturing with different deposition paths. *Materials Science and Engineering: A*, 772(November 2019), 138654. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138654>



