

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ELEKTRON DEMETİYLE ERGİTME YÖNTEMİ  
KULLANILARAK ÜRETİLEN Tİ-6Al-4V PARÇALARIN DİNAMİK  
ELASTİK MALZEME ÖZELLİKLERİNİN DARBE İLE UYARMA  
TEST YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**HAZIRLAYAN**

**İSMAİL ERCE ECE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ANKARA - 2021**



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ELEKTRON DEMETİYLE ERGİTME YÖNTEMİ  
KULLANILARAK ÜRETİLEN Tİ-6Al-4V PARÇALARIN DİNAMİK  
ELASTİK MALZEME ÖZELLİKLERİNİN DARBE İLE UYARMA  
TEST YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**HAZIRLAYAN  
İSMAİL ERCE ECE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEZ DANIŞMANI  
PROF. DR. SAMİ KARADENİZ**

**ANKARA - 2021**

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Yüksek Lisans Programı çerçevesinde İsmail Erce ECE tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 16 / 03 / 2021

**Tez Adı:** Elektron Demetiyle Ergitme Yöntemi Kullanılarak Üretilen Tİ-6Al-4V Parçaların Dinamik Elastik Malzeme Özelliklerinin Darbe ile Uyarma Test Yöntemiyle Belirlenmesi.

**Tez Jüri Üyeleri ( Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu )**

**İmza**

Prof. Dr. Sami Karadeniz, Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Ebru Saraloğlu Güler, Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Mustafa Kaya, Ankara Y. Beyazıt Üniversitesi

.....

**ONAY**

Prof. Dr. Ö. Faruk Elaldı  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü  
Tarih: ... / ... / .....

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

Tarih: 16 / 03 / 2021

Öğrencinin Adı, Soyadı: İsmail Erce ECE

Öğrencinin Numarası: 21910007

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Makine Mühendisliği

Danışmanın Unvanı/Adı: Prof. Dr. Sami Karadeniz

Tez Başlığı: Elektronik Demetiyel Ergitme Yöntemi Kullanılarak Üretilen Tİ-6Al-4V Parçaların Dinamik Elastik Malzeme Özelliklerinin Darbe ile Uyarma Test Yöntemiyle Belirlenmesi.

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 64 sayfalık kısmına ilişkin, 16 / 03 / 2021 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3'dür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

"Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını" inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası: .....

**ONAY**

Tarih: 16 / 03 / 2021

Prof. Dr. Sami Karadeniz

İmza:.....

## TEŞEKKÜR

Tez hazırlama sürecime sunduğu katkılardan ötürü tez danışmanım Sami KARADENİZ'e, varlığıyla bana her daim güç veren ve her zaman olduğu gibi bu süreçte de en büyük destekçim olan sevgili eşim Pelin UZUN ECE'ye ve beni yetiştirip bu günlere getiren aileme çok teşekkür ederim.



# ÖZET

İsmail Erce ECE

## ELEKTRON DEMETİYLE ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN Tİ-6Al-4V PARÇALARIN DİNAMİK ELASTİK MALZEME ÖZELLİKLERİNİN DARBE İLE UYARMA TEST YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2021

Ti-6Al-4V alaşımı yüksek dayanım, yüksek korozyon direnci ve düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı havacılık, otomotiv ve biyomedikal sektörlerinde geniş kullanıma sahiptir. Ti-6Al-4V parçaların geleneksel yöntemler ile işlenerek elde edilmesi zor ve pahalı olduğundan bu parçaların eklemeli imalat ile üretimi yaygınlaşmaktadır. Bu tez kapsamında geleneksel yöntemler ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçaların yerine eklemeli imalat ile farklı inşa yönlerinde üretilen Ti-6Al-4V parçaların kullanılabilirliği araştırılacaktır. Bu kıyaslama parçaların dinamik elastik malzeme özellikleri ile yapılacaktır. Bu tezde eklemeli imalat ile parça üretimi için elektron demetiyle ergitme yöntemi kullanılmıştır. Elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerin dinamik Young's modülü, dinamik kayma modülü ve dinamik Poisson Oranı gibi dinamik elastik malzeme özellikleri darbe ile uyarma test yöntemi ile belirlenmiştir.

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen test numunelerinin boyutları sonlu elemanlar analizi yardımıyla belirlenmiştir. Elektron demetiyle ergitme yöntemi ile Ti-6Al-4V numunelerin üretimi sırasında inşa yönünün malzeme özelliklerine etkisinin araştırılabilmesi için numuneler yatay ve dikey inşa yönlerinde üretilmişlerdir. Elektron demetiyle ergitme yöntemi kullanılarak üretilen numunelerin darbe ile uyarma test yöntemine uygun hale getirilebilmesi için numuneler ön ısıtma işlemi gerektirmeden talaşlı imalat işlenerek son ölçülerine getirilmiştir.

Darbe ile uyarma test yönteminin uygulanmasında ve malzemelerin dinamik elastik özelliklerinin belirlenmesinde ASTM E1876-15 standardı referans alınmıştır. Darbe ile uyarma test yöntemi kullanılarak numunelerin doğal frekansları ve Frekans Cevap Fonksiyonu (Frequency Response Function (FRF) grafikleri elde edilmiştir. Dinamik Young's modülünün formüller yardımıyla hesaplanması için numunenin eğilme durumundaki temel

doğal frekansını kullanılmıştır. Dinamik kayma modülünün formüller yardımıyla hesaplanması için ise numunenin burulma durumundaki temel doğal frekansını kullanılmıştır. Dinamik Young's ve dinamik kayma modülü kullanılarak Poisson oranı hesaplanmıştır.

Elektron demetiyle ergitme yöntemi kullanılarak üretilen Ti-6Al-4V alaşıma sahip plaka halinde numunelerin dinamik elastik malzeme özellikleri, geleneksel yöntemler ile üretilen Ti-6Al-4V plakaların SAE AMS4911R standardına göre sahip olması gereken minimum malzeme özelliklerini sağladığı görülmüştür. Dikey inşa yönünde üretilen numunelerin temel doğal frekanslarının yatay yönde inşa edilen numunelerin temel doğal frekanslarından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dikey yönde inşa edilen numunenin dinamik Young's modülü yatay yönde inşa edilen numunenin dinamik Young's modülünden az farkla daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Her bir mod için dikey inşa yönünde üretilen numunenin sönümleme faktörü değerleri, yatay inşa yönünde üretilen numunenin sönümleme faktörü değerlerinden daha düşüktür.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Eklemeli imalat, Elektron demetiyle ergitme, Darbe ile uyarma test yöntemi, Ti-6Al-4V alaşımı, İnşa Yönü

# ABSTRACT

**İsmail Erce ECE**

## **DETERMINATION OF THE DYNAMIC ELASTIC PROPERTIES OF Ti-6Al-4V PARTS MANUFACTURED WITH ELECTRON BEAM MELTING BY IMPULSE EXCITATION TECHNIQUE**

**Baskent University Institute of Science and Engineering**

**Department of Mechanical Engineering**

**2021**

Ti-6Al-4V alloy is widely used in applications of aerospace, dental and automotive industries due to its high strength, high corrosion resistance and low density characteristics. However, the parts manufactured through conventional methods require machining challenges such as long machining time, tool wear and high cost. Because of these challenges it has restricted usage areas. Therefore, currently Ti-6Al-4V parts are manufactured by using one of the additive manufacturing methods.

The main purpose of this thesis is to investigate whether the samples produced by additive manufacturing in different orientations can be used as a counterpart for the samples produced by the traditional manufacturing methods in terms of dynamic elastic properties.

In this study, the samples are produced by the electron beam melting (EBM) method. Dynamic Young's modulus and dynamic shear modulus of the samples manufactured by EBM method were determined by the impulse excitation technique. The optimum dimensions of the samples for the impulse excitation technique is determined by finite element analysis. In order to investigate the effects of build direction on the material properties of Ti-6Al-4V alloy, the samples were fabricated in horizontal and vertical build directions. In order to make the samples produced by electron beam melting method suitable for the impulse excitation test method, the samples are machined without the need for pre-heating treatment.

The elastic properties are determined according to ASTM 1876-15. Natural frequencies and the frequency response function (FRF) plots of the samples were obtained by using the impulse excitation test method. The value of dynamic Young's modulus is calculated by using the natural (resonant) frequency in the fundamental flexural mode of vibration. Similarly, the dynamic shear modulus is determined by using the fundamental torsional resonant frequency.

In order to compute the Poisson's ratio, the formula between dynamic shear modulus and dynamic Young's modulus is used.

As a result of this study it is found that the dynamic elastic material properties of the Ti-6Al-4V alloy plate samples produced by electron beam melting method provide the minimum material property requirements that the Ti-6Al-4V plates produced by the conventional methods according to SAE AMS4911R. The natural frequencies of the sample produced in the vertical built direction are higher than that of the natural frequencies of the sample built in the horizontal direction. The dynamic Young's modulus of the sample produced in the vertical built direction are higher than the dynamic Young's modulus of the sample built in the horizontal direction. The damping factor values of the specimen manufactured in the vertical build direction for all modes are lower than the damping factor values of the specimen manufactured in the horizontal build direction.

**KEYWORDS:** Additive manufacturing, Electron beam melting, Impulse excitation technique, Ti-6Al-4V Alloy, Building direction

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı .....	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Titanyum.....	5
2.1.1. Titanyum alaşımları .....	5
2.1.2. Ti-6Al-4V alaşımı.....	6
2.2. Metallerin Katmanlı İmalatı .....	7
2.2.1. Katmanlı imalat ile metal parça üretimi ve avantajları .....	7
2.2.2. Katmanlı imalat ile metal üretim yöntemleri .....	8
2.2.3. Elektron demetiyle ergitme yöntemi.....	10
2.3. Elektron Demetiyle Ergitme Yöntemiyle Üretilen Ti-6Al-4V Alaşımların Mekanik Özellikleri.....	12
2.3.1. Elastik özellikleri inceleyen yayınlar .....	12
2.3.2. İnşaa yönlerinin mekanik özelliklere etkisini inceleyen yayınlar .....	14
2.3.3. Talaşlı işleme ve ısı işlemleri inceleyen yayınlar .....	16
2.3.4. Diğer parametreleri inceleyen yayınlar .....	17
3. TEORİ.....	18
3.1. Sayısal İşaret İşleme.....	18

3.1.1. Frekans örtüşmesi.....	18
3.1.2. Spektral sızıntı .....	21
3.1.3. Pencere Kavramı .....	22
3.1.4. Koherans.....	23
3.2. Kayıp Faktörü ve Sönümleme Faktörünün Elde Edilme Teorisi .....	24
<b>4. ELEKTRON DEMETİYLE ERGİTME YÖNTEMİYLE Ti-6Al-4V NUMUNE ÜRETİMİ .....</b>	<b>26</b>
4.1. Numune Boyutlarının Belirlenmesi.....	26
4.2. Kimyasal Bileşim ve Toz Karakteristiği .....	27
4.3. Üretim Parametreleri.....	28
4.4. Numunelerin Farklı Oryantasyonlarda Üretimi.....	30
4.5. Nihai Numune Geometrilerinin Elde Edilmesi .....	33
<b>5. DİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ .....</b>	<b>36</b>
5.1. Darbe ile Uyarma Test Yöntemi .....	36
5.2. Dinamik Elastik Özelliklerin Sayısal Yöntemler ile Hesaplanması.....	38
<b>6. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....</b>	<b>40</b>
<b>7. TİTREŞİM TESTİ VE DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>47</b>
7.1. Test Düzeninin Tanıtımı .....	48
7.1.1. Testte kullanılan ekipmanların tanıtımı .....	48
7.1.2. Testte kullanılan destek yapılarının seçimi.....	49
7.1.3. Uyarıcı seçimi .....	49
7.1.4. İvme ölçer seçimi .....	49
7.2. Ölçümler .....	50
7.3. Doğal Frekans, Kayıp Faktörleri ve Sönümleme Faktörleri.....	53
7.3.1. Eklemeli imalat ile dikey yönde inşa edilen 1 numaralı numunenin doğal frekans, kayıp faktörleri ve sönümleme faktörleri .....	54
7.3.2. Eklemeli imalat ile yatay yönde inşa edilen 2 numaralı numunenin doğal frekans, kayıp faktörleri ve sönümleme faktörleri .....	56

7.3.3. Dikey ve yatay inşa yönünde üretilen 2 farklı numunenin doğal frekanslarının karşılaştırılması .....	58
8. SONUÇ.....	61
KAYNAKLAR.....	65



# TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Titanyum elementinin mekanik özelliklerinin alüminyum,nikel ve demir elementleri ile karşılaştırılması [4].	5
Tablo 2.2. Ti-6Al-4V alaşımının üretim yöntemlerine göre kimyasal bileşimleri	6
Tablo 2.3. Çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin farklı üretim yöntemlerine göre kıyaslanması	7
Tablo 2.4. ARCAM Q20plus cihazının karakteristik özellikleri [8].	12
Tablo 2.5. Young's modülü ve Poisson oranının literatür taramasından çıkan sonuçları	14
Tablo 2.6. Talaşlı işleme ve sıcak izostatik preslemenin mekanik özelliklere etkisi	16
Tablo 4.1. ARCAM Ti-6Al-4V toz malzemesinin ideal kimyasal bileşimi [8].	27
Tablo 4.2. Ön ısıtma parametreleri	29
Tablo 4.3. Eritme Parametreleri	29
Tablo 4.4. Destek yapılarının parametreleri	30
Tablo 6.1. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan değerler	40
Tablo 6.2. Analizi yapılan modellerin dinamik elastik malzeme özellikleri ve yoğunluk değerleri	41
Tablo 6.3. Sonlu elemanlar analizi yapılan 3 farklı modelin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	46
Tablo 7.1 1 Numaralı numuneye ait doğal frekans, kayıp faktörü ve sönümleme faktörü	55
Tablo 7.2. 1 numaralı numuneye ait test ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	56
Tablo 7.3. 2 Numaralı numuneye ait doğal frekans, kayıp faktörü ve sönümleme faktörü	57
Tablo 7.4. 2 numaralı numuneye ait test ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	58
Tablo 7.5. Dikey ve yatay inşa yönünde üretilen 2 farklı numunenin doğal frekanslarının karşılaştırılması	58
Tablo 7.6. Dinamik elastik malzeme özelliklerinin 5.Bölümdeki teorik formüller ve titreşim testi sonuçları yardımıyla elde edilmesi	60

# ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Lazer kaynaklı yönlendirilmiş enerji biriktirmeli yöntemin şematığı [10].....	8
Şekil 2.2. Elektron ışını serbest biçim yönteminin şematığı [10]. ....	9
Şekil 2.3. Seçici lazer ergitme ve sinterleme teknolojilerinin genel yapısı [10]. ....	10
Şekil 2.4. Elektron demetiyle ergitme makinesinin sistem şematığı [8] .....	11
Şekil 2.5. İnşa yönlerinin gösterimi [22] .....	15
Şekil 3.1. Frekans örtüşmesi kavramının gösterimi [30].....	18
Şekil 3.2. Frekans örtüşmesi örneği [30]. ....	19
Şekil 3.3. Bant genişliğinin üzerinde kalan gerçek frekansın örtüşme etkisiyle aynalanması [30].....	20
Şekil 3.4. İdeal örtüşme önleme filtre yöntemi [30]. ....	20
Şekil 3.5. Bu tez kapsamında kullanılan örtüşme önleme filtre yöntemi [30]. ....	21
Şekil 3.6 Sızıntı olan ve olmayan sinyalin gösterimi. ....	21
Şekil 3.7. Periyodik sinyalin gösterimi [30].....	22
Şekil 3.8. Periyodik olmayan sinyalin gösterimi [30].....	22
Şekil 3.9. Pencereleme uygulanan sinyal [30]. ....	23
Şekil 3.10. Sızıntı olan, sızıntı olmayan ve sızıntının pencere fonksiyonu ile engellendiği sinyaller [30].....	23
Şekil 3.11. Örnek koherans grafiği [30]. ....	24
Şekil 3.12. Yarım güç bant genişliği metodunun grafiksel gösterimi [35] .....	25
Şekil 4.1. ARCAM Q20plus Makinası.....	27
Şekil 4.2. Katmanlı imalat teknolojisinde katman kalınlığı, tarama yönü ve inşa yönünün gösterimi [37].....	28
Şekil 4.3. İnşa yönüne göre numunelerin üretim tablasına yerleştirilmesi .....	31
Şekil 4.4. Üretim tablası ve numuneler .....	32

Şekil 4.5. Üretimi tamamlanan numuneler .....	33
Şekil 4.6. Kullanılan talaşlı imalat tezgahı .....	34
Şekil 4.7. Katmanlı imalat sonrası talaşlı işlem uygulanan numuneler ve talaşlı işlem uygulanmamış numuneler.(1 Numaralı numune : Dikey inşa yönünde üretilen numune, 2 Numaralı numune : Yatay inşa yönünde üretilen numune).....	35
Şekil 5.1. Numuneyi asarak yapılan darbe ile uyarma test metodunun şematik gösterimi [38]. .....	37
Şekil 5.2. Destek amaçlı kullanılan poliüretan sünger .....	37
Şekil 6.1. Dikey oryantasyonda üretilen 1 numaralı numunenin 1. mod şekli .....	41
Şekil 6.2. Dikey oryantasyonda üretilen 1 numaralı numunenin 2. mod şekli .....	42
Şekil 6.3. Dikey oryantasyonda üretilen 1 numaralı numunenin 3. mod şekli .....	42
Şekil 6.4. Yatay oryantasyonda üretilen 2 numaralı numunen 1. mod şekli.....	43
Şekil 6.5. Yatay oryantasyonda üretilen 2 numaralı numunen 2. mod şekli.....	43
Şekil 6.6. Yatay oryantasyonda üretilen 2 numaralı numunen 3. mod şekli.....	44
Şekil 6.7. Geleneksel yöntemlerle üretilen modelin 1. mod şekli.....	45
Şekil 6.8. Geleneksel yöntemlerle üretilen modelin 2. mod şekli.....	45
Şekil 6.9. Geleneksel yöntemlerle üretilen modelin 3. mod şekli.....	46
Şekil 7.1. Dikey inşa yönünde üretilen numune(1), yatay inşa yönünde üretilen numune(2) ..	48
Şekil 7.2. 1 Numaralı numunenin ivme ölçer konumu, tahrik noktaları ve numuneye uygulanan tahriğin yönü .....	51
Şekil 7.3. Çelik halat ile yapılan asma işlemi .....	52
Şekil 7.4. Destek malzemesi olarak poliüretan sünger kullanılarak yapılan ölçüm .....	52
Şekil 7.5. Dikey olarak inşa edilen 1 numaralı numunenin koherans grafiği .....	53
Şekil 7.6. 1 Numaralı, dikey yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği (1 numaralı noktaya uygulanan impuls) .....	54
Şekil 7.7. 1 Numaralı, dikey yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği (1 ve 7 numaralı noktalara uygulanan impulsun karşılaştırılması, eğrilerin hangi noktalara ait olduğu metinde anlatılmıştır.).....	55

Şekil 7.8. 2 Numaralı, yatay yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği (1 numaralı noktaya uygulanan impuls) .....	56
Şekil 7.9. 2 Numaralı, yatay yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği (1 ve 7 numaralı noktalara uygulanan impulsun karşılaştırılması) .....	57
Şekil 7.10. 1 ve 2 numaralı numunelerin doğal frekanslarının aynı FRF grafiğinde gösterimi(Kırmızı renkli çizgiler : 1 numaralı dikey numune, mavi renkli çizgiler : 2 numaralı yatay numune) .....	59
Şekil 8.1. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen 2 farklı inşa yönüne sahip numunelerin doğal frekans test sonuçları ve geleneksel yöntemlerle üretilen aynı geometrideki modelin sonlu elemanlar analizinin sonuçları.....	61
Şekil 8.2. Eklemeli imalat ile üretilen Ti-6Al-4V malzemeler ile özellikleri SAE AMS4911R standardından alınan geleneksel Ti-6Al-4V malzemelerin dinamik young modülü ve dinamik kayma modüllerinin karşılaştırılması. ....	62
Şekil 8.3. Elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V alaşıma sahip numunelerin inşa yönüne göre sönümlenme faktörlerinin karşılaştırılması.....	63

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	amper
Al	alüminyum
CAD	computer aided design
E	dinamik Young's modülü
ELI	extra Low Interstitial
Fe	demir
FRF	frequency response function
$f_f$	numunenin eğilme durumundaki temel doğal frekansı
$f_t$	numunenin burulma durumundaki temel doğal frekansı
G	dinamik kayma modülü
H	hidrojen
Hz	hertz
Mo	molibden
N	azot
Ni	nikel
O	oksijen
Q	sönümlenme faktörü
Ti	titanyum
WCS	world coordinate system
$\Delta\omega$	bant genişliği
$\eta$	kayıp faktörü
$\omega_n$	doğal frekans

# 1. GİRİŞ

Titanyum ve alaşımları, yoğunluklarına kıyasla yüksek dayanıma sahip olmalarından ve yüksek korozyon dirençlerinden dolayı havacılık, biyomedikal ve otomotiv sektörlerinde yaygın kullanıma sahiptirler. Titanyum alaşımları içerisinde ticari olarak en yaygın kullanıma sahip olanı Ti-6Al-4V alaşımıdır. Ti-6Al-4V alaşımları bir çok avantajın yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunların en başında bu alaşıma sahip parçaların geleneksel yöntemlerle talaşlı işlenmesinde yaşanan zorluklar gelmektedir. Bu malzemeden üretilen parçaların işlenmesinde sıklıkla takım aşınmaları meydana gelmekte ve bu aşınmalardan kaynaklı parçaların yüzey kalitelerinde bozulmalar olmaktadır. Ti-6Al-4V malzemeye sahip parça üretiminde bu gibi imalat kısıtlarından ve yüksek maliyetlerden dolayı, son yıllarda eklemeli imalat ile Ti-6Al-4V parça üretim yöntemleri imalat sektörlerinde yerini almaya başlamıştır.

Son yıllarda eklemeli imalat teknolojileri, kompleks geometriye sahip prototip parçaların üretimini kısa sürede yapılabilmesi, malzeme israfının az olması, kompleks parçaların üretiminde geleneksel yöntemlere göre ucuz maliyete sahip olabilmesi gibi özelliklerinden dolayı endüstrilerde yerini almıştır. Metalik malzemelere sahip numunelerin katmanlı imalatında bir çok yöntem bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında bu yöntemlerden elektron demetiyle ergitme katmanlı imalat yöntemi kullanılmıştır. Numuneler ARCAM Q20plus tezgahı ile üretilmiştir. Bu yöntem ile numune üretiminde metalik toz hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu metalik tozlar katman katman inşa edilerek istenen geometri elde edilir. Üretim yönteminden dolayı, geleneksel yöntemler ile üretilmeyen geometriler de bu yöntem ile üretilebilmektedirler. Ortaya çıkan geometrinin mekanik özellikleri üretim parametrelerine göre değişmektedir. Kullanılan üretim parametrelerinden 4. Bölümde ayrıntılı olarak bahsedilmiştir.

Endüstrilerde, yüke maruz kalan parçaların malzeme seçiminde Ti-6Al-4V alaşımları önemli yer tutmaktadırlar. Bu yükler temel olarak statik ve dinamik yükler olarak ikiye ayrılabilirler. Bu tez kapsamında dinamik titreşim yüklerine maruz kalan geleneksel yöntemler ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçaların yerine eklemeli imalat ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların kullanılabilirliği araştırılacaktır. Bu durum ancak eklemeli imalat ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin dinamik elastik malzeme özelliklerinin, SAE AMS4911R standardında belirtilen Ti-6Al-4V plakaların sahip olması gereken minimum dinamik elastik malzeme özelliklerini sağlaması ile mümkündür. Bu tez kapsamında dinamik elastik malzeme

özelliklerinin belirlenmesinde darbe ile uyarma test yöntemi kullanılacaktır [1]. Eklemeli imalat ile üretilen test numunelerinin sonlu elemanlar modeli, testten bulunan dinamik elastik malzeme özellikleri sayesinde bilgisayar ortamında doğal frekans analizleri ile doğrulanmıştır. Doğrulan bu sonlu elemanlar modeli sayesinde geleneksel yöntemler ile titanyum numune üretimi yapılmasına gerek kalmamıştır. SAE AMS4911R standardından alınan geleneksel Ti-6Al-4V malzeme özellikleri ile test sonucundan elde edilen eklemeli imalat Ti-6Al-4V malzeme özellikleri karşılaştırılmıştır [2]. Ayrıca standarttan alınan, alaşımın sahip olması gereken minimum malzeme özellikleri sayesinde geleneksel yöntemler ile üretilebilecek Ti-6Al-4V numunelerin sonlu elemanlar modelinin doğal frekansları, eklemeli imalat modellerinin doğal frekansları ile karşılaştırılmıştır.

Tezin 1. Bölümünde teze giriş yapılarak tezin amaç ve kapsamından bahsedilmiştir. Tezin 2. Bölümünde literatür araştırmalarına yer verilmiştir. Titanyum elementi ve Ti-6Al-4V alaşımından bahsedilmiştir. Daha sonra katmanlı imalat yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir. Bu tez kapsamında kullanılan elektron demetiyle ergitme yöntemi hakkında diğer katmanlı imalat yöntemlerine göre daha ayrıntılı bilgi verilmiştir. Ardından elastik özellikleri inceleyen yayınlar ve sonuçları hakkında bilgi verilmiştir. Eklemeli imalat ile yapılan Ti-6Al-4V numune üretiminde inşa yönünün malzeme özelliklerine etkisinin incelendiği yayınlar ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Bu tez kapsamında eklemeli imalat ürünü olan Ti-6Al-4V numunelere son ölçülerinin verilebilmesi için talaşlı işleme uygulanmıştır. Bundan dolayı eklemeli imalat ile üretilen titanyum numunelerin talaşlı işleme parametrelerini inceleyen yayınlara ayrı bir başlık altında yer verilmiştir. 3. Bölümde yapılan titreşim testinin teorik temellerinden bahsedilmiştir. İlk olarak teorinin temellerinden bahsedilmiştir. Ardından tezde kullanılan frekans örtüşmesi, spektral sızıntı, ortalama alma ve koherans kavramlarından bahsedilmiştir. Modal parametrelerin hesaplanma teorileri yine bu bölümde ayrı başlıklar altında verilmiştir. 4. Bölümde numunelerin nihai geometrilerinin elde edilmesine kadar olan süreçteki üretim aşamalarından bahsedilmiştir. Öncelikle teste uygun numune boyutlarının nasıl belirlendiğinden ayrıntılı şekilde bahsedilmiştir. Daha sonra bu numunelerin hangi kimyasal bileşime sahip olmaları gerektiğinden bahsedilmiştir. Toz karakteristiği hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra bu numunelerin hangi üretim parametreleri ile üretildikleri tablolar halinde gösterilmiştir. Bu tezin amaçlarına giden yollardan biri olan numunelerin farklı oryantasyonlarda üretilmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Numunelerin hangi oryantasyonlarda ve tabla üzerinde hangi konumlarda üretildikleri şekiller yardımıyla anlatılmıştır. Üretilen numunelerin üretildikleri ve talaşlı işlem sonrası durumları şekiller yardımıyla gösterilmiştir. Son olarak talaşlı işlemin gerçekleştiği tezgah hakkında görsel

sunulmuştur. 5. Bölümde darbe ile uyarma test yönteminin nasıl yapıldığından genel olarak bahsedilmiştir. Numunelerin test sırasında nasıl desteklendikleri şekiller yardımıyla anlatılmıştır. Ayrıca bu bölüm altında malzemelerin dinamik elastik özelliklerinin nasıl hesaplandıkları hakkında bilgiler verilmiştir. Dinamik elastik malzeme özelliklerinin sayısal yöntemler ile nasıl belirlendikleri formüller yardımıyla ayrıntılı olarak verilmiştir. 6. Bölümde sonlu elemanlar analizinden bahsedilmiştir. Analizde kullanılan parametrelerden tablo yardımıyla ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Daha sonra numunelerin sonlu elemanlar modelinin doğrulamasının nasıl yapıldığından bahsedilmiştir. Dikey ve yatay inşa yönünde üretilen eklemeli imalat numunelerinin sonlu elemanlar modelinin doğrulaması yapılmıştır. Standartlardan alınan geleneksel yöntemlerle üretilen Ti-6Al-4V malzeme özellikleri doğrulanmış sonlu elemanlar modeline girdi oluşturmuştur. Böylelikle hem eklemeli imalat hem de geleneksel yöntemlerle üretilen numunelerin sonlu elemanlar analizleri tamamlanarak bu modellerin doğal frekans değerleri çıkartılmıştır. 7. Bölümde darbe ile uyarma test yönteminin özelliklerinden bahsedilmiştir. Bu testte kullanılan test düzeneğinin tanıtımı yapılmıştır. Kullanılan ekipmanların özelliklerinden ve bu ekipmanların hangi kriterlere dikkat edilerek seçildiklerinden ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan darbe ile uyarma test yönteminin tüm süreçlerinden bu bölüm altında bahsedilmiştir. Son bölümde tez çalışmaları boyunca elde edilen bilgiler özetlenerek tezde elde edilen sonuçlar verilmiştir.

### **1.1. Tezin Amacı**

Literatür taramasından çıkan sonuçlar neticesinde elektron demetiyle ergitme katmanlı imalat yönteminde inşa yönünün dinamik Young's modülü, dinamik kayma modülü ve dinamik Poisson oranı gibi malzeme özelliklerine farklı etkilerinin olabileceği görülmüştür. Elektron demetiyle ergitme tezgahı ile üretilen bu parçaların tezgahtan söküldükten sonra talaşlı işlenebilirlikleri araştırılmış ve numuneler uygun şartlar altında talaşlı işlenerek nihai ölçülerine getirilmiştir. Dinamik elastik malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için darbe ile uyarma test yöntemi kullanılmıştır. Sönümlenme faktörlerinin hesaplanması için yarım güç bant genişliği metodu kullanılmıştır.

Yukarıdaki paragrafta verilen bilgilere dayanarak tezin ana amacı şu şekildedir: Elektron demetiyle ergitme yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşıma sahip numunelerin farklı inşa yönüne göre dinamik Young's modülü, dinamik kayma modülü ve Poisson oranı gibi malzeme özelliklerinin değişip değişmediğinin belirlenmesi ve bu dinamik elastik malzeme

özelliklerini dikkate alarak eklemeli imalat ile farklı inşa yönlerinde üretilen ve titreşime maruz kalan bu numunelerin, geleneksel yöntemler ile üretilen aynı geometriye sahip numunelerin yerine kullanılabilirliğinin araştırılması.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Titanyum

Titanyum, doğada en fazla bulunan dördüncü elementtir. Bu element, doğada nadiren yüksek konsantrasyonlu ve saf halde bulunur. Bu sebeplerden ve titanyumun işlenmesindeki zorluklardan dolayı bu elementin elde edilmesi yüksek maliyetlidir [3].

Titanyum alaşımları yüksek mekanik dayanıma, düşük termal iletme sahip olmaları ve korozyona karşı benzersiz dirençlerinden dolayı endüstride kullanımları önemli bir yer tutmaktadırlar. Titanyum elementinin özelliklerinin diğer elementler ile karşılaştırılması Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Bu özelliklerinden dolayı geçmişten günümüze titanyum elementinin ana tüketicileri havacılık ve medikal sektörleri olmuştur. Bu sektörlerin yanında mimarlık uygulamaları, deniz taşımacılığı ve ulaşım sektörlerinde de kendine yer bulmaya başlamıştır [3] [4].

Tablo 2.1. Titanyum elementinin mekanik özelliklerinin alüminyum, nikel ve demir elementleri ile karşılaştırılması [4].

	Ti	Al	Fe	Ni
Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> )	4.5	2.7	7.9	8.9
Erime noktası(°C)	1670	660	1538	1455
Termal iletim(W/mK)	15-22	221-247	68-80	72-92
Young’s Modülü (GPa)	115	72	215	200
Korozyon Direnci	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Fiyat	Çok yüksek	Orta	Düşük	Yüksek

#### 2.1.1. Titanyum alaşımları

Titanyum alaşımları genellikle 3 ana kategoriye ayrılırlar :  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\alpha + \beta$  alaşımları . Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının kendi iç özelliklerine, malzeme içindeki dağılımına ve hacimsel oranlarına bağlıdır. Örneğin  $\alpha$  fazı,  $\beta$  fazına göre daha düşük yoğunluğa sahiptir. Çünkü  $\alpha$  fazındaki baskın olan Alüminyum elementinin yoğunluğu,  $\beta$  fazındaki baskın olan Mo ve V elementlerinin yoğunluğundan daha düşüktür [4].

Günümüzde 100'den fazla titanyum alaşımı olmasına rağmen bunlardan sadece 30 civarı alaşım ticari olarak kullanılmaktadır. Ti-6Al-4V olarak bilinen alaşım bu ticari kullanımların %50'den fazlasını oluşturmaktadır [3].

$\alpha$  alaşımları, kimyasal sektörlerde en çok kullanılan titanyum alaşımlarıdır. Bu alaşımları ön plana çıkaran özellikleri mükemmel korozyon direncine ve yüksek mekanik dayanıma sahip olmalarıdır.  $\alpha$  alaşımlarına örnek olarak Ti-5Al-2.5Sn, Ti-2Cu ve Ti-0.3Mo-0.8Ni verilebilir [3].

$\beta$  alaşımlarının endüstrilerde kullanım oranı son yıllarda artmaktadır. Bu alaşımları ön plana çıkaran en önemli özellikleri ısıl işlem ile 1380 MPa değerinde dayanıma ulaşabilmeleridir.  $\beta$  alaşımlarına örnek olarak Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al, Ti-10V-2Fe-3Al ve Ti-8Mn örnek olarak verilebilir [5].

$\alpha + \beta$  alaşımlarının geliştirilme sebebi bu alaşımların yüksek dayanım ve tokluk özelliklerine sahip olmalarıdır.  $\alpha + \beta$  alaşımlarına Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V ELI, Ti-6Al-4V-2Sn ve Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo örnek verilebilir. Bu alaşımlar içinde en popüler olanı 1950'li yılların başlarında Amerika'da keşfedilen Ti-6Al-4V alaşımıdır [4].

### 2.1.2. Ti-6Al-4V alaşımı

Ti-6Al-4V alaşımı, ticari olarak titanyum alaşımları içinde %50'den fazla kullanım oranına sahiptir. Ti-6Al-4V alaşımı bir  $\alpha + \beta$  alaşımıdır. Bu alaşımın içeriğinde %6 alüminyum  $\alpha$  fazı olarak bulunurken, %4 oranında vanadyum elementi  $\beta$  fazını oluşurmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımında bulunması gereken kimyasal bileşim üretim yöntemlerine göre değişmektedir. Tablo 2.2'de farklı standartlara göre Ti-6Al-4V alaşımının içerisinde bulunması gereken kimyasal bileşimler verilmiştir.

Tablo 2.2. Ti-6Al-4V alaşımının üretim yöntemlerine göre kimyasal bileşimleri

Element	Elektron demetiyle ergitme yöntemi Ti-6Al-4V ASTM F2924 – 14 [6]	Döküm Ti-6Al-4V ASTM F1108 [7]	Plaka halindeki Ti-6Al-4V SAE AMS4911R [2]
Al	5.5-6.75%	5.5–6.75%	5.5–6.75%
V	3.5-4.5%	3.5–4.5%	3.5–4.5%
C	<0.08%	<0.1%	<0.08%
Fe	<0.30%	<0.3%	<0.3%
O	<0.2%	<0.2%	<0.2%
N	<0.05%	<0.05%	<0.05%
H	<0.0015%	<0.015%	<0.015%
Ti	Denge	Denge	Denge

Diğer titanyum alaşımlarının çekme dayanımları 200-1400 MPa aralığındayken, Ti-6Al-4V için bu değer 900-1200 MPa aralığındadır. Titanyum alaşımlarının termal iletim oranları genel olarak 5.5-25 W/mK olmasına rağmen bu değer Ti-6Al-4V alaşımı için 6.6-6.8 W/mK aralığındadır. Ti-6Al-4V alaşımının farklı üretim yöntemleri için çekme test sonuçları Tablo 2.3'te verilmiştir [4]. Eklemeli imalat için verilen mekanik değerler ARCAM şirketinden alınmıştır [8].

Tablo 2.3. Çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin farklı üretim yöntemlerine göre kıyaslanması

	Elektron demetiyle ergitme yöntemi, Eklemeli imalat Ti-6Al-4V	Döküm Ti-6Al-4V ASTM F1108 [7]	Plaka halindeki Ti-6Al-4V SAE AMS4911R [2]
Çekme dayanımı (MPa)	1020	860	920
Akma dayanımı (MPa)	950	758	869
Young's modülü (GPa)	120	114	113.8
% Uzama	14	8	10

## 2.2. Metallerin Katmanlı İmalatı

### 2.2.1. Katmanlı imalat ile metal parça üretimi ve avantajları

Katmanlı imalat, toz veya tel halindeki hammaddenin lazer veya elektron ışımının enerjisi ile eritilerek katman katman birleştirilip nihai geometrinin elde edilmesi yöntemidir. Bu imalat yöntemi, üretim metodundan dolayı talaşlı imalat ve plastik şekil verme gibi geleneksel yöntemlerden ayrılmaktadırlar. Katmanlı imalat metodu günümüzde seri üretim yöntemi olarak endüstrilerde yer almaktadır. Önemli mühendislik malzemelerinden olan çelik, alüminyum, titanyum gibi malzemelerden ürünler bu yöntemlerle kolayca üretilmektedirler. Bu yöntemin en büyük avantajı, mühendislik tasarımlarında eşsiz bir özgürlük sunarken aynı zamanda bu özgür tasarımların kısa sürede üretilmelerine olanak sağlamasıdır [9]. Katmanlı imalat teknolojilerinin metal malzemelerden endüstriyel parça üretimindeki avantajları şu şekildedir [10];

- Tasarımlarda yapılacak özgürleştirme ve ölçülerde yapılacak değişikliklerin üretim maliyetlerine etkisi azdır.

- Eklemeli imalat ile karmaşık geometrili parçaların prototip üretimlerinin maliyeti geleneksel yöntemlere göre genellikle daha azdır. Buna sebep olarak, üretilecek parçalar için malzeme israfının az olması, takım üretiminin yapılmaması ve zamandan tasarruf gösterilebilir.
- İmalat teknolojisinin yetersiz kalmasından dolayı geleneksel yöntemler ile üretilemeyen parçalar katmanlı imalat ile üretilebilir.
- Kafes geometrilerinin üretilebilmesi mümkündür.
- Kimyasal bileşim olarak heterojen malzemelerin üretilebilmesi mümkündür.

### 2.2.2. Katmanlı imalat ile metal üretim yöntemleri

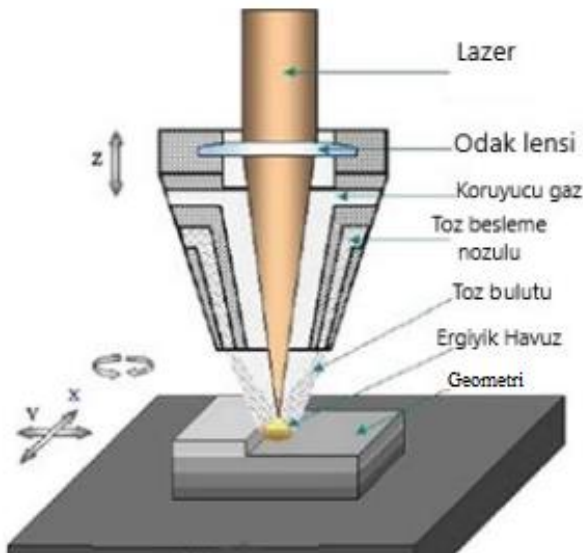
Metalik malzemelerin katmanlı imalat ile üretim yöntemleri iki ana gruba ayrılır. :

- Yönlendirilmiş enerji biriktirmeli yöntemler.
- Toz yataklı ergitme yöntemleri.

#### 2.2.2.1. Yönlendirilmiş enerji biriktirmeli yöntem

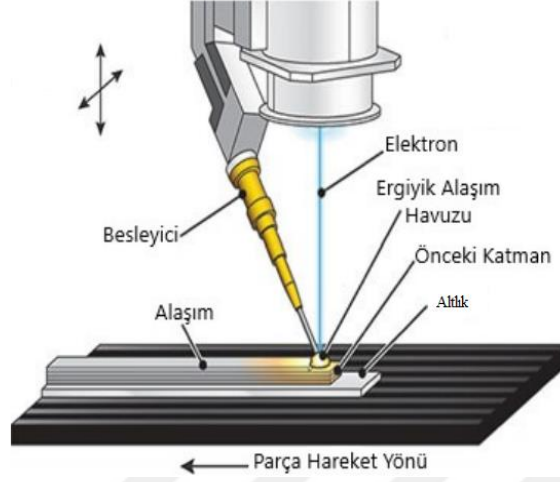
Yönlendirilmiş enerji biriktirmeli yöntem, enerji girişinin olduğu ve geometrinin üretildiği konuma, hammaddenin yönlendirilerek parça inşasının yapılması esasına dayanır. Enerjinin kaynağı lazer ya da elektron ışını olabilir [11].

Lazer kaynaklı yönlendirilmiş enerji biriktirmeli yöntemde, toz halindeki hammadde, lazer ışınının enerjisi ile katmanlar halinde inşa edilerek istenen geometriyi meydana getirir. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Lazer kaynaklı yönlendirilmiş enerji biriktirmeli yöntemin şematik gösterimi [10].

Elektron ışını serbest biçim yönteminde enerjinin kaynağı olarak elektron ışını kullanılır(Şekil2.2). Geometri inşasının yapıldığı ortam elektron ışınının odaklanması için yüksek vakum altındadır.

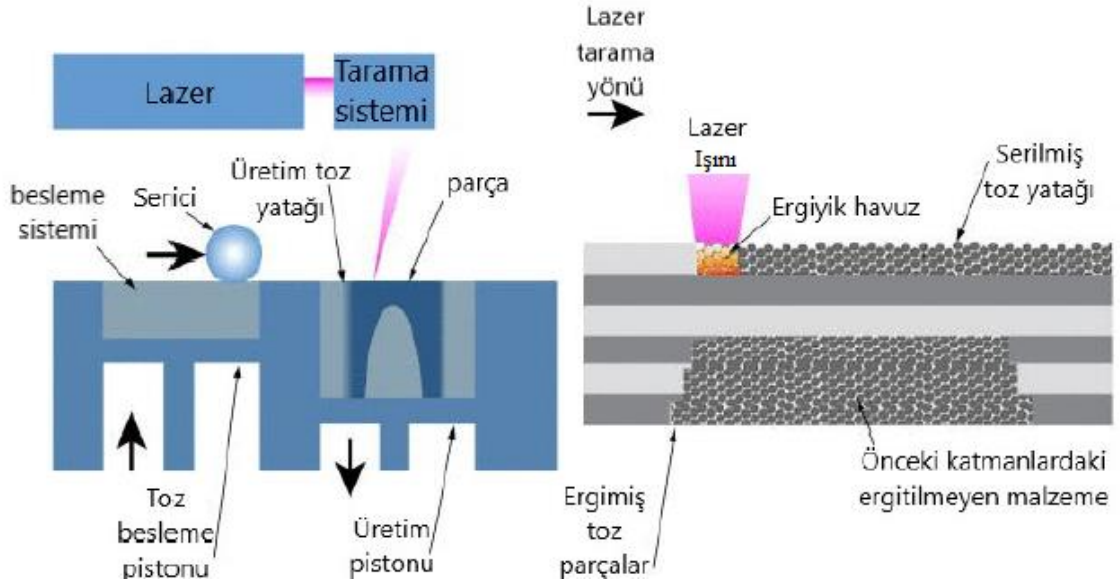


Şekil 2.2. Elektron ışını serbest biçim yönteminin şematığı [10].

#### 2.2.2.2. Toz yataklı ergitme yöntemleri

Toz yataklı ergitme yöntemlerinde bir çok varyasyon vardır. Proses kapasitesi, koşullar ve parça özellikleri değişse de, tüm varyasyonlar benzer çalışma prensibine sahiptir. Toz yataklı ergitme yöntemlerine örnek olarak elektron demetiyle ergitme, seçici lazer ergitme ve seçici lazer sinterleme gösterilebilir.

Seçici lazer ergitme, paslanmaz çelik ve titanyum gibi metal tozlarının lazer ışını yardımıyla ergitilerek istenen geometrideki parçanın imal yöntemidir. Seçici lazer ergitme yönteminde lazer ışını, hammaddenin tamamen ergitilmesi için kullanılır. Seçici lazer sinterleme yönteminde ise toz metal yeterince ısıtılmasına rağmen tamamen ergitilmeden kullanılır. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.3'te görülmektedir. Bu tez kapsamında elektron demetiyle ergitme yöntemi kullanılacak olup bu yöntem ayrı bir başlık altında ayrıntılı olarak incelenecektir.

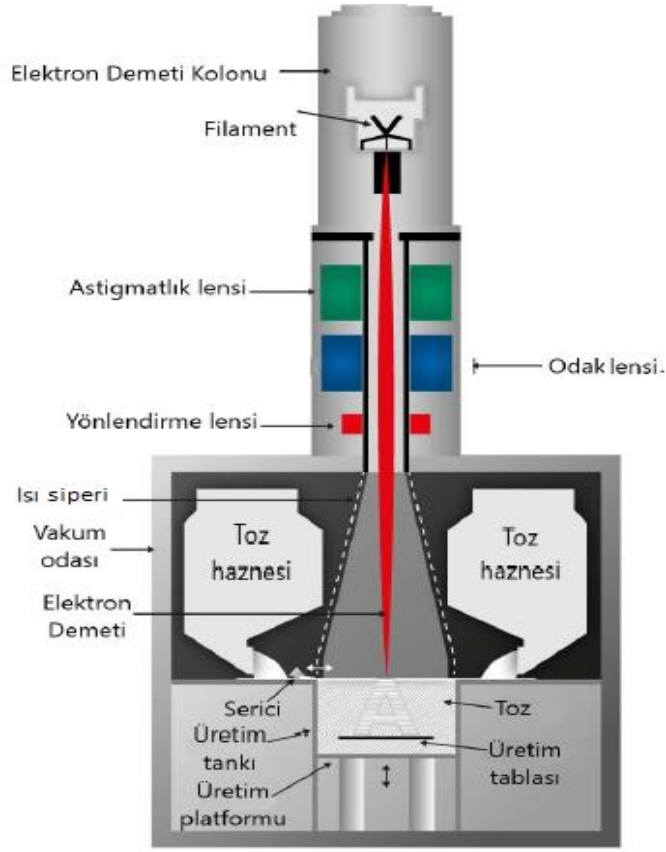


Şekil 2.3. Seçici lazer ertitme ve sintereleme teknolojilerinin genel yapısı [10].

### 2.2.3. Elektron demetiyle ertitme yöntemi

#### 2.2.3.1. Elektron demetiyle ertitme yöntemi ve yöntemde kullanılan makinanın özellikleri

Toz yataklı ertitme yöntemlerinden olan elektron demetiyle ertitme yöntemi ARCAM şirketi tarafından icat edilmiştir. Elektron demetiyle ertitme yöntemi, geleneksel yöntemlerle üretilemeyen veya üretmesi zor olan yapısal parçaların üretimine olanak sağlar. Bu tez kapsamında ARCAM Q20plus makinası kullanılacaktır. Makinanın bölümleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Makinanın genel özellikleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Elektron demetiyle ergitme makinesinin sistem şematığı [8]

Şekil 2.4'te gösterilen elektron demetiyle ergitme cihazında parça inşasının yapıldığı alan vakum altındadır. Bu yöntemde metal tozu ergitmek için elektron demetinin enerjisi kullanılır. Genellikle serilen tozun katman kalınlığı 50  $\mu\text{m}$ -200  $\mu\text{m}$  arasındadır. Süreç başlamadan önce toz yatağı, odaklanmamış elektron demeti tarafından ön ısıtmaya tabi tutulur. Elektron demeti belirli bir voltaj değeriyle ivmelendirilmeden önce, bir elektron tabancasından üretilir. Bu elektron demetleri, mercekler tarafından odaklandırılıp ayrıca tarama bobini yardımıyla yönlendirilerek istenen pozisyonda inşa tablasına aktarılır [12]. Elektron demetinin gücü bu demetin akımı ile hesaplanırken, elektron ışınının odak ve tarama hızı sırasıyla odak dengesi ve hız fonksiyonu ile hesaplanır. Ti-6Al-4V'nin üretimi için elektron demetinin yüksek akım değeri ve işlemin tarama hızı sırasıyla 30 mA ve 10000 mm/s değerlerine ulaşırken, hammadde 700 °C'nin üzerinde bir sıcaklığa sahiptir. Bu olay sadece hammaddenin ısınmasına değil aynı zamanda parçacıkların sinterlenmesine de yardımcı olur [13]. Metal tozlarının tamamen erimesinin sağlanması için bir sonraki ergiyik sırasında elektron ışınının akımı ve tarama hızı azaltılır. İnşa edilen katman bittikten sonra, inşa platformu aşağı indirilir ve bu işlem her katmandan sonra tekrar edilerek nihai geometri elde edilir.

Tablo 2.4. ARCAM Q20plus cihazının karakteristik özellikleri [8].

Maksimum inşa ölçüleri	350x380 mm
Makinanın ölçüleri	2400x1300x2945 mm(WxDxH)
Maksimum ışın demeti gücü	3000W
Minimum demet çapı	140 µm
Soğutma	Su soğutmalı finli yapı
Inşa atmosferi	4 x 10 <sup>-3</sup> mbar
Güç kaynağı	3x400 V, 32 A, 7 kW
Ağırlık	2900 kg
CAD arayüzü	STL

### 2.2.3.2. Elektron demetiyle ergitme yönteminin avantajları

- Geleneksel yöntemlerle ile üretilmeyen kompleks geometriye sahip parçalar bu yöntemle üretilir.
- Geleneksel yöntemlere göre malzeme israfı azdır.
- Ön ısıtma sisteminden dolayı artık gerilmeler azdır.
- Kompleks parçaların prototip üretimlerinde maliyet düşüktür.
- Lazer kaynaklı eklemeli imalat yöntemlerine göre enerji verimliliği yüksektir.

### 2.2.3.2. Elektron demetiyle ergitme yönteminin dezavantajları

- Geleneksel yöntemlere göre pahalı bir yöntemdir.
- Diğer katmanlı imalat yöntemlerine göre yüzey kalitesi yönünden daha pürüzlü parçalar üretilir.
- Minimum demet çapından dolayı ince ve kafes geometrilerin üretilmesi zordur.

## 2.3. Elektron Demetiyle Ergitme Yöntemiyle Üretilen Ti-6Al-4V Alaşımların Mekanik Özellikleri

### 2.3.1. Elastik özellikleri inceleyen yayınlar

NASA, ARCAM A2X cihazını kullanarak Ti-6Al-4V malzemelerin üretimlerini yaparak kapsamlı bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımına sahip

numunelerin farklı sıcaklık değerlerindeki mekanik özellikleri tablolar haline getirilerek kıyaslanmıştır. Oda sıcaklığında bulunan değerler şu şekildedir:

Young modülü 118 GPa,

Kayma modülü 45.7 GPa,

Poisson oranı 0.29.

Bu değerler dikey yönde inşa edilen numuneye aittir [14].

Haijun Gong vd. yaptıkları çalışmalara göre z yönünde üretilen Ti-6Al-4V numunelerde Young modülü 120 GPa olarak ölçmüşlerdir. Bulunan bu değer çekme testi ile elde edilmiştir. Numuneler Arcam S400 cihazında üretilmiştir [15].

Everth Hernandez-Nava, doktora tezinde elektron demetiyle ergitme metodu kullanarak üretilen Ti6Al4V malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu doktora tezi kapsamında üretilen numunelerde yatay inşa yönünde 110 GPa ve dikey inşa yönündekilerde 116.5 GPa şeklinde ölçerek Young modülü değerlerinde belirgin fark olduğu gözlemlenmiştir. [16].

Guillaume Mandil vd. elektron demetiyle ergitme yöntemiyle tek inşa yönü(dikey) kullanarak titanyum numuneler ürettirmişlerdir. Numunelere çekme testi uygulayarak mekanik özellikleri incelemiştir. Bu çalışmalar sonucunda Young's modülünü 114 GPa ve Poisson oranını 0.34 olarak bulmuşlardır [17].

Xiaoqing W. vd. elektron demetiyle ergitme yönteminde farklı işleme hızlarının young modülüne etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmaların sonucuna göre genel olarak işleme hızı arttıkça Young modülünün arttığını gözlemlemişlerdir. Makale sonuçlarından çıkartılan Young modül değerleri 111.7-119 GPa aralığındadır [18].

N. Stelzer vd. çalışmalarında ARCAM A2X cihazını kullanarak elektron demetiyle ergitme yöntemiyle Ti6Al4V numuneleri 3 farklı inşa yönünde ürettirmişlerdir. Dikey, yatay ve 45 derece olarak inşa edilen bu ürünlerin elastik modülleri sırasıyla 115.4 GPa, 100,2 GPa, 102.4 GPa çıkmıştır. Parçalara üretim sonrası ısıl işlem uygulanmamış ve üretildikleri haliyle teste tabi tutulmuşlardır [19].

Yukarıda verilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Young's modülü ve Poisson oranının literatür taramasından çıkan sonuçları

Referans(Kaynak)	Young's Modülü (GPa)	Poisson Oranı
[14]	118	0.29
[17]	114	0.34
[15]	120	-
[16]	Yatay İnşa Yönü : 110	-
	Dikey İnşa Yönü : 116.5	-
[18]	111.7 - 119	0.34
[19]	Yatay İnşa Yönü : 110	-
	Dikey İnşa Yönü : 100.2	-

### 2.3.2. İnşa yönlerinin mekanik özelliklere etkisini inceleyen yayınlar

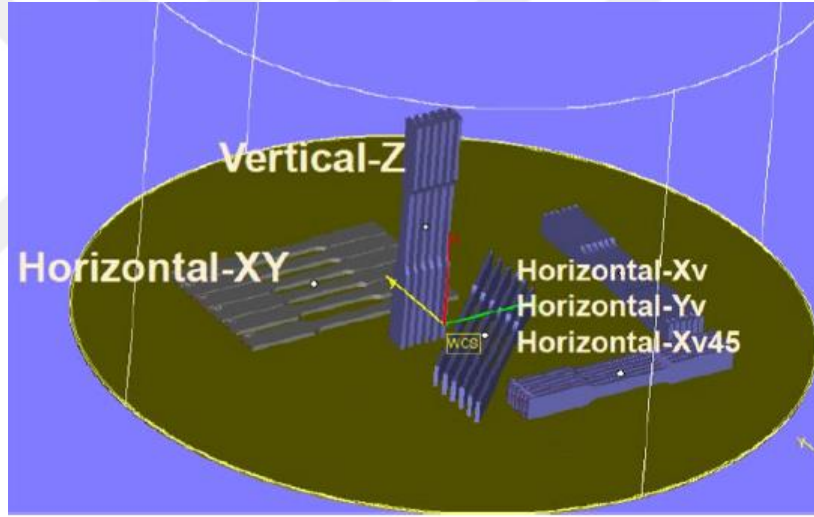
Haize Galarraga vd. yaptıkları çalışmada elektron demetiyle ergitme yöntemi kullanılarak farklı inşa yönlerinde titanyum parçalar üretilmişlerdir. Dikey ve yatay olarak üretilen titanyum parçalar hem kendi aralarında ve hem de tavlanmış döküm modellerle karşılaştırılmıştır. Yatay numunelerde akma ve çekme dayanımları sırasıyla 1006 MPa ve 1066 MPa olarak bulunmuştur. Dikey numunelerde ise akma ve çekme dayanımları sırasıyla 1001 MPa ve 1073 MPa olarak bulunmuştur. Bu yapılan çalışmaya göre dikey ve yatay inşa yönlerinde mekanik özelliklerde önemli farkların ortaya çıkmadığı görülmüştür. Tavlanmış döküm modelde ise akma ve çekme dayanımları sırasıyla 855 MPa ve 930 MPa olarak bulunmuştur. Bu çalışmaya göre katmanlı imalat ile üretilen Ti6Al4V parçaların geleneksel yöntemlerle üretilen parçalara göre mekanik özellikler açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmalarda ARCAM A2 makinası kullanılmıştır [20].

NASA, oda sıcaklığında yaptığı çekme testlerinde dikey ve yatay yönde ürettiği iki farklı numunede farklı mekanik özellikler saptamıştır. 3 farklı dikey numunenin ortalama değerleri alınacak olursa, akma dayanımı 1025 MPa, çekme dayanımı ise 1130 MPa bulunmuştur. Yatay numunelerde ise akma ve çekme dayanımları sırasıyla 960 MPa ve 1065 Mpa olarak bulunmuştur [14].

P. Edwards vd. elektron demetiyle ergitme yöntemiyle Ti6Al4V malzemelere sahip numuneleri farklı inşa yönlerinde ürettirmişlerdir. Yorulma testleri bu çalışmadaki ana kısmı oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalarda malzemedeki gözenekliliğin ve yüzey pürüzlülüğünün yorulma performanslarını direk etkilediği gözlemlenmiştir. Bu makale kapsamında ayrıca Ti6Al4V malzemelerin farklı inşa yönlerindeki mekanik özellikleri saptanmıştır. Buna göre

dikey olarak üretilen parçada akma dayanımı 818 MPa, çekme dayanımı ise 851 MPa olarak bulunmuştur. Yatay olarak üretilen parçada akma dayanımı 783 MPa, çekme dayanımı ise 833 MPa bulunmuştur. Bu çalışmadaki mekanik özelliklerin literatür taramasında karşılaşılan diğer titanyum malzemelerin mekanik özelliklerine göre bir miktar düşük çıktığı gözlemlenmiştir [21].

Charlottede Formanoir vd. 3 farklı inşa yönünü(dikey z, yatay xy, yatay xv) kullanarak ARCAM A2 makinası ile üretimler yaptırmıştır. İnşa yönleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Üretilen çekme testi numuneleri dikdörtgen kesitlidir. Numunelerin akma dayanımları arasında çok küçük farklar ortaya çıkmıştır. Akma dayanımları dikey z yönünde üretilen numunenin 1000MPa, yatay xy yönünde üretilen numunenin 1024 MPa ve kenar(kalınlık) üzerindeki yatay xv yönünde üretilen numunenin 1063 MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmada bulunan değerlerde tolerans değerleri verilmediği için akma dayanımları arasında hassas bir kıyaslama yapılması mümkün görünmemektedir [22].



Şekil 2.5. İnşa yönlerinin gösterimi [22]

Yuwei Zhai vd. Ti6Al4V malzemeleri elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretebilmek için iki farklı ARCAM cihazı kullanmışlardır. Bu cihazlardan bir tanesi ARCAM A2 modeli iken diğeri ARCAM Q10 modelidir. A2 cihazı ile üretilen titanyum parçalarda inşa yönünün akma(1001-1006 MPa) ve çekme dayanımlarına(1066-1073MPa) etki etmediği gözlemlenmiştir. Q10 cihazı ile üretilen numunelerde ise yatay numunelerde akma dayanımı 973 MPa ve çekme dayanımı 1032 MPa iken, dikey numunelerde akma dayanımı 1051 MPa ve çekme dayanımı 1116 MPa'dır. ARCAM A2 cihazında maksimum ışın gücü 3500 watt değerine ulaşırken, Q10 cihazında bu değer maksimum 3000 watt'dır [23].

### 2.3.3. Talaşlı işleme ve ısıt işlemleri inceleyen yayınlar

S. Franchitti vd. Ti-6Al-4V numunelerin üretimi için ARCAM A2X cihazını kullanmıştır. Üretilen titanyum numunelere talaşlı işleme ve sıcak izostatik presleme uygulanarak numuneler 3 farklı şekilde incelenmiştir. Bu parametrelerin mekanik özelliklere etkileri Tablo 2.6'da gösterilmiştir [24].

Tablo 2.6. Talaşlı işleme ve sıcak izostatik preslemenin mekanik özelliklere etkisi

	Üretilen numunenin yalın hali	Talaşlı işlenen numune	Talaşlı işleme + sıcak izostatik presleme
Akma Dayanımı(MPa)	857	958	860
Çekme Dayanımı(MPa)	919	1020	929
Young Modülü(GPa)	104.8	115.3	109.9

C. Formanoir vd. ısıt işlem tiplerinin mekanik özelliklere etkilerini incelemiştir. Çalışmada 4 adet numuneye 60 ve 30'ar dakikalık hava ve fırın soğutması ile ısıt işlemler uygulanmıştır. Bu numunelerden elde edilen sonuçlar ısıt işlem uygulanmayan numunelerinkilerle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ısıt işlemin akma dayanımını belirgin ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir [22].

A. Kirchner vd. sıcak izostatik preslemenin akma dayanımı ve Young modülü üzerine etkilerini incelemiştir. Sıcak izostatik presleme, 122 GPa olan young modülü değerini 113 GPa'a kadar düşürmektedir. ısıt işlem sıcaklığı yükseldikçe mekanik değerler daha fazla düşmektedir. Akma gerilmesi değeri de ısıt işlem sıcaklığının artmasıyla azalmaktadır [25].

P. Edwards vd. gerilme giderme ısıt işleminin elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V numunelere etkisini incelemiştir. Elektron demetiyle ergitme yönteminde üretim tablası işlem öncesinde yüksek ısılara çıkartıldığı için numune içerisinde artık gerilmeler oluşmamaktadır. Tabla ön ısıtıldığı için erime ve katılma sırasındaki lokal sıcaklık değişiklikleri minimuma indirilmektedir. Young's modülü ve akma dayanımı gibi değerlerin artırılması için gerilme giderme ısıt işlemine gerek kalmamaktadır. Fakat eğer incelenmesi gereken sorun yorulma dayanımı ve gözeneklilik ise ısıt işlemin gerekli bir proses olduğu görülmektedir [21].

Stefania Bruschi vd. yaptıkları çalışmada talaşlı işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüklerine olan etkilerini incelemiştir. Kesme ve ilerleme hızları değiştirilerek

deneyler yapılmıştır. Kesme hızı artırıldıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri olan Ra'nın azaldığı görülürken, ilerleme hızı arttırıldıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri olan Ra'nın arttığı görülmektedir [26].

#### **2.3.4. Diğer parametreleri inceleyen yayınlar**

F. Memu, yüksek lisans tezinde üretim tablası üzerinde parça konumunun malzeme özelliklerine etkisini incelemiştir. Üretim tablası üzerinde parçaların soğuma hızının tablanın köşelerinde tablanın merkezine göre daha hızlı olduğunu göstermiştir. Bundan dolayı tablanın merkezinde üretilen numuneler ile kenarlarında üretilen numuneler arasında mekanik özelliklerde %5 fark olduğu görülmüştür. Numune üretiminde ARCAM Q20plus cihazı kullanılmıştır [27].

S. T. Yiğitbaşı, yüksek lisans tezinde EBM yöntemiyle ürettiği Ti-6Al-4V numunelerin çekme özelliklerini, standarttan aldığı döküm ve dövme yöntemiyle elde edilen Ti-6Al-4V numunelerin sahip olduğu çekme özellikleri ile kıyaslamıştır. ARCAM Q20plus cihazı ile üretilen numunelerin çekme özelliklerinin döküm ve dövme yöntemiyle üretilen minimum malzeme özelliklerini sağladığı görülmüştür [28].

A. Orhangül, yüksek lisans tezinde seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen IN626 malzemeye sahip numunelerin dinamik modellerini darbe ile uyarma test yöntemi ile doğrulamıştır. Numuneler serbest olarak asılmıştır. Elastik bir darbe ve mikrofon yardımıyla numunelerin doğal frekansları belirlenmiştir [29].

## 3. TEORİ

### 3.1. Sayısal İşaret İşleme

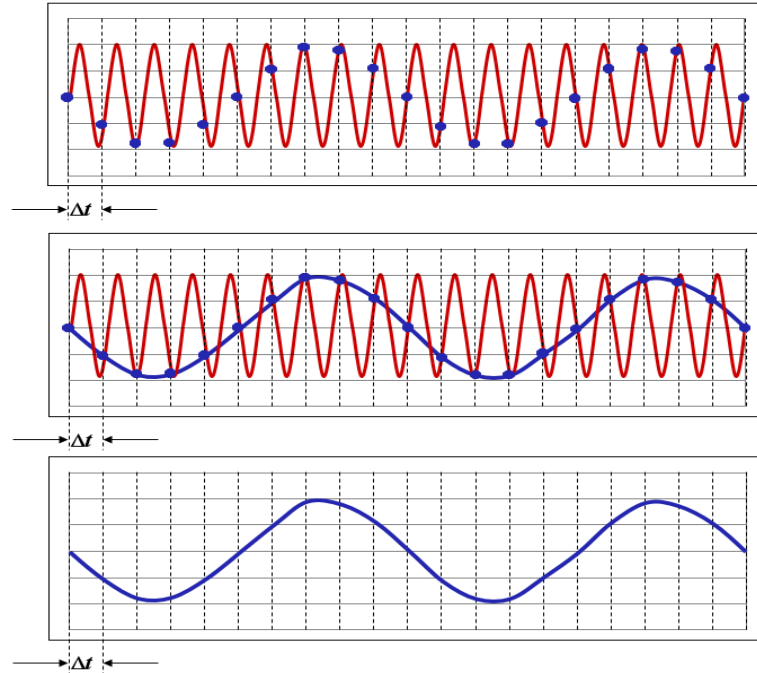
Tezin bu bölümünde, takip eden bölümlerde kullanılan sayısal işaret işleme ve titreşim teorisi ile ilgili kısa bilgiler verilecektir.

#### 3.1.1. Frekans örtüşmesi

Sinyallerin analog formlarından dijital formlarına dönüşümü sırasında, örtüşme nedeniyle frekansların ölçülmesinde hatalar meydana gelebilmektedir. Örtüşme, dinamik bir olayın yeterince örneklendirilememesinden kaynaklanmaktadır [30] [31] [32].

Örtüşme, örneklendirilmiş bir sinyalin spektrumunda meydana gelen bozulmadır. Bu bozulmalar, örnekleme oranının olması gerekenden çok daha düşük olmasından kaynaklanır. Böyle durumlarda frekans doğru şekilde elde edilemez [30] [31] [32].

Örtüşme, yüksek frekanslı verilerin gerçekte olduklarından daha düşük frekanslarda görülmelerine sebep olur. Böylelikle frekanslar yanlış veya hatalı yorumlanırlar. Örneğin, Şekil 3.1’de gösterilen kırmızı renkli sinüs dalgası orjinal sinyaldir. Mavi noktalar sinyallerin ne sıklıkla örneklendirildiğini göstermektedir. Mavi sürekli çizgi ise sinyalin düşük örnekleme oranında nasıl görüldüğünün göstergesidir. En altta yer alan grafik, bu frekansların olması gereken frekanslardan çok daha düşük elde edildiklerini gösterir [30].



Şekil 3.1. Frekans örtüşmesi kavramının gösterimi [30].

Bu başlık altında örtüşme kavramının anlatılmasında kullanılacak terimlerin tanımları aşağıdaki gibidir [30] :

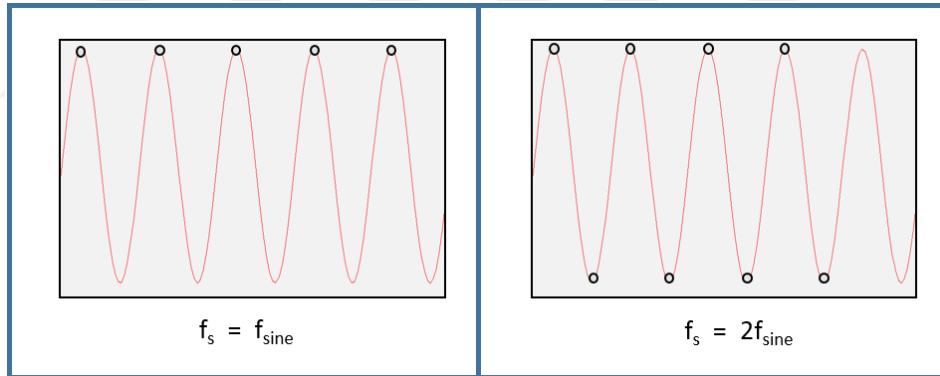
**Bant Genişliği;** test kapsamında ölçülecek frekans aralığıdır. Bant genişliği örnekleme frekansının yarısı kadar olmalıdır.

**Örnekleme Frekansı;** elde edilen frekansın bir saniyedeki örnek sayısıdır. Örnekleme frekansı bant genişliğinin iki katıdır.

**Ölçüm Aralığı;** ölçülmesi planlanan frekans aralığıdır. Ölçüm aralığı bant genişliğinin 80% idir.

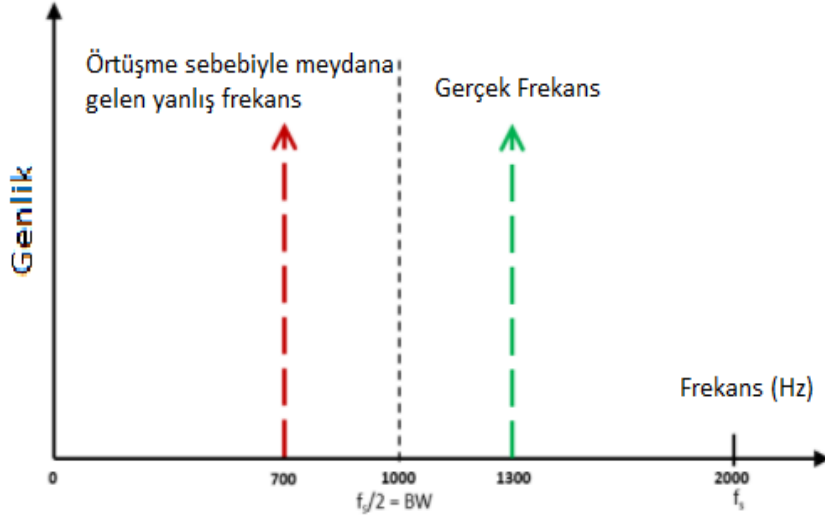
**Nyquist oranı;** sinyalin frekans ölçümünde hata oluşturmadan örneklenebileceği minimum frekanstır.

Şekil 3.2'de solda yer alan grafikte, bir sinüs dalgasının yetersiz örnekleme sayısı görülmektedir. Örnekleme sayısının yetersizliğinden dolayı frekans düzgün bir şekilde elde edilememiştir. Bu grafikten elde edilen frekans sıfırdır. Şekil 3.2'de sağda yer alan grafikte ise örnekleme sayısının yeterli olduğu görülmektedir. Bundan dolayı frekans doğru bir şekilde elde edilebilmiştir. Bu grafikten elde edilen frekans  $f_{sine}$  dır.  $f_s$  ifadesi örnekleme frekansını gösterirken,  $f_{sine}$  ifadesi sinüs dalgasının frekansını göstermektedir [30].



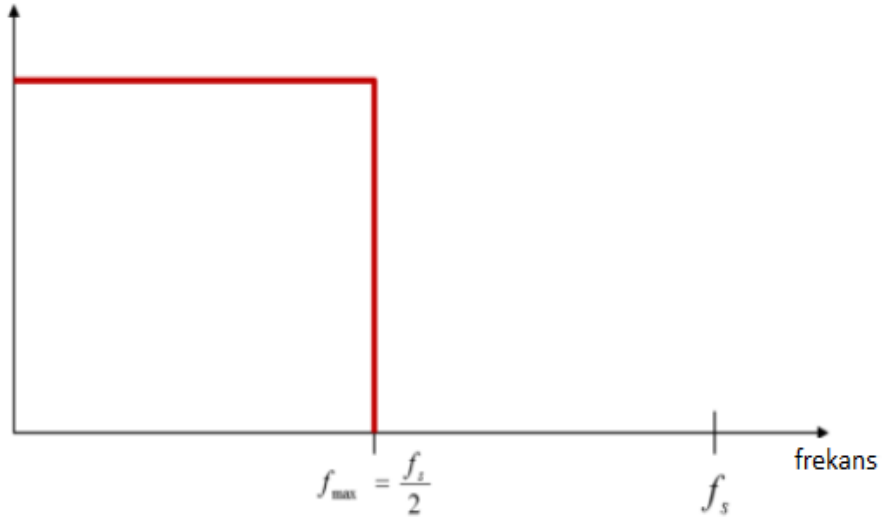
Şekil 3.2. Frekans örtüşmesi örneği [30].

Nyquist teoremine uyulmayan durumlarda, bant genişliğinin üzerinde elde edilen frekansların maksimum frekansa göre aynası görüntülenir. Yani elde edilen frekans, bant genişliğinin ne kadar üzerinde ise bant genişliğinin aynı oranda o kadar altında bir frekansmış gibi görüntülenir. Şekil 3.3'te bunun örneği görülmektedir.  $f_s/2$  frekansının üzerinde yer alan 1300 Hz'lik frekans 700 Hz olarak görüntülenir.



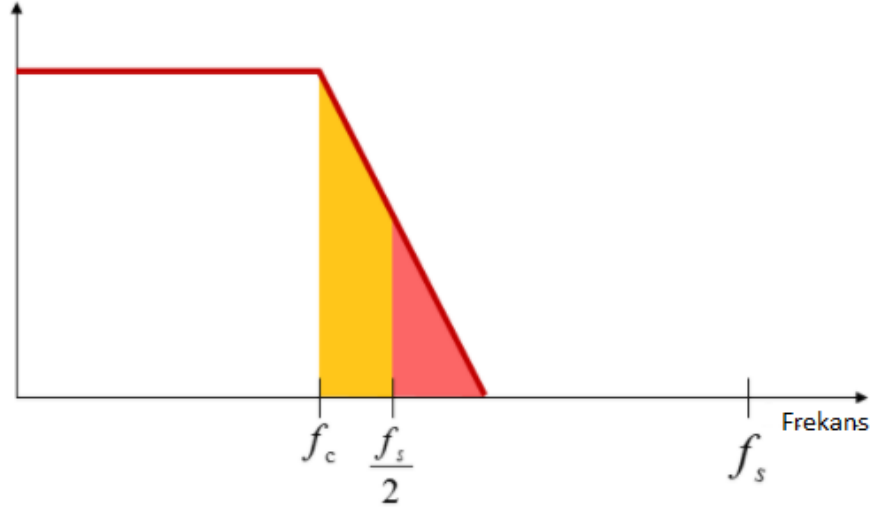
Şekil 3.3. Bant genişliğinin üzerinde kalan gerçek frekansın örtüşme etkisiyle aynalanması [30].

Örtüşmenin önlenmesi için filtre yöntemi kullanılır. Buna düşük geçişli filtre denir. Böyle durumlarda Şekil 3.3'te görülen 1300 Hz değerindeki frekansın 700 Hz olarak görüntülenmesi olmaz. Bu filtre yöntemlerinden ideal olarak gösterilene Şekil 3.4'te gösterilen tuğla duvar yöntemidir. Bu filtre yönteminde bant genişliğinin ötesinde yer alan sinyaller tamamen yok edilir [30].



Şekil 3.4. İdeal örtüşme önleme filtre yöntemi [30].

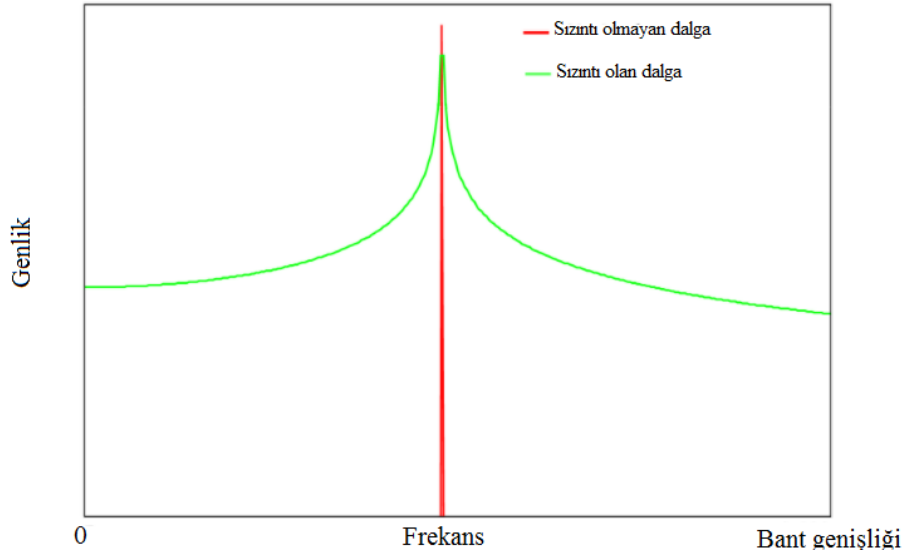
İdeal örtüşme önleme filtresi gerçek dünyada karşılığı olmayan bir filtre yöntemidir. Bundan dolayı bu tez kapsamında kullanılan örtüşme önleme yöntemi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu yöntemde bant genişliğinin 20%'sinin ötesindeki tüm frekanslar engellenir. Böyle durumlarda taranan frekans spektrumu 0 Hz'den bant genişliğinin 80% ine kadardır [30].



Şekil 3.5. Bu tez kapsamında kullanılan örtüşme önleme filtre yöntemi [30].

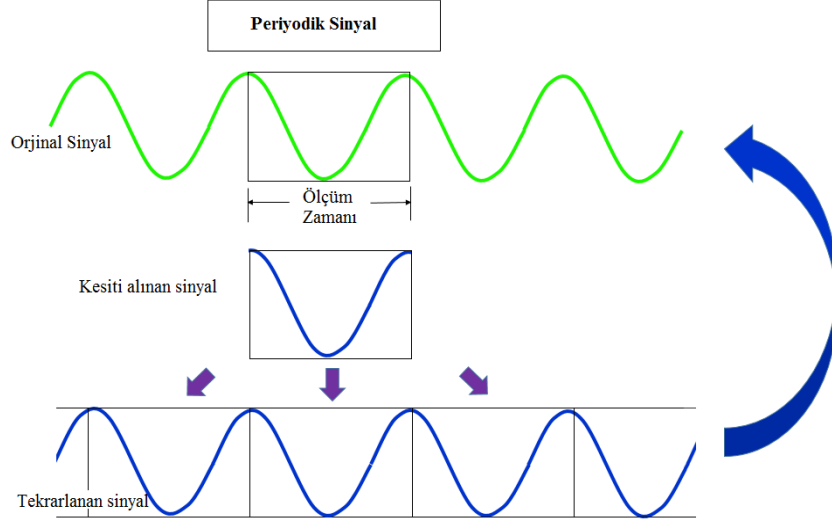
### 3.1.2. Spektral sızıntı

Sızıntı kavramı sinyalin periyodik olup olmadığı ile ilgilidir [33]. Şekil 3.6’da sızıntıya sahip olan sinyal, sızıntı olmayan sinyale göre daha düşük genliğe ve daha geniş frekans yanıtına sahiptir. Bundan dolayı zaman alanında elde edilen frekansların frekans alanında ölçülmeleri zordur [30].



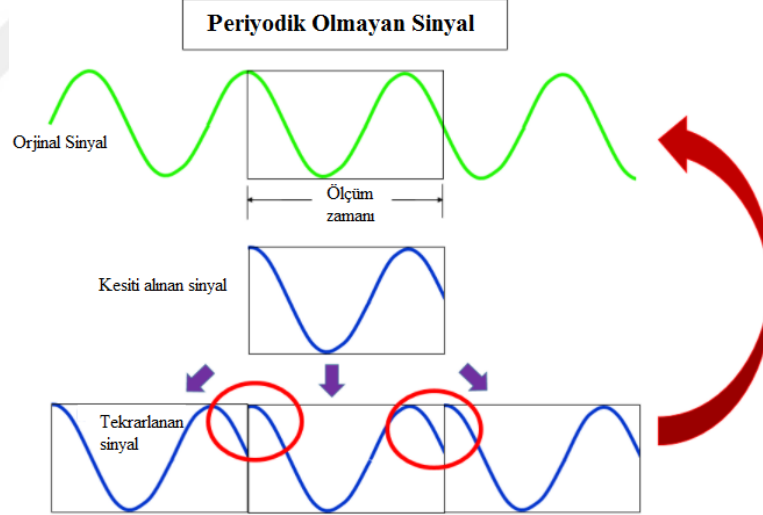
Şekil 3.6 Sızıntı olan ve olmayan sinyalin gösterimi [30].

Şekil 3.7’de periyodik olan bir sinyal görülmektedir. Bir sinüs dalga sinyalinin belirli küçük bir kesiti alınır. Bu kesit tekrarlı halde çoğaltılır. Çoğaltılan bu kesitten elde edilen sinyal, orjinal sinyal ile karşılaştırıldığında birebir eşleşiyor ise bu sinyale periyodik sinyal denir. Periyodik sinyallerde sızıntı problemi oluşmaz [30].



Şekil 3.7. Periyodik sinyalin gösterimi [30].

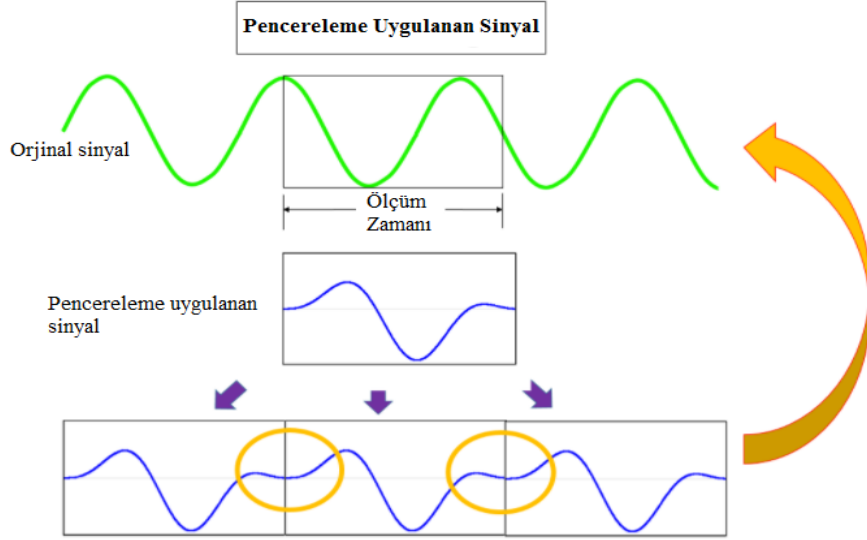
Şekil 3.8’de periyodik olmayan bir sinyal görülmektedir. Bir sinüs dalga sinyalinin belirli küçük bir kesiti alınır. Bu kesit tekrarlı halde çoğaltılır. Çoğaltılan bu kesitten elde edilen sinyal, orjinal sinyal ile karşılaştırıldığında birebir eşleşme olmuyor ise bu sinyale periyodik olmayan sinyal denir. Tekrarlanan sinyallerin birleşme noktalarında süreksizlikler meydana gelir [30].



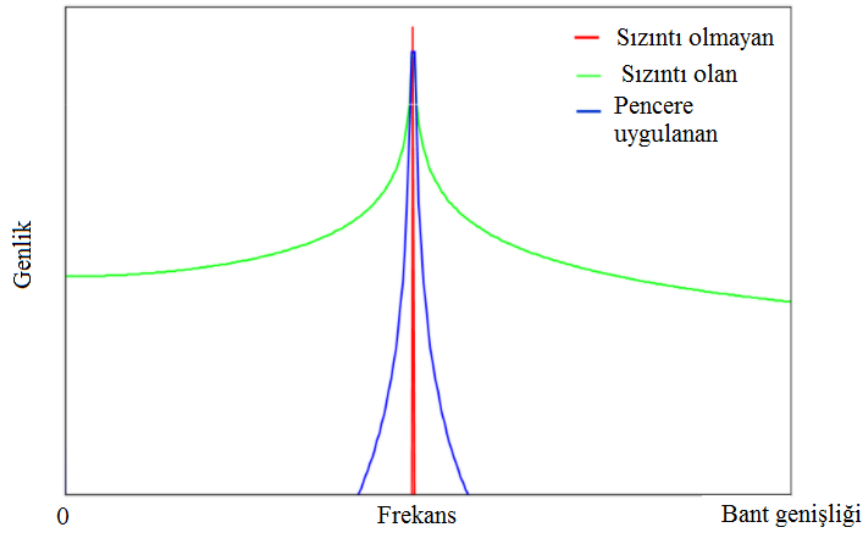
Şekil 3.8. Periyodik olmayan sinyalin gösterimi [30].

### 3.1.3. Pencere Kavramı

Sızıntıyı azaltmak için sinyal datalarına matematiksel fonksiyon olan pencere kavramı uygulanır [33]. Pencere fonksiyonu sayesinde sinyallerde yaşanan keskin süreksizlikler mümkün mertebede azaltılır. Şekil 3.9’da pencerelenen sinyal görülmektedir. Şekil 3.10’da sızıntı olan, sızıntı olmayan ve sızıntının pencere fonksiyonu ile engellendiği sinyaller gösterilmiştir [30].



Şekil 3.9. Pencereleme uygulanan sinyal [30].



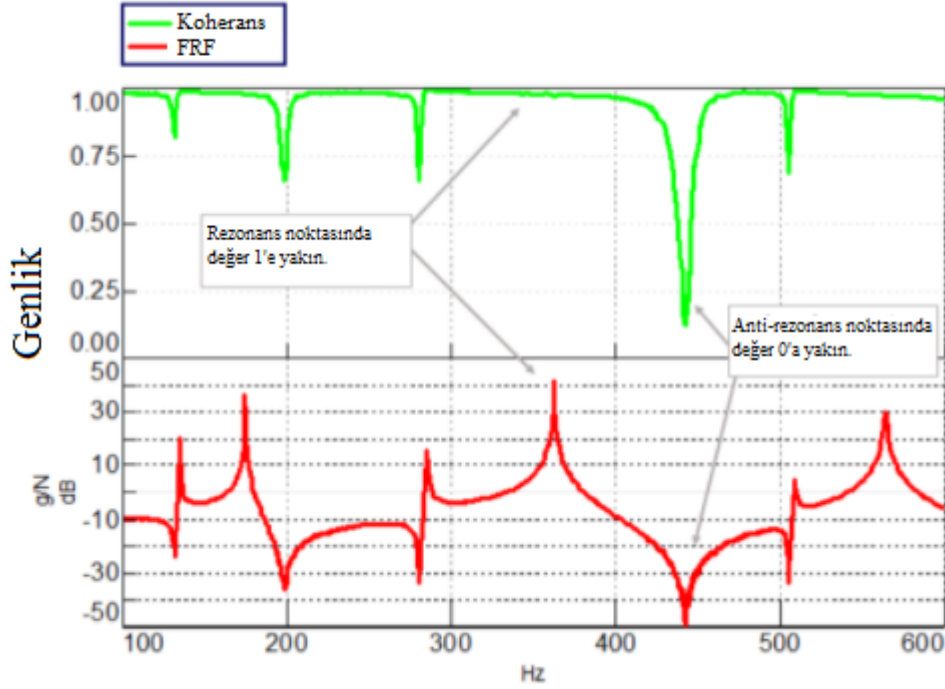
Şekil 3.10. Sızıntı olan, sızıntı olmayan ve sızıntının pencere fonksiyonu ile engellendiği sinyaller [30].

### 3.1.4. Koherans

Koherans grafikleri, sinyallerin frekansa bağlı şekilde tanımlandığı grafiklerdir. Koherans, çıkış sinyalinin ne kadarının giriş sinyali ile alakalı olduğuyula ilgilidir. İki sinyalin koherans kabul edilebilmesi için bu iki sinyalin sabit bir faz farkına, aynı frekans ve dalga biçimine sahip olmaları gerekir [30] [31] [34].

Koherans değeri 0 ile 1 arasındadır. Bu değerın sıfır olması iki sinyal arasında bir ilişki olmadığını gösterirken değerin 1 olması iki sinyal arasında tam bir ilişki olduğunu gösterir. Koherans grafikleri, kontrol ünitelerinin kalitesini belirlemek için kullanılırlar. Koherans değerinin 1'e yakın olması giriş ve çıkış sinyalinin arasındaki ilişkinin mükemmel olduğunu gösterir. Bu durum kontrol testinin kontrol yeteneğine tam hakim olduğunun kanıtıdır. Bu

değerin 0'a yakın olması kontrol kalitesinin düşük olduğunu gösterir. Örneğin zarar görmüş ve hatalı bir kablo veya farklı bir arızalı parça varsa kontrolün kalitesi düşüktür. Şekil 3.11'de örnek bir koherans grafiği görülmektedir. Hatalı olmayan ölçümlerde koherans değeri rezonans frekansları hariç diğer noktalarda 1'e yakındır. Fakat Şekil 3.11'de görülen ölçümlerde genliğin çok yüksek olduğu rezonans noktasında koherans değeri 1'e yakinken, genliğin çok düşük olduğu anti-rezonans noktasında koherans değeri 0'a yakındır. Böyle durumlar ölçümlerde bir sorun olduğunun göstergesidir [30].



Şekil 3.11. Örnek koherans grafiği [30].

Yapılan testlerde eğer tek bir ölçüm alınrsa sistemde rezonans noktaları farketmeksizin tüm koherans noktaları 1 değerini alacaktır. Koherans grafiğinin anlamlı olabilmesi için ölçüm yapılacak noktadan en az iki ölçüm alınması gereklidir. İdeal ölçüm sayısı yapılan testlere göre farklılık göstermektedir. Bu tez kapsamında her bir noktadan 5 ölçüm alınmıştır.

### 3.2. Kayıp Faktörü ve Sönümleme Faktörünün Elde Edilme Teorisi

Bu tez kapsamında sönümleme faktörünün hesaplanması için yarım güç bant genişliği metodu kullanılmıştır. Yarım güç bant genişliği metodunun grafiksel gösterimi Şekil 3.12'de verilmiştir. Bu yöntemde göre ilk olarak, rezonans tepe noktaları frekans yanıt fonksiyon grafiğinden bulunur ve bu frekansa karşılık gelen noktalar frekans ekseninde  $w_n$  olarak adlandırılır. Yatay ekseninde  $w_n$  frekansına karşılık gelen tepe noktaları, dikey eksen olan genlik ekseninde A olarak adlandırılır. A genlik değeri  $\sqrt{2}$  sayısına bölünür ve bu değer ile

cevap fonksiyonunun grafiği kesitirilerek eğri üzerinde  $Z_1$  ve  $Z_2$  yarım güç noktaları bulunur. Eğri üzerindeki  $Z_1$  ve  $Z_2$  yarım güç noktalarının dikey iz düşümünün yatay ekseninde karşılık geldiği noktalar sırasıyla  $\omega_1$  ve  $\omega_2$  noktalarıdır. Buradan hareketle bant genişliği [35] [36]:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \quad (3.1)$$

olarak elde edilir.

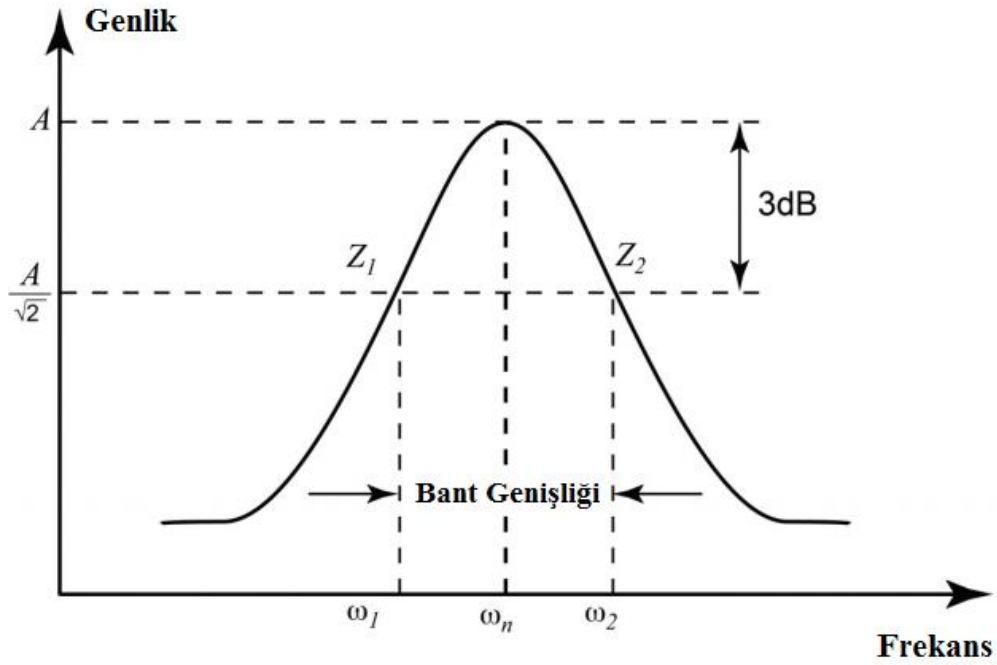
Kayıp faktörü( $\eta$ ) değeri [35]:

$$\eta = \frac{\Delta\omega}{w_n} \quad (3.2)$$

olarak hesaplanır. Bu metod aynı zamanda 3dB metodu olarak da adlandırılır. Sönümlenme faktörünün değeri ;

$$Q = \frac{w_n}{\Delta\omega} \quad (3.3)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 3.12. Yarım güç bant genişliği metodunun grafiksel gösterimi [35]

## 4. ELEKTRON DEMETİYLE ERGİTME YÖNTEMİYLE Ti-6Al-4V NUMUNE ÜRETİMİ

### 4.1. Numune Boyutlarının Belirlenmesi

Bu tez kapsamında yapılan darbe ile uyarma test yönteminde ASTM E1876-15 standardı referans alınmıştır. Diğer test yöntemlerinde olduğu gibi bu test yönteminde de testi yapılacak numunenin teste uygun ve ideal boyutlarda olması istenir [1].

Bu tez kapsamında, darbe ile uyarma test yönteminin uygulanabilmesi için dikdörtgen biçiminde Ti-6Al-4V numuneler üretilmiştir. Numunelerin kalınlık, en ve boy ölçülerinin belirlenmesinde ASTM E-1876-15 standardı referans alınarak uyulan kısıtlamalar şu şekildedir [1]:

- Kayma modülünün hesaplanmasında hata payının en aza indirilmesi için genişlik/kalınlık oranının 5'ten büyük olması gereklidir.
- Üretilen dikdörtgenel numunelerin tüm yüzeylerinin düz olması gereklidir.
- Numunenin uzunluk, genişlik ve kalınlığı boyunca karşılıklı yüzeylerinin paralellik oranının 0.1% içerisinde olması gerekmektedir.
- Numunenin uzunluğu en fazla 0.1% farklılıkla ölçülmelidir. Kalınlık ve genişlik ölçümlerinde ise 3 farklı noktadan yapılacak ölçümlerde en fazla 0.1% farklılık bulunması gereklidir.
- Testi yapılacak numunelerin yüzeyinde veya iç bölgelerinde büyük çatlaklar veya boşluklar olmamalıdır.

Kullanılacak test ekipmanlarının özelliklerinden dolayı kurulacak test düzeneğinde maksimum ölçülmesi planlanan frekans 2500 Hertz olarak belirlenmiştir.

Üretilen Ti-6Al-4V numunesinin titreşim analizlerine girdi oluşturacak dinamik elastik malzeme özellikleri Young's modülü, kayma modülü ve Poisson oranıdır. Dinamik Young's modülünün hesaplanması için numunenin eğilme durumundaki temel rezonans frekansının bulunması gereklidir. Dinamik Kayma modülünün hesaplanması için ise burulma durumundaki temel rezonans frekansının bulunması gereklidir. Kurulması planlanan test düzeneğinde maksimum ölçülebilecek frekans 2500 Hertz olduğu için bu iki temel frekans değerinin bu aralıkta bulunması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda numunelerin nihai boyutu 6 mm x 60 mm x 200 mm olarak belirlenmiştir.

Düz yüzeylere ve hassas toleranslara sahip, 6 mm x 60 mm x 200 mm boyutlarında test numunelerinin elektron demetiyle ergitme yöntemiyle elde edilebilmeleri için numunelere işleme payı verilmiştir. Bu nedenden dolayı numune, elektron demetiyle ergitme katmanlı imalat tezgahında 7 mm x 62 mm x 202 mm boyutlarında üretilmiştir.

#### 4.2. Kimyasal Bileşim ve Toz Karakteristiği

Ti-6Al-4V numuneler Şekil 4.1'de gösterilen ARCAM Q20plus tezgahında üretilmiştir. Numune üretimi için Ti-6Al-4V grade 5 tozu kullanılmıştır. Üretilen numuneler 45-106  $\mu\text{m}$  toz boyutlarına sahiptir. ARCAM şirketi tarafından verilen Ti-6Al-4V alaşımının ideal kimyasal bileşimi Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. ARCAM Ti-6Al-4V toz malzemesinin ideal kimyasal bileşimi [8].

Titanyum, Ti	Dengeli
Alüminyum, Al	6%
Vanadyum, V	4%
Karbon, C	0.03%
Demir, Fe	0.1%
Oksijen, O	0.15%
Nitrojen, N	0.01%
Hidrojen	0.001%



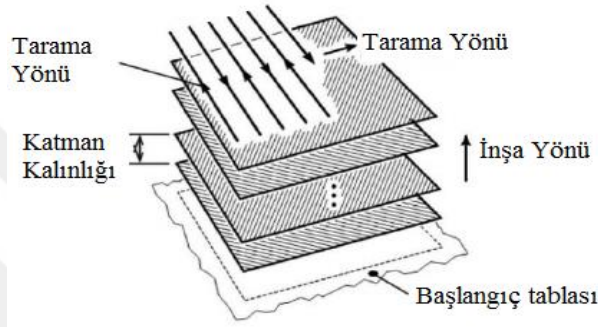
Şekil 4.1. ARCAM Q20plus Makinası

### 4.3. Üretim Parametreleri

Tez kapsamında üretilen tüm numuneler aynı üretim parametreleri ile üretilmiştir. ARCAM şirketi tarafından önerilen ve uygulanan üretim parametreleri Tablo 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir.

Üretim parametrelerinin tanımları kısaca özetlenecek olursa :

Katman kalınlığı ana üretim parametrelerinden biridir ve toz malzemenin boyutuna bağlıdır. Bu parametre üretilen geometrinin kalitesine direk etki etmektedir. İnşa edilen her katman bir tarama modeli ile oluşur. Tarama modeli, katman kalınlığı ve inşa yönü kavramları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Katmanlı imalat teknolojisinde katman kalınlığı, tarama yönü ve inşa yönünün gösterimi [37].

Demet akımı parametresi, prosesin giriş enerjisi ile ilgilidir. Bu akımın seçimi üretilecek numunenin geometrisine bağlıdır. İnce parçalar için düşük akım değerleri kullanılırken, büyük parçalar için yüksek akım değerleri kullanılır. Hız faktörü parametresi ise demet akımı ve demet hızının birleşimidir.

Odak ofset, sıfır konumundan odak düzlemine olan ofsettir. Odak ofset artırılırsa enerji yoğunluğu ve erime derinliği düşer.

Ön ısıtma sıcaklığı sayesinde, katmanlar üretilirken toz parçacıklar demetin ürettiği yüksek enerji ile uzağa kolayca gönderilir. Bu sıcaklık ana erime sıcaklığına yakın değerlerdedir.

Tablo 4.2. Ön ısıtma parametreleri

Ön Isıtma	Odak Ofset	44 mA		
	Isıtma Odak Ofset	100 mA		
	Maksimum Isıtma Süresi	60 s		
	Square Boyutu	144 mm		
	Parçaya Ofset	4 mm		
	Maksimum Akım	48 mA		
	Ön Isıtma I	Maks. demet akımı	36 mA	
		Min. demet akımı	36 mA	
		Demet hızı	40500 mm/s	
		Tekrar sayısı	3	
		Çizgi ofset	0.4 mm	
		Tarama derinliği	0.09 mm	
	Ön Isıtma II	Maks. demet akımı	45 mA	
		Min. demet akımı	45 mA	
		Demet hızı	40500 mm/s	
		Tekrar sayısı	3	
Çizgi ofset		0.4 mm		
Tarama derinliği		0.09 mm		

Tablo 4.3. Eritme Parametreleri

Eritme	Yüzey Sıcaklığı	925 °C		
	Maksimum derinlik	65 mm		
	Konturlar	Kontur Sayısı	3	
		Dış Kontur	Demet hızı	450 mm/s
			Maks. Demet Akımı	9 mA
			Ofset	0.27 mm
			Odak Ofset	6 mA
		İç Kontur	Demet hızı	450 mm/s
			Maks. Demet Akımı	9 mA
			Ofset	0.18 mm
	Odak ofset		6 mA	
	Tarama	Maksimum demet akımı	28 mA	
		Çizgi ofset	0.22 mm	
		Tarama derinliği	0.09 mm	
		Min. akım	3.5 mA	
Tarama uzunluğu		45 mm		

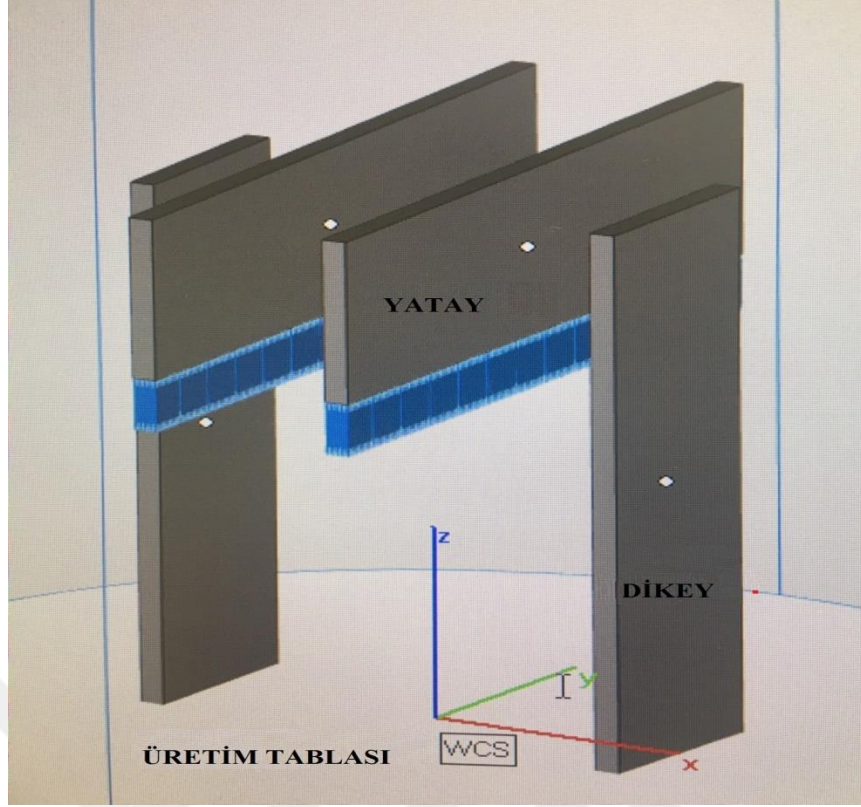
Tablo 4.4. Destek yapılarının parametreleri

Akım	10 mA
Hız	1950 mm/s
Odak ofset	9 mA

#### 4.4. Numunelerin Farklı Oryantasyonlarda Üretimi

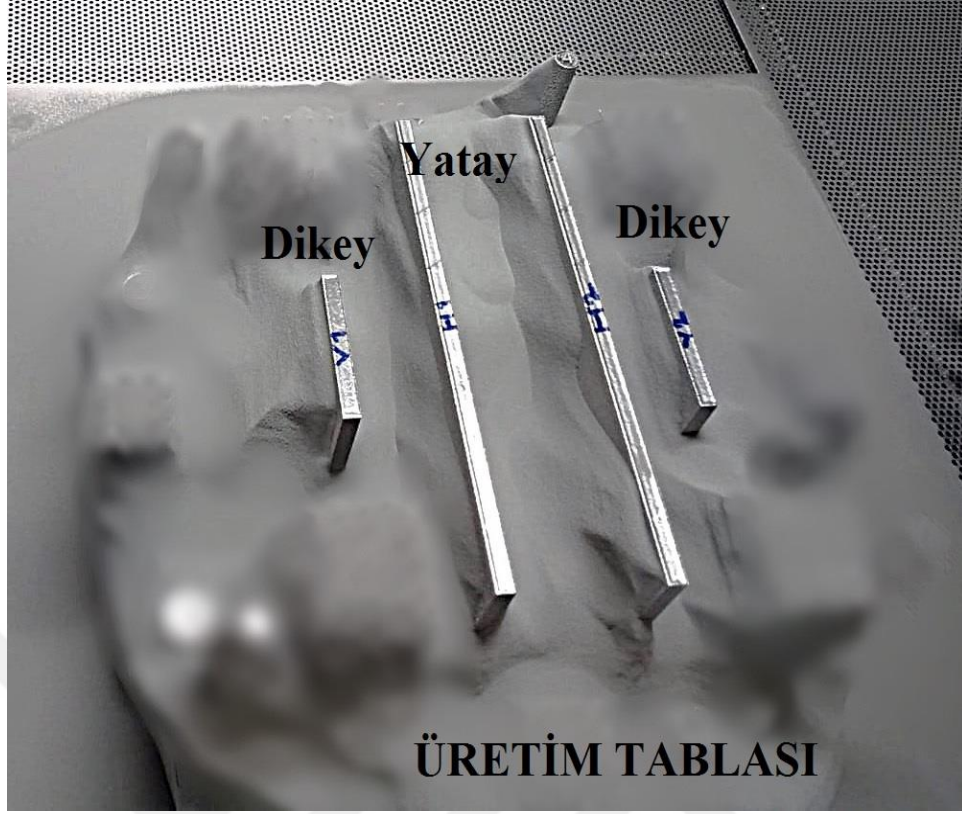
Literatür taramasından çıkan sonuçlar neticesinde, elektron demetiyle ergitme yönteminde, farklı inşa yönlerinde üretilen aynı boyuttaki numuneler aynı tabla üzerinde üretilmelerine rağmen farklı mekanik özellikler gösterebilmektedirler. Bu tez kapsamında inşa yönünün dinamik elastik özelliklere etkilerinin incelenebilmesi için numuneler 2 farklı inşa yönünde üretilmiştir. Üretilen farklı iki inşa yönünden biri dikey diğeri ise yatay olarak adlandırılmıştır. Her bir oryantasyon için 2 adet numune üretimi yapılmıştır. Şekil 4.2’de numunelerin üretim tablası üzerindeki oryantasyonları gösterilmiştir. Şekil üzerindeki “WCS” kavramı koordinat sistemini temsil etmektedir.

Bu tez kapsamında yatay inşa yönünde üretilen numunelerin katman katman inşa edilen yüzey alanı çok fazla olduğu için destek yapısı kullanılmıştır. Bu destek yapıları üretim sırasında ısıl genleşmelerden dolayı meydana gelen çarpılmaları önler. Destek yapısı ısının uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Şekil 4.3’te yatay olarak üretilen numunelerde, numunenin tabanında yer alan mavi renkli ve sık bir yapıda gösterilmiş destek yapıları görülmektedir.



Şekil 4.3. İnşa yönüne göre numunelerin üretim tablasına yerleştirilmesi

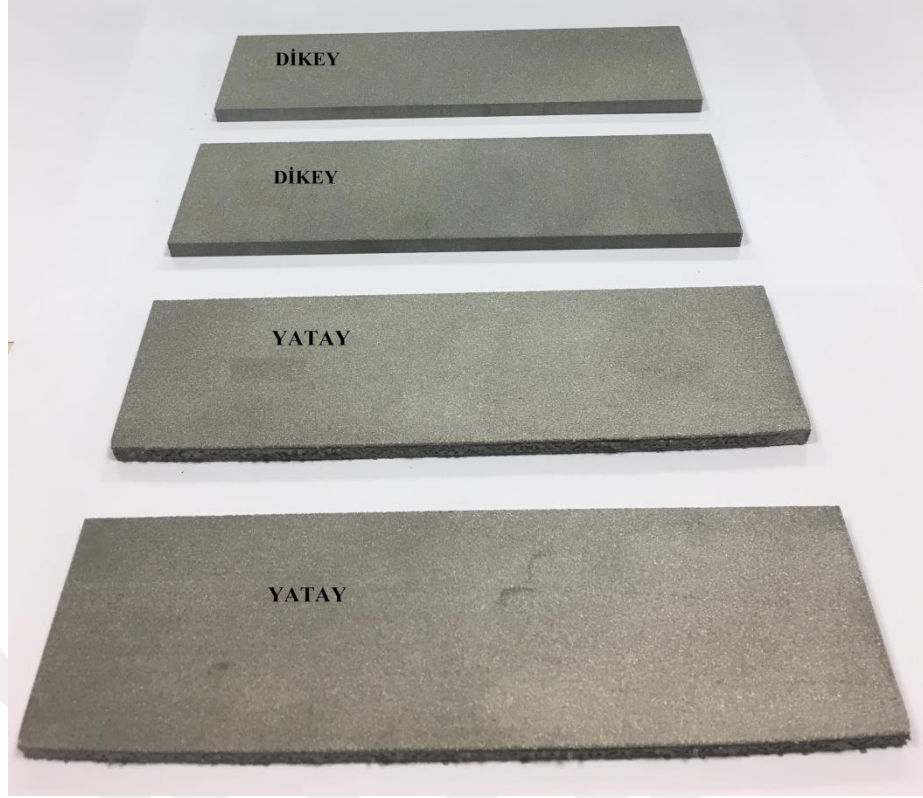
Üretilen numunelerin mekanik özellikleri, bu numunelerin üretim sırasındaki tabla üzerindeki konumlarından etkilenir. Tabla üzerinde farklı konumlardaki numunelerin soğuma hızları farklıdır. Aynı boyuttaki numunelerin farklı soğuma hızlarıyla üretilmesi nedeniyle bu numunelerin termal kütle akışlarında farklılık olduğu görülmüştür [27]. Dolayısıyla numunelerin tabla üzerindeki konumlarından kaynaklanan mekanik özelliklere olumsuz etkinin en aza indirilmesi için numuneler üretim tablasının ortasına konumlandırılmıştır. Şekil 4.4'te üretimi tamamlanan numunelerin tezgahtan sökülmeden önceki halleri görülmektedir.



Şekil 4.4. Üretim tablası ve numuneler

Üretimi tamamlanan numuneler, belirli temizlik işlemlerinin ardından tabladan alınır. Bu temizlik süreci üretilen parçaların boyutlarına göre değişiklik göstermektedir.

Yatay yönde üretimi yapılan numunelerin tabla ile temas ettiği yüzeylerde pürüzlülüğün çok fazla olduğu Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu yüzeyler, tabladan difüzyon nedeniyle kaynaklanan farklı mikroyapılara sahiptir.



Şekil 4.5. Üretimi tamamlanan numuneler

#### 4.5. Nihai Numune Geometrilerinin Elde Edilmesi

Elektron demetiyle ergitme katmanlı imalat yönteminde süreç başlamadan önce tabla ön ısıtılır. Tabla ön ısıtıldığı için erime ve katılma sırasındaki lokal sıcaklık değişiklikleri minimuma indirilmektedir. Dolayısıyla üretilen parçaların içerisinde oluşan artık gerilmelerin önemli ölçülerde olmadığı düşünülebilir. Bundan dolayı elektron demetiyle ergitme katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelere ek bir ısıl işlem gerekmeden talaşlı imalat uygulanabilir.

Elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretilen numunelere talaşlı imalat yöntemi uygulandığında mekanik özelliklerde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Talaşlı imalat uygulanan numunelerde, talaşlı imalat uygulanmayan numunelere göre Young's modülünün arttığı gözlemlenmiştir [24].

Darbe ile uyarma test metodunun dikdörtgen biçimindeki numunelere uygulanabilmesi için bu numunelerin geometrilerinin sahip olması gereken özellikler bölüm 4.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Elektron demetiyle ergitme katmanlı imalat yöntemiyle üretilen numunelerin yüzey ve ölçü toleransları hassas değildir. Bundan dolayı nihai boyutunun 6 mm x 60 mm x 200 mm olması istenen numunelere imalat aşamasında işleme payı verilmiştir. Katmanlı imalat yöntemiyle numuneler 7 mm x 62mm x 202 mm boyutlarında üretilmiştir.

Bu bölüm altında yapılan çıkarımlara göre parça geometrisinin istenen ölçülere indirilebilmesi için talaşlı imalat yöntemi kullanılmıştır. 7 mm x 62mm x 202 mm boyutlarındaki numuneler, Şekil 4.6’da gösterilen Kiheung KMB – U3 talaşlı imalat tezgahı kullanılarak işlenmiştir. Talaşlı imalat uygulanan ve uygulanmayan katmanlı imalat yöntemiyle üretilen numuneler Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Kullanılan talaşlı imalat tezgahı



Şekil 4.7. Katmanlı imalat sonrası talaşlı işlem uygulanan numuneler ve talaşlı işlem uygulanmamış numuneler.(1 Numaralı numune : Dikey inşa yönünde üretilen numune, 2 Numaralı numune : Yatay inşa yönünde üretilen numune)

## 5. DİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ

### 5.1. Darbe ile Uyarma Test Yöntemi

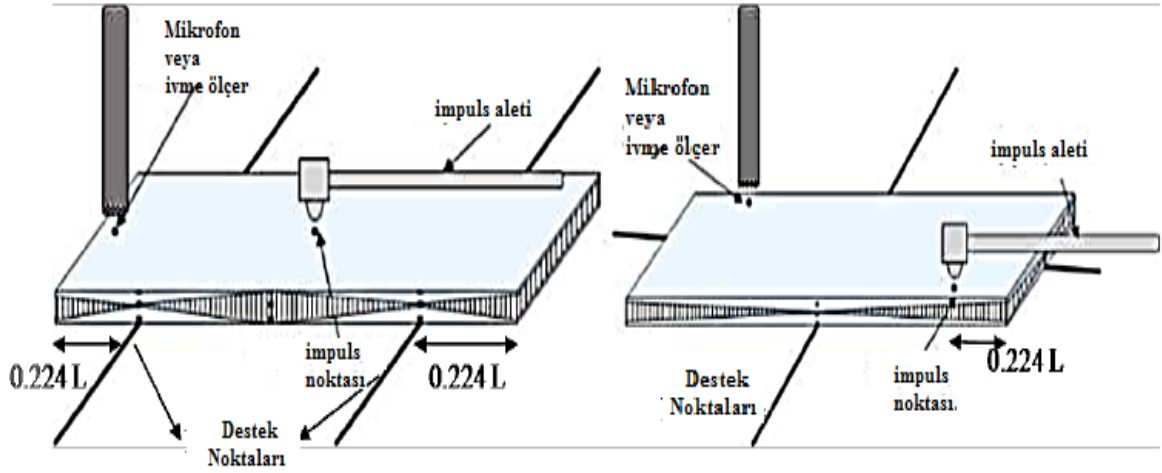
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir modelin titreşim analizinin yapılabilmesi için, analizi yapılan modelin yoğunluğuna ek olarak dinamik elastik malzeme özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bu tez kapsamında bu dinamik elastik özelliklerden Young's modülü, kayma modülü ve Poisson oranının elde edilebilmesi için ASTM E1876-15 standardı referans alınarak darbe ile uyarma test yöntemi kullanılmıştır [1].

Uygun geometriye sahip test numunelerinin temel rezonans frekans değerleri, bu numunelerin bir impuls aletinin elastik darbeleriyle uyarılması sonucu ölçülür. Test numunesine bir impuls aleti ile vurulur ve titreşim sinyali ivme ölçer tarafından algılanır. Elde edilen dalga formu(genlik zaman ilişkisi) daha sonra hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak genlik-frekans bölgesine çevirilir. Bu yöntem uygulanarak sistemin mod frekansları ve mod şekilleri elde edilir.

Dinamik Young's modülünün hesaplanması için numunenin eğilme durumundaki temel rezonans frekansının bulunması gereklidir. Dinamik kayma modülünün hesaplanması için ise burulma durumundaki temel rezonans frekansının bulunması gereklidir. Dinamik Young's modülü, dinamik kayma modülü ve Poisson oranının sayısal yöntemler ile nasıl hesaplandığı Bölüm 5.2 de verilmiştir.

Test numunesinin istenen modlarının bulunması için numunenin uygun koşullarda serbest olarak desteklenmesi gereklidir. Destek yapılarının ana amacı numuneyi dışarıdan kaynaklanan titreşim etkilerinden izole etmektir. Destek malzemeleri yumuşak veya rijit malzemeler olabilmektedir. Bu çalışmada destek yapılarından kaynaklanan hatanın önüne geçilmesi için birden fazla destek tipi kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

Numunenin asıldığı yöntemde, impuls ve sinyal toplama noktalarının konumları, istenen mod tiplerine göre numune üzerinde uygun olarak belirlenir. Bu yöntem ile destek noktalarının konumuna bağlı olarak, istenen frekans aralığında farklı rezonans frekansları elde edilebilir. Numuneyi asarak darbe ile uyarma test yöntemi örneği Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



a - Eğilme Frekansı Ölçümü

b - Burulma Frekansı Ölçümü

Şekil 5.1. Numuneyi asarak yapılan darbe ile uyarma test metodunun şematik gösterimi [38].

Eğilme ve burulma durumundaki temel rezonans frekansları tek bir destek yapısı ve tek bir ivme ölçer konumuyla bulunabilir. Bu tip testlerde ivme ölçer konumu sabit kalırken kuvvet farklı noktalardan uygulanır. Tek bir ivme ölçer konumu ile ölçümlerde sistemin desteklenebilmesi için numune, yeteri kalınlıkta poliüretan sünger üzerine yerleştirilir. Bu tez kapsamında tek bir destek yöntemi yanında iki destek yöntemi de uygulanmış ve sonuçların birbiriyle aynı çıktığı gözlemlenmiştir. Bu tezde kullanılan poliüretan sünger Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Destek amaçlı kullanılan poliüretan sünger

## 5.2. Dinamik Elastik Özelliklerin Sayısal Yöntemler ile Hesaplanması

Dinamik Young's modülü ASTM E1876-15 standardından alınan aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır [1]:

$$E = 0.9465(mf_f^2/b)(L^2/t^3)T_1 \quad (5.01)$$

$E$  = Dinamik Young's modülü, Pa

$m$  = Numunenin kütlesi, g

$b$  = Numunenin genişliği, mm

$L$  = Numunenin uzunluğu, mm

$t$  = Numunenin kalınlığı, mm

$f_f$  = Numunenin eğilme durumundaki temel doğal frekansı, Hz

$T_1$  = Düzeltme Faktörü

dür. Düzeltme faktörü, numunenin uzunluğunun kalınlığına oranı 20'den büyük ise ;

$$T_1 = [1.000 + 6.585(t/L)^2] \quad (5.02)$$

formülü ile hesaplanır.

Dinamik kayma modülü ASTM E1876-15 standardından alınan aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır [1]:

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt} [B/(1 + A)] \quad (5.03)$$

Bu bağtıda;  $G$  = Dinamik kayma modülü, Pa,

$f_t$  = Numunenin burulma durumundaki temel doğal frekansı, Hz

$$B = \left[ \frac{\frac{b+t}{t+b}}{4\left(\frac{t}{b}\right) - 2.52(t/b)^2 + 0.21(t/b)^6} \right] \quad (5.04)$$

$$A = \frac{[0.5062 - 0.8776\left(\frac{b}{t}\right) + 0.3504(b/t)^2 - 0.0078(b/t)^3]}{[12.03\left(\frac{b}{t}\right) + 9.892\left(\frac{b}{t}\right)^2]} \quad (5.05)$$

Poisson oranı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır [1]:

$$\mu = \left(\frac{E}{2G}\right) - 1 \quad (5.06)$$

Bu bağtıda;  $\mu$  = Poisson oranı,  $E$  = Dinamik Young's modülü,  $G$  = Dinamik kayma modülüdür.

Numunelerin kütleleri 0,01g hassasiyete sahip terazi ile ölçülmüştür. Numune kütlesini numune boyutlarının(uzunluk, genişlik ve yükseklik) çarpımına bölünmesi ile her bir numune için yoğunluk değeri hesaplanmıştır. Tez kapsamında kullanılan numunelerin boyutları Arşimed yoğunluk ölçüm cihazına uygun değildir. Eklemeli imalat tezgahından aynı parametrelerle ve aynı inşa yönlerinde üretilen daha küçük boyutlara sahip parçaların

yoğunlukları Arşimet prensibi ile ölçülmüştür. Her iki yöntemle yapılan hesaplamalarda yoğunluklar birbirleriyle aynı çıkmıştır.



## 6. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Testlerde kullanılması planlanan 6mm x 60mm x 200mm ölçülerinde numunelere sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde ağ inceltmesi kullanılarak iteratif bir çalışma yapılmış ve gerçeğe en yakın model oluşturulmuştur. Analizi yapılan tüm modellerin ortak özellikleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir. Analizi yapılan modellerin dinamik elastik malzeme özellikleri Tablo 6.2’de sunulmuştur. Yoğunluk değerinin nasıl bulunduğu Bölüm 5.2’de anlatılmıştır.

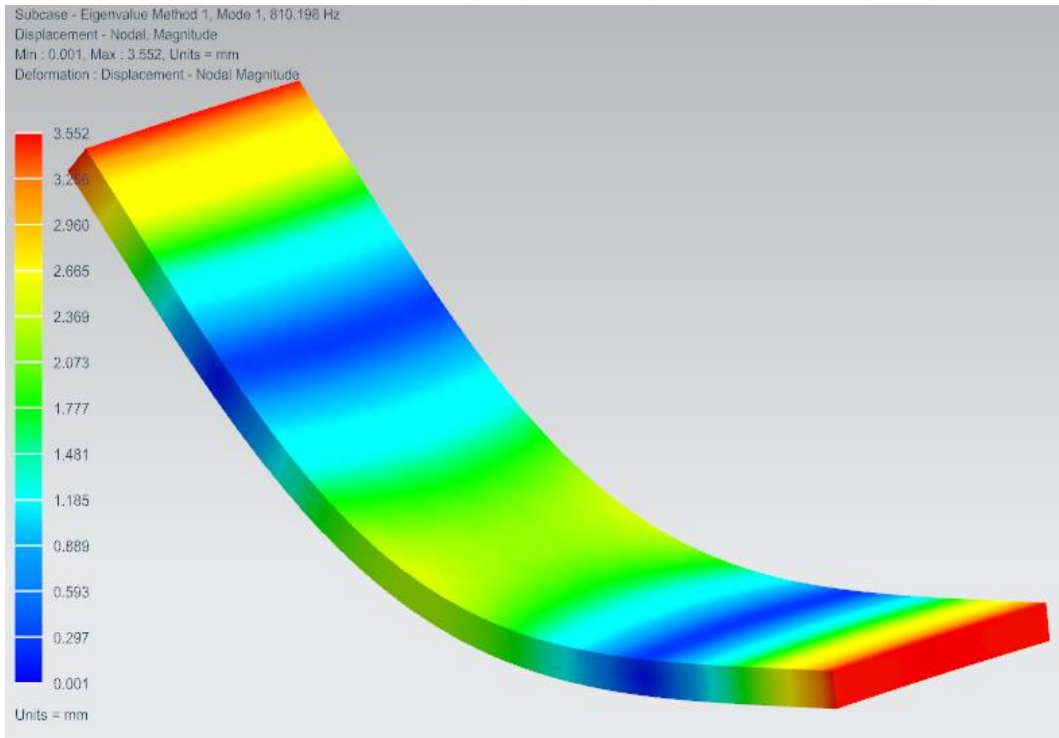
Tablo 6.1. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan değerler

Numune Boyutu	6mm x 60mm x 200mm
Kullanılan Yazılım	Simcenter
Çözücü	NX Nastran
Analiz Tipi	Structural
Çözüm Tipi	Real Eigenvalues
Eigenvalue Metod	Lanczos
Mesh Tipi	Ctetra(10)
Element Sayısı	3697
Düğüm Nokta Sayısı	7702
Taranan Frekans Aralığı	< 2500 Hertz
Malzeme Tipi	İzotropik

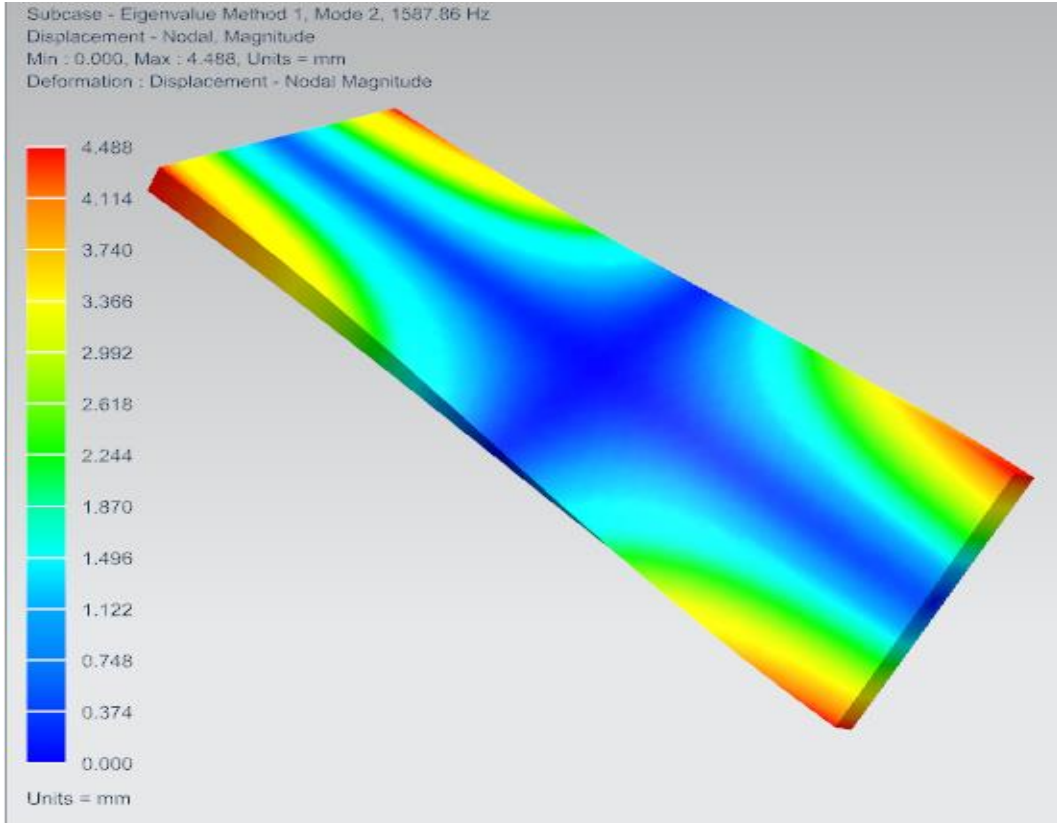
Eklmeli imalat ile dikey ve yatay oryantasyonlarda üretilen 1 ve 2 numaralı numunelerin sonlu elemanlar analizi sonuçları ve mod şekilleri Şekil 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6’da görülmektedir.

Tablo 6.2. Analizi yapılan modellerin dinamik elastik malzeme özellikleri ve yoğunluk değerleri

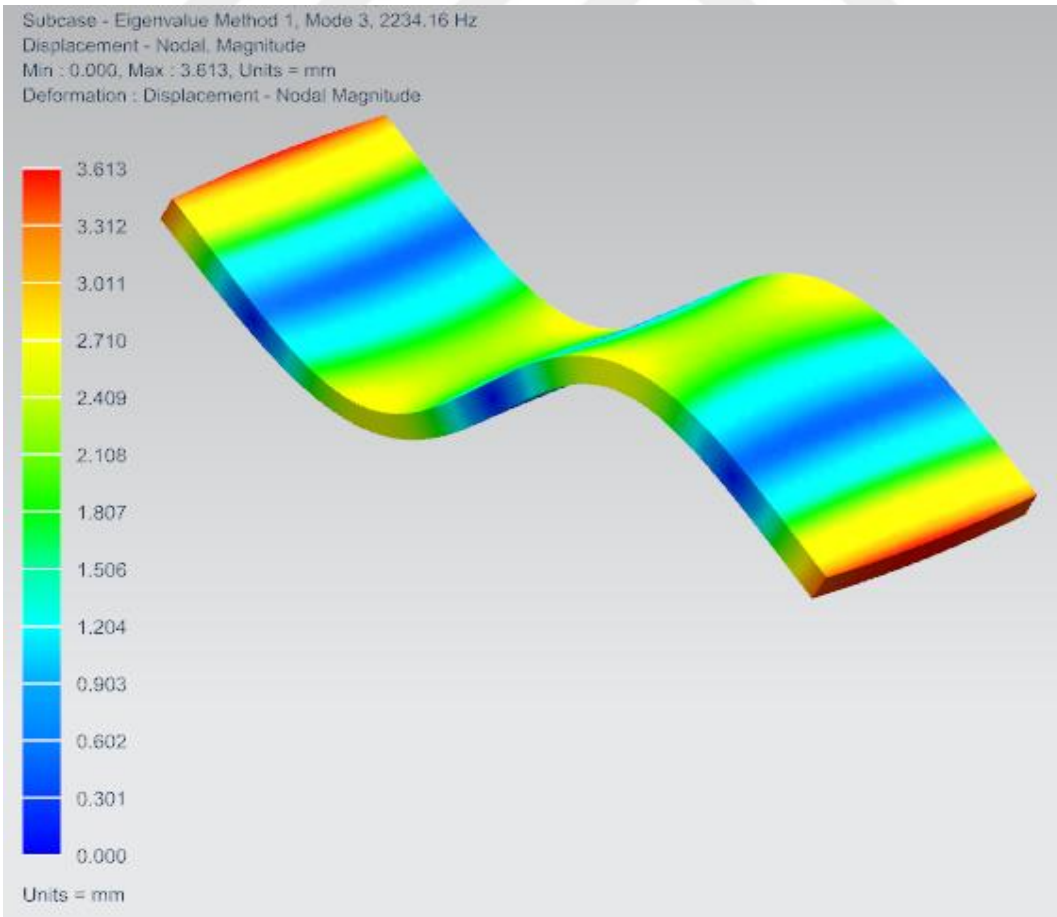
Malzeme Özelliği	Eklmeli İmalat Dikey Numune (Test Sonucu)	Eklmeli İmalat Yatay Numune (Test Sonucu)	Geleneksel Yöntem Ti-6Al-4V Plaka SAE AMS4911R [2]
Young Modülü,E (GPa)	119.7	118.3	113.8
Kayma Modülü,G(GPa)	45.75	45.6	43.43
Poisson Oranı, $\mu$	0.308	0.298	0.31
Yoğunluk, $\rho/cm^3$	4.415	4.410	4.429



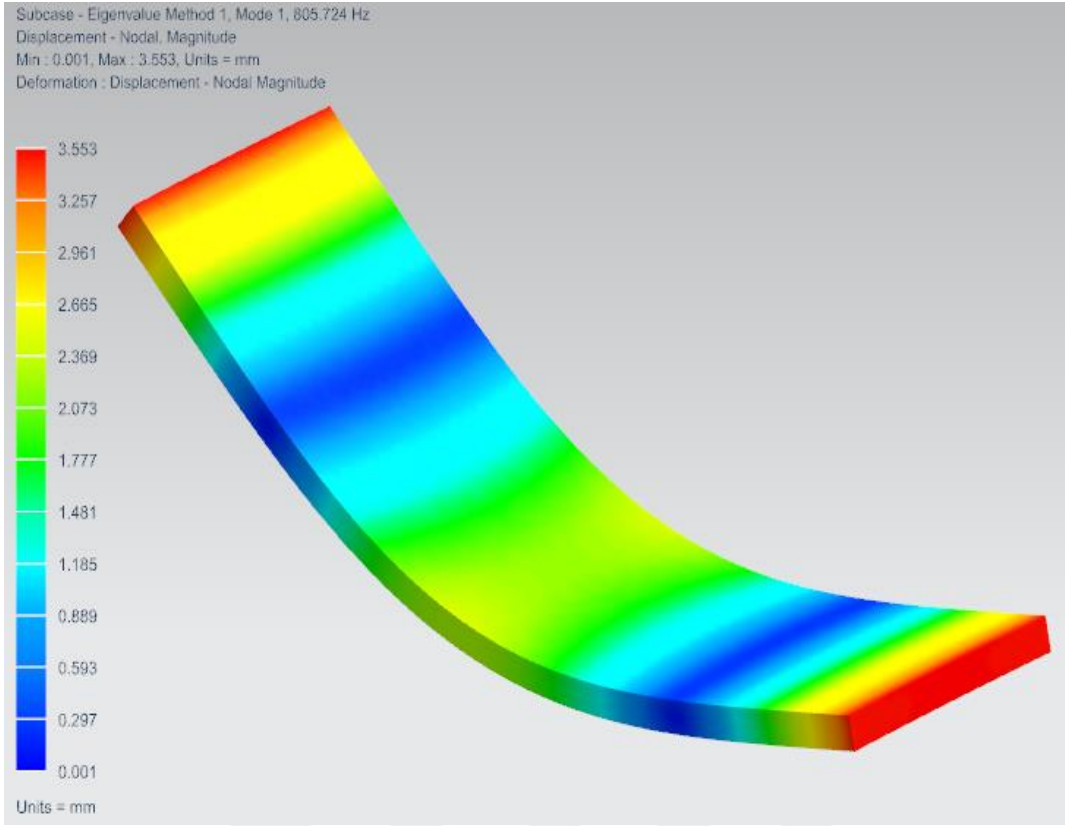
Şekil 6.1. Dikey oryantasyonda üretilen 1 numaralı numunenin 1.mod şekli



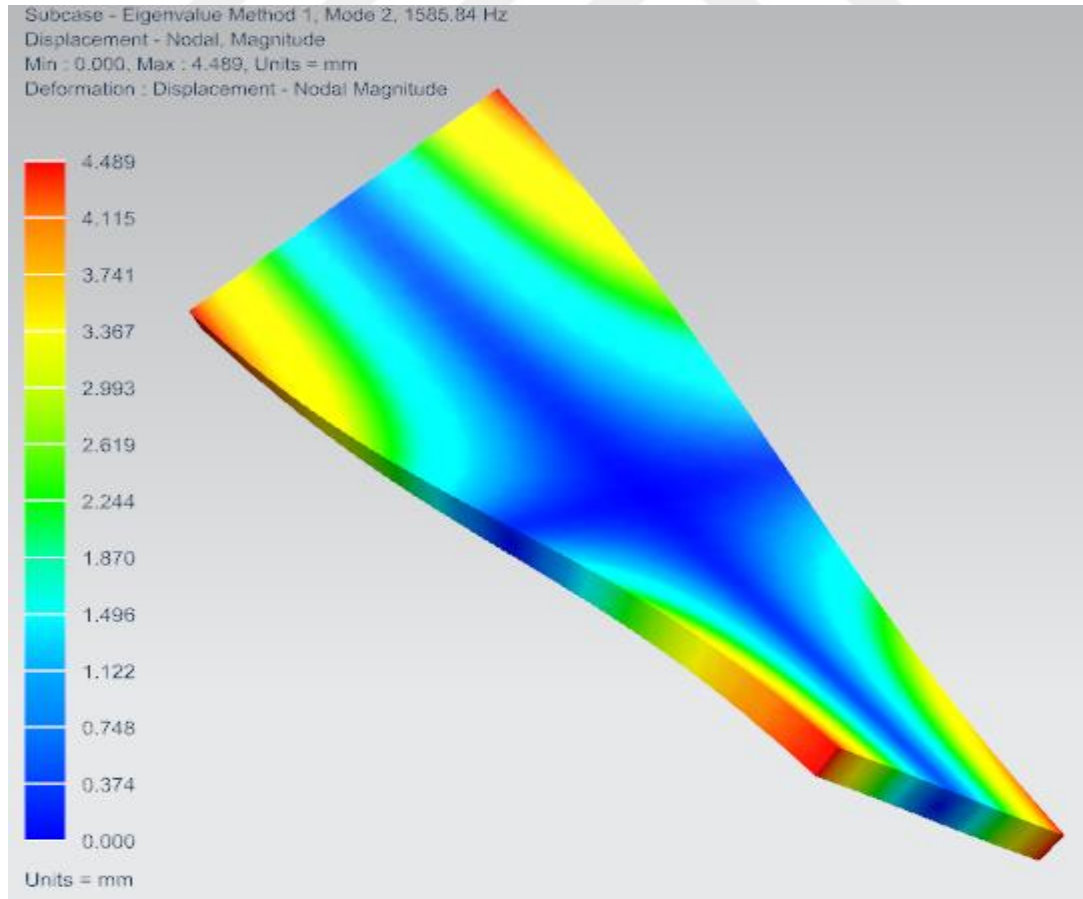
Şekil 6.2. Dikey oryantasyonda üretilen 1 numaralı numunenin 2.mod şekli



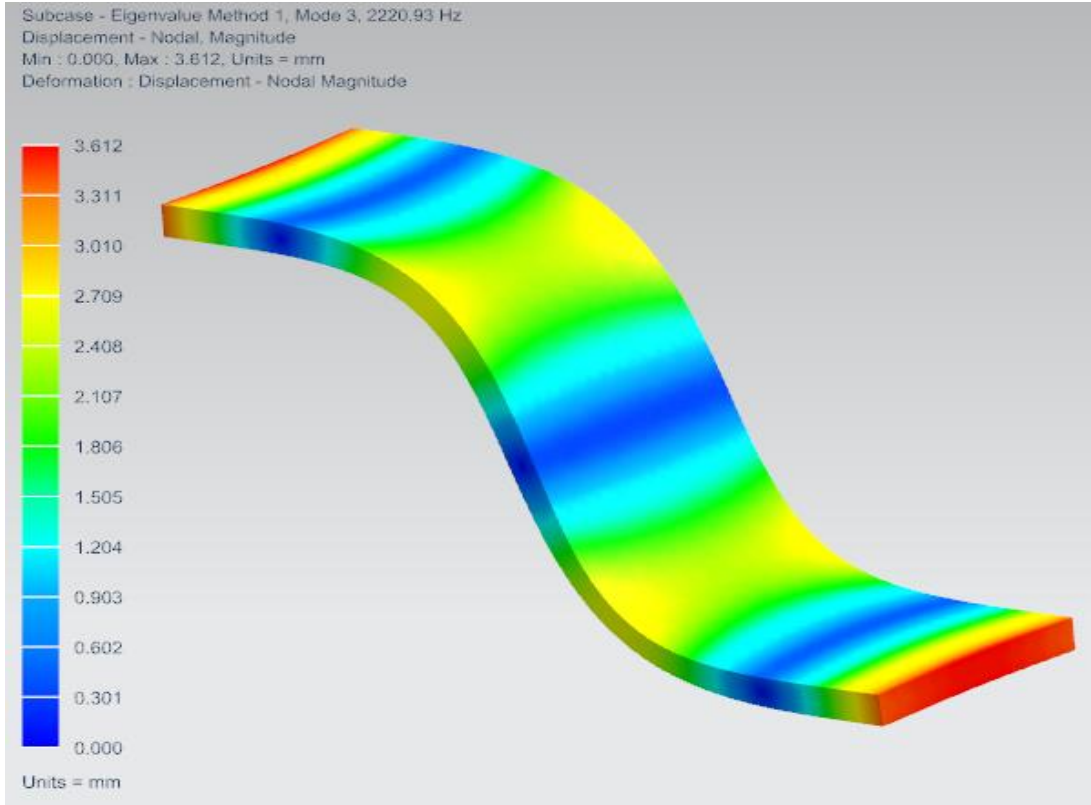
Şekil 6.3. Dikey oryantasyonda üretilen 1 numaralı numunenin 3.mod şekli



Şekil 6.4. Yatay oryantasyonda üretilen 2 numaralı numunen 1.mod şekli

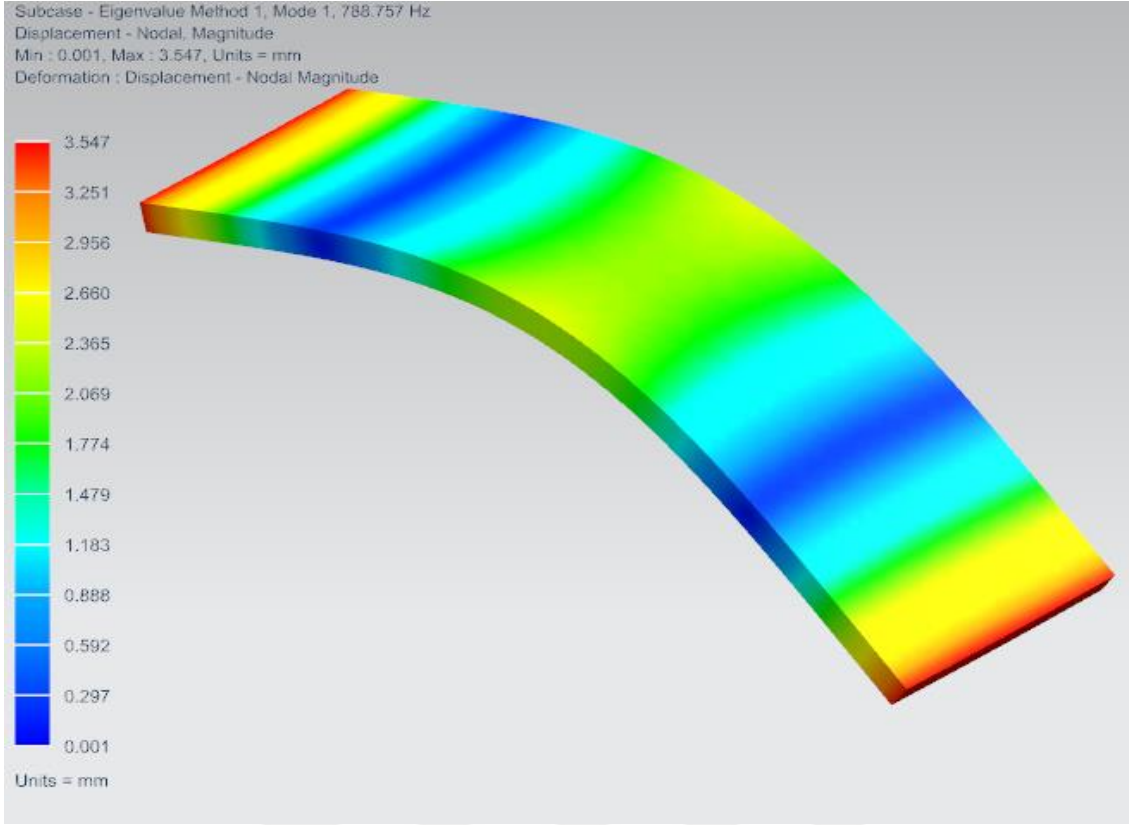


Şekil 6.5. Yatay oryantasyonda üretilen 2 numaralı numunen 2.mod şekli

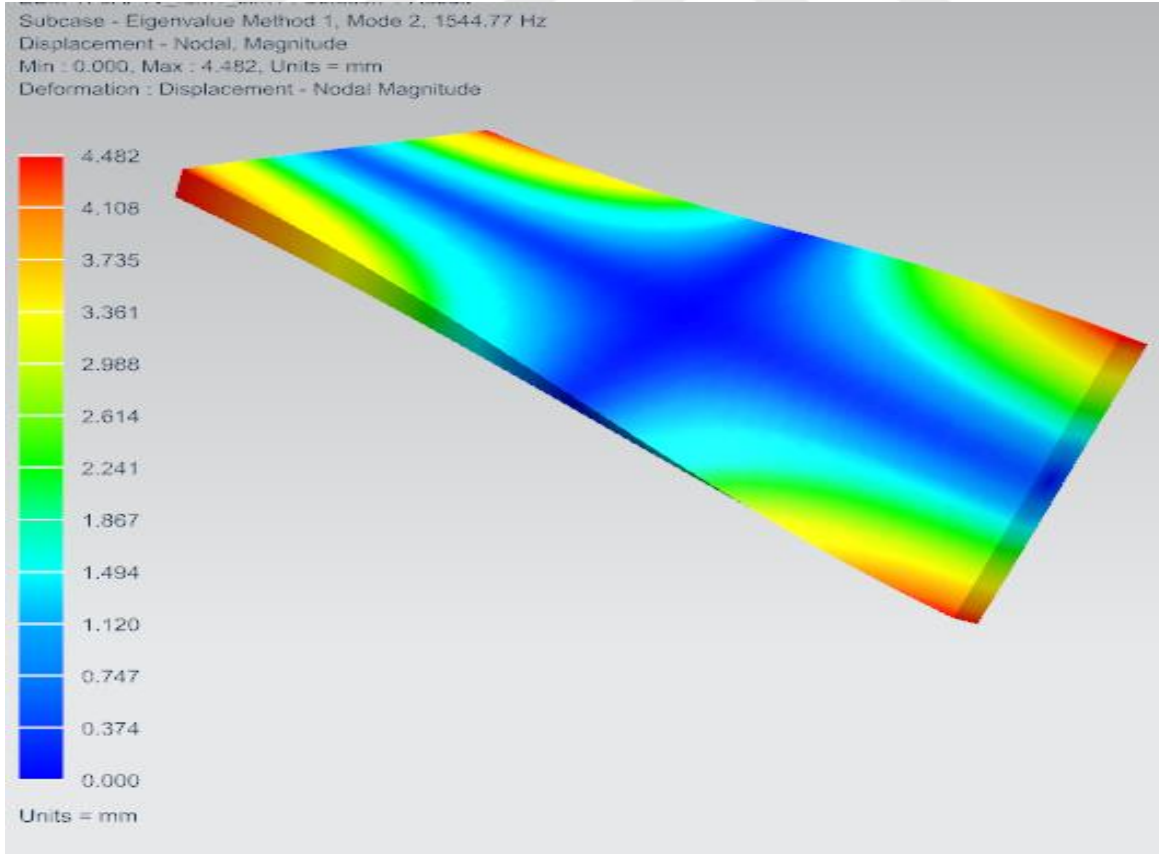


Şekil 6.6. Yatay oryantasyonda üretilen 2 numaralı numunen 3.mod şekli

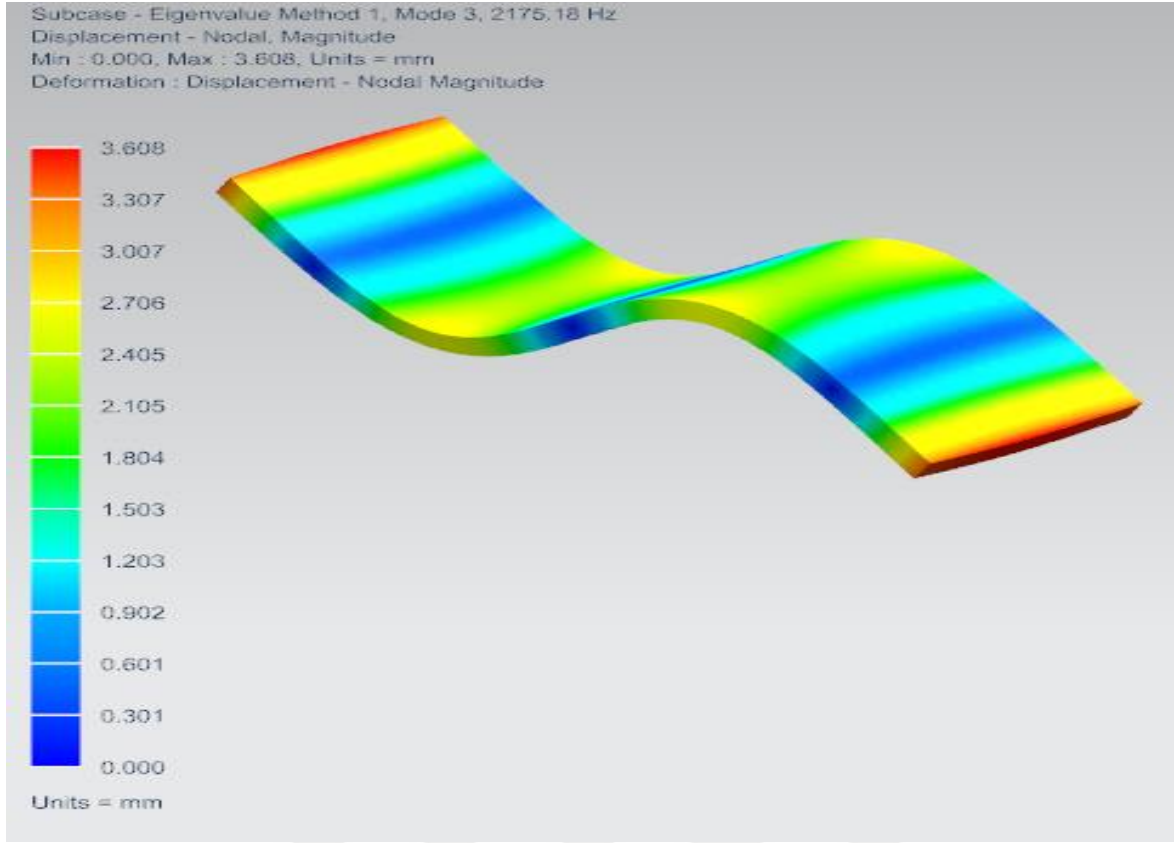
Eklemeli imalat ile üretilen numunelere yapılan testler ile bu numunelerin sonlu elemanlar analizleri karşılaştırıldığında sonuçların birbiriyle uyumlu çıktığı bir sonraki bölümde kanıtlanmıştır. Bu sebeplerden dolayı geleneksel yöntemler ile elde edilen Ti-6Al-4V numuneler bu tez kapsamında ayrıca imal edilmemiştir. SAE AMS4911R standardından Ti-6Al-4V malzemelerin özellikleri alınmıştır [2]. Doğruluğu kanıtlanmış sonlu elemanlar modelinin içerisine SAE AMS4911R standardından alınan Ti-6Al-4V malzeme özelliği eklenerek mod şekilleri ve değerleri elde edilmiştir. Geleneksel yöntemler ile elde edilebilen plaka halindeki Ti-6Al-4V modelin mod şekilleri Şekil 6.7, 6.8, 6.9'da görülmektedir. Titreşim analizi yapılan modellerin doğal frekanslarının karşılaştırılması Tablo 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.7. Geleneksel yöntemlerle üretilen modelin 1. mod şekli



Şekil 6.8. Geleneksel yöntemlerle üretilen modelin 2. mod şekli



Şekil 6.9. Geleneksel yöntemlerle üretilen modelin 3. mod şekli

Tablo 6.3. Sonlu elemanlar analizi yapılan 3 farklı modelin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod	Dikey inşa yönünde üretilen 1 Numaralı Numune (Hertz)	Yatay inşa yönünde üretilen 2 Numaralı Numune (Hertz)	Geleneksel Yöntemle Üretilen Numune (Hertz)
1	810.198	805.724	788.75
2	1587.86	1585.84	1544.77
3	2234.16	2220.93	2175.18

## 7. TİTREŞİM TESTİ VE DEĞERLENDİRME

Darbe ile uyarma test yöntemi, malzemelerin dinamik elastik özelliklerinin belirlendiği tahribatsız bir muayene yöntemidir. Bu yöntem ile testi yapılacak uygun geometriye sahip numunelerin temel rezonans frekansları elastik bir tahrik ve ivme ölçer yardımıyla bulunabilir. İvme ölçer, numunelerin mekanik titreşimlerini algılayarak bunları elektriksel sinyallere dönüştürür. Numunelerin destek yapılarının çeşidi, sinyal toplama konumları ve impuls noktaları, elde edilmesi istenen geçici titreşim modlarına göre uygun bir şekilde seçilir. Numunenin temel rezonans frekansı, kütle ve dış ölçüleri kullanılarak dinamik elastik özellikleri hesaplanabilir.

Darbe ile uyarma test yönteminin önemli özellikleri şu şekildedir :

- Basit tahrik mekanizmaları ve destek sistemleri ile ölçüm yapılabilmektedir. Kompleks yapıli destek ve test düzeneklerine ihtiyaç yoktur.
- Tahribatsız muayene yöntemi olduğu için numuneler farklı testlerde kullanılabilir.
- Bu yöntem ile numunelerin kalite kontrolleri yapılarak malzeme özellikleri ve karakteristikleri saptanabilmektedir. Ayrıca malzeme geliştirme çalışmalarına katkı sunabilmektedir.

Bu tez kapsamında elektron demetiyle ergitme yöntemiyle yatay ve dikey inşa yönlerinde dikdörtgen kesitli numuneler üretilmiştir. 7mm x 62mm x 202mm ölçülerinde farklı inşa yönlerinde üretilen titanyum numuneler talaşlı imalat tezgahında 6mm x 60mm x 200mm olan son ölçülerine getirilmiştir. Talaşlı işlem sonrası son halini alan numuneler Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Böylelikle eklemeli imalat tezgahında üretilen numunelerin yüzeylerinde bulunan kusurlar giderilmiş ve darbe ile uyarma test yönteminde ölçüm yapılabilmeye uygun hale getirilmiştir. Bulunan dinamik elastik özellikler sayesinde elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretilen numunelerin malzeme özellikleri geleneksel yöntemler ile üretilen titanyum plakaların malzeme özellikleri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 7.1. Dikey inşa yönünde üretilen numune(1), yatay inşa yönünde üretilen numune(2)

## 7.1. Test Düzenine Tanıtımı

Testin detaylı anlatımına geçmeden önce Teori Bölümü'nde bahsedilen ifadelerin sayısal karşılıkları ve yorumlamaları şu şekildedir: Bu tez kapsamında yapılan darbe ile uyarma test yönteminde örnekleme frekansı 6400 Hertz'dir. Bant genişliği 3200 Hertz'dir. Ölçüm yapılacak aralık 2500 Hertz'dir. Ölçümlerin doğru yapıldığı ve donanımsal bir hata olmadığı koherans grafiklerinde görülmektedir.

### 7.1.1. Testte kullanılan ekipmanların tanıtımı

Darbe ile uyarma test yönteminin gerçekleştirilebilmesi için bazı ekipmanların kullanılması gereklidir. Bu test yönteminde kullanılan ekipmanlar aşağıdaki gibidir :

Test Datalarının Elde Edildiği Yazılım : Simcenter Testlab Impact Testing Version 18

Test Cihazı : LMS Scadas Mobile SMP80 verilerin toplandığı mobile bir ölçüm cihazıdır.

İvme Ölçer : PCB ICP Accelerometer 356A33. İvme ölçerin ağırlığı 5.3 gramdır. -65 ile +250 °C aralığında çalışmaya uygun olan bu ivme ölçer 2 ile 10000 Hertz arası ölçüm yapabilmektedir. İvme ölçerin hassasiyeti 10 mV/g'dır.

Uyarıcı Çekiç : PCB Impulse Force Hammer 086C03

### **7.1.2. Testte kullanılan destek yapılarının seçimi**

Bu tez kapsamında yapılan testte numunelerin FRF değerlerinin bulunabilmesi için numunelerin serbest şekilde desteklenmesi gerekmektedir. İki tip serbest destek yapısı mevcuttur. Bunlardan bir tanesi numunelerin serbest bir şekilde rijit bir malzeme ile asılması. Diğeri ise numunenin tabanının boylu boyunca yumuşak bir malzeme ile desteklenmesi. Bu tez kapsamında destek yapılarından doğacak hataların önlenmesi için iki tip destek yapısı da ayrı ayrı kullanılmıştır.

### **7.1.3. Uyarıcı seçimi**

Numunenin belirli bir seviyede uyarılması için teste uygun bir uyarıcı seçilmesi önemli bir husustur. Ayrıca seçilen uyarıcıda kuvvet sensörünün çekicinin vurma yüzeyine entegre edilmiş olmasına dikkat edilmiştir. Kullanılan çekicinin rutin olarak yapılan kalibrasyon belgeleri incelenerek testin gerçekleştirilmesinde bir engel olmadığı görülmüştür.

Testten önce yapılan teste hazırlık aşamasında, birden fazla çekicinin ucu denenerek yapılan ölçümlerde çift etki(double impact) durumu incelenmiştir. Seçilen uçlarda ayrıca dikkat edilen hususlardan bir diğeri ise seçilen ucun ölçüm aralığı dışındaki frekanslarda uyarılma yapması istenmez. Darbe periyodu, yüzey sertliği, istenen frekans aralığı(<2500 Hertz) gibi hususlar göz önünde bulundurularak plastik uç seçilerek teste devam edilmiştir. Ayrıca ölçüm yapılan frekans aralığında çekicinin rezonans değerlerinin ölçüm sonuçlarına etki etmediği görülmüştür.

### **7.1.4. İvme ölçer seçimi**

İvme ölçer seçiminde bir çok kriter vardır. Bu kriterlerden biri ivme ölçerin ağırlığıdır. Doğru sonuçlar alınabilmesi için ivme ölçer ağırlığının yapının ağırlığının %10'un altında olması gerekmektedir [39] [40]. İvme ölçer ağırlığının değişmesinin FRF grafiklerine direk etkisi bulunmaktadır. Bu sebeplerden dolayı seçilen ivme ölçerin ağırlığı yapının ağırlığına göre ne kadar az ise sonuçlar o kadar doğru çıkacaktır. Bu tez kapsamında seçilen ivme ölçer 5.3 gram ağırlığındadır. Testi yapılan numunelerin ağırlıkları ise dikey inşa yönünde üretilen numune için 320.63 gram, yatay inşa yönünde üretilen numune için 320.29 gramdır. İvme

ölçer ağırlığı numunenin ağırlığına göre % olarak ihmal edilecek seviyede(<1.65%) olduğu için doğal frekans değerlerine düzeltme formülü uygulanmamıştır.

Genellikle kabul gören bir diğer durum ise ivme ölçer hassasiyeti ne kadar artarsa ölçüm sonuçlarının o kadar doğru olacağı yaklaşımıdır. Bu sebepten dolayı hassasiyeti 10 mV/g olan ivme ölçer seçilmiştir. Diğer yandan testin yapıldığı frekans aralığı ne kadar artarsa seçilen ivme ölçerin hassasiyeti o kadar düşmekte ve ağırlığı artmaktadır. Bu tezin ana amaçlarından biri eklemeli imalat ile üretilen titanyum numunelerin temel rezonans frekans değerlerinden dinamik elastik malzeme özelliklerinin belirlenmesidir. Tarama yapılan frekans aralığının 0 ile 2500 Hertz arasında olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu sebeplerden dolayı bu tez kapsamında hassasiyeti yüksek ağırlığı düşük PCB ICP Accelerometer 356A33 koda sahip ivme ölçer kullanılmıştır.

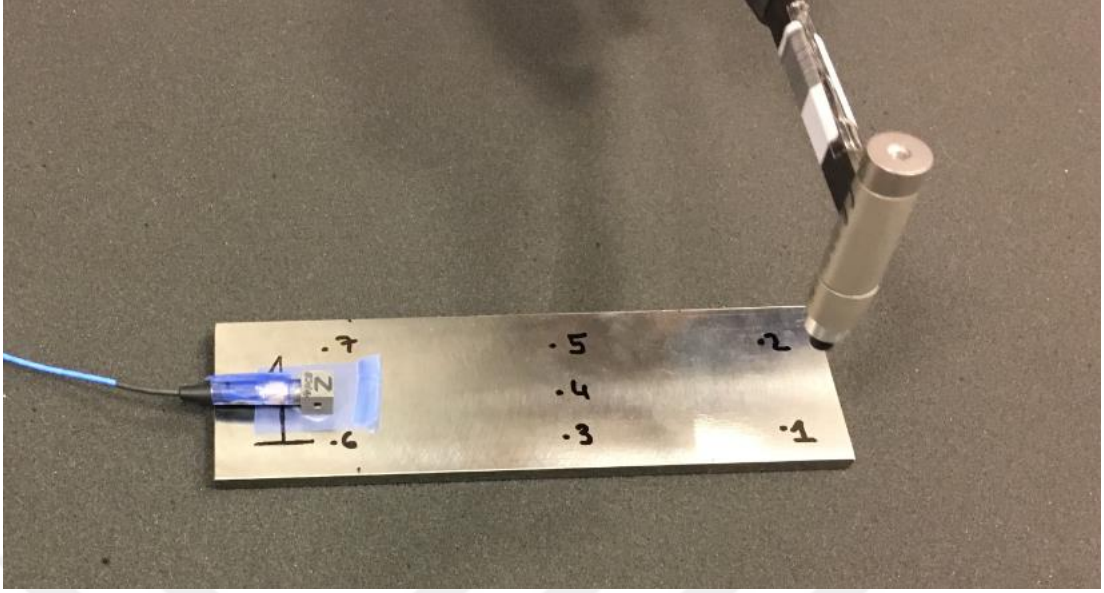
## 7.2. Ölçümler

Literatür taraması sonuçlarından elde edilen mekanik özellikler yapılan sonlu elemanlar analizlerine girdi oluşturmuştur. Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda testi yapılan yapının ilk 3 elastik modunun 2500 Hertz'in altında olduğu saptanmıştır. Sonuçların yüksek hassasiyette olması için kurulan test düzeneğinde frekans hassasiyeti 0.01 Hertz olarak ayarlanmıştır.

Malzemenin dinamik elastik özelliklerinin saptanabilmesi için düzlem dışı eğilme ve burulma durumundaki temel doğal frekanslarının bulunması yeterlidir. Bu iki doğal frekansa ek olarak bulunan üçüncü sıradaki doğal frekans testin sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmasına katkı sağlamıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizi yaklaşımında düzlem içi eğilme durumundaki doğal frekansın 2500 Hertz'in çok üstünde olduğu saptanmıştır. Yapılan hesaplamalarda düzlem dışı eğilme ve burulma temel doğal frekanslarının yeterli olmasından dolayı düzlem içi eğilme durumundaki doğal frekansın bulunması önemsenmemiştir.

Düzlem dışı ve burulma durumundaki temel doğal frekansların hesaplanması için numuneler 60mm(genişlik) x 200mm(uzunluk) ölçülerine sahip yüzeyden tahrik edilmiştir. Aynı zamanda ivme ölçer de bu yüze yerleştirilmiştir. Numuneler farklı inşa yönlerinde üretildikleri için x y z ölçüleri her bir numune için farklı bir ekseni ifade etmektedir.

İvme ölçer konumu belirlenmiştir. Yapılan testin amacı nedeniyle ivme ölçer tek bir konumda tutulmuş tahrik 7 farklı noktadan uygulanmıştır. Dolayısıyla 7 farklı ölçüm yapılmış ve 7 farklı FRF grafiği elde edilmiştir. İvme ölçer konumu, tahrik noktalarını ve tahriğin yapıldığı yön Şekil 7.2'de görülebilir.

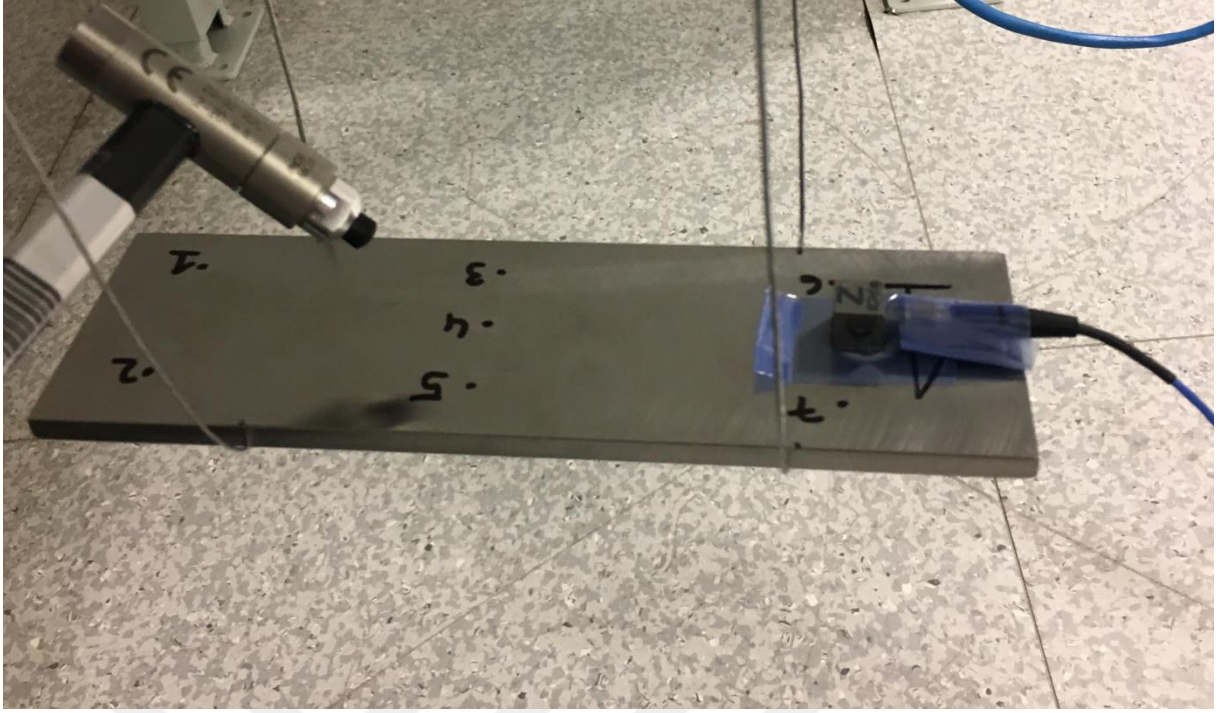


Şekil 7.2. 1 Numaralı numunenin ivme ölçer konumu, tahrik noktaları ve numuneye uygulanan tahriğin yönü

Güvenilir sonuçların elde edilebilmesi için uygulanan her bir kuvvet noktasına birden fazla vuruş yapılmalıdır. Bu tez kapsamında her bir noktaya 5 sağlıklı ölçüm yapıldığı kadar vurulmuştur. İvme ölçer ağırlığı numuneye göre çok düşük olduğu ve çekicinin ucu uygun seçildiği için çift etki(double impact) olmadan sağlıklı ölçümler arka arkaya vuruşlarda alınmıştır. Test öncesi yazılımda gerekli ayarlamalar yapılarak bu 5 sağlıklı vuruşun(tahrik) ortalaması alınarak FRF grafikleri oluşturulmuştur.

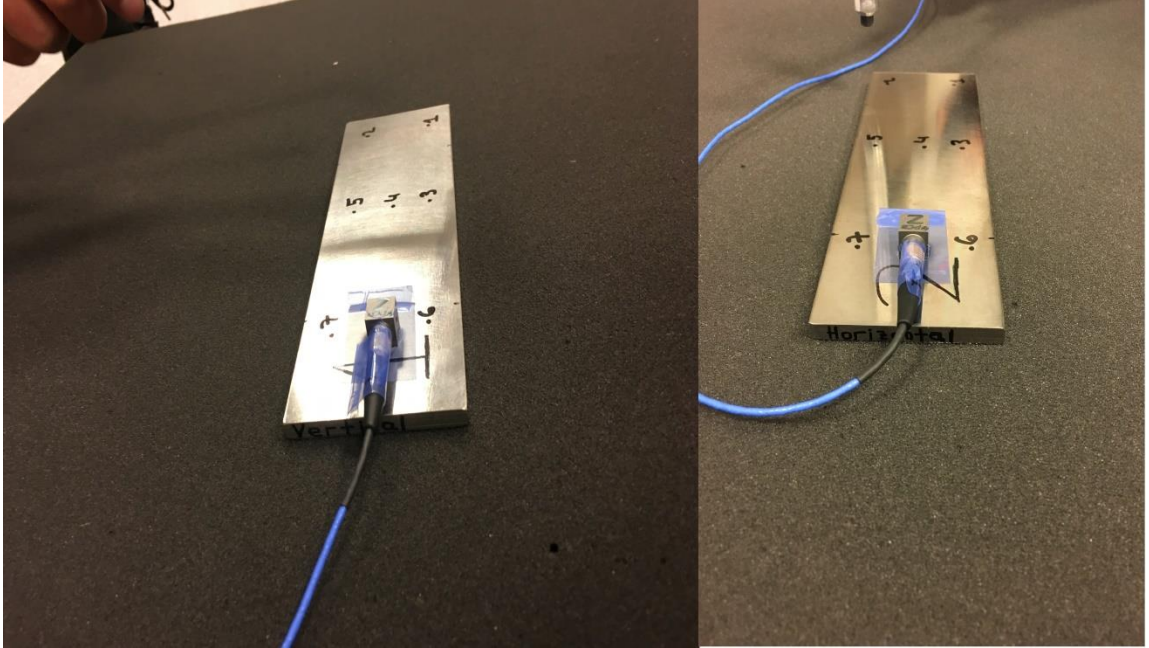
Bölüm 7.1.2’de de bahsedildiği üzere bu tez kapsamında destek yapılarından doğacak hataların önlenmesi için iki tip destek yapısı da ayrı ayrı kullanılarak ölçümler alınmıştır. Çelik halat ile yapılan asma işleminde numune ASTM E1876-15 standardına uygun olarak asılmıştır. İvme ölçer konumu, tahrik noktaları, numuneye uygulanan tahriğin yönü ve asma noktaları Şekil 7.3’te gösterilmiştir [1].

Destek malzemesi olarak poliüretan köpük kullanılarak yapılan ölçümler ASTM E1876-15 standardına uygun yapılmıştır. İvme ölçer konumu, tahrik noktaları, numuneye uygulanan tahriğin yönü ve poliüretan köpük Şekil 7.4’te gösterilmiştir [1].



Şekil 7.3. Çelik halat ile yapılan asma işlemi

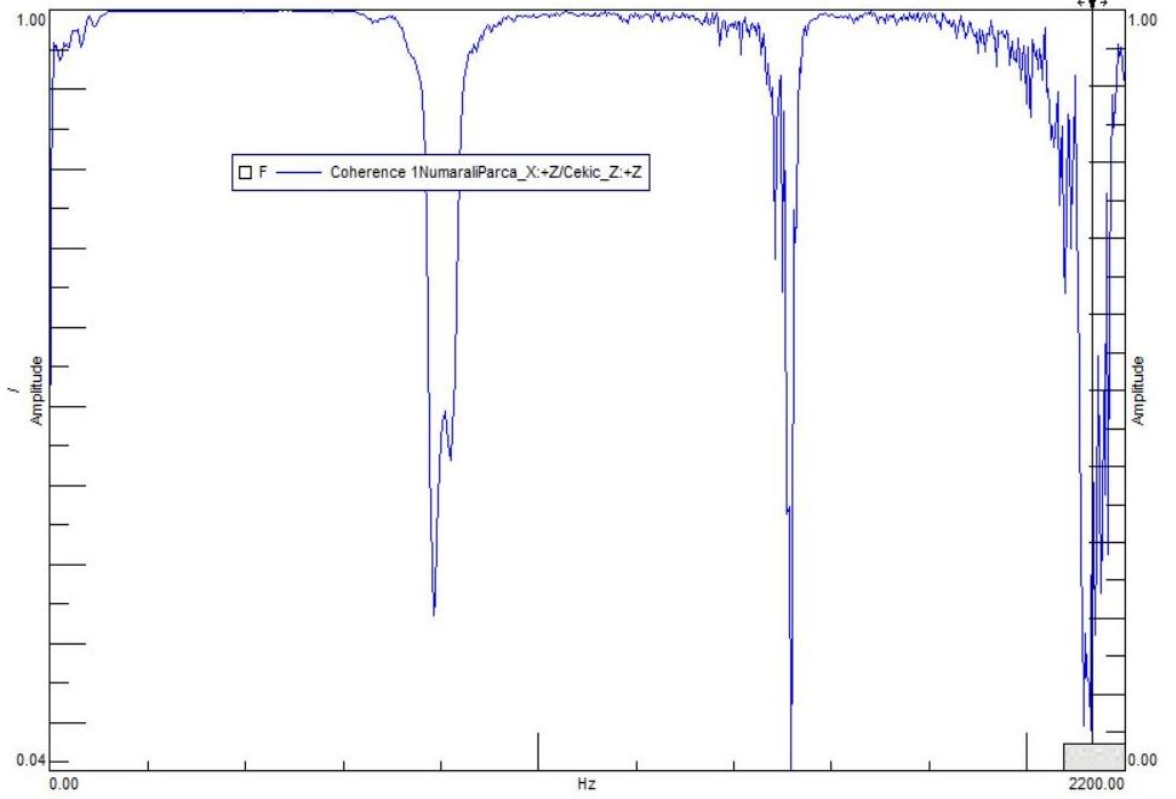
Kullanılan 2 destek yapısında da sonuçların birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Fakat koherans grafikleri incelendiğinde destek yapısı olarak poliüretan süngerin kullanıldığı ölçümlerin çelik halat ile yapılan asma işleminde alınan ölçümlere göre daha kesin sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolayısıyla bu tezin test bölümünde paylaşılan tüm grafikler destek yapısı olarak poliüretan sünger kullanılarak yapılan ölçümlerden alınmıştır.



Şekil 7.4. Destek malzemesi olarak poliüretan sünger kullanılarak yapılan ölçüm

Tahriğin uygulandığı tüm noktalardan alınan ölçümlerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ölçümlerin doğru yapıldığının göstergesi olan koherans grafikleri

birbirleriyle uyumludur. Her bir frekans noktası için koherans değeri 0 ile 1 arasında olmak zorundadır. Doğal frekanslar dışındaki frekanslarda koherans değerinin 1'e yakın olması ölçümün doğru yapıldığının göstergesidir. Şekil 7.5'te doğal frekanslara karşılık gelen noktalar dışında koherans değerinin 1'e çok yakın olduğu görülmektedir.



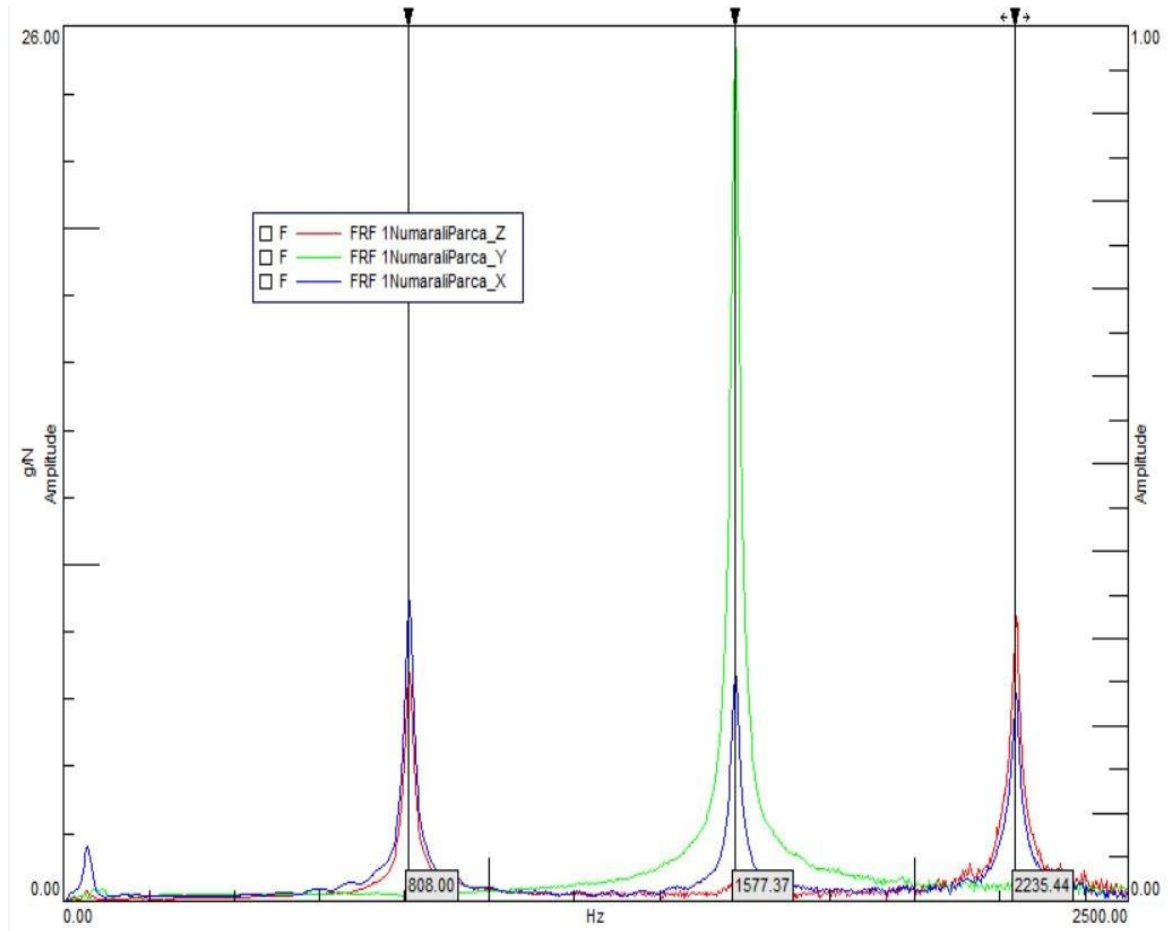
Şekil 7.5. Dikey olarak inşa edilen 1 numaralı numunenin koherans grafiği

### 7.3. Doğal Frekans, Kayıp Faktörleri ve Sönümleme Faktörleri

Kullanılan ivme ölçer ağırlığı yapının ağırlığına göre çok düşük olmasından dolayı ivme ölçer ağırlığının FRF grafiklerine etki etmediği daha önceki bölümlerde açıklanmıştı. Bunun yanı sıra koherans grafiklerinde istenen değerlerin elde edilebilmesi ve numunenin serbest titreşim yapabilmesi için iki farklı destek yapısı kullanılmıştır. Bu tez kapsamında destek yapısı olarak poliüretan süngerin kullanıldığı ölçümlerin çelik halat ile yapılan asma işleminde alınan ölçümlere çok yakın olsada daha kesin sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolayısıyla bu bölümde verilen grafikler poliüretan sünger yardımıyla yapılan ölçümlerden alınmıştır.

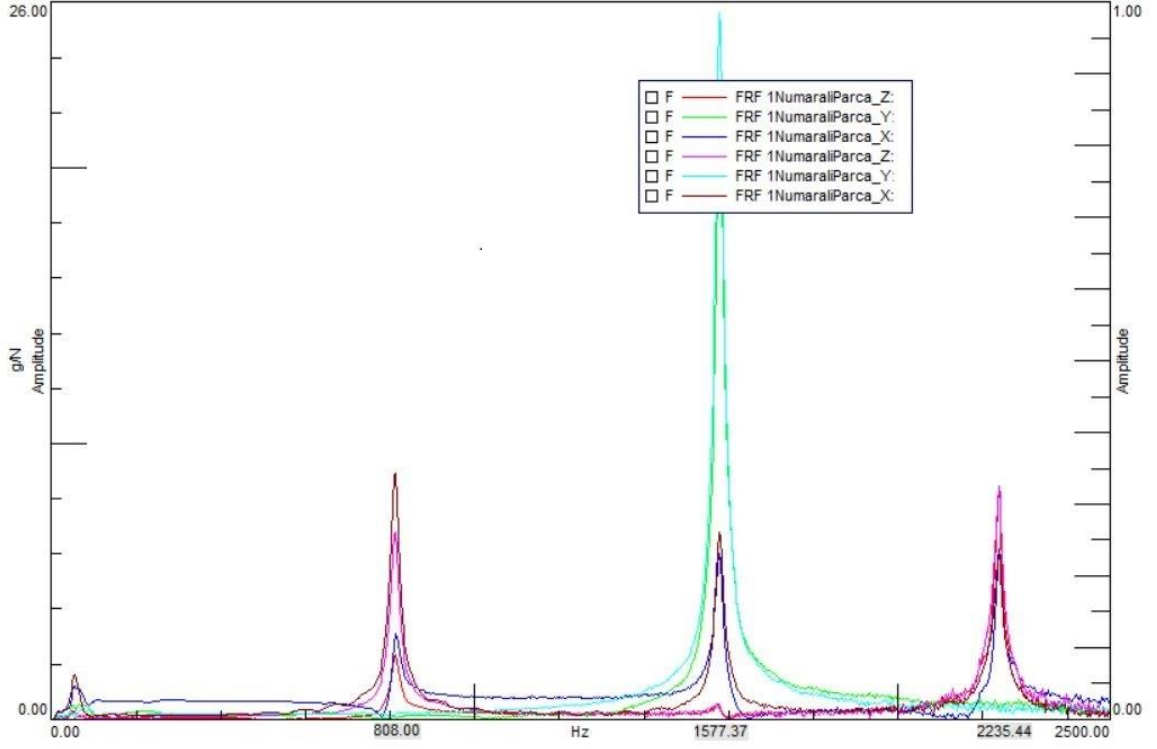
### 7.3.1. Eklemeli imalat ile dikey yönde inşa edilen 1 numaralı numunenin doğal frekans, kayıp faktörleri ve sönümleme faktörleri

Bu tez kapsamında titanyum numunelerin üretimi sırasında iki farklı inşa yönü kullanılmıştır. Dolayısıyla x-y-z eksenleri iki numune içinde farklılık gösterebilmektedir. 1 numaralı dikey yönde inşa edilen numunenin x-y-z koordinat eksenindeki konumu daha önce Şekil 4.2’de gösterilmişti. Dikey yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği Şekil 7.6’da gösterilmiştir. Şekil 7.6’da gösterilen ölçüm 1 numaralı noktaya uygulanan impuls etkisiyle alınmıştır.



Şekil 7.6. 1 Numaralı, dikey yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği (1 numaralı noktaya uygulanan impuls)

Ölçümün sağlıklı alınıp alınmadığının karşılaştırılması için 1 ve 7 numaralı noktalara uygulanan impulsun ortaya çıkardığı FRF grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.7’de gösterilmiştir. Şekil 7.7 içerisinde yer alan tabloda yukarıdan aşağıya ilk üç renk (kırmızı, yeşil, mavi) 1 numaralı noktaya uygulanan impulsun etkisiyle oluşan grafiği diğer üç renk ise 7 numaralı noktaya uygulanan impulsun etkisiyle ortaya çıkan grafiği ifade etmektedir.



Şekil 7.7. 1 Numaralı, dikey yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği (1 ve 7 numaralı noktalara uygulanan impulsun karşılaştırılması, eğrilerin hangi noktalara ait olduğu metinde anlatılmıştır.)

1 Numaralı numuneye ait testten elde edilen doğal frekans, kayıp faktörü ve sönümleme faktörü değerleri Tablo 7.1’de gösterilmiştir.

Tablo 7.1 1 Numaralı numuneye ait doğal frekans, kayıp faktörü ve sönümleme faktörü

Mod	Doğal Frekans (Hertz) $\omega_n$	Sönümleme Faktörü, Q	Kayıp Faktörü (%) $\eta$
1	808	53.76	1.86
2	1577.37	98.27	1.01
3	2235.44	125.06	0.79

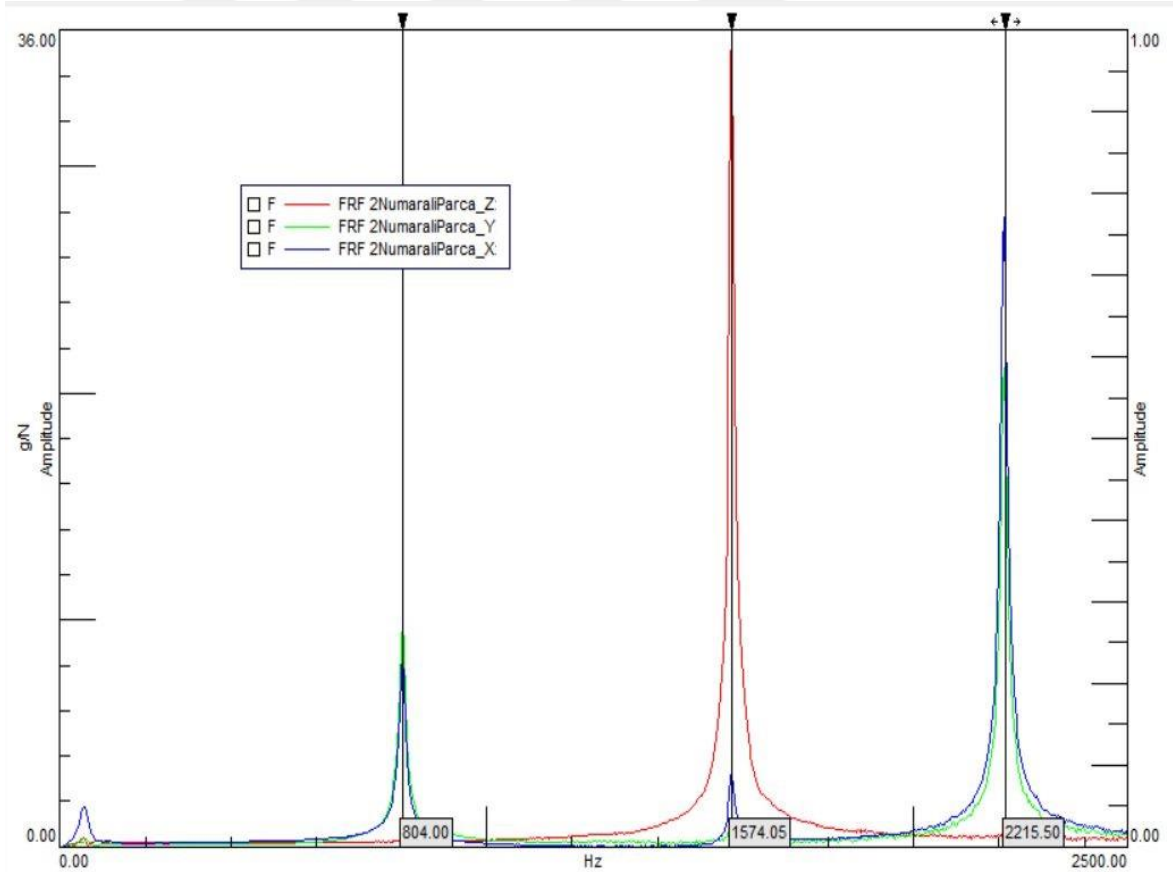
Test ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 7.2’de gösterilmiştir. Tüm mod değerleri için fark %1’in altında çıkmıştır. Tablonun oluşturulmasında herhangi bir düzeltme faktörü kullanılmamıştır. Bu tablo yapılan testin ve sonlu elemanlar analizinin doğruluğunun ispatı niteliğindedir.

Tablo 7.2. 1 numaralı numuneye ait test ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod	Sonlu Elemanlar Analizi (Hz) $\omega_n$	Test(Hz) $\omega_n$	Fark(%)
1	810.198	808	0.24
2	1587.86	1577.37	0.66
3	2234.16	2235.44	0.05

### 7.3.2. Eklemeli imalat ile yatay yönde inşa edilen 2 numaralı numunenin doğal frekans, kayıp faktörleri ve sönümleme faktörleri

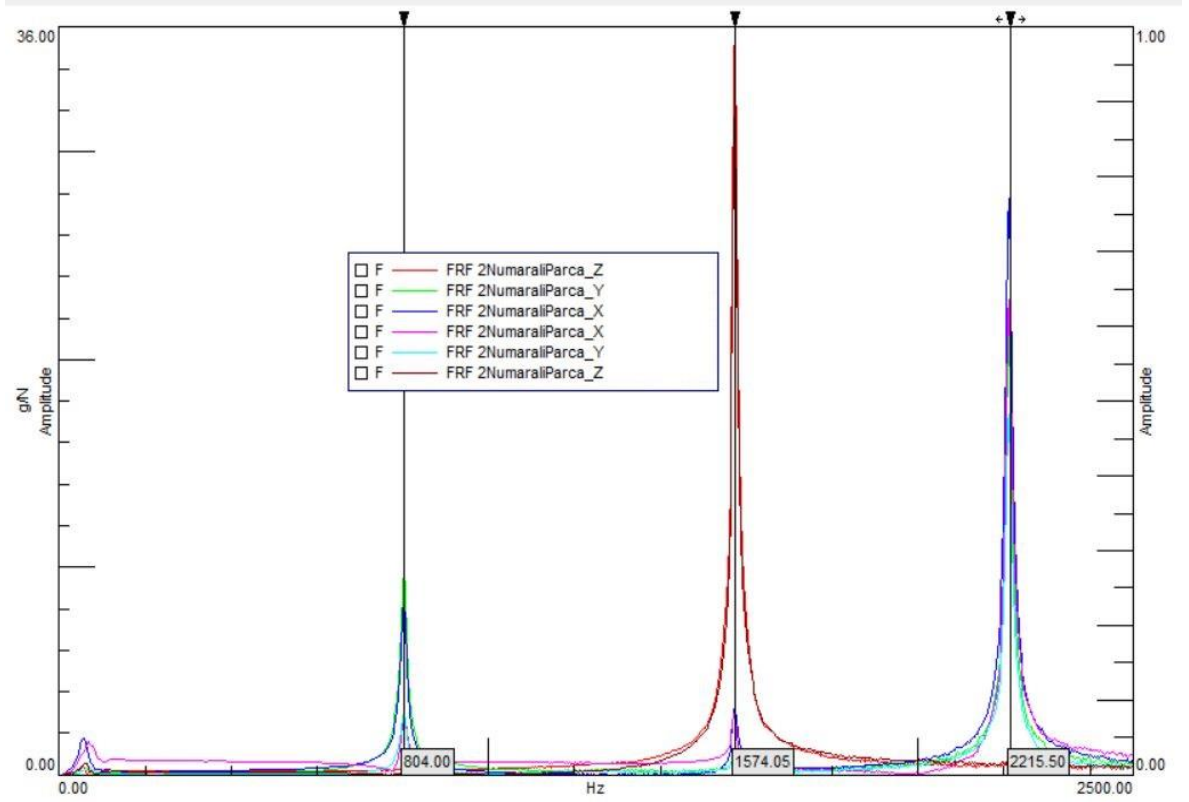
2 numaralı yatay yönde inşa edilen numunenin x-y-z koordinat eksenindeki konumu daha önce Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Yatay yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği Şekil 7.8’de gösterilmiştir. Şekil 7.8’de gösterilen ölçüm 1 numaralı noktaya uygulanan impuls etkisiyle alınmıştır.



Şekil 7.8. 2 Numaralı, yatay yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği (1 numaralı noktaya uygulanan impuls)

Ölçümün sağlıklı alınıp alınmadığının karşılaştırılması için 1 ve 7 numaralı noktalara uygulanan impulsun ortaya çıkardığı FRF grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.9’da

gösterilmiştir. Şekil 7.9 içerisinde yer alan tabloda yukarıdan aşağıya ilk üç renk (kırmızı, yeşil, mavi) 1 numaralı noktaya uygulanan impulsun etkisiyle oluşan grafiği diğer üç renk ise 7 numaralı noktaya uygulanan impulsun etkisiyle ortaya çıkan grafiği ifade etmektedir.



Şekil 7.9. 2 Numaralı, yatay yönde inşa edilen numunenin FRF grafiği (1 ve 7 numaralı noktalara uygulanan impulsun karşılaştırılması)

2 Numaralı numuneye ait testten elde edilen doğal frekans, kayıp faktörü ve sönümleme faktörü değerleri Tablo 7.3'te gösterilmiştir.

Tablo 7.3. 2 Numaralı numuneye ait doğal frekans, kayıp faktörü ve sönümleme faktörü

Mod	Doğal Frekans (Hertz) $\omega_n$	Sönümleme Faktörü, Q	Kayıp Faktörü (%) $\eta$
1	804	77.62	1.28
2	1574.05	172.84	0.57
3	2215.5	192.43	0.52

Test ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 7.4'te gösterilmiştir. Tüm mod değerleri için fark %1'in altında çıkmıştır. Tablonun oluşturulmasında herhangi bir düzeltme faktörü kullanılmamıştır.

Tablo 7.4. 2 numaralı numuneye ait test ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

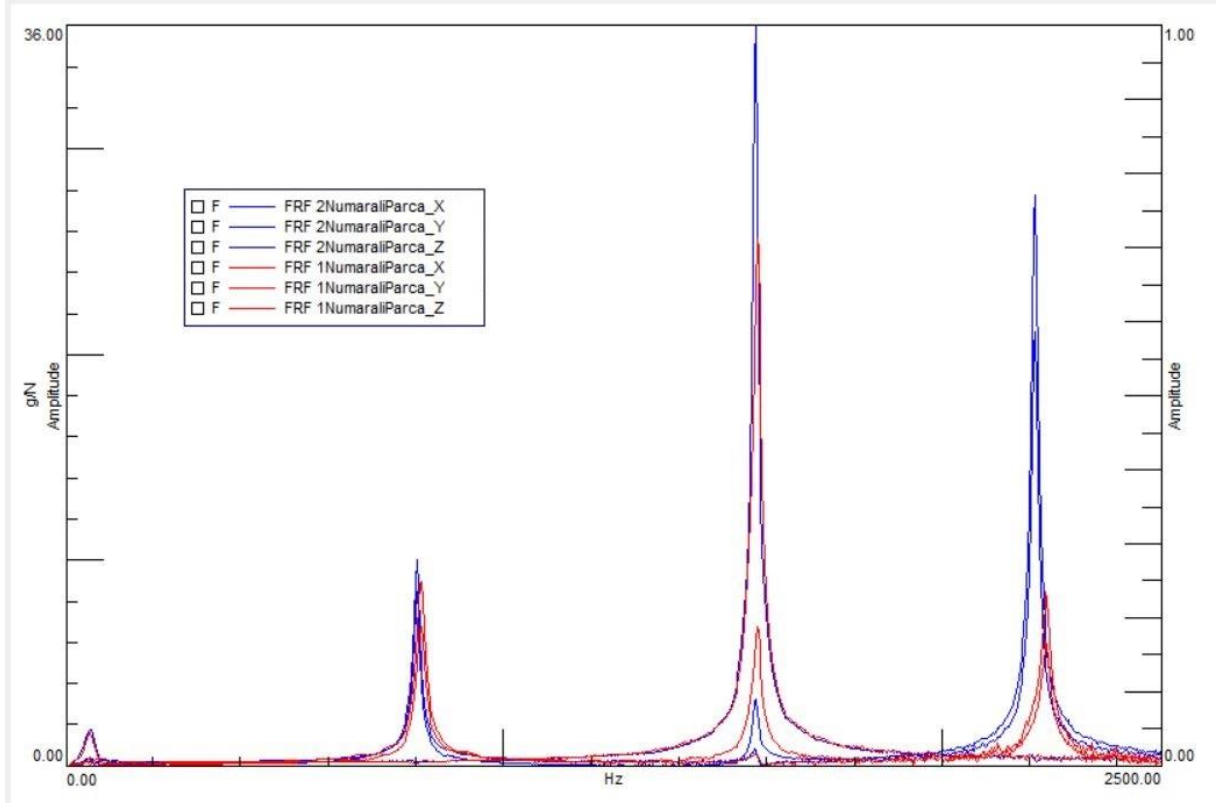
Mod	Sonlu Elemanlar Analizi (Hz) $\omega_n$	Test(Hz) $\omega_n$	Fark(%)
1	805.724	804	0.21
2	1585.84	1574.05	0.74
3	2220.93	2215.5	0.24

### 7.3.3. Dikey ve yatay inşa yönünde üretilen 2 farklı numunenin doğal frekanslarının karşılaştırılması

Yatay ve dikey inşa yönünde üretilen numunelerin doğal frekanslarının aynı grafikte karşılaştırılabilmeleri için Şekil 7.10'da verilen grafik türetilmiştir. İki grafiğinde impuls noktası olarak 1 numaralı lokasyon seçilmiştir. Dinamik elastik malzeme özelliklerinin belirlendiği ilk iki modun birbirine çok yakın çıktıkları grafikteki çizgilerden görülmektedir. Üçüncü mod olan düzlem dışı eğilme modunda iki numune arasında 20 Hz'lik farklılık çıkmıştır. Dikey ve yatay inşa yönünde üretilen 2 farklı numunenin doğal frekanslarının karşılaştırılması Tablo 7.5'te gösterilmiştir

Tablo 7.5. Dikey ve yatay inşa yönünde üretilen 2 farklı numunenin doğal frekanslarının karşılaştırılması

Mod	Eklmeli İmalat Dikey Yönde İnşa Edilen Numune(Hz) $\omega_n$	Eklmeli İmalat Yatay Yönde İnşa Edilen Numune(Hz) $\omega_n$
1	808	804
2	1577.37	1574.05
3	2235.44	2215.5



Şekil 7.10. 1 ve 2 numaralı numunelerin doğal frekanslarının aynı FRF grafiğinde gösterimi(Kırmızı renkli çizgiler : 1 numaralı dikey numune, mavi renkli çizgiler : 2 numaralı yatay numune)

#### 7.4. Testin Değerlendirilmesi ve Test Sonuçlarından Dinamik Elastik Malzeme Özelliklerinin Elde Edilmesi

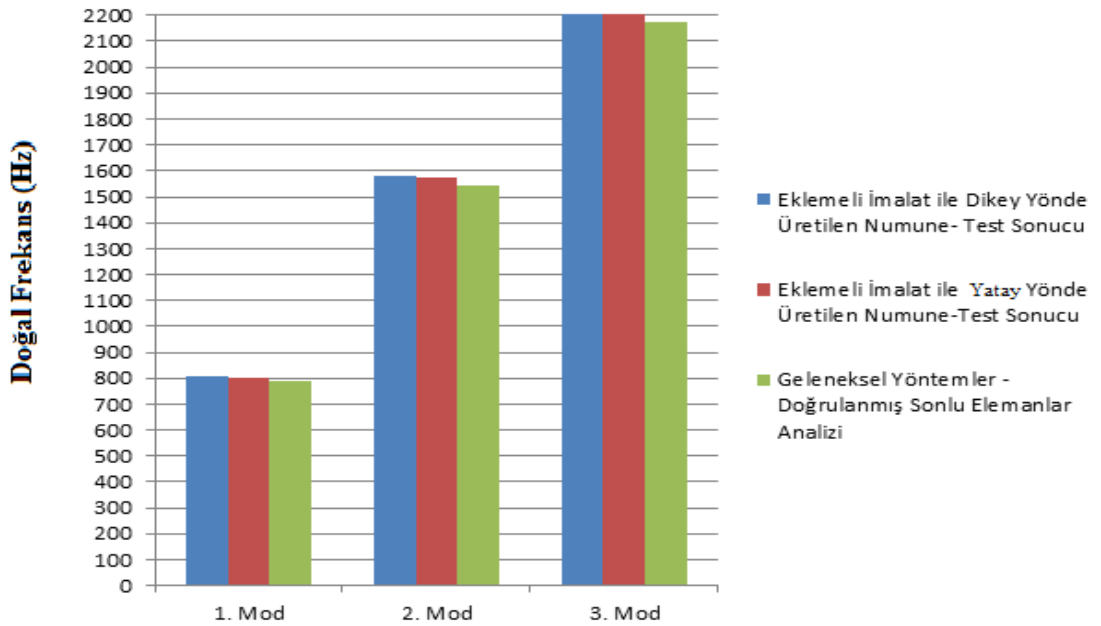
2 Ayrı numuneninde doğal frekans testleri tamamlanmıştır. Sonuçlar grafikler ve tablolar yardımı ile Yedinci Bölüm'ün ilk üç alt başlığında ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu tezin asıl amaçlarından biri olan dinamik elastik malzeme özelliklerinin hesaplanması bu testin sonuçları yardımıyla gerçekleşmiştir. Bu dinamik elastik malzeme özellikleri Beşinci bölümde yer alan teorik formüller yardımıyla hesaplanmıştır. Dinamik Young's modülünün hesaplanması için numunenin eğilme durumundaki temel rezonans frekansı kullanılmıştır. Dinamik kayma modülünün hesaplanması için ise burulma durumundaki temel rezonans frekansı kullanılmıştır. Böylelikle Tablo 7.6'da görülen değerler elde edilmiştir.

Tablo 7.6. Dinamik elastik malzeme özelliklerinin 5.Bölümdeki teorik formüller ve titreşim testi sonuçları yardımıyla elde edilmesi

Dinamik elastik malzeme Özelliği	Eklemeli İmalat Dikey Yönde İnşa Edilen Numune	Eklemeli İmalat Yatay Yönde İnşa Edilen Numune
Young Modülü, E (GPa)	119.7	118.3
Kayma Modülü, G(GPa)	45.75	45.6
Poisson Oranı, $\mu$	0.308	0.298

## 8. SONUÇ

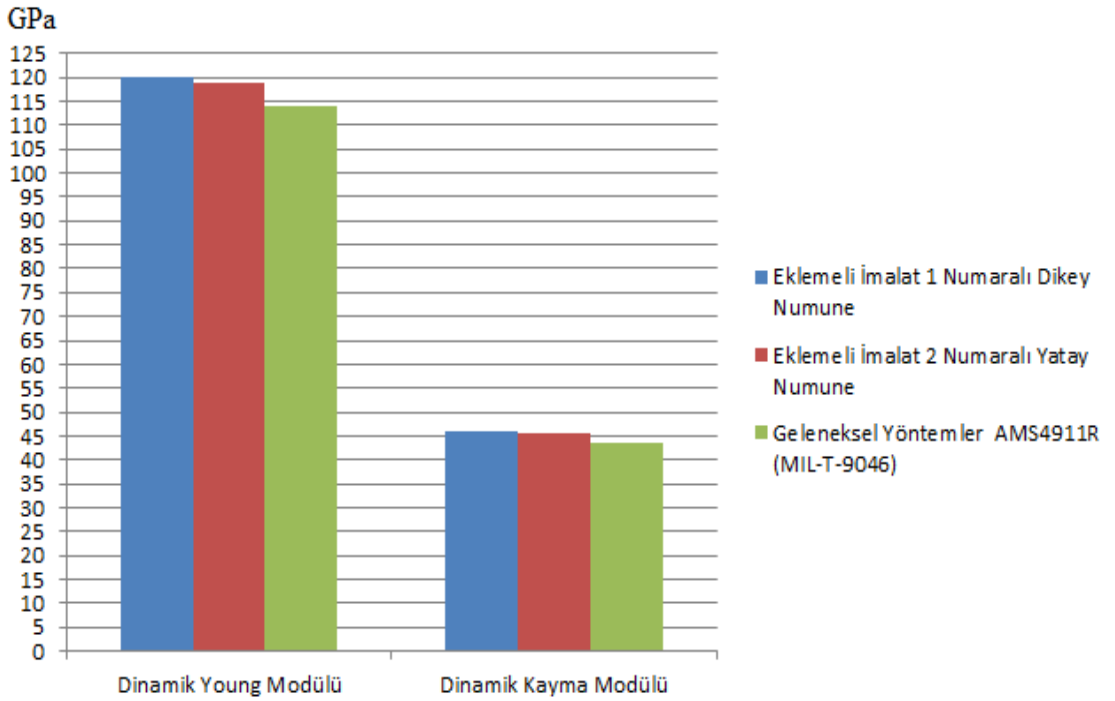
Bu tez kapsamında numunelerin üretiminde eklemeli imalat yöntemi olarak elektron demetiyle ergitme kullanılmıştır. Üretim ARCAM Q20plus makinesiyle yapılmıştır. Elektron demetiyle ergitme eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerin inşa yönünün bazı dinamik elastik malzeme özelliklerine etkisinin incelenmesi için dikey ve yatay yönde iki farklı numune üretilmiştir. Numuneler talaşlı imalat ile son ölçülerine getirilip düzgün yüzeylere sahip dikdörtgen kesitli plakalar elde edilmiştir. Ti-6Al-4V numunelerin darbe ile uyarma test yöntemiyle doğal frekans değerleri ölçülmüştür. Bulunan bu doğal frekans değerlerinden numunelerin dinamik elastik malzeme özellikleri Bölüm 5'te verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Bu dinamik elastik malzeme özellikleri kullanılarak numunelerin sonlu elemanlar modeli bilgisayar ortamında test sonuçları yardımıyla doğrulanmıştır. Bu doğrulamadan dolayı geleneksel yöntemler ile elde edilen Ti-6Al-4V alaşıma sahip plaka formunda numune üretilmesine gerek duyulmamıştır. Geleneksel yöntemler ile üretilen Ti-6Al-4V plakaların dinamik elastik malzeme özellikleri SAE AMS4911R'den alınmıştır. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen 2 farklı inşa yönüne sahip numunelerin doğal frekans test sonuçları ve geleneksel yöntemlerle üretilen aynı geometrideki modelin doğrulanmış sonlu elemanlar analizinin sonuçları Şekil 8.1'de gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen 2 farklı inşa yönüne sahip numunelerin doğal frekans test sonuçları ve geleneksel yöntemlerle üretilen aynı geometrideki modelin sonlu elemanlar analizinin sonuçları

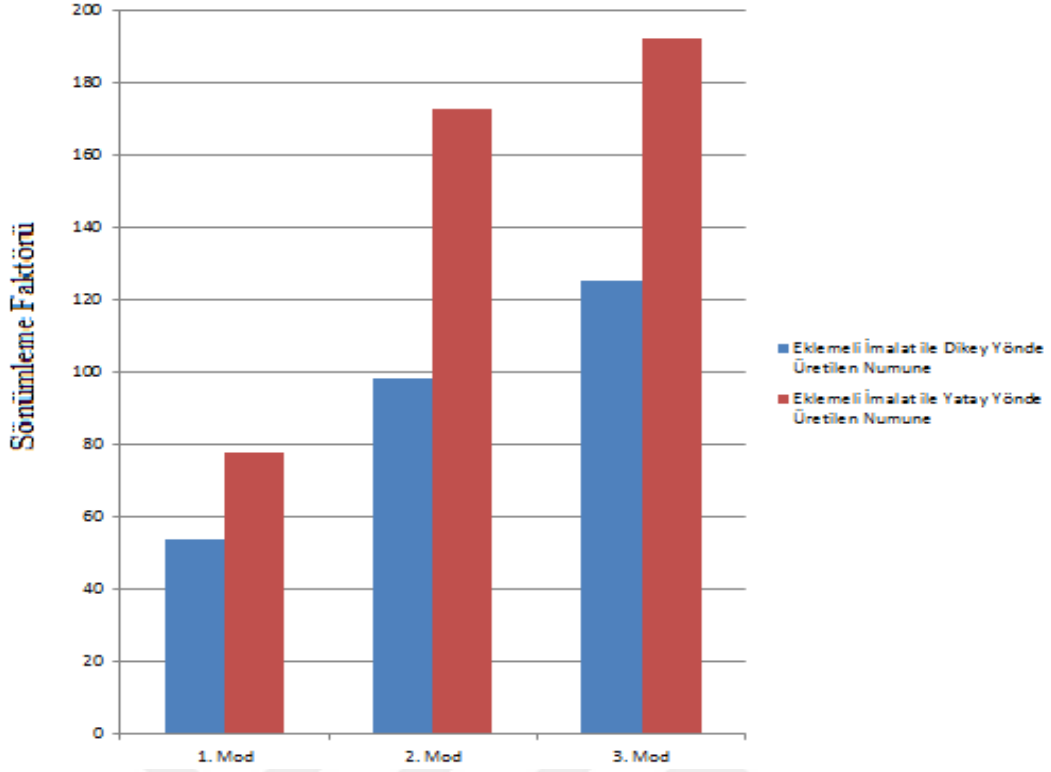
Grafikten açıkça görüleceği üzere elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretilen aynı geometriye sahip Ti-6Al-4V numunelerin farklı inşa yönlerinde üretilmesinin numunenin doğal frekanslarına etkisi çok azdır.

Bölüm 5'te yer alan formüller yardımıyla eklemeli imalat ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin dinamik elastik malzeme özellikleri hesaplanmıştır. Bu özellikler Şekil 8.2'de gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretilen aynı geometriye sahip Ti-6Al-4V numunelerin farklı inşa yönlerinde üretilmesinin numunenin dinamik elastik özelliklerine etkisi çok azdır. Eklemeli imalat ile üretilen numunelerin dinamik elastik malzeme özellikleri, SAE AMS4911R standardında verilen geleneksel yöntemler ile üretilen Ti-6Al-4V plakaların sahip olması gereken minimum dinamik elastik malzeme özellikleri ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda eklemeli imalat ile üretilen numunelerin inşa yönü farketmeksizin bu standardı sağladığı görülmüştür.



Şekil 8.2. Eklemeli imalat ile üretilen Ti-6Al-4V malzemeler ile özellikleri SAE AMS4911R standardından alınan geleneksel Ti-6Al-4V malzemelerin dinamik Young modülü ve dinamik kayma modüllerinin karşılaştırılması.

3.2. Bölüm'de gösterilen yarım güç bant genişliği metodu ile elektron demetiyle ergitme yöntemiyle üretilen numunelerin her bir mod değeri için sönümlenme faktörleri elde edilmiştir. Bu sönümlenme faktörlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 8.3'te verilmiştir.



Şekil 8.3. Elektron demetiyle ertitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V alaşıma sahip numunelerin inşa yönüne göre sönümleme faktörlerinin karşılaştırılması

Tezden çıkarılan sonuçlar maddeler halinde aşağıdaki gibidir :

- Elektron demetiyle ertitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V numuneler ön ısıtma işlemi gerek duyulmadan talaşlı işlenebilirler. Talaşlı işleme ile yüzeydeki pürüzlülüklerin düzeltildiği ve düzgün geometrinin elde edildiği numunelerde dinamik elastik malzeme özellikleri darbe ile uyarma test yöntemiyle elde edilebilir.
- Elektron demetiyle ertitme yöntemi kullanılarak üretilen Ti-6Al-4V alaşıma sahip plaka halinde numunelerin dinamik elastik malzeme özelliklerinin, geleneksel yöntemler ile üretilen Ti-6Al-4V alaşıma sahip plakaların SAE AMS4911R standardına göre sahip olması gereken minimum malzeme özelliklerini sağladığı görülmüştür.
- ARCAM Q20plus cihazı kullanılarak elektron demetiyle ertitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerin dinamik elastik malzeme özellikleri inşa yönüne göre çok az farklılık göstermektedir. Dikey yönde inşa edilen numunenin dinamik Young's modülü yatay yönde inşa edilen numunenin dinamik Young's modülünden az farkla daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.
- Her iki inşa yönünde imal edilmiş eklemeli imalat numunesine ait doğal frekanslar çok yakın değerlerde elde edilmiştir. İnşa yönlerinin doğal frekanslara etkisinin çok az

olduğu gözlemlenmiştir. Dikey yönde inşa edilen numunenin doğal frekanslarının yatay yönde inşa edilen numunenin doğal frekanslarına göre az farkla daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

- Dikey inşa yönünde üretilen numunenin her bir mod için sahip olduğu sönümlenme faktörü değeri yatay inşa yönünde üretilen numunenin sönümlenme faktörü değerlerinden düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Sönümlenme faktörü değeri sayısal büyüklüğü malzemelerin sönümlenme kapasiteleri ile ters orantılıdır. Dolayısıyla dikey inşa yönünde üretilen numunelerin sönümlenme kapasiteleri yatay inşa yönünde üretilen numunelerin sönümlenme kapasitelerinden daha yüksektir.
- Tablo 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilen üretim parametreleri kullanılarak bu tez kapsamında elde edilen dinamik elastik malzeme özelliklerine sahip Ti-6Al-4V parça üretimi yapılabilir.
- İhtiyaçlara uygun olarak, titreşime maruz kalan endüstriyel Ti-6Al-4V parçaların üretiminde elektron demetiyle ergitme yöntemi kullanılabilir.
- Darbe ile uyarma test yönteminde numunenin serbestçe desteklenmesi için poliüretan süngerler, diğer destek yapılarına göre tercih edilebilirler.
- Darbe ile uyarma test yönteminin uygulanmasının basitleştirilmesi mümkündür. Teste girecek numunenin boyutları doğru seçilerek dinamik elastik malzeme özelliklerinin hesaplanacağı modların ilk iki moda denk getirilmesi yapılan hesaplamaların daha kesin olmasına katkıda bulunur.
- Elektron demetiyle ergitme yöntemi kullanılarak üretilen numunelerde tabla ile temas eden yüzeylerde istenmeyen yabancı element ve pürüzlülük değeri diğer yüzeylere göre çok daha fazladır. Tasarım ve üretim aşamasında bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Mümkünse parçanın yüzey alanı en az olan yüzey üzerinde inşa işlemleri yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, ASTM E 1876-01, ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken , 2005.
- [2] Titanium Alloy, Sheet, Strip, and Plate, 6Al - 4V, Annealed, SAE AMS4911R, SAE International, Canada, 2019.
- [3] C.Leyens, and M.Peters, "Titanium and Titanium Alloys," Wiley-VCH, 2003.
- [4] C. Veiga, J. P. Davim, and A. Loureiro, "Properties and applications of titanium alloys: A brief review," Reviews on advanced materials science, vol. 32, pp. 14-34, 2012.
- [5] R.R. Boyer, "An overview on the use of titanium in the aerospace industry," Materials Science and Engineering, vol. 213, no. 1-2, pp. 103-114, 1996.
- [6] Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion, ASTM F2924 – 14, ASTM International, West Conshohocken, 2014.
- [7] Standard Specification for Titanium-6Aluminum-4 Vanadium Alloy Castings for Surgical Implants, ASTM F1108 - 14, ASTM International, West Conshohocken, 2014.
- [8] GE Additive, "Arcam EBM" [www.ge.com/additive](http://www.ge.com/additive).  
<http://www.arcam.com/technology/products/arcam-q20/>.
- [9] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," Acta Materiala, vol. 117, pp. 371-392, 2016.
- [10] L. Yang, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, M. Menon, and S. Wiener, Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production, Cham: Springer, 2017.

- [11] R. Udroui, "Powder bed additive manufacturing systems and its applications," *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 122-129, 2012.
- [12] X. Gong, T. Anderson, and K. Chou, "Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology," *Manufacturing Review*, 2014.
- [13] A.A. Antonysamy, J. Meyer, and P.B. Prangnell, "Effect of build geometry on the  $\beta$ -grain structure and texture in additive manufacture of Ti-6Al-4V by selective electron beam melting," *Materials Characterization*, vol. 84, pp. 153-168, 2013.
- [14] S. L. Draper, B. A. Lerch, J. Telesman, R. E. Martin, A. J. Ring, I. E. Locci, and A. Garg, "Materials Characterization of Electron Beam Melted Ti-6Al-4V," *The NASA Scientific and Technical Information (STI)*, Hampton, 2016.
- [15] H. Gong, T. Starr, K. Rafi, H. Gu, G.D.J Ram, and B. Stucker, "Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting," *Materials and Design*, vol. 86, pp. 545-554, 2015.
- [16] E.H.Nava, A study on the mechanical properties of micro-truss Ti-6Al-4V materials fabricated by Electron Beam Melting, Ph.D. thesis: The University of Sheffield, United Kingdom, 2016.
- [17] G. Mandil, van Thao Le, H. Paris, and M. Sua, "Building new entities from existing titanium part by electron beam melting: microstructures and mechanical properties," *Le Centre pour la Communication Scientifique Directe*, 2015.
- [18] X. Wang, X. Gong, and K. Chou, "Scanning Speed Effect on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Processed by Electron Beam Additive Manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 1, pp. 287-295, 2015.
- [19] N. Stelzer, M. Scheerer, Z. Simon, L. Bača, T. Sebald, H. Gschiel, M. Hatzenbichler, and B. Bonvoisin, "MECHANICAL PROPERTIES OF SURFACE ENGINEERED METALLIC PARTS PREPARED BY ADDITIVE MANUFACTURING," in *15th ECSSMET*, Toulouse, 2018.

- [20] H. Galarragaa, D. A. Ladosa, R. R. Dehoffb, M. M. Kirkab, and Peeyush Nandwana, "Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM)," *Additive Manufacturing*, vol. 10, pp. 47-57, 2016.
- [21] P. Edwards, A. O'Conner, and M. Ramulu, "Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 135, 2013.
- [22] C. Formanoir, S. Michotte, O. Rigo, L. Germain, and S. Godet, "Electron beam melted Ti-6Al-4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material," *Materials Science & Engineering*, vol. 652, pp. 105-119, 2015.
- [23] Y. Zhaia, H. Galarragaa, and D. A. Ladosa, "Microstructure Evolution, Tensile Properties, and Fatigue Damage Mechanisms in Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Two Additive Manufacturing Techniques," *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 658-666, 2015.
- [24] S. Franchitti, C. Pirozzi, and R. Borrelli, "Influence of hot isostatic pressing and surface finish on the mechanical behaviour of ti6al4v processed by electron beam melting," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 43, no. 12, pp. 2828-2841, 2020.
- [25] A. Kirchner, B. Klöden, T. Weißgärber, B. Kieback, A. Schoberth, S. Bagehorn, and D. Greitemeier, "Mechanical properties of Ti-6Al-4V additively manufactured by electron beam melting," in *Euro PM2015 - AM - Electron Beam Melting*, 2015.
- [26] S. Bruschi, R. Bertolini, and A. Ghiotti, "Coupling machining and heat treatment to enhance the wear behaviour of an Additive Manufactured Ti6Al4V titanium alloy," *Tribology International*, vol. 116, pp. 58-68, 2017.
- [27] F. MEMU, "Katmanlı İmalat yöntemiyle üretilmiş ti-6al-4v alaşımının mekanik özelliklerinin incelenmesi," *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara: TOBB Ekonomi ve Teknoloji

Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.

- [28] S.T. Yiğitbaşı, "Mechanical properties of ti-6al-4v parts produced by electron beam melting and topology optimization in different building directions," M.S. thesis, ANKARA: Middle East Technical University, 2018.
- [29] A. Orhangül, "Validation of dynamic models of additive manufacturing parts," M.S thesis, İstanbul: Istanbul Technical University, 2018.
- [30] Siemens Digital Industries Software, "What is a Frequency Response Function (FRF)?," community.sw.siemens.com, <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-frequency-response-function-frf>, (Accessed 10.Jul.2020).
- [31] D. J. EWINS, "Digital Signal Processing," in Modal Testing:Theory and Practice, USA, Wiley, 2000, pp. 131-143.
- [32] M. Bogdan, "Sampling rate and aliasing on a virtual laboratory," Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 2, 2009.
- [33] D.J. Jwo, H. Wu, and Y. Chang, "Windowing design and performance assessment for mitigation of spectrum leakage," in E3S Web of Conferences, 2018.
- [34] VR University," COHERENCE." vru.vibrationresearch.com.  
<https://vru.vibrationresearch.com/lesson/coherence/>.
- [35] M. V. Gelfuso, D. Thomazini, J. C. Silva de Souza, and J. J. de Lima Junior, "Vibrational Analysis of Coconut Fiber-PP Composites," Materials Research, vol. 17, 2013.
- [36] M. F. Treszkai, D. Sipos, and D. Feszty, "Damping determination by half-power bandwidth method for a slightly damped rectangular steel plate in the mid-frequency range," Acta Technica Jaurinensis, vol. 13, pp. 177-196, 2020.
- [37] A. Klassen, V. E. Forster, V. Juechter and C. Körner, "Numerical simulation of multi-component evaporation during selective electron beam melting of TiAl," Journal of

Materials Processing Technology, vol. 247, pp. 280-288, 2017.

- [38] T R Jebieshia , J. M. Kim, J. W. Kang , S. W. Son, and H. D. Kim, "Microstructural and Very High Cycle Fatigue (VHCF) Behavior of Ti6Al4V—A Comparative Study," Materials, vol. 13, 2020.
- [39] M. Senldge, and T. R. Licht, Piezoelectri Acccelerometers and Vibration Preamplifiers, 1987.
- [40] N. H. Baharin, and R. A. Rahman, "Effect of accelerometer mass on thin plate vibration," Jurnal Mekanikal, vol. 29, pp. 100-111, 2009.

