

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**OTOMOTİV SANAYİSİ İÇİN PERİYODİK HÜCRESEL HİBRİT  
MALZEMELERİN TASARIMI, ÜRETİMİ İLE MEKANİK VE  
TİTREŞİM ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ABDULLAH EREN**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2020**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**



**OTOMOTİV SANAYİSİ İÇİN PERİYODİK HÜCRESEL HİBRİT  
MALZEMELERİN TASARIMI, ÜRETİMİ İLE MEKANİK VE  
TİTREŞİM ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ABDULLAH EREN**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2020**

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP ) tarafından 2020FEBE025 nolu proje ile desteklenmiştir.**

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

  
**ABDULLAH EREN**

## ÖZET

**OTOMOTİV SANAYİSİ İÇİN PERİYODİK HÜCRESEL HİBRİT  
MALZEMELERİN TASARIMI, ÜRETİMİ İLE MEKANİK VE TİTREŞİM  
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ABDULLAH EREN  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. GÖKMEN ATLIHAN)**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2020**

Bu tez çalışmasında, hücresel hibrit malzeme yapısında olan bal petekli yapılar ile  $\Theta$  açısı verilerek oluşturulmuş değişken kesitli kirişlerin doğal frekanslarının mod değerlerini incelemek amacıyla tez çalışması yapılmıştır.

Yürütülen çalışmada, farklı çekirdek yapısındaki bal petekli kirişlerin ve  $\Theta$  açısı verilerek oluşturulmuş değişken kesitli kirişlerin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen ana kiriş ve açılı kirişlerin analitik, nümerik (Ansys) ve deneysel analizleri yapıp, oluşan doğal frekansların karşılaştırılması yapılarak titreşim mod değerlerinin birbirine yakınlığı gösterilmiştir.

Ankastre mesnetli kirişlerde, bal peteği yapılarının şekillerine göre ve  $\Theta$  açısı verilmesine göre aynı hacim ve yapıda olanların doğal frekans titreşim analizlerinin değişebileceği gösterilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER: Otomotiv, Doğal Frekans, Kompozit, Hibrit Malzeme, Süreksizlik, Deneysel Analiz, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)**

## **ABSTRACT**

### **DETERMINATION OF THE DESIGN, PRODUCTION AND MECHANICAL AND VIBRATION PROPERTIES OF PERIODIC CELLULAR HYBRID MATERIALS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY**

**MSC THESIS**

**ABDULLAH EREN**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**AUTOMOTIVE ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. GÖKMEN ATLIHAN)**

**DENİZLİ, SEPTEMBER 2020**

In this thesis, a thesis study was conducted to examine the mode values of the natural frequencies of the honeycomb structures with cellular hybrid material structure and variable cross-section beams formed by giving  $\Theta$  angle.

In the study, the design and production of honeycomb beams with different core structure and variable cross-section beams formed by giving angle were carried out. Analytical, numerical (Ansys) and experimental analyzes of the main beam and angle beams produced are made, and the proximity of the vibration mode values is shown by comparing the resulting natural frequencies.

It has been shown that the natural frequency vibration analysis of the beams with the same volume and structure can change according to the shapes of the honeycomb structures and given the angle.

**KEYWORDS: Automotive, Natural Frequency, Composite, Hybrid Material, Delaminated, Experimental Analysis, Finite Element Method (FEM)**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR</b> .....	<b>3</b>
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELERDE BAL PETEĞİ YAPISI</b> .....	<b>12</b>
3.1 Honeycomb (Bal Peteği) Yapısının Faydaları.....	13
3.2 Bal Peteği (Honeycomb) Uygulama Alanları.....	14
<b>4. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ</b> .....	<b>16</b>
4.1 3 Boyutlu İmalat Teknolojisi (3B Yazıcılar).....	17
4.1.1 3B Yazıcıların Avantajları.....	18
4.1.2 3B Yazıcıların Dezavantajları .....	19
4.1.3 3B Yazıcı Kullanım Alanları.....	19
4.1.4 3 Boyutlu Yazıcıların Otomotivde Kullanılması.....	19
4.1.5 Mühendislikte 3B Yazıcılar.....	21
4.1.6 Otomotivde 3B Yazıcı Kullanılmasına Örnekler .....	21
4.1.7 3B Yazıcı ile Yapılan Arabalara Örnekler .....	23
4.2 Hammadde olarak PLA .....	24
4.2.1 PLA Filamentinin Genel Özellikleri ve Avantajları.....	25
4.2.2 PLA Filamentinin Dezavantajları.....	26
4.2.3 PLA Filamentinin Üretilmesi.....	26
4.2.4 PLA Filamentinin Kullanım Alanları.....	28
<b>5. DENEYSEL ve NÜMERİK ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>29</b>
5.1 Deneysel Numunelerin Üretimi.....	29
5.1.1 Çalışmada Kullanılan 3B Yazıcının Temel Bileşenleri ve Görevleri.....	32
5.1.2 Çalışmada Kullanılan 3B Yazıcının Temel Çalışma Prensipleri.....	32
5.1.3 Çalışmada Kullanılan “Roboturk Compact Cs2 3D Yazıcı” Özellikleri.....	33
5.1.4 Ultimaker Cura Programı .....	34
5.2 Numune Boyutlarının Hesaplanması ve Tasarımı .....	39
5.2.1 Ana Kirişin Hesaplanması ve Tasarımı.....	39
5.2.2 Hücresel Hibrit Yapılı Kirişlerin Hesaplanması ve Tasarımı.....	40
5.2.2.1 Çıkartılan Küçük Hacimlerin Hesabı.....	41
5.2.2.2 Çıkartılan Alanların Her Satırda 3 Adet Olması Durumu .....	42
5.2.2.2.1 Üçlü Eşkenar Altıgen Yapılı Kirişlerin Hesaplanması ve Tasarımı .....	42
5.2.2.2.2 Üçlü Eşkenar Beşgen Yapılı Kirişlerin Hesaplanması ve Tasarımı .....	43
5.2.2.2.3 Üçlü Kare Yapılı Kirişlerin Hesaplanması ve Tasarımı .....	45
5.2.2.2.4 Üçlü Daire Yapılı Kirişlerin Hesaplanması ve Tasarımı .....	46
5.2.2.3 Çıkartılan Alanların Her Satırda 4 Adet Olması Durumu .....	49

5.2.3	θ Açısı Verilerek Elde Edilen Kirişlerin Hesaplanması ve Tasarımı	51
5.2.3.1	θ Açılarına Göre UzunTaraF (B) Uzunluklarının Bulunması	52
5.3	Yoğunluk Hesabı	55
5.4	Ansys 19.0 Workbench ile Analizlerin Yapılması	58
5.5	FFT Analizi	62
5.5.1	Veri Toplama Cihazı DEWE 43 A	63
5.6	Titreşim Deney Seti	64
<b>6.</b>	<b>DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>	<b>66</b>
6.1	θ Açısının Doğal Frekans Titreşimlerine Etkisi	67
6.2	Dolu Kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile Titreşim Analizi	68
6.2.1	Dolu Kirişe Ait Titreşim Mod Değerleri	68
6.2.2	Bal Petekli Yapıların Ansys Ortamında Analiz Sonuçları	69
6.2.2.1	Üçlü Eş Merkezli Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi	69
6.2.2.1.1	Üçlü Kare Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi	69
6.2.2.1.2	Üçlü Beşgen Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi	70
6.2.2.1.3	Üçlü Altıgen Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi	70
6.2.2.1.4	Üçlü Daire Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi	71
6.2.2.2	Dörtlü Eş Merkezli Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizleri	72
6.2.2.3	θ Açısına Sahip Kiriş Yapılarının Ansys Titreşim Analizleri	73
6.2.3	Açılı Parçaların analitik, deneysel ve nümerik analizlerinin karşılaştırılması	75
<b>7.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>78</b>
<b>8.</b>	<b>KAYNAKLAR</b>	<b>79</b>
<b>9.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>88</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Periyodik Hücresel Hibrit Malzemelerin (Bal Peteği Yapısının) Temel Yapısı.....	2
Şekil 3.1: Bal Peteği Yapısının Kısımları.....	12
Şekil 3.2: Tasarımı yapılan bal peteği yapısı (Alt ve üst katmanlı- katmansız)...	13
Şekil 3.3: Farklı Bal Peteği Çekirdek Yapıları.....	14
Şekil 3.4: Bal Peteği Yapısının Çeşitli Uygulamaları.....	15
Şekil 4.1: 3B Yazıcılarda İşlem Basamakları.....	18
Şekil 4.2: 3B Yazıcıların Otomotiv Fonksiyonel Parçalarda Kullanılması.....	20
Şekil 4.3: Ar-Ge Sistemlerinde 3B Yazıcı ile Prototipleme Yapma .....	21
Şekil 4.4: 3B Yazıcı ile Üretilen Local Motors Aracı.....	22
Şekil 4.5: Honda Access'in 3B Yazıcı ile Ürettiği Far.....	22
Şekil 4.6: 3B Yazıcı ile Üretilen Urbe 2 Aracı.....	23
Şekil 4.7: 3B Yazıcı ile Üretilen Strati Aracı.....	23
Şekil 4.8: PLA Malzemesinin Kullanımına Örnekler.....	25
Şekil 4.9: PLA Malzemesinin Üretim ve Dönüşüm Aşamaları.....	26
Şekil 4.10: PLA Malzemesinin Üretim Süreci.....	27
Şekil 4.11: PLA Malzemesinin Genel Kullanımına Örnekler.....	28
Şekil 4.12: Röchling Otomobil Firmasının PLA Malzemesini Kullanımına Örnekler.....	28
Şekil 5.1: 3B Yazıcı ile Bal Petekli Yapının Üretilmesi.....	30
Şekil 5.2: Tasarlanan Ana Yapıdaki Kirişin Solidworks Görüntüsü.....	30
Şekil 5.3: Tasarlanan bal petekli yapıdaki kirişin SolidWorks görüntüsü.....	31
Şekil 5.4: Kirişin Şeffaf Görüntüsü ile İç Yapısının Görülmesi ve 3B Yazıcıda İmalat Süreci.....	31
Şekil 5.5: Çalışmada Kullanılan 3B Yazıcı ve Bölümleri.....	34
Şekil 5.6: Ultimaker Cura Programı Ara Yüzü ve Üretilecek Kirişin Ultimaker Cura Görüntüsü.....	35
Şekil 5.7: Üretilecek Parçanın Ultimaker Cura Programında Dilimlenmeye Hazırlanması.....	37
Şekil 5.8: Üretilecek Parçanın Ultimaker Cura Programında Katman Görünümü.....	37
Şekil 5.9: Üretilecek Parçanın Ultimaker Cura Programında Dolgu ve Çizgi Yönlerinin Görünümü .....	38
Şekil 5.10: 3B Yazıcı'da Deney Kirişlerinin Üretilmesi.....	38
Şekil 5.11: Ana Kirişin SD SolidWorks Ortamındaki Tasarımı.....	39
Şekil 5.12: 3B Yazıcı ile Üretilen Ana Parça.....	39
Şekil 5.13: Hücresel Hibrit Yapılı Kirişlerin SolidWorks Tasarımı.....	40
Şekil 5.14: Deliklerin Açılacağı Tek Bir Yüzün Görünümü.....	41
Şekil 5.15: Üçlü Eşkenar Altıgen Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü.....	43
Şekil 5.16: Üçlü Eşkenar Beşgen Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü.....	44
Şekil 5.17: Üçlü Kare Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü.....	46

Şekil 5.18: Üçlü Daire Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü.....	47
Şekil 5.19: Üçlü Altıgen- Beşgen- Kare Ve Daire Çekirdek Yapılarının Solidworks Ortamındaki Tam Görünümü .....	48
Şekil 5.20: Üçlü Daire Ve Altıgen Bal Peteği Yapısındaki Kirişler .....	49
Şekil 5.21: Üçlü Eşkenar Beşgen Ve Kare Bal Peteği Yapısındaki Kirişler.....	49
Şekil 5.22: Dörtlü Eşkenar Altıgen Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü.....	50
Şekil 5.23: Dörtlü Altıgen- Beşgen- Kare Ve Daire Çekirdek Yapılarının Solidworks Ortamındaki Tam Görünümü.....	51
Şekil 5.24: $\Theta$ Açısı Verilmesiyle Oluşacak Yeni Açılı Parçaların 2 Boyutlu Görünümü.....	52
Şekil 5.25: $\Theta$ Açısı Verilmeyen 1 Numaralı Ana Kiriş.....	54
Şekil 5.26: Açılı Olarak Üretilen 11 Numaralı Kiriş ( $\Theta=1,0$ ).....	54
Şekil 5.27: Yoğunluk Deneyinde Kullanılan Ana Kirişlerin Ebatları ve SD Solidworks Görünümü.....	55
Şekil 5.28: RADWAG (NAS-220/C/2) Hassas Terazisi ve Ana Parçanın Ağırlığının Ölçülmesi.....	56
Şekil 5.29: Ansys Workbench Programının Giriş Sayfası.....	58
Şekil 5.30: PLA Malzemesinin Tanımlanması Ve Değerlerinin Girilmesi.....	59
Şekil 5.31: Parçanın Workbench Ortamına Yükleme Görüntüsü.....	60
Şekil 5.32: Kirişin Meshleme Görüntüsü.....	60
Şekil 5.33: Kirişin Bir Tarafının Sabitlemesi.....	61
Şekil 5.34: Ansys Ortamında Yapılan Titreşim Analizinin Genel Görüntüsü.....	62
Şekil 5.35: DEWE 43 A Veri Toplama Cihazı.....	63
Şekil 5.36: Kirişin Sabitleyiciye Bağlanarak Deney Mekanizmasının Oluşturulması.....	64
Şekil 5.37: İvme Ölçer'in Kiriş Numunesi Üzeriene Yerleştirilmesi.....	65
Şekil 5.38: Çalışmada Kullanılan DEWE 43 A Veri Toplama Cihazı ve Bağlantı Kabloları.....	66
Şekil 5.39: Deneysel Analiz ile Elde Edilen Titreşim Frekansının FFT Analizi ile Grafiğe Aktarılması.....	66
Şekil 6.1: 1. Mod Titreşim Frekansı.....	68
Şekil 6.2: 2. Mod Titreşim Frekansı.....	69
Şekil 6.3: 3. Mod Titreşim Frekansı.....	69
Şekil 6.4: Üçlü Kare ANSYS Analizinin Genel Sonuçları ve ANSYS Görünümü.....	69
Şekil 6.5: Üçlü Beşgen ANSYS Analizinin Genel Sonuçları ve ANSYS Görünümü.....	70
Şekil 6.6: Üçlü Altıgen ANSYS Analizinin Genel Sonuçları ve ANSYS Görünümü.....	70
Şekil 6.7: Üçlü Daire ANSYS Analizinin Genel Sonuçları ve ANSYS Görünümü.....	71
Şekil 6.8: $\Theta =0.1$ Açısına Sahip 2 No'lu Açılı Kirişin Ansys Ortamındaki Görünümü ve Titreşim Mod Değerleri .....	73
Şekil 6.9: $\Theta =1.0$ Açısına Sahip 2 No'lu Açılı Kirişin Ansys Ortamındaki Görünümü ve Titreşim Mod Değerleri .....	73
Şekil 6.10: 1. Mod'a Ait Titreşim Değerlerinin Açılara Göre Değişimi.....	75
Şekil 6.11: 2. Mod'a Ait Titreşim Değerlerinin Açılara Göre Değişimi.....	76
Şekil 6.12: 3. Mod'a Ait Titreşim Değerlerinin Açılara Göre Değişimi.....	76

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 5.1: Üretilen Açılı Parçaların Boyutsal Özellikleri.....	53
Tablo 5.2: Kullanılan RADWAG (NAS-220/C/2) Hassas Terazinin Ana Ölçüleri ve Temel Özellikleri.....	56
Tablo 5.3: Kullanılan Ana Kirişin Ebatları.....	56
Tablo 6.1: Kısa Taraftan (b) Sabit Tutulduğunda.....	67
Tablo 6.2: Uzun Taraftan (B) Sabit Tutulduğunda .....	68
Tablo 6.3: Üçlü Bal Peteği Yapılarının Ansys Analiz Sonuçları .....	71
Tablo 6.4: Dörtlü Yapıların Ansys Analizlerinin Frekans Mod Değerleri .....	72
Tablo 6.5: $\Theta$ Açılı Parçalarının Kısa (b) Tarafı Sabit Tutulduğunda Oluşan Titreşim Modları.....	74
Tablo 6.6: $\Theta$ Açılı Parçalarının Uzun (B) Tarafı Sabit Tutulduğunda Oluşan Titreşim Modları.....	74

## SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ

"	:	inç
2B	:	İki Boyutlu
2D	:	2 Boyutlu
3B	:	3 Boyutlu
3DP	:	Üç Boyutlu Yazıcı
A	:	Amper
a	:	Üçlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Eşkenar Altıgeninin Bir Köşesinin Uzunluğu
ABS	:	Acrylonitrile Butadiene Styrene
b	:	Açılı Yapıdaki Kirişin Kısa Kenarı (mm)
E	:	Elastisite modülü [N/mm <sup>2</sup> ]
f	:	Frekans [Hz]
$\omega$	:	Doğal frekans (Hz)
p(x)	:	Kirişin birim boyuna etki eden yük [N/mm]
M	:	Moment (Nmm)
I	:	Atalet momenti ( $mm^4$ )
PLA	:	Poli Laktik Asit
$\Theta$	:	Açılı Kirişler İçin Verilen Aç
mm	:	Milimetre
DEM	:	Ayrık Elemanlar Yöntemi
PEI	:	Polieterimid
FEM	:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
PU	:	Poli Üretan
SHPB	:	Split Hopkinson Pressure Bar
BDT	:	Bilgisayar Destekli Tasarım
TM	:	Tersine Mühendislik
BT	:	Bilgisayarlı Tomografi
FDM	:	Ergiterek Yığılma ile Modelleme
STL	:	Stereolithography
LM3D	:	Local Motors 3 Dimensional
SD	:	Securiy Digital
mhz	:	Megahertz
v	:	Volt
w	:	Watt
V	:	<i>Hacim</i>
j	:	Üçlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Eşkenar Beşgenin Bir Köşesinin Uzunluğu
c	:	Üçlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Karenin Bir Köşesinin Uzunluğu (mm)
$r_1$	:	Üçlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Dairenin Bir Yarıçapının Uzunluğu (mm)
d	:	Dörtlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Eşkenar Altıgeninin Bir Köşesinin Uzunluğu (mm)
e	:	Dörtlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Eşkenar Beşgenin Bir Köşesinin Uzunluğu (mm)
ı	:	Dörtlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Karenin Bir Köşesinin Uzunluğu (mm)

$r_2$	:	Dörtlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Dairenin Bir Yarıçapının Uzunluğu	(mm)
$L$	:	Deneyde Kullanılan Kirişin Uzunluğu	(mm)
$h$	:	Deneyde Kullanılan Kirişin Et Kalınlığı	(mm)
$g$	:	Gram	
$sn$	:	Saniye	
$q$	:	Ana Kirişin Uzunluğu	(mm)
$y$	:	Ana Kirişin Genişliği	(mm)
$z$	:	Ana Kirişin Et Kalınlığı	(mm)
$m$	:	Kütle	(gram)
$\rho$	:	Yoğunluk	( $kg/m^3$ )
$x$	:	Genlik	
$r$	:	Eğrilik Yarıçapı	(mm)
$t$	:	Zaman	(sn)
$A_n$	:	Kirişin genliği	
$n$	:	Mod Sayısı	

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yapımına başladığımız ilk andan itibaren benden desteklerini hiç esirgemeyen, her ne zaman olursa olsun yardım eden, geri çevirmeyen, bana çalışmada yön veren, danışman hocam, Doç. Dr. Gökmen ATLIHAN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmamın ANSYS analiz kısmında ve 3B Yazıcı ile üretim kısmında yardımlarını esirgemeyen sayın Doç. Dr. İsmail OVALI hocama teşekkür ederim.

Her türlü desteğini ve sabrını benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme, annem Şengül EREN'e ve babam Ali EREN'e sonsuz minnettarlıklarımı sunarım.

Öncelikle benim Yüksek Lisansa başlamamda en önemli faktör olan, her türlü desteğini, sabrını ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Ece EREN'e ve her Denizli'ye gidişimde bana evlerini açan ve beni evlatları gibi gören ÜNAL ailesine şükranlarımı sunuyorum.

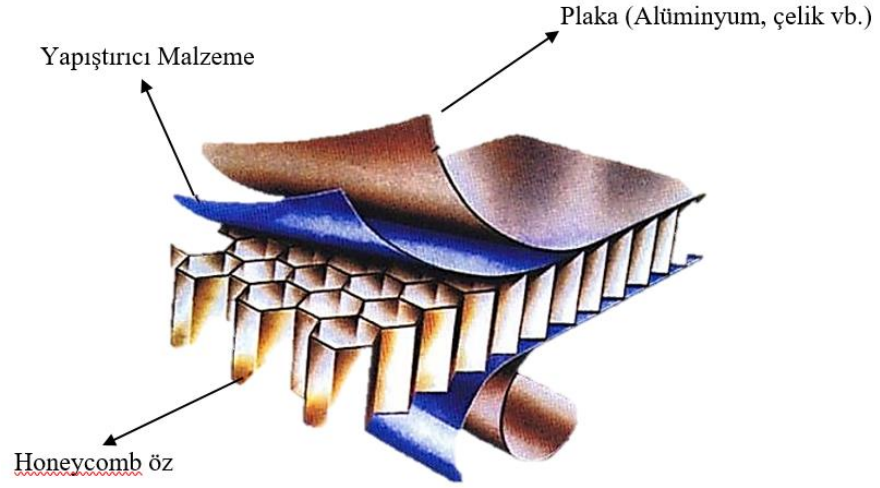
## 1. GİRİŞ

21. yüzyıl da teknolojik gelişmelerin hızla artmasıyla birlikte, kara, deniz, hava ve uzay araçları gibi günümüz taşıt vasıtalarında, savunma sanayisinde, çeşitli endüstri kollarında ve gündelik hayatın içine girmiş farklı ürünlerin imalatında, mukavemeti yüksek fakat aynı zamanda ağırlığı hafif ürünler tasarlamak, üretmek ve kullanmak bir zorunluluk haline gelmiştir. Malzemelerin birçoğunu solid olarak kullanmanın başta hem ekonomik ve ağırlık açısından hem de çeşitli sebeplerden dolayı mümkün olmadığı anlaşıldığından, farklı kombinasyonlar ve şekiller ile sandviç ürün haline getirilmiş panellerin kullanılması projelerde daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Tez çalışmasında kullanılan bal petekli yapılar, 3 boyutlu yazıcı ile çok ince tabakalardan üretilmesi sonucu elde edilen hücresel yapıların bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır.

Bal peteği hücresel yapıları, bal arılarının doğal olarak yaptıkları bal petekleri ile benzerlik gösterdiği için honeycomb yani bal peteği yapısı olarak adlandırılmaktadır. Bal petekli yapılar genellikle alt ve üst katman plakalarının ortasına çekirdek yapının çoğunlukla bir yapıştırıcı yardımı ile birleştirilmesi sayesinde oluşturulmaktadır. Bal petekli yapılar, ilk olarak yaklaşık 1940 yıllarında havacılık sektöründe, uçakların gövde panellerinde kullanılmaya başlanmıştır (Rathbun ve diğ., 2005).

Sandviç yapı malzemelerin, çeşitli uygulamalar için alt ve üst yüzey tabakaları ile çekirdeğinin farklı malzeme ve geometrik yapılardan seçilerek en uygun tasarımların elde edilebilmesi, en büyük avantajları arasında gösterilmektedir. (Alkan, 2012).

Aşağıdaki Şekil 1.1'de görüldüğü gibi bal peteği yapılarının temel yapısı altında ve üstünde ince bir plaka ortada seçilen şekle göre (dörtgen-beşgen-altıgen-yuvarlak vb.) çekirdek yapı ve bu çekirdek yapıyı ve plakaları birbirine yapıştıran yapıştırıcıdan oluşmaktadır.



**Şekil 1.1:** Periyodik hücresel hibrit malzemelerin (Bal Peteği Yapısının) temel yapısı (Alkan, Elektrikport, 2014)



## 2. LİTERATÜR

Ahmad ve diğ. (2017), uzay araçlarının temel yapısını oluşturan bal beteği yapısındaki sandviç laminatların sönümlenme özelliklerini inceleyip, geliştirme önerileri sunmuşlardır. Ufak parçacıklar ile altıgen petek hücrelerini doldurarak bir tasarım yapmışlardır. Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM) ile modelleyerek dinamik yükler altında parçacık-parçacık ve parçacık duvar etkilerinin frekanslarına bakmışlardır. Elde ettikleri deneysel veriler ile yaptıkları matematiksel değerleri karşılaştırarak doğruluklarını ispatlamışlardır.

Ahsanfar ve Galehdari (2017), yaptıkları çalışmalarında bal petek yapısındaki malzemelerin ani gelebilecek darbelere karşı oluşacak enerjiyi dağıtmasını ve absorbe etmesini incelemişlerdir. Bunun için asansör kabini enerji sönümlenme tasarımını ele almışlardır. Sayısal araştırmaları ABAQUS Software ve MATLAB ile yapıp karşılaştırma yapmışlardır. Sonuç olarak asansörlerde bal beteği yapısındaki malzemeler kullanılması dahilinde serbest düşme anında kullanılan malzemenin özelliğinden dolayı enerjiyi emeceğini ve daha az hasara yol açacağını sunmuşlardır.

Asadi ve diğ. (2006), yaptıkları çalışmalarında, Al-3003 alaşımından yaptıkları çekirdek yapıları bal beteği kırımlarının, düşme sırasındaki enerji emme kapasitelerini, hasar mekanizmalarını ve çekirdekler arasındaki alüminyum folyoların birbirine olan bağımlı deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak araştırmışlardır. Kurdukları deney düzeneğinde, kırımların yapısında meydana gelen hasarı incelemişler ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak da zamana bağımlı hasar diyagramlarını çıkarmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları petek çekirdek yapısının genel tasarıma uygun olduğunu göstermişlerdir.

Asadi ve diğ. (2007), yaptıkları çalışmalarında örnek bir olaydan yola çıkarak, bir arabanın vurduğu insanın aracın kaput bölgesine başını vurmasını, Cellbond alüminyum petek sandviç yapıları panele, çocuk kafası şeklinde bir cisim ile vurarak darbe oluşturmayı simülasyon etmişlerdir. Oluşan darbenin etkisini deneysel ve SEA yöntemi ile araştırmışlardır. Ayrıca petek sandviç yapıların açılabilir olarak ezilmesini de araştırmışlardır. Sonuç olarak çarpma sonucunda yapıda meydana gelen deneyi ve SEA sonuçlarını grafiklerle göstermişlerdir. Bununla birlikte hasar şekillerini ve emilen enerji miktarının yaklaşık olduğunu göstermişlerdir.

Atlıhan ve diğ. (2012), alüminyum malzemeden ürettikleri bal peteği yapısındaki sandviç kirişlerin doğal frekanslarını, hücre tipi ve içi dolu olacak şekilde, üçgen, kare, altıgen ve daire için nümerik olarak incelemiştir. Tasarladıkları sandviç kirişlerin geometrik hücrelerinin kenar uzunluklarını eşit olarak arttırmışlar ve doğal frekanslarını FEM ile analiz etmişlerdir. Dolu kirişin hem analitik hem de FEM ortamında yapılan analizleri birbirine yakın çıkmıştır. Çalışmaları sonucu geliştirilecek olan kirişin, düşük yoğunluk, yüksek dayanım sağladığını ve bunun yanında gösterdiği doğal frekans davranışı ile çok işlevli bir malzeme olacağını önermişlerdir.

Azzouz ve diğ. (2019), yapısal uygulamalar için polimer bazlı sandviç panellere katkı imalatı uygulanabilirliğini değerlendirmek için farkı üç tip 3 boyutlu baskılı kafes yapısının mekanik karakterizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Seçtikleri üç kafes yapısının sıkıştırma, kesme ve eğilme mukavemetlerini deneysel olarak araştırmışlardır. Tasarladıkları test numunelerinin tabanlarını, filaman vasıtasıyla 3 boyutlu yazıcıda üretmişlerdir. Sandviç yapıların arasını epoksi yapıştırıcı kullanarak poliaktik asit (PLA) malzemesinden keten deriler ile doldurmuşlardır. Sonuç olarak potansiyel yapılarda hafif polimer bazlı sandviç panellerin üretilebilirliğini ve faydalarını açıklamışlardır.

Baltacı ve Sarıkanat (2006), birbirinden farklı fiber oryantasyonları bulunan tabakalı kompozit kirişler tasarlayıp, imal etmişler ve bu kirişleri serbest ve zorlanmış yükler altındaki gösterdikleri davranışları incelemiştir. Yaptıkları çalışmalarında izoparametrik kabuk elaman kullanmışlar ve FEM yöntemi ile analizlerini yapmışlardır. Kompozit kirişin serbest ve zorlanmış titreşimini gözlemlemişler ve farkı fiber oryantasyonlarının kompozit kirişin frekansına etkilerini açıklamışlardır.

Boudjemaı ve diğ. (2012), bal peteği yapısında tasarladıkları petek panellerin, kenetlenmemiş sınır koşulları altında analizlerini yapmışlardır. Petek paneller için detaylı sonlu elemanlar modelleri geliştirmişler ve analiz etmişlerdir. Ayrıca deneysel testleri de yapmışlar ve iki yoldan yapılan deneylerde bulunan frekansların birbirine yakınlığını göstermişlerdir. Sonuç olarak geometri parametrelerinin ve malzeme türünün petek plaka modal frekansının değeri üzerinde bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Cuvier ve diğ. (2014), yaptıklarında çalışmalarında PLA bazlı bileşimlere mekanik özelliklerini araştırarak otomotiv sektöründe kullanılabilirliğine bakmışlardır. PLA (poliaktik asit) malzemesi hakkında yaptıkları araştırmalarında, mevcut biyo bazlı polimerler arasında PLA'nın yüksek mukavemet, sertlik, ve iyi işlenebilirlik açısından otomotiv sektöründe kullanılabilecek mekanik özelliklere sahip olduklarını belirtmişlerdir. Fakat bunlarla birlikte nispeten düşük ısıl kararlık, düşük tokluk ve endüstriyel uygulamalar için kırılabilirliğini de söylemişlerdir. PLA bazlı malzemelerin nano yapılarının dörtdü bileşimlerinin plastikleştirici ve darbe değıştirici gibi biyo-bazlı malzemelere örnek olabileceğini göstermişlerdir.

Debruyne ve diğ. (2015), termoplastik bal beteğı sandviç kirişleri deneysel olarak belirledikleri rezonans frekanslarının ve belirli sayıda test kirişinin mod şekillerinin analizi serbest sınır koşulları altında karakterize etmişlerdir. Tasarım parametreleri olarak, kirişin uzunluk modülü ve çekirdek kirişlerin düzlem dışı kesme modülleri belirlemişlerdir. Bu iki bağımsız parametreyi deneysel titreşim verileri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanarak hesaplamışlar ve karşılaştırmışlardır. Deneysel ve sayısal modal analizden kaynaklanan belirsizliğin kabul edilen iki sertlik parametresi üzerindeki etkisi olarak tartışmışlardır.

Degiovanni ve diğ. (2010), sandviç yapılı parçaların statik analizi için Hermitian ZikZag Teorisini ile taban laminat kavramına dayanan sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Tasarladıkları modeli farklı sınır şartları ve dış yüklere maruz bırakarak tam boyutlu elastisite çözümlerini ve statik tepkilerini çözümlenmişlerdir. Buldukları frekans değerler için çeşitli yorumlarda bulunmuşlardır.

Eloy ve diğ. (2019), karbon/epoksi kompozit yapılı sandviç paneller ile manyetorelojik elastomer (esnek) yapılı bal beteğı sandviçlerinin imalatını ve tasarımı yapıp incelemişlerdir. Işın formundaki test numunelerini serbest ve zorlanmış titreşimlere maruz bırakmışlar ve kirişin serbest ucuna ve ortasına yerleştirilmiş harici bir manyetik alanın varlığını kabul edip ya da kabul etmeyip iki farklı analiz yapmışlardır. Uygulanan manyetik alanın doğal frekans değerlerini %37,45'e kadar düşürdüğünü göstermişlerdir. Yaptıkları sayısal ve deneysel analizler sonucunda, manyetik alanın, bal peteğı yapısındaki sandviç panellerin doğal frekanslarını değıştirebildiğini açıklamışlardır.

Ergün ve diğ. (2012), alüminyum ve kompozit malzemelerinden tasarladıkları ve imal ettikleri bal peteği yapısındaki sandviç yapılarının kritik burkulma yüklerini üç eksen altında uygulanacak şekilde FEM yöntemi ile incelemiştir. Sandviç yapılarını farklı hücre boyutlarında ve farklı hücre duvarı kalınlıklarında tasarlayarak karşılaştırılmasını yapmışlardır. Tasarlanan sandviçlerin doğrusal burkulma analizini ANSYS ortamında yaparak, elde ettikleri sonuçların literatüre uygun olduğunu ve tasarladıkları sandviç panelli yapının diğerlerine göre daha iyi burkulma davranışı gösterdiğini açıklamışlardır.

Heimbs ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmalarında bal petekli sandviç kırımlarda bulunan zigzag formundaki çekirdekli yapıların, çekme, açılı çekme, basma ve darbelere karşı gösterdikleri mukavemet değerlerini, deneysel açıdan ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Petek yapının ana çekirdeğinin malzemesini, dört farklı karbon fiber malzeme kullanımı yaparak çeşitlendirmişler ve farklılıkları göstermişlerdir. Oluşturdukları petek yapıları ve basma kuvveti sonucu yapıda meydana gelen hasarı grafiklerle göstermişlerdir. Sonuç olarak yapılarda farklı diyagram görülmesinin nedeninin, çekirdek yapıda kullanılan farklı fiber malzemelerinden kaynaklandığını göstermişlerdir. Daha sonra fiber yapıdaki karbon miktarlarını değiştirip, gerilmelerde değişiklik oluştuğunu göstermişlerdir.

Hosseini ve diğ. (2014), petekli hücreli yapılarda hasar tespiti için ultrasonik güdümlü dalgalar kullanarak deneysel araştırma yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sayısal yaklaşımlarla desteklemişlerdir. Çalışmalarında heterojen hücreli orta çekirdek ve sekiz düğüm noktası kullanmak üzere 3B olarak basit bir ortotropik tabaka şeklinde modellemişlerdir. Kendilerine bazı sınırlamalar belirlemişlerdir. Bu sınırlamalar dahilinde dalga boyunun hücreli yapının karakteristik uzunluk ölçeğinden daha küçük olduğunu ve ultrasonik güdümlü dalgaların mikro yapıdan daha fazla etkilendiği belirli frekans aralıkları için daha belirgin olduğunu göstermişlerdir. Bu sebeple, geometrik parametrik çalışmaya dayalı yeni bir sadeleştirme yaklaşımı önermişlerdir. Önerdikleri yeni yaklaşımda, malzeme homojenizasyonunun yerine temel amaçlarının yapısal geometriyi daha basit hale getirmektir. Önerdikleri yöntemi, farklı hücreli yapıları basitleştirmek için kullanmışlardır. Ultrasonik güdümlü dalga yayılımının sonuçlarını karmaşık geometrik modellerle karşılaştırmışlardır. Önerdikleri yaklaşımı kanıtlamak için,

basitleştirilmiş içi boş küre sandviç plakasındaki dalga yayılımını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Jiang ve diğ. (2020), epoksi ve silikon kauçuktan ürettikleri tek boyutlu periyodik plakanın iki tarafına homejen alüminyum plakalar yapıştırarak periyodik bir sandviç plaka tasarlamışlardır. Yaptıkları iletim analizindeki kayıplar nedeniyle tasarladıkları yeni yapıda halen bant boşluklarının bulunduğunu belirtmişlerdir. Daha sonra tabaka kalınlığının ve çekirdek bileşen oranının, bant-boşluk özelliklerini ve oluşan frekans etkilerini araştırmışlardır. Deneysel araştırmalara ek olarak analitik araştırmalar yapıp karşılaştırma yapmışlardır. Yaptıkları analizler sonucu burulma ve doğrusal sertlik arttıkça, zayıflama aralıklarının daha yüksek frekansa doğru hareket etme eğiliminde olduğunu ve periyodik sandviç plakasının zayıflama davranışlarının, aynı sınır şartları altında birbirine yaklaşacağını göstermişlerdir.

Khakalo ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmalarında modelledikleri iki boyutlu üçgen tip kafes yapılı petek sistemlerin, bükülme, burkulma ve titreşim özelliklerini, basitleştirilmiş bir gerinim gradyanı elastikiyet süreklilik teorisinin yardımıyla belirlemişlerdir. Başlangıç olarak genelleştirilmiş Bernoulli-Euler ve Timoshenko sandviç kiriş modellerini türetmişlerdir. Modellerde yer alan iki ek uzunluk ölçeği parametrelerini, sırasıyla, statik bükülme ve serbest titreşimler için gerinim enerjisi ve atalet parametrelerinin kalibre edilmesi için kriter problemlerinde kafes yanıtının eşleştirilmesiyle doğrulamışlardır. Yüksek mertebeden malzeme parametrelerinin problem türüne, sınır koşullarına veya spesifik kiriş formülüzasyonuna bağlı olmadığı da göstermişlerdir. Genel olarak bükülme sertliğinin, kritik burkulma yükünün ve öz frekansların kafes mikro yapısına güçlü bir şekilde bağlı olduğu ve bu bağımlılıkların genelleştirilmiş Bernoulli-Euler kiriş modeli tarafından yakalandığı göstermişlerdir.

Khoshhravan ve Pour (2014), yaptıkları çalışmalarında bal petek şeklindeki çekirdek yapıların, hücre eksenine doğrultusunda basma kuvvetine karşı gösterdikleri mukavemeti deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Hücre duvarı genişliğinde yapılacak azalma ve hücre duvar kalınlığında yapılacak artışın bal petek şeklindeki kirişli yapılarda basma mukavemetinin yükselttiği sonucuna ulaşmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapıda oluşan burkulma şekillerini araştırmışlardır.

Krishna ve diğ. (2019), Aviyonik (uçakların elektronik sistemleri) sistemleri için ağırlık azaltması yapmak adına, bal peteği yapısında alüminyum malzeme tasarımı

yapmışlardır. Tasarladıkları malzemeye FEM ortamında dinamik yükler uygulayarak, titreşim tepkilerini incelemişlerdir. Tam dolu alüminyum malzeme ile bal peteği yapısındaki alüminyum malzemeyi ağırlık yönünü de dikkate alarak dinamik ve statik yükler altında karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak bal beteği yapısının muazzam ağırlık tasarrufunun yanında, dinamik ve statik yükler altında aviyonik sistemler için yeterli olduğunu göstermişlerdir.

Li ve diğ. (2019), 3D baskı tekniği kullanarak, genel kafes yapısına dayanan, üçgen bal peteği şeklinde, T-kaburga ve hiyerarşik izogrid yapılarında plastik malzemeler tasarlamışlardır. Tasarladıkları malzemeleri kenar sıkıştırma altında inceleyerek burkulma dirençlerine ve plastik performanslarına bakmışlardır. Kenar sıkıştırma altında kafesli yapıların üç yapısal arızaya sahip olduklarını önermişlerdir. Bunlar malzeme arızası, küresel burkulma ve yerel burkulmadır. Yaptıkları analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile de doğrulamışlardır. Hata modu haritası yöntemiyle, daha uygun tasarımlar önermişlerdir.

Meo ve diğ. (2005), çalışmalarında ticari büyük uçakların kanadında bulunan ve motorları ihtiva eden kapalı bölmelerin kompozit sandviç yapılarını ele almışlardır. Kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe tepkilerinin, hasar analizlerini ve arıza mekanizmalarını araştırmak amacıyla farklı yükler vererek incelemişlerdir. Daha sonra geçici dinamik sonlu elemanlar analizi kullanarak sayısal simülasyon elde etmişlerdir. Sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırıp, emilen hasar ve darbe enerjilerini göstermişlerdir. Sonuç olarak, bir tasarımcının doğru bir sayısal model tasarlarken, düşük hızlı darbe tepkilerinin yer aldığı mekanizmaları anlamaları gerektiğini ve böylece daha verimli bir darbeye dayanıklı uçak motor bölmeleri tasarlayabileceklerini savunmuşlardır.

Mujika ve diğ. (2011), bal peteği yapısındaki sandviç panelin çekirdeğinin düzlem dışı kesme modülünü ve kalınlık yönünde Young Modülünü deneysel yöntemler, analitik yaklaşım ve FEM yöntemi ile belirlemişlerdir. Deneysel yöntemlerde statik ve dinamik test yapmışlar ve statik testler için 3 noktalı bükme kullanmışlar ve Young Modülünü elde etmek için sıkıştırma testleri yapmışlardır. Dinamik test yönteminde ise titreşim deneyleri yapmışlardır. Sandviç peteğin ortotropik yapısında iki yönde kesme modülü belirlemişler ve farklı yollarla elde

ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Her iki yöntemle elde ettikleri kesme modüllerinin birbirine yakın olduklarını göstermişlerdir.

Nia ve Sadeghi (2010), yaptıkları çalışmalarında içi köpükle doldurulmuş düzgün altıgen şeklindeki bal peteği kiriş yapı panellerinin plastik şekil değiştirme hareketlerini ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Birbirinden farklı 5 adet sade ve köpük dolgululu olmak üzere alüminyum 5052-H39 yapılı petekler hazırlamışlar ve statik aksenal basınç yükü altında incelemişlerdir. Hücre boyut yüksekliğini, hücre genişliğini ve hücre duvar kalınlıklarının ezilme mukavemetini araştırmışlar, bunlara ek olarak enerji absorpsiyon kapasitesi ve hücre kıvrımlarının dalga boyuna etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada burkulma sonucu meydana gelen hasarı grafiklerle göstermişlerdir. Sonuç olarak kullanılan köpük dolgusunu fazlaştırdıkça bal peteği yapısındaki kiriş panellerin ortalama ezilme mukavemetlerinin ve enerji kapasitelerinin %300 arttırdığı göstermişlerdir.

Sahu ve diğ. (2018), plastik naylon filamandan tasarladıkları bal peteği yapısındaki parçalarının, ağırlık yönlerini de dikkate olarak darbelere karşı dirençlerine ve enerji absorpsiyon özelliklerini incelemişlerdir. Bal peteği formundaki hücrelerin boyutlarını değiştirerek düzlem içi eğilme testleri ile karşılaştırma yapmışlardır. Yaptıkları deneysel sonuçları ANSYS ortamında da yaparak benzerlikleri ortaya koymuşlardır. Kullandıkları plastik naylon filamanının sınır değerlerini ve periyot aralıklarını göstermişlerdir.

Sayyad A. and Ghugal Y. M. (2017), mekanik ve uzay mühendisliği olmak üzere birçok yapıda kullanılabilir olarak gösterdikleri laminat yapıdaki sandviç kompozit yapılar üzerine çalışmışlardır. Bu yapıların bükülme, burkulma ve titreşim analizlerini yeni teoremlerle geliştirmek istemişlerdir. Çalışmalarında, serbest titreşim analizi, sandviç katmanlara dayalı teorileri, zig-zag teorileri ve izotropik burkulmaya uğramış yapılar üzerine eleştiriler sunmuşlardır. Son olarak, çeşitli eşdeğer tek katmanlı ve çok katmanlı teorilerin yer değiştirme alanlarını özetlemişlerdir.

Solmaz ve Çelik (2018), altıgen bal peteği yapısındaki sandviç kompozit kirişlerin basma yükü altındaki gösterdiği tepkileri incelemişlerdir. Yaptıkları kompozit parçaların yüzey örtüsünü polyester tabakalı kompozitten imal edip, petek hücrelerini ABS ve PLA gibi iki farklı termoplastik malzemeden imal etmişlerdir. Çekirdek yapının imalatını üç boyutlu yazıcı kullanarak yapmışlardır. Farklı

boyutlarda ve farklı hücre boyutlarında ürettikleri yapılara basma kuvveti uygulamışlar ve özgül kritik burkulma yük değerlerini belirlemişler ve grafiklerle sunmuşlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda ise, PLA malzemenin ABS malzemeye göre daha üstün özelliklere sahip olduğunu göstermişlerdir.

Şakar ve diğ. (2010), petek yapısındaki sandviç kompozit yapıların serbest titreşim analizlerini yapmışlardır. Sandviç kompozit yapıların serbest sınır şartlarındaki doğal frekanslarını deneysel ve nümerik olarak hesaplayarak bulmuşlardır. Daha sonra bu frekanslara karşılık gelen titreşim hareketlerini elde etmişlerdir. Sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst yüzey kompozit tabaka özelliklerinin, malzemenin yüksekliğinin titreşim karakteristiklerine etki etmelerini incelemişlerdir. Nümerik analizleri FEM yöntemi bulmuşlardır. Sonuç olarak sandviç yapıların titreşim karakteristiklerinde etkili olan önemli parametreleri sunmuşlardır.

Trelease (2018), bal peteği sandviç yapılarını, katmanlı plaka gibi modelleyerek sonlu elemanlar analizlerini incelemiştir. Bal peteği sandviç yapılarının mekanik özelliklerini daha da geliştirmek adına içini poliüretan köpük doldurmuştur. İçi boş ve içi PU köpük dolu parçalarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerini yapıp karşılaştırmıştır. Köpük dolu yapının doğal frekansının düşük modlarda azalma eğilimi göstermesine karşın yüksek modlarda arttığını göstermiştir.

Yardımcı ve Gürses (2016), alüminyum dolgu kullandıkları altıgen bal peteği yapısındaki sandviç kirişe bükme testi uygulamışlardır. Birbirinden farklı hücre boyutlarında tasarladıkları iki sandviç kirişin sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analizlerini yapmışlardır. Yaptıkları analizlerde yapının plastik gerinimlere ve yer değiştirmelere gösterdikleri davranışları gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak bükme yüküne maruz kalan sandviç yapının en kritik hasar tipinin hücre duvarlarında oluşan burkulmalar olduğunu tespit etmişlerdir.

Wang ve diğ. (2019), kompozit yapıdaki petek sandviç panellerin titreşim özelliklerini araştırmışlardır. Sandviç modeli ortotropik şekilde tasarlamışlar ve hem iki boyutlu hem üç boyutlu olarak tasarlayıp, sonlu elemanlar yöntemi ile frekans değerlerine bakmışlardır. Yaptıkları deneysel sonuçlar ile FEM ortamında yapılan analizlerin yakın olduğunu göstermişlerdir. Yüz-tabaka kalınlık oranı, duvar- tabaka kalınlık oranı ve malzemenin dolgu yoğunluklarının frekans parametrelerini değiştirdiğini göstermişlerdir.

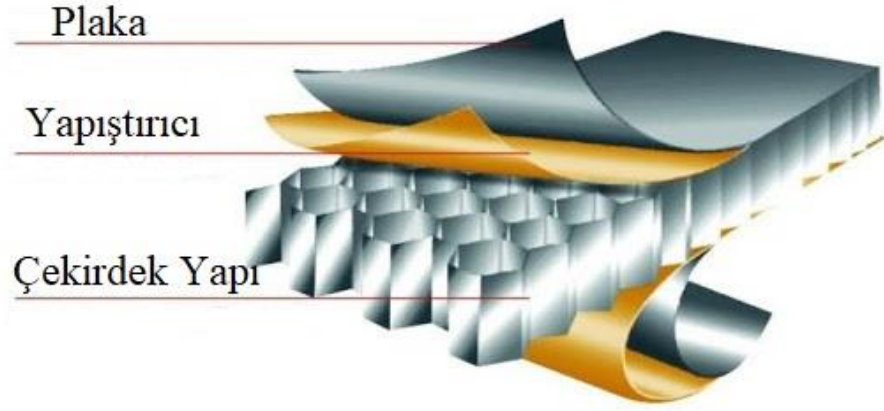


Zhang ve diğ. (2017), çalışmalarında sandviç kirişlerde hibrit bal peteği oluklarının titreşim performanslarını incelemişlerdir. Petek oluklu hibrit çekirdeklerin eşdeğer makroskopik sertliğini elde etmek için homejenizasyon (2D) yöntemi kullanmışlardır. Titreşim özelliklerini (yani doğal frekansları ve mod şekilleri) araştırmak için sonlu elemanlar yöntemleri ve modal analiz teknikleri kullanmışlardır. Analizler ile yaptıkları tahminleri, deneysel ve 3 boyutlu sonlu elemanlar programı ile karşılaştırıp, sonuçların uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Son olarak klasik ve rafine teorilere dayanan lamine ve sandviç kirişlerin sonlu elemanlar modellemesi üzerine literatür gözden geçirmişlerdir.

Zhang ve diğ. (2019), mikro delikli sandviç kirişlerin bal peteği yapılarının modal performanslarını incelemişlerdir. Titreşim özelliklerini bulmak için FEM (sonlu elemanlar yöntemi) ve modal analiz tekniklerini kullanmışlardır. Mikro yapılı sandviç kirişinin doğal frekanslarının, deneysel ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan sonuçlara dayanarak mikro yapılar olmadan, sandviç kirişinin karşılık gelen sırasına göre biraz daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Mikro yapıların çaplarının sandviç kirişlerin doğal frekansları üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için boyutsuz bir frekans parametresi önermişlerdir. Sonuçlar, sandviç panellerin frekans parametresinin mikro yapının çapının oranının artmasıyla doğrusal olarak azaldığını göstermişlerdir.

### 3. KOMPOZİT MALZEMELERDE BAL PETEĞİ YAPISI

Bal peteği sandviç yapıları kompozit ve imalat endüstrisinin en önemli ve son yıllarda gittikçe değeri artan mühendislik buluşlarından biridir. Havacılık ve otomotiv endüstrisi başta olmak üzere bir çok endüstri alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmakta olup, kullanılan başka malzemelere göre çok düşük ağırlık, dayanım ve üretim maliyetlerinin azaltılması gibi konularda üstünlük göstermektedir (Bakem ve diğ., 2011).



Şekil 3.1: Bal Peteği Yapısının Kısımları ( Koinmo, 2012)

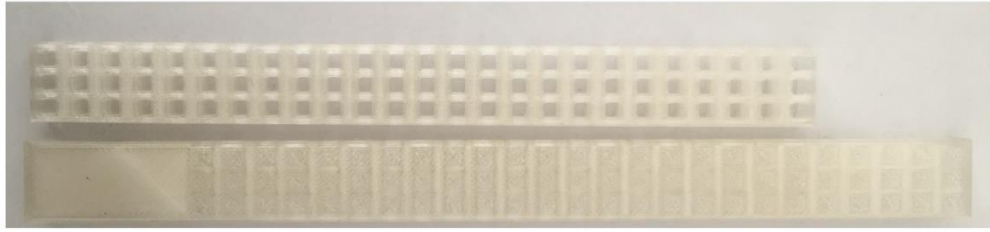
Şekil 3.1’de görüldüğü üzere genel olarak bal petekli yapılar, çok ince tabakaların şekillendirilmesi sonucu elde edilen hücrelerin birleştirilmesi ile oluşturulur. İnce tabakaların birleştirilmesiyle panel yapısı oluşturulur. Panel haline getirilmiş sandviç yapıların temel özelliği; hafif bir çekirdek ve onu saran, katmanlayan bir başka malzemedan oluşmalarıdır. Bu amaçla giderek daha fazla kullanım alanı bulan bal peteği yapılı plastik çekirdekli paneller, hafiflik, basma ve kesme dayanımı, alev dayanıklılık, aşınmaya dayanıklılık, korozyona dayanıklılık ve kolay işlenebilirlik özellikleri nedeniyle, kara, deniz yapılarında ve araçlarında önemli avantajlar sağlar.

- Bal peteği yapılı kompozitler üç şekilde gruplandırılır
  1. Yüksek sıcaklığa hatta alev dayanıklı, gemilerde ve trenlerde kullanılan alüminyum alaşımlı bal petekleri...
  2. Mekanik dayanımı fazla, korozyon direnci yüksek nomex ve kevlar bal petekleri. Bunlar uzay mekiği, uçak ve arabalarda kullanılır.

3. Kimyasal ve ekonomik yönden avantajları olan termoplastik bal petekler (Arslan, 2018).

### 3.1 Bal Peteği (Honeycomb) Yapısının Faydaları

Malzemenin kullanımın gerçekleştirileceği şartlar ve ortam, kullanılacak malzemenin sahip olması gereken özellikleri belirleyen ölçütlerdir. Bu ltler arasında; yorulma, sürünme, sıcaklık, evre, korozyon, rijitlik, mukavemet, hafiflik, insan ve maliyet faktörü sayılabilir. Fakat hava araçlarında en önemli husus ağrılık olduğu için bal peteği gibi hafif yapılara ihtiyaç vardır (Pehlivanoğlu, 2005).



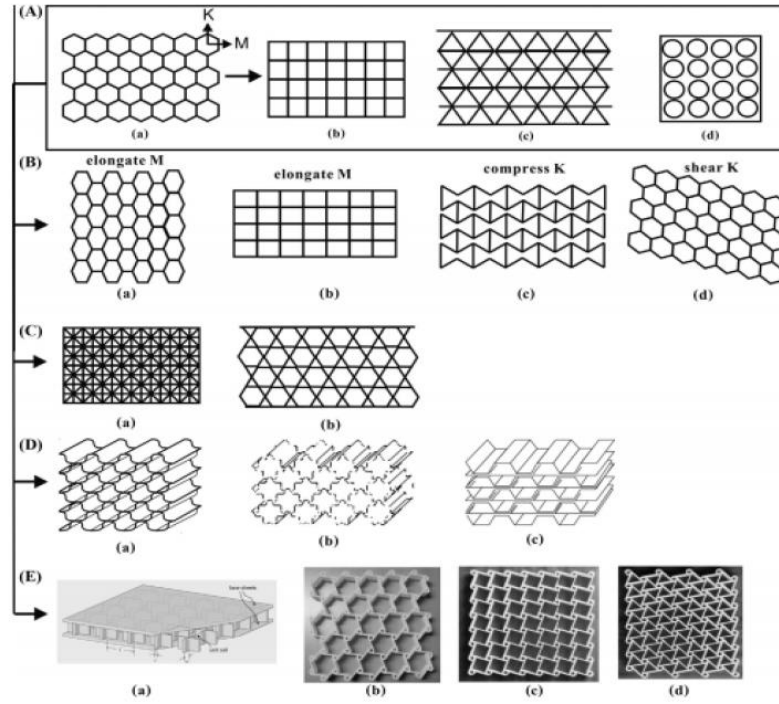
şekil 3.2: Tasarımı Yapılan Bal Peteği Yapısı (Alt Ve st Katmanlı- Katmansız)

Bal peteği yapılarını eksenleri ve açıklıkları her zaman yatay düzendedir. şekil 3.2’de görüldüğü üzere bal peteği yapısının çekirdeğinin kare, altıgen vb. gibi istediğimiz yapılarda olması, en küçük yüzey alanda en geniş kaplamayı elde etmemizi sağlar. Yani yüzey malzemelerle birleştiği noktada plakalara temas yüzeyleri az olmasına karşın kapladığı alan geniştir. Bu sayede kare, altıgen vb. yapılar ile, az malzeme kullanımı gerçekleştirilerek istenen kafes yapı elde edilir. (Yiğit, 2010).

Günümüzde çok çeşitli çekirdek yapılar kullanılmaktadır. Bal peteği yapılarda esas mekanik davranışı karşılayan kısımdır. Bal peteği yapılardaki çekirdekler farklı yapılarda (altıgen, kare, dikdörtgen, zigzag, elipsoit, yumurta kolisi vb.), içi boşluklu, içi dolu, farklı malzemelerden (köpük, alüminyum, bakır, kağıt, epoksi vb.), farklı birleştirme yöntemleriyle (yapıştırma, kalıplama vb.) oluşturulmaktadır. Alt taraftaki resimde farklı çekirdek yapıları görülmektedir (Akkuş, 2006).

Bu çalışmada altıgen yapılı kafes sisteminin yanı sıra dörtgen, beşgen ve daire çekirdekli kafes sistemleri de üretilmiştir. şekil 3.3’de daha önce farklı çekirdek yapıları ile üretilen plakaların modelleri bulunmaktadır. Çalışmada üretililecek

imkan dahilinde olan ve birbiriyle karşılaştırıldığında sağlıklı sonuçlar verebilecek, aynı merkezli dörtgen, beşgeni, altıgen ve daire çekirdekli yapılar üretilmiştir.



Şekil 3.3: Farklı Bal Peteği Çekirdek Yapıları (Zhang ve diğ., 2014)

Kesme gerilmesine dayanım hücre sayısı ve alt üst katmanlar değiştirilerek arttırılmaktadır. Bu çalışmada aynı satırda 3 ve 4 delik olmasına göre iki farklı tasarım yapıp, bağlantı kalınlıklarının değişimine göre çekirdek yapıların titreşim frekansları incelenmiştir.

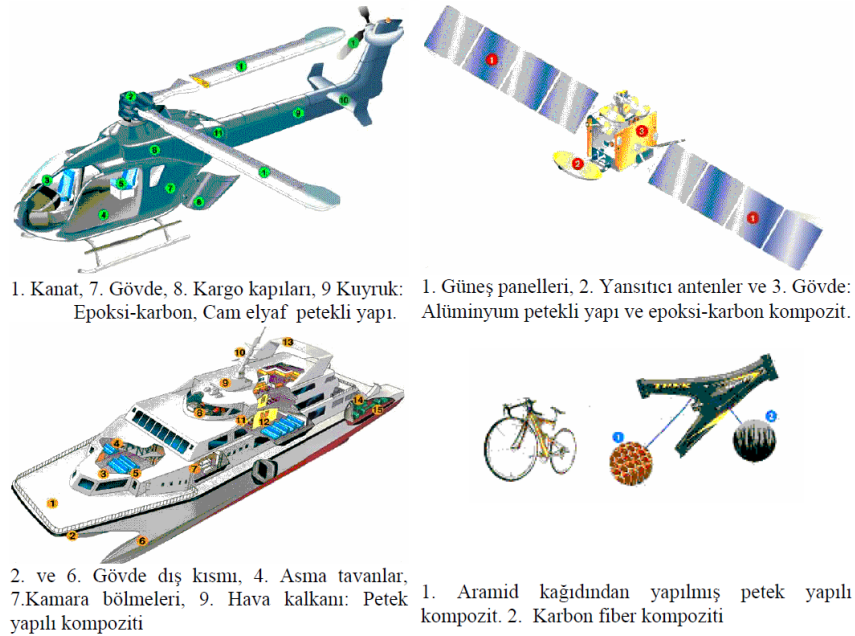
### 3.2 Bal Peteği (Honeycomb) Uygulama Alanları

Bal peteği yapıli malzemeler çarpışma anında açığa çıkan enerjiyi absorbe edebilme, esneklik, korozyona maksimum dayanımı basma, kırılmaya karşı gösterdiği direnç bakımından birçok sektörde kullanılmaktadır. Günümüzde kullanım alanları yönünden birçok kısım altında toplanmaktadır (Öztürk, 2018).

Bal Petekli Yapılar, Otomotiv Sektörü, Taşımacılık Sektörü, Havacılık Sektörü, Demir Yolları, Açık Hava Reklamcılığı, İnşaat ve Mimarı gibi alanlarda da kendi alt başlıkları altında birçok yerde karşımıza çıkmaktadır.

Honeycomb Çekirdek ve Honeycomb Paneller Şekil 3.4'de örnekleri görüldüğü üzere hafifliğin istendiği; ağırlığın kritik problem olduğu ve aynı zamanda yüksek mukavemet ve rijitlik istenen mimari yapılarda, endüstriyel tesislerde, havacılık, denizcilik ve uzay sanayinde, stadyum, spor salonları, kongre merkezleri, hava alanları, hızlı tren, metro, gemi, yat, tekne, karavan, prefabrik konut, konteyner, mantolama, ambalaj sanayi, mobilya sanayi, duvar panelleri, iç dekorasyon, asma tavan, çatı panelleri, engelli rampaları, taşınabilir rampalar, clean room (temiz oda) ve benzeri sonsuz kullanım alanına sahiptir.

Denizcilik sektöründe, tekne imalatı sırasında sandviç tekniği kullanılarak, teknenin mekanik dayanımı arttırılmaktadır. Havacılık ve uzay sanayine yönelik uygulamalarda ise, hafiflik ve rijitlik özellikleri önem taşımakta ve genellikle uçağın taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi gibi parçalar sandviç konstrüksiyon tekniği ile üretilmektedir. Son yıllarda bir çok binek ve spor otomobillerin tavan, direk ve gövdesinin bir çok kısımlarında, spor aletlerinde (yarış bisikleti kaburgası) ve rüzgar pervanesi türbini gibi bir çok alet ve makine imalatında petekli yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. (Alkan, 2014; Akkuş, 2016).



**Şekil 3.4:** Bal Peteği Yapısının Çeşitli Uygulamaları (Arslan ve Kaman, 2002).

## 4. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ

Eklemeli imalat yöntemi, üç boyutlu (3B) geometrik tasarımların verilerinden faydalanarak, kullanılan ham madde malzemesini bir biri ardına katman katman ekleyerek, karmaşık ve basit her türlü geometriki fiziksel parçaların seri bir şekilde imalatını gerçekleştiren bir imalat tekniğidir (Özsoy ve Duman, 2017).

Bu imalat tekniğinde üretilecek numune, bilgisayar destekli tasarım (BDT) programları ile çizim, tersine mühendislik (TM), bilgisayarlı tomografi (BT) gibi çeşitli şekillerde elde edilen 3B tasarımlardan üretilir. 3B tasarım istenilen çoklukta ince katmanlara bölünür yani dilimleme işlemi yapılır. Eklemeli imalat makinesi, parça bitirilinceye dek her bir katmanı üst üste olacak şekilde üretmek için bu geometrik veriyi kullanırlar (Çelik ve diğ., 2013; CustomPartNet, 2008).

Kullanılan ham madde malzemesi ve çalışma şekillerine göre birbirinden farklılık gösteren birçok yapıda eklemeli imalat yöntemleri geliştirilmiştir. En yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat teknikleri;

- Üç Boyutlu Yazıcı (3DP)
- Stereolitografi (SLA)
- Ergiterek Yığıma ile Modelleme (FDM),
- Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS)
- Seçmeli Lazer Ergitme (SLM)
- Elektron Işınli Ergitme (EBM) gibi yöntemlerdir.

Bu teknikler sayesinde sıvı reçineden, polimerlerden, polimer tozlarından, plastiklerden ve metal tozlarından 3B fiziksel parçalar üretilebilmektedir (Mellor ve diğ., 2012; Hague ve diğ., 2000).

Eklemeli imalat teknolojisi, üretimi yapılacak parçaların özelliklerine ve şekillerine göre diğeri geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında; maliyetleri neredeyse % 70'e kadar, üretimi tamamlanmış ürünlerin pazarlama süresini ise % 90'a kadar düşürdüğü belirtilmektedir. (Lan ve diğ., 2004).

Eklemeli imalat teknolojilerinin genel kullanım alanları olarak başta otomotiv sektörü olmak üzere dişçilik, askeri donanım, tıp, kalıpcılık mimari, kişisel araç-gereç, uzay ve havacılık, heykelcilik, kuyumculuk ve eğitim gibi üretim ve tasarım sektörünün yanı sıra hizmet sektörlerinde kullanılan ürünlerde de kullanılmaktadır (Özsoy ve Duman, 2017).

#### **4.1 3 Boyutlu İmalat Teknolojisi (3B Yazıcılar)**

3B yazıcı teknolojileri, filaman adı verilen çeşitli malzemeler kullanarak 3 boyutlu nesnelere üretebilen bir üretim teknolojisidir. Nesnelere genelde katman katman üretildiği için, bu teknoloji eklemeli imalat yönteminin alt dalı olarak bilinmektedir.

3B yazıcılarda üretilecek ürün üst üste ekleme yöntemi ile yapılmaktadır. Tasarımı yapılan numuneler, bilgisayar destekli tasarım (BDT) yazılımları ile oluşturulan 3B katı modellerden birinde üretilmektedir (Kruth ve diğ., 1998).

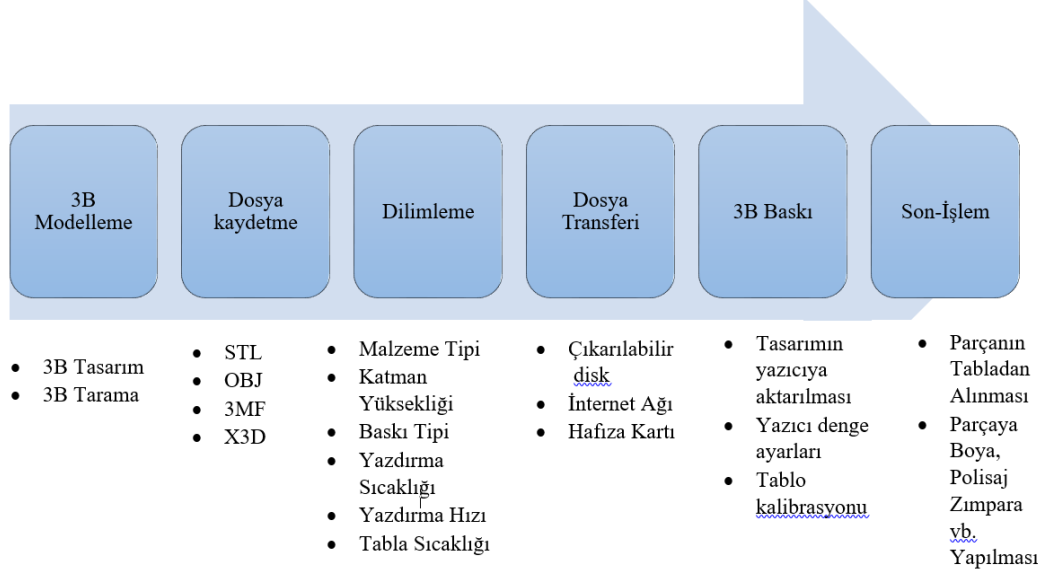
Bu üretim metodunda malzemenin katman katman eklenmesi ve dolayısıyla israf olan malzeme miktarının neredeyse hiç olmaması, diğer imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında bu teknolojinin daha verimli olduğunu göstermektedir (Levy ve diğ., 2003).

Bu imalat teknolojisi, polimerlerden faydalanarak fiziksel modellerin prototiplerinin çok seri bir şekilde üretilmelerine imkan sağlar. Yeni ürün tasarlama ve geliştirmedeki hataları ve devir sürelerini önceden görüp büyük oranda minimuma indirerek, yeni ürünlerin piyasaya sürülme süreçlerini hızlandırır (Santos ve diğ., 2006).

Her hangi bir düzen, hat kurulumu ve kalıp ihtiyacı gibi fazladan maliyet ve iş yükü olan sistemler kurulmadan, doğrudan ürün tasarımından üretime geçişe imkan veren 3B baskı üretim süreci Şekil 4.1’de görüldüğü üzere genel olarak 6 temel adımdan oluşmaktadır.

İmalat yapılacak 3B katı modeller doğrudan 3B yazıcılara gönderilmemektedir. 3B Model başlangıçta, tasarımı katı modelleme programlarından birinde (SolidWorks) tasarlanır ve daha sonra eklemeli imalat standart arabirimi olan STL dosyasına

dönüştürülür. İkinci olarak, parçada oluşabilecek hataların kontrolü ve onarımı, tablaya konumlanması ve imalat yönü, istenildiği durumlarda destek unsurlarının oluşturulması gibi bir grup ön işlemlere (Ultimaker Cura) tabi tutulur.



Şekil 4.1: 3B Yazıcılarda İşlem Basamakları (Sürmen, 2019).

Ön işlemler sonucunda 3B model dilimlenerek (2B katmanlara bölünerek) üretime hazır hale getirilir ve usb, kablosuz bağlantı gibi yöntemlerle 3B yazıcılara gönderilir. 3B yazıcılar, dilimlenerek elde edilmiş sınır çizgilerinden oluşan 2B geometrik veriyi (gcode) kullanarak katman katman imalat işlemini gerçekleştirirler.

#### 4.1.1 3B Yazıcıların Avantajları

- Kurulumu ve kullanımı kolay
- Üretim süresini azaltması ve çok karmaşık sistemleri tek işlem prosesinde üretebilmesi
- Üretimden önce hasar analizi ve çeşitli optimizasyonların digital ortamda yapılabilmesi
- Üretimin düşük maliyetli olması
- Tasarım dosyalarının kolay aktarılabilmesi
- Üretim süresinin önceden hesaplanabilmesi
- Kişiyeye özgü tasarımlar yapılabilmesi
- Daha az atık madde çıkmasını mümkün sağlar (Kemal ve Turan, 2018) - ( Top ve diğ., 2018).



#### **4.1.2 3B Yazıcıların Dezavantajları**

- Seri üretim için yüksek maliyet gerekmektedir.
- Malzeme yüzey işleme ve renklendirilmesi daha zordur.
- Dayanıklılığı ve mukavemeti düşük malzemeler oluşturur.
- Hassasiyet oranları düşük parçalar üretir (maktoloji, 2018).

#### **4.1.3 3B Yazıcı Kullanım Alanları**

3B yazıcılar genel olarak, otomotiv sektörü, otomotiv yan sanayi, uzay ve havacılık, gıda, mühendislik, mimarlık, tıp, kuyumculuk ve aksesuar, sanat, film ve eğlence, kalıp, medikal parçaları, biyomedikal parçaları, beyaz eşya parçaları, akademik araştırmalar, eğitim, dişçilik, askeri donanım vb. alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Özsoy ve Duman, 2017) - (Sürmen, 2019).

#### **4.1.4 3 Boyutlu Yazıcıların Otomotivde Kullanılması**

3B yazıcı kullanılarak üretilen Urbee aracının ardından otomotiv sektöründe eklemeli imalat ile araçlarda kullanılabilecek çeşitli son-ürün parçaların üretilebileceği fikri oldukça yerleşmeye başlamıştır. 3B yazıcıların kullanımının artmasıyla birlikte üretimde maliyetlerin ve tedarik süresinin düşürülebileceği ve aynı zamanda ölümlü kazalarında çokça yaşandığı kalıp, pres ve büyük şekillendirme makinelerinin kapladığı hacmin azaltılması ve üretim hattının sadeleştirilebileceği düşünülmektedir (Richardson ve Haylock, 2012).

3B yazıcılar yaklaşık 30 senedir kullanılmaktadır. Geçen 30 senede 3B yazıcılar da çok fazla değişik teknolojiler, değişik boyutlar, değişik malzemeler kullanılmıştır. Bu değişikliklerle beraber kullanım alanları da değişiklik göstermiştir. Neredeyse her sektörde kullanılabilen 3 boyutlu yazıcılar diğer üretim teknikleri ile kıyaslandığında daha kullanışlı, daha uygun fiyatlı ve daha hızlıdır (ARTIBOYUT, 2019; 3dedi.com, 2019).

Son 10 yılda 3B yazıcıların kullanılmasının en fazla gelişim gösteren endüstrileri arasında otomotiv endüstrisi ilk sırada gelmektedir. 3B yazıcıların bu endüstride özellikle araç aksesuarlarında aktif olarak kullanımı, rekabetçilere karşı avantaj kazanmasını sağlar. Otomotiv sektöründe prototip ve bitmiş parça tasarımları 3 boyutlu yazıcılarla yapılabilmekte, pek çok parçanın prototip, test ve fonksiyonel parça üretimi aşamaları 3B yazıcı ile yapılmaktadır.

Üç boyutlu yazıcılar prototip sürecini hızlandırmakta, tasarımı test ve modifiye etmeyi kolaylaştırmakta ve maliyeti diğer yöntemlere göre daha uygun tutmaktadır. 3 boyutlu baskı sayesinde, detaylı, kompleks bir parça üretmek mümkün olmaktadır. Ürünün kritik noktalarını ve inceliklerini tasarlandığı haliyle üretebilme kapasitesine sahiptir. 3B yazıcılar otomotiv sektöründe Şekil 4.2’de görüldüğü gibi otomobil, traktör ve otobüs prototip ve fonksiyonel parça tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (arti90.com, 2018).

#### **Otomotiv yedek parçalarında 3B yazıcıların kullanıldığı alanlar;**

- Özel Kadran Takımı
- Araç İçi / Konsol
- Turboprop
- Çark / Pervane
- Farlar
- Klima Sistemi
- Havalandırma Bacası



Şekil 4.2: 3B Yazıcıların Otomotiv Fonksiyonel Parçalarda Kullanılması (benimfabrikam.com, 2019)

#### 4.1.5 Mühendislikte 3B Yazıcılar

Mühendislik ve Ar-Ge firmalarında 3 boyutlu yazıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır ve son zamanlarda atölyelerin vazgeçilmez haline gelmiştir. Özellikle parçası bulunmayan, zor bulunan veya diğer üretim teknikleri ile üretilmesi zor olan parçaları 3B yazıcılar ile hızlı ve kolayca üretilebilmektedir. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi Ar-Ge firmaları için en önemli kullanım nedeni, 3B yazıcı sayesinde bir ürün tasarlarken ürünün neresinde hata olup olmadığını hızlıca görülebilmekte ve gerekli düzeltmeleri yaptıktan sonra seri üretime geçmeye olanak sağlamasıdır. Bu Ar-Ge firmaları için hem zamandan tasarruf hem de maliyet açısından kar sağlamaktadır.



Şekil 4.3: Ar-Ge Sistemlerinde 3B Yazıcı ile Prototipleme Yapma

#### 4.1.6 Otomotivde 3B Yazıcı Kullanılmasına Örnekler

- **Koenigsegg One** : Butik araba üreticisi Koenigsegg 3 boyutlu yazdırma teknolojisini özellikle tasarım ve modelleme alanında kullanmış ve bu şekilde en son teknolojiden faydalanırken AR-GE maliyetlerini düşürmüştür (boyutkat.com, 2019).
- **Local Motors LM3D Swim**: Şekil 4.4’de görülen Local Motors aracı, dünyanın çeşitli yerlerindeki irili ufaklı tesislerde tüm parçalarının 3 boyutlu yazdırma teknolojisiyle üretildiği %80 plastik - %20 karbon fiber olan elektrikli bir taşıttır. Bu araç öte yandan en az diğer araçlar kadar güçlüdür.



Şekil 4.4: 3B Yazıcı ile Üretilen Local Motors Aracı (localmotors.com, 2016)

- **Audi – Yedek Parça:** Audi ise otomotivde 3B Yazıcı kullanımını daha çok yedek parça üretiminde uygulayarak maliyet avantajı elde etmeyi tercih etmektedir. Tüm parçalar değilse de kritik önemdeki yedek parçalar, belirli bazı lokasyonlarda talep üzerine yazdırılarak servis edilmektedir.
- **Divergent Microfactories – Blade:** Local Motors’a benzer şekilde ilk tamamen 3B olarak yazdırılmış araba Blade’i üreten Divergent de bu sektörün öncülerinden biridir.
- **Honda Access:** Şekil 4.5’de görüldüğü üzere Honda Access StrataSys modelinde 3B Yazıcı teknolojisini çok farklı bir amaçla kullanmaktadır. Farklı otomobil parçalarını (far, kumanda paneli gibi) düşük adette çeşitli ve farklı üreterek çeşitlendirme ve özelleştirme amacıyla kullanmıştır ve bunu 3B yazıcı sayesinde düşük maliyetle çözmeyi başarmıştır (fiyatımbu.com, 2019).



Şekil 4.5: Honda Access’in 3B Yazıcı ile Ürettiği Far (StrataSys, 2015)

Bunlara ek olarak 3B yazıcılar ile üretilen otomobil parçalarına örnek olarak; pompalar, valfler, tamponlar, rüzgârlıklar ve soğutma delikleri gösterilmektedir. Son zamanlarda ise koltuk çerçevelerinin, lastiklerin, panellerin ve araç gövdesinin de üç boyutlu yazıcılardan üretilmesine başlanmıştır.

#### 4.1.7 3B Yazıcı ile Yapılan Arabalara Örnekler

3B yazıcılar ile üretilen ve geliştirilmekte olan otomobiller de bulunmaktadır. Bunlardan ilki mühendis Jim Kor'un dizayn ettiği ve 2013 yılında üretilen Şekil 4.6'da görülen "Urbee 2" adı verilen araçtır. Diğeri ise Local Motors'un 2014 yılında ürettiği ve Şekil 4.7'de görülen "Strati" adı verilen araçtır. Üç boyutlu yazıcılar ile üretilen bu araçlardan Strati'nin üretimi toplam 6 gün içerisinde tamamlanmıştır. Bu iki örnek geleceğin otomobilleri için önemli bir basamağı oluşturmaktadırlar ( Krassenstein, 2014; 3DörtgenBlog, 2018).



Şekil 4.6: 3B Yazıcı ile Üretilen Urbe 2 Aracı (Thu Hai, 2016).



Şekil 4.7: 3B Yazıcı ile Üretilen Strati Aracı (Barker, 2016)

## 4.2 Hammadde olarak PLA

PLA yani Poli-Laktik Asit, laktik asit malzemesinin bir türevi olup, biyobozunabilen bir polimer malzemedir. PLA organik materyallerden, özellikle mısır, patates, peynir altı suyu, seker kamışı ve şeker pancarı gibi ucuz, organik ve yenilenebilir kaynaklardan kolay biyo-teknolojik yöntemlerle elde edilebilmektedir. PLA hammadde olarak petrol kullanılan plastiklerden çok daha iyi özelliklere sahiptir ve bu nedenle günümüzde en çok kullanılan bir biyopolimer halini almıştır. Çevre dostu sayılan bu malzeme, genellikle reçine veya tel olarak kullanılabilen ve bu da PLA'yı 3B model üretimi yapabilmek için mükemmel bir hammadde malzemesi yapmaktadır (Hill ve Haghi, 2014).

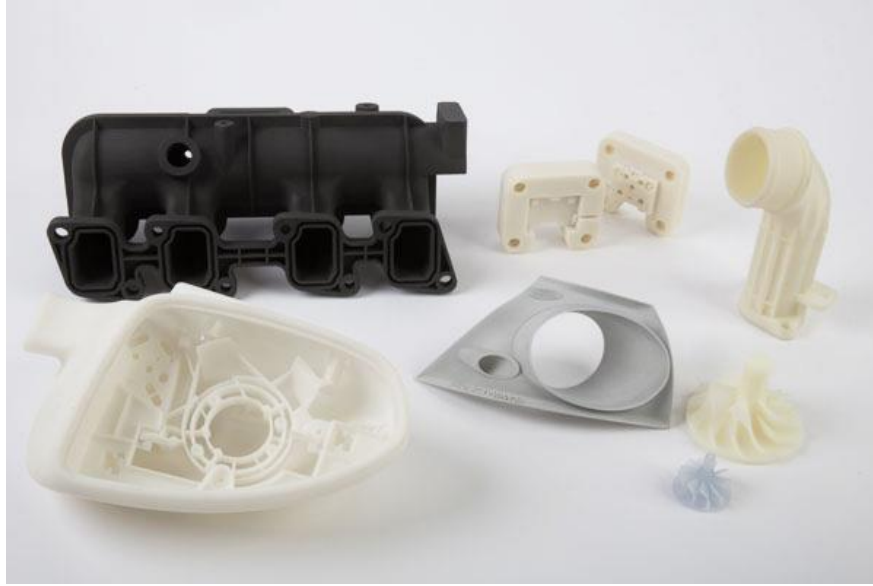
PLA genel olarak "yeşil plastik" adıyla da bilinmektedir. Bu, malzemeyi hem daha kolay hem de daha güvenli bir hale getirirken, estetik açıdan daha hoş bir pürüzsüz ve daha parlak bir görünüm kazandırmaktadır. PLA insan sağlığına zararlı değildir ve FDM teknolojisini kullanan bir 3B Yazıcı ile PLA baskı yapılabilmektedir. 3B yazıcılar'da en yaygın kullanılan termoplastiklerden biridir. Günlük kullanım koşulları altında, PLA, oldukça kararlıdır. Fiziksel özelliklerini ve mol kütlelerini yıllarca koruyabilmektedir (Henton ve diğ., 2005; Tabi ve diğ., 2010).

PLA (Polylactic Acid), malzeme piyasasında orta derece maliyetli bir fiyatı vardır ve oldukça kullanışlı ve mükemmel bir 3B yazıcı hammadde malzemesidir. ABS filamanlara göre birçok farklı renklerde imal edilebilme, soğuk tabla üzerine yazdırılabilme, yüksek hızlarda yazdırma imkanı sağlayabilmesi ve düşük çarpılma oranları gibi özellikleri sayesinde oldukça çok tercih edilen bir 3B yazıcı hammaddesidir (3D Printing Materials, 2017; Matthew ve diğ., 2016).

PLA filamentlerin biyolojik olarak parçalanabilen bir yapısı bulunmaktadır ve bu özelliği onu birçok filament türünden çok daha çevreci yapmaktadır. Bir diğer olumlu özelliği ise baskı esnasında dışarıya kötü koku yaymamasıdır. Polimer malzemeler ile üretimlerde genellikle bir koku hissedilmektedir. Bu koku, kullanılan malzemeye ve basım sıcaklığına göre değişmektedir. Örneğin; PLA'da bazı markalarda baharat kokusu alırken, bazı markalarda şekerimsi veya waffle gibi bir koku alınmaktadır.

#### 4.2.1 PLA Filamentinin Genel Özellikleri ve Avantajları

- ABS'ye göre basımı oldukça kolaydır.
- Sert bir yapıya sahiptir. Dayanıklı ve darbelere karşı dirençlidir.
- Yüzeyi pürüzsüzleştirmek için aseton ile işlem yapılmasına gerek yoktur.
- Basım sıcaklığı genellikle 190°C – 220°C arasındadır.
- Yatak sıcaklığı 50°C – 70°C arasında kullanılmaktadır.
- Bir kere ayarlanmış sıcaklık, yatak kalibrasyonu ve üretim hızı ile sorunsuz basım yapılabilir.
- Şekil 4.8'de görüldüğü üzere PLA ile üretilen 3B modeller kesilebilir, törpülenebilir, taşlanabilir, boyanabilir ve güçlü yapıştırıcılar ile yapıştırılabilir.
- İçinde bitkisel malzemeler bulunduğu için doğaya az zarar veren bir plastik çeşididir ve doğada kolaylıkla çözülebilmektedir (Ning ve diğ., 2015; Weng ve diğ., 2016; 3detay, 2019).



Şekil 4.8: PLA Malzemesinin Kullanımına Örnekler (Prodways, 2019)

#### 4.2.2 PLA Filamentinin Dezavantajları

- Çok daha düşük bir erime noktasına sahiptir. Bu, basılı parçaların mekanik işlemler için kullanılması veya hatta yüksek sıcaklıktaki yerlerde saklanması parçanın eğrilmesine, parçalanmasına veya eritilmesine neden olabilir.
- Kolay kırılan ve yüzeyi sert bir malzemedir.
- Büküldüğünde kırılmaya daha meyillidir.
- Yüzeyi pürüzsüzleştirmek için aseton ile işlem yapılamaz.

#### 4.2.3 PLA Filamentinin Üretilmesi

Aşağıdaki Şekil 4.9’da PLA filamentinin, mısır nişastası veya şeker kamışı gibi karbonhidrat kaynağının kontrollü koşullar altında fermantasyonu yoluyla üretilmesinin şematığı görülmektedir. Yapı taşları genellikle laktik asit veya laktik monomerleri olmaktadır. Bu yapılar daha sonra PLA’da polimerize olurlar.

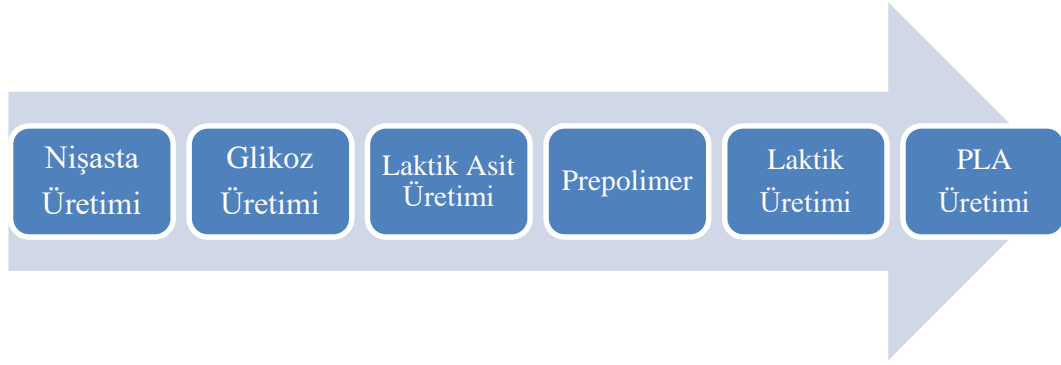


Şekil 4.9: PLA Malzemesinin Üretim ve Dönüşüm Aşamaları (Peng ve Sun, 20107)

Şekil 4.10’da görüldüğü üzere başlangıç olarak mısır, ıslak öğütme işleminden geçer ve nişasta ayrılır. Nişasta daha sonra asit veya enzimler ile karıştırılıp, ısıtılır. Bu işlem nişastayı dekstroz (D-glikoz) veya mısır şekerini kırmaktadır. Son olarak,



glikozun fermantasyonu, PLA'nın temel bileşeni olan L-Lactic Asiti üretilir (BoyutKat, 2019).



Şekil 4.10: PLA Malzemesinin Üretim Süreci (Tseng, 2013)

PLA plastiğinin laktik asitten üretilmesi için iki yöntem uygulanmaktadır. Birinci yöntem, laktik asidin, daha büyük molekülerin ağırlıklarla sonuçlanan bir ara durum olarak kullanılmasıdır. İkinci yöntem ise, laktik asidin doğrudan polimerizasyonundan oluşur.

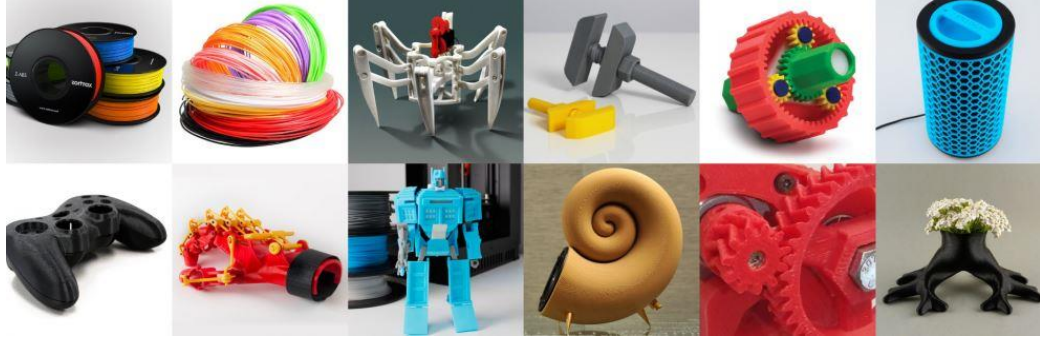
Başka bir yöntem ise endüstriyel yöntemle PLA üretimidir. PLA plastiğinin işlenme yöntemi ticari polimerlere uygulanan yöntemlere benzemektedir. Endüstriyel üretim sırasında özel önem taşıyan husus PLA'nın nemini kontrol etmektir. Yüksek nem konsantrasyonu başarısız ürüne neden olabilmektedir.

#### 4.2.4 PLA Filamentinin Kullanım Alanları

PLA Filamanının Genel Kullanım Alanları;

- Gıda Ambalaj Endüstrisi (yiyecek saklama kapları vb.),
- Sağlık Medikal Endüstrisi (vidalar, plakalar, cerrahi yapı ve kafesler gibi kemik sabitleme cihazları),
- Tekstil Endüstrisi (Spor kıyafetleri),
- Kozmetik Endüstrisi (Araştırma yapılmaktadır)
- Otomotiv Endüstrisi

PLA filament, sayısız uygulama için harika bir malzemedir. Diğer filament filament tiplerinde bulunan mekanik özelliklere sahip olmamakla birlikte, PLA'nın basılması kolaydır, birçok renk ve çeşit elde edilebilmektedir.



Şekil 4.11: PLA Malzemesinin Genel Kullanımına Örnekler

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere PLA daha parlak bir görüntüye sahip olduğu için göze hitap eden alanlarda ve sağlığa zararlı olmadığı için insan vücudu ile temas halinde olabilecek yerlerde kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak oyuncaklar, mimari ölçek modeller, mutfak gereçleri, kurabiye kalıpları, saklama kapları verilebilmektedir (Grandviewresearch, 2018).

PLA otomotiv sektöründe de oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi Röchling otomobil firması hava filtresi kutularında ve iç kaplamalarda PLA malzemesi kullanmıştır. Yüksek ısı değerlerine sahip PLA bileşiklerini kullanarak üretmişlerdir. Bu malzemelerin lif takviyesi ile 140 °C'ye kadar geliştirilmiş termal dirence, iyi bir çizilme ve UV direnci olduğunu söylemişlerdir.



Şekil 4.12: Röchling Otomobil Firmasının PLA Malzemesini Kullanımına Örnekler (Plastics, 2013).

## 5. DENEYSEL ve NÜMERİK ÇALIŞMALAR

### 5.1 Deneysel Numunelerin Üretimi

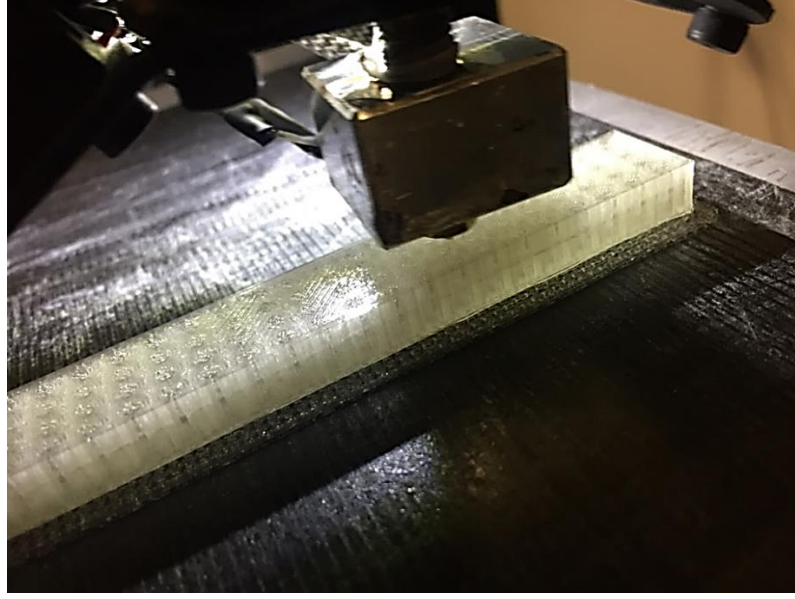
Bu tez çalışmasında periyodik hücreli hibrit malzemeler, yani bal peteği yapıları esas alınarak değişken kesitli kirişlerin doğal frekans analizleri incelenmiştir. Panel haline getirilmiş sandviç yapıların temel özelliği; iki adet ince ve rijit alt ve üst yüzey tabaka arasına kalın fakat oldukça hafif çekirdek malzemesinin konulması ile elde edilmektedir. Bu çalışmada 150\*15\*8 mm ebatlarında kirişler üretilmiştir. Üretilen ilk kiriş içi dolu olarak üretilmiştir ve diğer kirişler bu dolu kirişin ebatları ile aynı olacak şekilde, içerisinde dörtgen-beşgen-altıgen ve daire olmak üzere 4 farklı desende hacim çıkartılması yapılarak üretilmiş ve böylece kirişlere bal peteği yapısı verilmiştir. Çıkartılan hacimler her bir satırda 3 adet ve 4 adet olma durumuna göre toplam 8 adet tasarım yapılmıştır. Çıkartılan hacimlerin her biri eş merkezlidir ve her bir kiriş için  $4320 \text{ mm}^3$ 'dür.

İkinci bir çalışma olarak dolu kirişe  $\Theta$  açıları verilerek ( $\Theta=0,0$  dan  $1,0$ 'a kadar) 11 farklı tasarım yapılmıştır.

Yapılan bütün tasarımların çalışmaları SD SolidWorks katı modelleme programında gerçekleştirilmiştir.

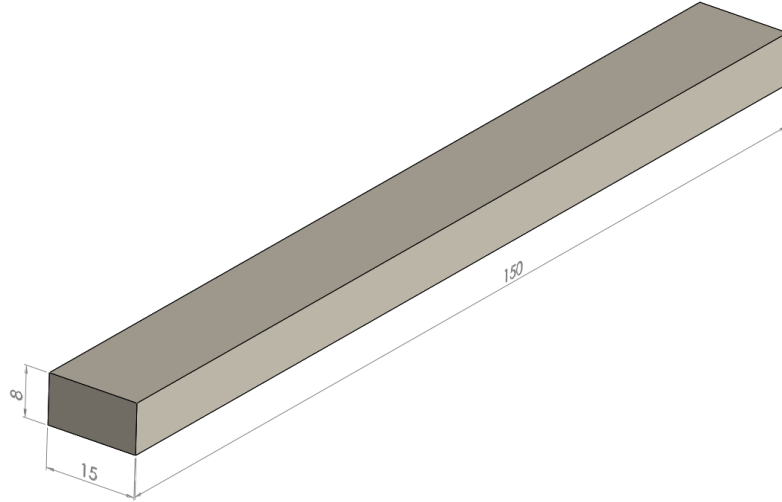
Şekil 5.1' de çalışmada kullanılan bal petekli yapıli kirişlerin 3 boyutlu İmalat (Eklemeli İmalat) yöntemi ile üretim aşaması gösterilmektedir. Kirişlerde hammadde olarak PLA (Poli Laktik Asit) plastik malzemesi kullanılmaktadır. Üretilen kirişler tek bir malzemedenden bir bütün olarak eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ve çekirdek yapı ile alt ve üst yüzey plakalar arasında bir yapıştırıcı kullanılmasına gerek kalmamıştır.

3B yazıcılar ile üretilen numuneler 8x15x150 mm boyutlarında kiriş olarak üretilmiştir. Üretilen kirişler dolu kiriş, çekirdekli yapıli kirişler (toplam 8 adet) ve  $\Theta$  açısı verilmiş kirişler (toplam 11 adet) olmak üzere üç farklı şekilde üretilmiştir.



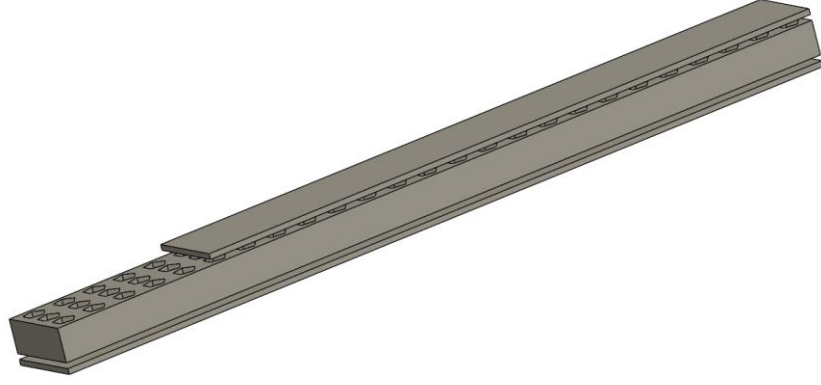
**Şekil 5.1:** 3B Yazıcı ile Bal Petekli Yapının Üretilmesi

Aşağıda Şekil 5.2’de, tasarlanan ana kirişin SD Solidworks ortamındaki görüntüsü ve ebatları bulunmaktadır.



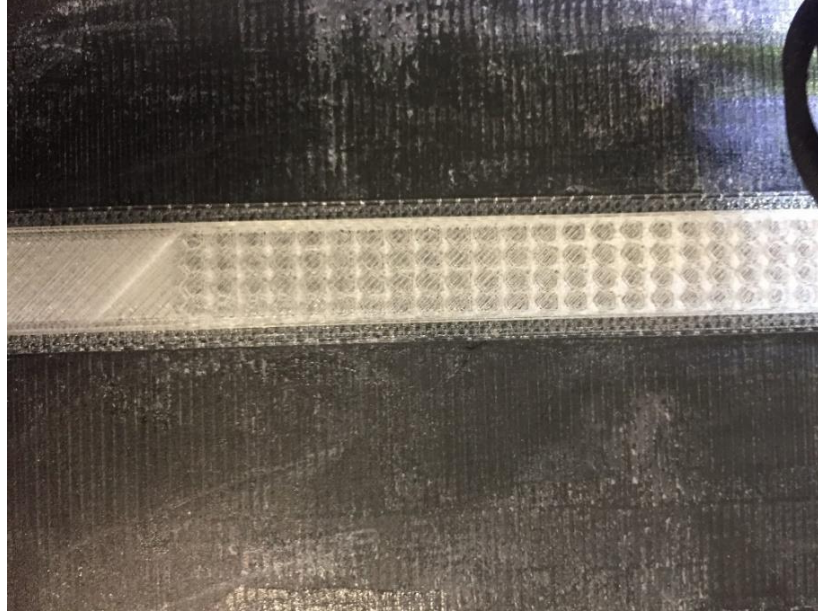
**Şekil 5.2:** Tasarlanan Ana Yapıdaki Kirişin SD Solidworks Görüntüsü

Aşağıdaki Şekil 5.3’de ise tasarlanan bal petekli yapının SD Solidworks ortamındaki görüntüsü bulunmaktadır. Alt ve üst tabakaların çekirdek yapıdan ayrı görülmesinin nedeni plaka varlığının ve iç çekirdek yapısının gösterilmek istenmesidir.



**Şekil 5.3:** Tasarlanan Bal Petekli Yapıdaki Kirişin Solidworks Görüntüsü

Şekil 5.4’de görüldüğü üzere üretilen kirişler 3B yazıcıda eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş olup, kirişler bir bütün olarak imal edilmiştir. Şeffaf malzeme kullanılarak da kirişin iç yapısındaki çekirdekli yapının gösterilmesi amaçlanmıştır. Buna ek olarak ham madde seçimi şeffaf PLA kullanılması ile kirişlerde oluşabilecek hataların daha iyi görülmesi sağlanmıştır.



**Şekil 5.4:** Kirişin Şeffaf Görüntüsü ile İç Yapısının Görülmesi ve 3B Yazıcıda İmalat Süreci

### 5.1.1 Çalışmada Kullanılan 3B Yazıcının Temel Bileşenleri ve Görevleri

- **3B Yazıcı Kasası:** Makineyi bir arada tutar.
- **3B Yazıcı Baskı Kafası Hareket Sistemi:** Baskı yatağı etrafında sağa sola hareket eder.
- **3B Yazıcı Baskı Kafası (Ekstrüder):** Filamenti eritip ittirerek dökten ve nozül içeren kısım.
- **3B Yazıcı Baskı Yatağı:** Malzemenin dökülerek nesnenin kat kat oluşturulduğu tabla veya hazne.
- **3B Yazıcı Step Motorları:** Hassas konumlandırma ve hız kontrolü için kullanılır.
- **3B Yazıcı Elektroniği:** Motorları sürme, baskı kafasını ısıtma ve diğer kontrol konutlarını yerine getirir.
- **3B Yazıcı Gömülü Yazılımı:** 3B yazıcılığı kontrol etmek için kullanılan yazılım.
- **3B Yazıcı Dilimleme Yazılımı:** 3B modelleri baskıya hazırlamak için gerekli yazılım (Ultimaker Cura) (boyutkat.com, 2019).

### 5.1.2 Çalışmada Kullanılan 3B Yazıcının Temel Çalışma Prensibi

Eklemeli üretim teknolojisiyle parça basımı yapan tüm 3B yazıcılarda olduğu gibi çalışmada kullanılan Roboturk 3B yazıcısında da, çeşitli filamanlar arasından seçilmiş uygun filaman (bu çalışma için PLA), Nozzle adı verilen sıcaklık kontrollü bir uç yardımıyla sistemi besleyen filament ısıtma tabakasından geçirilerek, baskı yatağına malzemeyi dökerek fiziksel modeli oluşturmaya başlar. Basılan model bu süreç sırasında 3B yazıcı yatağı yüzeyinden başlayarak aşağıdan yukarıya doğru katman katman birbirine eklenerek üretilir. Yazıcı baskı kafası (ekstrüder) asenkron motorlar sayesinde x,y ve z yönlerinde istenilen açıda hareket edebilmektedir.

3B yazıcılar oluşturacakları üç boyutlu modelin dijital tasarım dosyasına ihtiyaç duyarlar. Bunun için çalışmada kullanılan Roboturk yazıcısına godeları verebilmek için “Ultimaker Cura” programı kullanılmıştır. Ultimaker Cura programının kullandığı en yaygın format ‘.STL’ formatıdır. Ultimaker Cura ile tasarlanacak parçanın “gcode”ları çıkartılır ve “harici usb, wifi, PC bağlantı veya SD

kart” ile 3B Yazıcı’ya gcode’lar atılır. 3B yazıcı üzerindeki 3.5" dokunmatik ekran üzerinden yüklenen gcode’lar seçilir ve parça tasarımı başlamış olur.

Bunlara ek olarak üç boyutlu yazıcı ürünlerinin mekanik özellikleri, katman kalınlığı, tabla sıcaklığı, nozul sıcaklığı, nozul çapı, dolgu yoğunluğu, basma yönü gibi parametrelere bağlı olarak değişir (Tymrak ve diğ., 2014).

### **5.1.3 Çalışmada Kullanılan “Roboturk Compact Cs2 3D Yazıcı” Özellikleri**

- 168mhz - 32bit İşlemci
- Tam Renkli Dokunmatik Ekran
- 2 mm Alüminyum - Kapalı Kasa
- 40 ~ 300 Mikron
- 3,5" Renkli Dokunmatik Ekran
- Titreşim Önleyici Mekanik Sistem
- 3 Farklı Tabla Seviyeleme Özelliği
- Nozzle Işıklandırması
- Maksimum Performans İçin Özel Tasarım Extruder
- İç Mekan Işıklandırması
- Şeffaf Plexi Kapaklar
- Kare Kızaklı X ve Y Ekseni (Corexy)
- Linear Kızaklı Eksen Yapısı
- Uzun Süreli Baskılar İçin Dizayn Edilmiş Sistem
- Tek Renk Çekme Tip Extruder (Opsiyonel 2. Renk Seçeneği)
- PLA - ABS - HIBS - PETG - FLEX - PA12 - STH
- Pc Bağlantı - Sd Kart - Wifi - Usb ile Bağlantı ve Baskı
- 12V – 30A – 350w Güç Kaynağı, (3dedi.com, 2017).

Yukarıda özellikleri verilen ve çalışmada kullanılan 3B yazıcı aşağıda Şekil 5.5’de gösterilmektedir.



**Şekil 5.5:** Çalışmada Kullanılan 3B Yazıcı

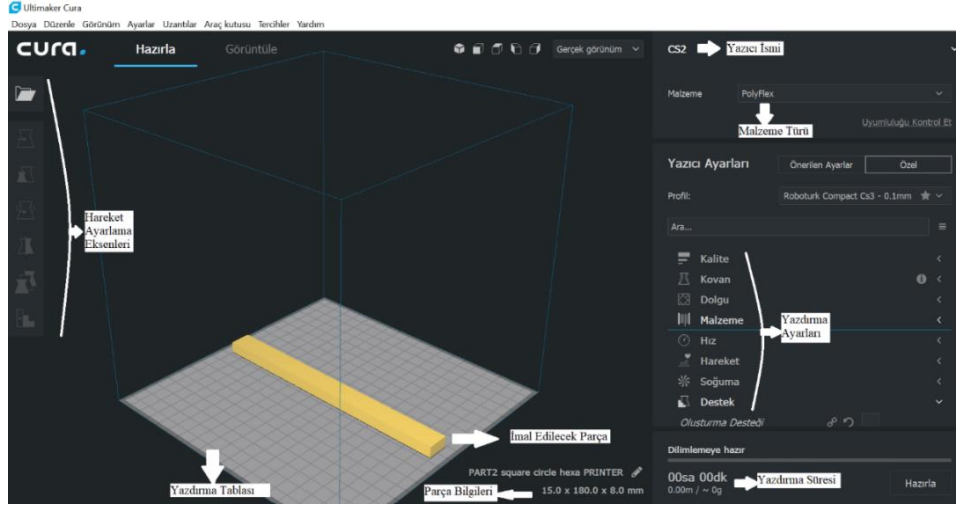
#### **5.1.4 Ultimaker Cura Programı**

Tasarlanan 3 boyutlu modelin dilimlenmesini yaparak gcode'ları oluşturmak için kullanılan bir programdır.

CURA yazılımının 2 temel işlevi vardır.

1. 3B tasarım dosyalarından, 3B yazıcınızın anlayabileceği 'gcode' komut dosyaları oluşturmak,
2. Hazırladığı 'gcode' komut dosyalarını doğrudan baskı alınması için 3B yazıcınıza USB bağlantısı ya da SD kart ile göndermektir.





**Şekil 5.6:** Ultimaker Cura Programı Ara Yüzü ve Üretilecek Kirişin Ultimaker Cura Görüntüsü

SD Solidworks 3 boyutlu çizim programında tasarımı yapılan parçalar STL formatında kaydedilir. Ultimaker Cura programı STL formatındaki dosyaları kolaylıkla okuyabilmektedir.

Yukarıdaki 5.6'da görüldüğü üzere açılan parça programda sarı renkte görülür. Daha sonra programda ince ayarlar yaparak yazdırılacak parça hazırlanır.

Yapılan test denemelerinden sonra tasarımı yapılan bütün test numuneleri aşağıdaki ana özelliklerde basılmıştır.

#### ➤ Kalite Ayarları Bölümü

**Katman Yüksekliği:** 0.13 mm her bir katmanın kalınlığıdır. Düşük seçilerek yüzey pürüzlülüğü azaltıldı ve hataların minimuma indirilmesi sağlandı.

**Hat Genişliği:** 0.4 mm nozlu çapı ile aynı değildir.

**Duvar Hat Genişliği:** 0.4 mm nozlu çapı ile aynı değildir.

**Dolgu Hattı Yoğunluğu:** 0.3 mm nozlu çapından küçük seçilerek dolgulardaki oluşabilecek hataların önlenmesi sağlandı. Çok düşük seçilirse baskı şişme yaptığı ve delikleri kapattığı görüldü.

#### ➤ Kovan Ayarları Bölümü

**Duvar Hat Sayısı:** 2 ana parçanın ve deliklerin duvar kalınlığıdır. Düşük verilmesinin nedeni deliklerin kapanmasını önlemektir.

**Duvarlar Arasındaki Boşlukları Doldur:** Her bölüm duvarların arasındaki boşluklar doldurarak hataların giderilmesi sağlandı.

➤ **Dolgu Ayarları Bölümü**

**Dolgu Yoğunluğu:** 100 % özellikle deliklerin arasındaki dolguların doldurulması için tam dolgu uygulaması yapıldı.

**Dolgu Hattı Mesafesi:** 0.3mm nozlu çapından küçük verilerek dolguların birbiri üzerine denk gelmesi sağlandı ve dolguların arasının kapanması sağlandı.

**Dolgu Şekli:** Çizgiler parçanın şişme yapmadan en hatasız bir şekilde ve simetrik olarak oluşması için kullanıldı.

➤ **Malzeme Bölümü**

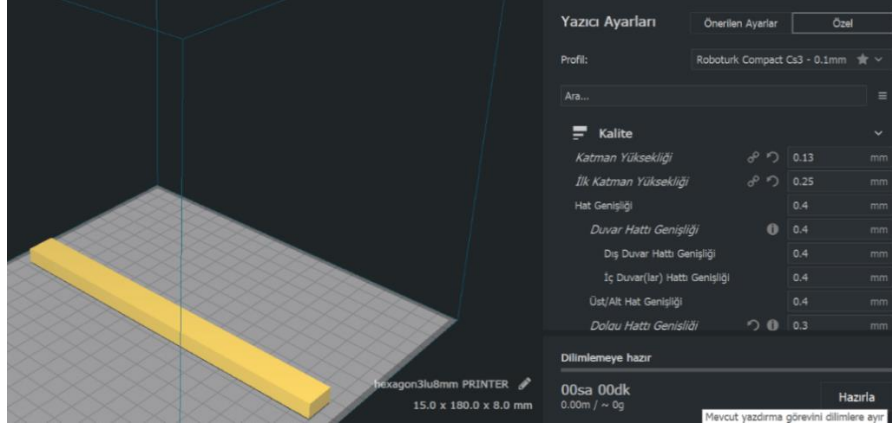
**Malzeme Yazdırma Sıcaklığı:** 210 derece PLA malzemesinin ortalama erime sıcaklığı olarak verildi.

**Yapı Levhası Sıcaklığı:** 60 derece tasarlanan parçanın yazdırma tablasına yapışması ve kalkmaması için verildi.

**Yapı Levhası Yapıştırma Türü:** Radye olarak verildi ve böylece parçanın altına ek bir taban yapılması sağlanarak yüzey pürüzlülüğü ve ilk başlangıçta oluşabilecek hataların önlenmesi sağlandı.

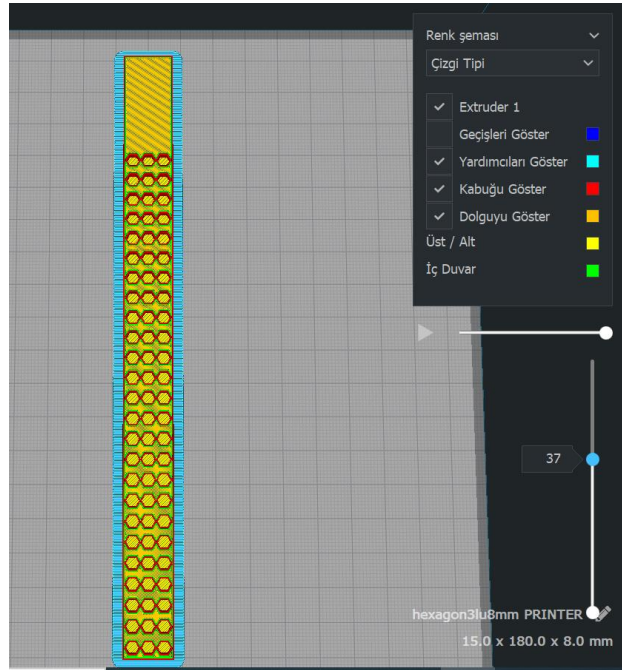
Programda kullanılan ana özellikler bu şekilde olup, daha birçok ayrıntı da kullanılmıştır. Fakat genel her makinenin genel ayarları olup buraya değinilmemiştir.

Ayarlar yapıldıktan sonra Şekil 5.7'nin sağ alt kısmında görülen HAZIRLA butonu ile program parçayı uygun dilimlemeye ayırdı ve 3B yazıcı için gcode'ları çıkarılması sağlandı.

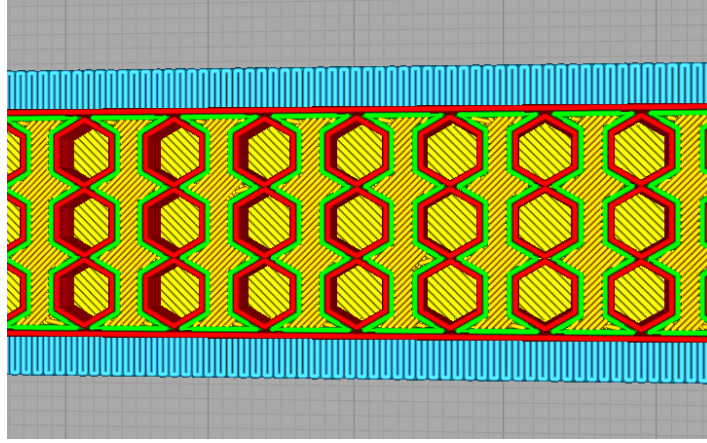


Şekil 5.7: Üretilecek Parçanın Ultimaker Cura Programında Dilimlenmeye Hazırlanması

Programda hazır olan parçaların 'katman görünümü' açılarak 3B yazıcı için hazırlanan katmanları ve yazıcının yazdırma şekli görülür. Şekil 5.8'de görüldüğü üzere parça boyutuna ve katman kalınlığına göre program parçaları katmanlara ayırır ve bize 3B yazıcının her katmanda yapacağı işleri ve baskının kalitesini, dolgu yoğunluğunu, çizgilerin yönleri gibi önemli verileri parça basılmadan önce görmemizi sağlar.



Şekil 5.8: Üretilecek Parçanın Ultimaker Cura Programında Katman Görünümü



Şekil 5.9: Üretilcek Parçanın Ultimaker Cura Programında Dolgu ve Çizgi Yönlerinin Görünümü

- Sarı Renkler : Dolguyu Ve Çizgi Yönlerini  
Kırmızı Renkler : Dış Duvarları  
Yeşil Renkler : İç Duvarları  
Mavi Renkler : Radye Yapısını

Üretilcek parçanın ultimaker cura programında dolgu ve çizgi yönlerinin görünümü sağlanmış olur (Şekil 5.9).



Şekil 5.10: 3B Yazıcı'da Deney Kirişlerinin Üretilmesi

Son olarak dilimlenerek gcode'leri hazırlanan parça usb bağlantısı ile makineyi gönderilir.

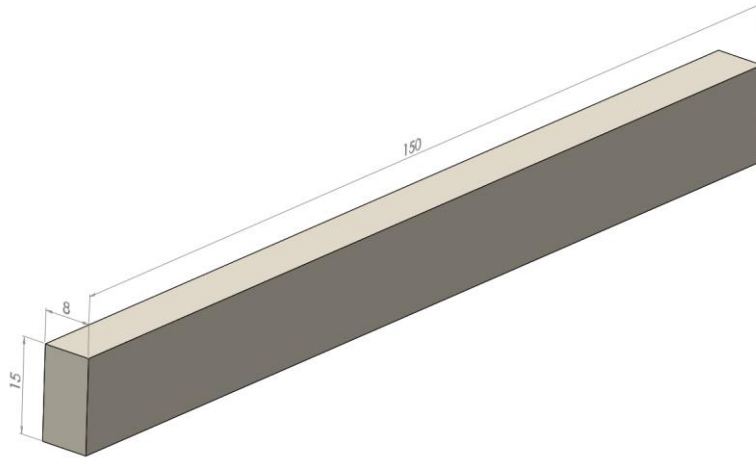
3B yazıcının üzerindeki dokunmatik ekran ile yazdır komutu verilir ve 3B yazıcı parçayı işlemeye başlar. İşlenen parçanın ilk olarak radye alt tabanı yapılıır. Daha sonra kat çıkma yöntemi ile parça basılmaya başlar. Şekil 5.10'da  $\Theta$  açılı kirişlerin ve bal peteği yapısına sahip kirişlerin üretim aşaması anındaki görüntüleri mevcuttur.

## 5.2 Numune Boyutlarının Hesaplanması ve Tasarımı

### 5.2.1 Ana Kirişin Hesaplanması ve Tasarımı

Yapılan çalışmada, mevcut titreşim deneyi test düzeneği, 3B yazıcı özellikleri, kullanılacak PLA malzemesinin özellikleri ve çeşitli denemelerden sonra bir parça tasarımı yapılmıştır.

Ana kirişin tasarımı yapılırken ilk önce ana kirişin içine bal peteği yapılarının verilmesini sağlayacak kalınlıkta olmasına ve titreşim cihazının ölçebileceği kalınlıkta olmasına dikkat edildi. Bu sebeple yapılan denemeler sonucunda Şekil 5.11’de görüldüğü üzere ana kirişin ebatlarının kalınlığının 8 mm, eninin 15 mm ve uzunluğunun 150 mm olmasına karar verildi.



Şekil 5.11: Ana Kirişin SolidWorks Ortamındaki Tasarımı

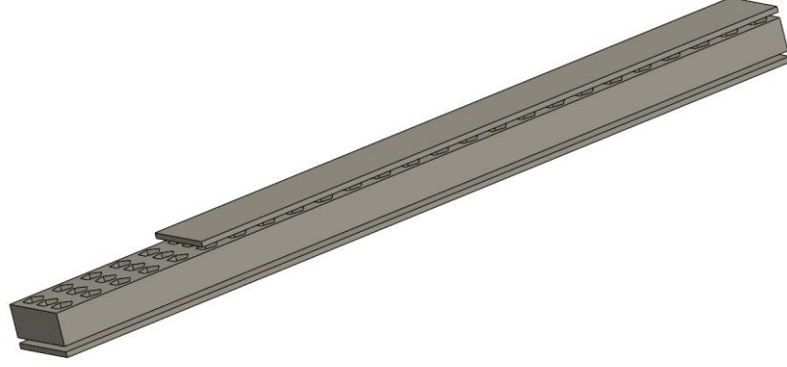
Şekil 5.12’de görüldüğü gibi yapılan tasarım daha sonra 3B yazıcı ile üretilmiştir.



Şekil 5.12: 3B Yazıcı ile Üretilen Ana Parça

## 5.2.2 Hücresel Hibrit Yapılı Kirişlerin Hesaplanması ve Tasarımı

Parça tasarımında ana unsur olarak, tasarlanacak yapıya, bir bal peteği kiriş yapısı vermek olmuştur. Bunun için 8 mm'lik et kalınlığına sahip parçanın alt ve üst kısımlarına 1 mm'lik plaka kalınlığı verilmiştir. Daha sonra ortasında kalan 6 mm'lik kısma farklı şekillerde ama aynı hacimli ve eş merkezli delikler açılmıştır. Böylelikle tasarlanan parçaya bal betekli sandviç kiriş özelliği verilmiştir.



Şekil 5.13: Hücresel Hibrit Yapılı Kirişlerin SD Solidworks Tasarımı

Şekil 5.13'de görüldüğü üzere ortada 6 mm kalınlığında çekirdek bal peteği yapısı ve alt ve üstte 1 mm'lik katman bulunmaktadır. Üst katmanda kesit alınarak içyapıdaki bal peteği çekirdek yapısı gösterilmek istenmiştir.

Tasarlanan parçadan aynı alanlara sahip kare, eşkenar beşgen, eşkenar altıgen ve daire olacak şekilde delikler açılarak, hacim çıkarımı yapılması için hesaplamalar yapılmıştır.

### Yapılan hesaplamalarda ana kriterler olarak;

- Toplam çıkan hacimlerin birbirine eşit olması,
- Açılan küçük deliklerin (kare, beşgen, altıgen, daire) hacimlerinin birbirine eşit olması,
- Açılan küçük deliklerin aynı sayıda ve eş merkezli olması,
- Her satır ve sütundan aynı sayılarda delik açılması,
- Ana parçanın her kenarından 1 mm'lik boşluk bırakılması olarak belirlenmiştir.

Fakat çıkartılacak hacimlerin yükseklikleri 6 mm olup ve bu yüksekliğin bütün şekillerde aynı olacağı için, ana hesaplamalar şekillerin alanları üzerinden yapılmıştır. Daha sonra yükseklik ile çarpılıp çıkartılan hacimler bulunmuştur.

### 5.2.2.1 Çıkartılan Küçük Hacimlerin Hesabı

Çekirdek parçanın kalınlığı 6 mm olup, toplam hacmi:

$$V=a*b*c$$

$$V_{\text{çekirdek parça}} = 6 \text{ mm} * 15 \text{ mm} * 150 \text{ mm}$$

$$V_{\text{çekirdek parça}} = 13500 \text{ mm}^3 \text{ olarak bulundu.}$$

Toplam çıkartılacak hacmin hesabı için, deliklerin açılacağı yüzlerden çıkartılacak toplam alanların hesabı yapıldı.



Şekil 5.14: Deliklerin Açılacağı Tek Bir Yüzün Görünümü

Şekil 5.14'de de görüldüğü gibi deliklerin açılacağı tek bir yüzün toplam alanı;

$$A=a*b$$

$$A=15*150 = 2250 \text{ mm}^2 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Çıkartılan ufak alanların her satırda 3 adet olması ve 4 olması koşulları ele alınarak 2 farklı tasarım yapıldı. Burada amaç delikler arası mesafeye bağlı olarak titreşim frekanslarının değişimini gözlemlemektir. Bu amaçla tasarımlar yapılmıştır. Yapılan tasarımların her satırda 3 adet olması durumu bölüm 5.2.2.2'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Yapılan ana hesaplar aynı olduğu için her satırda 4 adet olması durumu ayrıntılı olarak verilmemiştir. Yalnızca yapılan tasarımların resimleri ve açıklamaları tez çalışmasında gösterilmiştir.

### 5.2.2.2 Çıkartılan Alanların Her Satırda 3 Adet Olması Durumu

Çıkartılan alanların her satırda 3 adet olması ve boşluklar arasındaki mesafelerin yatayda 1.5 mm ve düşey ekseninde ise 2.9 mm'dir.

#### 5.2.2.2.1 Üçlü Eşkenar Altıgen Yapılı Kirişin Hesaplanması ve Tasarımı

Çıkartılan alanların ve çıkan her bir deliğin eş merkezli olması için, çıkan her bir ufak deliğin alanının birbirine eşit olması gereklidir. Yapılan çalışmalar, denemeler ve hesaplamalar sonucu ilk olarak altıgen delikli yapıların tasarımının yapılmasına karar verilmiştir.

Yapılan araştırmalar, denemeler ve hesaplamalar sonucu çıkartılacak ufak eşkenar altıgenlerin her birinin tek bir uzunluğu 1.92 mm olarak belirlenmiştir.

$a=1.92 \text{ mm}$  (a= Üçlü Yapıdaki Kirişin İçerisindeki Bir Eşkenar Altıgeninin Bir Köşesinin Uzunluğu)

Eşkenar altıgenin alan hesabı=  $6 \cdot \frac{a^2 \sqrt{3}}{4}$  ise;

$$A_{\text{eşkenar altıgen}} = 6 \cdot \frac{(1.92)^2 \sqrt{3}}{4}$$

Çıkartılacak tek bir ufak eşkenar altıgenin alanı;

$$A_{\text{eşkenar altıgen}} = 9.58 \text{ mm}^2 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Aynı zamanda çıkartılan tek bir eşkenar altıgenin hacmi;

$$A_{\text{eşkenar altıgen}} = \text{Yükseklik} \cdot \text{Alan}$$

$$A_{\text{eşkenar altıgen}} = 6 \text{ mm} \cdot 9.58 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{eşkenar altıgen}} = 57.48 \text{ mm}^3 \text{ olarak belirlenir.}$$

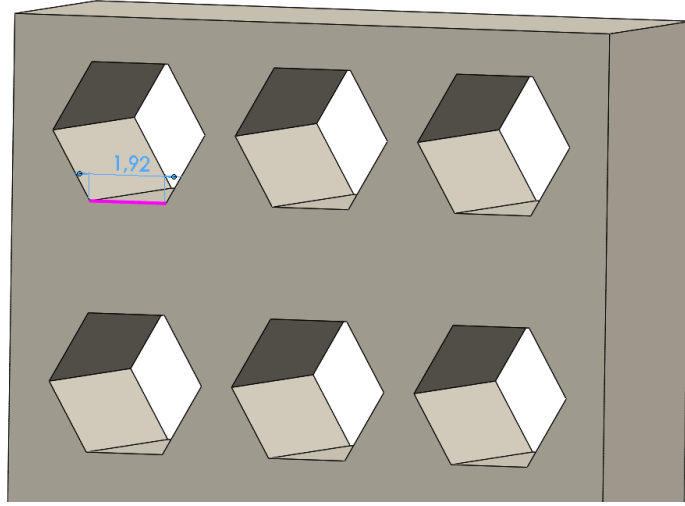
Toplam çıkartılan tek bir alan=  $9.58 \text{ mm}^2$  ise her ve satırda 3 adet eşkenar altıgen bulunacağı kabul edildiğinde;

Her bir satırdan çıkan toplam alan:  $9.58 \text{ mm}^2 \cdot 3 = 28.74 \text{ mm}^2$  olarak bulunur.



Yapılan araştırma ve hesaplamalar sonucunda her bir satırdan çıkartılacak alan sayısı 25 olarak kabul edilirse;

Toplam çıkartılan alan=  $28.74 \text{ mm}^2 * 25 = 718.5 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanır ve tek yüzdeki çıkartılacak toplam alan  $720 \text{ mm}^2$  olarak belirlendi.



**Şekil 5.15:** Üçlü Eşkenar Altıgen Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü

Hacim (V) =Alan\*Yükseklik ise;

Yükseklik=6 mm,

$$V_{\text{eşkenar altıgen}} = 6 \text{ mm} * 720 \text{ mm}^2$$

Şekil 5.15'de deliklerinin yakın görünümü görülen Eşkenar Altıgen'den toplam çıkartılan hacim,  $V=4320 \text{ mm}^3$  olarak belirlendi.

#### 5.2.2.2.2 Üçlü Eşkenar Beşgen Yapılı Kirişin Hesaplanması ve Tasarımı

Çalışmada ana şartları çıkartılan alanların ve çıkan her bir deliğin eş merkezli olması gerektiği için, çıkan her bir ufak deliğin alanının birbirine eşit olması gereklidir. İlk olarak belirlediğimiz çıkan her bir eşkenar altıgenin alanı  $9.58 \text{ mm}^2$  olduğuna göre, çıkartılan her bir eşkenar beşgenin alanı da  $9.58 \text{ mm}^2$  olarak kabul edildi ve parça tasarımı buna göre yapıldı.

$$A_{\text{eşkenar beşgen}} = 9.58 \text{ mm}^2$$

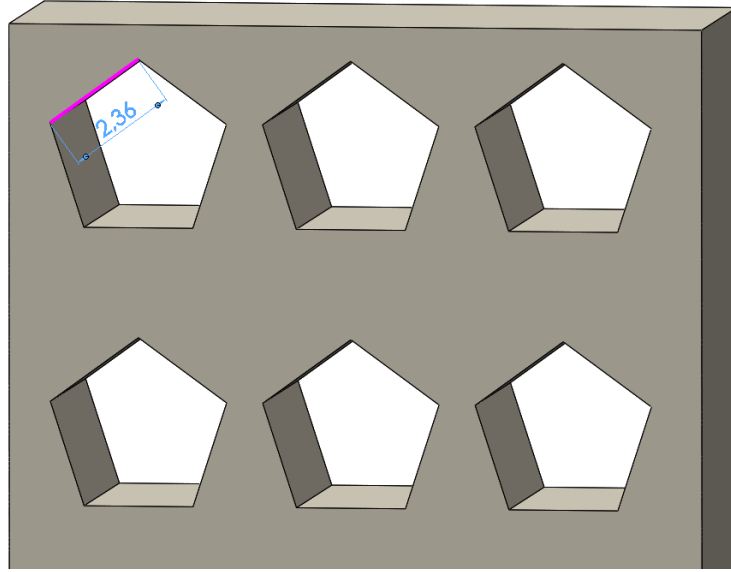
$j = 2.36$  mm olarak bulunur. ( $j =$  Üçlü yapıdaki kirişin içerisindeki bir eşkenar beşgenin bir köşesinin uzunluğu)

Aynı zamanda çıkartılan tek bir eşkenar beşgenin hacmi;

$$A_{\text{eşkenar beşgen}} = \text{Yükseklik} * \text{Alan}$$

$$A_{\text{eşkenar beşgen}} = 6 \text{ mm} * 9.58 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{eşkenar beşgen}} = 57.48 \text{ mm}^3 \text{ olarak belirlenir.}$$



**Şekil 5.16:** Üçlü Eşkenar Beşgen Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü

Şekil 5.16'da görülen eşkenar beşgen'den toplam çıkartılan tek bir alan= $9.58 \text{ mm}^2$  ise her ve satırda 3 adet eşkenar beşgen bulunacağı kabul edildiğinde;

Her bir satırdan çıkan toplam alan:  $9.58 \text{ mm}^2 * 3 = 28.74 \text{ mm}^2$  olarak bulunur.

Yapılan araştırma ve hesaplamalar sonucunda her bir satırdan çıkartılacak alan sayısı 25 olarak kabul edilirse;

Toplam çıkartılan alan=  $28.74 \text{ mm}^2 * 25 = 718.5 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanır ve tek yüzdeki çıkartılacak toplam alan  $720 \text{ mm}^2$  olarak belirlendi.

Hacim (V) = Alan\*Yükseklik ise;

Yükseklik=6 mm,

$$V_{eşkenar\ beşgen} = 6\text{ mm} * 720\text{ mm}^2$$

Eşkenar beşgenden toplam çıkartılan hacim,

$$V_{eşkenar\ beşgen} = 4320\text{ mm}^3 \text{ olarak belirlendi.}$$

### 5.2.2.2.3 Üçlü Kare Yapılı Kirişin Hesaplanması ve Tasarımı

Çalışmada sunulan üçlü kare yapılı kirişin tasarımı için;

$$A_{kare} = 9.58\text{ mm}^2$$

$$A_{kare} = c^2 \quad (c = \text{Üçlü yapıdaki kirişin içerisindeki bir karenin bir köşesinin uzunluğu})$$

Aynı zamanda çıkartılan tek bir eşkenar karenin hacmi;

$$V_{kare} = \text{Yükseklik} * \text{Alan} \quad V_{kare} = 6\text{ mm} * 9.58\text{ mm}^2$$

$$V_{kare} = 57.48\text{ mm}^3 \text{ olarak belirlenir.}$$

Toplam çıkartılan tek bir alan =  $9.58\text{ mm}^2$  ise her ve satırda 3 adet kare bulunacağı kabul edildiğinde;

$$\text{Her bir satırdan çıkan toplam alan: } 9.58\text{ mm}^2 * 3 = 28.74\text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

Yapılan araştırma ve hesaplamalar sonucunda her bir satırdan çıkartılacak alan sayısı 25 olarak kabul edilirse;

Toplam çıkartılan alan =  $28.74\text{ mm}^2 * 25 = 718.5\text{ mm}^2$  olarak hesaplanır ve tek yüzdeki çıkartılacak toplam alan  $720\text{ mm}^2$  olarak belirlendi.

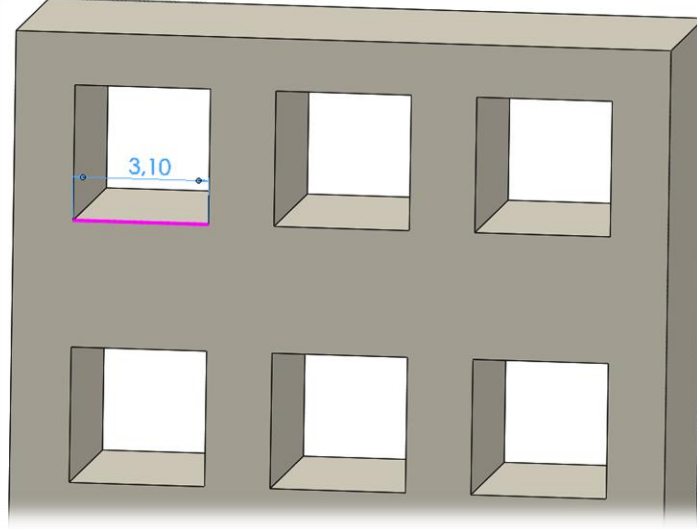
Hacim (V) = Alan \* Yükseklik ise;

$$\text{Yükseklik} = 6\text{ mm,}$$

$$V_{kare} = 6\text{ mm} * 720\text{ mm}^2$$

Kareden toplam çıkartılan hacim,

$$V_{kare} = 4320\text{ mm}^3 \text{ olarak belirlendi (Şekil 5.17).}$$



Şekil 5.17: Üçlü Kare Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü

#### 5.2.2.2.4 Üçlü Daire Yapılı Kirişin Hesaplanması ve Tasarımı

Çalışmada sunulan üçlü daire yapılı kirişin tasarımı için;

$$A_{daire}=9.58 \text{ mm}^2$$

$$A_{kare}= \pi * r_1^2 \quad ( r_1 = \text{Üçlü yapıdaki kirişin içerisindeki bir dairenin bir yarıçapının uzunluğu})$$

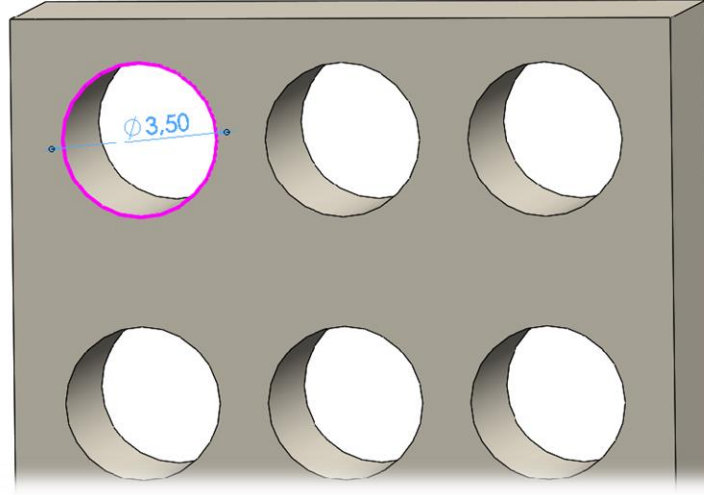
$r_1= 1,75 \text{ mm}$  olarak belirlendi.

Aynı zamanda çıkartılan tek bir dairenin hacmi;

$$V_{daire} = \text{Yükseklik} * \text{Alan}$$

$$V_{daire} = 6 \text{ mm} * 9.58 \text{ mm}^2$$

$V_{daire} = 57.48 \text{ mm}^3$  olarak belirlenir.



Şekil 5.18: Üçlü Daire Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü

Şekil 5.18’de yakın görüntüsü görülen Daire yapılı kirişten toplam çıkartılan tek bir alan= $9.58 \text{ mm}^2$  ise her ve satırda 3 adet daire bulunacağı kabul edildiğinde;

Her bir satırdan çıkan toplam alan:  $9.58 \text{ mm}^2 * 3 = 28.74 \text{ mm}^2$  olarak bulunur.

Yapılan araştırma ve hesaplamalar sonucunda her bir satırdan çıkartılacak alan sayısı 25 olarak kabul edilirse;

Toplam çıkartılan alan=  $28.74 \text{ mm}^2 * 25 = 718.5 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanır ve tek yüzdeki çıkartılacak toplam alan  $720 \text{ mm}^2$  olarak belirlendi.

Hacim (V) = Alan\*Yükseklik ise;

Yükseklik=6 mm,

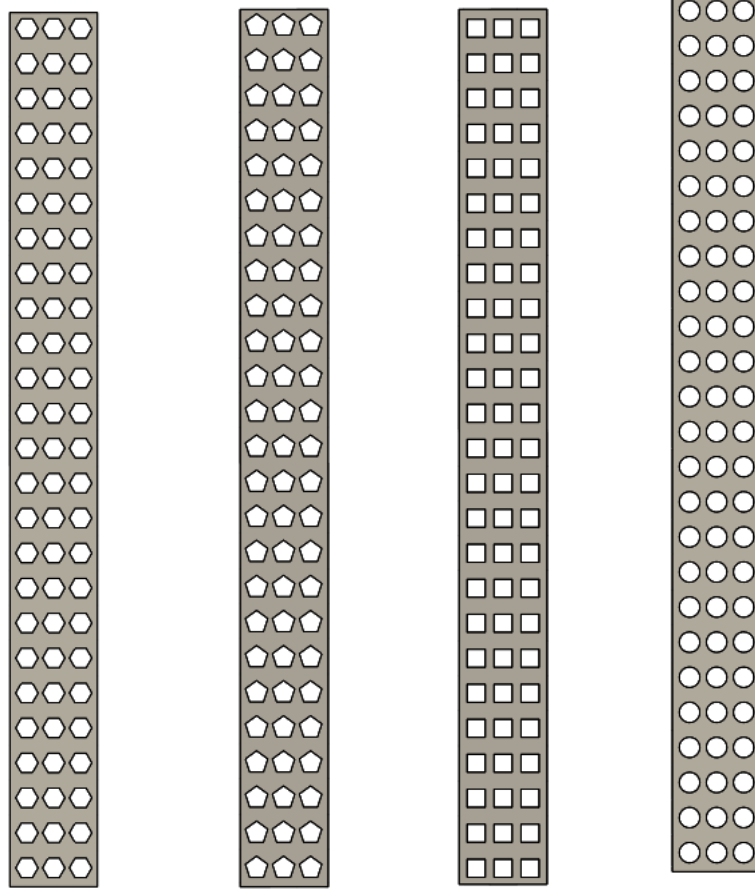
$$V_{daire} = 6 \text{ mm} * 720 \text{ mm}^2$$

Kareden toplam çıkartılan hacim,

$$V_{daire} = 4320 \text{ mm}^3 \text{ olarak belirlendi.}$$

Sonuç olarak aşağıdaki Şekil 5.19’da görülen tasarlanan kirişlerin alan çıkarımı yapılacak tek bir yüzünden, her satırda 3’er adet, her sütunda 25’er adet olacak şekilde, toplam 75 adet sırasıyla, aynı alanlara sahip eşkenar üçgen, kare, eşkenar beşgen, eşkenar altıgen ve daire olacak şekilde delikler açılarak alan çıkarımı yapılmıştır. Tek

bir yüzdeki çıkarılan toplam alan  $720 \text{ mm}^2$ , toplam çıkarılan hacim ise,  $4320 \text{ mm}^3$  olarak belirlenmiştir. Parçanın her bir yanından 1 mm boşluk bırakılarak kenar duvarlar yapılmıştır.

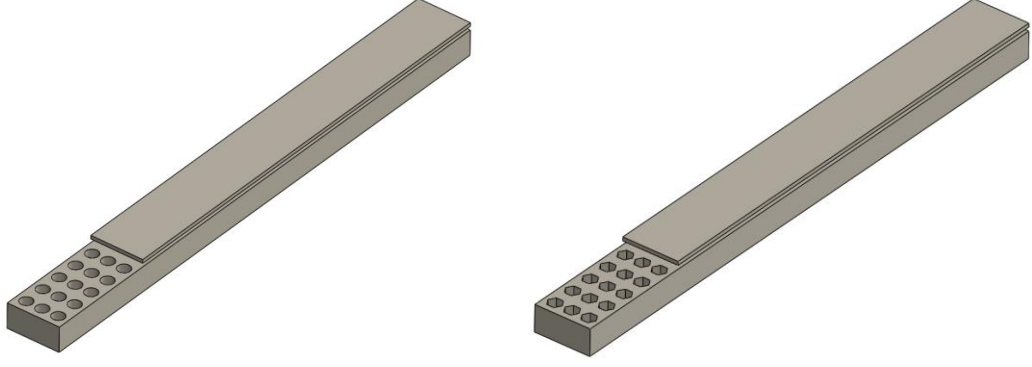


**Şekil 5.19:** Üçlü Altıgen- Beşgen- Kare ve Daire Çekirdek Yapılarının SD Solidworks Ortamındaki Tam Görünümü

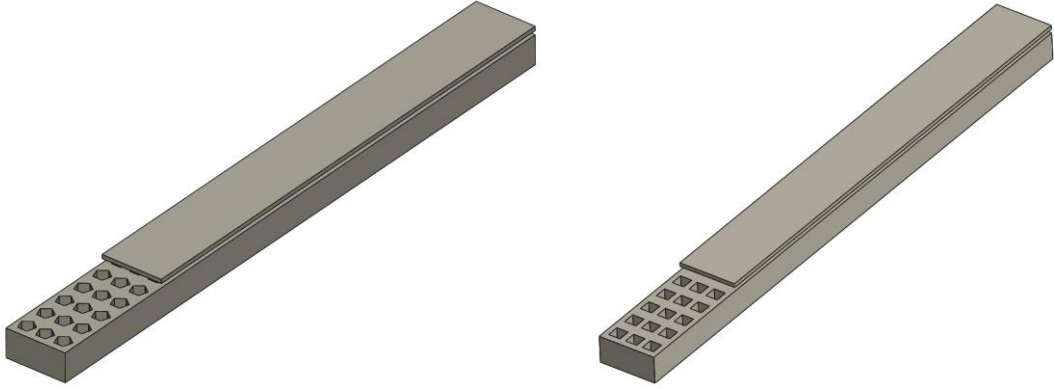
Şekil 5.20 ve 5.21’de görüldüğü üzere yapılan tasarımların alt ve üst yüzlerine 1’er mm’lik plaka koyularak deliklerin üst ve alt bölgelerinin kapatılması ile bal peteği yapısında bir sandviç kiriş elde edilmesi sağlandı.

Toplam oluşan yeni parçanın yüzey boyutları  $150 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  olup, et kalınlığı 8 mm oldu.

Yapılan deneysel analizler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapılan ANSYS Workbench analizleri oluşan bu ana parça boyutlarında olan kirişler üzerinden yapıldı.



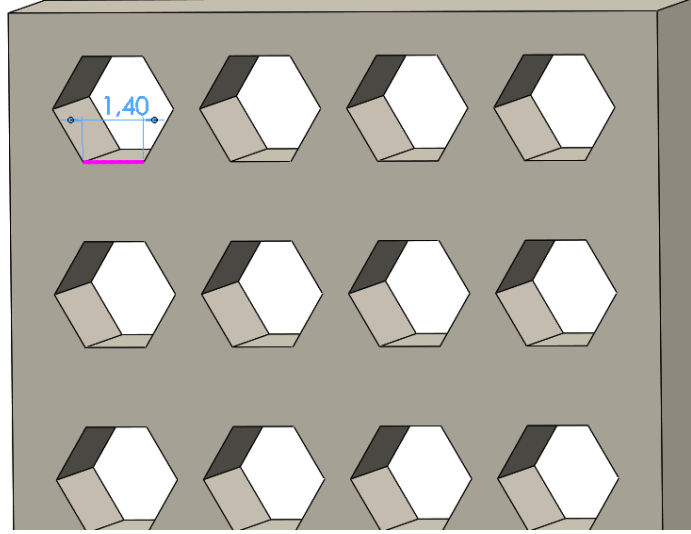
Şekil 5.20: Üçlü Daire Ve Altıgen Bal Peteği Yapısındaki Kirişler



Şekil 5.21: Üçlü Eşkenar Beşgen Ve Kare Bal Peteği Yapısındaki Kirişler

### 5.2.2.3 Çıkartılan Alanların Her Satırda 4 Adet Olması Durumu

Çıkartılan alanların her satırda 4 adet olması ve boşluklar arasındaki mesafelerin yatay düzlemde 1.14 mm ve düşey ekseninde ise 2.0 mm'dir. Daha öncede belirtildiği gibi her satırda 3 adet ve her satırda 4 adet delik olma durumunun ana hesaplaması ve tasarımları birbirine benzer olduğu için her satırda 4 adet delik olma durumunun hesaplamaları ve tasarımları ayrıntılı olarak verilmemiştir. Onun yerine tasarımların SD SOLIDWORKS tasarımları ve çıkartılan yaklaşık hacimleri verilmiştir. Şekil 5.22'de görüldüğü üzere her satırda 4 adet delik olması durumunda da deliklerin bulunduğu yüzden çıkan toplam alanın  $720 \text{ mm}^2$  olmasına dikkat edildi.



Şekil 5.22: Dörtlü Eşkenar Altıgen Bal Peteği Yapısının SolidWorks Ortamındaki Kesit Görünümü

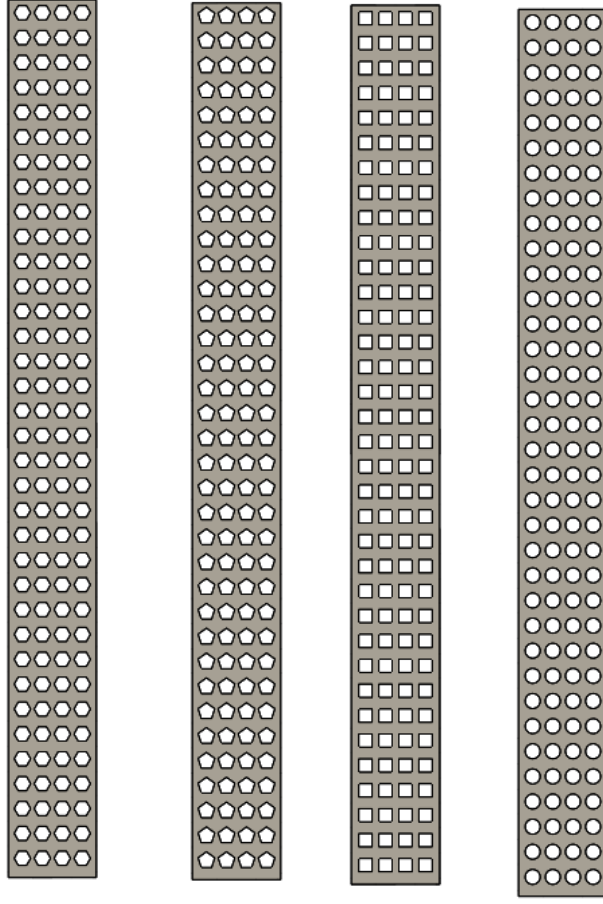
Şekil 5.23’de görüldüğü üzere yapılan tasarımlarda her bir deliğin (eşkenar altıgen, kare, eşkenar beşgen ve daire) her bir alanının  $30,6 \text{ mm}^2$  dir. Her bir satırda 4 ve her bir sütunda 35 olarak toplam 140 adet delik olması ve bu deliklerin eşmerkezli alınması ve her bir kirişten çıkartılan toplam hacmin  $4320 \text{ mm}^3$  olmasına dikkat edilmiştir.

Yapılan tasarımların alt ve üst yüzlerine 1’er mm’lik plaka koyularak deliklerin üst ve alt bölgelerinin kapatılması ile bal peteği yapısında bir sandviç kiriş elde edilmesi sağlandı.

Toplam oluşan yeni parçanın yüzey boyutları  $150 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  olup, et kalınlığı 8 mm oldu.

Yapılan deneysel analizler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapılan ANSYS Workbench analizleri oluşan bu yeni parçalar üzerinden yapıldı.





**Şekil 5.23:** Dörtlü Altıgen- Beşgen- Kare Ve Daire Çekirdek Yapılarının Solidworks Ortamındaki Tam Görünümü

### 5.2.3 $\Theta$ Açısı Verilerek Elde Edilen Kirişlerin Hesaplanması ve Tasarımı

İçi dolu hücresel hibrit yapılı bal peteği kirişlerinin tasarımında olduğu gibi  $\Theta$  açılı kirişlerin tasarımında da ana kiriş'in üzerinden  $\Theta$  açısı verilerek yeni tasarımlar yapılmıştır.

Şekil 5.24'de görüldüğü üzere B uzunluğunun formülü;

$$B = b + 2h \quad (5.1)$$

h uzunluğunun formülü  $\Theta$  açısından faydalanılarak;

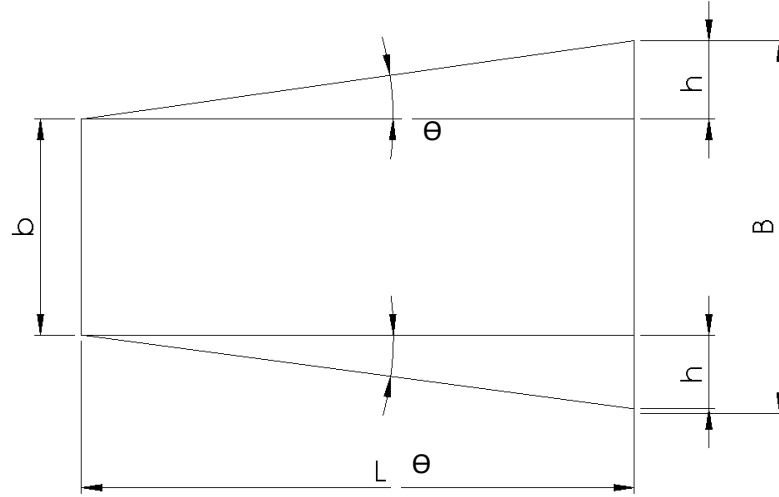
$$h = \tan(\Theta) * L \quad (5.2)$$

bulunur. h uzunluğu 1.1'de yerine konulursa B uzunluğunun formülü;

$$B = b + 2 * \tan(\Theta) * L \quad (5.3)$$

olarak bulunur. L uzunluğu tüm parçalarda eşit ve 150 mm olarak kabul edilir.

$$L = 150 \text{ (mm)}$$



Şekil 5.24:  $\Theta$  Açısı Verilmesiyle Oluşacak Yeni Açılı Parçaların 2 Boyutlu Görünümü

Yukarıdaki şekil 5.24'da kirişe  $\Theta$  açısının uygulanması ve h değerlerinin eklendiği yerler ve B uzunluğu gösterilerek,  $\Theta$  açısının değişmesi ile yeni oluşacak kirişlerin 2 boyutlu görünümü şekillendirilmiştir.  $\Theta$  açısını  $0^\circ$  değerinden başlayarak (0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-1,0)  $0.1^\circ$  artırılarak toplam 11 adet parça tasarımı yapılmıştır.

### 5.2.3.1 $\Theta$ Açılarına Göre Uzun Taraf (B) Uzunluklarının Bulunması

- **1 numaralı parça (Ana Parça) ; ( $\Theta_1 = 0^\circ$ )**  
 $\tan(0) = 0$  olduğu için değerler değişmemiştir ve b uzunluğu ile B uzunluğu birbirine eşit ve 15 mm'dir.
- **2 numaralı parça: ( $\Theta_2 = 0,1$ )**

$$B_2 = b + 2 * \tan(\Theta_2) * L$$

$$= 15 + 2 * \tan(0,1) * 150$$

$$= 15 + 2 * (0,2617)$$

$$B_2 = 15,5235 \text{ (mm)}$$

Yapılan diğer parçaların hesaplamasında  $B = b + 2 * \tan(\Theta) * L$  ana formülü kullanılarak  $\Theta$  açısı değiştirilerek diğer parçaların boyutsal ebatları bulunmuştur.

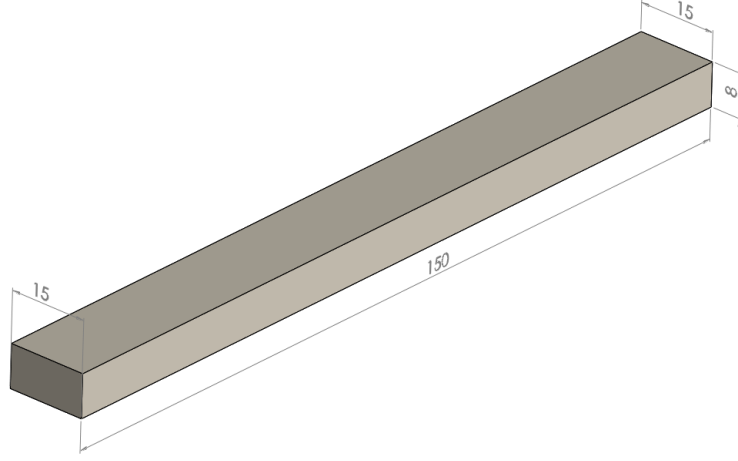
Sonuç olarak yapılan hesaplamalar sonucunda oluşan yeni 10 adet açılı kirişin boyutsal özellikleri Tablo 5.1’de verilmektedir.

**Tablo 5.1:** Üretilen Açılı Parçaların Boyutsal Özellikleri

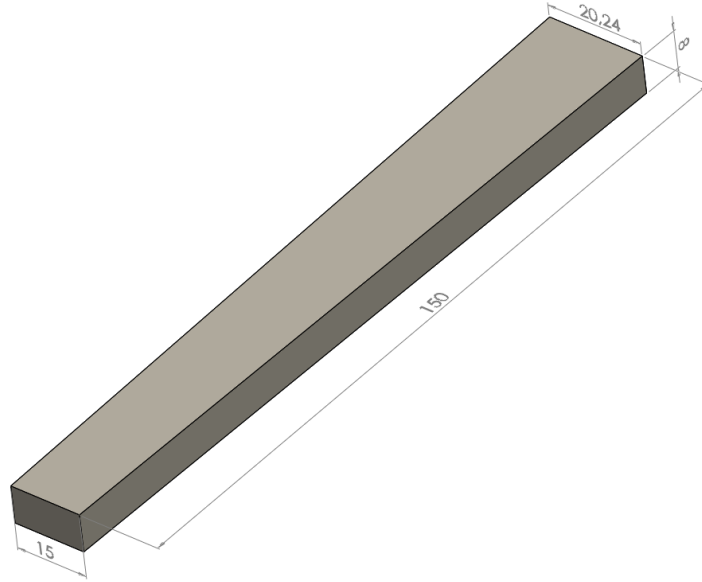
Parça numarası	b (kısa kenar)	L (kiriş uzunluğu)	$\Theta$ (açı değeri)	B (uzun kenar)	h (et kalınlığı)
1	15	150	0,0	15,000	8
2	15	150	0,1	15,523	8
3	15	150	0,2	16,047	8
4	15	150	0,3	16,570	8
5	15	150	0,4	17,094	8
6	15	150	0,5	17,618	8
7	15	150	0,6	18,141	8
8	15	150	0,7	18,665	8
9	15	150	0,8	19,189	8
10	15	150	0,9	19,712	8
11	15	150	1,0	20,236	8

Yapılan hesaplamalar sonucunda yukarıdaki tablo 5.1’de boyutsal özellikleri bulunan 11 adet parçanın SD SolidWorks ortamında tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımlarda  $\Theta$  açısı değiştirilerek “b” kenarının sabit bırakılıp “B” tarafının  $\Theta$  açısına bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir. Şekil 5.25’de  $\Theta$  açısı verilmeyen ana parça bulunmaktadır.

Şekil 5.26’da ise SD Solidworks ortamında katı modelleme olarak tasarımı yapılan 11 ( $\Theta=1,0$ ) numaralı parça bulunmaktadır.



Şekil 5.25:  $\theta$  Açısı Verilmeyen 1 Numaralı Ana Kiriş

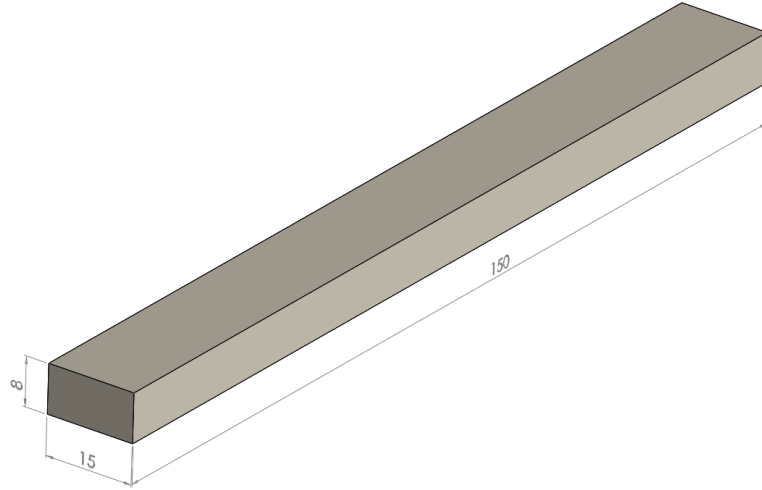


Şekil 5.26: Açılı Olarak Üretilen 11 Numaralı Kiriş ( $\theta=1^\circ$ )

### 5.3 Yoğunluk Hesabı

Çalışmada kullanılan PLA filamanının malzeme yoğunluğunu bulmak için yoğunluk hesabı yapılmıştır. Elde edilen yoğunluk değeri, nümerik analiz, analitik çözüm ve deneysel analiz yapılırken kullanılmıştır.

Deneysel olarak kullanılan PLA malzemesinin yoğunluğunu bulmak amacıyla test edilecek kiriş ebatlarında içi dolu bir kiriş üretildi. Üretilen numune 150 mm uzunluğunda, 15 mm genişliğinde ve 8 mm et kalınlığındadır. Tasarımı yapılan numunenin, Ultimaker Cura programında 'gcode'ları çıkartıldı ve 3B yazıcı ile üretimi yapıldı. 3B Yazıcı ile üretilen kiriş ve SD Solidworks tasarımı Şekil 5.27'de gösterilmektedir.



**Şekil 5.27:** Yoğunluk Deneyinde Kullanılan Ana Kirişlerin Ebatları ve SD Solidworks Görünümü

Üretilen her bir kirişin yoğunluğunu belirlemek için, numuneler RADWAG (NAS-220/C/2) marka hassas terazi ile ağırlıkları ölçülmüştür. Kullanılan hassas terazi ve ana dolu parçanın (150\*15\*8 mm) ölçüm anındaki görüntüsü aşağıdaki Şekil 5.28'de gösterilmiştir. Hassas terazinin Özellikleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.2:** Kullanılan RADWAG (NAS-220/C/2) Hassas Terazinin Ana Ölçüleri ve Temel Özellikleri

Maksimum Ölçülen Ağırlık	220 g
Maksimum Ölçülen Ağırlık	10 g
Ölçüm Hassasiyeti	0,01 g
Cevap Süresi	2 sn



**Şekil 5.28:** RADWAG (NAS-220/C/2) Hassas Terazisi ve Ana Parçanın Ağırlığının Ölçülmesi

Yapılan ölçüm sonucunda Ana Kiriş numunesinin ağırlığı 22,04 gram olarak ölçülmüştür. Ağırlıkların tespitinden sonra numunenin ebatları üretimde hataların olabilme ihtimaline karşı kumpas ile ölçülerek hacmi belirlendi. Hacim belirlenirken numune dikdörtgen plazma yapısında olduğu için her bir uzunluğu çarpılarak hacmi bulunmuştur.

**Tablo 5.3:** Kullanılan Ana Kirişin Ebatları

Uzunluk	q	150 mm
Genişlik	y	15 mm
Et kalınlığı	z	8 mm

$$V_{\text{dikdörtgen}} = q \cdot y \cdot z \text{ ise;}$$

$$V_{\text{dikdörtgen}} = 150 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm}$$

$$V_{\text{dikdörtgen}} = 18000 \text{ mm}^3$$

$m$  = kütle (gram) : dolu numunenin ağırlığı

$V$  = Hacim ( $\text{mm}^3$ ) : dolu kütlenin hacmi ise ;

Böylece  $\rho = \frac{m}{V}$  yoğunluk formülünden, numunenin yoğunluğu tespit edilir (Demir ve diğ., 2011).

$$\rho = \frac{22.04}{18000} \text{ ise ;}$$

$$\rho = 1,224 \cdot 10^{-3} \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3} \text{ olur.}$$

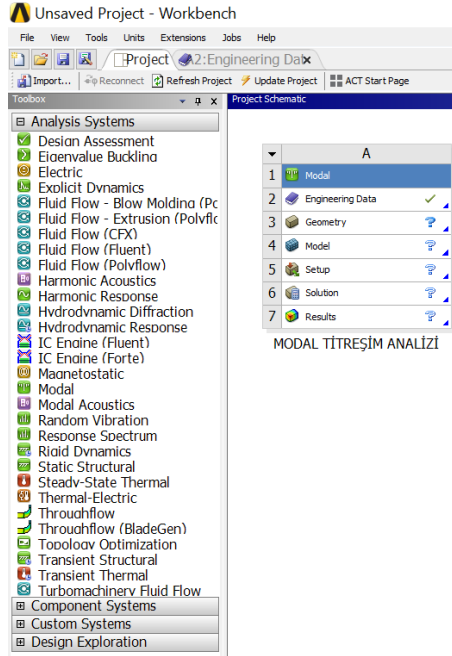
Bulunan  $\frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}$  'ü  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  'e çevrildi ve bunun için bulunan sonuç  $10^6$  ile çarpıldı.

Sonuç olarak dolu numunenin yoğunluğu  $1224 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak yoğunluk deneyi sonucunda bulunan yoğunluk değeri kirişlerin nümerik analiz, analitik çözüm ve deneysel analiz yapılırken kirişlerin mod frekanslarını bulmada kullanılmıştır. Analitik çalışma da Atlıhan ve Ergene'nin oluşturdukları analitik model kullanılmıştır (Atlıhan ve Ergene 2018).

## 5.4 Ansys 19.0 Workbench ile Analizlerin Yapılması

### ➤ İlk olarak ANSYS 19.0 paket programı açıldı.



Şekil 5.29: Ansys Workbench Programının Giriş Sayfası

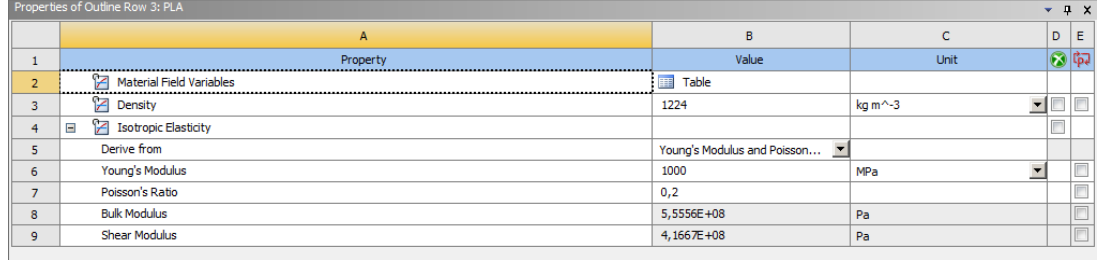
Açılan programda Modal analiz kısmı seçilip Project Schematic kısmına eklendi (Şekil 5.29). Bunun amacı yapılacak olan analizlerin modal analiz olmasıdır. Çünkü çalışmada yapılacak olan titreşim analizleri ANSYS ortamında Modal Analiz olarak yapılmaktadır.

### ➤ PLA Malzemesinin Değerlerinin Programa Girilmesi

Daha sonra Şekil 5.29’da görüldüğü üzere engineering data sekmesine sağ tık yapıp edit sekmesi açılarak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Bunun nedeni kullanılan malzemenin özelliklerinin ANSYS ortamında tanıtılmasıdır. Bu sayede yapılacak analizlerle, yapılan gerçek deneylerin karşılaştırılması sağlanacaktır. Genel olarak ANSYS ortamında tanımlı malzemeler bulunmaktadır. Fakat PLA malzemesi tanımlı değildir. Bu çalışmada kullanılan PLA malzemesinin özellikleri diğerlerinden



farklı olacağı için ve yapılan deneylerle analizlerin birbirini desteklemesi için, kullanılan malzemenin özellikleri tespit edilmiştir. Burada da tespit edilen malzeme özelliklerinin tanıtılması yapılmıştır.



	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1224	kg m <sup>-3</sup>		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
6	Young's Modulus	1000	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,2			
8	Bulk Modulus	5,5556E+08	Pa		
9	Shear Modulus	4,1667E+08	Pa		

Şekil 5.30: PLA Malzemesinin Tanımlanması Ve Değerlerinin Girilmesi

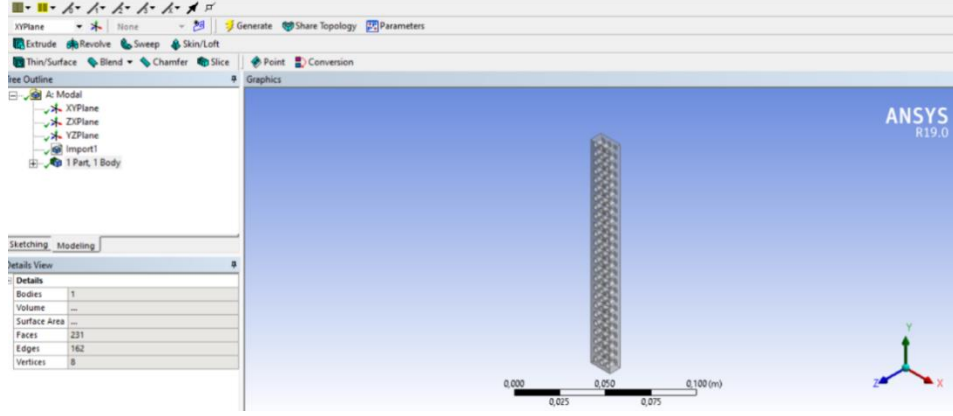
### ➤ Solid Ortamında Tasarımı Yapılan Parçanın Ansys Workbench Ortamına Alınması

Geometry kısmına sağ tık yapıp, Replace Geometry, Browse seçilip, analizi yapılacak olan solid parçasının seçimi yapılmıştır.

Edit Geometry in Designer seçeneğine tıklanıp, parçanın ANSYS ortamına gelmesi sağlanmıştır.

Sonra açılan Şekil 5.30'da açılan pencerede Genarete tuşuna basılarak, parçanın gözükmesi ve hata olup olmadığına bakılması sağlanmıştır.

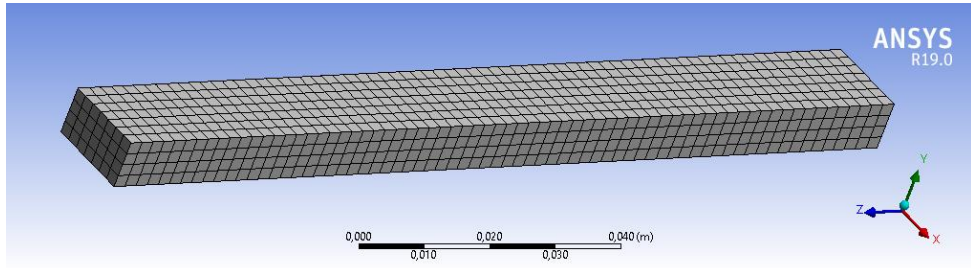
Daha sonra bu sayfa kapatılıp, Model kısmına sağ tık yapıp, Edit seçeneğine tıkladığında, modal analiz sayfasının açılması sağlanır.



Şekil 5.31: Parçanın Workbench Ortamına Yükleme Görüntüsü

### ➤ Meshleme İşleminin Yapılması

Analiz kısmında ilk olarak parçanın meshleme işlemi yapıldı. Ana dolu parçanın meshleme işlemi aşağıdaki Şekil 5.32’de gösterilmiştir.



Şekil 5.32: Kirişin Meshleme Görüntüsü

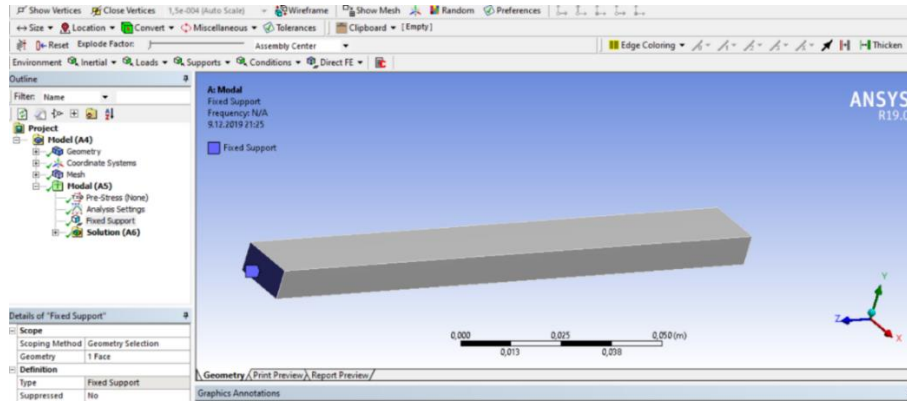
### ➤ Burada meshleme değerleri olarak girilen aşağıdaki değerler aşağıdaki gibidir;

- Display Style= Body Color
- Size Function= Adaptive
- Relevance Center=Fine
- Span Angle Center=Fine
- Nodes=10250
- Element=1932

Kullanılan değerler sonuçların daha doğru çıkması için daha hassas seçilmeye çalışılmıştır.

### ➤ Kirişin Bir Tarafının Sabit Tuturulması

Meshleme işleminin ardından parçanın analiz edilmesi için, deneysel yöntemde yapıldığı için parçanın bir ucu sabitlenmiştir (Ankastre mesnet). Bu işlem için Modal – Supports – Fixed Support seçilip, aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere sabit tutulacak uç seçilmiştir (Şekil 5.33).



Şekil 5.33: Kirişin Bir Tarafının Sabitlenmesi

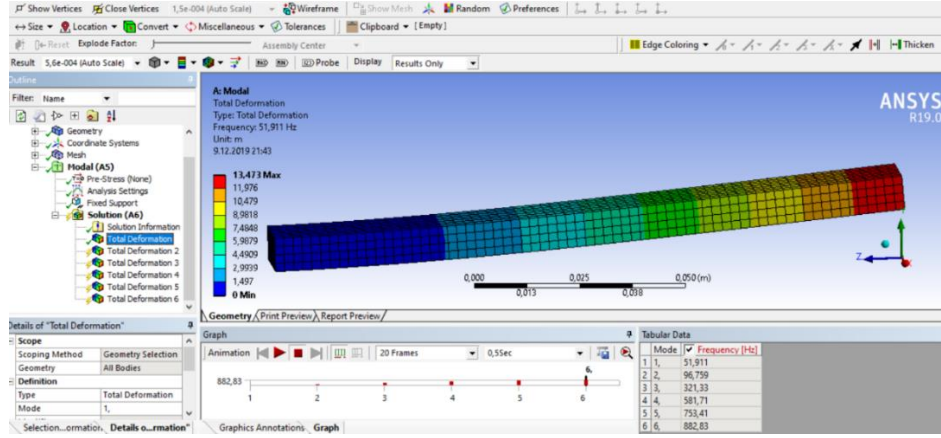
### ➤ Total Deformation Uygulanması

Parçanın analizi için solution bölümünden parçaya total deformation uygulanıp titreşim hareketleri ve titreşim değerleri bulunmuştur.

Bunun için solution – deformation – total deformation seçeneği uygulanır.

Seçilen her modun mod sayısını değiştirmek için Solution altında seçilen total deformation'lar seçilir ve details of "Total Deformation" seçeneği altındaki definition – mode – seçeneklerinden 1-2-3 değerleri sırayla girilerek, titreşim frekansının 1. Mod, 2. Mod ve 3. Mod değerlerinin bulunması sağlanır.

Total deformation değerleri belirlendikten sonra Solve komutu ile analiz yapılmıştır. Yapılan analiz ve titreşim mod değerleri Şekil 5.34'de görülmektedir.



Şekil 5.34: Ansys Ortamında Yapılan Titreşim Analizinin Genel Görüntüsü

## 5.5 FFT Titreşim Analizi

Periyodik bir fonksiyonu oluşturan harmonik fonksiyonları ayırım metoduna FFT, yani Hızlı Fourier Çevirimi denir. FFT analizinin ana prensibi olan Fourier Serisi; periyodik bir sinyali meydana getiren, basit harmonik sinyallerin oluşturduğu seridir. Bu seri sonucu oluşan çevirim, belirlenen harmonik sinyallerin, frekans ekseninde dizildiği grafik FFT Spektrum grafiği olarak bilinmektedir (TMMOB, 1994; dewesoft.com, 2019).

Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) genellikle titreşim analizinde kullanılan, istatistiksel tabanlı, matematiksel bir işlemdir. Aldığı karışık sinyal yumaklarını işler, ayırıştırır ve oluşan titreşim frekansının büyüklüğünü ve şiddetini istenilen şekilde ya da grafik olarak gösterir. Sonuç olarak, sahip olunan FFT sinyallerini, zaman alanından frekans alanına dönüştürülmesinde kullanılır. FFT tekrarlanmayan sinyalleri dikkate almayıp, karmaşık sinyaller içinde periyodik olanları belirleyip harmonik bileşenlerine ayırır. FFT sinüs dalgaları içerisindeki zaman verilerini ayırıştırılmaktadır (wikipedia, 2020; dewesoft.com, 2019).

Çalışmada kullanılan Dewesoft FFT spektrum analizörü, gelişmiş ortalama alma, seçilebilir çözünürlük (64.000 satır ve daha fazlası) veya bant genişliğinin doğrudan spesifikasyonu (örn. 0.01 Hz) ile spektral analiz için tüm ana fonksiyonları sağlamaktadır. Birden fazla kanal bir FFT analiz cihazında kolaylıkla karşılaştırılabilir, görüntülenebilir ve analiz edilebilmekte kullanılmaktadır.

Ölçüm sırasında gerçek zamanlı doğrudan çevrimiçi frekans spektrumu analizi veya depolanan veriler üzerinde çevrimdışı frekans analizi sunar.

Dewesoft X FFT analizörü, farklı parametrelerin otomatik tespiti için birden fazla işaretleyicinin ayarlanmasına izin verir.

Dewesoft X FFT analizörü, otomotiv, havacılık, güç ve NVH uygulamaları için güçlü veri işleme özelliklerine sahiptir. Bunların yanı sıra Dewesoft X, uygulamaya özgü alanlar için gelişmiş matematik modülleri sunmaktadır (dewesoft.com, ; Değirmenli, 2017).

### 5.5.1 Veri Toplama Cihazı DEWE 43 A

Aşağıdaki Şekil 5.35’de .alışmada kullanılan DEWE 43 A görülmektedir. DEWE 43 A, çeşitli dinamik verileri toplamada kullanılan, çok yönlü, karmaşık yapılandırma ayarları olmayan, veri toplamayı sağlayan test ve ölçüm cihazıdır.



Şekil 5.35:DEWE 43 A Veri Toplama Cihazı

DEWE 43 A, her bir veri kaynağının farklı örnekleme oranlarına sahip olmasına rağmen, tüm verileri zamanlama ve GPS senkronizasyon teknolojisi sayesinde mikro saniye hassasiyetle senkronize edebilmektedir.

DEWE-43A donanımı, voltaj, gerilim, ICP / IEPE, charge, CAN, sayaç, enkoder ve dijital gibi farklı sinyalleri okuyabilme özelliği vardır. Buna ek olarak, dahil edilen Dewesoft X yazılımı ile, GPS, Flexray, Ethernet, Seri, PCM telemetri ve diğer birçok arabirimden verileri kolayca alabilir ve birleştirilebilmektedir.

## DEWE-43A'nın Temel Özellikleri

- Ağırlığı 1.5 Kg
- 8 Adet 200 Khz Anti-Aliased Dinamik Giriş
- 8 Adet İleri Düzey Sayaç (Advanced Counters)
- 24 Adet Dijital Giriş
- 2 Adet Can Girişi
- Ac/Dc Adaptörler
- Dewesoft'un Ödüllü Veri Toplama Ve İşleme Yazılımı İçermektedir.
- Ms1 Adaptörleri İle Üniversal Veri Toplama İmkanı Sağlar (Dewesoft.Com, )

## 5.6 Titreşim Deney Seti

Kiriş yapılarının titreşim analizinin deneysel metodunda en çok kullanılan yöntemlerden biri, kirişe bir sinyal verilmesi ve verilen bu sinyalin titreşim grafiğinden kirişin doğal frekansının hesaplanmasıdır. Şekil 5.36'de görüldüğü üzere bu çalışmada kiriş bir ucundan sabitleme aparatının iki çenesine 30 mm'lik çıkıntısı ile tutturulmuştur ve diğer tarafı serbest bırakılarak ankastre yapılı kiriş haline getirilmiştir.



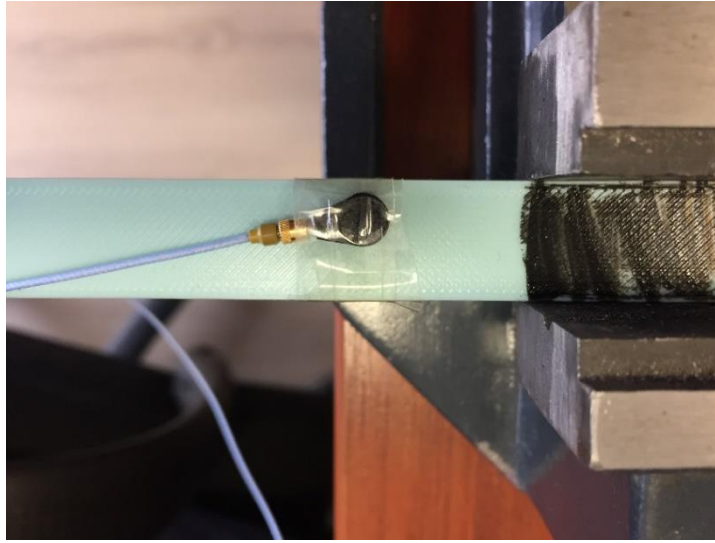
**Şekil 5.36:** Kirişin Sabitleyiciye Bağlanarak Deney Mekanizmasının Oluşturulması

Bu çalışmada kullanılan titreşim analizi test düzeneği, sinyali alan bir ivme ölçer PCB35C22 model Piezoelectric ICP Accelerometer, ivme ölçerden gelen verileri toplamaya yarayan bir veri toplama cihazı DEWE 43A, veri toplama cihazından gelen impulsları almaya ve okumaya yarayan bir bilgisayar titreşim

programını DEWESoft X ve programda gelen impulsları grafiğe aktaran analiz arayüzü, FTT'den oluşmaktadır.

Deneysel titreşim analizinde ilk olarak, titreşimi yapılacak kiriş numunesine dışarıdan elle titreşim hareketi verilmiştir. Kirişte oluşan titreşimleri, kirişin üst yüzeyine monte edilmiş olan aşağıdaki şekilde görülen Piezoelectric ICP Accelerometer ivme ölçer gelen titreşim sinyalini veri toplama cihazı DEWE 43 A'ya göndermeyi sağlar. Çalışmada kullanılan PCB 352C22 Tipi ivme ölçerin özelliği -54 ile 121 °C arasındaki sıcaklıklardaki çevre şartlarında ve 0.3 ile 200000 Hz çalışma frekansına kadarki koşullarda çalışabilmesidir. Kütlesi yaklaşık 0.5 gram olduğu için kullanılan kirişe göre çok az bir ağırlık olup, ağırlığı kolaylıkla ihmal edilebilmektedir (pcb.com, 2019) .

Aşağıdaki Şekil 5.37'de görüldüğü üzere kiriş numunesinin sabitleme aparatının yakın kısmına bağlantısı yapılmıştır.



**Şekil 5.37:** İvme Ölçer'in Kiriş Numunesi Üzerine Yerleştirilmesi

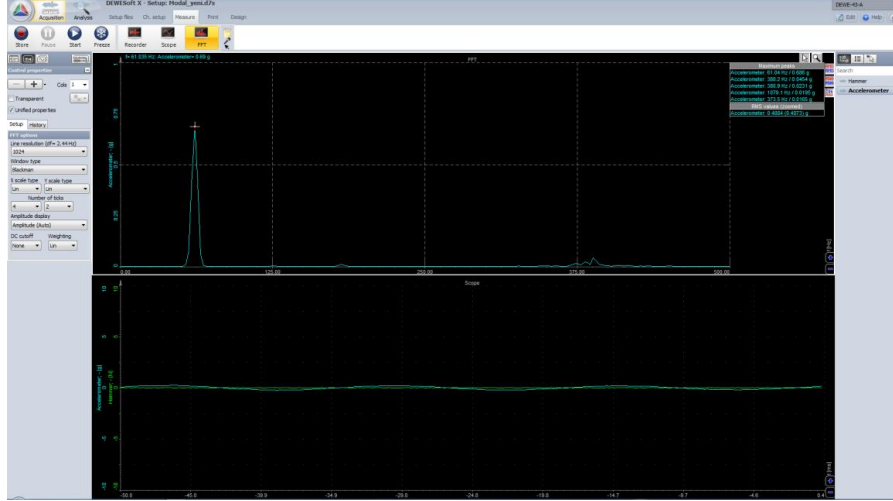
İvmeölçer, aldığı titreşim sinyallerini, kablo aracılığıyla veri toplama cihazı olan DEWE 43A'ya gönderir. DEWE 43 A, dinamik verileri toplamada kullanılan ve hızlı veri aktarımı yapabilen test ve ölçüm cihazıdır. Aşağıdaki Şekil 5.38'de çalışmada kullanılan DEWE 43 A'nın bağlantısı ve kendisi görülmektedir.

Veri toplama cihazı topladığı sinyalleri bilgisayar programına gönderir. Çalışmada kullanılan DEWESoft X gelişmiş ortalama almaya yarayan, 64.000'den fazla seçilebilir çözünürlük sağlayan ve bant genişliğinin doğrudan spesifikasyonu

(örn. 0.01 Hz) ile spektral analiz için tüm ana fonksiyonları sağlamaya yarayan bir titreşim analiz programıdır. Bilgisayar programı gelen impulsları FFT analizine gönderir ve kirişin titreşim değerleri grafiğe aktarılmış olur (Şekil 5.39).



Şekil 5.38: Çalışmada Kullanılan DEWE 43 A Veri Toplama Cihazı ve Bağlantı Kabloları



Şekil 5.39: Deneysel Analiz ile Elde Edilen Titreşim Frekansının FFT Analizi ile Grafiğe Aktarılması



## 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 6.1 $\Theta$ Açısının Doğal Frekans Titreşimlerine Etkisi

$\Theta$  açılı parçaların analitik titreşim analiz sonuçları;

**Tablo 6.1:** Kısa Taraftan (b) Sabit Tutulduğunda

Parça Numarası	Açı değeri ( $\Theta$ )	1. Mod	2. Mod	3. Mod	Mod Birimi
1	0	51.82	323.87	907.88	Hertz
2	0.1	50.9755	318,59	893.09	Hertz
3	0.2	50.0994	313.12	877.74	Hertz
4	0.3	49.2068	307.54	862.10	Hertz
5	0.4	48.3037	301.89	846.28	Hertz
6	0.5	47.3878	296.17	830.23	Hertz
7	0.6	46.4602	290.37	813.98	Hertz
8	0.7	45.5217	284.51	797.54	Hertz
9	0.8	44.5727	278.57	780.91	Hertz
10	0.9	43.6153	272.59	764.14	Hertz
11	1.0	42.6487	266.55	747.20	Hertz

Tablo 6.1 incelendiğinde kirişin kısa tarafından tutulduğunda (b) mod sayısı arttığında kirişin doğal frekans değeri artmaktadır.  $\Theta = 0^0$  hariç tutulduğunda kiriş değişken kesit halini aldığı anda açı değeri ( $\Theta$ ) arttığında kirişin mod 1, mod 2 ve mod 3 frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu bize kirişin  $\Theta$  değeri değiştirilerek doğal frekansların değiştirilebileceğini göstermektedir.

Aşağıdaki tablo 6.2’de görüldüğü üzere,  $\Theta$  açılı kirişin uzun tarafından tutulduğunda (B) mod sayısı arttığında kirişin doğal frekans değeri artmaktadır.  $\Theta = 0^0$  hariç tutulduğunda kiriş değişken kesit halini aldığı anda açı değeri ( $\Theta$ ) arttığında kirişin mod 1, mod 2 ve mod 3 frekans değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu bize kirişin  $\Theta$  değeri değiştirilerek doğal frekansların değiştirilebileceğini göstermektedir. Aynı zamanda kirişin kısa veya uzun tarafından tutulmasıyla da kirişin doğal frekans değerlerinin değişebileceği gösterilmiştir.

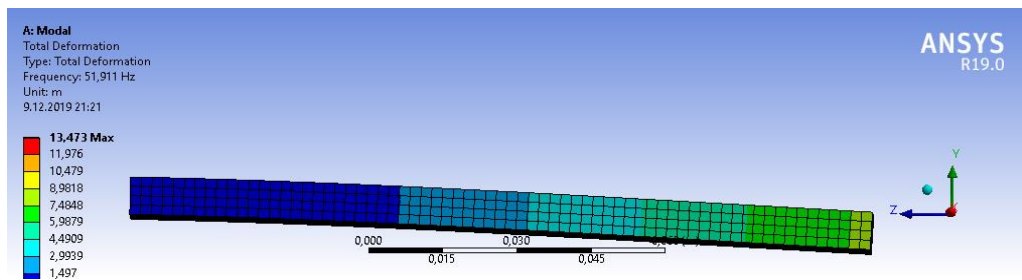
**Tablo 6.2:** Uzun Taraftan (B) Sabit Tutulduğunda

Parça Numarası	Açı değeri ( $\Theta$ )	1. Mod	2. Mod	3. Mod	Mod Birimi
1	0	51.82	323.87	907.88	Hertz
2	0.1	52.6598	329.12	922.59	Hertz
3	0.2	53.4861	334.28	937.07	Hertz
4	0.3	54.2949	339.34	951.24	Hertz
5	0.4	55.0878	344.29	965.13	Hertz
6	0.5	55.868	349.17	978.80	Hertz
7	0.6	56.6364	353.97	992.26	Hertz
8	0.7	57.3939	358.71	1005.54	Hertz
9	0.8	58.1418	363.38	1018.64	Hertz
10	0.9	58.8802	368.00	1031.58	Hertz
11	1.0	59.6097	372.56	1044.36	Hertz

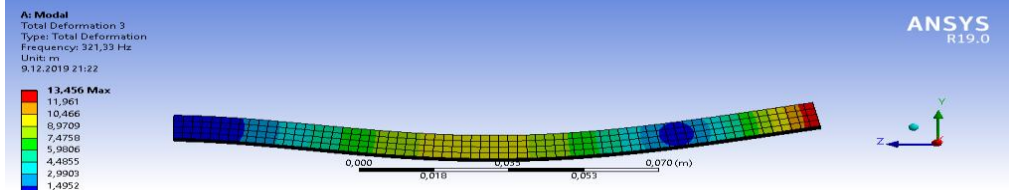
## 6.2 Dolu Kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile Titreşim Analizi

### 6.2.1 Dolu Kirişe Ait Titreşim Mod Değerleri

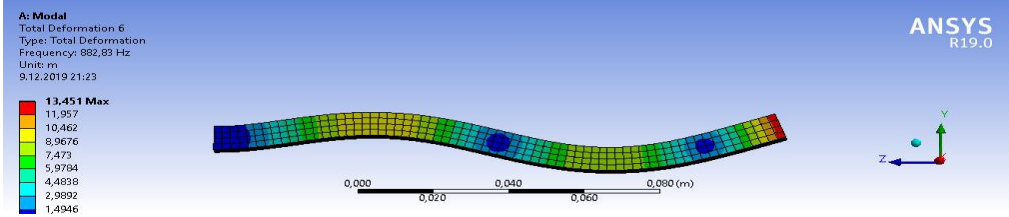
Aşağıdaki Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3’de içi dolu ana kirişe ait 1. Mod, 2. Mod ve 3. Mod Total Deformation titreşim analizleri gösterilmiştir. Şekillerdeki kirişin mavi tarafı sabit tutturulan yer olup kırmızı-yeşil ucu ise doğal frekans salınımlarının verildiği noktadır.



**Şekil 6.1:** 1. Mod Titreşim frekansı 51,911 Hertz’dir.



Şekil 6.2: 2. Mod titreşim frekansı 321,33 Hertz'dir.



Şekil 6.3: 3. Mod titreşim frekansı 882,33 Hertz'dir.

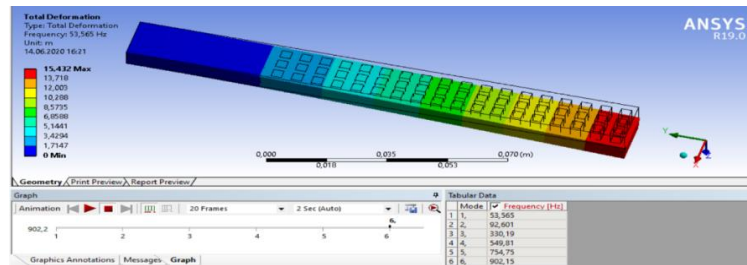
## 6.2.2 Bal Petekli Yapıların Ansys Ortamında Analiz Sonuçları

Bel petekli yapıların ANSYS ortamında analizi yapılırken, dolu parçanın analiz özelliklerini aynı olduğu gibi kullanılmıştır. Bu da daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

### 6.2.2.1 Üçlü Eş Merkezli Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi

Her satırda 3 adet delik olması durumunda yapılan analizlerdir.

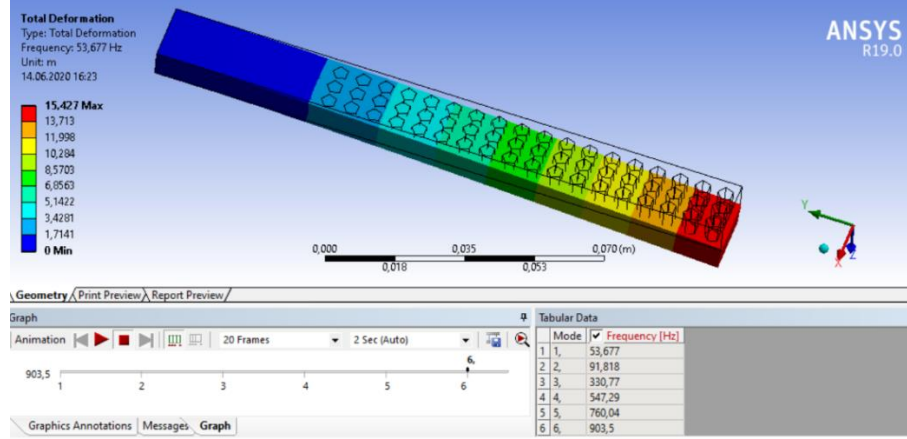
#### 6.2.2.1.1 Üçlü Kare Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi



Şekil 6.4: Üçlü Kare ANSYS Analizinin Genel Sonuçları ve ANSYS Görünümü

Şekil 6.4'de, üçlü kare yapısının ansys analizinin doğal frekans mod değerleri gösterilmiştir.

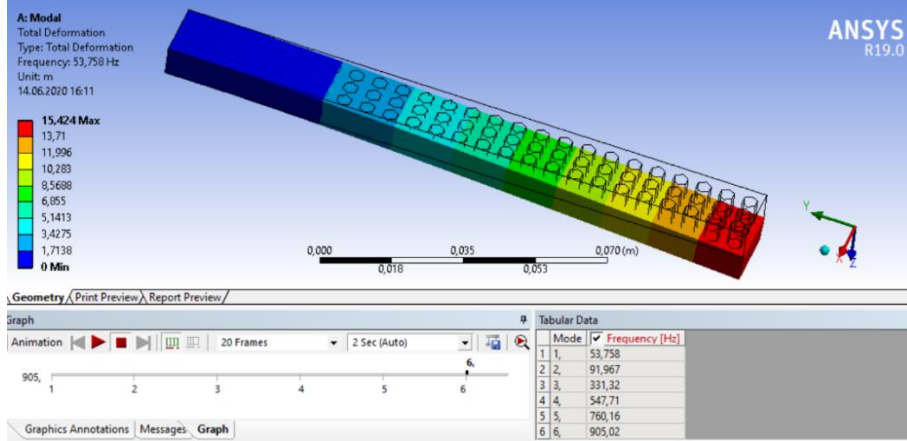
### 6.2.2.1.2 Üçlü Beşgen Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi



Şekil 6.5: Üçlü Beşgen ANSYS Analizinin Genel Sonuçları ve ANSYS Görünümü

Şekil 6.5’de, üçlü beşgen yapısının ansys analizinin doğal frekans mod değerleri gösterilmiştir.

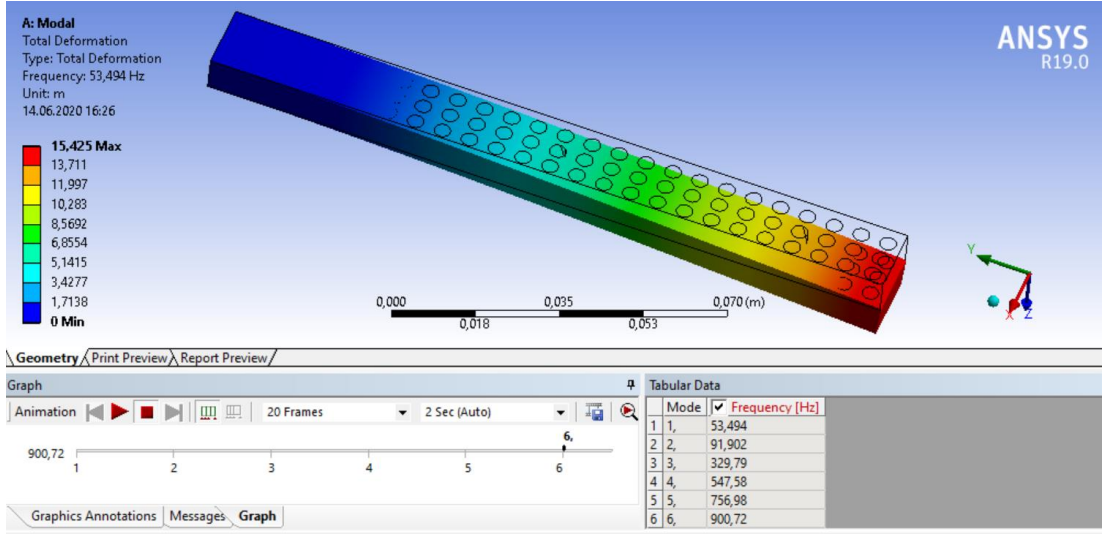
### 6.2.2.1.3 Üçlü Altıgen Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi



Şekil 6.6: Üçlü Altıgen ANSYS Analizinin Genel Sonuçları ve ANSYS Görünümü

Şekil 6.6’da, üçlü altıgen yapısının ansys analizinin doğal frekans mod değerleri gösterilmiştir.

### 6.2.2.1.4 Üçlü Daire Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizi



Şekil 6.7: Üçlü Daire ANSYS Analizinin Genel Sonuçları ve ANSYS Görünümü

Şekil 6.7’de, üçlü daire yapısının ansys analizinin doğal frekans mod değerleri gösterilmiştir.

Tablo 6.3: Üçlü Bal Peteği Yapılarının Ansys Analiz Sonuçları

Üçlü Yapılar	1. Mod	2. Mod	3. Mod	Mod Birimi
Üçlü Dörtgen Yapı	53,565	330,19	902,15	Hertz
Üçlü Beşgen Yapı	53,677	330,77	903,5	Hertz
Üçlü Altıgen Yapı	53,758	331,32	905,02	Hertz
Üçlü Daire Yapı	53,494	329,79	900,72	Hertz

Üçlü bal Peteği yapılarının Ansys analiz sonuçları Tablo 6.3’de incelendiğinde, tüm bal Peteği yapılarında mod sayıları artığında kirişin doğal frekans değerleri artmaktadır. En düşük frekans değeri 1. mod, 2. mod ve 3. mod değerleri için 53,464 Hz, 329,79 Hz ve 900,72 Hz değeri ile üçlü daire yapıda oluşmaktadır. Buna karşın en büyük doğal frekans değerleri 1. mod, 2. mod ve 3. mod değerleri için 53,758 Hz, 331,32 Hz ve 905,02 Hz ile üçlü altıgen yapıda elde edilmiştir. Bu değerler ile bal Peteği yapısının geometrisinin değişimi ile doğal frekans değerlerinin değişebileceği görülmüştür.

### 6.2.2.2 Dörtlü Eş Merkezli Bal Peteği Yapısının Ansys Titreşim Analizleri

Dörtlü balpeteği yapılarının ansys titreşim analizlerinin görüntüsü ve değerleri üçlü balpeteği yapılarına benzediği için şekiller sonuç olarak verilmeyip, tablo olarak verilmiştir (Tablo 6.4).

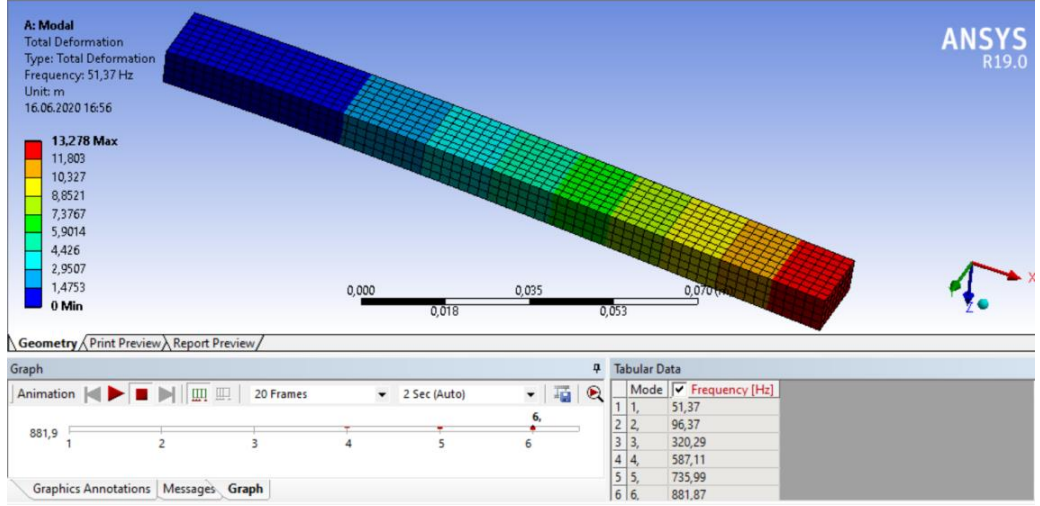
**Tablo 6.4:** Dörtlü Yapıların Ansys Analizlerinin Frekans Mod Değerleri

Yapı \ Mod	1. Mod (Hz)	2. Mod (Hz)	3. Mod (Hz)
Dörtlü Kare	53,359	329,12	899,59
Dörtlü Beşgen	53,170	327,87	895,79
Dörtlü Altıgen	53,132	327,61	895,64
Dörtlü Daire	53,068	327,32	895,15

Tablo 6.4’de da görüldüğü üzere tüm bal peteği yapılarında mod sayıları arttığında kirişin doğal frekans değerleri artmaktadır. En düşük frekans değeri 1. mod ve 2. mod değerleri için 53,068 Hz, 327,32 ve 895,15 Hz ile dörtlü daire bal peteği yapısında oluşmaktadır. Buna karşın en büyük doğal frekans değerleri 1. mod, 2. mod ve 3. mod değerleri için 53,359 Hz, 329,12 Hz ve 899,59 Hz ile dörtlü kare yapıda elde edilmiştir. Bu değerler ile bal peteği yapısının geometrisinin değişimi ile doğal frekans değerlerinin değişebileceği görülmüştür. Böylelikle kirişin geometrisi oynanmadan (boy, en ve yükseklik) kirişin bal petek geometrisi değiştirilerek doğal frekans değerlerinin değiştirilebileceği gösterilmiştir.

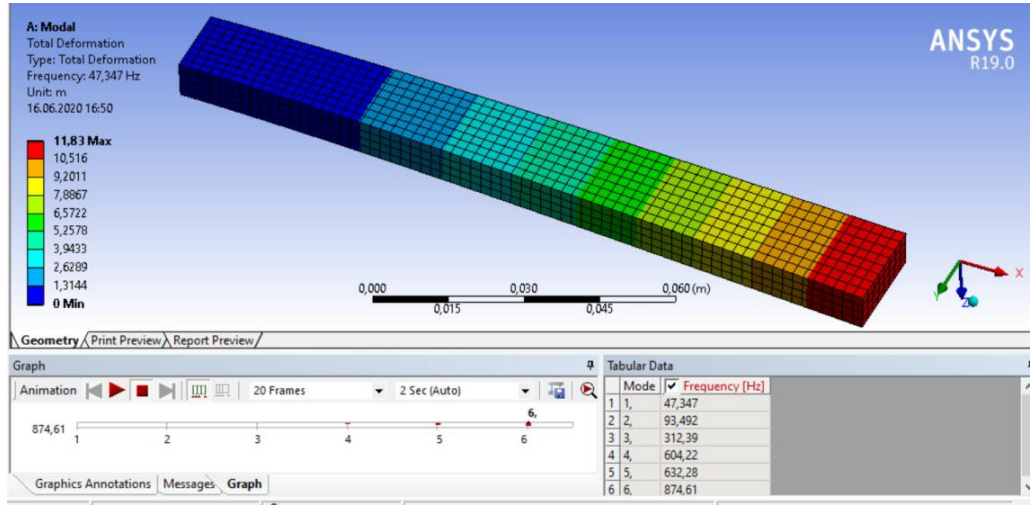
### 6.2.2.3 $\Theta$ Açısına Sahip Kiriş Yapılarının Ansys Titreşim Analizleri

$\Theta$  açılı olarak üretilen 11 adet açılı kiriş numunelerinin Ansys Workbench ortamındaki analizleri ayrı ayrı yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda 2 no’lu parça olan  $\Theta=0.1$  ve 11 no’lu parça olan  $\Theta=1.0$  kirişlerinin gösterimi aşağıdaki Şekil 6.8’de görülmektedir.



Şekil 6.8:  $\Theta = 0.1$  Açısına Sahip 2 No'lu Açılı Kirişin Ansys Ortamındaki Görünümü Ve Titreşim Mod Değerleri

$\Theta = 1.0$  Açısına sahip 11 no'lu açılı kirişin ansys ortamındaki görünümü ve titreşim mod değerleri Şekil 6.9'da görülmektedir.



Şekil 6.9:  $\Theta = 1.0$  Açısına Sahip 11 No'lu Açılı Kirişin Ansys Ortamındaki Görünümü Ve Titreşim Mod Değerleri

➤ **Açılı parçaların ansys titreşim analiz sonuçları;**

**Kısa taraftan sabit tutulduğunda (Tablo 6.5);**

**Tablo 6.5:**  $\Theta$  Açılı Parçalarının Kısa (b) Tarafı Sabit Tutulduğunda Oluşan Titreşim Modları

Parça Numarası	Açı değeri ( $\Theta$ )	1. Mod	2. Mod	3. Mod	Mod Birimi
1	0	51,911	321,330	882,830	Hertz
2	0.1	53,370	320,290	881,870	Hertz
3	0.2	50,850	319,300	880,950	Hertz
4	0.3	50,352	318,340	880,070	Hertz
5	0.4	49,873	317,400	879,210	Hertz
6	0.5	49,412	316,500	878,380	Hertz
7	0.6	48,969	315,630	877,580	Hertz
8	0.7	48,541	314,780	876,810	Hertz
9	0.8	48,129	313,960	876,050	Hertz
10	0.9	47,732	313,160	875,320	Hertz
11	1.0	47,347	312,390	874,610	Hertz

Yukarıda verilen Tablo 6.5 incelendiğinde kirişin kısa tarafından tutulduğunda (b) ve mod sayısı arttığında kirişin doğal frekans değerinin arttığı görülmektedir.  $\Theta = 0^0$  hariç tutulduğunda kiriş değişken kesit halini aldığı anda açı değeri ( $\Theta$ ) arttığında kirişin mod 1., mod 2., ve mod 3 frekans değerlerinin düştüğü görülmektedir.

**Uzun taraftan sabit tutulduğunda (Tablo 6.6);;**

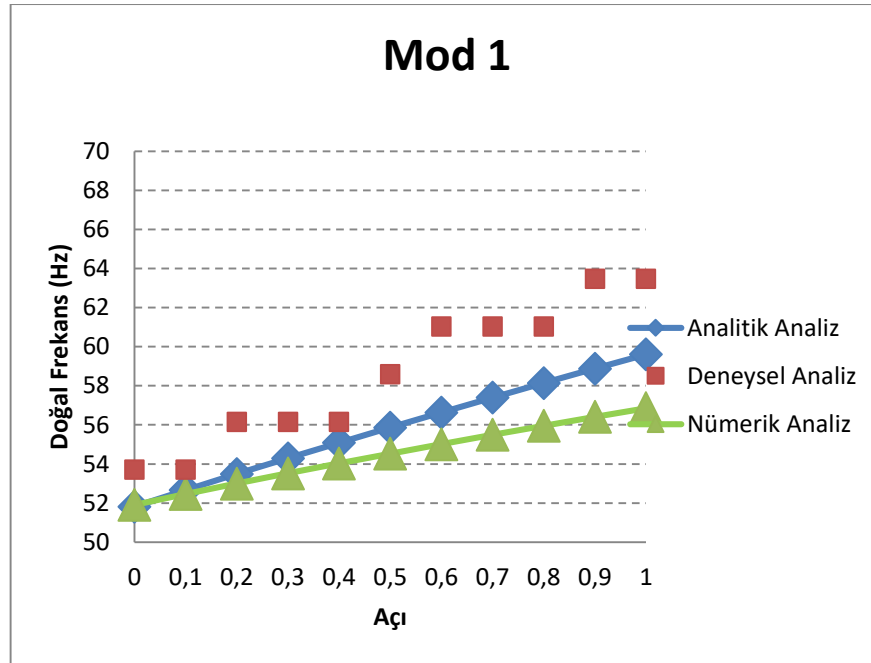
**Tablo 6.6:**  $\Theta$  Açılı Parçalarının Uzun (B) Tarafı Sabit Tutulduğunda Oluşan Titreşim Modları

Parça Numarası	Açı değeri ( $\Theta$ )	1. Mod	2. Mod	3. Mod	Mod Birimi
1	0	51,911	321,330	882,830	Hertz
2	0.1	52,461	322,380	883,860	Hertz
3	0.2	52,997	323,410	884,870	Hertz
4	0.3	53,520	324,410	885,850	Hertz
5	0.4	54,031	325,370	886,800	Hertz
6	0.5	54,530	326,310	887,730	Hertz
7	0.6	55,016	327,230	888,640	Hertz
8	0.7	55,492	328,120	889,520	Hertz
9	0.8	55,958	328,990	890,390	Hertz
10	0.9	56,413	329,830	891,240	Hertz
11	1.0	56,859	330,660	892,107	Hertz

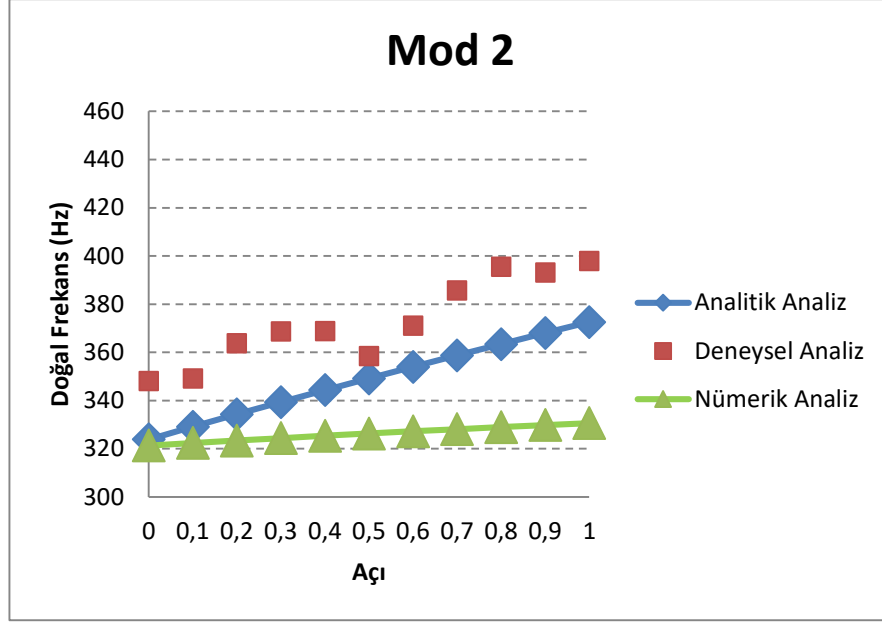


Tablo 6.6’de  $\Theta$  açılı parçalarının uzun (B) tarafı sabit tutulduğunda oluşan titreşim modları incelendiğinde, mod sayısı artığında kirişin doğal frekans değeri artmaktadır.  $\Theta = 0^0$  hariç tutulduğunda kiriş değişken kesit halini aldığı anda açı değeri ( $\Theta$ ) artığında kirişin mod 1, mod 2 ve mod 3 frekans değerlerinin de artığı görülmektedir. Bu bize kirişin  $\Theta$  değeri değiştirilerek de doğal frekansların değiştirilebileceğini göstermektedir. Aynı zamanda kirişin kısa veya uzun tarafından tutulmasıyla da kirişin doğal frekans değerlerinin değişebileceği gösterilmiştir.

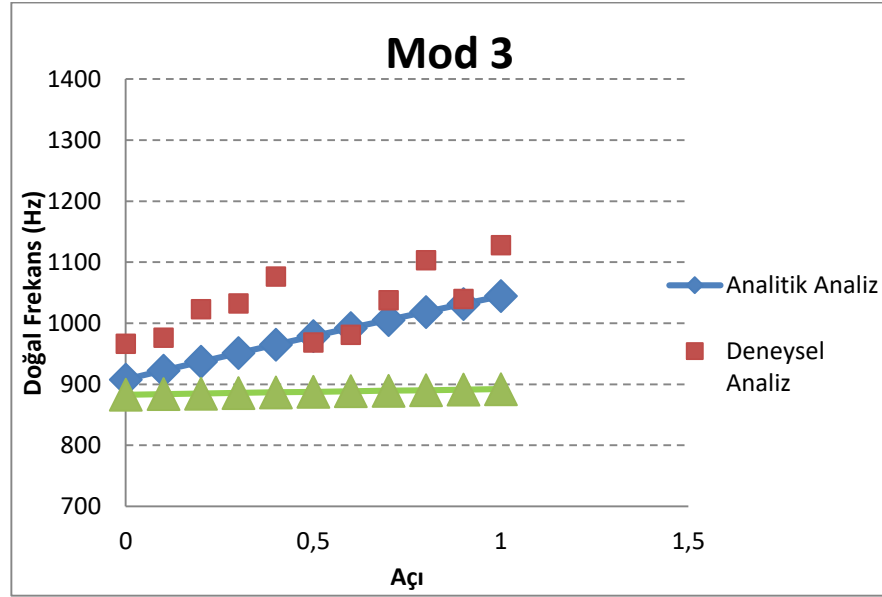
### 6.2.3 Açılı parçaların analitik, deneysel ve nümerik analizlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.10: 1. Mod'a ait Titreşim değerlerinin açılara göre değişimi



Şekil 6.11: 2. Mod'a ait Titreşim değerlerinin açılara göre değişimi



Şekil 6.12: 3. Mod'a ait Titreşim değerlerinin açılara göre değişimi

Yukarıdaki Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de bulunan grafik değerleri incelendiğinde nümerik ve analitik titreşim analizlerinde mod 1, mod 2 ve mod 3 değerlerinin her birinde lineer düzgün bir artış olduğu görülmektedir. Bunun nedeni Ansys ortamında yapılan hesaplamalarda ve analitik hesaplamalarda kullanılan kirişlerde herhangi malzeme kusurunun olmadığı kabul edilerek hesapların

yapılmasıdır. Ansys ortamında yapılan nümerik analiz ve analitik analizin birbirinden farklı olmasının nedeni ise analitik hesaplamalarda Bernoulli-Euler kiriş metoduyla kirişin doğal frekansının hesaplanması, ANSYS nümerik analiz hesaplamalarında ise Timoshenko Kiriş Teorisinin kullanılmasıdır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak bu tez çalışmada PLA malzemesinde 3B yazıcılar ile üretilen kirişlerin, açılı ya da bal petekli yapılarının çok kolay bir şekilde, ucuz ve daha sağlıklı ve hatta geri dönüşümlü olarak kullanılan 3B yazıcıların kolay üretim imkanları içerisinde istenilen ölçü ve boyutta üretilebileceği gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan PLA malzemesi ve 3B yazıcı modelinin ve benzerlerinin otomotiv ve otomotiv yan sanayi sektörü başta olmak üzere birçok sektörde güvenle ve seri bir şekilde kullanılabilirliği gösterilmektedir. Yapılan analitik, nümerik ve deneysel analizler sonucunda her analiz değerleri için bulunan mod titreşim değerlerinin birbirine yakın olarak bulunmasında bunun bir kanıtıdır.

Çalışmada kullanılan kirişlerde deneysel analizlerde oluşan modlar arasında farklar olmaması ise deney sırasında kullanılan kirişin üretim hatalarından ve malzemenin içyapısında oluşan hava boşluklarından kaynaklanmıştır. Fakat yine de deneysel analiz ile elde edilen mod değerlerinin her birinin nümerik ve analitik analiz değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Bu da durum da analizlerde oluşabilecek hata payının içinde olduğu için analizlerinin birbiri ile yakın olduğu gösterilmektedir.

Tez çalışmasında, kirişin eğim açısının değiştirilmesi ile ( $\Theta$ ), doğal frekans değerlerinin değişeceği ve bal petekli yapıların bal peteği yapısına ve bal peteklerinin boşluklarının arasındaki farklara göre değişeceği gösterilmiştir.

Çalışmada kullanılan kirişlere yapılan titreşim analizlerine çekme deneyleri yapılarak kirişlerin nümerik analizde kullanılarak gerçeğe yakın sonuçların bulunması sağlanmıştır. Buna ek olarak ileri çalışmalarda  $\Theta$  açısı verilerek oluşturulan yeni tasarımların içyapısının bal petekli yapılardan yapılmasına göre yeni çalışmalar yapılabilecektir.

## 8. KAYNAKLAR

3Ddedi.com, “Roboturk Compact Cs2 3D Yazıcı detayları [online]”, (09.11.2019), <https://3dedi.com/3d-yazici/roboturk-compact-cs2-3d-yazici-3d-printer/>, (2017).

3detay, “PLA vs ABS Karşılaştırmalı 3D Baskı Filamentleri [online]”, (08.11.2019), <https://3detay.com/pla-vs-abs-karsilastirmali-3d-baski-filamentleri/> , (2019).

3dörtgen, B., “3 Boyutlu Yazıcı ile Araba Yapmak Mümkün-Mü? [online]”, (09.11.2019), <https://blog.3dortgen.com/3-boyutlu-yazici-ile-araba-yapmak-mumkun-mu/>, (2018).

Ahmad N., Ranganath R. and Ghosal A., “Modeling and Experimental Study Of A Honeycomb Beam Filled With Damping Particles”, Elsevier Journal of Sound and Vibration, 391, (20-34), (2017).

Ahsanfar M. and Galehdari S., “Optimum Design For Graded Honeycomb As Energy Absorber Device in Elevator Cabin”, Elsevier Procedia Engineering, 173, (1291-1298), (2017).

Alkan, H. “Honeycomb Nedir?, Nerelerde Kullanılır? [online]”,(30.11.2019), <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/honeycomb-nedir-nerelerde-kullanilir> , (2014).

Anonim, "Lactic Acid Market & Polylactic Acid (PLA) Market Industry Report Lactic 2025 [online]", (05.06.2020), from <https://www.grandviewresearch.com> (2018).

Arıkan, I., “Otomotivde 3D Printer Uygulamaları [online]”, (09.11.2019), [https://www.fiyatimbu.com/blog/otomotivde-3d-printer-uygulamalari\\_212](https://www.fiyatimbu.com/blog/otomotivde-3d-printer-uygulamalari_212), (2017).

Arslan B., “Mühendislikte Bal Peteği Yapılar [online]”,(30.11.2019), <https://www.bilimvetekno.com/muhendislikte-bal-petegi-yapilar/> , (2018).

Artıboyut, “Mühendislik Uygulamalarında 3 Boyutlu Yazıcılar [online]”, (09.11.2019), [https://www.artıboyut.com/index.php/tr/kullanım\\_alanları/muhendislik-uygulamalarında-3-boyutlu-yazıcılar](https://www.artıboyut.com/index.php/tr/kullanım_alanları/muhendislik-uygulamalarında-3-boyutlu-yazıcılar), (2019).

Artıdoksan, “Otomotiv Endüstrisinde 3b Baskı [online]”, (09.11.2019), <https://arti90.com/otomotiv-endustrisinde-3b-baski/>, (2018).

Asadi, M., Vollaie, A. C., Ashmead, M. and Shirvani, H., “Experimental Test and Finite Element Modelling of Pedestrian Headform Impact on Honeycomb

Sandwich Panel”, *18th Engineering Mechanics Division Conference (EMD2007)*, (2006).

Asadi, M., Vollaire, A. C., Ashmead, M. and Shirvani, H., “Experimental Test and Finite Element Modelling of Pedestrian Headform Impact on Honeycomb Sandwich Panel”, *18th Engineering Mechanics Division Conference (EMD2007)*, (2007).

Atlıhan G., Kovan V., Topçu M., Ergün E. And Altan G., “ Investigation Of Vibration Behavior Of Periodic Cellular Structures: Numerical Study”, *14<sup>th</sup> Internatiol Materials Symposium (IMSP’2012)*, (2012).

Atlıhan G., and Ergene B., “Vibration Analysis of Layered Composite Beam with Variable Section in Terms of Delamination and Orientation Angle in Analytical and Numerical Methods”, *Acta Physica Polonica A*, 134, (13-17), (2018).

Aydın, M., Yıldırım, F. Ve Çantı, E., “ Farklı Yazdırma Parametrelerinde PLA Filamentinin İşlem Performasının İncelenmesi”, *International Journal Of 3D Printing Technologies and Digital Industry*”, 3 (2), 102-115, (2019).

Azzouz L., Chen Y., Zarelli M., Pearce J., Mitchell L., Ren G. and Grasso M., “Mechanical properties of 3-D printed truss-like lattice biopolymer non-stochastic structures for sandwich panels with natural fibre composite skins”, *Composite Structures*, 216, (340-349), (2019).

Baltacı A. and Sarıkanak A., “Free Vibration Analysis Of Composite Sandwich Panels With Hierarchical Honeycomb Sandwich Core”, *Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8-3, (85-97), (2006).

Barker, P., “local motors strati is the worlds first 3d printed car [online]”, (09.11.2019), <https://www.redbull.com/in-en/local-motors-strati-is-the-worlds-first-3d-printed-car>, (2016).

Benimfabrikam, “OTOMOTİV [online]”, (09.11.2019), <https://benimfabrikam.info/otomotiv.php> , (2019).

Boyacıoğlu, S., “Otomotiv Endüstrisi için 3D Yazıcılar [online]”, (09.11.2019), <http://www.kimyasalgelismeler.com/sectorler/muhendislik-tasarim-ve-dizayn/otomotiv-endustrisi-icin-3d-yazicilar.html>, (2015).

BoyutKat, “3D YAZICI NEDİR ve NASIL ÇALIŞIR [online]”, (09.11.2019), <https://www.boyutkat.com/3d-yazici/3d-yazici-nedir-nasil-calisir/> (2018).

Boyutkat, “PLA Filament Özellikleri [online]”, (08.11.2019), <https://www.boyutkat.com/3d-yazici-filament/pla-filament-nedir/> , (2019).

Boudjemai A., Amri R., Mankour A., Salem H., Bouanane M. and Boutchicha D., “Modal Analysis And Testing Of Hexagonal Honeycomb Plates Used For Satellite Structural Design”, *Materials and Design*, 35, (266-275), (2012).

Chatterjee, A. and Deopura, B.L., “High Modulus and High Strength PP Nanocomposite Filament”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37 (5), 813-817, (2006).

Cuiver D., Odent J., Delille R., Murariu M., Lauro F., Raquez J., Bennani B. and Dubois P., “Tailoring Polylactide (PLA) Properties For Automotive Applications: Effect Of Addition Of Designed Additives On Main Mechanical Properties”, *Elsevier Polymer Testing*, 36, (1-9), (2014).

CustomPartNet, “Additive Fabrication [online]”, (03.04.2020), <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>, (2008).

Çantı, E. ve Aydın, M., “Effects of Micro Particle Reinforcement on Mechanical Properties of 3D Printed Parts”, *Rapid Prototyping Journal*, 24 (1), 171-176, (2018).

Çantı, E., Aydın, M. ve Yıldırım, F., “Production and Characterization of Composite Filaments for 3D Printing”, *Journal of Polytechnic*, 21 (2), 397-402, (2018).

Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A., “ Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 53-69, (2013).

Degiovanni M., Gherlone M., Mattone M. and Sciuva M, “A Sub-Laminates FEM Approach For The Analysis Of Sandwich Beams With Multilayered Composite Faces”, *Elsevier Composite Structures*, 92, (2299-2306), (2010).

Debruyne S., Vandepitte D. and Moens D., “Identification Of Design Parameter Variability Of Honeycomb Sandwich Beams From A Study Of Limited Available Experimental Dynamic Structural Response Data”, *Elsevier Computers and Structures*, 146, (197-213), (2013).

Değirmenli, E., “Telli Çalgı Yapımında Kullanılan Titreşim Ölçüm Tekniklerinin Deneysel Analizi”, *Rast Müzikoloji Dergisi*, (Baskıda), Doi: 10.12975/rastmd.2017.05.03.0001131687, (2017).

Demir E ve diğ., “Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeden Yapılmış Tabakalı Sandviç Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi”, Bilimsel Araştırma Projesi Sonuç Raporu, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2011 BSP 014, (2013).

Dönmez, M., “İki Delikli Kompozit Plakanın Ansys ile Serbest Titreşim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde, (2011).

Eloy F., Gomes G., Ancelotti A., Cunha S., Bombard A. and Junqueira D., “A numerical-experimental dynamic analysis of composite sandwich beam with magnetorheological elastomer honeycomb core”, *Composite Structures*, 209, (242-257), (2019).

Ergün E., Kovan V., Topçu M. and Atlıhan G., “ Investigation Of Buckling Behavior Of Periodic Cellular Structures: A Finite Element Study”, 14<sup>th</sup> Internatiol Materials Symposium (IMSP’2012), (2012).

Günay M., Gündüz S., Yılmaz H., Yaşar N. ve Kaçar R., “PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, (baskıda) (2019).

Hague, R. and Reeves, P. “Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing [Online]”, (05.05.2020), Shropshire: Smithers Rapra Publishing; (2000).

Heimbs, S., Cichosz, J., Kilchert, S. ve Klaus, M., “Sandwich Panels With Cellular Cores Made Of Folded Composite Material: Mechanical Behaviour And İmpact Performance”, *17th International Conference on Composite Materials (ICCM-17)*, Edinburgh (2009).

Henton, D., Gruber, P., Lunt, J. and Randall, J., “Polylactic Acid Technology”, 555-556, (2005).

Hill, N. and Haghi M., “Deposition Direction-Dependent Failure Criteria For Fused Deposition Modeling Polycarbonate”, *Rapid Prototyping Journal*, 20 (3), 221-227, (2014).

Hosseini S., Willberg C., Kharaghani A. and Gabbert U., “Characterization Of The Guided Wave Propagation İn Simplified Foam, Honeycomb And Hollow Sphere Structures”, 56, (553-566), (2014).

Jiang C., Xiang Y., He P. and He H., “Vibration Attenuation Behaviors Of Finite Sandwich Plates With Periodic Core”, *Elsevier Applied Acoustics*, 157, (107009), (2020).



Kayalı ES., Ensari C., Dikeç F. Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Yayını, 1996.

Kemal, Ş. ve Turan, O., “3B Yazıcı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi”, *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2 (2), (2018).

Khakalo S., Balobanov V. and Niiranen J., “Modelling Size-Dependent Bending, Buckling And Vibrations Of 2D Triangular Lattices By Strain Gradient Elasticity Models: Applications To Sandwich Beams And Auxetics”, *Elsevier International Journal of Engineering Science*, 127, (33-52), (2018).

Khoshravan, M. R. and Pour, M. N., “Numerical And Experimental Analyses Of The Effect Of Different Geometrical Modelings On Predicting Compressive Strength Of Honeycomb Core”, *Thin-Walled Structures*, 84, (423-431), (2014).

Koinmo, G.H., “Pilot Project for Aluminium Honeycomb Roof Panel [online]”, (03.04.2020), <http://www.koinmo.com/index.php?section=news&cmd=details&newsid=44&pdfview=1>, (2012).

Krassenstein, B., “Local Motors Strati [online]”, (09.11.2019), <https://3dprint.com/15139/local-motors-3d-printed-strati/>, (2014).

Kricheldorf, H., “Syntheses And Application Of Polylactides”, *Chemosphere*, 43, 49-54, (2001).

Krishna G., Nath T., Burman R., Sekhar B. and Rao V., “Numerical and Experimental Comparative Study Of Aluminum And Hybrid Mounting Interfaces Of Launch Vehicle Avionics For Weight Reduction” *Elsiver Procedia Structural Integrity*, 14, (820-829), (2019).

Kruth, J.P., Leu, M.C. and Nakagawa, T., “Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47, 525-540, (1998).

Lan, H., Ding, Y., Hong, J., Huang, H. and Lu, B., “A Web-Based Manufacturing Service System for Rapid Product Development”, *Computers in Industry*, 54, 51-67, (2004).

Levy, G.N., Schindel, R. and Kruth, J.P., “Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of The Art and Future Perspectives”, *Cirp Annals Man. Tech.* 52, 589-609, (2003).

Maktoloji, “3D yazıcıların avantajlar ve dezavantajları [online]”, (09.11.2019), <https://www.maktoloji.com/2018/12/3d-yazicilar-avantajlar-ve-dezavantajlar.html>, (2018).

Matthew, R.S., Jake, M.E., Zeeshan, A., Abigail, E.M. and Matthew, R.H., “The Chemical, Mechanical, and Physical Properties of 3D Printed Materials Composed of Tio<sub>2</sub>-ABS Nanocomposites”. *Science and Technology of Advanced Materials*, 17 (1), 89-97, (2016).

Mellor, S., Hao, L. and Zhang, D., “Additive Manufacturing: A Framework for Implementation Exeter [Online]”, (05.05.2020), [www.medifas.net](http://www.medifas.net), (2012).

Meo M., Vignjevic R. and Marengo G., “The Response Of Honeycombsandwich Panels Under Low-Velocity Impact Loading”, *Elsevier Mechanical Sciences*, 47, (1301-1325), (2005).

Ming L., Changliang L., Qing Z., Bing H., Hao W. and Hualin F., “Design and mechanical properties of hierarchical isogrid structures validated by 3D printing technique”, *Materials and Design*, 168, (107664), (2019).

Mujika F., Pujana J. and Olave M., “On The Determination Of Out-Of-Plane Elastic Properties Of Honeycomb Sandwich Panels”, *Elsevier Polymer Testing*, 30, (222-228), (2011).

Murariu, M. and Dubois, P., “PLA composites: From production to properties”, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 17–46. (2016).

Nia, A. A. ve Sadeghi, M. Z., “The Effects Of Foam Filling On Compressive Response Of Hexagonal Cell Aluminum Honeycombs Under Axial Loading-Experimental Study”, *Materials & Design*, 31 (3), (1216-1230), (2010).

Ning, F., Cong, W., Qiu J., Wei, J. and Wang, S., “Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling”. *Composites Part B: Engineering*, 80 (1), 369-378, (2015).

Ngay, T. H., “Điểm danh các mẫu xe in 3D độc nhất hành tinh [online]”, (09.11.2019), <https://danviet.vn/diem-danh-cac-mau-xe-in-3d-doc-nhat-hanh-tinh-p1-7777715558.htm>, (2016).

Omay, D., “Yemekhane Atıklarından Poli (L-Laktik Asit)’in Enzimatik Polimerizasyonu ve Sentezlenen Polimerin Karakterizasyonu ve Bio-bozundurulması” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, İstanbul, (2010).

Öztürk, C. A., “honeycomb nedir? [online]”, (30.11.2019), <https://malzemebilimi.net/honeycombnedir.html> , (2018).

Özsoy K. ve Duman B., “Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği”, Süleyman Demirel Üniversitesi, Senirkent MYO, Isparta, (2017).

Peng, T. and Sun, W., “Energy Modelling for FDM 3D Printing From A Life Cycle Perspective”, *International Journal of Manufacturing Research*, 12 (1), (2017).

Potluri R. and Rao U. K., “Determination of Elastic Properties of Reverted Hexagonal Honeycomb Core: FEM Approach”, *Elsevier Materials Today Proceedings*, 4, (8645-8633), (2017).

Resinex, “PLA-Biopolimer Polilaktik Asit [online]”, (08.11.2019), <https://www.resinex.com.tr/polimer-turleri/pla.html>, (2019).

Richardson, M. and Haylock, B., “Designer/maker: the rise of additive manufacturing, domestic-scale production and the possible implications for the automotive industry”, *Computer-Aided Design ve Applications PACE*, 2, 33-48, (2012).

Rigid3D, “Cura Dilimleme Yazılımı [online]”, (09.11.2019), <http://www.rigid3d.com/cura-dilimleme-yazilimi/> , (2017).

Sahu S., Badgayan N., Samanta S., Sahu D. and Sreekanth P., “ Influence Of Cell Size On Out Of Plane Stiffness And in-Plane Compliance Character Of The Sandwich Beam Made With Tunable PCTPE Nylon Honeycomb Core And Hybrid Polymer Nanocomposite Skin”, *Mechanical Sciences*, 148, (284-292), (2018)

Santos, E.C., Shiomi, M., Osakada, K. and Laoui, T. “Rapid Manufacturing of Metal Components by Laser Forming”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1459-1468, (2006).

Sayyad A. and Ghugal Y., “Bending, Buckling And Free Vibration Of Laminated Composite And Sandwich Beams: A Critical Review Of Literature”, *Composite Structures*, 171, (486-504), (2017).

Solmaz ve Çelik (2018), “Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yükü Altındaki Performanslarının Araştırılması”, *Fırat Üniv. Müh. Dergisi*, 30(1), (277-286), (2018).

Sürmen, H. K., “Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (2), DOI: 10.17482/uumfd.519147, (2019).

Şakar G., Yaman M. and Bolat F., “Bal Peteği Sandviç Kompozit Yapıların Dinamik Analizi”, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, (11-12 Kasım), Balıkesir, 2010.

Tabi T., Sajo, I. E., Szabo, F., Luyt, A.S., Kovacs, J.G., “Crystalline Structure Of Annealed Polylactic Acid and Its Relation To Processing”, Express Polymer Letters, 4, 659–668, (2010).

Tektemur, E., “Poli (Laktik Asit) Üretimine İŞLETME Parametrelerinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2011).

Top, N., Şahin, İ. ve Gökçe, H., “3B Yazıcı Teknolojisi için Topoloji Optimizasyonu: Otomotivde Salıncak Kolu Üzerine bir Çalışma”, ISIDE, 3, (2018).

Trelease E., “Poliüretan Köpük İle Doldurulmuş Bal Peteği Sandviç Plakların Titreşim Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, (2018).

Tseng S., “USING BIO-BASED MATERIALS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY”, University of Windsor Scholarship at UWindsor”, Windsor, Ontario, Canada, (2012).

Tymrak, B.M., Kreiger M., Pearce J.M., “Mechanical Properties Of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions”, Materials & Design, 58, 242–246, (2014).

Ultimaker, “Ultimaker Teknik Bilgi Formu”, (16.12.2019), <https://ultimaker.com/download/67782/TDS%20PC%20v3.010-tur.pdf>, (2017).

Yardımcı O. and Gürses E., “Bal Peteği Dolguya Sahip Sandviç Yapıların Bükme Yükü Altındaki Davranışlarının Karşılaştırılması”, VI. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı, (28-30 Eylül Kocaeli), (2016).

Wang Y., Zhang Z., Xue X., and Zhang L., “Free Vibration Analysis Of Composite Sandwich Panels With Hierarchical Honeycomb Sandwich Core”, *Elsevier Thin-Walled Structures*, 145, (106425), (2019).

Weng, Z., Wang, J., Senthil, T. and Wu, L., “Mechanical and Thermal Properties of ABS/Montmorillonite Nanocomposites for Fused Deposition Modeling 3D Printing”. *Materials & Design*, 102 (1), 276-283, (2016).

Wyman, C., “PolyJet 3D Printers [Online]”, (05.05.2020), <https://www.stratasys.com/polyjet-technology>, (2015).

Zak, A., Krawczuk, M., and Ostachowicz, W., “Vibration of a Laminated Composite Plate with Closing Delamination”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, (12), (545-551), (2001).

Zhang Z., Han B., Zhang Q. and Jin F., “Free Vibration Analysis Of Sandwich Beams with Honeycomb-Corrugation Hybrid Cores”, *Composite Structures*, 171, (335-344), (2017).

Zhang Z., Zhang Q., Li F., Yang J., Liu J., Liu Z. and Jin F., “Modal Characteristics Of Micro-Perforated Sandwich Beams With Square Honeycomb-Corrugation Hybrid Cores: A Mixed Experimental-Numerical Study”, *Elsevier Thin-Walled Structures*, 137, (185-196), (2019).

## 9. ÖZGEÇMİŞ

- Adı Soyadı : Abdullah EREN
- Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA / 25.05.1994
- Lisans Üniversite : PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ /  
TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ/ OTOMOTİV  
MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ (2013-2017)
- Y. Lisans Üniversite : PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ / FEN  
BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ/ OTOMOTİV  
MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI  
(2017-2020)
- Elektronik posta : abdlhrn94@hotmail.com
- İletişim Adresi : Hançerli Mah. 2. Hançer Sk. No:13
- Cep Telefonu : 0 (539) 258 6814