



**Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Polimer Kafes Yapıların
Titreşim Sönümlleme Davranışının Araştırılması**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk KIZILKAYA

Danışman
Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK 2025

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Polimer Kafes
Yapıların Titreşim Sönümlleme Davranışının Araştırılması

Ufuk KIZILKAYA

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Ufuk KIZILKAYA tarafından hazırlanan Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Polimer Kafes Yapıların Titreşim Sönümleme Davranışının Araştırılması adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 29 / 01 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Başkan : Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmza

Üye : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmza

Üye : Doç. Dr. Berkay ERGENE

Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ... İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... / / tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

Beyan ederim.

29 / 01 / 2025

İmza

Ufuk KIZILKAYA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Polimer Kafes Yapıların Titreşim Sönümleme Davranışının Araştırılması

Ufuk KIZILKAYA

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Bu çalışma, bal peteği dolgusu bulunan, dış ölçüleri birbirine eşit ancak cidar kalınlığı, bal peteği kenar uzunluğu, dolgu yoğunluğu gibi parametreleri farklı olan kiriş biçimli numunelerin, eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemesi kullanılarak üretildiği bir araştırmayı sunmaktadır. Çalışma, bu numunelerin darbe ile tetiklenen titreşim davranışlarını detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Deneysel analiz kısmı, çekiç darbe testi ile gerçekleştirilmiş olup, PLA filament ile üretilen numunelerin sönüm oranları belirlenmiştir. Sonrasında, numunelerin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi yapılmış, modal analiz ve ardından harmonik analiz uygulanmıştır. Bu süreç, bal peteği dolgulu kiriş şeklindeki numunelerin rezonans frekansları ve çökme değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Deneysel ve nümerik analizlerin karşılaştırılması, elde edilen sonuçların birbirini destekleyecek şekilde uyumlu olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, SLA ve FDM üretim yöntemlerinin titreşim özellikleri üzerine karşılaştırmalar yapılmış ve SLA üretim yöntemindeki son adım olan kürlleme işleminin etkisi de çalışmada ele alınmıştır. Kafes yapıların doluluk oranı, cidar kalınlığı ve kenar uzunluğu gibi parametrelerinin titreşim davranışını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Özellikle, daha yüksek doluluk oranına sahip numunelerin daha iyi sönümleme sağladığı, ancak buna bağlı olarak ağırlıklarının arttığı belirlenmiştir. Sayısal analizler ile deney sonuçları karşılaştırıldığında, sonlu elemanlar yönteminin (FEM) deneysel bulgularla yüksek uyum içinde olduğu görülmüştür. Bal peteği dolgulu numunelerin silikon dolgulu numunelere kıyasla daha yüksek sönümleme özelliğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

2025, xi + 85 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Kafes yapılar, Titreşim sönümleme, PLA, SLA

ABSTRACT

M.Sc. Thesis / Ph.D. Thesis

Investigation of Vibration Damping Behavior of Polymer
Lattice Structures Produced by Additive Manufacturing

Ufuk KIZILKAYA

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Kubilay ASLANTAŞ

This study presents research on the production of beam-shaped samples with honeycomb fillings, where the external dimensions are equal, but parameters such as wall thickness, honeycomb cell edge length, and filling density vary. These samples were manufactured using the additive manufacturing method with PLA material. The study aims to examine in detail the vibration behavior of these samples triggered by impact. The experimental analysis was performed through a hammer impact test, and the damping ratios of the samples made with PLA filament were determined. Subsequently, the samples were modeled using the finite element method, followed by modal analysis and harmonic analysis. This process allowed for the determination of the resonance frequencies and collapse values of the honeycomb-filled beam samples. A comparison of the experimental and numerical analyses revealed that the results were consistent and mutually supportive. Additionally, comparisons were made between the vibration characteristics of SLA and FDM manufacturing methods, and the effect of the curing process, the final step in SLA manufacturing, was also addressed in the study. It was found that the parameters of lattice structures, such as filling density, wall thickness, and edge length, directly influence their vibration behavior. Specifically, samples with higher filling densities exhibited better damping, although this was accompanied by an increase in weight. When comparing the numerical analyses with the experimental results, it was observed that the finite element method (FEM) showed a high degree of agreement with the experimental findings. It was also determined that the honeycomb-filled samples had better damping properties compared to silicone-filled samples.

2025, xi + 85 pages

Keywords: Analysis, Additive Manufacturing, Hammer Blow, Fill geometry.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ufuk KIZILKAYA

Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Bu Çalışmanın Amacı	3
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Giriş	5
2.2.1 Kafes Yapıları	5
2.2.2 Kafes Yapıları Kullanım Alanları.....	7
2.2.3 Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri.....	9
2.2.4 Kafes Yapıların Üretim Yöntemleri	14
2.3.1 Eklemeli İmalat.....	14
2.3.2 Üç Boyutlu Yazıcı ile Eklemeli İmalat.....	17
2.3.3 Dilimleme	17
2.3.4 Baskı İşlemi	18
2.3.5 FDM Üretim Yöntemi	19
2.3.6 SLA Üretim Yöntemi.....	21
2.4 FDM Tekniği ile Üretilen Ürünlerin Mekanik Özellikleri	23
2.5 Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Ürünlerin Darbe ve Şok Sönümlleme Özellikleri.....	27
2.6 Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Ürünlerin Titreşim Özellikleri	30
2.7.1 Modal Analiz	31
2.7.2 Harmonik Analiz.....	33
2.8 FDM ile Üretilen Kafes Yapıların Darbe Davranışları.....	34
2.9 Eklemeli İmalatta Sonlu Eleman Uygulamaları	35
2.10 Sönümlleme Özelliği Olan Ham Maddeler.....	37
3. MATERYAL ve METOT	38
3.1 Kiriş Geometrisinin Geometrik Tasarımı	38
3.2 Numunelerinin İmalatı.....	38
3.3 Çekiç Darbe Testi	40

3.4	Numerik Modelleme	43
3.5	Titreşim Analizinde Sonlu Elemanlar Metodunun Matematiksel Temelleri ve Uygulama Yöntemleri.....	44
3.6	Yapıların Doğal Frekansının Hesaplanması	46
4.	BULGULAR	48
4.1	Kiriş Çeper Kalınlığının Genliğe Olan Etkisi.....	48
4.2	Kafes Kenar Uzunluğunun Genliğe Olan Etkisi.....	49
4.3	Kafes Cidar Kalınlığının Genliğe Olan Etkisi	50
4.4	Değişken Parametrelerle Sönümleme Oranının Değişimi	51
4.5	Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları.....	55
4.6	Farklı Kafes Yapısının Titreşim Özellikleri Üzerindeki Etkisi	62
4.7	Üretim Tekniğinin Titreşim Özellikleri Üzerindeki Etkisi.....	64
4.8	Silikon Dolgusunun Titreşim Özelliklerine Etkisi.....	66
5.	SONUÇ.....	70
6.	KAYNAKLAR.....	72

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

E	Elastisite modülü
% İntill	Dolgu yoğunluğu
Gpa	Gigapascal
rh	Görünür yoğunluk
rs	Hücreseı yapı yoğunluğu
rr	Hücreseı yoğunluk
Mpa	Megapascal
*	Phase angle (faz açısı)

Kısaltmalar

ABS	Akrilonitil bütadien strien
DPI	Dots per inch
Hz	Frekans
FDM	Eriyik yığma modellemesi (fused deposition modeling)
L	Length
um	Mikrometre
mm	Milimetre
N	Newton
PLA	Poliaktik asit
PET-G	Polietilen tereftalat
STL	Standard triangle language
t	Tickness
W	Weight

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. 1 Hücresel yapılar ve stokastik ve stokastik olmayan türleri	3
Şekil 2. 1 Kafes yapılarının çeşitli mimarileri (a) dikme tabanlı kafes hücreleri ilk üç sırada gösterilmektedir. (b) iskelet ve (c) tabaka üçlü periyodik minimum yüzeyler.	6
Şekil 2. 2 Kafes yapılarının aerodinamik üzerindeki etkisi.....	7
Şekil 2. 3 Kafes yapı kullanılarak üretilmiş olan bazı tasarım örnekleri	9
Şekil 2. 4 Kafes yapı tiplerinde uygulanan kuvveti iletim örneği	10
Şekil 2. 5 Kafes yapı kullanılarak üretilmiş olan bazı tasarım örneklerinin uygulanan kuvvete gösterdiği tepki	11
Şekil 2. 6 Kafes yapı kullanılarak oluşturulan modele kuvvet uygulanması ve çökme değerleri.....	12
Şekil 2. 7 Kafes yapısının basma zorlanması altındaki davranışı	13
Şekil 2. 8 Farklı hücre geometrisine sahip PLA malzemeden üretilmiş geometrilerin basma davranışları	14
Şekil 2. 9 Eklemeli imalat başlığı altında yer alan farklı üretim teknikleri.....	15
Şekil 2. 10 Üç boyutlu baskı ile üretimin şematik ifadesi.....	17
Şekil 2. 11 Birleştirmeli yığılma modeli çalışma şekli.....	19
Şekil 2. 12 FDM üç boyutlu yazıcı ve üretimi yapılan parça örneği.....	20
Şekil 2. 13 SLA tipi üç boyutlu yazıcı çalışma şekli	22
Şekil 2. 14 SLA yazıcı ile üretilmiş parça örnekleri	22
Şekil 2. 15 FDM ile üretilen numunede çekme mukavemeti ile dolgu yüzdesi oranı arasındaki ilişki	24
Şekil 2. 16 FDM ile üretilen numunede çekme mukavemeti ile nozzle sıcaklığı arasındaki ilişki.....	25

Şekil 2. 17 FDM ile üretilen numunede sertlik, dolgu sıcaklığı oranı arasındaki ilişki.	26
Şekil 2. 18 Kirişlerin baskı tablasında bulunma konumları	26
Şekil 2. 19 FDM ile üretilen numunede çekme mukavemeti ile baskı yönü arasındaki ilişki	27
Şekil 2. 20 FDM ile üretilen numunede uygulanan kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki	28
Şekil 2. 21 Kafes yapıda deney numunelerinin sonlu elemanlar metodu ile uygulanan kuvvet etkisinde gösterdiği şekil değişimi.....	29
Şekil 2. 22 Kafes yapıya sahip protezin şematik gösterimi.....	30
Şekil 2. 23 Bir uçak kanadı geometrisine uygulanan kafes yapısı örneği ve bu kanat geometrisinin modal analiz sonucu	32
Şekil 2. 24 FDM yöntemi ile farklı geometrilerle üretilmiş kiriş numuneler ve bu numunelere ait sönüm oranları	33
Şekil 2. 25 FDM yöntemi ile üretilen düz dişliye uygulanan kuvvetin oluşturacağı etkinin sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi	35
Şekil 2. 26 FDM yöntemi ile üretilen kiriş şeklindeki numunenin sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi	36
Şekil 2. 27 FDM yöntemi ile üretilen kiriş şeklindeki numunenin iç dolgu geometrileri	36
Şekil 3. 1 Kirişin boyutları ve geometrik modeli	38
Şekil 3. 2 Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş kiriş şeklindeki numune.....	39
Şekil 3. 3 a) Çalışmada kullanılan deneysel düzeneği, b) Çekiç testi sonrasında elde edilen sonuçların örnek gösterimi	42
Şekil 3. 4 Sönüm oranı hesaplamak için kullanılan çekiç testi deney düzeneği ve real part grafiği	43

Şekil 3. 5 Nümerik modellemede kullanılan basamakların şematik gösterimi.	43
Şekil 3. 6 Mesh metrics analiz sonucu	44
Şekil 3. 7 Skewness analiz sonucu	44
Şekil 4. 1 Kiriş çeper kalınlığının frekans değeri üzerindeki etkisi	48
Şekil 4. 2 İçi boş numunede kiriş çeper kalınlığının frekans değeri üzerindeki etkisi...	49
Şekil 4. 3 Bal peteği geometrinin kenar uzunluğunun frekans değeri üzerindeki etkisi	50
Şekil 4. 4 Bal peteği geometride t değerinin rezonans frekans değeri üzerindeki etkisi	51
Şekil 4. 5 Farklı W/a değerleri için sönüm oranının değişimi ve tam dolu kiriş ile karşılaştırılması.....	52
Şekil 4. 6 L değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi.....	53
Şekil 4. 7 t değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi	54
Şekil 4. 8 Kabuk şeklinde kirişlerde w değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi	54
Şekil 4. 9 W/A oranının rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi.....	58
Şekil 4. 10 L değerinin rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi	58
Şekil 4. 11 T değerinin rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi	59
Şekil 4. 12 Kiriş çeper kalınlığının rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi	60
Şekil 4. 13 Üç boyutlu yazıcı kaynaklı üretim hatalarından lineer olmayan katman problemi.....	60
Şekil 4. 14 Üç boyutlu yazıcı kaynaklı üretim hatalarından yapışma problemi.....	61
Şekil 4. 15 Dilimleme programında eksenlerin gösterimi.....	61
Şekil 4. 16 3D hex, lidinoid ve üçgen geometrisine sahip kafes yapısının genel görünümü.....	63

Şekil 4. 17 Deneysel dolgu geometrilerinin sönümleme oranı ve frekans değerleri üzerindeki etkisi.....	64
Şekil 4. 18 SLA ve FDM üretim yöntemlerinin frekans ve sönümleme oranı üzerindeki etkisi	65
Şekil 4. 19 SLA ile yapılan üretim yönteminde kütleme işleminin frekans ve sönüm oranı üzerindeki etkisi	66
Şekil 4. 20 SLA üretim yönteminde kütleme işleminin ivme ve titreşim genliği üzerindeki etkisi.....	66
Şekil 4. 21 W=0,75mm için dolgusuz, silikon dolgulu ve bal peteği dolgulu kirişin sönüm oranı ve frekans değişimi	67
Şekil 4. 22 Silikon dolgu malzemesinin kirişin doğal frekans ve sönüm oranı üzerindeki etkisi	68
Şekil 4. 23 Silikon dolgulu ve dolgusuz üretilen iki farklı cidar kalınlığına sahip numunenin ivme-zaman grafikleri.....	68
Şekil 4. 24 3mm cidar kalınlığına sahip kirişte silikon dolgu kaynaklı mekanik özelliklerin değişim grafiği.....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Üretilen kiriş geometrilerinin geometrik özellikleri	40
Çizelge 4. 1 w/a değerinin titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması	55
Çizelge 4. 2 Bal peteği hücresi kenar uzunluğunun (L) titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması.....	56
Çizelge 4. 3 t'nin titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması	57
Çizelge 4. 4 Kiriş şeklinde numunelerin kütle özellikleri	62



1. GİRİŞ

Genellikle üç boyutlu baskı olarak adlandırılan eklemeli imalat, modern üretim teknolojilerinin en modern hali olmakta ve çeşitli sektörlerde nesneleri kavramsallaştırma, tasarlama ve üretme şeklinde devrim yaratmaktadır. Malzemeyi katı bir bloktan kesip çıkarmayı içeren geleneksel eksiltici üretim yöntemlerinin aksine, eklemeli üretim nesneleri dijital tasarımlardan katmanlar halinde oluşturarak benzersiz tasarım özgürlüğü ve özelleştirme sunmaktadır. Bu dönüştürücü süreç, ince katmanlar halinde dilimlenmiş dijital bir modelle başlamaktadır ve daha sonra genellikle plastik ve metallerden seramiklere ve hatta biyolojik malzemelere kadar çeşitli malzemeler kullanılarak sırayla biriktirilir veya sertleştirilmektedir.

Katmanlı imalatın çok yönlülüğü prototip oluşturma ve çok ötesine uzanmaktadır; karmaşık geometrilerin ve girift yapıların hassas ve verimli bir şekilde üretilmesini sağlayarak havacılık, otomotiv, sağlık, mimari ve daha birçok alanda yeniliklere kapı açmaktadır (Sheydaeian 2017). Hafif ancak sağlam bileşenler üretme kabiliyeti, şirketlerin malzeme israfını azaltarak karmaşık parçalar oluşturma potansiyelinden yararlandığı havacılık ve uzay alanında dikkatleri üzerine çekmektedir. Benzer şekilde, sağlık alanında eklemeli üretim hastaya özel implantların, protezlerin ve hatta organların üretimini kolaylaştırarak kişiselleştirilmiş tıpta devrim yaratmaktadır. Dahası, eklemeli üretim yalnızca gerekli olanı kullanarak malzeme israfını en aza indirdiğinden ve yerel üretim yetenekleri nakliyyeyi azalttığından, etkisi sürdürülebilirliğe kadar uzanmaktadır. Popüler bir eklemeli üretim tekniği olan FDM (Fused Deposition Modeling) ile üretim, üç boyutlu nesneler oluşturmak için termoplastik malzemelerin hassas bir şekilde katmanlar halinde biriktirilmesini içermektedir.

FDM, ekstrüzyon nozülü için takım yolunu belirleyen özel bir yazılım kullanılarak katmanlara dilimlenmiş dijital bir modelle başlamaktadır. Tipik olarak ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) veya PLA (Polilaktik Asit) olan termoplastik filament, yazıcının nozülü içinde erime noktasına kadar ısıtılmaktadır. Nozül daha sonra önceden tanımlanmış yollar boyunca hareket ederek erimiş malzemeyi bir yapı platformu üzerine katmanlar halinde ekstrüde eder ve burada hızla soğuyup katılaşarak altındaki katmana yapışmaktadır. FDM yöntemi, uygun fiyat, erişilebilirlik ve kullanım kolaylığı gibi çeşitli avantajlar sunarak hızlı prototipleme, küçük ölçekli üretim ve hobi uygulamaları için popüler bir seçim

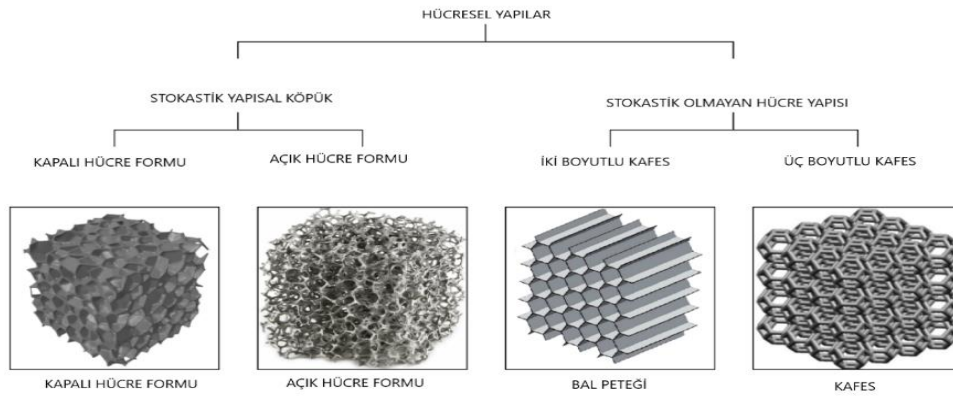
olabilmektedir (Hasanov 2020). Nispeten hızlı geri dönüş süreleriyle işlevsel prototipler üretme yeteneği, tasarımcıların ve mühendislerin tasarımları hızla yinelemesini ve konseptleri verimli bir şekilde doğrulamasını sağlamaktadır. Ayrıca, FDM'nin farklı mekanik özelliklere sahip mühendislik sınıfı termoplastikler de dahil olmak üzere geniş uyumlu malzeme yelpazesi, havacılık, otomotiv, sağlık ve tüketim malları gibi sektörlerde fonksiyonel testler ve son kullanım uygulamaları için uygun parçaların üretilmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte FDM, katman yapışma sorunları, yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk gibi bazı sınırlamalar da sunmaktadır. Birbirine bağlı destek ve boşluk ağlarıyla karakterize edilen kafes yapılar, optimum güç, sertlik ve düşük ağırlık kombinasyonu sunarak, malzeme verimliliği ve performansın kritik olduğu uygulamalar için idealdir (Ekon 2014).

Kafes yapıların FDM imalatında tasarımcılar, yük taşıma kapasitesi, termal iletkenlik veya sıvı akışı optimizasyonu gibi belirli performans gereksinimlerine göre uyarlanmış karmaşık kafes mimarileri oluşturmak için dijital tasarım araçlarının esnekliğinden yararlanmaktadırlar. Unsur kalınlığı, kafes yoğunluğu ve birim hücre geometrisi gibi parametreleri ayarlayarak mühendisler, havacılık ve otomotivden biyomedikal ve mimariye kadar çeşitli endüstrilerdeki farklı uygulamalara uyacak şekilde kafes yapının mekanik özelliklerini ve genel davranışını hassas bir şekilde ayarlayabilmektedirler. FDM'nin malzemeyi hassas bir şekilde biriktirme yeteneği, karmaşık kafes yapılarının yüksek doğruluk ve çözünürlükle oluşturulmasını sağlayarak nihai bileşenin bütünlüğünü ve işlevselliğini garanti etmektedir. Ayrıca, FDM 'nin eklemeli yapısı, kafes yapıların daha büyük parçalara veya montajlara sorunsuz bir şekilde entegre edilmesine olanak tanıyarak, daha az ağırlık ve malzeme kullanımı ile karmaşık, çok işlevli bileşenlerin üretilmesini sağlamaktadır.

Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıların öne çıkan en önemli avantajlarında biri hafifliktir. Kafes yapılar, içi boş ve birbirine bağlı tasarımları nedeniyle doğal olarak hafiftir, bu da onları havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi ağırlık azaltmanın çok önemli olduğu uygulamalar için ideal hale getirmektedir (Vaezi 2013). Diğer bir önemli avantajı ise malzemeyi yalnızca ihtiyaç duyulan yerlere stratejik olarak dağıtarak malzeme kullanımını en üst düzeye çıkarır, malzeme israfını ve maliyetleri azaltmaktadır. Gözenekli yapıların öne çıkan bir diğer avantajı ise özelleştirilebilir olmasıdır. Kafes geometrisi ve özellikleri belirli performans gereksinimlerine göre uyarlanabilir ve

yeniden tasarlanabilmektedir. Titreşimin sönümlenmesine yönelik özellikleri ile de dikkati çeken gözenekli yapılar, özellikle havacılık sektöründeki tekrarlı yüklemelere ve titreşimlere karşı bir alternatif olarak görülmeye başlanmıştır.

Üç boyutlu hücresel yapılar genellikle birim hücrelerinin düzenine bağlı olarak stokastik (köpük/periodyik olmayan) ve stokastik olmayan (periodyik) yapılar olarak sınıflandırılır ve her yapı ayrıca kapalı hücreli ve açık hücreli yapılara bölünebilir (Gibson 1997). Açık hücreli köpük yapıları Şekil 1.1’de verilen genellikle üretim sırasında şişirici bir madde kullanılarak oluşturulan ve yalnızca sıvıların ve gazların kolayca geçmesine izin veren çerçeveyi yerinde bırakan açık hücre duvarlarına sahiptir (Dossi 2017). Stokastik olmayan yapılar, petekler ve kafes kirişler gibi belirli bir şekle sahip birim hücrelerin tekrar tekrar düzenlendiği periodyik veya kafes yapıları olarak da bilinir (Pan 2020).



Şekil 1. 1 Hücresel yapılar ve stokastik ve stokastik olmayan türleri (Juliana Marques Dias 2020)

1.1 Bu Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, bal peteği kafes yapısının PLA malzemeden üretilmiş kirişin titreşim davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle bal peteği kafes geometrisinin L (kenar uzunluğu) ve t (kalınlığı) sabit alınarak üç boyutlu kiriş, PLA malzeme kullanılarak üretilmiş ve çekiç testi yapılmak suretiyle sönüm oranı ve rezonans frekansları bulunmuştur. Nümerik modelleme yöntemi ile elde edilen mod frekansları ve titreşim genliği karşılaştırılmıştır. Bal peteği geometrisinin farklı L ve t değerleri için sonlu elemanlar analizleri genişletilmiştir. Bu sayede w (duvar kalınlığı), L ve t değerlerinin amplitud (çökme) değerine etkisi gözlemlenmiştir. W , L ve t değerleri ile dolaylı olarak parça dolgu yoğunluklarıyla ağırlıkları da değiştirilmiştir. Mümkün olan

en hafif, çökme değerleri ve titreşim değerleri en verimli numune tespit edilmiştir. Ayrıca sadece bal peteği değil en verimli dolgu geometrilerinin de testleri aynı parametrelerde yapılmıştır ve sonuçlar aynı değerlere sahip fakat farklı geometrilerdeki dolgular için de kıyaslanmıştır.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Giriş

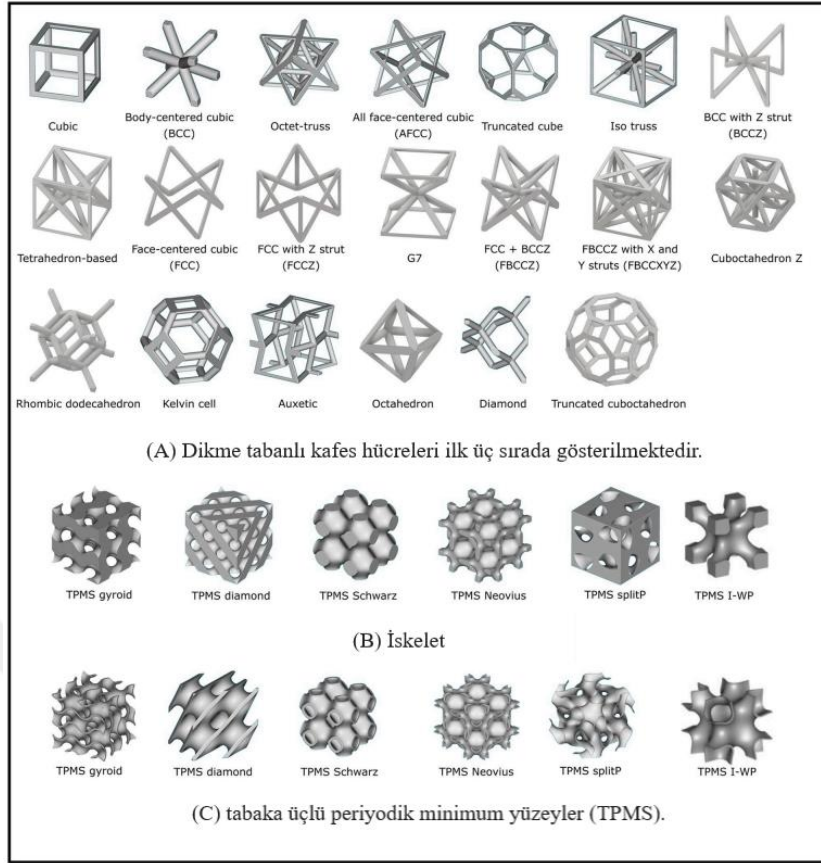
Genellikle üç boyutlu baskı olarak da adlandırılan eklemeli imalat, modern endüstride devrim niteliğinde bir yöntem olarak, son yirmi yılda yoğun bir kullanım alanı bulmuştur. Malzemeyi katı bir bloktan talaş kaldırmayı içeren geleneksel eksiltici yöntemlerin (tornalama, frezeleme vb) aksine, eklemeli üretim nesneleri dijital tasarımlardan katmanlar halinde oluşturur. Bu sayede geleneksel imalat yöntemleri ile üretimi mümkün olmayan geometrilerin imalatı mümkün hale gelmiştir. Bu alanda son yirmi yılda yapılan akademik çalışmalar da hız kazanmış olup, her geçen gün gelişmekte olan bir üretim süreci haline gelmiştir. Bu tez çalışmasında bu alanda yapılan çalışmaların ve öne çıkan bulguların kısa bir özeti verilmeye çalışılmıştır.

2.2.1 Kafes Yapıları

Hafiflik, yüksek özgül dayanım, sertlik ve ısı dağılımı gibi üstün özelliklere sahip olan kafes yapıları, havacılık, biyoloji mühendisliği, makine mühendisliği ve diğer birçok tasarım alanında tercih edilen bir yapı geometrisidir.

Kafes yapıları, gözenekli malzemelerin ortaya çıkmasından önce, hücresel yapılar olarak adlandırılıyordu. "Hücresel yapı" terimi, öncelikle Gibson ve Ashby, Evans, Hutchinson ve diğerleri tarafından tanıtıldı. Gibson ve Ashby, hücresel yapıyı köpükler (açık ve kapalı hücreli köpükler) ve peteklerden oluşan bir yapı olarak tanımladılar. Ancak, kafes yapıları, köpüklerden ve peteklerden farklı bir tür hücresel malzeme olup, yapısal farklılıklar çoğunlukla birim hücrenin topolojisi, ölçeği ve özelliklerinde yatar (Gibson 1997). Dikme tabanlı kafeslerde, birim hücrelerin köşelerinde veya kenarlarında (ve bazen de hücrenin iç kısmında) bulunan düğümler, genellikle dikmeler veya kırışlar olarak adlandırılan ince düz elemanlarla bağlanır.

Mevcut literatür taramasından elde edilen en önemli sonuçlar, Şekil 2.1'in ilk üç satırında gösterilmektedir. Bunlar temel olarak temel kübik hücreyi temel alır; burada düğümlerin ve dikmelerin sayısı istenen yoğunluğu ve mekanik özellikleri sağlayacak şekilde modüle edilir.



Şekil 2. 1 Kafes yapılarının çeşitli mimarileri (A) Dikme tabanlı kafes hücreleri ilk üç sırada gösterilmektedir. (B) İskelet ve (C) tabaka üçlü periyodik minimum yüzeyler (TPMS) (Zheng 2019).

FDM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerini belirleyen faktörler arasında, matris fazı olarak kullanılan polimer filament tipi yanında, üretim parametrelerinin yanı sıra mekanik özellikleri geliştiren katkı maddelerinin eklenmesi de etkilidir (İpekçi 2017). ABS, PLA ve PET-G gibi sıkça kullanılan filament çeşitleri dışında, son zamanlarda metal veya termoplastik eklenerek üretilen metal-polimer kompozit malzemeler de popüler hale gelmiştir.

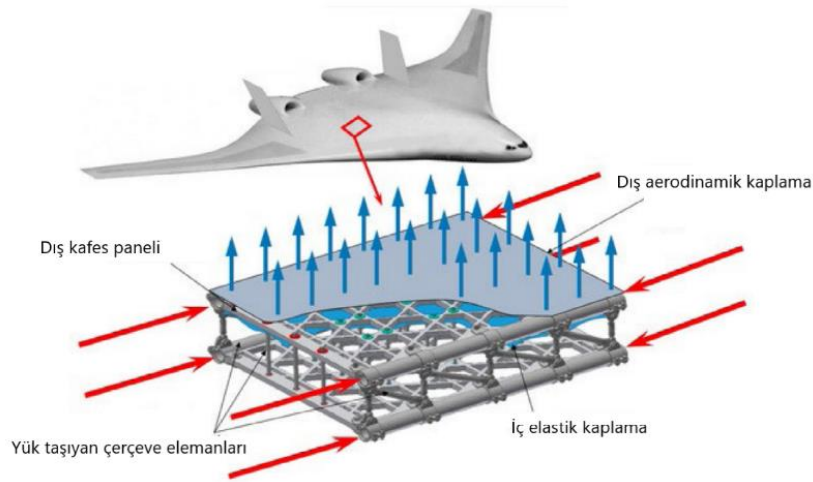
Gülcan (2021) tarafından yapılan çalışmada, mevcut filamentlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için ek katkı maddeleri kullanan önemli literatür çalışmalarını da incelemiştir. Araştırmanın amacı, üretilen kompozit filamentlerin mekanik özelliklerini artıran katkı maddelerini belirlemektir.

Ayrıca, bu alanda yeni çalışmalara başlayacak veya yeni bir kompozit filament geliştirecek olanlar için deneysel çalışmaların ve planlamanın pratik bir rehber olması hedeflenmektedir.

2.2.2 Kafes Yapıları Kullanım Alanları

Tabakalı ve hücresel yapıya sahip olan kafes yapıları, geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yapılar, mimari, endüstriyel ve uzay alanlarında çeşitli amaçlar için tercih edilmektedir. Mimari alanda, kafes yapılar estetik görünüşleri ve yaratıcı tasarım potansiyelleriyle dikkat çeker. Büyük açıklıkların geçilmesi gereken mekanlarda, kafes yapılar dayanıklılıkları ve esneklikleri ile tercih edilirler. Özellikle spor salonları, stadyumlar, fuar alanları gibi geniş kapsamlı mekanlarda kullanılmaktadırlar (Babae 2013). Ayrıca, kafes yapılar modern mimarinin sembolik bir ögesi olarak da görülmektedir. Endüstriyel alanda, kafes yapılar genellikle büyük açıklıkları kapatmak, depolama alanları oluşturmak veya üretim tesislerini desteklemek için kullanılır. Hafiflikleri ve kolay montajları sayesinde endüstriyel tesislerin hızlı bir şekilde inşa edilmesine olanak tanır.

Ayrıca, kafes yapılar çatı sistemleri olarak da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uzay alanında, kafes yapılar uzay istasyonları, roket rampaları ve uzay araçları Şekil 2.2’de belirtilen destek yapıları olarak kullanılır (Duos 2014). Bu yapılar, uzay araştırmalarında kullanılan hassas ekipmanların korunması ve çalışma alanlarının sağlanması için önemlidir. Ayrıca, uzayda yapısal dayanıklılığı ve hafifliği nedeniyle tercih edilirler. Kafes yapıları, geniş açıklıkları geçmek, hafiflikleri ve dayanıklılıklarıyla dikkat çekmektedir ve farklı endüstrilerde çeşitli amaçlar için kullanılmaktadırlar.



Şekil 2. 2 Kafes yapılarının aerodinamik üzerindeki etkisi (Dubovikov 2019)

Kafes yapılar, yüksek dayanım-ağırlık oranları, verimli malzeme kullanımı ve enerji sönümleyebilme gibi benzersiz özellikleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Bu uygulamaların biri ısı değıştircilerdir. Şekil 2.3-a 'da Karmaşık ve ince cidarlı yapıya sahip geometriler üretmek için çeşitli kafes yapılarının kullanıldığı görülmektedir. Şekil 2.3-b de ise Hongik Üniversitesi tarafından sürücü koltuğu tasarımı için kafes yapısı kullanılmıştır. 45 x 30 x 30 cm boyutlarındaki maket, çeşitli parçalar halinde basılarak daha sonra birleştirilen koltuk üretimi için Invicta DL380 malzemesi kullanılmıştır (Grima 2011). Şekil 2.3-b 'de havacılık ve otomotiv endüstrisi için kafes yapıları bulunmaktadır, uçaklar ve araçlar için hafif ancak güçlü bileşenler oluşturarak yakıt verimliliğinin artırılmasına ve emisyonların azaltılmasına yardımcı olurken, darbe enerjisini emerek araçlardaki güvenlik özelliklerini geliştirecek şekilde tasarlanır. Şekil 2.3-c 'de tıbbi cihazlarda, ortopedik implantlar bulunmaktadır. İmplantlar için doğal kemiğin gözenekli yapısını taklit ederek daha iyi entegrasyon ve iyileşmeyi desteklemek için kullanılır ve protez uzuvlarda işlevselliği ve konforu artırmak için hafif ve güçlü yapılar kullanılmaktadır.

Mimarlık ve inşaat alanında, inşaat malzemelerine ağırlığı azaltırken dayanıklılık sağlamak için dahil edilebilir ve bina tasarımlarında estetik ve işlevsel amaçlı benzersiz görsel efektler ve gölgelendirmeler sunar (Wang 2016). Üretim ve üç boyutlu baskı sektöründe, özel mekanik özelliklere sahip parçaların oluşturulmasına olanak tanıyarak malzeme kullanımını ve performansı optimize eder, karmaşık şekil ve yapıların hızlı prototiplemesini kolaylaştırmaktadır. Spor gereçlerinde, kasklar ve dolgular gibi koruyucu donanımlarda hafif kalırken yüksek darbe direnci sağlamak için kullanılmaktadır ve bisiklet çerçeveleri, raket çerçeveleri gibi performans ekipmanlarında azaltılmış ağırlık ve artırılmış güç yoluyla performansı artırmaktadır. Enerji sektöründe, yüksek yüzey alanı/hacim oranı ile verimli ısı değışimi gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır ve rüzgâr türbini kanatlarında ve enerjiyle ilgili diğer yapılarda verimliliği artırmak ve malzeme kullanımını azaltmak için kullanılmaktadır. Kullanım alanı Şekil 2.3-a 'da gösterilmektedir. Savunma ve havacılık alanında ise uydu bileşenlerinin üretiminde hafif ve güçlü yapılar kullanılarak fırlatma maliyetleri ve performansı optimize edilirken, gelişmiş kafes tasarımları ile askeri zırhın koruyucu özellikleri artırılabilir. Bu uygulamalar, çeşitli yüksek performanslı ve yenilikçi alanlarda kafes yapılarının çok yönlülüğünü ve avantajlarını göstermektedir.

Tasarlanacak bileşenlerde kullanılacak kafes yapıların seçiminde dikkate alınması gereken dört önemli faktör bulunmaktadır; yapı, metal, işleme ve ekonomi. Burada yapısal olarak, istenilen gözenek şekli, gözenek sayısı ve kafes yapısının iç yüzey alanı gibi özellikler anlaşılmaktadır (Zheng 2014). Örneğin, uçaklardaki yük taşıyan bir bileşen için, kapalı hücreli bir yapı tercih edilebilirken, elastik modülü düşük olan bölgelerde, örneğin kemik implantlarında, açık hücreli bir yapı tercih edilebilmektedir. Metal olarak, tasarlanan ürünün kullanım alanına uygun malzeme seçimi kastedilmektedir. Örneğin, uçaklardaki yük taşıyan bir yapı için alüminyum tercih edilebilmektedir (Pattanayak 2016). Kafes yapının işlenmesi için kullanılacak teknoloji ve bu teknolojinin getirdiği maliyet farkları da göz önünde bulundurulmaktadır.



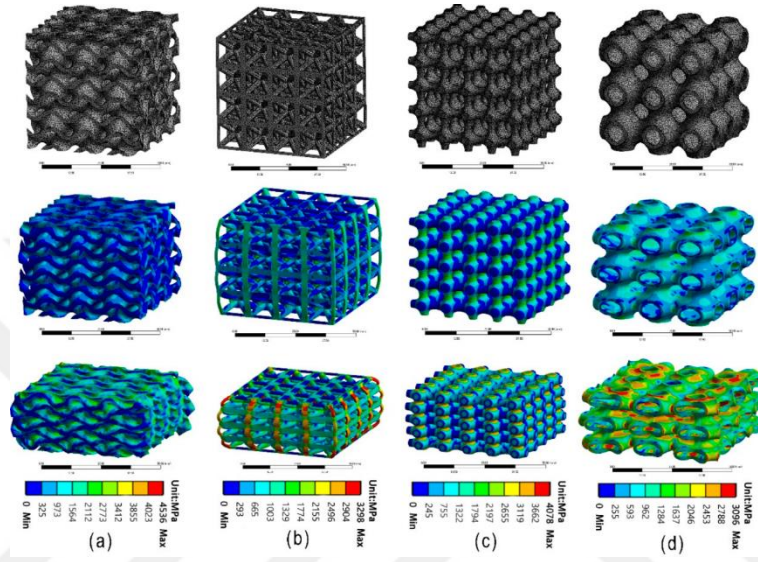
Şekil 2. 3 Kafes yapı kullanılarak üretilmiş olan bazı tasarım örnekleri, a) Isı değiştirici (Dutkowski 2019), b) Araç koltuğu, c) Kalça protezi

2.2.3 Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri

Mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerinden bahsedildiğinde genellikle o malzemenin elastik modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve poisson oranı gibi öne çıkan unsurlar akla gelmektedir. Kafes yapılarında da elastik modül ve akma dayanımı yine mekanik özellik olarak tanımlanmaktadır.

Serbestlik derecesinin sağladığı geometrik özgürlük nedeniyle kafes yapılar, sürekli döküm yöntemi ile üretilen malzemelerle elde edilemeyen fonksiyonel veya mekanik özelliklere ulaşabilmektedir. Bunlar; negatif poisson oranına (Koehnen 2018), negatif rijitlik ve negatif sıkıştırılabilirliktir. Ayrıca polimer esaslı malzemeler için negatif termal genleşme katsayısı ve düşük kütleli yüksek rijitlik özellikleri de mühendislik malzemelerde gözlemlenmeyen özellikler arasındadır ve Şekil 2.4 'de belirtilmektedir.

Kafes yapıların mekanik özellikleri genellikle ana malzemelerinin mekanik özelliklerinin bir kesri olarak ifade edilmektedir. Hücresel yapının görünür yoğunluğunun (ρ_h) hücresel yapının malzemesinin yoğunluğuna (ρ_r) oranı olan kafes yapının bağıl yoğunluğuna (ρ_h/ρ_r) bağlıdır. Topolojiden bağımsız olarak, kafes yapıların mekanik özelliklerinin bağıl yoğunluk azaldıkça azaldığı bilinmektedir (Leary 2018).

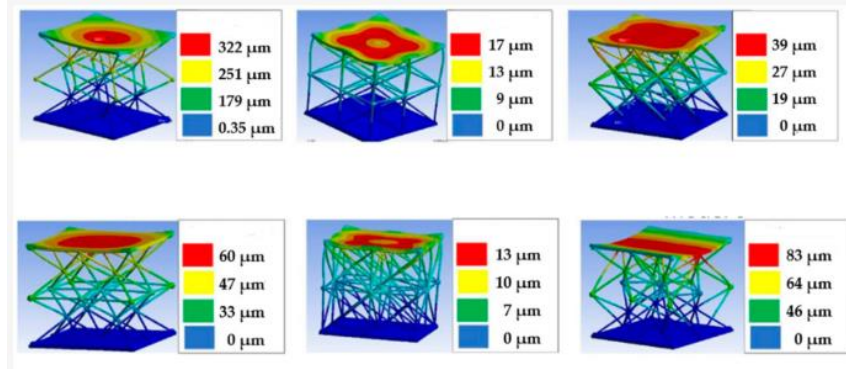


Şekil 2. 4 Kafes yapı tiplerinde uygulanan kuvveti iletim örneği (Teng F. 2022)

Hücrelerin yükleme yönüne göre yönelimi de anizotropik (farklı yönlerde ölçüldüğünde özellikleri değişen malzemeler) kafes yapıların mekanik tepkisini önemli ölçüde etkilemektedir. Genel anlamda kafes yapılarının deformasyon davranışı üç farklı bölge ile tanımlanır, Şekil 2.7 'de ifade edilmektedir. Bunlar lineer elastik deformasyon; plastik deformasyon ve yoğunlaşma (Mazur 2016). Kafes yapıların bileşen dikmeleri, basma yükü altında üç hasar mekanizmasına (akma, burkulma ve kırılma) karşı koymaya çalışmaktadır. Elastik deformasyon sırasında malzeme lineer elastik bir davranış sergilemektedir. Yani yükün kaldırılması durumunda numune tekrar eski haline dönmeye çalışmaktadır. Buradaki doğrunun eğimi malzemenin elastik modülünü vermektedir.

Elastik sınıra ulaşıldığında, hücreler akmaya veya burkulmaya başladığında plastik deformasyon başlamaktadır (Mishra 2021). Eğilme ağırlıklı yapılarda deformasyon, plato gerilimi olarak adlandırılan neredeyse sabit bir gerilimle devam eder bu durum, Şekil 2.5 'de belirtilmiştir. Yüklemin devam etmesiyle birlikte hücre bileşenleri diğer bileşenlerle temas edecek ve daha fazla deformasyon oluşumu kısıtlanacaktır. Böylece bu

aşamadan sonra malzemede yoğunlaşma gerilmesine ulaşılır ve gerilme dik bir şekilde arttıkça yoğunlaşma başlamaktadır (Fu 2002).

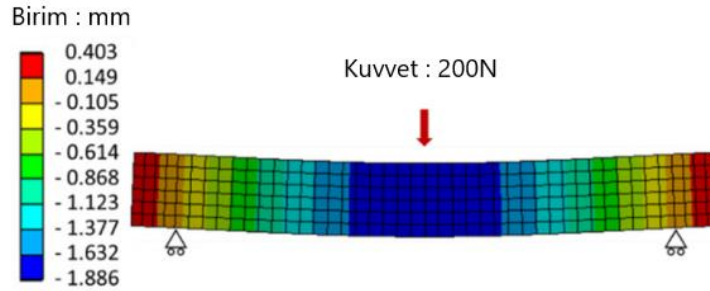


Şekil 2. 5 Kafes yapı kullanılarak üretilmiş olan bazı tasarım örneklerinin uygulanan kuvvete gösterdiği tepki (Chen 2020)

Kafes yapılar, mekanik ve fonksiyonel özellikler açısından dikkat çekici avantajlar sunmaktadır. Bu yapılar, belirli bir birim hücre sayısına ulaşıldığında makroskobik düzeyde belirgin hale gelen elastisite modülü ve akma dayanımı gibi mekanik özellikler kazanmaktadır. Geleneksel döküm malzemeleriyle kıyaslandığında, kafes yapılar aşağıdaki özgün özellikleri sergileyebilmektedir (Mieszala 2017). Kafes yapıların mekanik özellikleri, genellikle ana malzemelerinin mekanik özelliklerinin bir yansıması olarak değerlendirilir ve bu özellikler, kafes yapısının bağıl yoğunluğuna bağlıdır. Bağıl yoğunluk, hücresel görünür yoğunluğun (ρ^*) kafes yapısının malzemesinin yoğunluğuna (ρ_s) oranı ile tanımlanır. Bu oran, kafes yapının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir faktördür. Daha yüksek bir bağıl yoğunluk, genellikle daha iyi mekanik özellikler anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, kafes yapının tasarımına bağlı olarak, belirli geometrik düzenlemeler ve malzeme seçimleri, mekanik performansı artırabilir veya azaltabilmektedir.

Şekil 2.6'da bu bağlamda, kafes yapıların mekanik özellikleri, yalnızca kullanılan malzemenin özellikleriyle değil, aynı zamanda yapının tasarımı ve yapılandırmasıyla da doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, kafes yapıların optimize edilmesi hem mekanik dayanıklılığı hem de hafifliği sağlamak amacıyla önem taşımaktadır. Araştırmalar, bu yapıların çeşitli uygulamalarda, özellikle havacılık, otomotiv ve biyomedikal mühendislik alanlarında, yenilikçi ve performans odaklı çözümler sunma potansiyelini ortaya koymaktadır. Topolojiden bağımsız olarak, kafes yapılarının mekanik

özelliklerinin bağıl yoğunluğun azalmasıyla azaldığı bilinmektedir (Galantucci 2015). Hücrelerin yükleme yönüne göre oryantasyonu da anizotropik kafes yapılarının mekanik tepkisini önemli ölçüde etkilemektedir.



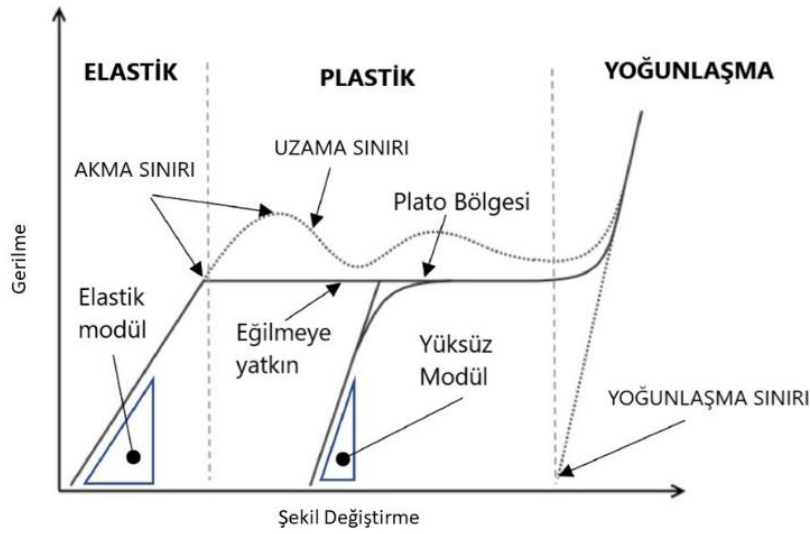
Şekil 2. 6 Kafes yapı kullanılarak oluşturulan modele kuvvet uygulanması ve çökme değerleri (Chen 2020)

SLM (Selective Laser Melting) yöntemiyle üretilen kafes yapıların mekanik testleri genellikle basınç testleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bunun temel nedeni, basınç testinin çekme testine göre daha basit bir uygulama sürecine sahip olmasıdır. Çekme testleri, numune ile test donanımı arasındaki özel arayüz tasarımını gerektirirken, basınç testleri, kafes yapıların plakalar arasındaki ezilme yoluyla kolayca gerçekleştirilebilmektedir.

Basınç testleri, kafes yapıların dayanıklılığını değerlendirmek için daha pratik bir yaklaşım sunmaktadır; bu sayede karmaşık test düzeneği gereksinimlerini azaltılmaktadır. Ayrıca, basınç testi, malzemenin gerçek kullanım koşullarını daha iyi simüle edebilmektedir, bu da kafes yapıların mekanik özelliklerinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, SLM ile üretilen kafes yapıların performansını belirlemek için basınç testleri önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. (Xu 2017).

Kafes yapıları gerilim altında test ederken, genellikle arayüzeyin yakınında başarısızlıklar gözlemlenmektedir. Bu durum, kafes yapının test aparatı ile olan bağlantısında kritik bir stres konsantrasyonu olduğunu göstermektedir. Arayüzdeki bu stres yoğunlaşması, yapıların genel dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilir ve bu nedenle, bu noktada dikkatli bir değerlendirme yapılması önemlidir. Kafes yapıların çekme davranışı, hala

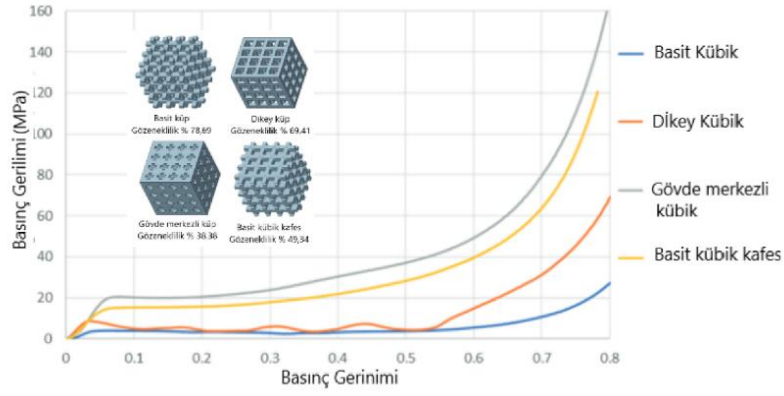
araştırılması gereken bir alan olarak kalmaktadır. Özellikle, bu yapıların mekanik performansını artırmak için arayüz tasarımının optimize edilmesi ve stres dağılımının iyileştirilmesi gerekmektedir. Çekme testlerinin daha fazla incelenmesi, bu yapıların dayanıklılığını ve performansını artırmak için kritik bilgiler sağlayabilir. Bu nedenle, kafes yapıların çekme davranışını anlamak, mühendislik uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2. 7 Kafes yapısının basma zorlanması altındaki davranışı

Dikme narinliği arttıkça burkulma olasılığı da artmakta, bu durum gözenekliliğin sabit kalması halinde birim hücre boyutunun büyümesiyle basınç dayanımının azaldığını göstermektedir (Bellehumeur 2004). Basınç dayanımı ve sertlik, birim hücrenin eğilme baskın mı yoksa gerilme baskın mı davrandığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Eğilme baskın yapılar esnek özellikler sergilerken, gerilme baskın yapılar daha yüksek dayanım gösterir (Bethel 2006).

Şekil 2.8’de, hücre yapılarına sahip PLA’dan üretilmiş geometrilerin basma davranışı sunulmaktadır. Bu grafik, farklı tasarımların basınç dayanımını nasıl etkilediğini ve eğilme ile gerilme baskınlıklarının sonuçlarını görsel olarak ortaya koymaktadır. Bu bilgiler, kafes yapıların tasarımı ve optimizasyonu için önemli ipuçları sağlamaktadır.



Şekil 2. 8 Farklı hücre geometrisine sahip PLA malzemeden üretilmiş geometrilerin basma davranışları

2.2.4 Kafes Yapıların Üretim Yöntemleri

Kafes yapılar, her biri kendine özgü avantajlar ve uygulama alanları sunan çeşitli yöntemlerle üretilir. Bu yöntemler arasında eklemeli imalat tekniği önemli bir yer tutmaktadır (Spitznogle 1971). Bu bölümde, eklemeli imalat tekniğinin temel özelliklerine değinilecek ve ardından bu başlık altında kullanılan alt başlıklar detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Eklemeli imalat, katmanlar halinde malzeme ekleyerek nesnelerin oluşturulmasını sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu teknik, karmaşık geometrilerin hızlı bir şekilde üretilmesine olanak tanırken, malzeme israfını da minimize etmektedir. Ayrıca, kişiselleştirilmiş ve özelleştirilmiş ürünlerin üretilmesi için ideal bir çözüm sunar. Alt başlıklar altında, eklemeli imalatın türleri, kullanılan malzemeler, süreç parametreleri ve mekanik özellikler gibi konular detaylı olarak incelenecektir. Bu kapsamda, eklemeli imalatın kafes yapıların üretimindeki rolü ve sağladığı faydalar da vurgulanacaktır.

2.3.1 Eklemeli İmalat

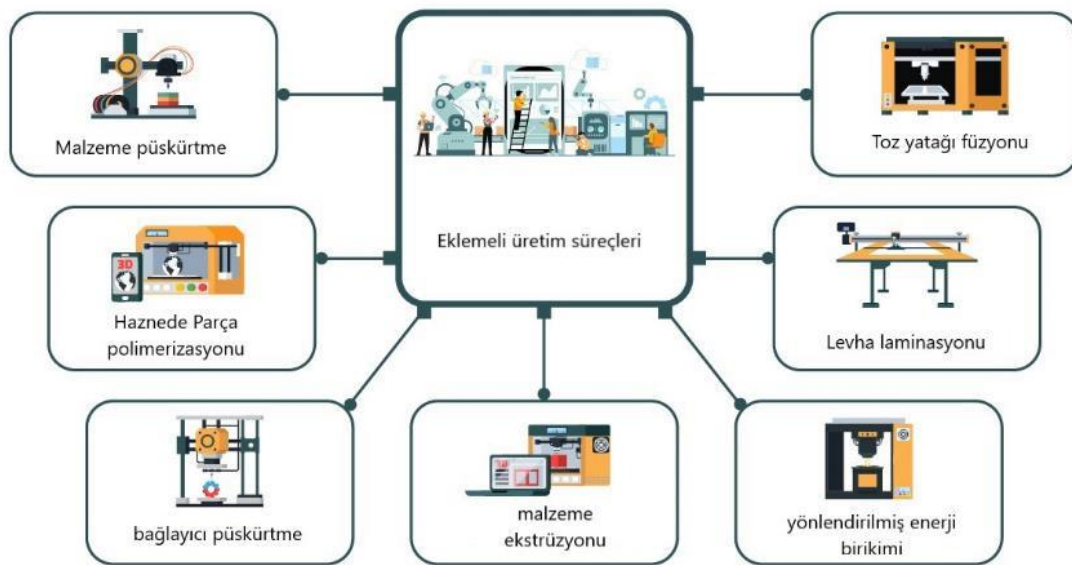
Eklemeli imalat, üç boyutlu baskı veya katmanlı imalat olarak da bilinir. Bu yöntem, bir dijital modeli katmanlar halinde fiziksel bir nesneye dönüştürmek için kullanılır. Her katman, önceki katmanın üzerine eklenerek oluşturulur ve bu işlem malzeme ekleyerek yapıldığı için "eklemeli imalat" olarak adlandırılmaktadır. Eklemeli imalat, plastik, metal, seramik ve biyomalzemeler gibi çeşitli malzemelerle çalışabilir ve mühendislik, tıp, eğitim, sanat, mimari gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Mazzeo 2024).

Eklemeli imalatın avantajları arasında, karmaşık geometrilerin kolayca üretilebilmesi, hızlı ve maliyet etkin prototip üretimi, özelleştirilmiş ürünlerin tasarlanabilmesi ve atık malzeme miktarının minimize edilmesi yer alır. Bu yöntem, üretim süreçlerinde yenilikçi ve esnek çözümler sunarak endüstriyel dönüşüme önemli katkılarda bulunmaktadır.

Eklemeli imalat teknolojileri, çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, havacılık endüstrisi, hızlı prototipleme ve parça üretimi için bu teknolojinin avantajlarından yararlanmaktadır. Otomotiv sektöründe, özelleştirilmiş parçaların üretimi ve yedek parça tedariki için sıkça tercih edilmektedir. Tıp alanında ise, protezler ve özel medikal cihazların üretiminde kritik bir rol oynamaktadır. Eklemeli imalatın yaygınlaşması, daha fazla sektörde kullanım potansiyelini artırmaktadır (Grafakos 2014).

Eklemeli imalat teknolojileri sürekli olarak geliştirilmektedir. Malzeme çeşitliliğinin artması, üretim hızının yükselmesi ve baskı kalitesinin iyileşmesi, bu teknolojilerin gelecekteki potansiyelini artırmaktadır.

Ayrıca, yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi teknolojilerin eklemeli imalat süreçlerine entegrasyonu, üretim verimliliğini artırabilir ve tasarım sürecini optimize edebilir. Günümüzde eklemeli imalat başlığı altında yer alan farklı uygulamalar, Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Bu uygulamaların her birinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.



Şekil 2. 9 Eklemeli imalat başlığı altında yer alan farklı üretim teknikleri

Malzeme püskürtme, mürekkep püskürtmeli yazıcılara benzer bir şekilde, belirli desenlerde katmanlar halinde damlacıkların yerleştirilmesiyle ürün oluşturma yöntemidir; her tamamlanan katman UV ışınlarıyla sertleştirilir (Papazoglou 2021). Fotopolimerlerin veya radyasyonla sertleştirilebilen reçinelerin, ultraviyole ışık ve oksijen arasındaki kimyasal reaksiyonu kullanarak üç boyutlu nesneler üretmesini sağlamaktadır. Malzeme Ekstrüzyonu, 1980'lerde S. Scott Crump tarafından patentlenen FDM yöntemi ile termoplastik filamentini eriterek katmanlar halinde yerleştirerek üç boyutlu nesneler oluşturur (Macy 2016).

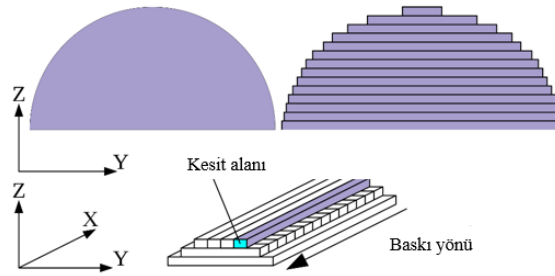
Toz Yatak Eritme, lazer sinterleme gibi toz yatak eritme teknikleriyle toz malzemeyi eritir ve lazer veya elektron ışını aracılığıyla birleştirerek üç boyutlu nesneler oluşturur. Levha Lamineleme, ultrasonik katkılı imalat, lamine nesne imalatı ve seçici depozit lamineleme gibi süreçleri içerir ve malzeme levhalarını istifleyerek ürün oluşturur. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme, termal enerji kullanarak malzeme katmanlarını eritir ve birleştirerek üç boyutlu nesneler üretir. Küresel katı hal eklemeli imalat pazarının 2028 yılında 34 milyar doların üzerinde değerlendirileceği öngörülmektedir (Lindberg 2018). Katı hal eklemeli imalatın artan popüleritesi, sağladığı faydalarla ilişkilidir. Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IoT) alanında, katı hal eklemeli imalat süreçleri, tedarik zinciri karmaşıklığını ortadan kaldırmak, üretimi optimize etmek, atıkları azaltmak, prototip maliyetlerini düşürmek ve üretim tesisleri ile depolama alanlarının ürettiği kirliliği sınırlamak için temel araçlar olarak öne çıkmaktadır (Forster 2015). Üç boyutlu baskı teknolojisinin yaygınlaşması, kişisel bilgisayarların veya yazıcıların evrim süreciyle karşılaştırıldığında farklılıklar göstermektedir.

Üç boyutlu baskı makineleri, büyük kuruluşların belirlediği yol yerine, girişimci ve meraklı bireylerin denetiminde gelişme göstermiş ve bu sayede geniş kitleler tarafından benimsenmiş ve geliştirilmiştir (İpekçi 2015). Bu durum, teknolojinin farklı amaçlar için çeşitli çözümler sunmasına yol açarken, çeşitli teknik yaklaşımların, üretim yöntemlerinin ve malzeme türlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır (Gebhardt 2013). Bu da standartlaşmayı ve kullanım kolaylığını olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, üç boyutlu baskı teknolojilerinde kullanım amacının öncelikle belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Hedef belirlendikten sonra, gereksinimlere uygun olarak elde edilecek çıktının özellikleri tanımlanabilir. Teknik kısıtlamalar göz önünde bulundurulduğunda, ölçekli model oluşturma, birebir basım yerine tercih edilebilir (Vaupotic 2006). Bu

süreçte, teknolojinin henüz tam olarak anlaşılammış bazı yönleri nedeniyle ortaya çıkan kısıtlamalar dikkate alınmalıdır.

2.3.2 Üç Boyutlu Yazıcı ile Eklemeli İmalat

Üç boyutlu yazıcı ile üretim, bilgisayar destekli olarak tasarlanmış bir nesnenin polimer, kompozit, reçine gibi malzemelerden ısı veya kimyasal işlemlerle üretilmesi sürecidir (Chaput 2011). Bu işlemi gerçekleştiren cihazlara ise üç boyutlu baskı makinesi veya üç boyutlu yazıcı adı verilir. Bu yöntemde üretimi yapılacak olan geometrinin bilgisayar ortamında tasarımı gerçekleştirildikten sonra, malzemenin belirli bir katman kalınlığında yığılması mantığına dayanmaktadır ve Şekil 2.10'da belirtilmiştir. Baskılar çeşitli hammaddeler kullanılarak yapılabilir. Normal kullanıcılar arasında en yaygın olarak kullanılan hammaddeler PLA ve ABS, TPU gibi plastiklerdir (Qian 2014).



Şekil 2. 10 Üç boyutlu baskı ile üretimin şematik ifadesi (İlyin 2021)

2.3.3 Dilimleme

Model veya CAD verisi, dilimleme yazılımı tarafından üç boyutlu yazıcının anlayabileceği bir dille, yani G koduna dönüştürülür. Başka bir deyişle, STL dosyasındaki model, dilimleme yazılımı aracılığıyla katmanlara ayrılır. Bu katmanlar, plastik eritme, lazer sinterleme, sterolitografi gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu aşama, kaliteli ürünler üretebilmek için en önemli adımdır. Üç boyutlu yazıcı ile üretim sırasında gereken birçok parametre bu aşamada belirlenir. En önemli parametrelerden bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- **Katman Kalınlığı:** Parçanın Z eksenindeki hassasiyeti belirleyen bir parametredir. Genellikle 0.25 mm civarındadır, ancak 0.1 mm'ye kadar indirilebilir.
- **Dolgu Deseni:** Bu parametre, parçanın iç dolgu katmanlarının geometrisini belirler.
- **Dolgu Miktarı:** üç boyutlu yazıcının en önemli özelliklerinden biri, parçanın iç hacmini doldurmadan üretim yapabilme yeteneğidir. Sağlam ve dayanıklı bir ürün için dolgu miktarı optimum seviyede olmalıdır. İstenirse, %100 doluluk oranıyla üretim yapılabilir. Ancak, sadece görsel amaçlı bir üretim için %20 doluluk oranı yeterli olabilir.
- **Hız ve Sıcaklık:** Üç boyutlu yazıcının en kritik parametreleridir. Püskürtücünün (nozzle) hangi sıcaklığa kadar ısıtılacağı ve ne kadar hızlı hareket edeceği bu parametrelerle belirlenir. Bu değerler genellikle malzemeye ve üretilecek parça geometrisine bağlı olarak değişebilir (Forster 2015).

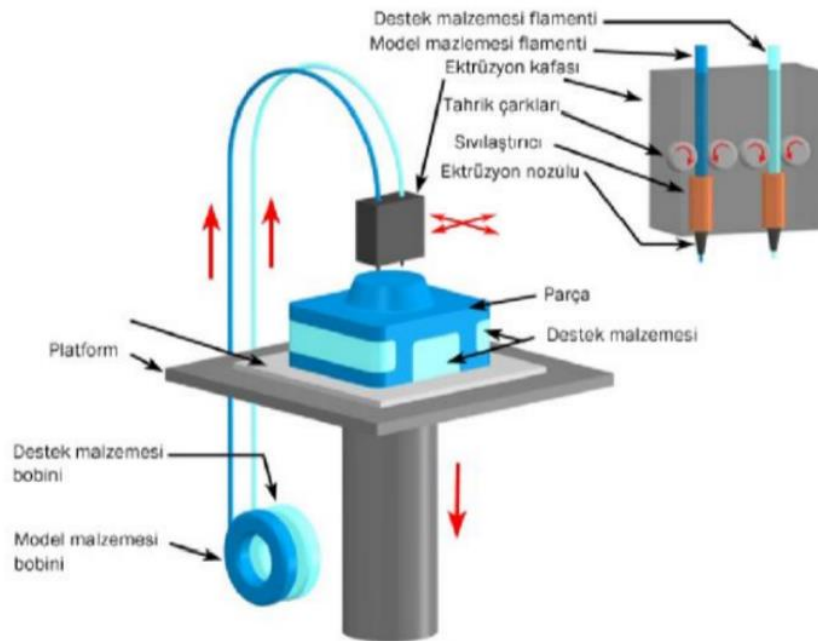
2.3.4 Baskı İşlemi

Geleneksel FDM tipi üç boyutlu yazıcılarda baskı işlemi, bilgisayar ortamında başlar ve yazıcının baskıyı tamamlamasıyla son bulur. Bazı üç boyutlu yazıcılar, bilgisayar bağlantısına ihtiyaç duymadan hafıza kartındaki tasarım dosyasını okuyarak baskı yapabilir. Üç boyutlu tasarım dosyaları, bilgisayar yazılımı aracılığıyla dilimleme işlemine tabi tutulur ve basılabilir üç boyutlu dosya formatına dönüştürülür. Dilimleme programları, seçilen baskı parametrelerine göre ortalama 0,28 mm aralıklarla baskı yönüne dik eksen (Z) kesitleri olarak o katman için X ve Y koordinatlarını belirler. Bu dosyalar genellikle gcode formatındadır. Yazıcı tarafından gerçekleştirilecek tüm hareketler, sıcaklık değerleri, ham madde tüketim miktarı, yazıcının harcadığı enerji, baskı süresi ve hammadde dökümüne ne zaman başlanacağı gibi pek çok bilgiyi içerir. Yazıcının çözünürlüğü, katman kalınlığına ve X-Y eksenlerindeki hareket hassasiyetine bağlıdır. Baskı kalınlığı genellikle 100 µm (250 DPI) olarak belirlenir, ancak bazı yazıcılar 16 µm (1,600 DPI) gibi çok daha yüksek çözünürlükte baskı yapabilir. Baskı süresi, yazıcı ve basılan tasarıma göre değişiklik gösterir.

2.3.5 FDM Üretim Yöntemi

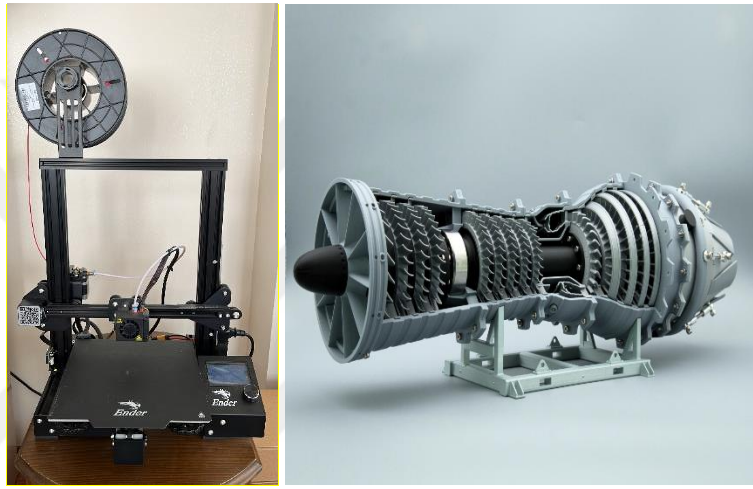
FDM, üç boyutlu baskı teknolojileri arasında en popüler ve yaygın olarak kabul gören yöntemlerden biridir. Bu yöntem, birikimli katman modeli olarak bilinir ve bir başlık aracılığıyla katmanlar halinde malzeme biriktirerek nesneler oluşturur şematik gösterimi Şekil 2.11 'de bulunmaktadır. FDM teknolojisinin temel çalışma prensibi, polimer malzemelerin ısıtılarak eritilmesi ve belirli koordinatlara göre ince katmanlar halinde üst üste yerleştirilmesidir. Bu süreçte genellikle PLA ve ABS gibi polimerler kullanılır. PLA, biyobozunur yapısı ve düşük erime sıcaklığı ile çevre dostu bir malzeme olarak öne çıkarken, ABS daha yüksek mukavemeti ve ısıl dayanıklılığı sayesinde mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.

FDM teknolojisi, plastik malzemeler grubunda yüksek mukavemet elde edilmesini sağlar ve karmaşık geometrilere sahip nesnelerin düşük maliyetle üretilmesine olanak tanır. Bu nedenle, prototipleme, eğitim, tıp ve mühendislik gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. FDM'nin en büyük avantajlarından biri, kullanıcı dostu ve düşük maliyetli olmasıdır, bu da bireysel kullanıcılar ve küçük ölçekli işletmeler için cazip bir seçenek sunar. Ancak, FDM teknolojisinin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle havada asılı duran çıkıntılı yapıların üretimi zorluk teşkil edebilir; bu tür yapılar destek malzemesi kullanılmadan üretildiğinde deformasyon riski taşır.



Şekil 2. 11 Birleştiricili yığılma modeli çalışma şekli (Sürmen 2019)

Tasarım aşamasında dikkatli planlama ve gerektiğinde destek malzemesi kullanımı ile bu sorunlar çözülebilir. FDM teknolojisi, kullanıcıların yaratıcı fikirlerini gerçeğe dönüştürmelerine olanak tanıyan esnek bir üretim yöntemi sunar. Gelecekte, malzeme bilimindeki ilerlemeler ve daha gelişmiş baskı teknikleri ile FDM'nin daha da yaygınlaşması ve çeşitlenmesi beklenmektedir. Şekil 2.12 'de Creality marka ender 3 pro model üç boyutlu yazıcı ve FDM tipi bir yazıcı ile üretilmiş türbin motoru modeli bulunmaktadır. Bu bağlamda, FDM teknolojisi, üç boyutlu baskı dünyasında önemli bir rol oynamaya devam edecek ve yenilikçi uygulamalara kapı aralayacaktır.



Şekil 2. 12 FDM üç boyutlu yazıcı ve üretimi yapılan parça örneği (İnt. Kyn. 7)

FDM yöntemi ile üretim yapılacaksa, dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri kullanılacak polimer malzemenin seçimidir. Piyasada yaygın olarak kullanılan yazıcılar genellikle ABS, PLA veya her ikisiyle çalışmaktadır. Bu nedenle, bu iki malzemeyi ve kullanım alanlarını anlamak, üç boyutlu yazıcı teknolojisinin temelini oluşturur. ABS, plastik enjeksiyon sektöründe yaygın olarak kullanılan hafif ama dayanıklı bir termoplastik polimerdir ve özellikle Lego parçalarının üretiminde tercih edilir (Bai 2017). Petrol türevi olan ABS, aseton ile çözünebilir özelliğine sahiptir ve genellikle 20 ila 80 °C arasında kullanılabilir; ancak 80 °C'nin üzerinde yumuşama ve şekil bozulması yaşanabilir, çünkü erime başlangıç sıcaklığı 105 °C'dir. Ayrıca, ABS'nin yoğun güneş ışığına maruz kalması durumunda hasar görme ihtimali bulunduğundan, bu koşullarda kullanılacak ürünlerde malzemenin boyanması önerilir (Shibata 1976). Ayrıca genellikle açık kasalı olarak tabir edilen yazıcılarda kullanılması tercih edilmemektedir. Ortam

sıcaklığının değişken olması baskının tamamlanmasına engel olabilmektedir.

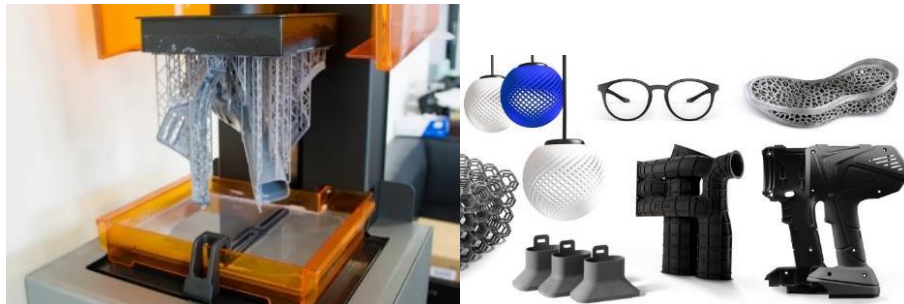
PLA ise geri dönüştürülebilir kaynaklardan üretilen çevre dostu bir malzemedir ve üç boyutlu yazıcılarda sıklıkla kullanılır. İnsan vücudu içinde 6 ay ile 2 yıl arasında parçalanabilmesi nedeniyle tıbbi ve diş hekimliği uygulamalarında da tercih edilir. PLA'nın bir diğer avantajı, farklı bileşenlerle karıştırılarak ahşap veya alçı görünümlü ürünler elde edilebilmesidir. ABS filamentlere göre çok daha kolay kullanılabilmesidir. Naylon, güçlü ve dayanıklı yapısıyla orta-yüksek seviyede detaylar gerektiren üretimlerde tercih edilmektedir ve lazer sinterleme yöntemiyle çeşitli üretimler gerçekleştirilebilir (Beyen 2007). Bu malzemelere ek olarak, metal alaşımları, seramik, polimer bazlı malzemeler, kâğıt, tuz ve reçine gibi çeşitli malzemeler de üç boyutlu yazıcılarda kullanılabilir. Özellikle DNA sarmalı gibi yapılar için reçine tercih edilirken, fiber ile güçlendirilmiş "cement polimer" malzemesi standart çimentodan daha dayanıklı ürünlerin üretimini sağlar (Çelik 2013). Tuzun malzeme olarak kullanıldığı ilk çalışmalar, yarı saydam, beyaz ve hızlı kuruyan yapısıyla Mimar Mark Kelly tarafından gerçekleştirilmiş olup, bu malzeme mimarların kavramsal tasarımlarını üretime dönüştürmelerine olanak sağlamıştır.

2.3.6 SLA Üretim Yöntemi

SLA, katmanlı imalatın önemli bir yöntemidir ve üç boyutlu nesnelerin üretiminde yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi sağlar (Sürmen 2019). Bu yöntemde genellikle sıvı formdaki fotopolimer reçineler kullanılır. İşlem, özel bir platformun altında bulunan bir tank içinde başlar; bu tankın içindeki reçine, bir lazer veya dijital ışık projektörü tarafından yönlendirilen UV ışınları ile katmanlar halinde sertleştirilir. Her bir katman, bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelinden elde edilen verilere dayanarak belirlenir. SLA, katmanları sıvı reçine yüzeyinde izleyerek ve seçilen alanları sertleştirerek nesneyi oluşturur. Bu süreç, ince detayları ve kompleks geometrileri hassas bir şekilde oluşturmayı sağlar (Özsolak 2019). Ayrıca, SLA'nın sunduğu yüksek çözünürlük, nesnelerin pürüzsüz ve homojen yüzeylerle sonuçlanmasını sağlar (Yalçın 2017). Bu teknoloji, farklı mekanik ve termal özelliklere sahip birçok çeşit reçine kullanımına olanak tanır ve bu da SLA'nın geniş bir uygulama yelpazesi sunmasını sağlar. Örneğin, yumuşak, esnek, sert veya şeffaf nesneler üretmek için farklı reçineler kullanılabilir. Bu

özellik, endüstriyel prototiplerden medikal modellere, mimari projelerden taktasarımlarına kadar çeşitli alanlarda SLA'nın kullanılmasını sağlar. Ancak, SLA işlemi genellikle işlem sonrası temizlik ve ek UV kürleme gerektirir (Kara 2013). Temizlik, baskıdan sonra fazla reçinenin çıkarılmasını ve nesnenin yüzeyinin pürüzsüzleştirilmesini içerirken, ek UV kürleme nesnenin tam olarak sertleşmesini ve istenen mekanik özelliklere ulaşmasını sağlar. Sonuç olarak, SLA teknolojisi, detaylı ve hassas üretim gereksinimlerini karşılamak için ideal bir seçenektir (Epma 2019).

Şekil 2. 13 SLA tipi üç boyutlu yazıcı çalışma şekli (İnt. Kyn. 8)



Şekil 2. 14 SLA yazıcı ile üretilmiş parça örnekleri (İnt. Kyn. 9)

2.4 FDM Tekniği ile Üretilen Ürünlerin Mekanik Özellikleri

Malzemenin etkin kullanımı malzemenin için mekanik niteliklerinin bilinmesi ve ihtiyaç duyulduğunda bu özelliklerin iyileştirilmesi gerekebilmektedir. Malzemenin mekanik özellikleri genellikle çekme dayanımı, darbe dayanımı, elastiklik modülü, akma dayanımı, yorulma dayanımı ve sertlik gibi kriterlerle ilişkilendirilmektedir (Schmidt 2017).

FDM tipi üretim yöntemiyle üretilen ürünlerin mekanik özelliklerini inceleyen araştırmalar, iki temel faktörün önemini vurgulamaktadır bu temel faktörler, baskı parametreleri, katkı maddeleri ile katkı maddesinin dolgu oranları olarak adlandırılmaktadır.

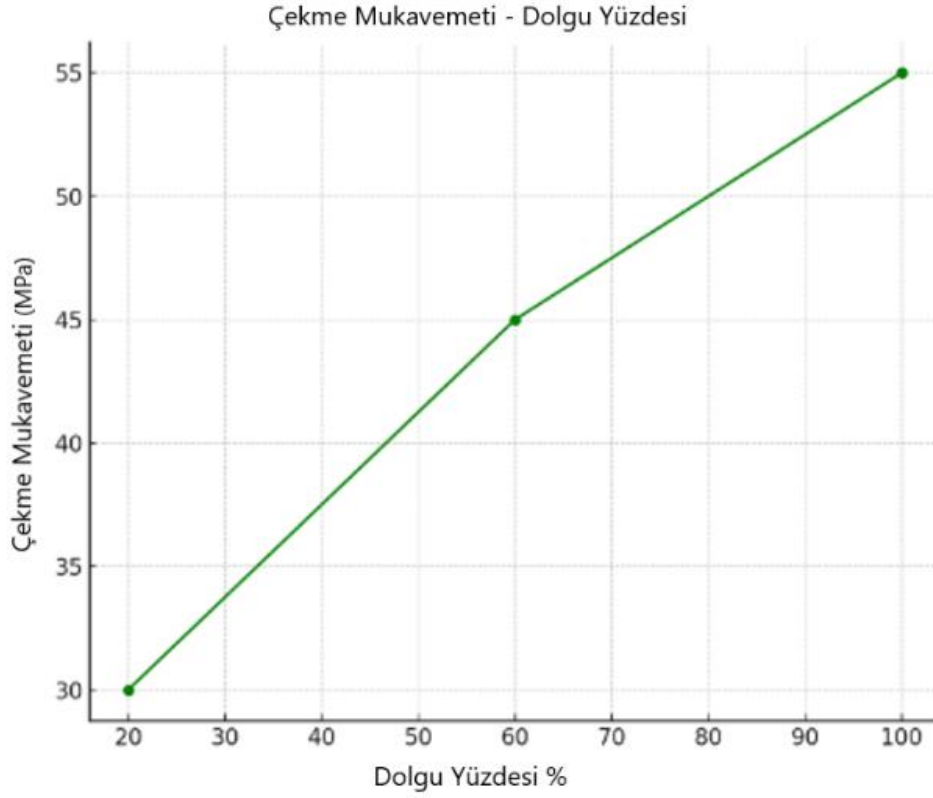
Üç boyutlu baskı parametrelerinin, üç boyutlu baskı ile üretilmiş ürünlerin mekanik nitelikleri üzerindeki etkilerini araştıran çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Irrinki 2017). Örneğin, Kam ve ekibi, dolum oranı, basım hızı, katman kalınlığı, filament ve püskürtme ağız çapı gibi değişkenleri sabit tutarak birçok farklı dolum denemesi gerçekleştirmiştir ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Deneysel çalışma sonuçları, doğrusal dolum deseniyle üretilen parçaların dayanıklılığının diğer dolum desenleriyle üretilenlere göre yaklaşık %15 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, aynı çalışmada tam petek dolum yönteminin diğer dolum biçimlerine göre daha fazla esneklik gösterdiği yapılan deneylerle tespit edilmiştir (Kayacan 2019).

FDM yöntemiyle basılan parçaların mekanik özelliklerini belirlemede katkı maddesinin etkilerini inceleyen çalışmalar da önemli bulgular sunmaktadır (Kayacan 2019). Dolgu malzemesinin mekanik özellikleri, FDM yöntemiyle yapılan üç boyutlu yazıcı üretiminde kritik bir rol oynar ve parçaların mekanik özelliklerini belirlemektedir.

Doluluk oranı, dolgu deseni, filament rengi, nozzle sıcaklığı, filament tipi (TPU, ABS, PLA), baskı yönü ve baskı hızı gibi parametreler, üretilen parçaların çekme mukavemeti, sertlik ve mekanik dayanıklılığı üzerinde belirgin etkiler yaratmaktadır (Duman 2017).

Örneğin, %100 doluluk oranıyla üretilen PLA numuneleri daha yüksek çekme mukavemeti ve sertlik değerlerine sahip olmaktadır, Şekil 2.15'te gösterilmekte olan, %20 doluluk oranıyla üretilen numuneler daha hafif ancak daha kırılabilir olduğu gözlemlenmektedir. (Rysava 2016).



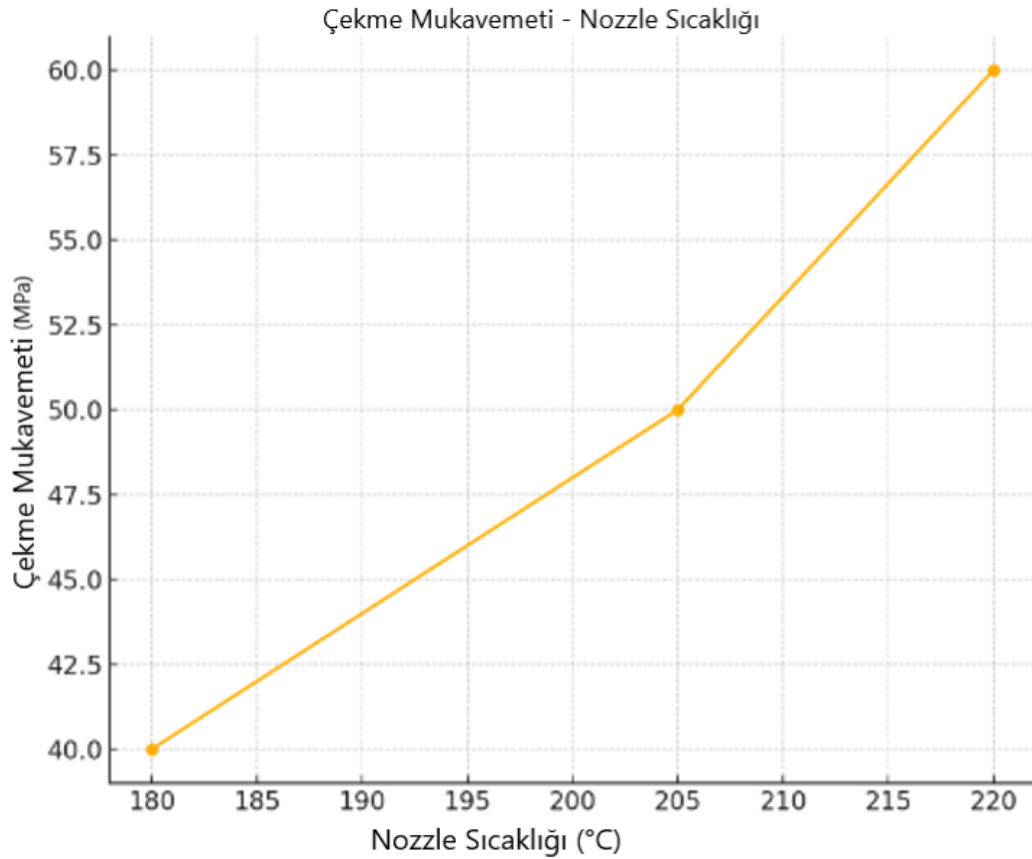
Şekil 2. 15 FDM ile üretilen numunede çekme mukavemeti ile dolgu yüzdesi oranı arasındaki ilişki (Rifaie 2014)

Dolgu desenleri (çizgi, ızgara, eş merkezli gibi) ve baskı hızları, mekanik özellikler üzerinde önemli farklılıklar yaratabilmektedir. Yüksek doluluk oranı ve optimal baskı parametreleri kullanılarak üretilen parçalar genellikle daha yüksek performans göstermektedir.

Üç boyutlu yazıcı ile üretimde nozul sıcaklığı, parçaların mekanik özellikleri üzerinde de önemli bir etkiye sahip olmaktadır.

Nozul sıcaklığı, termoplastik filamentlerin eriyerek katmanlar halinde birikmesini sağlamaktadır; bu süreçte sıcaklık, filamentin yapışma gücünü, katmanlar arası bağlanmayı ve nihai ürünün mukavemetini etkilemektedir. Örneğin, PLA malzemesi ile yapılan çalışmalarda, 220 °C nozul sıcaklığında üretilen numunelerin, daha düşük sıcaklıklarda üretilenlere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti gösterdiği bulunmuştur (Sofu 2007).

Yüksek sıcaklık, filamentin daha iyi erimesine ve katmanlar arasında daha güçlü bağların oluşmasına olanak tanırken, çok yüksek sıcaklıklar malzemenin bozulmasına ve mekanik özelliklerin azalmasına yol açabilir bu durum Şekil 2.16 'da belirtilmektedir (Polat 2016).



Şekil 2. 16 FDM ile üretilen numunede çekme mukavemeti ile nozzle sıcaklığı arasındaki ilişki (Rifaie 2014)

Dolayısıyla, optimal nozul sıcaklığının belirlenmesi, FDM yöntemiyle üretilen parçaların kalitesini ve performansını artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş numunelerde farklı sıcaklıklarda yapılan çekme deney sonuçları, malzemenin mekanik özelliklerini belirgin şekilde etkilemektedir.

Nozul sıcaklığı, termoplastik filamentlerin katmanlar arasında nasıl bağlandığını ve bu bağların ne kadar güçlü olduğunu belirlemektedir (Seçer 2019).

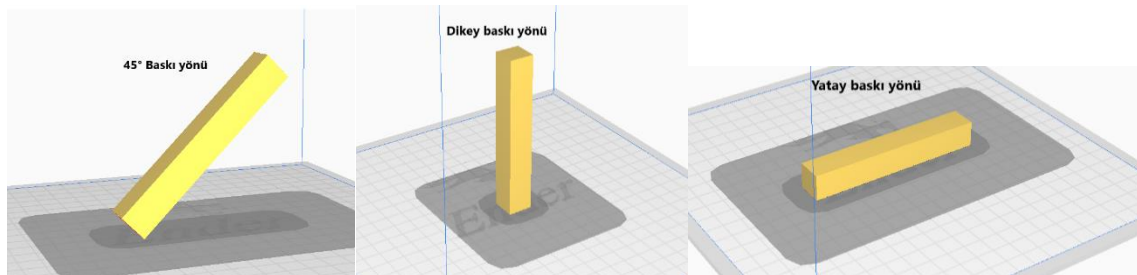
Örneğin, PLA malzemesi kullanılarak yapılan çalışmalarda, 180 °C, 205 °C ve 220 °C nozul sıcaklıklarında üretilen numunelerin çekme mukavemetlerinin karşılaştırılma grafiği, Şekil 2.17 'de bulunmaktadır. Grafikte, 220 °C'de üretilen numunelerin daha yüksek çekme mukavemeti değerine sahip olduğu gözlemlenmektedir (Ahuja 2016). Bu durum, yüksek sıcaklığın filamentin daha iyi erimesini ve katmanlar arasında daha güçlü bağların oluşmasını sağladığını göstermektedir (Nath 2019) ancak bu durum PLA tipi filamentler için geçerli olmaktadır.



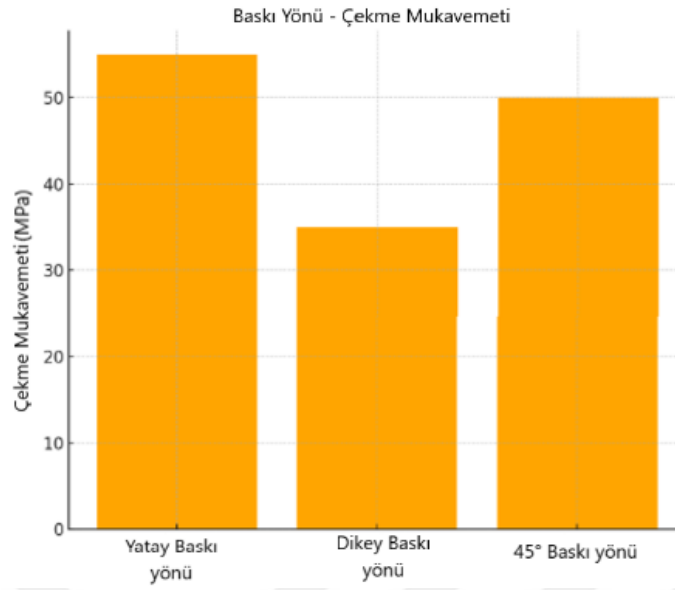
Şekil 2. 17 FDM ile üretilen numunede sertlik ile dolgu sıcaklığı oranı arasındaki ilişki (Jamal 2017)

Ancak, aşırı yüksek sıcaklıklar malzemenin termal bozulmasına neden olabilir ve bu durum mekanik özelliklerin azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, optimal nozul sıcaklığının belirlenmesi, üretilen parçaların kalite ve performansını artırmada kritik bir rol oynamaktadır (Galilea 2016).

Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş numunelerde baskı yönü, parçaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Baskı yönü, katmanların hangi açıyla yerleştirildiğini belirler ve bu, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve darbe dayanıklılığı gibi özelliklerde farklılıklara yol açabilmektedir (Schönrath 2019). Örneğin, dikey yönlendirilmiş numuneler, yatay veya 45 derece açılı yönlendirilmiş numunelere göre genellikle daha düşük çekme mukavemeti göstermektedir; bu durum, Şekil 2.18’de belirtilmiştir katmanlar arası yapışmanın, katman içi yapışmaya göre daha zayıf olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2. 18 Kirişlerin baskı tablasında bulunma konumları



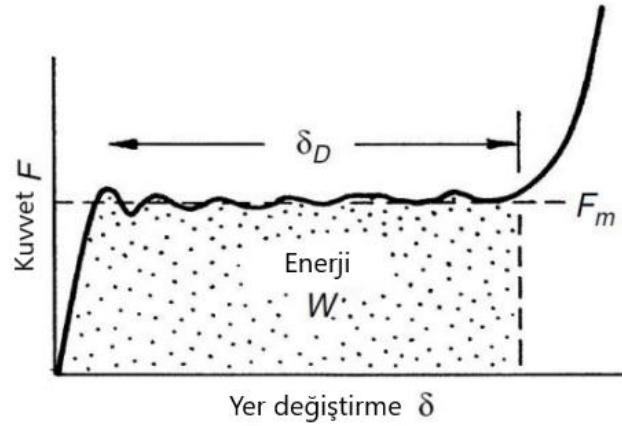
Şekil 2. 19 FDM ile üretilen numunede çekme mukavemeti ile baskı yönü arasındaki ilişki (Hasan 2014)

Benzer şekilde, baskı yönü, parçanın belirli yükler altında nasıl davrandığını etkilemektedir. Yatay yönlendirme, eğilme mukavemetini artırabilirken, dikey yönlendirme darbe dayanıklılığını azaltabilmektedir. Bu nedenle, baskı yönünün optimal seçimi, uygulama gereksinimlerine göre belirlenmeli ve parçaların mekanik performansını maksimize etmek için dikkatle değerlendirilmektedir. Bu seçim, nihai ürünün kullanım alanına bağlı olarak, tasarım sürecinde kritik bir rol oynamaktadır.

2.5 Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Ürünlerin Darbe ve Şok Sönümlene Özellikleri

Çarpma sırasında elastik ve plastik deformasyon, şok, kırılma ve parçalanma gibi birçok fiziksel olay meydana gelmektedir (Douellou 2019). Havacılık, otomotiv ve askeri uygulamalardaki yıkıcı arızalar, darbeden kaynaklanan emilen enerji miktarını artırarak bu arızaların azaltılması ihtiyacını doğurmaktadır. Özellikle havacılık endüstrisinde dolu ve kuş çarpmalarından kaynaklanan hasarın azaltılması büyük önem taşımaktadır (Pfaff 2018). Otomotiv endüstrisinde ise çarpışmalar sırasında yolcuları korumak amacıyla yüksek enerji emici malzemeler kullanılmaktadır (Rigon 2018). Şekil 2.19'da yer değiştirme-kuvvet grafiği görülmektedir. Bal peteği geometri, darbe sırasında emici bir görev üstlenmektedir; F_m sabit kuvvetiyle δD sınır mesafesine kadar plastik olarak

Çökme meydana gelmektedir (Hattal 2019). Bu tür tasarımlar, malzemenin enerji emme kapasitesini artırarak yapısal bütünlüğü koruma konusunda önemli bir rol oynamaktadır.

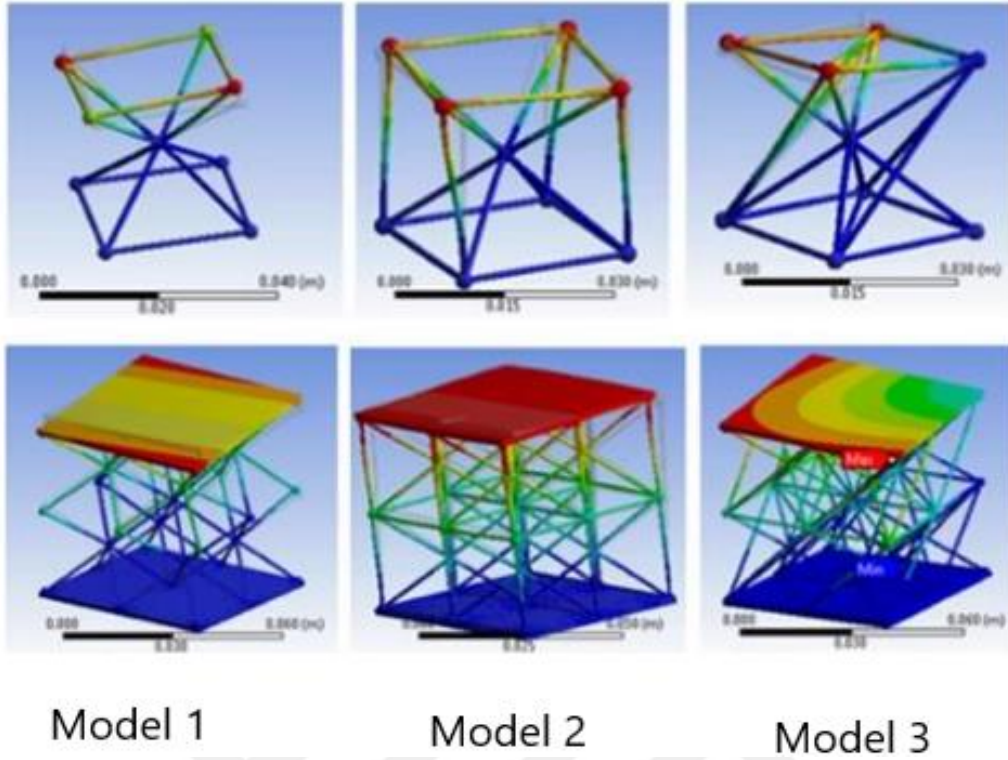


şekil 2. 20 FDM ile üretilen numunede uygulanan kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki (Rifaie 2014)

Yapıdan emilen her birim enerji, araçtaki yolculara uygulanan olası yüklerin azalması anlamına gelmektedir. Hüresel yapılar, dış kafes yapılarının enerjiyi absorbe etme ve darbe altında deforme olma özellikleri sayesinde aracın iç kısmındaki plastik deformasyonu da azaltabilmektedir. Bu nedenle, bir kafes yapısının enerji soğurma yeteneklerinin ve iyileştirmelerinin araştırılması oldukça arzu edilmektedir. Bu yapıların enerji emiliminin verimli ve doğru bir şekilde tasarlanması ve optimize edilmesi için başarısızlık mekanizmalarının iyi bilinmesi gerekmektedir (Liu 2019).

FDM yöntemiyle üretilen parçaların darbe ve şok sönümleme özellikleri, kullanılan malzemeye, baskı parametrelerine ve parçanın geometrik tasarımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında PLA, ABS, PETG ve TPU bulunmaktadır.

PLA, yüksek rijitlik ve düşük darbe dayanımı ile bilinirken, ABS daha esnek ve dayanıklı bir yapıya sahiptir ve şekil 2.20’de belirtilmektedir. PETG yüksek darbe dayanımı sunarken, TPU esnek yapısıyla mükemmel darbe ve şok sönümleme özellikleri sağlamaktadır (Meneghetti 2018). Bu farklı malzeme özellikleri, uygulama gereksinimlerine göre seçim yapılmasını mümkün kılarak güvenli ve etkili tasarımlar geliştirilmesine olanak tanımaktadır.



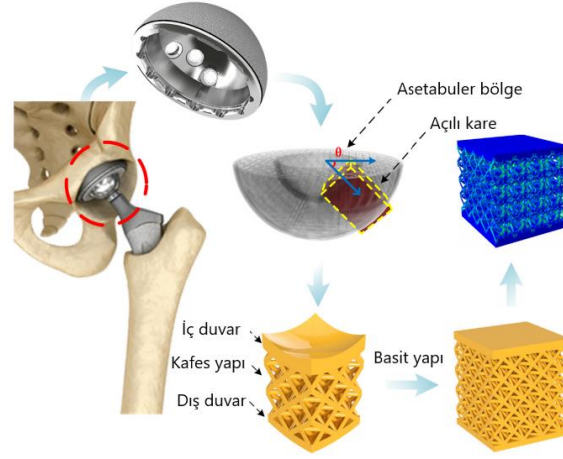
Şekil 2. 21 Kafes yapıda deney numunelerinin sonlu elemanlar metodu ile uygulanan kuvvet etkisinde gösterdiği şekil değişimi (Rifaie 2017)

Baskı parametreleri, parçaların mekanik performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Doluluk oranı, katman kalınlığı, baskı hızı ve ekstrüzyon sıcaklığı gibi faktörler, parçaların darbe dayanımını belirlemektedir. Örneğin, yüksek doluluk oranı ve ince katman kalınlığı, parçaların darbe dayanımını artırabilirken, düşük doluluk oranları şok sönmülme kapasitesini artırabildiği gözlemlenmektedir (Moridi 2018).

Geometrik tasarımda, hücresel yapılar ve kafes yapıları gibi iç yapılar enerji sönmülmesini iyileştirebilmektedir. Bununla birlikte, köşeler ve keskin kenarlar stres konsantrasyonlarını artırarak darbe dayanımını olumsuz etkileyebilmektedir.

Ek olarak, ısı ile işlem görmüş PLA parçalarının mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda, baskı sonrası ısı işlemlerinin mekanik dayanımı artırdığı gözlemlenmektedir.

Isıl işlem, katmanlar arasındaki bağlanma kalitesini iyileştirerek darbe dayanımını artırmaktadır (Larimian 2018). Bu, özellikle medikal uygulamalarda ve örneğin protez Şekil 2.21’de belirtilmiştir üretiminde büyük avantajlar sağlamaktadır (Holovenko 2020).



Şekil 2. 22 Kafes yapıya sahip protezin şematik gösterimi (Feng 2021)

Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş parçaların darbe ve şok sönümlenme özellikleri, özellikle hibrit fiber takviyeli kompozitlerin kullanımı ile önemli ölçüde artırılabilir. Araştırmalar, karbon ve Kevlar gibi sürekli fiberlerle takviye edilmiş PLA kompozitlerinin, saf PLA'ya kıyasla daha yüksek darbe direnci ve enerji absorpsiyonu sağladığını göstermektedir (Aktimur 2015). Ayrıca, polimerik sandviç yapılarının çekirdek yapı geometrisi, şok sönümlenme kapasitesini önemli ölçüde etkiler ve bu tür yapıların performansı, strut çapı ve düzeni gibi parametrelerle optimize edilebilmektedir (Holmberg 2019). Su emilimi ve ısı işlemi gibi düşük maliyetli post-proses teknikleri de PLA numunelerinin darbe direncini artırmada etkili bulunmaktadır.

2.6 Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Ürünlerin Titreşim Özellikleri

Araştırmalar, üç boyutlu yazıcılarla üretilen parçaların titreşim özelliklerinin çeşitli faktörler tarafından etkilendiğini göstermektedir. Özellikle, doluluk yüzdesi, malzeme tipi ve baskı parametreleri bu özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yapılan bir çalışmada, doluluk yüzdesinin artırılmasıyla üç boyutlu baskıyla üretilmiş olan yapıların titreşim özelliklerinin iyileştirildiği gözlemlenmektedir. Daha yüksek doluluk yüzdesi, yapıların rijitliğini artırarak titreşim genliklerini azaltmaktadır. Bir diğer araştırma ise, FDM teknolojisiyle üretilen renkli üç boyutlu yazıcıların titreşim karakteristiklerinin, mod analizi ve güç spektrumu yöntemi ile optimize edilmesi üzerine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, doğal frekans ve mod şekli yer değiştirmesi gibi dinamik özelliklerin analiz edilmesiyle, cihazın rezonans karakteristiklerinin iyileştirildiği ve

genel mod yer değiştirmesinin azaltıldığı bulunmaktadır. Ayrıca, üç boyutlu baskıyla üretilmiş olan polimer dişlilerin titreşim özellikleri üzerinde yapılan parametrik bir çalışmada, farklı baskı sıcaklıkları, baskı hızı ve doluluk yüzdesi gibi faktörlerin, dişlilerin titreşim davranışlarını önemli ölçüde etkilediği belirtilmektedir. Bu faktörlerin optimizasyonu, dişlilerin çalışma ömrünü ve performansını artırmada kritik bir rol oynamaktadır.

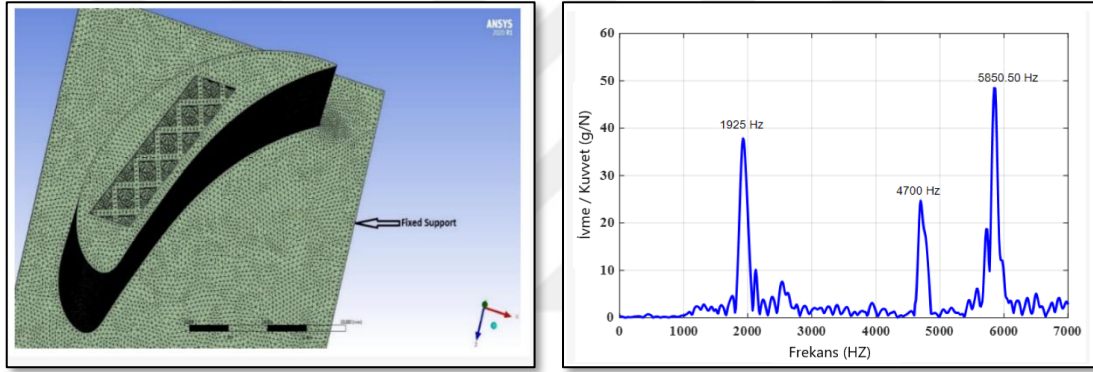
Sönüm oranı, bir sistemin titreşim enerjisini kaybetme hızını belirleyen bir parametredir ve bu özellik, genellikle malzemenin iç yapısı, esnekliği ve rijitliği ile doğrudan ilişkilidir. SLA yöntemiyle üretilen parçalar, fotopolimer malzemelerin daha sert ve daha az esnek yapıları nedeniyle genellikle daha düşük sönüm oranlarına sahip olabilir; bu, titreşim enerjisinin daha az emildiği ve daha hızlı iletildiği anlamına gelir. Bu durum, SLA parçalarının titreşimleri daha hızlı yaydığı ve sönümleme süreçlerinin daha az etkili olduğu sonuçlarını doğurur. Öte yandan, FDM yöntemiyle üretilen parçalar, genellikle daha esnek olan termoplastik malzemelerden üretildiği için daha yüksek sönüm oranlarına sahip olabilir (Turan 2022).

FDM parçalarının iç yapılarındaki zayıf bağlar ve katmanlar arasındaki boşluklar, titreşim enerjisinin bir kısmını emerek sönümlenmesine olanak tanır; ayrıca, bu parçaların genellikle daha düşük rijitlikleri, enerji kaybını artırarak titreşimlerin hızla sönmesine neden olur. Bu farklılıkların temel nedenleri, malzeme esnekliği ve rijitliği, yapısal bağlantılar ve katmanların özelliği, ayrıca iç yapıdaki doku farklarından kaynaklanmaktadır. SLA parçalarının daha rijit ve homojen katmanlarla birleştirilmiş yapıları, titreşim enerjisinin hızla iletilmesine yol açarken, FDM parçalarındaki katmanlar arası zayıf bağlar ve infill oranı, titreşim enerjisinin daha fazla sönümlenmesini sağlar. Sonuç olarak, FDM ile üretilen parçalar, genellikle SLA parçalarına kıyasla daha yüksek sönüm oranlarına sahip olma eğilimindedir; ancak bu fark, kullanılan malzemelerin ve üretim parametrelerinin özelliklerine göre değişkenlik gösterebilir (Aktitiz 2020).

2.7.1 Modal Analiz

Modal analiz, yapıların titreşim özelliklerini belirlemek için kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu analiz yöntemi, yapıların doğal frekanslarını, sönüm oranlarını ve mod şekillerini belirleyerek dinamik davranışlarını anlamayı amaçlamaktadır. Uygulama

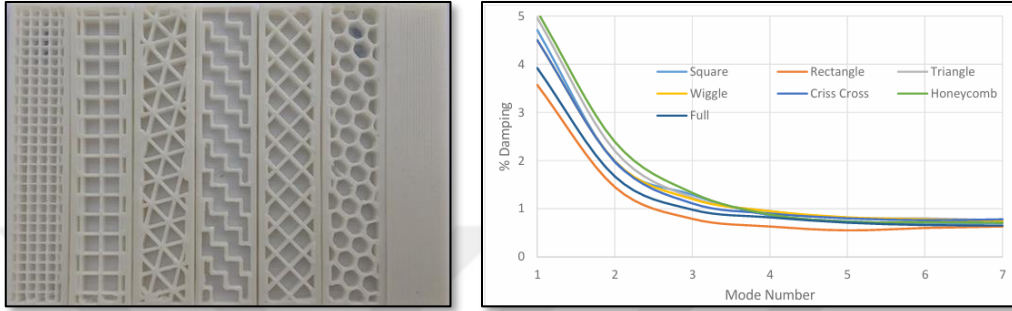
alanları arasında köprüler, binalar ve makine parçaları gibi çeşitli mühendislik yapıları yer almaktadır. Örneğin, araç-köprü etkileşim sistemlerini inceleyen bir çalışma, araçların ve köprülerin senkronize titreşim verilerini kullanarak köprülerin doğal frekanslarını hassas bir şekilde tahmin etmeyi başarmaktadır. Ayrıca, frekans domenii sistem tanımlama yöntemleri kullanılarak yapılan deneysel modal analizler, yapısal sağlık izleme sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu tür analizler, yapıların titreşim modlarını belirleyerek potansiyel hasarları tespit etmeye ve bakım ihtiyaçlarını planlamaya yardımcı olmaktadır. Şekil 2.24’de kafes yapı dolgusu olan bir uçak kanadı modeli ve bu modele ait modal analiz yöntemi ile elde edilmiş ivme/ kuvvet-frekans grafiği bulunmaktadır.



Şekil 2. 23 Bir uçak kanadı geometrisine uygulanan kafes yapısı örneği ve bu kanat geometrisinin modal analiz sonucu (Hüseyin 2022)

İyibilgin (2014) tarafından yapılarına bir çalışmada FDM yöntemi üretilen kirişlerin, içyapı geometrilerinin (Kare, dikdörtgen, üçgen, daire, bal peteği, vb.) doğal frekans ve sönüm oranı gibi titreşim parametrelerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre içyapısı tamamen dolu olan kiriş numunesinin rijitliği diğer numunelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. İç geometrik yapının etkisi, yüksek frekanslarda daha belirgin hale gelmektedir. Sönüm karakteristiği açısından en uygun iç geometrik yapıya sahip kiriş formu bal peteği formu olduğu tespit edilmiştir. Modal analiz üzerine yapılan çalışmalar, genellikle yapıların dinamik özelliklerini belirlemeye odaklanmaktadır. Şekil 2.23’te iç dolgu geometrilerinin sönüm oranlarına etkisi bulunmaktadır. Örneğin, ardgermeli dengeli konsol köprülerde doğal frekans formülü geliştirilmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, Operasyonel Modal Analiz (OMA) ve

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak köprülerin dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada köprülerin yüksekliği ve uzunluğunun doğal frekans üzerindeki etkileri incelenmiştir (Li 2016). Ayrıca, inşaat mühendisliğinde OMA yönteminin kullanımı ve köprülerde deneysel modal analiz uygulamaları da bu alanda yapılan önemli araştırmalar arasındadır.



Şekil 2. 24 FDM yöntemi ile farklı geometrilerle üretilmiş kiriş numuneler ve bu numunelere ait sönüm oranları (Osman 2021)

2.7.2 Harmonik Analiz

Harmonik analiz, matematiğin temel alanlarından biri olup, Fourier analizi ve diğer ilgili matematiksel teknikleri içermektedir. Harmonik analiz, fonksiyonları ve sinyalleri frekans bileşenlerine ayırarak inceler ve bu sayede veri analizi, sinyal işleme ve görüntü işleme gibi çeşitli alanlarda uygulamalara sahiptir. Son yıllarda, harmonik analizdeki ilerlemeler, özellikle Calderón-Zygmund operatörleri ve ağırlıklı eşitsizlikler gibi konulara odaklanmıştır (Dang 2019). Bu konular, klasik harmonik analiz tekniklerinin modern uygulamalarla entegrasyonunu ve yeni sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Gaussian harmonik analiz ise, Gaussian ölçü ve Hermite polinomları gibi özel matematiksel yapılarla ilgilenir, özellikle olasılık teorisi ve kuantum mekaniği gibi alanlarda uygulama bulur (Ming 2019). Harmonik analiz üzerine yapılan çalışmalar, genellikle titreşimlerin ve dalgaların incelenmesi ile ilgilenir ve mühendislik, fizik ve matematik gibi çeşitli alanlarda geniş uygulama alanı bulmaktadır.

Harmonik analizde, bir sistemin veya sinyalin çeşitli frekans bileşenlerine ayrılması ve bu bileşenlerin ayrı ayrı incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu alanda yapılan araştırmalar (Yıldız 2019), mühendislik uygulamalarında mekanik sistemlerin titreşim analizinden,

akustik problemlerin çözümüne kadar birçok pratik alanda kullanılmaktadır. Örneğin, ANSYS gibi mühendislik yazılımları kullanılarak yapılan harmonik analiz çalışmaları, mekanik sistemlerde meydana gelen dinamik yüklerin ve titreşimlerin etkilerini incelemekte ve bu bilgilerin sistemlerin optimizasyonunda kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, yapısal mühendislikte köprüler ve binalar gibi büyük yapıların deprem dayanıklılığının değerlendirilmesinde de harmonik analiz yöntemleri uygulanmaktadır (Uzun 2017).

2.8 FDM ile Üretilen Kafes Yapıların Darbe Davranışları

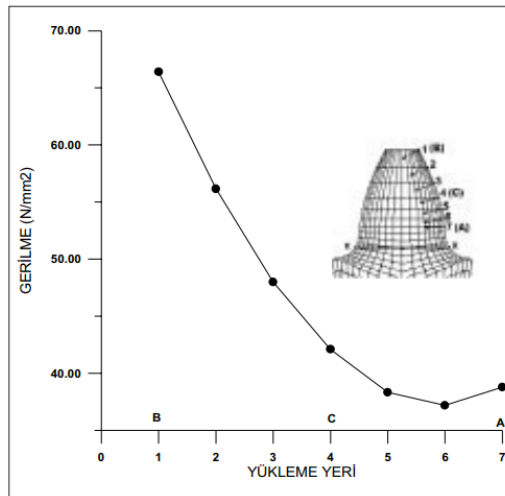
Darbe testi, bir malzemenin veya bir ürünün dayanıklılığını ölçmek için yapılan bir testtir. Genellikle, bir ürünün normal kullanım sırasında veya belirli bir kuvvetin etkisi altında nasıl davrandığını belirlemek için uygulanmaktadır (Mielicki 2016). Darbe testi, ürünün tasarımında veya imalatında iyileştirmeler yapmak için önemli bilgiler sağlayabilmektedir. Darbe testi genellikle şu adımları içermektedir:

- **Test Öncesi Hazırlık:** Test edilecek malzeme veya ürün belirlenir ve test cihazı uygun şekilde ayarlanmaktadır. Test parametreleri, test edilen malzeme veya ürüne ve test amaçlarına bağlı olarak belirlenmektedir.
- **Darbe Uygulaması:** Test cihazı, belirli bir kuvvet veya enerji ile ürüne darbe uygulamaktadır (Wang 2017). Darbenin türü (örneğin, düşme, çarpma veya çarpmaya dayanıklılık), test edilen ürünün türüne ve uygulama amacına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir.
- **Değerlendirme:** Darbe sonrasında, ürünün veya malzemenin durumu değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme, üründe meydana gelen herhangi bir hasarı veya deforme olmayı içerebilmektedir (Stansbury 2016). Ayrıca, ürünün işlevselliğinin ve performansının etkilenip etkilenmediği de incelenmektedir.
- **Sonuçların Analizi:** Test sonuçları analiz edilir ve yorumlanmaktadır. Ürünün darbe dayanıklılığı hakkında bilgi vermektedir. Bu bilgiler, ürün tasarımında veya imalatında değişiklikler yapılmasına yönelik öneriler sağlayabilmektedir. Darbe testleri, birçok endüstriyel sektörde kullanılmaktadır, özellikle otomotiv, havacılık, elektronik ve tıbbi cihazlar gibi sektörlerde ürün güvenliğini ve dayanıklılığını sağlamak için önemlidir (Kumar 2010). Ayrıca, tüketicilere

güvenilir ve kaliteli ürünler sunmak için üreticiler tarafından da sıklıkla uygulanmaktadır.

2.9 Eklemeli İmalatta Sonlu Eleman Uygulamaları

Eklemeli imalat ve sonlu eleman analizi kombinasyonu, mühendislik ve tasarım alanlarında önemli bir gelişim sağlamak ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Eklemeli imalat, malzemeleri üst üste katmanlar ekleyerek fiziksel nesneler üretirken, sonlu eleman analizi, yapıların davranışını simüle eden ve optimize eden bir yöntemdir. Bu iki teknolojinin birleşimi, tasarım ve üretim süreçlerini daha verimli ve güvenilir hale getirmektedir. NASA'nın rüzgâr tüneli testleri için geliştirdiği parçalar, eklemeli imalat ve sonlu eleman analizi kullanılarak hafif ve dayanıklı hale getirilmiştir. Bu parçalar, rüzgâr tüneli testlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla optimize edilmiştir (İnt. Kyn. 2). General Electric (GE) ise LEAP jet motoru için eklemeli imalat teknolojisiyle hafif ve dayanıklı parçalar üretmiştir. Bu parçaların tasarımı ve performansı sonlu eleman analizi ile optimize edilmiştir (İnt. Kyn. 3). Audi, yarış otomobillerinde kullanılacak parçalar için eklemeli imalat ve FEA teknolojilerini birleştirerek performans ve dayanıklılığı artırılmaktadır (İnt. Kyn. 4). Şekil 2.26'da düz dişlilerin maruz kaldığı kuvvet etkisindeki gösterdiği tepkilerin sonlu elemanlar metodu ile incelenmesiyle ilgili bir çalışmadan görsel bulunmaktadır.



Şekil 2. 25 FDM yöntemi ile üretilen düz dişliye uygulanan kuvvetin oluşturacağı etkinin sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi (Fetvacı 2019)

Rüzgâr türbini bıçaklarının tasarımında eklemeli imalat ve sonlu elemanlar analizi (FEA) teknolojileri, bıçakların aerodinamik performansını ve yapısal dayanıklılığını artırma amacıyla uygulanmaktadır.

Benzer şekilde, petrol ve gaz endüstrisinde boru ve bağlantı parçalarının tasarımında da bu yöntemler etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Yapı mühendisliğinde ise, eklemeli imalat ve FEA, köprüler gibi büyük ölçekli projelerin yapısal bileşenlerinin tasarımında kritik bir öneme sahiptir. Bu teknolojiler, yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını optimize etmek için önemli katkılar sağlamaktadır.

2.10 Sönümleme Özelliği Olan Ham Maddeler

Sönümleme özelliği olan malzemeler, enerji yutma kapasiteleri sayesinde titreşim, şok ve ses yalıtımı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, enerji sönümleyerek mekanik sistemlerde istenmeyen titreşimleri ve darbeleri azaltır, böylece sistem performansını ve ömrünü artırır (Yan 2011).

Kolayca bulunabilen sönümleyici malzemeler arasında kauçuk, köpük, jel ve çeşitli polimerler bulunur. Özellikle otomotiv, havacılık ve inşaat sektörlerinde sönümleme özelliği olan malzemeler, yolcu konforunu ve güvenliğini artırmak amacıyla kritik öneme sahiptir.

Kauçuk, çeşitli elastomerler ve poliüretan köpükler, evde ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan sönümleyici malzemelerdir. Bu malzemelerin geliştirilmesi ve optimizasyonu, mühendislik alanında devam eden araştırmaların odak noktalarından biridir ve bu çalışmalar, yeni nesil malzemelerin performansını ve verimliliğini artırmayı hedeflemektedir (Mousa 2014).

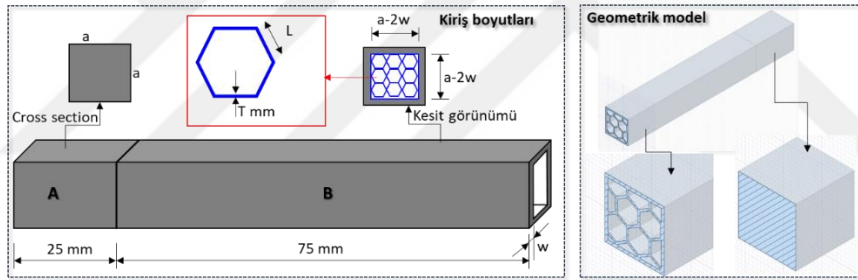
Son yıllarda, bu malzemelerin kullanım alanlarında çeşitlilik artmış, daha çevre dostu ve sürdürülebilir seçeneklerin geliştirilmesi amacıyla biyolojik olarak çözünebilen ve düşük karbon ayak izine sahip alternatifler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır.

Bu bağlamda, geri dönüştürülebilir polimerler ve biyolojik kaynaklardan elde edilen elastomerler gibi yenilikçi malzemeler, hem çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlar hem de performans bakımından yüksek verimlilik sunmaktadır.

3. MATERİYAL ve METOT

3.1 Kiriş Geometrisinin Geometrik Tasarımı

Bu bölümde, ilk olarak belirlenen bal petek benzeri geometri ve tüm kirişin bilgisayar destekli tasarımı gerçekleştirilmektedir. Tasarım için SpaceClaim yazılımı kullanılmaktadır. Şekil 3.1’de belirtilen kirişin 25mm’lik kısmı (A alanı), içi dolu olarak özelleştirilmiş ve kirişi sabitlemek amacıyla kullanılmaktadır. Kirişin B alanı numunelerde değişken duvar kalınlıklarına sahiptir ve iç kısmı petek benzeri yapıyla doldurulmaktadır. Kullanılan petek boyutları Şekil 3.1’de belirtilmektedir. Kirişin B bölümü, cidar kalınlığının ve bal peteği geometrisinin etkisini inceleyebilmek için değişkenlik göstermektedir. Şekil 3.1’de bal peteği geometrisine ait L ve t belirtilmektedir.



Şekil 3. 1 Kirişin boyutları ve geometrik modeli

3.2 Numunelerinin İmalatı

Test numunelerinin imalatı FDM açık kasa üç boyutlu yazıcı ile kırmızı Pla filament ile yapılmıştır. Nozzle çapı 0,4mm filament çapı ise 1,75mm'dir. Baskı hızı 65mm/s olarak tercih edilmiştir. Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş kiriş şeklindeki numune Şekil 3.2’de bulunmaktadır. Nozzle sıcaklığı 210 derece, tabla sıcaklığı 60 derecedir. Ortam sıcaklığı 23 derecedir. Kapalı kutu yazılar ortam sıcaklığından çok fazla etkilenmezken açık kasalı yazıcılar etkilenmektedir bundan dolayı ortam sıcaklığı 23 derecede sabit tutulmuştur. Dilimleme programlarında baskı kalitesi standart olarak 0.12mm, 0.16mm, 0.2mm ve 0.28mm olarak seçilebilmektedir ancak seçilen bu yükseklikler katman yüksekliği değerini göstermektedir, baskı kalitesi olarak değerlendirilmemelidir.



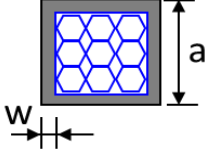
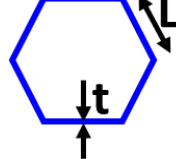
Şekil 3. 2 Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş kiriş şeklindeki numune

Katman yüksekliği sadece z ekseni boyunca çözünürlüğü ifade eder. Z ekseni doğrultusunda kesit alanında her katman arasında büyük bir fark yoksa en düşük kalite olan 0,28mm tercih etmek doğru bir seçim olmaktadır (Özbay 2019). Kirişler, dikdörtgen kesitli olduğu için z ekseni boyunca her katmanın kesit alanı birbirinin aynıdır. Numunelerin imalatında 0,28mm tercih edilmiştir.

Baskı kalitesi z ekseni boyunca katman sayısının artmasıyla doğru orantılıdır ancak katman sayısının artması baskı süresini aritmetik olarak arttırmaktadır. 0,28mm katman kalınlığında 2 saatte basılan bir ürün 0,14mm katman kalınlığında minimum 4 saatte üretilenektir (Adamidis 2018).

Üretilen numunelerin ağırlık ölçümleri yapılarak, yazıcı programında elde edilen ağırlıkla kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama neticesinde aralarında fark olan numuneler yeniden üretilmiştir. Çizelge 3.1’de bal peteği geometrisi için dikkate alınan hücre boyutları, doluluk oranları ve numunenin üretim amacı verilmektedir.

Çizelge 3. 1 Üretilen kiriş geometrilerinin geometrik özellikleri

Geometri							
Model No	W (mm)	L (mm)	t (mm)	a (mm)	w/a	Doluluk Oranı (%)	Amaç
1	0,75	3	0,5	15	0,05	19	Cidar kalınlığının etkisi (w)
2	1,5	3	0,5	15	0,1	19	
3	3	3	0,5	15	0,2	19	
4	1,5	0,75	0,5	15	0,1	51,6	Bal peteği dolgu geometrisinin kenar uzunluğunun etkisi (L)
5	1,5	1	0,5	15	0,1	43,4	
6	1,5	1,5	0,5	15	0,1	32,9	
7	1,5	3	0,3	15	0,1	12,2	Bal peteği dolgu geometrisinin cidar kalınlığının etkisi (t)
8	1,5	3	0,75	15	0,1	26,50	
9	1,5	3	1	15	0,1	32,9	
10	1	0	0	15	0,1	0	İç dolgusu olmayan kabuk şeklindeki numunelerde cidar kalınlığının etkisi (w)
11	1,5	0	0	15	0,1	0	
12	0,75	0	0	15	-	0	
13	1,25	0	0	15	-	0	
14	3	0	0	15	-	0	Dolu kiriş
15	-	0	0	15	-	100	

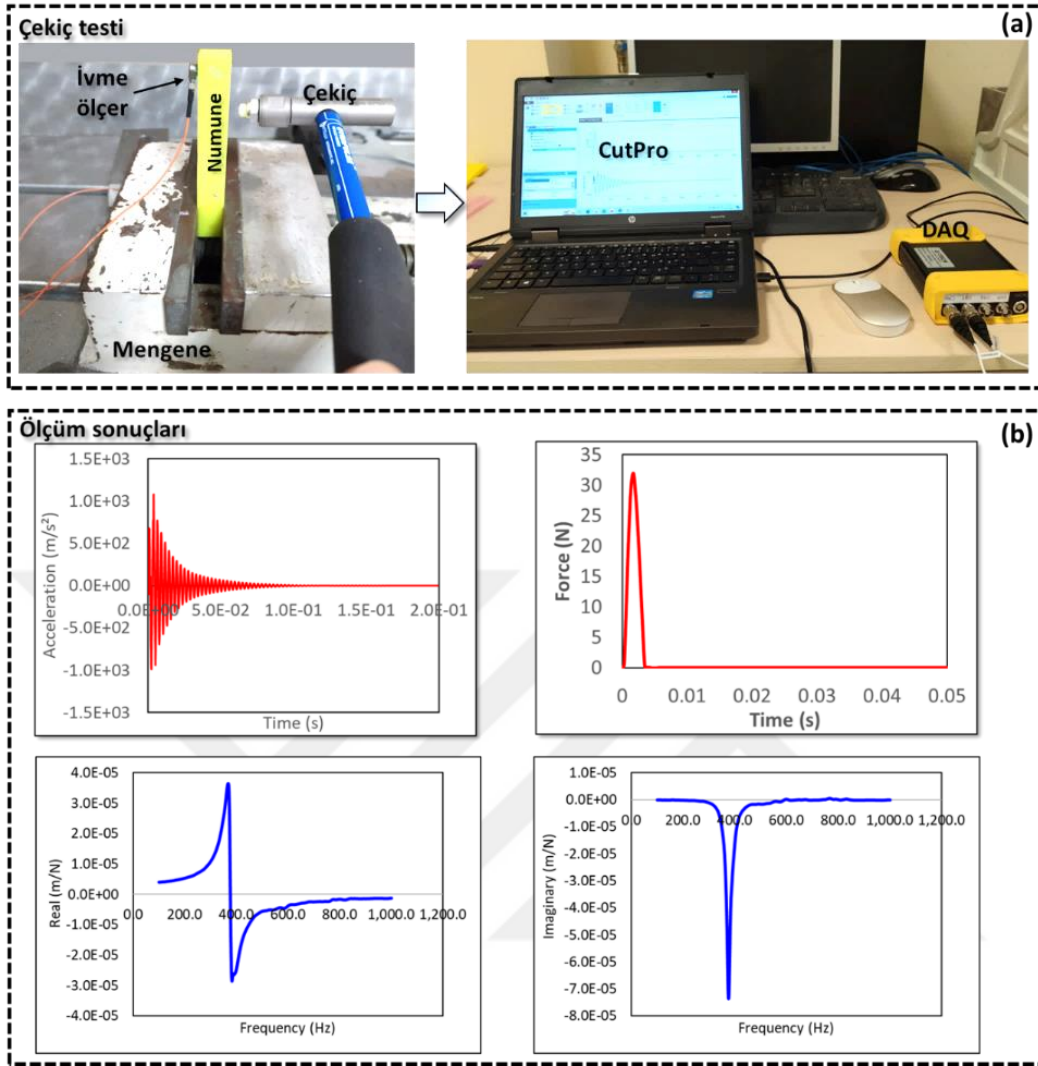
3.3 Çekiç Darbe Testi

Şekil 3.3’de kullanılan deney prosedürünün şematik bir gösterimi sunulmuştur. Üç boyutlu yazıcıyla üretilen örnek, A bölgesinden Şekil 3.3-a’daki verilen bir mengene aracılığıyla sabitlenmiştir. Örnek üzerinde doğal frekansları ölçmek için bir ivme ölçer takım ucuna bağlanmıştır. Çekiç testi için Dytran marka ve 5800B4 model numarasına

sahip bir çekiç kullanılmıştır. Frekans tepkisini ölçmek için ilgili konuma Dytran marka 322F1 model bir ivmeölçer monte edilmiştir. Örnek titreşim karakteristiği sonuçlarını elde etmek için CutPRO yazılımının Tap Testing ölçüm modülüyle birlikte dört kanallı bir veri toplama sistemi Novian marka ve model numarası S04 olarak kullanılmıştır. Ölçüm sonrasında kuvvet-zaman, ivme-zaman grafikleri ile gerçek frekans ve hayali frekans değişimleri elde edilmiştir ve Şekil 3.3-b'de bulunmaktadır. Tüm bunların yanı sıra, birinci mod frekansında örnekte meydana gelen genlik değeri de kaydedilmiştir.

Çekiç darbe testi ile gerçekleştirilen titreşim analizi sonucunda yapılan modal analizde, grafik üzerinde dikey ekseninde "real (m/N)" birimi kullanılarak, test edilen yapının dinamik özellikleriyle ilişkilendirilen bir parametre sunulmaktadır. Bu parametre, sistemin kütle ve kuvvet gibi fiziksel özelliklerine bağlı olarak titreşim yanıtını ifade etmektedir. Yatay ekseninde yer alan frekans değerleri ise, sistemin doğal frekanslarını ve titreşim modlarını temsil etmektedir. Modal analiz, bu frekanslar ve modlar aracılığıyla yapının titreşim davranışlarını ve rezonans noktalarını belirlemeye olanak tanır. Grafik üzerinde tespit edilen pikler, sistemin rezonansa girdiği frekansları ve doğal titreşim modlarını işaret ederek, yapı üzerindeki dinamik yüklerin nasıl dağıldığını ve hangi frekansta maksimum titreşimlerin gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Bu analiz, yapının güvenliği ve performansı açısından kritik öneme sahip bilgilerin elde edilmesini sağlar.

Çekiç darbe testi ile gerçekleştirilen titreşim analizi ve sonrasında yapılan modal analizde, grafik üzerinde dikey ekseninde "imaginary (m/N)" birimi kullanılarak, sistemin dinamik davranışlarının sanal (hayali) bileşenleri ile ilişkili bir parametre sunulmaktadır. Bu terim, sistemin titreşim modlarının stabilitesini ve rezonans karakteristiklerini incelemeye olanak tanır, çünkü hayali bileşenler, titreşimlerin damping düzeyini ve sistemin ne kadar kararlı olduğunu gösterir. Yatay ekseninde yer alan frekanslar ise, yapının doğal titreşim frekanslarını temsil etmektedir ve bu frekanslar, sistemin dinamik tepkilerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Grafik üzerinde belirginleşen sanal bileşenlerin büyüklüğü, sistemin rezonans noktalarına yaklaşan frekanslarda titreşim yanıtının artışı ve bu noktaların potansiyel olarak stabiliteye olan etkilerini işaret eder. Modal analiz sayesinde elde edilen bu veriler, yapının titreşim karakteristiklerini, güvenliğini ve performansını değerlendirirken kritik bilgilerin sağlanmasına imkân verir.

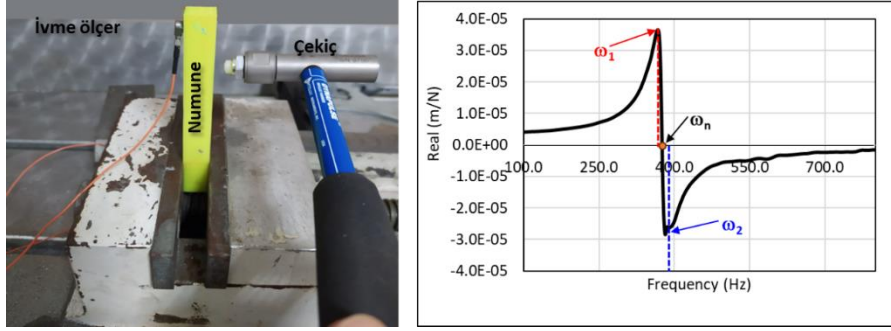


Şekil 3. 3 a) Çalışmada kullanılan deneysel düzeneği, b) Çekiç testi sonrasında elde edilen sonuçların örnek gösterimi

Sayısal modelleme için örneğin damping oranı bilinmesi gerekmektedir. Yapılan tap testi sonuçlarına dayanarak örneğin damping oranı hesaplanmıştır Şekil 3.4’de damping oranı belirlemek için gerekli olan grafik bulunmaktadır (Agarwala 1995).

Uygulanan çekiç testinin ardından numuneye ait gerçek ve hayali kısmı eğriler elde edilmiştir. Gerçek kısım eğrisindeki tepe noktalar (ω_1 ve ω_2) ile doğal frekansa denk gelen (ω_n) değerleri dikkate alınmıştır. Denklem 3.1 kullanılarak, Şekil 3.4 ’te bulunan grafik kullanılarak numunenin sönüm oranı hesaplanmıştır.

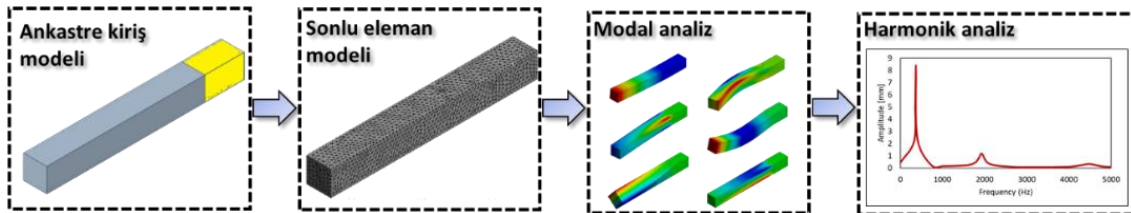
$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (3.1)$$



Şekil 3. 4 Sönüm oranı hesaplamak için kullanılan çekiç testi deney düzeneği ve real part grafiği

3.4 Numerik Modelleme

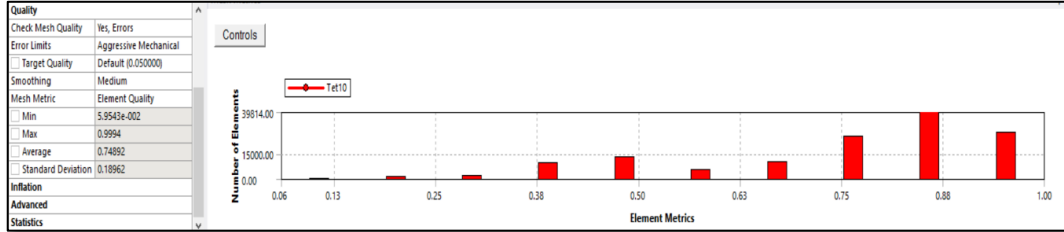
Sonlu elemanlar analizi için Ansys Workbench yazılımı, geometrik tasarım için Spaceclaim programı kullanılmıştır. Geometrik model, Ansys yazılımına aktarıldıktan sonra modal analiz yapılmak suretiyle mod frekansları bulunmuştur. Ardından harmonik analiz yapılarak, numunenin frekans tepkisi elde edilmiştir Şekil 3.5’de aşamalar belirtilmiştir. Her iki analizde de numunenin A kısmı sabitlenmiştir. Harmonik analizde çekiç yükü uygulandığı yönde yük uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelleme öncesinde mesh yakınsama analizi yapılarak yeterli eleman ve düğüm sayısı belirlenmiştir. Şekil 3.4’de çalışmada kullanılan nümerik modelleme işleminin adımları verilmiştir. Kullanılan PLA malzemesinin elastik modülü 2300MPa, poisson oranı 0,39 ve yoğunluğu ise 1,25g/cm³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca önceki bölümde bahsedilen yöntem kullanılarak her bir geometri için elde edilen sönüm oranı nümerik modellemeye dahil edilmiştir. Modellemede 31752 eleman (10 düğümlü tetrahedronlar) ve 56764 düğüm kullanılmıştır (Yazdi 2016).



Şekil 3. 5 Nümerik modellemede kullanılan basamakların şematik gösterimi.

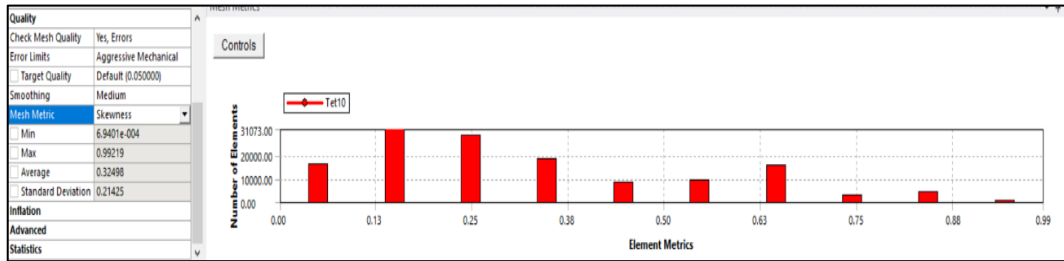
Nümerik modelleme çalışmalarında kullanılan düğüm ve eleman sayısının yeterli olup olmadığının kontrolü için oluşturulan ağ yapısının kalitesi çözüm öncesinde kesinlikle

kontrol edilmelidir. Bu amaçla Ansys yazılımında oluşturulan ağ yapısının yeterli kalitede olup olmadığı mesh metric ve skewness analizleri ile kontrol edilmiştir. Şekil 3.6'da Mesh metric ve element metric analiz sonucu verilmektedir.



Şekil 3. 6 Mesh metrics analiz sonucu

Ağ yapısı için Tetragonal eleman (Tet10) kullanılmış, mesh metric ortalama değerinin 0,748 olduğu tespit edilmiştir. Bu değer kabul edilebilir sınırı 0,5-0,8 aralığıdır. Bununla birlikte kullanılan elemanların çarpılma durumlarını kontrol eden skewness değerinin de 0.2-0.69 aralığında olması önerilir. Bu çalışmada oluşturulan ağ yapısının skewnees değeri 0,324 olarak tespit edilmiştir ve değerler Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 7 Skewness analiz sonucu

3.5 Titreşim Analizinde Sonlu Elemanlar Metodunun Matematiksel Temelleri ve Uygulama Yöntemleri

Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), karmaşık mühendislik ve fiziksel sistemlerin analizinde, yapıları küçük, birbirine bağlı elemanlara ayırarak çözüm yapmayı sağlayan güçlü bir sayısal tekniktir. FEM, yapının fiziksel özelliklerini tanımlayan kütle, sertlik ve zayıflama gibi matrisleri kullanarak, her bir elemanın bireysel davranışını matematiksel

olarak modeller. Titreşim analizinde bu yöntem, yapının dinamik denklemlerini çözmek için uygulanır (Şen 2016). İlk adımda, yapı küçük elemanlar (örneğin üçgen, dörtgen veya hexahedron gibi şekiller) olarak modellenir. Her bir eleman için, kütle matrisi, sertlik ve zayıflama matrisleri oluşturulur. Bu matrisler, yapıdaki her bir düğümdeki yer değiştirme, hız ve ivme gibi değişkenleri tanımlar. Daha sonra, yapının dinamik denklemleri, genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K \cdot u(t) = F(t) \quad (3.1)$$

Burada, [M] kütle matrisi, [C] zayıflama matrisi, [K] sertlik matrisi, $u(t)$ yer değiştirme vektörü, $\dot{u}(t)$ hız vektörü, $\ddot{u}(t)$ ivme vektörü ve $F(t)$ dış kuvvetleri temsil eder (Pozrikidis 2008). Çoğu durumda, zayıflama etkisi (zayıflama matrisi) ihmal edilebilir, böylece denklemler şu şekilde sadeleşir:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + K \cdot u(t) = F(t) \quad (3.2)$$

Bu denklemler, serbest titreşimler için temel denklemlerdir. Yapının doğal frekanslarını ve titreşim modlarını belirlemek için, bu diferansiyel denklemler, genellikle özdeğer problemi olarak çözülür. Bu çözüm, sırasıyla karakteristik denklemlere dönüşür:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + K \cdot u(t) = 0 \quad (3.3)$$

Bu, serbest titreşim hareket denklemi olarak bilinir. Burada, dış kuvvetler $F(t)$ olmadığı için sistem doğal hareketini serbest bırakır.

Bu denklemi zamanla bağımsız hale getirmek için, çözümün bir harmonik titreşim şeklinde olduğunu varsayabiliriz. Yani, çözümün zamanla değişen kısmı e (karmonik fonksiyon) şeklinde ifade edilir:

$$u(t) = \varphi e \quad (3.4)$$

Yukarıdaki zamanla bağımsız çözümü hareket denkleminde yerine koyarsak:

$$M \cdot (-\omega^2 \varphi e) + K \cdot (\varphi e) = 0 \quad (3.5)$$

Burada e terimi her iki terimle çarpıldığı için her iki tarafta da aynı faktör bulunur ve bu terim yok sayılabilir:

$$-\omega^2 M \cdot \varphi + K \cdot \varphi = 0 \quad (3.6)$$

Sonuç olarak, bu denklem şu hale gelir:

$$(K - \omega^2 M) \cdot \varphi = 0$$
$$(K - \omega^2 M)\phi = (K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (3.7)$$

Burada, ω doğal frekansları ve ϕ ise mod şekillerini temsil eder. Bu denklemi çözmek, yapının farklı titreşim modlarındaki doğal frekanslarını (ω) ve bu frekanslarla ilişkili titreşim şekillerini (ϕ) belirler (Fleury 1979). FEM, her bir mod için belirlenen frekans ve şekilleri kullanarak yapının titreşimsel davranışını detaylı bir şekilde ortaya koyar. Sonuç olarak, FEM, yapının hangi frekansta rezonansa gireceğini ve hangi şekillerde titreşeceğini anlamamıza olanak tanır. Bu analiz, yapıların titreşimsel davranışlarını optimize etmek ve güvenli tasarımlar yapmak için kullanılır, özellikle inşaat, otomotiv, havacılık ve makine mühendisliği gibi alanlarda kritik bir rol oynar (Günay 1993). FEM, karmaşık yapıların dinamik analizlerini küçük, yönetilebilir adımlara indirger ve mühendislerin yapıların titreşimsel özelliklerini ayrıntılı bir şekilde incelemelerini sağlar.

3.6 Yapıların Doğal Frekansının Hesaplanması

Bu çalışmada, kiriş formu numuneler üretilip deneysel ve modelleme çalışmalarıyla mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Sabit uçlu kirişin doğal frekansının tespiti formül yardımıyla hesaplanıp modelleme ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Doğal frekans

ω_n (radyan/saniye), çubuğun uzunluğu L(m), malzemenin elastik modülü E(Pa), çubuğun kesit alanı momenti I (m^4), çubuğun kütlesi M (kg) olarak ifade edilmektedir. Burada, $(\pi/2)^2$, L uzunluğundaki sabit uçlu çubuğun ilk doğal frekansını hesaplarken uygulanır.

$$\omega_n = (\pi/L)^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{M}} \cdot (\pi/2)^2 \quad (3.8)$$

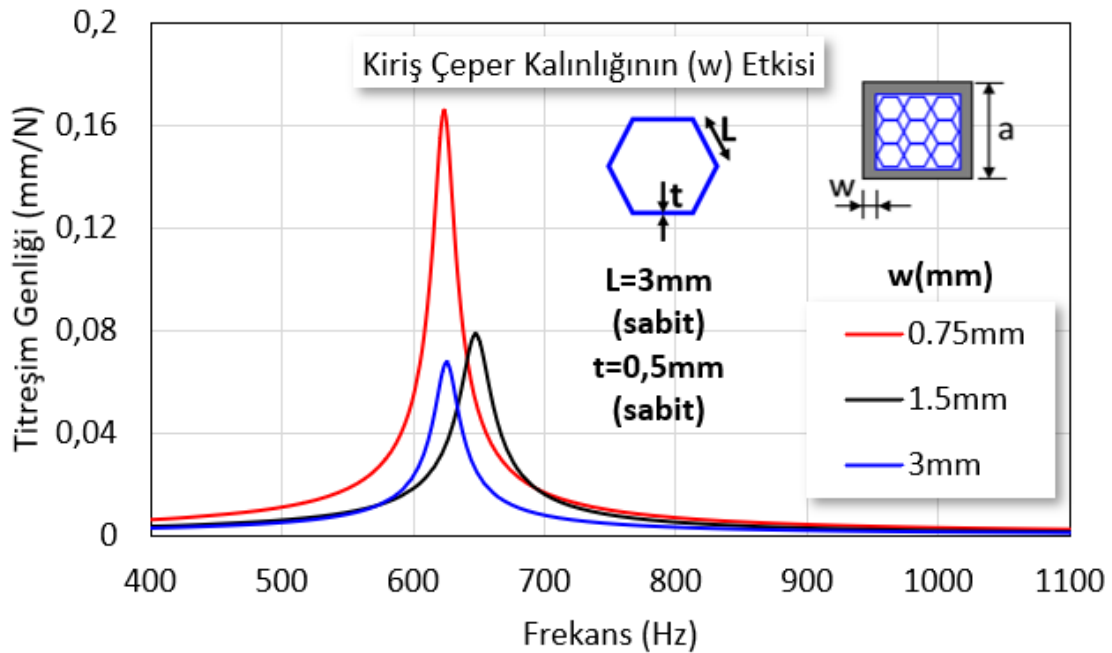
Buradan tamamen dolu kirişin doğal frekansı, 590Hz çıkmıştır. Deneysel çalışma sonucunda ise 580,6 Hz tespit edilmiştir.



4. BULGULAR

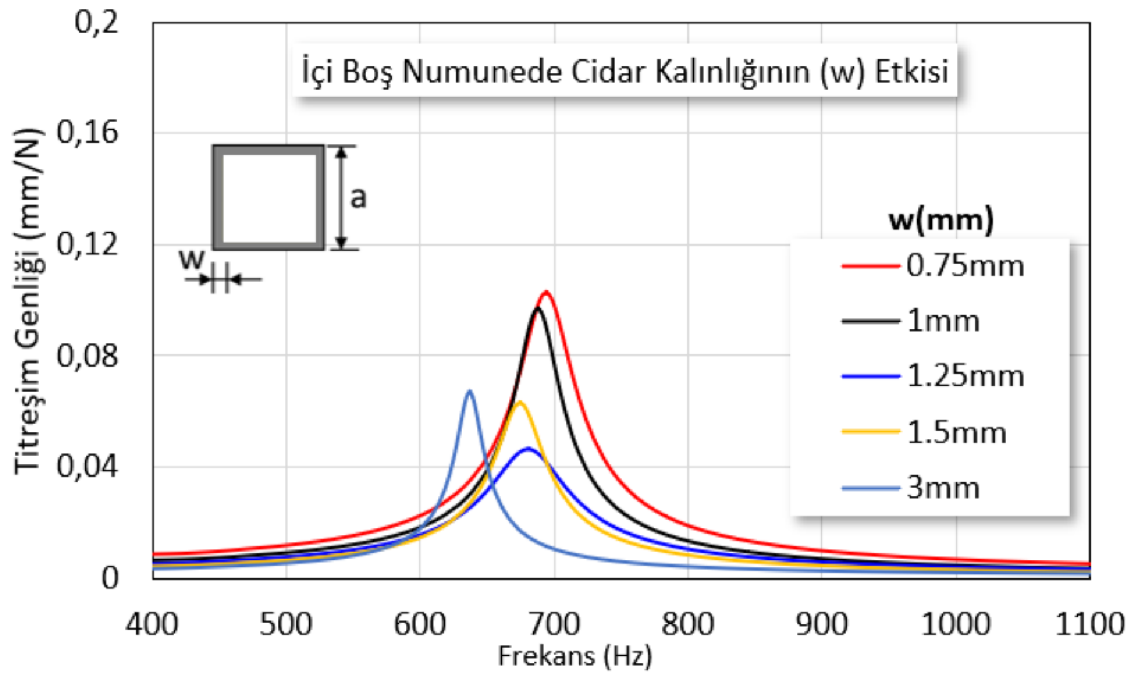
4.1 Kiriş Çeper Kalınlığının Genliğe Olan Etkisi

Bu çalışmada toplam 15 adet parametreleri birbirinden farklı, kiriş şeklinde kare kesitli numune incelenmiştir. Numunelerin 1, 2 ve 3 numaralı olanların iç dolguları ve dolgu yoğunlukları birbirleri ile aynı ancak kiriş çeper kalınlıkları birbirleri ile farklıdır. Modal analiz, harmonik analiz ve çekiç- darbe testleri yapıldığında çeper kalınlığının numuneler üzerindeki çökme ve frekans değerleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. 1 numaralı numune 0,75mm cidar kalınlığı ve Şekil 4.1'deki grafikte kırmızı renk ile belirtilmiştir. 2 numaralı numune 1,5mm cidar kalınlığı, siyah renk ve 3 numaralı numune 3mm cidar kalınlığı, mavi renk ile belirtilmiştir. Şekil 4.1'de bulunan grafikte, hangi frekans değerinde numunedeki genlik değerinin miktarı görülmektedir. Grafik incelendiğinde, cidar kalınlığının artmasıyla genlik değeri azalmaktadır. Cidar kalınlığının frekans değeri üzerinde çok küçük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ancak özellikle 1 ve 2 numaralı numuneler dikkate alındığında cidar kalınlığının iki katına çıkmasıyla genlik değerinde yarıdan daha fazla miktarda azalma meydana gelmiştir. 2 ve 3 numaralı parçaların genlik değerlerinde küçük bir değişim olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 1 Kiriş çeper kalınlığının frekans değeri üzerindeki etkisi

Şekil 4.1’de içi dolu numunelerin uygun parametrelerin sabit tutulmasıyla kiriş çeper kalınlığının etkisi bulunmaktadır. Şekil 4.2’de ise içi tamamen boş kabuk şeklindeki numuneler üzerinde kiriş çeper kalınlığının etkisi bulunmaktadır. Sırasıyla 10, 11, 12, 13, 14 numaralı numuneler sırasıyla 0,75mm, 1mm, 1,25mm, 1,5mm ve 3mm cidar kalınlıklarıyla belirtilmiştir. İçi dolu numunelerde olduğu gibi içi tamamen boş numunelerde de cidar kalınlığının artmasıyla genlik değeri azalmaktadır.

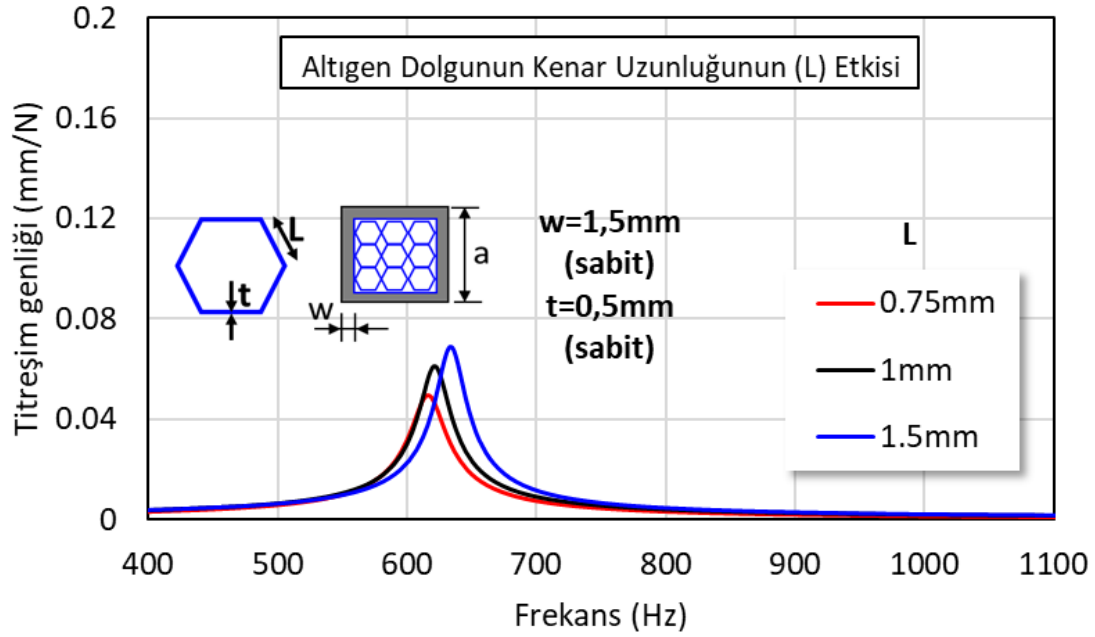


Şekil 4. 2 İçi boş numunede kiriş çeper kalınlığının frekans değeri üzerindeki etkisi

4.2 Kafes Kenar Uzunluğunun Genliğe Olan Etkisi

Şekil 4.3’de üç boyutlu yazıcı ile üretilen kare kesitli kirişlerden 4, 5 ve 6 numaralı olanların mekanik özellikleri ile ilgili grafik bulunmaktadır. Grafikte, L uzunluğunun genlik değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 4 numaralı kiriş $L=0,75\text{mm}$ ve kırmızı renk, 5 numaralı kiriş $L=1\text{mm}$ ve siyah renk, 6 numaralı kiriş $L=1,5\text{mm}$ ve mavi renk ile belirtilmiştir. Şekil 4.3 ‘de bulunan grafikteki değerlerden yola çıkılarak L değerinin frekans değerleri üzerinde çok küçük bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Kirişlerin yoğunluk oranları incelendiğinde ise, 4 numaralı kirişin (%51,6), 5 numaralı kirişin (%43,4) ve 6 numaralı kirişin (%32,9) olduğu görülmüştür. L’nin azalmasıyla dolgu

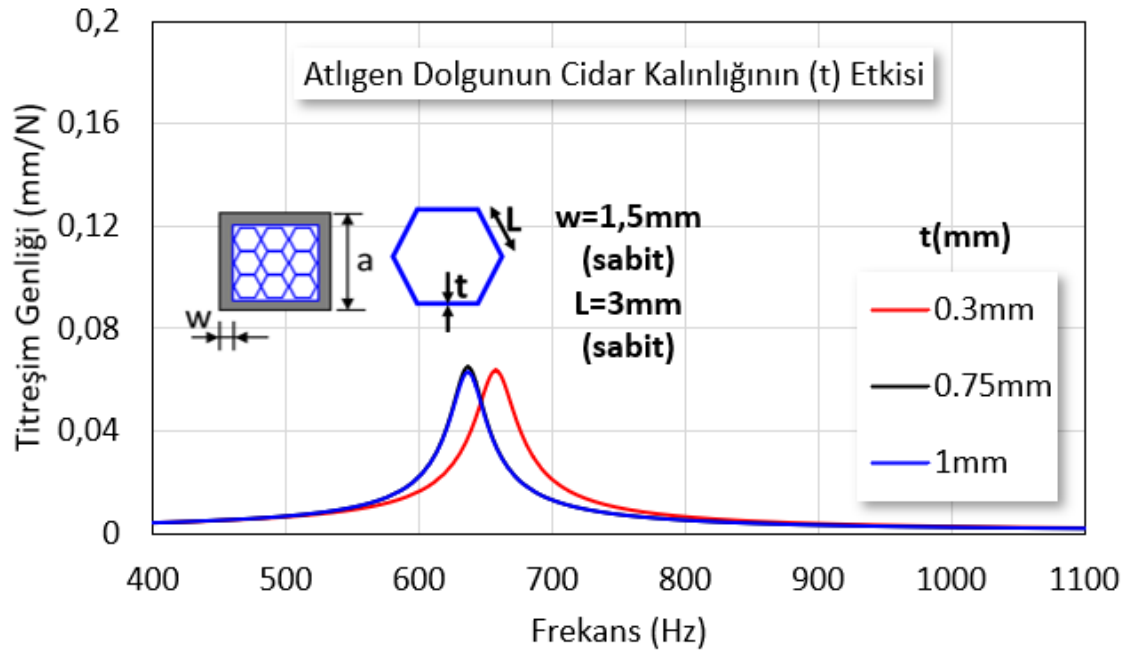
oranın yükseldiği gözlemlenmiştir ancak genlik değerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. 4 ve 6 numaralı kirişlerin genlik değerleri incelendiğinde 4 numaralı kiriş 0,05mm genlik değerinde iken 6 numaralı kirişin 0,065mm genlik değeri okunmaktadır. Genlik değerlerinde 0,015mm değerinde fark olduğu gözlemlenmiştir. Dolgu oranları incelendiğinde yaklaşık %20 oranında bir fark tespit edilmiştir.



Şekil 4. 3 Bal peteği geometrinin kenar uzunluğunun frekans değeri üzerindeki etkisi

4.3 Kafes Cidar Kalınlığının Genliğe Olan Etkisi

Bu bölümde bal peteği geometrinin t değerinin genlik ve frekans değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 7. Numaralı kiriş $t=0,3\text{mm}$ ve kırmızı renk, 8. Kiriş $t=0,75\text{mm}$ ve siyah renk, 9. kirişin $t=1\text{mm}$ ve mavi renk olarak belirlenmiştir. Dolgu yoğunlukları sırasıyla 7, 8 ve 9. kiriş için, (%12,2), (%26,5) ve (%32,9) değerlerindedir. Grafikte, 8 ve 9 numaralı kirişlerin eğrileri iç içe girmiş durumdadır. Frekans ve genlik değerleri birbirlerine çok yakındır. 7 numaralı kiriş ise yaklaşık 40 Hz. daha yüksek frekans değerine sahiptir. Genlik değeri ise çok küçük bir farkla 8 ve 9 numaralı numunelere göre düşük değere sahiptir. Genlik ve frekans değerleri göz önüne alındığında 7 numaralı kirişin dolgu yoğunluğu en az olduğu için hafiftir ancak ağır ve yoğunluğu fazla olan kirişe göre daha az genlik değerine sahiptir.



Şekil 4. 4 Bal peteği geometride t değerinin rezonans frekans değeri üzerindeki etkisi

4.4 Değişken Parametrelerle Sönümlleme Oranının Değişimi

Sönümlleme oranı, salınan veya titreşen bir cismin nasıl durağan hale geldiğini tanımlayan boyutsuz bir parametredir. Sönümlleme olmayan bir durumda, salınımlı bir sistem asla durmaz; ancak, doğada böyle bir durum gerçekleşmez. Her salınımlı sistem belirli bir süre sonra durmaya veya denge pozisyonuna gelmeye başlamaktadır. Bu süreçte genlik, zamanla kademeli olarak azalır ve nihayetinde sıfıra ulaşmaktadır (Özgür 2022).

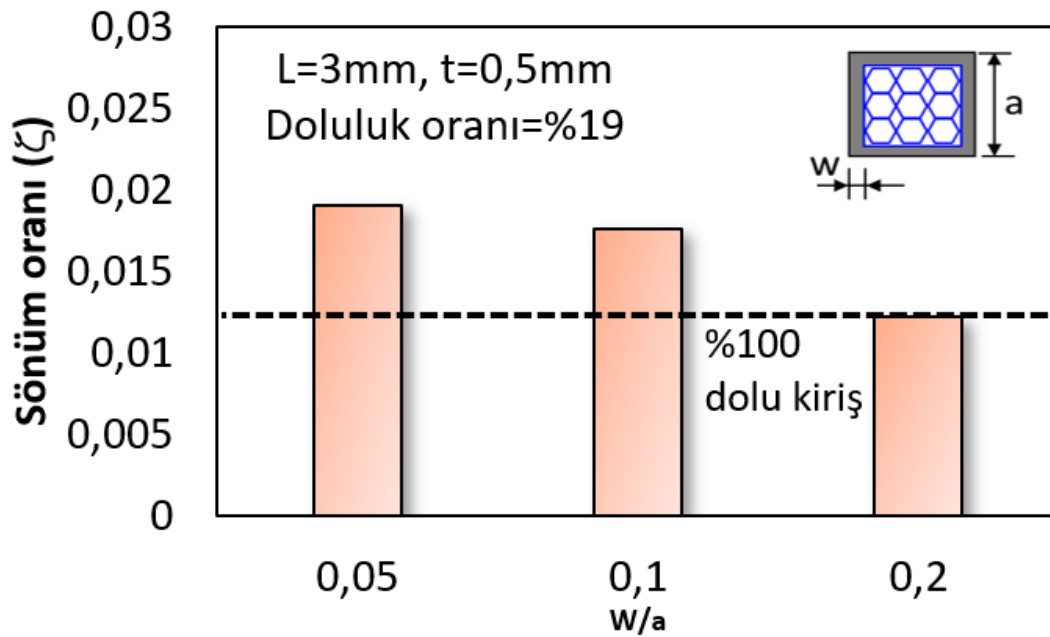
Sönümlleme oranı, titreşimli bir sistemin genliğinin zamana göre ne kadar hızlı azaldığını belirlemektedir (Gnanaprakasam 2022). Sönümlleme oranı 1'den küçükse, sistem az sönümlü olarak adlandırılmaktadır.

Sönümlleme oranı 1'e eşit olduğunda, sistem kritik sönümlü olarak tanımlanmaktadır ve sönümlleme oranı 1'den büyükse, sistem aşırı sönümlü olarak kabul edilmektedir (Lv 2021).

Az sönümlü bir sistem, bir kuvvet tarafından uyarıldığında salınır ve azalan genlikle kademeli olarak durmaktadır. Aşırı sönümlü bir sistem ise hiç titrememektedir. Kritik sönümlleme durumunda, sistem denge konumuna kayar ve bu konumu hemen aşmadan minimum sürede durmaktadır. Çoğu sistem için sönümlleme oranı 1'den azdır, yani düşük sönümlüdürler (Kornbluh vd. 2004). Tez çalışmasının bu bölümünde farklı cidar

kalınlığında ve kafes boyutlarında tasarlanan bal peteği geometrisinin sönümleme oranı üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu tespit edilmektedir. Yapılan çekiş ve ivme ölçer testi sonrasında Denklem 3.1 kullanarak her bir kiriş geometrisinin sönüm oranları tespit edilmektedir. Şekil 4.5 'te 1, 2 ve 3 numaralı kiriş için elde edilen sönüm oranlarının tam dolu olan kiriş ile kıyaslamaları verilmektedir.

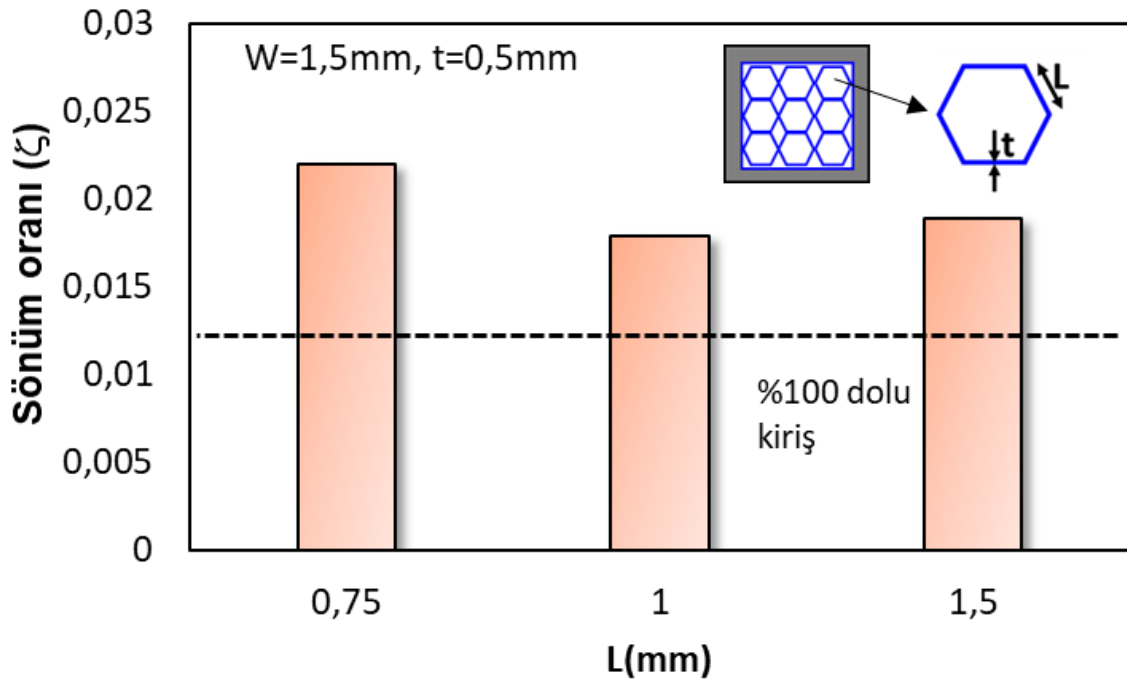
Grafikte verilen kesik çizgi dolu olan kiriş malzeme için elde edilen sönüm oranıdır. W/a oranının artmasıyla sönümleme oranının azaldığı gözlemlenmektedir. W/a oranının artması, kiriş cidar kalınlığının arttığı anlamına gelmektedir ve cidar kalınlığı ile sönüm oranının ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. İnce cidar kalınlığına sahip kirişlerde (1 ve 2 numaralı kirişler) sönüm oranı %100 dolu kirişten daha yüksek değere sahip iken, 3 numaralı kirişin $W/a=0,2$ oranına sahip kirişin sönümleme oranı %100 dolu olan kirişle birebir aynı olduğu görülmektedir. Şekil 4.5 ten çıkartılacak önemli bir sonuç, uygun dolgu malzemesi ve cidar kalınlığı kullanıldığında yapının hafifletilmesi ve titreşim sönümleme kabiliyetinin arttırılabilmektedir.



Şekil 4. 5 Farklı W/a değerleri için sönüm oranının değişimi ve tam dolu kiriş ile karşılaştırılması

Şekil 4.6' da L değerinin 4, 5 ve 6 numaralı kirişlerde sönüm oranına etkisi verilmektedir $W=1,5mm$ ve $t=0,5mm$ olarak sabit alınmıştır ve 4, 5 ve 6 numaralı kirişlerin doluluk oranı sırasıyla, %51, %43 ve %32 dir.

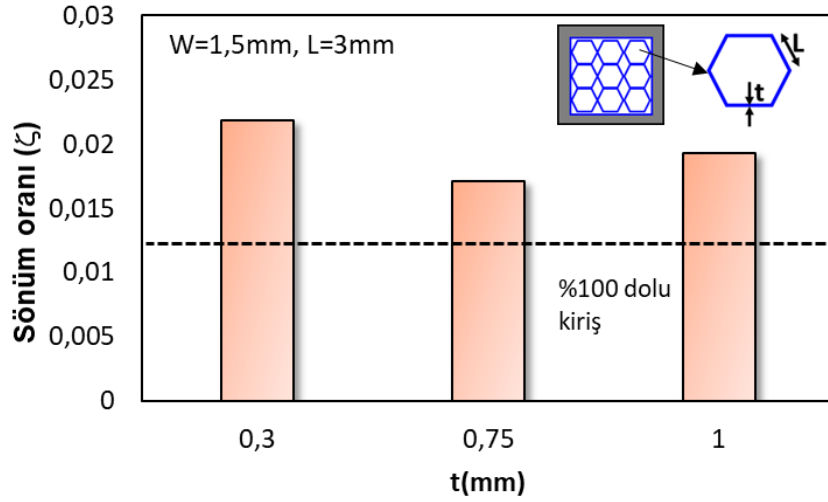
Tüm kirişlerin sönümleme oranları %100 dolu olan kirişe göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. L değerinin azalması, kiriş içerisinde daha fazla bal peteği gözeneginin olmasıdır, bu durum sönüm oranının artmasına neden olduğu görülmektedir. L=1mm için sönüm oranı azalırken, L=1,5mm değerinde sönüm oranının yükseldiği gözlemlenmiştir. %100 dolgu oranına sahip kirişe göre 4 numaralı kiriş %49, 5 numaralı kirişte %57 ve 6 numaralı kirişte %68 oranında hafifleme gözlemlenmektedir. 4 ve 6 numaralı kirişler arasındaki hafifletme farkı %19, sönüm oranları arasındaki fark %14,09 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. 6 L değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi

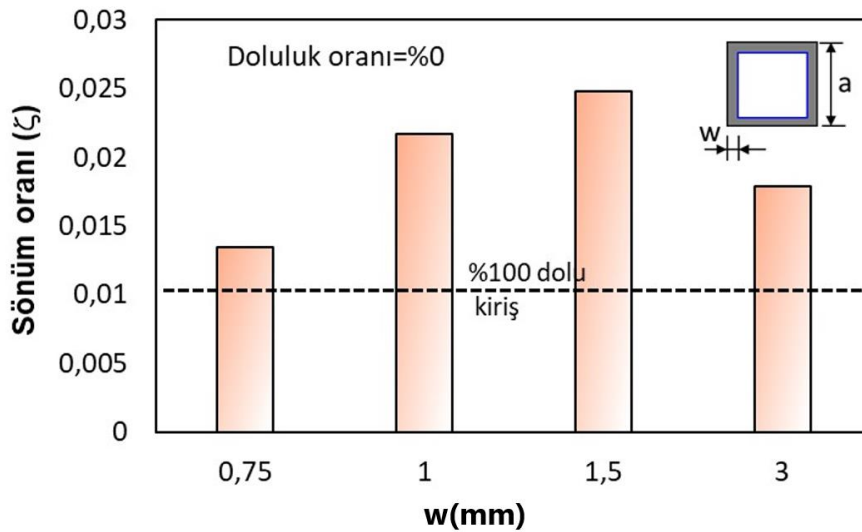
Şekil 4.7' de t değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi verilmektedir. t=0,3mm olduğunda sönüm oranı en yüksek değerde olmaktadır, t değerinin yükselmesiyle sönüm oranının azaldığı görülmektedir. t=0,75mm için sönüm oranı minimum iken t=1mm'de sönüm oranında yükselme olduğu görülmektedir.

Benzer bir eğilimin Şekil 4.6'da da elde edildiğini görülmektedir. Bu nedenle şekil 4.6 ile Şekil 4.7 beraber değerlendirdiğinde, minimum L ve t değerlerinde bal peteği kullanmak sönüm oranının artmasına katkıda bulunduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4. 7 t değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi

Şekil 4.8 'de tamamen boş, kabuk şeklinde kirişlerin W değerlerindeki değişimin sönüm oranı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. W kalınlığı 0,75mm olan 10 numaralı kirişin sönümlenme oranı, %100 dolu olan 15 numaralı kirişe göre yüksek olduğu görülmektedir. W=1,5mm ye kadar olan W değerlerinde sönüm oranı yükselirken, W değerinin 1,5mm'den yüksek olması halinde sönüm oranında azalmasına meydana geldiği görülmektedir. W değerinin daha yüksek değerlere çıkması, kirişin iç dolgu olmadan çeper kalınlığı ile doluluğunun artması anlamına gelmektedir. Böylece 15 numaralı kiriş için elde edilen sönüm oranına yakın değerler elde edilmektedir. Şekil 4.8 de kesik çizgi ile belirtilen 0,0122 sönümlenme oranı 15 numaralı kirişe aittir.

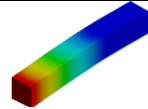
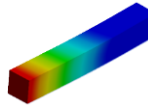
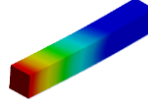


Şekil 4. 8 Kabuk şeklinde kirişlerde w değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi

4.5 Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Çizelge 4.1’de w/a değişiminin titreşim genliği üzerindeki etkisi deneysel ve modelleme sonuçları verilmektedir. Çizelge 4.1’te ayrıca 1.moda ait kirişin deformasyon davranışı da verilmektedir. Çizelge 4.1’te görüldüğü üzere, $w/a=0,05$ değerinde deneysel ve nümerik modelleme arasındaki fark belirgin şekilde yüksektir. Bunun nedeni, azalan çeper kalınlığı ile birlikte üretimden kaynaklanan boyutsal hatanın da artmasıdır. FDM ile yapılan üretimlerde z yönündeki hassasiyet genellikle 0,1 mm ile 0,3 mm arasında değişmektedir. Ancak, bu değerler kullanılan yazıcıya, nozül çapına, katman yüksekliğine ve malzeme türüne bağlı olarak değişmektedir. Bazı yüksek kaliteli FDM yazıcılar, daha ince katman yükseklikleriyle (0,05 mm gibi) daha yüksek hassasiyet sağlayabilirken, daha düşük kaliteli yazıcılar bu aralığın üst sınırına yakın sonuçlar verebilmektedir. Her durumda, ideal sonuçlar için yazıcının kalibrasyonu ve malzeme ayarları önemlidir. Çeper kalınlığının bu değere yaklaşması boyutsal hatalarında artmasına neden olmaktadır (Agarwal 2022). Üretilen kiriş şekilli numuneler için z eksen hassasiyeti 0,28mm olarak tercih edilmiştir. Buna karşı sonlu elemanlar analizinde, modellenen geometrinin herhangi bir boyutsal hatası bulunmadığından elde edilen sonucun daha doğru olma olasılığı yüksektir.

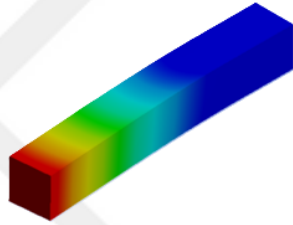
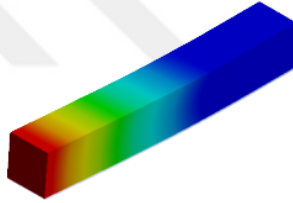
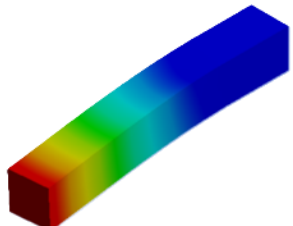
Çizelge 4. 1 W/a değerinin titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması

W/a	Deneysel (mm)	Modelleme (mm)	Hata (%)	1.Mod a ait deformasyon şekli
0,05	0,11	0,164	+49,09	
0,1	0,07	0,078	+11,42	
0,2	0,06	0,067	+11,66	

Çizelge 4.2’de L’nin titreşim genliği üzerindeki etkisini deneysel ve modelleme sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Çizelge 4.2’te ayrıca 1.moda ait kirişin deformasyon davranışı da verilmektedir.

Çizelge 4.2’te görüldüğü üzere, $L=1$ olduğunda, deneysel ile nümerik modelleme sonuçları birbirine eşit olmaktadır. $L=0,75\text{mm}$ ve $1,5\text{mm}$ olduğunda deneysel ile nümerik modelleme sonuçları arasında bir miktar fark oluşmuştur.

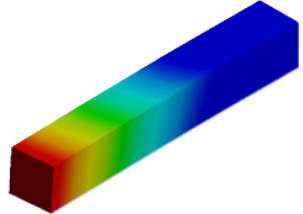
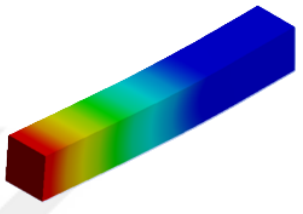
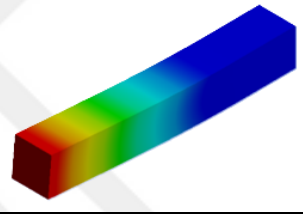
Çizelge 4. 2 Bal peteği hücresi kenar uzunluğunun (L) titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması

L(mm)	Deneysel (mm)	Modelleme (mm)	Hata (%)	1.Mod a ait deformasyon şekli
0,75	0,06	0,063	+4,99	
1	0,06	0,06	0	
1,5	0,07	0,068	-2,85	

Çizelge 4.3’de t’nin titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçları verilmektedir. 1.moda ait kirişin deformasyon davranışı Çizelge 4.1 ve Çizelgede 4.2 ‘de elde edilenlere oldukça benzerdir.

$T=0,75\text{mm}$ ve 1mm olduğunda deneysel ile nümerik modelleme sonuçları hata oranı azalmaktadır. Bunun nedeni, t değerinin artmasıyla modelleme esnasında oluşabilecek üretim hatalarının azalması ve deneysel çalışma şartlarına daha yakın numuneler elde edilebilmektir.

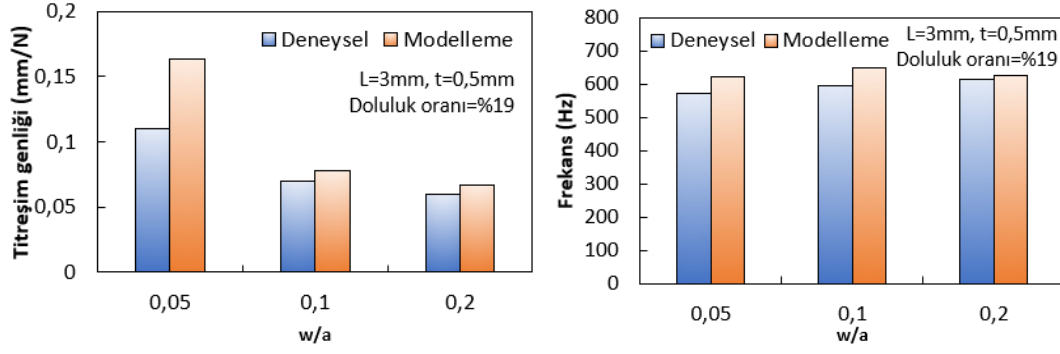
Çizelge 4. 3 t'nin titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması

t(mm)	Deneysel (mm)	Modelleme (mm)	Hata (%)	1.Mod a ait deformasyon şekli
0,3	0,07	0,063	+9,99	
0,75	0,07	0,065	+7,14	
1	0,06	0,063	+4,99	

Şekil 4.9'da w/a oranının kirişin 1.mod frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkileri verilmektedir. Artan w/a oranı ile birlikte modelleme ile deneysel frekans sonuçları arasındaki fark sırasıyla %17,1 %18,9 ve %17,9 olarak hesaplanmıştır.

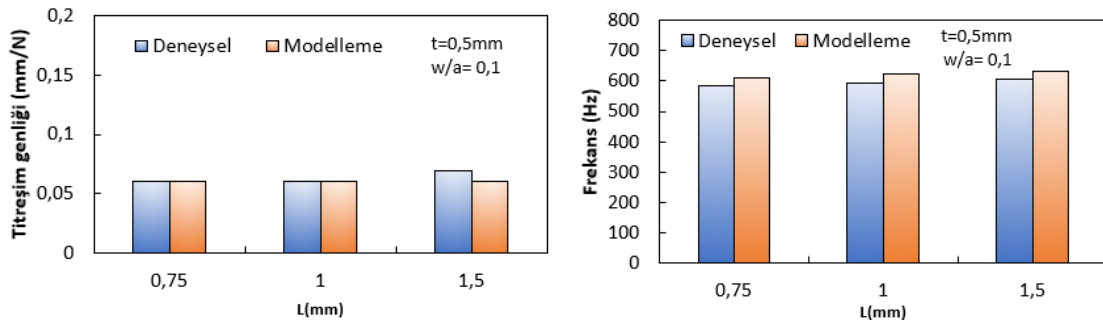
Titreşim genliği açısından değerlendirildiğinde, artan w/a oranı ile birlikte deneysel ve modelleme arasındaki farklar sırasıyla %53 %8 ve %7 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu farklar kabul edilebilir düzeyde olmakla birlikte, daha hassas üretim kabiliyetine sahip yazıcılar veya farklı teknikler (Stereolithography, SLA) kullanmak suretiyle bu farkın kapanabileceği öngörülmektedir. W/a değerinin artması ile birlikte kirişin rijitliği de artmaktadır. Artan rijitlikle beraber titreşim genliğinin de arttığı görülmektedir.

Kirişin rijitliği azaldıkça uygulanan çekiç testi sonuçlarında hata miktarının da arttığı düşünülmektedir. Çünkü uygulanan çekiç kuvveti ve bu kuvvete karşılık kirişin tepkisi de daha kararsız olacaktır. Bu durum modelleme ile deneysel sonuçların arasındaki farkın da artmasına neden olduğu düşünülmektedir (Candaş 2013).



Şekil 4. 9 W/A oranının rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi

Şekil 4.10'da 4,5 ve 6 numaralı kirişler için elde edilen deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir. Hem modelleme hem de deneysel sonuçlara göre artan L değerine bağlı olarak rezonans frekansının da bir miktar arttığı görülmektedir. Bununla birlikte artan L değerine bağlı olarak titreşim genliğinin değişmediğini söylemek mümkündür. Deneysel ve modellemeden elde edilen frekans değerleri arasındaki fark sırasıyla %8,81 %8,55 ve %8,29 dur. L=0,75 ve 1mm için elde edilen titreşim genliği değerleri birbirlerine çok yakın olduğu ancak L=1,5mm olan kirişte deneysel çalışma titreşim genliğinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir ve hata payları sırasıyla %0,01 %0,0 ve %19,3 olarak hesaplanmıştır.



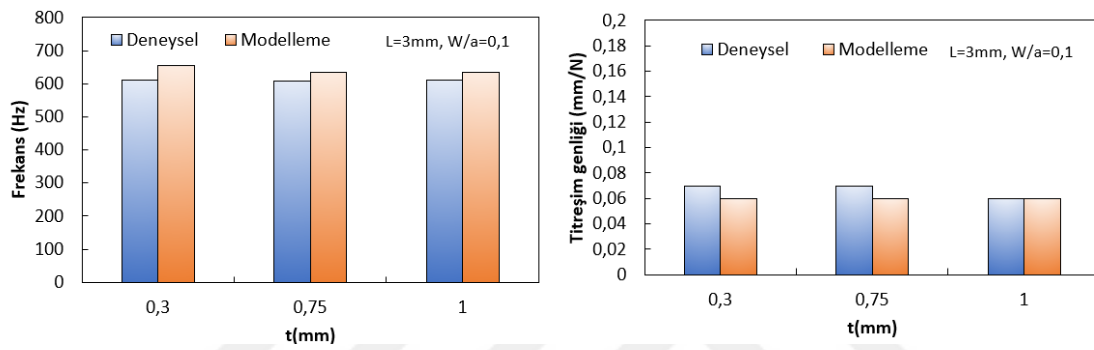
Şekil 4. 10 L değerinin rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi

Şekil 4.11, 7, 8 ve 9 numaralı kirişlere ait t-frekans ve titreşim genliği grafiklerini içermektedir. İlk grafik, t-frekans etkileşimini detaylandırırken; ikinci grafik, t-titreşim genliği ilişkisini sunmaktadır.

İlk grafikte, her bir kirişin frekans değerlerinin deneysel verilerde daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, t değerindeki değişikliklerin frekans üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu belirlenmiştir. Hesaplanan hata payları sırasıyla %7,54, %4,61 ve %4,1 olarak

bulunmuştur. Bu hata paylarının göreceli olarak düşük seviyelerde olması, belirli çalışma türlerinin değerlerinin sapmalarının üretim kaynaklı hataların kabul edilebilir seviyelerde olduğunu göstermektedir.

İkinci grafikte ise, ilk iki kirişin titreşim genliği değerlerinin deneysel verilerde belirgin bir şekilde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda hesaplanan hata payları %14,29, %14,29 ve %0 olarak belirlenmiştir. Bu durum, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmakta ve deneysel koşulların sonuçlar üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.



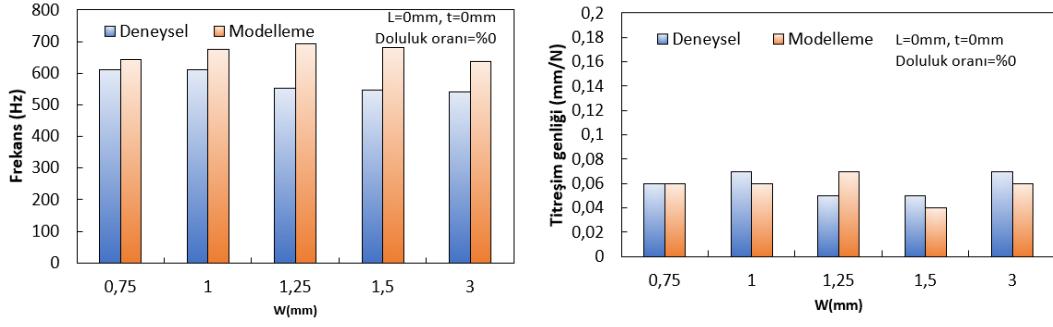
Şekil 4.11 T değerinin rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi

Şekil 4.12, içi tamamen boş olan ve W değerleri değişiklik gösteren kirişlerin t-frekans ve titreşim genliği grafiklerini sunmaktadır.

İlk grafikte, tüm kirişlerin frekans değerlerinin deneysel çalışmalarda daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

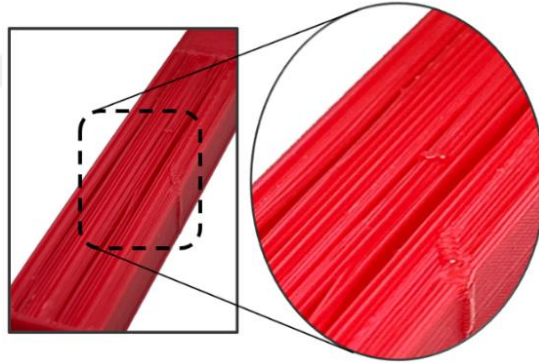
Deneysel ve modelleme süreçleri arasındaki hata oranları, sırasıyla %5,25, %10,31, %22,3, %24,31 ve %17,31 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek hata oranları, kabuk yapısına sahip kirişlerin üretim aşamasında meydana gelen hataların sayısının arttığını işaret etmektedir. İkinci grafikte ise, neredeyse tüm kirişlerde deneysel çalışmalarda elde edilen titreşim genliği değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Deneysel ve modelleme çalışmaları arasındaki hata payları %0, %14,2, %16,4, %15,1 ve %14,2 olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, deneysel verilerin modelleme ile kıyaslandığında daha tutarlı olduğunu, ancak bazı kirişler için önemli farklılıkların ortaya çıktığını göstermektedir. Bulgular, üretim süreçlerinde yaşanan değişkenliklerin etkilerini değerlendirmek açısından önemlidir.



Şekil 4. 12 Kiriş çeper kalınlığının rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi

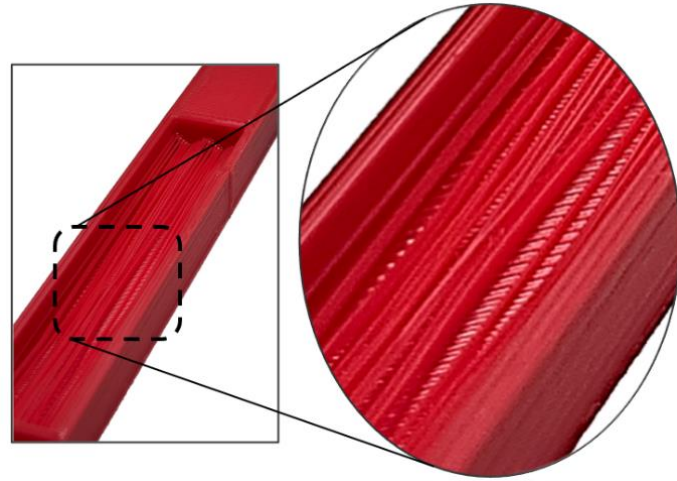
Sonlu elemanlar metodu ile deneysel sonuçlar arasındaki farklılıkların başlıca sebeplerinden biri, kiriş şeklinde üretilen numunelerin üretim sürecinde karşılaşılan zorluklardır. Şekil 4.13'te, bu üretimle ilgili karşılaşılan bir problem örneği sunulmaktadır. Özellikle, altıgen dolgu formunu oluşturan katmanların lineer bir şekilde ilerlememesi, katmanlar arasındaki yapışma ve birleşme sorunlarına yol açmakta, bu da üretim sürecinin doğruluğunu ve simülasyonla uyumunu olumsuz yönde etkilemektedir.



Şekil 4. 13 Üç boyutlu yazıcı kaynaklı üretim hatalarından lineer olmayan katman problemi

Şekil 4.14'da, kiriş şeklindeki numunelerin üretiminde karşılaşılan bir diğer problem olan yapışma sorunu gözlemlenmektedir. Üretim hatalarının daha net bir şekilde tespit edilebilmesi amacıyla, 1 ve 7 numaralı numuneler z ekseninden kesit alınarak yeniden üretilmiştir.

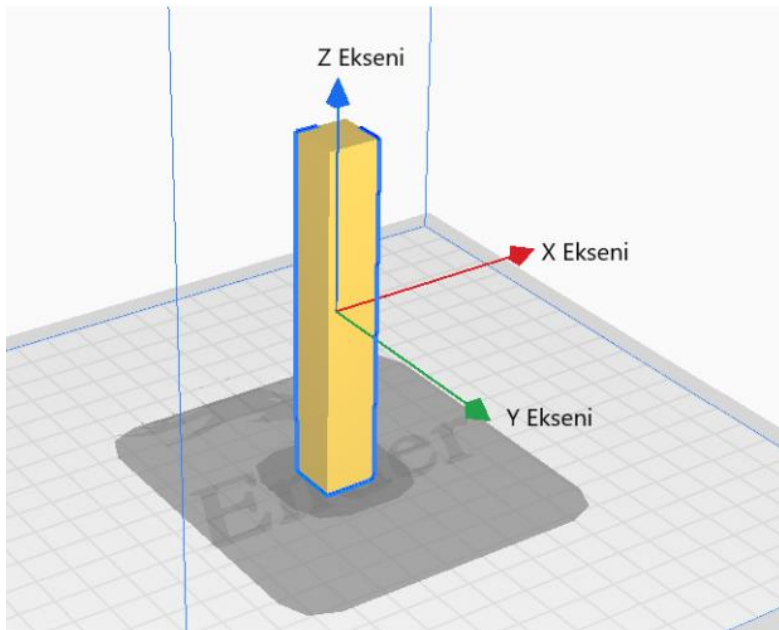
1 ve 7 numaralı numuneler, tercih edilmesinin sebebi olarak, en düşük dolgu yoğunluklarına ve altıgen dolgu geometrisinin en ince cidar kalınlıklarına sahip olmalarıdır. Dolgu yoğunluğu ve cidar kalınlığının artması, yapışma kaynaklı sorunları önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 4. 14 Üç boyutlu yazıcı kaynaklı üretim hatalarından yapışma problemi

Çizelge 4.4'te, üretim sürecine bağlı olarak meydana gelen kütle farklılıkları gözlemlenmiştir. Yapışma sorunları, geometrik hatalar ve kütleli bozukluklar, frekans ve sönümlenme oranı gibi parametrelerde değişimlere yol açmaktadır. Bu tür değişiklikler, sonlu elemanlar metodu ile elde edilen simülasyon sonuçları ile deneysel bulgular arasındaki farkların temel kaynağını oluşturmaktadır.

Şekil 4.15 'te, dilimleme programında kirişin dikey konumda yerleştirdiği ve eksen çizgilerinin isimleri bulunmaktadır.



Şekil 4. 15 Dilimleme programında eksenlerin gösterimi

Numuneler incelendiğinde %50 ve üzerinde hata payı bulunan üç adet numune oldu gözlemlenmiştir. Bu numuneler 1,2 ve triangle isimle numunelerdir.

Kirişlerin, üretimi ve sonlu elemanlar metodundaki ağırlık değerlerindeki yüksek farkın sebebinin kullanılan filamentin tamamında homojen kimyasal formül olmadığı öngörülmektedir. Filament değişimi, nozzle tıkanması, filament çap değişimi gibi hatalar fazla veya eksik ekstrüzyon gerçekleşmesine sebep olabilmektedir.

Çizelge 4. 4 Kiriş şeklinde numunelerin kütle özellikleri

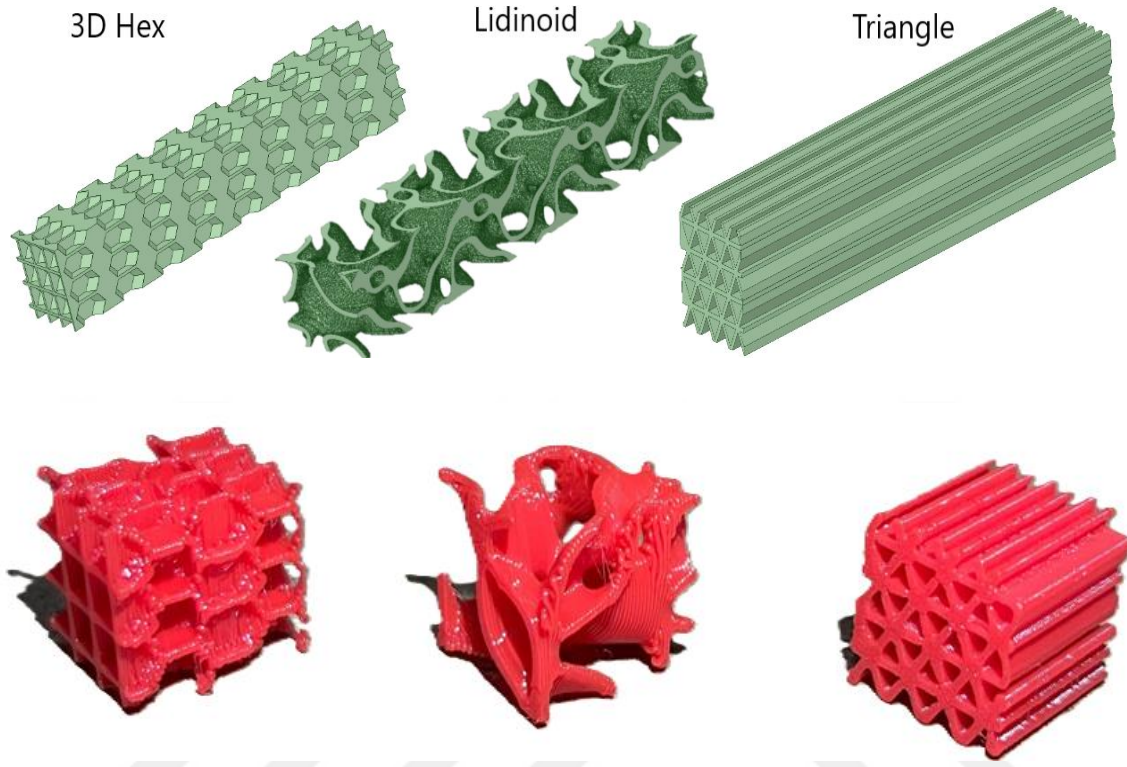
Kiriş Şeklinde Numunelerin Kütle Özellikleri									
Kiriş No	Tasarım Kütle Özellikleri				Üretim Kütle Özellikleri				
	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Ağırlık (gr)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Ağırlık (gr)	Ağırlık Farkı (%)
1	15	15	100	26,455	15,1	14,93	99,41	18,8223	28,85
2	15	15	100	24,605	15,59	14,87	100,52	17,5432	28,7
3	15	15	100	22,142	15,03	14,77	100,23	19,7580	10,76
4	15	15	100	21,332	15,5	14,7	100,07	19,444	8,85
5	15	15	100	20,045	15,39	14,63	100,25	18,1	9,7
6	15	15	100	18,774	15,05	14,4	100,25	19,1437	1,96
7	15	15	100	16,298	15,47	14,76	100,28	14,6477	10,12
8	15	15	100	17,845	15,01	14,63	100,45	15,8496	11,18
9	15	15	100	17,845	15,06	14,44	100,25	15,7741	11,6
10	15	15	100	12,493	15,21	14,74	99,83	10,8620	13,05
11	15	15	100	14,895	15,06	14,67	100,43	13,0411	12,44
12	15	15	100	11,21	15,36	14,84	100,19	10,1732	9,24
13	15	15	100	13,721	15,2	14,74	100,08	11,9994	12,54
14	15	15	100	20,835	15,31	14,8	99,9	18,8763	9,4
15	15	15	100	28,125	15,53	14,08	100,39	24,5661	12,65
Triangle	15	15	100	11,21	15,33	14,66	100,03	13,9137	24,11
3dhex	15	15	100	11,21	15,16	14,42	100,042	13,7191	22,38
Lidinoid	15	15	100	11,21	15,26	14,81	100,066	12,8551	14,67

4.6 Farklı Kafes Yapısının Titreşim Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Kiriş içindeki kafes yapısının değişiminin titreşim özellikleri üzerindeki etkisini inceleyebilmek için, üç farklı kafes yapısına sahip tasarımlar gerçekleştirilmiş ve üretim yapılmıştır.

Şekil 4.15'te, bal peteği geometrisinden hariç tasarlanan üç farklı kafes dolgusunun görselleri sunulmaktadır. Farklı kafes yapısının etkisini ortaya koyabilmek adına Çizelge 3.1'de verilen 1 numaralı kiriş ile aynı cidar kalınlığına sahip olan kirişlerin dolgu yoğunlukları da %19 alınmıştır.

Böylece aynı cidar kalınlığına ve aynı dolgu yoğunluğuna sahip farklı kafes yapısında olan kirişler birbiri ile kıyaslanmak istenmiştir.



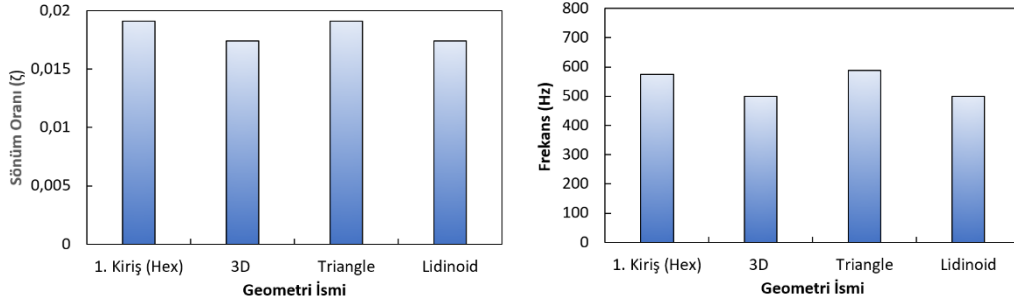
Şekil 4.16 3D hex, lidinoid ve üçgen geometrisine sahip kafes yapısının genel görünümü

Şekil 4.16 'da 1 numaralı kiriş ile birlikte deneysel olarak üretilen üç farklı kirişin çekme darbe testiyle elde edilen verilerinin grafiksel gösterimleri sunulmaktadır. Bu grafiklerin incelenmesi sonucunda, üçgen dolgu geometrisine sahip kirişin en yüksek sönümleme oranını sağladığı gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan, lidinoid dolgu geometrisiyle üretilen kirişin en düşük sönümleme oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Geometri değişikliğinin rezonans frekansı ve sönümleme oranı üzerindeki etkileri, Şekil 4.16' daki grafiklerle gösterilmiştir.

Aynı dolgu oranına (%19) sahip olmalarına rağmen, frekans değerleri açısından, 1. kiriş ile üçgen kafes yapısı arasında %13,07'lik bir fark gözlemlenmiştir.

Ayrıca, sönüm oranı açısından yapılan değerlendirmede, üçgen kafes yapısının sönüm oranı, 1. kirişin sönüm oranından %8,91 daha yüksek bulunmuştur. 3D Hex ve Lidinoid kafes yapılarının frekans ve genlik değerleri ise birbirine oldukça yakı sonuçlarda olduğu tespit edilmiştir.



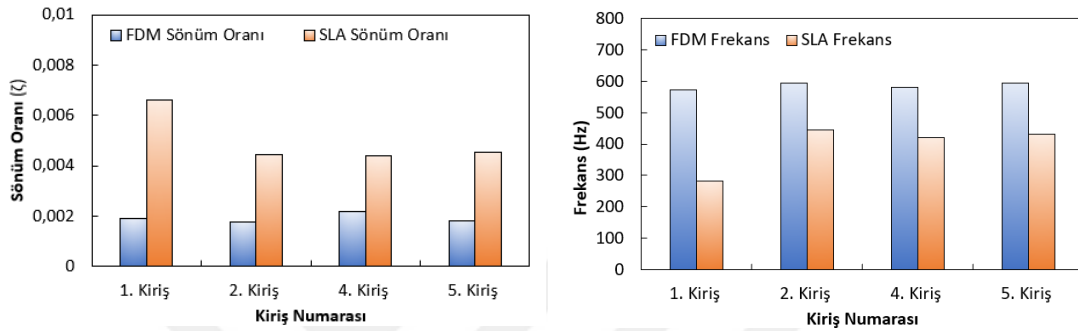
Şekil 4. 17 Deneysel dolgu geometrilerinin sönümleme oranı ve frekans değerleri üzerindeki etkisi

4.7 Üretim Tekniğinin Titreşim Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.17'de, SLA ve FDM üretim yöntemleri ile üretilen 1, 2, 4 ve 5 numaralı numunelerin çekiç-darbe testi ile elde edilen sonuçları gösteren grafikler yer almaktadır. Numunelerin üretimi esnasında dilimleme programına en yakın geometri üretiminin gerçekleştiği tespit edilen 1,2,4 ve 5 numaralı numuneler sonuçların en doğru ve net şekilde oluşabileceği öngörüldüğü için tercih edilmişlerdir. Şekil 4.17 de verilen sonuçlar kürlenmemiş SLA numunelerine ait sonuçlardır.

Şekil 4.17 de dikkati çeken ilk bulgu, üretim yöntemi kirişin hem doğal frekansının hem de sönüm oranının değişmesine neden olduğudur. Bununla birlikte FDM yöntemiyle üretilen numunelerin frekans ve sönümleme oranı değerlerinin tüm kirişlerde birbirine oldukça yakındır. Buna karşın SLA ile üretilen numunelerde hem frekans değerleri hem de sönüm oranları değişkenlik göstermektedir. FDM ve SLA ile üretilen 1 nolu kiriş numunede frekans değeri %51,04 kadar azalırken, sönüm oranı %246,95 artmıştır. Diğer kiriş numunelerde (2,4 ve 5) SLA üretim yönteminin kullanılması doğal frekansta ortalama %27,83 azalmaya neden olurken, sönüm oranında %99,09 artmaya neden olduğu tespit edilmiştir. SLA numunelerinde sönüm oranının daha yüksek olmasının altında yatan neden ise imalat sonrasında kütleme işleminin uygulanmamış olmasıdır. SLA ile yapılan üretimde şekillendirme sonrasında numune kullanılan reçine tipine bağlı olarak su veya alkol ile yıkandıktan sonra 1-3 dakika arasında kürlenir (Topçu 2020). Bu işlem, numunenin daha da sertleşmesine ve mukavemet kazanmasına neden olmaktadır. Bu yüksek sönüm oranları, SLA yönteminde kütleme işleminin eksikliğinden kaynaklanmakta olup, titreşimlerin hızlı bir şekilde sönümlenmesi gereken uygulamalar için avantaj sağlar. Ancak bu durum enerji kaybını artırarak dinamik tepkime sürelerini

olumsuz etkileyebilir. Ayrıca SLA yöntemi, doğal frekansı düşürerek rezonans etkilerini azaltma potansiyeline sahip olsa da bu, sistemin titreşim davranışını optimize etmeyi zorlaştırabilir. Diğer taraftan, FDM yöntemi daha tutarlı doğal frekans değerleri sağlayarak kontrol edilebilir sistemlerde önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu sonuçlar, malzeme seçimi ve üretim yöntemi kararlarının, uygulama gereksinimlerine göre dikkatle değerlendirilmesi gerektiğinin bir göstergesidir.

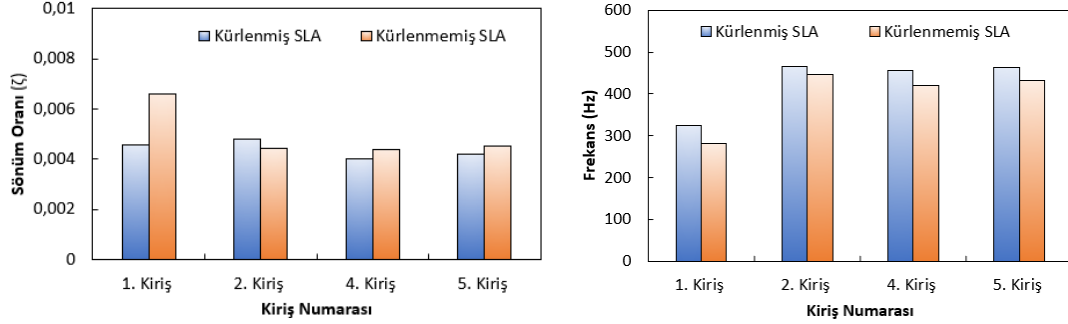


Şekil 4. 18 SLA ve FDM üretim yöntemlerinin frekans ve sönümlenme oranı üzerindeki etkisi

Şekil 4.18'de, SLA üretim yöntemiyle üretilen kiriş şeklindeki numunelerin kürlenme işlemi öncesi ve sonrasındaki titreşim frekansı ile sönümlenme oranı değerlerinin karşılaştırıldığı grafikler sunulmaktadır. Frekans değerleri incelendiğinde, kürlenme işleminin 1, 2, 4 ve 5 numaralı kirişlerde titreşim frekansını ortalama %8,67 oranında artırdığı gözlemlenmektedir. Bu artış, tüm kirişler (1, 2, 4 ve 5) için tutarlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Sönümlenme oranları üzerine yapılan incelemede ise, 4. ve 5. kirişlerde sönümlenme oranının yaklaşık %7 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ancak, 2. kirişte kürlenme işlemi sönümlenme oranını %7 civarında bir azaltmaya sebep olmuştur. Diğer taraftan, 1. kirişte, diğer kirişlere kıyasla daha belirgin bir artış gözlemlenmiş olup, bu artış yaklaşık %44,54 oranındadır.

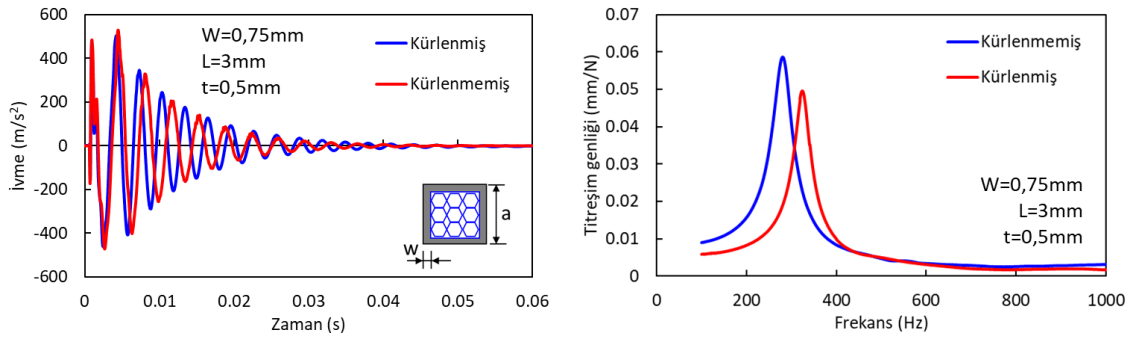
Kürlenme süresinin artırılması, reçinenin sertleşme seviyesini daha da artırabilir. Sertlikteki artış, titreşim frekansını daha fazla artırabilir. Ancak bu artış, kürlenme süresine bağlı olarak belirli bir noktadan sonra doygunluğa ulaşabilir. Kürlenme süresinin artması, materyalin viskoelastik özelliklerini etkileyerek sönümlenme oranını olumlu ya da olumsuz yönde değiştirebilir. Bu, kürlenme sonrası malzemenin yapısal homojenliği ve esneklik katsayısına bağlıdır. Sonuç olarak, kürlenme süresi optimize edilerek hem yüksek frekans değerleri hem de uygun sönümlenme oranları elde edilebilir. Ancak sürenin

gereğinden fazla artırılması malzemenin gevrekleşmesine yol açabilir, bu da kırılabilirlik riskini artırabilir. Bu nedenle deneysel bir çalışma ile ideal kütleme süresi belirlenmelidir.



Şekil 4. 19 SLA ile yapılan üretim yönteminde kütleme işleminin frekans ve sönüm oranı üzerindeki etkisi

Şekil 4.19'da SLA üretim yöntemi ile üretilen parçalara uygulanan kütleme işleminin, numunelerin mekanik özellikleri üzerinde belirli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. İvme/zaman grafiği incelendiğinde, kütleme işleminin numuneler üzerinde anlamlı bir etki yaratmadığı, bu etki arasındaki farkın ise kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Frekans/titreşim genliği grafiği incelendiğinde ise, kütleme işleminin frekans değerinde yaklaşık 50 Hz'lik bir artışa yol açtığı, ancak titreşim genliği değerinde yaklaşık 0,01 mm/N'lik bir azalma meydana getirdiği tespit edilmiştir.

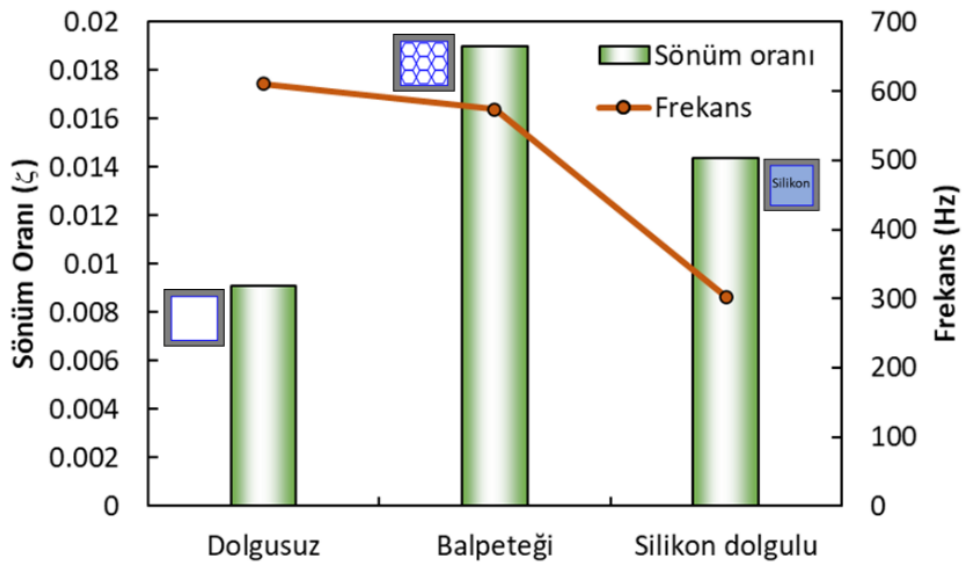


Şekil 4. 20 SLA üretim yönteminde kütleme işleminin ivme ve titreşim genliği üzerindeki etkisi

4.8 Silikon Dolgusunun Titreşim Özelliklerine Etkisi

Tez çalışmasının bu bölümünde kiriş içerisinde kafes kullanmak yerine sönümleme özelliği olan soğuk silikon kullanımının etkisi araştırılmıştır. Silikon yoğunluğu daha yüksek olması nedeniyle iç yapısında kafes bulunan kirişlere nazaran daha ağır olacağı

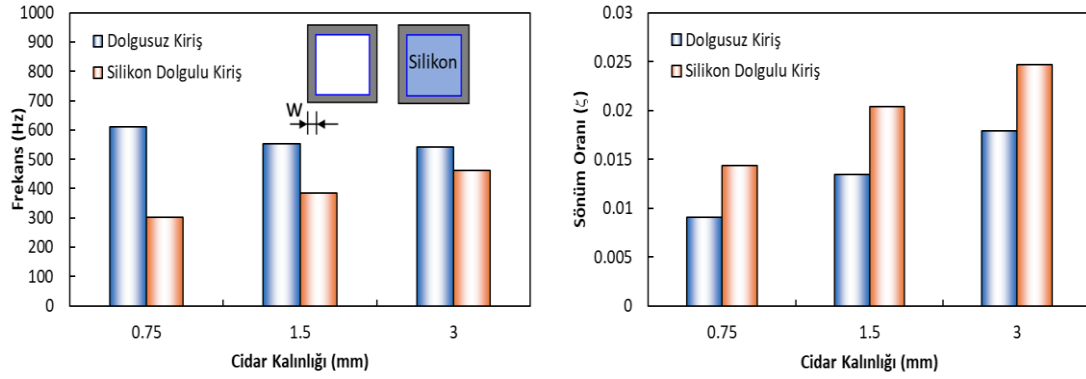
da açıktır. Fakat bir sönümleme özelliğinin de olduğu bilinmektedir (Erol 2008). Bu nedenle kiriş içerisine bal peteği bir kafes yerine dolgu olarak soğuk silikon enjekte edilmiş ve donması sağlanmıştır. Şekil 4.20'de, cidar kalınlığı 0,75 mm olan, içi tamamen boş, soğuk silikon dolgulu ve altıgen dolgu geometrili kirişlerin çekiç-darbe testi sonrasında elde edilen titreşim frekansı ve sönüm oranı değerlerini verilmektedir. Silikon dolgunun doğal frekansı değerlerinde bir azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. 0,75 cidar kalınlığına sahip içi boş kiriş ile içi silikon dolu kirişin doğal frekans değerleri arasında %50,45 fark vardır.



Şekil 4. 21 W=0,75mm için dolgusuz, silikon dolgulu ve bal peteği dolgulu kirişin sönüm oranı ve frekans değişimi

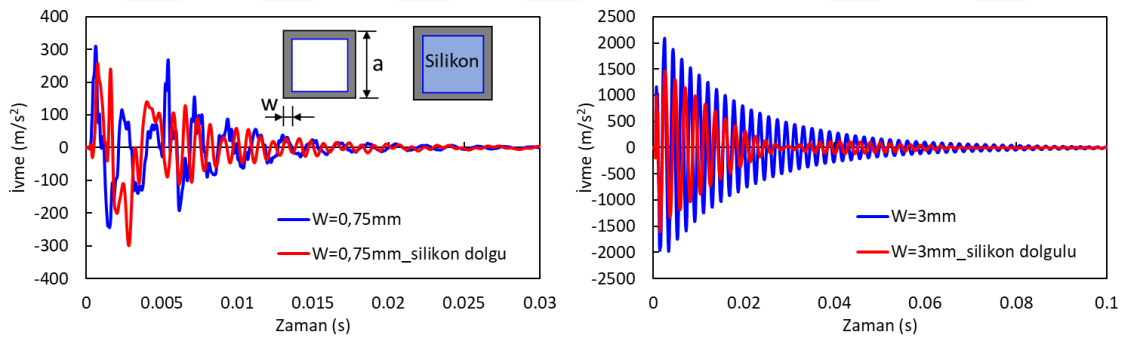
Şekil 4.21'de, silikon dolgunun tamamen boş bir kirişteki titreşim frekansını, kirişin cidar kalınlığıyla doğru orantılı olarak azalttığı gösterilmektedir. Ayrıca, içi altıgen dolgu geometrisi ile %19 oranında dolmuş olan 1, 2 ve 3 numaralı kirişlerin titreşim frekanslarına ilişkin veriler de sunulmuştur.

Grafiklerin incelenmesi sonucunda, boş kiriş ile altıgen geometri dolgusu arasındaki frekans değerlerinde yaklaşık %6'lık bir fark gözlemlenmiştir. Bu bulgu, silikon dolgunun, titreşim frekansını düşürmede altıgen dolgu geometrisine kıyasla daha etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Sönümleme oranı grafiği incelendiğinde, 1. kiriş dışında, 2. ve 3. kirişlerde silikon dolgunun, altıgen dolgu geometrisine kıyasla daha yüksek sönümleme oranlarına katkı sağladığı belirlenmiştir.



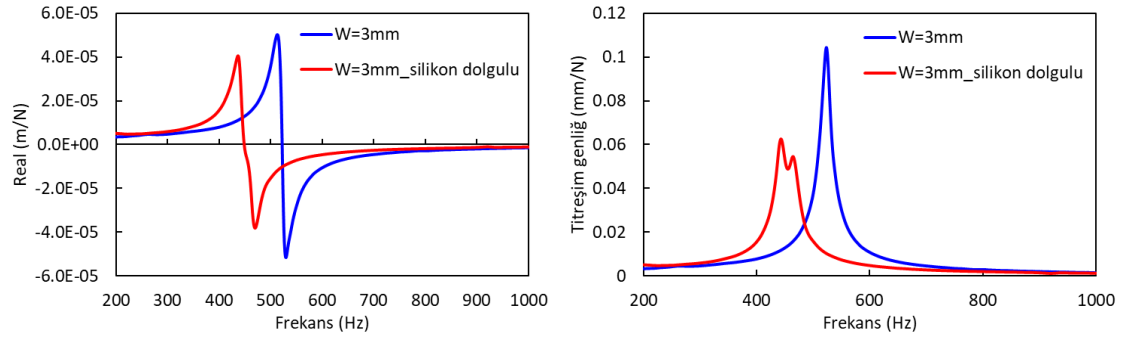
Şekil 4. 22 Silikon dolgu malzemesinin kirişin doğal frekans ve sönüm oranı üzerindeki etkisi

Şekil 4.22'de, boş olarak üretilip silikon ile doldurulan numunelerin ivme/zaman grafikleri sunulmuştur. Grafiklerin incelenmesi sonucunda, 3 mm cidar kalınlığına sahip kirişin ivme/zaman verilerinin doğrusal bir şekilde ilerlediği, ancak 0,75 mm cidar kalınlığına sahip kirişin verilerinde doğrusal olmayan değişikliklerin gözlemlendiği belirlenmiştir. Silikon dolgusu, ivme değerinde yaklaşık 500 m/s²'lik bir azalmaya yol açarken, cidar kalınlığının artması ise ivme değerinde yaklaşık 1600 m/s²'lik bir artışa sebep olmaktadır.



Şekil 4. 23 Silikon dolgulu ve dolgusuz üretilen iki farklı cidar kalınlığına sahip numunenin ivme-zaman grafikleri

Şekil 4.23'de, 3 mm cidar kalınlığına sahip kirişte silikon dolgu uygulamasının mekanik özelliklerdeki değişimi gösteren grafik yer almaktadır. Titreşim grafiğinin incelenmesi sonucunda, silikon dolgunun frekans değerini yaklaşık 200 Hz kadar azalttığı ve titreşim genliği değerinde ise yaklaşık 0,05 mm/N'lik bir düşüşe yol açtığı gözlemlenmiştir. Real grafiği incelendiğinde ise silikon dolgunun m/N değerinin azalmasına sebep olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4. 24 3mm cıdar kalınlığına sahip kirişte silikon dolgu kaynaklı mekanik özelliklerin değişim grafiğı

5. SONUÇ

Bu çalışma, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kafes yapılı polimer numunelerin mekanik performansı ve titreşim sönümleme davranışının kapsamlı bir analizi üzerine odaklanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizi sayesinde, üretilen numunelerin rezonans frekansları, titreşim genlikleri ve sönüm oranları detaylı bir biçimde değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, kirişlerin titreşim davranışları ve sönümleme özellikleri üzerindeki farklı parametrelerin etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Kiriş çeper kalınlığının titreşim genliği üzerindeki etkisinin, çeper kalınlığının artmasıyla genlik değerlerinde düşüş sağladığı ve bunun rijitliğin artmasıyla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Kafes kenar uzunluğunun genliğe olan etkisi değerlendirilmiş ve artan kenar uzunluğunun genlik değerlerini belirli bir seviyeye kadar artırdığı tespit edilmiştir. Kafes cidar kalınlığının genliğe etkisi analiz edilmiş, ince cidar kalınlıklarında üretimden kaynaklanan hataların titreşim genliği farklarına neden olduğu görülmüştür. Değişken parametrelerle sönümleme oranlarının incelenmesi sonucu, minimum cidar kalınlığı ve bal peteği dolgularının sönümleme oranını artırdığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, farklı üretim parametrelerinin ve geometrik tasarım unsurlarının titreşim performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu vurgulamakta ve optimizasyon çalışmaları için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Numunelerin dolgu geometrileri ve üretim parametrelerinin, mekanik özellikler üzerindeki etkisi açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Bal peteği dolgulu kirişlerin, silikon dolgulu numunelere kıyasla daha üstün mekanik performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bal peteği geometrisinin doluluk oranı ve cidar kalınlığı gibi parametrelerinin optimize edilmesi, hafiflik ile titreşim sönümleme kabiliyeti arasında dengeli bir çözüm sunmuştur. Soğuk silikon dolgulu numunelerde, silikon, malzemenin rezonans frekansını düşürdüğü ve titreşim genliğini azalttığı tespit edilmiştir. Ancak, bu yapılarda malzeme kullanımının daha maliyetli olması ve üretim sürecinde yaşanan karmaşıklıklar nedeniyle, silikon dolgulu yapıların belirli uygulama alanlarıyla sınırlı kalabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışma ayrıca, SLA ve FDM gibi farklı eklemeli imalat yöntemlerinin mekanik performansa etkilerini de incelemiştir. SLA yöntemiyle üretilen numunelerde, üretim sonrası kurlama işleminin sönümleme oranı ve frekans değerleri üzerinde önemli bir

etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bu durum, SLA yönteminde üretim süreci optimizasyonunun mekanik performans üzerindeki önemini göstermektedir. Dolgu geometrisinin modifikasyonu ve üretim parametrelerinin hassas ayarlarla optimize edilmesi, hafiflik ve mekanik dayanıklılık gibi kritik gerekliliklerin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma, sonlu elemanlar analizinin deneysel verilerle büyük ölçüde uyum gösterdiğini ve bu yöntemin tasarım çalışmalarında ön değerlendirme aracı olarak etkin bir biçimde kullanılabileceğini göstermiştir.

5.1 İleriye Yönelik Çalışmalar

Bu çalışmanın bulguları, gelecekteki çalışmalar için de çeşitli çalışma konularının araştırılmasını gündeme getirmiştir. İlk olarak, farklı polimer malzemelerin veya kompozit yapıların dolgu geometrileri üzerindeki etkisi incelenebilir. Ek olarak, üretim süreci parametrelerinin, özellikle baskı hızı ve katman kalınlığı gibi öğelerin mekanik performansa etkileri derinlemesine araştırılabilir. Bal peteği geometrisinin farklı ölçeklerde çoklu parametre optimizasyonu ile incelenmesi, daha dayanıklı ve hafif yapıların tasarlanmasına olanak sağlayabilir. Ayrıca, bu yapıların havacılık, otomotiv ve biyomedikal uygulamalarda enerji sönmüleme potansiyeli üzerine özel testlerin yapılması faydalı olacaktır. Gelecek çalışmalarda, farklı materyallerin ve dolgu türlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenebilir. Özellikle soğuk silikon yerine alternatif dolgu malzemelerinin kullanılması, numunelerin mekanik performansını daha da iyileştirebilir.

6. KAYNAKLAR

- Adamidis O, Alber S, Anastasopoulos I, 2018, Investigation Into 3D Printing Of Granular Media. Physical Modelling İn Geotechnics, Proceedings Of The 9th International Conference On Physical Modelling İn Geotechnics, CRC Press, London, 113-118.
- Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H. Ve Barlow, J. 1995, Direct Selective Laser Sintering Of Metals. Rapid Prototyping Journal, 1(1), 26-36. Doi:10.1108/13552549 510078113.
- Ahuja B, Schaub A, Junker D, Karg M, Tenner F, Plettke R, 2016, A Round Robin Study For Laser Beam Melting İn A Metal Powder Bed, South African J Ind Eng 27:30–42.
- Al Rifaie, Hasan Z, 2014, Impact Of Supply Air Flow Rate On System Performance And Space Comfort Of Residential Air Conditioning Systems.
- Al Rifaie M, 2017, Jamal Resilience And Toughness Behavior Of 3D-Printed Polymer Lattice Structures: Testing And Modeling.
- Aktitiz, İ., Aydın, K., & Topcu, A. (2020). Stereolitografi (SLA) Tekniği İle Basılan 3 Boyutlu Polimer Yapılarda İkincil Kırılma Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(4), 949-958.
- Aktimur B, Gökpınar R, 2015, Katmanlı Üretimin Havacılıkdaki Uygulamaları, Gazi Üniversitesi Fen Bilim Dergisi, 3:463–9.
- Amit Kumar Singh, M. Leela, R. Jeevitha, R. Mirudhularani And S. Vigneswari, 2023, Journal Of Biomedical Engineering And Technology. 2023, 10(1), 1-7. DOI: 10.12691/Jbet-10-1-1 Pub. Date: March 24.
- Asadollahi-Yazdi E, Gardan J. Ve Lafon, P, 2016, Integrated Design İn Additive Manufacturing Based On Design For Manufacturing. Int'l Journal Of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic And Manufacturing Engineering, 10(6), 1104-1111.
- Atlıhan G, 2021, Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Bal Petekli Yapıların Titreşim Davranışlarının Nümerik Ve Deneyisel Olarak İncelenmesi.

- Agarwal K, 2022 Erimiş Biriktirme Modelleme (FDM) Kullanılarak Basılan ABS Numunelerinin Boyutsal Değişimine Baskı Parametrelerinin Etkisinin Analiz Edilmesi.
- Bai J, Et Al. 2017, "Porosity Evolution İn Additively Manufactured Aluminium Alloy During High Temperature Exposure." IOP Conference Series: Materials Science And Engineering.
- Beyen K, 2007, Structural Identification For Post-Earthquake Safety Analysis Of The Fatih Mosque After The 17 August 1999 Kocaeli Earthquake, Engineering Structures, 30(8), Pp. 2165–2184.
- Bellehumeur C, Li L, Sun Q, Gu P ,2004, Erimiş Biriktirme Modelleme Sürecinde Polimer Filamentler Arasındaki Bağ Oluşumunun Modellenmesi. J Manuf Process 6(2):170–178.
- Babae S, Et Al, 2013, 3D Soft Metamaterials With Negative Poisson's Ratio Adv. Ater., 25 (36), Pp. 5044-5049.
- Candaş A, 2013, Bir Jib Krenin Deneysel Gerilme Analizi.
- Chaput Vd. 2011, "Seramik Endüstrisi", Cilt. 161, No. 9, S. 15–16.
- Çelik İ, Karakoç F, Cakir M, Duysak A, 2013, Rapid Prototyping Technologies And Application Areas, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 31:53–70.
- Douellou C Vd. 2019, Assessment Of Geometrical Defects Caused By Thermal Distortions İn Laser-Beam-Melting Additive Manufacturing: A Simulation Approach, Rapid Prototyp J, 25:939–50.
- Durgun, I.J.R.P.J. "Sheet Metal Forming Using FDM Rapid Prototype Tool." 2015.
- Dizon J, Espera Jr, Chena Q, Advincula R, 2018, "Mechanical Characterization Of 3D-Printed Polymers", Additive Manufacturing, 20: 44-67.
- Dias JM Da Silva, FSCP, Gasik M Ve Diğerleri, 2024, Kalça İmplantlarında Eklemeli Olarak Üretilen Hücresel Yapıların Açığa Çıkarılması: Kapsamlı Bir İnceleme. Int J Adv Manuf Technol 130, 4073–4122.

- Duman B, Kayacan M, 2017, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme / Ergitme Yöntemi İle İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini, Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 7:12-28.
- Dossi M, Brennan M, Moesen M, 2017, Multi-Physics Study Of The Wave Propagation Problem İn Open Cell Polyurethane Foams. In Proceedings Of The COMSOL International Conference, Rotterdam, The Netherlands.
- Duoss E, Et Al, 2014, Three-Dimensional Printing Of Elastomeric, Cellular Architectures With Negative Stiffness Adv. Funct. Mater., 24 (31), Pp. 4905-4913.
- Dubovikov E, 2019, Gelecekteki Sivil Uçaklar İçin Düşük Eğrilikli Panellerin Üretim Yöntemleri.
- Dutkowski K, 2016, Isı Transferinde Minimal Yüzeylerin Son Teknoloji Kullanımlarının İncelenmesi.
- Epma, 2019, Introduction To Additive Manufacturing Technology, A Guide For Designers And Engineers, Eur Powder Metall Assoc., Shrewsbury.
- Erol, Ö., Sarı, B., Ünal, H. İ., & Yılmaz, H. 2008, Montmorillonit/Silikon Yağı Süspansiyonlarının Elektoreolojik Özelliklerinin İncelenmesi.
- Fleury, C. (1989). Efficient Approximation Concepts Using Second Order Information. International Journal For Numerical Methods İn Engineering, 28(9), 2041-2058.
- Ford, 2014, SLN Eklemeli Üretim Teknolojisi: ABD Üretim Rekabet Gücüne İlişkin Potansiyel Etkiler. J. Uluslararası İletişim. Ekon, 6, 40.
- Fu S, Xu G, Mai Y, 2002, Hibrit Parçacık/Kısa Lif/Polimer Kompozitlerinin Elastik Modülü Üzerine. Kompozisyon. Bölüm B Eng, 33, 291–299.
- Forster AM, 2015 Polimer Malzemelerin Katkısal İmalatı İçin Malzeme Test Standartları: Son Durum Ve Standartların Uygulanabilirliği. ABD Ticaret Bakanlığı, Ulusal Standartlar Ve Teknoloji Enstitüsü.
- Forster A, 2015, Materials Testing Standards For Additive Manufacturing Of Polymer Materials: State Of The Art And Standards Applicability, National Institute Of Standards And Technology, Gaithersburg.

- Feng J, 2021 İmplant Uygulamaları İçin İzotropik Oktet-Kafes Kafes Yapı Tasarımı Ve Anizotropi Kontrol Stratejileri.
- Fetvacı C, 2019, Düz Dişlilerde Kavrama Çevriminde Gerilmelerin Değişiminin Sonlu Eleman Metodu İle İncelenmesi.
- Gebhardt IA, 2003, Hızlı Prototipleme: Endüstriyel Hızlı Prototipleme Sistemi: Prototip Oluşturucu: Katı Zemin Kürleme, Cubital, S. 105–109.
- Galantucci LM, Bodi I, Kacani J, Lavecchia F, 2015, Erimiş Biriktirme Modelleme (FDM) Tekniğine Dayalı 3 Boyutlu Açık Kaynaklı Bir Yazıcı İçin Boyutsal Performansın Analizi. In: 3. CIRP Küresel Web Konferansı.
- Gibson L, Ashby M, 1997, Cellular Solids: Structure And Properties, 2nd Ed.; Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Gibson L, Ashby M, 1997, Cellular Solids: Structure And Properties, 2nd Ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, Pp. 16–21.
- Grima J, Et Al, 2011, Negative Linear Compressibility Of Hexagonal Honeycombs And Related Systems Scr. Mater., 65 (7), Pp. 565-568.
- Grafakos L, 2014, Modern Fourier Analizi. Üçüncü Baskı, Matematikte Lisansüstü Metinler. 250, Springer, New York.
- Güler, M., & Şen, S. (2016). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. Ordu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 56-66.
- Günay, D. (1993). Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri.
- Hasanov S, Gupta A, Nasirov A, Fidan I, 2020, Erimiş Filament Üretim Prosesi İle Üretilen Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Mekanik Karakterizasyonu. J. Manuf. İşlem. 58, 923–935.
- Hattal A, Chauveau T, Djemai M, Fouchet J, Bacroix B, Dirras G, 2019, Effect Of Nano-Yttria Stabilized Zirconia Addition On The Microstructure And Mechanical Properties Of Ti6Al4V Parts Manufactured By Selective Laser Melting, Mater Des, 180.

- Holovenko Y, Kollo L, Saarna M, Rahmani R, Soloviova R, Antonov M, 2020, Effect Of Lattice Surface Treatment On Performance Of Hardmetal- Titanium Interpenetrating Phase Composites, Int J Refract Met Hard Mater, 86.
- Irrinki H, Alhofors M, Stitzel J, Gulsoy O, 2019, Sıcak İzostatik Preslemenin Lazer-Toz Yatak Füzyon Tekniği İle Üretilmiş 17-4PH Paslanmaz Çelikler Üzerine Etkisi, 2nd International Turkish World Engineering And Science.
- İlyin D, 2021, Hızlı Prototipleme Kavramı.
- İyibilgin O, 2019 Experimental Modal Analysis Of 3d Printed Beams.
- Kornbluh RD Ve Diğerleri, 2004, Kauçuktan Sertliğe, Kelepçeliden Sönümsüzlüğe: Geniş Aralıklı Kontrol Edilebilir Sertlik Ve Sönümlemeye Sahip Kompozit Malzemelere Doğru. SPIE 5388:372–386 Proc.
- Kumar S, 2010, “Selective Laser Sintering: Recent Advances”, Journal Of Laser Applications, 607: 1-8.
- Knauss W, Emri I, 1987, Hacim Değişimi Ve Polimerlerin Doğrusal Olmayan Termo-Viskoelastik Yapısı. In: Yee, A. (Ed.) Polimer Mühendisliği Ve Bilimleri, Cilt 27, S. 86–100.
- Kam M, İpekçi A, Saruhan H, 2017, “3 Boyutlu Baskı Dolgu Yapılarının PET-G Malzemeli Ürünlerin Mekanik Özelliklerine Ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi,” Gaziosmanpasa Bilimsel Araştırma Dergisi, Cilt. 6, S. 114–121.
- Kam M, Saruhan H, 2018, “3D Baskı Doluluk Oranlarının PET - G Malzeme Ürünlerinin Mekanik Özellikleri Ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisinin Araştırılması” Journal Of New Results İn Science, Cilt. 7, Hayır. 2, S. 1–8.
- Kayacan M, Yılmaz N, 2019, DMLS Eklemeli İmalatta Süreç Ve Maliyet Modeli Geliştirilmesi, Politeknik Dergisi, 22:763–70.
- Kayacan M, Yılmaz N, 2019, DMLS İle Eklemeli İmalatta Dengesiz Sıcaklık Dağılımı Ve Parçaya Etkilerinin Araştırılması, Politeknik Dergisi, 7:79–94.
- Kara N, 2013, Havacılıkta Katmanlı İmalat Teknolojisinin Kullanımı, Mühendis Ve Makine, 54:70–5.

- Koehnen P, Et Al, 2018, Mechanical Properties And Deformation Behavior Of Additively Manufactured Lattice Structures Of Stainless-Steel Mater. Des., 145, Pp. 205-217.
- Larimian T, Kannan M, Grzesiak D, Almangour B, Borkar T, 2020, Effect Of Energy Density And Scanning Strategy On Densification, Microstructure And Mechanical Properties Of 316L Stainless Steel Processed Via Selective Laser Melting, Mater Sci Eng A, 770.
- Leary M, Et Al, 2018, Inconel 625 Lattice Structures Manufactured By Selective Laser Melting (SLM): Mechanical Properties, Deformation And Failure Modes Mater. Des., 157, Pp. 179-199.
- Lv H, Zhang S, Sun Q Ve Diğerleri, 2021, Manyetorheolojik Sönümleme Sistemleri İçin Dinamik Modeller, Kontrol Stratejileri Ve Uygulamaları: Sistematik Bir İnceleme. J Vib Eng Technol 9:131–147.
- Lindberg A, Alfthan J, Pettersson H, Flodberg G, Yang L, 2018, Polimer Toz Yatak Eritilmiş Nesnelerin Mekanik Performansı – FEM Simülasyonu Ve Doğrulaması. Addit Manuf 24:577–586.
- Lopez-Galilea I, Rutttert B, He J, Hammerschmidt T, Drautz R, Gault B, 2019, Additive Manufacturing Of CMSX-4 Ni-Base Superalloy By Selective Laser Melting: Influence Of Processing Parameters And Heat Treatment, Addit Manuf, 30:874-899.
- Liu J, Sun Q, Zhou C, Wang X, Li H, Guo K, 2019, Achieving Ti6Al4V Alloys With Both High Strength And Ductility Via Selective Laser Melting, Mater Sci Eng A, 766.
- Li F, Chen S, Shi J, Tian H, Zhao Y, 2017, Evaluation And Optimization Of A Hybrid Manufacturing Process Combining Wire Arc Additive Manufacturing With Milling For The Fabrication Of Stiffened Panels, Appl Sci, 7.
- Mousa A, 2014, “The Effects Of Content And Surface Modification Of Filler On The Mechanical Properties Of Selective Laser Sintered Polyamide12 Composites”, Jordan Journal Of Mechanical And Industrial Engineering, 8 (5): 265-274.

- Macy B, 2016, Erimiş Biriktirme Modellemesini Kullanan Hızlı/Uygun Fiyatlı Kompozit Takımlama Stratejileri, SAMPE Journal 47, 4.
- Mielicki C, Wegner A, Gronhoff B, Wortberg J, Witt G, 2012, "Prediction Of PA 12 Melt Viscosity İn Laser Sintering By A Time And Temperature Dependent Rheological Model", Rtejournal, 9.
- Mazzeo M, De Domenico D, Quaranta G, Santoro R, 2024, Serbest Titreşim Tepkisi Ve Geliştirilmiş Ampirik Fourier Ayrıştırma Tekniğine Dayalı Verimli Bir Otomatik Modal Tanımlama Yöntemi. Eng. Struct, 298, 117046.
- Ming W,Dang J, An Q, Chen M, 2019, Chip Formation And Hole Quality İn Dry Drilling Additive Manufactured Ti6Al4V, Mater Manuf Process, 1-9.
- Mieszala M, Hasegawa M, Guillonneau G, Bauer J, Raghavan R, Frantz C, Kraft O, Mischler S, Michler J, Philippe L, 2017, 3B Hücreli Mimarilere Sahip Amorf Metal/Polimer Hibrit Yapıların Mikromekaniği: Boyut Etkileri, Burkulma Davranışı Ve Enerji Emme Kapasitesi. Small, 13, 1602514.
- Mazur M, Et Al, 2016, Mechanical Properties Of Ti6Al4V And AlSi12mg Lattice Structures Manufactured By Selective Laser Melting (SLM) Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, And Applications, Pp. 119-161.
- Moridi A, Demir A, Caprio L, Hart A, Previtali B, Colosimo B, 2019, Deformation And Failure Mechanisms Of Ti-6Al-4V As Built By Selective Laser Melting, Mater Sci Eng A, 768.
- Mishra K, Ponnusamy P, Nallamilli P, 2021, "The İnfluence Of Process Parameters On The İmpact Resistance Of 3D Printed PLA Specimens Under Water-Absorption And Heat-Treated Conditions", Rapid Prototyping Journal.
- Meneghetti G, Rigon D, Gennari C, 2018, An Analysis Of Defects İnfluence On Axial Fatigue Strength Of Maraging Steel Specimens Produced By Additive Manufacturing, Int J Fatigue, 118:54-64.
- Ngo T, Et Al, 2018, "Additive Manufacturing (3D Printing): A Review Of Materials, Methods, Applications And Challenges." Pp. 172-196.

- Najmon J, S Raeisi, Tovar A, 2019, "Review Of Additive Manufacturing Technologies And Applications In The Aerospace Industry." Additive Manufacturing For The Aerospace Industry. Elsevier, Pp. 7-31.
- Nath S, Irrinki H, Kearns M, Gulsoy O, Atre S, 2019, Microstructure And Mechanical Properties Of AISI-420 Stainless Steels Produced By Laser-Powdered Bed Fusion 2nd International Turkish World Engineering And Science Congress.
- Oktet S, 2022, Kafes-Kafes Tabanlı Gaz Türbini Kanatlarının Deneysel Ve Sayısal Titreşim Analizi.
- Özbay B, Serhatlı İ, Bulduk M, 2019, “Manufacturing And Characterization Of Filled Polyamide 12 Composite Structure By Selective Laser Sintering Method”, 5th Edition Of International Conference On Polymer Science And Technology, Berlin.
- Özsolak O, 2019, Eklemeli İmalat Yöntemleri Ve Kullanılan Malzemeler, International Journal Of Innovative Engineering Applications, 1:9–14.
- Öteyaka M, Çakır F, Sofuoğlu M, 2022, FDM Baskılı PLA Numunelerinin Eğilme Ve Titreşim Sönümleme Özellikleri Üzerinde Dolgu Deseni Ve Oranının Etkisi.
- Pattanayak D, Et Al, 2011, Bioactive Ti Metal Analogous To Human Cancellous Bone: Fabrication By Selective Laser Melting And Chemical Treatments Acta Biomater., 7 (3), Pp. 1398-1406.
- Papazoglou E, Karkalos N, Karmiris-Obratański P, Markopoulos A, 2021, Metal Ve Polimer Tozları İçin SLM Ve SLS'nin Modellenmesi Ve Simülasyonu Üzerine: Bir İnceleme. Arch Comput Methods Eng 29(2):941–973.
- Pan C, Han Y, Lu J, 2020, Design And Optimization Of Lattice Structures: A Review. Appl. Sci, 10, 6374.
- Pfaff M, Jäcklein K, Hoschke M, Wickert, 2018, Designed Materials By Additive Manufacturing–Impact Of Exposure Strategies And Parameters On Material Characteristics Of Alsi10mg Processed By Laser Beam Melting, Metals (Basel), 8.
- Pan C, 2020, Kafes Yapıların Tasarımı Ve Optimizasyonu: Bir İnceleme.

- Polat Çoban N, Anaç N Ve Mert F, 2023. “Eklemeli İmalat İle Üretilen PLA Parçaların Yapıştırılmasında Yapıştırma Parametrelerinin Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi”, Politeknik Dergisi, 26(3): 1145-1154.
- Polat E, 2016, Katmanlı Lazer Ergitme Metodu İle Üretime Yönelik Düzenek Geliştirilmesi Ve İşlem Parametrelerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Pozrikidis, C. (2008). Numerical Computation In Science And Engineering. Oxford University Press.
- Qian T, Wang Y, 2010, "Hücre Biyolojisi İçin Mikro/Nano Üretim Teknolojileri", Medikal Ve Biyoloji Mühendisliği Ve Bilgisayar, Cilt. 48, No. 10, S. 1023–1032.
- Ramkumar G, Gnanaprakasam A, Thirumarimurugan, Mayıs 2022, Manyetorheolojik Akışkan Çekirdekli PLA Ve PVC Konsol Yapılarda Sönümleme Karakteristiklerinin İncelenmesi.
- Rigon D, Meneghetti D, Görtler M, Cozzi D, Waldhauser W, Dabalà M, 2018, Influence Of Defects On Axial Fatigue Strength Of Maraging Steel Specimens Produced By Additive Manufacturing, MATEC Web Conf, 165:2–8.
- Rysava Z, Bruschi S, Carmignato S, Medeossi S, Savio E, Zanini F, 2016, Micro-Drilling And Threading Of The Ti6Al4 V Titanium Alloy Produced Through Additive Manufacturing, Procedia CIRP, 46:583–6.
- Spitznogle F, 1971, Karmaşık Üstel Sinyal Analizi Hesaplama Algoritmasındaki Gelişmeler, Rapor Numarası U1-829401-5, Sonar Sinyallerinin Gösterimi Ve Analizi, Cilt 1, S. 37.
- Schmid M, Wegener K, 2016, “Additive Manufacturing: Polymers Applicable For Laser Sintering (LS)”, ICMEM 2016, Nový Smokovec.
- Schmid M, 2018, Laser Sintering- With Plastics Technology, Processes, And Materials”, Carl Hanser Verlag, Münih.
- Singh S, R.J.R.P.J, 2016, Singh. "Fused Deposition Modelling Based Rapid Patterns For Investment Casting Applications: A Review."

- Simkins M, 2008, "3 Boyutlu Yapışkan Bir Baskı: Yapışkan Yiyecek Veya Kil İle Kendi Lezzetli Tasarımlarınızı Tasarlayın Ve Oluşturun", Technology And Learning, S. 48.
- Sofu M, 2007, Hızlı Direkt İmalatta Kullanılan Seçici Lazer Sinterleme Ve Ergitme Cihazının Gövde Tasarımı Ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü, Isparta.
- Schmidt M, Merklein M, Bourell D, Dimitrov D, Hausotte T, Wegener K, 2017, Laser Based Additive Manufacturing In Industry And Academia, CIRP Ann Manuf Technol, 66:561–83.
- Shibata A, Sözen M, 1976, Substitute-Structure Method For Design In R/C, Journal Of The Structural Division, ASCE, Vol. 102, Pp. 1–18.
- Sartori S, Moro L, Ghiotti A, Bruschi S, 2017, On The Tool Wear Mechanisms In Dry And Cryogenic Turning Additive Manufactured Titanium Alloys, Tribol Int, 105:264–73.
- Seçer Y, 2019, Seçici Lazer Ergitme Yöntemi İle Oluşturulan Farklı Yüzey Tekstürlerinin Ve Plazma Nitrüleme İşleminin AISI 316L Paslanmaz Çeliğinin Yapısal, Mekanik Ve Tribolojik Özelliklerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Stansbury J, Idacavage M, 2016, "3D Printing With Polymers: Challenges Among Expanding Options And Opportunities, Dent. Mater., 32: 54-64.
- Sheydaeian E, 2017, Çok Malzemeli Hibrit Eklemeli İmalat Fonksiyonel Kademeli Yapılar İçin Sistemler, Malzemeler Ve Metodolojiler. Doktora Tez, University Of Waterloo, Waterloo, ON, Kanada.
- Schönrath H, Spasova M, Kilian S, Meckenstock R, Witt G, Seht J, 2019, Additive Manufacturing Of Soft Magnetic Permalloy From Fe And Ni Powders: Control Of Magnetic Anisotropy, J Magn Magn Mater, 478:274–8.
- Sürmen H, 2019, Eklemeli İmalat (3B Baskı):Tehnolojiler Ve Uygulamalar, Uludağ Üniversitesi Mühendisli Fakültesi Dergisi, 24:373–92.
- Sürmen H, 2019,Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar.

- Teng F, 2017, Katmanlı Üretime Dayalı Farklı Kafes Yapılarının Topolojik Ve Mekanik Özellikleri.
- Turan SR, Ülker O, Kuncan M, Buldu A, 2022. Stereolithografi Eklemeli İmalat Yöntemiyle Farklı Doluluk Oranlarında Üretilen Numunelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Uluslararası 3D Baskı Teknolojileri Ve Dijital Endüstri Dergisi, 6(3), 399-407.
- Uluslararası Modal Analiz Konferansı Bildirileri, 1982-2006 (DeneySEL Mekanik Derneği, Bethel 1982-2006.
- Vaezi M, Chianrabutra S, Mellor B, Yang S, 2013, Çoklu Malzeme Eklemeli Üretim Sanal Fizik Prototip. 8, 19–50.
- Vaupotic B, Brezocnik M Ve J. Balic, 2016, “Yeni Ürünün İmalatında Polyjet Teknolojisinin Kullanılması,” Malzeme Ve Üretim Mühendisliğinde Başarılar Dergisi, Cilt. 18, No. 1-2, S. 319–322.
- Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D, 2017, “3D Printing Of Polymer Matrix Composites: A Review And Prospective”, Composites Part B, 110: 442-458.
- Wang Q, Et Al, 2016, Lightweight Mechanical Metamaterials With Tunable Negative Hermal Expansion Phys. Rev. Lett., 117 (17), P. 175901.
- Xu Z, Wang H, Yang G, 2017, 3D Baskı Parçalarının Kontur Hassasiyeti Üzerinde Geometrik Parametrelerin Etkisine İlişkin Araştırma. Mach. Des. Manuf. 5, 113–115.
- Yalçın B, Ergene B, 2017, Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Yöntemi Ve Metalurjisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknol Bilim Dergisi, 9:65–88.
- Yan C, Hao L, Xu L, Shi Y, 2011, “Preparation, Characterisation And Processing Of Carbon Fibre/Polyamide-12 Composites For Selective Laser Sintering”, Composites Science And Technology 71: 1834-1841.
- Yıldırım Ş, 2019, Çift KöprülÜ Askı Tip Kren Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Metodu İle Modal Analizi.

Zhang S, Zhang Y, Gao M, Wang F, Li W, Zeng X, 2019, Effects Of Milling Thickness On Wire Deposition Accuracy Of Hybrid Additive/Subtractive Manufacturing, Sci Technol Weld Join, 24:375–81.

Zheng X, Et Al, 2014, Ultralight, Ultrastiff Mechanical Metamaterials Science, 344 (6190), Pp. 1373-1377.

Zheng Y, 2019, Malzeme Yüzeylerinin Biyolojik Esinlenmeyle Tasarımı.



İnternet Kaynakları

- 1- https://www.researchgate.net/publication/320786408_Performance_of_hybrid_nano-micro_reinforced_mg_metal_matrix_composites_brake_calliper_simulation_approach, 16.10.2024
- 2- <https://www.nasa.gov/>, 02.11.2024
- 3- <https://www.geaerospace.com/>, 03.11.2024
- 4- <https://www.audi.com/en.html>, 18.11.2024
- 5- <https://www.ford.com/>, 06.10.2024
- 6- <https://blog.dta.com.tr/frfden-sonum-nasil-hesaplanir/>, 19.10.2024
- 7- <https://www.printables.com/model/952835-3d-printable-turbojet-engine/>, 22.10.2024
- 8- <https://coprint3d.com/blogs/guides/3d-printing-technologies-comparison-fdm-sla-sls-and-dmls>, 16.10.2024
- 9- <https://omniatasarim.com/magaza/3d-baski-hizmeti/>, 03.10.2024

