



**AÇILI YÜKLER ALTINDA BİYO-İLHAMLI YAPI DOLGULU HİBRİT
TÜPLERİN ENERJİ SÖNÜMLEME PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

Selin ARICI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2023

ETİK BEYAN

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

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

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

Selin ARICI

31/03/2023

AÇILI YÜKLER ALTINDA BİO-İLHAMLI YAPI DOLGULU HİBRİT TÜPLERİN ENERJİ SÖNÜMLEME PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Selin ARICI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2023

ÖZET

Araç kazalarının her geçen gün artması otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliği konusunda araştırmaların önemini ortaya koymaktadır. Araştırma alanlarından biri olan taşıt güvenlik sistemleri can ve mal kaybının en aza indirgenmesini sağlamaktadır. Enerji sönümleyici yapılar pasif güvenlik sistemi elemanları olarak kabul edilmektedir. Bu çalışma canlı doğadan esinlenerek tasarlanan biyo-ilhamlı yapı ile dolgulu hibrit enerji sönümleyici profiller üzerine olacak şekilde iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada biyo-ilhamlı modeller (1M, 2M, 3M) 3D baskı yöntemi üretilmiştir. Üretilen biyo-ilhamlı yapılar geleneksel enerji sönümleyici profillerin içerisine yerleştirilmiş, 0° ve 15°'lik deformasyon açısında ezilerek performansları belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında elde edilen deney sonuçları dikkate alınarak sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve aynı koşullar altında analizler yapılmıştır. Sonuç olarak 0° deformasyon açısında 3M hibrit modelin geleneksel modele (0M) göre enerji sönümleme kapasitesi bakımından %22,64 ve ezilme kuvveti verimi bakımından %8,63 daha iyi olduğu belirlenmiştir. 15° deformasyon açısında geleneksel modele göre enerji sönümleme kapasitesi bakımından 3M modelin %22,49, ezilme kuvveti verimi bakımından ise 2M modelin %6,06 daha iyi sonuca sahip olduğu tespit edilmiştir. Özgül enerji sönümleme kapasitesi bakımından gerek 0° gerekse 15° de yapılan tüm deneylerde kütle artış oranının sönümlenen toplam enerji artış oranından daha az olmasından dolayı geleneksel modellerin hibrit modellerden daha yüksek performansa sahip olduğu bulunmuştur.

Bilim Kodu : 93006

Anahtar Kelimeler : Pasif güvenlik sistemleri, hibrit enerji sönümleyiciler, biyo-ilhamlı yapılar, özgül enerji sönümleme, ezilme kuvveti verimi

Sayfa Adedi : 89

Danışman : Doç. Dr. Murat ALTIN

INVESTIGATION OF ENERGY ABSORPTION PERFORMANCE OF BIO-INSPIRED STRUCTURE FILLED HYBRID TUBES UNDER ANGLE LOADS

(M. Sc. Thesis)

Selin ARICI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2023

ABSTRACT

The increase in vehicle accidents daily reveals the importance of research on passenger safety in the automotive industry. Vehicle security systems, one of the research areas, ensure that the loss of life and property is minimized. Energy absorbing structures are considered passive safety system elements. This study was carried out in two stages, on a bio-inspired structure inspired by nature and on a filled hybrid energy-absorbing profile. In the first stage, bio-inspired models (1M, 2M, 3M) were produced by the 3D printing method. The produced bio-inspired structures were placed in conventional energy absorbing profiles, and their performances were determined by crushing at deformation angles of 0° and 15° . Considering the experimental results obtained in the second stage of the study, finite element models were created, and analyses were made under the same conditions. As a result, it was determined that the 3M hybrid model at 0° deformation angle was 22.64% better in energy absorption capacity and 8.63% better in crush force efficiency compared to the conventional model (0M). It has been determined that the 3M model has a better result of 22.49% in terms of energy absorption capacity and 6.06% of the 2M model in terms of crush force efficiency compared to the conventional model at 15° deformation angle. In terms of specific energy absorption capacity, it has been found that conventional models have higher performance than hybrid models because the mass increase rate is less than the total absorption energy increase rate in all experiments performed at both 0° and 15° .

Science Code : 93006

Key Words : Passive safety systems, hybrid energy absorbers, bio-inspired structures, specific energy absorption, crush force efficiency

Page Number : 89

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Murat ALTIN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında her konuda yanımda olan ve bana her daim yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Murat ALTIN'a, teşekkürü bir borç bilirim. Kıymetli varlıklarıyla her zaman yanımda olan, çalışmam sırasında sabırlarını esirgemeyen, hayatıma anlam katan sevgili annem, babam ve ağabeyime manevi desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca FLY-2021-7392 nolu proje kapsamında maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Güvenlik Sistemleri.....	5
2.2. Çarpışma Test Türleri	5
2.3. Biyo-İlhamlı Yapılar	8
2.4. Eklemeli İmalat.....	11
2.4.1. Stereolitografi (SLA) teknolojisi.....	13
2.5. Performans Metrikleri	14
3. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	17
3.1. Geleneksel Enerji Sönümleyici Yapılar	17
3.2. Biyo-ilhamlı Enerji Sönümleyici Yapılar	23
4. MATERYAL METOT	31
4.1. Biyo-ilhamlı Enerji Sönümleyici Yapıların Tasarımı	31
4.2. Biyo-ilhamlı Enerji Sönümleyici Yapıların Üretimi	34
4.3. Reçine Malzemesinin Mekanik Özellikleri	38

	Sayfa
4.4. Hibrit Enerji Sönümleyici Yapılar	42
4.5. Açısal Deformasyon Test Düzeneğinin Tasarımı ve İmalatı.....	44
4.6. Deneysel Çalışmalar.....	45
5. LS-DYNA İLE SONLU ELEMENLAR ANALİZİ	61
5.1. Ls-Dyna Çalışma Prensibi	61
5.1.1. Zaman integrasyonu	61
5.1.2. Zaman adımı büyüklüğü	63
5.1.3. Ls-Dyna birim sistemleri.....	64
5.2. Eleman Ağ Boyutu Hassasiyeti	65
5.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	66
6. DENEY SONUÇLARI KULLANILARAK SONLU ELEMENLAR MODELLERİNİN DOĞRULANMASI.....	71
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
7.1. Sonuçlar	81
7.2. Öneriler	82
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. 2010-2021 Trafik kaza istatistikleri.....	1
Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri.....	12
Çizelge 4.1. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin performans metrikleri.....	46
Çizelge 4.2. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin performans metrikleri.....	48
Çizelge 4.3. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin performans metrikleri.....	50
Çizelge 4.4. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin performans metrikleri.....	51
Çizelge 4.5. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin performans metrikleri.....	53
Çizelge 4.6. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin performans metrikleri.....	55
Çizelge 4.7. 2M151, 2M152 ve 2M153 modellerinin performans metrikleri.....	56
Çizelge 4.8. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin performans metrikleri.....	58
Çizelge 4.9. 0° Deney sonuçları.....	59
Çizelge 4.10. 15° Deney sonuçları.....	60
Çizelge 5.1. 0° Ls-Dyna Birim Sistemi.....	65
Çizelge 6.1. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin performans metrikleri.....	72
Çizelge 6.2. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin performans metrikleri.....	73
Çizelge 6.3. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin performans metrikleri.....	74
Çizelge 6.4. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin performans metrikleri.....	75
Çizelge 6.5. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin performans metrikleri.....	77
Çizelge 6.6. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin performans metrikleri.....	78
Çizelge 6.7. 2M151, 2M152 ve 2M153 modellerinin performans metrikleri.....	79
Çizelge 6.8. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin performans metrikleri.....	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tez akış şeması.....	3
Şekil 2.1. Araç güvenlik sistemleri.....	5
Şekil 2.2. Çarpışma anında aracı etkileyen deformasyon etki seviyeleri	6
Şekil 2.3. Biyo-ilhamlı yapılar konusundaki yayın sayısı	9
Şekil 2.4. Enerji sönümleyiciler için ilham kaynağı olan biyolojik yapılar.....	10
Şekil 2.5. Enerji sönümleyicilerde kullanılan biyo-ilhamlı yapıların sınıflandırılması..	11
Şekil 2.6. SLA sistem modeli	13
Şekil 2.7. Performans metrikleri	14
Şekil 3.1. Farklı tasarımlara sahip enerji sönümleyici yapılar.....	18
Şekil 3.2. Halkalı ve halkasız enerji sönümleyici yapılar.....	19
Şekil 3.3. Halka mesafesine göre tasarlanmış enerji sönümleyici yapılar	19
Şekil 3.4. Kare ve altıgen enerji sönümleyici yapılar	20
Şekil 3.5. Çok hücreli enerji sönümleyici yapılar.....	21
Şekil 3.6. Tasarlanmış enerji sönümleyici yapıların üstten görünümü.....	22
Şekil 3.7. Açılı yükleme durumunda olan bir enerji sönümleyici yapı	22
Şekil 3.8. Tasarlanan enerji sönümleyici yapıların üstten görünümü.....	23
Şekil 3.9. Biyo-ilhamlı enerji sönümleyici yapılar	24
Şekil 3.10. Geleneksel petek yapılardan esinlenilmiş enerji sönümleyici yapılar.....	25
Şekil 3.11. Farklı dalga genliklerine sahip enerji sönümleyici yapılar.....	26
Şekil 3.12. Çok hücreli enerji sönümleyici yapılar.....	27
Şekil 3.13. Biyo-ilhamlı yeni enerji sönümleyici	27
Şekil 3.14. Bambu mikro yapısı.....	28
Şekil 3.15. Nervürlü ve nervürsüz enerji sönümleyici yapılar.....	28

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. Hindistan cevizi ağacından esinlenilmiş bir enerji sönümleyici yapı.....	29
Şekil 3.17. Yeni altıgen enerji sönümleyici yapı	30
Şekil 3.18. Geleneksel, perdesiz ve perdeli dış bükey enerji sönümleyici yapılar	30
Şekil 4.1. Karahindiba bitkisinin fizyolojik yapısı	31
Şekil 4.2. Hücre ölçüleri	32
Şekil 4.3. Tasarım görüntüleri	33
Şekil 4.4. Model türüne göre adlandırma.....	34
Şekil 4.5. Model türü, deney açısı ve numune numarasına göre adlandırma	34
Şekil 4.6. LCD tabanlı SLA baskı cihazı.....	35
Şekil 4.7. Modelin baskı için konumlandırılması	35
Şekil 4.8. Model destek yapıları	36
Şekil 4.9. Yıkama-kürleme cihazları	37
Şekil 4.10. Çekme numune ölçüleri.....	38
Şekil 4.11. Biyo-ihamlı yapının yük-uzama grafiği.....	41
Şekil 4.12. Hibrit enerji sönümleyici yapının tasarım hali	43
Şekil 4.13. Açısal deformasyon test düzeneği tasarımı	44
Şekil 4.14. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	46
Şekil 4.15. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	47
Şekil 4.16. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	49
Şekil 4.17. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	51
Şekil 4.18. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	52
Şekil 4.19. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	54
Şekil 4.20. 2M151, 2M152 ve 2M153 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	56
Şekil 4.21. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	57

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Merkezi fark metodu.....	62
Şekil 5.2. Alüminyum tüp için eleman boyutu-ortalama ezilme kuvvet değerleri	65
Şekil 5.3. Biyo-ilhamlı yapı için eleman boyutu-ortalama ezilme kuvvet değerleri	66
Şekil 5.4. Parçaların sonlu elemanlarına ayrılmış hali.....	67
Şekil 5.5. Parçaların numaralandığı *PART kartı	67
Şekil 5.6. Kesit tanımlama kartı.....	68
Şekil 5.7. Malzeme kartı	68
Şekil 5.8. Kontak kartları	69
Şekil 5.9. Sınır koşulları.....	70
Şekil 5.10. Hareketli plaka için hız tanımlama kartı.....	70
Şekil 6.1. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	71
Şekil 6.2. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	73
Şekil 6.3. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	74
Şekil 6.4. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	75
Şekil 6.5. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	76
Şekil 6.6. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	77
Şekil 6.7. 2M151, 2M152 ve 2M153 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	78
Şekil 6.8. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Önden çarpışma testi	6
Resim 2.2. Yan darbe testi	7
Resim 2.3. Direk çarpma testi	7
Resim 2.4. Kızak sistemi ile arkadan çarpma testi	8
Resim 4.1. Deneme modeli	36
Resim 4.2. Modelin yıkama anı	37
Resim 4.3. Baskı sonucunda elde edilen modeller	38
Resim 4.4. Çekme numunesi.....	39
Resim 4.5. Deney test cihazı.....	39
Resim 4.6. Çekme deneyi görüntüleri.....	40
Resim 4.7. Numunelerin çekme deneyinden önceki ve sonraki hali	40
Resim 4.8. Yoğunluk ölçüm testi.....	41
Resim 4.9. Alüminyum için işlem sırası	42
Resim 4.10. Hibrit enerji sönümleyiciler	43
Resim 4.11. Deney düzeneği.....	44
Resim 4.12. Üretilmiş olan açılabilir deformasyon test düzeneği	45
Resim 4.13. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin deformasyon görüntüsü.....	47
Resim 4.14. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin deformasyon görüntüsü.....	48
Resim 4.15. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin deformasyon görüntüsü.....	50
Resim 4.16. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin deformasyon görüntüsü.....	52
Resim 4.17. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin deformasyon görüntüsü.....	53
Resim 4.18. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin deformasyon görüntüsü.....	55
Resim 4.19. 2M151, 2M152 ve 2M153 modellerinin deformasyon görüntüsü.....	57

Resim**Sayfa**

Resim 4.20. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin deformasyon görüntüsü.....	58
---	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Δt_e	Bir elemanın zaman adım boyutu
P_n	Dış yükleme matrisi
L_i	Eleman üzerindeki kenar uzunluğu
E	Elastik modülü
GPa	Gigapascal
A_s	Kabuk elemanın toplam alanı
L_s	Karakteristik uzunluk
kg	Kilogram
kg/m ³	Kilogram bölü metreküp
kJ/kg	Kilojoule bölü kilogram
kN	Kilonewton
m	Kütle
ρ	Malzeme yoğunluğu
MPa	Megapascal
m/s	Metre bölü saniye
mm/dk	Milimetre bölü dakika
ms	Milisaniye
nm	Nanometre
ν	Poisson oranı
s	Saniye
K	Sertlik matrisi
c	Ses hızı
C	Sönümleme matrisi
δ	Yer değiştirme
Δt	Zaman adım boyutu
α	Zaman adım katsayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar****ABS**

Anti-lock Brake System

ASR

Anti-Slip Regulation

CAD

Computer Aided Design

ESP

Electronic Stability Programme

LCD

Liquid Crystal Display

SLA

Stereolithography

TÜİK

Türkiye İstatistik Kurumu

UV

Ultraviyole

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi, ülkelerin ekonomik yönden sürükleyici ve teknolojinin gelişmesinde sanayinin öncüsü konumundadır. Artan dünya nüfusu ile toplumsal ve bireysel olarak taşıtlara olan talep her geçen gün pozitif yönde ivmelenmektedir. Konjonktürel olarak taşıtlara olan yüksek talep beraberinde kaza sayılarının da artmasına yol açmaktadır. Bu yüzden araç çarpışma dayanıklılığı ve güvenliği gibi alanlar, araştırma-geliştirme çalışmalarında önemli bir konu haline gelmiştir. Her sektörde olduğu gibi otomotiv sektöründe de öncelik can güvenliği ilke edinilmiştir [1].

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine toplam trafikteki toplam motorlu kara taşıtı sayısı 2021 yılında, Covid-19 etkisindeki 2020 yılına göre %4,6, kaza sayısı %20,6, maddi hasarlı kaza sayısı %19,8, yaralı sayısı %21,4, ölümlü yaralanmalı kaza sayısı %25,1, ölü sayısı %10,2 artış göstermiştir. Çizelge 1.1’de yıllara göre trafik kaza istatistikleri yer almaktadır [2].

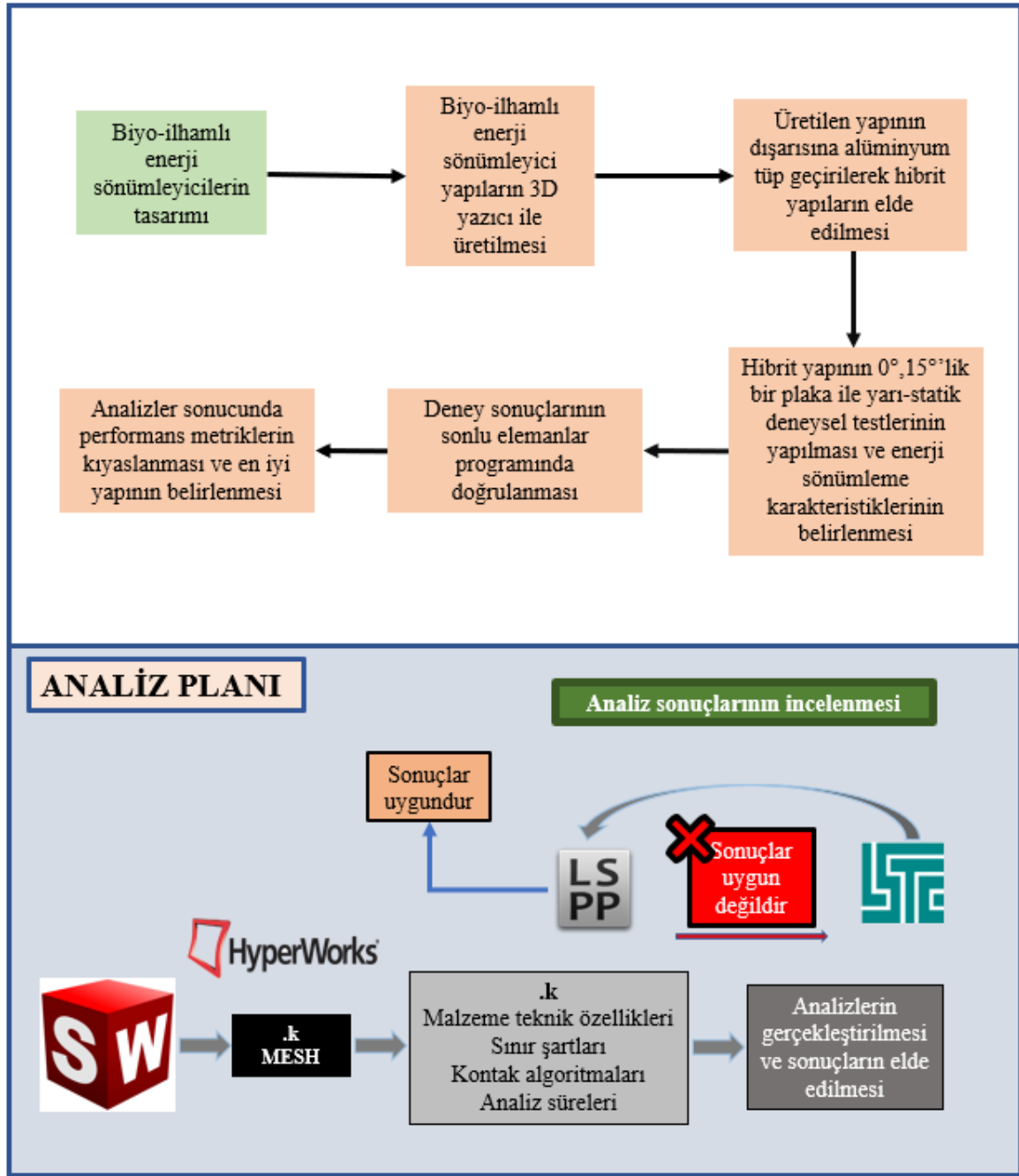
Çizelge 1.1. 2010-2021 Trafik kaza istatistikleri [2]

Yıl	Toplam kaza sayısı	Ölümlü yaralanmalı kaza sayısı	Maddi hasarlı kaza sayısı	Ölü sayısı			Yaralı sayısı
				Toplam	Kaza yerinde	Kaza sonrası	
2010	1 106 201	116 804	989 397	4 045	4 045	-	211 496
2011	1 228 928	131 845	1 097 083	3 835	3 835	-	238 074
2012	1 296 634	153 552	1 143 082	3 750	3 750	-	268 079
2013	1 207 354	161 306	1 046 048	3 685	3 685	-	274 829
2014	1 199 010	168 512	1 030 498	3 524	3 524	-	285 059
2015	1 313 359	183 011	1 130 348	7 530	3 831	3 699	304 421
2016	1 192 491	185 128	997 363	7 300	3 493	3 807	303 812
2017	1 202 716	182 669	1 020 047	7 427	3 534	3 893	300 383
2018	1 229 364	186 532	1 042 832	6 675	3 368	3 307	307 071
2019	1 168 144	174 896	993 248	5 473	2 524	2 949	283 234
2020	983 808	150 275	933 533	4 866	2 197	2 669	226 266
2021	1 186 353	187 963	998 390	5 362	2 421	2 941	274 615

Meydana gelen kazalar can kayıplarına, kalıcı sağlık sorunlarına ya da büyük maddi kayıplara yol açmaktadır. Bu nedenle can ve mal kaybı birçok araştırmacı için önemli konu haline gelmiş ve bu konudaki çalışma alanları genişlemiştir.

Günümüzde otomotiv sektöründe ergonomik ve en önemlisi de güvenliğin en iyi seviyelerde olduğu araçlar tasarlanmaktadır. Özellikle pasif güvenlik sistemi elemanlarından olan enerji sönümleyici yapıların kullanılması, kazanın meydana geldiği durumlarda çarpışmanın etkisiyle oluşan kinetik enerjinin sönümlenerek taşıt kabinine en az seviyede iletilmesini sağlamaktadır. Son zamanlarda geleneksel enerji sönümleyici yapılara kıyasla performanslarından dolayı daha karmaşık yapılar tasarlanmakta ve bu yapılar üzerine çalışmalar artmaktadır. Karmaşık tasarımlara örnek olarak biyo-ilhamlı yapılar gösterilebilir. Biyo-ilhamlı yapılar, canlı doğanın formlarından esinlenilerek tasarlanmaktadır. Bu tasarımlar biyoloji ve teknolojiyi birlikte kullanarak problemlerin  z m ne yardımcı olmayı hedeflemektedir.

Yapılan tez çalışması pasif güvenlik sistemlerinden biri olan hibrit yapıya sahip enerji sönümleyici yapıların performanslarını geliştirmeye yöneliktir. Çalışma iki temel başlık altında yapılmıştır. İlk aşamada biyo-ilhamlı olarak bilinen yapılar 3D (3 boyutlu) yazıcı teknolojisinden yararlanılarak üretilmiş ve sonrasında özgün biyo-ilhamlı yapıların dışına alüminyum profiller yerleştirilerek hibrit enerji sönümleyici profiller elde edilmiştir. Üretilen profillerin enerji sönümleme performanslarının incelenmesi için 500 kN basma kapasitesine sahip pres cihazı ile yarı-statik test koşullarında 0  ve 15  derecelik açılarda deformasyona uğratılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında deney sonuçlarından elde edilen verilerden yararlanılarak sonlu elemanlar analizleri ile doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak özgün yapıya sahip enerji sönümleyici profillerin 0  ve 15 'lik deformasyonlar altındaki performansları incelenmiştir. şekil 1.1'de tez kapsamında yapılacak işlemlerin ayrıntıları akış şeması şeklinde verilmiştir.

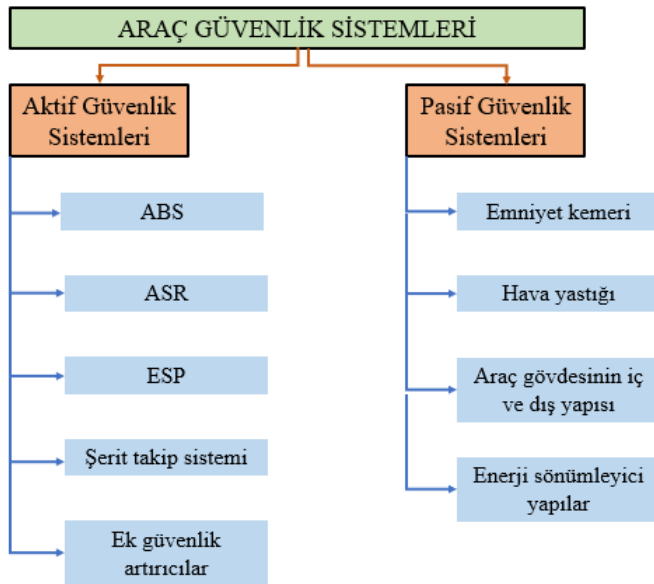


Şekil 1.1. Tez akış şeması

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Güvenlik Sistemleri

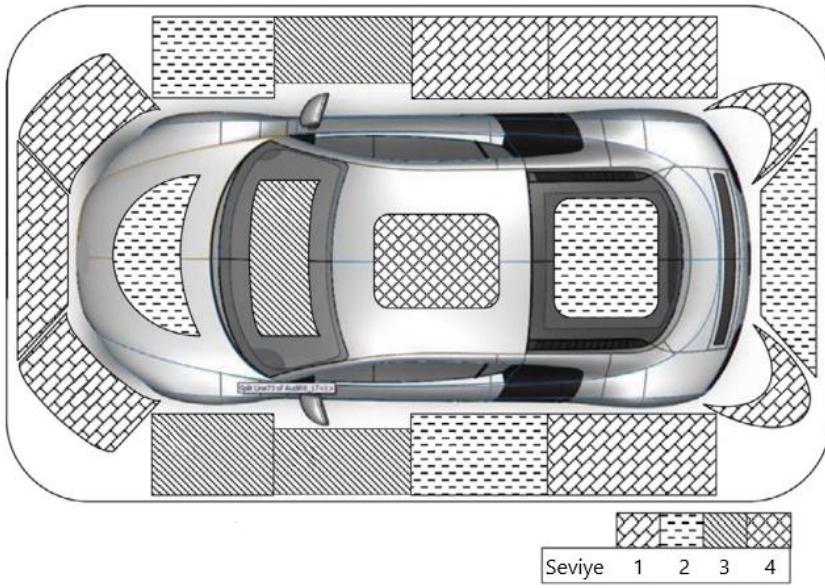
Taşıtlarda en önemli konulardan bir tanesi güvenlidir. Pasif ve aktif olmak üzere iki çeşit güvenlik sistemi mevcuttur. Pasif güvenlik sistemi, kazanın meydana gelmesi durumunda araç içerisindeki en az şekilde zarar görmesini sağlarken aktif güvenlik sistemi kaza oluşma ihtimalinin en aza indirgenmesi ya da hiç oluşmaması için kullanılmaktadır. Pasif güvenlik sistemlerine hava yastığı, emniyet kemeri vb., aktif güvenlik sistemlerine ise ABS (Anti-lock Brake System), şerit takip sistemi vb. örnek verilebilir [3, 4]. Şekil 2.1’de aktif ve pasif güvenlik sistemlerine örnekler verilmiştir.



Şekil 2.1. Araç güvenlik sistemleri

2.2. Çarpışma Test Türleri

Çarpışma testleri önden, yandan, arkadan ve açılı olmak üzere çarpışma testlerini dört ana bölüm olarak gruplandırılır. Her çarpışma türünde araç bölgeleri farklı derecelerde etkilenebilir. Şekil 2.2’de bir aracın çarpışmadan en çok etkilenen bölgeleri seviye olarak belirtilmiştir. Çarpışmadan en çok etkilenen bölge 4, en az etkilenen bölgesi 1 olarak gösterilmiştir [5].



Şekil 2.2. Çarpışma anında aracı etkileyen deformasyon etki seviyeleri [5]

Önden çarpma testleri en çok rastlanılan bir kaza türüdür. Bu kaza türünde diğer kaza türlerinden daha ciddi sonuçlarla karşılaşilmektedir. Önden çarpışma testi Resim 2.1’de görüldüğü üzere 50 km/s hıza sahip aracın sert bir bariyere çarpıtırılma mantığıyla yapılır. Çarpışma sonucunda ortaya çıkan kinetik enerji sönmölenerek yolcu kabininin en az hasar alacak şekilde etkilenmesi amaçlanmaktadır [6].



Resim 2.1. Önden çarpışma testi [6]

Yandan arpma kazaları ciddi yaralanmaların hatta ölümlerin en yüksek olduğu ikinci kaza türüdür. nden arpmalar ile kıyaslandığında kaza anında oluşan kinetik enerjiyi emebilecek yeteri kadar bir ezilme bölgesi bulunmadığından baş ve göğüste ciddi yaralanmalar meydana gelmektedir. Yandan arpma testlerinden biri olan yan darbe testi Resim 2.2’de görülen sabit bir araca hızı 60 km/s olan bir bariyer çarptırılmaktadır [7].



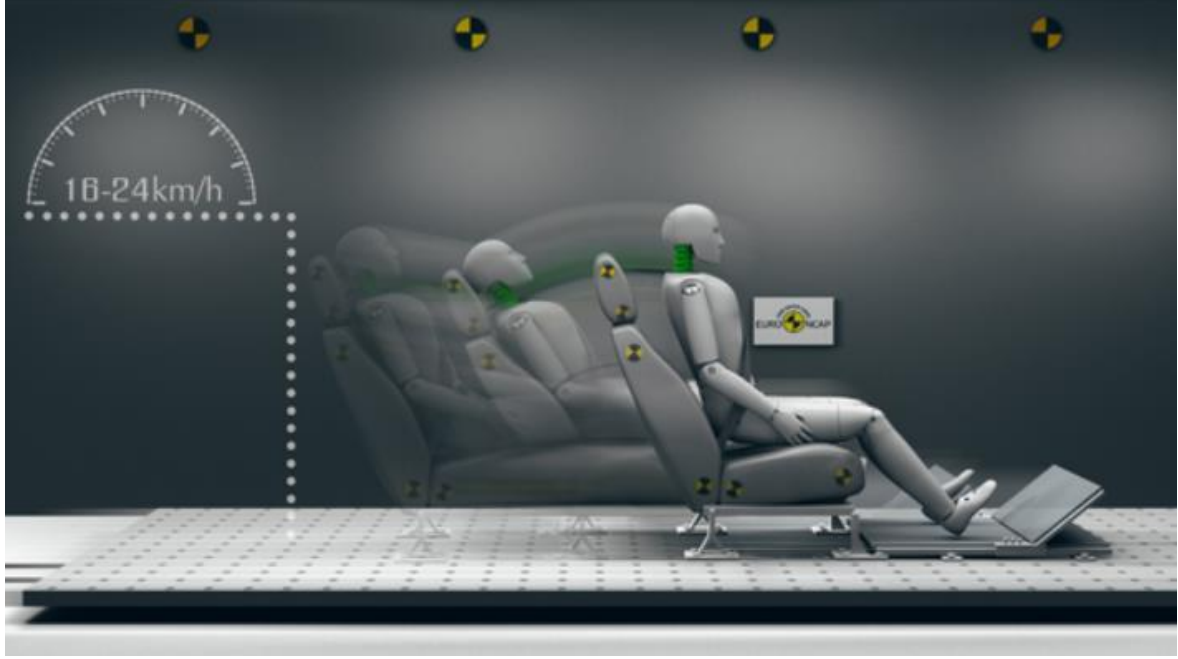
Resim 2.2. Yan darbe testi [7]

Yandan arpma testlerinden bir diğeri de direk çarpma testleridir. Bu test ile gerçek hayatta bir ağacın ya da direğin araca çarpması gibi durumlar incelenmektedir. Testlerde Resim 2.3’te görülen 32 km/s hıza sahip bir araç sabit olan direğe çarptırılmaktadır [8].



Resim 2.3. Direk arpma testi [8]

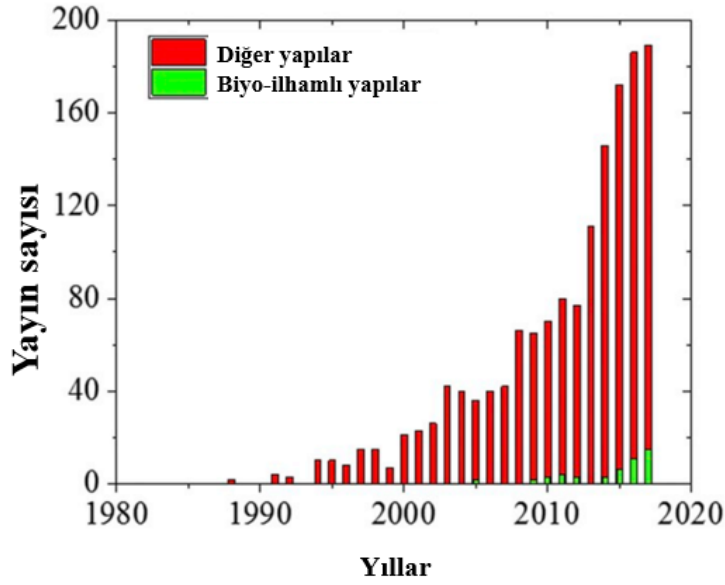
Trafikte seyir halindeyken arkadan çarpmalı kazalar meydana gelmektedir. Otomobilin hız ile kütlesine bağlı olarak ortaya çıkan kinetik enerjinin miktarı ve kazanın şiddeti değişmektedir. Kaza şiddetinin artması yolcuların omurgalarının hasar görmesine ve tedavi edilememesi gibi birçok sağlık sorununa yol açmaktadır. Arkadan çarpma testlerinde Resim 2.4'te görülen kızak sistemi ile bir aracın arkadan çarpma etkisi oluşturulmaktadır [9].



Resim 2.4. Kızak sistemi ile arkadan çarpma testi [9]

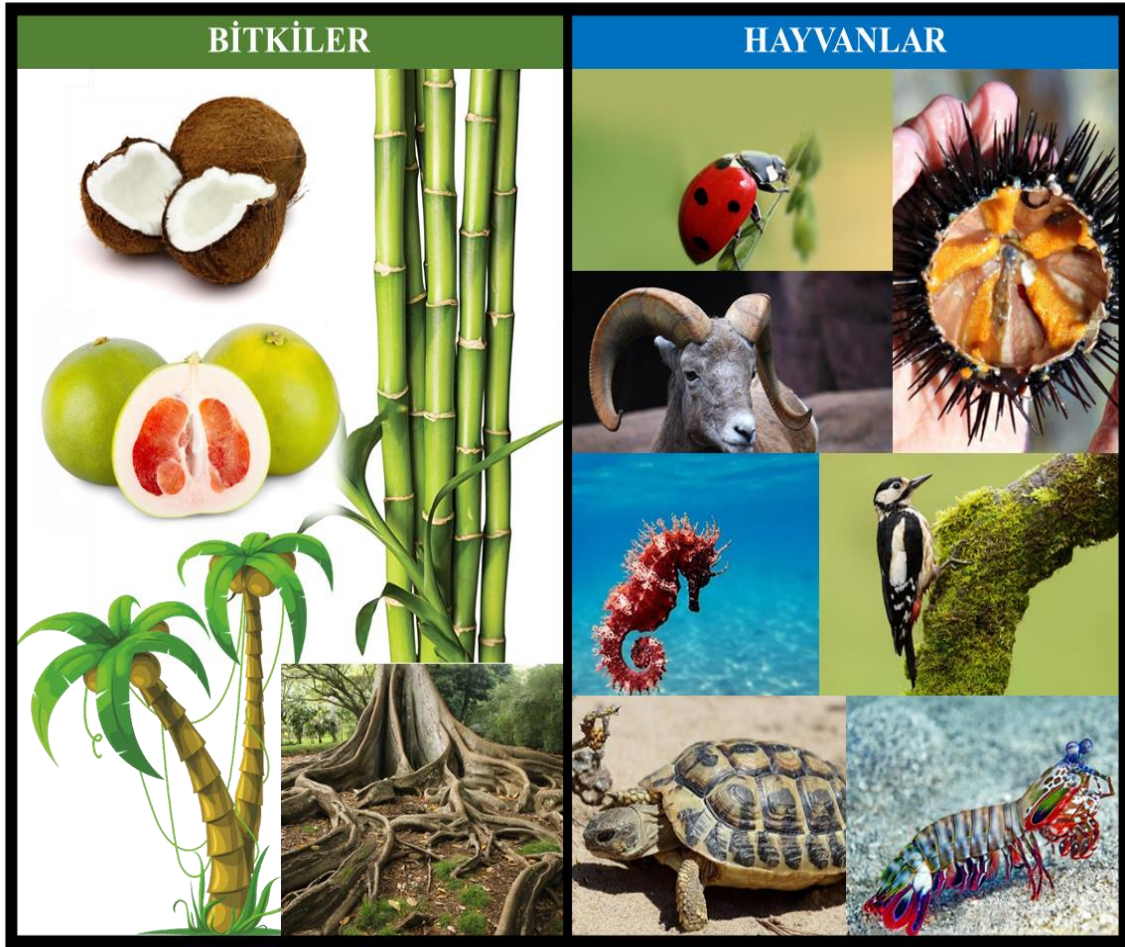
2.3. Biyo-İlhamlı Yapılar

Günümüzde geleneksel yapılara kıyasla performanslarından dolayı daha karmaşık enerji sönümleyicilerine olan ilgi artmıştır. Enerji sönümleme kapasitelerinin daha da iyileştirilmesi için çalışma alanları genişletilmiş ve araştırmacılar zorlu şartlara uyum sağlamış canlıların özelliklerinden ya da fizyolojik yapılarından etkilenecek yeni yapılar ortaya koymaya başlamışlardır. Doğa, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek enerji sönümleme sağlayabilecek tasarımlar için insanlara yeni fikirler sunmakta ve biyomimetik yaklaşım fikri Şekil 2.3'te görüldüğü gibi günden güne artmaktadır [10].



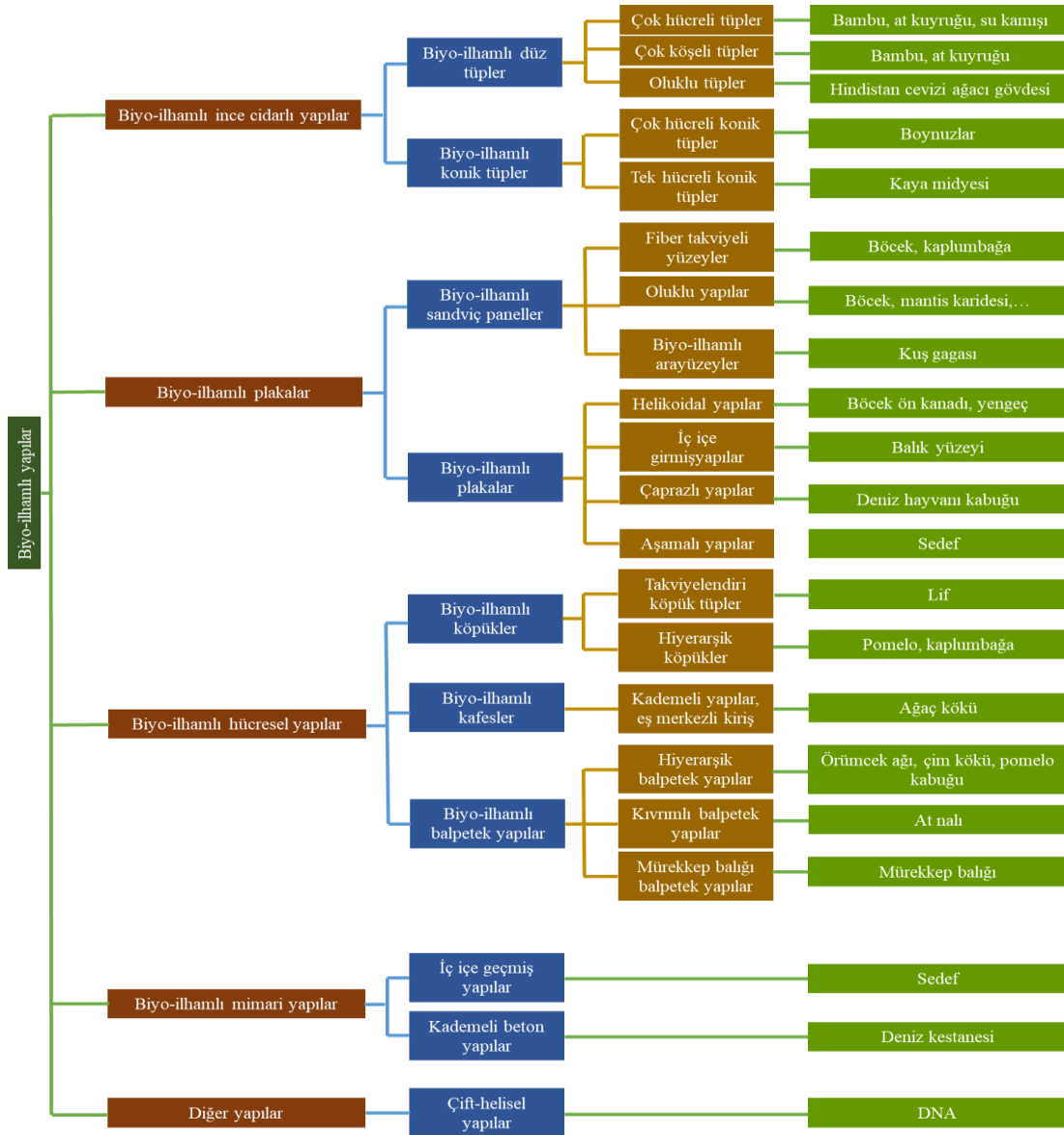
Şekil 2.3. Biyo-ilhamlı yapılar konusundaki yayın sayısı [10]

Canlı yapılardan esinlenerek tasarlanan yapılara biyo-ilhamlı adı verilmektedir. Bu yapılara örnek olarak hindistan cevizi ağacının gövdesi, bir böceğin kanat mikroyapısı, kemik, diş boynuz yapıları verilebilir. Basit yapıya sahip biyo-ilhamlı yapıların üretimi geleneksel üretim yöntemlerinden olan tornada işleme, derin çekme işlemi, lazerle kesme, hassas döküm işlemi gibi farklı yöntemlerle yapılabilir [11-15]. Daha karmaşık yapıdaki modellerin üretimi eklemeli imalat yöntemi olan stereolitografi (SLA) ile yapılmaktadır [16, 17]. Kompozit malzemelere sahip yapılar için yaygın olarak kullanılan laminasyon tekniği kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra manyetik destekli slip döküm, sıcak pres destekli slip döküm, buz kalıplama gibi birçok üretim yöntemi mevcuttur. Biyo-ilhamlı yapılar otomobil, otobüs ve trenlerin ön bölgesinde, mimari yapılarda ve koruyucu zırh yapılarına kadar birçok sektörde kullanılmıştır [11, 18-20]. Şekil 2.4'te esinlenilen birkaç biyolojik yapı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Enerji sönümleyiciler için ilham kaynağı olan biyolojik yapılar [10]

Biyo-ilhamlı yapıları çalışma konuları üzerine birçok dala ayırmak mümkündür. Şekil 2.5’te görüldüğü gibi çalışma konuları ince duvarlı yapılar, plakalar, hücresel yapılar, mimari yapılar ve diğer yapılar olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 2.5. Enerji sönümleyicilerde kullanılan biyo-ilhamlı yapıların sınıflandırılması [10]

2.4. Eklemeli İmalat

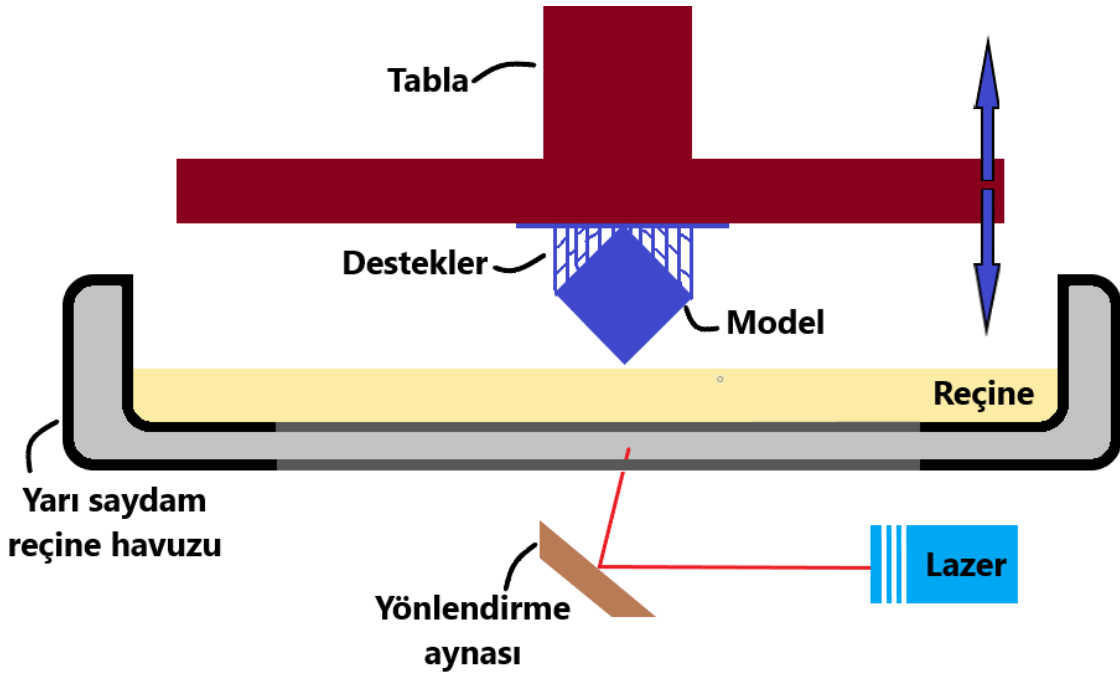
Eklemeli imalat yöntemi günümüzde birçok teknoloji alanında kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemi, üç boyutlu yapıların geometrik ölçülerine göre üst üste katman oluşturma prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde parçalar, CAD programlarında çizim, bilgisayarlı tomografi ve tersine mühendislik gibi farklı yöntemlerle elde edilen üç boyutlu modelden üretilirler. Model, dilimleme olarak adlandırılan katlanmalara ayrılır. Üretim cihazı parça tamamen ortaya çıkıncaya kadar bu ardışık katmanları oluşturur ve her bir katman için geometrik veri kullanılır [21]. Bu yöntemde Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere birçok yöntem ve malzeme mevcuttur.

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri [22]

	TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM (Fused Deposition Modeling)	Termoplastik	Termal enerji	•Düşük yazıcı maliyeti •Çoklu malzeme ile baskı •Yüksek mukavemet •Düşük parça çözünürlüğü •Zayıf yüzey iş-sonu •Düşük baskı hızı
		Polimerize edilebilir	Fotopolimerizasyon	SLA (Stereolithography)	Fotopolimer Seramik	UV ışını	•Yüksek baskı hızı •Yüksek parça çözünürlüğü •Yüksek detay •Malzeme maliyeti yüksek
				DLP (Digital Light Processing)		Projeksiyon	•Yüksek baskı hızı •Çözünürlük, projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
			Malzeme püskürtme	PJ (Polyjet)	Fotopolimer Wax	UV ışını	•Çoklu malzeme ile baskı •İyi yüzey iş-sonu •Yüksek doğruluk •Yüksek detay
	KATI	Yapışık objeler	Sac laminasyon	LOM (Laminated Object Manufacturing)	Kağıt Plastik film Metalik sac Seramik bant	Lazer ışını	•İyi yüzey iş-sonu •Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük •Büyük boyutlu malzeme basabilme •Dikey yönde zayıf mukavemet
	TOZ	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS (Selective Laser Sintering)	Poliamid Polimer	Yüksek-Güçlü Lazer ışını	•Yüksek doğruluk •Yüksek detay •Tam dolu parça üretimi •Yüksek mukavemet •Destek yapıları gerekmez
				DMSL (Direct Metal Laser Sintering)	Metal tozu, Seramik tozu		
				SLM (Selective Laser Melting)			
				EBM (Electron Beam Melting)			
		Direk enerji depolama	LENS (Laser Engineered Net Shape) EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing)	Erimiş metal tozu	Lazer ışını	•Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme •Son-işlem gerekir	
							Yapıştırma

2.4.1. Stereolitografi (SLA) teknolojisi

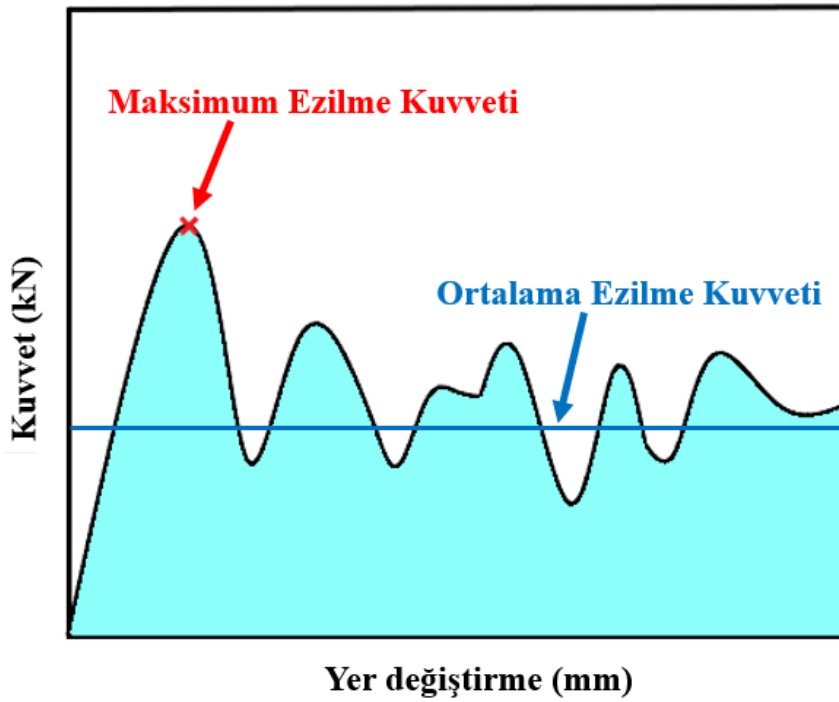
Tez çalışması kapsamında biyo-ilhamlı yapılar Stereolitografi (SLA) Teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Bu yöntem ile oda sıcaklığındaki bir sıvı fotopolimer reçine ile modellenmiş yapıların üretimi yapılır. Üretimin ilk aşamasında modellenmiş yapı bilgisayar ortamında bir yazılım ile katmanlarına ayrılır. Devamında ultraviyole lazer ile her bir katmanın katılaştırılması sağlanır. Katman oluşturma işlemi yeni katmanın bir önceki katmanın üzerine oluşturulması prensibine dayanır. Bir katmanın katılaştırılmasından sonra tabla katman kalınlığı kadar aşağı iner. Bu katman üzerine tekrar sıvı reçine temas eder ve tekrar katılaştırma işlemi yapılarak üretim süreci devam eder. Katman oluşturma işlemi bittikten sonra model tabla üzerinden sökülür ve desteklerinden temizlenir. Mühendislik, dental, biyomedikal gibi birçok alana hizmet eden SLA teknolojisi ile son derece karmaşık ve detaylı parçaları yüksek doğrulukta elde etmek mümkündür [21, 23-25]. Şekil 2.6’da SLA sistem modeli verilmiştir.



Şekil 2.6. SLA sistem modeli

2.5. Performans Metrikleri

Hibrit enerji sönümleyici yapıların bir kuvvet karşısında nasıl davrandığını belirleyebilmek için literatürde birçok metrik mevcuttur [26, 27]. Bu çalışmada kullanılan performans metrikleri aşağıda açıklanmaktadır. Şekil 2.7’de performans metriklerinin grafik üzerinde gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.7. Performans metrikleri

Toplam Sönümlenen Enerji: Eksenel yükleme etkisi altındaki yapıların enerji sönümleme kapasitelerini gösterir. Eş. 2.1’de kuvvet-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alanı verir ve bu da toplam sönümlenen enerji miktarına eşittir. Burada F eksenel yöndeki ezilme kuvveti, δ ise enerji sönümleyici yapının deformasyon mesafesidir.

$$E_T = \int_0^{\delta_{maks}} F d\delta \quad (2.1)$$

Maksimum Ezilme Kuvveti (F_{maks}): Maksimum ezilme kuvveti, deformasyon esnasında ortaya çıkan en yüksek kuvvet değeridir. Bu kuvvetin büyük olması araca aktarılabak deformasyon enerjisinin fazla olması anlamına gelir.

Özgöl Enerji Sönümlleme (E_m): Özgöl enerji sönümlleme kapasitesi, birim kütle başına sönümlenen enerji olarak tanımlanır. Bu nedenle iyi bir enerji sönümleyici için kütle çok önemli bir parametredir. Eş. 2.2’de gösterildiği gibi formülize edilmiştir. Burada E_T toplam sönümlenen enerjiyi, m_T ise toplam kütleyi ifade etmektedir.

$$E_m = \frac{E_T}{m_T} \quad (2.2)$$

Ortalama Ezilme Kuvveti (F_{ort}): Ortalama ezilme kuvveti Eş. 2.3’te görüldüğü gibi toplam sönümlenen enerjinin toplam yer değiştirmeye (δ_{maks}) oranıdır.

$$F_{ort} = \frac{E_T}{\delta_{maks}} \quad (2.3)$$

Ezilme Kuvveti Verimi (η): Ezilme yükü verimliliği, Eş. 2.4’te verildiği gibi ortalama ezilme kuvvetinin maksimum ezilme kuvvetine oranıdır. Bir enerji sönümleyici için bu değerin yüksek olması beklenir. Yüksek bir ezilme kuvveti verimi, bize bu enerji sönümleyiciden iyi bir verim alındığını ifade eder.

$$\eta = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \quad (2.4)$$

3. LİTERATÜR ÖZETLERİ

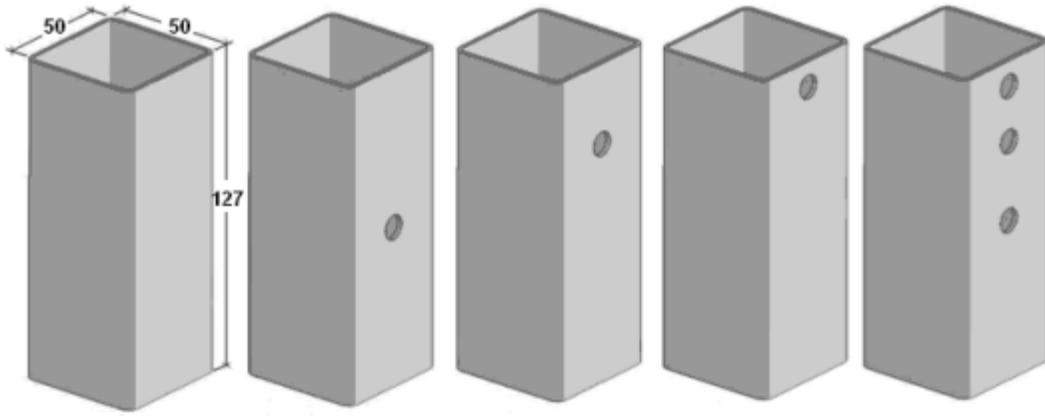
3.1. Geleneksel Enerji Sönümleyici Yapılar

Pasif güvenlik sistemi elemanlarından biri olan enerji sönümleyici yapılar üzerine geçmişten günümüze çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda silindirik, kare ve konik gibi farklı geometrik yapılardaki enerji sönümleyici profiller incelenmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Çalışmalar sonunda plastik deformasyon davranışları ve enerji sönümleme kapasiteleri bulunarak en iyi enerji sönümleyici yapılar belirlenmiştir [28, 29].

Çalışmaların bir bölümünü enerji sönümleyici yapının boyutları ve et kalınlıkları oluşturmaktadır. Bir enerji sönümleyicinin yapısal parametrelerinin değişmesi performans özelliklerini etkilemektedir. En iyi performans özelliklerine sahip enerji sönümleyici yapıların belirlenmesi için de optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır [29-31].

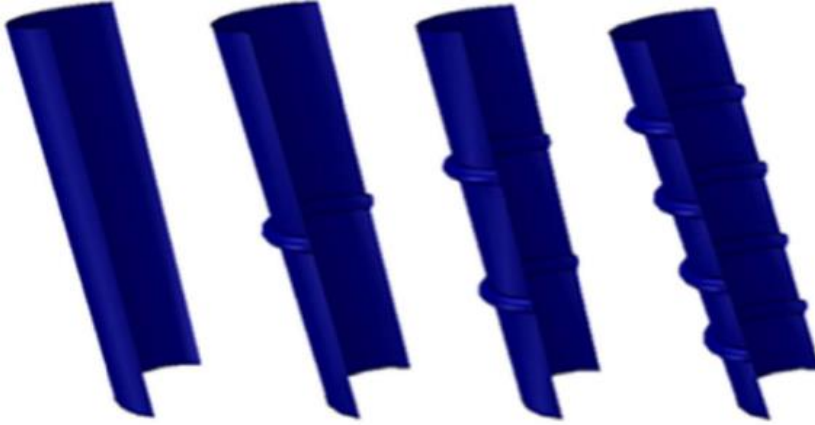
Enerji sönümleyici yapıların tasarımı üzerine yapılan araştırma-geliştirme çalışmalarının yanı sıra günümüzde çoğu araç üreticisi hafiflikle beraber piyasaya güvenli araç sunmak istedikleri için yeni çalışmaların konusu değişebilmektedir. Bu yüzden farklı malzemeler, çalışma konuları arasında önemli yere sahiptir [32-34].

Mamalis A.G. ve arkadaşları tarafından deformasyon durumunda katlanmayı başlatan dairesel deliklere sahip enerji sönümleyici yapıların yük altındaki performansları deneysel, teorik ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmalarında S355 çelik malzemesine sahip Şekil 3.1’de verilen 50 mm×50 mm×127 mm boyutlarında dikdörtgen enerji sönümleyiciler üzerine farklı sayı, konum ve boyutlarda delikler açarak enerji sönümleyici yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak deneysel testlerde, üretilmiş yapılar 20 mm/dk hıza sahip bir plaka ile eksenel yük altında deformasyona uğratılmış ve enerji sönümleme performansları belirlenmiştir. Deneysel çalışmaların devamında bilgisayar yardımıyla elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrulamalarını gerçekleştirmişlerdir. Deneysel test ve nümerik analizler sonucunda bütün numunelerin düzgün katlanma modu sergilediği, delik çapının delik konumuna göre ezilme tepkisini daha az etkilediği, deliğin orta yükseklikte olduğu numunelerin daha fazla enerji sönümlendiği bulunmuştur [35].

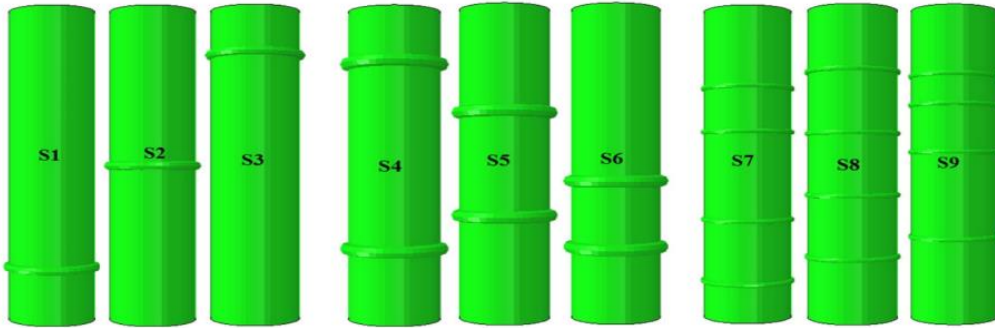


Şekil 3.1. Farklı tasarımlara sahip enerji sönümleyici yapılar [35]

Isaac C.W. ve arkadaşı, Şekil 3.2’de verilen dairesel profil üzerine halka ekleyerek A36 çelik malzemesine sahip dört yeni enerji sönümleyici yapı tasarlamıştır. Tasarlanan yapıların çarpışma performanslarını incelemek için Abaqus sonlu elamanlar analiz programı kullanılmıştır. Analizlerde değişken parametreler kullanılarak enerji sönümleyici yapı, 10 m/s hız ve 600 kg kütleyle sahip bir plaka ile deformasyona tabii tutulmuştur. İlk parametre olarak enerji sönümleyici yapının kalınlığı 0,8 mm, 1,2 mm ve 1,6 mm olacak şekilde seçilerek halkasız ve 2 halkalı yapı kıyaslanmıştır. Her iki yapı için 0,8 mm kalınlıkta maksimum deformasyon kuvveti en az değerdedir. İkinci parametre ise halka sayısıdır ve 0, 1, 2 ve 4 olarak seçilmiştir. Analizler sonucunda halka sayısının artması maksimum deformasyon kuvvetini düşürdüğü bulunmuştur. Üçüncü parametre için halka kalınlığıdır. Burada halka kalınlığı, enerji sönümleyici yapının et kalınlığı ve halka sayısı ile beraber incelenmiştir. Sonuçlarda enerji sönümleyici yapının kalınlığı 0,8 mm iken 1 halkalı yapı için enerji sönümleme miktarı halka kalınlığındaki artışla azalmıştır. Enerji sönümleyici yapının kalınlığı 1 mm iken 4 halkalı için enerji sönümleme miktarı sürekli artış göstermiştir. Son parametre ise halkalar arası mesafedir. Burada aşağıdaki Şekil 3.3.’te görülen S4 yapısı en yüksek enerji sönümlemeye ancak düşük bir ezilme yükü verimliliği değerine sahiptir. S2 ve S7 yapılarına bakıldığında sırasıyla %66,3 ve %66,2’lik ezilme yükü verimliliği ile en iyi değerlere sahiptir. Genel sonuçlar incelendiğinde hem eksenel hem de eğik deformasyon koşullarında enerji sönümleme miktarları için halkalı enerji sönümleyici yapılar, halkasız yapılara göre daha iyi performans sağladığı görülmüştür [36].



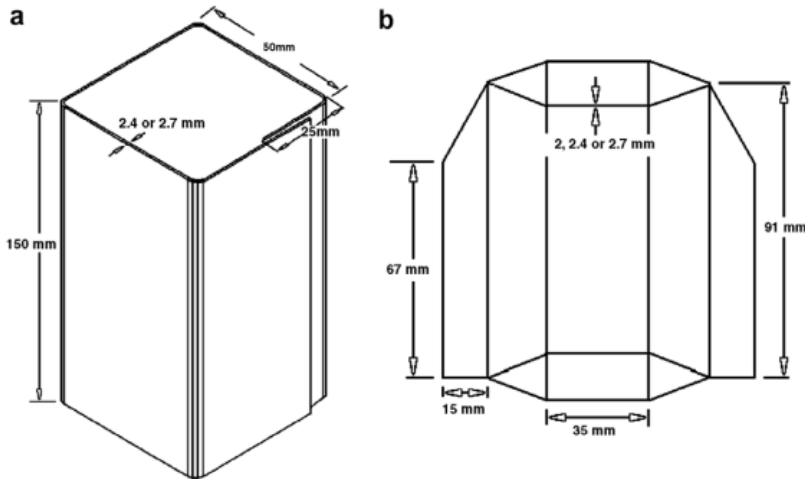
Şekil 3.2. Halkalı ve halkasız enerji sönümleyici yapılar [36]



Şekil 3.3. Halka mesafesine göre tasarlanmış enerji sönümleyici yapılar [36]

Zarei H. Ve arkadaşları çalışmalarında aşağıdaki Şekil 3.4'te görülen ölçülerde kompozit malzemeli enerji sönümleyici yapılar tasarlayarak çarpışma performanslarını deneysel testler ve nümerik analizler ile incelemişlerdir. Deneysel çalışma aşamasında her iki yapı için et kalınlığı 2,4 mm ve 2,7 mm alınmıştır. Kare yapı için 10,2 m/s- 10,4 m/s, altıgen yapı için de hız 7,3 m/s- 8,8 m/s hızları seçilmiştir. Deneysel sonuçlarda özgül enerji sönümleme miktarı, kare yapı için 10,4 m/s hız 2,7 mm et kalınlığında, altıgen yapı için de 8,9 m/s hız 2,4 mm et kalınlığında en fazla değerde çıkmıştır. Nümerik analiz aşamasında Ls-Dyna sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak modellenmiş, malzeme özellikleri, sınır şartları ve kontak algoritmaları tanımlanmıştır. Çalışmanın devamını ise kare enerji sönümleyici yapı için bir optimizasyon çalışması oluşturmaktadır. Optimizasyon değişkenleri arasında et kalınlığı, kenar uzunluğu ve yükseklik yer almaktadır. Et kalınlığı 1 mm- 4 mm, kenar uzunluğu 70 mm- 120 mm ve yükseklik 100 mm-350 mm arasında olacak şekilde birçok yapı modellenmiştir. Çalışmanın sonucunda optimum yapının et kalınlığı 3 mm, kenar uzunluğu 70 mm ve yükseklik 210 mm olarak bulunmuştur. Son olarak daha önceki yapmış oldukları çalışmalarda bulunan 70 mm×210 mm ölçülerindeki optimum alüminyum enerji

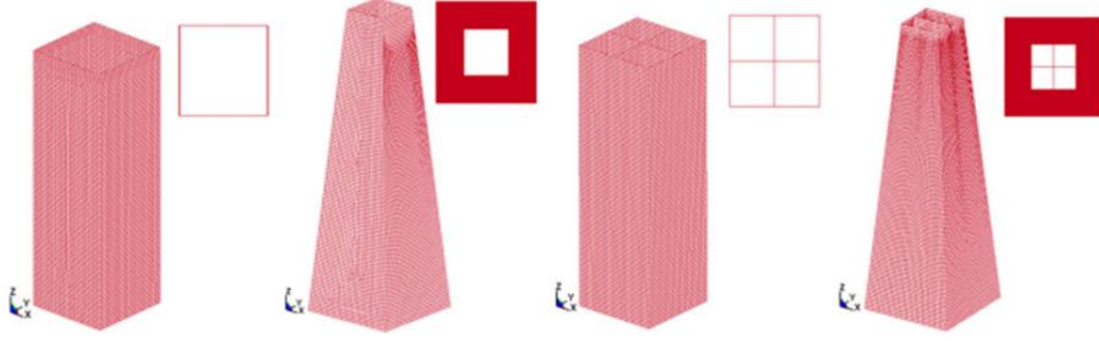
sönümleyici yapıyı bu çalışmada elde edilen 70 mm×210 mm ölçülerindeki optimum kompozit enerji sönümleyici yapı ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda optimum kompozit enerji sönümleyici yapı, alüminyum yapıya göre %26 daha az ağırlığa ve %17 daha fazla enerji sönümleye sahip olduğu bulunmuştur [37].



Şekil 3.4. Kare ve altıgen enerji sönümleyici yapılar [37]

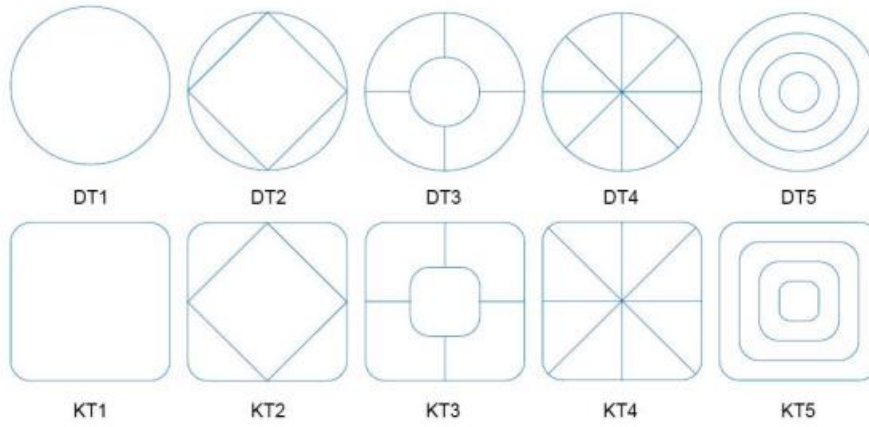
Qi C. ve arkadaşları AA6060-T4 malzemesine sahip Şekil 3.5'te görülen çok hücreli ve tek hücreli enerji sönümleyici yapılar üzerine çalışmışlardır. Konik ve kare yapılar yükseklikleri 250 mm, kenar uzunlukları 80 mm ve et kalınlığı 2 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan çok hücreli enerji sönümleyici yapıların çarpışma performansını incelemek için Ls-Dyna sonlu elamanlar analiz programı yardımıyla 10 m/s hıza sahip açılı bir plaka ile deformasyona uğratılmıştır. Analiz sonuçları, literatürden alınan kare enerji sönümleyici yapıların deneysel test sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulama işlemi yapılmıştır. Çalışmanın devamında çok hücreli konik enerji sönümleyici yapıların et kalınlığı ve koniklik açısının çarpışma performanslarına etkisi incelenmiştir. İlk olarak enerji sönümleyici yapının et kalınlığı 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm ve 2,5 mm olarak 0°-30° arasında farklı açılara sahip bir plaka ile deformasyona uğratılmıştır. Sonuçlara bakıldığında et kalınlığının azalması maksimum ezilme kuvvetinin azalmasına neden olmuştur. Deformasyon açısının artmasıyla da maksimum ezilme kuvvetleri her et kalınlığı için azalmaktadır. Daha küçük et kalınlığı, küçük deformasyon açılarında çok hücreli konik yapıların özgül enerji sönümleme kapasitesini azaltmıştır. Et kalınlığı 2,5 mm'den 1,0 mm'ye düşürüldüğünde özgül enerji sönümleme kapasitesi ise 25,603 kJ/kg'dan 11,834 kJ/kg'a düşmektedir. İkinci olarak da enerji sönümleyici yapının koniklik açısını 1°, 3°, 5° ve 7° olarak 0°-30° arasında farklı

açılara sahip plaka ile deformasyona uğratılmıştır. Sonuçlara bakıldığında her koniklik açısı için deformasyon açısının artmasıyla özgül enerji sönümleme miktarı ve tepe ezme kuvveti azalmaktadır. Özgül enerji sönümleme miktarının fazla, tepe ezme kuvvetinin ise az olması için daha büyük koniklik açılarının tercih edilmesi gerektiği bulunmuştur [38].

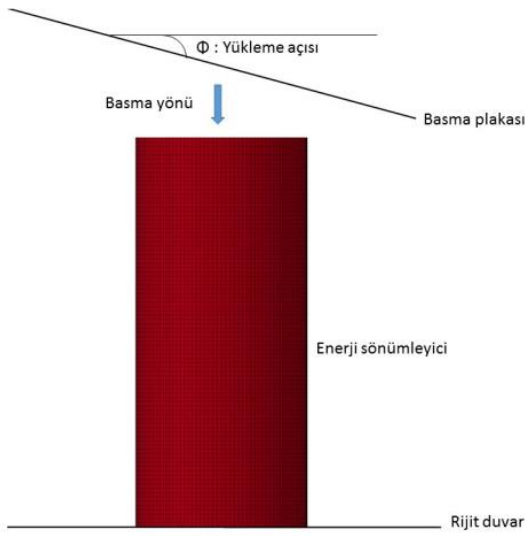


Şekil 3.5. Çok hücreli enerji sönümleyici yapılar [38]

Altın M. çalışmasında kare ve dairesel kesitli farklı geometrilerdeki on adet enerji sönümleyici yapının çarpışma performanslarını incelemiştir. İlk olarak Al 6063 malzemesine sahip dairesel profilin çapı 80mm, kare profilin kenar uzunlukları 80 mm, yükseklikler 180 mm olacak şekilde yeni enerji sönümleyici yapılar tasarlanmıştır. Şekil 3.6'da tasarlanmış enerji sönümleyici yapılar görülmektedir. İkinci olarak nümerik analizlerin doğrulanması için 100 mm uzunluğundaki dairesel profillerin deneysel testleri yapılmıştır. Deneysel testlerde dairesel profillere 2 mm/dk hız ve 0°, 15° ve 30° açılarda Şekil 3.7'de görülen bir plaka ile deformasyona uğratılmıştır. Deformasyon yer değiştirmesi 120 mm olduğunda işlem tamamlanmıştır. Son olarak deneysel testler verileri nümerik analizler ile karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki farkın çok az olduğu bulunmuştur. Çalışma sonucunda 8 hücreye ayrılmış dairesel profilin (DT4) ezilme kuvveti %85, özgül enerji sönümleme kapasitesi 33,03 kJ/kg bulunarak en iyi sonucu verdiği ve deformasyon açısının artması ile toplam sönümleme miktarının ters orantılı olduğu bulunmuştur [39].

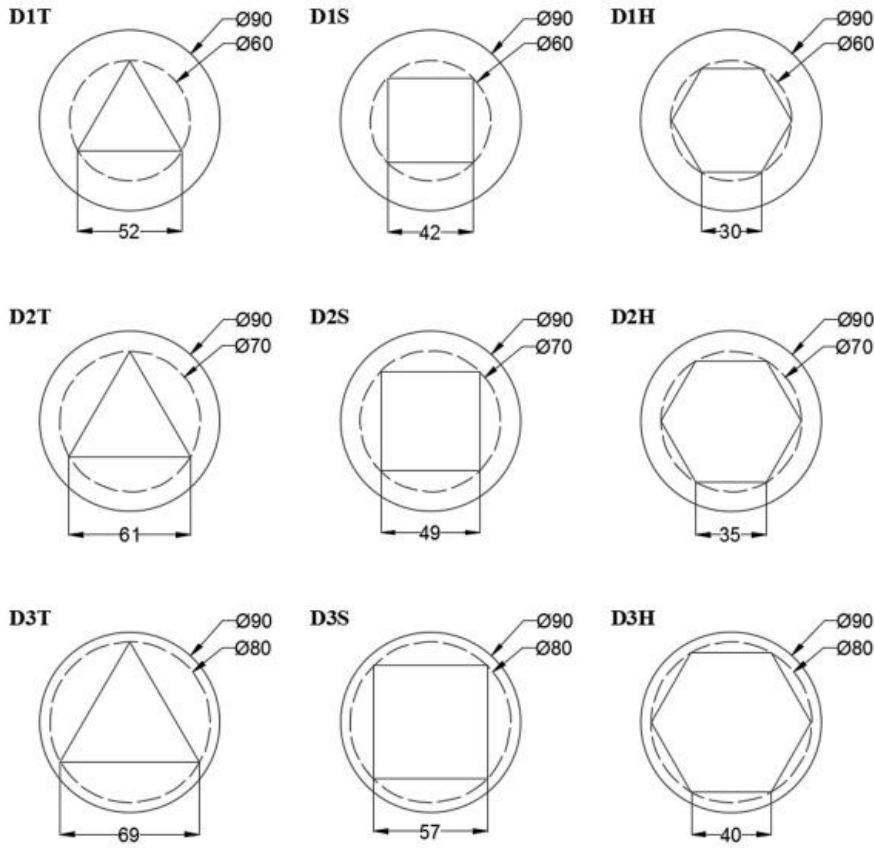


Şekil 3.6. Tasarlanmış enerji sönümleyici yapıların üstten görünümü [39]



Şekil 3.7. Açılı yükleme durumunda olan bir enerji sönümleyici yapı [39]

Vinayagar K. ve arkadaşları çalışmalarında geleneksel dairesel bir enerji sönümleyici içine aşağıdaki Şekil 3.8’de görüldüğü gibi üçgen, kare ve altıgen profiller yerleştirerek yeni tasarımlar oluşturmuşlardır. Çelik sacdan üretilen enerji sönümleyici yapılarda dış silindir boyutu 90 mm olacak şekilde sabit tutulup, iç profilin yerleştirildiği çap ise 60 mm, 70 mm ve 80 mm olacak şekilde değiştirilerek 9 adet farklı yapının deneysel testleri gerçekleştirilmiş ve çarpışma performansları incelenmiştir. Deneysel testlerde enerji sönümleyici yapılar 10 mm/dk hıza sahip bir plaka ile deforme edilmiştir. Çalışmalar sonucunda iç profili altıgen olan yapılar, diğer yapılara göre daha fazla enerji sönümleme kabiliyetine sahip olduğu ve bütün yapılarda iç profilin yerleştirildiği çapın artmasıyla özgül enerji sönümleme miktarının arttığı bulunmuştur [40].



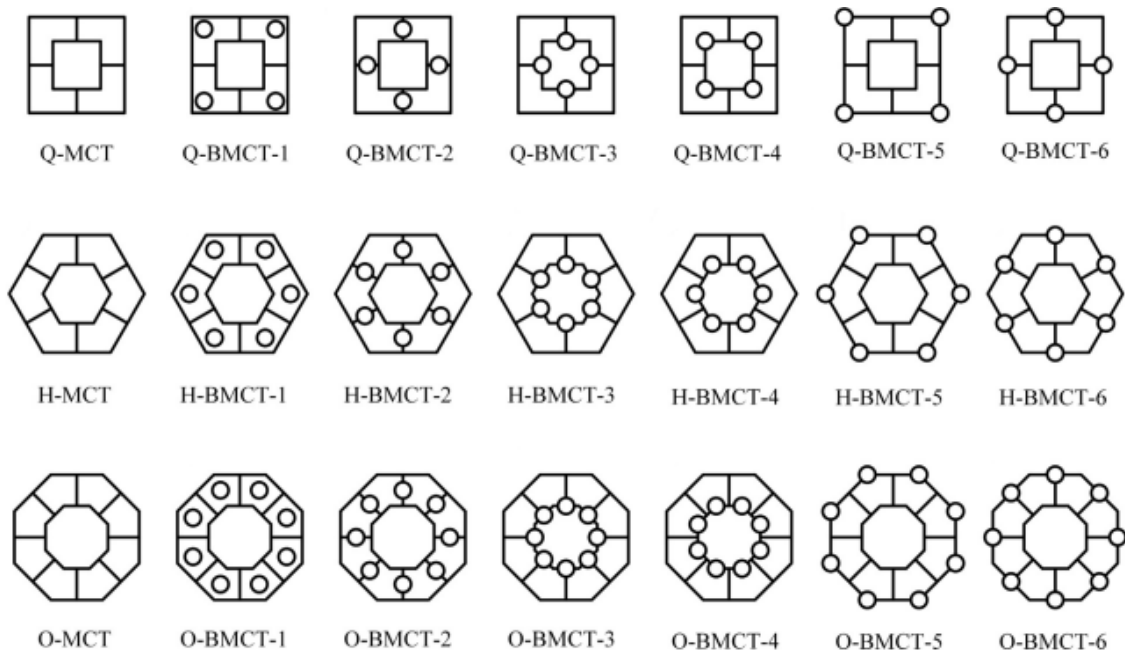
Şekil 3.8. Tasarlanan enerji sönümleyici yapıların üstten görünümü [40]

3.2. Biyo-ilhamlı Enerji Sönümleyici Yapılar

Araştırmacılar son zamanlarda farklı mühendislik çalışmaları için yıllar boyunca evrim geçirerek çeşitli zor şartlara karşı koruyan biyolojik yapılar üzerine çalışmaya başlamışlardır. Doğadaki bitki ve hayvanlar, araştırmacılar için yeni enerji sönümleyici tasarımların ilham kaynağı olmuştur. Günümüzde çarpışma performanslarının geliştirilmesini sağlayan yeni biyo-ilhamlı tasarımlar geleneksel enerji sönümleyicilere alternatif bir yapı olmaktadır [41-43].

Gergedan böceği kanatlarının mikro yapısından ilham alan Zhang L. ve arkadaşları, AA6060-T4 malzemesini kullanarak dörtgen, altıgen ve sekizgen enerji sönümleyici yapılar geliştirmişlerdir. Geliştirilen yapıları Ls-Dyna sonlu elemanlar analiz programı ile geleneksel dörtgen, altıgen ve sekizgen türdeki enerji sönümleyiciler ile karşılaştırmışlardır. Analizlerde, geliştirilen yeni yapının alt yüzeyi sabit tutulmuş ve 10 m/s hızla bir levha tarafından deforme edilmiştir.

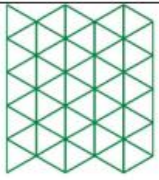
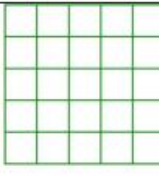
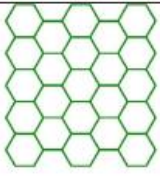
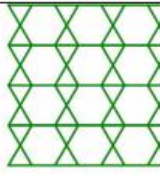
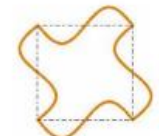
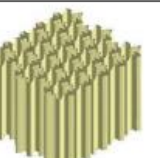
Enerji sönümleyici yapı 168 mm deformasyon boyutuna geldiğinde analiz tamamlanmıştır. Sonuçlara bakıldığında en iyi performans değerlerini O-BMCT-6 sekizgen yapısı vermiştir. Çalışmanın devamı, O-BMCT-6'nın optimizasyonu olarak devam etmiştir. Bu optimizasyon çalışmasında duvar kalınlığı ve dairesel borunun çapı değişken parametre olarak seçilmiştir. 8 mm-18 mm boru çapları ve 1,2 mm-2,8 mm et kalınlıklarında 30 farklı tasarım oluşturmuşlardır. Optimizasyon sonuçlarına göre, en iyi enerji sönümleyici yapının et kalınlığı 2,04 mm ve boru çapı 10,24 mm'dir. Bütün çalışmalar sonucunda geliştirilmiş dörtgen, altıgen ve sekizgen kesitli biyo-ilhamlı çok hücreli tüpler geleneksel yapılara alternatif olabileceğini söylemişlerdir [44]. Şekil 3.9'da tasarlanan enerji sönümleyici yapılar gösterilmektedir.



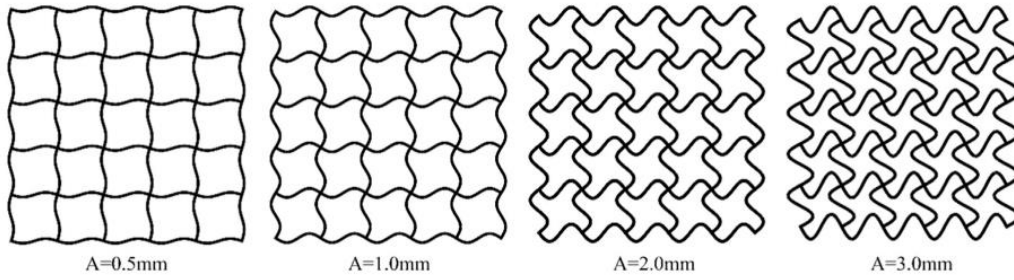
Şekil 3.9. Biyo-ilhamlı enerji sönümleyici yapılar [44]

Yang X. ve arkadaşları, üçgen, kare, kagome ve altıgen yapıları, at nalı şeklindeki mezo yapılardan oluşan biyo-ilhamlı alüminyum petek yapılarla karşılaştırmışlardır. Aşağıdaki Şekil 3.10'da yeni enerji sönümleyici yapılar görülmektedir. Çalışmalarında yeni yapıların çarpışma performanslarını incelemek için nümerik analizler gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde AA3003 H18 alüminyum alaşımlı enerji sönümleyici yapı 1 m/s hıza sahip bir plaka ile deforme edilmiştir. Nümerik analiz sonuçlarına bakıldığında at nalı şeklindeki yapıların başlangıçtaki tepe kuvveti, ezme kuvveti verimliliği ve özgül enerji sönümleme miktarı geleneksel enerji sönümleyicilere göre daha iyi çıkmıştır. Özgül enerji sönümleme miktarı üçgen petek yapısına göre %37, kare petek yapısına göre %38,4, altıgen petek

yapısına göre %6,5 ve kagome petek yapısına göre ise %12,4 daha yüksek elde edilmiştir. Analizlerin doğrulanması için 3×3 ve 5×5 hücreden oluşan geleneksel petek yapıların deneysel ve nümerik analizleri karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyum halinde olduğu bulunmuştur. Çalışmaların devamında at nalı petek yapısının dalga genliği üzerine nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kare at nalı petek yapısının dalga genliği Şekil 3.11’ de görüldüğü gibi 0,5 mm, 1 mm, 2 mm ve 3 mm değerlerinde tasarlanmıştır. Analiz sonuçlarında dalga genliği için ezme kuvveti verimliliği sırasıyla %33,60, %39, %36,1 ve %33 olduğu ve özgül enerji sönmleme miktarı en fazla dalga genliği 1 mm iken bulunmuştur. Son olarak hücrelerin et kalınlığı için yapılan çalışmada 0,05 mm, 0,075 mm, 0,1 mm ve 0,125 mm kalınlıkları kullanılmış ve kalınlığın artmasıyla enerji sönmleme miktarının arttığı gözlemlenmiştir [45].

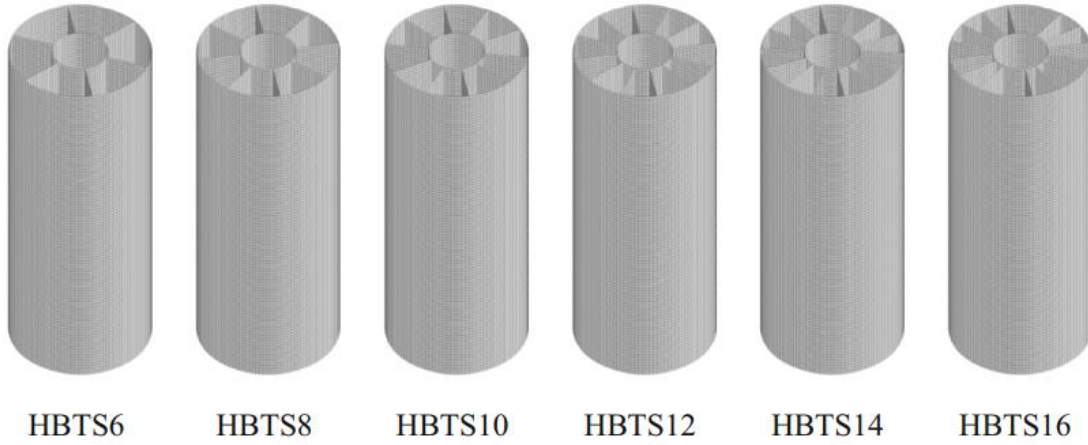
	Üçgen	Kare	Altıgen	Kagome
Petek yapılar				
At nalı mezo yapılar				
Birim hücreler				
3D model				

Şekil 3.10. Geleneksel petek yapılardan esinlenilmiş enerji sönmleyici yapılar [45]



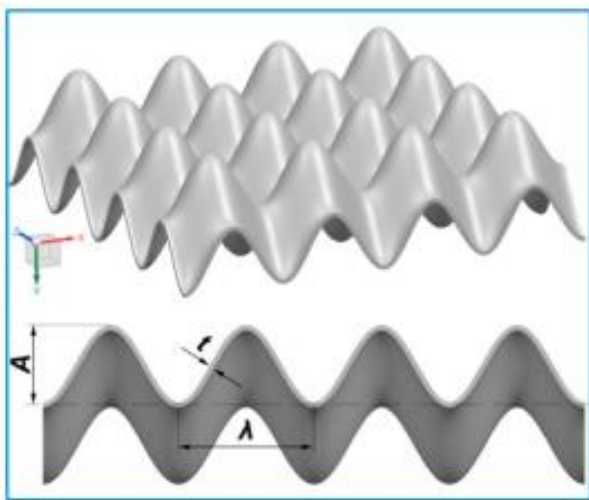
Şekil 3.11. Farklı dalga genliklerine sahip enerji sönümleyici yapılar [45]

Xiao Y. ve arkadaşları, atkuyruğu bitkilerinin çok hücreli yapısından ilham alarak 80 mm çapa ve 200 mm uzunluğuna sahip ALMg0.5F22 alüminyum alaşımını Şekil 3.12’de görülen hücresel yapıları (HBTS) tasarlamışlardır. Et kalınlığını, hücre sayısını ve iç çapı değişken kabul ederek tasarlanmış yeni yapıları eksenel yükler altındaki enerji performansını incelemek için sayısal bir analizlere tabi tutmuşlardır. Modelleme aşamasında 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 mm olacak şekilde 5 farklı değer ile ideal ağ boyutunu bulmak için analizler yapmış ve ideal ağ boyutu 20 mm seçilmiştir. Literatürden dairesel 4 hücreli yapının deneysel verileriyle analiz verilerini karşılaştırarak doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar birbirine çok yakın çıkmış ve optimizasyon aşamasına geçilmiştir. Optimizasyon aşamasında 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 hücreli HBTS’lerin et kalınlığını 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm ve 3 mm, iç çapın ise 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm ve 60 mm olacak şekilde birbirinden farklı yapılar tasarlamışlardır. Ardından analiz aşamasına geçilerek HBTS’lerin bir ucunu sabitleyip 15 m/s hıza ve 1000 kilogram kütleyle sahip bir plaka ile deforme etmişlerdir. Çalışma sonunda optimum yapının iç çapı 50 mm et kalınlığı ise 2,5 bulunmuştur. Özgül enerji sönümleme kapasitesi, maksimum ezilme kuvveti ve enerji sönümleme verimliliği, hücre sayısı ve et kalınlığı ile orantılı olarak arttığı ve 16 hücreli HBTS’nin iyi bir enerji sönümleyici olmasından dolayı araç gövdelerinde ya da diğer alanlarda kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [46].



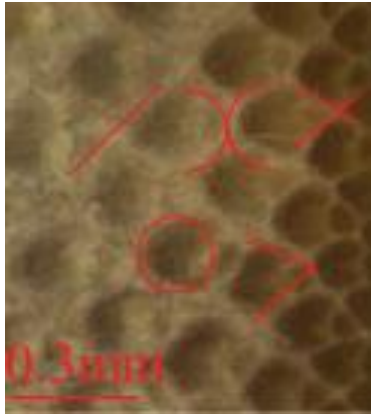
Şekil 3.12. Çok hücreli enerji sönümleyici yapılar [46]

Mantis karidesinin telzon kısmından ilham alınarak AlSi10Mg malzemesine sahip, 0,4 mm et kalınlığında yeni enerji sönümleyici yapılar tasarlayan Yang J. ve arkadaşları, çalışmalarında dalga boyu ve genliğin değişken kabul edildiği bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Genlik $6 < A < 10$ ve dalga boyu $6 < \lambda < 14$ mm olacak şekilde birbirinden farklı birçok yapı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapılar sonlu elemanlar analiz programında nümerik analizlere tabi tutulmuştur. Çalışmanın devamında analizlerin doğruluğu için yeni yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda dalga boyunun genliğe göre enerji sönümleme kabiliyetinde daha etkin olduğu ve optimizasyonlar sonucunda elde edilen yapı için dalga boyu 6 mm, genliğin ise 8 mm olduğu bulunmuştur. Şekil 3.13'te tasarlanan enerji sönümleyici yapı gösterilmektedir [47].

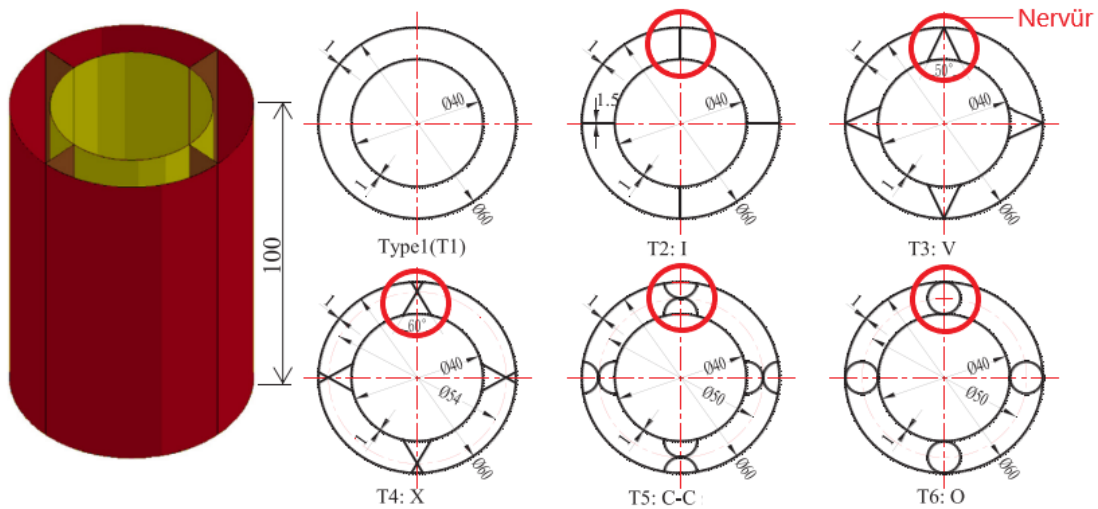


Şekil 3.13. Biyo-ilhamlı yeni enerji sönümleyici [47]

Fu J. ve arkadaşları rüzgar, yerçekimi ve kar gibi çevresel yüklere dayanma kabiliyeti nedeniyle Şekil 3.14'te gösterilen bambu mikro yapısından ilham almışlardır. Şekil 3.15'te görülen nervür yapısına bağlı I, V, X, C-C, O ve nervürsüz olmak üzere 6063-T5 alüminyum alaşımıyla birbirinden farklı 6 yapı tasarlamışlardır. Nervür kalınlıklarını farklı alarak bütün tasarımların aynı kütlede olması sağlanmıştır. Çalışmaların devamında yapıların performans metriklerini elde etmek için Ls-Dyna ile nümerik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Enerji sönümleyici yapılar sabit 10 m/s hızındaki bir plaka deforme edilmiştir. Analizler, boru yüksekliğinin %75'i deforme edildiğinde tamamlanmıştır. Analiz çalışmalarının doğrulanması için nervürsüz yapının deneysel testleri yapılarak analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmaların sonucunda X nervürüne sahip yapının, aynı kütledeki diğer yapılara kıyasla 31,51 J/g ile en yüksek özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür [48].

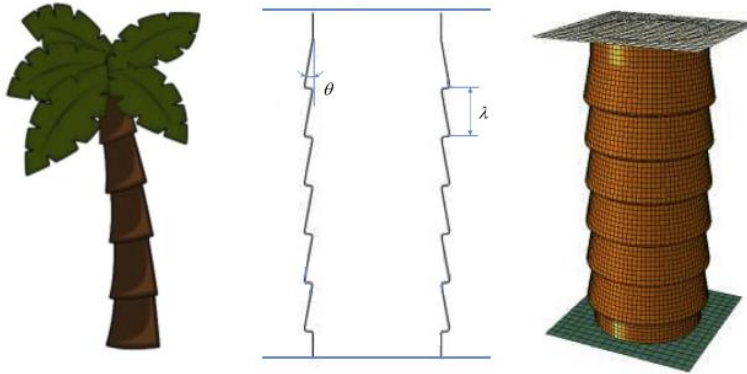


Şekil 3.14. Bambu mikro yapısı [48]



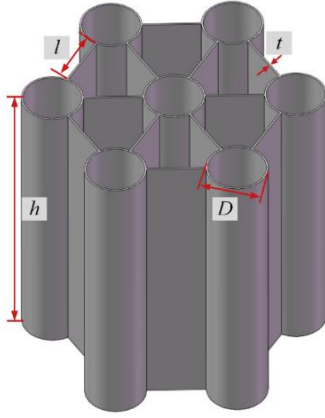
Şekil 3.15. Nervürlü ve nervürsüz enerji sönümleyici yapılar [48]

Ha N.S. ve arkadaşları, hindistan cevizinin eksenel ve yanal yüklere karşı dayanıklı olma özelliğinden dolayı çalışmalarında esin kaynağı olmuştur. Yeni bir enerji sönümleyici tasarımı için hindistan cevizinin fizyolojik yapısını esas almışlardır. Şekil 3.16'da gösterilen dalga boyu (λ) ve koniklik açısı (Θ)'nın performans metrikleri üzerindeki etkilerini incelemek için nümerik analizler gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde dalga boyu için 16,286 mm, 19 mm, 22,8 mm, 28,5 mm, 38 mm ve koniklik açısı için de 5° , 10° , 15° , 20° seçmişlerdir. Bu analizlerin doğruluğu, 80 mm yüksekliğinde, 70 mm çapında, 18 mm dalga boyunda, 3,5 mm genişliğinde ve 1,65 mm et kalınlığında biyo-ilhamlı enerji sönümleyicinin deneyleri ile ispatlanmıştır. Çalışmalar sonucunda yeni tasarımın maksimum ezilme kuvvetinin standart konik ve dairesel enerji sönümleyicilere göre önemli ölçüde azaldığı, koniklik açısıyla sönümlenen enerji miktarı arasında ters orantı olduğu ve standart konik yapılar ve dairesel yapılara göre daha az salınımlı kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır [49].



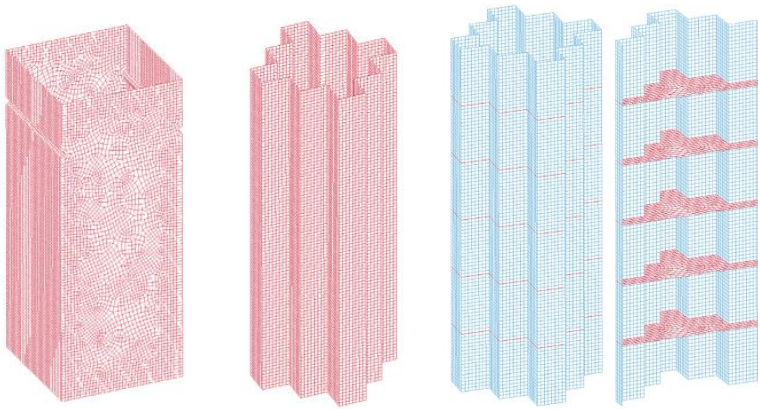
Şekil 3.16. Hindistan cevizi ağacından esinlenilmiş bir enerji sönümleyici yapı [49]

Hu D. ve arkadaşları biyolojik yapılardan esinlenmişler ve klasik altıgen petek yapının köşelerine dairesel profiller ekleyerek Şekil 3.17'de görülen yeni bir enerji sönümleyici yapı tasarlamışlardır. Tasarlanan yeni yapıların enerji sönümleme kabiliyetlerini nümerik ve teorik analizler ile elde etmişlerdir. Petek yapı malzemesi olarak Al 6061-T5 seçmişler ve dairesel boruların çapı (D) ile dairesel borular arasındaki mesafeyi (I) değiştirerek bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon çalışmaları için dairesel boruların arasındaki mesafe 15 mm-30 mm ve dairesel boruların çapı 10 mm-30 mm olacak şekilde 36 farklı petek yapı tasarlanmıştır. Analizler sonucunda aynı çapa ve yüksekliğe sahip enerji sönümleyici profillerde özgül enerji sönümleme miktarı daha fazla çıkmış ve maksimum ezilme kuvveti ile yükseklik-çap değerleriyle doğru orantılı olarak artmıştır [50].



Şekil 3.17. Yeni altıgen enerji sönümleyici yapı [50]

Bir bambu mikro yapısına bakıldığında diyafram ve duvarlara sahip olduğu görülür. Liu S. ve arkadaşları, bu bambu yapısı sahip olduğu diyaframların enine gerilme mukavemetini yükseltmesi, bambunun bölünmesini ve genişlemesini engellemesi özelliğinden dolayı yeni bir enerji sönümleyici tasarlanımı için ilham kaynağı olmuştur. Çalışmalarında enerji sönümleme özelliklerini iyileştirmek için çok köşeli ince duvarlı yapıya bambu yapısından ilham aldıkları diyafram bölmeleri eklemiştirler. Yeni yapılar 3 mm et kalınlığında, 200 mm yüksekliğinde, 80 mm genişlikte ve AA6060-T4 malzemesine sahip yeni dışbükey enerji sönümleyiciler tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni yapılar kare profil ve biyo-ilhamlı diyaframa sahip olmayan dışbükey yapılarla enerji sönümleme özelliklerini karşılaştırmak için Ls-Dyna sonlu elemanlar analiz programı ile nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.18’de kare, diyaframsız dışbükey ve diyaframlı yeni tasarımlar gösterilmiştir. Analiz sonuçlarında, yeni tasarımların geleneksel yapılara göre daha iyi enerji sönümlendiği ve genişleme-büzülme deformasyon moduna geçmesini engellediği bulunmuştur [51].



Şekil 3.18. Geleneksel, perdesiz ve perdeli dış bükey enerji sönümleyici yapılar [51]

4. MATERİYAL METOT

Tez çalışması kapsamında bu bölümde biyo-ilhamlı hibrit enerji sönümleyici yapıların tasarımı, üretimi ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

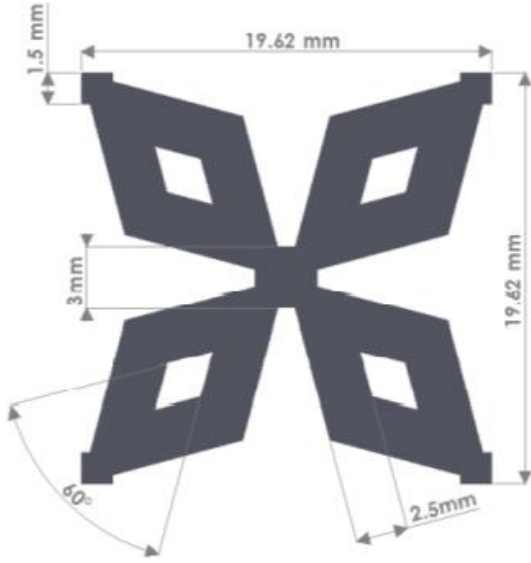
4.1. Biyo-ilhamlı Enerji Sönümleyici Yapıların Tasarımı

Bir model biyo-ilhamlı adını alması için bir canlıdan esinlenilerek tasarlanmış olması gerekir. Bir canlının mikro yapısı, fizyolojik yapısı ya da zorlu şartlarda bile hayatta kalmasına neden olan özellikler farklı tasarım çalışmalarına ilham olmuştur. Çevresel koşullarda fizyolojik yapısını koruyan karahindiba bitkisi, bu çalışma için ilham kaynağı olmuştur. Şekil 4.1’de karahindiba bitkisi gösterilmiştir.



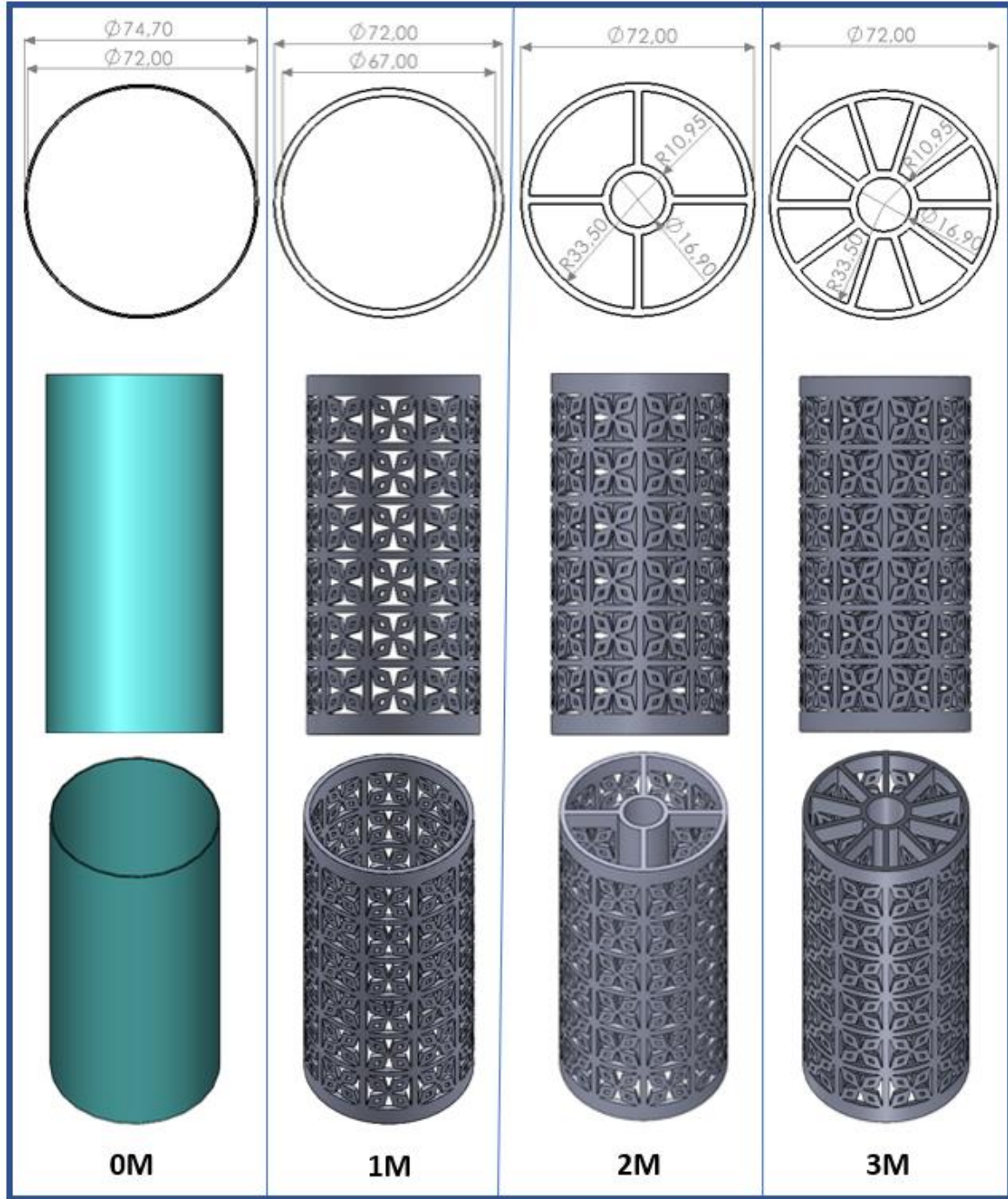
Şekil 4.1. Karahindiba bitkisinin fizyolojik yapısı

Tasarım fikrinin oluşması ile birlikte Şekil 4.2’de görüldüğü gibi tek bir hücre için ölçüler belirlendikten sonra 3 farklı yapının modellenmesine geçilmiştir. Modelleme işlemi SolidWorks CAD programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



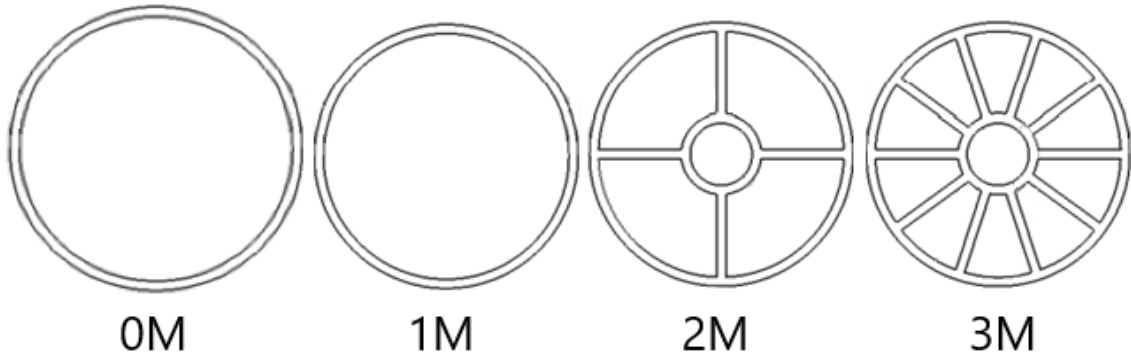
Şekil 4.2. Hücre ölçüleri

Tasarımlarda bütün yapılar için yükseklik 150 mm, dış çap 72 mm, iç çap 67 mm ve eş hücre boyutlarında olacak şekilde modelleme işlemi yapılmıştır. Şekil 4.3'te tasarımların üstten görünümü ve tasarım sonundaki halleri verilmiştir.

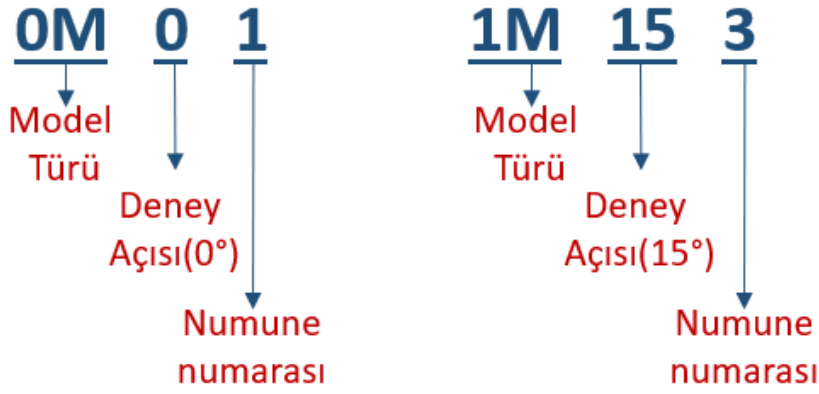


Şekil 4.3. Tasarım görüntüleri

Üç farklı model için iki farklı açıda deneyler ve analizler gerçekleştirileceği için biyo-ilhamlı enerji sönümleyici yapılar adlandırılmıştır. Bu adlandırma Şekil 4.4'teki örnekte görüldüğü gibi model türüne (0M, 1M, 2M ve 3M), Şekil 4.5'te görüldüğü gibi de deney açısına (0° ve 15°) ve numune numarasına göre yapılmıştır.



Şekil 4.4. Model türüne göre adlandırma



Şekil 4.5. Model türü, deney açısı ve numune numarasına göre adlandırma

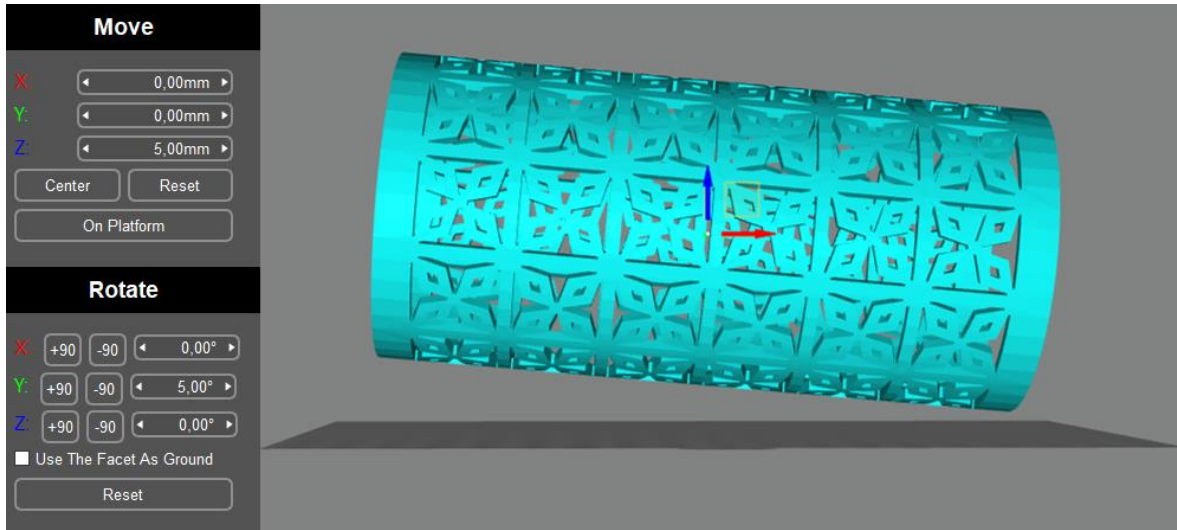
4.2. Biyo-ilhamlı Enerji Sönümleyici Yapıların Üretimi

Tasarım aşamasından sonra Şekil 4.6’da gösterilen LCD tabanlı SLA teknolojisiyle çalışan 192×120×245 mm baskı hacmine sahip 3D yazıcısı tercih edilmiştir. Bu yazıcı için 405 nm UV reçine seçilerek üretim aşamasına geçilmiştir.



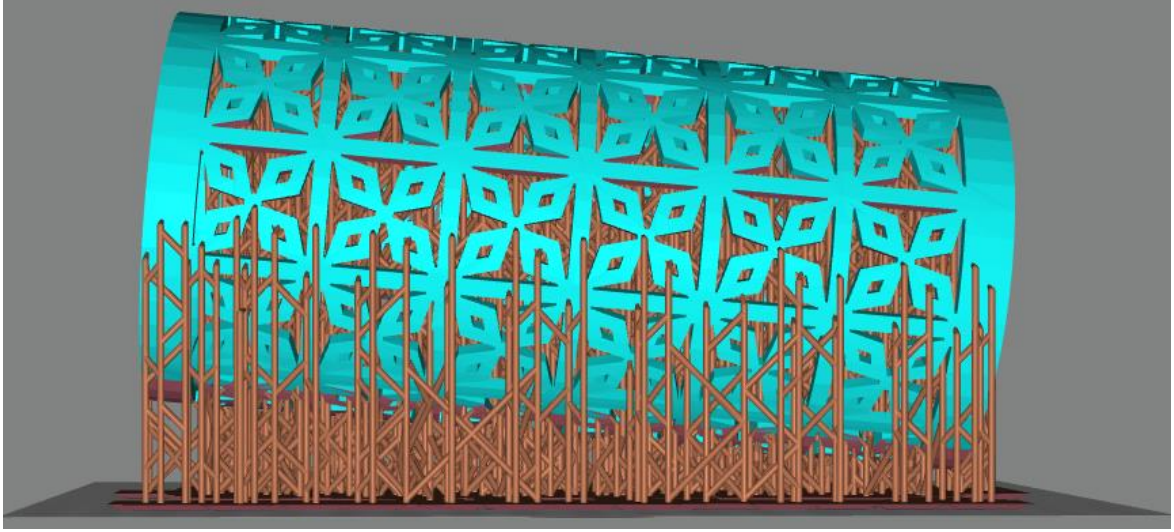
Şekil 4.6. LCD tabanlı SLA baskı cihazı [52]

Üretim aşaması iki kısımdan oluşmaktadır. İlk aşama, destek-katman oluşturma ve 3D yazıcıdan baskı alma kısımlarından meydana gelmektedir. Bu aşamada CAD programında tasarlanan yapılar Photon_WorkShop programı kullanılarak stl dosyası formatında dışarı aktarılır. Bu programda ilk olarak model, Şekil 4.7’de görüldüğü gibi 5° açiya sahip ve tabladan 5 mm yukarıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Modelin tabladaki konumu katman sayısını etkilemektedir. Modelin açısı arttıkça katman sayısı da artmaktadır.



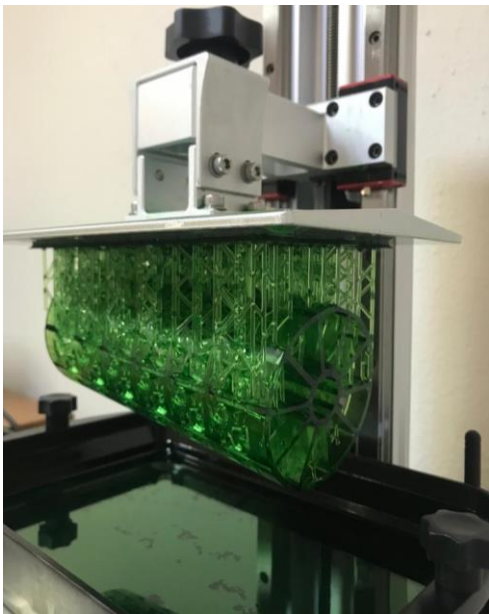
Şekil 4.7. Modelin baskı için konumlandırılması

Konulandırma işleminden sonra destek oluşturma aşamasına geçilmiştir. Destek oluşturma kısmı en önemli aşamalardan biridir. Atılan desteklerin yeterli olması ya da destek kalınlığı gibi faktörler 3D yazıcıdan alınan modelin kalitesini etkilemektedir. Bu nedenle orta kalınlıkta ve yeterli sayıda Şekil 4.8’de gösterildiği gibi destekler atılmıştır.



Şekil 4.8. Model destek yapıları

Destek atma işlemlerinden sonra katman oluşturma işlemi yapılmıştır. Bu aşamada katman sayısı analizin süresini ve desteklerden dolayı da harcanan reçine miktarını etkilemektedir. Katman oluşturma işlemi sonucunda model 1796 katmana ayrılmıştır. Katmanlara ayrılmış modeller 3D yazıcıya aktarılarak basım işlemine geçilmiştir. Bu aşamada konumlandırma da kullanılan açının ya da yüksekliğin doğru tercih edilip edilmediğini test etmek için ilk olarak aynı özelliklere sahip farklı renkteki bir reçine ile Resim 4.1’de görülen deneme modeli üretilmiştir. Sorunsuz üretilen modelin ardından gri renkteki modellerin üretimi gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.1. Deneme modeli

Üretimin son aşamasını ise yıkama ve kürleme oluşturmaktadır. Bu işlemler için Şekil 4.9’da görülen cihazlar kullanılmıştır. Bu cihaz hazne içinde girdap oluşturarak model üzerinde fazla reçine kalmasını önlemek için iyi bir temizleme sağlamaktadır.



Şekil 4.9. Yıkama-kürleme cihazları [52]

Yıkama işleminde ilk olarak 3D yazıcıdan alınan model üzerinde kalan reçinenin temizliği için %99,9 saflıkta bir izopropil alkol ile Resim 4.2’de gösterilen özel bir haznede 8 dakika boyunca yıkanmıştır. Yıkama işleminden sonra destekler kesilmiş ve ardından kürleme aşamasına geçilerek modeller 5 dakika boyunca UV bir ışın ile kürlenerek Resim 4.3’teki biyo-ilhamlı yapılar elde edilmiştir.



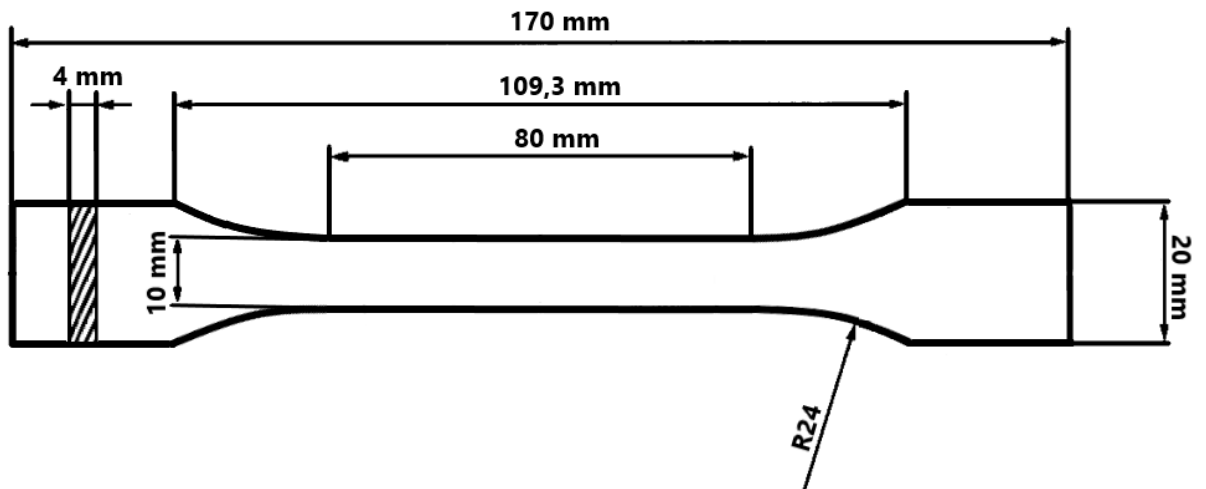
Resim 4.2. Modelin yıkama anı



Resim 4.3. Baskı sonucunda elde edilen modeller

4.3. Reçine Malzemesinin Mekanik Özellikleri

Tez kapsamında modellerin 3D yazıcıda üretilmesi için 405 nm UV fotopolimer reçine tercih edilmiştir. Reçinenin mekanik özelliklerini elde etmek için yoğunluk ve çekme testleri yapılmıştır. Çekme deneyinde polimerler için ISO-527 Tip 1A standardı ele alınmıştır [53]. İlk olarak çekme numuneleri Şekil 4.10'da gösterilen ölçülerde standartlara uygun olarak SolidWorks CAD programı kullanılarak modellenmiş ve numuneler 3D baskı cihazında üretilmiştir. Resim 4.4'te üretimi yapılmış bir çekme numunesi gösterilmiştir.

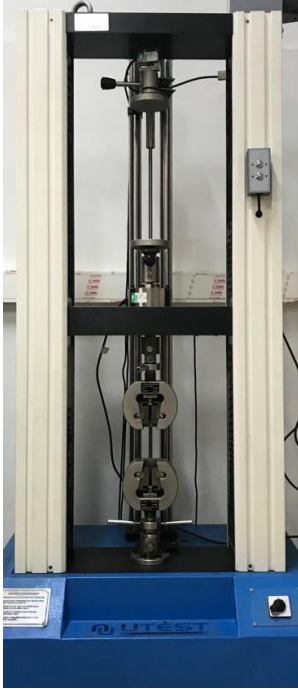


Şekil 4.10. Çekme numune ölçüleri [53]



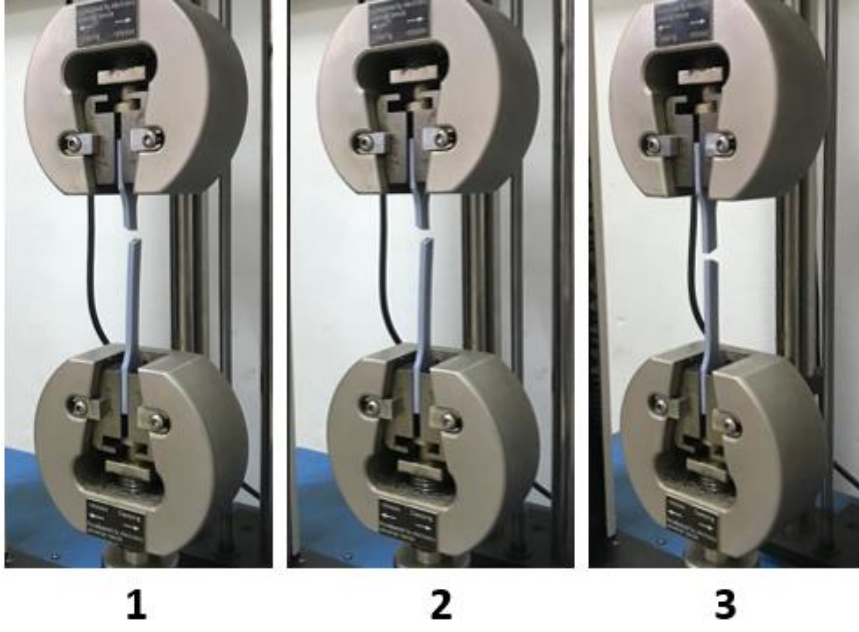
Resim 4.4. Çekme numunesi

Modelleme ve üretim aşamalarından sonra numunelerin çekme testleri Resim 4.5'teki PROFI X6 cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin doğruluğu için üç tekrarlı test şeklinde yapılmıştır.

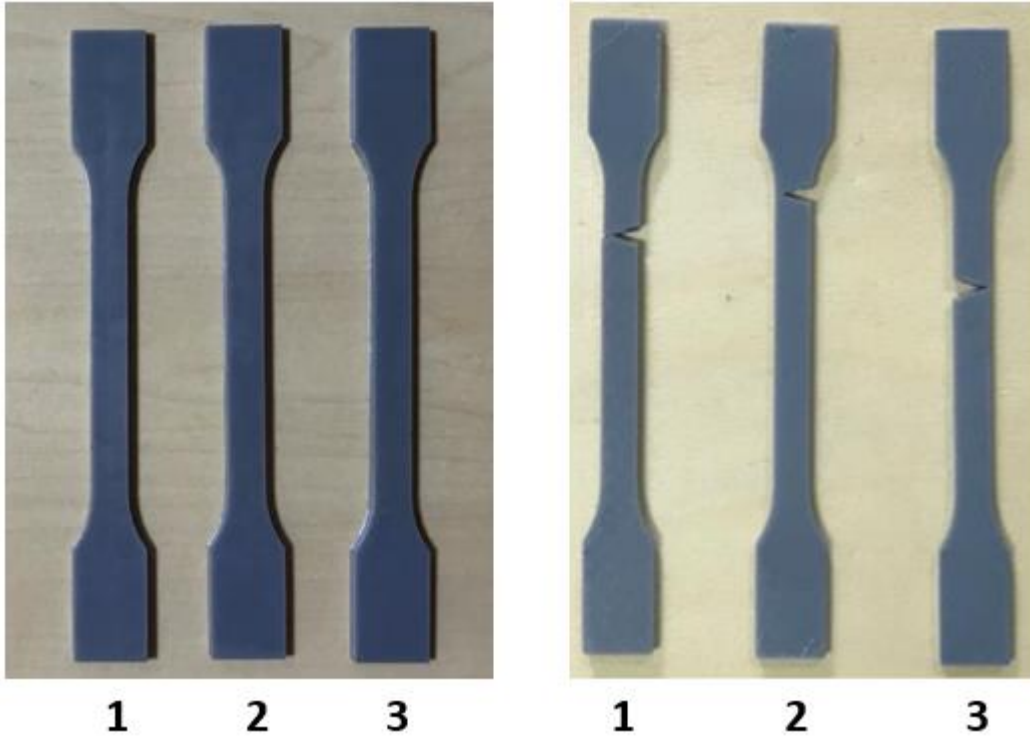


Resim 4.5. Deney test cihazı

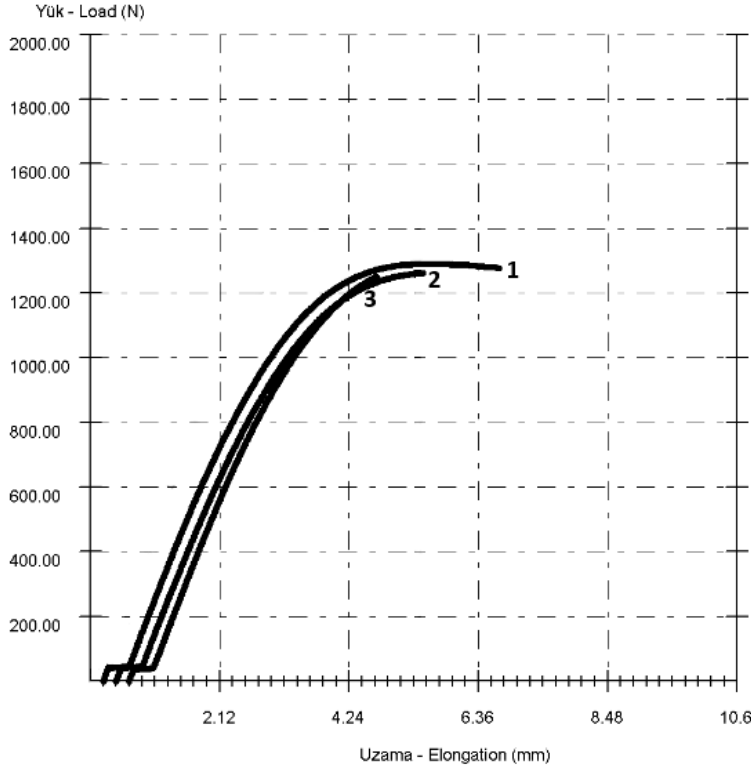
Deneyler sonucunda Şekil 4.11'deki yük-uzama grafiği elde edilmiştir. Resim 4.6'da çekme deneyi görüntüleri Resim 4.7'de ise numunelerin deneyden önceki ve sonraki hali gösterilmektedir.



Resim 4.6. Çekme deneyi görüntüleri



Resim 4.7. Numunelerin çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 4.11. Biyo-ihamlı yapının yük-uzama grafiği

Bir sonraki aşamada yoğunluk hesabı gerçekleştirilmiştir. Arşimet prensibine göre hesaplandığında malzemenin yoğunluğu $1,23 \text{ g/cm}^3$ olduğu tespit edilmiştir (Resim 4.8.). Malzemenin temin edildiği firma tarafından verilen mekanik özellikler kataloğunda yoğunluk değerinin $1,05\text{-}1,25 \text{ g/cm}^3$ olduğu verilmektedir [52]. Buna göre laboratuvar ortamında yapılan yoğunluk ölçüm deneyinin doğruluğu ispat edilmiştir.



Resim 4.8. Yoğunluk ölçüm testi

4.4. Hibrit Enerji Sönümleyici Yapılar

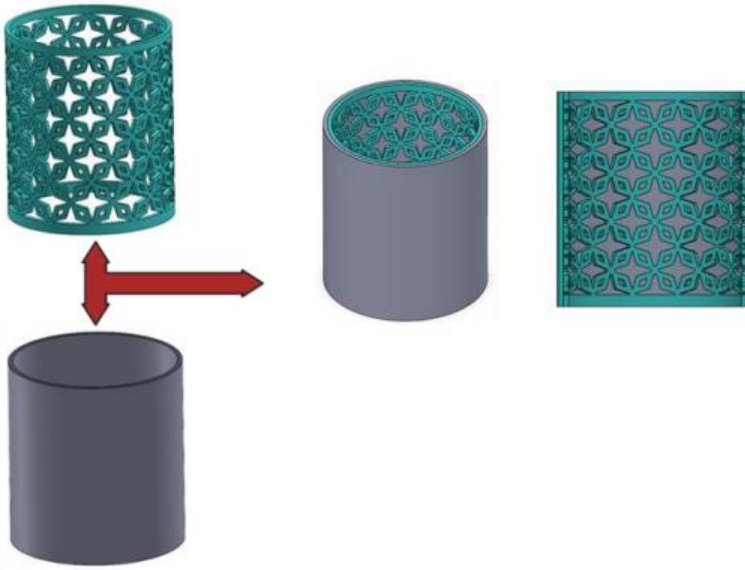
Tez kapsamında biyo-ilhamlı enerji sönümleyici yapıların dış kısmına yoğunluğu $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, elastisite modülü 64 GPa, akma dayanımı 142 MPa ve poisson oranı 0,3 olan Al6063 malzemesinden bir tüp geçirilerek hibrit yapılar elde edilmiştir [54].

Temin edilen standart alüminyum profillerin uzunlukları 2000 mm'dir. Çalışmada kullanılacak alüminyum profillerin uzunluğu 150 mm olduğu için standart profiller Resim 4.9'da görüldüğü gibi elektrikli testereyle laboratuvarında kesilerek hazırlanmıştır. Profiller boş olduğu için elektrikli testerenin çeneleri sıkıştırılırken deforme olmaması adına içerisine sıkı geçecek boyutta hazırlanan polyamidler yerleştirilmiştir.

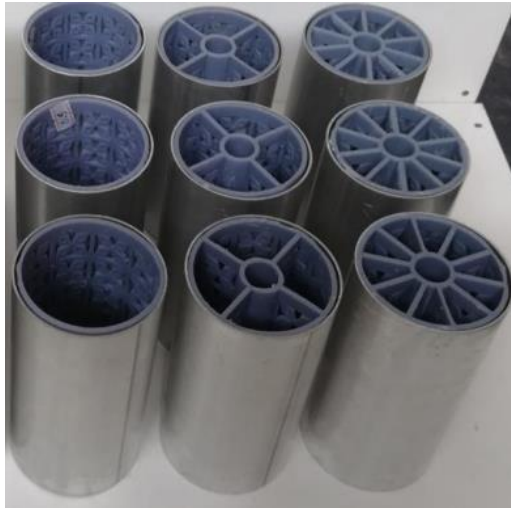


Resim 4.9. Alüminyum için işlem sırası

Şekil 4.12'deki hibrit tasarım için alüminyum tüpler daha önce üretilmiş olan biyo-ilhamlı yapıların dışına geçirilerek Resim 4.10'daki hibrit enerji sönümleyiciler elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra hibrit enerji sönümleyicilerin deney çalışmalarına geçilmiştir.



Şekil 4.12. Hibrit enerji sönümleyici yapının tasarım hali



Resim 4.10. Hibrit enerji sönümleyiciler

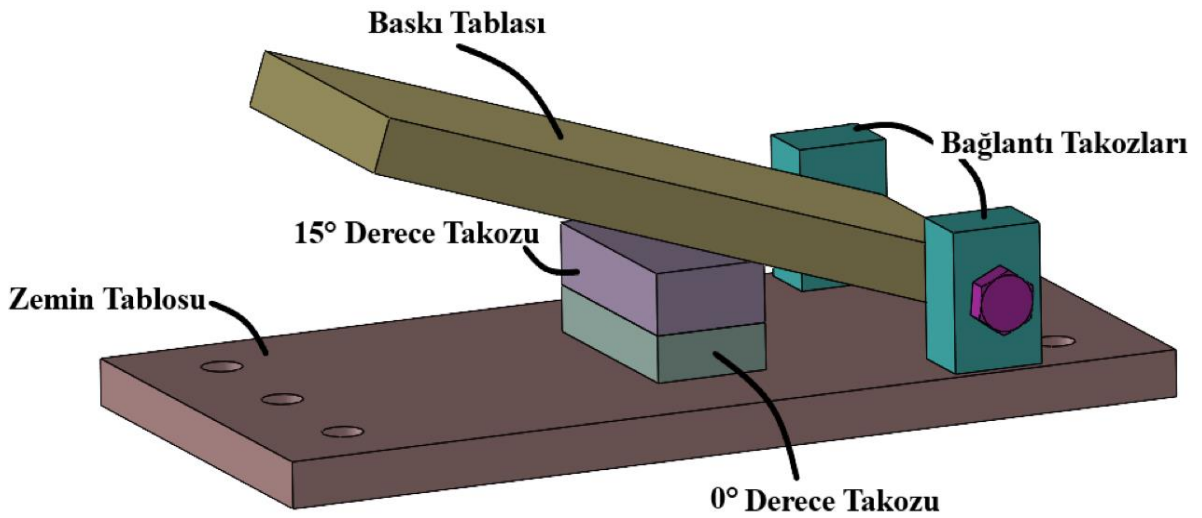
Deney çalışmaları için yarı-statik yükleme özelliğine sahip Resim 4.11’de gösterilen INSTRON 600 LX deney düzeneği kullanılmıştır. Sistemin maksimum basıncı 8,3 bar, ağırlığı 295 kg ve yük basma kapasitesi 600 kN’ dur. Cihaz basma işlemini gerçekleştiren karşılıklı iki adet metal bloğa sahiptir. Bu blokların arasındaki mesafe 77 mm-914 mm aralığındadır. Deneylerde numune bu iki blok arasına yerleştirilir. Blokların genişlikleri ise 508 mm’dir. Basma hızı 5 mm/dk alınmış ve 0° ile 15° açılara sahip bir plakalarla profiller deformasyona uğratılmıştır.



Resim 4.11. Deney düzeneği

4.5. Açısal Deformasyon Test Düzeneğinin Tasarımı ve İmalatı

Deneysel çalışmalarda hibrit enerji sönümleyiciler testleri 0° ve 15° açılara sahip rijit bir plaka ile yapılmıştır. Testler için ilk olarak INSTRON 600 LX cihazına bağlanabilen bir düzene Şekil 4.13'teki gibi SolidWorks programında tasarlanmıştır. Bu modelde 0° ve 15° deneyler için iki farklı takoz modellenerek ardından St52 Karbon Çeliği ile Resim 4.12'de görülen modelin üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13. Açısal deformasyon test düzeneği tasarımı



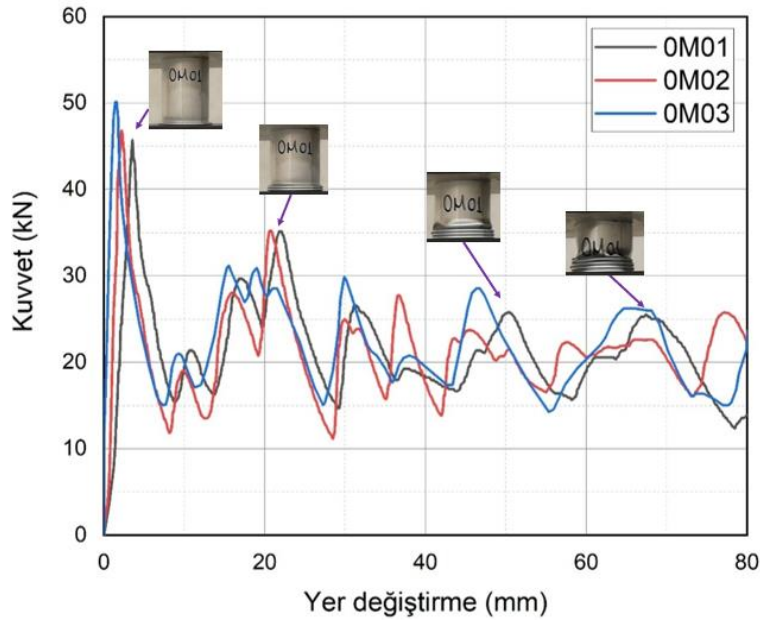
Resim 4.12. Üretilmiş olan açısız deformasyon test düzeneği

4.6. Deneysel Çalışmalar

Deney test cihazı özel bir programla çalışmaktadır. Bu yüzden ilk olarak cihaza bağlı olan bilgisayarda belirlenen 5 mm/dk hız girdi olarak yazılmaktadır. Ardından tasarımı yapılan ve üretilen açısız test düzeneğine ilk olarak 0° takozu takılmış ve düzenek cihaza monte edilmiştir. 0M, 1M, 2M ve 3M modeller sırasıyla iki plaka arasına yerleştirilerek 80 mm deformasyon mesafesi için deneyler gerçekleştirilmiştir. 0° için bütün deneyler bittikten sonra 15° takozu test düzeneğine takılmış aynı işlemler bütün modeller için tekrarlanmıştır. Testlerin doğruluğu için her bir model üç tekrarlı deneye tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda elde edilen sonuçların ortalaması alınarak ilerideki aşamalarda sonlu elemanlar analiz çalışmaları için esas alınacaktır.

0M modelinin 0° Deney Sonuçları

0° deneyleri için daha önceden üretilmiş açısız deformasyon test düzeneğine 0° takozu bağlanarak deney cihazına monte edilmiştir. Parçaların deformasyon mesafeleri 80 mm olarak belirlenmiş ve parçalar bu mesafeye kadar deforme edildikten sonra deneyler sonlandırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda Şekil 4.14'teki kuvvet-yer değiştirme grafiği elde edilmiştir. Ayrıca grafik üzerinde 0M01 modelin belli mesafelerdeki deformasyon görüntüleri gösterilmiştir.



şekil 4.14. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Maksimum deformasyon kuvvetlerinin, yapılan üç tekrarlı testte yakın seviyelerde olduğu görölmektedir. Bununla birlikte ilk katlanmadan sonra 0M01 ve 0M02 modelleri benzer şekilde deforme olmaya devam etmiş ancak 0M03 modelin deformasyon şekli diğerlerine göre bir miktar farklı davranış sergilemiştir. Buna bağlı olarak Çizelge 4.1’de hesaplanan performans metrikleri 0M03 model için az da olsa farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin performans metrikleri

	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	E_m (kJ/kg)
0M01	0,124	80	1,707	45,703	21,338	46,68	13,766
0M02	0,124	80	1,704	46,838	21,300	45,47	13,742
0M03	0,124	80	1,771	50,010	22,138	44,26	14,282
Ortalama	0,124	80	1,727	47,517	21,592	45,47	13,930

0M01 modeli özgül enerji sönümleme kapasitesi bakımından diğer modeller ile kıyaslandığında 0M02 modelinden 0,024 kJ/kg daha fazla, 0M03 modelinden 0,516 kJ/kg daha az olduğu görölmektedir. Ezilme kuvveti bakımından ise 0M01 modelinin 0M02 modelinden %1,21 ve 0M03 modelinden %2,42 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Diğer

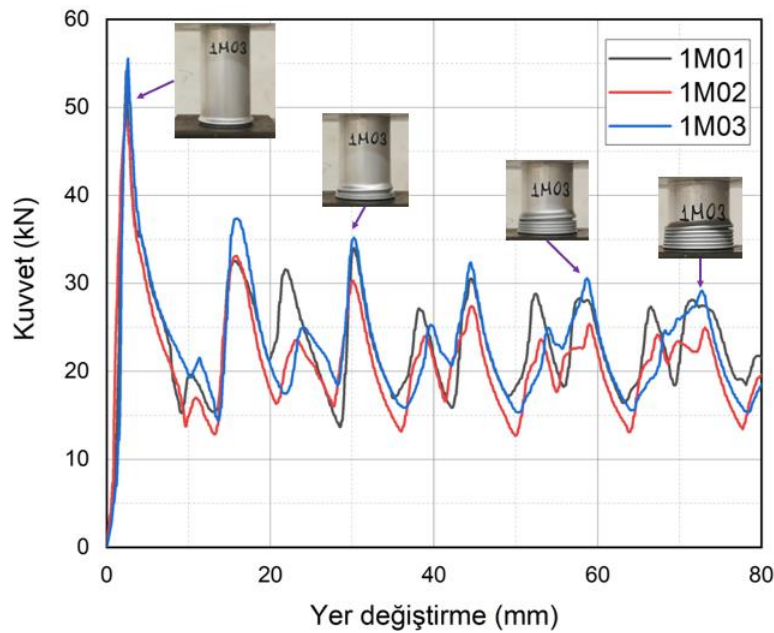
metriklerle bakıldığında aralarında çok ufak farklılık olduğu görülmektedir. Aynı yapıya sahip bu üç model arasındaki farklılıkların ortaya çıkması deformasyon esnasındaki katlanmaların ve maksimum ezilme kuvvetlerinin farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Bu küçük farklılıklar Resim 4.13'te üç modele ait verilmiş deformasyon görüntülerinde de net bir şekilde görülmektedir.



Resim 4.13. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin deformasyon görüntüsü

1M modelinin 0° Deney Sonuçları

Alüminyum tüplerin deneylerinden sonra hibrit yapılara geçilmiştir. Deney koşulları aynı kabul edilmiş ve ilk olarak 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerin analizleri 80 mm deformasyon mesafesi için gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda Şekil 4.15'te kuvvet-yer değiştirme grafiği ve Resim 4.14'teki deformasyon görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 4.15. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Grafiğe bakıldığında ilk deformasyonlar ortalama 52,8 kN seviyelerinde meydana gelmiştir. Deformasyon görüntülerinden de görüldüğü gibi modeller benzer şekilde katlanmaya uğramış ve yaklaşık aynı kuvvet aralıklarında salınım göstererek deformasyona uğramıştır. Deformasyon anında biyo-ilhamlı yapıda kırılmalar söz konusudur. Bu kırılmalar her yapıda farklı bölgelerde ve miktarlarda olduğu için deformasyonlar benzer şekilde gerçekleşse de bu durum performans metriklerini az da olsa etkilemektedir. Grafikte 1M01 ve 1M03 eğrileri yakın seviyelerde salınım yaptığı için Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere sönümlenen enerjilerde birbirine yakın çıkmıştır.

Çizelge 4.2. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin performans metrikleri

	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	E_m (kJ/kg)
1M01	0,188	80	1,863	54,130	23,288	43,02	9,910
1M02	0,188	80	1,691	48,972	21,138	43,16	8,995
1M03	0,188	80	1,843	55,551	23,038	41,47	9,803
Ortalama	0,188	80	1,799	52,884	22,488	42,55	9,569

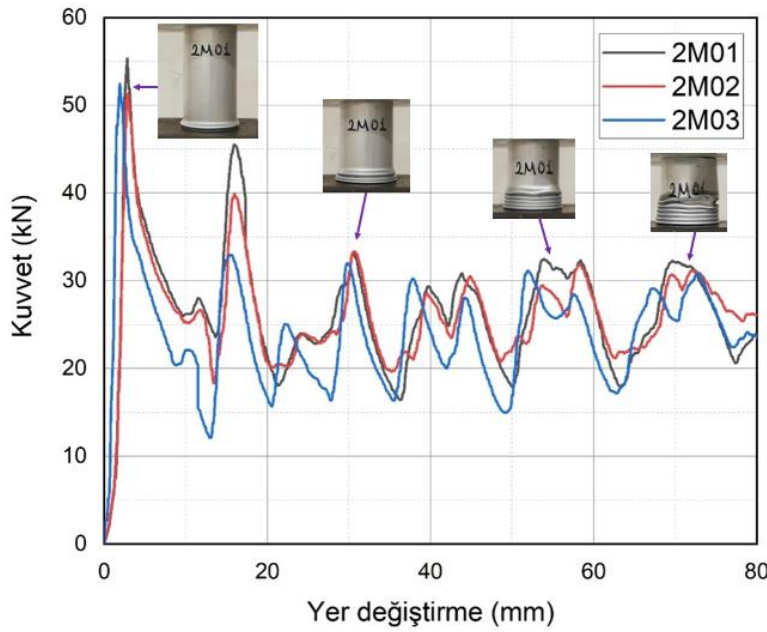
1M01 ve 1M03 yapılarının aynı seviyelerde salınım yapması ortalama ezilme kuvvetlerinin birbirine yakın çıkmasına neden olmuştur. Eğrinin altında kalan alan toplam sönümlenen enerji vereceğinden benzer ortalama ezilme kuvvetine sahip 1M01 ve 1M03 yapıları arasındaki toplam sönümlenen enerji farkı 0,020 kJ çıkmıştır. Kütlelerin eşit olmasından dolayı da bu iki yapı için özgül enerji sönümleme değerleri arasında fark 0,106 kJ/kg iken 1M01 ile 1M02 arasındaki fark 0,915 kJ/kg kadardır. Ezilme kuvvet verimleri incelendiğinde ise 1M01 ile 1M02 arasında %0,14 fark 1M01 ile 1M03 modelleri arasında %1,55 fark söz konusudur.



Resim 4.14. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin deformasyon görüntüsü

2M modelinin 0° Deney Sonuçları

Deney şartları aynı kabul edilecek şekilde 80 mm deformasyon mesafesinde 2M modellerin testleri gerçekleştirilmiştir. Daha öncesinde bahsedilen biyo-ihamlı yapıların kırılma durumu burada da söz konusu olduğundan deney sonuçlarında yine ufak farklılıklar mevcuttur. Deneyler sonunda Şekil 4.16'da grafik değerleri elde edilerek Resim 4.15'te deformasyon görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.16. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Grafik incelendiğinde maksimum ezilme kuvvetinden sonra üç eğri 12 kN- 47 kN arasında salınım yapmıştır. Katlanmalara bakıldığında benzer katlanma sergilemiş ve performans metriklerinde yakın sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle 2M01 ve 2M02 modellerinin maksimum ezilme kuvvetleri arasında fark olsa da salınımları benzer olduğu için Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere ortalama ezilme kuvveti gibi bazı metrikler çok yakın çıkmıştır.

Çizelge 4.3. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin performans metrikleri

	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	E_m (kJ/kg)
2M01	0,241	80	2,128	55,356	26,600	48,05	8,830
2M02	0,241	80	2,093	51,331	26,163	50,96	8,685
2M03	0,241	80	1,926	52,466	24,075	45,88	7,992
Ortalama	0,241	80	2,049	53,051	25,613	48,30	8,502

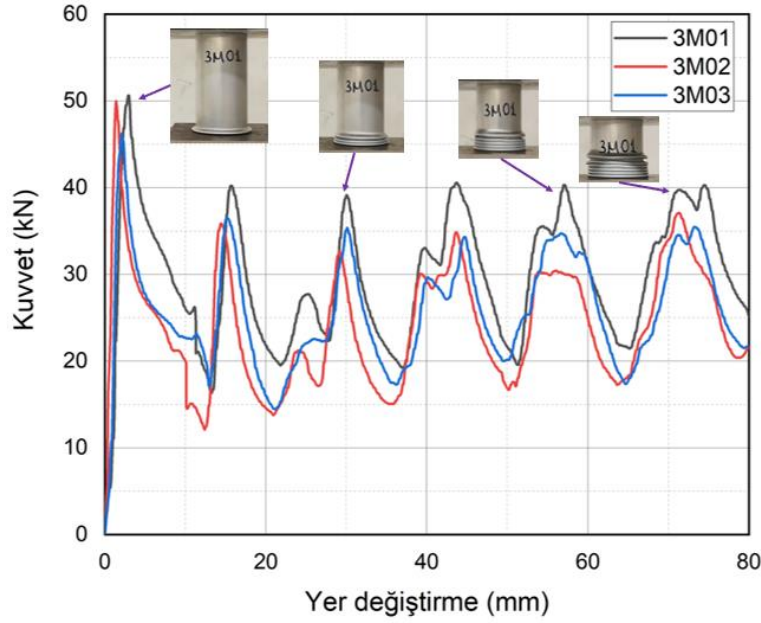
2M01 ve 2M02 modelleri için ortalama ezilme kuvvetleri arasında 0,438 kN kadar bir fark vardır. Bu nedenle toplam sönümlenen enerjide de fark az olmuştur. Özgül enerji sönümleme, kütlelerin eşit olmasından dolayı toplam sönümlenen enerji ile doğru orantılıdır. Bundan dolayı değerler arasında 0,145 kJ/kg’lık bir fark söz konusudur. 2M01 ile 2M03 arasındaki özgül enerji sönümleme farkı ise 0,838 kJ/kg’dır. Ezilme kuvveti verimi incelendiğinde ise 2M01 ile 2M02 modellerin arasındaki fark %2,91 ve 2M01 ile 2M03 modelleri için bu fark %2,17’dir.



Resim 4.15. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin deformasyon görüntüsü

3M modelinin 0° Deney Sonuçları

Son olarak 3M modelin deneyleri aynı koşullar sağlanarak gerçekleştirilmiştir. 80 mm deformasyon mesafesi sonucunda Şekil 4.17’deki kuvvet-yer değiştirme grafiği ve Resim 4.16’daki deformasyon görüntüleri elde edilmiştir.



şekil 4.17. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Grafik incelendiğinde üç modelin maksimum ezilme kuvveti ortalama 49 kN değerinde meydana geldiği görölmektedir. 3M02 ile 3M03 modelleri benzer aralıktaki salınım göstermektedir. Bu durum 3M02 ile 3M03 modellerinin ortalama ezilme kuvvetlerinin 3M01 ile 3M03 modellerine kıyasla Çizelge 4.4'te göröldüğü üzere daha yakın sonuç elde etmemize neden olmuştur.

Çizelge 4.4. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin performans metrikleri

	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	E_m (kJ/kg)
3M01	0,380	80	2,365	50,651	29,563	58,36	6,224
3M02	0,380	80	1,934	50,000	24,175	48,35	5,089
3M03	0,380	80	2,056	46,211	25,700	55,61	5,411
Ortalama	0,380	80	2,118	48,954	26,479	54,11	5,575

Ortalama ezilme kuvveti değerleri 3M02 ve 3M03 modellerinde birbirine yakın çıkmıştır. Maksimum ezilme kuvveti bakımından ise 3M01 ve 3M02 modelleri arasında en yakın değerler elde edilmiştir. Ortalama ezilme kuvveti yakın çıkan modellerin toplam enerji sönümleme değerlerinin de birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Özgöl enerji sönümleme

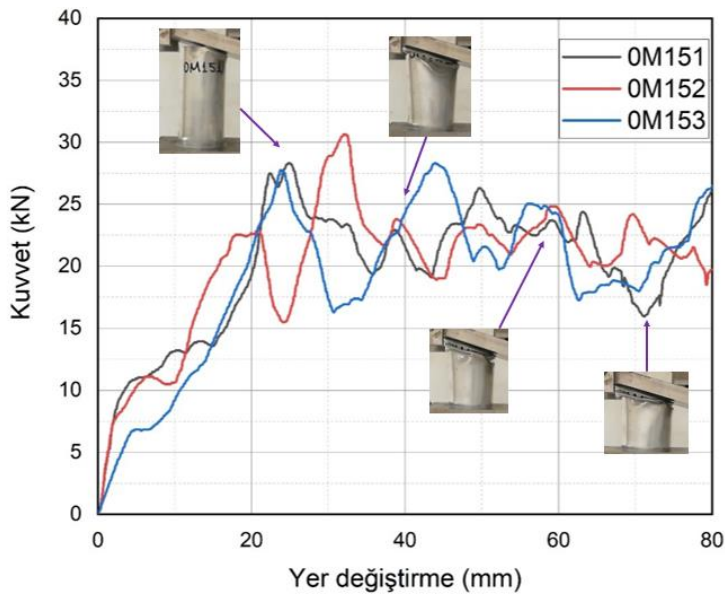
değeri daha önceden belirtildiği gibi toplam sönümlenen enerji ile doğru orantılı olduğundan 3M02 ile 3M03 modelleri arasında 0,321 kJ/kg'lık bir fark oluşturmuştur. Ezilme kuvvet verimine bakıldığında ise 3M02 ile 3M03 arasında %7,26, 3M01 ile 3M03 arasında %2,75'lik bir fark söz konusudur. Sonuçlardaki bütün farklılıklar deney esnasında biyo- ilhamlı yapının deformasyon anında farklı yerlerden kırılması ve alüminyum yapının farklı katlanmalar göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Resim 4.16. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin deformasyon görüntüsü

0M modelinin 15° Deney Sonuçları

0° deneyleri bittikten sonra 15° deneyleri için açılma deformasyon test düzeneğinde 0° takozu üzerine 15° takozu bağlanmıştır. Deneyler 80 mm deformasyon mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda Şekil 4.18'deki kuvvet-yer değiştirme grafiği ve Resim 4.17'deki deformasyon görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 4.18. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Üç tekrarlı test sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde üç modelin salınımlarının ve deformasyon görüntülerinin benzediği görülmüştür. Fakat elde edilen maksimum ezilme kuvveti farklı deformasyon mesafelerinde meydana gelmiştir. Modeller arasında en büyük fark maksimum ezilme kuvvetinde oluşmuş ve bu durum ezilme kuvveti veriminde ufak da olsa bir farka neden olmuştur. Çizelge 4.5'te 0M modellerinin performans metrikleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin performans metrikleri

	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	E_m (kJ/kg)
0M151	0,124	80	1,587	28,317	19,838	70,05	12,798
0M152	0,124	80	1,603	30,627	20,038	65,42	12,927
0M153	0,124	80	1,519	28,318	18,988	67,05	12,250
Ortalama	0,124	80	1,570	29,087	19,621	67,51	12,659

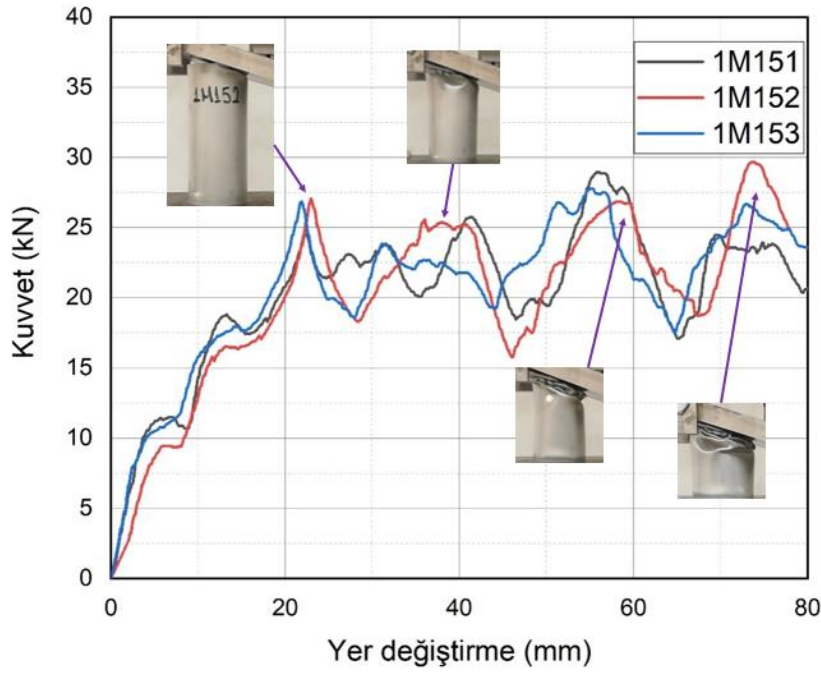
Performans metrikleri incelendiğinde özgül enerji sönmüleme değerlerinin birbirine yakın çıktığı görülmüştür. Ezilme kuvvet verimindeki ufak farkın nedeni ise maksimum ezilme kuvvetleri ve ortalama ezilme kuvvetleridir. Üç model kendi içinde kıyaslandığında 0M151 ile 0M152 arasındaki ezilme kuvveti verim farkı %4,6 ile en büyük değer çıkmıştır.



Resim 4.17. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin deformasyon görüntüsü

1M modelinin 15° Deney Sonuçları

Alüminyum deneylerinden sonra 80 mm'lik deformasyon için hibrit modellerin 15° deneylerine geçilmiştir. Aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda Şekil 4.19'daki kuvvet-yer değiştirme grafiği elde edilmiştir. Grafik üzerinde 1M151 modelinin deformasyon görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.19. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Kuvvet-yer değiştirme grafiğine bakıldığında üç modelin eğrilerinin aynı şekilde salınım yaptığı görülmektedir. Bu benzerlik Çizelge 4.6'da görülen performans metrik değerlerinin çok yakın çıkmasına neden olmuştur. 1M152 modelinin maksimum ezilme kuvveti diğer modellere göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni ise biyo-ilhamlı yapının hücrelerinin iç içe geçmesi ona uygulanacak kuvveti arttırmış ve yaklaşık 57 mm'de oluşan kuvvetten daha fazla bir kuvvet oluşturmuştur.

Çizelge 4.6. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin performans metrikleri

	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	E_m (kJ/kg)
1M151	0,188	80	1,629	28,950	20,363	70,33	8,660
1M152	0,188	80	1,612	29,681	20,150	67,88	8,569
1M153	0,188	80	1,654	27,793	20,675	74,39	8,793
Ortalama	0,188	80	1,632	28,808	20,396	70,87	8,674

Üç modelinde sonuçlarının bu kadar yakın çıkması istenilen bir durumdur. Buradan Resim 4.18’de gösterildiği gibi katlanmaların ve genel olarak biyo-ilhamlı yapıların kırılma noktalarının benzediği anlamına gelmektedir. Özgül enerji sönümlemelere bakıldığında modeller arasında maksimum 0,223 kJ/kg’lık bir değer söz konusudur. Ezilme kuvvet verimi ise maksimum ezilme kuvvetinden etkilendiğinden en büyük fark %6,5 değeriyle 1M152 ve 1M153 modelleri arasında oluşmuştur.



Resim 4.18. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin deformasyon görüntüsü

2M modelinin 15° Deney Sonuçları

2M modelleri için aynı şartlar altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilerek performans metrikleri hesaplanmıştır. Şekil 4.20’de elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği görülmektedir.

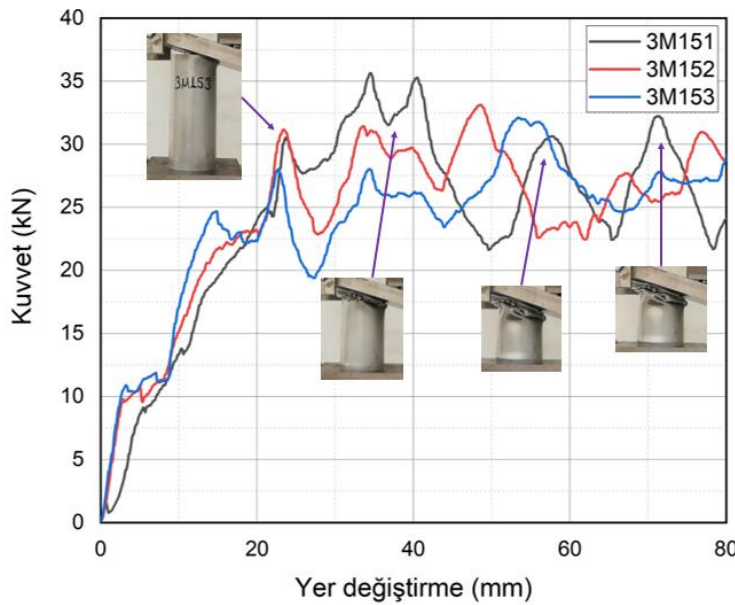
Performans metrikleri incelendiğinde üç model içinde yakın değerler elde edilmiştir. Ezilme kuvveti verimi bakımından 2M151 ile 2M152 arasında %0,82, 2M151 ile 2M153 arasında %2,52 ve 2M152 ile 2M153 arasında %3,34 farklar oluşmuştur. Özgül enerji sönümlmelerine bakıldığında ise değerler birbirine yakın çıkmış ve en büyük fark 0,374 kJ/kg değeriyle 2M151 ile 2M153 arasında meydana gelmiştir.



Resim 4.19. 2M151, 2M152 ve 2M153 modellerinin deformasyon görüntüsü

3M modelinin 15° Deney Sonuçları

3M modeli aynı koşullarda ve aynı deformasyon mesafesi için deneyleri yapılmış ve sonucunda Şekil 4.21'deki kuvvet-yer değiştirme grafiği edilmiştir. Bu grafik kullanılarak Çizelge 4.8'de verilen performans metrikleri hesaplanmıştır. Grafik üzerinde 3M153 modelinin deformasyon görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.21. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Grafik üzerindeki eğrilerin benzer salınım gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle ortalama ezilme kuvvetleri birbirine yakın çıkmıştır. Ortalama ezilme kuvveti enerji sönümleme değerlerini etkileyeceğinden buna bağlı hesaplanan diğer metriklerinde benzer seviyelerde çıkmasına sebep olmuştur.

Çizelge 4.8. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin performans metrikleri

	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	E_m (kJ/kg)
3M151	0,380	80	1,933	35,632	24,163	67,81	5,087
3M152	0,380	80	1,941	33,131	24,263	73,23	5,108
3M153	0,380	80	1,894	32,115	23,675	73,71	4,984
Ortalama	0,380	80	1,923	33,626	24,033	71,58	5,060

3M modelinin daha fazla hücresel yapıdan oluşması biyo-ilhamlı yapıda kırılmaların daha fazla olacağı ve bu kırılmaların da benzer bölgelerde gerçekleşme durumu modeller arasındaki performans metriklerinin farklı çıkmasına neden olmuştur. Ezilme kuvvet verim değerleri incelendiğinde 3M151 ile 3M152 arasında %5,42, 3M152 ile 3M153 arasında %0,48 ve 3M151 ile 3M153 arasında ise %5,90'lık farklar mevcuttur. 3M151 ile 3M152 arasında 0,021 kJ/kg, 3M152 ile 3M153 arasında 0,124 kJ/kg ve 3M151 ile 3M153 arasında 0,103 kJ/kg'lık bir özgül enerji sönümleme farkı söz konusudur. Özgül enerji sönümleme değerlerindeki farkın az olması daha önceden de belirtildiği gibi eğrilerin deformasyon aralıklarının ve deformasyon şekillerinin benzer olmasından kaynaklanmaktadır (Resim 4.20.).



Resim 4.20. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin deformasyon görüntüsü

0° deneylerin sonuçları incelendiğinde en iyi sonuçlar 3M modeli için elde edilmiştir. 3M modelinin kütlesi diğer modellere göre fazla olduğundan özgül enerji sönmleme miktarı düşük elde edilmiştir (Çizelge 4.9.).

Çizelge 4.9. 0° Deney sonuçları

0° Derece	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	E_m (kJ/kg)
0M01	0,124	80	1,727	47,517	21,592	45,476	13,930
0M02							
0M02							
1M01	0,188	80	1,799	52,884	22,488	42,552	9,569
1M02							
1M03							
2M01	0,241	80	2,049	53,051	25,613	48,303	8,502
2M02							
2M03							
3M01	0,380	80	2,118	48,954	26,479	54,110	5,575
3M02							
3M03							

15° deneyleri incelendiğinde toplam sönmlenen enerji ve ortalama ezilme kuvvet değeri 3M modelde en iyi elde edilirken ezilme kuvvet verimi ise 2M modelinde en iyi elde edilmiştir. 0M modelinin kütlesinin az olması da özgül enerji sönmleme miktarını arttırmıştır (Çizelge 4.10.).

Çizelge 4.10. 15° Deney sonuçları

[illegible]

5. LS-DYNA İLE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

5.1. Ls-Dyna Çalışma Prensipleri

Ls-Dyna programı otomotiv, inşaat gibi birçok sektörde kullanılmaktadır ve Unix, Linux ve Windows tabanlı platformlar için optimize edilmiştir. Ls-Dyna, sonlu elemanlar metoduyla denklemleri çözer ve tamamen komut satırı tarafından yönlendirilir. Birçok malzeme özelliği sunması da kullanıcı için önem teşkil eder [55, 56].

5.1.1. Zaman integrasyonu

Bir sistemin hareket denkleminin çözülmesi zamana bağlı integrasyon gerektirir. Lineer adi diferansiyel denklemler analitik çözümlenebilirken lineer olmayanlar için sayısal çözüm metotları kullanılır. Bir sistem için iki tür çözüm yönetimi vardır. Bunlardan birisi explicit (açık, dinamik) diğeri ise implicit (kapalı, statik) yöntemdir [57]. Explicit yöntemler sistem durumunu ileriki bir zamanda çözerken implicit yöntemler sistemi hem şimdiki zamanda hem de ileri zamandaki durumunu kapsayan denklemi çözer ve sistem durumunu hesaplar. Açık yöntemde o andaki durum dikkate alınarak ileriki zaman adımındaki durum hesaplanır ve büyük deformasyonlar ve doğrusal olmayan malzeme davranışları gibi durumlarda daha iyi sonuçlar alabilmek için kullanılır [58, 59]. Açık yöntemlerin çalışması matematiksel olarak Eş 5.1'deki gibi ifade edilir [60].

$$y(t + \Delta t) = F(y(t)) \quad (5.1)$$

Kapalı yöntemde ise sistemi mevcut durumu ile ileriki bir zamandaki durumu birlikte ele alınarak iteratif bir çözüm yapılır. Kapalı yöntemler ise matematiksel olarak Eş. 5.2 ile ifade edilebilir [57, 58].

$$F(y(t), y(t + \Delta t)) = 0 \quad (5.2)$$

Burada t zamanı, Δt küçük zaman adımını ifade etmektedir. $y(t)$ ifadesi mevcut sistem durumunu, $y(t+\Delta t)$ ise ileriki bir zamandaki sistem durumunu ifade etmektedir.

$$M\ddot{u}_n + C\dot{u}_n + Ku_n = P_n \quad (5.5)$$

Eş. 5.6'da M kütle, C sönümleme matrisini, P_n dış yükleme matrisini ve K sistem katılık matrisini tanımlamaktadır. Konum, hız ve ivme ifadeleri yukarıdaki denklemde yerine yazılırsa sistemin hareket denklemi Eş. 5.6'daki gibi elde edilir [57].

$$\left(M + \frac{1}{2}\Delta t C\right)u_{n+1} = \Delta t^2 P_n - (\Delta t^2 K - 2M)u_n - \left(M - \frac{\Delta t}{2}C\right)u_{n-1} \quad (5.6)$$

5.1.2. Zaman adımı büyüklüğü

Zaman adımı büyüklüğü, toplam simülasyon süresi ve analiz sonunda çıkacak sonuçların doğruluğu için önemli bir etkidir. Toplam analizin süresi ile zaman adımının hesaplanmasında ağ örgüsündeki en küçük elamanın boyutuyla bağlantılıdır. Ağ örgüsünde eleman boyutlarının küçültülmesi analiz sonundaki sonuçların daha doğru çıkmasına neden olur. Fakat analizin doğru sonuç vermesini sağlarken analiz süresinin uzamasına da neden olmaktadır. Zaman adımı boyutunu ne kadar çok küçültürsek gerçek sonuçlara o kadar çok yaklaşılr. Ls-Dyna'da zaman adımı büyüklüğü Eş. 5.7'deki gibi hesaplanmaktadır [55].

$$\Delta t^{n+1} = \alpha \cdot \min \{\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_n\} \quad (5.7)$$

Eş. 5.7'de n eleman sayısını, Δt zaman adımını α ise zaman adımı katsayısını tanımlar. Zaman adımı katsayısı için varsayılan değer 0,9 dur. Fakat daha küçük değerler de tanımlanabilir. Bu değer *CONTROL_TIMESTEP komutu içindeki TSSFAC ile değiştirilebilir. Kabuk elemanlar için zaman adımı hesaplarken Eş. 5.8 kullanılır [55, 56].

$$\Delta t_e = \frac{L_s}{c} \quad (5.8)$$

Eş. 5.8'de Δt_e eleman zaman adımını, L_s karakteristik uzunluğu c ise ses hızını tanımlar. Ses hızı ise aşağıdaki Eş. 5.9 ile hesaplanır. [55].

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (5.9)$$

Eş. 5.9'da E elastik modülü, ρ malzeme için yoğunluğu ν ise Poisson oranını tanımlar. Karakteristik uzunluk üç farklı yolla hesaplanabilir [55]. İlk hesaplama Eş. 5.10 ile tanımlanır.

$$L_s = \frac{(1+\beta)A_s}{\max(L_1, L_2, L_3, (1-\beta)L_4)} \quad (5.10)$$

Eş. 5.10'da $L_i = (1,2,3,4)$ de kabuk eleman üzerindeki kenar uzunluklarıdır ve A_s kabuk eleman alanıdır. Bir üçgen eleman için $\beta=1$, dörtgen eleman için ise $\beta=0$ değerlerini alır. İkinci hesaplama, köşegen uzunluklarıyla yapılır [59]. Eş. 5.11'de hesaplama yöntemi gösterilmiştir.

$$L_s = \frac{(1+\beta)A_s}{\max(D_1, D_2)} \quad (5.11)$$

Eş. 5.11'de D_1 ve D_2 kabuk elemanın köşegen uzunluklarıdır.

Üçüncü hesaplama yöntemi ise kararsızlık durumları için kullanılmaktadır. Eş. 5.12'de hesap yöntemi verilmiştir. Bu yöntem ile daha büyük zaman adımı değerleri hesaplanabilir [55].

$$L_s = \max \left[\frac{(1+\beta)A_s}{\max(L_1, L_2, L_3, (1-\beta)L_4)}, \min(L_1, L_2, L_3, L_4 + 10^{20}\beta) \right] \quad (5.12)$$

5.1.3. Ls-Dyna birim sistemleri

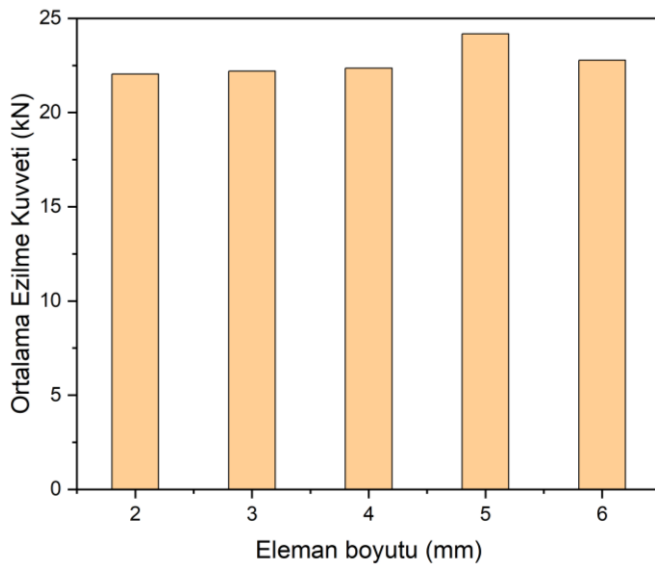
Ls-Dyna birimleri çözüm için önemlidir. Birimler birbiriyle uyumlu olduğu sürece doğru sonuçlar elde edilir. Örnek olarak kütle için birim kilogram (kg) uzunluk birimi için milimetre (mm) zaman için milisaniye (ms) kuvvet için kilonewton (kN) gerilme için gigapascal (GPa) enerji için kilonewton-milimetre (kN-mm) kullanılır. Zamanın saniye (s) alınması analiz sonucunu değiştirecektir. Çizelge 5.1'de Ls-Dyna birimleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Ls-Dyna Birim Sistemi [55]

	Uzunluk	Zaman	Kütle	Gerilme	Enerji	Kuvvet
(i)	m	s	kg	Pa	J	N
(ii)	mm	ms	kg	GPa	kN-mm	kN
(iii)	cm	us	g	Mbar	1,0e+07 Ncm	1,0e+07 N
(iv)	mm	ms	g	MPa	N-mm	N
(v)	mm	s	ton	MPa	N-mm	N

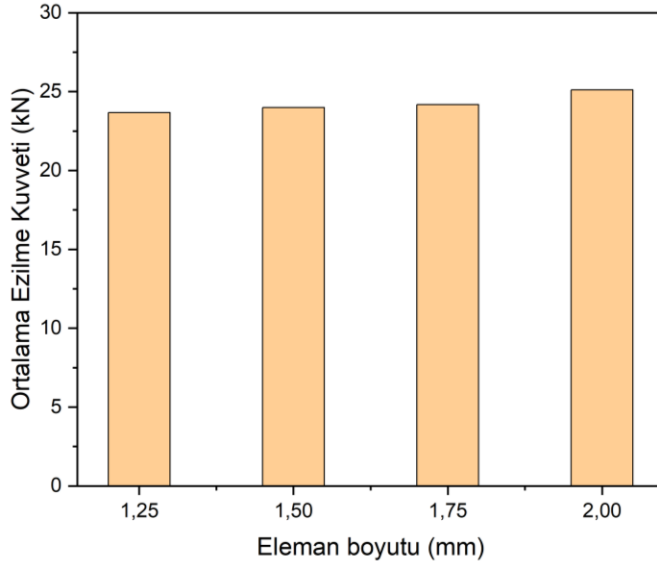
5.2. Eleman Ağ Boyutu Hassasiyeti

Eleman ağ boyutu, bir analizin gerçeğe yakınlığını ve analiz süresini doğrudan etkileyeceği için en önemli aşamadır. Eleman boyutunun büyümesi ile analiz süreleri azalmakta ve gerçeğe yakınlığı değişmektedir. Bu yüzden en iyi doğruluk ve en kısa analiz süresi için alüminyum tüp ve biyo-ilhamlı yapı için farklı eleman boyutları seçilmiştir. En iyi eleman ağ boyutu için sonlu elemanlar analizleri uygun koşullarda gerçekleştirilmiştir. Analizler sonunda ortalama ezilme kuvvetleri elde edilmiştir. Şekil 5.2. ve Şekil 5.3'te eleman boyutlarına göre elde edilen ortalama ezilme kuvvet değerleri verilmiştir.



Şekil 5.2. Alüminyum tüp için eleman boyutu-ortalama ezilme kuvvet değerleri

Alüminyum tüp için 2 mm-4 mm aralığındaki eleman boyutunda ortalama ezilme kuvveti değerleri benzer elde edilmesinden dolayı en büyük değer olan 4 mm eleman boyutu alınmıştır.

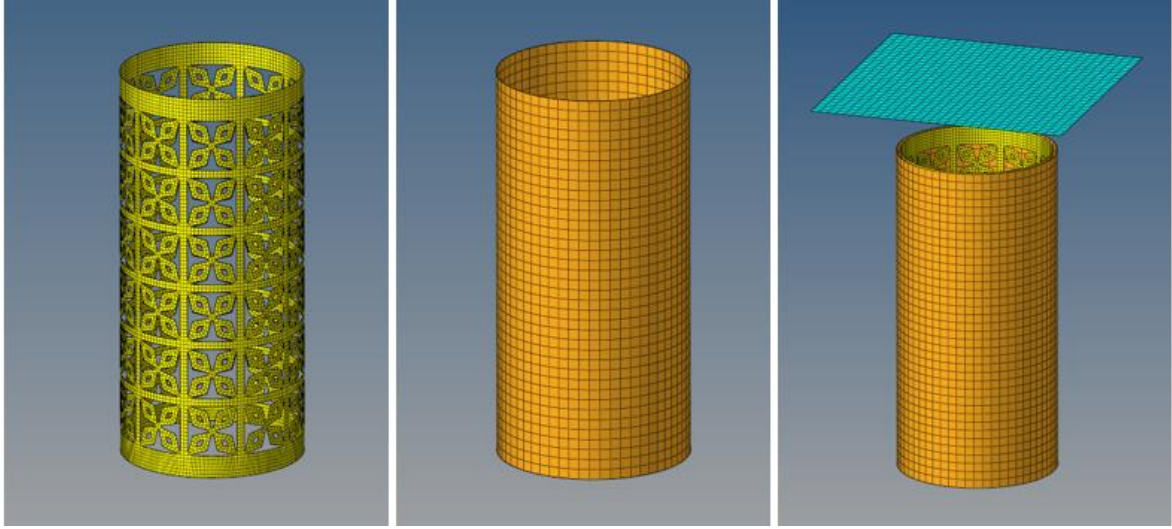


Şekil 5.3. Biyo-ilhamlı yapı için eleman boyutu-ortalama ezilme kuvvet değerleri

Biyo-ilhamlı yapı için 1,25 mm-1,75 mm aralığında ortalama ezilme kuvveti yaklaşık aynı seviyelerde meydana geldiğinden ve düzgün bir ağ modeli için eleman boyutu 1,5 mm alınmıştır.

5.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar analizi yapılacak modeller ilk olarak SolidWorks programı ile tasarlanmıştır. SolidWorks ile tasarlanan enerji sönümleyici yapıların sonlu elemanlar ağını oluşturmak için Hypermesh programı kullanılmıştır. Alüminyum profilin eleman boyutu 4 mm, reçineden üretilen biyo-ilhamlı yeni tasarımın eleman boyutu 1,5 mm ve rijit plakanın eleman boyutu 1 mm olarak belirlenmiş ve Şekil 5.4'te gösterildiği gibi model elemanlarına ayrılmıştır.



Şekil 5.4. Parçaların sonlu elemanlarına ayrılmış hali

Hypermesh'te her bir parçanın numaralandığı sonlu eleman ağ modeli Ls-Dyna programında *PART kısmında aynı sırayla numaralandırılmıştır. *PART bölümünde ilgili parçanın malzeme özellikleri ve kesit tanımlaması yapılmaktadır. Şekil 5.5'te PID parça numarasını, SECID kesit özelliklerini ve MID ise malzeme özelliklerini ifade etmektedir.

NewID	Draw	RefBy	Pick	Add	Accept	Delete	Default	Done	1 tube
☐ Use *Parameter ☐ Comment									2 moving_surface
(Subsys: 1 sample_run.k) Setting									3 resin
*PART_(TITLE) (3)									
1	TITLE								
tube									
2	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID	
	1	3	4	0	0	0	0	0	

Şekil 5.5. Parçaların numaralandığı *PART kartı

Kesit özellikleri için *SECTION_SHELL komutu kullanılarak kabuk elemanların et kalınlık tanımlamaları, integrasyon nokta sayısı ve eleman formülasyonu tanımlanmıştır. Şekil 5.6'da görülen *SECTION_SHELL kartında SECID kesitin numarasını, T et kalınlığını, ELFORM eleman formülasyonunu ve NIP integrasyon nokta sayısıdır. Hareketli plaka için 1 mm, alüminyum tüp için 1,35 mm ve biyo-ilhamlı yapı için 2,5 mm kalınlık tanımlaması yapılmıştır. Eleman formülasyonu için Belytschko-Lin-Tsay tercih edilmiştir. İntegrasyon nokta sayısının değeri ise 5 kabul edilmiştir. Bu değer istenilen hassasiyeti karşılamaktadır.

*SECTION_SHELL_(TITLE) (3)								
TITLE moving								
1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID ☐	ICOMP	SETYP
	1	2	1.0000000	5	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0

Şekil 5.6. Kesit tanımlama kartı

Malzeme tanımlamasında hareketli plaka için *MAT_RIGID(20), alüminyum tüp ve biyo-ilhamlı yapı için MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY(24) malzeme kartları kullanılmıştır. Malzeme kartında MID malzeme numarasını, RO yoğunluğunu, E elastik modülü, PR poisson oranını ve LCSS ise efektif gerilme-gerinim eğrisini ifade etmektedir. *MAT_RIGID(20) kartı rijit malzemeler için kullanılmaktadır. Burada parçanın CON1 ve CON2 ile doğrusal hareketi ve dönme hareketi sınırlandırılmıştır. Şekil 5.7’de malzeme kartı verilmiştir.

*MAT_RIGID_(TITLE) (1)								
TITLE rigid								
1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	3	7.850e-06	2.100e+05	0.3000000	0.0	0	0.0	
2	CMO	CON1	CON2					
	1.0	5	7					

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (2)								
TITLE resin								
1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	2	1.230e-06	1.8510000	0.2000000	0.0	0.0	1.000e+21	0.0
2	C	P	LCSS ☐	LCSR ☐	VP			
	0.0	0.0	3	0	0.0			

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (2)								
TITLE tube								
1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	4	2.700e-06	64.000000	0.3000000	0.0	0.0	1.000e+21	0.0
2	C	P	LCSS ☐	LCSR ☐	VP			
	0.0	0.0	1	0	0.0			

Şekil 5.7. Malzeme kartı

Nümerik analizlerde sonlu elamanlarına ayrılmış parçaların birbiriyle iç içe geçmesini engellemek için uygun kontak kartları kullanılmalıdır. Bu çalışmada hareketli plaka ve sabit parçalar arasında için `AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`, hareketli plakaların haricindeki parçaların kendi içinde kontak kurmak için de `AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE` kontak kartı kullanılmıştır. Kontak kartlarında statik ve dinamik sürtünme için sırasıyla 0,3 ve 0,2 değerleri seçilmiştir [61]. Kritik sönümlemede %10 civarı bir sönümleme için viskoz sönümleme (VDC) değeri 10 alınmıştır [58]. Şekil 5.8’de kontak kartları gösterilmiştir.

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_ (THERMAL) (1)

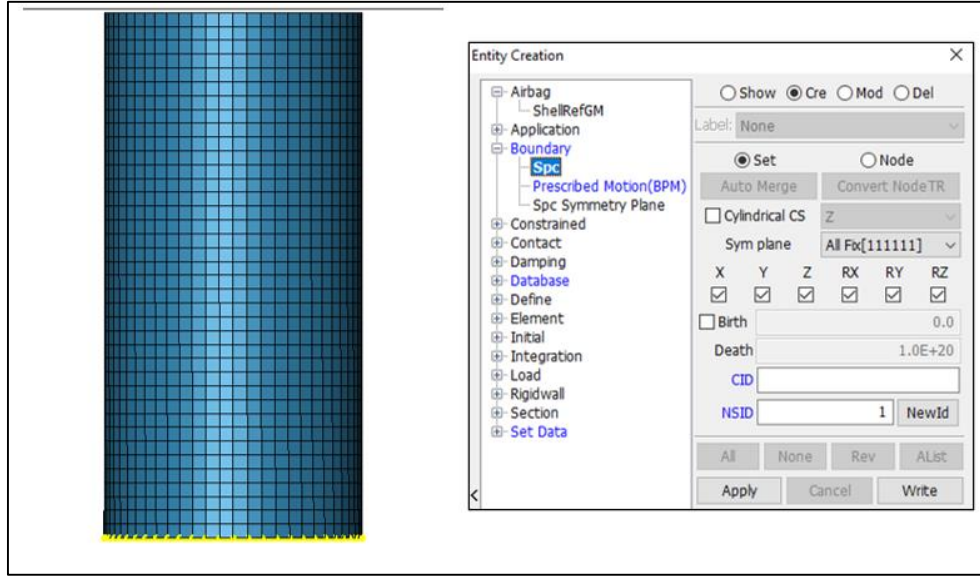
1	CID	TITLE						
	4	tube-resin_mov						
☐ MPP1 ☐ MPP2								
2	IGNORE	BCKET	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPARM8
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	2	2	2	3	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	10.0000000	0	0.0	0.0
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
☐ Thermal ☐ T_Friction ☐ A ☐ AB ☐ ABC ☐ ABCD ☐ ABCDE ☐ ABCDEF								

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_ (1)

1	CID	TITLE						
	3	all part						
☐ MPP1 ☐ MPP2								
2	IGNORE	BCKET	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPARM8
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	2	0	2	0	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3000000	0.2000000	0.0	10.0000000	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
☐ A ☐ AB ☐ ABC ☐ ABCD ☐ ABCDE ☐ ABCDEF								

Şekil 5.8. Kontak kartları

Analizlerin doğru çalışması için sınır koşulları tanımlanmalıdır. Bu çalışmada iki farklı sınır koşulu tanımlanmıştır. Biyo-ilhamlı yapı ve alüminyum tüpün hareketli plaka karşısında zeminden kaymaması için Şekil 5.9’da görülen `BOUNDARY_SPC` kartı kullanılmıştır. Burada eksenlerdeki doğrusal hareketi ve dönme hareketi sınırlandırılmıştır.



Şekil 5.9. Sınır koşulları

Hareketli plakanın tek yönde hareketi için BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID kartı kullanılmıştır. Şekil 5.10'da görülen PID olarak hareketli plaka seçilmiş, serbestlik derecesi (DOF) ile sadece tek bir yönde hareket sağlanmış, LCID ile plakanın hız eğrisi 2 mm/ms olarak tanımlanmış ve hız-ivme-yer değiştirme (VAD) ile tanımlanan grafiğin hız eğrisi olduğu ifade edilmiştir.

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_(ID) (1)								
ID	TITLE							
1	Rigid_Motion							
1	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
1	3	1	0	2	1.0000000	0	1.000e+28	0.0
2	OFFSET1	OFFSET2	MRB	NODE1	NODE2			
2	0.0	0.0	0	0	0			

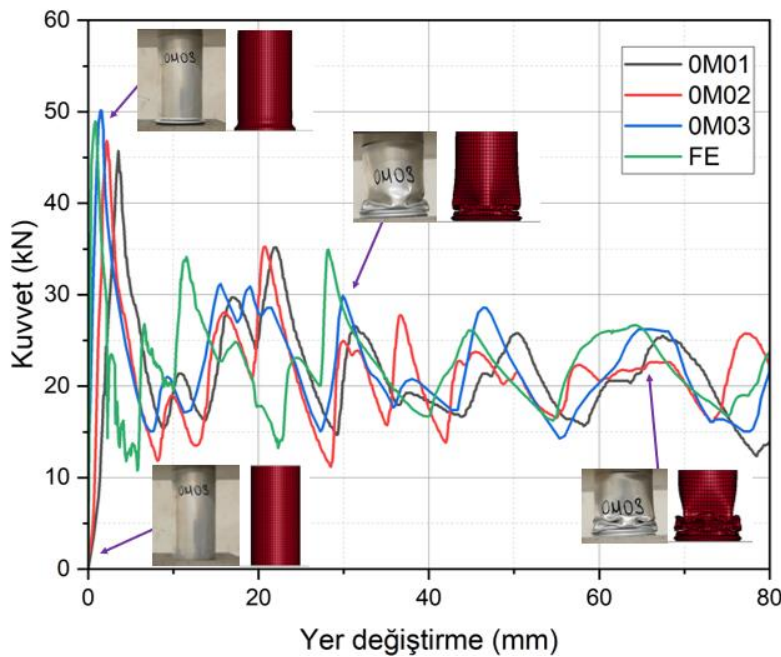
Şekil 5.10. Hareketli plaka için hız tanımlama kartı

6. DENEY SONUÇLARI KULLANILARAK SONLU ELEMANLAR MODELLERİNİN DOĞRULANMASI

Bu bölümde hibrit enerji sönümleyici profillere yönelik yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak sonlu elemanlar modellerinin doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analizler Ls-Dyna çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilerek performans metrikleri hesaplanmıştır. Deney sonuçlarının ortalama değerleri ile analiz sonuçları arasındaki % hata değerleri tespit edilmiştir.

0M modelinin 0° Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Deformasyon görüntüleri ile analiz görüntüleri karşılaştırıldığında Şekil 6.1’de görüldüğü üzere birebir aynı katlanma gözlenmiştir. Bu da performans metriklerinin % hata değerinin düşük olmasına neden olmuştur. Kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde ilk deformasyon 48 kN civarında meydana gelmiş ve deney eğrileri ile analiz eğrileri aynı kuvvet aralığında salınım yapmıştır. Bu nedenle maksimum ezilme kuvvetlerinin yakın olmasından dolayı Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi enerji değerleri de birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 6.1. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği

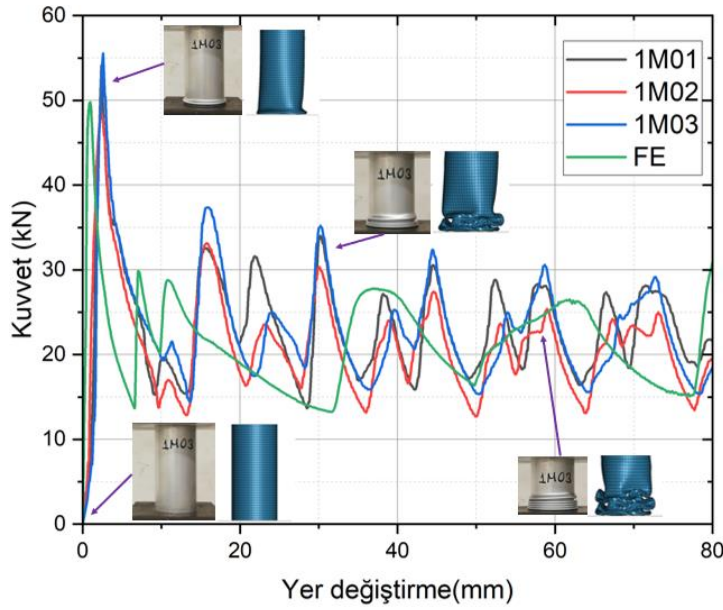
Çizelge 6.1. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin performans metrikleri

Profil	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	%Hata η	E_m (kJ/kg)	%Hata E_m
Deney (ORT)	0,124	80	1,727	47,517	21,592	45,47		13,930	
Analiz (FE)	0,124	80	1,788	48,952	22,350	45,65	0,4	13,282	4,7

Performans metrikleri incelendiğinde ortalama ezilme kuvvetleri arasında 0,758 kN, toplam sönümlenen enerjiler arasında ise 0,061 kJ bir fark elde edilmiştir. Hatalara bakıldığında ise ezilme kuvvetleri arasında %0,4, özgül enerji sönümlemeleri arasında %4,7'lik fark söz konusudur.

1M modelinin 0° Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Analizlerin devamında 1M modeli incelenmiştir. Biyo-ilhamlı yapının kırılma özelliklerinin tam olarak tanımlanabildiği bir malzeme kartı bulunmadığından analizlerde kırılma gözlenememiştir. Bu nedenle Şekil 6.2'ye bakıldığında katlanma yapısının aynı olmadığı görülmektedir. Grafik incelendiğinde ise eğrilerin aynı kuvvet aralığında salınım gösterdiği ve maksimum ezilme kuvvetlerinin arasında az bir farkın olduğu görülmüştür. Analizler sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği kullanılarak Çizelge 6.2'de verilen performans metrikleri hesaplanmıştır.



Şekil 6.2. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değistirme grafiği

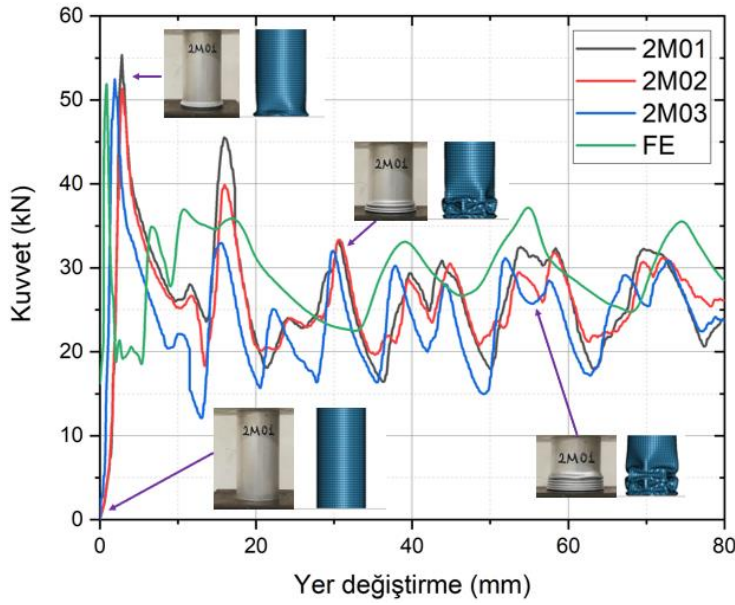
Çizelge 6.2. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin performans metrikleri

Profil	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	%Hata η	E_m (kJ/kg)	%Hata E_m
Deney (ORT)	0,188	80	1,799	52,884	22,488	42,55		9,569	
Analiz (FE)	0,188	80	1,718	49,802	21,475	43,12	1,3	9,138	4,5

Performans metrikleri incelendiğinde ortalama ezilme kuvvetleri sonuçları arasında 1,013 kN'luk bir fark vardır. Maksimum ezilme kuvvetleri ve ortalama ezilme kuvvetlerinin arasında farkın çok olmamasıyla beraber toplam sönümlenen enerji ve özgül enerji sönümleme değerinin yakın çıkmasına neden olmuştur. Hatalara bakıldığında ezilme kuvvet verimleri arasında %1,3'lik, özgül enerji sönümleme değerleri arasında ise %4,5'lik bir fark olduğu tespit edilmiştir.

2M modelinin 0° Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Hibrit enerji sönümleyiciler için aynı kartlar kullanıldığından 1M modelde bahsedilen durumların burada da geçerli olmasının yanında yapıdaki hücre sayının da artması elde edilen sonuçları etkilemiştir. Bu nedenle sonuçlar arasında farklar meydana gelmiştir. Aşağıdaki Şekil 6.3'te kuvvet-yer değiştirme eğrisi, Çizelge 6.3'te ise performans metrikleri verilmiştir.



Şekil 6.3. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği

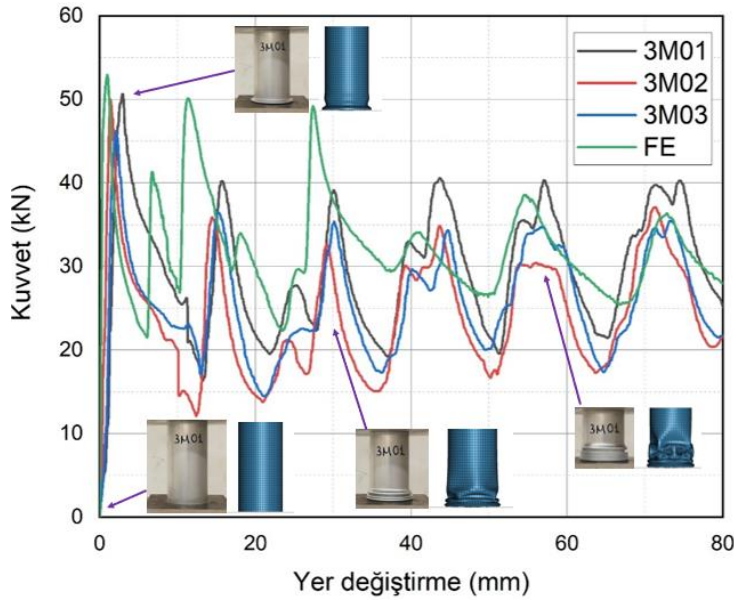
Çizelge 6.3. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin performans metrikleri

Profil	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	%Hata η	E_m (kJ/kg)	%Hata E_m
Deney (ORT)	0,241	80	2,049	53,051	25,613	48,30		8,502	
Analiz (FE)	0,241	80	2,336	51,885	29,200	56,26	16,5	9,693	14

Toplam sönümlenen enerjilerde 0,287 kJ'luk, maksimum ezilme kuvvetleri arasında 1,166 kN'luk bir fark söz konusudur. Salınımların benzer olmamasından dolayı ortalama ezilme kuvvetleri arasında 3,587 kN'luk fark meydana gelmiştir. Analizler sonucunda ezilme kuvveti için % hata değeri %16,5, özgül enerji sönümleme için %14 bulunmuştur.

3M modelinin 0° Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Kuvvet-yer değiştirme grafikleri incelendiğinde sonlu elemanlar analiz sonucunda elde edilen eğrinin ilk üç katlanmada deney sonuçlarına göre biraz fazla, daha sonraki katlanmalarda ise benzer çıktığı görülmüştür (Şekil 6.4.). Deformasyon esnasında hücreler iç içe geçtikten sonra ortaya çıkan mukavemet artmaktadır. Bu durum parçayı deforme etmek için gerek duyulan kuvvetin daha fazla olmasına sebebiyet vermektedir. Böylelikle analizlerde deformasyon kuvvetleri anlık olarak bir miktar fazla çıktığı görülmüştür. Çizelge 6.4'te performans metrikleri verilmiştir.



Şekil 6.4. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği

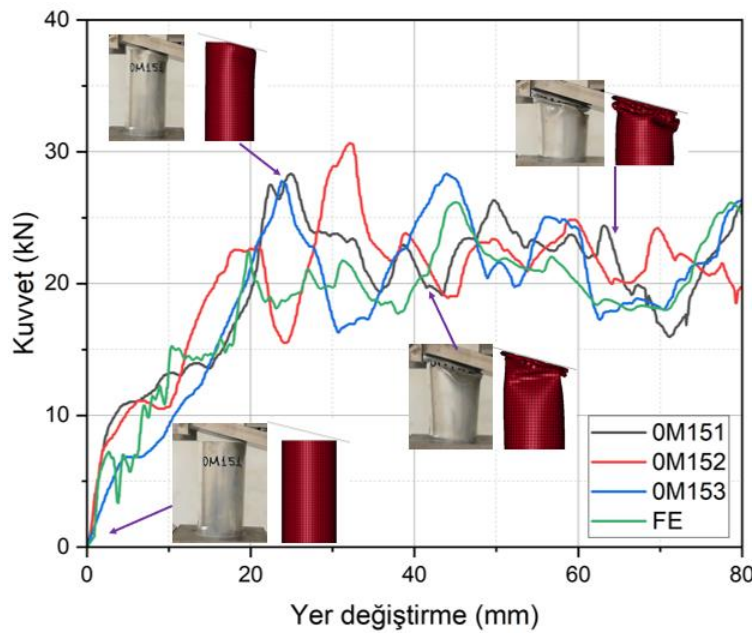
Çizelge 6.4. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin performans metrikleri

Profil	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	%Hata η	E_m (kJ/kg)	%Hata E_m
Deney (ORT)	0,380	80	2,118	48,954	26,479	54,11		5,575	
Analiz (FE)	0,380	80	2,560	52,872	32,000	60,52	11,9	6,737	20,8

Maksimum ezilme kuvvetleri arasında 3,918 kN’luk bir fark olsa da analiz eğrisinin deney eğrilerine göre daha yüksek kuvvet aralığında salınım yapması ortalama ezilme kuvvetinin daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Eğri salınımının daha yüksek kuvvetlerde seyretmesi, altında kalan alanı büyüteceğinden toplam sönümlenen enerjiyi artıracaktır. Buna bağlı olarak özgül enerji sönümlenmesi de fazla çıkmıştır. Hata değerlerine bakıldığında ise ezilme kuvveti verimi için %11,9, özgül enerji sönümlenmesi için %20,8’luk fark ortaya çıkmıştır.

0M modelinin 15° Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Plaka açıları 15° olacak şekilde ayarlanmış ve 0M modellerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda Şekil 6.5’teki kuvvet-yer değiştirme grafiği elde edilmiştir. Eğriler kıyaslandığında benzer şekilde salınım yaptığı görülmüştür. Grafikte 0M151 modeli için deney ve analiz deformasyon görüntüleri verilmiştir. Çizelge 6.5’te performans metrikleri verilmiştir.



Şekil 6.5. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği

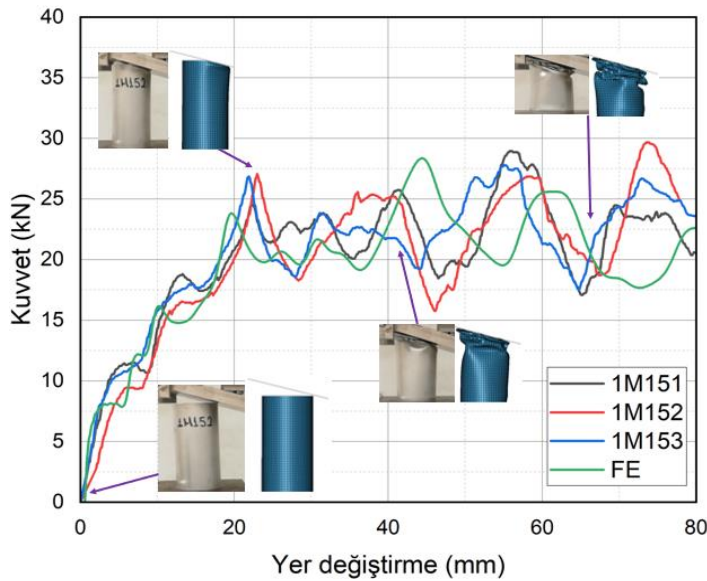
Çizelge 6.5. 0M151, 0M152 ve 0M153 modellerinin performans metrikleri

Profil	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	%Hata η	E_m (kJ/kg)	%Hata E_m
Deney (ORT)	0,124	80	1,570	29,087	19,621	67,51		12,659	
Analiz (FE)	0,124	80	1,473	26,170	18,413	70,35	4,2	12,061	4,7

Analiz ve deney eğrilerinin benzerliği sonuçların yakın çıkmasına sebep olmuştur. Salınımlara bağlı olan analiz ve deneylerin toplam sönümlenen enerji değerlerinde 0,097 kJ'luk bir fark mevcuttur. Hatalar incelendiğinde ezilme kuvvet verimi için %4,2, özgül enerji sönümlemesi için %4,7'lik fark oluşmuştur.

1M modelinin 15° Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Aynı şartlarda yapılan analizlerin devamında 1M model incelenmiştir. Analizler sonucunda kuvvet-yer değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Şekil 6.6'da kuvvet-yer değiştirme grafiğine, Çizelge 6.6'da ise bu grafikten hesaplanan performans metriklerine yer verilmiştir. 1M152 modelinin analiz-deney deformasyon görüntüleri belirli aralıklarla grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 6.6. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği

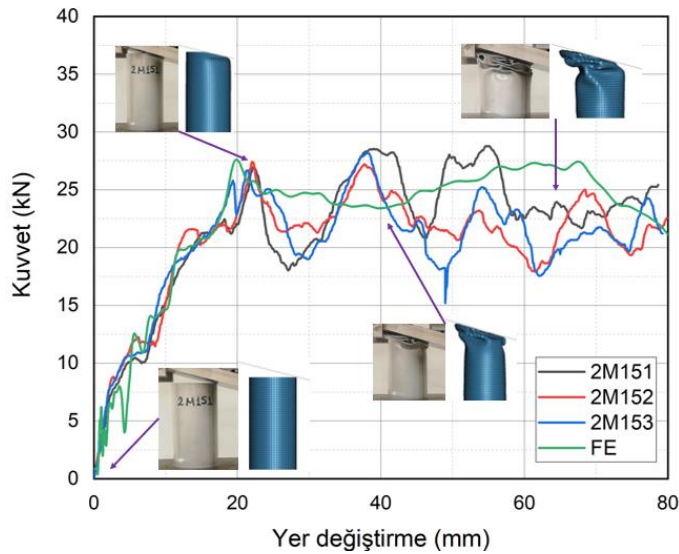
Çizelge 6.6. 1M151, 1M152 ve 1M153 modellerinin performans metrikleri

Profil	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	%Hata η	E_m (kJ/kg)	%Hata E_m
Deney (ORT)	0,188	80	1,632	28,808	20,396	70,87		8,674	
Analiz (FE)	0,188	80	1,567	28,542	19,588	68,62	3,2	8,330	4

Analiz sonuçları deney sonuçlarıyla kıyaslandığında eğrilerin benzer şekilde elde edildiği görülmüştür. Ortalama ezilme kuvvetleri arasında 0,808 kN, maksimum ezilme kuvvetleri arasında 0,266 kN ve toplam sönümlenen enerjiler arasında 0,065 kJ'luk bir fark vardır. Hata oranları ise ezilme kuvveti verimi için %3,2 özgül enerji sönümlemesi için %4 olarak elde edilmiştir.

2M modelinin 15° Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Aynı şartlar için modellenen 2M'nin analiz sonuçlarından Şekil 6.7'deki kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler sayesinde Çizelge 6.7'deki performans metrikleri hesaplanmıştır. İlk deformasyondan sonra açığa bağlı olarak hibrit profilin içerisinde biyo-ilhamlı yapı kısa bir sürede kırılmaya başlamış, bu durum profilin çok fazla salınım yapmadan katlanmanın devam etmesine neden olmuştur.



Şekil 6.7. 2M151, 2M152 ve 2M153 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği

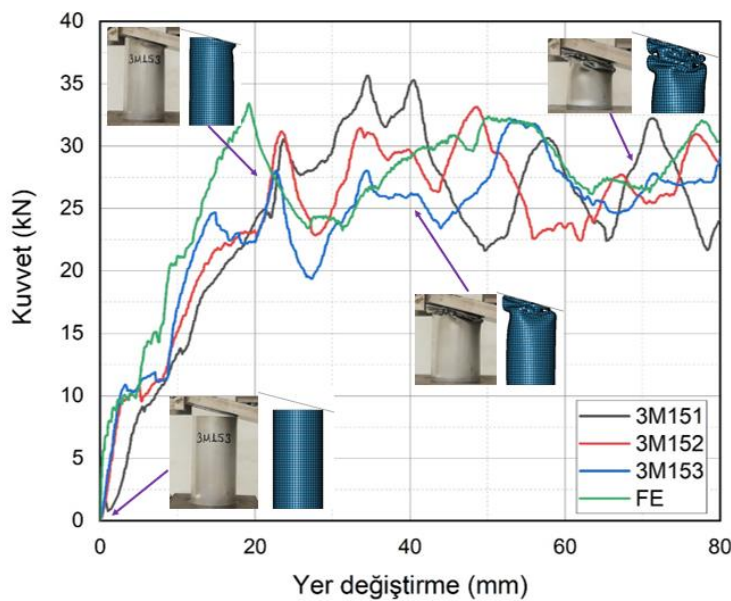
Çizelge 6.7. 2M151, 2M152 ve 2M153 modellerinin performans metrikleri

Profil	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	%Hata η	E_m (kJ/kg)	%Hata E_m
Deney (ORT)	0,241	80	1,657	28,152	20,708	73,56		6,882	
Analiz (FE)	0,241	80	1,810	27,600	22,625	81,97	11,4	7,519	9,3

Performans metrikleri incelendiğinde sonuçlarda ortalama ezilme kuvveti için 1,917 kN, toplam sönümlenen enerji için 0,153 kJ ve maksimum ezilme kuvveti için 0,552 kN’luk bir fark vardır. Hata değerlerinde ise ezilme kuvveti verimi için %11,4, özgül enerji sönümlenmesi için %9,3’lük fark tespit edilmiştir.

3M modelinin 15° Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Doğrulama çalışmalarının sonuncusu olarak 3M modeli incelenmiştir. Analizler sonunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi Şekil 6.8. üzerinde deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Elde edilen grafik verileri ile Çizelge 6.8’deki performans metrikleri hesaplanmış ve ezilme kuvveti verimi ile özgül enerji sönümlenme değeri için % hata değerleri bulunmuştur.



Şekil 6.8. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 6.8. 3M151, 3M152 ve 3M153 modellerinin performans metrikleri

Profil	m_T (kg)	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	η (%)	%Hata η	E_m (kJ/kg)	%Hata E_m
Deney (ORT)	0,380	80	1,923	33,626	24,033	71,58		5,060	
Analiz (FE)	0,380	80	1,880	33,572	23,500	69,99	2,2	4,947	2,2

Grafikteki eğrilerin salınımlarının yaklaşık aynı kuvvet aralığında olduğu görülmektedir. Bu da değerlerin yakın elde edileceği anlamına gelmektedir. Ortalama ezilme kuvveti için 0,533 kN, maksimum ezilme kuvveti için 0,054 kN’luk bir fark ortaya çıkmıştır. Hata oranlarına bakıldığında ezilme kuvveti verimi ve özgül enerji sönmüleme değerleri için %2,2’lik bir değer elde edilmiştir. Burada analiz-deney sonuçlarındaki hata oranlarının düşük çıkmasının sebebi yapının katlanma esnasında açılmal deformasyona bağlı olarak kuvvetin azalmasından dolayı daha düşük kuvvet değerlerinin meydana gelmesidir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Tez kapsamında, otomobillerde kullanılan ve önemli bir pasif güvenlik sistemi elemanı olan enerji sönümleyici profillerin enerji sönümleme kapasitelerinin geliştirilmesine yönelik deneysel ve sonlu elemanlar çalışmaları yapılmıştır. Çalışma iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada araçlarda daha önce hiç kullanılmamış, doğadan esinlenilerek tasarlanan özgün yapıdaki enerji sönümleyici biyo-ilhamlı yapıdaki profiller tasarlanarak üretilmiştir. Üretilen bu modeller standart alüminyum profiller içerisine yerleştirilerek özgün hibrit enerji sönümleyici yapılar elde edilmiştir. Bu yapılar laboratuvar ortamında yarı-statik basma test cihazı ile 0° ve 15° 'lik açı ile 80 mm deforme edilmiş ve performans metrikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada deneyler ile elde edilen test sonuçları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar modelleri doğrulanmıştır. Yapılan tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. 0° deformasyon açısında gerçekleştirilen deneylerde toplam sönümlenen enerji bakımından en yüksek değer 3M modelinde elde edilmiştir. Buna karşın biyo-ilhamlı yapılar arasında en fazla kütleyle 3M modeli sahip olduğu için özgül sönümleme enerji miktarı diğer modellere nazaran daha az çıkmıştır.
2. 0° deformasyon açısında maksimum ezilme kuvveti en düşük içi boş alüminyum enerji sönümleyici yapıda çıkmasına rağmen ortalama ezilme kuvveti bakımından en yüksek değere sahip profil 3M modelidir. Bu nedenle en yüksek ezilme kuvveti verimi %54 ile 3M modelinden elde edilmiştir.
3. 0° deformasyon açısında özgül enerji sönümleme kapasitesi bakımından en iyi performansı 0M modeli, ezilme kuvveti verimi bakımından ise 3M modeli göstermiştir.
4. 15° deformasyon açısında toplam sönümlenen enerji miktarı 1,923 kJ ile en yüksek 3M modelinde çıkmasına rağmen hibrit yapıların boş profile kıyasla kütlelerinin fazla olması içi boş alüminyum profilin özgül enerji sönümleme miktarının 12,659 kJ/kg ile daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur.
5. 15° deformasyon açısında ortalama ezilme kuvveti en fazla 3M modelinden elde edilmiştir. Bununla birlikte 2M modelinin maksimum ezilme kuvveti 3M modeline

kıyasla 5,473 kN daha azdır. Bu nedenle en yüksek ezilme kuvveti verimi %73,57 ile 2M modelinde elde edilmiştir.

6. 15° deformasyon açısında 0M modeli özgül enerji sönümleme miktarı bakımından, 2M modeli ise ezilme kuvveti verimi bakımından en iyi performansı göstermiştir.
7. Tüm deney koşullarında boş alüminyum profillerin içerisine özgün olarak tasarlanan biyo-ilhamlı yapıları yerleştirmenin toplam sönümlenen enerji ve ezilme kuvveti verimini kayda değer bir şekilde arttırdığı tespit edilmiştir.
8. Sonlu elemanlar modellerini doğrulama çalışmalarında hata oranları genellikle %10 civarlarında çıkmıştır.

7.2. Öneriler

1. Özgün olarak tasarlanan biyo-ilhamlı yapılar metal veya daha esnek formlarda farklı reçine malzemelerinden üretilebilir.
2. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 0° ve 15°'nin dışında farklı açılarda modellerin performansları incelenebilir.
3. İleriki aşamalarda özellikle biyo-ilhamlı yapıların optimizasyonları üzerine çalışmalar yapılabilir.
4. Üretilen hibrit yapıların içleri metal veya poliüretan köpük gibi farklı malzemeler doldurularak performans metrikleri kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

1. Arıcı, S., İnci, H. ve Altın, M. (2022). *Biyo-ilhamlı profillerin enerji sönümleme kapasitelerinin deneysel olarak incelenmesi*. 1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences (ICEANS 2022). Konya.
2. İnternet: TÜİK. (2022). Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, 2021. URL: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Karayolu-Trafik-Kaza-Istatistikleri-2021-45658>, Son Erişim Tarihi: 02.02.2023.
3. Inallu, A. T. (2014). *Design of Steering Wheel Force Feedback System with Focus on Lane Keeping Assistance Applied in Driving Simulator*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. Oktay, G. (2008). *Design and simulation of a traction control system for an integrated active safety system for road vehicles*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
5. Huang, H., Hu, S. ve Abdel-Aty, M. (2014). Indexing crash worthiness and crash aggressivity by major car brands. *Safety science*. 62, 339-347.
6. İnternet: EuroNCAP. Mobil Progresif Deforme Olabilen Bariyer. URL: <https://www.euroncap.com/tr/araç-guevenligi/derecelerin-açiklamaları/yetişkin-yolcu-koruması/oenden-çarpmalar/mobil-progresif-deforme-olabilen-bariyer/>, Son Erişim Tarihi: 13.11.2022.
7. İnternet: EuroNCAP. Yan Darbe. URL: <https://www.euroncap.com/tr/ara%C3%A7-guevenli%C4%9Fi/derecelerin-a%C3%A7%C4%B1klamalar%C4%B1/yeti%C5%9Fkin-yolcu-korumas%C4%B1/yandan-%C3%A7arpmalar/yan-darbe/>, Son Erişim Tarihi: 13.11.2022.
8. İnternet: EuroNCAP. Yandan Dikme Çarpma Testi. URL: <https://www.euroncap.com/tr/ara%C3%A7-guevenli%C4%9Fi/derecelerin-a%C3%A7%C4%B1klamalar%C4%B1/yeti%C5%9Fkin-yolcu-korumas%C4%B1/yandan-%C3%A7arpma-testi/>, Son Erişim Tarihi: 13.11.2022.
9. İnternet: EuroNCAP. Travma. URL: <https://www.euroncap.com/tr/araç-guevenligi/derecelerin-açiklamaları/yetişkin-yolcu-koruması/arkadan-çarpmalar/travma/#>, Son Erişim Tarihi: 13.11.2022.
10. San Ha, N. ve Lu, G. (2020). A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications. *Composites Part B: Engineering*. 181, 107496.
11. Chen, B., Zou, M., Liu, G., Song, J. ve Wang, H. (2018). Experimental study on energy absorption of bionic tubes inspired by bamboo structures under axial crushing. *International Journal of Impact Engineering*. 115, 48-57.

12. Akbulut, E. F. (2017). *The investigation of the static and dynamic crushing behavior of an energy absorbing biomimetic armor*, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
13. Mirkhalaf, M., Dastjerdi, A. K. ve Barthelat, F. (2014). Overcoming the brittleness of glass through bio-inspiration and micro-architecture. *Nature Communications*. 5(1), 3166.
14. Mirkhalaf, M., Sunesara, A., Ashrafi, B. ve Barthelat, F. (2019). Toughness by segmentation: Fabrication, testing and micromechanics of architected ceramic panels for impact applications. *International Journal of Solids and Structures*. 158, 52-65.
15. Fischer, S. F., Thielen, M., Weiß, P., Seidel, R., Speck, T., Bührig-Polaczek, A. ve Bünck, M. (2014). Production and properties of a precision-cast bio-inspired composite. *Journal of Materials Science*. 49, 43-51.
16. Chen, J., Zhang, X., Okabe, Y., Saito, K., Guo, Z. ve Pan, L. (2017). The deformation mode and strengthening mechanism of compression in the beetle elytron plate. *Materials & Design*. 131, 481-486.
17. Gu, G. X., Takaffoli, M., Hsieh, A. J. ve Buehler, M. J. (2016). Biomimetic additive manufactured polymer composites for improved impact resistance. *Extreme Mechanics Letters*. 9, 317-323.
18. Wang, C., Li, Y., Zhao, W., Zou, S., Zhou, G. ve Wang, Y. (2018). Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure. *International Journal of Mechanical Sciences*. 138, 489-501.
19. Wang, Z., Sun, Y., Wu, H. ve Zhang, C. (2018). Low velocity impact resistance of bio-inspired building ceramic composites with nacre-like structure. *Construction and Building Materials*. 169, 851-858.
20. Huang, J., Durden, H. ve Chowdhury, M. (2011). Bio-inspired armor protective material systems for ballistic shock mitigation. *Materials & Design*. 32(7), 3702-3710.
21. Özsoy, K. ve Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3B Baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. 1(1), 36-48.
22. Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B Baskı): teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 24(2), 373-392.
23. Yılmaz, G. (2021). Bilgisayarlı tomografi verilerinden anatomik ayak kemik yapısının ultraviyole ledli 3 boyutlu yazıcı ile üretimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. (22), 128-133.
24. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C. ve Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*. (031), 53-70.
25. Van Noort, R. (2012). The future of dental devices is digital. *Dental Materials*. 28(1), 3-12.

26. Altın, M., Acar, E. ve Güler, M. A. (2021). Crashworthiness optimization of hierarchical hexagonal honeycombs under out-of-plane impact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 235(6), 963-974.
27. Song, X., Sun, G., Li, G., Gao, W. ve Li, Q. (2013). Crashworthiness optimization of foam-filled tapered thin-walled structure using multiple surrogate models. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 47, 221-231.
28. Hussain, N. N., Regalla, S. P. ve Rao, Y. V. D. (2017). Comparative study of trigger configuration for enhancement of crashworthiness of automobile crash box subjected to axial impact loading. *Procedia Engineering*. 173, 1390-1398.
29. Wang, J., Zhang, Y., He, N. ve Wang, C. H. (2018). Crashworthiness behavior of Koch fractal structures. *Materials & Design*. 144, 229-244.
30. Woelke, P., Abboud, N., Tennant, D., Hansen, E. ve Mcarthur, C. (2012). Ship impact study: Analytical approaches and finite element modeling. *Shock and Vibration*. 19(4), 515-525.
31. Xu, X., Zhang, Y., Wang, J., Jiang, F. ve Wang, C. H. (2018). Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns. *Composite Structures*. 194, 36-48.
32. Sun, G., Deng, M., Zheng, G. ve Li, Q. (2019). Design for cost performance of crashworthy structures made of high strength steel. *Thin-Walled Structures*. 138, 458-472.
33. Saenz-Dominguez, I., Tena, I., Esnaola, A., Sarrionandia, M., Torre, J. ve Aurrekoetxea, J. (2019). Design and characterisation of cellular composite structures for automotive crash-boxes manufactured by out of die ultraviolet cured pultrusion. *Composites Part B: Engineering*. 160, 217-224.
34. Lu, R., Gao, W., Hu, X., Liu, W., Li, Y. ve Liu, X. (2018). Crushing analysis and crashworthiness optimization of tailor rolled tubes with variation of thickness and material properties. *International Journal of Mechanical Sciences*. 136, 67-84.
35. Mamalis, A., Manolakos, D., Spentzas, K., Ioannidis, M., Koutroubakis, S. ve Kostazos, P. (2009). The effect of the implementation of circular holes as crush initiators to the crushing characteristics of mild steel square tubes: experimental and numerical simulation. *International Journal of Crashworthiness*. 14(5), 489-501.
36. Isaac, C. W. ve Oluwole, O. (2016). Energy absorption improvement of circular tubes with externally press-fitted ring around tube surface subjected under axial and oblique impact loading. *Thin-Walled Structures*. 109, 352-366.
37. Zarei, H., Kröger, M. ve Albertsen, H. (2008). An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. *Composite Structures*. 85(3), 245-257.
38. Qi, C., Yang, S. ve Dong, F. (2012). Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading. *Thin-Walled Structures*. 59, 103-119.

39. Altın, M. (2019). Değişik geometrilere sahip enerji sönümleyici profillerin açılı yükler altında performanslarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 34(3), 1517-1526.
40. Vinayagar, K. ve Kumar, A. S. (2017). Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*. 112, 184-193.
41. Fischer, S. F., Thielen, M., Loprang, R. R., Seidel, R., Fleck, C., Speck, T. ve Bührig-Polaczek, A. (2010). Pummelos as concept generators for biomimetically inspired low weight structures with excellent damping properties. *Advanced Engineering Materials*. 12(12), B658-B663.
42. Seidel, R., Thielen, M., Schmitt, C., Bührig-Polaczek, A., Fleck, C. ve Speck, T. (2010). Fruit walls and nut shells as an inspiration for the design of bio-inspired impact resistant hierarchically structured materials. *Design and Nature V*. 421-430.
43. Bührig-Polaczek, A., Fleck, C., Speck, T., Schüller, P., Fischer, S., Caliaro, M. ve Thielen, M. (2016). Biomimetic cellular metals—using hierarchical structuring for energy absorption. *Bioinspiration & Biomimetics*. 11(4), 045002.
44. Zhang, L., Bai, Z. ve Bai, F. (2018). Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections. *Thin-Walled Structures*. 122, 42-51.
45. Yang, X., Sun, Y., Yang, J. ve Pan, Q. (2018). Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure. *Thin-Walled Structures*. 125, 1-11.
46. Xiao, Y., Yin, H., Fang, H. ve Wen, G. (2016). Crashworthiness design of horsetail-bionic thin-walled structures under axial dynamic loading. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 12, 563-576.
47. Yang, J., Gu, D., Lin, K., Yang, Y. ve Ma, C. (2019). Optimization of bio-inspired bi-directionally corrugated panel impact-resistance structures: Numerical simulation and selective laser melting process. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 91, 59-67.
48. Fu, J., Liu, Q., Liufu, K., Deng, Y., Fang, J. ve Li, Q. (2019). Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption. *Thin-Walled Structures*. 135, 400-413.
49. San Ha, N., Lu, G. ve Xiang, X. (2018). High energy absorption efficiency of thin-walled conical corrugation tubes mimicking coconut tree configuration. *International Journal of Mechanical Sciences*. 148, 409-421.
50. Hu, D., Wang, Y., Song, B., Dang, L. ve Zhang, Z. (2019). Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing. *Composites Part B: Engineering*. 162, 21-32.
51. Liu, S., Tong, Z., Tang, Z., Liu, Y. ve Zhang, Z. (2015). Bionic design modification of non-convex multi-corner thin-walled columns for improving energy absorption through adding bulkheads. *Thin-Walled Structures*. 88, 70-81.

52. İnternet: Anycubic. URL: <https://www.anycubic.com/>, Son Erişim Tarihi: 22.11.2022.
53. TS EN ISO 527-2. (2012). Plastikler-Çekme özelliklerinin tayini-Bölüm 2: Kalıplama ve ekstrüzyon plastikleri için deney şartları.
54. Barsoum, I., Khan, F., Molki, A. ve Seibi, A. (2014). Modeling of ductile crack propagation in expanded thin-walled 6063-T5 aluminum tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 80, 160-168.
55. Livermore Software Technology Corporation. (2006). *Ls-Dyna Theory Manual*. Livermore, California.
56. Livermore Software Technology Corporation. (2010). *Ls-Dyna Keyword User's Manual*. Livermore, California.
57. Cerit, M. E. (2011). *Şehirlerarası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
58. Altın, M. (2017). *Taşıtlarda kullanılan metalik köpük içeren çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
59. Özer, F. (2011). *Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerde şekil verme operasyonları sonucu oluşan geri yayılanmanın doğru tahmini ve telafisi*, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
60. Wu, J., Song, G., Yeh, C.-P. ve Wyatt, K. (1998). *Drop impact simulation and test validation of telecommunication products*. Sixth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Cat. No. 98CH36208) - ITherm'98. Seattle, Washington, USA.
61. Aktaş, C. (2021). *Tetra kiral ve içe girintili çarpışma kutularının performanslarının deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmesi ve optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.



Gazili olmak ayrıcalıktır