

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİYO İLHAMLI HİBRİT BİR ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ PROFİLİN ENERJİ  
SÖNÜMLEME PERFORMANSININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cihan SAVAŞ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem ACAR**

**AĞUSTOS 2023**





## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Cihan SAVAŞ



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BİYO İLHAMLI HİBRİT BİR ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ PROFİLİN ENERJİ SÖNÜMLEME PERFORMANSININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Cihan SAVAŞ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Ağustos 2023

Biyo ilhamlı yapılar sahip oldukları yüksek mukavemet ve hafiflikten dolayı otomotiv, savunma, uzay ve havacılık ve biyomedikal gibi birçok endüstriyel sektörde kullanılmaktadır. Son yıllarda üç boyutlu baskı ile üretim ve simülasyon teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte biyo ilhamlı yapılar enerji sönmleyici profiller olarak kullanılmaya başlanmıştır. Hurma ağacının (Lat. Phoenix dactylifera) gövdesinin kesitinden esinlenilerek elde edilen spiral parça, içi boş alüminyum tüpün içerisine eklenerek biyo ilhamlı hibrit bir enerji sönmleyici profil elde edilmiştir. Bu biyo ilhamlı hibrit enerji sönmleyici profilin enerji sönmleme performansı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. ANSYS LS-DYNA kullanılarak oluşturulan benzetim modelleri, aksel ezilme testleriyle doğrulanmıştır. Üç farklı tasarım değişkenine (spiral devri, et kalınlığı ve hücre sayısı) sahip biyo ilhamlı hibrit enerji sönmleyici profilin enerji sönmleme performansını arttırmak için Yanıt Yüzey Metodu ve Kriging vekil modelleri oluşturularak tasarım eniyilemesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımındaki biyo ilhamlı hibrit enerji sönmleyici profilin, içi boş alüminyum profile göre özgül enerji sönmleme kapasitesinin (SEA)

ve ezilme kuvveti verimliliğinin (CFE) sırasıyla %17,2 ve %4,6 daha yüksek çıktığı saptanmıştır. Eniyileştirilmiş biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin, başlangıç tasarımına göre SEA ve tepe kuvvetinin sırasıyla %32,9 ve %47,6 oranında düştüğü fakat CFE'nin %37 oranında arttığı saptanmıştır. Ek olarak, eniyileştirilmiş biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin SEA'sı, içi boş alüminyum tüpe göre %21,3 oranında düşüş yaşarken, CFE'nin ise %43,3 oranında artış yaşadığı saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyo ilhamlı yapılar, Enerji sönümleyici profiller, Vekil modeller, Sonlu elemanlar analizi, ANSYS LS-DYNA.



## **ABSTRACT**

Master of Science

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ENERGY  
ABSORPTION PERFORMANCE OF A BIO-INSPIRED HYBRID ENERGY  
ABSORPTION PROFILE**

Cihan SAVAŞ

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Erdem ACAR

Date: August 2023

Bio-inspired structures are used in many industrial sectors such as automotive, defense, aerospace and biomedical due to their high strength and lightweight. In recent years, bio-inspired structures have been used as an energy-absorbing profile with the development of three-dimensional printing and simulation technologies. The spiral piece inspired by the trunk cross-section of the date palm tree (Lat. Phoenix dactylifera) was added to the hollow aluminum tube to create a bio-inspired hybrid energy-absorbing profile. The energy absorption performance of this bio-inspired hybrid energy-absorbing profile was investigated experimentally and numerically. Simulation models created by using ANSYS LS-DYNA were validated by axial crushing tests. Design optimization studies were carried out by using Response Surface Method and Kriging surrogate models in order to increase the energy absorption performance of the bio-inspired hybrid energy-absorbing profile with three different design variables (spiral revolution, wall thickness and cell number). It was obtained that the specific energy absorption capacity (SEA) and crash force efficiency (CFE) of the bio-inspired hybrid energy-absorbing profile in the initial design were %17,2 and %4,6 higher, respectively, compared to the hollow aluminum profile. It was obtained



that the SEA capacity and peak force of the optimized bio-inspired hybrid energy-absorbing profile decreased by %32,9 and %47,6, respectively, but the CFE increased by %37 compared to the initial design. In addition, the SEA capacity of the optimized bio-inspired hybrid energy-absorbing profile decreased by %21,3 compared to the hollow aluminum tube, while CFE increased by %43,3.

**Keywords:** Bio-inspired structures, Energy absorption profiles, Surrogate models, Finite element analysis, ANSYS LS-DYNA.



## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Erdem ACAR, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Mehmet Ali Güler ve Doç. Dr. Murat Altın'a ve destekleriyle her zaman yanımda olan eşime ve aileme çok teşekkür ederim. Ayrıca, sağladığı burs desteğinden dolayı TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne ve bu çalışmayı 222M364 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	ix
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	xi
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xiii
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xvii
<b>KISALTMALAR</b> .....	xix
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xxi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Tezin İçeriği .....	2
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>3</b>
2.1 Enerji Sönümleyici Profiller .....	3
2.2 Metal Enerji Sönümleyiciler .....	4
2.3 Kompozit Enerji Sönümleyiciler .....	9
2.4 Hibrit Enerji Sönümleyiciler .....	14
2.5 Biyo İlhamlı Enerji Sönümleyici Profiller .....	20
2.6 Enerji Sönümleme Performansı Göstergeleri.....	34
<b>3. BİYO İLHAMLI HİBRİT BİR ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ PROFİL TASARIMI</b> .....	<b>37</b>
3.1 Optimizasyon Probleminin Tanımı .....	38
3.2 Optimizasyonda Kullanılacak Yöntemler .....	39
3.3 Deney Tasarımının Oluşturulması .....	41
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>43</b>
4.1 Üç Boyutlu Baskı ile Numune ve Parça Üretimi .....	44
4.2 Numune Çekme Testleri .....	51
4.3 Parça Eksenel Ezilme Testleri.....	55
<b>5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>59</b>
5.1 Katı Model Oluşturulması.....	62
5.2 Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı.....	63
5.3 Sınır Koşulları ve Temas Algoritmaları.....	64
5.4 Sonlu Elemanlar Ağı Yakınsama Çalışmaları.....	65
5.5 Sonlu Elemanlar Modelinin Deneysel Çalışmalarla Doğrulanması.....	67
<b>6. ENİYİLEME ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>73</b>
6.1 Eniyileme Sonuçları .....	73
6.2 Optimum Tasarım Performansının Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları.....	73
6.3 Optimum Tasarımın Başlangıç Tasarımıyla ve İçi Boş Profil ile Kıyaslanması .....	75
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>77</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>79</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>91</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Çarpışma kutularının araç içerisindeki konumları .....	3
Şekil 2.2: Helikopterde kullanılan örnek bir enerji sönümleyici profil . ....	4
Şekil 2.3: Kağıt model (a) ve deneysel sonuç (b) . ....	4
Şekil 2.4: Dairesel alüminyum tüpün aksel ezilme altındaki görüntüsü . ....	5
Şekil 2.5: Enerji sönümleyici (a) ve diyaframın (b) ölçüleri . ....	6
Şekil 2.6: Enerji sönümleyici profillerin şematik kesit görüntüsü . ....	7
Şekil 2.7: Enerji sönümleyici profilin oluk geometrisi . ....	8
Şekil 2.8: Origami desenli üç farklı tüp . ....	8
Şekil 2.9: Beş hücreli LVT (a) dokuz hücreli LVT (b) ve değişken kalınlık yapısı (c) .....	9
Şekil 2.10: CFRP tüpün deneysel (a) ve nümerik (b) aksel ezilme sonuçları .....	10
Şekil 2.11: Numunenin deneyden önceki (a) ve sonraki (b) görüntüsü .....	10
Şekil 2.12: Delik açılmış kare kesitli CFRP tüp: deneysel (a) ve nümerik (b) .....	11
Şekil 2.13: Çok hücreli CFRP tüpün ezilme davranışı: deneysel (a) ve nümerik (b).12	
Şekil 2.14: Dikey kırışların uç içerisindeki konumu (a) ve ezilme testi sonrası görüntüsü (b) .....	13
Şekil 2.15: Çoklu dikiş desesine sahip CFRP ve GFRP (a) ve aksel ezilme görüntüleri (b) .....	13
Şekil 2.16: Yarı-statik aksel ezilme altındaki deformasyon görüntüsü .....	14
Şekil 2.17: Farklı köpük doluluk oranına sahip enerji sönümleyici profiller: %11.4 (a) %22.8 (b) %33.4 (c) %100 (d) .....	15
Şekil 2.18: Hibrit enerji sönümleyici profil . ....	15
Şekil 2.19: Dış katlanma (a) iç katlanma (b) kuvvet-yer değiştirme grafiği (c) .....	16
Şekil 2.20: Deneysel (a) ve nümerik (b) deformasyon sonuçları .....	16
Şekil 2.21: Ezilme testinden önce numuneler (a) ve içi bal peteği dolu CFRP tüplerin (b) ezilme sonuçları .....	17
Şekil 2.22: Boş GFRP tüp (a) içi PU dolu GFRP tüp (b) ve içi alüminyum köpük dolu GFRP tüpün (c) ezilme testi sonuçları .....	18
Şekil 2.23: CFRP (a) izotropik CFRP (b) alüminyum-CFRP hibrit (c) alüminyum (d) numuneler .....	18
Şekil 2.24: Tekil tüpler (a) ve hibrit tüpler (b) .....	19
Şekil 2.25: Örnek kalınlık değişimi . ....	20
Şekil 2.26: Peygamber devesi karidesi kuyruğu (Stomatopoda) . ....	21
Şekil 2.27: Japon gergedan böceğinin kanadından esinlenen kafes yapısı .....	21
Şekil 2.28: Üçlü periyodik yüzeyin birim hücre elemanı . ....	22
Şekil 2.29: Kıyı at kuyruğu yapısı ve biyo-ilhamlı tasarım . ....	22
Şekil 2.30: Çok hücreli ve biyo-ilhamlı çok hücreli tüplerin kesitleri .....	23
Şekil 2.31: Ejder kanı ağacı ve amazon nilüferi . ....	23
Şekil 2.32: Kemik yapısı ve haversian kanalı . ....	24
Şekil 2.33: Bambu ağacının mikroyapısı ve biyo ilhamlı enerji sönümleyici profiller . ....	24

Şekil 2.34: Bambu ağacı gövdesinde bulunan iletim damarları (a) ve BHTNS yapısı (b) .....	25
Şekil 2.35: Uğur böceği kanadının mikroyapısı (a) ve sırasıyla BHS, BHTS-1, BHTS-2 (b) .....	25
Şekil 2.36: Sukamışının yapısal formu ve biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil(a) ve bambu ağacının yapısal formu ve biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil (b) ...	26
Şekil 2.37: Sıfıncı dereceden (a) birinci dereceden (b) ve ikinci dereceden (c) hiyerarşik yapıların oluşumu .....	27
Şekil 2.38: EBEP biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil (a), geleneksel enerji sönümleyici profil (b) .....	27
Şekil 2.39: Biyo ilhamlı yenilikçi kafes yapısı . .....	28
Şekil 2.40: Tendon yapısı (a) ve boru şeklinde hiyerarşik yapıların oluşumu (b) . ...	28
Şekil 2.41: Latis yapılar (a), hibrit enerji sönümleyici profiller (b) .....	29
Şekil 2.42: Normal, birinci ve ikinci dereceden hiyerarşik balpetekleri .....	30
Şekil 2.43: Hindistan cevizi ağacı (a), konik oluklu tüp (b), konik oluklu tüpün sonlu elemanar modeli (c) .....	30
Şekil 2.44: Lotus kökü (a), birim eleman (b) ve LFT (c) .....	31
Şekil 2.45: Bambu ağacından esinlenen enerji sönümleyici profil .....	31
Şekil 2.46: Üç farklı biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil . .....	32
Şekil 2.47: At kuyruğu bitkisinin kesit görüntüsü (a), at kuyruğu bitkisinden esinlenilmiş ince cidarlı yapının kesit görüntüsü (b) . .....	33
Şekil 2.48: Balanus (a) ve biyo ilhamlı yapı(b) . .....	33
Şekil 2.48: Tipik kuvvet-yer değiştirme grafiği. ....	34
Şekil 3.1: Hurma ağacının kesiti(a) ve biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profil(b) .....	37
Şekil 3.2: Tasarım değişkenleri. ....	38
Şekil 3.3: Eniyileme çalışması akış şeması. ....	39
Şekil 3.4: Latin hiperküp örnekleme. ....	42
Şekil 4.1: Alüminyum boru profil (a) ve biyo ilhamlı spiral parça (b). ....	43
Şekil 4.2: Testere ile alüminyum boru profil kesimi. ....	44
Şekil 4.3: Toz yatak füzyon birleştirme işleminin jenerik gösterimi. ....	45
Şekil 4.4: Örnek bir eklemeli imalat işlemi. ....	46
Şekil 4.5: Biyo ilhamlı spiral enerji sönümleyici profilin STL uzantı görüntüsü. ....	47
Şekil 4.6: EOS M290 marka üç boyutlu baskı cihazı . .....	47
Şekil 4.7: Farklı sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin oda sıcaklığındaki çekme testi sonuçları . .....	49
Şekil 4.8: EOS T6 ısıtma işlem reçetesinin temsili grafiği . .....	50
Şekil 4.9: Çözelti tavlama sırasında kullanılan fırın (a) ve numuneler ve parçalar (b). ...	50
Şekil 4.10: Yapay yaşlandırma sırasında kullanılan fırın (a) ve numuneler ve parçalar (b). ...	51
Şekil 4.11: Sünek malzemelere özgü gerilme-gerinim eğrisi. ....	51
Şekil 4.12: ASTM E8/E8M standartına göre üretilen çekme testi numunesi (a) ve ölçüleri (b). ....	54
Şekil 4.13: Çekme testi sonucu kopan numuneler. ....	54
Şekil 4.14: AlSi10Mg gerilim-gerinim eğrileri. ....	54
Şekil 4.15: INSTRON marka basma test düzeneği. ....	55
Şekil 4.16: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profil (a) ve altına yerleştirilen plaka (b). ....	56
Şekil 4.17: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profillerin aksel ezilme testi sonuçları. ....	57
Şekil 4.17: Boş alüminyum tüpün aksel ezilme testi sonuçları. ....	57

Şekil 5.1: Sırasıyla bir, iki ve üç boyutlu ağ örgüsü. ....	59
Şekil 5.2: Merkezi farklar yönteminde $t_n$ anında $F(t)$ değerinin yaklaşık olarak hesaplanması. ....	61
Şekil 5.3: Boş tüp (a) ve biyo ilhamlı yapının (b) SOLIDWORKS programında oluşturulması. ....	62
Şekil 5.4: Parçaların ağ örgüsü: alüminyum tüp (a) ve biyo ilhamlı yapı (b). ....	63
Şekil 5.5: SECTION SHELL kartı. ....	64
Şekil 5.6: Temas algoritması kartı. ....	64
Şekil 5.7: Yükleme ve sınır koşulları ve temas algoritmaları. ....	65
Şekil 5.8: Eleman boyutuna göre toplam enerji sönümlemenin değişimi. ....	66
Şekil 5.9: Eleman boyutuna göre tepe kuvvetinin değişimi. ....	66
Şekil 5.10: Eleman boyutuna göre ezilme kuvveti verimliliğinin değişimi. ....	66
Şekil 5.11: MAT24 malzeme kartı. ....	67
Şekil 5.12: Gerçek gerilme-efektif plastik gerilim eğrisinin elde edilmesi. ....	68
Şekil 5.13: Al 6063-T52 ve AlSi10Mg malzemelerinin gerçek gerilim-efektif plastik gerilim eğrileri. ....	69
Şekil 5.14: Eksenel ezilme testi ve sonlu elemanlar analizi sonuçları. ....	69
Şekil 5.15: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin kuvvet-yer değiştirme grafikleri. ....	70
Şekil 5.16: Boş alüminyum tüpün kuvvet-yer değiştirme grafikleri. ....	71
Şekil 6.1: Optimum tasarımın deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları. ....	74
Şekil 6.2: Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin kuvvet-yer değiştirme grafikleri. ....	74





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1: Yanıt Yüzey Metodu ve Kriging vekil modellerinin çapraz doğrulama hata oranları.....	41
Çizelge 4.1: Toz yatak füzyon birleştirme teknolojilerinin kısaltması ve ingilizce türkçe açıklamaları. ....	45
Çizelge 4.2: Plastik ve metal esaslı üç boyulu baskı malzemeleri .....	46
Çizelge 4.3: EOS M290 marka üç boyutlu baskı cihazına ait teknik bilgiler .....	48
Çizelge 4.4: AlSi10Mg malzemenin kimyasal özellikleri . ....	48
Çizelge 4.5: Üretimde kullanılan işlem parametreleri . ....	48
Çizelge 4.6: Çekme testi sonuçları.....	55
Çizelge 4.7: INSTRON marka basma test düzeneğine ait teknik bilgiler.....	56
Çizelge 4.8: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profillerin enerji sönümleme performans göstergeleri.....	56
Çizelge 4.9: Boş alüminyum tüplerin enerji sönümleme performans göstergeleri... ..	57
Çizelge 4.10: İçi boş alüminyum tüpün ve biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin enerji sönümleme performans göstergelerinin kıyaslanması. ....	58
Çizelge 5.1: Boş alüminyum tüplerin enerji sönümleme performans göstergeleri... ..	60
Çizelge 5.2: Al-6063-T52 ve AlSi10Mg malzeme özellikleri. ....	68
Çizelge 4.8: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin deneysel ve nümerik olarak elde edilen enerji sönümleme performansı göstergeleri.....	70
Çizelge 5.4: İçi boş alüminyum tüpün enerji sönümleme performans göstergeleri... ..	71
Çizelge 6.1: Özgül enerji sönümleme kapasitesi, ezilme kuvveti verimliliği ve kompozit fonksiyon için vekil modeller oluşturularak elde edilen eniyileme sonuçları. ....	73
Çizelge 6.2: Optimum tasarımın enerji sönümleme performans göstergeleri.....	74
Çizelge 6.3: Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin içi boş alüminyum profil ile enerji sönümleme performansının kıyaslanması.....	75
Çizelge 6.4: Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin içi boş alüminyum profil ile enerji sönümleme performansının kıyaslanması.....	75



## KISALTMALAR

<b>ASTM</b>	: American Society For Testing And Materials
<b>CFE</b>	: Ezilme Kuvveti Verimliliği
<b>CFRP</b>	: Carbon Fiber Reinforced Polymer
<b>COPRAS</b>	: Complex Proportional Assessment
<b>DMLS</b>	: Direct Metal Laser Sintering
<b>GFRP</b>	: Glass Fiber Reinforced Polymer
<b>GMSE</b>	: Leave One Out Generalized Mean Square Cross Validation
<b>LHS</b>	: Latin Hypercube Sampling
<b>ISO</b>	: International Organization For Standardization
<b>LHS</b>	: Latin Hypercube Sampling
<b>RSM</b>	: Response Surface Method
<b>SEA</b>	: Özgöl Enerji Sönümleme Kapasitesi
<b>SLS</b>	: Selective Laser Sintering
<b>STL</b>	: Standart Triangle Language
<b>TOPSIS</b>	: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$E_T$	Toplam sönmölenen enerji
$F_{ort}$	Ortalama ezilme kuvveti
$F_{maks}$	Tepe kuvveti
$f$	Kompozit fonksiyon
$\sigma_e$	Mühendislik gerilmesi
$\varepsilon_e$	Mühendislik gerinimi
$\sigma_t$	Gerçek gerilme
$\varepsilon_t$	Gerçek gerinim
$\sigma_p$	Oransal limit
$\sigma_o$	Akma gerilmesi
$\Delta t$	Zaman adım büyüklüğü
$c$	Gerilim dalga yayılım hızı
$L$	Eleman büyüklüğü
$\rho$	Yoğunluk
$E$	Elastiklik modülü
$\nu$	Poisson oranı



## 1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus ve ulusal tehditlerden dolayı şirketler ve ülkeler taşımacılık ve savunma alanlarındaki gelişimlerine öncelik vermektedir. Son yıllarda, otomotiv ve savunma sanayii sektörlerinde kullanılan yapısal parçaların dayanımını artırma hedefi şirketlerin ve ülkelerin temel hedeflerinden olmuştur. Yapısal parçaların dayanımını arttırmak hem ortaya çıkan ürünün uzun süreli kullanılmasına olanak sağlar, hem de can güvenliğinin artmasına yardımcı olur. Otomotiv endüstrisinde şasi, karoseri ve çarpışma kutuları yapısal parçalara örnek olarak verilebilirken, uçak ve helikopter endüstrisinde ise iskelet, sandviç yapıları vb. örnek verilebilir. Bu yapısal parçaların belirli çalışma koşulları altında işlevini yerine getirmesi gerekmektedir. Örneğin otomobillerde kullanılan çarpışma kutuları, çarpışma esnasında üzerine gelen enerjiyi sönmüleyerek sürücü ve yolcuların kazayı olabildiğince hafif bir şekilde atlattığını sağlamaktadır. Uçaklarda ise gövdede bulunan sandviç yapılar burkulmaya yönelik dayanım artışı sağlamasına ilaveten yabancı cisimlerin çarpmasına karşı da enerji sönmüleyici rol oynamaktadır. Enerji sönmüleyici profiller, üzerlerine gelen kinetik enerjiyi, deformasyon enerjisine çevirerek sönmüleyen yapılardır. Enerji sönmüleyici profillerin yüksek enerji sönmüleme kapasitesine sahip olmasına ilaveten aynı zamanda hafif de olması gerekmektedir. Hem hafif hemde yüksek enerji sönmüleme kapasitesine sahip ürünlerin ortaya çıkması için yenilikçi malzeme ve üretim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda üç boyutlu baskı ile imalat yönteminin gelişmesiyle birlikte bu ürünlerin ortaya çıkması kolaylaşmaktadır. Araştırmacılar eklemeli imalat yöntemi ile üretimi kullanarak düşük ağırlıklı ve yüksek enerji sönmüleme kapasitesine sahip tasarımlar elde etmeyi amaçlamaktadırlar. Bilgisayar destekli mühendislik programlarının kabiliyetleri ve test yeteneklerinin artmasıyla birlikte ürün geliştirme süreçleri daha hızlı ve güvenilir hale gelmiştir. Son yıllarda doğada bulunan hayvan ve bitki türlerinin doğal formlarından esinlenilerek enerji sönmüleyici profillerin tasarımı araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır.



## 1.1 Tezin Amacı

Son yıllarda araştırmacılar doğadaki canlıların yapısal formlarından esinlenerek elde ettikleri tasarımlar üzerine çalışmalar gerçekleştirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, hurma ağacı gövdesinin kesitinden ilham alınarak tasarlanan spiral yapının alüminyum tp içerisine yerleştirilmesiyle elde edilen biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin, yarı-statik (İng. Quasi-static) aksenal ezilme yüklemesi altında, boş bir alüminyum tüpe göre daha yüksek enerji sönümleme performansı sergilediğini göstermek hedeflenmiştir. Bu doğrultuda üretim, test, sonlu elemanlar modelleme çalışmaları ve tasarım en iyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen üretim ve deneysel faaliyetler 222M364 proje no.lu TÜBİTAK 1002-B Acil Destek Modülü kapsamında desteklenmiştir.

## 1.2 Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde giriş, tezin amacı ve tezin içeriği anlatılmıştır. İkinici bölümünde enerji sönümleyici profiller ve farklı tipteki enerji sönümleyici profiller ile ilgili geçmişte yapılan çalışmalar geniş bir yelpazede tanıtılmıştır. Ardından enerji sönümleme performansı göstergeleri sunulmuştur. nc bölümünde biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil, optimizasyon çalışmasının tanımı ve optimizasyonda kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Drdnd bölümünde bu tez çalışmasında gerçekleştirilen üç boyutlu baskı ile numune ve parça üretimi, numune çekme testleri ve parça aksenal ezilme testleri gibi deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Beşinci bölümünde sırasıyla katı model oluşturulması, sonlu elemanlar ağ yapısı, sınır koşulları ve temas algoritmaları, sonlu elemanlar ağı yakınsama çalışmaları ve sonlu elemanlar modelinin deneysel çalışmalarla doğrulanması anlatılmıştır. Altıncı bölümünde eniyileme çalışmalarının sonuçları ve optimum tasarım performansının testlerle doğrulanması gösterilmiştir. Son bölüm olan yedinci bölümünde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur. Bu çalışmaya ilaveten gelecekte yapılabilecek çalışmalar anlatılarak tez çalışması sonlandırılmıştır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

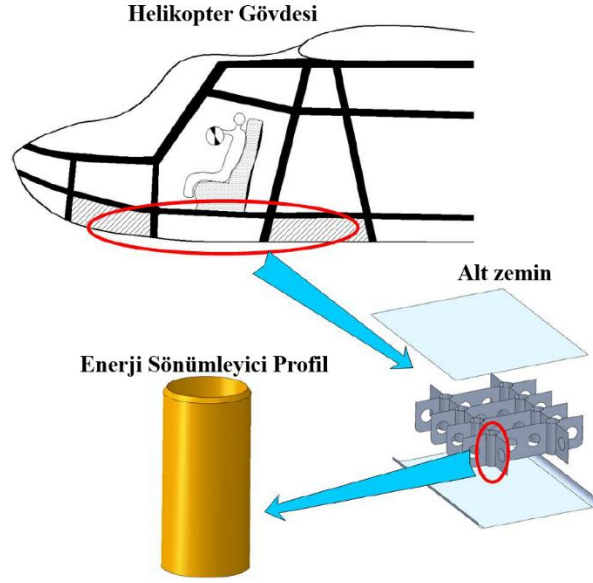
### 2.1 Enerji Sönümleyici Profiller

Otomobillerde bulunan pasif güvenlik sistemleri, çarpışma anında otomobilin üzerine gelen enerjiyi sönümleyerek araç sürücüsü ve yolcuların en az hasarla kazadan sıyrılmasını sağlayan bileşenlerdir. Bu bileşenler aynı zamanda üzerine gelen enerjiyi en yüksek seviyede sönümlemekle görevlidir. Çarpışma kutuları, tampon ve direkler pasif güvenlik sistemlerine örnek olarak verilebilir. Bu ince cidarlı yapılar otomotiv endüstrisinde yüksek dayanım, düşük maliyet, hafiflik ve çarpışmaya karşı mükemmel sönümleyici özellik göstererek yaygın bir şekilde kullanılan bileşenlerdir. Bu özelliklerin iyi olması çarpışma esnasında yolcuların en az hasarla kurtulması anlamına gelmektedir. Şekil 2.1’de otomotiv endüstrisinde kullanılan enerji sönümleyici profillere örnek olarak çarpışma kutuları ve konumları görülmektedir.



Şekil 2.1: Çarpışma kutularının araç içerisindeki konumları [1].

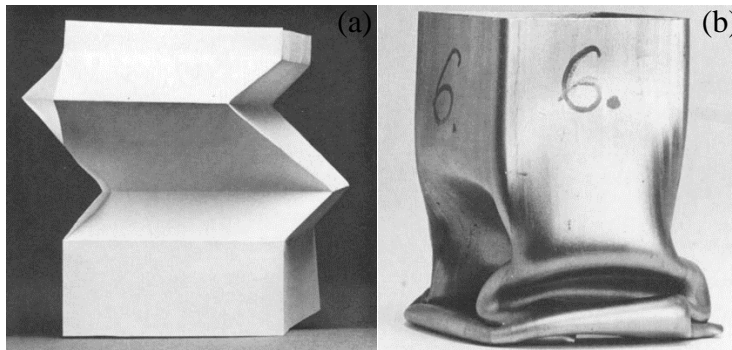
Aynı şekilde helikopter gövdesinin alt zemininde kullanılan yapısal parçaların da enerji sönümlemeye karşı yüksek performans göstermesi beklenmektedir. Bu sayede çarpışma durumunda mürettebat ve kritik bileşenler olabildiğince az hasarla vakayı atlattırılır. Şekil 2.2’de helikopterlerde kullanılan enerji sönümleyici profile örnek görülmektedir.



Şekil 2.2: Helikopterde kullanılan örnek bir enerji sönümleyici profil [2].

## 2.2 Metal Enerji Sönümleyiciler

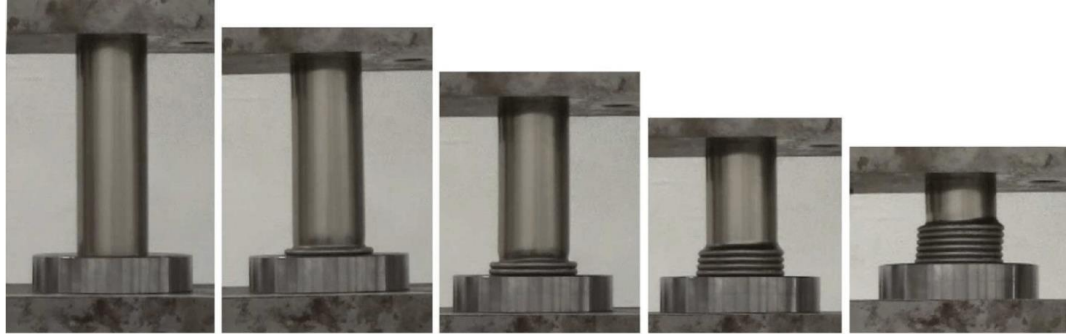
Abramovicz ve Jones [3], iki farklı yanal uzunluk/kalınlık ( $c/h$ ) oranına sahip kare kesitli çelik profillerin aksenal yönde dinamik ezilme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Teorik yaklaşımlar kullanarak kare kesitli tüplerin aksenal ezilme davranışını modelleyebilmek için çalışmalar yapmışlardır. Farklı aralıklarda değişken  $c/h$  oranı için dört deformasyon modunu teorik ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Şekil 2.3'te teorik yaklaşım sonucu elde edilen kağıt model ve deneysel sonuç görülmektedir. Çok düşük hızlardaki ezilme testlerinde bile ezilme mesafesinin deformasyon oranına (İng. strain rate) bağlı olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 2.3: Kağıt model (a) ve deneysel sonuç (b) [3].

Wierzbicki ve Abramovicz [3], ince cidarlı yapıların kademeli olarak katlanma davranışını modelleyebilmek için teorik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri teorik yöntemde temel geometrik özellikleri ve tipik burkulmaları hesaplamayı başarmışlardır. Geliştirdikleri teorik modeldeki hesaplamaların kesit boyutlarından çok kalınlığa daha fazla bağımlı olduğunu saptamışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmalardan elde ettikleri ortalama ezilme kuvveti ve lokal ezilme modlarını teorik çalışmalar ile doğrulamışlardır.

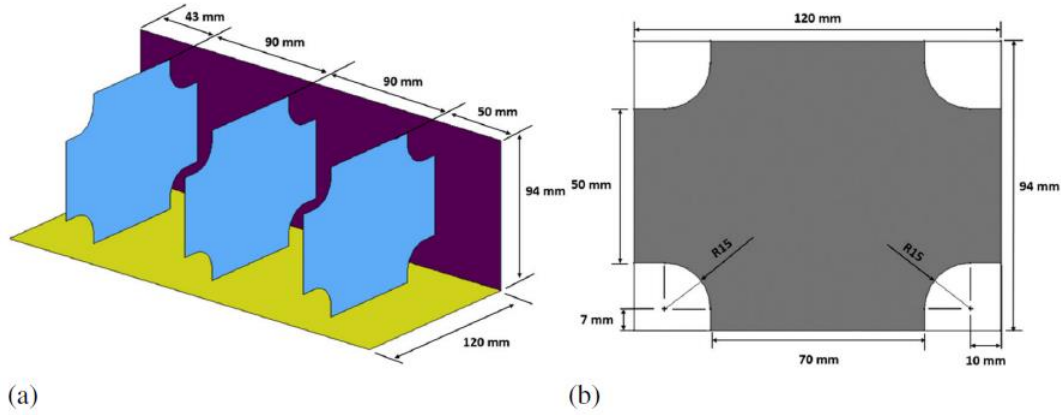
Acar vd. [5], alüminyum malzemeye sahip otuz farklı çok hücreli ince cidarlı dairesel tüplerin enerji sönümlenme performanslarını incelemişlerdir. Boş bir alüminyum tüpün aksenal ezilme testini gerçekleştirdikten sonra ANSYS LS-DYNA yazılımı ile benzetim modelleri geliştirmiş ve bu modelleri literatürde mevcut deneysel ve nümerik çalışmalarla doğrulamışlardır. Şekil 2.4'te dairesel alüminyum tüpün aksenal ezilme altındaki deformasyon görüntüsü kademeli olarak görülmektedir. Otuz farklı çok hücreli tasarım arasından en iyi tasarımı seçmiş ve ardından vekil model tabanlı eniyileme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Eniyileme çalışmalarına göre elde ettikleri son tasarımın enerji sönümlenme performansının, ilk tasarıma göre %12 iyileştigini saptamışlardır.



Şekil 2.4: Dairesel alüminyum tüpün aksenal ezilme altındaki görüntüsü [5].

Keskin vd. [6], dikdörtgen kesitli ince cidarlı enerji sönümleyici profilin içerisine diyafram yerleştirerek elde edilen farklı tasarım çözümlerinin enerji sönümlenme performansına etkisini incelemişlerdir. ANSYS LS-DYNA ile oluşturdukları benzetim modellerini literatürde bulunan deneysel ve nümerik çalışmalarla doğrulamışlardır. Diyafram ölçüleri, diyaframın enerji sönümleyici profil içerisindeki konumu ve enerji sönümleyici profilin koniklik açısını tasarım değişkenleri olarak kullanmışlardır. Şekil 2.5'te enerji sönümleyici profil ve diyaframın ölçüleri görülmektedir. Eniyileme çalışmalarına göre, en uygun tüp ve diyafram ölçülerinin özgül enerji sönümlenme kapasitesini ilk tasarıma göre %59,2 arttırdığını gözlemlemişlerdir. Diyafram

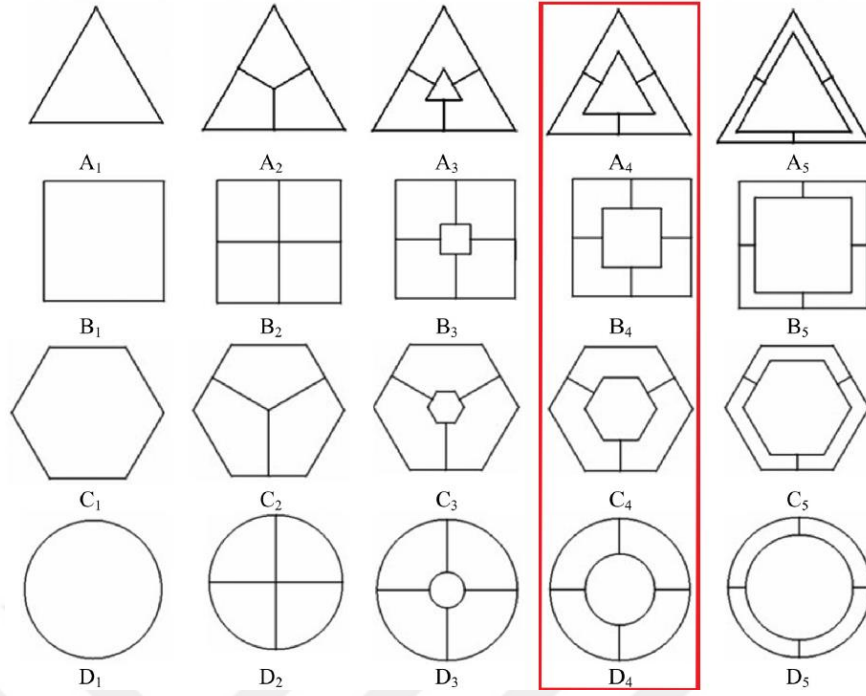
konumunu ilk darbe bölgesine yaklaştırdıkça özgül enerji sönümleme kapasitesinde %7,7 iyileşme olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.5: Enerji sönümleyici (a) ve diyaframın (b) ölçüleri [6].

Nia ve Parsapour [7], alüminyum malzemeden yapılmış üçgen, dörtgen, beşgen ve altıgen olmak üzere dört farklı kesite sahip enerji sönümleyici profillerin boş ve çok hücreli olan formlarının enerji sönümleme performansını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarını, ANSYS LS-DYNA yazılımı ile nümerik olarak düşük hata payıyla doğrulamayı başarmışlardır. Çok hücreli enerji sönümleyici profillerin, boş olanlarına göre daha yüksek enerji sönümleme performansı sergilediğini saptamışlardır. Çok hücreli beşgen ve altıgen kesite sahip profillerin, üçgen profile göre yaklaşık %120 daha fazla özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu görmüşlerdir.

Pirmohammad ve Marzdashti [8], dairesel, üçgen, dörtgen ve altıgen kesitli çok hücreli ve aralarında kırışlar ile güçlendirilmiş alüminyum enerji sönümleyici profillerin yarıstatik aksenal ve eğimli ezilme altındaki enerji sönümleme performanslarını araştırmışlardır. Dıştaki kesitin aynısını belli bir büyütme faktörü ile çarparak içeriye yerleştirmişlerdir. Şekil 2.6'da enerji sönümleyici profillerin şematik kesit görüntüsü verilmiştir. Özgül enerji sönümleme kapasitesi, ezilme kuvveti verimliliği ve tepe kuvveti metriklerini kullanarak önerilen tasarımlar arasında sıralama yapabilmek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden COPRAS'ı kullanmışlardır. Çok hücreli yapılardan dördüncü sütündeki (büyüme faktörü= 0,5) tasarımların diğerlerine göre daha üstün olduğunu vurgulamışlardır. Büyüme faktörünün 0,5 olduğu tasarımlar arasından ise en iyisinin dairesel kesite sahip tasarımın olduğunu saptamışlardır.

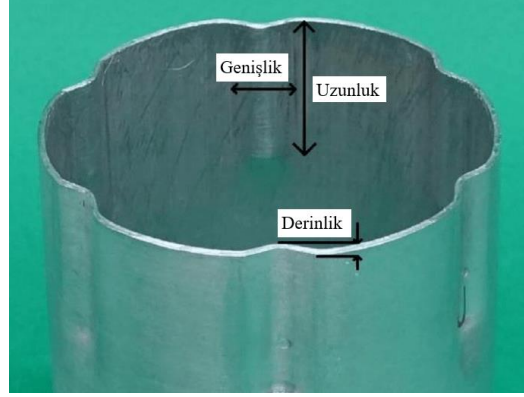


Şekil 2.6: Enerji sönümleyici profillerin şematik kesit görüntüsü [8].

Qi vd. [9], tek hücreli düz (SCS), tek hücreli konik (SCT), çok hücreli düz (MCS) ve çok hücreli konik (MCT) olmak üzere dört farklı ince cidarlı enerji sönümleyici profilin eğimli ezilme altındaki enerji sönümlenme performansını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Çok hücreli yapıların, tek hücreli yapıları göre,  $0^\circ$  ve  $40^\circ$  arasındaki eğimli ezilme altında daha yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesi olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca konik tipindeki tüplerin, düz tüplere göre daha düşük tepe kuvvetine sahip olduğunu görmüşlerdir. Küçük eğimlerdeki ezilme altında, kalınlık etkisinin özgül enerji sönümlenme kapasitesi ve tepe kuvvetine olan etkisinin daha fazla olduğunu saptamışlardır. Çok hücreli konik tüplerde, eğimli ezilme altında koniklik açısı arttıkça özgül enerji sönümlenme kapasitesinin de arttığını görmüşlerdir. Sadighi vd. [10], aksenal olarak yarı oluklu dairesel alüminyum tüplerin enerji sönümlenme performansını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Dört farklı deneysel çalışmayı, ANSYS LS-DYNA ile benzetim modelleri kurarak doğrulamışlardır. Oluk sayısı ve oluk uzunluğunu tasarım değişkeni olarak kabul ederek eniyileme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.7'de enerji sönümleyici profilin oluk geometrisi görülmektedir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan COPRAS'ı kullanarak farklı alternatifler arasından en iyisini seçmeyi çalışmışlardır. Sekiz oluklu tüpün, altı oluk tüpe göre, özgül enerji sönümlenme kapasitesinde %10 ve çarpışma kuvveti verimliliğinde ise %8 daha yüksek performans

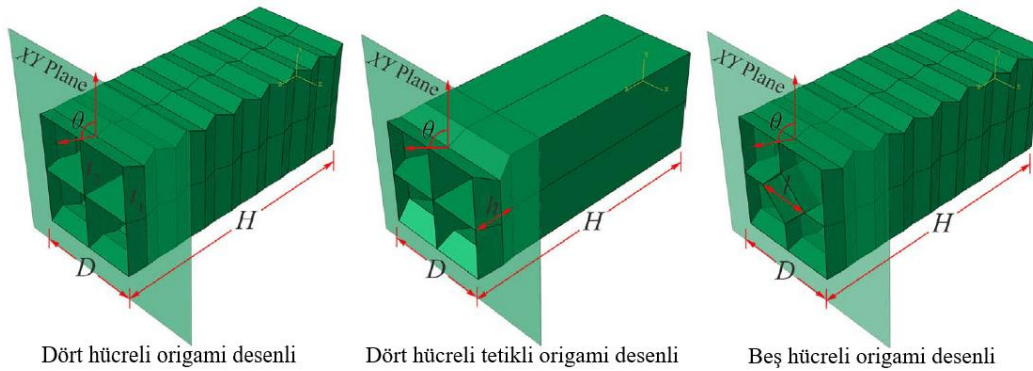


gösterdiğini saptamışlardır. Üçüncü seviye oluk uzunluğuna (81,6 mm) sahip enerji sönümleyici profillerin, ikinci seviyedekilerine göre daha yüksek performans gösterdiğini görmüşlerdir.



Şekil 2.7: Enerji sönümleyici profilin oluk geometrisi [10].

Yang vd. [11], üç farklı ön-katlamalı (İng. pre-folded) origami desenli çok hücreli enerji sönümleyici profillerin enerji sönümleme performanslarını araştırmışlardır. Geometrik özelliklerin performansa etkisini araştırmak için, çok amaçlı optimizasyon çalışmalarını deneysel olarak doğrulanmış sonlu elemanlar modellerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.8’de origami desenli modeller görülmektedir. Çok amaçlı optimizasyon çalışmalarına göre, dört hücreli origami desenli ve dört hücreli tetikli origami desenli enerji sönümleyici profillerin, geleneksel tüplere daha yüksek özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır. Beş hücreli origami desenli profillerin ise en yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır.

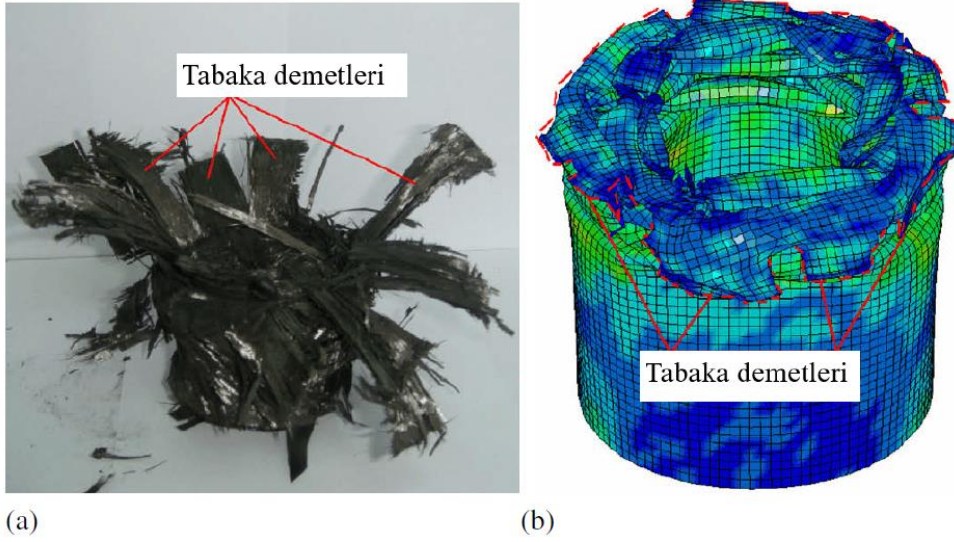


Şekil 2.8: Origami desenli üç farklı tüp [11].

Zheng vd. [12], nispeten yeni bir tasarım olan ve yanal olarak kalınlığı değişebilen (LVT) kare kesitli enerji sönümleyici profillerin performansını deneysel, nümerik ve teorik olarak araştırmışlardır. İlk olarak beş ve dokuz hücreli LVT’lerin yarı-statik

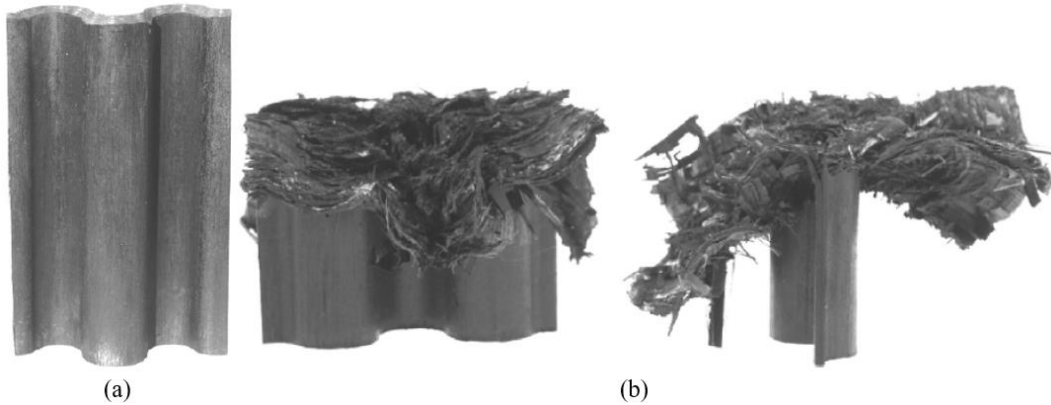






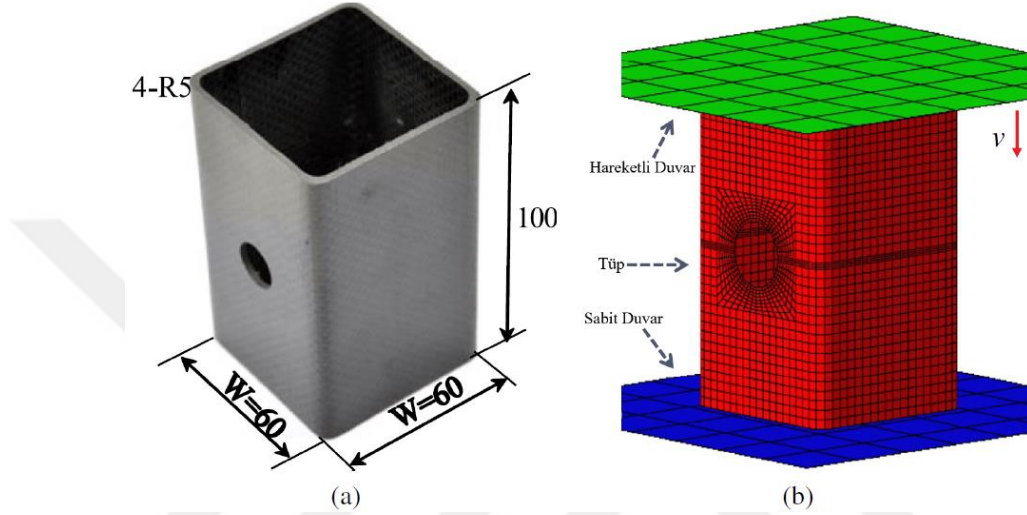
Şekil 2.10: CFRP tütün deneysel (a) ve nümerik (b) eksenel ezilme sonuçları [13].

Feraboli vd. [14], kompozit malzemelerin eksenel yarı-statik ezilme altındaki davranışını modelleyebilmek için deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Nümerik çalışmalarında ANSYS LS-DYNA çözücüsünü kullanmışlardır. Şekil 11’de deneysel çalışmada kullanılan numunenin deneyden önce ve deneyden sonraki hali görülmektedir. Hasar mekaniğine dayanan malzeme modelleri ile kıyaslandığında daha az deneysel veri gerektiren MAT54 “Enhanced Composite Damage” malzeme modelini kullanmışlardır. Oluşturdukları benzetim modelleri ile deneysel sonuçları doğrulamışlardır. MAT54 malzeme modelinin fiziksel olmayan ve eleman boyutu, kontak algoritması ve yük-temas eğrisi gibi deneysel olarak ölçülemeyen birden çok parametreye karşı hassas olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.11: Numunenin deneyden önceki (a) ve sonraki (b) görüntüsü [14].

Liu vd. [15], kare kesitli CFRP tüplere delik açarak, bu tüplerin enerji sönümlene kapasitelerini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.12’de deneysel ve nümerik çalışmada kullanılan delik açılmış kare kesitli CFRP tp görülmektedir. Delik apı, yükseklik-uzunluk oranı, ofset-kalınlık oranı gibi tasarım parametreleri kullanarak en iyileme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. En iyi tasarımın tepe kuvvetini %4,62 arttırmasına rağmen, özgül enerji sönümlene kapasitesini %100,5 gibi bir artışla 29,6 J’den 59,3 J’e çıkardığını görmüşlerdir.



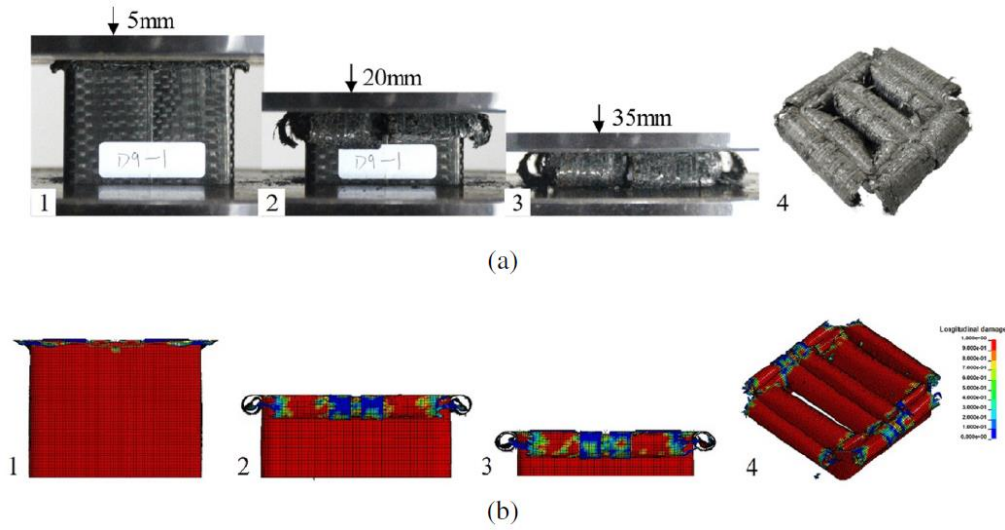
Şekil 2.12: Delik açılmış kare kesitli CFRP tp: deneysel (a) ve nümerik (b) [15].

Han vd. [16], şapka şeklindeki bir profile sahip CFRP yapının yarı-statik aksenal ezilme yükü altındaki davranışını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. ANSYS LS-DYNA ile oluşturdukları benzetim modelini deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır. şapka şeklindeki yapıyı elde etmek için iki farklı CFRP profilin arasına taban plakası yerleştirerek bunları yüksek mukavemetli yapıştırıcı ile bağlamışlardır. şapka şeklindeki yapının kırılma davranışını inceledikleri gibi, araya yerleştirdikleri bağlayıcı katmanında kırılma ve çatlak davranışını incelemişlerdir. Geliştirmiş oldukları modelleme tekniğiyle CFRP profilin kırılma davranışını, bağlayıcı katmanın arayüzey hasarını ve kompozit matrislerini tahmin edip değerlendirmeyi başarmışlardır.

Striewe vd. [17], cam fiber ile güçlendirilmiş plastik (GFRP) malzemeden ürettikleri küçük ölçekli profilin, daha büyük ölçekli enerji sönümlene uygulamalarına ışık tutması için enerji sönümlene performansını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Deneysel alışmaları 4,4 m/s darbe hıza ve 760 kg kütleye sahip rijit bir bariyer ile gerçekleştirmişlerdir. ANSYS LS-DYNA ile oluşturdukları dört

katmandan oluşan benzetim modellerini deneysel sonuçları ile doğrulamışlardır. 90° serim açısına sahip profillerin özgül enerji sönümlene kapasitesini 17 kJ/kg, 0° serim açısına sahip profillerin özgül enerji sönümlene kapasitesini ise 24 kJ/kg olarak bulmuşlardır.

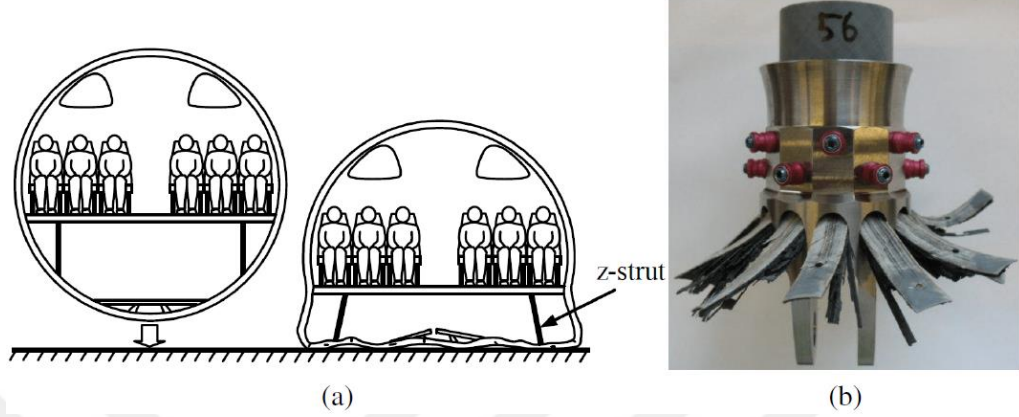
Liu vd. [18], sıcak sıkıştırma kalıplama işlemi ürettikleri çok hücreli ve tek hücreli kare profile sahip CFRP tüplerin ezilme davranışını ve enerji sönümlene performanslarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.13'te çok hücreli CFRP tüpün aksenal ezilme davranışının deneysel ve nümerik olarak sonuçları görülmektedir. ANSYS LS-DYNA ile oluşturdukları benzetim modelleriyle elde ettikleri sonuçları incelediklerinde hem deformasyon ve kırılma modlarını hemde yük-yer değiştirme eğrilerini deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır. Aynı katman sayısı altında, iki hücreli CFRP profilin (60 J/g), tek hücreli CFRP profile (64,6 J/g) göre daha az özgül enerji sönümlene kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır. Profilin en üstüne yerleştirdikleri 45°'lik konik tetikleme yapısının, tepe kuvvetini 95,8 kN'dan 77,3 kN'a düşürdüğünü ve ezilme kuvveti verimliliğini %64'ten %81'e yükselttiğini görmüşlerdir.



Şekil 2.13: Çok hücreli CFRP tüpün ezilme davranışı: deneysel (a) ve nümerik (b) [18].

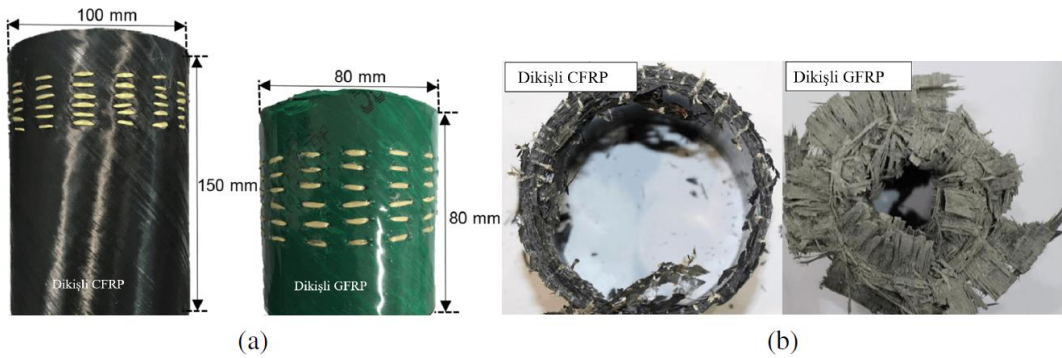
Heimbs vd. [19], ticari uçakların gövdesine yerleştirilen ve çarpma sönümleyici eleman olarak görev yapan kompozit dikey kirişleri (İng. vertical (-z) struts) geliştirmişlerdir. Bu dikey kirişin performansını statik, normal ve açılı çarpma ve yorulma bakımından parça seviyesinde deneyler yaparak araştırmışlardır. Şekil 2.14'te dikey kirişlerin kullanıldığı konum ve ezilme testi sonrası görüntüsü görülmektedir.

ABAQUS yazılımını kullanarak oluşturdukları benzetim modelleri sayesinde ezilme açısı ve kiriş kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Geliştirdikleri kompozit dikey kirişin benzer alüminyum yapılara göre 765 g daha hafif olduğunu ve daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.14: Dikey kirişlerin uçak içerisindeki konumu (a) ve ezilme testi sonrası görüntüsü (b) [19].

Rabiee ve Ghasemnejad [20], GFRP ve CFRP kompozit malzemeye sahip enerji sönümleyici profillerdeki çoklu dikiş deseninin (İng. multi-stitching pattern) enerji sönümleme performansına etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Şekil 2.15'te çok dikiş desenine sahip CFRP ve GFRP tüpler ve deformasyon görüntüleri görülmektedir. Çok katmanlı sonlu elemanlar modelleme tekniği vasıtasıyla oluşturdukları benzetim modellerini, deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır. Kullandıkları metodun dikişli ve dikişsiz bölgedeki enerji tabanlı temas kartı modelleme tekniğine dayandığını vurgulamışlardır. Dikişli GFRP ve CFRP profillerin, dikişsiz modellerine göre sırasıyla %18 ve %17 daha fazla özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır.

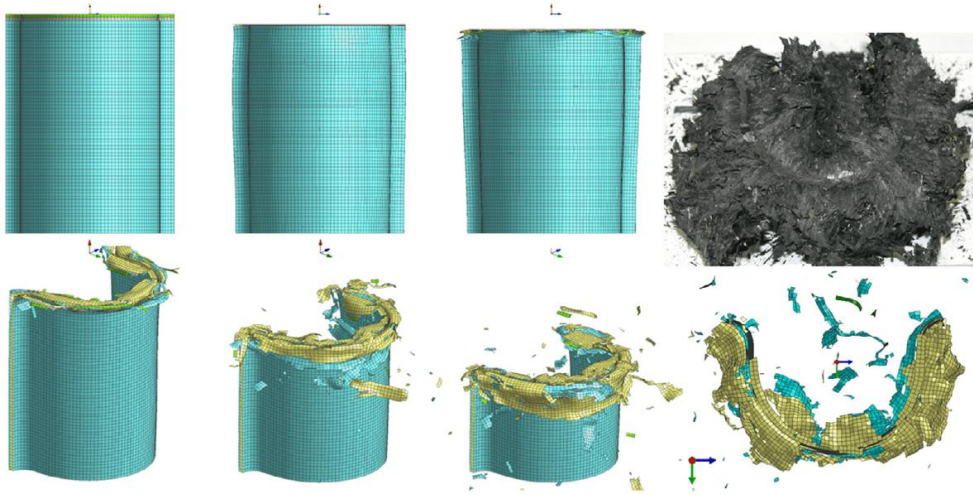


Şekil 2.15: Çoklu dikiş desene sahip CFRP ve GFRP (a) ve aksel ezilme görüntüleri (b) [20].



Siromani vd. [21], farklı tetikleme mekanizmalarına sahip dairesel kesitli grafit epoksi kompozit tüplerin enerji sönümlenme performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Farklı tetikleme mekanizması kullanarak tepe kuvvetini düşürüp enerji sönümlenme performansını arttırmayı amaçlamışlardır. Yivli uç (İng. chamfered end), içe doğru yayılan uç ve dışa doğru yayılan uç adını verdikleri üç farklı tetikleme mekanizmasının etkisini incelemiştirler. Yivli uç tetik mekanizmasının diğer ikisine göre daha düşük tepe kuvveti ve daha yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır. Ayrıca yivli uç ve içe doğru yayılan ucu birleştirerek elde ettikleri tetikleme mekanizmasının en düşük tepe kuvveti ve en yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır.

David ve Johnson [22], dinamik yüklemelere maruz kalan karbon fiber kompozit enerji sönümleyici profillerin davranışını modelleyebilmek için sonlu elemanlar modeli ve tasarım aracı geliştirmişlerdir. Sonlu elemanlar modeli çalışmalarını PAM-CRASH yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.16'da CFRP profilin yarı-statik aksenal ezilme altındaki deformasyonu görülmektedir. Deformasyon hızı etkilerini ezilme davranışına entegre etmek için deneysel numune testlerinden elde edilen her bir yükleme rejimi için malzeme modellerini türetmişlerdir.

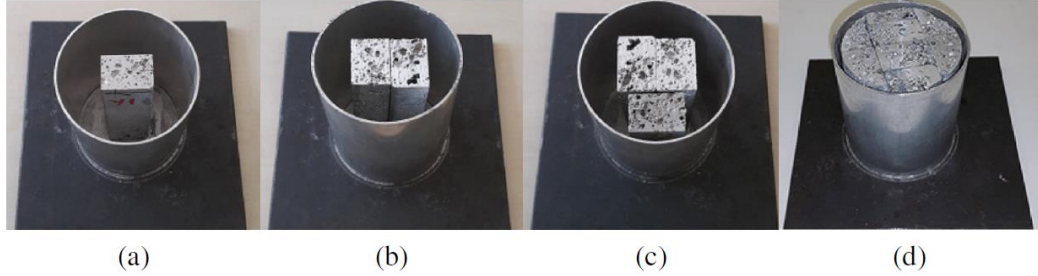


Şekil 2.16: Yarı-statik aksenal ezilme altındaki deformasyon görüntüsü [22].

#### 2.4 Hibrit Enerji Sönümleyiciler

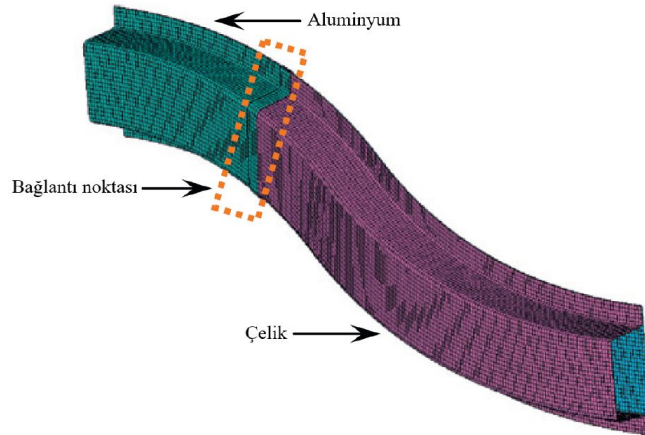
Altın vd. [23], dairesel alüminyum tüp içerisine yerleştirilen alüminyum köpüğün doluluk oranının enerji sönümlenme kapasitesine etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Dört farklı doluluk oranına (%11,4, %22,8, %34,2, %100) sahip tasarımın aksenal ezilme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.17'de dört farklı

alüminyum köpük doluluk oranına sahip numuneler görülmektedir. ANSYS LS-DYNA ile oluşturdukları benzetim modellerini deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır. Köpük dolu tasarımların, boş alüminyum tüplere göre sırasıyla 3,14 ve 6 kat daha yüksek ezilme kuvveti verimliliği ve özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.17: Farklı köpük doluluk oranına sahip enerji sönümleyici profiller: %11.4 (a) %22.8 (b) %33.4 (c) %100 (d) [23].

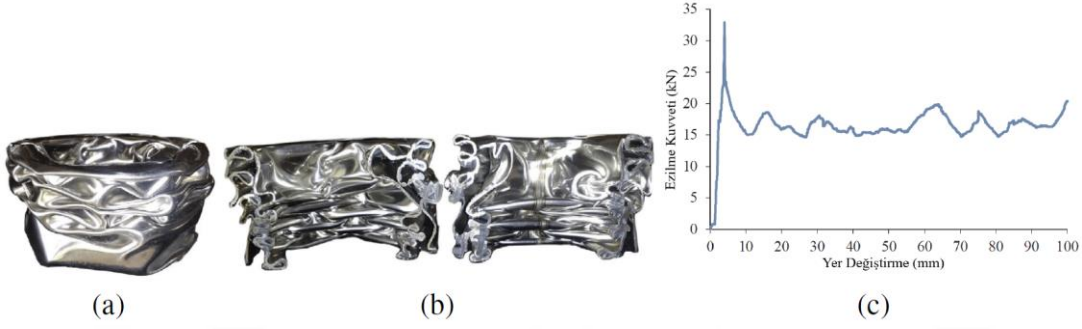
Zhou vd. [24], ilk tepe kuvvetini düşürüp, enerji sönümleme kapasitesini arttırmak adına, ön tarafına alüminyum arka tarafına yüksek dayanımlı çelik yerleştirdiği S şeklinde hibrit enerji sönümleyici profil üzerine çalışmışlardır. Şekil 2.18’de hibrit enerji sönümleyici profil görülmektedir. Farklı malzeme tipleri, parçaların et kalınlığı, ve alüminyum parçanın uzunluğunu tasarım değişkeni olarak alıp, sonuca etkisini araştırmışlardır. Nihai elde edilen tasarımın, ilk modele göre, kütle ve tepe kuvvetini sırasıyla %7,7 ve %16 düşürdüğünü ve toplam sönümlediği enerjinin %117,8 fazla olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.18: Hibrit enerji sönümleyici profil [24].

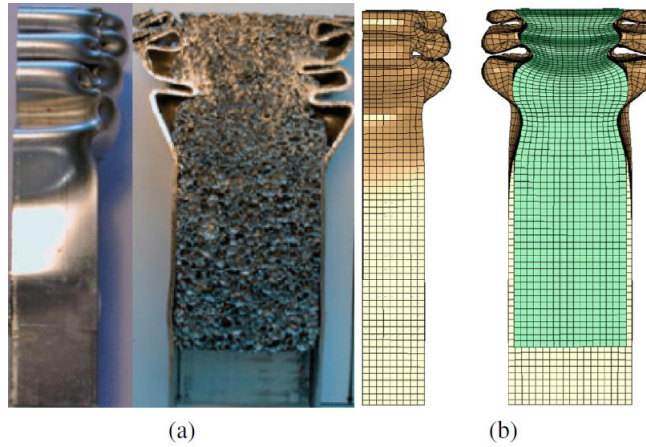
Vinayagar ve Kumar [25], dış kesiti dairesel ve iç kesiti üçgen, dörtgen ve altıgen olan hibrit enerji sönümleyici profillerin enerji sönümleme performanslarını deneysel olarak araştırmışlardır. Dış tüpün çapını sabit tutarak, iç tüpün çapının ve kesitinin enerji sönümleme performansına etkisini incelemişlerdir. Şekil 2.19’da iç tüpün

altıgen olduğunu durumdaki dış katlanma, iç katlanma ve kuvvet-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Çift kesitli tüplerin, tek kesitli tüplere göre hem ortalama ezilme kuvvetinin hem de enerji sönümlene kapasitesinin %132 - %213 aralığında daha yüksek olduğunu saptamışlardır. İç kesitin altıgen olduğu durumda en yüksek özgül enerji sönümlene kapasitesinin elde edildiğini görmüşlerdir.



Şekil 2.19: Dış katlanma (a) iç katlanma (b) kuvvet-yer değiştirme grafiği (c) [25].

An vd. [26], kademeli olarak yanal yönde değişken kalınlığa sahip kare kesitli alüminyum tüp içerisine alüminyum köpük malzeme yerleştirerek elde ettiği profilin (İng. foam-filled thin-wall tube with functionally lateral graded thickness, (FLGT)) aksenal ezilme ve yanal eğilme davranışını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.20’de deneysel ve nümerik deformasyon sonuçları görülmektedir. Özgül enerji sönümlene kapasitesi ve tepe kuvvetini eniyilemek için çok amaçlı eniyileme çalışmaları gerçekleştirip, Pareto cephesi grafiklerini incelemişlerdir. FLGT’lerin, tekdüze kalınlıktaki karşılıklarına göre daha yüksek enerji sönümlene performansı sergilediğini saptamışlardır.



Şekil 2.20: Deneysel (a) ve nümerik (b) deformasyon sonuçları [26].

Güden vd. [27], alüminyum ve cam fiber kompozit tüp içerisine yerleştirdikleri alüminyum köpük malzemenin etkisini araştırmak için deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Karşılaştırma yapabilmek adına, alüminyum, cam fiber kompozit ve alüminyum/cam fiber kompozit hibrit tüplerinde yarı-statik aksenal ezilme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Hibrit tüpün özgül enerji sönümlenme kapasitesinin, tekil alüminyum ve tekil cam fiber kompozit tüpün özgül enerji sönümlenmelerinin toplamından daha fazla olduğunu saptamışlardır. Köpük dolu kompozit yapıların ortalama ezilme kuvvetini arttırmada kompozit yapılara göre daha etkisiz olduğunu görmüşlerdir. Köpük dolu hibrit tüplerin, kompozit ve boş hibrit tüplere göre daha az özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır.

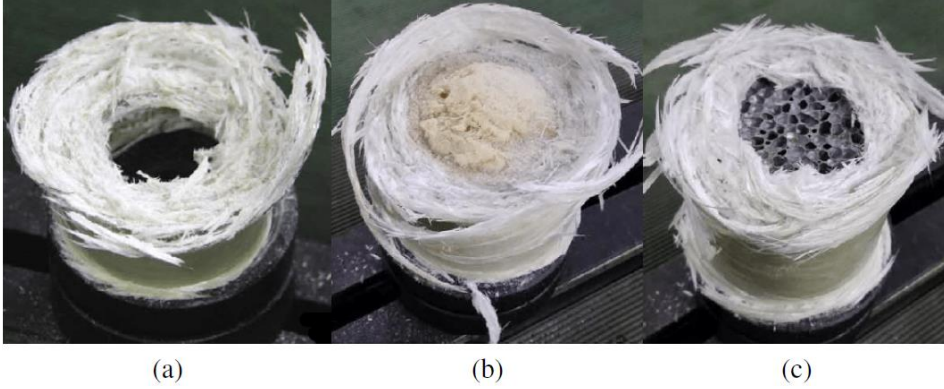
Sun vd. [28], içerisi alüminyum köpük veya bal peteği ile doldurulmuş alüminyum, çelik ve CFRP hibrit enerji sönümleyici profillerin ezilme davranışını ve enerji sönümlenme performansını yarı-statik aksenal ezilme testleri ile araştırmışlardır. Uzunluk-çap oranı, karbon fiber kompozitin katman sayısı, tüpün malzemesi, alüminyum köpüğün yoğunluğu ve bal peteğinin yapısal parametrelerini tasarım değişkeni olarak alarak etkisini incelemişlerdir. Şekil 2.21’de ezilme testi öncesi numuneler ve içi bal peteği dolu CFRP tüplerin ezilme sonuçları görülmektedir. İçi alüminyum köpük dolu CFRP tüplerin, boş CFRP tüplere kıyasla daha düşük özgül enerji sönümlenme kapasitesi gösterirken, içi alüminyum köpük dolu metal tüplerin, boş metal tüplere kıyasla daha yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesi gösterdiğini saptamışlardır. İçi bal peteği dolu CFRP tüplerin, boş CFRP tüplere kıyasla daha düşük özgül enerji sönümlenme kapasitesi sergilemesine rağmen tüm metal deney numunelerinden daha yüksek performans gösterdiğini görmüşlerdir.



Şekil 2.21: Ezilme testinden önce numuneler (a) ve içi bal peteği dolu CFRP tüplerin (b) ezilme sonuçları [28].

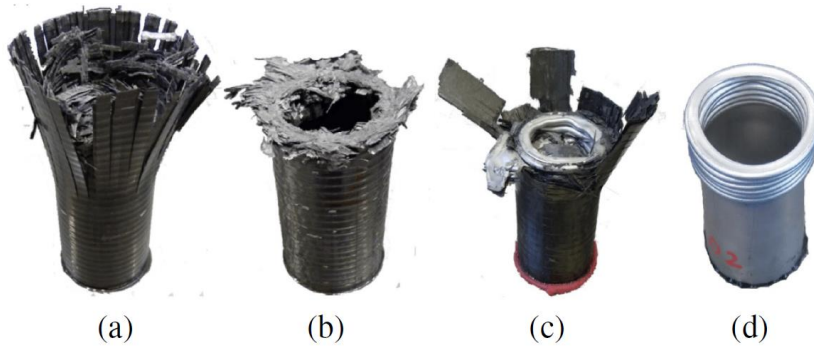


Zhang vd. [29], GFRP, metal tüp, köpük dolu tüpler ve hibrit tüplerin enerji sönümlenme kapasitesini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. ANSYS LS-DYNA ile kurdukları benzetim modellerini, deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır. Şekil 2.22’de boş GFRP, içi poliüretan (PU) köpük dolu GFRP ve içi alüminyum köpük dolu GFRP’nin aksel ezilme testi sonuçları görülmektedir. Boş GFRP, PU dolu GFRP ve alüminyum köpük dolu GFRP’nin özgül enerji sönümlenme kapasitelerini sırasıyla 15,15 kJ/kg, 18,15 kJ/kg ve 13,16 kJ/kg bulmuşlardır. Çap, et kalınlığı ve koniklik açısının özgül enerji sönümlenme kapasitesine etkisini incelemişlerdir. Nispeten daha küçük çap-kalınlık oranına sahip dairesel tüplerin, daha yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır. Koniklik açısının enerji sönümlenme kapasitesine büyük bir etkisi olduğunu görmüşlerdir.



Şekil 2.22: Boş GFRP tüp (a) içi PU dolu GFRP tüp (b) ve içi alüminyum köpük dolu GFRP tüpün (c) ezilme testi sonuçları [29].

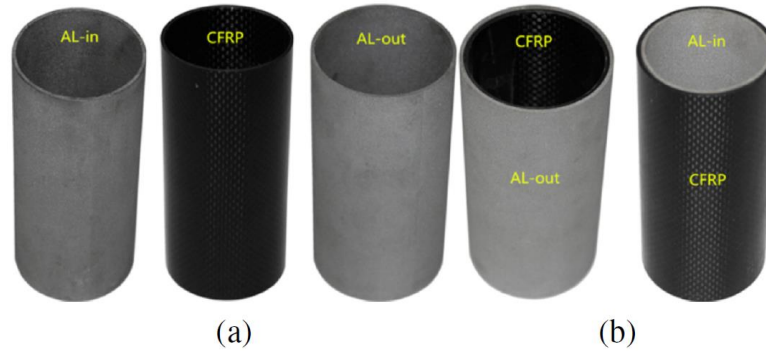
Reuter ve Tröster [30], dairesel alüminyum-karbon fiber kompozit (CFRP) hibrit tüplerin enerji sönümlenme performansını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Deneyleri kütlesi ve düşme hızı sırasıyla 380 kg ve 3,94 m/s olan çelik bir duvar vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.23’te deneyleri gerçekleştirilen numuneler görülmektedir. Hibrit yapıların, boş alüminyum tüplere göre %37 daha yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 2.23: CFRP (a) izotropik CFRP (b) alüminyum-CFRP hibrit (c) alüminyum (d) numuneler [30].

Ming vd. [31], hibrit ve düz metal-CFRP tüplerin aksine, metal tüplerin sonlarına ve başlarına origami deseni ekleyerek elde ettikleri hibrit enerji sönümleyici profillerin performanslarını deneysel olarak araştırmışlardır. Yaptıkları origami desenli tasarım ile yapının deformasyon modunu tetikleyerek, daha fazla enerji sönümleme kapasitesi elde etmeyi başarmışlardır. Geleneksel metal ve CFRP tüpler ile karşılaştırıldığında önerilen tasarımın %86,7 - %135 arasında iyileştirme sergilediğini saptamışlardır.

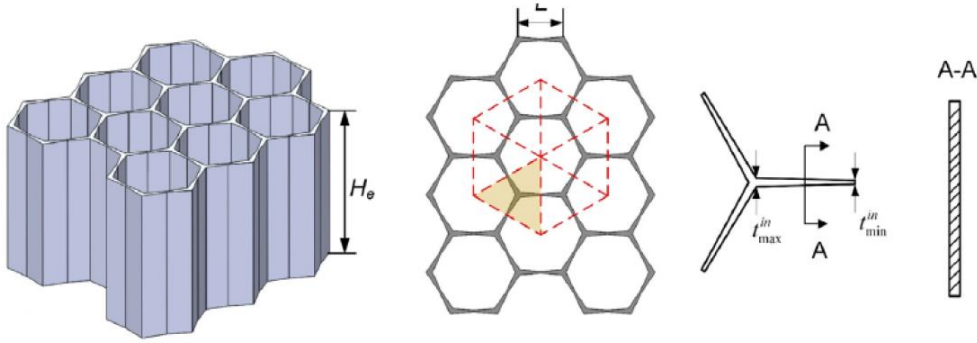
Wang vd. [32], alüminyum-CFRP tüplerin enerji sönümleme performansını mümkün olduğu kadar yükseltmek ve yapının maliyetini de mümkün olduğu kadar azaltmak için deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Oluşturdukları benzetim modellerini, hem deformasyon modları hem de enerji sönümleme performans göstergeleri bakımından deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır. Şekil 2.24'te deneylerde kullanılan tekil tüpler ve bunların birleşiminden elde edilen hibrit tüpler görülmektedir. Dış tüpün alüminyum iç tüpün CFRP olduğu tasarımın (Al-CF), tekil alüminyum ve CFRP ile kıyaslandığında sırasıyla %43,6 ve %17,8 daha fazla enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır. CF-Al hibrit tasarımının ise tekil alüminyuma göre %27,6 daha fazla enerji sönümlediğini fakat CFRP'ye göre ise %31,9 daha az enerji sönümlediğini görmüşlerdir. Gerçekleştirdikleri çok amaçlı eniyileme çalışmalarına göre optimum tasarımın dairesel kesitli, 14 katmanlı kompozit ve 1,2 mm et kalınlığına sahip Al-CF olduğunu ve bu tasarımın başlangıça göre ağırlığı %41,3, tepe kuvvetini %18 ve maliyeti %11,2 azalttığını, sönümlenen enerjiyi ise %48 arttırdığını saptamışlardır.



Şekil 2.24: Tekil tüpler (a) ve hibrit tüpler (b) [32].

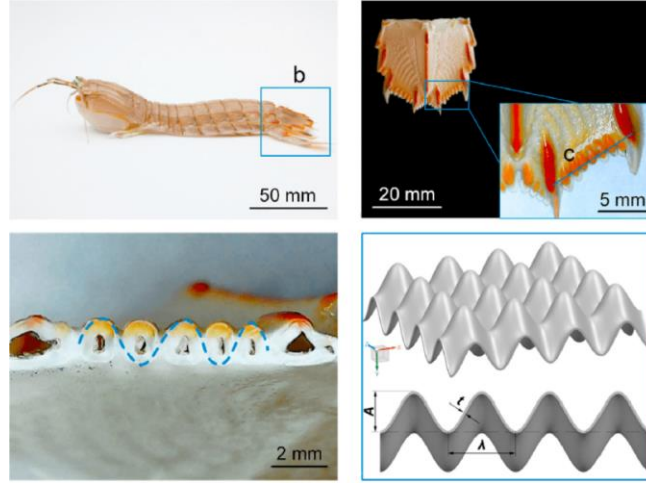
## 2.5 Biyo İlhamlı Enerji Sönümleyici Profiller

Wu vd. [33], bal peteğinin yapısından esinlenerek hem düzlem içi hem de düzlem dışı kalınlığı değişen bir tasarım geliştirmişlerdir. Örnek kalınlık değişimi Şekil 2.25'te gösterilmiştir. Kademeli bal petekleri, Eriyik Yığıma Modelleme (İng. Fused deposition modeling, (FDM)) yöntemi ile PLA (İng. Polylactic acid) malzemeden üretilip aksel ezilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. ANSYS LS-DYNA yazılımı ile benzetim modelleri oluşturmuş ve bu modelleri deney sonuçları ile doğrulamışlardır. Ardından çok amaçlı optimizasyon (İng. Multi objective optimization) çalışması gerçekleştirilerek en iyi tasarımı elde etmişlerdir. En iyi çift dereceli bal peteği tasarımının, normal peteklerden %45,6 daha yüksek özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır.



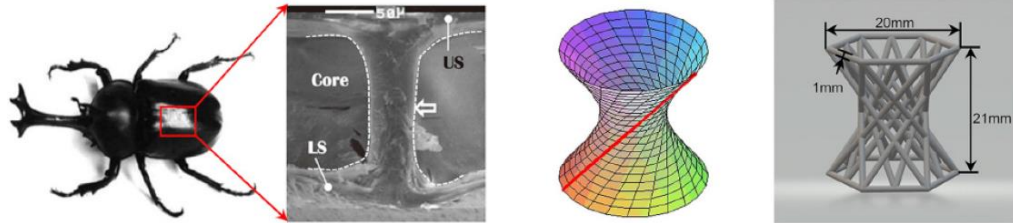
Şekil 2.25: Örnek kalınlık değişimi [33].

Yang vd. [34], peygamberdevesi karidesi kuyruğunun mükemmel bir enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu düşünerek, AlSi10Mg tozundan, seçici lazer eritme yöntemi ile üreterek benzer bir tasarımın aksel ezilme testini ve ANSYS LS-DYNA'da nümerik analiz çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.26'da peygamberdevesi karidesi kuyruğu görülmektedir. AlSi10Mg'den üretilen parçanın mekanik özelliklerini tek eksenli çekme testi ile belirlemişlerdir. Farklı tasarım parametrelerinin sonuca etkisini incelemek için optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çift yönlü oluklu panel yapısındaki dalga boyunun, genliğe göre, özgül enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkisinin daha büyük olduğunu görmüşlerdir. Dalga boyunun altı, genliğin sekiz olduğu tasarımın en iyi darbe direnci performansına sahip olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.26: Peygamber devesi karidesi kuyruğu (Stomatopoda) [34].

Du vd. [35], yaptıkları bir çalışmada japon gergedan böceğinin (İng. Allomyrina Dichotoma) ön kanadından esinlenerek yeni bir kafes yapısı tasarlamışlardır. Şekil 2.27'de bu kafes yapısı görülmektedir. Seçici lazer ergitme yöntemi ile üreterek imalat parametrelerinin (P: laser gücü, v= tarama hızı) mikro yapısına ve enerji sönümlenme kapasitesine etkisini incelemişlerdir. Optimize edilmiş imalat parametrelerinde (P=375 W, v=3500 mm/s) kafes yapıları, yüksek tepe kuvveti (2,95 kN) ve deformasyona rağmen oldukça iyi enerji sönümlenme kapasitesi (3,45 J) göstermişlerdir.



Şekil 2.27: Japon gergedan böceğinin kanadından esinlenilen kafes yapısı [35].

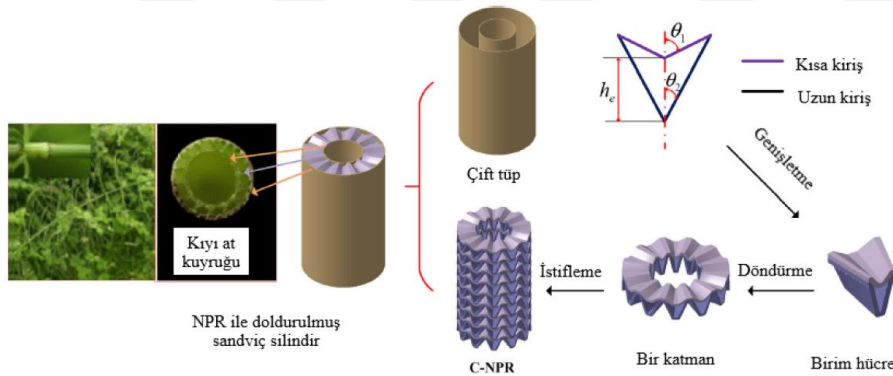
Yin vd. [36], doğal hiyerarşik biyo ilhamlı yapılardan esinlenerek yüksek mukavemetli ve yüksek enerji sönümlenme kapasiteli üç boyutlu hücresel yapılar geliştirmişlerdir. Şekil 2.28'de üçlü periyodik yüzeyin (İng. Triply periodic minimal surface, TPMS) birim hücre elemanı görülmektedir. Eklemeli imalat yöntemi ile 316L paslanmaz çelik malzeme kullanarak çekme ve aksenal ezilme testi için deney numunelerini üretmişlerdir. Biyo-ilhamlı üç boyutlu hücresel yapının ezilme davranışını incelemek için ANSYS LS-DYNA ticari sonlu elemanlar analizi yazılımı kullanarak simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Tasarım parametrelerini optimize etmek için Kriging vekil modelini ve baskın olmayan sıralama genetik algoritmayı (İng. non-

dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) ortaklaşa kullanmışlardır. Sonuç olarak elde edilen biyo ilhamlı üç boyutlu hüresel yapının, son derece yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır.



Şekil 2.28: Üçlü periyodik yüzeyin birim hücre elemanı [36].

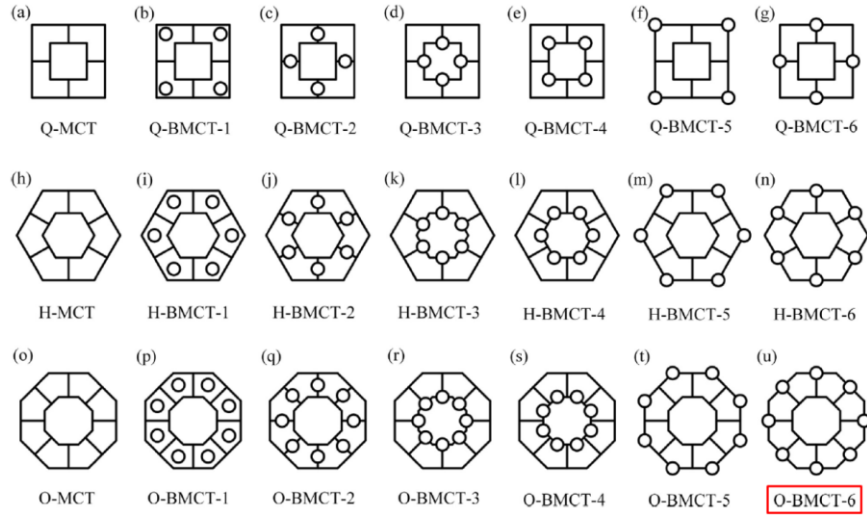
Sun vd. [37], kıyı atkuyruğu yapısından esinlenerek, arası çift oklu ökzetik yapılarla doldurulmuş çift borulu biyo-ilhamlı enerji sönümleyici profil tasarlamışlardır. Şekil 2.29'da kıyı at kuyruğu yapısı (İng. shore horsetail) ve biyo-ilhamlı tasarım görülmektedir. Bu tasarımın enerji sönümleme kapasitesini deneysel ve nümerik olarak inceleyerek, geleneksel tasarımlardan üstünlüklerini vurgulamışlardır. Katman ve hücre sayısındaki artışın, ortalama ezilme kuvveti ve enerji sönümleme kapasitesini arttırdığını saptamışlardır.



Şekil 2.29: Kıyı at kuyruğu yapısı ve biyo-ilhamlı tasarım [37].

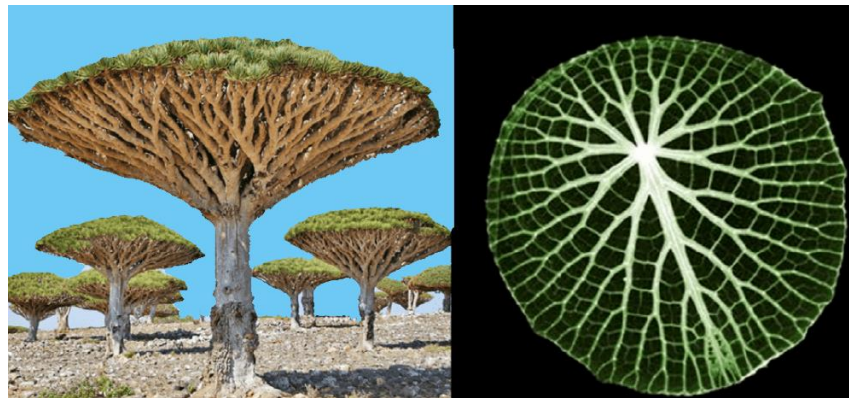
Zhang vd. [38], dörtgen, altıgen, sekizgen ve dairesel kesitleri kullanarak oluşturdukları biyo-ilhamlı çok hücreli tüplerin (İng. bionic multi-cell tubes, BMCT) ezilme davranışlarını incelemişlerdir. Bu tasarımı elde ederken uğur böceğinin ön kanatlarından ilham almışlardır. Şekil 2.30'da farklı tasarımların kesitleri gösterilmektedir. ANSYS LS-DYNA ile oluşturdukları benzetim modellerini, basitleştirilmiş süper katlama elemanı (İng. simplified super folding element) teorisi ile doğrulamışlardır. Sekizgen kesitli BMCT tasarımlarından altıncısının en yüksek ezilme performansı gösterdiğini saptamışlardır. Ardından farklı veki model teknikleri kullanarak çok amaçlı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.





Şekil 2.30: Çok hücreli ve biyo-ilhamlı çok hücreli tüplerin kesitleri [38].

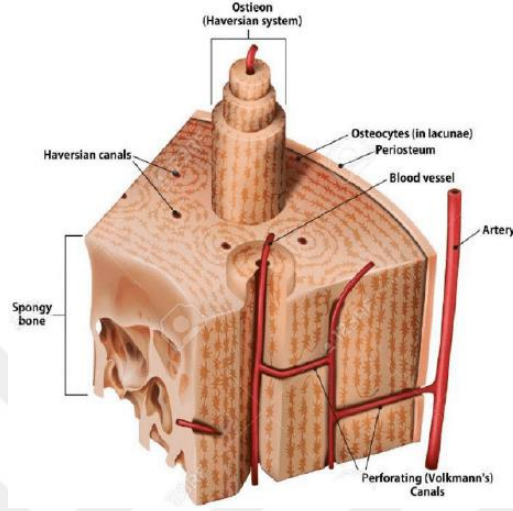
Ha vd. [39], amazon nilüferi (İng. giant water lily) ve ejder kanı ağaçlarından (İng. dragon blood tree) yola çıkarak biyo ilhamlı çok hücreli dairesel tüplerin enerji sönümlenme kapasitelerini deneysel, nümerik ve teorik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.31’de dallı ağaçlara benzeyen ejder kanı ağacı ve amazon nilüferi görülmektedir. Dairesel tüplerin içerisini dallar ile bölerek biyo ilhamlı dairesel tüpleri elde etmişlerdir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden karmaşık orantılı değerlendirme (COPRAS) yöntemini kullanarak biyo ilhamlı tüplerin performansını en iyilemeye çalışmışlardır. İkinci dereceden biyo ilhamlı çok hücreli tüpün, geleneksel çok hücreli tüplere göre yaklaşık %35,4 daha yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır. İkinci derece dört dallı biyo ilhamlı enerji sönümleyici profilin en iyi sonucu verdiğini saptamışlardır.



Şekil 2.31: Ejder kanı ağacı ve amazon nilüferi [39].

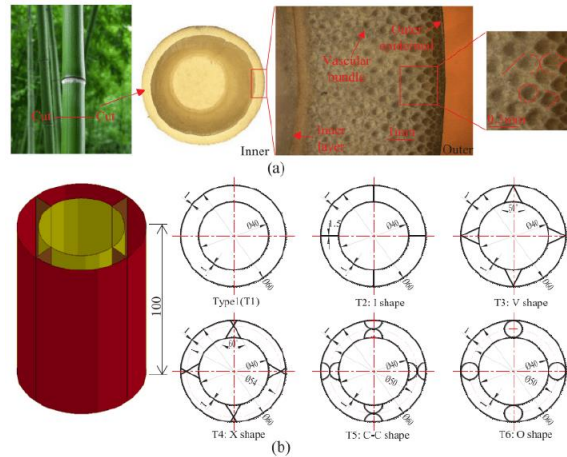
Nikkah vd. [40], kemik yapısının haversian kanalından mimarisinden esinlenerek, iç içe yuvalanmış onsekiz adet biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil geliştirmişlerdir. Şekil 2.32’de kemik yapısı ve haversian kanalı görülmektedir. Yarı statik aksenal

ezilme testini sonlu elemanlar analizi ile doğrulamışlardır. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS'i kullanmışlardır. Yüksek enerji sönümleme kapasitesine ve düşük darbe kuvvetine sahip tasarımın dışarıdan içeriye doğru sırasıyla kare, sekizgen, dairesel ve yanlardan güçlendirilmiş (S-H-Cr) tasarımın olduğunu bulmuşlardır.



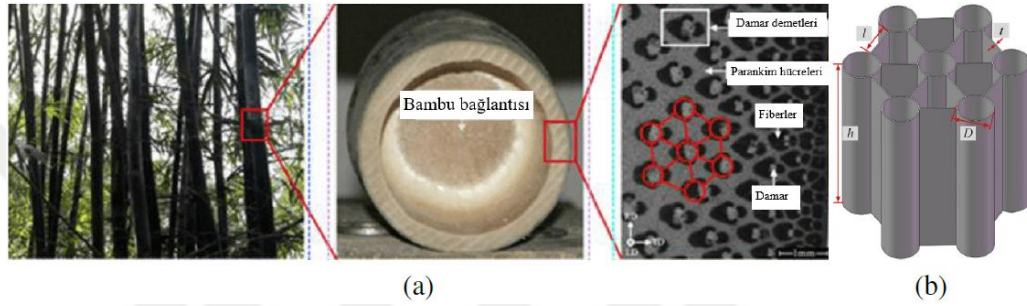
Şekil 2.32: Kemik yapısı ve haversian kanalı [40].

Fu vd. [41], bambu ağacının mikroyapısından esinlenerek tasarladıkları biyo ilhamlı enerji sönümleyici profilin (İng. bionic-bamboo tube, BBT) aksel ezilme davranışını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.33'te bambu ağacının mikroyapısı ve biyo ilhamlı enerji sönümleyici profiller görülmektedir. Kaburga (İng. rib) sayısı ve şeklinin enerji sönümleme performansına etkisini incelemişlerdir. X şeklindeki kaburganın en yüksek özgül enerji sönümleme kapasitesine (31,51 J/g) sahip olduğunu saptamışlardır. En iyi BBT tasarımı ile ilk tasarım karşılaştırıldığında özgül enerji sönümleme kapasitesinde %6.84'lük bir artış olduğunu görmüşlerdir.



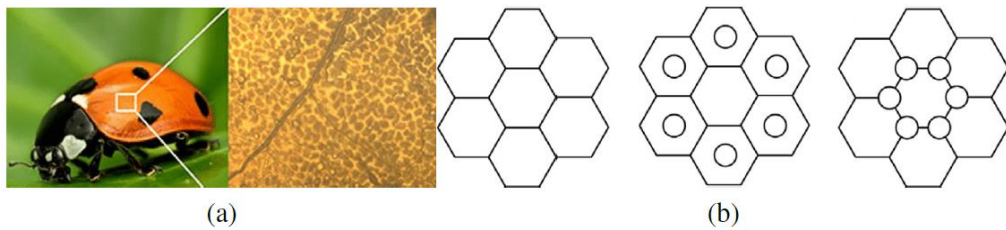
Şekil 2.33: Bambu ağacının mikroyapısı ve biyo ilhamlı enerji sönümleyici profiller [41].

Hu vd. [42], bambu ağacı gövdesinde bulunan iletim damarlarından (İng. vascular bundle) esinlenerek hiyerarşik bal peteği (İng. the bionic honeycomb tubular nested structure, BHTNS) yapıları geliştirmişler ve enerji sönümlenme kapasitelerini deneysel, nümerik ve analitik olarak incelemişlerdir. Şekil 2.34'te bambu ağacı gövdesinin iletim damarları ve BHTNS görülmektedir. Eksenel ezilme testlerini 261,1 kg ağırlığında ve 977 m yükseklikten serbest bırakılan bir plaka ile gerçekleştirmişlerdir. Bir hücrenin çapı ( $D$ ) ve iki hücre arasındaki mesafe ( $L$ ) parametrelerini kullanarak optimizasyon çalışmaları yapmışlardır.  $D$  ve  $L$  parametreleri arttıkça özgül enerji sönümlenme kapasitesinde azalma olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.34: Bambu ağacı gövdesinde bulunan iletim damarları (a) ve BHTNS yapısı (b) [42].

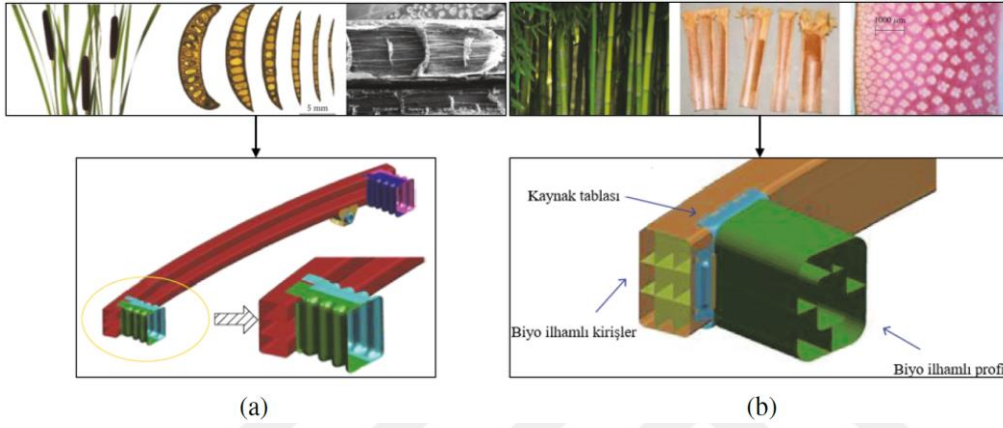
Xiang ve Du [43], uğur böceği kanadının mikroyapısından esinlenerek tasarladıkları biyo ilhamlı ince cidarlı bal peteği (İng. bionic honeycomb thin-walled structure, BHTS) yapısının dinamik darbeye karşı enerji sönümlenme kapasitesini araştırmışlardır. BHTS'nin içerisini farklı kolonlarla doldurmuşlardır. Şekil 2.35'te uğur böceği kanadının mikroyapısı ve BHTS'ler görülmektedir. Eksenel ezilme için 500 kg ağırlığa ve 10 m/s hıza sahip rijit bir plaka kullanmışlardır. BHTS-2'nin özgül enerji sönümlenme kapasitesi, BHS'ye göre %35,97, BHTS-1'e göre ise %24,52 daha fazla çıktığını saptamışlardır. Yaptıkları parametrik çalışma neticesinde BHTS-2'deki kolon sayısının 6 ve kolon çapının 8 mm olduğu durumda, enerji sönümlenme kapasitesinin en yüksek olduğunu görmüşlerdir.



Şekil 2.35: Uğur böceği kanadının mikroyapısı (a) ve sırasıyla BHS, BHTS-1, BHTS-2 (b) [43].

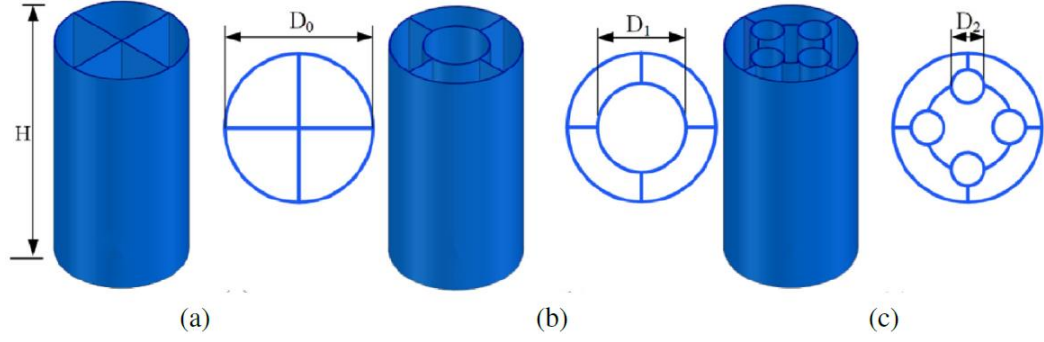


Xu vd. [44], sukamışı (İng. cattail) ve bambu ağacının yapısal formundan esinlenerek geliştirdikleri biyo ilhamlı enerji sönümleyici profilin enerji sönümlene kapasitesini nümerik olarak araştırmışlardır. Enerji sönümleyici profilin önüne bir araç tamponu yerleştirerek, ANSYS LS-DYNA ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.36’da sukamışı ve bambu ağacının yapısal formları ve tasarladıkları biyo ilhamlı enerji sönümleyici profiller görülmektedir. Tasarladıkları biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil ve tampon yapısının, ezilme deformasyonunu %33,33 ve toplam ağırlığı ise %44,44 azalttığını saptamışlardır.



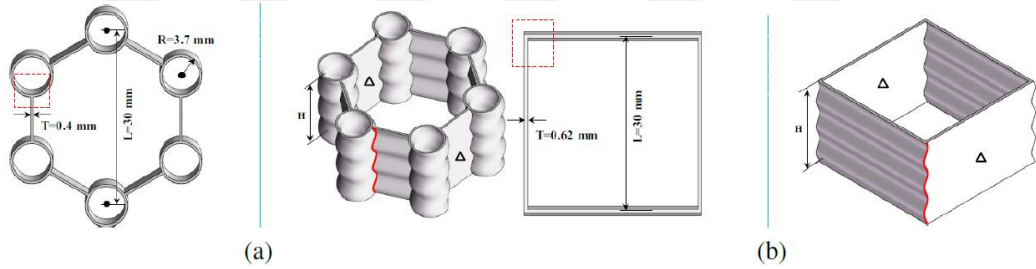
Şekil 2.36: Sukamışının yapısal formu ve biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil(a) ve bambu ağacının yapısal formu ve biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil (b) [44].

Zhang vd. [45], doğada çokça bulunan hiyerarşik yapılardan esinlenerek yenilikçi hiyerarşik dairesel tüplerin (İng. hierarchical circular tube, HCT) enerji sönümlene performanslarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Alüminyum 6061 malzemeden ürettikleri HCT’lerin orta kırışlerinin kesiştiği noktalarına dairesel tüpler ekleyerek birinci ve ikinci dereceden yapılar elde etmişlerdir. Şekil 2.37’de hiyerarşik yapıların oluşumu görülmektedir. Enerji sönümlene kapasitesi bakımından incelendiğinde ikinci dereceden HCT’nin büyük avantajlar sağladığını görmüşlerdir. İkinci dereceden HCT’nin temel geometrik parametrelerinin enerji sönümlene performansına etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları en iyileme çalışmaları sonucunda, en yüksek enerji sönümlene kapasitesine sahip tasarımın alt daire sayısının(N) 5, birinci derece daire çapının ( $D_1$ ) ve ikinci derece daire çapının ( $D_2$ ) sırasıyla 45,9 mm ve 18 mm olduğunu bulmuşlardır.



Şekil 2.37: Sıfırıncı dereceden (a) birinci dereceden (b) ve ikinci dereceden (c) hiyerarşik yapıların oluşumu [45].

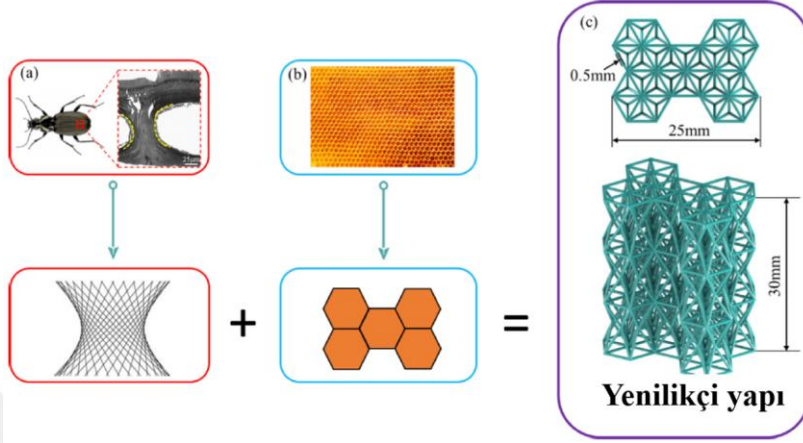
Yu vd. [46], yaptıkları çalışmada bir böceğin mikroyapısından esinlenerek yüksek enerji sönümlenme kapasitesine ve yüksek ezilme kuvvet verimliliğine sahip biyo ilhamlı trabeküler balpeteği yapısını (İng. end-trabecular beetle elytron plate, EBEP) geliştirmişlerdir. EBEP ile endüstride kullanılan geleneksel enerji sönümleyici profillerin karşılaştırmasını deneysel nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.38'de EBEP biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil ve geleneksel enerji sönümleyici profil görülmektedir. EBEP'in yaklaşık 5 kat daha fazla enerji sönümlenme kapasitesine ve yaklaşık 2,5 kat daha fazla ezilme kuvvet verimliliğine sahip olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.38: EBEP biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil (a), geleneksel enerji sönümleyici profil (b) [46].

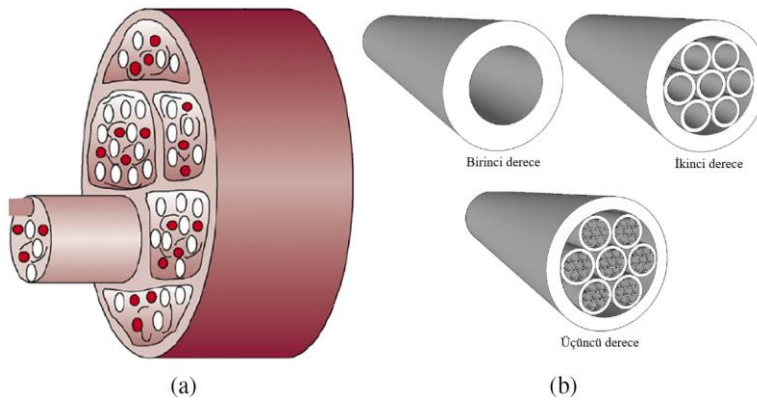
Wang vd. [47], bir böceğin ön kanat yapısından ve balpeteği yapısından esinlenerek biyo ilhamlı yenilikçi bir kafes (İng. lattice) yapısı geliştirmişlerdir. Şekil 2.39'da biyo ilhamlı yenilikçi kafes yapısı görülmektedir. Eksenel statik ve dinamik yüklemeye maruz bırakılan bu yapıların enerji sönümlenme kapasitesilerini ve mekanik dayanım performanslarını araştırmışlardır. Seçici lazer ergitme (İng. selective laser melting) yöntemi ile üretilen parçaların imalat parametrelerinin (P = lazer gücü, v = tarama hızı) sonuçlara etkisini incelemişlerdir. Isıl işlem görmüş AlSi10Mg malzemenin farklı deformasyon hızlarındaki (İng. strain rate) davranışını modelleyebilmek için Johnson-Cook malzeme modelini oluşturmuşlardır. Eniyileştirilmiş imalat parametrelerinde (P = 300 W, v = 1400 mm/s) ürettikleri biyo ilhamlı yenilikçi kafes yapısının yarı-statik

eksenel ezilme sonuçlarını deneysel ve nümerik olarak karşılaştırdıklarında %4,5 fark olduğunu saptamışlardır. Aynı imalat parametrelerinde ürettikleri numunenin özgül enerji sönümlene kapasitesinin 9,3 kJ/kg ve tepe kuvvetinin 1,8 kN olduğunu bulmuşlardır.



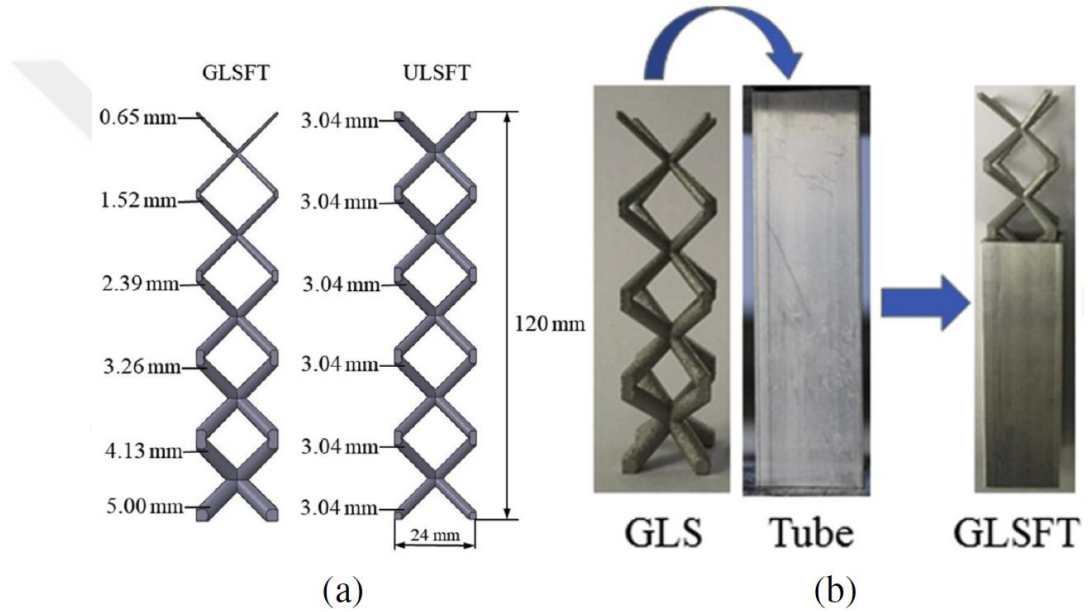
Şekil 2.39: Biyo ilhamlı yenilikçi kafes yapısı [47].

Tsang ve Raza [48], tendon ve kas gibi biyolojik malzemelerin mikro ve nano mimarisinden esinlenerek boru şeklinde hiyerarşik yapıların dinamik ve düzlem içi (İng. in-plane) yükleme durumundaki enerji sönümlene performanslarını incelemişlerdir. Şekil 2.40'ta tendon yapısı ve birinci, ikinci ve üçüncü dereceden boru şeklindeki hiyerarşik yapılar görülmektedir. ANSYS Explicit Dynamic modülünü kullanarak, rijit bir duvarı bu yapıya çarptırarak sonuçları incelemişlerdir. Rijit duvarın hızı ve kütlesi, et kalınlıkları ve hiyerarşi derecesini tasarım değişkenleri, von-mises gerilmesi, dikey yer değiştirme, temas kuvveti ve toplam enerjiyi de çıktı olarak kabul ederek parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çıktılar arasındaki en iyi iyileşmenin, ikinci derecede %73 ve üçüncü derecede %89 ile toplam enerjide gerçekleştiğini saptamışlardır.



Şekil 2.40: Tendon yapısı (a) ve boru şeklinde hiyerarşik yapıların oluşumu (b) [48].

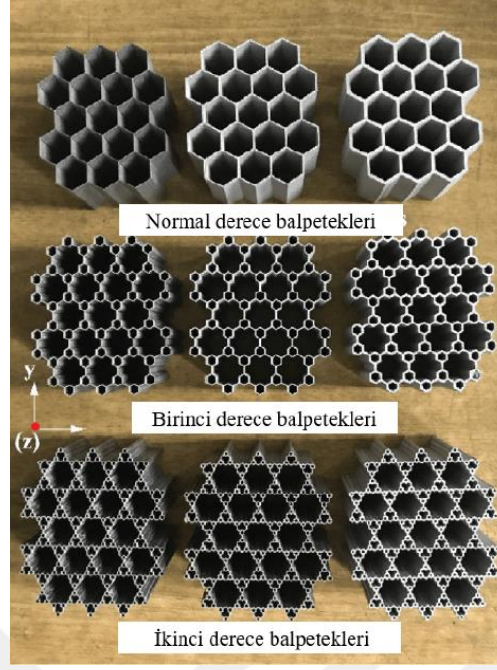
Çetin ve Baykasoğlu [49], kademeli latis yapılar (İng. graded lattice structure filled tubes, GLSFT) ve tekdüze latis yapılar (İng. uniform lattice structure filled tubes, ULSFT) ile doldurulmuş alüminyum kare kesitli enerji sönmüleyici profillerin enerji sönmüleme performanslarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.41’de GLSFT, ULSFT ve hibrit enerji sönmüleyici profil görülmektedir. Temel çap ve temel açısı gibi tasarım değişkenlerinin sonuca etkisini araştırmışlardır. GLSFT’lerin ULSFT’lere göre 3,3 kat daha fazla özgül enerji sönmüleme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır. Aynı ağırlığa sahip GLSFT ve ULSFT’ler karşılaştırıldığında, GLSFT’lerin daha yüksek enerji sönmüleme performansı gösterdiğini saptamışlardır.



Şekil 2.41: Latis yapılar (a), hibrit enerji sönmüleyici profiller (b) [49].

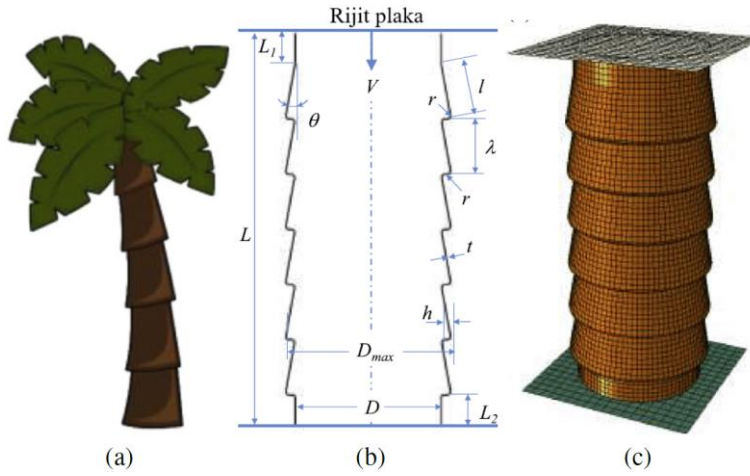
Zhang vd. [50], seçici lazer eritme yöntemi ile AlSi10Mg malzemeden üretilen hiyerarşik balpeteği yapılarının düzlem içi ezilme davranışlarını araştırmışlardır. Isıl işlem görmüş ve görmemiş normal derece, birinci derece ve ikinci derece hiyerarşik bal peteği yapılarının yapısal hiyerarşinin etkisini ve mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Şekil 2.42’de normal, birinci ve ikinci dereceden hiyerarşik bal peteği yapıları görülmektedir. Yüksek hiyerarşik balpeteği yapılarının basma mukavemeti nispeten küçük olmasına rağmen, elastisite modüllerinin yüksek olduğunu saptamışlardır. Isıl işlem görmemiş hiyerarşik balpeteği yapılarının, ısıtılma işlem görmüşlere göre daha dayanıklı olduğunu bulmuşlardır.





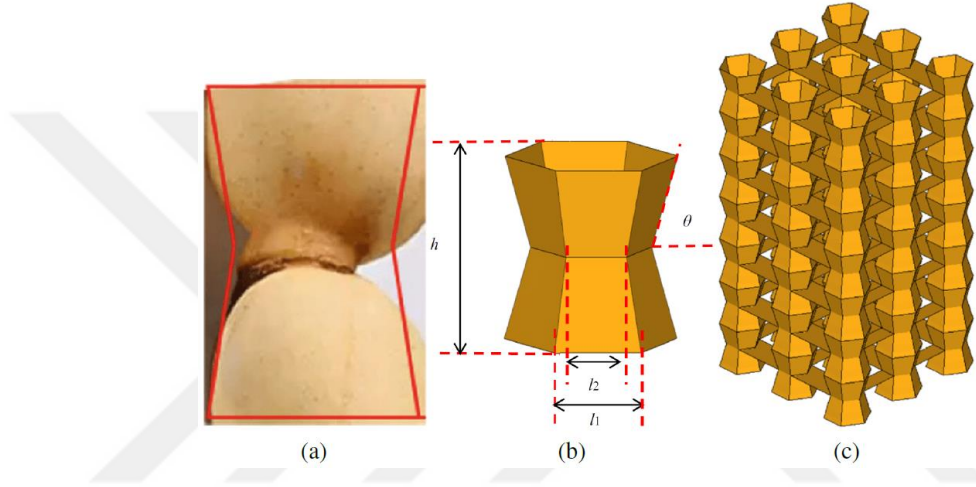
Şekil 2.42: Normal, birinci ve ikinci dereceden hiyerarşik balpetekleri [50].

Ha vd. [51], hindistan cevizi ağacının doğal formundan esinlenerek konik oluklu tüpün (İng. conical corrugation tube, CCT) enerji sönümlenme performansını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.43'te sırasıyla hindistan cevizi ağacı, konik oluklu tüp ve konik oluklu tüpün sonlu elemanlar modeli görülmektedir. ABAQUS programı ile benzetim modelleri kullanarak koniklik açısı ve dalga boyunun enerji sönümlenme kapasitesine etkisini incelemişlerdir. CCT'nin düz tüpe göre ilk tepe kuvvetini %50'den %97'ye kadar düşürdüğünü saptamışlardır. CCT'lerin küçük koniklik açılarında nispeten daha yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır. Dalga boyunun 22,8 mm ve koniklik açısının  $5^\circ$  olduğu tasarımın en yüksek enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır.



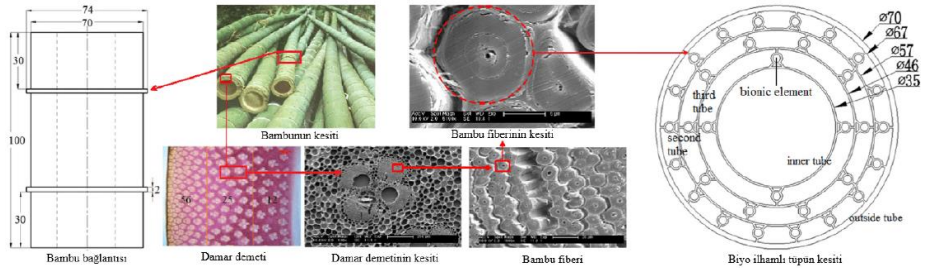
Şekil 2.43: Hindistan cevizi ağacı (a), konik oluklu tüp (b), konik oluklu tüpün sonlu elemanlar modeli (c) [51].

Li vd. [52], yenilikçi lotus kökünden (İng. lotus root fillet tube, LFT) esinlenerek ortaya çıkardıkları profili dörtgen kesitli alüminyum tüpün içerisinde yerleştirerek elde ettikleri biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin enerji sönümleme performansını nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.44'te sırasıyla lotus kökü, birim eleman ve LFT görülmektedir. Dış tüpün kalınlığı ( $t_1$ ), birim elemanın kalınlığı ( $t_2$ ), birim elemanın yüksekliği ( $h$ ) ve uzunluğunu ( $l_1$ ,  $l_2$ ) tasarım değişkeni kabul ederek en iyileme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Özgül enerji sönümleme kapasitesinin en yüksek (31,8 kJ/kg) olduğu tasarım ölçülerinin sırasıyla  $t_1= 2,3$  mm,  $t_2= 0,6$  mm,  $h= 6,7$  mm,  $l_1= 5,2$  mm,  $l_2= 3,6$  mm olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.44: Lotus kökü (a), birim eleman (b) ve LFT (c) [52].

Zou vd. [53], bambu ağacının yapısından esinlenerek geliştirdikleri biyo ilhamlı enerji sönümleyici profilin aksel ve yanal enerji sönümleme kapasitesilerini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.45'te bambu ağacından esinlenilen enerji sönümleyici tüp görülmektedir. Biyo ilhamlı iç tüpün ve dış tüpün kalınlığını tasarım değişkeni olarak kabul ederek, yanıt yüzey metodu (İng. response surface method) ile en iyileme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Özgül enerji sönümlemesinin en yüksek (35,03 kJ/kg) olduğu iç ve dış tüp kalınlıklarının sırasıyla  $t_1= 1,06$  mm ve  $t_2= 1,2$  mm olduğunu saptamışlardır.



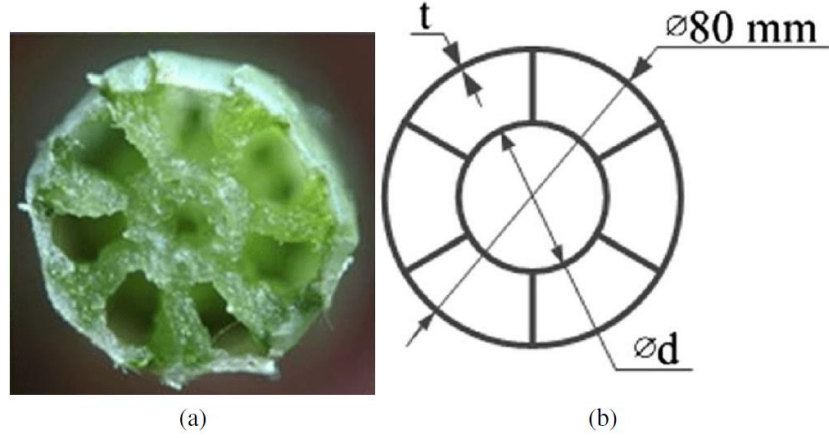
Şekil 2.45: Bambu ağacından esinlenilen enerji sönümleyici profil [53].

Chen vd. [54], bambu ağacının kesitinden esinlenerek tasarladıkları farklı biyo ilhamlı enerji sönümleyici profillerin enerji sönümlenme kapasitelerini deneysel olarak incelemiştir. Değişken kalınlıklı biyo ilhamlı tüp (İng. bionic tubes of variable thickness, BTVT), kaburgalı biyo ilhamlı tüp (İng. bionic tubes with rib, BTR) ve bambu kesitli biyo ilhamlı tüp (İng. bionic tubes with bamboo cross-section, BTBC) olmak üzere üç farklı tipte profili incelemiştir. Şekil 2.46’da bu üç farklı tipteki biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil görülmektedir. Düşen ağırlık darbe testi (İng. drop-weight test) ile deneysel çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. BTVT’ler ve BTBC’lerin, geleneksel tüpe göre, sırasıyla ortalama %8 ve %50 daha fazla özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.46: Üç farklı biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil [54].

Xiao vd. [55], at kuyruğu bitkisinin yapısal formundan esinlenerek geliştirdikleri biyo ilhamlı enerji sönümleyici profillerin aksel dinamik yüklemeye karşı enerji sönümlenme performanslarını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Farklı duvar sayısına sahip altı farklı at kuyruğu bitkisinden esinlenilmiş ince cidarlı yapıların (İng. horsetail-bionic thin-walled structure, HBTS) enerji sönümlenme kapasitelerini değerlendirmişlerdir. Şekil 2.47’de at kuyruğu bitkisinin kesiti ve at kuyruğu bitkisinden esinlenilmiş ince cidarlı yapının kesiti görülmektedir. İç çap ve duvar kalınlığını tasarım değişkeni olarak belirledikten sonra, özgül enerji sönümlenme kapasitesini en yüksek seviyeye çıkartmak için çok amaçlı en iyileme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. On altı hücreli HBTS’nin 57,2 kJ/kg ile en yüksek özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.47: At kuyruğu bitkisinin kesit görüntüsü (a), at kuyruğu bitkisinden esinlenilmiş ince cidarlı yapının kesit görüntüsü (b) [55].

Taşdemirci vd. [56], bir tür midye olan balanustan esinlenerek elde ettikleri biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin yarı-statik ve dinamik ezilme altında yük taşıma ve enerji sönümlene kapasitesini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 2.48'de balanus ve biyo ilhamlı yapı görülmektedir. Derin çekme işlemi ile ürettikleri biyo ilhamlı yapının kalıntı gerilim-gerinimini ve kalınlık dağılımını anlamak için ANSYS LS-DYNA yazılımını kullanmışlardır. Deformasyon hızı ve sıcaklığa bağlı olarak değişen malzeme özelliklerini modelleyebilmek adına Johnson-Cook malzeme modelini kullanmışlardır. Ortalama ezilme kuvvetindeki artış yarı-statik hızlarda %5 iken deformasyon hızları arttıkça bu artışın %26 olduğunu saptamışlardır.



Şekil 2.48: Balanus (a) ve biyo ilhamlı yapı(b) [56].

Xin vd. [57], deniz kabuğu ve istiridye gibi deniz hayvanlarının kabuğunda bulunan ve süslemecilikte kullanılan beyaz ve parlıtlı sedef maddesinden esinlenerek tasarladıkları karbon epoksi kompozit tüpün enerji sönümlene kapasitesini aksenal ezilme deneylerini yaparak araştırmışlardır. Katman kesimi aralıkları ve dağılımlarına dayanan dört farklı karbon epoksi tüpün enerji sönümlene kapasitesini incelemişlerdir. Dairesel ve sürekli katman kesimleri ilk tepe kuvvetini düşürmeye

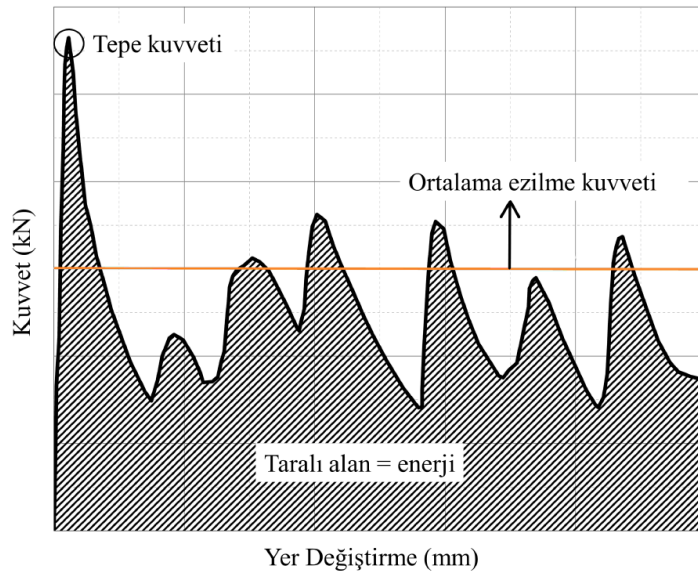


yardımcı olmasına rağmen, ani kırılmalara ve ezilme kuvvetinde dalgalanmalara neden olduğunu saptamışlardır. İlk tepe kuvvetini %39 düşürmeyi ve özgül enerji sönümleme kapasitesini %51 arttırmayı başarmışlardır.

Yin vd. [58], at kuyruğunun yapısal karakteristiğinden esinlenerek biyo ilhamlı enerji sönümleyici profil (İng. bionic thin-walled structure, BTS) ve içerisi köpük ile doldurulmuş biyo ilhamlı profil (İng. foam-filled bionic thin-walled structure, FBTS) geliştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarına ilaveten ANSYS LS-DYNA ile benzetim modelleri kurarak nümerik analizler de gerçekleştirmişlerdir. FBTS yapısını çok amaçlı güvenilirlik temelli iyileme yöntemi (İng. multi-objective deterministic optimization, MDO) ile geliştirerek geleneksel tasarımdan daha iyi sonuçlar verdiğini saptamışlardır. Tasarım parametrelerindeki belirsizliklerden dolayı çok amaçlı gürbüz en iyileme çalışmasında (İng. multi-objective robust optimization, MRO) gerçekleştirmişlerdir. MRO'nun MDO'ya göre daha güvenilir sonuçlar verdiğini saptamışlardır.

## 2.6 Enerji Sönümleme Performansı Göstergeleri

Enerji sönümleyici profillerin performans göstergeleri genellikle enerji ve kuvvet tabanlı metrikler kullanılarak değerlendirilmektedir. Tipik kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 2.49'da gösterilmektedir.



Şekil 2.49: Tipik kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Toplam sönümlenen enerji, kuvvet-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan olarak tanımlanmaktadır. Toplam sönümlenen enerjinin hesaplanması eşitlik (2.1)'de gösterilmiştir [5].

$$E_T = \int_0^{\delta} F(x)dx \quad (2.1)$$

Burada  $\delta$  deformasyon mesafesini,  $F$  ise ezilme kuvvetini temsil etmektedir. Özgöl enerji sönümleme kapasitesi toplam sönümlenen enerjinin kütleyle bölünmesiyle elde edilmektedir. Eşitlik (2.2)'de özgöl enerji sönümleme kapasitesinin nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir.

$$SEA = \frac{E_T}{m} \quad (2.2)$$

Burada  $m$  enerji sönümleyici profilin kütesini temsil etmektedir. Ortalama ezilme kuvveti, toplam sönümlenen enerjinin deformasyon miktarına bölünmesiyle elde edilmektedir. Eşitlik (2.3)'te bu hesaplama gösterilmektedir.

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

Kuvvet-yer değiştirme grafiğinde, elde edilen en yüksek kuvvet, tepe kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (2.4)'te bu ifadenin tanımı yer almaktadır.

$$F_{maks} = \max F(x) \quad (2.4)$$

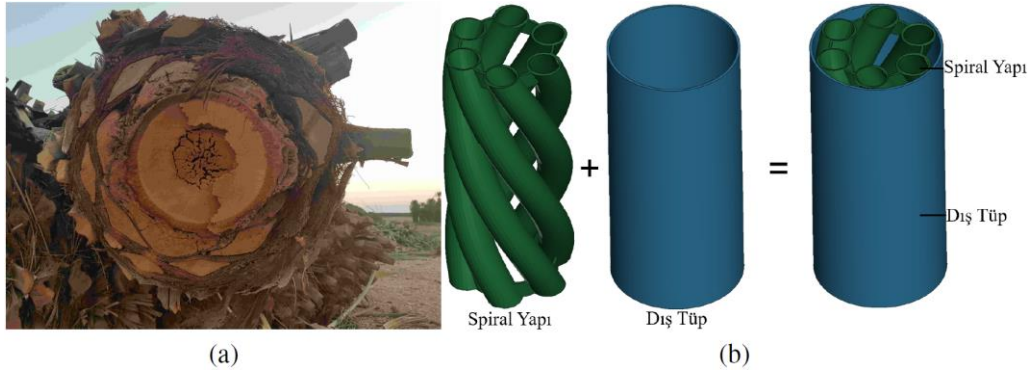
Ezilme kuvveti verimliliği ise ortalama ezilme kuvvetinin, tepe kuvvetine oranlanmasıyla elde edilmektedir. Genellikle yüzde cinsinden ifade edilmektedir. Eşitlik (2.5)'te ezilme kuvveti verimliliği verilmiştir.

$$CFE = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \quad (2.5)$$



### 3. BİYO İLHAMLI HİBRİT BİR ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ PROFİL TASARIMI

Doğal yapılar uzun yıllardır süren evrimlerinden sonra güçlü mekanik özellikler göstermektedir. Biyo ilhamlı yapılar yüksek mukavemet ve hafiflikten dolayı otomotiv, savunma, uzay ve havacılık ve biyomedikal gibi birçok endüstriyel sektörde kullanılmaktadır. Son yıllarda, yüksek enerji sönmleme kapasitesine sahip hafif yapılar tasarlamak için biyo ilhamlı yapılara olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Literatüre kazandırılan çalışmalar incelendiğinde, doğada bulunan bitki ve hayvan türlerinin doğal formundan esinlenilerek birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Doğadan esinlenilmiş yapılara örnek olarak bal peteği, bambu ağacı gövdesi ve sinek kanatları verilebilir. Bu yapılar enerji sönmleyici profillerden, ısı değiştiricilerine kadar birçok farklı alanda çalışılmaya ve kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada ise hurma ağacının (Lat. Phoenix dactylifera) gövdesinden esinlenilen spiral yapılar enerji sönmleyici profil olarak kullanılmıştır. Boş alüminyum tüp içersine, spiral yapı yerleştirilerek, biyo ilhamlı hibrit enerji sönmleyici profil elde edilmiştir. Şekil 3.1’de hurma ağacının kesiti ve elde edilen biyo ilhamlı hibrit enerji profil görülmektedir.



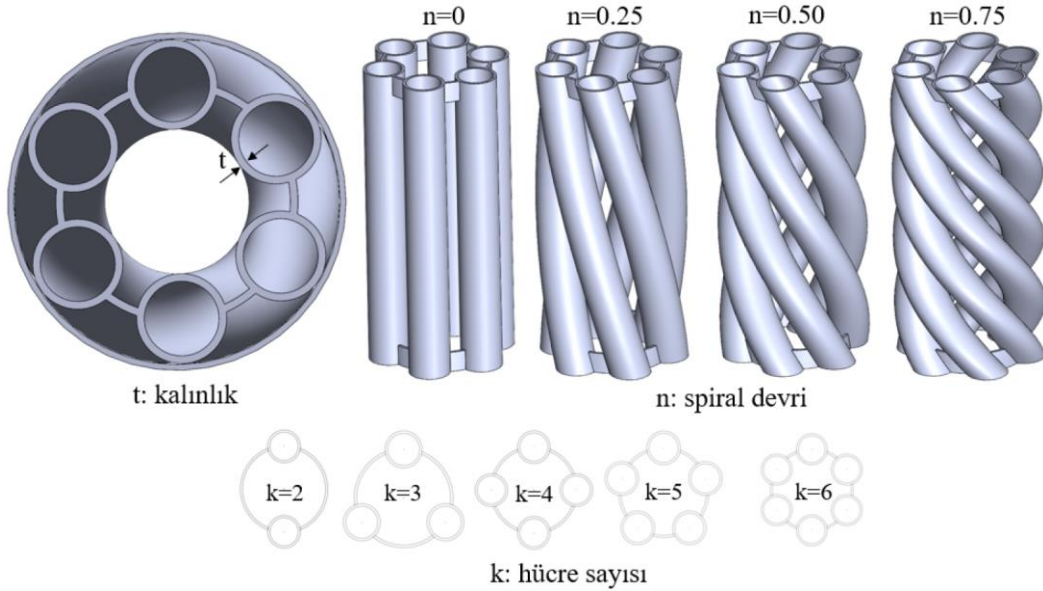
Şekil 3.1: Hurma ağacının kesiti(a) ve biyo ilhamlı hibrit enerji sönmleyici profil(b)

### 3.1 Optimizasyon Probleminin Tanımı

Biyo-ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin özgül enerji sönümleme kapasitesini ve ezilme kuvveti verimliliğini arttırmak için vekil tabanlı eniyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Eniyileme problemi standart formda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \text{Tasarım Değişkenleri} \quad & x=[n,t,k] \\ \text{Minimize} \quad & -f(x) \\ \text{Kısıtlar} \quad & 0 \leq n \leq 0.75 \\ & 1 \leq t \leq 1.70 \\ & k \in \{2,3,4,5,6\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Optimizasyon probleminin tasarım değişkenleri; spiral devri ( $n$ ), et kalınlığı ( $t$ ) ve hücre sayısı ( $k$ ) olarak belirlenmiştir. Şekil 3.2’de tasarım değişkenleri görülmektedir.



Şekil 3.2: Tasarım değişkenleri.

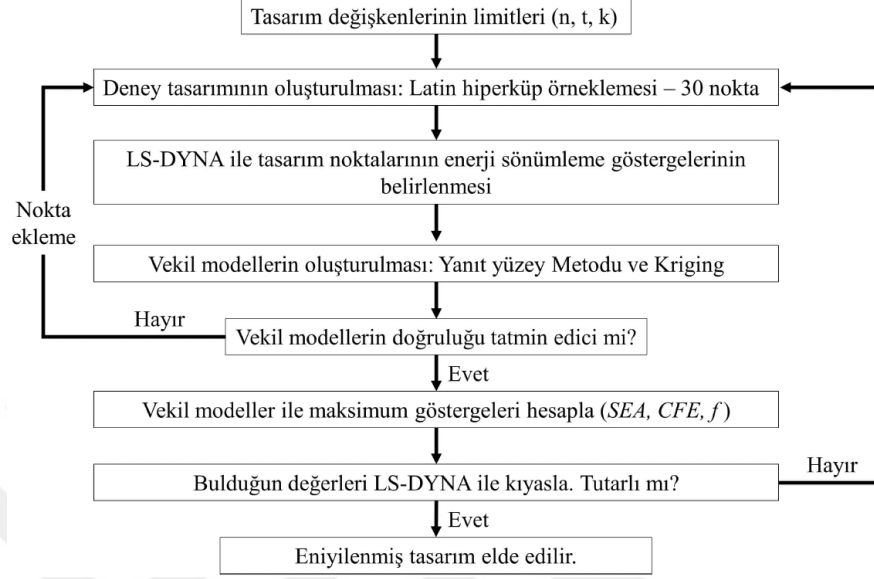
Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu; özgül enerji sönümleme kapasitesinin ve ezilme kuvveti verimliliğinin enbüyüklenmesini hedefleyen bir kompozit fonksiyon olup, eşitlik 3.2’de tanımlanmaktadır.

$$f = 0,5 \times \frac{SEA}{SEA_{maks}} + 0,5 \times \frac{CFE}{CFE_{maks}} \quad (2.5)$$

Burada  $SEA_{maks}$  ve  $CFE_{maks}$  sırasıyla özgül enerji sönümleme kapasitesi ve ezilme kuvveti verimliliği için veri noktalarında elde edilen en büyük değerlerdir.

## 3.2 Optimizasyonda Kullanılacak Yöntemler

Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profillerin eniyileme çalışmasında kullanılacak yöntemlerin ve izlenecek yolun akış şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3: Eniyileme çalışması akış şeması.

ANSYS LS-DYNA ile oluşturulan benzetim modellerinin, deneysel sonuçlar ile doğrulanmasının ardından eniyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Burada ilk olarak tasarım değişkenlerinin limitleri belirlendikten sonra otuz adet deney tasarımı noktası oluşturulmuştur. Bu noktaların enerji sönümleme performans göstergeleri ANSYS LS-DYNA ile elde edilmiştir (bkz: EK 1). Özgül enerji sönümleme kapasitesi, ezilme kuvveti verimliliği ve kompozit fonksiyon için vekil modeller oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında ikinci dereceden yanıt yüzey metodu (İng. Response surface method, RSM) ve sıfırinci ve birinci mertebeden Kriging vekil modelleri (KR0, KR1) kullanılmıştır. Vekil modellerde temel amaç, tasarım değişkeni seti ( $x$ ) ile yanıt ( $y$ ) arasında bir ilişki kurmaktır. Yanıt yüzey metodunda bu işlem polinomlar ile yapılırken, Kriging modelinde global eğilim modeli (trend model) kullanılır. Yanıt yüzey metodu genel formda eşitlik 3.3'teki gibi ifade edilmektedir.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{n_b} \beta_i \xi_i(x) \quad (3.3)$$

Burada  $n_b$  sabit sayısını,  $\beta$  sabitleri,  $\xi$  ise şekil fonksiyonunu temsil etmektedir. Üç adet tasarım değişkenine sahip ikinci dereceden yanıt yüzey fonksiyonu eşitlik 3.4'deki gibi oluşmaktadır.

$$\hat{y} = \beta_1 + \beta_2 X_1 + \beta_3 X_2 + \beta_4 X_3 + \beta_5 X_1 X_2 + \beta_6 X_1 X_3 + \beta_7 X_2 X_3 + \beta_8 X_1^2 + \beta_9 X_2^2 + \beta_{10} X_3^2 \quad (3.4)$$

Kriging vekil modelinin genel formu eşitlik 3.5’de verilmiştir.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{n_b} \beta_i \xi_i(x) + Z(x) \quad (3.5)$$

Kriging vekil modelinde trend model, doğrusal, ikinci dereceden, trigonometrik yada logaritmik şekilde tanımlanabilmektedir. Rastgele süreç modelinin yönetildiği  $Z(x)$  ifadesini modelleyebilmek için gaussian, spline veya kübik gibi modeller kullanılmaktadır. Oluşturulan vekil modellerin doğruluğunu tespit etmek için eşitlik 3.6’da verilen çapraz doğrulama hata oranları (İng. Leave one out generalized mean square cross validation, GMSE) hesaplanmıştır.

$$GMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_k - \hat{y}_k^{(-k)})^2} \quad (3.6)$$

Burada  $N$  veri noktasını,  $y_k$  gerçek sonucu ve  $\hat{y}_k$  ise vekil model kullanılarak tahmin edilen değeri temsil etmektedir. Elde edilen GMSE değerleri, veri noktalarındaki en büyük ve en küçük değerlerin farkına oranlanarak, eşitlik 3.7’deki gibi normalize edilmiştir ve  $GMSE_{nor}$  hesaplanmıştır.

$$GMSE_{nor} = \frac{GMSE}{y_{maks} - y_{min}} \quad (3.7)$$

İkinci derece yanıt yüzey metodu, sıfırcı ve birinci mertebeden Kriging vekil modellerinin  $GMSE_{nor}$  değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 3.1’de vekil modellerin  $GMSE_{nor}$  değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1: Yanıt Yüzey Metodu ve Kriging vekil modellerinin çapraz doğrulama hata oranları.

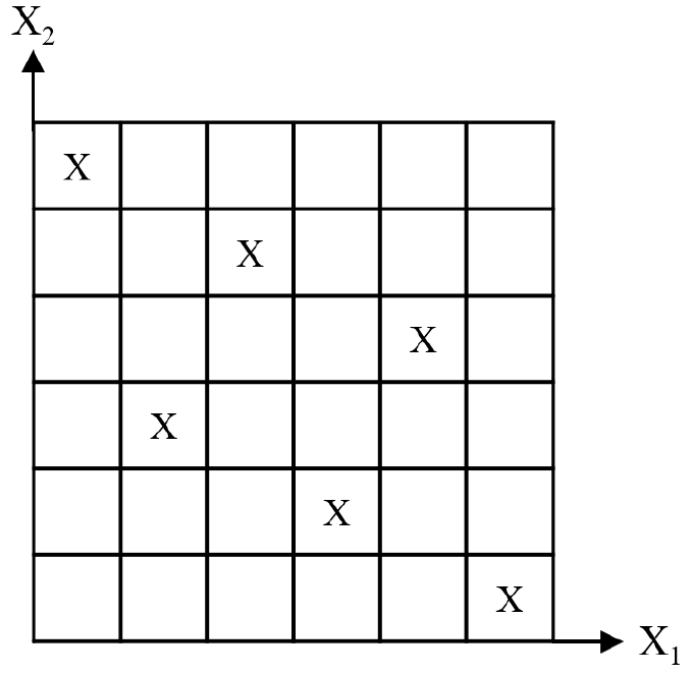
		RSM	KR0	KR1
Enerji Sönümlenme Performansı Göstergeleri	Sembol	$GMSE_{nor}$	$GMSE_{nor}$	$GMSE_{nor}$
Toplam Sönümlenen Enerji	$E_T$	7,4	5,6	6,0
Kütle	$m$	0,0	0,2	0,3
Tepe Kuvveti	$F_{maks}$	6,0	3,7	2,6
Ortalama Ezilme Kuvveti	$F_{ort}$	7,4	5,6	6,0
Özgül Enerji Sönümlenme Kapasitesi	$SEA$	22,8	12,9	12,8
Ezilme Kuvveti Verimliliği	$CFE$	10,0	8,8	7,6
Kompozit Fonksiyon	$f$	18,8	14,6	11,7
$GMSE_{nor}$ değerleri % cinsindedir.				

Özgül enerji sönümlenme kapasitesi ve kompozit fonksiyon enerji sönümlenme performansı göstergelerinin her üç vekil modelde de hata oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Ezilme kuvveti verimliliğinde ise hata oranı %7,6 ile birinci mertebeden Kriging vekil modelinde çıkmıştır. Diğer göstergelere bakıldığında her üç vekil modelde de hata oranlarının %10'un altında kaldığı saptanmıştır.

### 3.3 Deney Tasarımının Oluşturulması

Vekil modellerin oluşturulabilmesi için ilk olarak latin hiperküp örnekleme (İng. Latin hypercube sampling, LHS) metodu kullanılarak otuz adet deney tasarımı noktası (İng. Design of experiment, DOE) MATLAB yazılımı aracılığıyla oluşturulmuştur. MATLAB yazılımında tasarım noktalarının oluşturulabilmesi için "lhsdesign" komutu kullanılmıştır. Latin hiperküp örnekleme, çok boyutlu bir dağılımdan neredeyse rastgele bir parametre değerleri örneği oluşturmak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bir tasarım değişkeni matrisinin içerisindeki satır ve sütunlar belirlendikten sonra seçilen elemanlar bir satırda ve sütunda yer almaktadır. Latin hiperküp örnekleme kullanılarak oluşturulan tasarım uzayı şematik olarak Şekil 3.4'te verilmiştir.

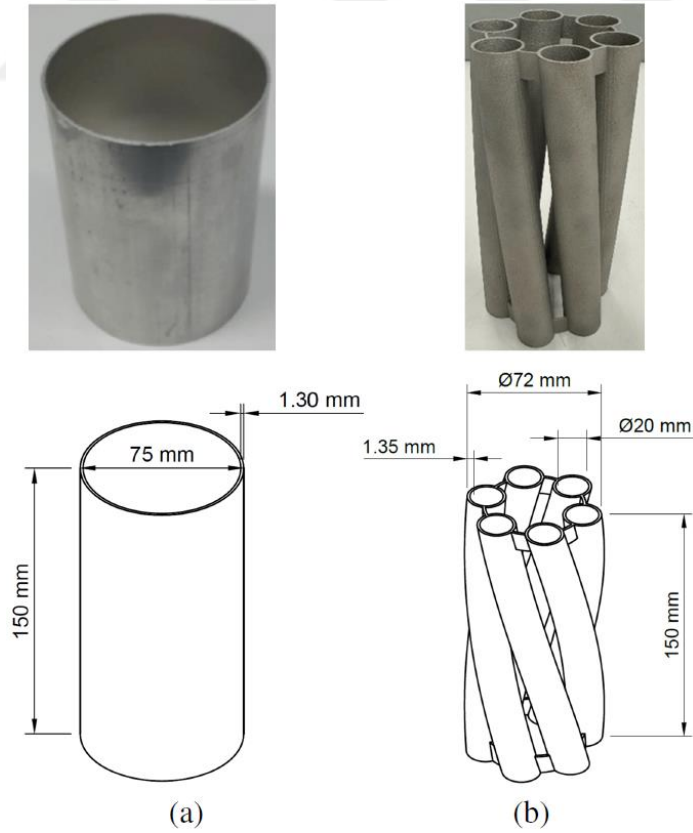




Şekil 3.4: Latin hiperküp örnekleme.

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Dairesel kesitli alüminyum boru profilin içerisine, hurma ağacı gövdesinin kesitinden esinlenilerek elde edilen spiral yapı yerleştirilerek, biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profil elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında ilk olarak üç boyutlu baskı yöntemi ile çekme testi numunesi ve biyo ilhamlı spiral parça AlSi10Mg malzemeden üretilmiştir. Bu malzemenin temel mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen biyo ilhamlı spiral parça ise boş alüminyum tüp içerisine yerleştirilerek aksel ezilme testleri gerçekleştirilmiştir. Alüminyum 6063-T52 malzemeden üretilen boru profilin et kalınlığı 1,30 mm, dış çapı 75 mm ve uzunluğu 150mm'dir. Spiral parçanın ise et kalınlığı 1,35 mm, hücrelerin dış çapı 20 mm ve uzunluğu 150 mm ve spiral devri 0,1'dir. Şekil 4.1'de alüminyum boru profil ve biyo ilhamlı spiral parça görülmektedir.



Şekil 4.1: Alüminyum boru profil (a) ve biyo ilhamlı spiral parça (b).

Aluminyum borular 1600 mm olarak tedarik edildikten sonra 150 mm boya sahip parçalar şeklinde testere yardımıyla kesilmiştir. Şekil 4.2’de testere ile aluminyum boru profil kesim işlemi görülmektedir.



Şekil 4.2: Testere ile aluminyum boru profil kesimi.

#### 4.1 Üç Boyutlu Baskı ile Numune ve Parça Üretimi

Üç boyutlu baskı (İng. 3-dimensional printing veya additive manufacturing) sayesinde, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyen karmaşık geometriye sahip yapıların üretilebilmesi mümkün olmaktadır. Üç boyutlu baskı, bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları sayesinde üç boyutlu olarak tasarımı gerçekleştirilen nesnelerin, polimer, reçine, plastik, kompozit veya metalik toz gibi malzemelerden kimyasal yada ısıl işlemlerle üretilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Son zamanlarda üç boyutlu baskı yöntemi savunma ve havacılık, uzay, otomotiv ve medikal uygulamalar gibi endüstriyel alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Üç boyutlu baskı, geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha karmaşık yapıların üretimi, düşük malzeme sarfiyatı, kaynak ve perçinleme gibi birleştirme işlemlerinin azaltılması ve daha temiz üretim ortamı gibi avantajlara sahiptir. Bu avantajların yanı sıra, üretilen parça boyutunun ve malzeme çeşidinin sınırlı olması, kusurlar ve imalat sonrası ilave işlemler gibi dezavantajlarla da karşılaşmaktadır [59]. Üç boyutlu baskı yönteminin ilk doğuşundan günümüze kadar geçen sürede birçok eklemeli imalat yöntemi geliştirilmiştir. ASTM ve ISO standartlarına göre, aşağıda yedi farklı üç boyutlu baskı yöntemi sıralanmıştır [60].

- Vat polimerizasyon (İng. Vat photopolymerization)
- Malzeme jeti (İng. Material jetting)

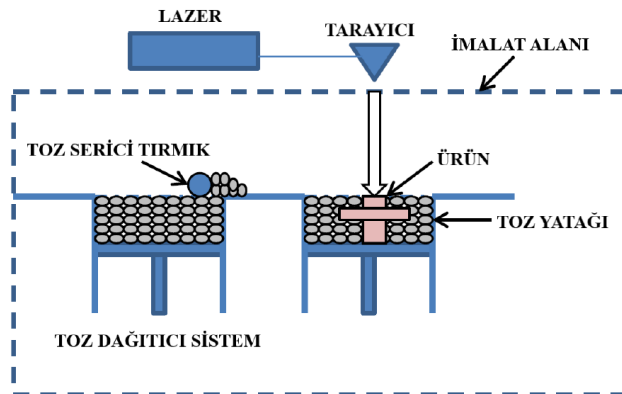
- Bağlayıcı püskürtme (İng. Binder jetting)
- Toz yatak füzyon birleştirme (İng. Powder bed fusion)
- Malzeme ekstrüzyonu (İng. Material extrusion)
- Doğrudan enerji biriktirme (İng. Directed energy deposition)
- Tabaka laminasyonu (İng. Sheet lamination)

Yukarıdaki her bir üç boyutlu baskı yöntemi, kendi içerisinde farklı eklemeli imalat teknolojilerine sahiptir. Çizelge 4.1’de yaygın olarak kullanılan toz yatak füzyon birleştirme teknolojilerinin kısaltmaları ve İngilizce ve Türkçe açıklamaları görülmektedir.

Çizelge 4.1: Toz yatak füzyon birleştirme teknolojilerinin kısaltması ve İngilizce Türkçe açıklamaları.

Kısaltma	Açılımı (İng.)	Açılımı (Tr.)
SLS	Selective Laser Sintering	Seçici Lazer Sinterleme
SLM	Selective Laser Melting	Seçici Lazer Eritme
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
EBM	Electron Beam Melting	Elektron Demeti ile Eritme
SHS	Selective Heat Sintering	Seçici Isı Sinterleme

Toz yatak füzyon birleştirme teknolojilerinde, çalışma alanının üzerine toz serici tırmık vasıtasıyla toz katman serilir. Bir enerji kaynağı ile yüzeydeki tozlar eritilir yada sinterlenir. Ardından bir toz katman daha atılır ve üç boyutlu parça elde edilmesi için işlem tekrarlanır. Şekil 4.3’te örnek bir toz yatak füzyon birleştirme işlemi görülmektedir [61].



Şekil 4.3: Toz yatak füzyon birleştirme işleminin jenerik gösterimi.

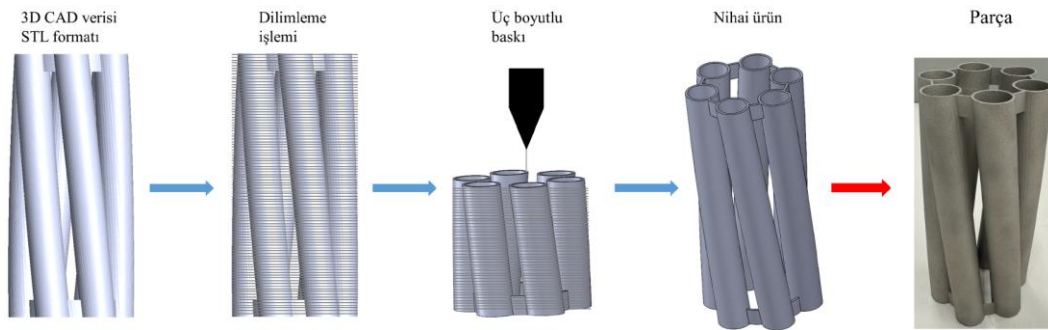
Üç boyutlu baskı yöntemlerini birbirinden ayıran temel farklar vardır. Bu temel farklar kullanılan malzeme türüne ve katmanların üst üste nasıl koyulduğuna göre

değişmektedir. Örneğin SLS, SLM, DMLS ve FDM gibi üç boyutlu baskı yöntemleri, katmanları üretmek için malzemeyi eritme yada yumuşatma işlemini kullanırken, SLA yöntemi ise kullanılan sıvı reçine malzemeyi sertleştirmektedir [62]. Çizelge 4.2’de plastik ve metal esaslı üç boyutlu baskı malzemelerine örnekler görülmektedir.

Çizelge 4.2: Plastik ve metal esaslı üç boyutlu baskı malzemeleri [63].

Plastik Esaslı Malzeme	Metal Esaslı Malzeme
PLA (Polylactic Acid)	Çelik (17-4PH, 316L vb.)
ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	Aluminyum (AlSi10Mg, AlF357)
PEI (Polyetherimide)	Titanyum (Ti-6Al-4V)
PP (Polypropylene)	Nikel (IN625, IN718)

Metal esaslı eklemeli imalat, toz yada telin bir enerji kaynağı ile katman katman eritilerek yada sinterlenerek yapıların üretildiği yenilikçi bir üretim yöntemidir. Eritme işlemi parçacıkları ergime sıcaklığına getirip birleştirirken, sinterleme ise birbirine yakın parçacıkları ergime sıcaklığının yaklaşık %60 - %80’ine getirerek birleştirmektedir [64]. Bu tez çalışmasında, biyo ilhamlı spiral parça ve çekme testi numunesinin üç boyutlu baskı yöntemi ile üretimi Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Diğer üç boyutlu baskı teknolojilerinde olduğu gibi DMLS teknolojisinde, bilgisayar destekli tasarım verisi, STL (İng. Standart Triangle Language) formatına dönüştürülerek dilimleme işlemi (İng. slicing) yapılmaktadır. Temel olarak dilimleme işlemi, üç boyutlu modeli dilimlere ayırır ve ardından en kısa üretim süresi ve en yüksek mukavemet değeri gibi özellikleri elde etmek için her bir katmanın yolunu (İng. tool path) belirler. Dilimleme işlemini yapabilmek için Magics, RP Tools veya EOS Print gibi ön işlemci yazılımları kullanılmaktadır. Şekil 4.4’te biyo ilhamlı spiral numune için eklemeli imalat ile üretim işleminin adımları görülmektedir.



Şekil 4.4: Örnek bir eklemeli imalat işlemi.

STL formatı, üç boyutlu baskı ve bilgisayar destekli tasarım alanlarında sıklıkla karşılaşılan bir dosya formatıdır. Bu format içerisinde parçanın malzemesine ait herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. STL formatı birbiriyle bağlantılı üçgenlerden oluşmaktadır ve bu üçgenler üç boyutlu nesnenin dış yüzeylerini temsil etmektedir. Şekil 4.5'te biyo ilhamlı enerji sönümleyici profilin STL uzantılı hali görülmektedir.



Şekil 4.5: Biyo ilhamlı spiral enerji sönümleyici profilin STL uzantılı görüntüsü.

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi (FSMVÜ) bünyesinde, Alüminyum Test, Eğitim ve Araştırma Merkezinde (ALUTEAM) bulunan EOS M290 marka üç boyutlu baskı cihazı kullanılarak biyo ilhamlı spiral parçanın ve çekme testi numunesinin üretim faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6'da EOS M290 marka üç boyutlu baskı cihazı görülmektedir.



Şekil 4.6: EOS M290 marka üç boyutlu baskı cihazı [63].

EOS M290 alüminyum, çelik ve takım çelikleri, bakır, titanyum ve nikel gibi birçok farklı malzemeyi kullanarak üç boyutlu baskı üretimi gerçekleştirebilmektedir. Çizelge 4.3'te EOS M290 cihazına ait teknik bilgiler yer almaktadır.

Çizelge 4.3: EOS M290 marka üç boyutlu baskı cihazına ait teknik bilgiler [63].

İnşa Hacmi	250 × 250 × 325 mm
Lazer Tipi	Yb fiber lazer, 400 W
Hassas Optik	F-theta lens, yüksek hızda tarama
Tarama Hızı	max. 7000 mm/s
Odak Çapı	100 µm
Güç	32 A / 400 V
Harcanan Güç	max. 8,5 kW, ort. 2,4 kW

Çekme testi numunesi ve biyo ilhamlı spiral parça AlSi10Mg tozundan üretilmiştir. AlSi10Mg tozu, ince et kalınlıklarına ve karmaşık geometrilere sahip döküm parçalar için kullanılmaktadır. AlSi10Mg parçaları, iyi termal özellik, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık istenen durumlarda tercih edilmektedir. Çizelge 4.4'te AlSi10Mg malzemenin kimyasal özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.4: AlSi10Mg malzemenin kimyasal özellikleri [63].

Element	Simge	Ağırlıkça içerik
Silisyum	Si	%9,0 - %11,0
Demir	Fe	≤ %0,55
Bakır	Cu	≤ %0,05
Manganez	Mn	≤ %0,45
Nikel	Ni	≤ %0,05
Çinko	Zn	≤ %0,10
Kurşun	Pb	≤ %0,05
Kalay	Sn	≤ %0,05
Titanyum	Ti	≤ %0,15
Alüminyum	Al	Ana element

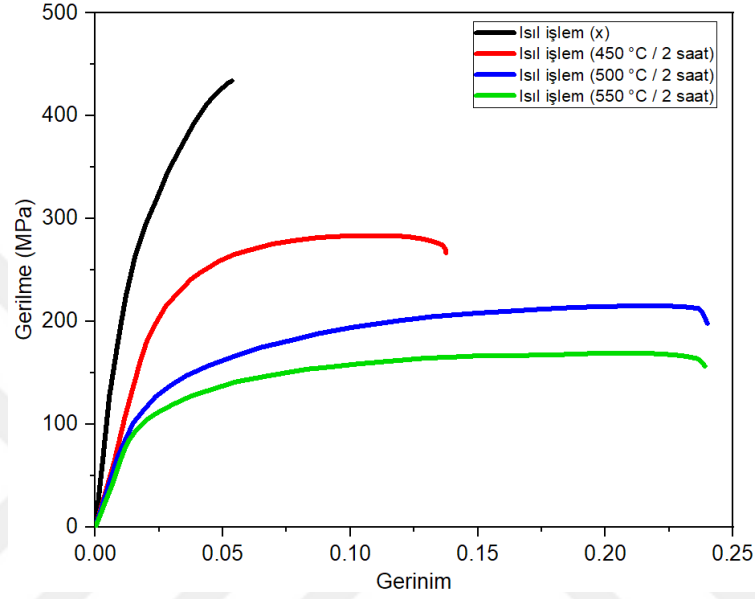
Üretilen numune ve parçalardan minimum gözeneklilik ve mükemmel mekanik özellikler elde etmek için en iyi üretim parametrelerini kullanmak gerekmektedir. EOS M290 marka üç boyutlu baskı cihazı kullanılarak üretilen numune ve parçaların üretiminde kullanılan işlem parametreleri Çizelge 4.5'te görülmektedir.

Çizelge 4.5: Üretimde kullanılan işlem parametreleri [65].

Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Mesafesi (µm)	Katman Kalınlığı (µm)
370	1300	190	30



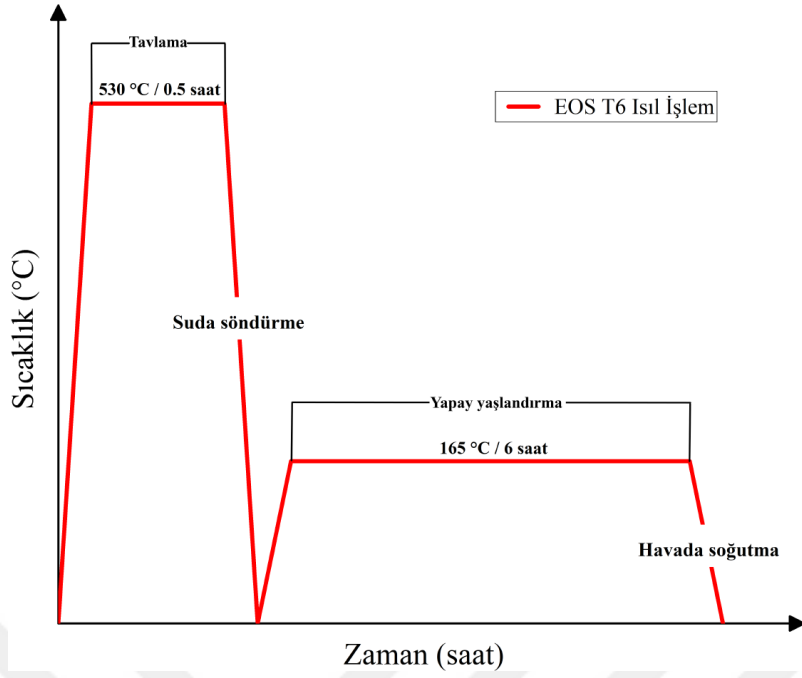
Metal esaslı üç boyutlu baskı cihazlarında üretilen parçalar cihazdan ilk çıktıklarında kırılkan özellik göstermektedir. Bu kırılkanlığı gidermek adına farklı ısıl işlem reçeteleri uygulanmaktadır. Her farklı ısıl işlem sonucunda yapının mekanik özellikleri değişmektedir [50, 66-68]. Şekil 4.7’de farklı sıcaklıklarda ısıl işleme uygulanmış SLM yöntemi ile üretilmiş numunelerin oda sıcaklığındaki çekme testi sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.7: Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanmış numunelerin oda sıcaklığındaki çekme testi sonuçları [68].

Şekil 4.7 incelendiğinde ısıl işlem uygulanmamış (siyah eğri) numunenin oldukça kırılkan özellik gösterdiği görülmektedir. Farklı ısıl işlem reçeteleri uygulanmış (kırmızı, mavi ve yeşil eğriler) numuneler ise birbirlerinden farklı olmak üzere, daha sünek özellik göstermişlerdir. Bu tez çalışması kapsamında, metal esaslı üç boyutlu baskı yöntemi ile DMLS teknolojisiyle EOS M290 marka cihazda üretilen çekme testi numunelerine ve biyo ilhamlı spiral parçalara EOS markası tarafından önerilen en iyileştirilmiş EOS T6 ısıl işlem reçetesi uygulanmıştır. Şekil 4.8’de EOS T6 ısıl işlem reçetesinin temsili grafiği görülmektedir.





Şekil 4.8: EOS T6 ısıtım reçetesinin temsili grafiği [63].

Bu ısıtım reçetesinde ilk olarak numune ve parçalar 530°C’de yarım saat tutularak çözelti tavlaması (İng. solution annealing) işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözelti tavlaması işlemi başlangıcında oda sıcaklığındaki fırın çalıştırıldıktan bir saat sonra istenilen sıcaklığa ulaşmaktadır. Şekil 4.9’da çözelti tavlaması için kullanılan fırınla birlikte fırının içerisine yerleştirilen numuneler ve parçalar görülmektedir.



Şekil 4.9: Çözelti tavlamasında kullanılan fırın (a) ve numuneler ve parçalar (b).

Otuz dakika süre dolduğunda fırındaki numuneler ve parçalar hızlı bir şekilde oda sıcaklığındaki suya batırılmaktadır (İng. water quenching). Bu sayede 530°C’deki mikro yapı dondurulmaktadır. Suya batırma işleminin ardından numuneler ve parçalar 165°C’de altı saat boyunca tutularak yapay yaşlandırma (İng. artificial aging) işlemi yapılır ve süre dolduktan sonra numuneler ve parçalar havada soğutulurak kullanıma



Gerilme-gerinim eğrisi incelendiğinde, eğrinin elastik ve plastik bölge olarak ikiye bölündüğü görülmektedir. Elastik bölgede, bir parça üzerine uygulanan yüklemeye kaldırıldığında parça eski formuna geri dönebilmektedir. Elastik bölge Eşitlik 4.1’de verilen Hooke kanunu ile tanımlanmaktadır. Hooke kanunu, doğrusal elastik malzemelerin üzerinde oluşan deformasyon, o deformasyona neden olan kuvvetle yaklaşık olarak doğru orantılı olduğunu açıklamaktadır.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (4.1)$$

Eğri üzerinde akma gerilmesinin tam olarak nerede olduğunu tanımlamak için birkaç yöntem belirlenmiştir [69]. Elastik bölgedeki doğrusallığın ilk kaybedildiği nokta oransal limit (İng. proportional limit,  $\sigma_p$ ) olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlamanın yoruma açık bir tanımlama olduğu belirtilmektedir. Bir diğer yöntem ise ofset metodudur. Elastik bölge eğrisine paralel ve belli bir ofsetli gerinim değerinden başlayacak şekilde bir çizgi çizilir. Bu çizginin eğriyi kestiği nokta ofsetli akma gerilmesi (İng. offset yield strength,  $\sigma_o$ ) olarak tanımlanmaktadır. Metal malzemeler için yaygın bir şekilde %0.2 ofset değeri kullanılmaktadır. Bu ofset değeri aynı zamanda %0.2’lik kalıcı deformasyon anlamına gelmektedir. Gerilim-gerinim eğrisinde akma gerilmesini takip eden bölgeye gerinim pekleşmesi (İng. strain hardening) denmektedir. Burada gerinim arttıkça parçanın mukavemeti artmaktadır. Bir malzemede kopmadan önce oluşabilecek en yüksek değer ise nihai kopma gerilmesi (İng. ultimate tensile strength,  $\sigma_u$ ) olarak tanımlanmaktadır. Bu değerden sonra boyun verme işlemi başlar ve kararsızlık durumu oluşur. Gerilim-gerinim eğrileri, ASTM veya ISO gibi standartlarda belirtilmiş deney numunelerine, belirli şartlar altında çekme testi yapılarak elde edilmektedir. Deney numunesine kademeli olarak artan bir şekilde çekme kuvveti uygulanır ve yer değiştirme değerleri kaydedilir. Eşitlik 4.2 ve Eşitlik 4.3 kullanılarak mühendislik gerilim ve gerinim değerleri elde edilmektedir.

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.3)$$

Burada  $\sigma_e$  ve  $\varepsilon_e$  sırasıyla mühendislik gerilim ve gerinimlerini,  $F$  uygulanan kuvveti,  $A_0$  ilk kesit alanını,  $L$  son boyu ve  $L_0$ ’da ilk boyu temsil etmektedir. Gerçekte böyle

olmamasına rağmen mühendislik yaklaşımında deney numunesinin boyu ve kesit alanının değişmediği yaklaşımı yapılmaktadır. Bu yüzden ilk kesit alanı ve ilk boy ölçüleri kullanılarak ortaya çıkan eğriye mühendislik gerilim-gerinim eğrisi denmektedir. Anlık olarak kesit alanının ve numune boyunun değiştiği hesaba katılırsa bu eğri gerçek gerilim-gerinim eğrisi olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 4.4 ve Eşitlik 4.5 kullanılarak gerçek gerilim gerinim eğrileri elde edilmektedir.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{\delta L}{L} \quad (4.5)$$

Deney numunesi, tek düze bir şekilde deformasyona maruz bırakıldığında hacimde herhangi bir değişim olmaması gerekmektedir. İlk ve son hacim dengesi Eşitlik 4.6'da verilmiştir.

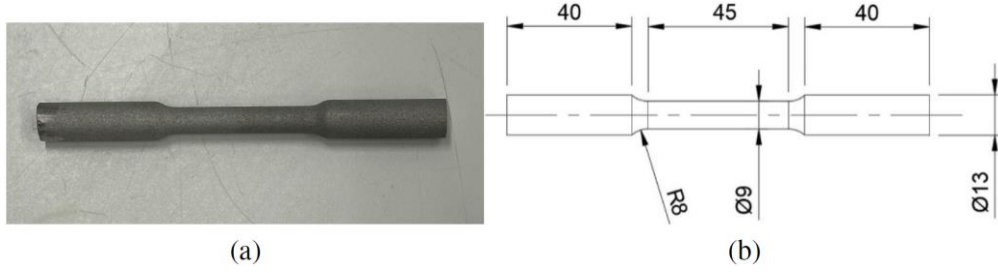
$$A_0 \times L_0 = A \times L \quad (4.6)$$

Mühendislik gerilimi ve gerinimleri kullanılarak, gerçek gerilme ve gerinimler sırasıyla Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8'de ki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (4.7)$$

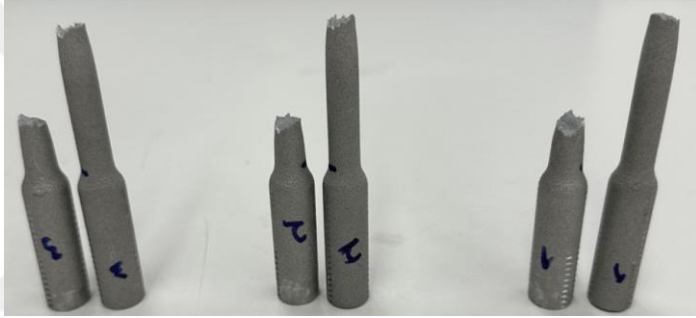
$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (4.8)$$

Gerçek gerilme-gerinim eğrileri, malzeme modellerinin oluşturulmasında sıklıkla kullanılmaktadır. ANSYS LS-DYNA, Abaqus ve Radioss gibi sonlu elemanlar analizi programları, çarpma, patlama ve metal şekillendirme gibi doğrusal olmayan problemlerin çözümlerinde gerçek gerilme-gerinim eğrilerini kullanmaktadır. Bu eğrilerin doğru bir şekilde elde edilmesi, yüksek deformasyon içeren problemlerin çözümünde hayati bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, AlSi10Mg toz malzemenen üretilmiş bir parçanın temel yapısal mukavemet özelliklerini ve gerçek gerilim-gerinim eğrisini belirlemek için ASTM E8/E8M standartına göre numune üretilip çekme testi gerçekleştirilmiştir [70]. Çekme testi numunesi ve ölçüleri Şekil 4.12'de görülmektedir.



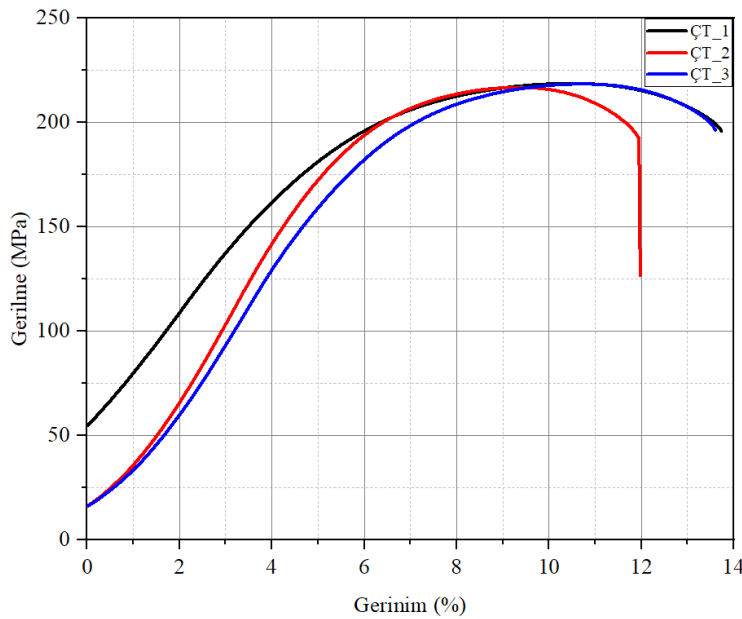
Şekil 4.12: ASTM E8/E8M standartına göre üretilen çekme testi numunesi (a) ve ölçüleri (b).

Çekme testi, universal çekme testi cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numunesi cihazın iki çenesi arasına yerleştirilmiştir. Çenelerden biri sabit iken diğeri ise 2 mm/dk hızda numuneyi çekmiştir. Çekme testi üç tekrar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13'te çekme testi sonunda orta bölgesinden kopan üç tane numune görülmektedir.



Şekil 4.13: Çekme testi sonucu kopan numuneler.

Elde edilen üç farklı (ÇT: Çekme testi) gerilim-gerinim eğrileri Şekil 4.14'de, akma ve nihai çekme mukavemetleri ve uzama değerleri ise Çizelge 4.6'da görülmektedir.



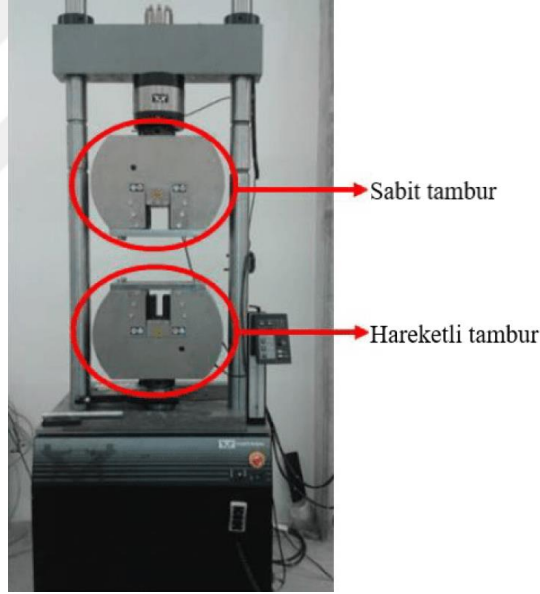
Şekil 4.14: AlSi10Mg gerilim-gerinim eğrileri.

Çizelge 4.6: Çekme testi sonuçları.

Numune No	Akma Mukavemeti (MPa)	Nihai Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
1	152,2	218,8	13,7
2	161,6	216,9	12,0
3	156,4	218,6	13,6
Ortalama	156,7	218,1	13,1

### 4.3 Parça Eksenel Ezilme Testleri

Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin eksenel ezilme davranışını ve enerji sönümleme kapasitesini belirlemek için yarı-statik eksenel ezilme testleri TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Teknoloji Merkezi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Eksenel ezilme testleri Şekil 4.15'te gösterilen INSTRON marka basma test düzeneği ile yapılmıştır.



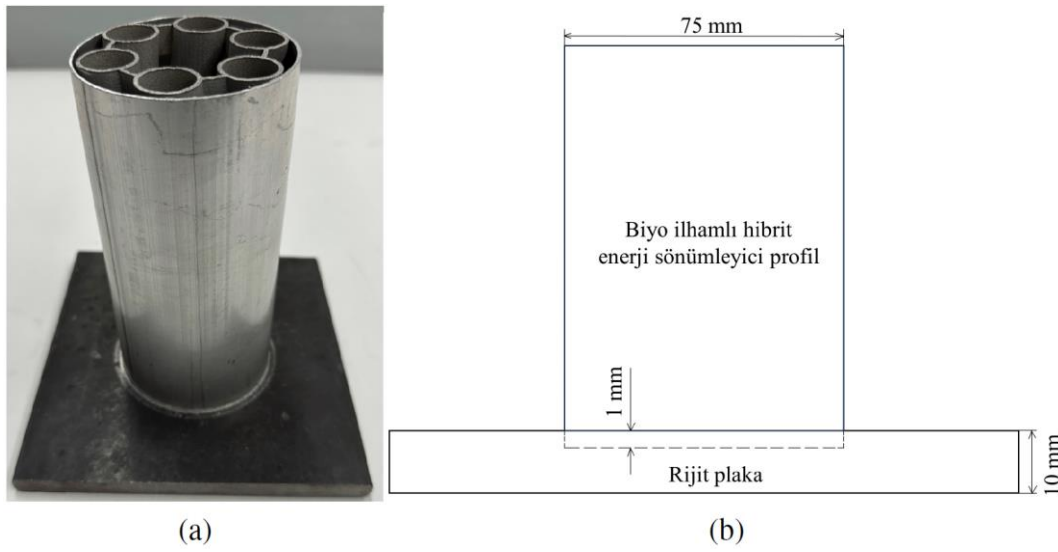
Şekil 4.15: INSTRON marka basma test düzeneği.

INSTRON marka basma test düzeneğinde biri sabit bir diğeri hareketli olmak üzere iki adet tambur bulunur. Sabit tambur deney numunesinin tutturulmasına olanak sağlarken, hareketli tambur ise deformasyona olanak sağlamaktadır. Cihaz basma testi sonucu olarak kuvvet-yer değiştirme grafiği vermektedir. Çizelge 4.7'de basma cihazına ait teknik bilgiler verilmiştir.

Çizelge 4.7: INSTRON marka basma test düzeneğine ait teknik bilgiler.

Marka	INSTRON
Model	600 LX
Maksimum Sistem Basıncı	8,3 bar
Yük Basma Kapasitesi	500 kN
Ağırlık	295 kg
İki Blok Arasındaki Mesafe Aralığı	77-914 mm
Blokların Genişlikleri	508 mm

Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profili, hareketli tambur üzerinde sabit bir şekilde tutabilmek için profilin altına plaka yerleştirilmiştir. Şekil 4.16'da biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profil ve altına yerleştirilen plaka görülmektedir.



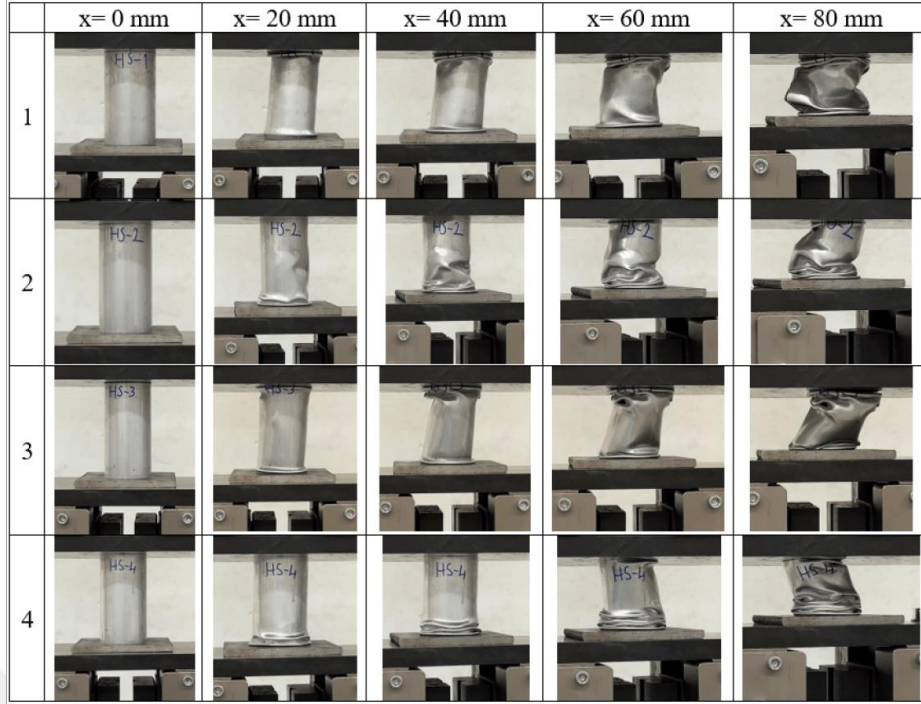
Şekil 4.16: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profil (a) ve altına yerleştirilen plaka (b).

Eksenel ezilme testinde, hareketli tamburun hızı 2mm/dk olarak ayarlanmıştır. Dört tekrar gerçekleştirilen eksenel ezilme testinin yer değiştirmeye bağlı olarak sonuçları aşağıdaki Şekil 4.17'de görülmektedir. Çizelge 4.8'de ise biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profillerin eksenel ezilme testi sonucu elde edilen enerji sönümlenme performans göstergeleri görülmektedir.

Çizelge 4.8: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profillerin enerji sönümlenme performans göstergeleri.

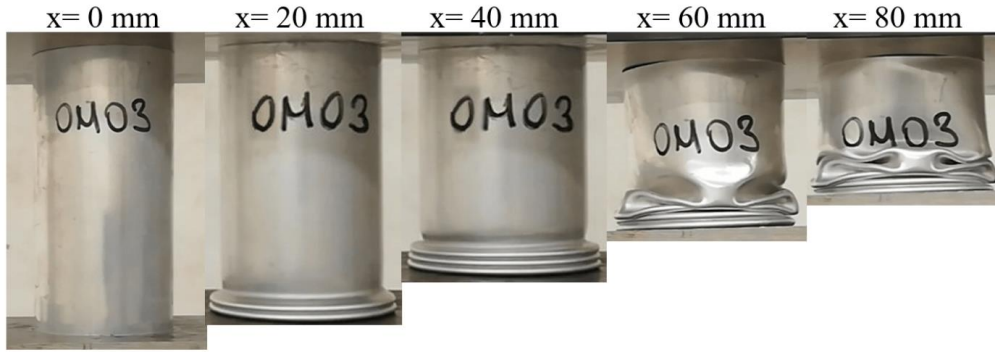
	$E_T$ (kJ)	$F_{maks}$ (kN)	$F_{ort}$ (kN)	$SEA$ (kJ/kg)	$CFE$ (%)
HS-1	3,21	110,7	40,0	11,2	36,2
HS-2	4,90	128,1	61,2	17,1	47,8
HS-3	4,66	128,9	58,3	16,3	45,2
HS-4	6,68	136,4	83,5	23,4	61,2
Ortalama	4,86	126,0	60,8	17,0	47,6





Şekil 4.17: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profillerin aksel ezilme testi sonuçları.

Şekil 4.18’de üç tekrar gerçekleştirilen boş alüminyum tüpün aksel ezilme sonuçları görülmektedir. Çizelge 4.9’da ise boş alüminyum tüplerin aksel ezilme testi sonucu elde edilen enerji sönümleme performans göstergeleri görülmektedir.



Şekil 4.18: Boş alüminyum tüpün aksel ezilme testi sonuçları.

Çizelge 4.9: Boş alüminyum tüplerin enerji sönümleme performans göstergeleri.

	$E_T$ (kJ)	$F_{maks}$ (kN)	$F_{ort}$ (kN)	$SEA$ (kJ/kg)	$CFE$ (%)
AL-1	1,71	45,7	21,3	14,3	46,7
AL-2	1,70	46,8	21,3	14,3	45,5
AL-3	1,77	50,0	22,1	14,9	44,3
Ortalama	1,73	47,5	21,6	14,5	45,5

Çizelge 4.10’da ise içi boş alüminyum tüpün ve biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin enerji sönümleme performans göstergelerinin kıyaslanması görülmektedir.

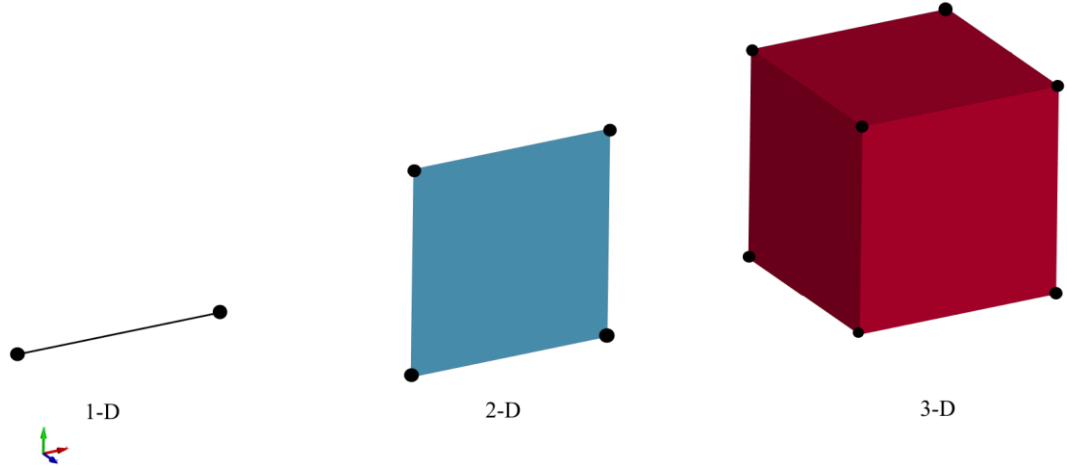
Çizelge 4.10’da ise içi boş alüminyum tüpün ve biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin enerji sönümleme performans göstergelerinin kıyaslanması görülmektedir.

Çizelge 4.10: İçi boş alüminyum tüpün ve biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin enerji sönümleme performans göstergelerinin kıyaslanması.

	$E_T$ (kJ)	$F_{maks}$ (kN)	$F_{ort}$ (kN)	$SEA$ (kJ/kg)	$CFE$ (%)
AL-ort	1,73	47,5	21,6	14,5	45,5
HS-ort	4,86	126,0	60,8	17,0	47,6
Fark (%)	180,9	165,3	181,5	17,2	4,6

## 5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ÇALIŞMALARI

Karmaşık mühendislik problemleri beraberinde aynı karmaşıklıkta problem çözümleri içermektedirler. Bu karmaşık problemler aynı zamanda çözümleri doğruluktan uzaklaştırmaktadır. Karmaşık problemlerin daha hızlı ve doğru bir şekilde çözülebilmesi için sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu, zorlu bir mühendislik problemini daha yalın hale getirerek çözmektedir. Sonlu elemanlar metodu eldeki problemi, birbiriyle bağlantılı düğüm noktalarına (İng. node) ve ağ örgülerine (İng. element) ayırarak çözüme gitmektedir. Şekil 5.1’de sırasıyla bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu ağ örgüleri görülmektedir. Burada siyah noktalar düğüm noktalarını temsil etmektedir.



Şekil 5.1: Sırasıyla bir, iki ve üç boyutlu ağ örgüsü.

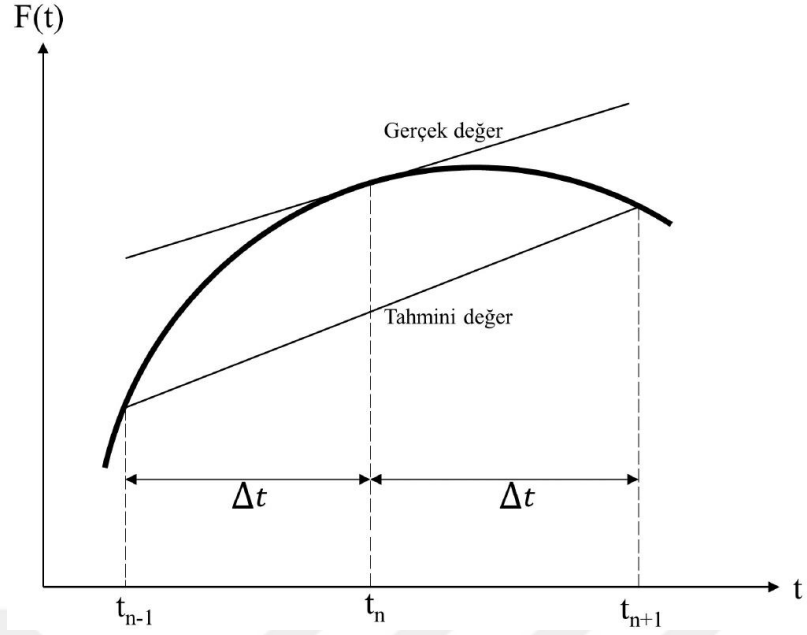
Günümüzde pek çok alanda sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Bu alanlar mekanik problemler, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği olarak sıralanabilir. Temel olarak sonlu elemanlar analizi, sonlu elemanlar metodu arkasındaki matematiksel denklemleri kullanarak bir simülasyon oluşturmaktadır. Bu simülasyon, bir ürün yada parçanın belirli bir yüklemeye altındaki davranışını incelemeye olanak sağlamaktadır. Sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirebilmek için açık (İng. explicit) ve kapalı (İng. implicit) olmak üzere iki farklı zaman integrasyonu yöntemi kullanılmaktadır. Açık zaman integrasyonunda, bir sonraki zaman adımı  $t_1$  hesaplanırken mevcut durumdaki  $t_0$  veriler kullanılmaktadır. Kapalı zaman integrasyonunda ise hem mevcut durumdaki

veriler hem de bir sonraki zaman adımındaki veriler kullanılmaktadır. Kapalı zaman integrasyonu yönteminde elde edilen veriler belli bir tolerans değerinin altına düştüğünde, bir sonraki adıma geçilmektedir. Bir sonraki adımın hesaplanması için, bir önceki adımda elde edilen veriler başlangıç ve sınır şartları olarak kabul edilerek çözüme devam edilmektedir. Kapalı yöntem kullanılarak gerçek sonuçlara ulaşmak daha kolaydır. Fakat, kapalı yöntemde yakınsama (İng. convergence) sorunları ortaya çıkmaktadır. Açık zaman integrasyonu yönteminde ise yakınsama problemi yoktur. Çizelge 5.1’de kapalı ve açık zaman integrasyonu yöntemlerinin temel farklılıkları görülmektedir.

Çizelge 5.1: Boş alüminyum tüplerin enerji sönümleme performans göstergeleri.

Kapalı Zaman İntegrasyonu	Açık Zaman İntegrasyonu
Zaman adımı büyüklüğünden (İng. time step size) bağımsızdır.	Zaman adımına bağımlıdır.
Her bir zaman adımı iterasyon gerektirir.	Her zaman adımı doğrudan çözülür.
İki zaman adımı arasındaki geçiş yavaştır.	İki zaman adımı arasındaki geçiş hızlıdır.
Genellikle deformasyon hızlarının düşük olduğu statik, sürünme vb. gibi problemlerde kullanılır.	Genellikle deformasyon hızlarının yüksek olduğu çarpışma, patlama, delinme gibi problemlerde kullanılır.

Açık zaman integrasyonu yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların doğruluğu için, sonuçların dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Nümerik yöntemler ile oluşturulan benzetim modellerinin, deneysel sonuçlar ile doğrulanması büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan sonlu elemanlar analizleri yüksek deformasyon, doğrusal olmayan malzeme özelliği ve sürtünmeli temas gibi doğrusal olmayan faktörler içermektedir. Bu faktörler göz önüne alındığında, sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmek için ANSYS LS-DYNA çözücüsü kullanılmıştır. ANSYS LS-DYNA doğrusal olmayan mühendislik problemlerin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılan ticari sonlu elemanlar analizi yazılımıdır. ANSYS LS-DYNA’da gerçekleştirilen açık zaman integrasyonlu yöntemlerde merkezi farklar metodu kullanılmaktadır. Merkezi farklar metodunda hesaplaması gerçekleştirilecek noktanın önüne ve arkasına eşit uzaklıkta birer nokta atılmaktadır. Şekil 5.2’de merkezi farklar yöntemi grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.2: Merkezi farklar yönteminde  $t_n$  anında  $F(t)$  değerinin yaklaşık olarak hesaplanması.

Burada  $t_n$  çözüm zamanını,  $t_{(n-1)}$  bir önceki zaman adımını,  $t_{(n+1)}$  bir sonraki zaman adımını,  $\Delta t$  ise zaman adımı büyüklüğünü temsil etmektedir. Zaman adımı büyüklüğü ANSYS LS-DYNA’da hesaplama maliyeti ve hesaplama doğruluğu bakımından çok önemli bir kriterdir. Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu eleman tiplerine göre farklı zaman adımı büyüklüğü hesaplama yöntemleri vardır. İki boyutlu (2-D) elemanlarda, zaman adımı büyüklüğü Eşitlik 5.1’deki gibi hesaplanmaktadır [71].

$$\Delta t = \frac{L}{c} \quad (5.1)$$

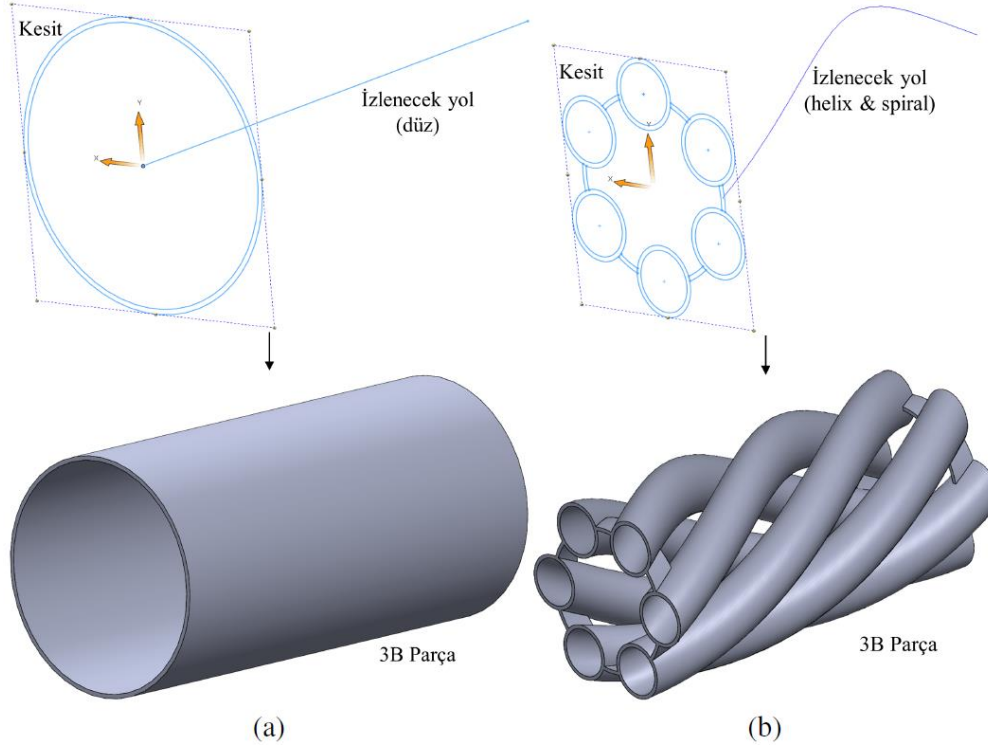
Burada  $L$  eleman büyüklüğünü ve  $c$  ise gerilim dalga yayılma hızını temsil etmektedir. İki boyutlu bir elemanda gerilim dalga yayılma hızı hesaplanması ise Eşitlik 5.2’de verilmiştir.

$$c = \sqrt{\frac{E}{(1 - \nu^2)\rho}} \quad (5.2)$$

Burada  $E$  malzemenin elastiklik modülünü,  $\nu$  poisson oranını ve  $\rho$  ise yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan zaman adımı büyüklüğü  $1,1 \times 10^{-4}$  mertebelerindedir. Eşitlik 5.1’de ve Eşitlik 5.2’de görüldüğü gibi, zaman adımı büyüklüğü ağ örgüsünün yapısına ve malzemenin özelliklerine göre değişmektedir.

## 5.1 Katı Model Oluşturulması

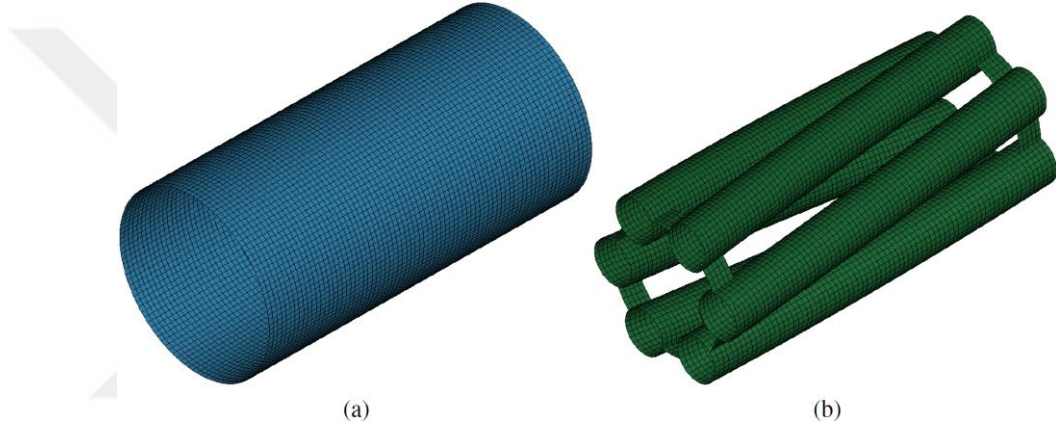
Üretim, test ve nümerik analiz işlemlerinden önce numune ve parçaların gerçek ölçüleriyle katı modelleri bilgisayar ortamında SOLIDWORKS programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bilgisayar destekli tasarım araçlarından biri olan SOLIDWORKS, windows işletim sistemleri ile çalışmaktadır ve tarihteki ilk üç boyutlu modelleme aracıdır. Üç boyutlu parça tasarımı, teknik resim, montaj, animasyon ve yapısal analiz gibi araçlara sahip olan SOLIDWORKS programında yapılan çalışmalar pek çok program üzerinde de kullanılabilir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen üç boyutlu tasarımlar, ilk olarak parça kesitinin çizilmesiyle başlamıştır. Ardından kesitin bir yol boyunca itilerek katı model (3B) oluşturulması sağlanmıştır. Alüminyum tüp, iç ve dış daireselleri çizildikten sonra doğrusal bir yolda itilerek katı modeli oluşturulmuştur. Biyo ilhamlı spiral yapı ise, kesit profili çizildikten sonra helix yada spiral olarak adlandırılan yol boyunca süpürülerek katı modeli oluşturulmuştur. Şekil 5.3'te boş tüp ve biyo ilhamlı spiral yapının SOLIDWORKS'te nasıl oluşturulduğu görülmektedir.



Şekil 5.3: Boş tüp (a) ve biyo ilhamlı yapının (b) SOLIDWORKS programında oluşturulması.

## 5.2 Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı

Tasarımı gerçekleştirilen katı modellerin (3B) belirli yüklemeler altında nasıl davrandığını incelemek için ilk önce sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulmaktadır. Mesh yada ağ örgüsü olarak adlandırılan sonlu elemanlar parçaları, doğru nümerik simülasyon sonuçlarını elde edebilmek için oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında parçaların ağ örgüsünün oluşturulması için Hypermesh programı kullanılmıştır. SOLIDWORKS programında tasarlanan katı model .igs uzantısı ile kaydedildikten sonra Hypermesh programına alınmaktadır. Burada eğer gerekiyorsa geometri düzenlemeleri yapılır ve parçanın ağ örgüsü oluşturulur. Şekil 5.4'te sonlu elemanlarına ayrılmış alüminyum tüp ve biyo ilhamlı yapı görülmektedir.



Şekil 5.4: Parçaların ağ örgüsü: alüminyum tüp (a) ve biyo ilhamlı yapı (b).

Parçanın geometrisine bağlı olarak oluşturulan ağ örgüsünün kalitesi değişkenlik gösterebilmektedir. Ağ örgüsünün kalitesi ne kadar iyi olursa analiz sonucunda elde edilen verilerde o kadar gerçeğe yakın olmaktadır. Ağ örgüsü kalitesini değerlendirmede kullanılan kriterlere örnek olarak en-boy oranı, eğrilik açısı ve çarpıklık verilebilir. En-boy oranı, en kısa kenarın en uzun kenara oranı olarak tanımlanmaktadır. Eğrilik açısı, ağ örgüsü elemanının kenar orta noktalarından gelen çizgiler arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır. Çarpıklık ise, ağ örgüsü düzleminin bükülmesi ile alakalıdır. Dört düğüm noktasına sahip bir ağ örgüsünde, bir düğüm noktası diğer üç düğüm noktasının oluşturduğu düzlemden ayrılırsa bu durumda çarpıklık meydana gelmektedir. Ağ örgüsü kalitesinin düşük olması aynı zamanda hesaplama maliyetinide arttırmaktadır. Üç boyutlu tasarımı gerçekleştirilen parçaların orta düzlemine iki boyutlu ve olabildiğince karelerden oluşan ağ yapısı oluşturulmuştur. ANSYS LS-DYNA, ağ yapısının formülasyonu için bir çok farklı seçenek sunmaktadır. Bu çalışmada ELFORM 2 (Belytschko-Tsay) ağ yapısı



formülasyonu kullanılmıştır. SECTION SHELL kartı kullanılarak ağ yapısı formülasyonu ve parçaların kalınlığı atanmaktadır. Şekil 5.5'te SECTION SHELL kartı görülmektedir.

Keyword Input Form

RefBy Sort/T1 Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 sample\_run.k) Setting

\*SECTION\_SHELL\_(TITLE) (3)

TITLE  
Outer\_Tube\_1.30mm

SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	2	1.0000000	2	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF
	1.3000000	1.3000000	1.3000000	1.3000000	0.0	0.0	0.0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.  
Replace Insert  
Delete Help

Repeated Data by Button and List

Şekil 5.5: SECTION SHELL kartı.

### 5.3 Sınır Koşulları ve Temas Algoritmaları

Biyo ilhamlı spiral yapı, boş alüminyum tüp içerisine yerleştirilerek biyo ilhamlı hibrit enerji sönmüleyici profil elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi çalışmalarında, biyo ilhamlı hibrit enerji sönmüleyici profil sadece aksel yönde serbestliği olan hareketli bir plaka vasıtasıyla deformasyona uğratılmıştır. Tüm yönlerde serbestlik derecesi kısıtlanan rijit bir plaka vasıtasıyla da alt ucundan sabitlenmiştir. Alüminyum tüp ve biyo ilhamlı spiral yapı parçaları SET PART komutu vasıtasıyla tek bir çatı altına toplanmıştır. Ardından, CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE kullanılarak hareketli plaka ile biyo ilhamlı hibrit enerji sönmüleyici profil arasına temas algoritması tanımlanmıştır. Bu sayede analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi tek bir temas algoritmasının altından okunmuştur. Şekil 5.6'da kullanılan temas algoritması görülmektedir.

Keyword Input Form

RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 sample\_run.k) Setting

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_(ID/TITLE/MPP)\_(THERMAL) (2)

CID	TITLE	MPP1	MPP2
3	FORCE		

IGNORE	BCKT	LCBOKT	NSZTRK	INITIIR	PARMAX	UNUSED	CPARM6
0	200		3	2	1.0005		0

UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE
	0	1.0	0

SURFA	SURFB	SURFATYP	SURFBTYP	SABOXID	SBBOXID	SAPR	SBPR
1	2	3	2		0	0	0

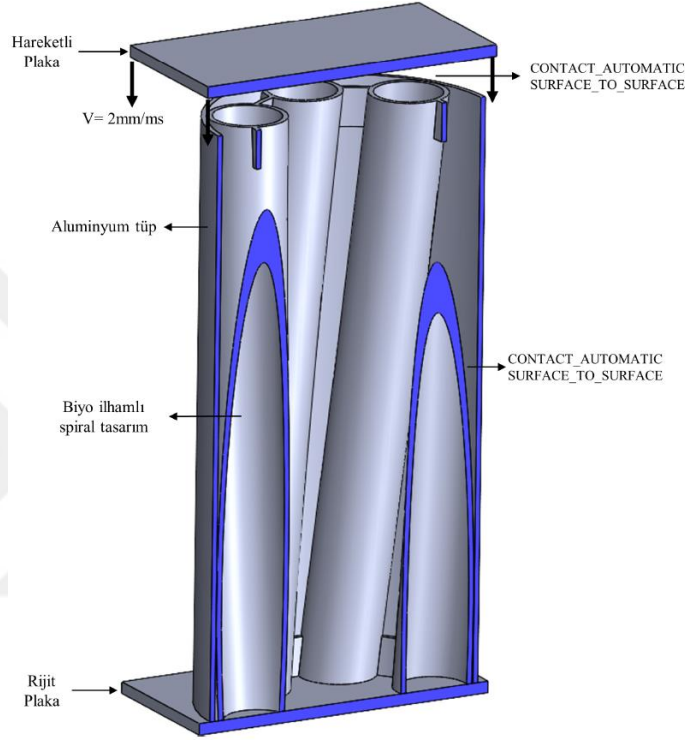
FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	10.0000000		0.0	1.000e+20

SFSA	SFSB	SAST	SBST	SFSAT	SFSBT	SFS	SFS
1.0000000	1.0000000			1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

Thermal  T\_Friction  A  AB  ABC  ABCD  ABCDE  ABCDEF

Şekil 5.6: Temas algoritması kartı.

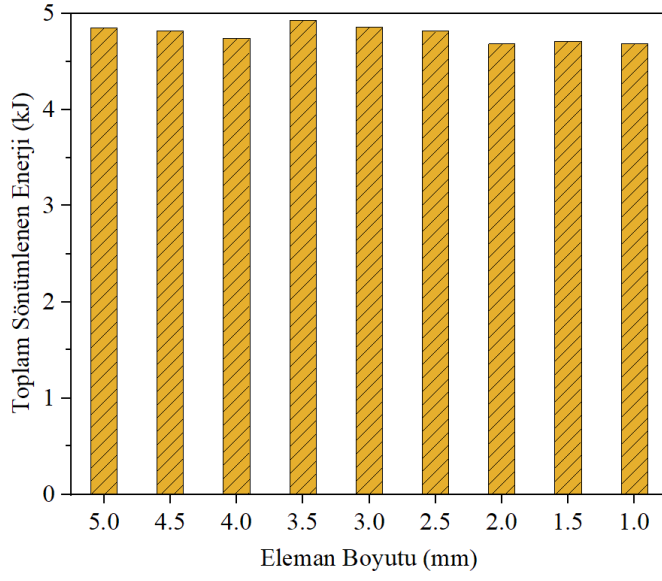
Aluminyum tüp ile biyo ilhamlı spiral parçanın arasında da CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan parçaların kendileri içerisinde etkileşimini önlemek için CONTACT AUTOMATIC SINGLE SURFACE tanımlanmıştır. Kullanılan tüm temas algoritmalarında statik ve dinamik sürtünme katsayısı sırasıyla 0,3 ve 0,2 alınmıştır [23]. Şekil 5.7’de sonlu elemanlar analizi modelinde kullanılan yükleme ve sınır koşulları ile birlikte temas algoritmaları gösterilmiştir.



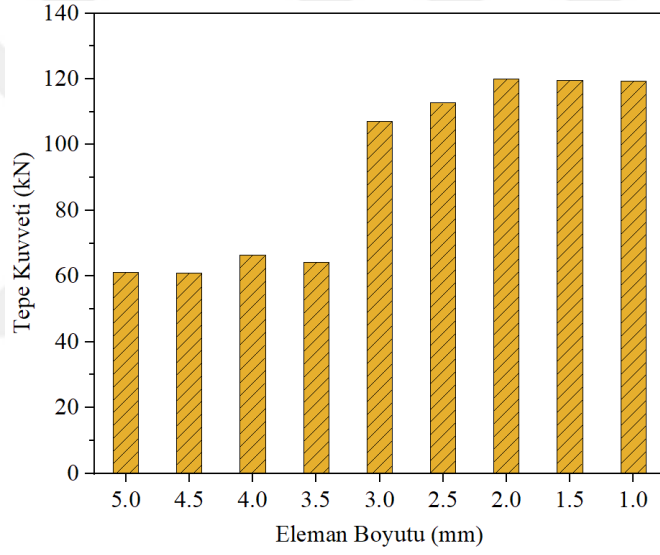
Şekil 5.7: Yükleme ve sınır koşulları ve temas algoritmaları.

#### 5.4 Sonlu Elemanlar Ağı Yakınsama Çalışmaları

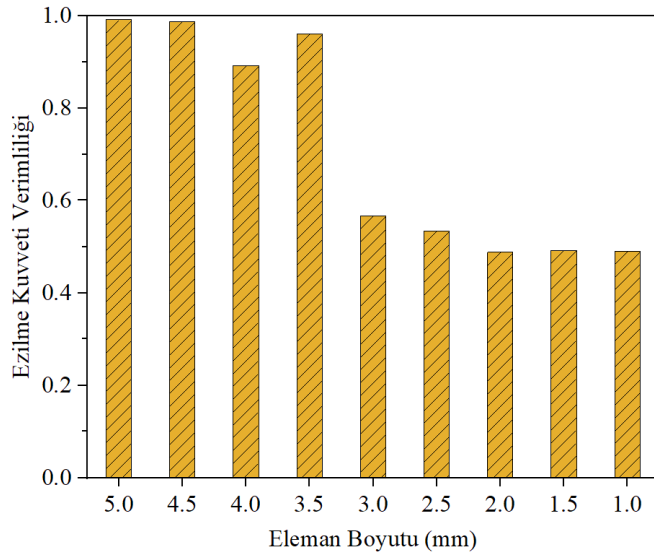
Sonlu elemanlar ağının boyutu, analiz sonucunu ve analiz süresini doğrudan etkilemektedir. 1 mm’den 5 mm’ye 0,5 mm artışla dokuz farklı ağ boyutunun analiz sonucuna etkisi araştırılmıştır. Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da sırasıyla toplam sönmölen enerji, tepe kuvveti ve ezilme kuvveti verimliliğinin ağ boyutuna göre değişimi görölmektedir. Toplam sönmölen enerji, tepe kuvveti ve ezilme kuvveti verimliliği değeri incelendiğinde 2 mm ağ örgüsü boyutunda yakınsama sağlanmıştır. En iyileme çalışmaları 2 mm ağ boyutu değeri kullanılmıştır.



Şekil 5.8: Eleman boyutuna göre toplam enerji sönümlemenin değişimi.



Şekil 5.9: Eleman boyutuna göre tepe kuvvetinin değişimi.



Şekil 5.10: Eleman boyutuna göre ezilme kuvveti verimliliğinin değişimi.

## 5.5 Sonlu Elemanlar Modelinin Deneysel Çalışmalarla Doğrulanması

ANSYS LS-DYNA ile oluşturulan sonlu elemanlar modelinin deneysel çalışmalar ile doğrulanması için yazılıma doğru ve güvenilir malzeme özelliği tanımlamak oldukça önemlidir. ANSYS LS-DYNA, malzemelerin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi için çeşitli malzeme modelleri ve malzeme kartları içermektedir. Örneğin GFRP ve CFRP gibi kompozit malzemelerin modellenmesi için MAT54, MAT55 ve MAT58 gibi malzeme kartları kullanılmaktadır. Alüminyum, çelik ve titanyum gibi metalik malzemeler için de MAT03, MAT15, MAT18, MAT24 ve MAT224 malzeme kartları sıklıkla kullanılmaktadır. Buradaki temel amaç, malzemenin belirli deformasyon hızı ve sıcaklık altındaki davranışını doğru bir şekilde modelleyebilmektir. Bu tez çalışması kapsamında, alüminyum 6063-t52 ve AlSi10Mg malzemeleri için MAT24 PIECEWISE LINEAR PLASTICITY kartı kullanılmıştır. Hareketli plaka için de MAT20 RIGID malzeme kartı kullanılmıştır. Hareketli plakanın aksel serbestliği dışındaki tüm serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır. Şekil 5.11'de MAT24 malzeme kartı görülmektedir.

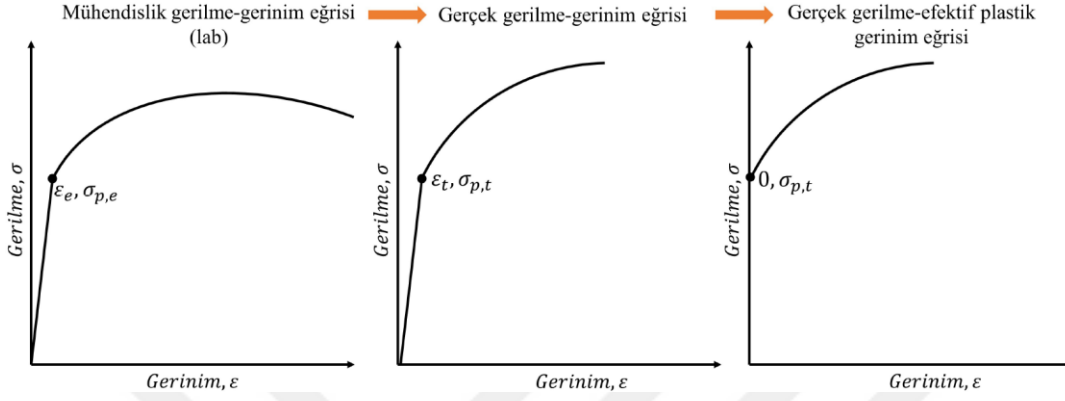
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (0)								
TITLE								
1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
							10.E+20	
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
			0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8

Plot Raise New Padd

Şekil 5.11: MAT24 malzeme kartı.

MAT24 malzeme kartı içerisinde yoğunluk, elastiklik modülü, poison oranı, akma gerilmesi ve malzemenin plastik bölgesi tanımlanabilmektedir. Bu kart içerisinde malzemenin plastik bölgesini tanımlamanın birden fazla yöntemi vardır. Malzemenin plastik bölgesi doğrusal davranıyormuş gibi bir yaklaşım yapılarak doğrunun eğimi yani malzemenin tanjant modülü ETAN kutucuğuna tanımlanmaktadır. Başlangıç noktası akma gerilmesi olmak şartıyla, malzemenin plastik bölgesi üzerinden sekiz farklı nokta EPS1-EPS8 ve ES1-ES8 kutucuklarına birbirine karşılık gelen efektif

plastik gerinim ve gerçek gerilim değerleri tanımlanabilmektedir. Eğer sekizden daha fazla nokta girilmesine ihtiyaç duyulursa, DEFINE CURVE kartı vasıtasıyla parçalı bir şekilde plastik bölge eğrisi tanımlanabilmektedir ve LCSS kutucuğuna karşılık gelen eğri numarası girilmektedir. Şekil 5.12’de gerçek gerilme-efektik plastik gerinim eğrisinin nasıl elde edildiği adım adım gösterilmektedir.

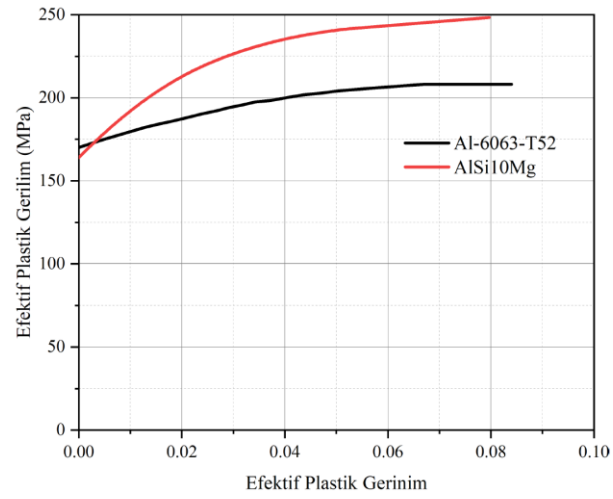


Şekil 5.12: Gerçek gerilme-efektik plastik gerinim eğrisinin elde edilmesi.

Laboratuvar ortamında oda sıcaklığındaki çekme testi ile elde edilen mühendislik gerilim-gerinim eğrisi, Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8 kullanılarak gerçek gerilim-gerinim eğrisine dönüştürülmektedir. Ardından başlangıç noktası  $(0, \sigma_p)$  olacak şekilde ayarlandıktan sonra eğri malzeme kartının içerisine parçalı bir şekilde girilmektedir. Çizgelde 5.2’de Al-6063-T52 ve AlSi10Mg malzemelerinin özellikleri görülmektedir. Şekil 5.13’de ise bu iki malzemenin gerçek gerilim-efektik plastik gerinim eğrileri verilmiştir. AlSi10Mg malzemenin yoğunluk, elastiklik modülü ve poisson oranı özellikleri EOS firmasının malzeme kitapçığından alınmıştır [63].

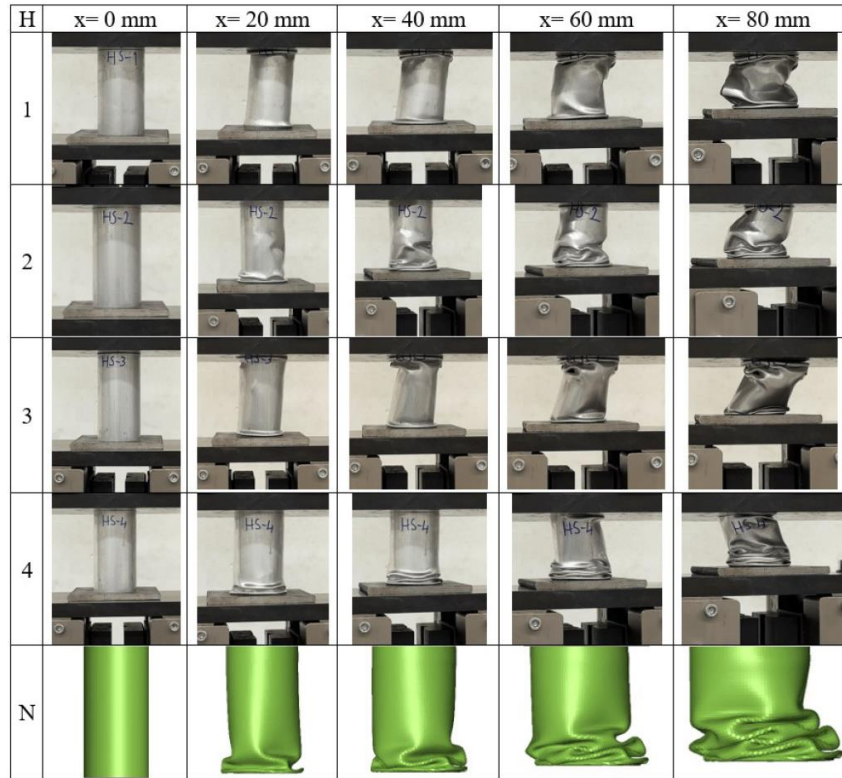
Çizelge 5.2: Al-6063-T52 ve AlSi10Mg malzeme özellikleri.

Malzeme Özelliği	Al-6063-T52 [23]	AlSi10Mg
Yoğunluk ( $\text{kg/mm}^3$ )	$2,70 \times 10^{-6}$	$2,68 \times 10^{-6}$
Elastiklik Modülü (GPa)	68,2	69,3
Poison Oranı	0,3	0,3
Akma Gerilmesi (GPa)	0,180	0,160



Şekil 5.13: Al 6063-T52 [23] ve AlSi10Mg malzemelerinin gerçek gerilim-efektik plastik gerinim eğrileri.

Oluşturulan nihai analiz kartları ANSYS LS-DYNA kullanılarak çözdürülmüştür ve LS-PrePost programında sonuçlar incelenmiştir. Boş aluminyum tüpün ve biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin aksel ezilme testi sonuçları ve sonlu elemanlar analizi çalışmalarından elde edilen sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.14’de biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin deneysel ve nümerik çalışmalar neticesinde elde edilen deformasyon görüntüleri görülmektedir. Çizelge 5.3’te ise enerji sönümleme performansı göstergelerinin karşılaştırılması verilmiştir.

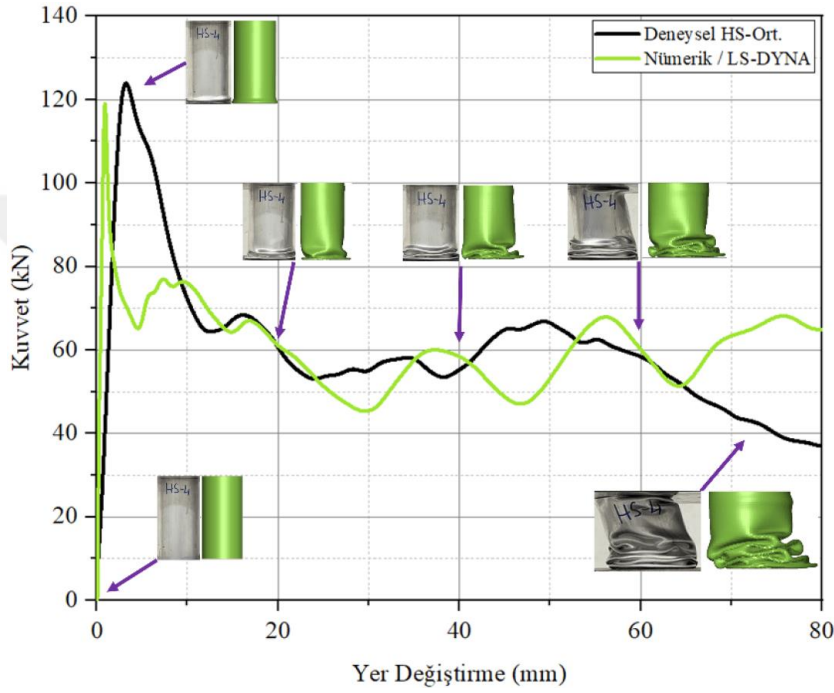


Şekil 5.14: Aksel ezilme testi ve sonlu elemanlar analizi sonuçları.

Çizelge 5.3: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin deneysel ve nümerik olarak elde edilen enerji sönümlenme performansı göstergeleri.

	$E_T$ (kJ)	$F_{maks}$ (kN)	$F_{ort}$ (kN)	$SEA$ (kJ/kg)	$CFE$ (%)
Ortalama	4,86	126,0	60,8	17,0	47,6
Nümerik	4,68	120,0	58,6	16,7	48,3
Fark (%)	1,7	1,8	1,7	1,7	1,5

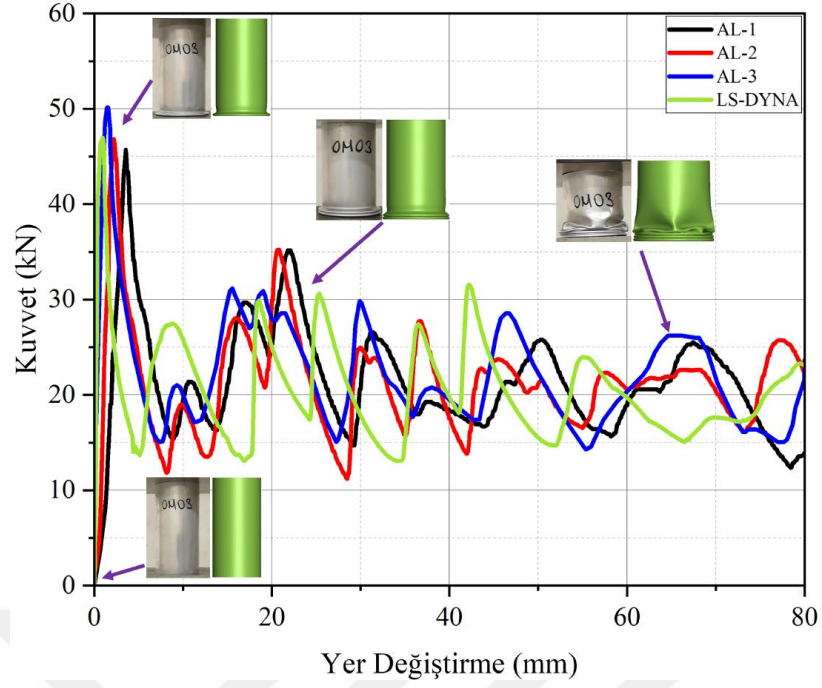
Şekil 5.15'te dört deney sonucunun ortalaması ve sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri görölmektedir.



Şekil 5.15: Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

Şekil 5.16'da üç adet içi boş alüminyum tüpün kuvvet yer değiştirme grafikleri ve çizelge 5.4'de ise enerji sönümlenme performans göstergeleri görölmektedir.





Şekil 5.16: Boş alüminyum tüpün kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

Çizelge 5.4: İçi boş alüminyum tüpün enerji sönümlenme performans göstergeleri.

	$E_T$ (kJ)	$F_{maks}$ (kN)	$F_{ort}$ (kN)	$SEA$ (kJ/kg)	$CFE$ (%)
Ortalama	1,73	47,5	21,6	14,5	45,5
Nümerik	1,72	48,4	21,5	14,3	44,4
Fark (%)	0,5	1,8	0,5	1,6	2,3





## 6. ENİYİLEME ÇALIŞMALARI

### 6.1 Eniyileme Sonuçları

Eniyileme çalışmasında hata oranları daha düşük olduğu için birinci merteye Kriging vekil modeli kullanılmıştır. Eniyileme probleminin çözümü MATLAB yazılımında “fmincon” komutu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Global minimum değerini bulma ihtimalini arttırmak için çoklu başlangıç noktası stratejisi (İng. Multiple starting point strategy) kullanılmıştır. Çizelge 6.1’de özgül enerji sönümleme kapasitesi, ezilme kuvveti ve kompozit fonksiyonu oluşturan bileşenler ( $E_T$ ,  $m$ ,  $F_{maks}$ ,  $F_{ort}$ ) için vekil modeller oluşturularak yapılan eniyileme çalışmasının sonuçları gösterilmektedir. Kompozit amaç fonksiyonu için vekil model tahmini ile ANSYS LS-DYNA doğrulama simülasyonu sonucu arasındaki farkın sadece %2 civarında olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1: Özgül enerji sönümleme kapasitesi, ezilme kuvveti verimliliği ve kompozit fonksiyon için vekil modeller oluşturularak elde edilen eniyileme sonuçları.

	n	t(mm)	k	Kriging Tahmini	LS-DYNA	Hata (%)
SEA (kJ/kg)	0,23	1,70	2	19,30	18,19	6,10
CFE (%)	0,75	1,70	6	62,60	62,10	0,77
f	0,66	1,70	5	0,951	0,932	2,05

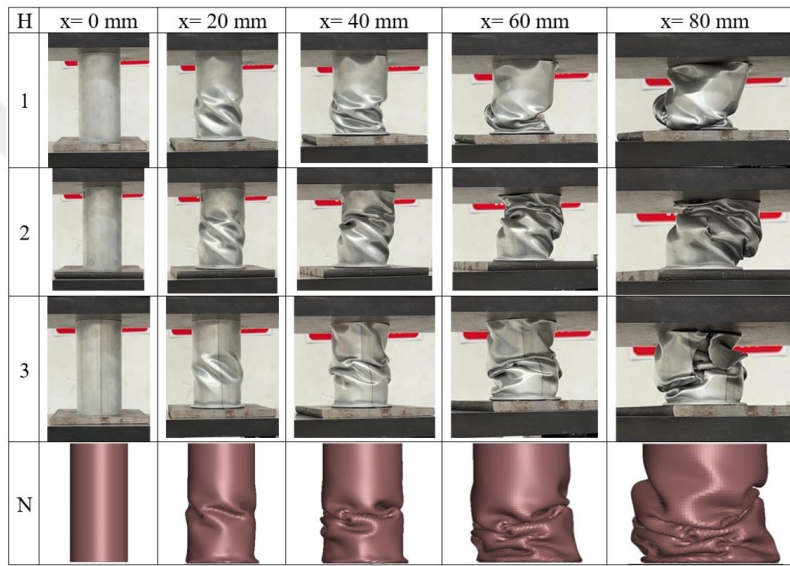
### 6.2 Optimum Tasarım Performansının Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Optimum tasarım değişkenlerine sahip biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin aksenal ezilme testleri üç tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ardından ANSYS LS-DYNA kullanılarak oluşturulan benzetim modeli deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Çizelge 6.2’de optimum tasarımın deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen enerji sönümleme performans göstergeleri görülmektedir.

Çizelge 6.2: Optimum tasarımın enerji sönümlenme performans göstergeleri.

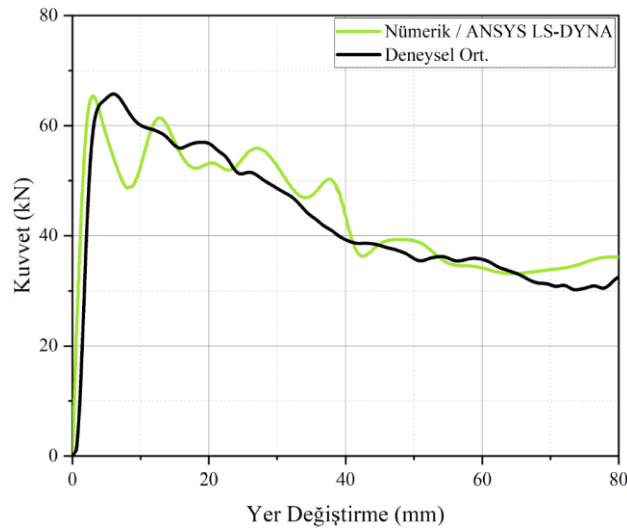
	$E_T$ (kJ)	$F_{maks}$ (kN)	$F_{ort}$ (kN)	$SEA$ (kJ/kg)	$CFE$ (%)
O-1	3,73	67,8	46,6	12,3	68,8
O-2	3,49	67,4	43,6	11,5	64,7
O-3	3,12	62,8	39,0	10,3	62,1
Ortalama	3,44	66,0	43,0	11,4	65,2
LS-DYNA	3,52	65,4	44,1	12,1	67,5
Hata(%)	2,4	0,9	2,4	6,5	3,5

Deneyel ve nümerik sonuçlar incelendiğinde aradaki hata payının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Şekil 6.1’de optimum tasarımın deneyel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.1: Optimum tasarımın deneyel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları.

Şekil 6.2’de üç deney sonucunun ortalaması ve sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.2: Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

### 6.3 Optimum Tasarımın Başlangıç Tasarımıyla ve İçi Boş Profil ile Kıyaslanması

Biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin başlangıç ve optimum tasarımının enerji sönümleme performans göstergelerinin kıyaslanması Çizelge 6.3'te gösterilmektedir. Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilede tepe kuvvetinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Başlangıç tasarımına kıyasla, tepe kuvvetinin 126 kN'dan 66 kN değerine düştüğü (%47,6 oranında azalma) görülmektedir. Tepe kuvvetindeki azalma neticesinde, ezilme kuvveti veriminin %47,6'dan %65,2'ye çıktığı (%37 oranında artış) saptanmıştır. Özgül enerji sönümleme kapasitesinin ise 17,0 kJ/kg'dan 11,4 kJ/kg değerine düştüğü (%33 oranında düşüş) görülmüştür.

Çizelge 6.3: Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin içi boş alüminyum profil ile enerji sönümleme performansının kıyaslanması.

	$E_T$ (kJ)	$F_{maks}$ (kN)	$F_{ort}$ (kN)	$SEA$ (kJ/kg)	$CFE$ (%)
Başlangıç	4,86	126,0	60,8	17,0	47,6
Optimum	3,44	66,0	43,0	11,4	65,2
Fark (%)	-29,2	-47,6	-29,3	-32,9	37,0

Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profil ile içi boş alüminyum profilin enerji sönümleme performansı göstergelerinin kıyaslanması Çizelge 6.4'te gösterilmektedir. Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin tepe kuvveti, içi boş alüminyum profile göre %38,9 daha fazla çıktığı saptanmıştır. Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin enerji sönümleme kapasitesinin, içi boş alüminyum profile göre yaklaşık iki kat fazla olduğu görülmektedir. Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin özgül enerji sönümleme kapasitesinin içi boş alüminyum profile göre %21,6 oranında düşük çıktığı fakat ezilme kuvveti verimliliğinin ise %43,3 oranında fazla çıktığı saptanmıştır.

Çizelge 6.4: Optimum biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin içi boş alüminyum profil ile enerji sönümleme performansının kıyaslanması.

	$E_T$ (kJ)	$F_{maks}$ (kN)	$F_{ort}$ (kN)	$SEA$ (kJ/kg)	$CFE$ (%)
İçi Boş	1,73	47,5	21,6	14,5	45,5
Optimum	3,44	66,0	43,0	11,4	65,2
Fark (%)	98,8	38,9	98,8	-21,3	43,3



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji sönümleyici profillerin üzerilerine gelen kinetik enerjiyi deformasyon enerjisine çevirerek sönümlemesi beklenmektedir. Bu yapıların en yüksek seviyede enerji sönümleme kapasitesine sahip olmasının yanında hafifde olması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında içi boş aluminyum tüp içerisine, biyo ilhamlı spiral parça koyularak elde edilen biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin enerji sönümleme performansı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Aluminyum boru profil AL-6063-T52 malzemedен, biyo ilhamlı spiral parça ve çekme testi numunesi ise AlSi10Mg malzemedен üretilmiştir. İçi boş aluminyum tüplerin ve biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profillerin eksenel ezilme testleri gerçekleştirilmiştir. ANSYS LS-DYNA kullanılarak oluşturulan benzetim modeli, deneysel veriler ile doğrulandıktan sonra tasarım eniyileme çalışmaları yapılarak biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin performansının artırılması hedeflenmiştir. Üç tasarım değişkenli eniyileme çalışmasında latin hiperküp örnekleme ile otuz deney tasarımı noktası oluşturulmuştur. Deney tasarımlarına uygun bir şekilde kurulan sonlu elemanlar analizi modellerinin sonuçları Yanıt Yüzey Metodu ve Kriging vekil modelleri oluşturulması için kullanılmıştır. Bu vekil modeller çoklu başlangıç noktası stratejisi ile çözümlenerek eniyileme çalışması tamamlanmıştır. Son olarak eniyileştirilmiş tasarımın eksenel ezilme testleri gerçekleştirilmiş ve benzetim modelinin doğrulaması yapılarak tez çalışması tamamlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Başlangıç tasarımındaki biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin, içi boş aluminyum profile göre özgül enerji sönümleme kapasitesinin (SEA) ve ezilme kuvveti verimliliğinin (CFE) sırasıyla %17,2 ve %4,6 daha yüksek çıktığı saptanmıştır.
- Eniyileştirilmiş biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin, başlangıç tasarımına göre SEA ve tepe kuvvetinin sırasıyla %32,9 ve %47,6 oranında düştüğü fakat CFE'nin %37 oranında arttığı saptanmıştır.

- Ek olarak, eniyileştirilmiş biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin SEA'sı, içi boş alüminyum tüpe göre %21,3 oranında düşüş yaşarken, CFE'nin ise %43,3 oranında artış yaşadığı saptanmıştır.
- ANSYS LS-DYNA kullanılarak oluşturulan benzetim modellerinin, deneysel sonuçlara yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu çalışmalara devam etmek isteyen araştırmacılara, biyo ilhamlı hibrit enerji sönümleyici profilin, özgül enerji sönümleme kapasitesini arttırmak için üretim parametrelerinin ve ısıl işlem reçetelerinin enerji sönümleme performansına etkisini araştırması önerilebilir.



## KAYNAKLAR

- [1]. **Momentive Develop Composite Crashbox**, <https://rb.gy/asq0g> (Erişim Tarihi: 01.07.2023)
- [2]. **Wang, Y., Feng, J., Wu, J., & Hu, D. (2016)**. Effects of fiber orientation and wall thickness on energy absorption characteristics of carbon-reinforced composite tubes under different loading conditions, *Composite Structures*, 153, 356-368.
- [3]. **Abramowicz, W., & Jones, N. (1984)**. Dynamic axial crushing of square tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 2(2), 179-208.
- [4]. **Wierzbicki, T., & Abramowicz, W. (1983)**. On the crushing mechanics of thin-walled structures.
- [5]. **Acar, E., Altin, M., & Güler, M. A. (2019)**. Evaluation of various multi-cell design concepts for crashworthiness design of thin-walled aluminum tubes, *Thin-Walled Structures*, 142, 227-235.
- [6]. **Keskin, S. A., Acar, E., Güler, M. A., & Altin, M. (2021)**. Exploring various options for improving crashworthiness performance of rail vehicle crash absorbers with diaphragms, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64, 3193-3208.
- [7]. **Nia, A. A., & Parsapour, M. (2014)**. Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections, *Thin-Walled Structures*, 74, 155-165.
- [8]. **Pirmohammad, S., & Marzdashti, S. E. (2016)**. Crushing behavior of new designed multi-cell members subjected to axial and oblique quasi-static loads, *Thin-Walled Structures*, 108, 291-304.
- [9]. **Qi, C., Yang, S., & Dong, F. (2012)**. Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading, *Thin-Walled Structures*, 59, 103-119.
- [10]. **Sadighi, A., Salaripoor, H., & Asgari, M. (2022)**. Comprehensive study on the crashworthiness of a new developed axially-half corrugated aluminum tubes, *International journal of crashworthiness*, 27(3), 633-650.
- [11]. **Yang, K., Xu, S., Zhou, S., & Xie, Y. M. (2018)**. Multi-objective optimization of multi-cell tubes with origami patterns for energy absorption, *Thin-Walled Structures*, 123, 100-113.
- [12]. **Zheng, G., Pang, T., Sun, G., Wu, S., & Li, Q. (2016)**. Theoretical, numerical, and experimental study on laterally variable thickness (LVT) multi-cell tubes for crashworthiness, *International Journal of Mechanical Sciences*, 118, 283-297.



- [13]. **Huang, J., & Wang, X. (2009).** Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes. *Composite Structures*, 91(2), 222-228.
- [14]. **Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M., & Byar, A. (2011).** LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 42(11), 1809-1825.
- [15]. **Liu, Q., Liufu, K., Cui, Z., Li, J., Fang, J., & Li, Q. (2020).** Multiobjective optimization of perforated square CFRP tubes for crashworthiness. *Thin-Walled Structures*, 149, 106628.
- [16]. **Han, X., Hou, S., Ying, L., Hou, W., & Aliyev, H. (2019).** On the fracture behaviour of adhesively bonded CFRP hat-shaped thin-walled beam under axial crushing load: An experimental and modelling study. *Composite Structures*, 215, 258-265.
- [17]. **Striewe, J., Reuter, C., Sauerland, K. H., & Tröster, T. (2018).** Manufacturing and crashworthiness of fabric-reinforced thermoplastic composites. *Thin-Walled Structures*, 123, 501-508.
- [18]. **Liu, Q., Fu, J., Ma, Y., Zhang, Y., & Li, Q. (2020).** Crushing responses and energy absorption behaviors of multi-cell CFRP tubes. *Thin-walled Structures*, 155, 106930.
- [19]. **Heimbs, S., Strobl, F., & Middendorf, P. (2011).** Integration of a composite crash absorber in aircraft fuselage vertical struts. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 3(2), 87.
- [20]. **Rabiee, A., & Ghasemnejad, H. (2019).** Lightweight design to improve crushing behaviour of multi-stitched composite tubular structures under impact loading. *Thin-Walled Structures*, 135, 109-122.
- [21]. **Siromani, D., Henderson, G., Mikita, D., Mirarchi, K., Park, R., Smolko, J., ... & Tan, T. M. (2014).** An experimental study on the effect of failure trigger mechanisms on the energy absorption capability of CFRP tubes under axial compression. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 64, 25-35.
- [22]. **David, M., & Johnson, A. F. (2015).** Effect of strain rate on the failure mechanisms and energy absorption in polymer composite elements under axial loading. *Composite Structures*, 122, 430-439.
- [23]. **Altin, M., Güler, M. A., & Mert, S. K. (2017).** The effect of percent foam fill ratio on the energy absorption capacity of axially compressed thin-walled multi-cell square and circular tubes. *International journal of mechanical sciences*, 131, 368-379.
- [24]. **Zhou, Y., Lan, F., & Chen, J. (2011).** Crashworthiness research on S-shaped front rails made of steel–aluminum hybrid materials. *Thin-Walled Structures*, 49(2), 291-297.
- [25]. **Vinayagar, K., & Kumar, A. S. (2017).** Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 112, 184-193.

- [26]. **An, X., Gao, Y., Fang, J., Sun, G., & Li, Q. (2015).** Crashworthiness design for foam-filled thin-walled structures with functionally lateral graded thickness sheets. *Thin-walled structures*, 91, 63-71.
- [27]. **Guden, M., Yüksel, S., Taşdemirci, A., & Tanoğlu, M. (2007).** Effect of aluminum closed-cell foam filling on the quasi-static axial crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminum/composite hybrid tubes. *Composite structures*, 81(4), 480-490.
- [28]. **Sun, G., Li, S., Liu, Q., Li, G., & Li, Q. (2016).** Experimental study on crashworthiness of empty/aluminum foam/honeycomb-filled CFRP tubes. *Composite Structures*, 152, 969-993.
- [29]. **Zhang, Z., Sun, W., Zhao, Y., & Hou, S. (2018).** Crashworthiness of different composite tubes by experiments and simulations. *Composites Part B: Engineering*, 143, 86-95.
- [30]. **Reuter, C., & Tröster, T. (2017).** Crashworthiness and numerical simulation of hybrid aluminium-CFRP tubes under axial impact. *Thin-Walled Structures*, 117, 1-9.
- [31]. **Ming, S., Song, Z., Zhou, C., Du, K., Teng, C., Wang, Y., ... & Wang, B. (2022).** The crashworthiness design of metal/CFRP hybrid tubes based on origami-ending approach: Experimental research. *Composite Structures*, 279, 114843.
- [32]. **Wang, Z., Jin, X., Li, Q., & Sun, G. (2020).** On crashworthiness design of hybrid metal-composite structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 171, 105380.
- [33]. **Wu, Y., Sun, L., Yang, P., Fang, J., & Li, W. (2021).** Energy absorption of additively manufactured functionally bi-graded thickness honeycombs subjected to axial loads. *Thin-Walled Structures*, 164, 107810.
- [34]. **Yang, J., Gu, D., Lin, K., Yang, Y., & 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.
- [35]. **Du, Y., Gu, D., Xi, L., Dai, D., Gao, T., Zhu, J., & Ma, C. (2020).** Laser additive manufacturing of bio-inspired lattice structure: Forming quality, microstructure and energy absorption behavior. *Materials Science and Engineering: A*, 773, 138857.
- [36]. **Yin, H., Zhou, J., Wen, G., & Wu, Z. (2022).** Crushing analysis and optimization for bio-inspired hierarchical 3D cellular structure. *Composite Structures*, 286, 115333.
- [37]. **Sun, H., Ge, C., Gao, Q., Qiu, N., & Wang, L. (2022).** Crashworthiness of sandwich cylinder filled with double-arrowed auxetic structures under axial impact loading. *International Journal of Crashworthiness*, 27(5), 1383-1392.

- [38]. **Zhang, L., Bai, Z., & Bai, F. (2018).** Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections. *Thin-Walled Structures*, 122, 42-51.
- [39]. **San Ha, N., Pham, T. M., Chen, W., Hao, H., & Lu, G. (2021).** Crashworthiness analysis of bio-inspired fractal tree-like multi-cell circular tubes under axial crushing. *Thin-Walled Structures*, 169, 108315.
- [40]. **Nikkhah, H., Baroutaji, A., Kazancı, Z., & Arjunan, A. (2020).** Evaluation of crushing and energy absorption characteristics of bio-inspired nested structures. *Thin-Walled Structures*, 148, 106615.
- [41]. **Fu, J., Liu, Q., Liufu, K., Deng, Y., Fang, J., & Li, Q. (2019).** Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption. *Thin-Walled Structures*, 135, 400-413.
- [42]. **Hu, D., Wang, Y., Song, B., Dang, L., & 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.
- [43]. **Xiang, J., & Du, J. (2017).** Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb structure under axial impact loading. *Materials Science and Engineering: A*, 696, 283-289.
- [44]. **Xu, T., Liu, N., Yu, Z., Xu, T., & Zou, M. (2017).** Crashworthiness design for bionic bumper structures inspired by cattail and bamboo. *Applied bionics and biomechanics*, 2017.
- [45]. **Zhang, Y., Xu, X., Wang, J., Chen, T., & Wang, C. H. (2018).** Crushing analysis for novel bio-inspired hierarchical circular structures subjected to axial load. *International Journal of Mechanical Sciences*, 140, 407-431.
- [46]. **Yu, X., Pan, L., Chen, J., Zhang, X., & Wei, P. (2019).** Experimental and numerical study on the energy absorption abilities of trabecular–honeycomb biomimetic structures inspired by beetle elytra. *Journal of Materials Science*, 54(3), 2193-2204.
- [47]. **Wang, X., Qin, R., & Chen, B. (2021).** Laser-based additively manufactured bio-inspired crashworthy structure: Energy absorption and collapse behaviour under static and dynamic loadings. *Materials & Design*, 211, 110128.
- [48]. **Tsang, H. H., & Raza, S. (2018).** Impact energy absorption of bio-inspired tubular sections with structural hierarchy. *Composite Structures*, 195, 199-210.
- [49]. **Cetin, E., & Baykasoğlu, C. (2020).** Crashworthiness of graded lattice structure filled thin-walled tubes under multiple impact loadings. *Thin-Walled Structures*, 154, 106849.
- [50]. **Zhang, Y., Lin, Y., Li, Y., & Li, X. (2021).** 3D printed self-similar AlSi10Mg alloy hierarchical honeycomb architectures under in-plane large deformation. *Thin-Walled Structures*, 164, 107795.

- [51]. **San Ha, N., Lu, G., & 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.
- [52]. **Li, Z., Duan, L., Chen, T., & Hu, Z. (2018).** Crashworthiness analysis and multi-objective design optimization of a novel lotus root filled tube (LFT). *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57, 865-875.
- [53]. **Zou, M., Xu, S., Wei, C., Wang, H., & Liu, Z. (2016).** A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo. *Thin-Walled Structures*, 101, 222-230.
- [54]. **Chen, B. C., Zou, M., Liu, G. M., Song, J. F., & Wang, H. X. (2018).** Experimental study on energy absorption of bionic tubes inspired by bamboo structures under axial crushing. *International Journal of Impact Engineering*, 115, 48-57.
- [55]. **Xiao, Y., Yin, H., Fang, H., & 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.
- [56]. **Tasdemirci, A., Akbulut, E. F., Guzel, E., Tuzgel, F., Yucesoy, A., Sahin, S., & Guden, M. (2018).** Crushing behavior and energy absorption performance of a bio-inspired metallic structure: Experimental and numerical study. *Thin-Walled Structures*, 131, 547-555.
- [57]. **Xin, Z., Zhang, X., Duan, Y., & Xu, W. (2018).** Nacre-inspired design of CFRP composite for improved energy absorption properties. *Composite Structures*, 184, 102-109.
- [58]. **Yin, H., Xiao, Y., Wen, G., Gan, N., Chen, C., & Dai, J. (2016).** Multi-objective robust optimization of foam-filled bionic thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 109, 332-343.
- [59]. **Siyambaş, Y., & Turgut, Y. A. K. U. P. (2022).** Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımli Parçalarda Kusurlar, Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü-Bir Araştırma. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10(2), 368-390.
- [60]. **Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021).** *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- [61]. **Frazier, W. E. (2014).** Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23, 1917-1928.
- [62]. **Ibrahim, Y., & Hilal, N. (2022).** The Potentials of 3D-Printed Feed Spacers in Reducing the Environmental Footprint of Membrane Separation Processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 109249.
- [63]. **EOS GmbH.** Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet, 01 2022.
- [64]. **Liu, P.S., & Chen, G.F.,** Chapter two - making porous metals. *Porous Materials*, (Sf. 21–112), Butterworth-Heinemann, Boston.

- [65]. **Hadadzadeh, A., Baxter, C., Amirkhiz, B. S., & Mohammadi, M. (2018).** Strengthening mechanisms in direct metal laser sintered AlSi10Mg: Comparison between virgin and recycled powders. *Additive Manufacturing*, 23, 108-120.
- [66]. **Özer, G., Tarakçı, G., Yılmaz, M. S., Öter, Z. Ç., Sürmen, Ö., Akça, Y., ... & Koç, E. (2020).** Investigation of the effects of different heat treatment parameters on the corrosion and mechanical properties of the AlSi10Mg alloy produced with direct metal laser sintering. *Materials and Corrosion*, 71(3), 365-373.
- [67]. **Zhang, C., Zhu, H., Liao, H., Cheng, Y., Hu, Z., & Zeng, X. (2018).** Effect of heat treatments on fatigue property of selective laser melting AlSi10Mg. *International Journal of Fatigue*, 116, 513-522.
- [68]. **Li, W., Li, S., Liu, J., Zhang, A., Zhou, Y., Wei, Q., ... & Shi, Y. (2016).** Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 663, 116-125.
- [69]. **Dowling, N.E.** Mechanical behavior of materials. Pearson Education Limited, (Sf. 123-127) 2013.
- [70]. **ASTM, E. 8. (2001).** Standard test methods for tension testing of metallic materials. *Annual book of ASTM standards. ASTM*.
- [71]. **LSTC LS-DYNA Support, <https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/timestep-size>** (Erişim Tarihi: 01.08.2023)

## **EKLER**

EK 1: 30 Adet Deneş Tasarımı Noktasının Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

EK 2: Yanıt Yüzet Metodu MATLAB kodu

EK 3: Kriging vekil modeli MATLAB kodu

EK 4: Çoklu başlangıç noktası stratejisi ile optimizasyon probleminin özümü



## EK 1

ÇizelgeEk.1: 30 adet deney tasarımı noktasının sonlu elemanlar analizi sonuçları.

Analiz No.	n	t (mm)	k	E <sub>T</sub> (kJ)	F <sub>maks</sub> (kN)	F <sub>ort</sub> (kN)	E <sub>m</sub> (kJ)	η (%)	f
1	0.50	1.03	3	3.001	95.33	37.51	16.07	39.4	0.741
2	0.34	1.01	5	3.531	104.27	44.14	15.70	42.3	0.755
3	0.40	1.06	3	3.087	97.86	38.59	16.36	39.4	0.749
4	0.09	1.11	6	4.166	114.46	52.08	16.25	45.5	0.796
5	0.25	1.67	4	4.537	116.33	56.71	17.66	48.8	0.859
6	0.06	1.26	4	3.739	108.69	46.74	16.60	43.0	0.785
7	0.66	1.53	4	4.187	100.02	52.34	17.00	52.3	0.870
8	0.00	1.60	5	4.595	119.61	57.44	16.31	48.0	0.817
9	0.35	1.14	6	4.033	110.26	50.41	15.52	45.7	0.778
10	0.20	1.57	6	5.392	124.23	67.40	17.47	54.3	0.898
11	0.38	1.38	2	3.445	98.21	43.06	18.93	43.8	0.853
12	0.43	1.29	2	3.382	96.38	42.28	18.99	43.9	0.854
13	0.51	1.54	3	3.694	100.20	46.18	16.96	46.1	0.819
14	0.30	1.36	4	4.037	109.87	50.46	17.32	45.9	0.827
15	0.72	1.09	4	3.541	93.92	44.26	16.73	47.1	0.821
16	0.59	1.70	6	5.449	110.03	68.11	16.88	61.9	0.945
17	0.11	1.43	2	3.322	100.69	41.53	18.04	41.2	0.808
18	0.26	1.41	6	4.718	121.02	58.98	16.23	48.7	0.821
19	0.68	1.32	5	4.378	98.62	54.73	17.15	55.5	0.900
20	0.17	1.13	5	3.847	110.37	48.09	16.25	43.6	0.780
21	0.61	1.62	2	3.515	95.73	43.94	18.30	45.9	0.853
22	0.15	1.19	2	3.124	98.81	39.05	17.97	39.5	0.793
23	0.53	1.45	4	4.033	102.08	50.41	16.80	49.4	0.841
24	0.46	1.48	2	3.469	97.21	43.36	18.63	44.6	0.851
25	0.55	1.64	5	5.008	107.33	62.60	17.55	58.3	0.933
26	0.75	1.21	3	3.148	92.72	39.35	15.90	42.4	0.762
27	0.20	1.17	3	3.235	102.93	40.44	16.55	39.3	0.753
28	0.04	1.27	6	4.547	118.14	56.84	16.55	48.1	0.824
29	0.65	1.49	3	3.457	96.80	43.21	16.09	44.6	0.784
30	0.30	1.33	5	4.196	114.21	52.45	16.38	45.9	0.802

## EK 2

```
1  clc;
2  clear all;
3  x = load('inputs.txt');
4  v3 = load('MCF.txt');
5  stats = regstats(v3,x,'quadratic');
6  b = stats.beta
7
8
9  % Load the test data files
10 xt = load('inputs.txt');
11 yt = load('MCF.txt');
12 Xt = x2fx(xt,'quadratic');
13 ypred = Xt*b;
14 error = ypred - yt;
15 rmse = sqrt(mean(error.^2))
16
17 % loocv
18 n = size(x,1);
19 for i=1:n
20     xi=x; v3i=v3;
21     xi(i,:)=[]; v3i(i,:)=[];
22     stats = regstats(v3i,xi,'quadratic');
23     bi = stats.beta;
24     Xi = x2fx(x(i,:), 'quadratic');
25     err_cv(i,1) = Xi*bi - v3(i);
26 end
27 rmse_cv = sqrt(mean(err_cv.^2))
28
29 GRMSE = rmse/(max(v3)-min(v3))
30 GRMSE_CV = rmse_cv/(max(v3)-min(v3))
```

ŞekilEk.1: Yanıt Yüzet Metodu MATLAB kodu.



## EK 3

```
1 function MCF_kr
2 addpath('dace')
3 % Load the training data files
4 x = load('inputs.txt');
5 v3 = load('MCF.txt');
6 %figure, plot(x(:,1),x(:,2),'b*'), xlabel('x_1'), ylabel('x_2')
7
8 % Construct the surrogate model
9 theta0 = [1 1 1]; lb = [1e-2 1e-2 1e-2]; ub = [100 100 100];
10 [dmodel, perf] = dacefit(x, v3, @regpoly1, @corr Gauss, theta0, lb, ub);
11
12 % loocv
13 n = size(x,1);
14 for i=1:n
15     xi=x; v3i=v3;
16     xi(i,:)=[]; v3i(i,:)=[];
17     [dmodeli, perf_i] = dacefit(xi, v3i, @regpoly1, @corr Gauss, theta0, lb, ub);
18     err_cv(i,1) = predictor(x(i,:), dmodeli) - v3(i);
19 end
20 rmse_cv = sqrt(mean(err_cv.^2))
21 % Load the test data files
22
23 % Load the test data files
24 xt = load('inputs.txt');
25 yt = load('MCF.txt');
26 ypred = predictor(xt, dmodel);
27 error = ypred - yt;
28 rmse = sqrt(mean(error.^2))
29
30 GRMSE = rmse/(max(v3)-min(v3))
31 GRMSE_cv = rmse_cv/(max(v3)-min(v3))
32
33
34 end
```

ŞekilEk.2: Kriging vekil modeli MATLAB kodu.

## EK 4

```
1 function SAE_opt_kr_2
2 global dmodel1 dmodel2 dmodel3 dmodel4
3
4 % Load the data files
5 x = load('inputs.txt');
6 EA = load('EA.txt');
7 m = load('mass.txt');
8 PCF = load('PCF.txt');
9 MCF = load('MCF.txt');
10
11 % Construct the surrogate model
12 theta0 = [1 1 1];
13 lb = [1e-2 1e-2 1e-2];
14 ub = [100 100 100];
15 [dmodel1, perf1] = dacefit(x, PCF, @regpoly1, @corr Gauss, theta0, lb, ub);
16 [dmodel2, perf2] = dacefit(x, MCF, @regpoly1, @corr Gauss, theta0, lb, ub);
17 [dmodel3, perf3] = dacefit(x, EA, @regpoly1, @corr Gauss, theta0, lb, ub);
18 [dmodel4, perf4] = dacefit(x, m, @regpoly1, @corr Gauss, theta0, lb, ub);
19
20
21 % Formulate the optimization problem
22 A = [];
23 b = [];
24 Aeq = [];
25 beq = [];
26 lb = [0, 1, 2];
27 ub = [0.75, 1.7, 6];
28 options = optimset('display', 'iter', 'MaxFunEvals', 500);
29
30 % Multiple starting point strategy
31 fval_opt = Inf;
32 for ii = 1:30
33     fprintf('i = %4.0f \n', ii)
34     x0 = lb + (ub - lb) .* rand(1, 3);
35     [xopt, fval, exitflag, output] = fmincon(@get_obj, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, @get_constr, options);
36     if fval < fval_opt && exitflag > 0
37         x_opt = xopt; % Ensure x_opt is a column vector
38         fval_opt = fval;
39     end
40 end
41
42 x_opt, fval_opt
43
44 function f = get_obj(xx)
45 global dmodel1 dmodel2 dmodel3 dmodel4
46 %X = [xx(:,1), xx(:,2), xx(:,3)];
47 PCF = predictor(xx, dmodel1);
48 MCF = predictor(xx, dmodel2);
49 EA = predictor(xx, dmodel3);
50 m = predictor(xx, dmodel4);
51 %SAE = predictor(xx, dmodel1);
52 %CFE = predictor(xx, dmodel2);
53 %f = -0.5*((EA/m)/(16.42-10.37)+(MCF/PCF)/(0.715-0.445));
54 %f = -0.5*((EA/m)/(16.42)+(MCF/PCF)/(0.715));
55 f = -EA/m;
56 %f = -MCF/PCF;
57
58 function [c, ceq] = get_constr(xx)
59 c = [];
60 ceq = [];
```

ŞekilEk.3: Çoklu başlangıç noktası stratejisi ile optimizasyon probleminin çözümü.

