

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

**BAL PETEĞİ DOLGULU HİBRİT YAPILARIN ENERJİ SÖNÜMLEME  
KAPASİTELERİNİN İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Can KAYA**

**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.

Can KAYA



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BAL PETEĞİ DOLGULU HİBRİT YAPILARIN ENERJİ SÖNÜMLEME KAPASİTELERİNİN İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Can KAYA

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

Danışman: Prof. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Ağustos 2023

Enerji sönümleyici yapılar birçok sektörde kullanılan önemli bir yapısal elemandır. Otomotiv sektöründe enerji sönümleyici yapıların araç içerisinde bulunan sürücü ve yolcuların güvenliğini sağlamaktadır. Önden çarpışma durumlarında çarpışma kutuları ortaya çıkan enerjiyi sönümlemekle görevlidir. Çarpışma kutularının hafif ve yüksek mukavemete sahip olmaları beklenmektedir. Bu tez çalışmasında bal peteği dolgulu hibrit enerji sönümleyici yapıların çarpışma performansı nümerik olarak belirlenecektir. Deney tasarımında farklı geometrik ve yapısal seviyeler bulunduğu için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. 36 Deney tasarımı sonucunda çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS yöntemi kullanılarak en uygun tasarıma ulaşılması hedeflenmektedir. Analiz modellerinde kullanılacak malzeme kartları literatür doğrulaması ile hazırlanmıştır. Analiz modelinde çok fazla kontak ve eleman bulunması analiz çözüm sürecini oldukça uzatmaktaydı. Bu sorunun çözülebilmesi için ağırlık ölçeklendirme çalışması gerçekleştirilmiştir. %10 Ağırlık arttırması analiz süresini yarıya düşürmüştür. Uygun analiz modeli Python programlama dili kullanılarak geliştirilen TOPSIS kodu ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek enerji sönümlene kapasitesine sahip modelin TOPSIS puanı en yüksek olmaktadır. En yüksek puana sahip model boş alüminyum tüpe göre %22

daha fazla enerji sönümlenme kapasitesine sahip olmaktadır. En yüksek TOPSIS puanına sahip modeller incelendiğinde dış tüp malzemesinin karbon fiber destekli kompozit tüp olduğu gözlemlenmiştir. En düşük puana sahip modellerde ise dış tüp ve iç tüp kalınlığının 1 mm ve iç dolgunun dolu olduğu modeller olduğu gözlemlenmiştir. En düşük tepe ezilme değerine sahip modellerde dış tüp malzemesinin alüminyum olduğu, dış dolgunun dolu, dış tüp çapının 80 mm ve dış tüp kalınlığının 1 mm olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hibrit çarpışma kutuları, Enerji sönümleyici yapılar, TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemi.



## **ABSTRACT**

Master of Science

### **INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE ENERGY ABSORPTION CAPACITIES OF HONEYCOMB FILLED HYBRID STRUCTURES**

Can KAYA

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

Supervisor: Prof. Dr. Erdem ACAR

Date: August 2023

Energy absorbing structures are crucial structural elements utilized in various industries. In the automotive sector, energy absorbing structures ensure the safety of drivers and passengers within vehicles. Crash boxes are tasked with dampening the impact energy. Crash boxes are expected to be lightweight yet possess high strength. In this thesis, the crash performance of honeycomb-filled hybrid energy absorbing structures will be numerically determined. Due to the presence of different geometric and structural levels in the experimental design, the Taguchi experimental design has been employed. Following the 36 experimental designs, the TOPSIS method, a multi-criteria decision-making approach, will be utilized to achieve the optimal design. Material cards for the analysis models have been prepared through literature validation. The analysis model contained a significant number of contacts and elements, leading to a lengthy analysis solution process. To address this issue, a mass scaling study was conducted. A 10% weight increase reduced the analysis time by half. The appropriate analysis model was developed using the Python programming language and the TOPSIS code. Upon examining the obtained results, the model with the highest energy absorbing capacity has the highest TOPSIS score. The model with the highest score exhibits 22% greater energy dissipation capacity compared to an empty aluminum tube. Upon analyzing models with the highest TOPSIS scores, it was

observed that the external tube material is carbon fiber-reinforced composite. Models with the lowest scores have an external and internal tube thickness of 1 mm, with a solid internal fill. Models with the lowest peak crushing values feature an aluminum external tube material, solid external fill, 80 mm external tube diameter, and 1 mm external tube thickness.

**Keywords:** Hybrid crash box, Energy absorption structures, TOPSIS multi-criteria decisioning method.





## TEŐEKKÖR

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 aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.





## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<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 Çarpışma Kutuları Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	3
2.3 Kompozit Çarpışma Kutuları Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	7
2.4 Bal Peteği Dolgulu Çarpışma Kutuları Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	10
2.5 Hibrit Çarpışma Kutuları Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	12
2.6 Çarpışma Kutuları Performans Göstergeleri .....	14
<b>3. HİBRİT ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ YAPI</b> .....	<b>17</b>
3.1 Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri .....	17
3.2 Deney Tasarımının Oluşturulması .....	19
<b>4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>21</b>
4.1 Katı Model Çalışmaları .....	22
4.2 Malzeme Doğrulaması .....	23
4.3 Sonlu Elemanlar Ağ Yapıları .....	32
4.4 Nümerik Analiz Modeli .....	35
4.5 Analiz Sonuçları .....	39
<b>5. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME</b> .....	<b>43</b>
5.1 Problem Tanımı .....	43
5.2 TOPSIS Yöntemi .....	43
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>49</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>63</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Çarpışma kutularının araç içerisindeki konumları.....	3
Şekil 2.2: Çok Hücreli Yapı Analiz Modeli.....	4
Şekil 2.3: Altıgen Enerji Sönümleyici Yapıların Katlanma Şekilleri .....	5
Şekil 2.4: Çentikli Alüminyum Kare Profil Numuneleri .....	6
Şekil 2.5: Çeşitli Yüzey Paternine Sahip Alüminyum Numuneler .....	6
Şekil 2.6: Origami Yapılı CFRP Çarpışma Kutuları: Temal (a),.....	7
Şekil 2.7: Deneysel Gerçekleştirilen Kompozit Tüpler: Düz Zemin (a),.....	8
Şekil 2.8: Sonlu Eleman Analiz Modelleri: 20 Yüzey (a) ve 24 Yüzey (b).....	9
Şekil 2.9: Deneysel ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması.....	10
Şekil 2.10: Bal Peteği Yapısının Deformasyon Modları.....	11
Şekil 2.11: 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Modeli .....	11
Şekil 2.12: Bal Peteği Yapısı: Deney Düzeneği (a), Farklı Açılarda (b).....	12
Şekil 2.13: Bal Peteği Dolgulu Hibrit Yapının Sonlu Elemanlar Modeli .....	13
Şekil 2.14: Bal Peteği Dolgulu Hibrit Yapı .....	13
Şekil 2.15: Hibrit Yapı Analiz Modeli .....	14
Şekil 2.16: Kuvvet - Yer Değiştirme Grafiği .....	15
Şekil 3.1: Örnek Hibrit Enerji Sönümleyici Yapı .....	17
Şekil 4.1: Örnek Hibrit Enerji Sönümleyici Katı Modeli .....	22
Şekil 4.2: Deneysel ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması.....	23
Şekil 4.3: Karbon Fiber Destekli Kompozit Yapı a) Analiz Modeli b) Tetik Yapısı ...	24
Şekil 4.5: Makale ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması.....	26
Şekil 4.5: Doğrulama Çalışması a) Deney Çalışması b) Analiz Modeli.....	27
Şekil 4.6: Doğrulama Çalışması a) Analiz Modeli b) Eksenel Görüntü. ....	27
Şekil 4.7: Alüminyum Tüp Makale ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması.....	28
Şekil 4.8: Hiyerarşik Bal Peteği Yapısı.....	29
Şekil 4.9: Bal Peteği Yapısı Analiz Modeli a) İzometrik b) Eksenel Görüntü. ....	30
Şekil 4.10: Bal Peteği Yapısı Alüminyum Gerilme Gerinim Grafiği. ....	31
Şekil 4.11: Bal Peteği Yapısı Makale ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması....	31
Şekil 4.12: Alüminyum Tüp Eleman Boyutu Çalışması.....	32
Şekil 4.12: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp Eleman Boyutu Çalışması. ....	33
Şekil 4.14: Bal Peteği Eleman Boyutu Çalışması .....	34
Şekil 4.15: SECTION_SHELL Kartı a) Alüminyum b-c) Bal Peteği Yapısı .....	35
Şekil 4.16: PART_COMPOSITE Kartı .....	36
Şekil 4.17: Örnek Temas Algoritması.....	37
Şekil 4.18: Temas Algoritmaları .....	37
Şekil 4.19: Temas Algoritmaları .....	38
Şekil 4.20: Al-D-Al-D-Ç100-t1 Analiz Sonuçları: Eksenel (a), İzometrik (b) Görünüm .....	39
Şekil 4.21: Al-D-C-B-Ç100-t1 Analiz Sonuçları: Eksenel (a), İzometrik (b) Görünüm .....	39
Şekil 4.22: Al-B-Al-B-Ç90-t1,5 Analiz Sonuçları: Eksenel (a), İzometrik (b) Görünüm .....	40

Şekil 4.23: C-B-A1-D-Ç100-t1,5 Analiz Sonuçları: Eksenel (a), İzometrik (b)  
Görünüm..... 40



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 1.1: Yanıt Yüzey Metodu ve Kriging vekil modellerinin çapraz doğrulama hata oranları.....	1
Çizelge 3.1: Taguchi Deney Tasarımı.....	19
Çizelge 4.1: Rijit Plaka için Malzeme Özellikleri .....	25
Çizelge 4.2: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp için Malzeme Özellikleri .....	25
Çizelge 4.3: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp için Malzeme Özellikleri .....	25
Çizelge 4.4: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp Doğrulama Çalışması Sonuçları	26
Çizelge 4.5: Alüminyum Gerçek Gerilme Efektif Plastik Gerinim Değerleri [28].	28
Çizelge 4.6: Alüminyum Tüp Doğrulama Çalışması Sonuçları .....	29
Çizelge 4.7: Alüminyum Tüp Doğrulama Çalışması Sonuçları .....	32
Çizelge 4.8: Alüminyum Tüp Eleman Yakınsaması Çalışması Sonuçları.....	33
Çizelge 4.9: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp Eleman Yakınsaması Çalışması Sonuçları .....	34
Çizelge 4.10: Bal Peteği Yapısı Eleman Yakınsaması Çalışması Sonuçları .....	34
Çizelge 4.11: Kütle Ölçeklendirme Analiz Sonuçları.....	38
Çizelge 4.12: Kütle Ölçeklendirme Analiz Süreleri Sonuçları .....	39
Çizelge 4.13: Analiz Sonuçları .....	41
Çizelge 5.1: TOPSIS Yöntemi Parametre Ağırlıkları .....	44
Çizelge 5.2: En İyi 5 TOPSIS Sonucu .....	44
Çizelge 5.2: En Kötü 5 TOPSIS Sonucu.....	44
Çizelge 6.1: En Yüksek 5 SEA Modeli.....	45
Çizelge 6.2: En Düşük 5 PCF Modeli.....	46





## KISALTMALAR

<b>EA</b>	: Energy Absorption
<b>CFE</b>	: Crash Force Efficiency
<b>CFRP</b>	: Carbon Fiber Reinforced Polymer
<b>GFRP</b>	: Glass Fiber Reinforced Polymer
<b>NHTSA</b>	: National Highway Traffic Safety Administration
<b>PCF</b>	: Peak Crushing Force
<b>SCS</b>	: Spesific Crushing Stress
<b>SEA</b>	: Specific Energy Absorbing Capacity
<b>TOPSIS</b>	: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$E_T$	Toplam sönmömlenen enerji
$F_{ort}$	Ortalama deformasyon kuvveti
$F_{maks}$	Maksimum deformasyon kuvveti
$x_{ij}$	Performans değerleri
$n_{ij}$	Normalize edilmiş karar matrisleri
$E_j$	Entropi değeri
$V_{ij}$	Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisleri
$E_a$	Fiber yönünde elastik modöl
$E_b$	Fiber yönüne dik elastik modöl
$G_{ab}$	Ab ekseninde kesme modölü
$v_{ba}$	Minor Poisson oranı
$X_t$	Fiber yönünde dik çekme mukavemeti
$X_c$	Fiber yönünde dik basma mukavemeti
$Y_t$	Kesme yönünde çekme mukavemeti
$Y_c$	Kesme yönünde basma mukavemeti
$S_c$	Ab ekseninde kesme mukavemeti
$S_b$	Katmanlar arası kesme mukavemeti
$\sigma_{aa}$	Kompozit malzeme fiber yönünde mukavemeti
$\sigma_{ab}$	Kompozit malzeme kayma yönünde mukavemeti
$\sigma_{bb}$	Kompozit malzeme reçine yönünde mukavemeti
$A$	Kesit Alanı
$\rho$	Yoęunluk
$E$	Elastiklik modölü
$\nu$	Poisson oranı
$\delta$	Deformasyon uzunluğu



## 1. GİRİŞ

Son yıllarda otomotiv sektörüne olan ilginin hızla artması, artan trafik kazalarıyla doğrudan ilişkilendirilebilir. Hızla büyüyen nüfus, artan araç sayısı ve yoğunlaşan şehirleşme gibi faktörler, trafiğin karmaşıklığını ve riskini artırmaktadır. Bu durum, güvenli sürüşün ve çarpışmaların önlenmesinin ne kadar önemli olduğunu bir kez daha vurgulamaktadır. Amerikan Ulusal Karayolu Trafiki İdaresi (NHTSA) verilerine göre 2012 yılı içerisinde 33782 kişi hayatını kaybetmiştir. 2022 senesinde ise bu sayı %26'lık artış göstererek 42795 kişi olmaktadır. Çizelge 1.1'de 2011- 2012 Yılları arasında Amerika'da gerçekleşen ölümlü trafik kaza istatistikleri gösterilmektedir [Url-1].

Çizelge 1.1: Yanıt Yüzey Metodu ve Kriging vekil modellerinin çapraz doğrulama hata oranları.

Yıl	1.Yarı (Ocak- Haziran)	2.Yarı (Temmuz- Aralık)	Toplam (Tüm Sene)
2011	14953	17526	32479
2012	16133	17649	33782
2013	15373	17520	32893
2014	15035	17709	32744
2015	16193	19291	35484
2016	17717	20089	37806
2017	17761	19712	37473
2018	17526	19309	36835
2019	17025	19330	36355
2020	17065	21942	39007
2021	19988	22951	42939
2022	20190	22605	42795

Gelişen teknoloji ve artan mobilite ihtiyacıyla birlikte, otomobil üreticileri sürücü ve yolcu güvenliğini en üst düzeye çıkarmak için sürekli olarak yeni yöntemler ve teknolojiler araştırmaktadır. Bu çabaların sonucunda, çarpışma anında yaşanan yaralanmaları minimize etmek ve hayat kurtarmak için pasif güvenlik sistemleri

önemli bir rol oynadığını gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, çarpışma kutuları (veya çarpma bölmeleri), modern otomobillerin tasarımında kritik bir bileşen haline gelmiştir. Çarpışma kutuları, aracın ön bölümünde yer alan özel tasarımı parçalarıdır. Bir çarpışma durumunda, açığa çıkan enerjinin yönetilmesi ve dağıtılması için tasarlanmışlardır. Bu sayede, çarpışmanın etkisi azaltılarak, araç içindeki yolcuların güvenliği sağlanmaktadır. Bu sistemler, araç içerisindeki yolcuların korunmasına odaklanmaktadır. Çarpışma anında araç içerisinde bulunanların güvenliğinden sorumlu pasif güvenlik sistemlerinden biri de çarpışma kutularıdır. Çarpışma kutuları önden çarpışma durumlarında oldukça önem taşıyan bir yapıdır. Çarpışma anında açığa çıkan enerjinin sönmülmesini sağlar. Ucuz ve yüksek dayanıma sahip olması beklendiği gibi aynı zamanda hafif olmalıdır.

## **1.1 Tezin Amacı**

Bal peteği dolgulu yapılara ilgi gittikçe artmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, bal peteği dolgulu hibrit yapıların sanki-durağan (İng. quasi-static) aksel yüklemeye altındaki enerji sönmülleme kapasiteleri nümerik olarak incelenecektir. Elde edilen sonuçlar incelenerek, çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS yöntemi kullanarak ilgilenilen kriterlere göre en uygun tasarım bulunacaktır.

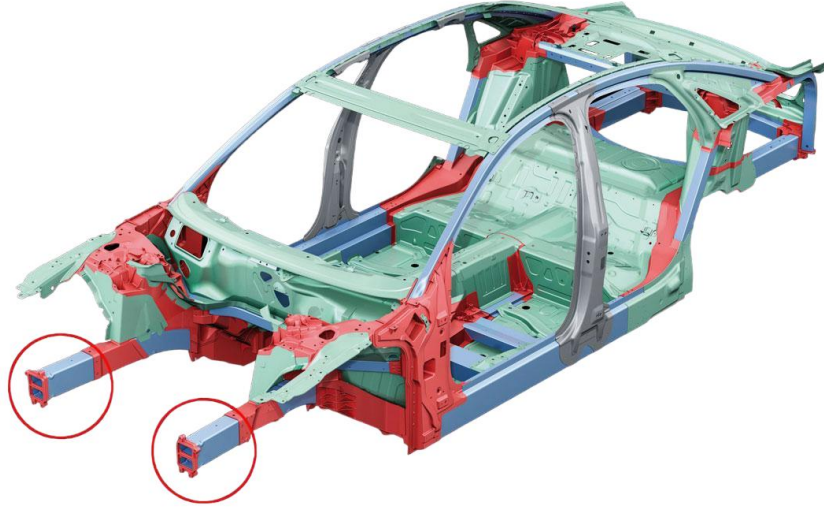
## **1.2 Tezin İçeriği**

Tez çalışması kapsamında ilk bölümde giriş, tezin amacı ve tezin içeriği aktarılmıştır. İkinci bölümde enerji sönmülleyici profiller ile ilgili yapılan çeşitli literatür çalışmaları aktarılmaktadır. Farklı malzeme, geometri ve kombinasyonları ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Üçüncü bölümde hibrit enerji sönmülleyici yapı, çok kriterli karar verme yöntemleri ve deney tasarımı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde hibrit enerji sönmülleyici yapılar için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi çalışması aktarılmıştır. Sırasıyla katı model hazırlanması, malzeme doğrulaması, sonlu elemanlar ağ yapısı ve analiz sonuçları aktarılmıştır. Beşinci bölümde çok kriterli karar verme yöntemi çalışması aktarılmıştır. Son bölüm olan altıncı bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar aktarılarak tez çalışması sonlanmaktadır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1 Enerji Sönümleyici Profiller

Çarpışma Kutusu, otomobillerin tasarım sürecinde düşünülmesi gereken önemli bir pasif güvenlik bileşenidir. Çarpışma Kutusu, özellikle çarpma anında aracın enerjisini emerek ve dağıtarak, yolcuların zarar görmesini en aza indirmeyi hedefler. Araçların ön bölgesinde bulunan çarpışma kutusu, motor bölmesi ile yolcu bölmesi arasında yer alır. Çarpışma anında ortaya deformasyon enerjisini dağıtarak yolcuların korunmasını sağlar. Yolcu güvenliğinin artırılabilmesi adına literatürde çarpışma kutuları ile ilgili çeşitli alanlarda çalışmalar bulunmaktadır. Şekil 2.1 ile otomobillerde bulunan çarpışma kutularının konumları gösterilmektedir.

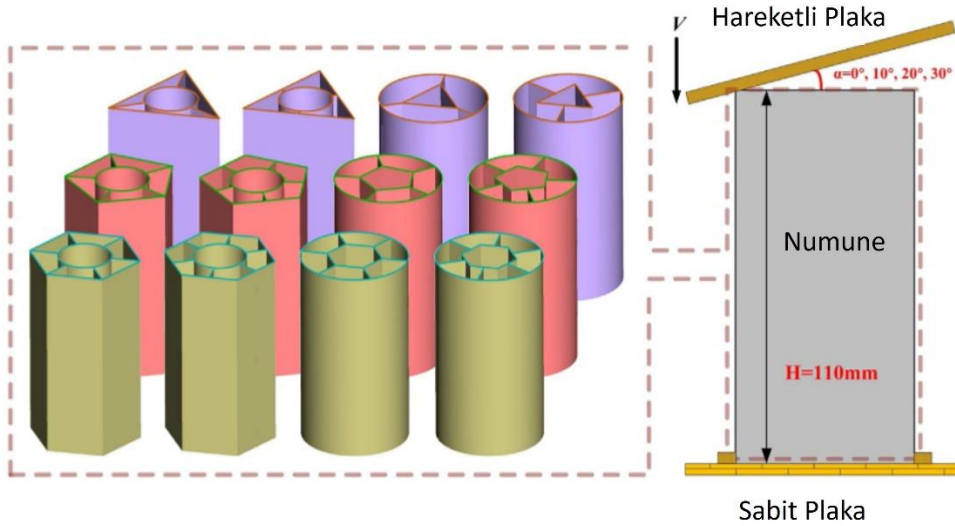


Şekil 2.1: Çarpışma kutularının araç içerisindeki konumları [Url-2].

### 2.2 Metal Çarpışma Kutuları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Zhang vd. [3], çok hücreli hibrit yapıları, (İng. HMSs) dairesel ve çokgen kesitli tüplerle birleştirerek bunların enerji sönümleme kapasitelerini birden çok yükleme koşulu altında deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çok hücreli hibrit yapıların, 10° eğik basma testi durumunda kararlı bir katlanma davranışı göstermekle birlikte

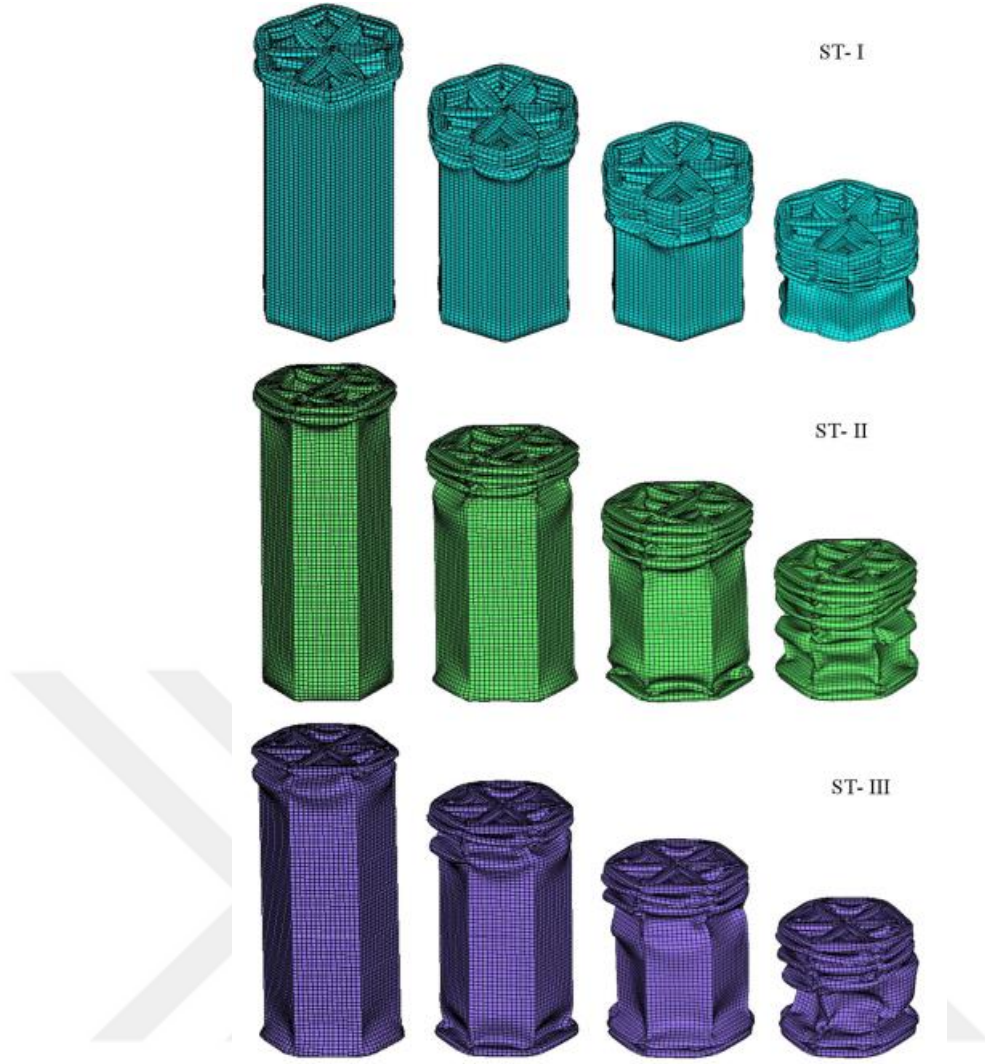
daha yüksek enerji sönümlendiğini bulmuşlardır. Nümerik analiz sonucunda, dışı dairesel olan HMS yapıların dışı çokgen olan HMS yapılara göre daha kararlı bir kuvvet-yer değiştirme eğrisine sahip olduğunu görmüşlerdir. Dışı dairesel içi altıgen kesitli ve yanlardan güçlendirilmiş (İng. CHM) enerji sönümleyici profil, orijinal enerji sönümleyici profile göre,  $0^\circ$  ve  $15^\circ$  açılı basma durumunda sırasıyla %26,6 ve %15,9 daha çok enerji sönümlendiğini saptamışlardır. Şekil 2.2 ile çok hücreli yapıların analiz modeli gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Çok Hücreli Yapı Analiz Modeli [1].

Thien vd. [2], çok hücreli altıgen enerji sönümleyici profiller üzerinde delikler açarak en yüksek ezilme kuvvetini düşürmeyi ve enerji sönümlene kapasitesine arttırmayı hedeflemişlerdir. Kenardan kenara (İng. WTW) ve köşeden köşeye (İng. CTC) bağlantılar kurarak üç farklı konfigürasyon oluşturmuşlardır. Delikli ve deliksiz enerji sönümleyici profillerin çarpışmaya karşı kabiliyetlerini belirlemişler ve karşılaştırmışlardır. Yanıt yüzey yöntemi ve çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu teknikleri kullanılarak en iyileme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, delikli tüplerin standart tüplere karşın daha az enerji sönümlene kapasitesine sahip olduğunu saptamışlardır ve tatmin edici seviyede en yüksek tepe kuvvetinin azalmadığını görmüşlerdir. Altıgen enerji sönümleyici yapıların katlanma şekilleri Şekil 2.3 ile gösterilmektedir.





Şekil 2.3: Altıgen Enerji Sönümleyici Yapıların Katlanma Şekilleri [2].

Katelko vd. [3], aksenal darbe yüklemesine maruz kalmış dört köşesi çentikli alüminyum kare kesitli profillerin çarpışmaya karşı dayanıklılığını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Nümerik modelde Abaqus yazılımını kullanmışlardır. Biri hareketli diğeri hareketsiz olan rijit bariyerleri enerji sönümleyici profillerin altına ve üstüne yerleştirerek ezilme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar ile nümerik çalışmaların hem nitelik hem nicelik olarak tatmin edici seviyede olduğunu görmüşlerdir. En derin çentik tasarımı için çarpışma kuvveti verimini %28 arttırdığını, en yüksek ezilme kuvvetini %30 düşürdüğünü saptamışlardır. Çentik yapısına sahip alüminyum kare profil numuneleri Şekil 2.4 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Çentikli Alüminyum Kare Profil Numuneleri [3].

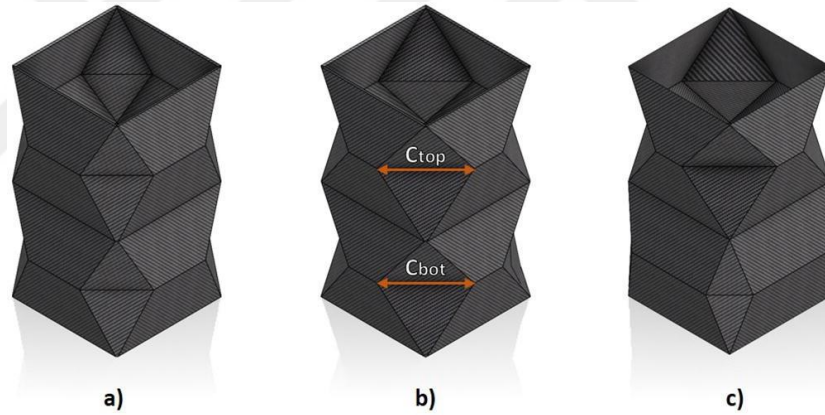
Ufodike vd. [4], ince cidarlı ve eşkenar dörtgen yıldız tipte oluklu, alüminyum 6061-T6 malzemedan üretilmiş dairesel tüplerin çarpışma performansını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Sekiz tane eşkenar dörtgen oluşan, dört dikey ve iki yatay bölgeyi 4h2v şeklinde isimlendirmiştir. 4h2v tasarımında, spesifik enerji sönümlene kapasitesinde ve çarpışma kuvveti veriminde sırasıyla %31 ve %34,5 artış meydana geldiğini görmüşlerdir. Oluklu tasarımların ilk ezilme deformasyon kuvvetini yüksek oranda etkilediğini fakat ardışık katlanma üzerinde sınırlı etkiye sahip olduğunu saptamışlardır. Çeşitli yüzey şekline sahip Alüminyum numuneler Şekil 2.5 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Çeşitli Yüzey Paternine Sahip Alüminyum Numuneler [4].

### 2.3 Kompozit Çarpışma Kutuları Üzerine Yapılan Çalışmalar

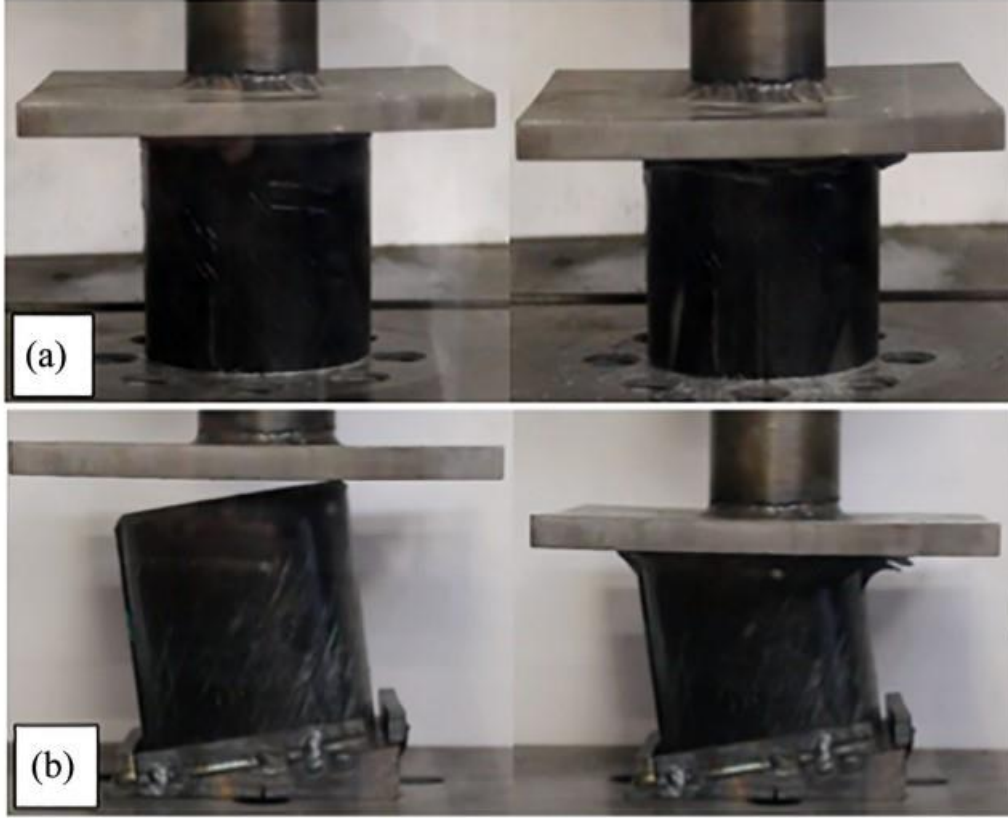
Ciampaglia vd. [5], origami geometrisine sahip enerji sönümleyici profillerin aksel yük altında deformasyon davranışlarını incelemiş ve standart kare profilli enerji sönümleyiciler ile karşılaştırmışlardır. Origami profillerin malzemesini CFRP kompozit olarak seçmişlerdir. Çalışmada origami profillerin orta kısmında yer alan üçgenel yapının ölçülerini değiştirerek en ideal geometriyi bulunmaya çalışmışlardır. Çalışma nümerik ve deneysel olarak iki kısımda ele alınmıştır. Nümerik analizler sonucunda profillerin maksimum deformasyon kuvveti ve toplam enerji sönümleme miktarlarına bakılarak optimum geometriye sahip enerji sönümleyici profilleri belirlemişlerdir. Belirlenen profiller daha sonra üretmiş ve deneysel çalışmalar ile nümerik çalışmaların sonuçları doğrulamışlardır. Sonuç olarak origami geometriye sahip enerji sönümleyici profillerin standart enerji sönümleyicilere göre maksimum deformasyon kuvvetini %50 azaltmış, toplam enerji sönümleme miktarını %30 arttırmışlardır. Şekil 2.6 ile origami yapılı CFRP çarpışma kutuları gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Origami Yapılı CFRP Çarpışma Kutuları: Temal (a), Asimetrik (b-c) [5].

Rabiee vd. [6], çarpışma performansını artırmak için eğik yüklemeler altında kompozit boru şeklindeki yapıların enerji sönümleme kapasitelerini etkileyen parametreler üzerinde deneysel ve nümerik çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında profil malzemesi olarak glass/epoxy kompozit kullanılmıştır. Eğik çarpma açıları 5°, 10°, 20° ve 30° olarak seçmiştir. Sonuçlarda, çarpma açılarının artırılmasıyla, test edilen tüm kesitlerin enerji sönümleme kapasitelerinin azaldığını belirlemişlerdir. Tasarım açısından bu durumun nedeninin yüklemeye sonunda bükülme ve kesme kuvvetinin kombinasyonlarının malzemeye uygulandığı tespit edildikten sonra iyileştirmeleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, iyileştirilmiş modelin eğik yüklemeye

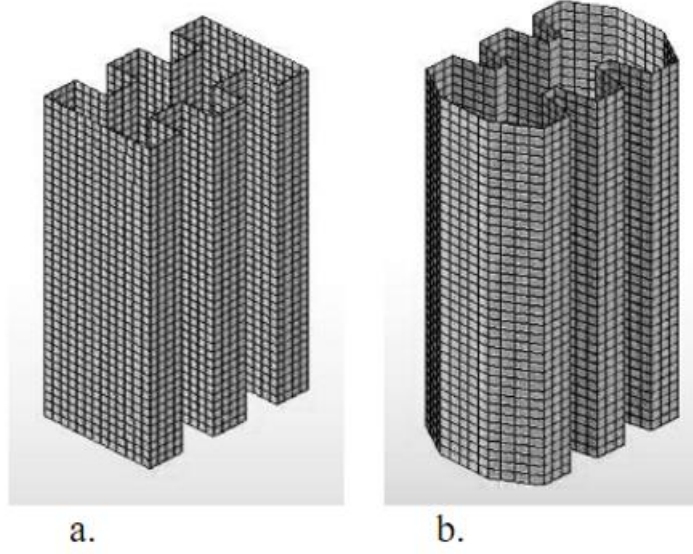
altında aynı eksenel açı için spesifik enerji sönümlenme kapasitesinin %50 arttığını belirlemişlerdir. Şekil 2.7 ile kompozit tüplerin düz ve eğik zeminde gerçekleştirilmiş testleri gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Deneyleri Gerçekleştirilen Kompozit Tüpler: Düz Zemin (a), 5° Eğik Zemin (b) [6].

Dawood vd. [7], Ls-Dyna yazılımını kullanarak kompozit malzemeye sahip tüplerinin sonlu elemanlar yöntemi ile enerji sönümlenme kapasitelerini gözlemlemeyi hedeflemişlerdir. Analiz edilen tasarımların geometrik yapısı girintilere sahiptir. Girinti derinliği, düzlem genişliği, duvar kalınlığı ve malzeme özelliklerinin etkilerini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarını Shetty [8] tarafından yapılan benzer bir çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırmışlar ve sonuçların tutarlı olduğunu belirtmişlerdir. Tüplerin et kalınlığının en fazla olduğu durum ile en az olduğu durumu karşılaştırmışlar ve duvar kalınlığının maksimum olduğunda enerji sönümlenme kapasitesinin %15 arttığını belirlemişlerdir. Girinti derinliği en kalın ve en ince model arasında da enerji sönümlenme özelliğinin derinlik arttıkça %5 arttığını tespit

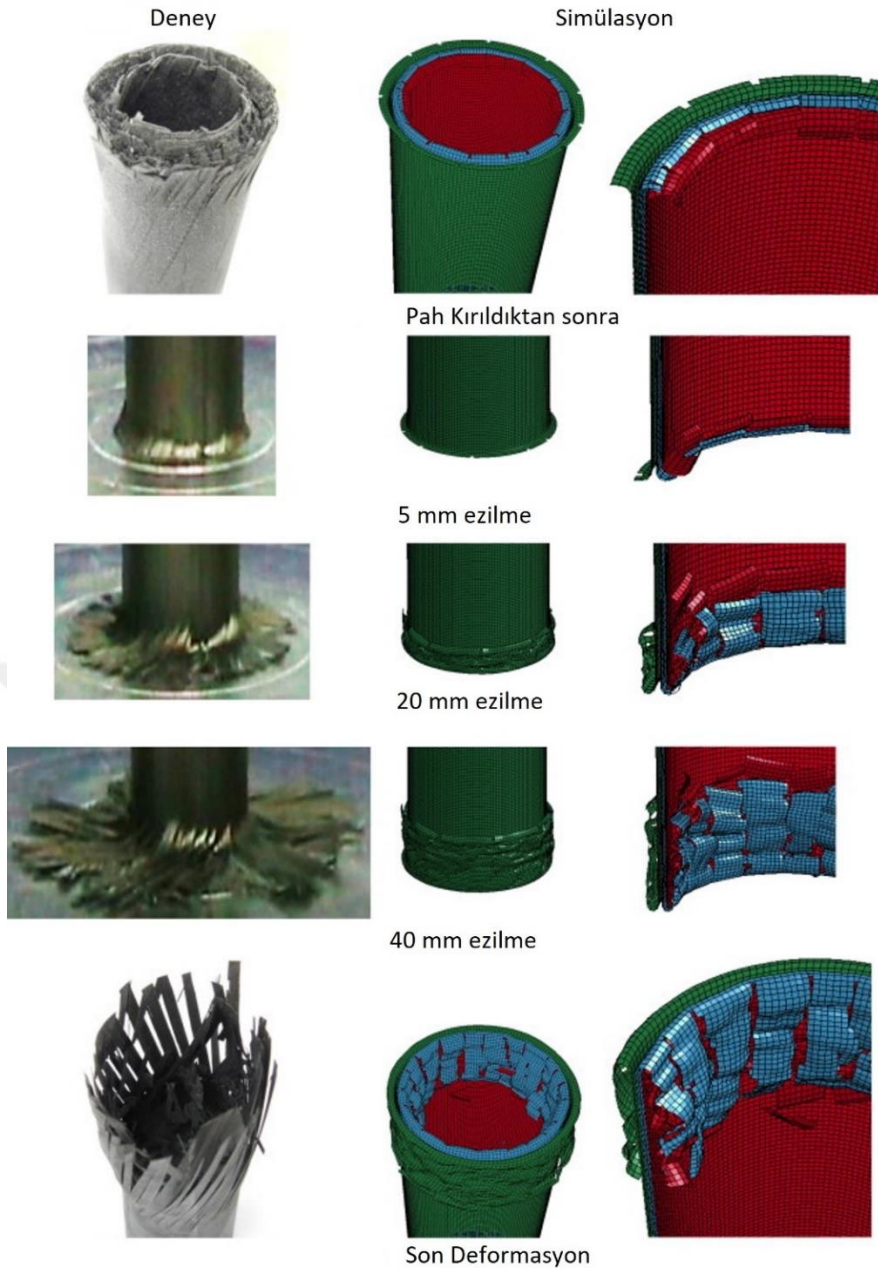
etmişlerdir. Şekil 2.8 ile çalışma kapsamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz modelleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Sonlu Eleman Analiz Modelleri: 20 Yüzey (a) ve 24 Yüzey (b) [7]

Siromani vd. [9], CFRP malzeme yapısı kullanan dairesel kesitte tüplerin çarpışma davranışını ve enerji sönümlene kapasitesini sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Pahlı ve düz olmak üzere iki farklı model kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda düz kesitli tüplerin pahlı tüplere kıyasla %40 daha fazla spesifik enerji sönümlene kapasitesine ve %16 daha fazla maksimum ezilme kuvvetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçları Şekil 2.9 ile gösterilmektedir.





Şekil 2.9: Deneysel ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması [9]

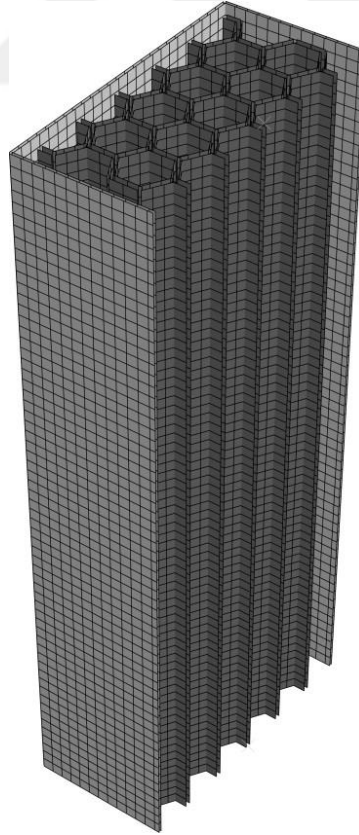
## 2.4 Bal Peteği Dolgulu Çarpışma Kutuları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Meran vd. [10], alüminyum malzemeden oluşan bal peteği yapılarının çarpışmaya karşı dayanıklılık performansını deneysel, nümerik ve teorik olarak incelemiştir. Tasarım parametreleri olarak et kalınlığı, hücre duvar boyu, hücre genişleme açısı ve darbe hızını almışlardır. Çalışmada küçük hücre duvarı yapısı ve ince cidar kalınlığına sahip bal peteği yapılarının daha iyi performans gösterdiğini saptamışlardır. Şekil 2.10 ile bal peteği yapısının deformasyon modları gösterilmektedir.



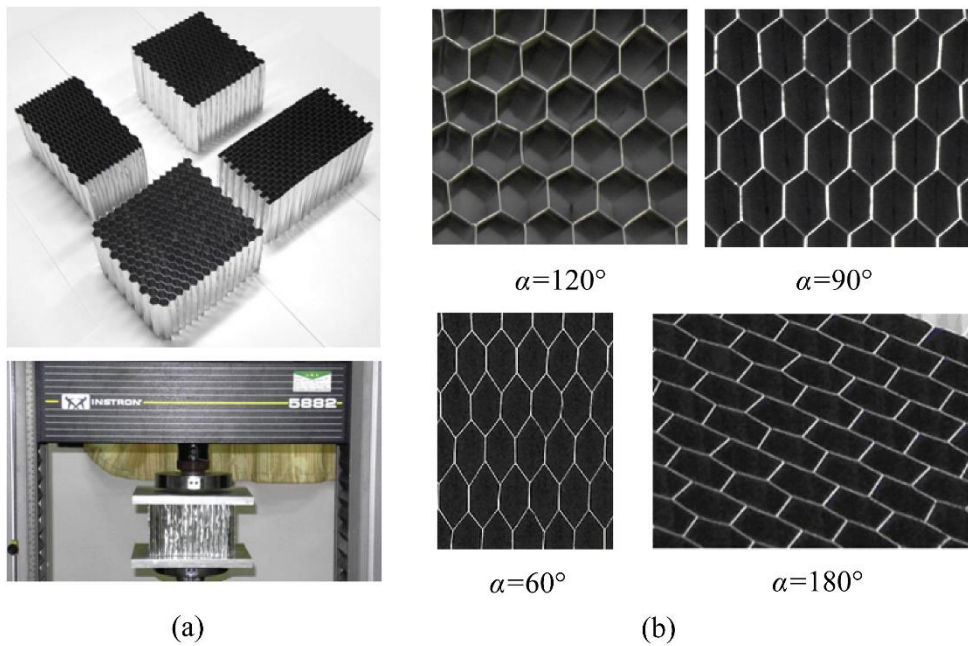
Şekil 2.10: Bal Peteği Yapısının Deformasyon Modları [10].

Paz vd. [13], kare kesitli içi boş çelik tüpün içerisine cam fiber ile güçlendirilmiş poliamidden üretilen bal peteği yapılarını yerleştirerek hibrit tasarımın enerji sönümlenme kapasitesini nümerik olarak araştırmışlardır. Çelik tüpün kalınlığı, bal peteği kalınlığı, bal peteği hücresinin birim uzunluğu ve bal peteği yapısının yüksekliğini tasarım değişkeni, kütle, enerji sönümlenme kapasitesi ve tepe kuvvetini amaç fonksiyonu olarak belirleyerek, vekil model en iyileme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. İlk tasarıma göre %37 daha düşük tepe kuvveti, %35 daha yüksek spesifik enerji sönümlenme kapasitesi elde etmişlerdir. Çalışma kapsamında kullanılan sonlu elemanlar modeli Şekil 2.11 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.11: 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Modeli [11]

Zhang vd. [12], düzenli hiyerarşik alüminyum bal peteği yapılarının her bir köşesine bir birim eleman ekleyerek birinci ve ikinci seviyede bal peteği yapılarını elde etmişlerdir. Bu yeni tasarımın enerji sönümlenme kapasitesini araştırmak için deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Farklı birim eleman hücrelerinin yerleştirilme düzeninin ezilme mukavemeti ve ezilme kuvveti verimini arttırdığını saptamışlardır. Ek olarak malzeme dağılımı olarak adlandırdıkları hücre kalınlığı ve hücre ölçüsünü değiştirerek enerji sönümlenme kapasitesine katkısını görmek için parametrik çalışmalar yapmışlardır. Hücre sayısının artmasıyla birlikte ezilme kuvveti verimi %66 civarında sabit kalırken, enerji sönümlenme kapasitesi ve ortalama ezilme kuvvetinin arttığını görmüşlerdir. Çalışmada kullanılan bal peteği yapıları ve test düzeneği Şekil 2.12 ile gösterilmektedir.

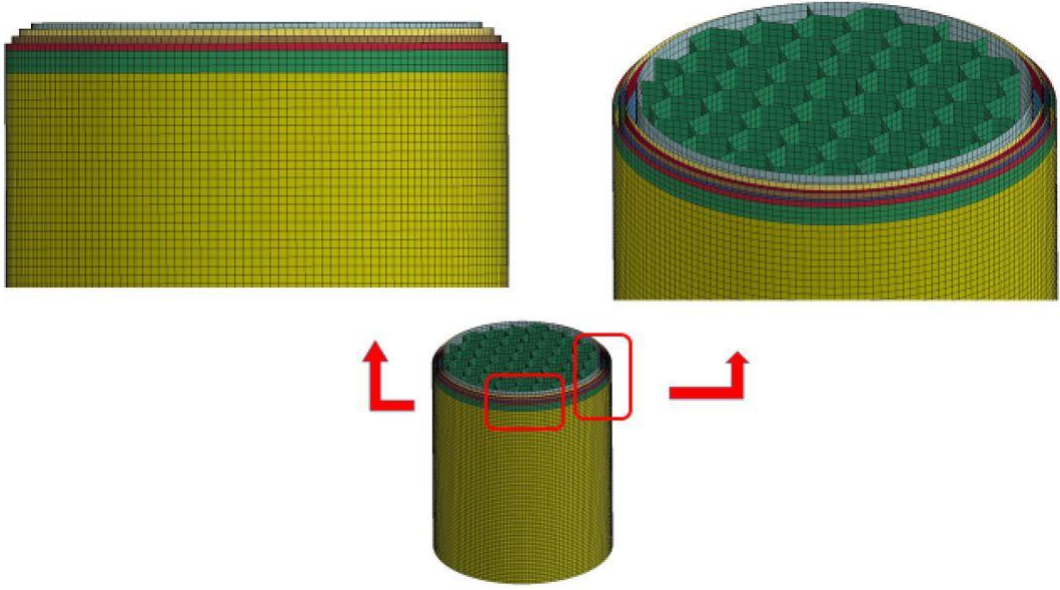


Şekil 2.12: Bal Peteği Yapısı: Deneysel Düzeneği (a), Farklı Açılarda (b) [12].

## 2.5 Hibrit Çarpışma Kutuları Üzerine Yapılan Çalışmalar

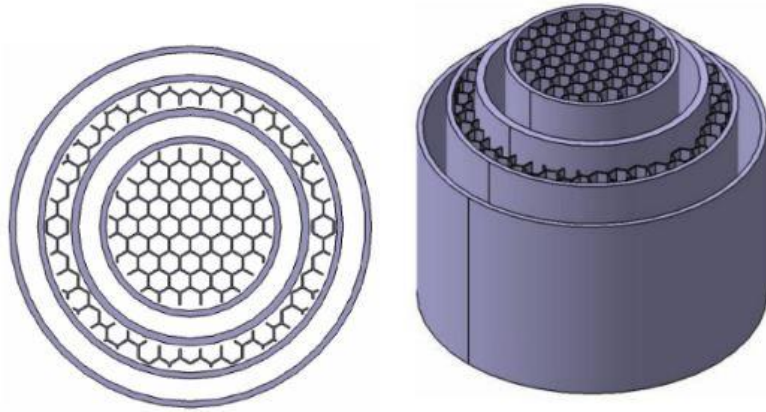
Mert vd. [13], Alüminyum 6082 tüpün etrafına sarılmış GFRP yapısının çarpışma performansını belirlemişlerdir. GFRP/hibrit ve bal peteği dolgulu/hibrit yapılarının çarpışma davranışlarının karşılaştırılabilmesi için yarı statik testler gerçekleştirmişlerdir. Nümerik modeller ve deneysel çalışmaların uyum içinde olduğunu gözlemlemişlerdir. CFE ve SEA değerlerinin boş kompozit tüpe kıyasla sırasıyla %95 ve %29 daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 2.13 ile çalışmada kullanılan sonlu elemanlar analiz modeli gösterilmektedir.





Şekil 2.13: Bal Peteği Dolgulu Hibrit Yapının Sonlu Elemanlar Modeli [13].

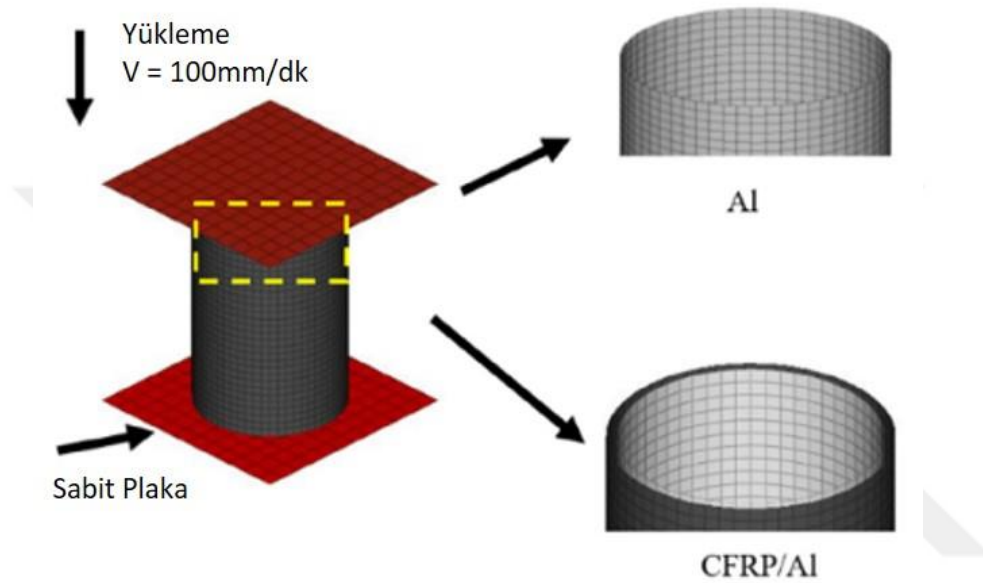
Usta vd. [14], boş ve dolgulu hibrit yapıların deneysel ve nümerik olarak aksenal yük altındaki davranışını incelemiştir. Alüminyum 6063 kullanılan tüplerin içerisine ABSplus plastik modeli ile altıgen bal peteği yapıları yerleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda bal peteği dolgusunun katlanma tipine önemli derecede etki ettiği yönündedir. Dolgulu tüp yapıların, boş yapılara kıyasla daha çok enerji sönümlendiği ve çarpışma kuvveti verimliliğinin daha iyi olduğunu gözlemlemiştir. Şekil 2.14 ile çalışmada kullanılan hibrit yapı gösterilmektedir.



Şekil 2.14: Bal Peteği Dolgulu Hibrit Yapı [14].

Ma vd. [15], Karbon fiber destekli kompozit tüp ve alüminyum tüp kullanarak araçların çarpışma performansını iyileştirmeyi ve ağırlığı azaltmayı hedeflemektedirler. Aksenal yük altında yarı statik testler gerçekleştirmişlerdir.

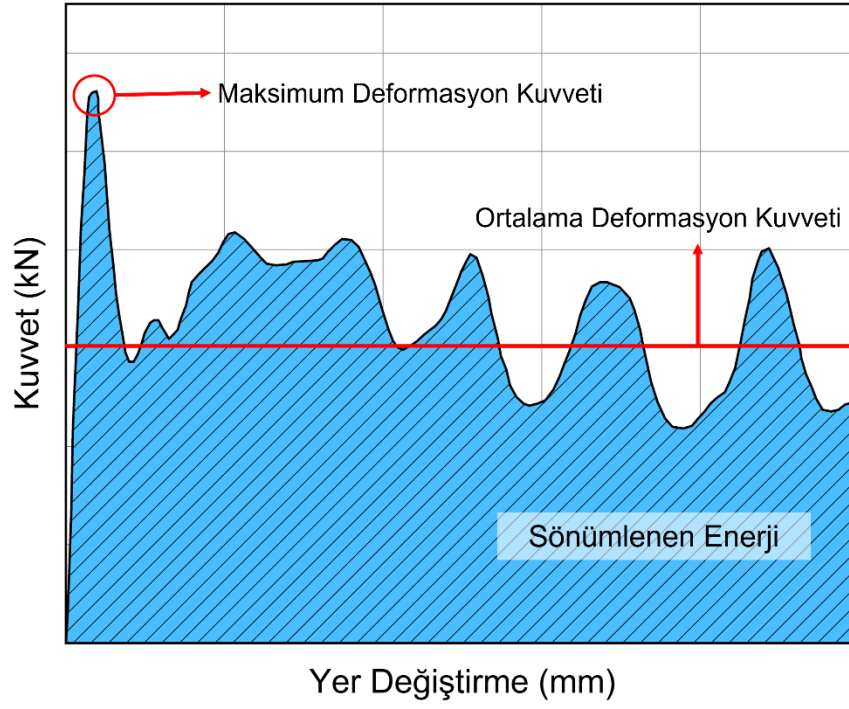
Nümerik analizler ile test çalışmalarının uyum içinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Geometrinin, alüminyum tüp kalınlığının, fiber sarma açısının ve katmanların hibrit yapının çarpışma performansını nasıl etkilediği üzerine çok amaçlı optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Optimum sonucun SEA ve  $F_{ort}$  değerlerinde sırasıyla, %18 ve %46 iyileştirme gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda ağırlık %35,21 azaltılmıştır. Hibrit yapının nümerik çalışma kapsamında hazırlanmış analiz modeli Şekil 2.15 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.15: Hibrit Yapı Analiz Modeli [15].

## 2.6 Çarpışma Kutuları Performans Göstergeleri

Bir yapının çarpışma performansı, çeşitli değerlendirme kriterleri aracılığıyla saptanabilmektedir. Enerji Sönümleyici yapılarda performans göstergesi olarak enerji ve kuvvet tabanlı yöntemler kullanılabilir. Tipik Kuvvet - Yer Değiştirme grafiği Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16: Kuvvet - Yer Değişirme Grafiği

Sönümlenen enerji ( $E_T$ ), kuvvet-yer değişirme grafiğinde altta kalan ile tanımlanmaktadır. Eşitlik (2.1) ile sönümlenen enerjinin hesaplanması gösterilmektedir [16].

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

$F$  ezilme kuvvetini,  $\delta$  ise deformasyon uzunluğunu ifade etmektedir. Spesifik enerji sönümleme kapasitesi, sönümlenen enerjinin kütleyle oranı ile elde edilmektedir. Eşitlik (2.2) ile spesifik enerji sönümleme kapasitesi formülasyonu gösterilmektedir [16].

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

Burada  $m$  enerji sönümleyici profilin kütleini temsil etmektedir. Ortalama ezilme kuvveti, toplam sönümlenen enerjinin deformasyon miktarına bölünmesiyle elde edilmektedir. Eşitlik (2.3)'te bu hesaplama gösterilmektedir [16].

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

Maksimum deformasyon kuvveti (İng. PCF), önden çarpışma durumlarında önem taşıyan bir parametredir. Kuvvet-yer değiştirme grafiğinde elde edilen en yüksek kuvvet değeri anlamına gelmektedir [16].

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

Ezilme kuvveti verimliliği (İng. CFE), ortalama ezilme kuvvetinin, maksimum deformasyon kuvvetine oranlanmasıyla elde edilir. Eşitlik \ref{eq:CFE} ezilme kuvveti verimliliğini göstermektedir [16].

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



### 3. HİBRİT ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ YAPI

Hibrit enerji sönümleyici yapılar çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Literatürde alüminyum, kompozit ve bal peteği ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır ancak çift borulu alüminyum ve karbon fiber kompozit borular arasına yerleştirilmiş bal peteği dolgulu yapılara rastlanmamıştır. Bu çalışmada, içerisi bal peteği yapıları ile doldurulmuş çift borulu hibrit enerji sönümleyici profillerin enerji sönümleme davranışları nümerik olarak incelenecektir. Enerji sönümleyici profil, alüminyum ve karbon fiber kompozit tüp, bal peteği dolgu gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Şekil 3.1’de örnek bal peteği dolgulu hibrit yapının tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Örnek Hibrit Enerji Sönümleyici Yapı

#### 3.1 Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Hibrit enerji sönümleyici yapılar için uygun tasarım çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS metodu ile gerçekleştirilmiştir. Alternatifleri pozitif

ve negatif ideal çözüm olmak üzere iki kategoriye ayırır. Pozitif ideal çözüm, her kriter için maksimum veya minimum değerlere sahip en iyi alternatifken, negatif ideal çözüm, her kriter için minimum veya maksimum değerlere sahip en kötü alternatifleri temsil eder [17]. Kullanım kolaylığı ve sonuçların kolayca yorumlanabilir olmasından dolayı TOPSIS Yöntemi bir çok alanda kullanılabilir [18].

TOPSIS Yönteminde amaç, pozitif ideal çözüme en kısa ve negatif ideal çözüme en uzak mesafeyi hesaplamaktır. TOPSIS Yöntemi kullanılabilmesi için öncelikle karar matrisinin normalizasyonunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Eşitlik (3.1) ile ilgili formülasyon gösterilmektedir [19].

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3.1)$$

Entropi metodu kullanılarak TOPSIS yönteminde kullanılan parametreler için uygulanacak ağırlıklar hesaplanmaktadır. Entropi değeri Eşitlik (3.2) ile ifade edilmektedir [19].

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln (P_{ij}) \quad (3.2)$$

$$k = \frac{1}{\ln (m)} \quad (3.3)$$

$m$  alternatif sayısını belirtmektedir. Her bir kriterin ağırlık hesaplaması Eşitlik (3.4) ile gösterilmektedir [19].

$$d_j = |1 - E_j| \quad (3.4)$$

$$\beta_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (3.5)$$

Normalize edilmiş karar matrisleri, elde edilen ağırlıklar ile çarpılmaktadır. Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi Eşitlik (3.6) ile gösterilmektedir [19].

$$V_{ij} = n_{ij} \beta_j \quad (3.6)$$

Pozitif ideal ve negatif ideal çözümlere uzaklıklar Öklid uzaklık formülü kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlik (3.7) ve Eşitlik (3.8) ile en yakın ve en uzak sonuçların hesaplanması gösterilmektedir [19].

$$V_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (3.7)$$

$$V_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.9) kullanılarak ideal çözüme göre uzaklıklar hesaplanır. Alternatifler arasından karar verilir [19].

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (3.9)$$

### 3.2 Deney Tasarımının Oluşturulması

TOPSIS Metodunun kullanılabilmesi için deney tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı tasarım değişkenleri seviyesi için literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Taguchi Deney Tasarımı kullanıldığı gözlemlenmiştir [20]. Taguchi yöntemi kullanılarak oluşturulan deney tasarımında; farklı malzeme, çap ve kalınlık parametrelerine göre tüp yapıları, doluluk durumuna göre bal peteği yapısı kombinasyonları oluşturulmuştur. Çizelge 3.1'de deney tasarımı oluşturulurken ilgililenilen parametreler gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Taguchi Deney Tasarımı

No.	Malzeme (Dış Tüp)	Malzeme (İç Tüp)	Doluluk Durumu (İç Dolgu)	Doluluk Durumu (Dış Dolgu)	Dış Tüp Çapı (mm)	Dış Tüp Kalınlığı (mm)
Seviye 1	Alüminyum	Alüminyum	Dolu	Dolu	100	2
Seviye 2	CFRP	CFRP	Boş	Boş	90	1,5
Seviye 3	-	-	-	-	80	1

Deney tasarımı oluşturulurken belirli sabitlemeler yapılmıştır. Bal peteği dolgularında duvar uzunluğu 6 mm ve kalınlık olarak 0,075 mm kullanılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Bal Peteği yapılarında hücrelerin temas halinde olduğu kısımlarda iki kat et kalınlığı olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. İlgili durum

incelendiğinde temas halinde olunan bölgelerde et kalınlığı 0,15 mm olmaktadır. Dış Tüp kalınlığı ve İç Tüp kalınlığı eşit kabul edilmiştir. Dış Tüp Çapı İç Tüp çapının iki katı olacağı varsayılmıştır.

Çizelge 3.1 incelendiğinde farklı seviyelerde tasarım parametreleri bulunmaktadır. Bu durumda Taguchi Yönteminde karışık deney tasarımı kullanılmıştır. Taguchi L36 deney tasarımı uygun bulunmuştur. Taguchi Tasarımı veya Taguchi Deney Tasarımı, ürün ve süreçlerin kalitesini artırmak ve istenen sonuçları elde etmek için kullanılan bir deney tasarımı yaklaşımıdır. Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu yöntem, özellikle endüstriyel üretim ve mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Taguchi Deney Tasarımı'nın temel avantajlarından biri, az sayıda deney kullanarak büyük veri setleri toplamak yerine optimize sonuçlara daha hızlı ve etkili bir şekilde ulaşma olanağı sağlamasıdır [21].

Tezin geri kalanında Hibrit yapıların deney tasarımında daha anlaşılabilir olması için kodlanarak kullanılacaktır. Öncelikle dış tüp malzemesi, doluluk durumu, iç tüp malzemesi, doluluk durumu, dış çap ve dış tüp kalınlığı şeklinde ilerlemektedir. Örnek olarak Al-D-C-B-Ç90-t2 kodlaması ile kullanılacaktır. Burada sırasıyla Alüminyum, dolu, karbonfiber destekli kompozit, boş, dış tüp çapı 90 mm ve dış tüp kalınlığı 2 mm olarak ifade edilmektedir.



#### 4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ÇALIŞMALARI

Deney tasarımında belirtilen tasarımların ilgili yükler altında nasıl davranacağı ve enerji sönmleme kapasitesi seviyelerinin belirlenebilmesi açısından sonlu elemanlar analizi kullanılmaktadır. Analiz modellerinin oluşturulabilmesi için öncelikle tasarımların katı modellerinin hazırlanması gerekmektedir. Hazırlanan modeller daha sonra sonlu elemanlar ağı oluşturan yazılımlar sayesinde elemanlarına ayrıştırılmalıdır. Analiz modelinin hazırlanması için malzeme özellikler, kesit (İng. Section) ve sınır koşulları tanımlanmalıdır. Hazırlanan analiz modelleri Ls-Dyna programı kullanılarak çözüm elde edilmektedir.

Ls-Dyna, Livermore Software Technology Corporation (LSTC) tarafından geliştirilen bir sonlu elemanlar analiz (İng. Finite Element Analysis) yazılımıdır. Geniş bir uygulama yelpazesinde genellikle karmaşık fiziksel olayların ve davranışların simülasyonunu gerçekleştirmek için kullanılır. Özellikle nümerik çözüm ve yüksek performanslı hesaplama teknikleriyle, çeşitli endüstrilerde mühendislik analizleri için yaygın olarak tercih edilmektedir. Çarpışma, patlama ve metal şekillendirme gibi çeşitli uygulama alanında kullanılabilir.

Ls-Dyna yazılımında Açık (İng. Explicit) ve Kapalı (İng. Implicit) çözüm yöntemleri kullanılabilir. Açık Yöntem, dinamik olayların hızlı ve karmaşık analizi için kullanılan etkili bir çözüm yöntemidir. Bu yöntemde, sabit bir zaman adımı kullanılarak denklemler doğrudan çözülür ve yapısal davranış anlık güncellemelerle her adımda tahmin edilir. Açık yöntem, çarpışma, çökme ve patlama gibi hızlı deformasyon değişikliklerinin olduğu senaryolarda hızlı ve doğru sonuçlar verir. Bu yöntem, karmaşık temas etkileşimlerini ele alabilme yeteneği sayesinde özellikle çarpışma analizlerinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, açık yöntem, simülasyonun doğruluğunu artırmak için daha küçük zaman adımları kullanarak detaylı sonuçlar elde etmeye olanak tanır. Bununla birlikte, bu yöntemin sayısal kararlılığı, sabit bir zaman adımı gerektiren kapalı yönteme göre daha fazla dikkat gerektirir. Açık yöntemin doğru parametre seçimi ve uygun zaman adımıyla dinamik olayların gerçekçi ve güvenilir bir şekilde simüle edilmesini sağlar [22].

Kapalı Yöntem, yavaş ve nispeten durağan yapıların analizi için tasarlanmış etkili bir simülasyon yaklaşımıdır. Bu yöntemde, değişken zaman adımları kullanılarak denklemler dolaylı olarak çözülür ve sistem durumu her adımda güncellenir. Kapalı yöntem, statik analiz, termal analiz ve yavaş yükleme oranlarına sahip problemlerde mükemmel sonuçlar sunar. Yavaş deformasyon değişikliklerinin olduğu senaryolarda kullanılırken, dinamik olayların hassas analizini gerçekleştirmek için daha büyük zaman adımları kullanma yeteneği sayesinde hesaplama verimliliğini artırır. Kapalı yöntem, sayısal olarak kararlı ve daha büyük zaman adımları kullanabilme avantajıyla dikkat çeker. Bununla birlikte, kapalı yöntem, karmaşık temas ve sürtünme durumlarında daha fazla yaklaşım ve yaklaşım kontrolü gerektirebilir. Kapalı yöntemin uygun parametre seçimi ve zaman adımıyla, yavaş ve istikrarlı değişiklikler gösteren yapıların analizini doğru ve verimli bir şekilde gerçekleştirme kapasitesine sahiptir [22].

#### 4.1 Katı Model Çalışmaları

Deney tasarımında bulunan alternatiflerin katı modelleri Fusion 360 programı kullanılarak hazırlanmıştır. Tüpler ve Bal Peteği yapıları 100 mm uzunluğunda olmaktadır. Bal Peteği yapılarında duvar uzunluğu 6 mm olmaktadır. Hazırlanan katı modeller .step uzantısı ile dışarı aktarılarak sonlu elemanlar ağ yapıları hazırlanması için hazırlanmaktadır. Hazırlanan örnek hibrit enerji sönümleyici katı modeli Şekil 4.1 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Örnek Hibrit Enerji Sönümleyici Katı Modeli

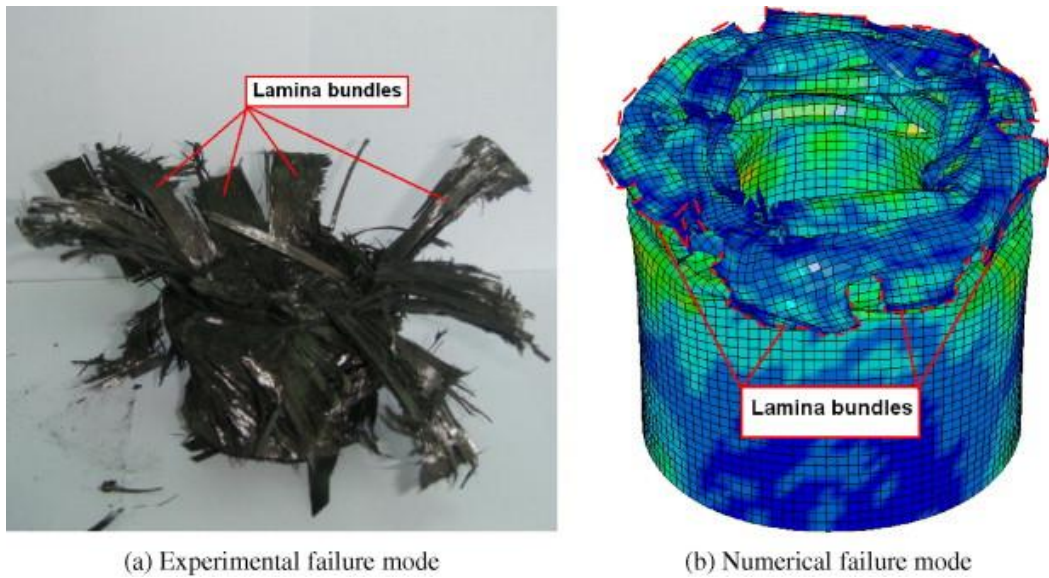
## 4.2 Malzeme Doğrulaması

Sonlu elemanlar analizlerinde en önemli etkenlerden birisi de modelde kullanılan malzeme özellikleridir. Alüminyum, Karbon fiber destekli kompozit tüp ve Bal Peteği konuları ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Doğrulama için uygun makaleler belirlenerek doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Wang vd. [23], karbon destekli güçlendirilmiş plastiklerin (CFRP) aksenal yük altında davranışlarını incelemek için sanki-durağan testler ve nümerik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Nümerik çalışmada iki katmanlı ve trigger yapısının kullanıldığı nümerik modellerde Chang-Chang hasar kriteri kullanılmışlardır. Numunelerin farklı kompozit matriks yapılarına sahip olduğu için çalışmalarında çarpışma performansını özgül çarpışma stresi değerleri üzerine yorumlamışlardır. Özgül çarpışma stresi (SCS) Eşitlik (4.1) ile hesaplanabilmektedir. Eşitlikte yer alan  $\rho$  tüp yoğunluğunu  $A$  kesit alanını ifade etmektedir.

$$SCS = \frac{F_{ort}}{\rho A} \quad (4.1)$$

Test ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında uyum içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Belirtilen makalenin doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2 ile deneysel ve nümerik çalışma sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Deneysel ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması [25]

Doğrulama modelinde kullanılan analiz modeli Şekil 4.3 ile gösterilmektedir. Analiz modelinde rijit hareketli plaka, aksenal yönde ve sabit hızda kompozit tüpe doğru hareket etmektedir. Kompozit tüplerin alt kısmında bulunan rijit sabit plaka 6 dönme yönünde de hareketi kısıtlanmıştır. Kompozit tüpler iki katmanlı kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Her bir katman, yedi farklı serim şekline sahip iterasyon noktasına sahiptir. Tetik mekanizmasında kalınlık yarıya düşmektedir.

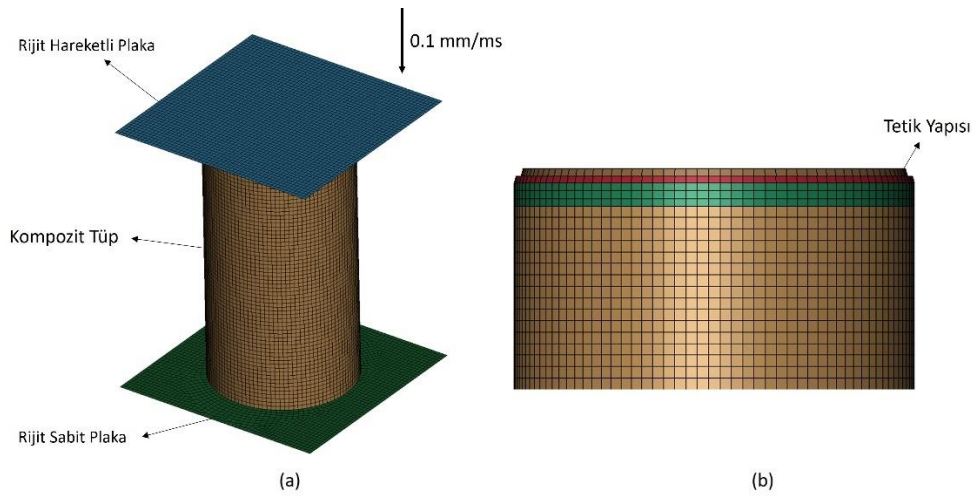
Rijit plakalar \*MAT\_20-RIGID kartı kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan rijit plaka malzeme özellikleri Çizelge 4.1 ile gösterilmektedir. Kompozit tüp \*MAT\_54/55-ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE kartı kullanılarak modellenmiştir. Chang-Chang hasar modeli kullanılmıştır. Chang-Chang hasar modeli sadece kabuk elamanlar için kullanılabilen güçlü bir hasar tespit yöntemidir. Bu kritere göre hasar fiber çekme modunda ( $\sigma_{aa}>0$ ) ise Eşitlik (4.2) ile hesaplanmaktadır[24,25].

$$\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right) + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right) \geq 1 \quad (4.2)$$

Basma modunda ( $\sigma_{aa}<0$ ) Chang-Chang hasar modeli Eşitlik (4.3) ile hesaplanmaktadır.

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_c}\right) + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 \geq 1 \quad (4.3)$$

Çizelge 4.2 ile karbon fiber destekli kompozit tüp için kullanılan malzeme kartı gösterilmektedir.



Şekil 4.3:Karbon Fiber Destekli Kompozit Yapı a)Analiz Modeli b)Tetik Yapısı [23].

Çizelge 4.1: Rijit Plaka için Malzeme Özellikleri

Parametre	Değer
$\rho$	7850 kg/mm <sup>3</sup>
$E$	210 GPa
$\nu$	0,33

Çizelge 4.2: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp için Malzeme Özellikleri

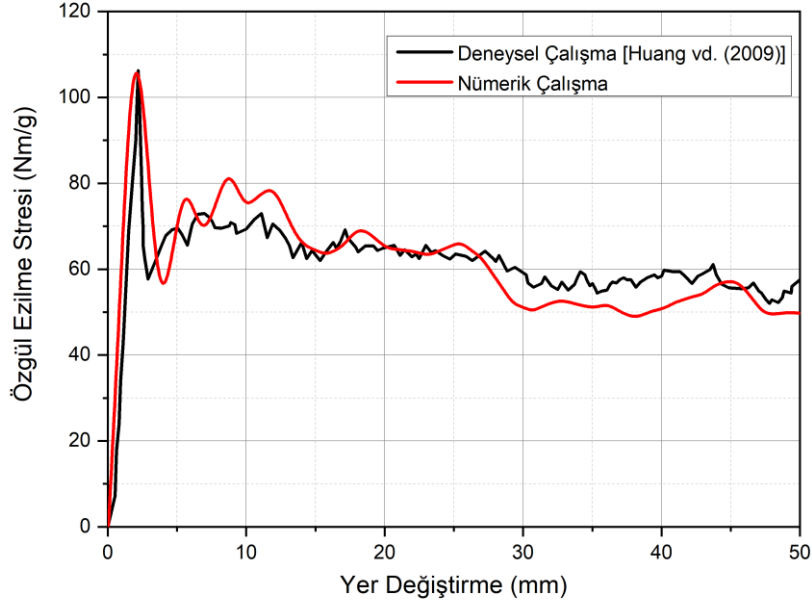
Parametre	Değer
$\rho$	1530 kg/mm <sup>3</sup>
$E_a$	135 GPa
$E_b$	9,12 GPa
$G_{ab}$	5,67 GPa
$\nu_{ba}$	0,021
$X_t$	2326 MPa
$X_c$	1236 MPa
$Y_t$	51 MPa
$Y_c$	209 MPa
$S_c$	87,9 MPa
$S_b$	99,2 MPa

Malzeme kartında kullanılan hasar kriterleri Çizelge 4.3 ile gösterilmektedir.

Çizelge 4.3: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp için Malzeme Özellikleri

Parametre	Değer
ALPH	0
BETA	0
FBRT	1,0
YCFAC	3,0
TFAIL	0,4
SOFT	0,8
EFS	0,95

Karbon fiber destekli kompozit tüpler için yapılan doğrulama çalışması kapsamında elde edilen Özgül Ezilme Stresi - Yer Değiştirme grafiği uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.4 ile makale ve doğrulama sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Çizelge 4.4 incelendiğinde elde edilen spesifik enerji sönmeme kapasitesi sonuçlarının kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.

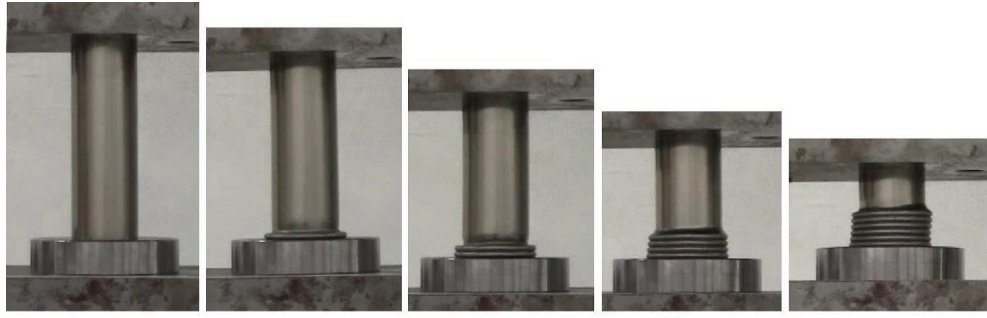


Şekil 4.4: Makale ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması

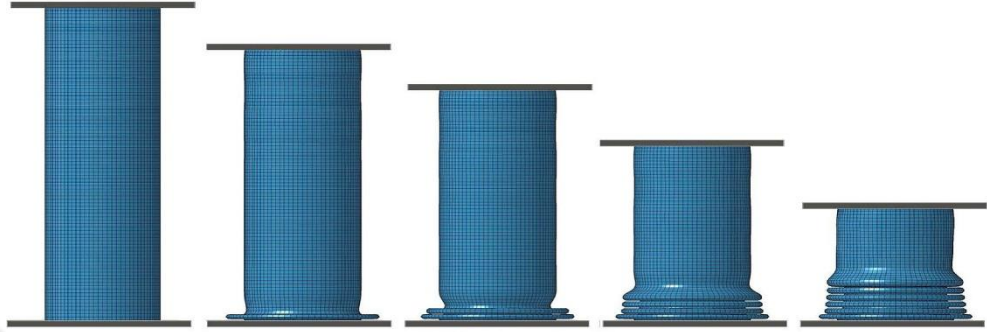
Çizelge 4.4: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp Doğrulama Çalışması Sonuçları

	SEA (J/g)
Makale Sonuçları	61,40
Doğrulama Çalışması	65,47
Hata	%6

Alüminyum Tüp için gerçekleştirilen doğrulama çalışmasında Acar vd.[28] çalışmaları makale değerlendirilmiştir. Acar vd. [26], ince cidarlı Alüminyum 6063 tüpler için çarpışma performansını arttırmak amacıyla çoklu hücre tasarımı kullanmışlardır. Çarpışma performansını spesifik enerji sönmüleme (SEA) ve çarpışma kuvveti verimi (CFE) ile değerlendirmişlerdir. Nümerik analizler ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimizasyon çalışması gerçekleştirerek uygun tasarımları bulmuşlardır. Şekil 4.5 ile gerçekleştirmiş oldukları deneysel ve nümerik çalışma gösterilmektedir.



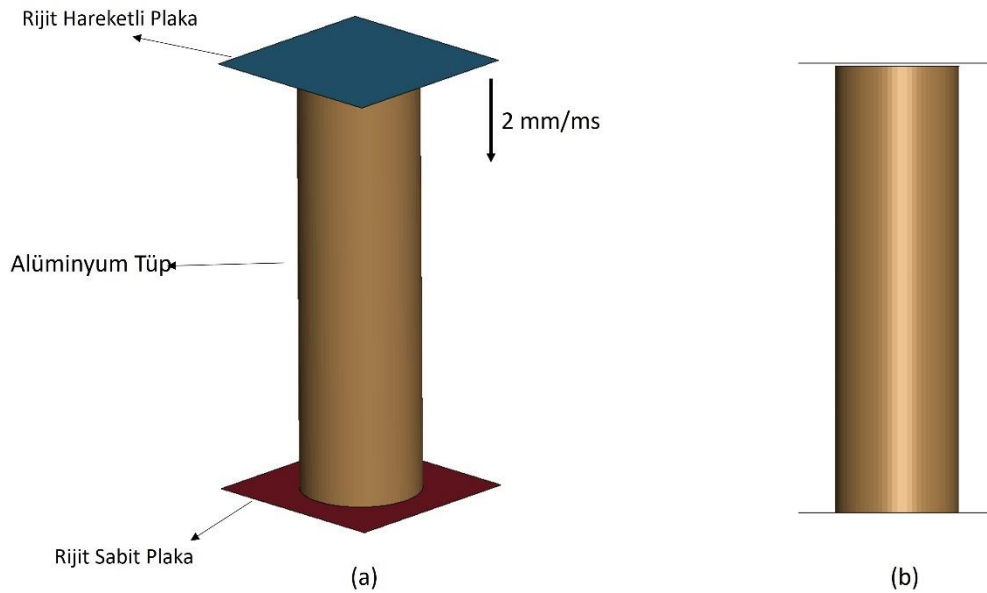
(a) Experimental



(b) Finite Element Analysis

Şekil 4.5: Doğrulama Çalışması a)Deney Çalışması b) Analiz Modeli [26].

Doğrulama çalışmasında kullanılan analiz modeli Şekil 4.6 ile gösterilmektedir. Analiz modelinde rijit hareketli plaka, aksenal yönde ve sabit hızda alüminyum tüpe doğru hareket etmektedir. Alüminyum tüpün alt kısmında bulunan rijit sabit plaka 6 dönme yönünde de hareketi kısıtlanmıştır.



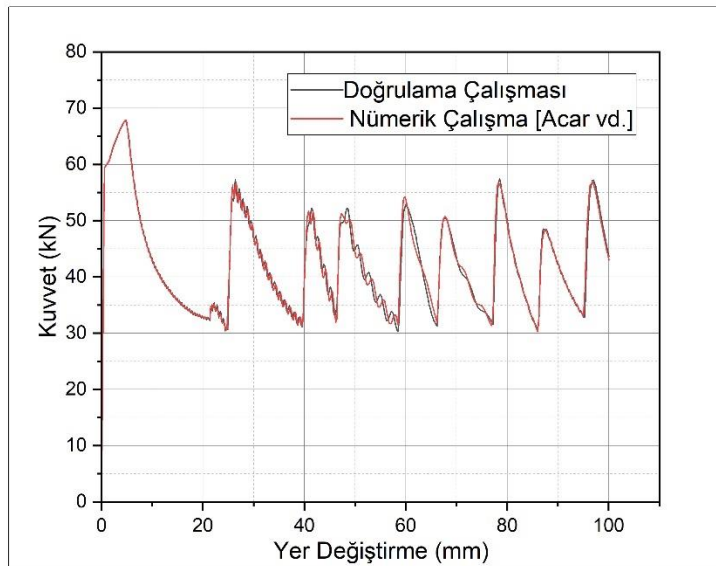
Şekil 4.6: Doğrulama Çalışması a)Analiz Modeli b) Aksenal Görüntü.

Rijit plakalar \*MAT\_20-RIGID kartı kullanılarak modellenmiştir. Çizelge 4.1 ile rijit plakanın malzeme özellikleri gösterilmektedir. Alüminyum tüp \*MAT\_24-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY kartı kullanılarak modellenmiştir. Alüminyum tüp yoğunluğu  $2700 \text{ kg/m}^3$ , Elastik Modülü  $68,2 \text{ GPa}$  ve Poisson Oranı  $0,3$  olmaktadır. Malzeme kartında tanımlanan gerilme gerinim eğrisi Çizelge 4.5 ile gösterilmektedir.

Çizelge 4.5: Alüminyum Gerçek Gerilme Efektif Plastik Gerinim Değerleri [28].

$\sigma_t$ (MPa)	$\epsilon_p$
180	0,0
183	0,006
189	0,011
196	0,016
204	0,023
212	0,031
218	0,038
222	0,044
231	0,057
239	0,071
245	0,04

Şekil 4.7 ile gösterilen kuvvet - yer değiştirme grafiği incelendiğinde doğrulama çalışması ve makale arasında uyum olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 4.6 incelendiğinde elde edilen spesifik enerji sönmeme kapasitesi sonuçlarının kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.



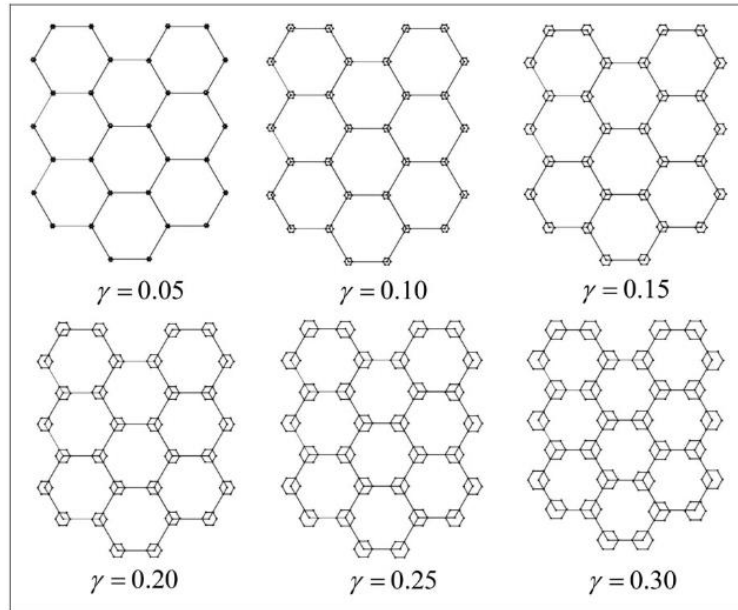
Şekil 4.7: Alüminyum Tüp Makale ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması



Çizelge 4.6: Alüminyum Tüp Doğrulama Çalışması Sonuçları

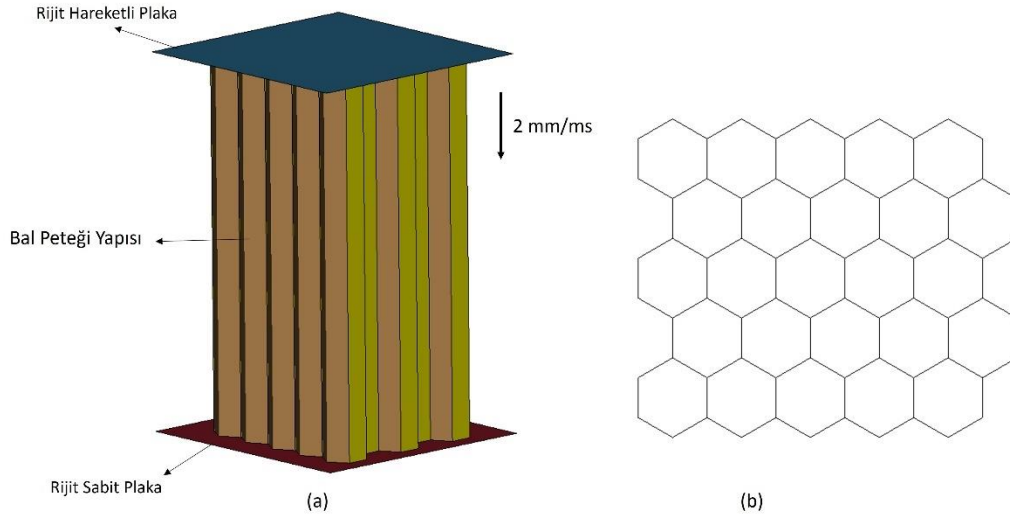
	EA (kJ)
Makale Sonuçları	4,11
Doğrulama Çalışması	4,23
Hata	%3

Bal Peteği yapılarının doğrulama çalışmasında Altın vd.[27] makalesinden yararlanılmıştır. Altın vd. [27], standart alüminyum bal peteği yapısının (RHH) köşelerine daha küçük altıgen yapılar yerleştirerek hiyerarşik bal peteği (HHH) yapılarını elde etmişlerdir. Bal Peteği yapısının doğrulama çalışmasını Zhang vd. [12] makalesini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bal petek yapının köşegen açısı, kenar uzunluğu ve et kalınlığını değişken parametreler olarak almışlar, toplam enerji sönümlenme kapasitesini en yükseğe çıkarmak için üç farklı optimizasyon yöntemi kullanmışlardır: polinom tepki yüzeyi, radyal tabanlı fonksiyonlar ve kriging modeli. Bu üç modelden en doğru sonuç vereninin Kriging modeli olduğunu saptamışlardır. En iyi enerji sönümlenme kapasitesine sahip HHH yapısının, en iyi enerji sönümlenme kapasitesine sahip RHH yapısından, %148 daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Şekil 4.8 ile hiyerarşik bal peteği yapısının yukarıdan görünümü gösterilmektedir. Hiyerarşik bal peteği yapısında kullanılan  $\gamma$  yapısal organizasyon parametresini göstermektedir.  $\gamma$  değeri büyüdükçe hiyerarşik yapıda bulunan bal petekleri de büyümektedir.



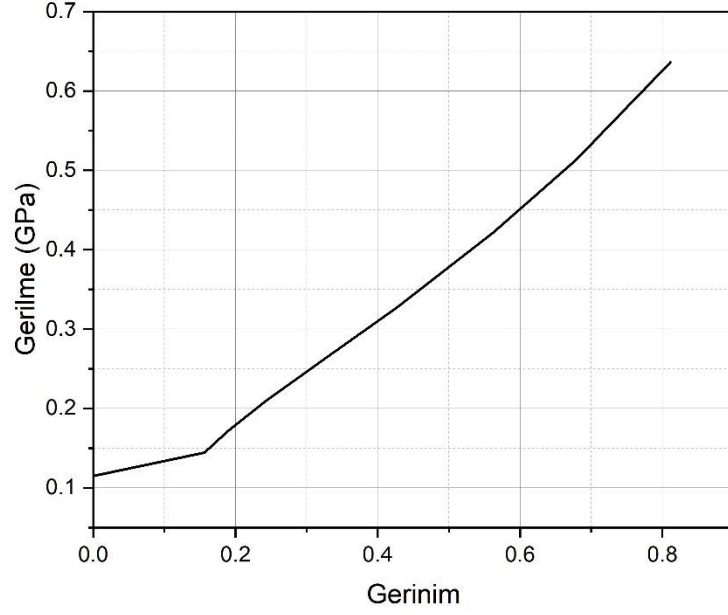
Şekil 4.8: Hiyerarşik Bal Peteği Yapısı [29].

Şekil 4.9 ile doğrulama çalışmasında kullanılan analiz modeli gösterilmektedir. 5x5 yapıda bulunan bal peteğine doğru aksel yönde rijit plaka sabit hızla hareket etmektedir. Bal peteği yapısının alt kısmında yer alan rijit plaka tüm hareket yönlerinde kısıtlanarak sabit olmaktadır. Bal peteği yapıları 6mm duvar uzunluğu ve 0,075 mm et kalınlığına sahip olmaktadır. İki hücrenin temas halinde bulunduğu duvarlarda et kalınlığı iki kat olarak tanımlanmıştır..



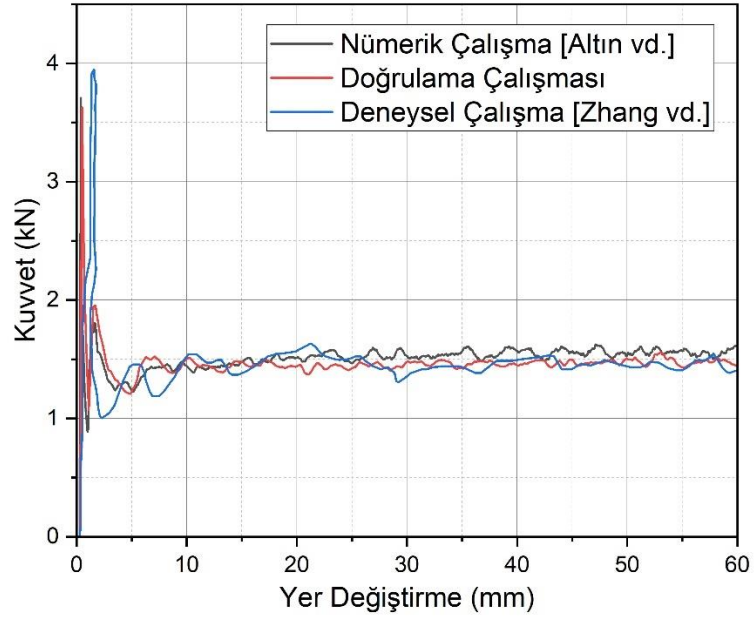
Şekil 4.9: Bal Peteği Yapısı Analiz Modeli a)İzometrik b)Eksenel Görüntü.

Rijit plakalar \*MAT\_20-RIGID kartı kullanılarak modellenmiştir. Çizelge 4.1 ile rijit plaka için kullanılan malzeme özellikleri gösterilmektedir. AA3003-H8 malzemesi kullanılarak modellenen bal peteği yapısı malzemesi \*MAT\_24-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY kartı kullanılarak modellenmiştir. Alüminyum Bal Peteği yoğunluğu  $2700 \text{ kg/m}^3$ , Elastik Modülü  $69,0 \text{ GPa}$  ve Poisson Oranı 0,3 olmaktadır. Malzeme kartında yer alan Gerinim oranı parameteresi C ve P sırasıyla 6,5 ve 4 olarak kullanılmıştır. Malzeme kartında tanımlanan gerilme gerinim eğrisi Şekil 4.10 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.10: Bal Peteği Yapısı Alüminyum Gerilme Gerinim Grafiği.

Şekil 4.11 ile gösterilen kuvvet - yer değiştirme grafiği incelendiğinde doğrulama çalışması ve makale arasında uyum olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 4.7 incelendiğinde elde edilen spesifik enerji sönmeme kapasitesi sonuçlarının kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11: Bal Peteği Yapısı Makale ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması.

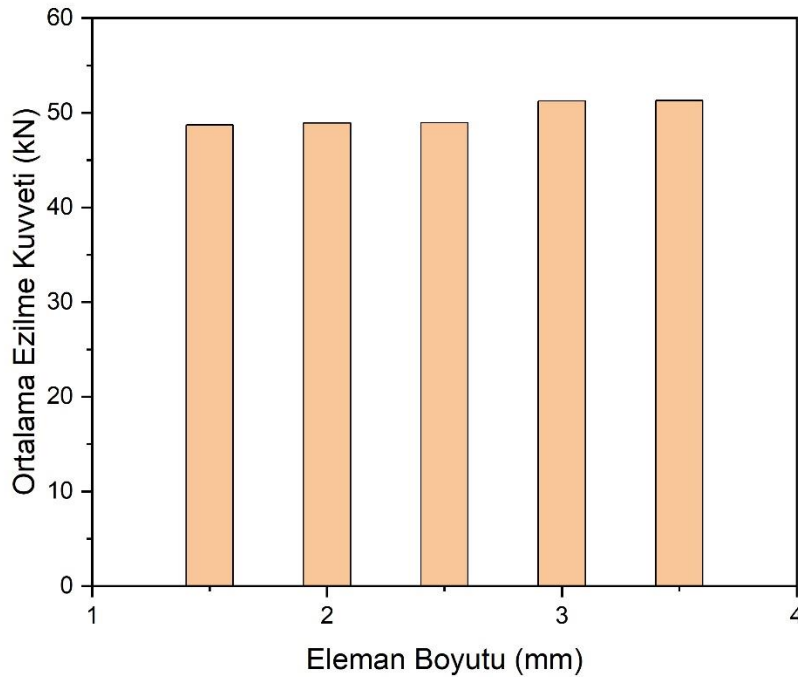
Çizelge 4.7: Alüminyum Tüp Doğrulama Çalışması Sonuçları

	EA (J)
Makale Sonuçları	91,87
Doğrulama Çalışması	88,95
Hata	%3,2

### 4.3 Sonlu Elemanlar Ağ Yapıları

Hazırlanan katı modellerin, sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilebilmesi için ağ yapılarının oluşturulması gerekmektedir. Tez çalışmasında ağ yapılarının oluşturulabilmesi için HyperMesh yazılımı kullanılmıştır. Alüminyum, karbon fiber destekli kompozit tüpler ve bal peteği yapılar için uygun ağ yapısının belirlenmesi adına eleman boyutu yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.12'de alüminyum tüp için gerçekleştirilen yakınsama çalışması gösterilmektedir. Çizelge 4.8 incelendiğinde MCF değerindeki Hata oranının %5'ten daha düşük olduğu durum olan 2,5 mm'nin en uygun eleman boyutu olacağı düşünülmüştür.

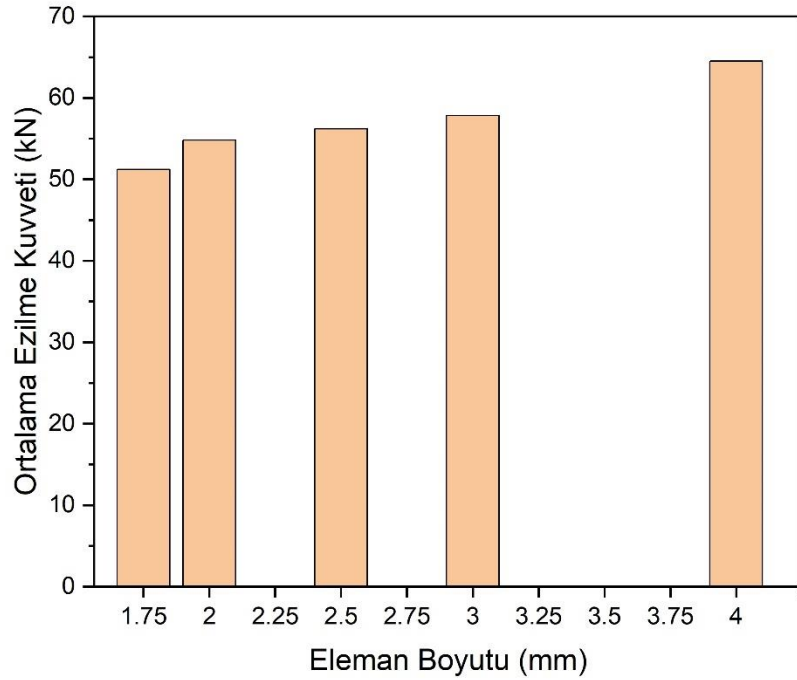


Şekil 4.12: Alüminyum Tüp Eleman Boyutu Çalışması.

Çizelge 4.8: Alüminyum Tüp Eleman Yakınsaması Çalışması Sonuçları

	PCF (kN)	EA (j)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	MCF Hata (%)
1,5	112	2435	14,34	48,71	
2	112	2445	14,43	48,93	0,41
2,5	112	2448	14,42	48,96	0,53
3	112	2563	15,14	51,26	5,26
3,5	119,9	2565	15,11	51,34	5,34

Karbon fiber destekli kompozit tüpler için gerçekleştirilen eleman boyutu çalışması Şekil 4.13'de gösterilmektedir. Analiz sonuçlarının gösterildiği Çizelge 4.9 incelendiğinde Ortalama Ezilme Kuvveti değerlerinde %5 hatanın altında bulunan 2,5 mm eleman boyutu uygun bulunmuştur.

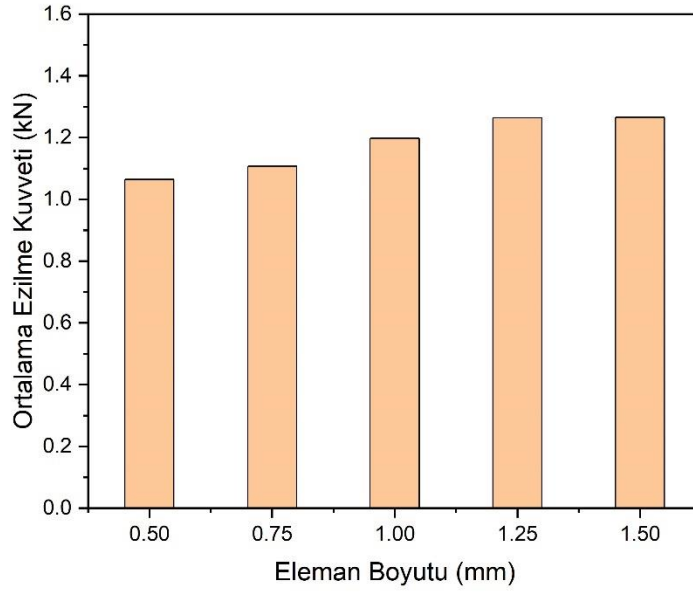


Şekil 4.13: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp Eleman Boyutu Çalışması.

Çizelge 4.9: Karbon Fiber Destekli Kompozit Tüp Eleman Yakınsaması Çalışması Sonuçları

	PCF (kN)	EA (j)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	MCF Hata (%)
2	282	2741	28,50	54,82	
2,5	284	2810	29,22	56,22	2,52
3	282	2890	30,50	57,80	5,44
4	203	3225	33,54	64,50	17,57

Bal Peteği yapılar için gerçekleştirilen eleman boyutu çalışması Şekil 4.14 ile gösterilmektedir. Çizelge 4.10 incelendiğinde Ortalama Ezilme Kuvvetinde %5'lik hatanın altında bulunan 0,75 mm eleman boyutu analiz modelleri için uygun olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.14: Bal Peteği Eleman Boyutu Çalışması

Çizelge 4.10: Bal Peteği Yapısı Eleman Yakınsaması Çalışması Sonuçları

	PCF (kN)	EA (j)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	MCF Hata (%)
0,5	1,96	53,21	3,78	1,06	
0,75	1,97	55,35	3,93	1,11	4,01
1	1,95	59,92	4,25	1,21	12,55
1,25	1,88	63,16	4,48	1,26	18,7
1,5	1,72	63,28	4,49	1,27	18,9

#### 4.4 Nümerik Analiz Modeli

HyperMesh üzerinden hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapıları .k dosya uzantısı ile dışarı aktarılmaktadır. Hazırlanan ağ yapılarının malzeme, kesit ve sınır koşullarının tanımlanması için LS-PrePost yazılımı kullanılmaktadır. Alüminyum tüp ve bal peteği yapısı için \*MAT\_24-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY kartı, karbon fiber destekli kompozit tüp için \*MAT\_54/55-ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE kartı kullanılarak modellenmiştir.

Alüminyum Tüp ve Bal peteği yapısı için kesit (İng. Section) tanımlanırken \*SECTION\_SHELL kartı kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında ELFORM 2 (Belytschko-Tsay) formülasyonu kullanılmıştır. Şekil 4.15 ile Alüminyum Tüp ve Bal Peteği yapısı için tanımlanan örnek SECTION\_SHELL kartı gösterilmektedir. Belirtilen kart içerisinde bulunan T1-T2-T3-T4 parametreleri ile ilgili parçalara kalınlık ataması gerçekleştirilmiştir.

a)

*SECTION_SHELL_(TITLE) (4)								
TITLE								
Tube								
1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	1	2	1.0000000	5	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0

b)

*SECTION_SHELL_(TITLE) (4)								
TITLE								
HC-Single								
1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	2	2	1.0000000	5	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	0.0750000	0.0750000	0.0750000	0.0750000	0.0	0.0	0.0	0

c)

*SECTION_SHELL_(TITLE) (4)								
TITLE								
HC-Double								
1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	3	2	1.0000000	5	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	0.1500000	0.1500000	0.1500000	0.1500000	0.0	0.0	0.0	0

Şekil 4.15: SECTION\_SHELL Kartı a) Alüminyum b-c) Bal Peteği Yapısı

Karbon fiber destekli kompozit tüp için \*SECTION kartı kullanılmasına gerek yoktur. Kompozit malzeme modellemesi için \*PART\_COMPOSITE kartı kullanılmıştır.

Belirtilen kartta malzemenin serim açısı, serim yönü ve katman kalınlıkları ilgili parametreler kullanılarak tanımlanmaktadır. Örnek \*PART\_COMPOSITE kartı Şekil 4.16 ile gösterilmektedir.

\*PART\_COMPOSITE\_(TITLE) (1)

1 **TITLE**  
Inner Tube

2 **PID** **ELFORM** **SHRF** **NLOC** **MAREA** **HGID** **ADPOPT** **ITHELFRM**  
1 2 0.0 0.0 0.0 2 0 0

Repeated Data by Button and List

3 **MID1** **THICK1** **B1** **TMID1** **MID2** **THICK2** **B2** **TMID2**  
4 0.125 45.0 0 4 0.125 -45.0 0

	MID1	THICK1	B1	TMID1	MID2	THICK2	B2	TMID2
1	4	0.125	45.0	0	4	0.125	-45.0	0
2	4	0.125	90.0	0	4	0.125	90.0	0
3	4	0.125	0.0	0	4	0.125	90.0	0
4	4	0.125	0.0	0	4	0.125	0.0	0

Data Pt. 1

Replace Insert  
Delete Help

Şekil 4.16: PART\_COMPOSITE Kartı

Hibrit Enerji Sönümleyici yapı aksel yönde sabit hızda rijit bir plaka ile deformasyona uğratılmaktadır. Hibrit yapının alt kısmında bulunan düğüm noktaları tüm hareket yönlerinde kısıtlandırılmıştır. Hareketli rijit plaka sabit 0,1 mm/ms hızla hibrit yapıya doğru aksel şekilde hareket etmektedir.

Hibrit yapı ve plakalar arasında etkileşim \*CONTACT kartlarından \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE kartı kullanılarak tanımlanmıştır. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0,3 ve 0,2 alınmıştır. Analiz modelinde parçaların kendileri ile olan etkileşimleri \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE kartı kullanarak tanımlanmıştır. Örnek temas algoritması kartı Şekil 4.17 ile gösterilmektedir.

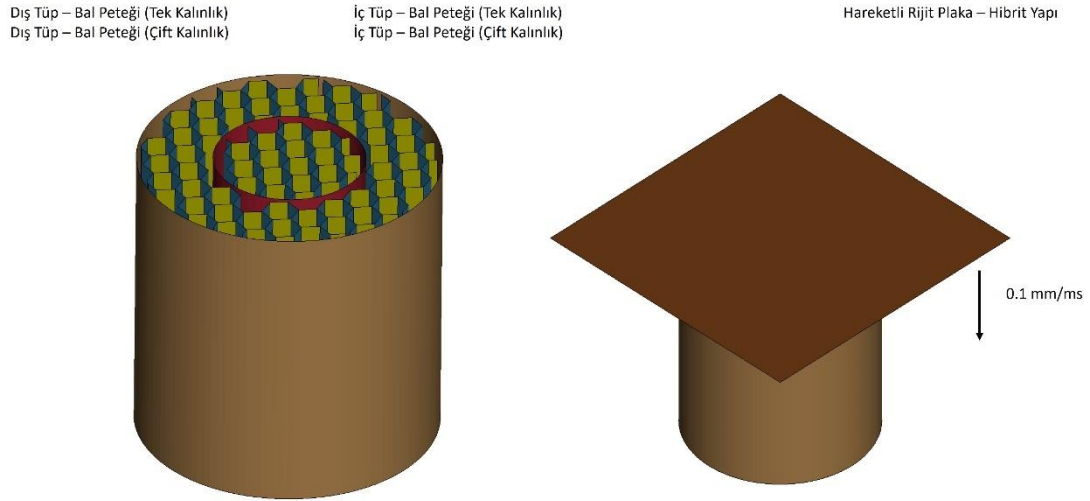


\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_(ID/TITLE/MPP)\_(THERMAL) (5)

1	<u>CID</u>	<u>TITLE</u>						
	2	Wall to Inner Tube						
			<input type="checkbox"/> MPP1	<input type="checkbox"/> MPP2				
2	<u>IGNORE</u>	<u>BCKET</u>	<u>LCBCKT</u>	<u>NS2TRK</u>	<u>INITITR</u>	<u>PARMAX</u>	<u>UNUSED</u>	<u>CPARM8</u>
	0	200		3	2	1.0005		0
3	<u>UNUSED</u>	<u>CHKSEGS</u>	<u>PENSF</u>	<u>GRPABLE</u>				
		0	1.0	0				
4	<u>SSID</u>	<u>MSID</u>	<u>SSTYP</u>	<u>MSTYP</u>	<u>SBOXID</u>	<u>MBOXID</u>	<u>SPR</u>	<u>MPR</u>
	4	1	3	3	0	0	0	0
5	<u>FS</u>	<u>FD</u>	<u>DC</u>	<u>VC</u>	<u>VDC</u>	<u>PENCHK</u>	<u>BT</u>	<u>DT</u>
	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	<u>SFS</u>	<u>SFM</u>	<u>SST</u>	<u>MST</u>	<u>SFST</u>	<u>SFMT</u>	<u>FSF</u>	<u>VSF</u>
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
	<input type="checkbox"/> Thermal		<input type="checkbox"/> T_Friction		<input type="checkbox"/> A		<input type="checkbox"/> AB	
					<input type="checkbox"/> ABC		<input type="checkbox"/> ABCD	
							<input type="checkbox"/> ABCDE	
							<input type="checkbox"/> ABCDEF	

Şekil 4.17: Örnek Temas Algoritması

Deney Tasarımında belirtilmiş doluluk oranına göre temas algoritmaları farklılık göstermektedir. Bazı modellerde dış dolgu bulunmayıp sadece iç dolgu bulunurken bazı modellerde ise iki dolgu yapısının bulunduğu olmaktadır. Bu durum sonucunda analiz modellerinde temas algoritmalarında farklılık göstermektedir. Örnek temas algoritması Şekil 4.18 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.18: Temas Algoritmaları

Yüksek sayıda eleman ve fazla temas algoritmalarının bulunması analiz sürelerini oldukça uzatmaktadır. Zaman adımları küçüldükçe analiz süresi uzamaktadır. Bu durumun en önemli nedenlerinden biri de eleman boyutlarının düşük olmasıdır. 36 Farklı deney tasarımı için belirtilen durum bir problem teşkil etmektedir. Analiz sürelerinin kısaltılabilmesi için çeşitli literatürde araştırma yapılmıştır.

Analiz süresini kısaltmak için zaman adımlarının arttırılması gerekmektedir. Kütle Ölçeklendirme (İng. Mass Scaling) yöntemi kullanılarak analiz süresi kısaltılabilmektedir [28].

Kütle Ölçeklendirme yönteminin kullanılabilmesi için analiz modelinde kinetik enerjinin düşük olması gerekmektedir. Kütle ölçeklendirilerek arttırıldığı için analiz sonuçlarında da farklılıklar gözlemlenebilir. Uygun kütle yüzdesinin bulunabilmesi için analizler gerçekleştirilmiştir.

Kütle Ölçeklendirme işlemi iki türlü yapılabilmektedir. İlk olarak malzeme yoğunluğu değiştirilerek, ikinci olarak analiz modelinde yer alan \*CONTROL-TIME\_STEP kartında bulunan DT2MS parametresi değiştirilerek gerçekleştirilmektedir [29]. Bu tez çalışmasında zaman adımı kartı üzerinden yöntem uygulanmıştır. Örnek uygulama yöntemi Şekil 4.19 ile gösterilmektedir.

*CONTROL_Timestep (1)								
1	DTINIT	TSSFAC	ISDO	TSLIMIT	DT2MS	LCTM	ERODE	MSIST
	0.0	0.9000000	0	0.0	-2.000e-04	0	0	0
2	DT2MSF	DT2MSLC	IMSCL	UNUSED	UNUSED	RMSCL	UNUSED	IHQD
	0.0	0	0	0	0	0.0	0	0

Şekil 4.19: Temas Algoritmaları

%10 Ağırlık ölçeklendirme gerçekleştirilmiş modelin çalışması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11 ile gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde oldukça yakın oldukları gözlemlenmiştir. Analiz süreleri Çizelge 4.12 ile gösterilmiştir. Analiz süresinin yarıya indiği gözlemlenmiştir. İlgili sonuçlar doğrultusunda %10 Ağırlık Ölçeklendirme yapılabileceği düşünülmüştür.

Çizelge 4.11: Kütle Ölçeklendirme Analiz Sonuçları

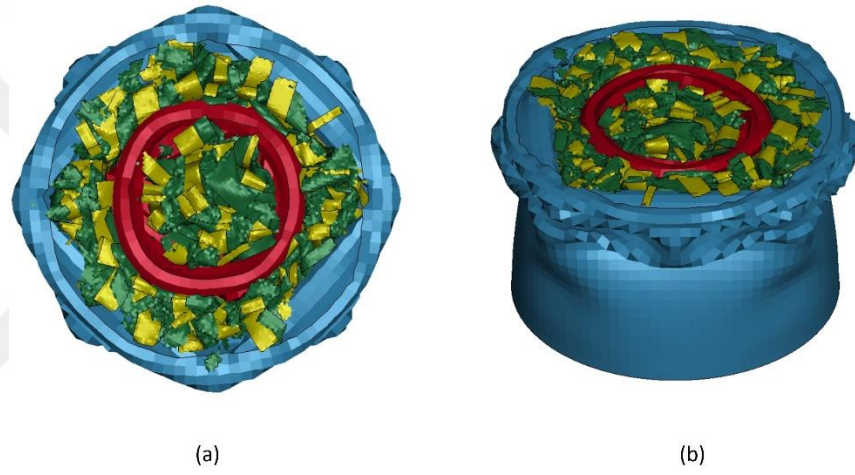
Model	PCF (kN)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)
Ana Model	3,38	3,83	2,08
Kütle Ölçeklendirilmiş Model	3,41	3,81	2,06
Hata (%)	0,92	0,77	0,77

Çizelge 4.12: Kütle Ölçeklendirme Analiz Süreleri Sonuçları

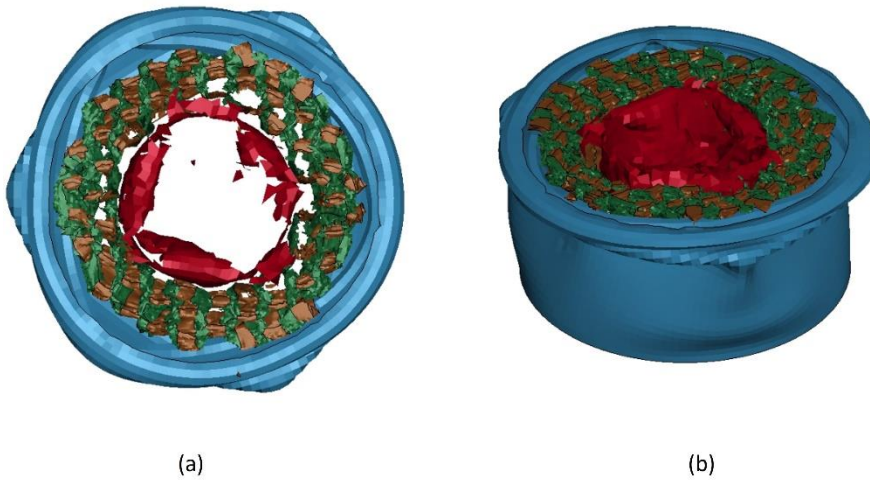
Model	Çözüm Süresi (dk)	Değişim (%)
Ana Model	1320	
Kütle Ölçeklendirilmiş Model	600	54,55

#### 4.5 Analiz Sonuçları

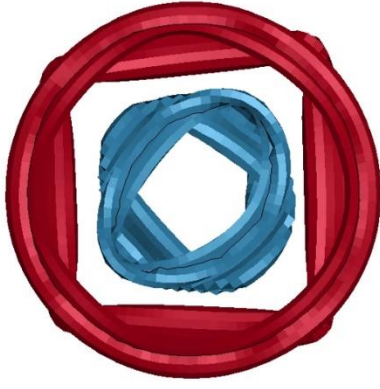
Analiz modelleri, Ls-Dyna yazılımı kullanılarak Explicit yöntemi ile çözümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 ile örnek analiz çıktıları gösterilmektedir. Deney tasarımında yer alan bütün modellerin analiz sonuçları Çizelge 4.13 ile gösterilmektedir.



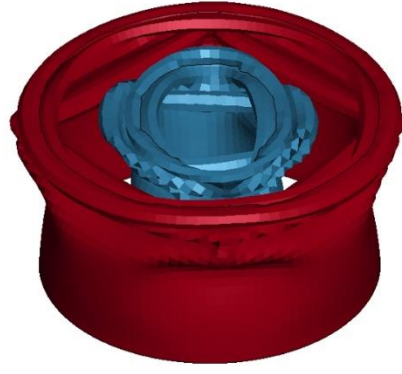
Şekil 4.20: Al-D-Al-D-Ç100-t1 Analiz Sonuçları: Aksel (a), İzometrik (b) Görünüm



Şekil 4.21: Al-D-C-B-Ç100-t1 Analiz Sonuçları: Aksel (a), İzometrik (b) Görünüm

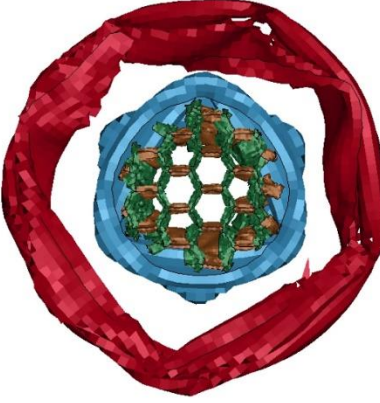


(a)

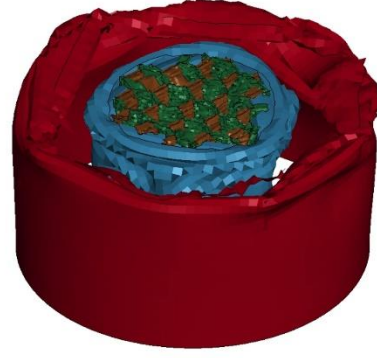


(b)

Şekil 4.22: Al-B-Al-B-Ç90-t1,5 Analiz Sonuçları: Eksenel (a), İzometrik (b) Görünüm



(a)



(b)

Şekil 4.23: C-B-Al-D-Ç100-t1,5 Analiz Sonuçları: Eksenel (a), İzometrik (b) Görünüm

Çizelge 4.13: Analiz Sonuçları

Model	PCF (kN)	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	CFE
Al-D-Al-D-DÇ100-t2	168,3	4,36	15,02	87,24	0,52
Al-D-Al-D-DÇ90-t1,5	113,3	2,48	12,38	49,50	0,44
Al-D-Al-D-DÇ80-t1	35,2	0,65	5,22	13,04	0,37
Al-D-Al-D-DÇ100-t2	168,3	4,36	15,02	87,24	0,52
Al-D-Al-D-DÇ90-t1,5	113,3	2,48	12,38	49,50	0,44
Al-D-Al-D-DÇ80-t1	35,2	0,65	5,22	13,04	0,37
Al-B-Al-B-DÇ100-t2	168,3	4,24	16,68	84,74	0,50
Al-B-Al-B-DÇ90-t1,5	113,2	2,56	14,89	51,12	0,45
Al-B-Al-B-DÇ80-t1	30,1	0,64	6,25	12,72	0,42
Al-D-CFRP-B-DÇ100-t2	225,6	3,99	16,29	79,82	0,35
Al-D-CFRP-B-DÇ90-t1,5	131,7	2,65	15,82	53,04	0,40
Al-D-CFRP-B-DÇ80-t1	30,7	0,77	7,41	15,42	0,50
Al-B-CFRP-D-DÇ100-t1,5	160,7	3,19	18,52	63,88	0,40
Al-B-CFRP-D-DÇ90-t1	38,5	0,82	7,74	16,40	0,43
Al-B-CFRP-D-DÇ80-t2	175,8	2,88	16,10	57,64	0,33
Al-B-CFRP-B-DÇ100-t1,5	142,1	2,85	17,57	56,92	0,40
Al-B-CFRP-B-DÇ90-t1	38,9	0,86	8,78	17,20	0,44
Al-B-CFRP-B-DÇ80-t2	181,1	3,63	20,83	72,50	0,40
CFRP-B-Al-B-DÇ100-t1,5	151,3	3,40	25,19	68,02	0,45
CFRP-B-Al-B-DÇ90-t1	37,1	0,99	12,15	19,80	0,53
CFRP-B-Al-B-DÇ80-t2	240,0	4,67	32,28	93,42	0,39
CFRP-B-Al-D-DÇ100-t1,5	245,2	3,25	22,39	64,92	0,26
CFRP-B-Al-D-DÇ90-t1	48,2	0,87	9,72	17,38	0,36
CFRP-B-Al-D-DÇ80-t2	231,5	3,86	25,73	77,18	0,33
CFRP-D-Al-B-DÇ100-t1	62,5	1,05	8,79	20,92	0,33
CFRP-D-Al-B-DÇ90-t2	207,9	4,57	24,90	91,40	0,44
CFRP-D-Al-B-DÇ80-t1,5	158,2	2,96	23,45	59,10	0,37
CFRP-B-CFRP-D-DÇ100-t1	62,7	0,97	9,74	19,42	0,31
CFRP-B-CFRP-D-DÇ90-t2	233,5	3,72	21,73	74,32	0,32
CFRP-B-CFRP-D-DÇ80-t1,5	155,4	2,34	20,53	46,80	0,30
CFRP-D-CFRP-B-DÇ100-t1	76,1	1,17	11,68	23,36	0,31
CFRP-D-CFRP-B-DÇ90-t2	360,1	4,15	31,17	82,90	0,23
CFRP-D-CFRP-B-DÇ80-t1,5	251,9	2,78	26,73	55,60	0,22
CFRP-D-CFRP-D-DÇ100-t1	67,8	1,20	11,09	23,96	0,35
CFRP-D-CFRP-D-DÇ90-t2	258,9	3,67	23,17	73,34	0,28



## 5. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME

### 5.1 Problem Tanımı

Çok kriterli karar verme, bir kararın alınmasında birden fazla kriter veya faktörün dikkate alındığı bir karar verme sürecidir. Bu tür kararlar genellikle karmaşık veya çok boyutlu problemleri çözmek için kullanılır. Her kriter, farklı önceliklere, ağırlıklara veya değerlere sahip olabilir ve karar verme süreci, bu kriterlerin bir araya getirilmesi ve analiz edilmesi yoluyla gerçekleşir [30].

Çarpışma kutularında, çarpışma performansı bir çok parametreye bağlıdır. Kullanılan malzeme ve geometrik yapı doğrudan etkilidir. Deney tasarımından en uygun sonuca ulaşılabilmesi için çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılabilir. En yaygın yöntemler EXPROM2, VIKOR ve TOPSIS yöntemleridir[31]. Bu tez çalışmasında en uygun tasarımın elde edilebilmesi için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Tasarımlar PCF, CFE MCF ve SEA değerlerine göre değerlendirilmiştir. Belirlenen parametrelerin ağırlıkları eşit değerdir. En uygun tasarımın hafif ve yüksek enerji sönmeme kapasitesine sahip olması beklenmektedir.

### 5.2 TOPSIS Yöntemi

Tez çalışması kapsamında Taguchi deney tasarımı kullanılarak 36 sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz modelleri arasından en uygun modelin seçilebilmesi için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Python Programla Dili kullanılarak ilgili hesaplamaları yapacak bir kod geliştirilmiştir. Kod çıktısı olarak en iyi ve en kötü sonuçları TOPSIS yöntemi kullanarak göstermektedir.

Python kodu girdi olarak .csv uzantılı dosyayı okumaktadır. Bu dosyada analiz modelinin sırasıyla PCF, CFE, MCF ve SEA değerleri bulunmaktadır. 0 ve 1 arasında puanlama sistemi kullanarak en iyi ve en kötü sonuçları kullanıcıya sunmaktadır.

Hesaplanan parametre ağırlıkları Çizelge 5.1 ile gösterilmektedir.

Çizelge 5.1: TOPSIS Yöntemi Parametre Ağırlıkları

	PCF (kN)	CFE	MCF (kN)	SEA (kJ/kg)
Ağırlıklar	0,226	0,283	0,236	0,254

Belirtilen ağırlıklara göre deney tasarımında bulunan modellerin performans değerleri hesaplanmıştır. En yüksek ve en düşük beş model Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3 ile gösterilmektedir.

Çizelge 5.2: En İyi 5 TOPSIS Sonucu

Model	PCF (kN)	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	CFE	TOPSIS
C-B-Al-B-Ç80-t2	240,0	4,67	32,28	93,42	0,39	0,75
C-D-C-B-Ç90-t2	360,1	4,15	31,17	82,90	0,23	0,74
C-D-Al-B-Ç90-t2	207,9	4,57	24,90	91,40	0,44	0,68
C-B-Al-D-Ç80-t2	231,5	3,86	25,73	77,18	0,33	0,66
C-D-C-D-Ç80-t2	258,9	3,67	23,17	73,34	0,28	0,63

Çizelge 5.3: En Kötü 5 TOPSIS Sonucu

Model	PCF (kN)	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	CFE	TOPSIS
C-B-Al-B-Ç90-t1	48,2	0,87	9,72	17,38	0,36	0,16
C-D-Al-B-Ç100-t1	62,5	1,05	8,79	20,92	0,33	0,15
C-B-C-D-Ç100-t1	62,7	0,97	9,74	19,42	0,31	0,14
Al-D-Al-D-Ç80-t1	35,2	0,65	5,22	13,04	0,37	0,14
Al-D-Al-D-Ç80-t1	35,2	0,65	5,22	13,04	0,37	0,14



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Otomobillerde bulunan enerji sönümleyici yapılar sürücü ve yolcuların güvenliği için önemli bir yapısal elemandır. Otomobillerin önden çarpışma durumlarında enerjinin sönümlenmesi ve aktarılması için çarpışma kutuları kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında bal peteği yapısı dolgulu alüminyum ve karbon fiber destekli kompozit tüpler ile hibrit çarpışma kutusunun çarpışma performansı nümerik olarak incelenmiştir. Geometrik ve yapısal parametreler göz önüne alınarak deney tasarımı oluşturulmuştur. Farklı seviyelerde deney tasarım parametreleri mevcut olduğu için L36 Taguchi Deney Tasarımı kullanılmıştır. Hibrit enerji sönümleyici yapının çarpışma performansı Ls-Dyna sonlu elemanlar çözücü programı ile aksel yük altında incelenmiştir. Literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Analiz modelinde kullanılacak malzemeler, makale doğrulama çalışması gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Ağ yakınsama çalışması gerçekleştirilerek uygun eleman boyutu elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en uygun tasarım çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS metodu ile belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 ile en yüksek beş SEA değerine sahip analiz sonucu gösterilmektedir.

Çizelge 6.1: En Yüksek 5 SEA Modeli

Model	PCF (kN)	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	CFE
C-B-AI-B-Ç80-t2	240,0	4,67	32,28	93,42	0,39
C-D-C-B-Ç90-t2	360,1	4,15	31,17	82,90	0,23
C-D-AI-B-Ç90-t2	207,9	4,57	24,90	91,40	0,44
C-B-AI-D-Ç80-t2	231,5	3,86	25,73	77,18	0,33
C-B-AI-B-Ç100-t1,5	151,3	3,4	25,19	68,02	0,45

PCF değerinin düşük olması çarpışma kutularında beklenmektedir. Çizelge 6.2 ile en düşük 5 PCF değerine sahip analiz modelleri gösterilmektedir.

Çizelge 6.2: En Düşük 5 PCF Modeli

Model	PCF (kN)	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	CFE
Al-B-Al-B-Ç80-t1	30,1	0,64	6,25	12,72	0,42
Al-D-C-B-Ç80-t1	30,7	0,77	7,41	15,42	0,50
Al-D-Al-D-Ç80-t1	35,2	0,65	5,22	13,04	0,37
Al-D-Al-D-Ç80-t1	35,2	0,65	5,22	13,04	0,37
C-B-Al-B-Ç90-t1	37,1	0,99	12,15	19,80	0,53

Sonuçlar incelendiğinde en yüksek SEA değerine sahip modellerin dış tüp malzemesinin CFRP olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum CFRP'nin düşük ağırlığa ve yüksek mukavemete sahip olmasından kaynaklanmaktadır. En yüksek SEA değerine sahip ilk 3 model incelendiğinde iç dolgunun boş olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun en önemli nedeni bal peteği yapısının ağırlığına oranla daha az enerji sönümlemesidir.

En düşük ilk 5 PCF modeli incelendiğinde Dış Tüp malzemesinin ilk dört modelde alüminyum olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum alüminyumun CFRP'den daha düşük PCF değerlerine sahip olması ile ilişkilendirilebilir. En düşük PCF değerlerine sahip modellerin dış tüp çaplarının 80 mm olduğu gözlemlenmiştir.

En düşük PCF değerine sahip hibrit enerji sönümleyici yapısının boş alüminyum tüpe kıyasla %55. En yüksek SEA değerine sahip hibrit enerji sönümleyici yapısının, boş alüminyum tüpe göre %28 daha fazla enerji sönümleme kapasite sahip olduğu incelenmiştir. En yüksek SEA değerine sahip hibrit modelin, boş karbon fiber destekli kompozit tüpten daha az enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun boş kompozit modelin sahip olduğu tetik yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

TOPSIS yöntemi kullanılarak elde edilen puanlar sıralandığında ilk beş modelin dış tüp malzemesinin CFRP olduğu ve dış tüp çapının 2 mm olduğu gözlemlenmiştir. En iyi puana sahip model, en yüksek SEA değerine sahip model olmaktadır.

Bu alışma, testler gerçekleştirilerek, farklı geometrik ve yapısal koşullar altında iletilebilir. Çok kriterli karar verme yöntemi değiştirilerek sonuçlar değelendirilebilir.





## KAYNAKLAR

- [1]. **Xiong, J., Zhang, Y., Su, L., Zhang, F., Wu, C.,** (2022). Experimental and numerical study on mechanical behavior of hybrid multi-cell structures under multi-crushing loads. *Thin-Walled Structures*, 170, 108588.
- [2]. **Tran, T. N., Baroutaji, A., Estrada, Q., Arjunan, A., Le, H., Thien, N. P.,** (2021). Crashworthiness analysis and optimization of standard and windowed multi-cell hexagonal tubes. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63(5), 2191-2209.
- [3]. **Ferdynus, M., Kotelko, M., & Urbaniak, M.,** (2019). Crashworthiness performance of thin-walled prismatic tubes with corner dents under axial impact-Numerical and experimental study. *Thin-Walled Structures*, 144, 106239.
- [4]. **Dolzyk, G., Jung, S., & Ufodike, C. O.,** (2021). Crashworthiness of circular tubes with rhombus star grooving pattern. *Materials Today Communications*, 29, 102899.
- [5]. **Ciampaglia, A., Fiumarella, D., Niutta, C. B., Ciardiello, R., & Belingardi, G.,** (2021). Impact response of an origami-shaped composite crash box: Experimental analysis and numerical optimization. *Composite Structures*, 256, 113093.
- [6]. **Rabiee, A., & Ghasemnejad, H.,** (2018). Laminate tailoring of composite tubular structures to improve crashworthiness design at off-axis loading. *Open Journal of Composite Materials*, 8(03), 84.
- [7]. **Dawood, M. S., Ghazilan, A. A., & Shah, Q. H.** (2017). Finite element analysis of a composite crash box subjected to low velocity impact. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 184, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
- [8]. **Shetty, S. K.,** (2006). Finite element study of energy absorption characteristics of a hybrid structure-composite wrapped on a square metal tube. *Wichita State University*.
- [9]. **Siromani, D., Awerbuch, J., Tan, T. M.,** (2014). Finite element modeling of the crushing behavior of thin-walled CFRP tubes under axial compression. *Composites Part B: Engineering*, 64, 50-58.
- [10]. **Meran, A. P., Toprak, T., Muğan, A.,** (2014). Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures. *Thin-Walled Structures*, 78, 87-94.
- [11]. **Paz, J., Díaz, J., Romera, L., Costas, M.,** (2014). Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of GFRP honeycomb-filled

energy absorption devices. *Finite Elements in Analysis and Design*, 91, 30-39.

- [12]. **Zhang, X., Zhang, H., Wen, Z.**, (2014). Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations. *International Journal of Impact Engineering*, 66, 48-59.
- [13]. **Mert, S. K., Güler, M. A., Altin, M., Acar, E., Çiçek, A.**, (2023). Crashworthiness evaluation of hybrid tubes made of GFRP composite and aluminum tubes filled with honeycomb structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(6), 291.
- [14]. **Usta, F., Türkmen, H. S.**, (2019). Experimental and numerical investigation of impact behavior of nested tubes with and without honeycomb filler. *Thin-Walled Structures*, 143, 106256.
- [15]. **Ma, Q., Zha, Y., Dong, B., Gan, X.**, (2020). Structure design and multiobjective optimization of CFRP/aluminum hybrid crash box. *Polymer Composites*, 41(10), 4202-4220.
- [16]. **Bhutada, S., Goel, M. D.**, (2022). Crashworthiness parameters and their improvement using tubes as an energy absorbing structure: an overview. *International journal of crashworthiness*, 27(6), 1569-1600.
- [17]. **Pavić, Z., & Novoselac, V.**, (2013). Notes on TOPSIS method. *International Journal of Research in Engineering and Science*, 1(2), 5-12.
- [18]. **Çelikkilek, Y., Tüysüz, F.**, (2020). An in-depth review of theory of the TOPSIS method: An experimental analysis. *Journal of Management Analytics*, 7(2), 281-300.
- [19]. **Çalışkan, H., Kurşuncu, B., Kurbanoğlu, C., Güven, Ş. Y.**, (2013). Material selection for the tool holder working under hard milling conditions using different multi criteria decision making methods. *Materials & Design*, 45, 473-479.
- [20]. **Xu, H., Jaynes, J., Ding, X.**, (2014). Combining two-level and three-level orthogonal arrays for factor screening and response surface exploration. *Statistica Sinica*, 24(1), 269-289.
- [21]. **Rao, R. S., Kumar, C. G., Prakasham, R. S., Hobbs, P. J.**, (2008). The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: a critical appraisal. *Biotechnology Journal: Healthcare Nutrition Technology*, 3(4), 510-523.
- [22]. **Zukas, J.** (2004). *Introduction to hydrocodes*. Elsevier.
- [23]. **Huang, J., Wang, X.**, (2009). Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes. *Composite Structures*, 91(2), 222-228.
- [24]. **Chang, F. K., Chang, K. Y.**, (1987). Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure. *Journal of Composite Materials*, 21(9), 809-833.

- [25]. **Chang, F. K., Chang, K. Y.,** (1987). A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations. *Journal of composite materials*, 21(9), 834-855.
- [26]. **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.
- [27]. **Altin, M., Acar, E., Güler, M. A.,** (2021). Crashworthiness optimization of hierarchical hexagonal honeycombs under out-of-plane impact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(6), 963-974.
- [28]. **Toksoy, A. K., Güden, M.,** (2010). Partial Al foam filling of commercial 1050H14 Al crash boxes: The effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption. *Thin-walled structures*, 48(7), 482-494.
- [29]. **LSTC LS-DYNA Support,** User Manual.
- [30]. **Aruldoss, M., Lakshmi, T. M., Venkatesan, V. P.,** (2013). A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1), 31-43.
- [31]. **Ameri, A. A., Pourghasemi, H. R., Cerda, A.,** (2018). Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. *Science of the Total Environment*, 613, 1385-1400.
- [Url-1]. **National Highway Traffic Safety Administration,** <https://www.nhtsa.gov/>  
(Erişim Tarihi: 10.06.2023)
- [Url-2]. **Momentive Develop Composite Crashbox,** <https://rb.gy/asq0g>  
(Erişim Tarihi: 15.07.2023)





## **EKLER**

EK 1: Taguchi Deneş Tasarımı

EK 2: TOPSIS Sonuçları

EK 3: TOPSIS Python Kodu





## EK 1

ÇizelgeEk.1: Taguchi Deney Tasarımı

No.	Malzeme (Dış Tüp)	Malzeme (İç Tüp)	Doluluk Durumu (Dış Dolgu)	Doluluk Durumu (İç Dolgu)	Dış Tüp Çapı (mm)	Dış Tüp Kalınlığı (mm)
1	Alüminyum	Alüminyum	Dolu	Dolu	100	2
2	Alüminyum	Alüminyum	Dolu	Dolu	90	1,5
3	Alüminyum	Alüminyum	Dolu	Dolu	80	1
4	Alüminyum	Alüminyum	Dolu	Dolu	100	2
5	Alüminyum	Alüminyum	Dolu	Dolu	90	1,5
6	Alüminyum	Alüminyum	Dolu	Dolu	80	1
7	Alüminyum	Alüminyum	Boş	Boş	100	2
8	Alüminyum	Alüminyum	Boş	Boş	90	1,5
9	Alüminyum	Alüminyum	Boş	Boş	80	1
10	Alüminyum	CFRP	Dolu	Boş	100	2
11	Alüminyum	CFRP	Dolu	Boş	90	1,5
12	Alüminyum	CFRP	Dolu	Boş	80	1
13	Alüminyum	CFRP	Boş	Dolu	100	1,5
14	Alüminyum	CFRP	Boş	Dolu	90	1
15	Alüminyum	CFRP	Boş	Dolu	80	2
16	Alüminyum	CFRP	Boş	Boş	100	1,5
17	Alüminyum	CFRP	Boş	Boş	90	1
18	Alüminyum	CFRP	Boş	Boş	80	2
19	CFRP	Alüminyum	Boş	Boş	100	1,5
20	CFRP	Alüminyum	Boş	Boş	90	1
21	CFRP	Alüminyum	Boş	Boş	80	2
22	CFRP	Alüminyum	Boş	Dolu	100	1,5
23	CFRP	Alüminyum	Boş	Dolu	90	1
24	CFRP	Alüminyum	Boş	Dolu	80	2
25	CFRP	Alüminyum	Dolu	Boş	100	1
26	CFRP	Alüminyum	Dolu	Boş	90	2
27	CFRP	Alüminyum	Dolu	Boş	80	1,5
28	CFRP	CFRP	Boş	Dolu	100	1
29	CFRP	CFRP	Boş	Dolu	90	2
30	CFRP	CFRP	Boş	Dolu	80	1,5
31	CFRP	CFRP	Dolu	Boş	100	1
32	CFRP	CFRP	Dolu	Boş	90	2
33	CFRP	CFRP	Dolu	Boş	80	1,5
34	CFRP	CFRP	Dolu	Dolu	100	1
35	CFRP	CFRP	Dolu	Dolu	90	2
36	CFRP	CFRP	Dolu	Dolu	80	1,5



**EK 2**

ÇizelgeEk.2: TOPSIS Sonuçları

Analiz Modeli	TOPSIS Puanı
AI-D-AI-D-Ç100-t2	0,55
AI-D-AI-D-Ç90-t1,5	0,35
AI-D-AI-D-Ç80-t1	0,13
AI-D-AI-D-Ç100-t2	0,55
AI-D-AI-D-Ç90-t1,5	0,35
AI-D-AI-D-Ç80-t1	0,13
AI-B-AI-B-Ç100-t2	0,55
AI-B-AI-B-Ç90-t1,5	0,38
AI-B-AI-B-Ç80-t1	0,17
AI-D-C-B-Ç100-t2	0,56
AI-D-C-B-Ç90-t1,5	0,40
AI-D-C-B-Ç80-t1	0,23
AI-B-C-D-Ç100-t1,5	0,49
AI-B-C-D-Ç90-t1	0,19
AI-B-C-D-Ç80-t2	0,44
AI-B-C-B-Ç100-t1,5	0,44
AI-B-C-B-Ç90-t1	0,20
AI-B-C-B-Ç80-t2	0,56
C-B-AI-B-Ç100-t1,5	0,56
C-B-AI-B-Ç90-t1	0,29
C-B-AI-B-Ç80-t2	0,75
C-B-AI-D-Ç100-t1,5	0,58
C-B-AI-D-Ç90-t1	0,16
C-B-AI-D-Ç80-t2	0,65
C-D-AI-B-Ç100-t1	0,15
C-D-AI-B-Ç90-t2	0,67
C-D-AI-B-Ç80-t1,5	0,51
C-B-C-D-Ç100-t1	0,14
C-B-C-D-Ç90-t2	0,61
C-B-C-D-Ç80-t1,5	0,43
C-D-C-B-Ç100-t1	0,18
C-D-C-B-Ç90-t2	0,74
C-D-C-B-Ç80-t1,5	0,59
C-D-C-D-Ç100-t1	0,19
C-D-C-D-Ç90-t2	0,63
C-D-C-D-Ç80-t1,5	0,50



### EK 3

```
import numpy as np
import pandas as pd
from denominator_func import denominator_func
from weight_func import weight_func
from euclidean_func import euclidean_func

#Step 1 Build Matrix

df = pd.read_csv('results.csv', delimiter=';')

df_normalized = pd.DataFrame(np.zeros((len(df), len(df.columns)
    ↪ )))
df_weighted = pd.DataFrame(np.zeros((len(df), len(df.columns)))
    ↪ )
df_alternatives = pd.DataFrame(np.zeros((len(df.columns), 2)))
df_euclidean = pd.DataFrame(np.zeros((len(df.columns), 2)))
performance_score = np.zeros((len(df), 1))

denominator = denominator_func(df)

#Step 2 Normalized Matrix
for i in range(len(df.columns)):
    for j in range(len(df)):
        df_normalized.iloc[j, i] = df.iloc[j, i] / denominator.
            ↪ iloc[i, 0]

#Step 3 Weighted Normalized Matrix

weights = weight_func(df)

for i in range(len(df.columns)):
    df_weighted.iloc[:, i] = df_normalized.iloc[:, i] * weights
        ↪ [i]

#Step 4 Finding Best/Worst Alternatives
```

```

for i in range(len(df_weighted.columns)):
    df_alternatives.iloc[i, 0] = max(df_weighted.iloc[:, i])
    df_alternatives.iloc[i, 1] = min(df_weighted.iloc[:, i])

#Step 5 Calculating Euclidean Distance From Worst and Best
↪ Alternatives

df_euclidean = euclidean_func(df_weighted, df_alternatives)

#Step 6 Calculate Performance Score

for i in range(len(df_euclidean)):
    performance_score[i] = df_euclidean.iloc[i, 1] / (
        ↪ df_euclidean.iloc[i, 0] + df_euclidean.iloc[i, 1])

#Step 7 Rank the Alternatives According to Performance Score

print('Best_Choice:\n', df.iloc[np.argmax(performance_score),
    ↪ :])
print('The_Value_of_the_Best_Choice:', np.amax(
    ↪ performance_score))

print('Worst_Choice:\n', df.iloc[np.argmin(performance_score),
    ↪ :])
print('The_Value_of_the_Worst_Choice:', np.amin(
    ↪ performance_score))

def weight_func (df):
    weight_parameters = np.zeros((len(df),len(df.columns)))
    df_r = pd.DataFrame(weight_parameters)
    df_e = pd.DataFrame(weight_parameters)
    df_sums = pd.DataFrame(np.zeros((len(df.columns),1)))

#Calculation of r
for i in range(len(df_sums)):
    df_sums.iloc[i] = math.sqrt(sum(df.iloc[:,i]**2))

for i in range(len(df.columns)):
    for j in range(len(df)):
        df_r.iloc[j, i] = df.iloc[j, i] / df_sums.iloc[i, :]

```



```

#Calculation of h
h = 1 / math.log(len(df))

#Calculation of e
for i in range(len(df)):
    for j in range(len(df.columns)):
        df_e.iloc[i, j] = -h * df_r.iloc[i, j] * math.log(df_r.
            ↪ iloc[i, j])

e = np.zeros((len(df_e.columns), 1))

for i in range(len(df_e.columns)):
    e[i] = sum(df_e.iloc[:, i])

dj = abs(1 - e)

#Calculation of weights

w = np.zeros((len(df_e.columns), 1))

for i in range(len(df_e.columns)):
    w[i] = dj[i] / sum(dj)

return w

def euclidean_func(df_weighted, df_alternatives):

    df_best_alternatives = pd.DataFrame(np.zeros((len(
        ↪ df_weighted), (len(df_weighted.columns))))))
    df_worst_alternatives = pd.DataFrame(np.zeros((len(
        ↪ df_weighted), (len(df_weighted.columns))))))

    df_euclidean = pd.DataFrame(np.zeros((len(df_weighted), 2))
        ↪ )

    for i in range(len(df_weighted)):
        for j in range(len(df_weighted.columns)):
            df_best_alternatives.iloc[i, j] = (df_weighted.iloc[
                ↪ i, j] - df_alternatives.iloc[j, 0])**2
            df_worst_alternatives.iloc[i, j] = (df_weighted.iloc

```

```

        ↪ [i, j] - df_alternatives.iloc[j, 1])**2

for i in range(len(df_weighted)):
    df_euclidean.iloc[i, 0] = math.sqrt(sum(
        ↪ df_best_alternatives.iloc[i,:]))
    df_euclidean.iloc[i, 1] = math.sqrt(sum(
        ↪ df_worst_alternatives.iloc[i,:]))

return df_euclidean

def denominator_func (df):
    denominator = pd.DataFrame(np.zeros((len(df.columns), 1)))

    for i in range(len(df.columns)):
        denominator.iloc[i, 0] = math.sqrt(sum(df.iloc[:,i]**2)
        ↪ )

    return denominator

```

ŞekilEk.2: TOPSIS Python kodu.