



**KOMPOZİT MALZEMELER VE YAPAY ZEKA  
OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ İLE YÜKSEK  
PERFORMANSLI OTOMOTİV DARBE SÖNÜMLEME  
BİLEŞENLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Mehmet KOPAR**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPOZİT MALZEMELER VE YAPAY ZEKA OPTİMİZASYON  
TEKNİKLERİ İLE YÜKSEK PERFORMANSLI OTOMOTİV DARBE  
SÖNÜMLEME BİLEŞENLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Mehmet KOPAR  
0000-0001-7347-4192

Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025  
**Her Hakkı Saklıdır**

## ÖZET

Doktora Tezi

### KOMPOZİT MALZEMELER VE YAPAY ZEKA OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ İLE YÜKSEK PERFORMANSLI OTOMOTİV DARBE SÖNÜMLEME BİLEŞENLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

**Mehmet KOPAR**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ

Bu tez çalışması kapsamında otomotiv pasif güvenlik sistemlerinden biri olan çarpışma kutuları ve otomotiv yan barları geliştirilmiştir. Bu tez kapsamında tasarlanan çarpışma kutuları eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan eriyik biriktirme yöntemi (FDM) ile PLA, ABS, PETG ve CF15PET malzeme kullanılarak üretilmiş ve çarpışma performanslarının incelenmesi amacıyla düşey darbe testi ile 2 kJ yük altında testler gerçekleştirilmiştir. Testlerin sonucunda en yüksek çarpışma performansına sahip olan birinci tasarımlı PLA ve ABS çarpışma kutuları özgül enerji emilimlerinin geliştirilmesi ve ağırlıklarının azaltılması amaçlanarak genetik algoritma kullanılarak şekil optimizasyonları yapılmıştır. Şekil optimizasyonu sonrasında belirlenen yeni ölçüler ile tasarımlar yapılarak eklemeli imalat yöntemi ile tekrardan üretimleri yapılmıştır. Optimize edilen çarpışma kutularının çarpışma performanslarının geliştirilmesi amacıyla filament sarma yöntemi ile  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$  sarım açılarına sahip olan cam ve karbon fiber takviyeli kompozit yapılar ile hibrit çarpışma kutuları geliştirilmiştir. Geliştirilen hibrit çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi amacıyla 4 kJ düşey darbe ile testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrulaması yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda tüm hibrit çarpışma kutularının 4 kJ enerjinin tamamının emilimini sağladığı ve hibrit yapıların plastik yapıların enerji emilimini arttırdığı gözlenmiştir. Burada sarım açılarının çarpışma anında çarpışma kutularının katlanma davranışını etkilediği belirlenmiştir. Otomotiv yan kapı barlarının geliştirilmesi için hacim ve yüzey merkezli kübik kafes yapılar ABS, PLA ve CF15PET malzemeler ile eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilerek alüminyum silindir ve kare borular ile hibritleştirilmiştir. Yapılan yarı statik testler sonucunda kafes yapıların yan kapı barlarının enerji emilimini geliştirdikleri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit çarpışma kutuları, eklemeli imalat, optimizasyon, yan kapı barı, kafes yapılar  
**2025, xxi + 136 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE AUTOMOTIVE IMPACT ABSORBER COMPONENTS WITH COMPOSITE MATERIALS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE OPTIMIZATION TECHNIQUES

**Mehmet KOPAR**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Automotive Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ

Within the scope of this thesis, crash boxes and automotive side bars, which are one of the automotive passive safety systems, have been developed. The crash boxes designed within the scope of this thesis were produced using PLA, ABS, PETG and CF15PET materials using the fused deposition method (FDM), which is one of the additive manufacturing methods, and tests were carried out under a vertical impact test and 2 kJ load in order to examine their crash performance. As a result of the tests, the first design PLA and ABS crash boxes with the highest crash performance were optimized using genetic algorithms in order to improve their specific energy absorption and reduce their weight. After the shape optimization, designs were made with the new measurements determined and they were re-manufactured using the additive manufacturing method. In order to improve the crash performance of the optimized crash boxes, glass and carbon fiber reinforced composite structures with  $\pm 45^\circ$  and  $90^\circ$  winding angles were developed with the filament winding method and hybrid crash boxes. In order to examine the crash performance of the developed hybrid crash boxes, tests were carried out with a 4 kJ vertical impact. The tests were verified using the finite element method. As a result of the tests, it was observed that all hybrid crash boxes absorbed the entire 4 kJ energy and that hybrid structures increased the energy absorption of plastic structures. Here, it was determined that the winding angles affected the folding behavior of the crash boxes at the time of the collision. For the development of automotive side door bars, body and surface-centered cubic lattice structures were produced using the additive manufacturing method with ABS, PLA and CF15PET materials and hybridized with aluminum cylinders and square pipes. As a result of the semi-static tests, it was determined that the lattice structures improved the energy absorption of the side door bars.

**Key words:** Composite crash boxes, additive manufacturing, optimization, side door bar, lattice structures

**2025, xxi + 136 pages.**

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim ve çalışmaların süresince gerek bilgi aktarımı gerekse manevi anlamda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Ali Rıza Yıldız'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesindeki sayın hocalarım Prof. Dr. Rukiye Ertan ve Dr. Öğr. Üyesi Emre Demirci hocalarıma sağlamış oldukları katkı ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

119C102 proje numarasıyla 2244 Sanayi Destekli Doktora Programında beni destekleyen TÜBİTAK BİDEB ve proje kapsamında görev aldığım Bursa Teknoloji Koordinasyon ve AR-GE Merkezi (BUTEKOM) A.Ş. ve ekip arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatım boyunca her konuda benden yardımlarını esirgemeyen değerleri aile üyelerim annem Gültaze Kopar ve babam Mahmut Kopar'a teşekkürlerimi sunarım

Mehmet KOPAR  
15/01/2025

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET.....                                                                                                                                                | viii  |
| ABSTRACT.....                                                                                                                                            | ix    |
| TEŞEKKÜR.....                                                                                                                                            | x     |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                                                                                     | xiv   |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                                                                            | 1     |
| 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....                                                                                                         | 4     |
| 2.1. Kaynak Araştırması.....                                                                                                                             | 4     |
| 2.2. Kuramsal Temeller.....                                                                                                                              | 12    |
| 2.2.1. Kompozit Malzemeler.....                                                                                                                          | 12    |
| 2.2.2. Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler .....                                                                                                | 15    |
| 2.2.3. Polimer Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeler .....                                                                                 | 17    |
| 2.2.4. Polimer Matrisli Kompozitlerin Takviye Malzemeleri.....                                                                                           | 18    |
| 2.2.5. Eklemeli İmalat Teknolojisi.....                                                                                                                  | 20    |
| 2.2.6. Enerji Yutucu Yapılar .....                                                                                                                       | 23    |
| 2.2.7. Genetik Algoritma.....                                                                                                                            | 29    |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM.....                                                                                                                               | 32    |
| 3.1. Çarpışma Kutuları ve Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Amacıyla Test Numunelerinin üretilmesi.....                                   | 32    |
| 3.2. PLA, ABS, PETG, CF15PET ve GF30PP Filamentlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Amacıyla Test Numunelerinin Üretilmesi ve Yapılan Testler ..... | 34    |
| 3.2.1. Çekme Testi .....                                                                                                                                 | 34    |
| 3.2.2. Üç Nokta Eğme Testi .....                                                                                                                         | 35    |
| 3.2.3. Izod Darbe Testi.....                                                                                                                             | 36    |
| 3.2.4. Bası Testi.....                                                                                                                                   | 36    |
| 3.2.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....                                                                                                          | 37    |
| 3.2.6. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC).....                                                                                                      | 38    |
| 3.2.7. Düşey Darbe Testi Cihazı .....                                                                                                                    | 39    |
| 3.3. Karbon ve Cam Fiber Takviyeli Çarpışma Kutularının Filament Sarma Yöntemi ile Üretilmesi.....                                                       | 39    |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....                                                                                                                            | 45    |
| 4.1. Filamentlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....                                                                                             | 45    |
| 4.1.1. Çekme Testi Sonuçları .....                                                                                                                       | 45    |
| 4.1.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları.....                                                                                                                | 46    |
| 4.1.3. Basma Testi Sonuçları.....                                                                                                                        | 47    |
| 4.1.4. Izod Darbe Testi Sonuçları .....                                                                                                                  | 49    |
| 4.1.5. Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Belirlenmesi .....                                                                                                  | 50    |
| 4.1.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülerinin İncelenmesi .....                                                                               | 50    |
| 4.1.7. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Ölçümleri (DSC).....                                                                                            | 51    |
| 4.2. PLA, ABS, PETG ve CF15PET Malzemeli Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi .....                                          | 52    |
| 4.2.1. Birinci ve İkinci Tasarım Çarpışma kutularının Simülasyonlarının Kurulumu....                                                                     | 52    |
| 4.2.2. ABS Malzemeli Birinci Tasarım Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi .....                                              | 53    |
| 4.2.3. PLA Malzemeli Birinci Tasarım Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi .....                                              | 55    |

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.4. CF15PET Malzemeli Birinci Tasarım Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi .....                                                                                                 | 57  |
| 4.2.5. PETG Malzemeli Birinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi .....                                                                                                 | 59  |
| 4.2.6. ABS Malzemeli İkinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi .....                                                                                                   | 61  |
| 4.2.7. PLA Malzemeli İkinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi .....                                                                                                   | 63  |
| 4.2.8. PLA Malzemeli İkinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi .....                                                                                                   | 65  |
| 4.2.9. PETG Malzemeli İkinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi .....                                                                                                  | 67  |
| 4.3. Özgül Enerji Emilimi En Yüksek Olan Çarpışma Kutularının Optimizasyonları ...                                                                                                                              | 69  |
| 4.4. Optimize Edilmiş Çarpışma Kutularının Farklı Sarım Açıklarına Sahip Olan Karbon ve Cam Fiber Takviyeli Kompozit Çarpışma Kutularının Hibritleştirilmesi, Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi ..... | 71  |
| 4.4.1. Hibrit Çarpışma Kutularının Üretilmesi.....                                                                                                                                                              | 71  |
| 4.4.2. Kompozit Takviyeli Çarpışma Kutularının Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....                                                                                                                     | 74  |
| 4.4.3. G1 Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçları .....                                                                                                                                               | 75  |
| 4.4.4. G1A Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçları .....                                                                                                                                              | 77  |
| 4.4.5. G1P Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçları .....                                                                                                                                              | 79  |
| 4.4.6. G2 Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                                 | 81  |
| 4.4.7. G2A Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                                | 83  |
| 4.4.8. G2P Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                                | 85  |
| 4.4.9. C1 Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                          | 87  |
| 4.4.10. C1A Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                        | 89  |
| 4.4.11. C1P Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                        | 91  |
| 4.4.12. C2 Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                         | 93  |
| 4.4.13. C2A Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                        | 95  |
| 4.4.14. C2P Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.....                                                                                                                        | 97  |
| 4.5. Kafes Yapı Takviyeli Alüminyum Hibrit Yan Kapı Barlarının Geliştirilmesi .....                                                                                                                             | 99  |
| 4.5.1. Kafes Yapıların Tasarımı ve Eklemeli İmalat Yöntemi Kullanılarak Üretilmesi.....                                                                                                                         | 99  |
| 4.5.2. Hibrit Yapıların Üç Nokta Eğme Simülasyonlarının Kurulu.....                                                                                                                                             | 102 |
| 4.5.3. Hibrit Yan Kapı Barlarının Test Prosedürünün Hazırlanması .....                                                                                                                                          | 104 |
| 4.5.4. K Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi .....                                                                                                                               | 105 |
| 4.5.5. KVA Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi ..                                                                                                                                | 107 |
| 4.5.6. KVP Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi ..                                                                                                                                | 108 |
| 4.5.7. KVC Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi..                                                                                                                                 | 110 |
| 4.5.8. KYA Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi ..                                                                                                                                | 111 |
| 4.5.9. KYP Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi ..                                                                                                                                | 113 |
| 4.5.10. KYC Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi ..                                                                                                                               | 115 |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.11. S Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi..... | 116 |
| 4.5.12. SVA Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi    | 118 |
| 4.5.13. KVP Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi    | 119 |
| 4.5.14. KVC Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi    | 121 |
| 4.5.15. SYA Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi    | 122 |
| 4.5.14. SYP Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.   | 124 |
| 4.5.15. SYC Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi.   | 125 |
| 5. SONUÇ.....                                                                     | 127 |
| KAYNAKLAR .....                                                                   | 132 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                    | 139 |



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|                         |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| $E_{11}$                | 1 yönü elastisite modülü     |
| $E_{22}$                | 2 yönü elastisite modülü     |
| $E_{33}$                | 3 yönü elastisite modülü     |
| $\nu_{11}$              | 1 yönü poisson's oranı       |
| $\nu_{13}$              | 2 yönü poisson's oranı       |
| $\nu_{23}$              | 3 yönü poisson's oranı       |
| $G_{12,13,23}$          | 12, 13, 23 yönü kesme modülü |
| $(\sigma_1^T)_{ult}$    | 1 yönü çekme dayanımı        |
| $(\sigma_{21}^T)_{ult}$ | 2 yönü çekme dayanımı        |
| $(\sigma_1^C)_{ult}$    | 1 yönü basma dayanımı        |
| $(\sigma_2^C)_{ult}$    | 2 yönü basma dayanımı        |
| $F_{ort}$               | Ortalama kuvvet              |
| $F_{maks}$              | Maksimum kuvvet              |
| $E_m$                   | Ortalama enerji              |
| $E_t$                   | Toplam enerji                |
| $\eta_f$                | Ezilme verimi                |

### Kısaltmalar

|         |                                                     |
|---------|-----------------------------------------------------|
| PLA     | Polilaktik asit                                     |
| ABS     | Akrilonitril bütadien stiren                        |
| CF15PET | %15 kısa karbon fiber katkılı polietilen tereflatat |
| PETG    | Polyethylene terephthalate glycol                   |
| GA      | Genetik algoritma                                   |
| KJ      | Kilojoule                                           |
| GR      | Gram                                                |
| CF      | Karbon fiber                                        |
| GF      | Cam fiber                                           |
| MM      | Milimetre                                           |
| N       | Newton                                              |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Eklemeli imalat G-Code oluşturulması .....                                                                                                                                                                                                                                  | 22    |
| Şekil 2.2. Eklemeli imalat yönteminin (FDM) şematik gösterimi (Shubham vd., 2018) .....                                                                                                                                                                                                | 23    |
| Şekil 2.3. Çarpışma kutularının araç üzerindeki konumu (Chatterjee & vander Veldt, 2015) .....                                                                                                                                                                                         | 24    |
| Şekil 2.4. Yan kapı barlarının araç üzerindeki konumu (M. F. Li vd., 2014) .....                                                                                                                                                                                                       | 25    |
| Şekil 3.1. Çarpışma kutularının tasarım ölçüleri <b>(a)</b> birinci tasarım, <b>(b)</b> ikinci tasarım .....                                                                                                                                                                           | 32    |
| Şekil 3.2. Çarpışma kutuları <b>(a)</b> PLA, <b>(b)</b> PETG, <b>(c)</b> ABS, <b>(d)</b> CF15PET, <b>(e)</b> Üç boyutlu yazıcı .....                                                                                                                                                   | 33    |
| Şekil 3.3. <b>(a)</b> Çekme testi makinesi, <b>(b)</b> ISO 527/3 standart ölçüleri.....                                                                                                                                                                                                | 35    |
| Şekil 3.4. <b>(a)</b> Üç nokta eğme testi makinesi makinası, <b>(b)</b> ISO 178 standart ölçüleri .....                                                                                                                                                                                | 35    |
| Şekil 3.5. <b>(a)</b> Izod testi makinesi makinası, <b>(b)</b> ISO 179 standart ölçüleri .....                                                                                                                                                                                         | 36    |
| Şekil 3.6. <b>(a)</b> Bası testi cihazı, <b>(b)</b> ASTM D695-15 standardı .....                                                                                                                                                                                                       | 37    |
| Şekil 3.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....                                                                                                                                                                                                                                    | 38    |
| Şekil 3.8. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) makinesi .....                                                                                                                                                                                                                      | 38    |
| Şekil 3.9. Düşey darbe testi cihazı .....                                                                                                                                                                                                                                              | 39    |
| Şekil 3.10. Filamentlerin reçine havuzundan geçirilmesi .....                                                                                                                                                                                                                          | 40    |
| Şekil 3.11. Kompozit çarpışma kutularının üretilmesi .....                                                                                                                                                                                                                             | 41    |
| Şekil 3.12. Kompozit çarpışma kutuları .....                                                                                                                                                                                                                                           | 42    |
| Şekil 4.1. Çekme testi sonuçları <b>(a)</b> $\pm 45^\circ$ tarama açılı, <b>(b)</b> $0-90^\circ$ tarama açılı .....                                                                                                                                                                    | 45    |
| Şekil 4.2. Farklı tarama açıları ile üretilen parçaların üç nokta eğme dayanımı .....                                                                                                                                                                                                  | 47    |
| Şekil 4.3. Farklı tarama açıları ile üretilen parçaların bası dayanımı .....                                                                                                                                                                                                           | 48    |
| Şekil 4.4. SEM görüntüleri; <b>(a)</b> $\pm 45^\circ$ ABS, <b>(b)</b> $0-90^\circ$ ABS, <b>(c)</b> $\pm 45^\circ$ PLA, <b>(d)</b> $90^\circ$ PLA, <b>(e)</b> $\pm 45^\circ$ PETG, <b>(f)</b> $90^\circ$ PETG, <b>(g)</b> $\pm 45^\circ$ CF15PET, <b>(h)</b> $0-90^\circ$ CF15PET ..... | 51    |
| Şekil 4.5. Malzemelerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi.                                                                                                                                                                                                                   | 52    |
| Şekil 4.6. Simülasyon kurulumu <b>(a)</b> birinci tasarım, <b>(b)</b> ikinci tasarım.                                                                                                                                                                                                  | 53    |
| Şekil 4.7. ABS malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görsel.                                                                                                                                | 54    |
| Şekil 4.8. ABS malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                                                                                             | 54    |
| Şekil 4.9. PLA malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu <b>a.)</b> test görseli, <b>b.)</b> test sonrası görsel, <b>c.)</b> simülasyon sonrası görseli.                                                                                                                               | 56    |
| Şekil 4.10. PLA malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği.....                                                                                                                                                                             | 56    |
| Şekil 4.11. CF15PET malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görsel.                                                                                                                           | 58    |
| Şekil 4.12. CF15PET malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                                                                                        | 58    |

|             |                                                                                                                                                                 |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.13. | PETG malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> simülasyon sonrası görseli .....                                             | 60 |
| Şekil 4.14. | PETG malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                | 60 |
| Şekil 4.15. | ABS malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli.....                | 61 |
| Şekil 4.16. | ABS malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği.....                                                                  | 62 |
| Şekil 4.17. | PLA malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli.....                | 63 |
| Şekil 4.18. | PLA malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği.....                                                                  | 64 |
| Şekil 4.19. | CF15PET malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli.....            | 65 |
| Şekil 4.20. | CF15PET malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                             | 66 |
| Şekil 4.21. | PETG malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> simülasyon sonrası görsel .....                                              | 67 |
| Şekil 4.22. | PETG malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                | 68 |
| Şekil 4.23. | Çarpışma kutusu optimizasyon bölgeleri .....                                                                                                                    | 69 |
| Şekil 4.24. | $\pm 90^\circ$ Cam fiber kompozit çarpışma kutuları <b>(a)</b> boş, <b>(b)</b> ABS çarpışma kutusu takviyeli, <b>(c)</b> PLA çarpışma kutusu takviyeli.....     | 72 |
| Şekil 4.25. | $\pm 45^\circ$ Cam fiber kompozit çarpışma kutuları <b>(a)</b> boş, <b>(b)</b> ABS çarpışma kutusu takviyeli, <b>(c)</b> PLA çarpışma kutusu takviyeli.....     | 73 |
| Şekil 4.26. | $\pm 90^\circ$ Karbon fiber kompozit çarpışma kutuları <b>(a)</b> boş, <b>(b)</b> ABS çarpışma kutusu takviyeli, <b>(c)</b> PLA çarpışma kutusu takviyeli ..... | 73 |
| Şekil 4.27. | $\pm 45^\circ$ Karbon fiber kompozit çarpışma kutuları <b>(a)</b> boş, <b>(b)</b> ABS çarpışma kutusu takviyeli, <b>(c)</b> PLA çarpışma kutusu takviyeli ..... | 73 |
| Şekil 4.28. | Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması .....                                                                                                                   | 75 |
| Şekil 4.29. | G1 kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli .....                                | 76 |
| Şekil 4.30. | G1 çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                          | 76 |
| Şekil 4.31. | G1A kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli .....                               | 78 |
| Şekil 4.32. | G1A çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                         | 78 |
| Şekil 4.33. | G1P kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli .....                               | 80 |
| Şekil 4.34. | G1P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-                                                                                                     |    |

|             |                                                                                                                                                                                                |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | yer değiştirme grafiği .....                                                                                                                                                                   | 80  |
| şekil 4.35. | G2 kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görsel .....                                                                | 81  |
| şekil 4.36. | G2 arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                         | 82  |
| şekil 4.37. | G2A kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli .....                                                                                   | 83  |
| şekil 4.38. | G2A arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                        | 84  |
| şekil 4.39. | G2P kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli .....                                                              | 85  |
| şekil 4.40. | G2P arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                        | 86  |
| şekil 4.41. | C1 kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli .....                                                               | 87  |
| şekil 4.42. | C1 arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                         | 88  |
| şekil 4.43. | C1A kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görsel .....                                                               | 89  |
| şekil 4.44. | C1A arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                        | 90  |
| şekil 4.45. | C1P kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli .....                                                              | 91  |
| şekil 4.46. | C1P arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                        | 92  |
| şekil 4.47. | C2 kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görsel .....                                                                | 93  |
| şekil 4.48. | C2 arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                         | 94  |
| şekil 4.49. | C2A kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görsel .....                                                               | 95  |
| şekil 4.50. | C2A arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                        | 96  |
| şekil 4.51. | C2P kompozit çarpışma kutusu <b>(a)</b> test görseli, <b>(b)</b> test sonrası görsel, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görseli .....                                                              | 98  |
| şekil 4.52. | C2P arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                                                                                                        | 98  |
| şekil 4.53. | Kafes yapıların geometrik şekilleri <b>(a)</b> silindir yüzey merkezli, <b>(b)</b> silindir hacim merkezli, <b>(c)</b> kare yüzey merkezli, <b>(d)</b> kare hacim merkezli kafes yapılar ..... | 100 |
| şekil 4.54. | Kafes yapıların üretilmesi .....                                                                                                                                                               | 100 |
| şekil 4.55. | Kare geometrili hibrit yan kapı barlarının görselleri .....                                                                                                                                    | 101 |
| şekil 4.56. | Silindir geometrili hibrit yan kapı barlarının görselleri .....                                                                                                                                | 101 |
| şekil 4.57. | Yarı montajlı farklı geometrili kafes yapıları .....                                                                                                                                           | 102 |
| şekil 4.58. | Takviyesiz ve kafes yapı takviyeli yan kapı barlarının simülasyon görselleri.....                                                                                                              | 103 |
| şekil 4.59. | Takviyesiz ve kafes yapı takviyeli yan kapı barlarının üç nokta eğme test görseli .....                                                                                                        | 104 |

|             |                                                                                                                                                      |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.60. | K yan kapı barı <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....              | 106 |
| Şekil 4.61. | KVA kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 107 |
| Şekil 4.62. | KVP kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 109 |
| Şekil 4.63. | KVC kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntüsü ..... | 110 |
| Şekil 4.64. | KYA kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 112 |
| Şekil 4.65. | KYP kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntüsü ..... | 114 |
| Şekil 4.66. | KYC kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 115 |
| Şekil 4.67. | S kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....     | 117 |
| Şekil 4.68. | SVA kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 118 |
| Şekil 4.69. | SVP kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 120 |
| Şekil 4.70. | SVC kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 122 |
| Şekil 4.71. | SYA kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 123 |
| Şekil 4.72. | SYV kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 124 |
| Şekil 4.73. | SYC kodlu yan kapı barının <b>(a)</b> kuvvet- yer değiştirme grafiği, <b>(b)</b> test sonrası görüntü, <b>(c)</b> simülasyon sonrası görüntü .....   | 126 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                   | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tablo 3.1. Filamentlerin mekanik özellikleri .....                                | 33    |
| Tablo 3.2. Test numunesi üretim parametreleri .....                               | 34    |
| Tablo 3.3. Kullanılan lifler ve matris malzemesinin mekanik özellikleri.          | 43    |
| Tablo 3.4. Kompozit yapıların mekanik özellikleri .....                           | 44    |
| Tablo 4.1. Yüksek hızlı çekme sonuçları .....                                     | 46    |
| Tablo 4.2. Izod darbe testi sonuçları .....                                       | 49    |
| Tablo 4.3. Çekme yönüne dikey ve yatay yönlerde yüzey pürüzlülüğü.                | 50    |
| Tablo 4.4. ABS malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları .....         | 55    |
| Tablo 4.5. PLA malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları .....         | 57    |
| Tablo 4.6. CF15PET malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları .....     | 59    |
| Tablo 4.7. PETG malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları .....        | 61    |
| Tablo 4.8. ABS malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları .....         | 63    |
| Tablo 4.9. PLA malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları .....         | 65    |
| Tablo 4.10. CF15PET malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları .....    | 67    |
| Tablo 4.11. PETG malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları .....       | 68    |
| Tablo 4.12. Optimize edilecek bölgelerin alt ve üst sınır değerleri .....         | 69    |
| Tablo 4.13. Optimizasyon sonrası tasarım ölçüleri .....                           | 71    |
| Tablo 4.14. Çarpışma kutularının hibritleştirilmesi ve kodları .....              | 72    |
| Tablo 4.15. Sonlu elamanlar yönteminde kullanılan malzeme özellikleri.            | 74    |
| Tablo 4.16. G1 çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi .....  | 77    |
| Tablo 4.17. G1A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi ..... | 79    |
| Tablo 4.18. G1P çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi ..... | 81    |
| Tablo 4.19. G2 çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi .....  | 83    |
| Tablo 4.20. G2A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi ..... | 85    |
| Tablo 4.21. G2P çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi ..... | 86    |
| Tablo 4.22. C1 çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi .....  | 87    |
| Tablo 4.23. C1A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi ..... | 90    |
| Tablo 4.24. C1P çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi ..... | 93    |

|             |                                                                        |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 4.25. | C2 çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi .....   | 95  |
| Tablo 4.26. | C2A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi .....  | 97  |
| Tablo 4.27. | C2P çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi .....  | 99  |
| Tablo 4.28. | Alüminyum 6063 malzeme özelliği (Koloushani vd., 2024)                 | 103 |
| Tablo 4.29. | Alüminyum 6063 gerilme- gerinim değerleri (Koloushani vd., 2024) ..... | 103 |
| Tablo 4.30. | Yan kapı barlarının takviyelendirilmesi ve kodlanması .....            | 105 |
| Tablo 4.31. | K kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler .....       | 106 |
| Tablo 4.32. | KVA kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler .         | 108 |
| Tablo 4.33. | KVP kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....      | 109 |
| Tablo 4.34. | KVC kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler .         | 111 |
| Tablo 4.35. | KYA kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler..         | 113 |
| Tablo 4.36. | KYP kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....      | 114 |
| Tablo 4.37. | KYC kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler..         | 116 |
| Tablo 4.38. | S kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....        | 117 |
| Tablo 4.39. | SVA kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....      | 119 |
| Tablo 4.40. | SVP kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....      | 121 |
| Tablo 4.41. | SVC kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....      | 122 |
| Tablo 4.42. | SYA kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....      | 124 |
| Tablo 4.43. | SYP kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....      | 125 |
| Tablo 4.44. | SYC kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler.....      | 126 |

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda, otomotiv endüstrilerinin ulaştığı yüksek üretim kapasitelerine bağlı olarak trafikte bulunan araç sayısında artış meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak da trafikte meydana gelen kaza oranlarında yükselme olmuştur. Ulaşımda meydana gelen kazalar incelendiğinde bunların %11,7'si arkadan çarpma, %7,38'si iki aracın karşılıklı çarpıştıkları, %1,9'u duran araca çarpma olarak gerçekleşmektedir. Veriler incelendiğinde arkadan ve karşılıklı çarpışma oranlarının oldukça yüksek olduğundan dolayı otomotiv endüstrileri kaza anında meydana gelen enerjinin emilimi ve buna bağlı olarak da yolcu güvenliğinin sağlanması amacıyla enerji emici yapılar üzerinde birçok çalışma yapmaktadır(Xie vd., 2022). Otomobillerde var olan enerji emici yapılar alüminyum, çelik ve alaşımlı çelik gibi birçok geleneksel malzemelerden üretilmektedir(van Mierlo vd., 2022). Ancak son yıllarda yaşanan enerji krizinden dolayı otomobiller kullanılan yakıtların maksimum verim ile kullanılması ve maksimum menzil mesafesinin arttırılmak amaçlanmaya başlamıştır(Vu vd., 2022). Otomobillerin var olan yakıt ile menzil mesafelerinin uzatmak amacıyla yapılan en önemli çalışmalardan biriside araçların ağırlığı azaltmaktadır(Doğru, 2019). Bundan dolayı gelişen teknik tekstiller sayesinde kompozit malzemelerin üretiminde artış gerçekleşmiş ve kullanım alanı oldukça genişlemeye başlamıştır(X. Liu vd., 2024).

Kompozit malzemeler sahip oldukları üstün mukavemet ve hafifliklerinden dolayı otomotiv, uzay-havacılık ve savunma sanayisi gibi birçok alanda oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır(Umair vd., 2018). Otomotiv endüstrisinde kompozit malzemeler kaputu takviye etmek, jantlar, şasi güçlendirme, yan kapı barları ve çarpışma kutuları gibi alanda kullanılması günden güne artış göstermektedir (Alimirzaei vd., 2023). Özellikle karbon ve cam fiberlerin sahip oldukları üstün mukavemet ve yüksek darbe dayanımına sahip olduklarından dolayı geleneksel malzemelere alternatif malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır(Obradovic vd., 2012). Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin çeşitlenmesine bağlı olarak karmaşık geometrili yapılarında üretiminde umut verici gelişmeler meydana gelmektedir.

Tez kapsamında, özgün değere sahip olan iki farklı çok hücreli çarpışma kutuları eklemeli imalat yöntemi kullanılarak polilaktik asit (PLA), Akrilonitril bütadien stiren (ABS), polietilen tereftalat (PETG) ve %15 kısa karbon elyaf katkılı polietilen tereftalat (CF15PET) filamentler kullanılarak eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan eriyik biriktirme yöntemi kullanılarak üç boyutlu yazıcılar ile üretilmiştir. Üretilen tüm çarpışma kutularının enerji emilim değerlerinin belirlenmesi amacıyla düşey darbe testi işe 2 kJ enerji düşürme yapılarak testler yapılmış ve çarpışma performansları incelenmiştir. Yapılan tüm testler sonlu elemanlar programı kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra özgül enerji emilimi en yüksek olan iki model genetik algoritma (GA) kullanılarak maksimum özgül enerji emilimi ve minimum ağırlığa sahip olacak şekilde optimizasyonları yapılmış ve yeni modeller belirlenen ölçülerde tekrar üretilmiştir. Yeni modellerin enerji emilim performanslarının geliştirilmesi amacıyla  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$  sarım açıları filament sarma yöntemi kullanılarak üretilen cam ve karbon kompozit çarpışmaları ile hibrit yapı oluşturulmuştur. Hibrit yapı çarpışma kutularının enerji emilim performanslarının incelenmesi amacıyla düşey darbe testinde 4 kJ enerji düşürme yapılarak performansları üretilmiştir.

Elde edilen veriler sonucunda plastik malzeme malzemeler ile üretilen çarpışma kutularının düşük hızlarda kullanılabileceği ancak yüksek hızlarda yetersiz kalabileceği düşünülmektedir. Ancak plastik çok hücreli yapılar kompozit malzemeler ile hibrit yapı oluşturulduğunda yüksek enerji emilimi değerine ulaşabileceği düşünülmektedir. Buna bağlı olarak kompozit veya hibrit kompozit çarpışma kutularının üretilmesinde geleneksel malzemelere alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca tez kapsamında, hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik kafes yapılar bilgisayar destekli tasarım programları kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan farklı iki tip kafes yapı eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan ergime biriktirme yöntemi kullanılarak ABS, PLA ve CF15PET malzemeler kullanılarak birbiri üçer adet olacak şekilde üretilmiştir. Üretilen kafes yapılar alüminyum 6063 tipi kare ve silindirik profil içerisine sıkı geçme olacak şekilde montajlanarak hibrit yapılar elde edilmiştir. Hibrit yapıların enerji emilim performanslarını hesaplamak amacıyla yarı statik olarak üç

nokta eğme testleri gerçekleştirilmiş ve sonlu elamanlar programı kullanılarak doğrulama yapılmıştır.



## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Kaynak Araştırması

Bu bölümde tez konusu olan çarpışma kutuları ve yan kapı barları ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelenmiştir.

Kim H. C. vd. (2014), yapmış oldukları çalışmalarda karbon fiber takviyeli içi boş alüminyum kirişlerin çarpışma dayanıklılıklarını incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmalarda  $0^\circ$ ,  $0-90^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  istifleme açısında çarpışma kutuları üreterek otomotiv gövdesi çarpışma testine benzer sınır koşulları oluşturularak testler yaparak istifleme açılarının etkisini kıyaslamışlardır. Sonuç olarak  $0-90^\circ$  istifleme açısına sahip olan çarpışma kutularının özgül enerji emilimi ve ezilme verimliliğini sırasıyla %38 ve %30 oranında iyileşme meydana geldiğini belirlemişlerdir (Kim vd., 2014).

Costas M. vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada karbon fiber takviyeli polimer, cam elyaf takviyeli poliamid, polietilen tereftalat köpük ve mantar şekilli çelikleri hibrit yaparak çarpışma kutularının önden çarpışma dayanıklılığını karşılaştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada takviye malzemelerini çarpışma kutularının iç kısımlarına yerleştirerek testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda cam elyaf takviyeli poliamid dolgu ile çelik çarpışma kutusunun en iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir (Costas vd., 2013).

Quanjing MA. vd. (2019), yapmış oldukları çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile PLA malzemeli çarpışma kutularının duvarlarını üçgen, kare, altıgen ve dörtgenli olarak üretmişlerdir. Üretilen çarpışma kutuları filament sarma yöntemi kullanılarak karbon fiber kompozitler ile hibrit yapı oluşturmuşlardır. Burada PLA malzemeli çarpışma kutularını duvar örgü desenlerinin enerji emilimi üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak PLA çarpışma kutusu takviyeli kompozit çarpışma kutularının takviyesiz kompozit çarpışma kutusuna göre daha iyi enerji emilimi sağladığını ifade etmişlerdir. Dolgu deseni olarak ise altıgen desenli PLA çarpışma kutusu takviyeli çarpışma

kutusunun diğerlerine göre yüksek enerji emilimi ve basınç dayanımına sahip olduğunu ifade etmişlerdir (M. A. Quanjin vd., 2019).

Ghasemnejaf H. vd. (2009), istifleme açısının çarpışma kutularının verimliliğini incelemek amacıyla ( $\pm 60^\circ$ ), ( $0^\circ_2/\pm 45^\circ$ ), ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ) ve simetrik ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ) istifleme açılarına sahip olan cam fiber takviyeli çarpışma kutularını üretmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda istifleme açılarının liflerin birbirleri arasında yapışmasında etkili olduğunu ve bunda çarpışma kutularının enerji emilim değerleri üzerinde etkisinin olduğunu olduğu belirtmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda ( $0^\circ_2/\pm 45^\circ$ ) istifleme açılarına sahip olan çarpışma kutularının daha yüksek enerji emilimine sahip olduğunu ifade etmişlerdir(Ghasemnejad vd., 2009).

O'Neil J. vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada üç farklı geometrili ve Kresling katlanma deşesine sahip olan çarpışma kutularını karbon fiberler kullanarak filament sarma yöntemi ile takviye ederek yarı statik testler gerçekleştirmişlerdir. Testler sonucunda elde edilen verileri, silindir ve kare geometrili geleneksel borularla kıyaslamışlardır. Yapılan yarı statik testler sonucunda Kresling katman desenli yapıların, kare ve silindirik yapılara göre daha az enerji emilimi ve maksimum kuvvet değerlerine sahip olduklarını ifade etmişlerdir(O'Neil vd., 2023).

Ciampaglia A. vd. (2024), yapmış oldukları çalışmada origami şeklindeki reçine transfer metodu ile karbon fiber kumaşlar ile üretmişlerdir. Kompozit origami çarpışma kutularının üretiminde 3, 6 ve 9 katlı olarak gerçekleştirerek kalınlığın etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda çarpışma kutularının kalınlığının artmasına bağlı olarak enerji emiliminin artmasının yanı sıra ağırlık azaltma işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca çalışma sonucunda ağırlığın %14 ve maksimum yavaşlamanın %21 oranında azaldığını ifade etmişlerdir(Ciampaglia vd., 2024).

Erkek B. vd. (2024), yapmış oldukları çalışmada cam (S1), aramid (S2), karbon (S3), hibrit aramid-karbon-cam (S4), karbon-cam-aramid (S5) ve cam-aramid-karbon (S6) kompozit çarpışma kutularını vakum infüzyon yöntemi kullanarak üretmişlerdir. Daha

sonra yarı statik basma testi yapılarak çarpışma kutularının maksimum kuvvet ve özgül enerji emilimi değerlerini karşılaştırmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde S3 tipli çarpışma kutularının en yüksek enerji emilimi değerine sahip olduğu, en düşük olanın ise S2 olduğunu belirlemişlerdir. Hibrit çarpışma kutularının ise en yüksek enerji emilimine sahip olan çarpışma kutusunun S5 olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak hibrit çarpışma kutularının istifleme sırasının çarpışma kutularının enerji emilim performanslarını etkilediğini belirtmişlerdir(Erkek vd., 2024).

Jiang Z. vd. (2024), yapmış oldukları çalışmada eksenel yük altında enerji emilimi değerleri korunurken maksimum kuvveti düşürmek amacıyla dairesel boru ve origami borudan oluşan (VTCO-ETCO) ve değişken kalınlara sahip olan iç içe geçmiş boru tasarlamışlardır. Tasarlanan yapılar üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak kısa karbon elyaf katkılı naylon filamentler kullanarak üretmişlerdir. Yapılan testler sonucunda ETCO tasarımının VTCO'dan daha iyi sonuç gösterdiğini ifade etmişlerdir. Daha da iyileştirilen VTCO çarpışma kutularında maksimum kuvvet %53 oranında azalmış ve çarpışma verimliliğinin %54 oranında iyileştiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak tasarlanan yapıların birbirleri içerisinde konumlandırılmasının çarpışma kutularının performans değerlerine etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir(Jiang vd., 2024).

Sadighi A. vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada oluklu kompozit çarpışma kutularını filament sarma yöntemi ile üretmişlerdir. Kompozit çarpışma kutuları üretiminde ilk olarak oluklu yapı elde etmek amacıyla ABS, bal mumu ile doldurmuşlardır. Daha sonra üretilen oluklu yapı üzerine filament sarma kullanarak karbon fiber lif kullanılarak sarım yapmışlardır. Üretimden sonra iç kısımda bulunan bal mumu eritilerek kompozit çarpışma kutularının üretimini tamamlamışlardır. Burada çarpışma kutuları konik ve silindirik 12 oluklu yapı olarak kompozit çarpışma kutuları üretmişlerdir. Kompozit çarpışma kutularının üretilmesinden sonra çarpışma kutularının performanslarını incelemek amacıyla yarı statik testleri yapılarak simülasyon sonuçları ile incelemişlerdir. Yapılan test sonucunda konik çarpışma kutularının silindirik çarpışma kutularına göre daha yüksek enerji emilimine sahip oldukları ve daha yüksek çarpışma dayanıklılığı sağladığını belirlemişlerdir. Çalışmada test sonrasında konik çarpışma kutularının özgül enerji emilimi değerinin 12,37 kJ/kg, silindirik kompozit

Çarpışma kutularının ise 8,38 kJ/kg olarak hesaplamışlardır. Ayrıca 12 olan oluk sayısının 18'e çıkarılmasıyla özgül enerji emilimi değerlerinin silindirik modellerde 12,43 kJ/kg olduğu konik modellerde ise 13,03 kJ/kg olarak gerçekleştiğini ifade etmişlerdir(Sadighi & Asgari, 2023).

Hussain N. N. vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada cam elyaf katkılı kare, silindir, altıgen ve ongen çarpışma kutularını üretmişlerdir. Üretilen  arpışma kutularının çarpışma kutularının performanslarını incelemek amacıyla düşey darbe testlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan düşey darbe testi sonrasında ongen çarpışma kutularının en yüksek özgül enerji emiliminin en yüksek olduğu, en düşük özgül enerji emilimine sahip olan çarpışma kutusunun ise kare çarpışma kutularının olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak çarpışma kutularının geometrik tasarımlarının özgül enerji emilimi üzerine etkisinin olduklarını ifade etmişlerdir(Hussain vd., 2022).

Sun G. vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada filament sarma yöntemi kullanılarak kaplanmış karbon fiber boru ve alüminyum/karbon borularının çarpışma dayanıklılığını incelemek amacıyla sarım açılarını 25 , 50 , 75 , 90  ve 0  a ılar ile üretimlerini 3-6-9 kat olacak şekilde gerçekleştirmişlerdir. Çarpışma kutularının üretilmesinden sonra kompozit ve alüminyum/kompozit hibrit yapısının etkileşimi belirlemek amacıyla yarı statik basma testleri yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda hem sarma açısının hem de kompozit kalınlıklarının enerji emilim değerlerine etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca aynı kalınlıklarda olan kompozitlerin sarım açılarının farklılığının enerji emilimi, maksimum kuvvet, özgül enerji emilimi değerlerine etkisini olduğu ifade etmişlerdir. Çalışma sonucunda 25  sarım açısına sahip olan 9 katlı kompozitlerin ve hibrit yapıların spesifik enerji emilimi en yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca hibrit yapılı çarpışma kutusunun alüminyum ve kompozitin etkileşimi sayesinde çarpışma dayanıklılığının arttığını ifade etmişlerdir(Sun vd., 2018).

Zarei H. vd. (2008), yapmış oldukları çalışmada cam fiber takviyeli poliamid kumaşları kullanarak kare ve ongen çarpışma kutularını termoform ve eritme ile üretmişlerdir.  retimden ardından çarpışma kutularının enerji emilim performanslarını incelemek amacıyla düşey darbe test cihazı ile testlerini yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda

kare geometrili kompozit çarpışma kutularının ongen kompozit çarpışma kutularından daha yüksek enerji emilimine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca testler sonlu elamanlar yöntemi ile validasyonlarını yapmışlardır. Validasyon sonrasında test ile simölasyon sonuçları arasında kare çarpışma kutularında yaklaşık olarak %17, ongen çarpışma kutularında ise %23 oranında sapma gerçekleştiğini ifade etmişlerdir(Zarei vd., 2008).

Ciampaglia A. vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada kare ve origami şeklinde tasarlamış oldukları altlıklar üzerine prepreg karbon kumaşlar kullanarak çarpışma kutularını üretmişlerdir. Daha sonra çarpışma kutuları vakum torbalama ile kürlenmeleri sağlanmıştır. Kara ve origami çarpışma kutularını ürettikten sonra yarı statik basma testi yaparak enerji ve maksimum kuvvet noktalarını incelemişlerdir. Test sonrasında sonrasında da kare kompozit çarpışma kutularının daha yüksek enerji emilimine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Testlerden sonra origami çarpışma kutusunun belirlenen kısıtlar çerçevesinde optimizasyonlarını yapmışlardır. Optimizasyon sonrasında origami kompozit çarpışma kutularının, kare çarpışma kutularının enerji emilimini geçtiğini ifade etmişlerdir(Ciampaglia vd., 2021).

Quanjin M. vd. (2020), yapmış oldukları çalışmada karbon-aramid hibrit kumaşları kullanarak el yatırması yöntemi kullanarak kare geometrili çarpışma kutularını üretmişlerdir. Üretimden sonra çarpışma kutularının enerji emilim değerlerinin belirlenmesi amacıyla yarı statik basma testi yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda kompozit çarpışma kutularının 57,94 j enerji emilimi sağladığı, özėöl enerji emiliminin 0.72 kJ/kg olduğu maksimum kuvvet dayanımının 62,46 kN olduğunu ve hibrit yapının alüminyum veya elik yerine kullanılabilirliğinde potansiyele sahip olduğunu ifade etmişlerdir(M. Quanjin vd., 2020).

Xing S. vd. (2025), yapmış oldukları çalışmada kısa karbon elyaf katkılı filamentler kullanarak üç boyutlu yazıcı ile origami şekle sahip olan çarpışma kutularının iç kısımlarına belirlenen boyutlarda üretilmiş ve konumlandırılmış farklı çarpışma kutularını üretmişlerdir. Üretilen arpışma kutuları yarı statik basma testi yapılarak enerji emilim performansları incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda origami şekilli

takviyesiz çarpışma kutusuna göre diğeri tasarımı enerji emiliminin %40 oranında iyileşme sağladığı ve çarpışma verimliliğinde %50 artış meydana geldiğini belirlemiştir. Ayrıca tüm çarpışma kutularında maksimum kuvvet değerinin değişmediğini ifade etmişlerdir(Xing vd., 2025).

Fu X. vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada naylon filamentler kullanarak kare geometrili çok hücreli çarpışma kutularını üretmişlerdir. Üretilen arpışma kutuları alüminyum içerine ve düz dolgu halinde bulunan naylon kare çarpışma kutusu ise alüminyumun dış kısmına takviye etmişlerdir. Çarpışma kutularının yarı statik basma testi enerji emilim performansları incelemişlerdir. Testler sonucunda naylon malzemeli çok hücreli çarpışma kutusunun iç kısmında bulunduğunda özgül enerji emiliminin diğerlerine göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir(Fu vd., 2021).

Zakki A. F. vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada cam fiber kumaşlar kullanarak epoksi takviyeli kare kompozit çarpışma kutuları üretmişlerdir. Üretilen arpışma kutularının iç kısımlarına enerji emilim değerlerine etkisinin arttırılması amacıyla kare, bal peteği ve üçgen enerji emici ile takviye yapmışlardır. Daha sonra üretilen çarpışma kutuları dinamik darbe testleri yaparak enerji emilimi değerleri belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda kare yapı takviyeli çarpışma kutusunun diğerlerine göre daha yüksek enerji emilimi sağladığını ifade etmişlerdir(Zakki & Windyandari, 2023).

Huang Z. vd. (2019), yapmış oldukları çalışmada boş, iki ve dört hücreli alüminyum çarpışma kutularını üretmişlerdir daha sonra tüm yapılar karbon fiber kumaşlar kullanılarak takviye edilerek enerji emilim değerleri belirlenmiştir. Yapılan testler sonucunda boş alüminyumun en düşük enerji emilimine sahip olduğu, en yüksek enerji emilimine ise kompozit takviyeli dört hücreli alüminyum çarpışma kutusunun olduğunu belirlemiştir. Çalışmanın sonucunda kompozit takviyesinin ve hücre sayısının enerji emilimi değerleri üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir(Huang vd., 2019).

Fang J. vd. (2015), yapmış oldukları çalışmada 75\*75\*200mm ölçülerinde bulunan kare alüminyum çarpışma kutusunun dört köşesine 25\*25\*200 mm ölçülerinde bulunan alüminyum ile takviye etmiştir. Daha sonra çarpışma kutularının enerji emilimi

performanslarını düşey darbe testi ile belirlemiştir. Yapılan çalışmada sonucunda hücre sayısının ve konumunun enerji emilimi performansına etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir. Test ve simülasyondan alınan veriler doğrultusunda multiobjective parçacık sürü optimizasyonu ile optimizasyonları yapılarak çarpışma kutularının enerji emilimini arttırmışlardır(Fang vd., 2015).

Yin F. vd. (2022) yapmış oldukları çalışmalarında, düz kabuklu kafes dolgulu yapıların eğilme dayanımını deneyler ve nümerik simülasyonlar ile incelenmişlerdir. Çalışmada üç tip TPMS tabanlı düz kabuk kafesi dikkate alınmıştır. Kafes kabuk kalınlığı, birim hücre boyutu ve tüp kalınlığı gibi tasarım parametrelerinin çarpışmaya dayanıklılık üzerindeki etkisi incelenmiştir. Düz kabuk kafes dolgulu yapının optimal tasarımını elde etmek için, PRS metamodeli ve NSGA-II kullanmışlardır ve optimizasyon hedefleri olarak tepe kırma kuvveti (PCF) ve spesifik enerji emilimi (SEA) seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, düz kabuklu kafes dolgulu yapıların aynı ağırlık altında geleneksel köpük dolgulu yapılara göre daha yüksek bükülme ve çarpışma dayanımına sahip olduğunu tespit etmişlerdir(Yin vd., 2022).

He W. vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada, PLA malzemeden çentikli üç nokta eğme numuneleri, FDM yöntemi kullanılarak üretmişlerdir ve octet-truss kafes yapıların kırılma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Numunelerin etkili kırılma tokluğunu hesaplamak için J-integral yöntemi kullanılmışlardır ve çentiğin kırılma tokluğu üzerindeki etkisini dikkate almışlardır. Ayrıca kafes yapıların kırılma davranışını daha iyi analiz etmek için simüle etmişlerdir ve deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır. Elde edilen deney ve simülasyon sonuçlarına göre, düğümlerin numunelerdeki kırılmanın temel sebebi olduğunu tespit etmişlerdir. XZ düzlemindeki kafes kiriş her zaman XY düzleminden önce kırılırken, YZ düzlemindeki kafes kirişin deformasyonu her zaman elastik olduğunu ifade etmişlerdir(He vd., 2023).

Tunay M. (2024) yapmış olduğu çalışmada, dairesel, kare, üçgen, altıgen çekirdek geometrileri kullanılarak tasarlanan 4 farklı sandviç yapının enerji emme kapasitelerini farklı termal yaşlanma süreleri altında deneysel olarak incelemişlerdir. Bu yapılar PLA malzeme kullanılarak FDM yöntemi ile üretilmiştir. Termal yaşlandırma süresi için

çevre koşullarında 0, 15, 30 ve 45 gün dikkate alınmıştır. Farklı çekirdek geometrilere sahip sandviç yapıların enerji emme davranışlarını incelemek için yarı statik üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlarda çekirdek topolojisinin sandviç yapıların enerji emme yeteneklerini önemli ölçüde etkilediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, termal yaşlanmanın yaşlı numuneler üzerindeki etkisi hakkında daha derin bilgiler elde etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanmışlardır(Tunay, 2024).

Ghannadpour S. A. M. vd. (2022) yapmış oldukları çalışmada, kafes çekirdekli sandviç kirişlerin üç noktalı eğilme ve basınç tepkilerini incelemek için kullanılan 10 dikme tabanlı topolojiyi tanıtmayı amaçlamışlardır. Çalışmada dijital ışık işleme (DLP) 3D teknolojisi kullanılarak numuneler seramik reçineden üretilmiştir. Üretilen numunelerin deneysel ve nümerik analizleri gerçekleştirilerek mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre, Yıldız ve Elmas yapıları yaklaşık olarak 458 N ve 450 N maksimum eğilme ve basma dayanımına sahip olduğu görülürken, Izgara ve Petek yapılar sırasıyla 119 N ve 162 N minimum eğilme ve basma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel sonuçları doğrulamak için, sonlu elemanlar metodu kullanılarak 10 yapı simüle edilmiştir. Elde edilen bütün sonuçlar karşılaştırılmıştır ve Grid gibi bazı yapıların, üç nokta eğilme testi sonucunda zayıf olduğu görülürken, bası testinde daha iyi olduğu görülmüştür. Star ve Diamond yapıların daha yüksek rijitliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu yapıların basınç ve eğilme altındaki sandviçlere göre daha iyi olduklarını belirlemişlerdir(Ghannadpour vd., 2022).

Liu Z. vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, metal-polimer malzemeli 2B (Bi-grid, Tri-grid, Quadri-grid ve Kagome-grid) ve 3B (yüzey merkezli kübik benzeri ve gövde merkezli kübik benzeri) geometrileri eklemeli imalat yöntemi kullanarak üretmişlerdir. Üretilen kafes yapıların alt ve üst yüzeyleri metal malzemeler ile takviye edilmiştir. Oluşturulan hibrit yapılar üç nokta eğme testi enerji emilim değerleri belirlemişlerdir. Yapılan test sonucunda hacim merkezli kübik yapılarla metal malzemenin hibritleşmesi sonucu oluşturulan yapının diğer kafes yapılara göre daha yüksek enerji emilimine sahip olduğunu belirlemişlerdir(Z. Liu vd., 2020).

## **2.2. Kuramsal Temeller**

### **2.2.1. Kompozit Malzemeler**

Kompozit malzemeler kısaca iki farklı malzemenin bir araya gelerek oluşan yeni malzeme olarak tanımlanır(Taşdelen vd., 2016). Farklı bir deyişle birbirleri ile aynı özelliklere sahip olmayan iki farklı malzemenin bir ara yüzeyde birleştirilmesi sonucu oluşan yeni malzemeye kompozit malzeme denir(Stabla vd., 2021).

İlk çağlarda insanlar genel olarak çevrelerinde bulunan çeşitli araçları doğada ki hallerini bozmadan, ihtiyaçları doğrultusunda değişiklikler yaparak ihtiyaçları kapsamında kullanılabilir araç – gereçler üretmişlerdir. Buna örnek olarak insanlığın ilk yıllarında yaşam alanı inşaatında kullandıkları kerpiç evler, günümüzde çelik ve beton gibi kompozitlere dönüşmüştür(Hu vd., 2015).

Ancak 1940'lı yıllarda Amerikalı bilim adamlarının cam elyafı keşfettikten sonra kompozit malzemelere yeni bir bakış açısı gelmiştir(Mansour vd., 2016). Bu keşif sayesinde ileri ve yenilikçi kompozit malzemeler dünya piyasasına girmiştir(Zhang vd., 2013). Cam fiberler, reçineleri ile birleştirilerek yeni kompozit yapılar oluşturulmuştur(Zhang vd., 2013). Oluşturulan bu kompozit yapılar yüksek mukavemet değerlerine ve ileri sızdırmazlık özelliğinden dolayı tekne, su deposu ve izolasyon gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemeler geleneksel malzemelere bağlı olarak birçok açıdan üstün özellik göstermektedir(Zhang vd., 2013).

Matris malzemesine göre kompozit yapılar üretim yöntemi ve kullanım alanlarına göre üç farklı gruba ayrılırlar. Bu grup içerisinde metalik, polimerik ve seramik kompozitler yer alır(Beylergil, 2021). Üç farklı grup birbirleri kıyaslandığında polimerik kompozit malzemelerin sahip oldukları rijitlik ve özgül dayanımları metalik kompozitlere göre daha zayıf kalmaktadır. Seramik kompozitler ile metalik kompozitler kıyaslandığında ise sürtünme direnci, aşınmaya karşı dayanıklılık ve tokluk açısından seramik malzemeler daha güçlüdür(Rafiee vd., 2022). Ancak seramik malzemelerin sahip

oldukları yüksek kırılgenlik değeri ve şekil değışimi miktarı az olması, seramik malzemelerin kullanım alanını oldukça kısıtlamaktadır(Agarwal & Pai, 2022).

Metaller ve alaşımlar genel olarak katı hal olarak üretildikten sonra şekil verilirler. Fakat bazı durumlarda metal yapının mukavemet değerlerinin iyileştirilmesi, kolay işlenebilir olması ve farklı metallerin kolay birleştirilmesi için farklı metaller birleştirilerek metal matrisli kompozit malzemeler oluşturulur. Bir metal ve seramiğin birleştirilmesi sonucunda oluşan metal matrisli kompozitler en yaygın formda bulunan yapılarıdır(Gu vd., 2012).

Metal matrisli kompozitler sahip oldukları yüksek mukavemet, ısı – termal iletkenlik, aşınma ve yorulma dayanımı, korozyon direnci, yüksek sıcaklıklara ulaşıldığında dahi yüksek mukavemet, tokluk ve sahip oldukları düşük yoğunluklarından dolayı otomotiv, uzay ve havacılık gibi üstün performans alanlarında kullanımı oldukça fazladır. Metal matrisli kompozitler ayrıca spor, denizcilik vb. alanlarda oldukça yaygın kullanıma sahip malzemelerdir(Karsli vd., 2012).

Metal matrisli kompozitler, seramik ve plastik matrisli kompozitlere göre daha alev almama, yüksek sıcaklığın olduğu çalışma koşullarında çalışabilme ve organik – inorganik sıvıların etkilerinden daha az etkilenmektedirler. Metal matrisli kompozitlerin sağlamış olduğu avantajlar çok olsa da dezavantajları da vardır. Bunlara örnek olarak maliyetinin yüksek olması, yüzey işlemleri ile giderilebilecek olsa da yüksek sıcaklıklara ulaşıldığında reaktif olması verilebilir(Czigány, 2005).

Seramik matrisli kompozitler, seramik malzemelerin içersine takviye malzemesi veya malzemelerinin yerleştirilmesi sonucu elde edilen kompozitlerdir. Bu kompozit yapı içersinde genellikle takviye malzemesi dağınık olarak konumlanırken, seramik matris sürekli fazda bulunurlar. Dağınık fazda bulunan malzemelere sürekli, kırılmış veya tanecikli lifler örnek verilebilir. Sürekli lifler diğerleri lif çeşitlerine göre daha yüksek performans gösterir. Örneğin yüksek mukavemet sağlama, hasar oluşmasının engellenmesi ve yüksek sıcaklarda dahi çalışabilme ihtimalini artırır(Wang vd., 2021).

Seramik matrisli kompozitlerin üretilmesinde genellikle ileri teknoloji seramik grubu içinde olan  $Al_2O_3$ , SiC,  $Si_3N_4$  ve  $B_4C$  gibi seramik özelliğe sahip olan ve özel işlemlere tabi tutularak üretilen ürünler kullanılırlar. Bu malzemeler aşınma dayanımları, yüksek sıcaklık ve kimyasal ortamın değişiminde hasara uğraması zor olduğundan dolayı tercih edilmektedir. Kompozit malzeme üretiminde sıklıkla kullanılan fiberler, seramik matrisli kompozit malzemelerin ana taşıyıcısı yani malzemenin performansını arttırmada temel yapıdır. Kompozitlerin performansını etkileyen bu liflerin türü, kullanılan hacim oranları ve fiberlerin dokuma türleri kompozitin özelliğini oldukça etkilemektedir(Doungkom vd., 2023).

Polimer matrisli malzemeler adından anlaşılacağı gibi matris malzemesi polimer olan kompozitlerdir. Polimer matrisli kompozitler sahip olduğu düşük yoğunluk değerleri, mukavemet özelliklerinin iyi olması, kolay bir üretim yöntemine sahip olması, korozyona karşı direnç göstermesi, aşınma direnci ve ekonomik olmasından dolayı günümüzde oldukça çok kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin sağladıkları bu avantajlara rağmen elastisite modülünün düşük olması ve karmaşık yapıya sahip olmalarından dolayı kullanım alanı kısıtlıdır. Ayrıca düşük elastik değeri ve direnç değerlerinden dolayı dezavantajlara sahiptir. Polimer matrisli kompozitler içinde bulunan matris malzemesinin cinsine bağlı olarak termoset ve termoplastik olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Her iki grup içerisinde de takviye malzemesi olarak karbon fiber, cam fiber, kevlar fiber ve bor fiberler kullanılmakta olup günümüzde termoplastik malzemeler ile keten, kenevir, sisal vb. doğal liflerde oldukça kullanılmaya başlanmıştır(Lee vd., 2001).

Termoset malzemelerden olan termoset reçineler sıvı halde bulunurlar ve üretim sırasında ilk önce jel formuna dönüşerek daha sonra katılaşır. Bu kompozit türünde genellikle tek yönlü veya dokunmuş kumaşlar kullanılmaktadır. Termoset malzemelerden olan epoksi ve fenolik reçineler yapıları gereği yüksek kompozit üretim anında herhangi bir basınç veya sıcaklığa ihtiyaç gerektirmediğinden dolayı günümüzde oldukça fazla kullanılmaktadır. Ayrıca bu reçinelere ilave kürlenme hızlandırıcılar atılarak kürlenme zamanını düşürmek mümkün hale gelmiştir(Boria vd., 2019).

### 2.2.2. Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler incelendiğinde burada en önemli konu malzeme üzerine etkiyen kuvvet veya kuvvetlerin büyük çoğunluğunun takviye malzemesinin taşıdığıdır. Burada takviye malzemesinin asıl görevi matris malzemesinin rijitliğini arttırmak, sıcaklık dayanımı ve yapının elastisite modülünü arttırmak kısacası kompozitin mukavemetini arttırmaktır(Mohammad, 2010).

Takviye elemanın elyaf olduğu kompozitlere elyaf takviyeli kompozitler denir. Bu tip kompozit malzemeler genel olarak çekme, eğilme, darbe dayanımı, burkulma gibi birçok mekanik özelliğin iyileştirilmesinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde matris malzemesi kompozit malzemede kullanılan elyafları bir arada tutmaktadır. Fiber ve matris malzemesinin birleşmesi ile edilen kompozit yapıda hacimsel oran vardır. Bu hacimsel oranın değişmesi ile birlikte kompozit yapının mekanik özelliklerinde de değişme meydana gelmektedir. Burada elyaf malzemesinin hacimsel oranının artmasına bağlı olarak mekanik özelliklerde iyileşme sağlanacaktır. Ancak elyafın hacimsel oranının çok yüksek seviyelere çıkması durumunda elyafların birbirleri ile iyi tutunamamasından kaynaklı olarak mekanik özelliklerde düşüşün gerçekleşmesi kaçınılmaz bir olaydır(Lau vd., 2020).

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, bir matris malzemesinin içerisine parçacık halinde bulunan takviye malzemesine enjekte edilmesiyle oluşturulan parçalardır. Bu tip malzemeler izotropik yapıdadırlar. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikleri, takviye malzemesi olarak kullanılan parçacığın sertliğine bağlıdır. Parçacık olarak takviye edilecek malzemeler olarak genel olarak metal ve seramik malzemeler kullanılmaktadır. Metal parçacıklar matris ile birleştirilmesi sonucunda kompozit malzemenin ısı ve elektrik iletkenliklerinde iyileştirme yapmaktadır. Seramik malzemeler ise yapının sertliklerini ve sıcaklığa karşı dirençli hale gelmesine sağlarlar(D. Sharma & Hiremath, 2023).

Kompozit malzemelerin çalışma şartları incelendiğinde, kompozit malzeme üzerine etki eden yükler takviye edici ve matris malzemeler arasında yük dağılır. Elyaf takviyeli

malzemelerde yük direk olarak elyaf ve matris malzeme üzerine etki edeceği için daha yüksek mekanik özellik verecektir. Ancak parçacık takviyeli malzemeler, kompozit malzemelerin plastik deformasyonu üzerine etkisi olduğundan dolayı elyaf takviyeli kompozitlere göre mekanik özellikleri daha zayıf kalmaktadır. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler genel olarak malzemenin ısı dayanımı, elektrik direncini iyileştirmek, aşınma dayanımı gibi özelliklerin artırılmasının yanı sıra ayrıca maliyetin azaltılması amacıyla da kullanımı yaygındır(Ivanov vd., 2019).

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen birçok etken vardır. Bunlardan önemlisi parçacıklı halde bulunan yapının boyutları, matris malzeme ile yapışması için yüzey enerjileri, üretim sırasında parçacıkların matris malzeme içerisine homojen dağılması ve eksenel yönelimleri gibi parametreler kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini oldukça etkilemektedir(Ivanov vd., 2019).

Tabakalı kompozit malzemeler, geçmişten günümüze kadar en çok kullanım alanına sahip olan kompozit yapılardır. Elyaf yönlenme açılarının aynı veya farklı olan tabakaların farklı üretim yöntemleri kullanılarak bir araya getirilmesi sonucu oluşturulan yapılardır. Tabakalı kompozit yapılar kolay üretim, düşük maliyet ve sahip olduğu mekanik özellikleri bu yapıları tercih edilebilir kılmaktadır. Ayrıca üretim sırasında farklı takviye malzemelerin eklenmesi ile birlikte kompozitlerin aşınma dayanımı, elektrik iletkenliği ve ısı dayanım gibi özelliklerinde iyileştirmeler yapılmaktadır(A. Sharma vd., 2020).

Karma kompozitler, aynı yapı içerisinde iki ya da daha fazla takviye edici malzemenin bulunması olarak açıklanır. Bu tip kompozitlerde yeni ve istenilen mekanik özelliklerinin elde edilmesinde oldukça basittir. Örnek olarak, kevlar tokluğu ve çekme dayanımı yüksek malzemedir ancak basma dayanımı düşüktür. Kevların kullanılması gereken alanda basma dayanımı yüksek amacıyla grafit malzemenin ikinci mir takviye malzemesi kullanılması sonucu yapının basma dayanımı artar ve isterleri karşılar duruma gelir(Egala vd., 2021).

### 2.2.3. Polimer Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeler

Termoset matris malzemeler kompozit malzemelerin üretiminde en çok kullanılan polimerlerdendir. Termoset malzemeler sıcaklıkla birlikte kürlenmeye başlayan başka deyişle sertleşmeye başlayan malzemelerden olduklarından dolayı soğuk ortamda saklanmaktadır. Bu tip polimer malzemeler kimyasal malzemeler ile tepkime vermediklerinden dolayı uzun ömre sahiptir ve geri dönüşümü olmayan malzemelerdendir. Termoset polimer malzemeler sahip oldukları gevreklik ve yüksek dayanıma sahip olduklarından dolayı otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Termoset polimer malzemelerin günümüzde en çok kullanılan çeşidi polyester, epoksi, vinilester, fenolik ve poliüretan reçinelerdir(Khan vd., 2021).

Polyester reçineler genel olarak cam elyafın takviye malzemesi olarak kullanıldığı kompozitlerin malzemelerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Sıvı halde bulunan polyesterler kompozit malzemelerin üretim sırasında yapının sertleşme (kürlenme) süresini kısaltmak amacıyla sertleştirici kullanılır bu sayede kompozit yapıların üretim süresi kısalrı olur. Polyester reçineler düşük maliyetli, 100 C'nin altında mekanik ve kimyasal yönden iyi bir performans sergilemektedir. Polyester reçinelerin sertleşmeye başlamadan önce viskozitesinde düşüş gerçekleşir. Düşen viskozite sayesinde takviye edici malzemenin ıslanması iyi bir şekilde gerçekleşeceğinden dolayı kompozit malzemenin mekanik özelliğinde iyileşme görülmektedir. Sahip olduğu avantajların yanında polyester reçine kullanılarak üretilen kompozitlerde sertleşme anında çekme meydana gelmektedir. Bu çekmeden dolayı üretilen kompozit malzemeler basma altında burkulmasına neden olabilmektedir. Bundan dolayı basma dayanımı düşük ve düzgün yüzey elde edilmesi zorlaşmaktadır(Boria vd., 2019).

Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok kullanılan reçinelerden olan epoksi reçineler, elyaf ile takviyelendirme yapıldığı zaman iyi bir bileşen oluşturmaktadır. Epoksi reçineler genel olarak karbon fiber veya cam fiberler ile oldukça fazla kullanılmakta ve oda sıcaklığında sertleşmeye başlayan malzemedir. Epoksi reçineler sahip olduğu korozyon direnci, uçucu olmaması, kimyasallara karşı dirençli olması gibi birçok özelliğinden dolayı birçok sektörde oldukça fazla kullanım alanına

sahiptir(Shubhra vd., 2013). Epoksi reçineler tıpkı polyester reçineler gibi hızlı sertleşme sağlanması amacıyla sertleştirici malzeme ile kullanılabilirler.

#### **2.2.4. Polimer Matrisli Kompozitlerin Takviye Malzemeleri**

Matris malzeme içerisinde yer alan elyaflar yapılar kompozit malzeme yapısının temel mukavemet elemanlarından birisidir. Kompozit malzeme yapımında sıklıkla kullanılan bu elyaf yapılar düşük yoğunluğa, yüksek bir elastisite modülüne, sertliği ve kimyasal korozyona oldukça dirençli yapılardır. Günümüzde kompozit malzemelerin üretiminde takviye edici olarak kullanılan bu yapılar üretilen kompozitin şekilsel ve boyutsal ebatlarda farklı farklı elyaflar malzemeler kullanılmaktadır(Azeem vd., 2024).

Bu elyaflar farklı kaynaklardan üretilir ve elyafların sahip olduğu farklı özellikleri ile mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve çeşitli özelliklerine sahip olan kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Günümüzde en eski ve en çok kullanılan elyaflardan birisi cam elyaflardır. Cam elyaflar yeni teknolojiler sayesinde farklı alanlarda kullanılan birçok kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Cam elyaflardan başka günümüzde en çok kullanılan elyaflardan olan bor, karbon, silisyum karbür ve aramidler de kompozit üretiminde kullanılan en önemli elyaflardandır. Günümüzde elyafların çapları eskiye göre daha küçük çaplarda üretilmektedir. Çapların azaltılması sonucunda kompozit üretiminde meydana gelebilecek hatalar, yapısal hatalar en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler(Lang & Radford, 2021).

Cam lifler, İngilizce adıyla fiberglass kompozit malzemelerin temel yapısını oluşturmaktadır. Cam lifler normal şişe camından çok yüksek saflıktaki kuartz camına kadar birçok camdan üretilmektedir. Cam, eriyik halden life dönüşeceğinden dolayı istenilen çaplarla üretilirler. Üretilen cam lifleri hem dış etkilere korumak hem de mekanik özelliklerinin artması amacıyla fiberlerin yüzeyleri çeşitli polimer malzemelerle kaplanır. Cam elyaf yapısı gereği sünek malzemedir ve bu yüzden dolayı elastisite değeri yüksektir. Cam elyaflara bir yük uygulandığında fiberlerde uzama meydana gelir. Kuvvetin cam fiberin üzerinden kalması sonucunda tekrar eski haline gelir. Akma

özelliği göstermediğinden dolayı cam fiberler kullanım alanına bağlı olarak seğıilmektedir. Birim ağırlığa düşen yük bakımından çelik ile kıyaslandığında cam fiberler daha mukavemetlidir. Ayrıca cam fiberler kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin üretiminin kolay olması, düşük maliyetli olması ve nem emilimine karşı dirençli olmasından dolayı oldukça geniş alanda kullanımı vardır. Bu sektörlerle örnek olarak inşaat, havacılık ve otomotiv gibi alanlar örnek verilebilir(Savran & Aydın, 2018).

Karbon elyaflar, cam elyaflara göre daha yüksek mukavemet değerine sahip olan malzemelerdir ve yoğunluğu 2.268 gr/cm<sup>3</sup> olan kristal yapıli malzemelerdir. Karbon elyaflar, cam elyaflardan sonra geliştirilmiş ve günümüzde kompozit yapıların üretilmesinde oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır. Karbon elyaflar genel olarak epoksi ve polyester reçineler ile kullanılmaktadır. Çelik malzemeler ile kıyaslandığında daha yüksek mukavemet değerine sahip, düşük yoğunluğu sahip ve son derece katı malzemelerdir. Karbon elyaflar ısıya karşı oldukça dayanıklı, yüksek sertlik, yorulma dayanımının yüksek olmasından dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Ancak karbon elyaf, cam elyaflara göre daha maliyetli malzemedir bundan dolayı performans göstergelerinin maliyetinden daha önemli olduğu alanlarda kullanılmaktadır. Karbon elyaflar sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı havacılık, uzay ve inşaat endüstrilerinde üstün performans özelliklerinin gerektiği alanlarda kullanımı artmıştır(Bhushi vd., 2019).

Aramid kelimesi ‘aromatik polyamid’ in kısaltılması sonucu çıkan isimdir. Aramidler kevlar 29 ve kevlar 49 olmak üzere iki tipi mevcuttur. Aramidlerin mekanik özellikleri incelendiğinde tıpkı grafit elyaflarda da olduğu gibi elyaf eksenine doğrultusunda iyi özellik gösterirken dik yönde zayıf özellik sergilemektedir. Aramid elyaflar düşük ağırlığa, yüksek çekme mukavemeti, yüksek darbe direnci ve düşük maliyete sahip olmasından dolayı kullanım alanı geniştir. Aramid elyaflar düşük sertliğe sahip olmasından istenilen formlara dönüştürebilir ve kimyasal malzemelere karşı dirençlidir. Fakat asit ve alkalilerden etkilenmektedir(Alkhatib vd., 2021).

Kevlar günümüzde yüksek darbe dayanımı olduğu için zırhlı araçlarda ve çelik yelek yapımında, çekme mukavemeti yüksek olmasından dolayı halat yapımında ve yanmaya karşı dirençli olmasından dolayı itfaiyeci kıyafeti gibi koruyucu giysi yapımında kullanılmaktadır. Kevlar yüksek çekme dayanımı ve sertliğinin az olmasından dolayı dokuma işlemi yapılabilir, kesilebilir ve dikilme gibi işlemlere tabi tutulabilir(T. T. Li vd., 2014).

Bu tez çalışması kapsamında literatür çalışmasından farklı olarak çok hücreli çarpışma kutuları eklemeli imalat yöntemi kullanılarak ABS, PLA ve CF15PET malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Üretilen plastik malzemeli çarpışma kutuları, karbon ve cam fiberler kullanılarak  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$  sarım açısına sahip olan ve filament sarma yöntemi kullanılarak üretilen kompozit çarpışma kutuları ile hibritleştirilmiştir.

#### **2.2.5. Eklemeli İmalat Teknolojisi**

Eklemeli imalat, prototip üretimi sırasında hızlı, ucuz ve kolay bir şekilde kullanılan ve genel olarak üç boyutlu baskı teknolojisi olarak isimlendirilen terimdir. Üç boyutlu yazıcılar genel olarak bir parça veya sistemin seri üretime geçmeden önce bu teknolojinin kullanılmasıyla örnek parçaların üretilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bir parçanın ileriki süreçlerde hazırlanan modellerin ve nihai parça üretiminin hızlı ve daha ucuz olacak şekilde üretilmesi kullanılan bir teknolojidir. Eklemeli imalat teknolojileri ilk yıllarda bir ürünün dijital ortamda tasarlanan ürünün fiziksel olarak üretilip değerlendirme işlemi olarak tanımlansa da günümüzde bu teknoloji birçok amaç için kullanılmaya başlanmıştır(Szczepanik & Nikiel, 2020).

Eklemeli imalat teknolojileri bileşenlerin tasarımı ve üretiminde oldukça kullanışlı olup, eşi benzeri olmayan imkanlar sunmaktadır. Eklemeli imalat teknolojileri hafif parçaların üretiminde, karmaşık tasarıma sahip ürünlerin üretiminde ve geometrik olarak iyileştirilmiş parçaların üretiminde kolaylık sağlamaktadır. Üretilmesi planlanan parçaların tasarımlarında ve üretiminin kolaylaştırılmasına yardım sağlayarak makine ve cihazların daha verimli olmasının yanı sıra daha az enerji tüketerek üretilmesine olanak sağlamaktadır. Havacılık sektöründe bazı karmaşık şekillere sahip olan motor parçaları

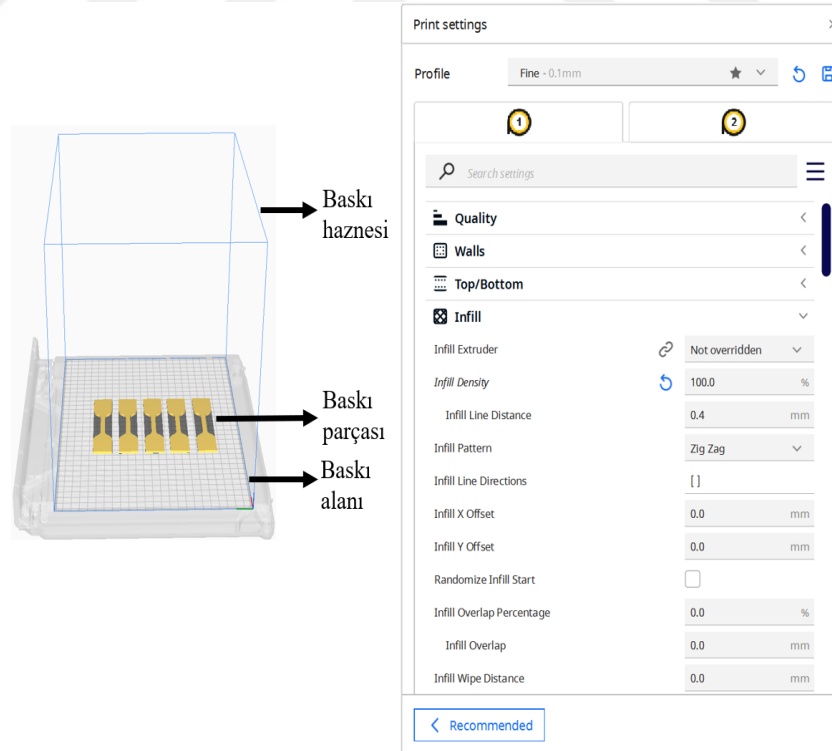
kullanılmaktadır. Bu karmaşık şekillere sahip olan parçaların üretiminde günümüzde eklemeli imalat teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Kolay bir şekilde hasara uğrayan ve sık sık değiştirilmesi gereken parçaların kolay bir şekilde üretilmesi bu sektör için önemli avantajlar sağlamaktadır. Havacılık sektöründe yüksek çekme dayanımına, yüksek korozyon direnci ve yüksek hasar toleransına sahip olan nikel bazlı alaşımlar alaşımların eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesiyle oldukça fazla kullanım alanına sahip olmuştur(Nie vd., 2022).

Geleneksel yöntemler kullanılarak yapılan tasarım ve imalat teknolojilerinin kullanıldığı geçmişin aksine otomotiv sektörü başta olmak üzere günümüzde birçok endüstride tasarım ve imalat konuları olmak üzere birçok değişimler meydana gelmiştir. Genel olarak bilgisayar destekli tasarımların kullanılmasıyla tasarlanan parçaların eklemeli imalat yöntemi kullanılarak fabrikalarda üretilmesi devrim niteliğinde bir gelişme olarak ifade edilmektedir. Local Motor isimli bir firma 2014 yılında elektrikli araçların üretiminde sadece eklemeli imalat yöntemi kullanarak araç üretimi gerçekleştirmiştir. Ayrıca bu firma OLLI adını verdiği sadece elektrikli motor ile çalışan ve sürücüsüz olarak hareket edebilen elektrikli otobüs üretimini yapmıştır. Bunun yanı sıra günümüzde birçok ünlü araba markaları prototip üretiminde ve motor parçalarının üretiminde eklemeli imalat yönteminden yararlanmaya başlamıştır. Üç boyutlu yazıcıların tasarım zincirine dahil edilmesi ile birlikte tasarım alanında birçok farklı fikirlerin ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Farklı tasarımların yaratacağı üretim sorunları eklemeli imalat teknolojileri sayesinde giderilmiş ve iyileştirme aşamalarında hızlı üretim ve test imkanıyla süreçleri kolay ve uygulanabilir kılmıştır. Eklemeli imalat teknolojileri hızlı ve kolay kullanılabilir olmasının yanında enerji tüketimi ve hurda malzeme miktarının en aza indirilmesinde oldukça fayda sağlamıştır. Sonuç olarak otomotiv sektöründe eklemeli imalat teknolojilerinin kullanılmasıyla ekonomik, emniyetli ve ergonomik tasarımların tasarımı ve üretimi konusunda faydalar sağlamıştır(Nguyen-Van vd., 2022).

Eklemeli imalat teknolojileri biyomedikal endüstrisinde yapay deri, ilaç ve farmasötik araştırmaları, yapay kemik, kıkırdak ve doku üretimi gibi malzemelerin üretiminde ve görselleştirilmesinde kullanım alanına sahiptir(Papon vd., 2020).

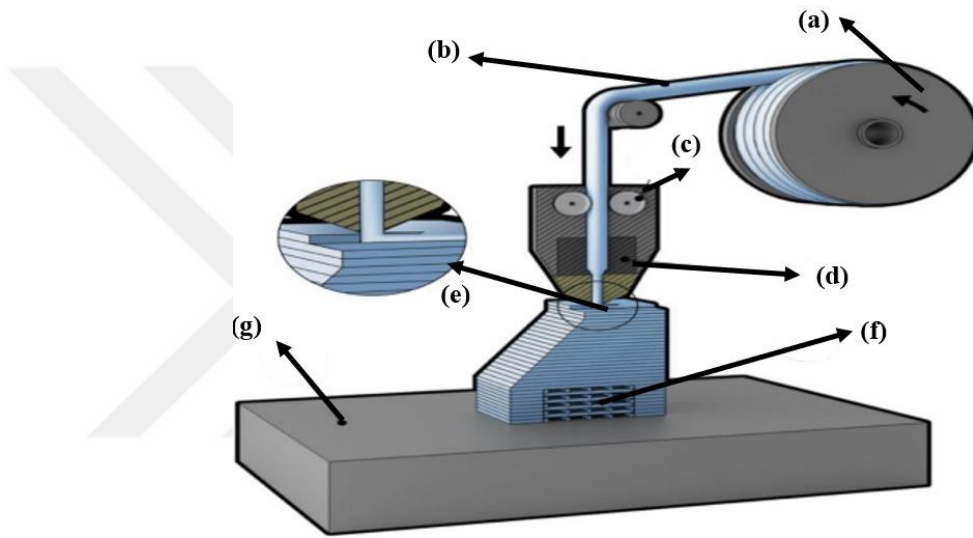
Eklemeli imalat teknolojileri bilimde, imalat sektöründe ve teknolojik aletlerin üretimde yaygın olarak kullanımı arttıkça, imalatçılar eklemeli imalat yönteminin sunduğu avantajların farkına varmış ve çok farklı endüstrilerde kullanılabileceğini görmüşlerdir. Günümüzde elektronik malzemelerde, elektrotlarda ve değiştirilebilir cihazlarda bulunan iletkenlerin yerleştirilmesi için muhafaza kabı olarak kullanılmaktadır(Sehhat vd., 2022).

Şekil 2.1’de örnek olarak çekme testi numunelerinin üç boyutlu yazıcı içerisinde konumlandırılması gösterilmiştir. Üç boyutlu yazıcılarda baskı işlemlerinin yapılması için ilk olarak üretilmesi planlanan parçaların tasarımları bilgisayar destekli tasarım programları ile tamamlanır. Daha sonra .STL uzantılı dosya üç boyutlu yazıcıya uygun olan dilimleme programı içerisine aktarılır. Programa aktarılan dosya üretilmesi planlanan malzemeye göre baskı hızı, nozzle sıcaklığı, tabla sıcaklığı (baskı alanı), doluluk oranı gibi ayarlamalar yapıldıktan sonra üç boyutlu yazıcıda üretim yapmak amacıyla dilimlemeler yapılır ve G-Code oluşturulur.



Şekil 2. 1. Eklemeli imalat G-Code oluşturulması

Oluşturulan G-Code şekil 2.2’de şematik gösterimi verilen üç boyutlu yazıcıya aktarılır. Baskı işlemine başlamadan önce üç boyutlu yazıcıya şekil 2.2.(a)’de gösterilen kısma kullanılacak filament takılır. Filament daha sonra şekil 2.2.(b)’de verilen hazne içinden geçerek şekil 2.2.(c)’de verilen besleme dişlisi yardımıyla otomatik olarak şekil 2.2.(d)’de verilen ısıtıcı blok içerisine gelir ve sıcaklık etkisiyle kullanılan filament erir. Daha sonra şekil 2.2.(e)’de ifade edilen nozzle ucundan çıkarak katmanlı üretim yaparak şekil 2.2.(g)’de verilen tablo üzerinde şekil 2.2.(f)’de ki gibi parça üretimine devam eder.



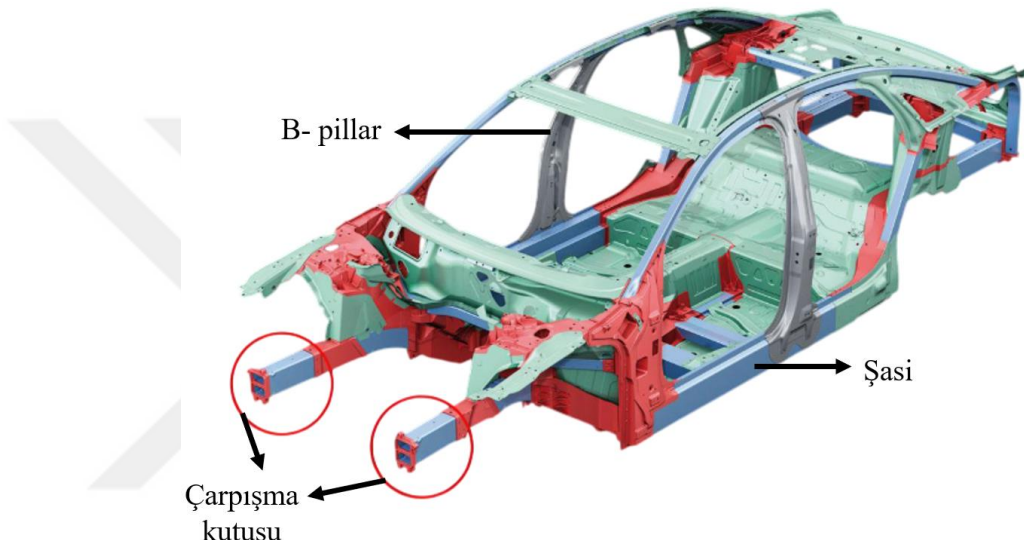
**Şekil 2. 2.** Eklemeli imalat yönteminin (FDM) şematik gösterimi(Shubham vd., 2018)

FDM yöntemi ile üretimin tamamlanmasından sonra tablo üzerinden parçalar çıkarılır ve eğer üzerinde destek parçası vb. yapılar var ise sökölerek temel parça kullanıma hazır duruma getirilir.

#### 2.2.6. Enerji Yutucu Yapılar

Otomobillerde pasif ve aktif olmak üzere gruplandırılan iki farklı güvenlik sistemi vardır. Aktif güvenlik sistemlerine örnek olarak fren sistemleri, denge ve kontrol sistemleri, çarpışma önleme ve uyarı sistemleri, kamera ve görüş sistemleri, lastik güvenlik sistemleri gibi gruplardan oluşmaktadır. Pasif güvenlik sistemleri ise hava yastıkları, emniyet kemerleri, yan kapı barları, çarpışma kutuları vb. sistemleri

kapsamaktadır. Pasif güvenlik sistemlerinden en önemli olan parçası çarpışma kutuları ve yan kapı barlarıdır. Çarpışma kutuları şekil 2.3’de ifade edildiği gibi şasi üzerinde, tamponun hemen kısmında bulunan enerji yutucu yapılardır. Çarpışma kutuları kaza anında tampondan sonra çarpışma enerjisini karşılayan bileşen olduğundan dolayı önem arz etmektedir. Çarpışma enerjisi, çarpışma kutularına iletildiği andan itibaren enerjinin emilimini sağlayarak araç içinde bulunan yolculara iletilmemesini veya minimum oranda iletilerek korunmasını sağlayan sistem bileşenlerindendir.



**Şekil 2. 3.** Çarpışma kutularının araç üzerindeki konumu (Chatterjee & van der Veldt, 2015)

Araç üzerine önden gelen çarpışma enerjisinin emilimini araçların ön ve arka kısımlarında bulunan çarpışma kutular ile sağlanırken, yandan gelen çarpışma enerjisi ise kapının iç kısımlarında bulunan yan kapı barları tarafından sağlanmaktadır. Yan kapı barları araç kapılarının tamamında bulunan ve farklı bölgelerde konumlandırılan yapılardan olup yolcu güvenliğinin sağlanması amacıyla kullanılan enerji yapısıdır. Şekil 2.4’de gösterilen kapı barları silindirik geometrili malzemelerden yapılmışken günümüzde enerji emilimini arttırmak amacıyla kare, oluklu silindirik ve oluklu kare vb. geometrilerde de üretilmektedir. Yan kapı barı malzemesi olarak genel olarak alüminyum ve çelik gibi geleneksel malzemeler kullanılırken, son yıllarda kompozit

malzemelerin sağladığı hafiflik ve yüksek mukavemet gibi avantajlardan dolayı kompozit malzemeler ile yan kapı barları geliştirilmeye başlanmıştır.



**Şekil 2. 4.** Yan kapı barlarının araç üzerindeki konumu(M. F. Li vd., 2014)

En çok kullanılan enerji yutucu modellerinden birisi ince duvarlı yapılardır. İnce duvarlı bileşenlerin enerji emme kapasitesini etkileyen başlıca faktörler malzeme, yapısal geometri ve yükleme modudur. İnce duvarlı enerji emiciyi üretmek için en çok kullanılan malzemeler, alüminyum alaşımı ve yumuşak çelik gibi metalik malzemeler ve elyaf takviyeli kompozitlerdir. Metalik ve kompozit yapıların enerji yayma mekanizmaları oldukça farklıdır. Kompozit malzemelerden yapılan yapılar normalde gevrekler ve delaminasyon, fiber kırılması ve matris çatlaması gibi farklı birleşik kırılma mekanizmaları yoluyla enerjiyi yayar, oysa metalik yapıların süneklik davranışı, ilerleyen plastik deformasyon yoluyla enerjiyi dağıtmalarına izin verir(Albak, 2021b).

Kompozit malzemeler, yüksek özgül mukavemetleri, yüksek özgül sertlikleri ve mükemmel enerji absorpsiyon performansları nedeniyle çarpışmaya dayanıklılık uygulamalarında artan bir popülerlik kazanmıştır. Kompozit yapılar, yumuşak çelik ve alüminyum gibi metalik yapılara göre birim kütle (SEA) başına daha fazla enerji emer. Ancak kompozit malzemenin anizotropik özelliklerinden dolayı kompozit enerji soğurucuların tasarımı ve analizi zordur. Ayrıca, kullanılan kompozit malzemelerin geri dönüştürülmesi çok zor olduğu için kompozit yapılar çevresel bir etkiye sahiptir. Ek olarak, kompozit malzemelerin üretim maliyeti, metalik yapılara göre nispeten daha yüksektir ve bu, havacılık yapıları ve yarış arabaları gibi belirli alanlarda uygulamalarını sınırlamıştır. Birçok araştırmacı, kompozit sarılı ince duvarlı metal borular veya harici olarak bağlanmış liflerle güçlendirilmiş borular gibi daha fazla miktarda enerjiyi emmek

için her iki malzeme türünü, yani metalik ve kompozitleri içeren hibrit yapılar da kullanmıştır. Hibrit yapılar, her bir malzemenin arzu edilen özelliklerini, kompozitlerin yüksek mukavemet/ağırlık oranını ve metallerin sünekliği ve kararlı plastik deformasyon modunu birleştirir(Albak, 2021b).

Metalik ince duvarlı yapıların enerji soğurma davranışı, son kırk yılda önemli miktarda araştırma almıştır. Genel olarak, metalik ince duvarlı boruların plastik olarak deforme olabileceği ve kinetik enerjiyi emilim edebileceği çeşitli ezilme veya yükleme durumları vardır; en yaygın durumlar eksenel ezilmeyi, yanal girintiyi, yanal sıkıştırmayı, boruyu ters çevirmeyi ve boruyu ayırmayı içerir. Bu ezilme durumlarının her biri, enerji dağıtma sürecinde ana rol oynayan ve çeşitli enerji absorpsiyon tepkilerine yol açan bir veya daha fazla deformasyon modu ile ilişkilidir(Usta vd., 2021). İnce duvarlı metalik bileşenlerin enerji soğurma performansı, bir dolgu malzemesi kullanılarak oldukça artırılabilir. Literatürde önerilen en yaygın dolgu malzemeleri arasında polistiren gibi polimerik köpükler ve alüminyum köpük gibi metalik köpükler. Son zamanlarda, cam elyaf takviyeli poliamid de birçok çalışmada dolgu malzemesi olarak bildirilmiştir. Bir enerji soğurucunun tasarımı ve analizi normalde sonlu elemanlar yöntemi gibi deneysel ve hesaplamalı teknikler kullanılarak gerçekleştirilir. Hesaplama tekniği, özellikle parametrik analiz yapmak için çok etkili ve verimli bir araçtır. Yapıların enerji yutma tepkilerini tanımlayabilen modeller, enerji yutan yapıların performansının analizi için büyük önem taşır ve teorik, ampirik ve istatistiksel yöntemler gibi farklı yöntemler kullanılarak geliştirilebilir. Teorik modeller, deneysel çökme modunun gözlemlenmesi, deformasyon mekanizmasının basitleştirilmesi, bazı sınırlı varsayımların benimsenmesi ve yapısal plastik analiz tekniğinin kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Öte yandan, ampirik modelleme, deneysel veya sonlu eleman sonuçları üzerinde doğrusal veya doğrusal olmayan çok değişkenli regresyon analizi kullanılarak ampirik ifadelerin türetildiği teoriden ziyade gözlemlere ve deneylere dayanmaktadır. Son olarak, istatistiksel yöntem, önceden tanımlanmış örnekleme noktalarında bu yanıtların değerlerini kullanarak enerji absorpsiyon yanıtlarının yanıt yüzey modeli gibi yaklaşık bir model oluşturmak için deney yaklaşımı tasarımını kullanır(Albak, 2021a).

Literatürde enerji yutucular için çarpışma performanslarının tayininde bazı tanımlamalar yapılmıştır. Enerji yutucu geometrilerin tasarımı ve simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi için bu tanımlamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Sönümlenen toplam enerji, özgül enerji emilimi, ortalama ezilme kuvveti, maksimum ezilme kuvveti, ezilme kuvveti verimi gibi bazı parametrelere ait tanımlamaları şu şekildedir;

Çarpışma sırasında enerji yutucu yapılar tarafından sönümlenen toplam enerji ( $E_T$ ), ezilme kuvvetinin yaptığı iş olarak tanımlanmaktadır ve denklem (2.1) ile hesaplanabilir(Gunaydin, 2024).

$$E_T = \int_{S_s}^{S_b} F. dS \quad (2.1)$$

Denklemde, F (kN) çarpışma sırasında meydana gelen eksenel yöndeki ezilme kuvvetini, S (mm) yer değiştirmeyi ifade etmektedir. SS-SB (mm) aralığı ise eksenel yöndeki çarpışma sonucu oluşan deformasyon miktarını ifade etmektedir. Sönümlenen toplam enerji, kuvvet-yer değiştirme grafiğindeki eğrinin altında kalan kısım olarak tanımlanmaktadır(Gunaydin, 2024).

Bir enerji yutucu yapının çarpışma sırasında sönümlediği toplam enerjinin, enerji yutucu yapının deforme olmamış kütesine bölünmesi ile birim kütle başına sönümlenen enerji elde edilir. Özgül enerji emilimi denklem (2.2) ile hesaplanabilir.

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

Burada,  $E_m$  özgül enerji emilimini, m çarpışma öncesi deforme olmamış enerji yutucu yapının kütesini ifade etmektedir(Gunaydin vd., 2022).

Son yıllarda, taşıtların güvenli olmasının yanı sıra hafif olması da istenen bir koşuldur. Bu sebeple enerji yutucu yapının sönümlediği enerji ile birlikte yapının kütlesi de önem olmaktadır. Enerji yutucu yapının olabildiğince çok enerji sönümleyebilmesi, aynı

zamanda hafif de olması istenmektedir. Enerji yutucu yapıların tasarım aşamasında özgül enerji emilimi de göz önünde bulundurulması gereken önemli bir parametredir. Denklem (2.3)'de ifade edilen enerji yutucu yapının sönümlendiği toplam enerjinin, çarpışma sırasındaki eksenel yöndeki toplam ezilme mesafesine oranı ortalama ezilme kuvvetini ( $F_{ort}$ ) verir(Gunaydin, 2024).

$$F_{ort} = \frac{E_T}{S_s - S_B} \quad (2.3)$$

Çarpışma sırasında enerji yutucu yapıya eksenel yönde gelebilecek kuvvetler enerji yutucu yapıda ezilme kuvvetlerini oluşturur. Enerji yutucu yapıda deformasyonun başladığı anda oluşmaya başlayan en yüksek kuvvete maksimum (pik) ezilme kuvveti adı verilir. Maksimum ezilme kuvvetinde yüksek değerler olması enerji yutucu yapının görevini tam olarak yerine getirememesine ve çarpışma sırasında ortaya çıkan ezilme kuvvetlerinin direkt olarak taşıt iskeletine ve dolayısıyla taşıt içerisinde bulunan sürücü ve yolculara aktarılmasına neden olacaktır. Bu sebeple maksimum ezilme kuvvetinin olabildiğince düşük ve ortalama ezilme kuvveti değerinde yakın bir değerde olması istenmektedir.

Denklem (2.3)'de ifade edilen ortalama ezilme kuvvetinin pik ezilme kuvvetine bölünmesi ile denklem (2.4)'de verilen ezilme kuvveti verimi ( $\eta_f$ ) elde edilir(Gunaydin, 2024).

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

Enerji yutucu yapının ezilme kuvveti veriminin yüksek olması yapının çarpışma performansının yüksek olduğunu ifade etmektedir. Ezilme kuvveti veriminin tek başına yüksek olması, her zaman sönümlenen enerjinin de yüksek olacağı anlamına gelmemektedir. Bu sebeple ortalama ezilme kuvveti değerinin yüksek olması bunun yanı sıra pik ezilme kuvveti değerinin de düşük olması istenir.

### 2.2.7. Genetik Algoritma

Mühendislik uygulamalarında karmaşık problemlerin analitik tekniklerin kullanılmasında belirli aşamadan sonra elle hesaplamalar yapmak oldukça güçleşmeye başlamaktadır. Ancak son yıllarda otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisi gibi alanlarda büyük örneklemelerin çözülmesi gerekmektedir. Bilgisayar sistemlerinin gelişmesine bağlı olarak bu karmaşık problemlerin çözümüne ve problem çözme tekniklerinin geliştirilmesine imkan sağlamaya başlamıştır (EMEL & Taşkın, 2002). Karmaşık problemlerin çözüm tekniklerinden birisi olan genetik algoritma (GA) 1975 yılında John Holland tarafından geliştirilen bir algoritma olup, evrimsel optimizasyon grubuna dahil olmuştur. John Holland, makine öğrenmesi üzerine yapmış olduğu çalışmada yaşayan organizmaların gelişimi ve evrim sürecinde meydana gelen değişiklikler etkilenmiş daha sonra bu süreçleri bilgisayar ortamına taşımak amacıyla çalışmalar yapmıştır. Canlı organizmada gerçekleşen çaprazlama, mutasyon ve seçilim gibi genetik açıdan gerçekleşen adımlar sonucunda yeni ve daha uyumlu bireylerin meydana gelebileceği belirlenmiştir. Bu yöntemler bilgisayar ortamına aktarıldığında GA olarak adlandırılmış olup, doğal seçilim ve genetik aşamaları örnek alan metasezgisel optimizasyon algoritması olarak sınıflandırılır (Al-Tashi vd., 2020).

Genetik algoritma optimizasyon için kullanılabilecek hem uygun hem de güçlü bir yöntemdir. Genetik algoritma en iyi çözümü bulmak için birden fazla noktadan araştırmaya başlamasından dolayı burada önemli olan başlangıç noktasının değerlerini belirlemek gerekmektedir. Başlangıç değerlerinin belirlenmesinden hemen sonra başlangıç popülasyonu oluşturulur ve rastgele olarak oluşturulur (Bui & Moon, 1996).

Genetik algoritma sürecinin başlaması sırasında ilk olarak popülasyon içerisinde bulunan bireylerin her birinin uygunluk değerlerinin belirlenmesi gerekir. Uygun değerlerinin belirlenmesinden sonra seçme yöntemi ile bu bireyler arasında yeni oluşturulacak popülasyona aktarılacak olan bireyler seçilmelidir. Popülasyonda ilk olarak çaprazlama meydana getiren kromozomlar hemen ardından mutasyona geçirir. Daha sonra meydana gelen yeni kromozomların uygunluk fonksiyonları tekrardan hesaplanır. Uygunluk değerlerinin belirlenmesinden sonra bir sonra oluşturulacak olan

popülasyona aktarılan kromozomlar için yeniden seçim işlemi yapılır. Bu tekrarlı süreç, probleme ve beklentileri karşılayana kadar devam eder(Lambora vd., 2019).

GA ilerleme adımları şu şekilde özetlenebilir;

- $t=0$   $G(t)$  jenerasyonun  $N$  (kromozom sayısı) tane kromozoma sahip olan popülasyon gelişigüzel oluşturulur.
- Başlangıç popülasyonu yani popülasyon içerisinde rastgele kromozom büyüklüğü belirlenir.
- Popülasyon içerisinde bulunan her  $x$  kromozom için  $(f(x))$  uygunluk değerleri hesaplatılır.
- $t=t+1$ .  $G(t)$  jenerasyonu oluşturulur. Burada kromozomlar bir önceki jenerasyondaki uygunluk değeri göre sonraki jenerasyona geçme hakkı kazanırlar. Daha sonra seçilen kromozomlar belirli oranda çaprazlamaya tabi tutularak, yeni kromozomlar eski kromozomların yerini alır. Çaprazlama sonucunda genetik çeşitlilik sağlanması için mutasyon uygulanır.
- Mutasyon ile popülasyon içerisinde bulunan yeni kromozomlar eski kromozomların yerine geçer.
- Oluşan yeni popülasyonda bulunan tüm kromozomların uygunluk değeri belirlenir.
- İlk başta belirlenmiş olan jenerasyon tamamlanırsa mutasyon oluşturma aşamasına (dördüncü madde) geri dönülür.
- Son olarak en iyi uygunluk değerinde olan kromozom en iyi çözüm sonucunu verir.

Genetik algoritma ile optimum sonuç elde edilene kadar tüm süreçler devam eder. Ancak optimum sonuca ulaşıldığında bu süreç durdurulur veya tanımlanan iterasyon tamamlanınca durur(Lambora vd., 2019).

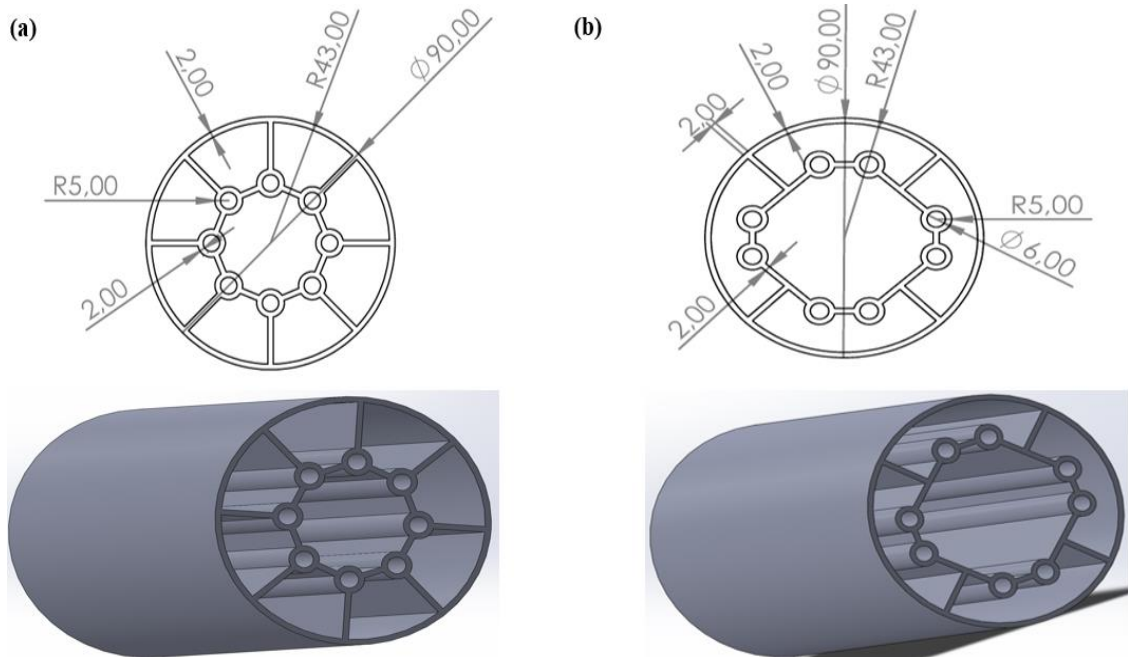


### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

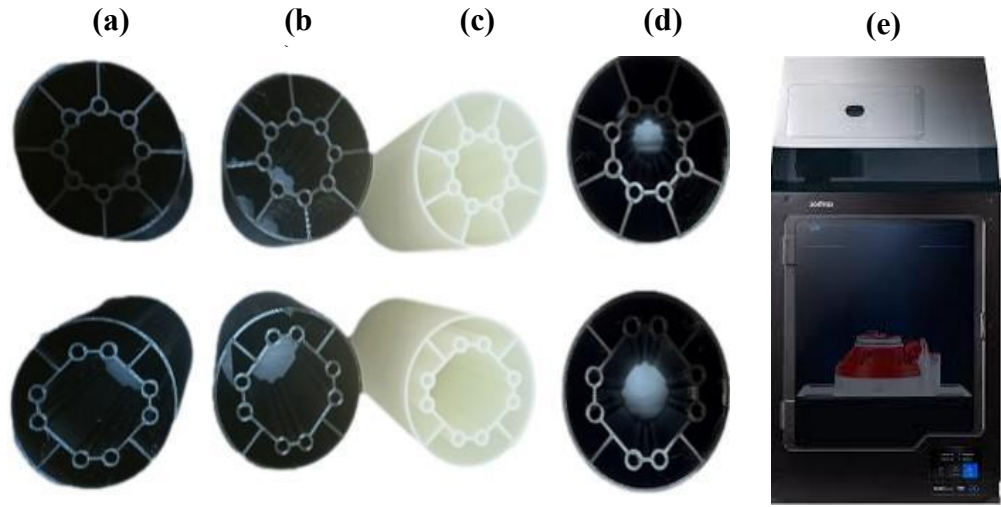
#### 3.1. Çarpışma Kutuları ve Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Amacıyla Test Numunelerinin üretilmesi

Çarpışma kutularının şekil 1’de verilen ölçülerde bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak 150 mm boyutunda üretilmiştir. Çarpışma kutuları, kompozit malzemeler ile hibritleştirilmesi amacıyla tamamı 90 mm çarpında olacak şekilde tasarlanmıştır.

Şekil 3.1’de tasarım ölçüleri verilen çarpışma kutuları ZORTRAX M300 DUAL markalı üç boyutlu yazıcı kullanılarak şekil 3.2’de ki gibi üretilmiştir. Çarpışma kutusu tasarımlarının tamamı PLA, ABS, PETG ve CF15PET malzemeler kullanılarak her bir tasarım tüm malzemeler için 3’er adet test numunesi olacak şekilde üretimleri tamamlanmıştır. ABS, PLA ve PETG malzemeleri ile üretilen çarpışma kutuları 0.4 mm çaplı nozzle ile 0.2 mm duvar kalınlıklarına, CF15PET malzemeli çarpışma kutusu ise 0.6 mm çaplı nozzle ile 0.3 mm duvar kalınlıklarına sahip olacak şekilde üretimleri tamamlanmıştır. Üretilen tüm numuneler testlerden önce kondisyon laboratuvarında bir gün sürede bekletilmiştir.



Şekil 3. 1. Çarpışma kutularının tasarım ölçüleri (a) birinci tasarım, (b) ikinci tasarım



**Şekil 3. 2.** Çarpışma kutuları (a) PLA, (b) PETG, (c) ABS, (d) CF15PET, (e) Üç boyutlu yazıcı

Deneysel çalışmalarda, üç boyutlu yazıcı ile eriyik birikme yöntemi (FDM) yöntemi kullanılarak kırılmış karbon elyaf katkılı polietilen tereftalat (PETCF), polietilen tereftalat glikol (PETG), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polylactic Acid (PLA) filamentler kullanılmıştır. Kullanılan filamentlerin firma tarafından verilen mekanik özellikleri tablo 3.1’de ifade edilmiştir. Ancak üretim sırasında kullanılan makine markası, baskı hızı, tarama açısı gibi nedenlerden dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde değişme olabileceğinden kullanılan filamentlerin tamamının mekanik özellikleri yeniden belirlenmiştir.

**Tablo 3. 1.** Filamentlerin mekanik özellikleri

|                                                    | PLA  | ABS  | PETG | CF15PET | GF30PP |
|----------------------------------------------------|------|------|------|---------|--------|
| <b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>                        | 34.7 | 36.3 | 33.4 | 63.2    | 41.7   |
| <b>Kopma Uzaması (%)</b>                           | 4.2  | 7.4  | 2.7  | 3.7     | 4.4    |
| <b>Young’s Modülü (MPa)</b>                        | 2308 | 1958 | 1933 | 6178    | 3507   |
| <b>Eğilme Mukavemeti (MPa)</b>                     | 98.0 | 56.6 | 66.7 | 108     | 23.1   |
| <b>Eğilme Modülü (MPa)</b>                         | 1860 | 1833 | 2063 | 5452    | 1671   |
| <b>Çentiksiz Darbe Dayanımı (kJ/m<sup>2</sup>)</b> | 3.3  | 18.8 | 2.1  | 5.7     | 20.5   |

### 3.2. PLA, ABS, PETG, CF15PET ve GF30PP Filamentlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Amacıyla Test Numunelerinin Üretilmesi ve Yapılan Testler

Otomotiv çarpışma kutularının üretimi eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan eriyik biriktirme (FDM) ile üretildiğinden ve sonlu elemanlar programı kullanılarak analizlerinin yapılması amacıyla mekanik özellikler belirleme yapılmıştır. Kullanılan filamentlerin markasının teknik dokümanlarının vardır. Ancak üç boyutlu yazıcının kalitesi, üretim hızı, tarama açısı gibi nedenlerden dolayı mekanik özelliklerde değişim olmaktadır. Bundan dolayı kullanılan tüm filamentlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla üretilen tüm test numuneleri Zortrax markalı M300 Dual serisi üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Tüm test numuneleri her malzeme için tablo 3.2’de verilen üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir.

**Tablo 3. 2.** Test numunesi üretim parametreleri

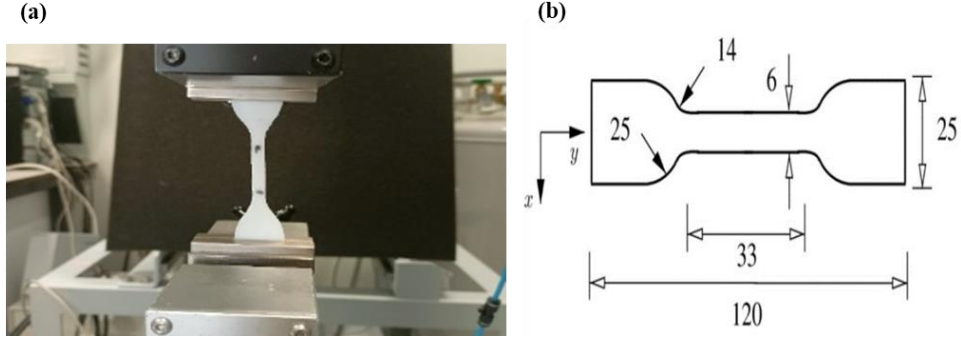
|                 | Nozzle<br>çapı | Doluluk<br>oranı (%) | Nozzle<br>sıcaklığı | Tabla<br>sıcaklığı | Baskı Açısı<br>(-/-)        | Tabaka<br>kalınlığı |
|-----------------|----------------|----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|
| <b>PETG</b>     | 0.4            | 100                  | 230                 | 100                | $\pm 45^\circ / 0-90^\circ$ | 0.2                 |
| <b>CF15/PET</b> | 0.6            | 100                  | 270                 | 100                | $\pm 45^\circ / 0-90^\circ$ | 0.2                 |
| <b>PLA</b>      | 0.4            | 100                  | 200                 | 50                 | $\pm 45^\circ / 0-90^\circ$ | 0.2                 |
| <b>ABS</b>      | 0.4            | 100                  | 220                 | 60                 | $\pm 45^\circ / 0-90^\circ$ | 0.2                 |
| <b>GF30PP</b>   | 0.6            | 100                  | 260                 | 100                | $\pm 45^\circ / 0-90^\circ$ | 0.2                 |

#### 3.2.1. Çekme Testi

Çekme testi, test edilmesi istenilen numunenin kopana kadar tek yönde kuvvet uygulanmasına esasına dayanır. Çekme testi sonucunda elde edilen sonuçlar herhangi bir uygulamada malzeme seçimi, kalite ve kontrol ve diğer yükleme koşullarında malzemenin nasıl davranacağını tahmin etmek amacıyla kullanılır.

Malzemelerin çekme dayanımı belirlemek amacıyla PLA, ABS, PETG, CF15PET ve GF30PP filamentler üç boyutlu yazıcı kullanılarak şekil 3.3 (b)’de gösterilen ölçülerde çekme testi numuneleri her malzeme için beşer adet olarak üretilmiştir. Üretilen çekme testi numuneleri ISO 527/3 standardına göre 10 KN yük hücresine sahip olan

SHIMADZU-AGS/X markalı cihazla tüm testler 2mm/dk çekme testi hızıyla çekme testleri yapılmıştır.

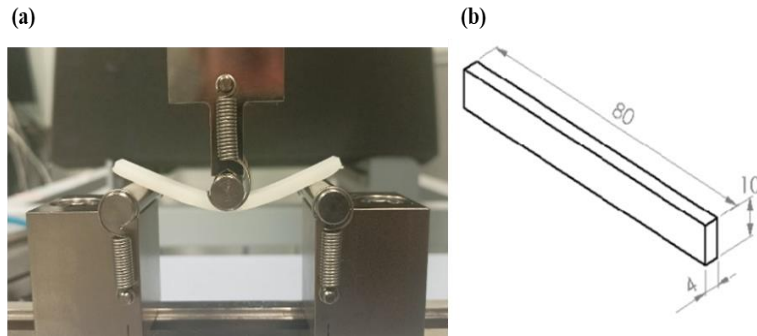


Şekil 3. 3. (a) Çekme testi makinesi, (b) ISO 527/3 standart ölçüleri

### 3.2.2. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta testi, malzemelerin mukavemet değerlerinin tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemelere eksenel yönde uygulanan kuvvete karşı eğilme direncinin belirlenmesi amacıyla yapılır.

Malzemelerin eğilme dayanımı belirlemek amacıyla PLA, ABS, PETG, CF15PET ve GF30PP filamentler üç boyutlu yazıcı kullanılarak şekil 3.4 (b)'de gösterilen ölçülerde çekme testi numuneleri her malzeme için beşer adet olarak üretilmiştir. Üretilen üç nokta eğme testi numuneleri ISO 178 standardına göre 10 KN yük hücresine sahip olan SHIMADZU-AGS/X markalı cihazla tüm testler 2mm/dk hızla üç nokta eğme testleri yapılmıştır.

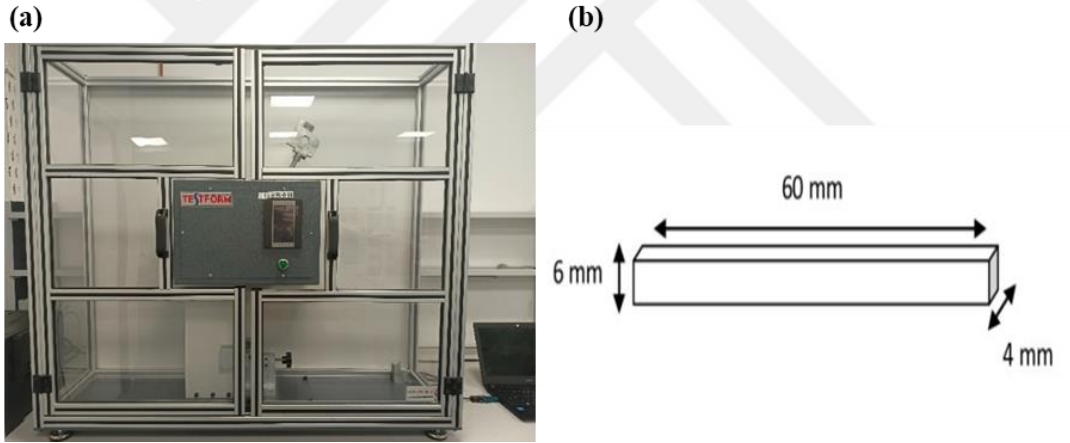


Şekil 3. 4. (a) Üç nokta eğme testi makinesi makinası, (b) ISO 178 standart ölçüleri

### 3.2.3. Izod Darbe Testi

Izod darbe testi, malzemelerin dayanıklılığının belirlenmesi amacıyla yapılan testtir. Çentikli ve çentiksiz olmak üzere iki tip darbe testi mevcuttur. Çentikli darbe testinde üretilen numunenin üzerine bir çentik açıldıktan sonra dikey yönde yerleştirilip edilmesi sonucunda darbe dayanımı hesaplanır. Çekiç olarak tabir edilen ve belirli bir ağırlığa sahip olan başlık malzeme üzerine saat yönünde hareket edecek şekilde çarpar ve darbe dayanımı tespit edilir.

Malzemelerin darbe dayanımı belirlemek amacıyla PLA, ABS, PETG, CF15PET ve GF30PP filamentler üç boyutlu yazıcı kullanılarak şekil 3.5 (b)'de gösterilen ölçülerde izod testi numuneleri her malzeme için beşer adet olarak üretilmiştir. Tüm numuneler ISO 179 standardına göre izod testleri gerçekleştirilmiştir.

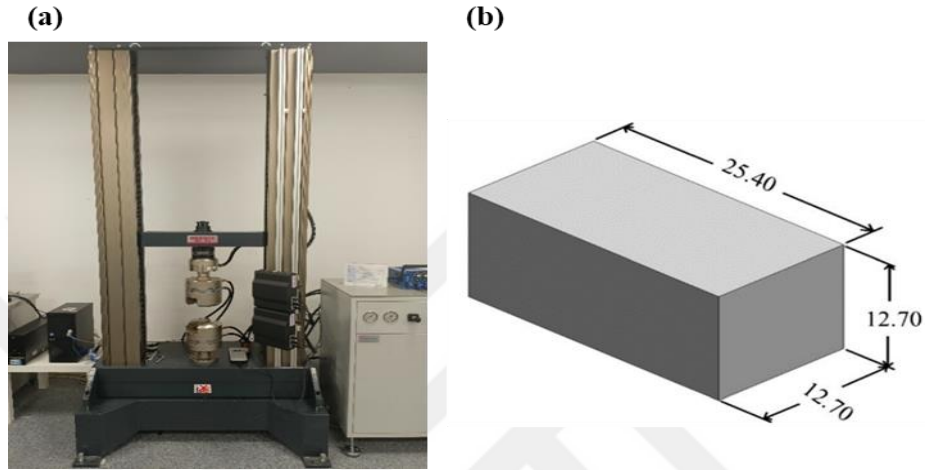


Şekil 3. 5. (a) Izod testi makinesi makinası, (b) ISO 179 standart ölçüleri

### 3.2.4. Bası Testi

Basma testleri, metal veya metal olmayan malzemelere uygulanan testtir. Malzemelere uygulanan statik yükleme koşullarında malzemelerin basma mukavemetinin, basma akma mukavemetini, basma elastisite modülünün, şekil ve kesit değişiminin hesaplanması amacıyla yapılan testtir.

Malzemelerin basma mukavemetini belirlemek amacıyla PLA, ABS, PETG, CF15PET ve GF30PP filamentler üç boyutlu yazıcı kullanılarak şekil 3.6 (b)'de gösterilen ölçülerde basma testi numuneleri her malzeme için beşer adet olarak üretilmiştir. Tüm numuneler ASTM D695-15 standardına göre BESMAK BMT 100E cihazı kullanılarak basma testleri gerçekleştirilmiştir.

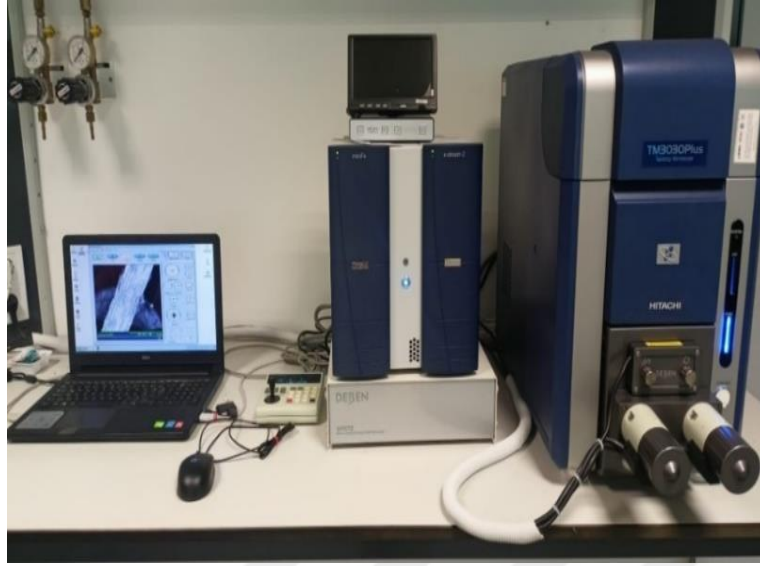


**Şekil 3. 6. (a) Bası testi cihazı, (b) ASTM D695-15 standardı**

### 3.2.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) bir numune üzerine elektron demetlerinin odaklanmasına bağlı olarak yüzey görüntüsü elde edebilen bir elektron mikroskobu türüdür. Taramalı elektron mikroskobundan gönderilen elektronlar numunenin atomları ile etkileşime girer ve topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler vererek parçanın daha detaylı olarak incelenmesini sağlar. Taramalı elektron mikroskopları sıvı olmayan ya da sıvı özelliklere sahip olmayan tüm malzemelerin incelenmesinde uygulanabilir. Genel olarak incelenen malzemelere örnek olarak metaller, fiberler, plastikler ve parçalar halinde bulunan malzemeler verilebilir.

Çekme testi sonucunda kopan yüzeyin görüntülerini incelemek ve çekme kuvveti altında malzemenin sünek ya da rijit kopma göstermesi gibi olayları incelemek amacıyla tüm malzemeler şekil 3.7'de ki HİTACHI TM3030 PLUS marka cihazla görüntüler elde edilmiştir.



**Şekil 3. 7.** Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

### **3.2.6. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)**

Diferansiyel taramalı elektron kalorimetresi (DSC) bir malzemenin hem fiziksel hem de kimyasal değişimlerini analiz etmek amacıyla kullanılan termal bir cihazdır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin karakterizasyonlarının amacıyla şekil 3.8’de verilen TA INSTRUMENT markalı cihazla tüm malzemelerin DSC analizleri yapılmıştır.



**Şekil 3. 8.** Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) makinesi

### 3.2.7. Düşey Darbe Testi Cihazı

Çarpışma kutularının enerji emilim değerlerinin belirlenmesi amacıyla şekil 3.9'da ki cihaz ile 580 kg yük kapasitesi olan 10 kN'lik düşey darbe kuvveti uygulayabilen test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3. 9. Düşey darbe testi cihazı

### 3.3. Karbon ve Cam Fiber Takviyeli Çarpışma Kutularının Filament Sarma Yöntemi ile Üretilmesi

Kompozit malzeme üretiminde son teknoloji sistem ve tam otomasyonlu filament sarma makinesi kullanılmıştır. Eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen çarpışma kutularının enerji emilimlerini arttırmak amacıyla karbon ve cam fiberler kullanılmıştır. Kompozit çarpışma kutuları 45° ve 90°'lik sarım açılarıyla yapılmasından dolayı ilk olarak CADWILL programı kullanılarak G-CODE'lar oluşturulmuştur. Oluşturulan kodlar filament sarma makinesi içerisine yüklenmiştir.

90 mm çap değerine sahip olan altlıklar filament sarma makinesi üretim anında herhangi bir şekilde kayma ve esneme olmayacak şekilde sabitlenmiştir. Altlık sistemin yerleştirilmesinden sonra yüzeyler kalıp ayırıcı kullanılarak altı kat ayırıcı kalıp

eklenmiştir. Bu işlem kompozit çarpışma kutularının altlık üzerinden kolay bir şekilde çıkarılması amacıyla yapılmıştır.

Çarpışma kutularında kullanılacak olan karbon ve cam fiberler ilk olarak gergi sistemine sahip olan hazne içerisinde sabitlenmiştir. Daha sonra matris malzeme olarak kullanılacak olan epoksi reçine ve kürleme işlemi hızlanması için kullanılan sertleştirici karıştırılmıştır. Karıştırılan reçine içerisinde bulunan hava kabarcıklarının reçine içerisinde dışarı atılması amacıyla 30 dakika süre ile vakumlama işlemi yapılmıştır. Vakumlama işleminin bitmesinin hemen ardından reçine, filament sarma makinesi içerisinde reçine havuza dökülmüştür.

Kullanılacak olan karbon ve cam filamentler reçine havuzundan Şekil 3.10'da belirtildiği gibi çekilmiştir.



**Şekil 3. 10.** Filamentlerin reçine havuzundan geçirilmesi

Karbon ve cam filamentler reçine havuzundan geçirildikten sonra altlık malzeme üzerine Şekil 3.11'de belirtildiği sabitlenmiştir. Daha sonra 45° ve 90°'lik açılarla sarım açılarına sahip olan karbon ve cam fiberlerin üretilmesi başlanmıştır.



**Şekil 3. 11.** Kompozit çarpışma kutularının üretilmesi

Karbon fiberler kullanılarak üretilen çarpışma kutularının hem 45° hem de 90°'lik açılarla çarpışma kutularının üretilmesinde 8 kat katman olacak şekilde tasarlanmıştır ve üretim yapılmıştır.

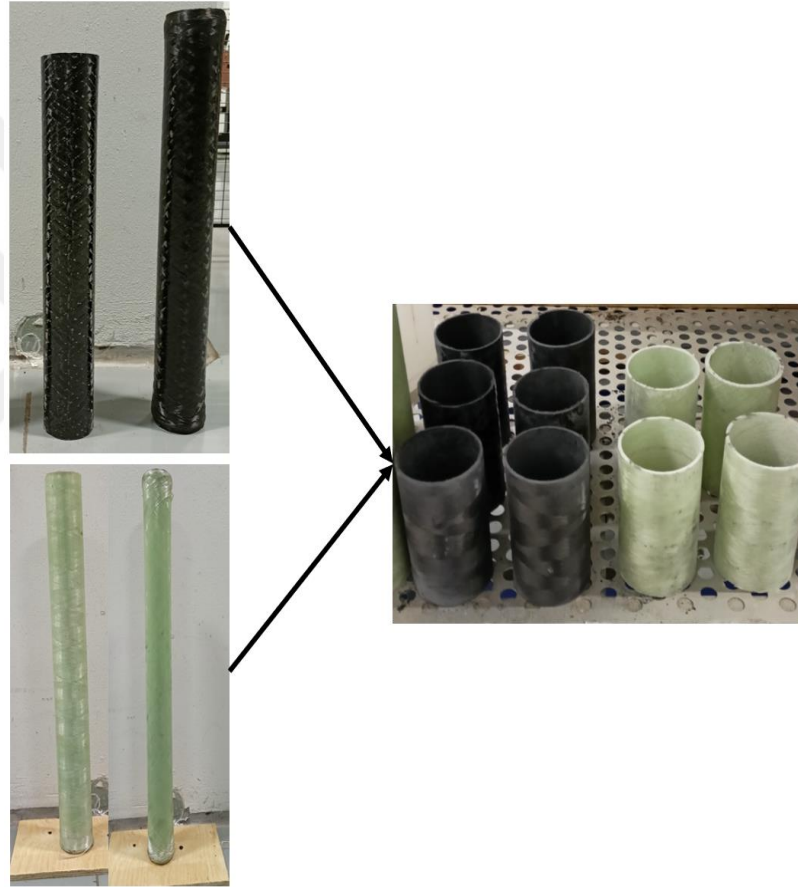
Cam fiberler kullanılarak üretilen çarpışma kutularının hem 45° hem de 90°'lik açılarla çarpışma kutularının üretilmesinde ise 8 kat katman olacak şekilde tasarlanmıştır ve üretim yapılmıştır.

Filament sarma işleminin sonucunda üretilen tüm çarpışma kutuları 2 saat sürede 100°C'de kürleme işlemi yapılmıştır. Kürleme işlemi sabit sıcaklığın olduğu alanda ve parça üzerinde bulunan reçinenin düşmesini engellemek amacıyla döner sistemde kürleme yapılmıştır.

Son olarak kürlenen tüm kompozit çarpışma kutuları post kürleme yapılması amacıyla 100°C'de 1 saat sürede son kürleme işlemi yapılarak çarpışma kutuları üretilmiştir.

Kompozit çarpışma kutularının üretilmesinden sonra PVC boru üzerinde bulunan kompozit plaka hem sol hem de sağ tarafından bulunan birikmiş kompozitler CAD

FİLL programının verdiği değer üzerine her iki yönden de 20 mm kesilmiş ve Şekil 3.12’de ifade edilen kompozit borular üretilmiştir. Üretilen kompozitler daha sonra eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen çarpışma kutularının aynı boyda olması amacıyla tüm kompozitler kesme cihazı kullanılarak 150 mm boyutlarına kesilmiştir. Kesme işlemi tamamlandıktan sonra test esnasında bozucu girişlerin engellenmesi amacıyla 0.5 mm’lik zımpara kullanılarak Şekil 3.12’de gösterildiği tüm kompozit çarpışma kutuları test için hazırlanmıştır.



**Şekil 3. 12.** Kompozit çarpışma kutuları

Eklemeli imalat yöntemi ile PLA, ABS, PETG, CF15PET filamentler kullanılarak üretilen çarpışma kutularının enerji emilim performanslarının geliştirilmesi amacıyla cam fiber (Şişe Cam) ve karbon fiber (DOWAKSA) elyafları kullanılmıştır. Elyaf hacimleri tüm kompozit yapılarda %40 şeklinde belirlenmiştir. Matris ve elyaf malzemelerin özellikleri tablo 3.3’de verilmiştir.

**Tablo 3. 3.** Kullanılan lifler ve matris malzemesinin mekanik özellikleri

|                                | Cam fiber | Karbon fiber | Epoksi reçine |
|--------------------------------|-----------|--------------|---------------|
| 1 Yönü Elastisite Modülü (GPa) | 43.4      | 240          | 3.1           |
| 2 Yönü Elastisite Modülü (GPa) | 15.2      | 14           |               |
| 3 Yönü Elastisite Modülü (GPa) | 15.2      | 14           |               |
| 1 Yönü Kesme Modülü (GPa)      | 6.140     | 25           | 1.1           |
| 2 Yönü Kesme Modülü (GPa)      | 6.140     | 7            |               |
| 3 Yönü Kesme Modülü (GPa)      | 6.140     | 7            |               |
| 1 Yönü Poisson's Ratio         | 0.29      | 0.29         | 0.36          |
| 2 Yönü Poisson's Ratio         | 0.38      | 0.4          |               |
| 3 Yönü Poisson's Ratio         | 0.4       | 0.49         |               |
| Çekme Dayanımı (MPa)           | 3000      | 4500         | 60            |
| Basma Dayanımı (MPa)           | 1000      | 2000         | 100           |

Masoumi M. vd. (2022), filament sarma ile ürettikleri konik yapıların mikro mekanik özelliklerini denklem (3.1-3.11) ile hesaplamıştır (Masoumi vd., 2022). Bu çalışmada kullanılan kompozit çarpışma kutularının sonlu elamanlar yöntemi ile simülasyonlarının gerçekleştirilmesi amacıyla hacimsel olarak %40 reçine ve %60 lif oranı olarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$E_{11} = V_f E_{11f} + V_r E_r \quad (3.1)$$

$$E_{22} = E_{33} = \frac{E_r}{1 - \sqrt{V_f \left(1 - \frac{E_r}{E_{22f}}\right)}} \quad (3.2)$$

$$G_{12} = \frac{G_r}{1 - \sqrt{V_f \left(1 - \frac{G_r}{G_{23f}}\right)}} \quad (3.3)$$

$$G_{23} = \frac{G_r}{1 - \sqrt{V_f \left(1 - \frac{G_r}{G_{23f}}\right)}} \quad (3.4)$$

$$v_{12} = V_f v_{12f} + V_r v_r \quad (3.5)$$

$$v_{23} = \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \quad (3.6)$$

$$(\sigma_1^C)_{ult} = \frac{G_r}{1 - v_f \left(1 - \frac{G_r}{G_{f12}}\right)} \quad (3.7)$$

$$(\sigma_2^C)_{ult} = \left(1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \left(1 - \frac{E_r}{E_{22f}}\right)\right) S_{rc} \quad (3.8)$$

$$(\sigma_1^T)_{ult} = V_f S_{fc} \quad (3.9)$$

$$(\sigma_2^T)_{ult} = \left( 1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \left( 1 - \frac{E_r}{E_{22f}} \right) \right) S_{rT} \quad (3.10)$$

$$(\tau_1)_{ult} = \left( 1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \left( 1 - \frac{G_r}{G_{22f}} \right) \right) S_{rS} \quad (3.11)$$

Burada  $(\sigma_1^T)_{ult}$  1 yönünde maksimum çekme dayanımını,  $(\sigma_2^T)_{ult}$  2 yönünde maksimum çekme dayanımını,  $(\sigma_1^C)_{ult}$  1 yönünde maksimum bası dayanımını,  $(\sigma_2^T)_{ult}$  2 yönünde maksimum bası dayanımını,  $(\tau_1)_{ult}$  1 yönünde maksimum kesme dayanımını,  $S_{rC}$  matris malzemesinin bası dayanımını,  $S_{rT}$  matris malzemesinin çekme dayanımını,  $S_{rS}$  ise matris malzemesinin kesme dayanımını ifade etmektedir.

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak kompozit malzemelerin özellikleri tablo 3.4’de verildiği hesaplanmıştır.

**Tablo 3. 4.** Kompozit yapıların mekanik özellikleri

| Malzeme özellikleri        | Karbon kompozit | Cam kompozit |
|----------------------------|-----------------|--------------|
| $E_{11}$ (MPa)             | 127240          | 27280        |
| $E_{22}$ (MPa)             | 13080           | 7948.7       |
| $E_{33}$ (MPa)             | 13080           | 7948.7       |
| $\nu_{11}$                 | 0.318           | 0.318        |
| $\nu_{13}$                 | 0.23            | 0.23         |
| $\nu_{23}$                 | 0.19            | 0.2          |
| $G_{12,13,23}$             | 1943            | 3055.5       |
| $(\sigma_1^T)_{ult}$ (MPa) | 2700            | 1800         |
| $(\sigma_2^T)_{ult}$ (MPa) | 26.7            | 37.69        |
| $(\sigma_1^C)_{ult}$ (MPa) | 1822            | 2165.3       |
| $(\sigma_2^C)_{ult}$ (MPa) | 46.64           | 62.8         |
| $(\tau_2)_{ult}$ (MPa)     | 56              | 8.5          |

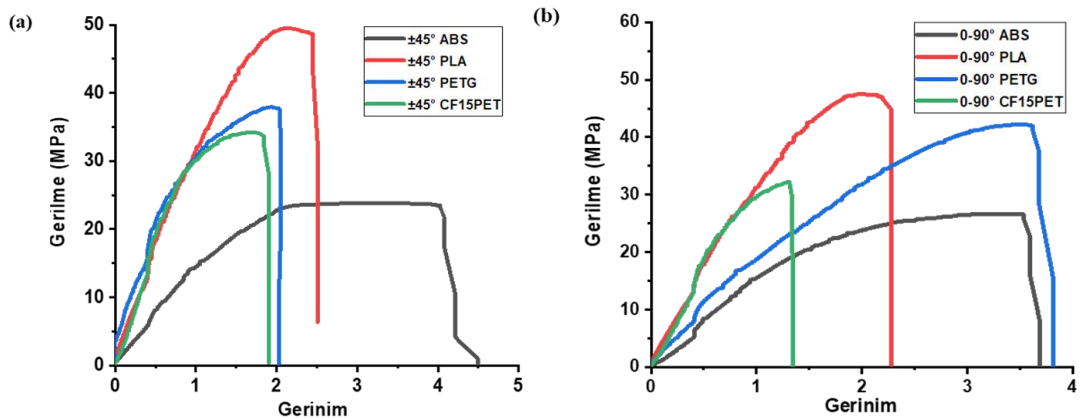
## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1. Filamentlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 4.1.1. Çekme Testi Sonuçları

Şekil 4.1’de verilen grafikler incelendiğinde malzemelerin çekme testi sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

- PLA malzemesi incelendiğinde  $\pm 45^\circ$  üretim açısına sahip olan test numunesinin  $0-90^\circ$  ile üretilen test numunesine göre yaklaşık %3.28 daha yüksek çekme dayanımı olduğu tespit edilmiştir.
- ABS malzemesi incelendiğinde  $0-90^\circ$  üretim açısına sahip olan test numunesinin  $\pm 45^\circ$  ile üretilen test numunesine göre yaklaşık %12 daha yüksek çekme dayanımı olduğu tespit edilmiştir.
- PETG malzemesi incelendiğinde  $0-90^\circ$  üretim açısına sahip olan test numunesinin  $\pm 45^\circ$  ile üretilen test numunesine göre yaklaşık %13 daha yüksek çekme dayanımı olduğu tespit edilmiştir.
- CFPET malzemesi incelendiğinde  $0-90^\circ$  üretim açısına sahip olan test numunesinin  $\pm 45^\circ$  ile üretilen test numunesi kıyaslandığında yaklaşık olarak %5 daha yüksek çekme dayanımına tespit edilmiştir.



Şekil 4. 1. Çekme testi sonuçları (a)  $\pm 45^\circ$  tarama açılı, (b)  $0-90^\circ$  tarama açılı

Ayrıca bu malzemelerin 500 mm/dk yükle hız ile çekme testi yapılmış ve sonuçlar simülasyonlarda kullanılmıştır. Tablo 4.1’de verilen yüksek hızlı çekme testi incelendiğinde malzemelerin çekme dayanımı ve uzama değerlerinde farklılıklar olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 1. Yüksek hızlı çekme sonuçları**

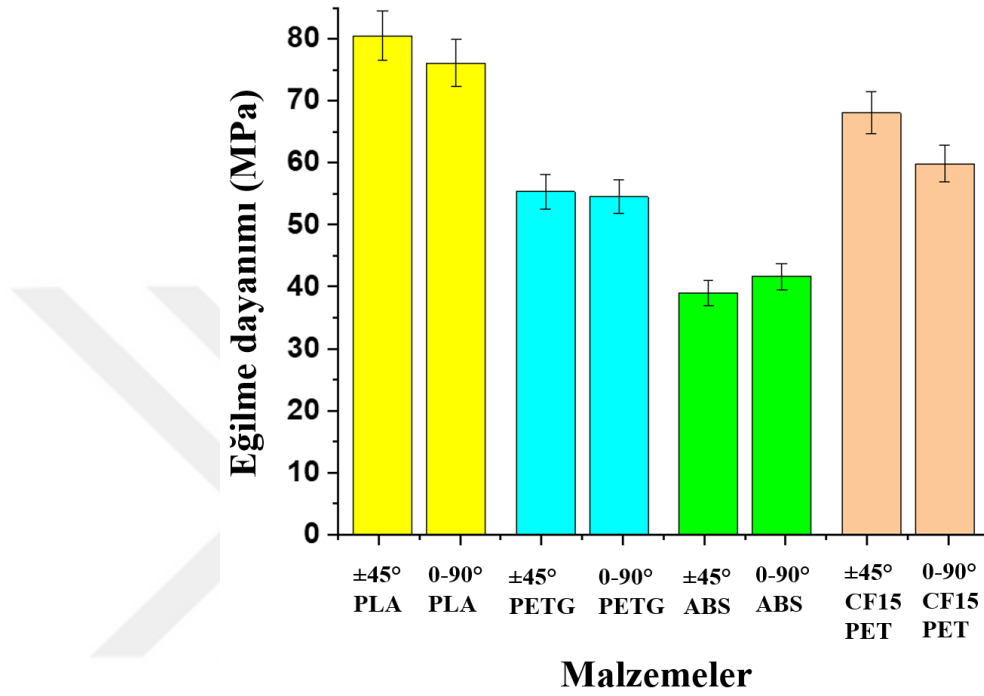
|         | <b>Yoğunluk<br/>(kg/mm<sup>3</sup>)</b> | <b>Youngs<br/>Modülü<br/>(MPa)</b> | <b>Poisson<br/>Oranı</b> | <b>Çekme<br/>dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>Kırılma<br/>dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>Uzama<br/>(%)</b> |
|---------|-----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| CF15PET | 1970                                    | 6178                               | 0.38                     | 49.80                               | 45                                    | 2.2                  |
| ABS     | 1050                                    | 2437                               | 0.38                     | 32.7                                | 16.3                                  | 1.69                 |
| PLA     | 1240                                    | 4558                               | 0.38                     | 58.86                               | 29.377                                | 1.55                 |

#### 4.1.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Şekil 4.2’de ABS, PLA, PETG ve CF15PET malzemelerin üç nokta eğme sonucu verilmiştir. Üç nokta eğme sonucu şu şekilde özetlenebilir;

- ABS malzemesi test sonucu incelendiğinde 0-90° açı ile üretilen malzemenin gerilme dayanımı  $\pm 45^\circ$  ile üretilen malzemedan yaklaşık olarak %6,88 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.  $\pm 45^\circ$  açı ile üretilen numunenin uzama değerinin 0-90° açı değeri ile üretilenden yaklaşık olarak %12,29 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- PETG malzemesi test sonucu incelendiğinde  $\pm 45^\circ$  açı ile üretilen malzemenin gerilme dayanımı 0-90° ile üretilen malzemedan yaklaşık olarak %1,5 daha fazla olduğu ve uzama değerinin yaklaşık olarak %3,85 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- PLA malzemesi test sonucu incelendiğinde  $\pm 45^\circ$  açı ile üretilen malzemenin gerilme dayanımı 0-90° ile üretilen malzemedan yaklaşık olarak %6,2 daha fazla olduğu ve uzama değerinin yaklaşık olarak %27 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- CF15PETG malzemesi test sonucu incelendiğinde  $\pm 45^\circ$  açı ile üretilen malzemenin gerilme dayanımı  $0-90^\circ$  ile üretilen malzemedan yaklaşık olarak %13,8 daha fazla olduğu ve uzama değerinin yaklaşık olarak %41,8 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



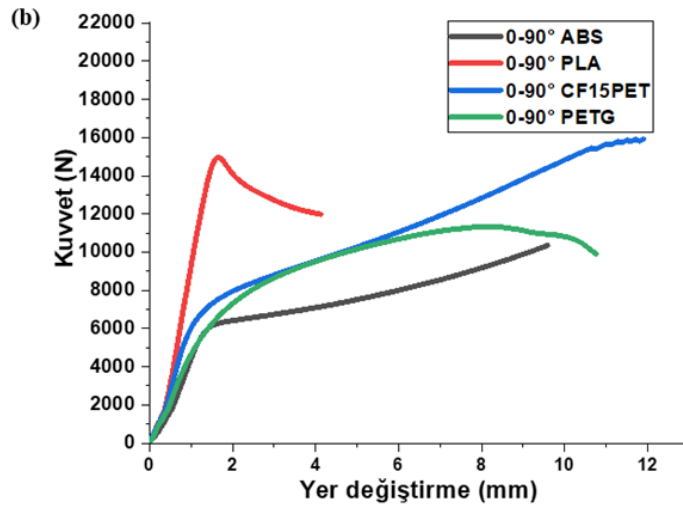
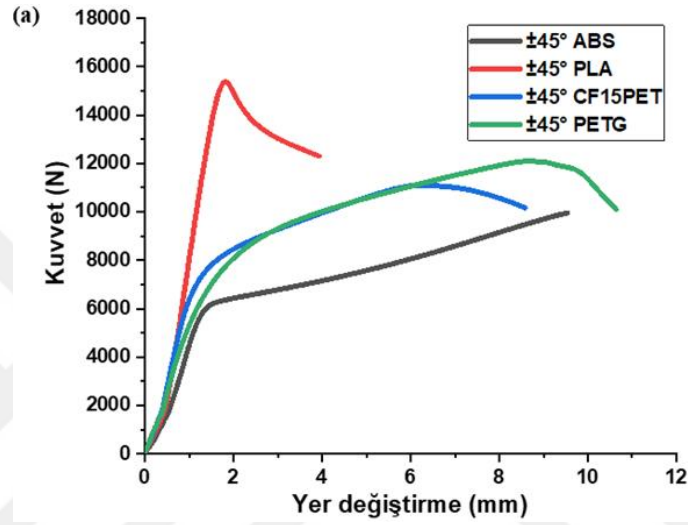
Şekil 4. 2. Farklı tarama açıları ile üretilen parçaların üç nokta eğme dayanımı

#### 4.1.3. Basma Testi Sonuçları

Basma testi için ASTM D695 standartlarında 5 adet numune üretilerek ilgili testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3’de verilen test sonuçları incelendiğinde;

- PLA malzemesi kullanılarak  $\pm 45^\circ$  açısıyla üretilen malzemenin,  $0-90^\circ$  açısıyla üretilen malzemeye bası dayanımından yaklaşık olarak %3 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- ABS malzemesi kullanılarak  $0-90^\circ$  açısıyla üretilen malzemenin,  $\pm 45^\circ$  açısıyla üretilen malzemeye bası dayanımından yaklaşık olarak %7,5 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- ABS malzemesi kullanılarak 0-90° açısıyla üretilen malzemenin,  $\pm 45^\circ$  açısıyla üretilen malzemeye bası dayanımından yaklaşık olarak %2,5 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- CF15PET malzemesi kullanılarak 0-90° açısıyla üretilen malzemenin,  $\pm 45^\circ$  açısıyla üretilen malzemeye bası dayanımından yaklaşık olarak %7,5 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. 3. Farklı tarama açıları ile üretilen parçaların bası dayanımı

#### 4.1.4. Izod Darbe Testi Sonuçları

Tablo 4.2’de verilen izod darbe sonuçları incelendiğinde;

- ABS malzemesi için test sonucu incelendiğinde  $\pm 45^\circ$  baskı açısıyla üretilen numunelerin darbe dayanımı  $0-90^\circ$  baskı açısıyla üretilen numunelerden yaklaşık olarak %63 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- PETG malzemesi için test sonucu incelendiğinde  $\pm 45^\circ$  baskı açısıyla üretilen numunelerin darbe dayanımı  $0-90^\circ$  baskı açısıyla üretilen numunelerden yaklaşık olarak %23 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- PLA malzemesi için test sonucu incelendiğinde  $\pm 45^\circ$  baskı açısıyla üretilen numunelerin darbe dayanımı  $0-90^\circ$  baskı açısıyla üretilen numunelerden yaklaşık olarak %17 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- CF15PETG malzemesi için test sonucu incelendiğinde  $\pm 45^\circ$  baskı açısıyla üretilen numunelerin darbe dayanımı  $0-90^\circ$  baskı açısıyla üretilen numunelerden yaklaşık olarak %23 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan izod testi sonucunda  $\pm 45^\circ$ ’lik açılarla üretilen numunelerin  $0-90^\circ$ ’lik açılarla üretilen numunelere göre daha fazla darbe enerjisi emilimi sağladığı belirlenmiştir. Bu durumun temel sebebinin  $\pm 45^\circ$ ’lik üretim açısına sahip olan malzemelerin gelen darbe kuvvetini karşılayarak malzeme tokluğunu arttırdığı tespit edilmiştir

**Tablo 4. 2.** Izod darbe testi sonuçları

| Malzeme                | Enerji (J) | Darbe Enerjisi ( $\text{kJ/m}^2$ ) |
|------------------------|------------|------------------------------------|
| $\pm 45^\circ$ ABS     | 1.0672     | 26.16                              |
| $0-90^\circ$ ABS       | 0.6454     | 16.02                              |
| $\pm 45^\circ$ PETG    | 0.9789     | 23.41                              |
| $0-90^\circ$ PETG      | 0.7956     | 19.03                              |
| $\pm 45^\circ$ PLA     | 0.7014     | 16.37                              |
| $0-90^\circ$ PLA       | 0.5902     | 13.95                              |
| $\pm 45^\circ$ CF15PET | 0.8370     | 18.58                              |
| $0-90^\circ$ CF15PET   | 0.7020     | 15.38                              |

#### 4.1.5. Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Belirlenmesi

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri tablo 4.3’de sunulduğu gibi çekme testi yönüne paralel ve dik olarak alınmıştır. Gerçekleştirilen testlerde tüm numune ve yönlenmeler için beşer tekrarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü endüstride sıklıkla kullanılan yüzey pürüzlülüğü ortalamasıdır. Çekme yönüne dik doğrultuda alınan yüzey pürüzlülük testlerinde ABS malzeme için 0-90° açı ile üretilen numunelerin  $\pm 45^\circ$  açı ile üretilen numuneden daha fazla yüzey pürüzlülüğe sahip olduğu belirlenmiştir. PETG, PLA ve CF15PETG malzemeleri için  $\pm 45^\circ$  açı ile üretilen numunelerin 0-90° ile üretilen numunelere göre daha az yüzey pürüzlülüğe sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çekme yönüne yatay yönde üretilen numunelerde ise ABS, PLA ve PETG numunelerinin 0-90° açısıyla üretilen numunelerin  $\pm 45^\circ$  açılarla üretilen numunelere göre düşük yüzey pürüzlülüğe sahip olduğu belirlenmiştir. CF15PETG numunelerde ise  $\pm 45^\circ$  açılarla üretilen numunelerin 0-90° açılarla üretilen numunelere göre daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu belirlenmiştir.

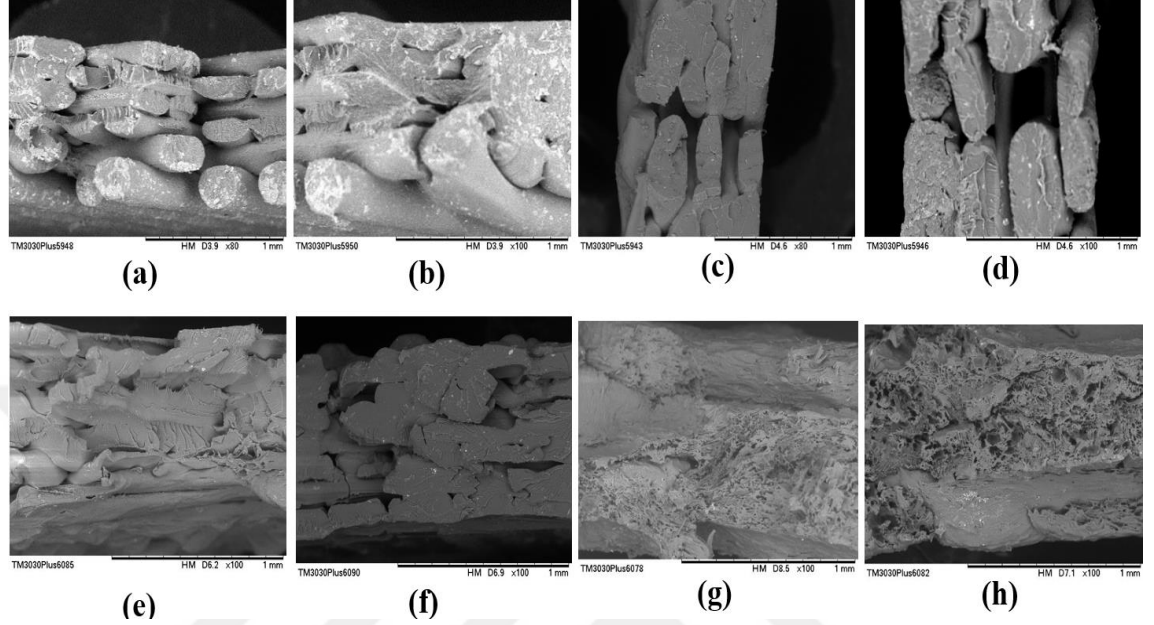
**Tablo 4. 3.** Çekme yönüne dikey ve yatay yönlerde yüzey pürüzlülüğü

|              | $\pm 45^\circ$ | 0-90°  | $\pm 45^\circ$ | 0-90°  | $\pm 45^\circ$ | 0-90°  | $\pm 45^\circ$ | 0-90°   |
|--------------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|
|              | ABS            | ABS    | PLA            | PLA    | PETG           | PETG   | CF15PET        | CF15PET |
| <b>Dikey</b> | 3.694          | 2.895  | 3.241          | 4.3825 | 4.6255         | 4.838  | 3.020          | 6.589   |
| <b>Yatay</b> | 3.474          | 0.9626 | 3.5796         | 1.9844 | 6.7332         | 2.9312 | 4.6858         | 6.0424  |

#### 4.1.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülerinin İncelenmesi

Şekil 4.4’de ABS, PETG, CF15PET ve PLA malzemelerin SEM görüntüleri ifade edilmiştir. Malzeme çekme deneyi sonrasında, malzemenin kopmuş olduğu alanda ki davranışı izlemek amacıyla alınan SEM görüntülerine göre  $\pm 45^\circ$  açılarla üç boyutlu yazıcı ile baskısı yapılan malzemelerin homojen bir şekilde birbirleri arasında ve üzerinde yapıştığı gözlemlenmiştir. 0-90° açılarla üç boyutlu yazıcı ile baskısı yapılan malzemelerin ise birbirleri üzerinde homojen olarak yapışmadıkları ve yüzeyleri

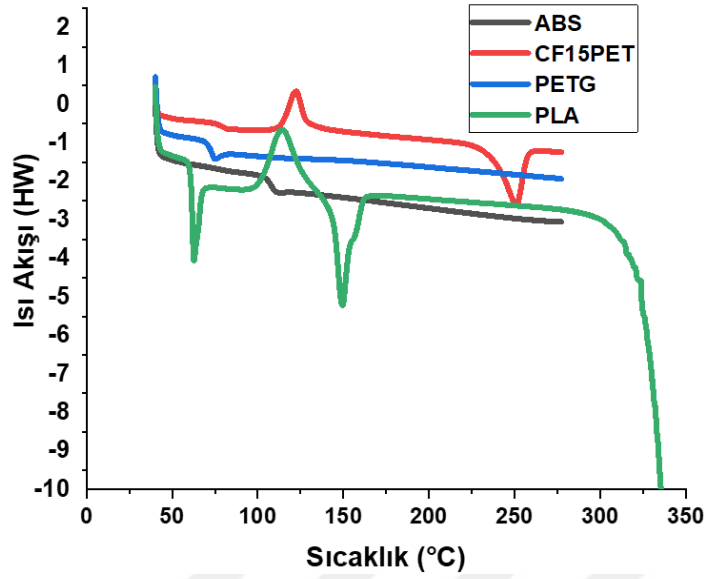
arasında boşluklar kaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun temel sebebinin üç boyutlu yazıcının baskı hızı ve sıcaklığı ile ilgisi olabileceği tespit edilmiştir.



**Şekil 4. 4.** SEM görüntüleri; (a)  $\pm 45^\circ$  ABS, (b)  $0-90^\circ$  ABS, (c)  $\pm 45^\circ$  PLA, (d)  $90^\circ$  PLA, (e)  $\pm 45^\circ$  PETG, (f)  $90^\circ$  PETG, (g)  $\pm 45^\circ$  CF15PET, (h)  $0-90^\circ$  CF15PET

#### 4.1.7. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Ölçümleri (DSC)

Şekil 4.5’de PLA, PETG, CFPET ve ABS malzemelerin DSC eğrileri ifade edilmiştir. PLA malzeme için camsı geçiş sıcaklığı  $62,94^\circ\text{C}$  ve erime sıcaklığı başlangıcı  $140,54^\circ$ , ABS malzeme için camsı geçiş sıcaklığı  $112,14^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiş olup erime sıcaklığı ölçüm aralığında belirlenememiştir. PETG malzemesi, diğer termoplastikler gibi erime sıcaklığına sahip bir polimerdir. Genellikle  $220-250^\circ\text{C}$  aralığında erime sıcaklığına sahiptir. Ancak, PETG malzemesinin erime sıcaklığına sahip olmaması, genellikle FDM 3D baskı teknolojisi için kullanılan filament formundaki PETG malzemesi için geçerlidir ve bu çalışmada PETG malzemesi camsı geçiş sıcaklığı  $75,38^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir. CF15PET malzeme için camsı geçiş sıcaklığı  $83,21^\circ\text{C}$  ve erime sıcaklığı  $250,94^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir.

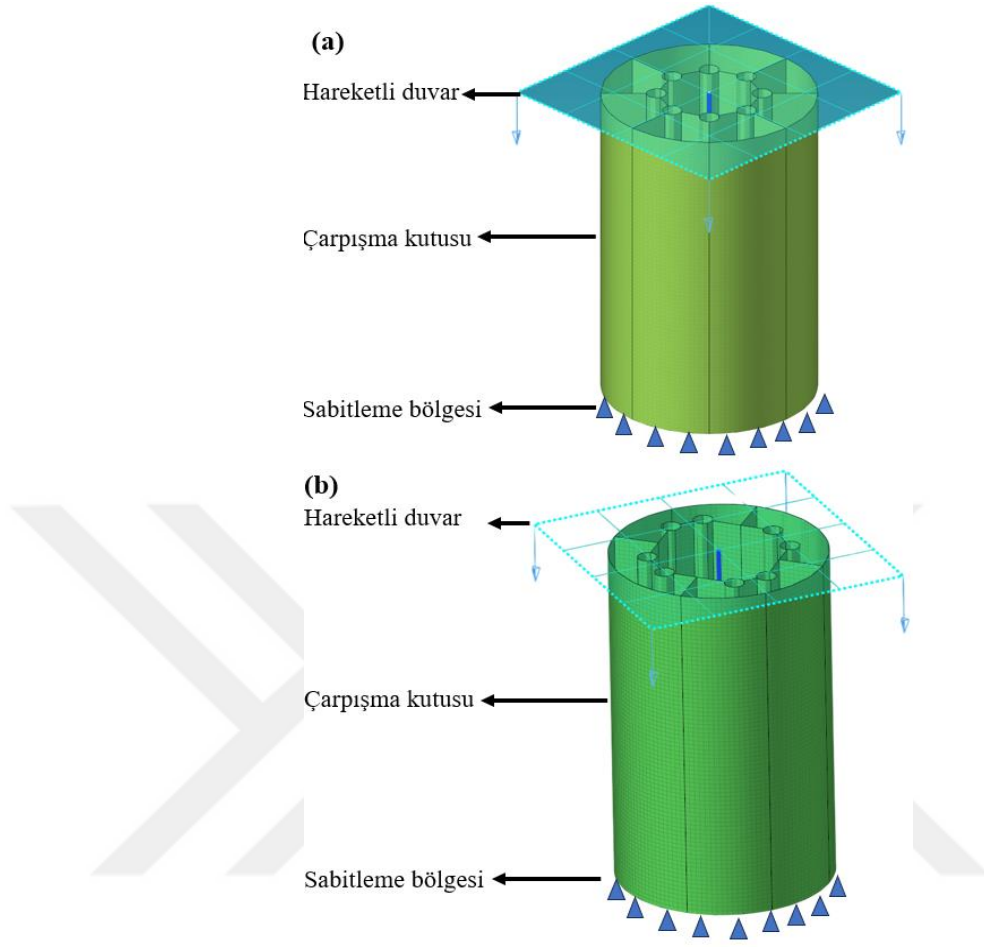


Şekil 4. 5. Malzemelerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

#### 4.2. PLA, ABS, PETG ve CF15PET Malzemeli Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

##### 4.2.1. Birinci ve İkinci Tasarım Çarpışma kutularının Simülasyonlarının Kurulumu

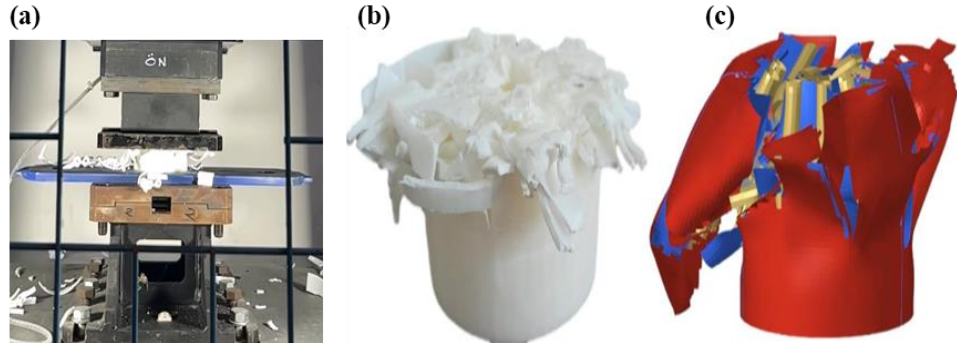
Birinci tasarım çarpışma kutularının simülasyonları sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Birinci çarpışma kutusu analizlerinin kurulumunda ‘MAT 2’ kartı kullanılarak tablo 4.1’de verilen yüksek hızlı çekme testi sonuçları kullanılmıştır. Bu çalışmada iki hem 2 mm/dk hem de 500 mm/dk hızlarda çekme testi yapılmıştır. Çarpışma kutuları yüksek hızlarda test edildiklerinden dolayı malzeme verisi olarak yüksek hızlı çekme testi sonucu kullanılmıştır. Çarpışma kutularının tasarımında ince duvarlı 2 mm et kalınlığında olan çarpışma kutuları için özellik kartı olarak ‘P1\_SHELL’ kartı tanımlaması yapılmıştır. Malzeme ve özellik kartlarının tanımlanmasından sonra şekil 4.6’da verildiği gibi çarpışma kutuları alt noktalarından tüm eksenlerde kısıtlanmıştır. Test anında 2 kJ’lık enerji kullanıldığı için şekil 4.6’da gösterildiği gibi çarpışma kutularının üstüne düşey darbe etkisi oluşturan rijit duvar tanımlaması yapılmış ve 2650 mm/sn hız tanımlaması yapılmıştır. Son olarak çarpışma kutularının analizleri sonucunda kuvvet ve yer değiştirme değerlerinin elde edilmesi ve grafiklerin oluşturulması amacıyla çıkış blokları oluşturulmuştur.



**Şekil 4. 6.** Simülasyon kurulumu **(a)** birinci tasarım, **(b)** ikinci tasarım

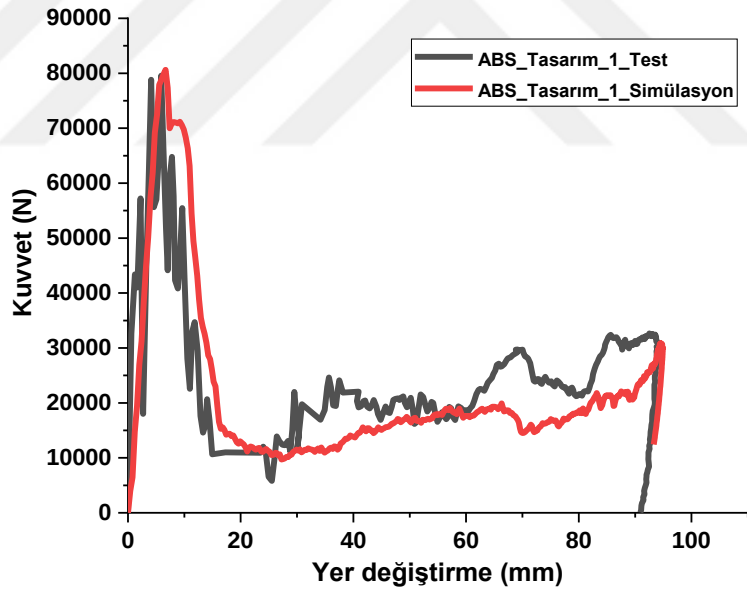
#### **4.2.2. ABS Malzemeli Birinci Tasarım Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi**

Şekil 4.7’de ABS malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusunun test ve simülasyon görselleri verilmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde çarpışma kutularında düşey darbe kuvvetinin etkisinden dolayı kırılmalar meydana gelmiştir. Şekil 4.7 (a, b, c)’de test ve simülasyon sonrası çarpışma kutuları görsellerinin birbirleri ile benzer davranış sergilediği belirlenmiştir.



**Şekil 4. 7.** ABS malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görsel

Şekil 4.8’de ABS malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Verilen grafik incelendiğinde test anında gerçekleşen kırılmalardan dolayı grafik çizgisi üzerinde titreşimler gerçekleşmiştir. Bu durum test veri okuma kapasitesine bağlı olarak da değişim göstermektedir.



**Şekil 4. 8.** ABS malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği

Tablo 4.4’de ABS malzemeli çarpışma kutusuna ait olan çarpışma performanslarını gösteren tablo verilmiştir. Tablo 4.4 incelendiğinde ABS malzemeli çarpışma kutularının maksimum kuvvet dayanımlarının yaklaşık olarak 80000 N olduğu, test ve simülasyon sonrası elde edilen değerlerin birbirleri ile yakın değerler oldukları

belirlenmiştir. Maksimum kuvvet noktasından sonra grafikte düşüş gerçekleşmiştir. Gerçekleşen bu kuvvet düşüş darbe kuvvetinin etkisiyle gerçekleşen kırılmalardan kaynaklanmıştır. Çarpışma kutularının performans kriterlerinden olan özgül enerji emilimi sonuçları incelendiğinde test ve simülasyon sonucunda hata oranının %3,3 oranında olduğu belirlenmiştir. Test ve simülasyon sonrasında maksimum kuvvet ve ortalama kuvvet değerlerinde hata oranı ise sırasıyla %1,33 ve %12,6 olarak gerçekleşmiştir.

**Tablo 4. 4.** ABS malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları

|                   | <b>Maksimum kuvvet<br/>(N)</b> | <b>Ortalama kuvvet<br/>(N)</b> | <b>Yer değiştirme<br/>(mm)</b> | <b>Enerji emilimi<br/>(kJ)</b> | <b>Özgül enerji emilimi<br/>(kJ/Kg)</b> |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Test</b>       | 79568                          | 24928,89                       | 94                             | 2                              | 9,61                                    |
| <b>Simülasyon</b> | 80627                          | 21782,77                       | 94,9                           | 2                              | 9,93                                    |
| <b>% Hata</b>     | +1,33                          | -12,6                          |                                |                                | +3,3                                    |

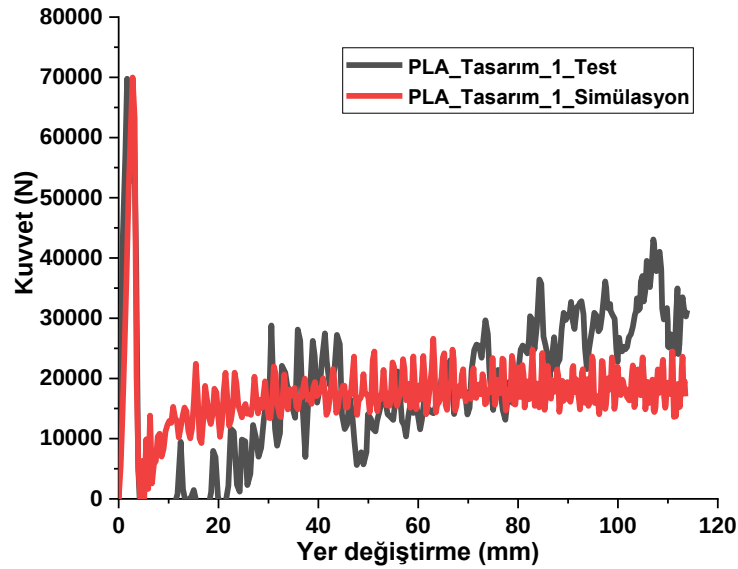
#### 4.2.3. PLA Malzemeli Birinci Tasarım Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.9’da PLA malzemeli birinci tasarım test ve simülasyon sonrası görseller verilmiştir. Şekil 4.9’da verilen görseller incelendiğinde PLA malzemesi tıpkı ABS’de olduğu kırılmalar meydana gelmiştir. Ancak PLA malzemesi, ABS malzemesine göre daha rijit yapıda olduğu için kırılmalar daha belirgin bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum çarpışma kutusunun enerji emilim performansına etkisi olmuştur. PLA malzemeli çarpışma kutusu tıpkı ABS malzemesi gibi tüm enerjiyi emmiştir.



**Şekil 4. 9.** PLA malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu **a.)** test görseli, **b.)** test sonrası görsel, **c.)** simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.10’da PLA malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.10’da verilen grafik incelendiğinde çarpışma kutuları düşey darbe kuvvetinin etkisine bağlı olarak maksimum kuvvet noktasına ulaştıktan sonra ani kırılma gerçekleşerek kuvvet sıfıra düşmüştür. Bu durum PLA malzemesinin rijit yapıda olmasından kaynaklıdır düşünülmektedir. Kuvvet düşüşünün ardından hemen sonra grafik tekrar pozitif yönde ilerlemeye başlamış ve kırılmalara rağmen enerji emilimine devam etmiştir.



**Şekil 4. 10.** PLA malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği

Tablo 4.5’de PLA malzemeli çarpışma kutularının test ve simölasyon sonucunda elde edilen çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.5 incelendiğinde maksimum kuvvet noktası 69767 N olarak gerçekleşmiş ve simölasyon sonucu ile aralarında %0,3 oranında hata payı oluşmuştur. Ortalama kuvvet ve özgül enerji emilimi açısından hata oranları ise sırasıyla %12,9 ve %1,34 olarak gerçekleşmiştir. PLA malzemeli çarpışma kutularının spesifik enerji emilimi açısından ABS malzemeli çarpışma kutusundan daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durumun temel nedenin PLA arpışma kutusunun test anında kırılma oranının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.

**Tablo 4. 5.** PLA malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları

|                     | <b>Maksimum kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama kuvvet (N)</b> | <b>Yer değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji emilimi (kJ)</b> | <b>Özgöl enerji emilimi (kJ/Kg)</b> |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Test</b>         | 69767                      | 20159,31                   | 113                        | 2                          | 8,2                                 |
| <b>Simölasyon</b>   | 69981,53                   | 17855,13                   | 113                        | 2                          | 8,09                                |
| <b>% Hata oranı</b> | +0,3                       | -12,9                      |                            |                            | -1,34                               |

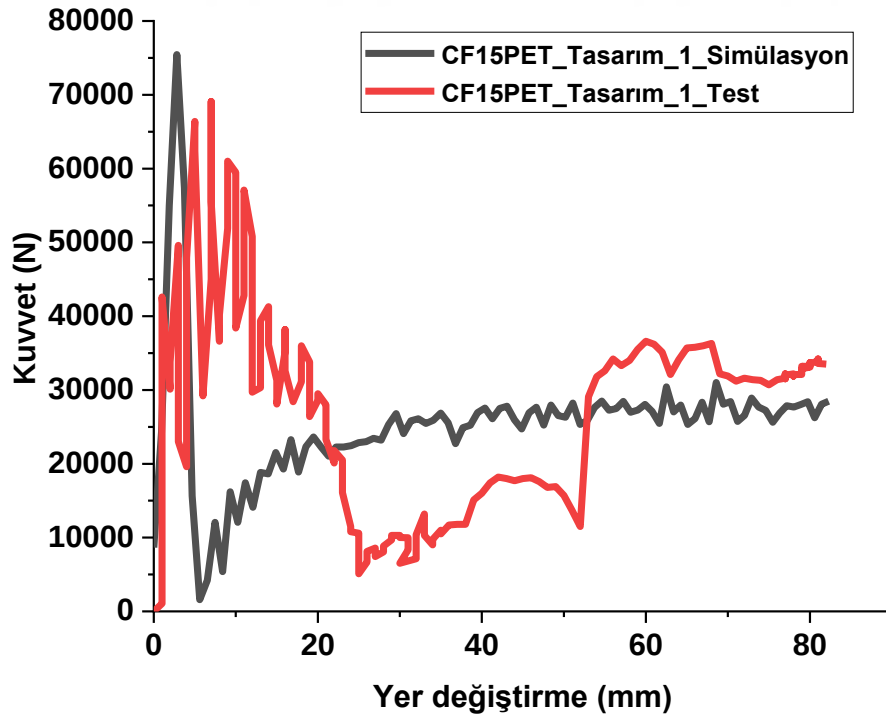
#### 4.2.4. CF15PET Malzemeli Birinci Tasarım arpışma Kutularının Test ve Simölasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.11’de CF15PET malzemeli çarpışma kutularının test ve analiz sonrası görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde test ve analizlerde çarpışma kutularının PLA ve ABS malzemeli çarpışma kutularında olduğu gibi kırılmalar meydana geldiğı belirlenmiştir. Test sırasında düşey darbe kuvvetinin etkisiyle gerçekleşen kırılma ABS malzemeli çarpışma kutularına benzer şekilde olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 11.** CF15PET malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görsel

Şekil 4.12’de CF15PET malzemeli çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrasında elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde test sırasında kuvvet yaklaşık 69000 N değerine ulaştıktan hemen sonra kademli olarak kırılmalar meydana gelerek yaklaşık 25mm yer değiştirme sonrasında minimum kuvvet noktasına ulaşarak hemen ardından kuvvet yukarı yönde ilerlemeye başlamıştır. Simülasyon grafiği incelendiğinde maksimum kuvvet noktasının test ile benzer değerde olduğu ve kırılma düşüşlerinin benzer olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 12.** CF15PET malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği

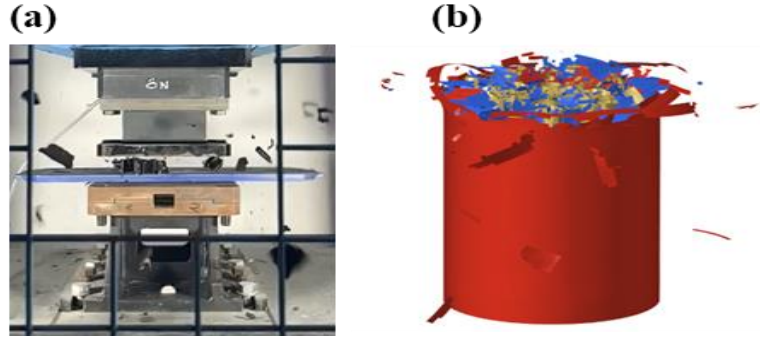
Tablo 4.6’da CF15PET malzemeli çarpışma kutularının çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.6’da ki veriler incelendiğinde test ve simülasyon sonuçlarının hata oranının %9,18 olduğu belirlenmiştir. Ortalama kuvvet değerleri kıyaslandığında ise hata oranı %0,3 oranında olduğu, test ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir. Çarpışma kutularının özgül enerji emilimi değerleri incelendiğinde ise test ve simülasyon sonuçlarında hata oranının %4,2 olduğu belirlenmiştir. CF15PET malzemesi PLA malzemesinden daha sünek yapıda olduğundan dolayı enerji emilim değeri PLA malzemesi çarpışma kutusundan bir miktar yüksek gerçekleşmiştir.

**Tablo 4. 6.** CF15PET malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları

|                     | <b>Maksimum kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama kuvvet (N)</b> | <b>Yer değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji emilimi (kJ)</b> | <b>Özgül enerji emilimi (kJ/Kg)</b> |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Test</b>         | 69100                      | 25598,17                   | 82                         | 2                          | 8,1                                 |
| <b>Simülasyon</b>   | 75445,45                   | 25506,09                   | 82                         | 2                          | 8,54                                |
| <b>% Hata oranı</b> | +9,18                      | -0,3                       |                            |                            | +5,43                               |

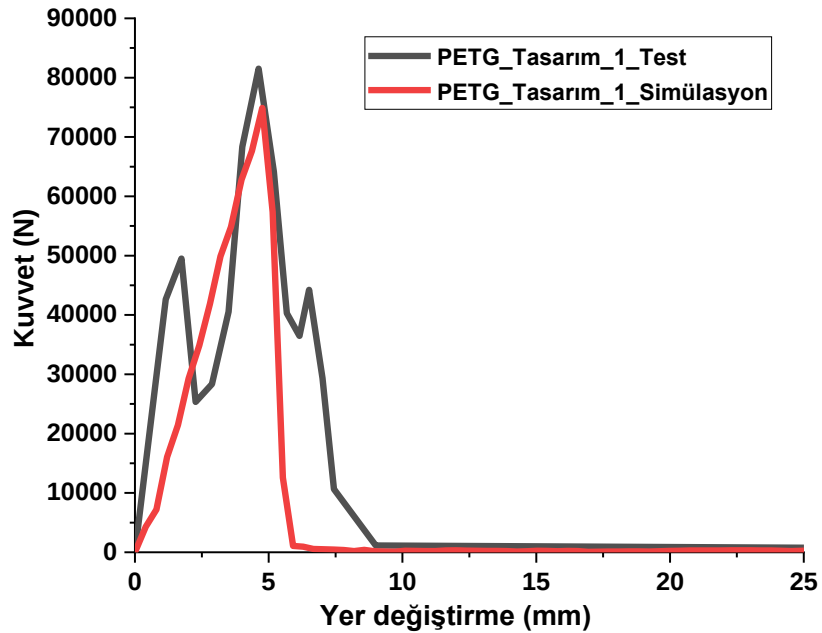
#### 4.2.5. PETG Malzemeli Birinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.13’de PETG malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu test ve simülasyon sonucu verilmiştir. PETG malzemeli çarpışma kutuları diğer malzemelere göre daha rijit yapıda olduklarından dolayı maksimum kuvvet noktasına ulaştıktan sonra patlama şeklinde kırılmalar olduğundan dolayı test sonucunda çarpışma kutularında parça bulunamamıştır. Şekil 4.13 (b)’de verilen simülasyon görselinde parça kalmasının sebebi ise analiz programının ezilecek parça kalmamasından dolayı hata vererek analizi sonlandırmasından kaynaklanmaktadır.



**Şekil 4. 13.** PETG malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.14’de PETG malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.14’de verilen grafik incelendiğinde çarpışma kutularında kuvvet maksimum noktaya ulaştıktan hemen sonra ani düşüşler olmuş ve kuvveti karşılayacak çarpışma kutusu parçası olmadığından dolayı enerji emilimine devam etmemiştir. PETG malzemeler diğer malzemeler ile kıyaslandığında en yüksek rijitliğe sahip olan malzeme olmasından dolayı yapı tamamen kırılmış ve enerji emilimi oldukça az gerçekleşmiştir.



**Şekil 4. 14.** PETG malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği

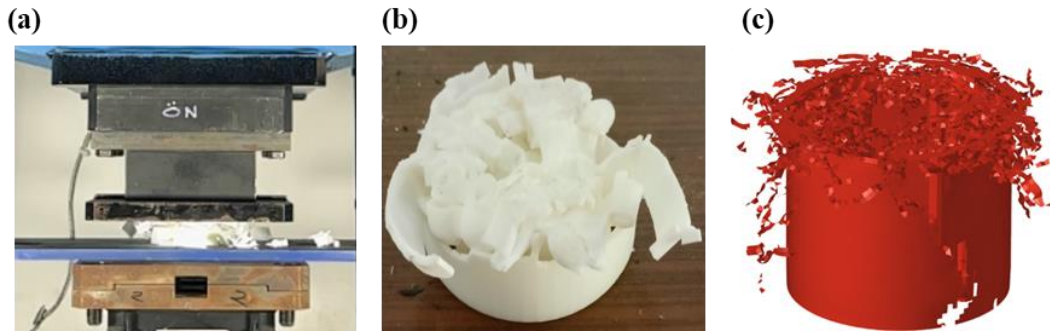
Tablo 4.7’de PETG malzemeli çarpışma kutularının çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.7 incelendiğinde test ve simülasyon sonrasında maksimum kuvvet noktasında değerlerinde hata oranı %8,8, ortalama kuvvet için hata oranı %33,3 ve spesifik enerji emilim değerlerinde ise %17,7 oranında hata ile gerçekleşmiştir. PETG malzemesinin rijitliğinden dolayı test ve simülasyon sonuçlarında belirli oranda hata olmasına neden olmuştur.

**Tablo 4. 7.** PETG malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Enerji emilimi (kJ) | Özgül enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 81509               | 2755,855            | -                   | 2                   | 1,03                         |
| <b>Simülasyon</b>   | 74905,71            | 8202,85             | -                   | 2                   | 0,875                        |
| <b>% Hata oranı</b> | -8,8                | +33,6               |                     |                     | -17,7                        |

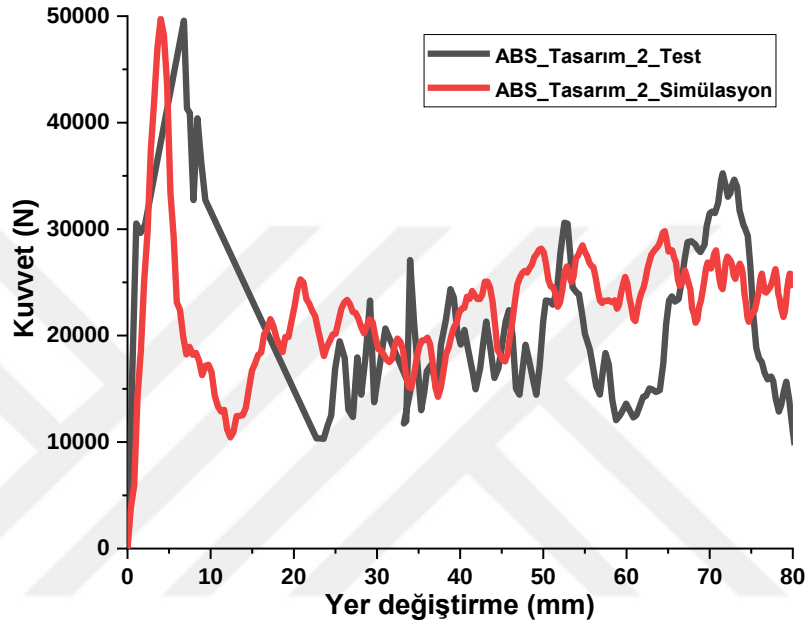
#### 4.2.6. ABS Malzemeli İkinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.15’de ABS malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde ABS malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutusunda birinci tasarımlı çarpışma kutusuna göre daha fazla kırılmalar meydana gelmiştir. Bunun nedeninin iç kısımda bulunan çok hücreli yapıların hem konumu hem de tasarımları ile ilgili olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4. 15.** ABS malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.16’de ABS malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.16 incelendiğinde hem test hem de analiz sonucunda maksimum kuvvetin yaklaşık olarak 50000 N olduğu belirlenmiştir. Maksimum noktadan sonra çarpışma kutularında gerçekleşen kırılmалardan dolayı kuvvet düşmüştür.



**Şekil 4. 16.** ABS malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği

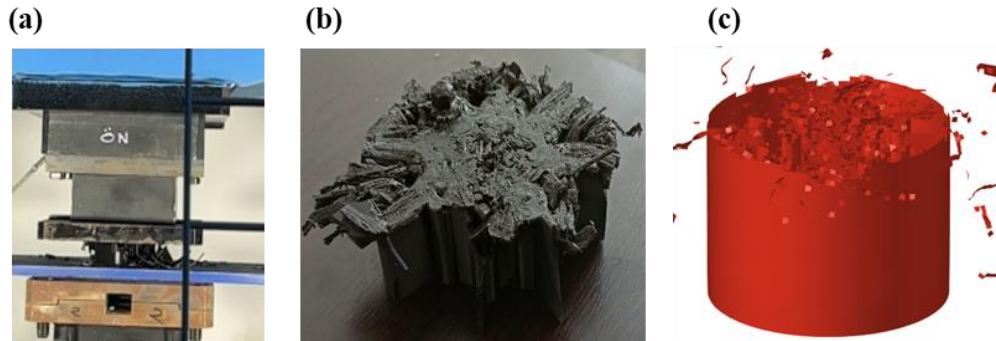
Tablo 4.8’de ABS malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının çarpışma performansını veren değerler tablo olarak sunulmuştur. Tablo 4.8 incelendiğinde maksimum kuvvet noktasında test ve simülasyon sonucunda hata oranının +0.4, ortalama kuvvet hata oranı %9,7 ve özgül enerji emilimi değerinde %8,73 oranında hata oranı gerçekleşmiştir. Yapılan test ve simülasyon sonucunda ABS malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutusunun özgül enerji emilimi 8,36 kJ/ kg olarak belirlenmiştir. İkinci tasarımın özgül enerji emilimi değeri birinci tasarımdan daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 4. 8.** ABS malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Enerji emilimi (kJ) | Özgöl enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 49582               | 20897               | 81                  | 1.75                | 8,36                         |
| <b>Simölasyon</b>   | 49758               | 22933,33            | 80                  | 1.83                | 9,09                         |
| <b>% Hata oranı</b> | +0,4                | +9,7                |                     |                     | +8,73                        |

#### 4.2.7. PLA Malzemeli İkinci Tasarım arpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

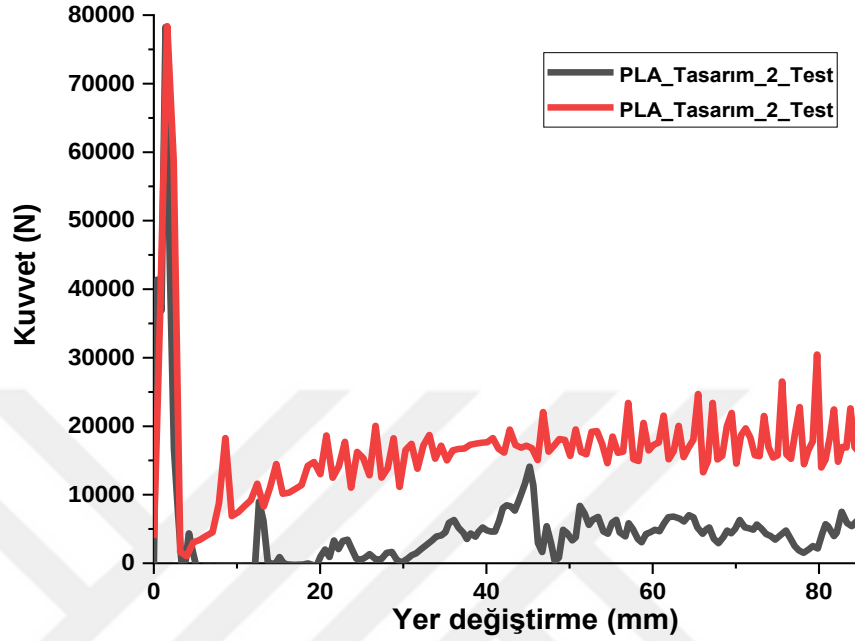
şekil 4.17’de test ve simölasyon sonucunda elde edilen göröntüler verilmiştir. şekil 4.17 incelendiğinde PLA malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının test ve çarpışma kutularının kuvvet etki ile maksimum kuvvet noktasına ulaştıktan sonra kırılarak enerji emilimine devam ettiği belirlenmiştir. PLA malzemeli ikinci tasarım, ikinci tasarım çarpışma kutusuna farklı şekilde kırılma davranışı sergilemiştir. Kırılma davranışında gerçekleşen bu durumun temel sebebi iç kısımda bulunan hücrelerin geometrik boyut ve konumu ile alakalı olduğu düşünölmektedir.



**şekil 4. 17.** PLA malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutusu **(a)** test görşeli, **(b)** test sonrası görşel, **(c)** simölasyon sonrası görşeli

şekil 4.18’de PLA malzemeli çarpışma kutularının test ve simölasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. şekil 4.18’de verilen grafik incelendiğinde maksimum kuvvet noktası yaklaşık olarak 78000 N değerine ulaştıktan sonra ani kırılma meydana gelmiştir. Bu kırılma değeri 0 N değerine düşmüştür. Gerçekleşen bu ani düşüş birinci tasarıma göre daha yüksek olup, düşey darbe

kuvvetinin devam eden kısımlarda çarpışma kutuları yüksek oranda darbe kuvvetine karşı koyamamıştır.



**Şekil 4. 18.** PLA malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği

Tablo 4.9’da PLA ikinci tasarım çarpışma kutularının çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.9’da ki veriler incelendiğinde testte maksimum kuvvet değerinin yaklaşık olarak 7800 N olduğu belirlenmiştir. Simülasyon ve test değerleri incelendiğinde hata oranı %0,16 oranında olduğu tespit edilmiştir. Ancak ortalama kuvvet ve özgül enerji emilimlerinde hata oranları yaklaşık olarak 1,5 ve 3,33 kat fark olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerde gerçekleşen hata oranlarında ki farklılık maksimum kuvvetten sonra ki eğrilerin birbirleri ile uyumlu olmadığı, test veya çarpışma kutularının üretimi sırasında gerçekleşebilecek hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. CF15PET malzemeli birinci tasarım ile ikinci tasarım kıyaslandığında, birinci tasarımın daha yüksek oranda enerji emilimi sağladığı belirlenmiştir.

**Tablo 4. 9.** PLA malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Enerji Emilimi (kJ) | Özgül enerji Emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 78278               | 6425.71             | 85                  | 0.41                | 2,1                          |
| <b>Simülasyon</b>   | 78402,25            | 16820               | 86                  | 1.4                 | 7,1                          |
| <b>% Hata oranı</b> | +0.16               | 1,5 kat             |                     |                     | 3,3 kat                      |

#### 4.2.8. PLA Malzemeli İkinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

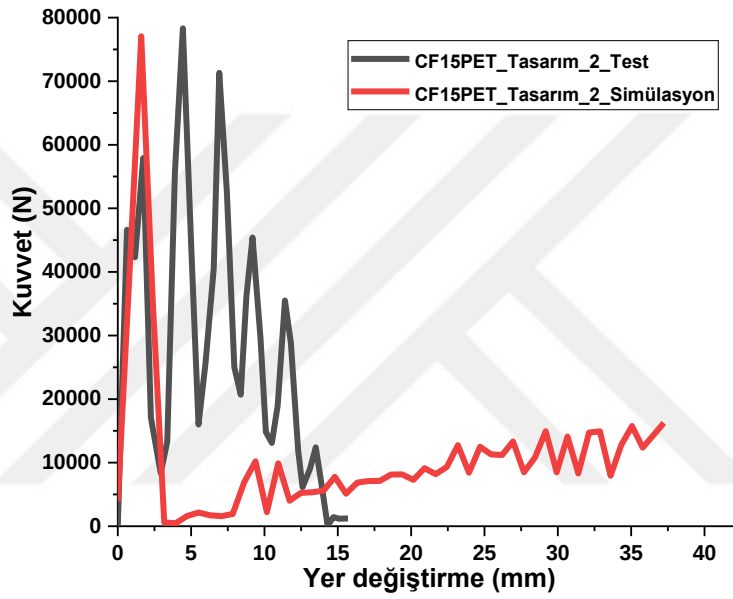
Şekil 4.19’da CF15PET malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.19 incelendiğinde CF15PET malzemesiyle üretilen ikinci tasarım çarpışma kutularının hem test hem de simülasyon sonucunda kırılmalar gerçekleştiği ve maksimum kuvvete ulaştıktan ani kırılmalar gerçekleştiğinden sonra darbe enerjisini az miktarda emilimi olduğu belirlenmiştir. CF15PET malzemesi, PLA malzemesine göre daha elastik olmasına rağmen çarpışma kutularının tasarımının etkisiyle yüksek oranda kırılmalar gerçekleştiği belirlenmiştir.



**Şekil 4. 19.** CF15PET malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.20’de CF15PET malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.20 incelendiğinde verilen grafik incelendiğinde test sonrasında maksimum kuvvet noktasının yaklaşık olarak 78300 N olduğu belirlenmiştir. Çarpışma kutularının test grafiği incelendiğinde keskin dalgalı gerçekleşmesinin sebebinin düşey darbe testi

cihazının veri okuma sıklığı veya kırılma anında parçanın üst üste binmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.20’de verilen simülasyon sonucu incelendiğinde ise maksimum kuvvet noktasına ulaştıktan sonra ani kırılmanın meydana geldiği ve bundan kuvveti minimum noktaya düşmesinin ardından ilerleyen kısımlarda enerji emilimine devam ettiği belirlenmiştir. Şekil 4.20’de test ve simülasyonda yer değiştirme miktarlarında meydana gelen bu farklılığın düşey darbe test cihazı üzerinde veri okuma hücrelerinin sıklığı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4. 20.** CF15PET malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği

Tablo 4.10’da CF15PET malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelendiği değerler verilmiştir. Tablo 4.10 incelendiğinde maksimum kuvvetin 78300 N olduğu belirlenmiştir. Maksimum kuvvet noktası için test ve simülasyon değerleri arasında hata oranının %1,5 olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Ancak şekil 4.20’de verilen grafikte de görüldüğü gibi ortalama kuvvet değerlerinde test ve simülasyon sırasında hata oranlarının fazla olduğu belirlenmiştir. Özgül enerji emilimi değerleri incelendiğinde ise hata oranı %0,4 olarak gerçekleşmiştir. CF15PET malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının enerji emilimlerinin birbirleri ile yakın olmasının simülasyonda yer değiştirme miktarının daha fazla olduğundan

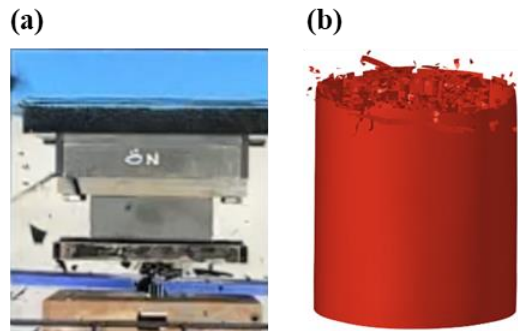
kaynaklanmaktadır. Burada çarpışma kutuları 2kJ olan uygulanan darbe testinin yaklaşık olarak 0,4 kJ'lik değerde emilim sağlamıştır.

**Tablo 4. 10.** CF15PET malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Enerji emilimi (kJ) | Özgül enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 78300               | 25844               | 15,7                | 0.41                | 1.81                         |
| <b>Simülasyon</b>   | 77058               | 10869               | 37,22               | 0.404               | 1,74                         |
| <b>% Hata oranı</b> | -1,5                | 2,3 kat             |                     |                     | -0,4                         |

#### 4.2.9. PETG Malzemeli İkinci Tasarım Çarpışma Kutusunun Test ve Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

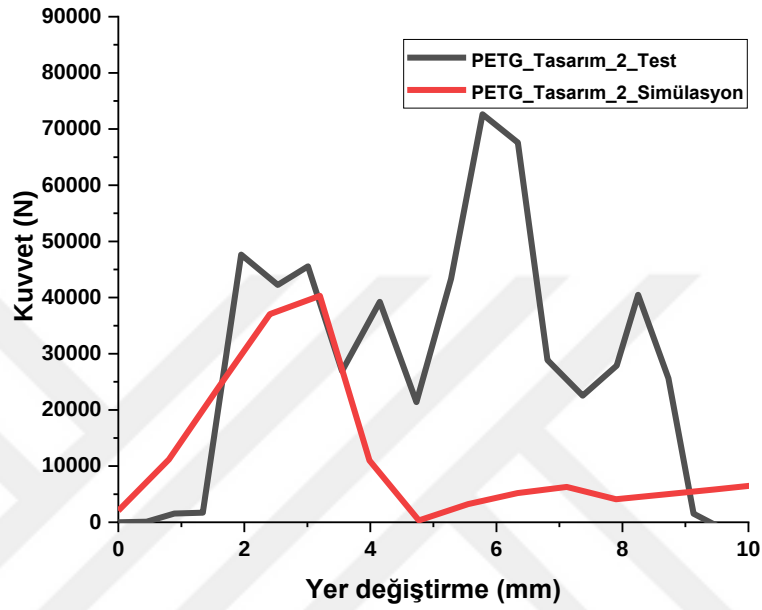
Şekil 4.21’de PETG malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde PETG malzemesinin yüksek rijitliğe sahip olmasından dolayı çarpışma kutuları kuvvetin etkisiyle patlama şeklinde gerçekleşmiş olup şekil 4.21.(a)’da verildiği gibi test sonrasında çarpışma kutusu parçası kalmamıştır. Şekil 4.21.(b)’de verilen simülasyon sonucunda ise simülasyon devam ederken kuvvet uygulanacak parça kalmadığını ifade eden hata kodu vererek analiz tamamlanmıştır.



**Şekil 4. 21.** PETG malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) simülasyon sonrası görsel

Şekil 4.22’de PETG malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.22’de kademeli

olarak ezilme davranışı sergilenmemiştir. Çarpışma kutusu test anında patlama şeklinde kırılmalar olmasından dolayı hem test hem de analiz 10 mm sonra tamamlanmıştır. Sonrasında veri okuma gerçekleşmediğinden dolayı beklenen enerji emilimi gerçekleşmemiş ve maksimum kuvvet yaklaşık olarak 72000 N olarak gerçekleşmiştir.



**Şekil 4. 22.** PETG malzemeli çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrası kuvvet-yer değiştirme grafiği

Tablo 4.11’de PETG malzemeli ikinci tasarım çarpışma kutularının çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.11 incelendiğinde maksimum kuvvet noktasının 72636 N olduğu belirlenmiştir. Ancak çarpışma kutularının test ve analiz verilerinde hata oranının oldukça yüksek olduğu bu durumun nedeninin test anında yüksek oranda kırılmaların meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Tablo 4. 11.** PETG malzemeli çarpışma kutusunun çarpışma performansları

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Enerji emilimi (kJ) | Özgül enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 72636               | 27740               | 10                  | 0,26                | 1,86                         |
| <b>Simülasyon</b>   | 40304,17            | 11984,32            | 10                  | 0,12                | 0,51                         |
| <b>% Hata oranı</b> | -80                 | 2,3 kat             |                     |                     | 3,5 kat                      |

#### 4.3. Özgöl Enerji Emilimi En Yüksek Olan Çarpışma Kutularının Optimizasyonları

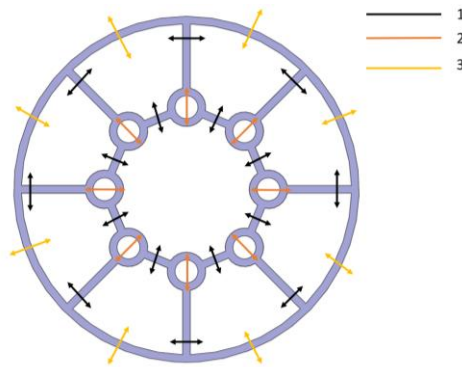
Eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen çarpışma kutularının test ve simülasyonları tamamladıktan sonra en yüksek özgül enerji emilimine sahip olan çarpışma kutularının birinci tasarımı ABS ve PLA malzemeli çarpışma kutularının olduğu belirlenmiştir. ABS malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu yaklaşık olarak 9,61 kJ/kg, PLA malzemeli birinci tasarım çarpışma kutusu ise 8,2 kJ/kg özgül enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

Bu iki farklı malzemeli çarpışma kutularının özgül enerji miktarlarını arttırmak amacıyla şekil optimizasyonları genetik algoritma (GA) kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 4.23’de geometrik ölçüleri verilen çarpışma kutularının duvar kalınlıkları 2 mm ve iç kısımda bulunan hücrelerin çapları 12 mm olarak tasarlanmıştır. Şekil 4.23’de de verildiği gibi çarpışma kutuları için üç farklı değişken tanımlanmıştır. Şekil 4.23’de de verildiği gibi siyah olan kısım birinci değişken, kırmızı kısım ikinci değişken ve sarı olan kısım üçüncü değişken olarak tanımlanmış olup alt ve üst kısıt ölçüleri tablo 4.12’de verildiği gibi belirlenmiştir.

**Tablo 4. 12.** Optimize edilecek bölgelerin alt ve üst sınır değerleri

|                                     | Alt sınır (mm) | Temel ölçü (mm) | Üst sınır (mm) |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| 1. Değişken (İç duvar kalınlıkları) | 1              | 2               | 3              |
| 2. Değişken (İç çaplar)             | 10             | 12              | 14             |
| 3. Değişken (Dış duvar kalınlığı)   | 1              | 2               | 3              |



**Şekil 4. 23.** Çarpışma kutusu optimizasyon bölgeleri

Çarpışma kutularının alt ve üst sınır değerlerinin belirlenmesinden sonra deney tasarımı (DoE) oluşturulmuştur. DoE oluşturulması aşamasında çok boyutlu bir parametre uzayından rastgele ancak eşit temsil sağlayacak şekilde örneklem almak için geliştirilmiş olan Latin HyperCube metodu kullanılmıştır. DoE seti oluşturulmasında 70 adet deney seti oluşturulmuş olup optimizasyon sırasında DoE’de bulunan tüm değerler kullanılmıştır.

DoE setinin oluşturulmasından sonra genetik algoritma (GA) ile maksimum iterasyon sayısı 100, minimum iterasyon sayı 50 ve popülasyon sayısı 50 olacak şekilde GA değerleri tanımlanmıştır. Daha sonra çarpışma kutularının optimizasyon amaç ve kısıt değerleri,

ABS malzemeli çarpışma kutusu için;

- **Amaç:** Minimum kütle (Ana model ağırlığı <240 gr.)
- **Kısıt:** Maksimum kuvvet noktası <80627 N  
Özgül enerji emilimi >9,61 kJ/kg (Ana model özgül enerji emilimi)

PLA malzemeli çarpışma kutusu için;

- **Amaç:** Minimum kütle (Ana model ağırlığı <257 gr.)
- **Kısıt:** Maksimum kuvvet noktası <69981,53 N  
Özgül enerji emilimi >8,09 kJ/kg (Ana model özgül enerji emilimi).

Olarak belirlenmiş ve GA ile optimizasyon PLA ve ABS malzemeli çarpışma kutuları için optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyonun tamamlanmasından sonra PLA ve ABS çarpışma kutularının yeni tasarım ölçüleri tablo 4.13’de verilmiştir. Tablo 4.13 incelendiğinde hem ABS hem de PLA malzemeli çarpışma kutularının optimum ölçülerinin birbirleri ile benzer olduğu bunun sebebinin ise her iki çarpışma kutusunun da birbirleri ile benzer oranda özgül enerji emilimi değerine sahip olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Tablo 4. 13.** Optimizasyon sonrası tasarım ölçüleri

| <b>Çarpışma kutusu malzemesi</b> | <b>1.Değişken (İç duvar kalınlıkları) (mm)</b> | <b>2.Değişken (İç çaplar) (mm)</b> | <b>3.Değişken (Dış duvar kalınlığı) (mm)</b> |
|----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>PLA</b>                       | 1.05                                           | 10                                 | 1.8                                          |
| <b>ABS</b>                       | 1                                              | 10                                 | 1.8                                          |

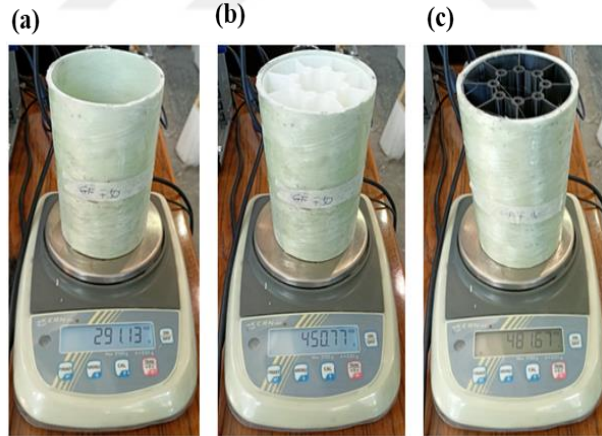
#### **4.4. Optimize Edilmiş Çarpışma Kutularının Farklı Sarım Açılarına Sahip Olan Karbon ve Cam Fiber Takviyeli Kompozit Çarpışma Kutularının Hibritleştirilmesi, Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi**

##### **4.4.1. Hibrit Çarpışma Kutularının Üretilmesi**

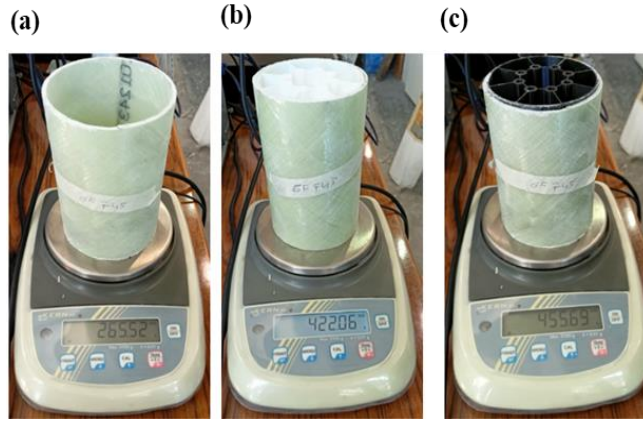
Çarpışma kutularının optimizasyonları tamamlandıktan yeni tasarımlar eklemeli imalat yöntemi kullanılarak PLA ve ABS malzemeleri ile üretilmiştir. Daha sonra filament sarma yöntemi ile 8 katlı,  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$  sarım açılarına ve 3 mm kalınlığa sahip olan çarpışma kutuları üretilmiştir. Filament sarma ile kompozit çarpışma kutularının üretilmesi sırasında %40 reçine ve %60 lif hacmi olacak şekilde üretim yapılmıştır. Kompozit çarpışma kutularının üretilmesinden sonra kürlenmenin yapılması amacıyla 2 saat süre ile  $120^\circ\text{C}$ 'de kül fırınında kürlleme işlemi yapılmıştır. Bu sayede kompozit yapıların ara yüzeylerinin birbirleri ile iyi tutulması ve maksimum mukavemet etmek amacıyla yapılmıştır. Üretilen kompozit çarpışma kutuları 150 mm boyutlarında olan çarpışma kutusu ile hibritleştirileceğinden dolayı 150 mm boyutlarında kesilmiştir. İstenilen boyutlarda kesilen çarpışma kutuları sonra olarak test sırasında bozucu giriş olmaması amacıyla üst ve alt kısımları zımpara ile düzleştirilerek şekil 4.24- 4.27'de verildiği gibi ABS ve PLA malzemeli çarpışma kutuları ile hibritleştirilmiştir. Tablo 4.14'de çarpışma kutularının hibritleştirilmesi sırasında kullanılan sıra verilmiştir. Takviyeli ve takviyesiz çarpışma kutuları ileri bölümlerde tablo 4.14'de verilen kod ile anılacaktır.

**Tablo 4. 14.** Çarpışma kutularının hibritleştirilmesi ve kodları

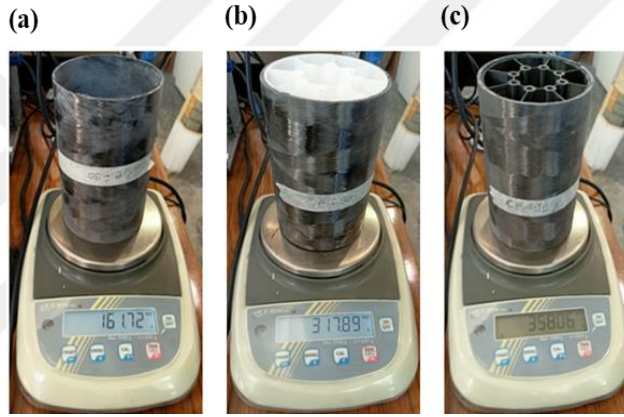
| Çarpışma kutusu isimleri | Fiber türü        | Sarım açısı | Takviyeli çeşidi | Çarpışma kutusu malzemesi | Kod |
|--------------------------|-------------------|-------------|------------------|---------------------------|-----|
| CF45°_Takviyesiz         | Karbon fiber (CF) | 45°         | Takviyesiz       | -                         | C1  |
| CF90°_Takviyesiz         | Karbon fiber (CF) | 90°         | Takviyesiz       | -                         | C2  |
| GF45°_Takviyesiz         | Cam fiber (GF)    | 45°         | Takviyesiz       | -                         | G1  |
| GF90°_Takviyesiz         | Cam fiber (GF)    | 90°         | Takviyesiz       | -                         | G2  |
| GF45°ABS_Hibrit          | Cam fiber (GF)    | 45°         | Takviyeli        | ABS                       | G1A |
| GF45°PLA_Hibrit          | Cam fiber (GF)    | 90°         | Takviyeli        | ABS                       | G1P |
| GP90°ABS_Hibrit          | Cam fiber (GF)    | 45°         | Takviyeli        | PLA                       | G2A |
| GP90°PLA_Hibrit          | Cam fiber (GF)    | 90°         | Takviyeli        | PLA                       | G2P |
| CF45°ABS_Hibrit          | Karbon fiber (CF) | 45°         | Takviyeli        | ABS                       | C1A |
| CF45°PLA_Hibrit          | Karbon fiber (CF) | 90°         | Takviyeli        | ABS                       | C1P |
| CP90°ABS_Hibrit          | Karbon fiber (CF) | 45°         | Takviyeli        | PLA                       | C2A |
| CP90°PLA_Hibrit          | Karbon fiber (CF) | 90°         | Takviyeli        | PLA                       | C2P |



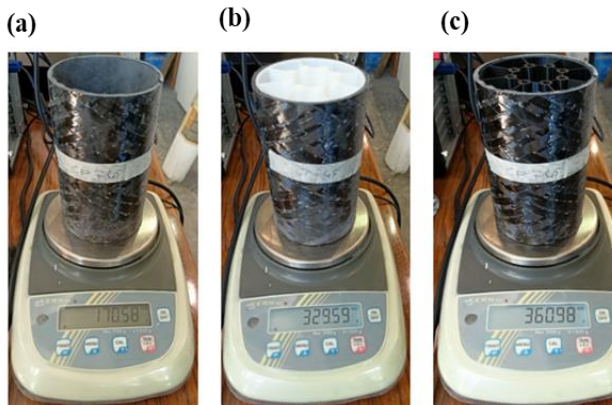
**Şekil 4. 24.**  $\pm 90^\circ$  Cam fiber kompozit çarpışma kutuları (a) boş, (b) ABS çarpışma kutusu takviyeli, (c) PLA çarpışma kutusu takviyeli



**Şekil 4. 25.**  $\pm 45^\circ$  Cam fiber kompozit çarpışma kutuları (a) boş, (b) ABS çarpışma kutusu takviyeli, (c) PLA çarpışma kutusu takviyeli



**Şekil 4. 26.**  $\pm 90^\circ$  Karbon fiber kompozit çarpışma kutuları (a) boş, (b) ABS çarpışma kutusu takviyeli, (c) PLA çarpışma kutusu takviyeli



**Şekil 4. 27.**  $\pm 45^\circ$  Karbon fiber kompozit çarpışma kutuları (a) boş, (b) ABS çarpışma kutusu takviyeli, (c) PLA çarpışma kutusu takviyeli

#### 4.4.2. Kompozit Takviyeli Çarpışma Kutularının Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

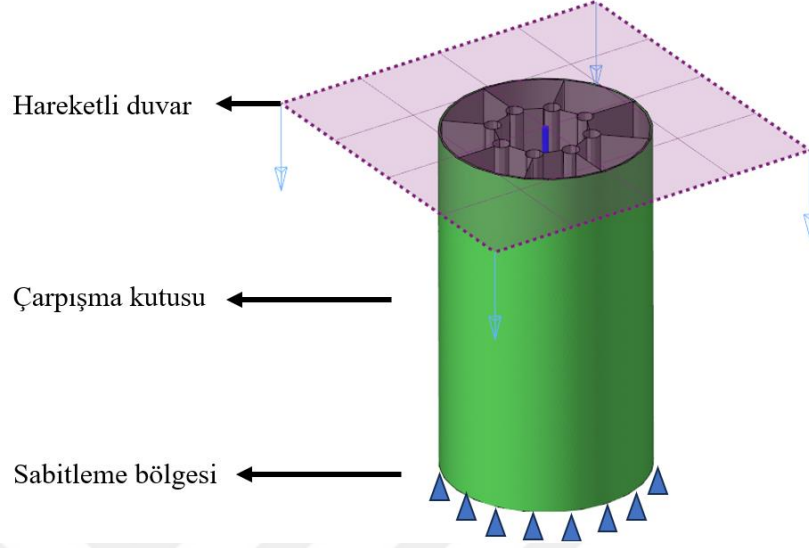
Çarpışma kutularının analizleri bilgisayar destekli sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çarpışma kutularının malzeme özelliklerinin tanımlanması amacıyla tablo 4.15’de verilen karbon kompozit, cam kompozit malzemelerin özellikleri tanımlanmıştır.

**Tablo 4. 15.** Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan malzeme özellikleri

| Malzeme özellikleri        | Karbon kompozit | Cam kompozit |
|----------------------------|-----------------|--------------|
| $E_{11}$ (MPa)             | 127240          | 27280        |
| $E_{22}$ (MPa)             | 13080           | 7948.7       |
| $E_{33}$ (MPa)             | 13080           | 7948.7       |
| $\nu_{11}$                 | 0.318           | 0.318        |
| $\nu_{13}$                 | 0.23            | 0.23         |
| $\nu_{23}$                 | 0.19            | 0.2          |
| $G_{12,13,23}$             | 1943            | 3055.5       |
| $(\sigma_1^T)_{ult}$ (MPa) | 2700            | 1800         |
| $(\sigma_2^T)_{ult}$ (MPa) | 26.7            | 37.69        |
| $(\sigma_1^C)_{ult}$ (MPa) | 1822            | 2165.3       |
| $(\sigma_2^C)_{ult}$ (MPa) | 46.64           | 62.8         |
| $(\tau_2)_{ult}$ (MPa)     | 56              | 8.5          |

Kompozit yapılar  $[\pm 45]_4$  ve  $[90^\circ]_8$  olarak üretimi yapıldığından dolayı cam ve karbon fiberler kompozit çarpışma kutuları ‘MAT 25’ malzeme kartı ve ‘PROP\_SH\_ORTH’ özellik kartı kullanılmıştır. Kompozit yapıların hasar kriterlerini incelemek amacıyla ‘FAİL\_CHANG’ başarısızlık kartı tanımlanmıştır. Kompozit yapıların iç kısımlarında bulunan plastik çarpışma kutularının malzeme kartı ise bölüm 4.2.1’de kullanılan kartlar tanımlanmıştır. Hibrit yapılarda kompozit ve plastik çarpışma kutuları arasına ‘TYPE 7’ kontak tanımlaması yapılmıştır. Daha sonra şekil 4.28’de verildiği gibi çarpışma kutuları alt kısımlardan rijit atanarak tüm eksenlerde kısıtlanarak sabitlenmiş ve düşey darbe kuvvetini temsil eden hareketli duvarın ağırlığı 0.580 ton ve 3750 mm/sn hız verilmiştir. Hareketli duvar ile çarpışma kutuları arasında 0.2 sürtünme katsayısı değeri verilerek analizler tüm çarpışma kutuları kurulmuştur. Analizler sonucunda kuvvet ve

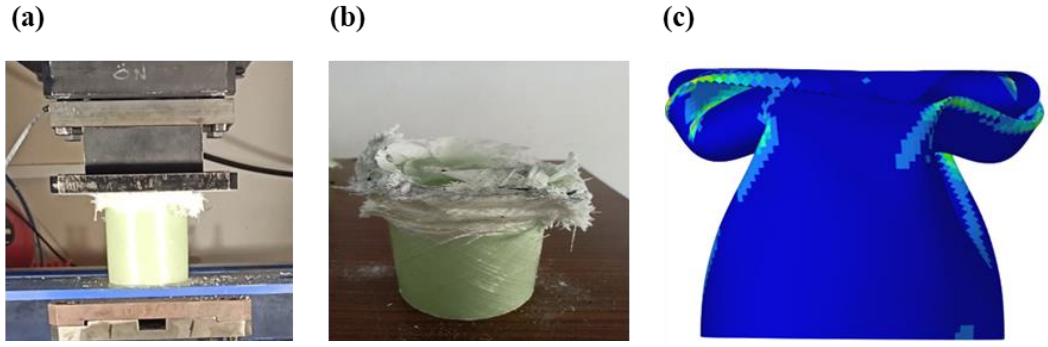
yer değiştirme grafiklerinin elde edilmesi amacıyla çıktı verisi olarak kuvvet ve yer değiştirme noktaları eklenmiştir.



**şekil 4. 28.** Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

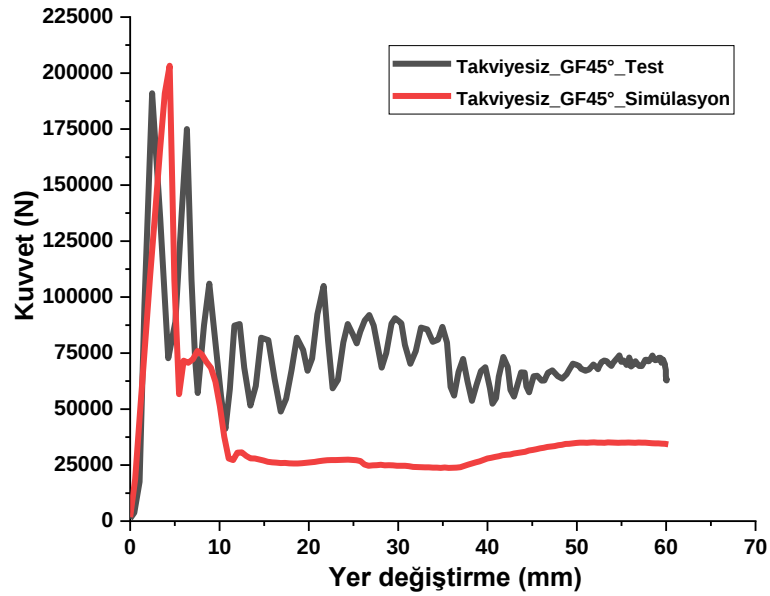
#### **4.4.3. G1 arpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçları**

şekil 4.29'da  $\pm 45^\circ$  sarım açılı takviyesiz cam fiber kompozit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası görüntüleri verilmiştir. şekil 4.29 incelendiğinde çarpışma kutularının düşey darbe kuvvetinin etkisiyle katlanarak enerji Emilimi sağlamış ve çarpışma kutularında kırılma veya yırtılma meydana gelmemiştir. şekil 4.29.b'de verilen test sonrası çarpışma kutusu görseli incelendiğinde 3 defa katlanma gerçekleşmiş ve çarpışma kutusu üzerinden yükün kaldırılması ile  $\pm 45^\circ$  sarım açılı takviyesiz cam fiber kompozit çarpışma kutusu bir miktar yukarı yönde hareket etmiştir. Test anında gerçekleşen bu katlanmaların nedeninin sarım açısının etkisinden olduğu düşünülmektedir. şekil 4.29'da verilen simülasyon sonucu görsel incelendiğinde ise test ile benzer şekilde ezilme davranışı sergilediği ve katlanmaların meydana geldiği belirlenmiştir.



**Şekil 4. 29.** G1 kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.30'da takviyesiz  $\pm 45^\circ$  sarım açılı cam fiber kompozit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.30'da verilen grafik incelendiğinde hem test hem de simülasyon sonucu elde edilen maksimum kuvvetin birbirleri ile yakın değerde olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.30'da ki test grafiğinde meydana gelen zigzagların oluşmasının nedenin test anında düşey darbe test cihazının veri okuma sıklığı ya da kompozit çarpışma kutusunun ezilme anında farklı direnç göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 4. 30.** G1 çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

Tablo 4.16’da G1 çarpışma kutularının çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.16 incelendiğinde çarpışma kutularının maksimum kuvvet değerleri birbirleri ile yakın değerlerde olduğu, test ve simülasyon sonucunda hata oranının yaklaşık %6 olduğu belirlenmiştir. Özgül enerji emilimi değerlerinde bu hata oranı %20 oranında hata oranı olduğu belirlenmiştir. Filament sarma ile kompozit üretimi kalıp içerisinde gerçekleştirmediğinden üretim sırasında yapının tüm bölgelerinde aynı et kalınlığı elde edilmesi güçtür. Bundan dolayı yer değiştirme oranı aynı olsa da özgül enerji emiliminde farklılık gerçekleşmiştir.

**Tablo 4. 16.** G1 çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | <b>Maksimum kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama kuvvet (N)</b> | <b>Yer değiştirme (mm)</b> | <b>Özgül enerji emilimi (kJ/Kg)</b> |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Test</b>         | 191000                     | 72400                      | 60                         | 16,4                                |
| <b>Simülasyon</b>   | 210000                     | 43784                      | 60                         | 13,41                               |
| <b>% Hata oranı</b> | -6,05                      | -91                        |                            | -22,3                               |

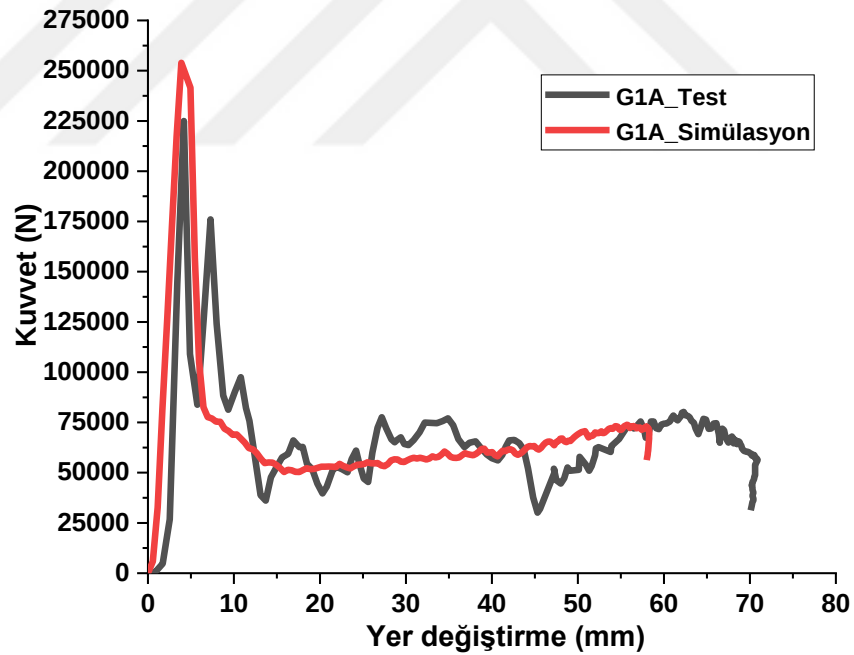
#### 4.4.4. G1A Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçları

Şekil 4.31’de G1A kompozit takviyeli çarpışma kutularının test ve simülasyon sonuç görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.31 incelendiğinde iç kısımda bulunan ABS malzemeli çarpışma kutusu darbe kuvvetinin oldukça yüksek olmasına rağmen dış kısımda bulunan kompozit yapıya zarar vermemiş ve hibrit çarpışma kutusu  $\pm 45^\circ$  sarım açısının etkisi ile kademeli olarak katlanma davranışı sergilemiştir. Cam fiber kullanılarak üretilen kompozit yapıda patlama şeklinde kırılma görülmemiştir. Burada reçine rijit davranış sergilediği için lifler birbirlerinden ayrılmıştır. Ancak cam liflerinde kopma görülmemiştir.



**Şekil 4. 31.** G1A kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.32’de G1A çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.32 incelendiğinde hem test hem de simülasyonda gerçekleşen maksimum kuvvet değerlerinin yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 32.** G1A çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

Tablo 4.17’de G1A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının gösterildiği tablo verilmiştir. Tablo 20 incelendiğinde test ve simülasyon sonucunda test ve analiz sonucunda %24 hata gerçekleştiği belirlenmiştir. Burada gerçekleşen farklılığın

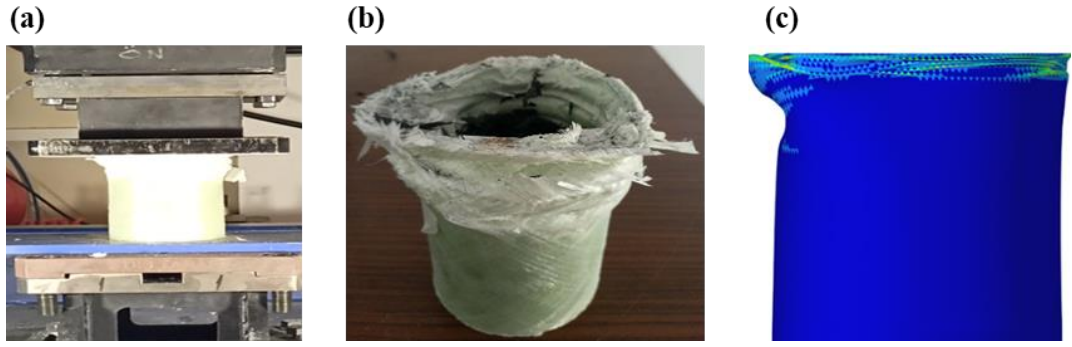
sebebinin kompozit malzemelerin kalınlıkların tüm bölgelerinde aynı olmamasından kaynaklandığı düşünülmekte olup kabul edilebilir oranda hata payı ile simülasyon sonucu elde edilmiştir. Ortalama kuvvet ve özgül enerji Emilimi için test ve simülasyon sonucunda hata oranlarının ise sırasıyla %7.36 ve %4,04 oranında gerçekleştiği belirlenmiştir. Burada da görüldüğü gibi özgül enerji Emilimi en yüksek oranda etkileyen değerin ortalama kuvvet olmasından dolayı, ortalama kuvvet değerlerinde ki hata oranlarının oldukça az olmasından dolayı özgül enerji Emilimi de çok küçük oranda hata ile tamamlanmıştır.

**Tablo 4. 17.** G1A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | <b>Maksimum kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama kuvvet (N)</b> | <b>Yer değiştirme (mm)</b> | <b>Özgül enerji Emilimi (kJ/Kg)</b> |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Test</b>         | 251000                     | 63471,98                   | 72                         | 9,03                                |
| <b>Simülasyon</b>   | 201252,12                  | 68147,76                   | 58,2                       | 9,41                                |
| <b>% Hata oranı</b> | -24                        | +7,36                      |                            | +4,04                               |

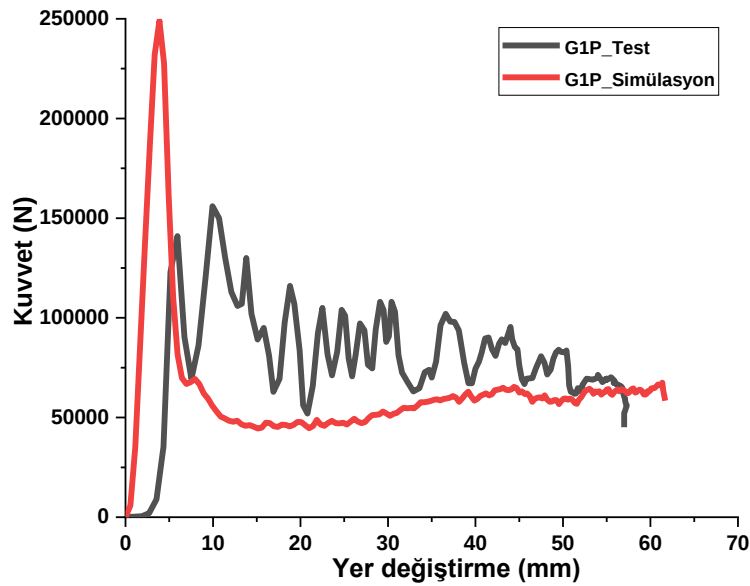
#### 4.4.5. G1P Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçları

Şekil 4.33’de G1P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonu elde edilen görseller verilmiştir. Şekil 4.33 incelendiğinde hibrit çarpışma enerjinin tamamının Emilimi gerçekleştirmiş ve dış kısımda bulunan kompozit yapıda herhangi bir deformasyon gerçekleşmemiştir. Hibrit yapı üzerinden kütle kaldırıldığında sarım açısının etkisine bağlı olarak kompozit yapı bir miktar eski haline dönmüş ancak kompozit yapı elastik olmadığından eski konumuna ulaşmamıştır. Burada stabil olarak katlanma gerçekleşmesinin sebebinin PLA malzemeli yapının yüksek oranda kuvvet dayanımına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hibrit yapılı halde bulunan PLA ve cam kompozit birbirleri ile uyumlu bir şekilde kuvvet dayanımına karşı koyduğu ve bundan dolayı ezilen kısmın haricinde bulunan çarpışma kutularında deformasyon olmadığı belirlenmiştir. Sonuç olarak G1P çarpışma kutuları test sonrasında G1A çarpışma kutuna göre özgül enerji Emilimi değerinin yüksek olduğu ve çarpışma kutularının daha iyi katlanma davranışı sergilediği belirlenmiştir.



**Şekil 4. 33.** G1P kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.34’de G1P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.34 incelendiğinde test ve simülasyon grafiklerinin maksimum kuvvet değerlerinde birbirleri ile uzak değerler olsa da ilk kuvvet düşüşünün ardından ortalama kuvvet değerinin birbirleri ile benzer şekilde ilerleme sağlamıştır. Bilindiği üzere düşey darbe test makinesi üzerinde bulunan ve veri okuma görevi yapan loadcell’lerin sayısı test anında veri okuma sıklığından dolayı grafiklerin oluşmasına etki olmaktadır. Ayrıca test anında çarpışma kutuları altlık üzerinden herhangi bir yönde hareket etmemesi sağlansa bile grafiklerde oluşan dalgalanmaların önüne geçilmemiştir.



**Şekil 4. 34.** G1P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

Tablo 4.18’de G1P çarpışma kutularının çarpışma performanslarının değerleri verilmiştir. Tablo 4.18 incelendiğinde test ve simülasyon sonrasında maksimum kuvvet değerlerinin birbirlerinden uzak olduğu belirlenmiştir. Ancak ortalama kuvvet ve özgül enerji emilimi değerleri arasında fark yakalılık olarak %20 olarak gerçekleşmiştir. G1P çarpışma kutularının test simülasyon sırasında yer değiştirme miktarında yaklaşık olarak 5 mm fark oluşmuştur.

**Tablo 4. 18.** G1P çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Özgül enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 156000              | 76300               | 57                  | 10,3                         |
| <b>Simülasyon</b>   | 249057              | 62303,95            | 61,8                | 8,45                         |
| <b>% Hata oranı</b> | +59                 | -22                 |                     | -21,8                        |

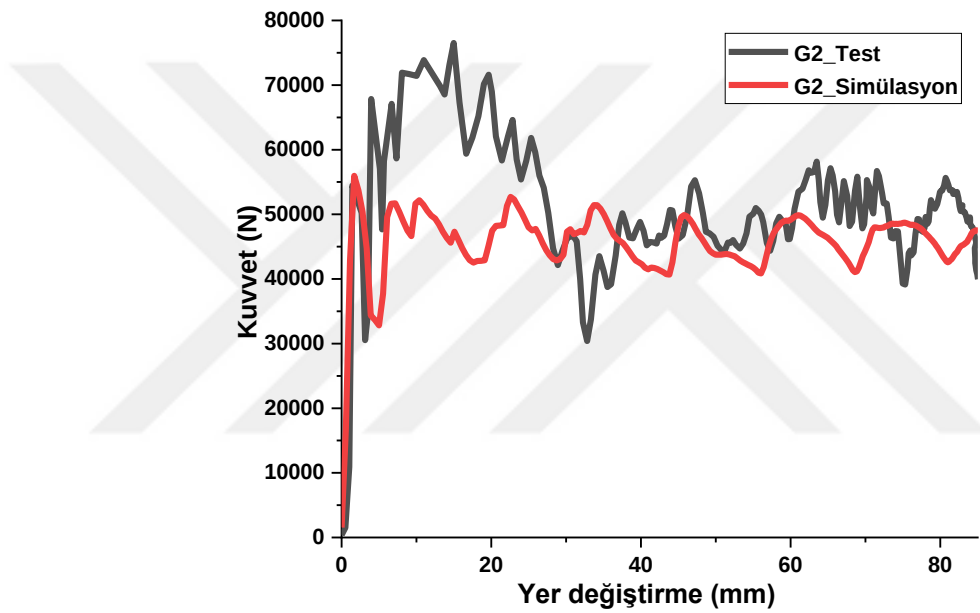
#### 4.4.6. G2 Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.35’de G2 kompozit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucu elde edilen görseller verilmiştir. Şekil 4.35.a incelendiğinde kompozit çarpışma kutusunun test alanının alt kısmında az miktarda yırtılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeninin çarpışma kutusunun alt kısmında dar bir alanda kalınlık değişiminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ancak üst kısımları hem test hem simülasyon sonucunda benzer ezilme davranışı sergilediği belirlenmiştir. G2 kompozit çarpışma kutusu ile G1 kompozit çarpışma kutularının ezilme davranışları karşılaştırıldığında G2 çarpışma kutusunda katlanan yüzeyler arası mesafesi az olsa da G1’e göre daha çok katlanma olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 35.** G2 kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görsel

Şekil 4.36'da G2 çarpışma kutularının test simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.36 incelendiğinde test ve simülasyon grafiğinde birinci maksimum kuvvet noktalarının yaklaşık olarak 55000 N değerinde olduğu ve birbirleri ile neredeyse aynı değerde oldukları belirlenmiştir. Ancak test sırasında alt kısımlarından sabitlenen çarpışma kutusunda tepki kuvveti olmasından test grafiğinde belirli oranda artış meydana gelmiştir. Test ve simülasyon grafikleri yaklaşık olarak 30 mm yer değiştirmeden sonra grafik çizgileri birbirlerine benzer eksende enerji emilimine devam ettiği belirlenmiştir.



**Şekil 4. 36.** G2 çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

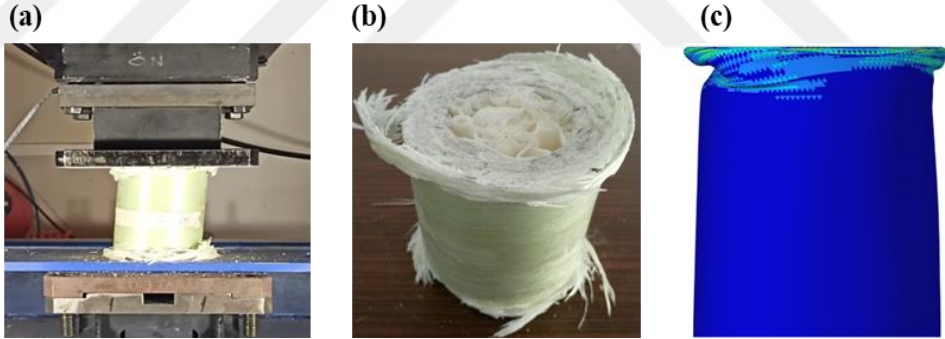
Tablo 4.19'da G2 çarpışma kutularının çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.19 incelendiğinde maksimum kuvvet noktasında test ve simülasyon sonuçlarında belirli oranda sapmalar meydana gelmiştir. Ancak ortalama kuvvette gerçekleşen %1,3 oranında hata oldukça az olmasından dolayı özgül enerji emiliminde de hata oranı %2,91 gibi düşük oranda gerçekleşmiştir. G2 çarpışma kutusu ile G1 çarpışma kutusu kıyaslandığında ise G1 çarpışma kutusunun daha yüksek oranda özgül enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 19.** G2 çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|              | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Özgül enerji emilimi (kJ/Kg) |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| Test         | 76500               | 45300               | 85                  | 13,3                         |
| Simülasyon   | 56000               | 45900               | 85                  | 13,7                         |
| % Hata oranı | -36                 | +1,3                |                     | -2,91                        |

#### 4.4.7. G2A Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

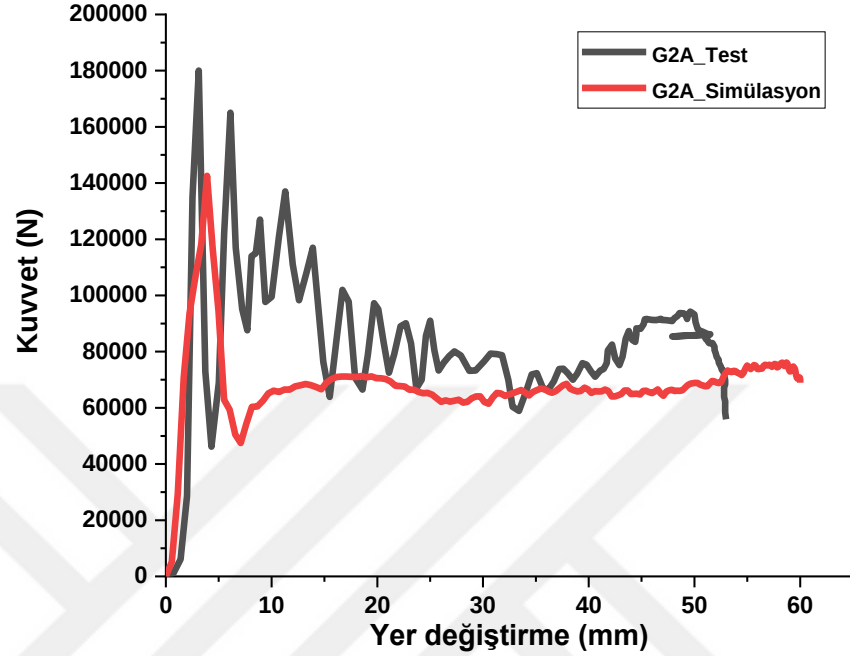
Şekil 4.37’de G2A hibrit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucu elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.37.a incelendiğinde G2 çarpışma kutusunda olduğu gibi G2A çarpışma kutusunda da alt kısmında yaklaşık olarak 5cm ezilme gerçekleşmiştir. G2A çarpışma kutularının alt kısmında gerçekleşen ezilme G2 çarpışma kutusuna göre daha az olduğu belirlenmiştir. Ancak üst ezilme kısımları incelendiğinde tamamen aynı ezilme ve sol tarafında küçük miktarda ayrılma olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 4. 37.** G2A kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.38’de G2A hibrit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrasında elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde maksimum kuvvet grafik eğrileri birbirlerine benzer şekilde ilerleme sağlamıştır. Ancak test sonucunda elde edilen maksimum kuvvet noktası simülasyon sonucunun üzerinde kalmıştır. Kuvvet maksimum kuvvet noktasına ulaşıktan bir miktar düşüş gösterse de hem test

hem de simülasyon sonucuna göre yaklaşık 15 mm yer değiştirmeden sonra benzer oranda grafik eğrisi oluşarak enerji emilimine devam etmiştir.



**şekil 4. 38.** G2A arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

Tablo 4.20’de G2A arpışma kutularının çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.20 incelendiğinde G2A arpışma kutularının maksimum kuvvet değerleri birbirlerine benzer eksen hareket etmiştir. Test ve simülasyon sonucunda maksimum kuvvet değeri için hata oranı %25, ortalama kuvvet için %20 ve zgöl enerji emilimi için %9,7 oranında hata oranı gerçekleştiği belirlenmiştir. zgöl enerji emilimi açısında G2A ve G1A birbirleri ile kıyaslandığında G2A arpışma kutularının daha yüksek oranda enerji emilimi sağladığı belirlenmiştir. Maksimum kuvvet noktaları G1A ve G2A için benzer sonuç olmasına rağmen 90° sarım açısının test anında daha düzgün katlanma sağlaması ve yapıların kalan bölgelerinde hasar meydana gelmemesini sağlamıştır.

**Tablo 4. 20.** G2A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Özgül enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 178950              | 82800               | 54                  | 9,75                         |
| <b>Simülasyon</b>   | 142300              | 68956               | 62                  | 8,89                         |
| <b>% Hata oranı</b> | -25                 | -20,08              |                     | -9,7                         |

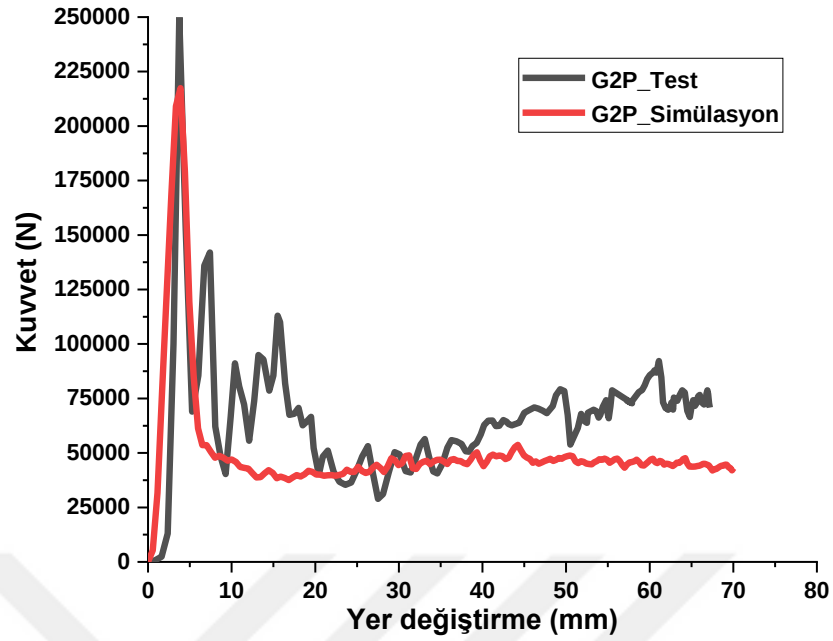
#### 4.4.8. G2P Çarpışma Kutularının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.39'da G2P çarpışma kutularının test ve analiz sonucunda elde edilen görseller verilmiştir. Şekil 4.39 incelendiğinde hibrit yapının iç kısmında bulunan PLA malzemesi dış kısımda bulunan cam fiber takviyeli kompozit yapıya zarar vermemiş ve PLA malzemesi kırılabilir iç kısımda kalmıştır. Şekil 4.39.(a, b) incelendiğinde ezilme sonrası yapıların birbirleri ile benzer görüntüler elde edilmiştir. Çarpışma kutularının kırılma ve hasar davranışları incelendiğinde içe ve dışa doğru fiberleri kopmalar gerçekleşmiştir. Ancak yırtılma meydana gelmemiştir.



**Şekil 4. 39.** G2P kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.40'da GP2 hibrit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.40 incelendiğinde hem test hem de maksimum kuvvete ulaşana kadar benzer eğri oluşturmuşlardır. Maksimum kuvvet noktasından sonra çarpışma kutularının kuvvet karşılama kapasitelerinin 50000 N değerine kadar düşüş gerçekleşmiş olup yaklaşık 10 mm yer değiştirmeden sonra test simülasyon eğrileri benzer şekilde ilerleme göstermiştir.



**Şekil 4. 40.** G2P arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

Tablo 4.21’de G2P arpışma kutularının çarpışma performans göstergeleri verilmiştir. Tablo 4.21 incelendiğinde G2P arpışma kutusunun maksimum kuvvet dayanımı 250000 N, ortalama kuvveti 67669 N ve özgül enerji emilimi değeri ise 9,45 kJ/kg olarak belirlenmiştir. Test ile simülasyon sonuçları kıyaslandığında hata oranları maksimum kuvvet için %15, ortalama kuvvet için %38 ve özgül enerji emilimi değeri için %14 olarak belirlenmiştir.

**Tablo 4. 21.** G2P arpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Özgöl enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 250000              | 67669               | 68                  | 9,45                         |
| <b>Simülasyon</b>   | 217387              | 48891               | 72                  | 8,25                         |
| <b>% Hata oranı</b> | -15                 | -38                 |                     | -14                          |

#### 4.4.9. C1 Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

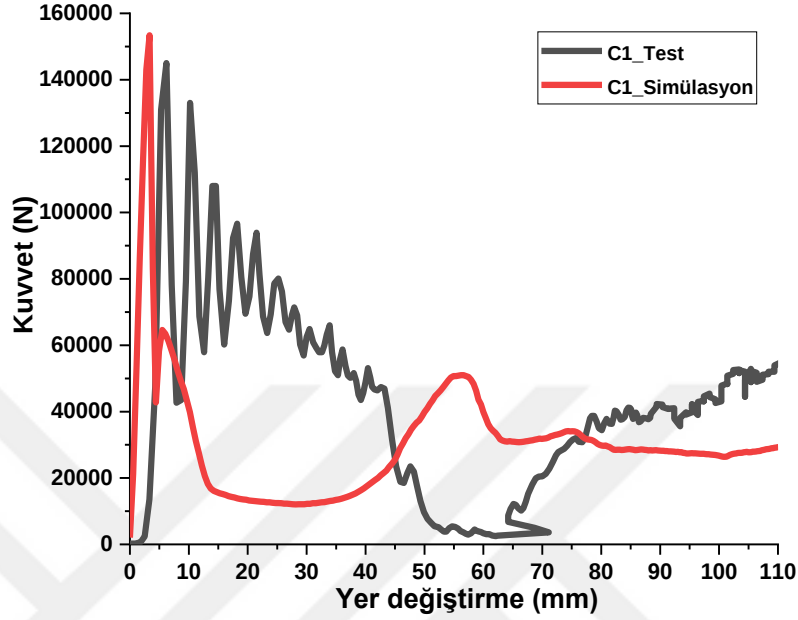
Şekil 4.41’de C1 kompozit çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.41 incelendiğinde C1 kompozit çarpışma kutusunda test sonrasında herhangi bir şekilde yırtılma veya kırılma meydana gelmemiştir. Kompoziti oluşturan karbon lifler çarpışma kutusunun iç ve dış kısımlarına doğru yönelim göstermiştir. Bu yönelim G1 çarpışma kutusunda da olduğu gibi gerçekleşmiş olduğundan sarım açısının farklı lifler kullanılsa da dinamik darbe altında iken benzer yönelim gösterdiğini ispatlamaktadır. Test ve simülasyon sonucunda elde edilen görüntüler incelendiğinde katlanan bölgelerin benzer şekillerde gerçekleştiği belirlenmiştir.



**Şekil 4. 41.** C1 kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.42’de test ve analiz sonrasında elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.42 incelendiğinde maksimum kuvvet noktalarının hem test hem de simülasyon sonucunda yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Ancak maksimum kuvvet noktasına ulaşıldıktan sonra kuvvet değerlerinde yüksek oranda düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüş test sırasında 50-70 mm yer değiştirme aralığında gerçekleşirken simülasyonda 15-35 mm aralığında gerçekleşmiştir. Her iki eğride de gerçekleşen bu kuvvet düşüşünden sonra çarpışma kutusu enerji emilimine devam ederek yaklaşık 110 mm ezilme gerçekleşmiştir. C1 kompozit çarpışma kutusunda gerçekleşen 110 mm ezilme miktarı, G1 kompozit çarpışma kutusunda gerçekleşen

ezilme miktarından daha fazla olmasından dolayı emilim sürekli hale geldiğinden özgül enerji miktarının C1 çarpışma kutusunda daha yüksek olmasına katkı sağlamıştır.



**Şekil 4. 42.** C1 çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

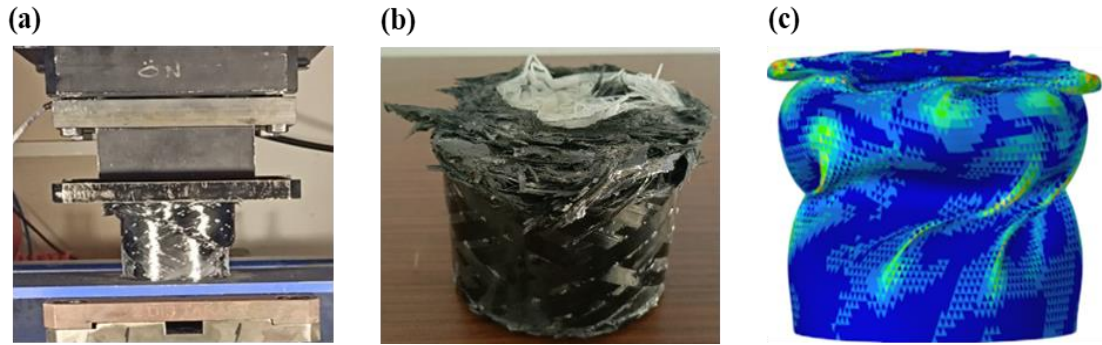
Tablo 4.22’de C1 kompozit çarpışma kutularının çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.22 incelendiğinde C1 kompozit çarpışma kutusunun test sonrası 145000 N değerinde maksimum kuvvet dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Simülasyon ile test sonucu kıyaslandığında ise sonuçlarda yaklaşık olarak %5,75 fark olduğu belirlenmiştir. C1 çarpışma kutularının özgül enerji emiliminin ise 22,5 kJ/kg olduğu ve C1 kompozit çarpışma kutusuna göre yüksek oranda özgül enerji emilimine sahip olduğu ve yaklaşık olarak 1,3 kat daha yüksek özgül enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı karbon fiber takviyeli çarpışma kutularının takviyesiz olarak enerji emici yapılarda kullanılabilirliği belirlenmiştir. Özgül enerji emilimi değeri için test ve simülasyon sonucunda ise hata oranının %1,3 olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 22.** C1 çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | <b>Maksimum kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama kuvvet (N)</b> | <b>Yer değiştirme (mm)</b> | <b>Özgül enerji emilimi (kJ/Kg)</b> |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Test</b>         | 145000                     | 36700                      | 110                        | 22,5                                |
| <b>Simülasyon</b>   | 153388,1                   | 33103                      | 110                        | 22,47                               |
| <b>% Hata oranı</b> | +5,75                      | -10,86                     |                            | -1,3                                |

#### 4.4.10. C1A Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

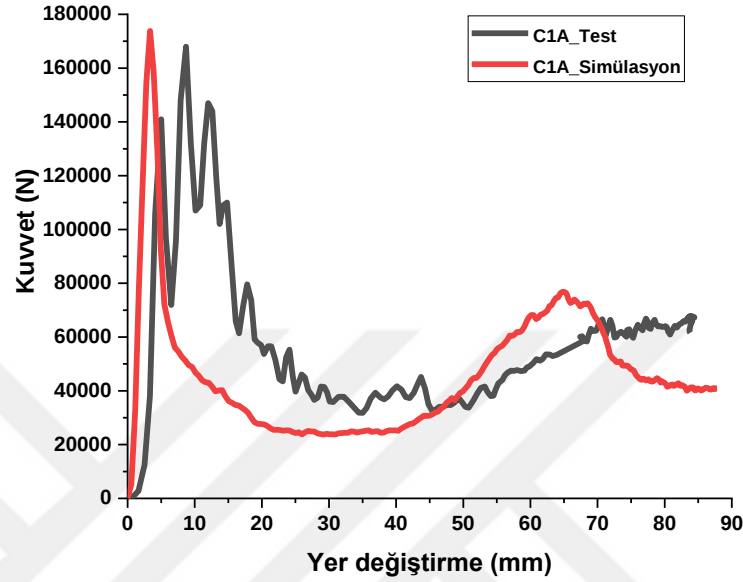
Şekil 4.43’de C1A kompozit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.43 incelendiğinde C1A hibrit çarpışma kutularında kuvvetin etkilediği üst yüzeylerde katlanma görüntülenmiş ve belirli bölgelerde karbon fiberde kırılmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. C1A çarpışma kutularının iç kısmında bulunan ABS malzemeli çarpışma kutusunun dış kısmında bulunan karbon fiber çarpışma kutusuna zarar vermediği ancak ezilme miktarı boyunca kırılmaların gerçekleştiği belirlenmiştir. Çarpışma kutularının ezilmeyen kısmında ise herhangi bir deformasyon görünmemiştir. C1A hibrit çarpışma kutusunda C1’e göre ezilme miktarı miktarının daha az olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 43.** C1A kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görsel

Şekil 4.44’de C1A hibrit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.44 incelendiğinde çarpışma kutularının maksimum kuvvet noktalarının birbirlerine yakın değerde olduğu ve test

sonucunda maksimum kuvvetin 168000 N olduğu belirlenmiştir. Kuvvet maksimum değere ulaştıktan sonra tıpkı C1’de olduğu keskin bir düşüş gözlemlense de enerji emilimine devam etmiştir.



**Şekil 4. 44.** C1A çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

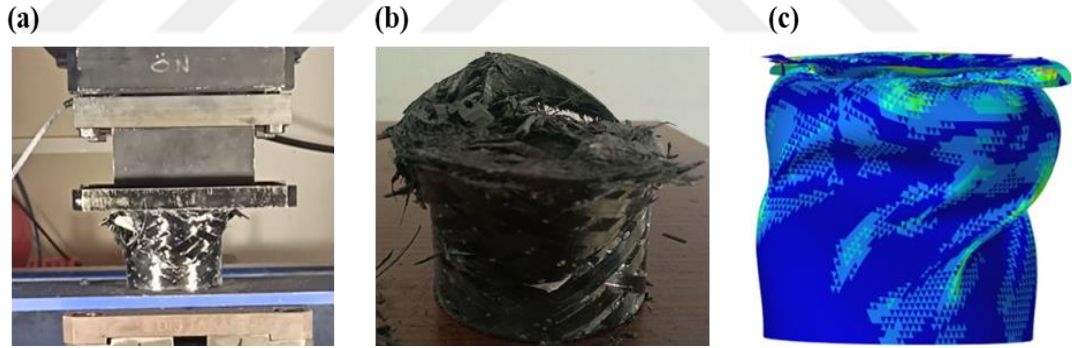
Tablo 4.23’de C1A çarpışma kutularının çarpışma performansı değerleri verilmiştir. Tablo 4.23 incelendiğinde test ve simülasyon sonrasında maksimum kuvvet değerleri arasında %3,36 gibi küçük bir hata payı gerçekleşmiştir. Ortalama kuvvet ve özgül enerji emilimi açısından bu oranlar sırasıyla %18 ve %15,2 oranında olduğu belirlenmiştir. Özgül enerji emilimi açısından C1A ile C1 kıyaslandığında, C1 çarpışma kutularının 2,2 kat daha çok enerji emilimi gösterdiği belirlenmiştir. Bunun sebebinin iç kısımda bulunan ABS çarpışma kutusunun test anında lif kopmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Tablo 4. 23.** C1A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Özgül enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 168000              | 54200               | 85                  | 14,1                         |
| <b>Simülasyon</b>   | 173843,9            | 45862,53            | 110                 | 12,2                         |
| <b>% Hata oranı</b> | +3,36               | -18                 |                     | -15,2                        |

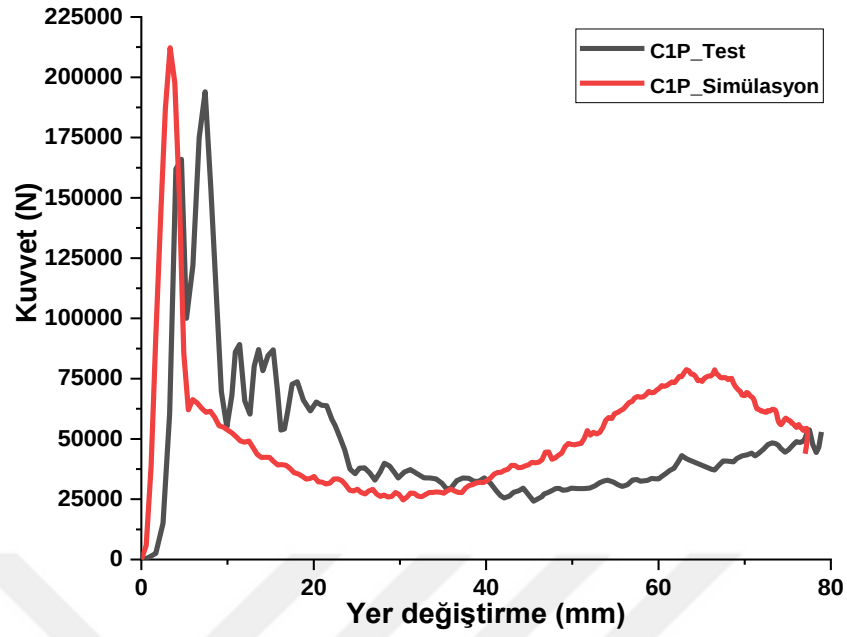
#### 4.4.11. C1P Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.45’de C1P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.45 incelendiğinde düşey darbe kuvvetinin etkisi ile C1P çarpışma kutusunun üst kısmından itibaren katlanmalar başlamıştır. Çarpışma kutularının üst kısmında az miktarda yırtılma gerçekleşmiş ve buda simülasyonun üst kısmında görülmektedir. C1P çarpışma kutusunun iç kısmında bulunan PLA malzemenin yalnızca ezilen kısmında kırılmalar meydana gelse de yapıya patlama veya kırılma şeklinde herhangi bir şekilde zarar vermemiştir. C1P ve C1A çarpışma kutularının test ve simülasyon sonuçları incelendiğinde her iki çarpışma kutusunda da benzer şekilde ezilme davranışı gerçekleşmiştir. Ancak iç kısımda bulunan ve eklemeli imalat yöntemi ile üretilen çarpışma kutusu malzeme çeşidinden dolayı maksimum kuvvet noktalarında ve ortalama kuvvet değerlerinde farklılıklar meydana gelmiştir. Bu değerlerde gerçekleşen değişiklikler ise özgül enerji emilimi değerlerinin C1A ve C1P çarpışma kutularında farklılık göstermesine neden olmuştur.



**Şekil 4. 45.** C1P kompozit çarpışma kutusu **(a)** test görseli, **(b)** test sonrası görsel, **(c)** simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.46’da C1P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrasında elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.46 incelendiğinde test sonucunda maksimum kuvvet noktasının yaklaşık olarak 194000 N değerine kadar çıktığı görülmektedir. Maksimum kuvvetten sonra kuvvet değerinde düşüş meydana gelse de 80 mm ezilene kadar enerji emilimi devam etmiştir.



**şekil 4. 46.** C1P arpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

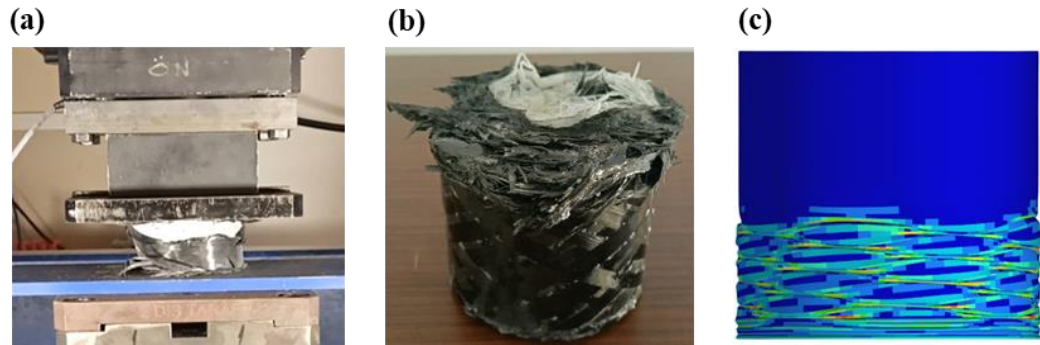
Tablo 4.24’da C1P arpışma kutularının test ve simülasyon sonrasında hesaplanan çarpışma performans değerleri verilmiştir. Tablo 4.24 incelendiğinde maksimum kuvvet noktalarının test ve simülasyon değerleri arasında %9,4 hata oranı gerçekleşmiş ve birbirlerine yakın değerler belirlenmiştir. Ortalama kuvvet değeri 48093 N olarak belirlenmiş olup simülasyon sonucu ile %13,05 oranında hata oranı oluşmuştur. C1P arpışma kutularının özgöl enerji emilimi 10,05 kJ/kg olarak belirlenmiştir. Bu değer simülasyon ile kıyaslandığında yaklaşık %15 hata oranı olduğu belirlenmiştir. C1P arpışma kutularının C1A arpışma kutularına göre özgöl enerji emilimi değerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Kompozit yapının iç kısmında bulunan PLA ve ABS malzemeli çarpışma kutularının sahip oldukları enerji emilimi ve uzama değerlerinin farklı olmasından dolayı çarpışma kutularının ortalama kuvvet ve özgöl enerji emilimi değerini etkilediği belirlenmiştir. Sonuç olarak C1A kompozit çarpışma kutularının C1P’ye göre yaklaşık olarak %40 oranında daha yüksek enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 24.** C1P çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | <b>Maksimum kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama kuvvet (N)</b> | <b>Yer değiştirme (mm)</b> | <b>Özgül enerji emilimi (kJ/Kg)</b> |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Test</b>         | 194000                     | 48093                      | 80                         | 10,05                               |
| <b>Simülasyon</b>   | 212289                     | 54367,03                   | 80                         | 11,6                                |
| <b>% Hata oranı</b> | +9,4                       | +13,05                     |                            | +15,4                               |

#### 4.4.12. C2 Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

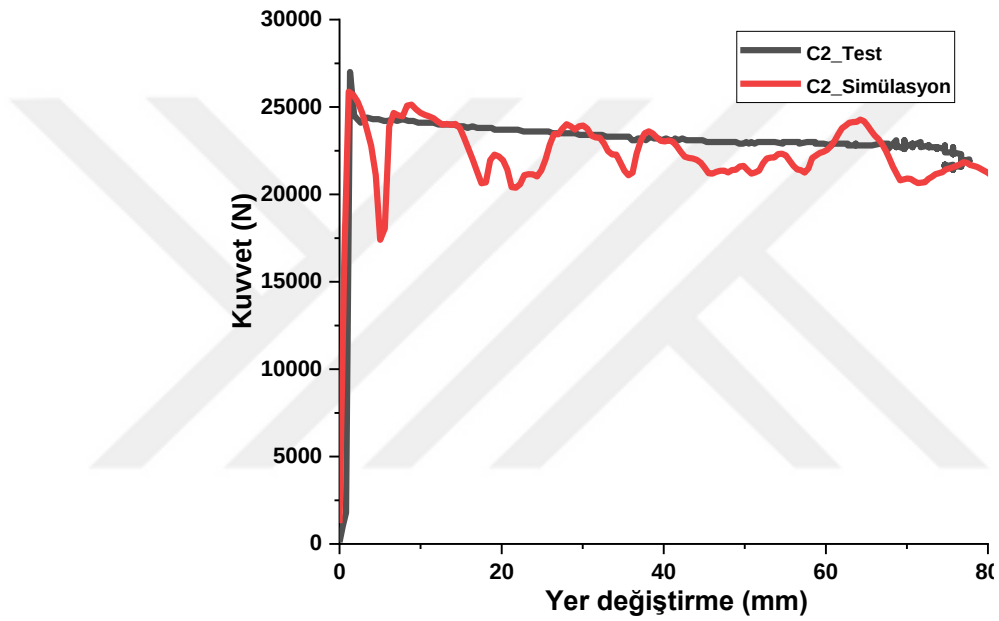
Şekil 4.47’de C2 kompozit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.47 incelendiğinde çarpışma kutuları düşey darbe testinin etkisiyle alt kısımlarından ezilmeye başlamıştır. Test sırasında C2 çarpışma kutusunda iç ve dış yönde gerçekleşen katlanmalar meydana gelmiştir. Burada gerçekleşen G1 çarpışma kutusunun ezilme görüntüleri ile benzerdir. Test sonrasında çarpışma kutularının üst kısımlarında deformasyon gerçekleşmiş olup, düşey darbe kuvvetinin sahip olduğu enerjinin tamamının emilimini gerçekleştirmiştir.



**Şekil 4. 47.** C2 kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görsel

Şekil 4.48’de C1 çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.48’de verilen grafik incelendiğinde test ve simülasyon sonucunda grafik eğrileri birbirlerine benzer şekilde ilerlemiştir. C2 çarpışma kutularında maksimum kuvvet noktalarının birbirlerine yakın değerde olduğu belirlenmiştir. C2 çarpışma kutularında kuvvet maksimum noktaya ulaştıktan sonra

oldukça az kuvvet düşüşü gerçekleşmiş olup enerji emilimi devam etmiştir. C2 çarpışma kutunda gerçekleşen maksimum kuvvet dayanımı C1'e yaklaşık olarak 4 kat daha düşük olmasına rağmen uygulanan düşey darbe enerjisini yaklaşık olarak 80 mm yer değiştirme sonucunda emilimini gerçekleştirmiştir.  $\pm 45^\circ$  ve  $0-90^\circ$  sarım açısıyla üretilen karbon fiber takviyeli çarpışma kutularının testleri sonucunda sarım açılarının enerji emilimi sırasında ezilme miktarları ve çarpışma kutularında katlanma şekillerinin değiştiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 4. 48.** C2 çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

Tablo 4.25'de çarpışma kutularının test ve simülasyon sonra elde veriler kullanılarak hesaplanan çarpışma performansları verilmiştir. Tablo 4.25 incelendiğinde çarpışma kutularının maksimum kuvvet değerinin 27000 N olduğu belirlenmiş olup, simülasyon sonucu ile karşılaştırıldığında %4,34 hata oranı olduğu belirlenmiştir. C2 çarpışma kutularının özgül enerji emilimi ise 10,33 kJ/kg olarak hesaplanmış ve simülasyon sonucuna göre %2,8 oranında hata oranı gerçekleştiği belirlenmiştir. C2 ile C1 çarpışma kutularının özgül enerji emilimi değerleri incelendiğinde C2 çarpışma kutusunun daha yüksek enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir. Benzer sarım açısı ile üretilen G2

çarpışma kutusu ile karşılaştırıldığında ise G2 çarpışma kutularının özgül enerji emiliminin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 25.** C2 çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | Maksimum kuvvet (N) | Ortalama kuvvet (N) | Yer değiştirme (mm) | Özgül enerji emilimi (kJ/Kg) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Test</b>         | 27000               | 22460               | 80                  | 10,33                        |
| <b>Simülasyon</b>   | 25876,95            | 22252,55            | 80                  | 10,69                        |
| <b>% Hata oranı</b> | -4,34               | -0,11               |                     | +2,8                         |

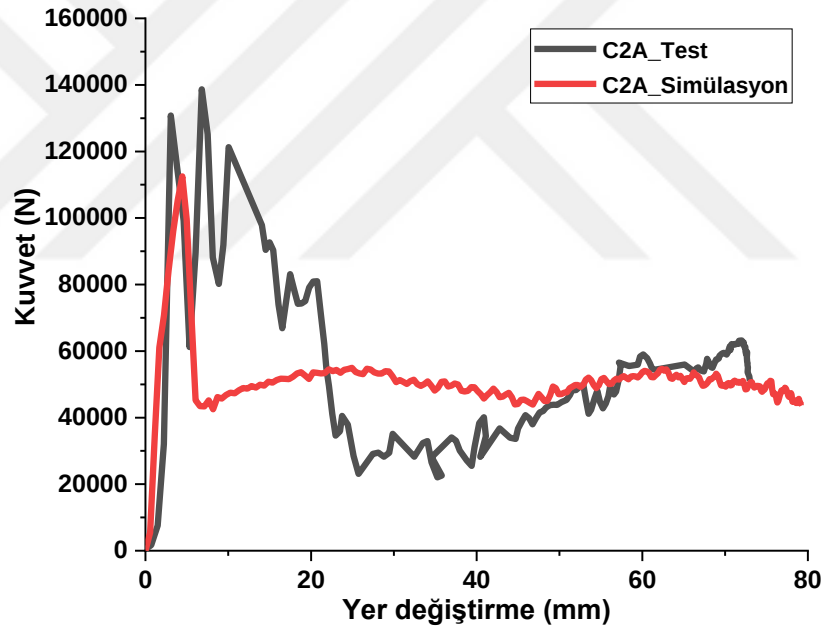
#### 4.4.13. C2A Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.49’da C2A hibrit çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucu elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.49 incelendiğinde C2A kompozit çarpışma kutuları düşey darbe kuvveti etkisiyle ilk olarak üst kısımdan katlanmaya başlamıştır. Ancak kuvvetin artmasına iç kısımda bulunan ABS malzemeli çarpışma kutusu orta noktada kırılma gerçekleşmesinden gerilme orta noktada birikmesinden dolayı orta noktada katlanma meydana gelmiştir. Şekil 4.49.(b-c)’de verilen test ve simülasyon sonrası görüntülerin ikisinde de çarpışma kutusu orta bölgeye yakın yerden katlanma davranışı sergilemiştir. Burada iç kısımda bulunan ABS çarpışma kutusu kompozit plakaya herhangi bir şekilde deformasyon vermemiştir. C2 ve C2A çarpışma kutularının ezilme davranışları incelendiğinde birbirlerinden farklı ezilme davranışı sergilediği ve iç kısımda bulunan yapının ezilme davranışına etkisinin olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 49.** C2A kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görsel

Şekil 4.50’da C2A çarpışma kutusunun test ve simülasyon sonrasında elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.50 incelendiğinde çarpışma kutuları test anında 138690 N maksimum kuvvet değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Kuvvette maksimum noktaya ulaştıktan sonra düşüş gerçekleşmişse de ezilme 80 mm devam ederek enerji emilimine devam etmiştir. Simülasyon ve test grafiği karşılaştırıldığında çarpışma eğriler birbirlerine yakın olarak ilerleme sağlamıştır. C2A ile C2 grafiği karşılaştırıldığında, C2A grafiğinin maksimum kuvvet ve ortalama kuvvet değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Böylece iç kısımda bulunan ABS çarpışma kutusunun maksimum ve ortalama kuvvet değerleri üzerine etkisinin olduğu ve dolayısıyla hem enerji emilimi hem de özgül enerji emilimine etkisinin olacağı düşünülmektedir.



**Şekil 4. 50.** C2A çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

Tablo 4.26’da C2A çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucu elde edilen çarpışma performans değerleri verilmiştir. Tablo 4.26 incelendiğinde maksimum kuvvet noktasının test ve simülasyon değerleri arasında yaklaşık %23 hata oranı olduğu belirlenmiştir. C2A çarpışma kutularının iç kısmında bulunan ABS malzemesinin ortalama kuvvet ile özgül enerji emilimine katkısı olmuştur. C2A çarpışma kutularının

ortalama kuvvet değeri 53979 N olduğu belirlenmiş ve simülasyon ile test sonucu arasında yaklaşık olarak %8 hata oranı olduğu belirlenmiştir. C2A çarpışma kutularının test sonucunda özgül enerji emilim değerinin ise 12,41 kJ/kg olduğu ve simülasyon ile %8 gibi yakın bir sapma oranı ile doğrulaması yapılmıştır. C2A çarpışma kutularının C1 çarpışma kutularına göre yaklaşık olarak %15 daha yüksek özgül enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir. Böylece iç kısımda bulunan ABS malzemeli çarpışma kutusu kompozit yapıyı maksimum kuvvet, ortalama kuvvet ve özgül enerji emilimi değerleri açısından pozitif yönden katkı sağlamıştır.

**Tablo 4. 26.** C2A çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi

|                     | <b>Maksimum kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama kuvvet (N)</b> | <b>Yer değiştirme (mm)</b> | <b>Özgül enerji emilimi (kJ/Kg)</b> |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Test</b>         | 138690                     | 53918,21                   | 78                         | 12,41                               |
| <b>Simülasyon</b>   | 112488,2                   | 49918                      | 80                         | 11,49                               |
| <b>% Hata oranı</b> | +23                        | +8,02                      |                            | +8,006                              |

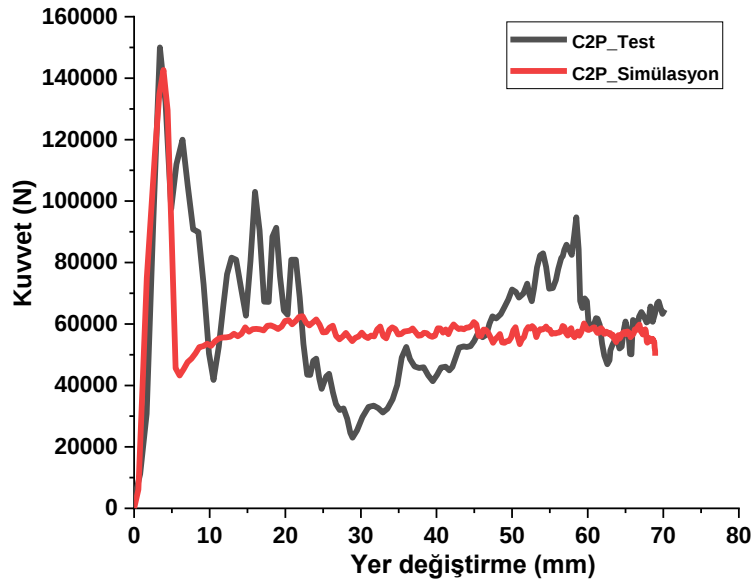
#### 4.4.14. C2P Kompozit Çarpışma Kutusunun Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.51’de C2P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucu elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.51 incelendiğinde çarpışma kutuları test sırasında tıpkı C2’de olduğu alt kısımdan katlanmaya başlamış ve üst kısımda herhangi bir deformasyon gerçekleşmemiştir. Burada çarpışma kutuları üzerine etkiyen kuvvet kompozit yapının sarım açısı veya iç kısımda bulunan PLA malzemeli çarpışma kutularının etkisiyle gerilimin alt kısma ilettiğinden dolayı bu şekilde ezilme gerçekleştiği düşünülmektedir. C2P hibrit çarpışma kutularının iç kısmında bulunan çarpışma kutuları kuvvetin etkisiyle ezilme bölgelerinde kırılma davranışı sergilediği belirlenmiştir. Burada çarpışma kutularının ezilemeyen bölgelerinde bulunan çarpışma kutusu bileşenlerinde kırılma, patlama vs. hata görünmemiştir.



**Şekil 4. 51.** C2P kompozit çarpışma kutusu (a) test görseli, (b) test sonrası görsel, (c) simülasyon sonrası görseli

Şekil 4.52’de C2P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.52 incelendiğinde hem test hem de simülasyon sonucunda maksimum kuvvet noktalarının birbirlerine oldukları ve test sonucunda maksimum kuvvetin yaklaşık olarak 150000 N olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Maksimum kuvvetten sonra kuvvet değerinde düşüş gerçekleşse de yaklaşık 10 mm sonra kuvvet değerinde artış gerçekleşmiştir. C2A ile C2P çarpışma kutularının kuvvet- yer değiştirme eğrileri kıyaslandığında maksimum kuvvet noktasının birbirlerine yakın değerde oldukları ancak kuvvet düşüşünden sonra C2P çarpışma kutusunda kuvvet değerinde dalgalanmalar olduğu belirlenmiştir. C2 ile kıyaslandığında ise kuvvet değerinin oldukça yüksek değerde olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 52.** C2P çarpışma kutularının test ve simülasyon sonrası kuvvet- yer değiştirme grafiği

Tablo 4.27’de C2P çarpışma kutularının çarpışma performansı göstergeleri verilmiştir. Tablo 4.27 incelendiğinde C2P çarpışma kutularının maksimum kuvvet değeri için test ve simülasyon sonucunda %5 oranında sapma gerçekleşmiştir. Bu sapma ortalama kuvvet için %6,6 olarak gerçekleşmiştir. C2P çarpışma kutularının özgül enerji emilimi değeri ise 12,01 kJ/kg olduğu ve simülasyona göre %8,3 oranında sapma olduğu görülmektedir. 90° sarım açısına sahip olan çarpışma kutularında C2A çarpışma kutusunun enerji emiliminin en yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 27. C2P çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi**

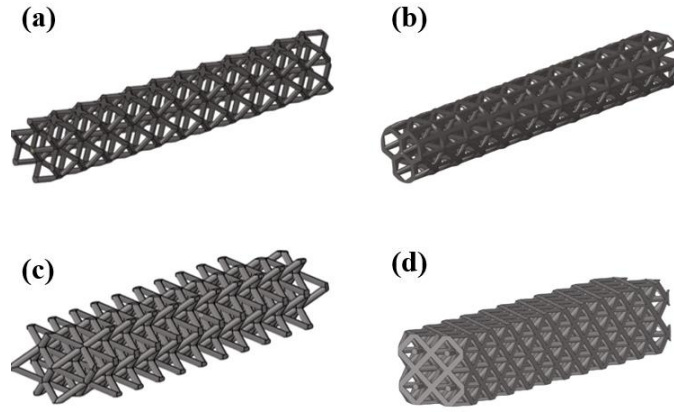
|                     | <b>Maksimum kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama kuvvet (N)</b> | <b>Yer değiştirme (mm)</b> | <b>Özgül enerji emilimi (kJ/Kg)</b> |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Test</b>         | 150000                     | 61400                      | 73                         | 12,01                               |
| <b>Simülasyon</b>   | 142657                     | 57573                      | 73                         | 11,08                               |
| <b>% Hata oranı</b> | -5                         | -6,6                       |                            | -8,3                                |

#### **4.5. Kafes Yapı Takviyeli Alüminyum Hibrit Yan Kapı Barlarının Geliştirilmesi**

##### **4.5.1. Kafes Yapıların Tasarımı ve Eklemeli İmalat Yöntemi Kullanılarak Üretilmesi**

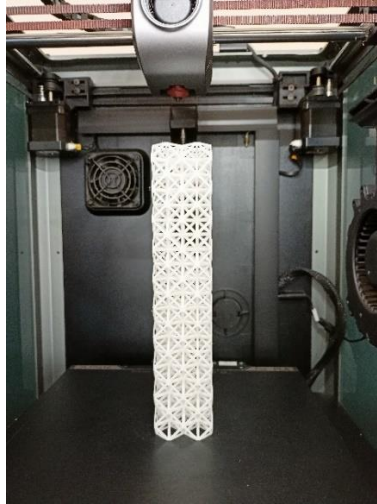
Şekil 4.53(a-d)’de silindir yüzey merkezli, silindir hacim merkezli, kare yüzey merkezli, kare hacim merkezli kafes yapıların görüntüleri verilmiştir. Silindir yapılar 40 mm dış çap, 36 mm iç çap, 2 mm et kalınlıklarına ve 200 mm boya sahip alüminyum 6063 borunun içerisine yerleştirileceğinden dolayı kafes yapıların birim hücreleri 12\*12\*10 mm ve kalınlıkları 2 mm olarak tasarlanmıştır. Kare yapılar ise 40\*40 mm, 200 mm boy ve 2 mm et kalınlığına sahip olan alüminyum 6063 kare profile takviye edileceği için kafes yapıların birim hücresi 18\*18 mm boyutlarında, 2 mm kalınlığa sahip olarak tasarlanmıştır.

Kafes yapıların tiplerinin yan kapı barlarının etkisinin araştırılmasıyla iki farklı kafes yapısı ve iki farklı dış yapı kullanılmıştır.



**Şekil 4. 53.** Kafes yapıların geometrik şekilleri **(a)** silindir yüzey merkezli, **(b)** silindir hacim merkezli, **(c)** kare yüzey merkezli, **(d)** kare hacim merkezli kafes yapılar

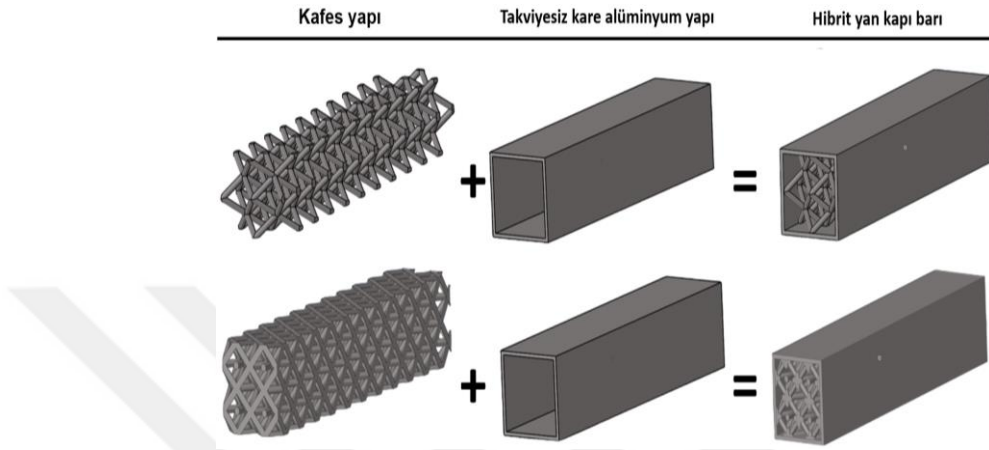
Kafes yapıların tasarlanmasında sonra üretimi için eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan eriyik biriktirme yöntemi kullanılmıştır. Kafes yapıların üretilmesinde PLA, ABS ve CF15PET malzemeleri kullanılarak malzeme tipinin enerji emilimine etkisi de araştırılmıştır. Tüm kafes yapılar Zortrax markalı M300 Dual serisi üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Şekil 4.57’de verilen görselde kafes yapıların üretimin ardından elde edilen görüntü verilmiştir.



**Şekil 4. 54.** Kafes yapıların üretilmesi

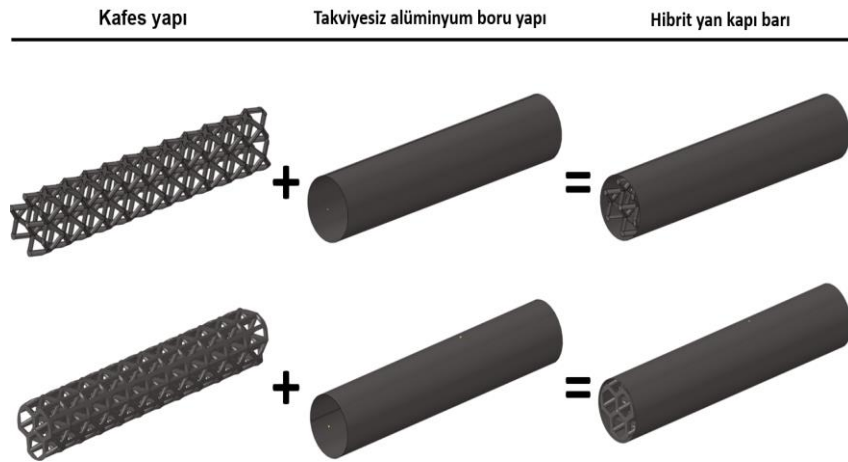
Kafes yapıların üretilmesinden sonra şekil 4.55’de verildiği gibi hibrit yan kapı barları oluşturulmuştur. Hibrit yapıların üretiminde eklemeli imalat yöntemi kullanılarak

üretile farklı tip ve malzemeli kafes yapıları, alüminyum profil ile sıkı geçme olacak iç içe geçirilmiştir. Burada yapıların sıkı geçme şeklinde montajlanmasının amacı test anında kafes yapıların alüminyum ile birlikte çalışması ve eğilme anında iç kısımdan çıkmamasından dolayı kullanılmıştır.



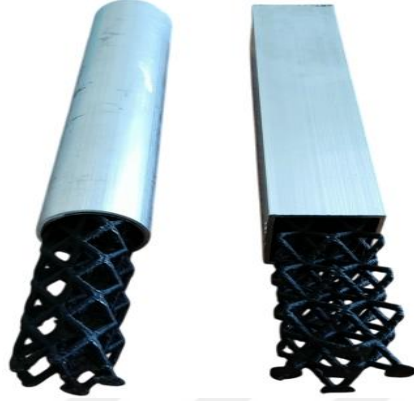
Şekil 4. 55. Kare geometrili hibrit yan kapı barlarının görselleri

Şekil 4.56'da silindir tipli kafes yapılarının alüminyum boru ile hibritleştirme görseli verilmiştir. Burada da tıpkı kare profilde olduğu gibi tasarlanan kafes yapıları alüminyum malzemeler ile sıkı geçme olarak montajlanmıştır.



Şekil 4. 56. Silindir geometrili hibrit yan kapı barlarının görselleri

Şekil 4.57’de hibrit yapıların montajlanma aşamasını gösteren yarı montajlı görseller verilmiş ve daha sonra tam boyutlarda montajları yapılmıştır.



Şekil 4. 57. Yarı montajlı farklı geometrili kafes yapıları

#### 4.5.2. Hibrit Yapıların Üç Nokta Eğme Simülasyonlarının Kurulumu

Şekil 4.58’de Takviyesiz ve kafes yapı takviyeli yan kapı barlarının simülasyon görselleri verilmiştir. Simülasyon sırasında tüm yapılara ilk olarak 1 mm boyutunda ağ yapıları oluşturulmuştur. Daha sonra malzeme tanımlaması yapmak amacıyla tablo 4.28’da verilen alüminyum malzeme özellikleri ve tablo 4.29’da verilen gerilme-gerinim değerleri ‘MAT 36’ kartı içerisine tanımlanmıştır. Daha sonra kafes yapılar katı olduklarından dolayı ‘P14\_SOLID’ özellik kartı ve alüminyum malzeme ince cidarlı olarak tanımlandığından dolayı ‘PSHELL’ özellik kartı tanımlanmış ve 2 mm kalınlık değeri verilmiştir. Alt destekler ve hareketli rijit duvarlara ise ‘MAT 2’ kartı içerisinde çelik malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Bu yapılara simülasyon anında ezilmemeleri amacıyla çelik malzeme özelliği verilmiş olup, ‘PSHELL’ özellik kartı tanımlanarak 2 mm kalınlık değeri girilmiştir. Kafes yapılara ise şekil 4.1’de çekme testi sonucunda elde edilen veriler kullanılarak ‘MAT 2’ kartı tanımlaması yapılmıştır.

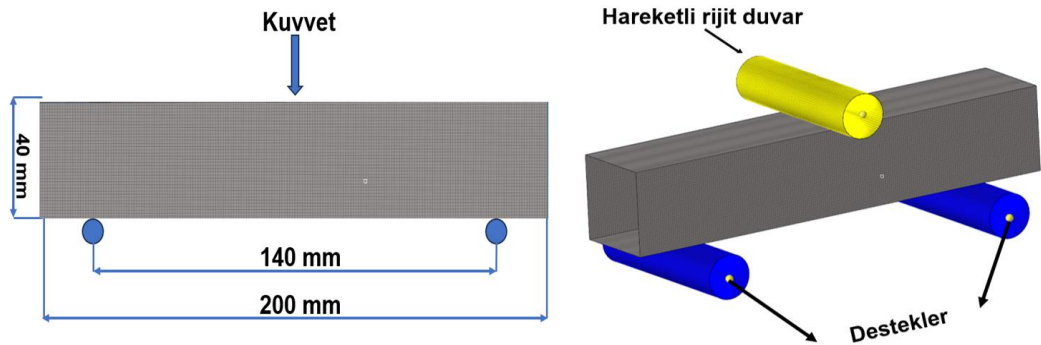
**Tablo 4. 28.** Alüminyum 6063 malzeme özelliği (Koloushani vd., 2024)

|         | Yoğunluk<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Poisson's<br>oranı | Young's<br>modülü<br>(MPa) | Başlangıç<br>akma<br>( $\sigma_y$ ) gerilme<br>(MPa) | Maksimum<br>( $\sigma_y$ )<br>Gerilme<br>(MPa) |
|---------|----------------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| AL 6063 | 2.7                              | 0.33               | 65980                      | 145                                                  | 170                                            |

**Tablo 4. 29.** Alüminyum 6063 gerilme- gerinim değerleri (Koloushani vd., 2024)

| Gerinim<br>(-)   | 0   | 0.006 | 0.011 | 0.016 | 0.023 | 0.031 | 0.038 | 0.044 | 0.057 | 0.071 |
|------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Gerilme<br>(MPa) | 145 | 147.5 | 150   | 152.5 | 155   | 157.5 | 160   | 162.5 | 165   | 170   |

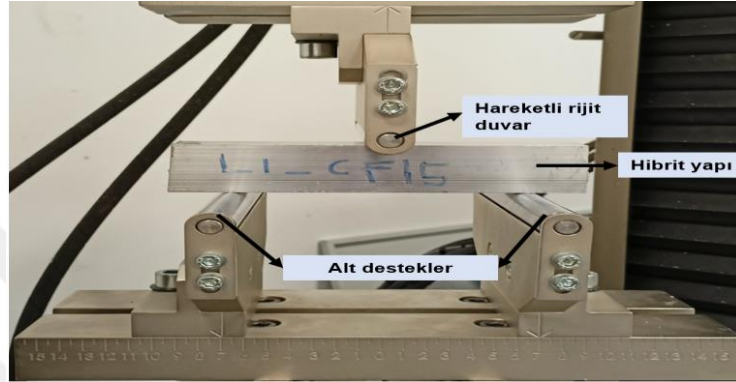
Malzeme ve özellik kartları tanımlandıktan sonra hibrit yan kapı barları şekil 4.58’de verildiği iki mesnet arası 140 mm olarak şekilde alt destek bölgeleri tanımlanarak destekler tüm yönlerde kısıtlanmıştır. Alt destekler ve hareketli rijit duvarlar 20 mm çapında olarak tasarlanmıştır. Daha sonra hibrit yapı ile alt destekler arasında ‘TYPE 7’ kontak kartı tanımlaması yapılmıştır. Üç nokta eğme kuvvetini temsil eden ve şekil 4.58’de sarı renk ile gösterilen hareketli rijit duvar yapının tam ortasında olacak şekilde konumlandırılmış ve 2 mm/dk hız tanımlaması yapılmıştır. Hareketli rijit duvar simülasyon anında sadece bası kuvveti uygulanması amacıyla sadece dikey yönde serbestlik tanımlanmıştır. Daha sonra hareketli rijit duvar ile hibrit yapı arasında ‘TYPE 7’ kontak kartı tanımlaması yapılmıştır. Daha sonra kuvvet ve yer değiştirme değerlerinin elde edilmesi amacıyla çıkış blokları oluşturularak analizlerin kurulumları tamamlanmıştır.



**Şekil 4. 58.** Takviyesiz ve kafes yapı takviyeli yan kapı barlarının simülasyon görselleri

#### 4.5.3. Hibrit Yan Kapı Barlarının Test Prosedürünün Hazırlanması

Şekil 4.59’da üretilen takviyesiz ve kafes yapı takviyeli yan kapı barlarının test anı görüntü verilmiştir. Burada hibrit yapı tıpkı simülasyonda olduğu ara mesafesi 140 mm olan alt destekler arasında sabitlenmiştir. Daha sonra üst kısımda bulunan hareketli duvar ile üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4. 59.** Takviyesiz ve kafes yapı takviyeli yan kapı barlarının üç nokta eğme test görseli

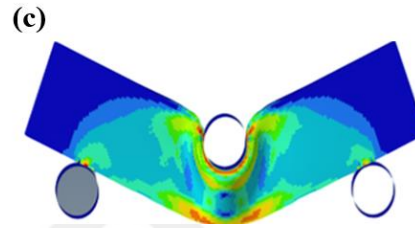
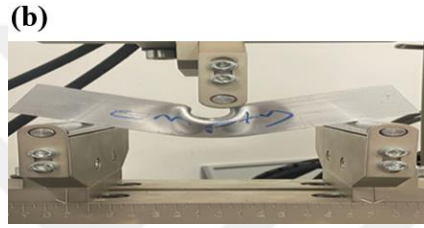
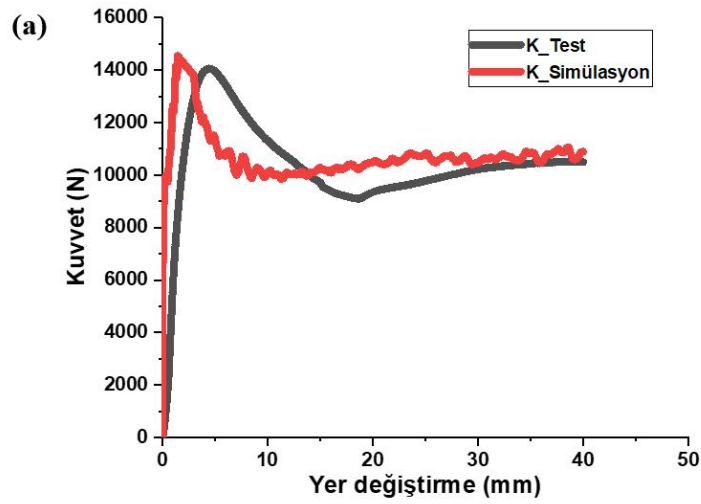
Tablo 4.30’da yan kapı barlarının takviyelendirilmesi için kullanılan malzeme ve geometri şekilleri verilmiş olup, ilerleyen bölümler yan kapı barları tablo 4.30’da verilen kodlar ile anılacaktır.

**Tablo 4. 30.** Yan kapı barlarının takviyelendirilmesi ve kodlanması

| Yan Kapı Barı Türleri | Kafes yapı takviye çeşidi | Takviye yapı malzemesi | Kod |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----|
| Kare Alüminyum        | Takviyesiz                | X                      | K   |
| Kare Alüminyum        | Hacim merkezli            | ABS                    | KVA |
| Kare Alüminyum        | Hacim merkezli            | PLA                    | KVP |
| Kare Alüminyum        | Hacim merkezli            | CF15PET                | KVC |
| Kare Alüminyum        | Yüzey merkezli            | ABS                    | KYA |
| Kare Alüminyum        | Yüzey merkezli            | PLA                    | KYP |
| Kare Alüminyum        | Yüzey merkezli            | CF15PET                | KYC |
| Silindir Alüminyum    | Takviyesiz                | X                      | S   |
| Silindir Alüminyum    | Hacim merkezli            | ABS                    | SVA |
| Silindir Alüminyum    | Hacim merkezli            | PLA                    | SVP |
| Silindir Alüminyum    | Hacim merkezli            | CF15PET                | SVC |
| Silindir Alüminyum    | Yüzey merkezli            | ABS                    | SYA |
| Silindir Alüminyum    | Yüzey merkezli            | PLA                    | SYP |
| Silindir Alüminyum    | Yüzey merkezli            | CF15PET                | SYC |

#### 4.5.4. K Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.60’da K kodlu yan kapının barının üç nokta eğme testi ve simülasyonları sonucunda elde edilen kuvvet ter değiştirme grafiği verilmiştir. K yapısı temel model olarak kabul edilip kafes yapıların etkisi bu K’nin sonucuna göre performans kriterleri değerlendirilmiştir. Şekil 4.60(a) incelendiğinde Test ve simülasyon sonucunda maksimum kuvvet dayanımı yaklaşık olarak 14000 N olarak gerçekleşmiştir. Maksimum kuvvet noktasından sonra belirli oranda kuvvet düşüşü gerçekleşmişse de testin ilerleyen kısmında kuvvet sabit ekseninde devam etmiştir. Şekil 4.60(b, c)’de verilen eğilme görüntüleri incelendiğinde ise test ve simülasyon sonrasında görüntülerin birbirlerine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 60.** K yan kapı barı **(a)** kuvvet- yer değiştirme grafiği, **(b)** test sonrası görüntü, **(c)** simülasyon sonrası görüntü

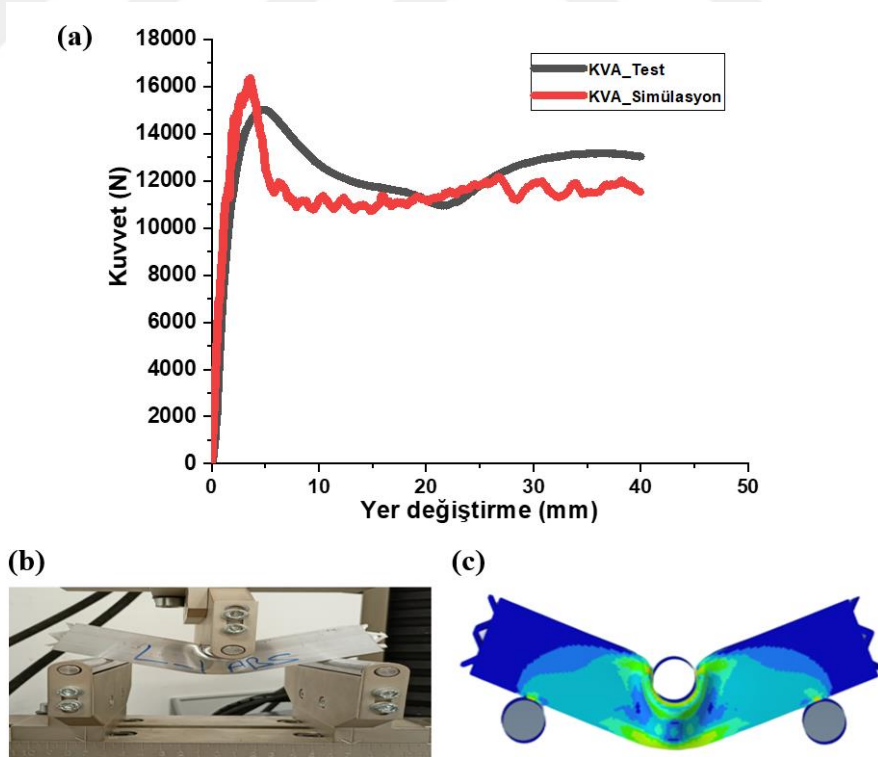
Tablo 4.31’de K kodlu yan kapı barının test ve simülasyon sonucu elde edilen değerler verilmiştir. Tablo 4.31’de verilen maksimum kuvvet, ortalama kuvvet ve enerji emilimi değerlerinin test ve simülasyon sonucunda birbirlerine yakın değerlerde oldukları belirlenmiş ve bu değerlerin hata oranları sırasıyla %3,3, %2,25 ve %2,35 oranında olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 31.** K kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>K Test</b>         | 14058,8                    | 10349,25                   | 40                         | 0,414                      |
| <b>K Simülasyon</b>   | 14544,3                    | 10586,92                   | 40                         | 0,424                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | +3,3                       | +2,25                      |                            | +2,35                      |

#### 4.5.5. KVA Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.31’de KVA kodlu yan kapı barının KVA kodlu yan kapı barının kuvvet- yer değiştirme grafiği, test sonrası görüntü, simülasyon sonrası görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.31(a)’da verilen grafik incelendiğinde test sonucunda maksimum kuvvetin 15019 N olduğu belirlenmiştir. Bu değer K kodlu yan kapı barı kıyaslandığında ABS malzemeli hacim merkezli kafes yapısının maksimum kuvveti etkilediği belirlenmiştir. Kuvvet düşüşünün ardından hemen hemen yatay ekseninde enerji emilimi devam etmiştir. Yatay ekseninde gerçekleşen kuvvet değeri K kodlu yapı yan kapı barına yüksek değerde olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.31(b-c) incelendiğinde test ve simülasyon görüntülerinin birbirlerine yakın olduğu ve her ikisinde de iç kısımda bulunan kafes yapısı eğme kuvvetinin etkisi ile alüminyum yapının iki uç kısmına doğru eğilme sergilediği belirlenmiştir. Test sonucunda iç kısımda bulunan kafes yapısında kırılma gözlemlenmemiş olduğu belirlenmiş ve bu sayede hem maksimum kuvvet hem de ortalama kuvvet değerlerinde artış meydana gelmiştir.



Şekil 4. 61. KVA kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntü

Tablo 4.32’de KVA kodlu yan kapı barının test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırıldığı değerler verilmiştir. Tablo 4.32 incelendiğinde maksimum kuvvet değerlerinde test ve simülasyon sonucunda %8,19 oranında hata olduğu belirlenmiştir. Ortalama kuvvet ve enerji Emilimi için hata oranları ise sırasıyla %5,4 ve %5,36 oranında olduğu belirlenmiştir. Test sonucunda KVA yan kapı barının 0,491 kJ enerji Emilimi değerine sahip olduğu belirlenmiş ve K kodlu yan kapı barına göre yaklaşık olarak %18 daha yüksek enerji Emilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

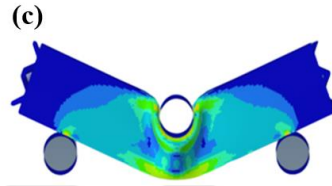
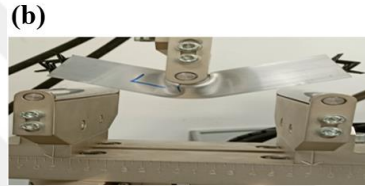
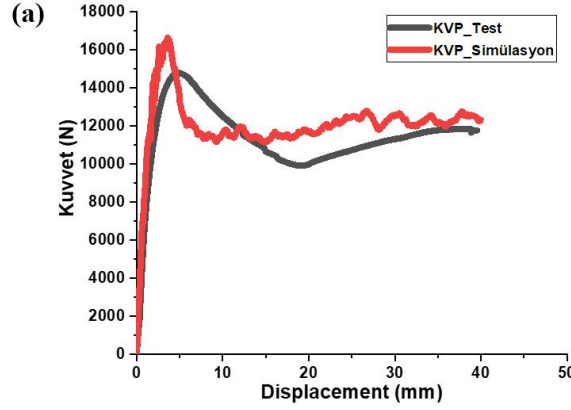
**Tablo 4. 32.** KVA kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>KVA Test</b>       | 15019,6                    | 12288,79                   | 40                         | 0,491                      |
| <b>KVA Simülasyon</b> | 16360,15                   | 11659,44                   | 40                         | 0,466                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | +8,19                      | -5,4                       |                            | -5,36                      |

#### 4.5.6. KVP Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.62’de KVP kodlu yan kapı barlarının test ve simülasyon sonucu elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği ile ezilme görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.62(a) incelendiğinde test sonucunda maksimum kuvvet dayanımının yaklaşık olarak 14500 N ve simülasyon sonucunda ise 16500 N olduğu belirlenmiştir. KVP kodlu yan kapı barının grafiği incelendiğinde kafes yapısının malzemesi olan PLA malzemenin rijit yapıda olmasından dolayı kuvvet etkisi ile kırılmalar meydana geldiğinden KVA kodlu yan kapına göre maksimum kuvvetten sonra düşüş daha çok olmuştur. Maksimum kuvvet düşmesinin hemen ardından kafes kırılmayan kafes yapılar yük taşımaya devam etmesinden dolayı ortalama kuvvet K kodlu yan kapı barına göre yüksek olduğu belirlenmiştir. Maksimum kuvvet açısından KVP’nin dayanımı ile K kodlu kapı barından 600 N daha yüksek olduğu KVA’dan ise yaklaşık 600 N daha düşük olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.62(b-c) verilen ezilme görüntüleri incelendiğinde ise hem test hem de simülasyon sonucunda kafes yapısı alüminyumun içerisinde her iki yönde de çıkmıştır. Burada simülasyon sonucunda elde edilen görüntü incelendiğinde K kodlu

kabı barında meydana gelen yüksek gerilme değeri bir noktada birikmemiş ve KVA’da olduğu gibi kafes yapılar gerilmeyi yapıya dağıtma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 62.** KVP kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntü

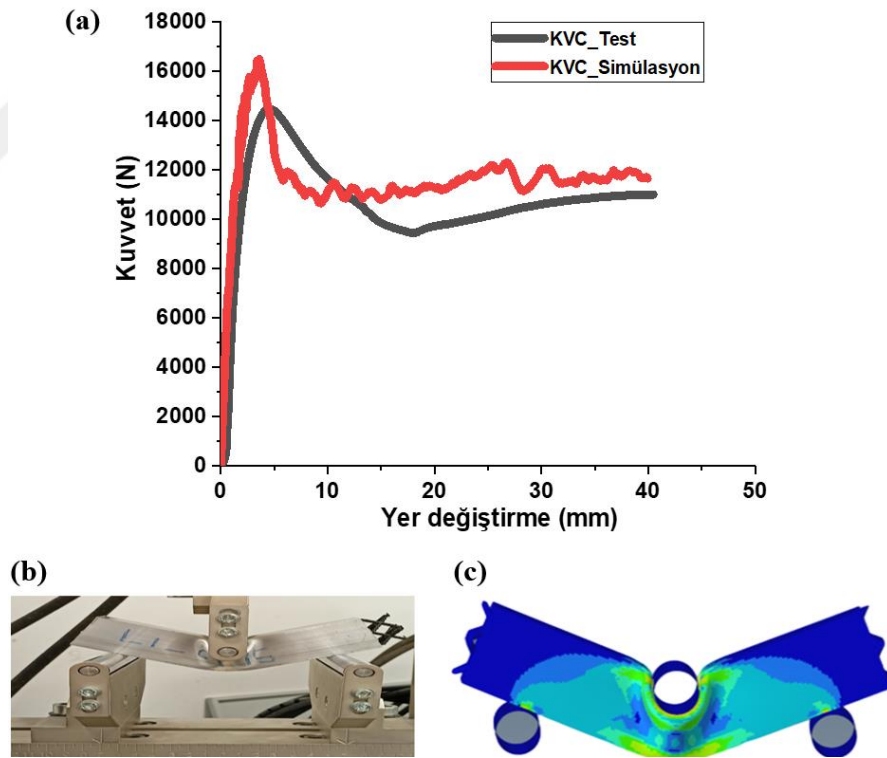
Tablo 4.33’de KVP kodlu kapı barının test ve simülasyon sonucu elde edilen veriler sunulmuştur. Tablo 4.33 incelendiğinde maksimum kuvvette test ile simülasyon sonunda %12 oranında hata oranı olduğu belirlenmiş ve sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğu belirlenmiştir. Bu hata oranı ortalama kuvvet için %8,5 ve enerji emilimi için %8,62 olduğu belirlenmiştir. KVP kodlu kapı barının enerji emiliminin K kodlu kapı barından yüksek olduğu, KVA kodlu kapı barından ise yüksek olduğu belirlenmiştir. Burada kafes yapı malzemesinin etkisinin olduğu açıkça belli olmuştur.

**Tablo 4. 33.** KVP kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | Maksimum Kuvvet (N) | Ortalama Kuvvet (N) | Yer Değiştirme (mm) | Enerji Emilimi (kJ) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>KVP Test</b>       | 14593               | 11138,92            | 40                  | 0,445               |
| <b>KVP Simülasyon</b> | 16646,9             | 12182,2             | 40                  | 0,487               |
| <b>Hata oranı (%)</b> | +12                 | +8,5                |                     | +8,62               |

#### 4.5.7. KVC Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.63’de KVC kodlu kapı barlarının kuvvet- yer değiştirme grafiği, test ve simülasyon sonrasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.63(a)’da verilen grafik incelendiğinde test sonrasında maksimum kuvvet noktasının 145475 N olduğu belirlenmiştir. Test sırasında kuvvet maksimum kuvvete ulaştıktan sonra diğer yan kapılarında da olduğu düşüş olmuştur. Burada kuvvet düşüşünden sonra gerçekleşen kuvvet dayanımı K kodlu yapıya yakın şekilde seyir etmiştir. KVC kodlu yapının maksimum kuvvet dayanımı değerlerinin hem KVA hem de KVP kodlu yapıdan düşük olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.63(b-c)’de verilen görseller incelendiğinde ise test sırasında kafes yapılar alüminyum yapıyı tek yönden çıkış gösterdiği belirlenmiştir. Burada kafes yapısı malzemesinin hem ezilme hem de kuvvet dayanımına katkısının oldukça fazla olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 63. KVC kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntüsü

Tablo 4.34’de KVC kodlu kapı barının test ve simülasyon sonucunda elde edilen değerler sunulmuştur. Tablo 4.34 incelendiğinde test ve simülasyon sonucunda hata oranının %12 olduğu belirlenmiştir. Ortalama kuvvet ve enerji emilimi için bu değer yaklaşık olarak %8,5 olarak gerçekleşmiştir. KVC kapı barının enerji emiliminin K kodlu kapı barından yüksek olduğu ancak diğer yapılardan düşük olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 34.** KVC kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

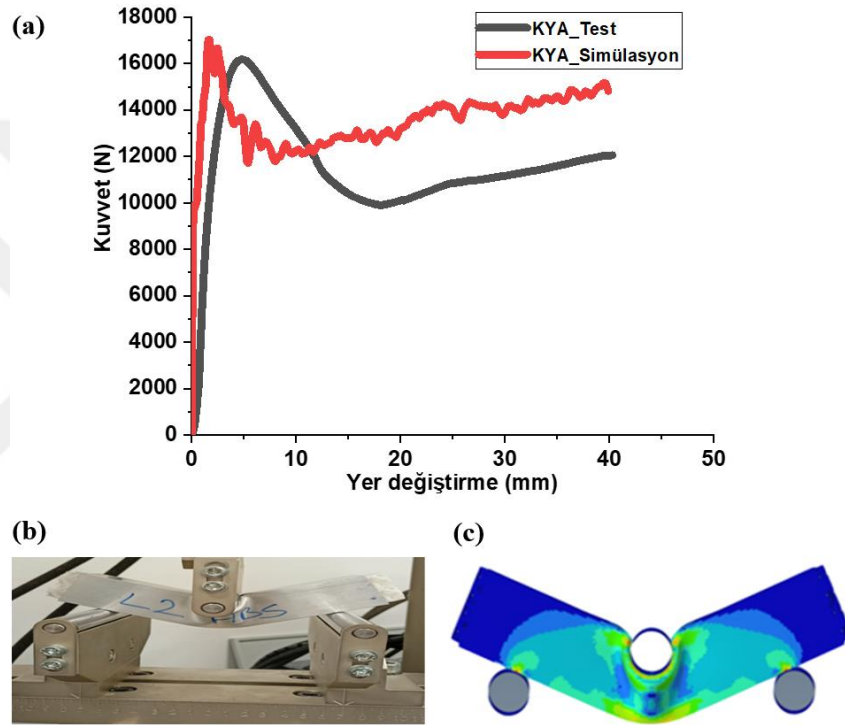
|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>KVC Test</b>       | 14475                      | 10679,97                   | 40                         | 0,427                      |
| <b>KVC Simülasyon</b> | 16495,72                   | 11718,69                   | 40                         | 0,468                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | +12,2                      | +8,8                       |                            | +8,75                      |

PLA, ABS ve CF15PET malzemeler ile üretilen yan kapı barlarının sonuçları incelendiğinde kafes yapıların malzeme çeşidinin maksimum kuvvet, ortalama kuvvet ve enerji emilimi değerleri üzerine oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Yan kapı barlarının enerji emilimi değerleri önemli olduklarından dolayı büyükten küçüğe doğru enerji emilimi sırası KVA, KVP, KVC ve K kodlu kapı olarak gerçekleşmiştir. Burada ABS malzemesinin en uygun ezilme davranışı ve enerji emilimi sağladığı belirlenmiştir.

#### **4.5.8. KYA Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi**

Şekil 4.64’de KYA kodlu kapı barlarının kuvvet- yer değiştirme, test ve simülasyon sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.64(a) incelendiğinde hem test hem de simülasyon sonucunda maksimum kuvvet noktalarının birbirlerine oldukça yakın değerde olduğu belirlenmiştir. Maksimum kuvvet yaklaşık olarak 16599,2 N olduğu belirlenmiş olup K yapı ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %18 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Grafikte ilk kuvvet düşüşünün ardından eğri tekrardan yukarı yönde yönelim göstermiş olup enerji emilimine devam ettiği belirlenmiştir. Ayrıca yapılan test sonucunda iç kısımda bulunan ABS kafes yapılarda kırılma meydana gelmemiştir. Bu durum sonucunda grafiğin yukarı eksene hareket ettiği düşünülmektedir. Şekil 4.64(b-c) incelendiğinde ise hem test hem de simülasyon sonucunda ezilme görüntülerinin

birbirlerine benzer olduğu belirlenmiştir. Ezilme davranışları görselleri incelendiğinde K kodlu yan kapı barında kuvvete dikey ekseninde gerilme birikmelerinin meydana gelmişken KYA kodlu yan kapı barında gerilme birikmeleri kafes yapıların etkisiyle yapı üzerine dağılmış ve gerilme birikmesinin belirli bölgelerde birikmesini engellemiştir. Ayrıca kafes yapısı tipinin değişmesine bağlı olarak maksimum kuvvet miktarında artış meydana gelmiştir. Şekil 4.64 (a-b) incelendiğinde iç kısımda bulunan kafes yapılar alüminyum yapı içerisinde her iki kısmına doğru çıkış göstermiştir.



**Şekil 4. 64.** KYA kodlu yan kapı barının **(a)** kuvvet- yer değiştirme grafiği, **(b)** test sonrası görüntü, **(c)** simülasyon sonrası görüntü

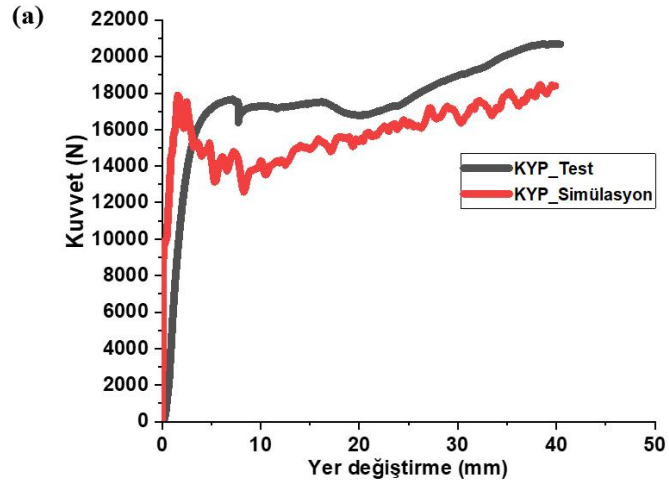
Tablo 4.35’de KYA kodlu kapı barının test ve analiz sonucunda elde edilen veriler sunulmuştur. Tablo 4.35 incelendiğinde maksimum kuvvet dayanımı değeri için test ve simülasyon sonucunda hata oranı %2,6 olduğu belirlenmiştir. Bu hata oranları ortalama kuvvet ve enerji emilimi için her iki değerde de yaklaşık olarak %6 olduğu belirlenmiştir. KYA kodlu yan kapı ile K kodlu kapı barı kıyaslandığında yaklaşık olarak %23 oranında artış gerçekleşmiştir. Burada KYA kodlu yan kapı barı KVA ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %4 daha fazla enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 35.** KYA kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>KYA Test</b>       | 16599,2                    | 12762,58                   | 40                         | 0,511                      |
| <b>KYA Simülasyon</b> | 17033,12                   | 13562,85                   | 40                         | 0,542                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | +2,6                       | +6,2                       |                            | +6,06                      |

#### **4.5.9. KYP Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi**

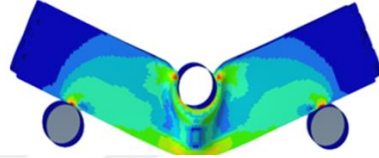
Şekil 4.65’de KYP kodlu yan kapı barının test sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği, test ve simülasyon sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.65(a)’da verilen grafik incelendiğinde test sonrasında maksimum kuvvet dayanımının 20685 N olduğu simülasyon sonucunda ise 18460 N olduğu ve değerlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. KYP kodlu yan kapı barının maksimum kuvvet düşüşünün ardından grafik tekrardan yükselişe geçerek test sonuna kadar enerji Emilimi artarak devam etmiştir. Burada pozitif ivme enerji Emilimi devam etmesinin sebebinin kafes yapıların gövde içerisinde katlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.65(b-c) incelendiğinde KYP kodlu kapı barlarının test simülasyon sonucunda elde edilen görseller oldukça benzer olduğu belirlenmiş ve gerilme birikmelerinin belirli noktada toplanmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca test ve simülasyon sonucunda iç kısımda bulunan takviye görevi gören kafes yapılarını alüminyum yapının içerisinde her iki taraftan çıkma eğilimi göstermiştir.



(b)



(c)



**şekil 4. 65.** KYP kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntüsü

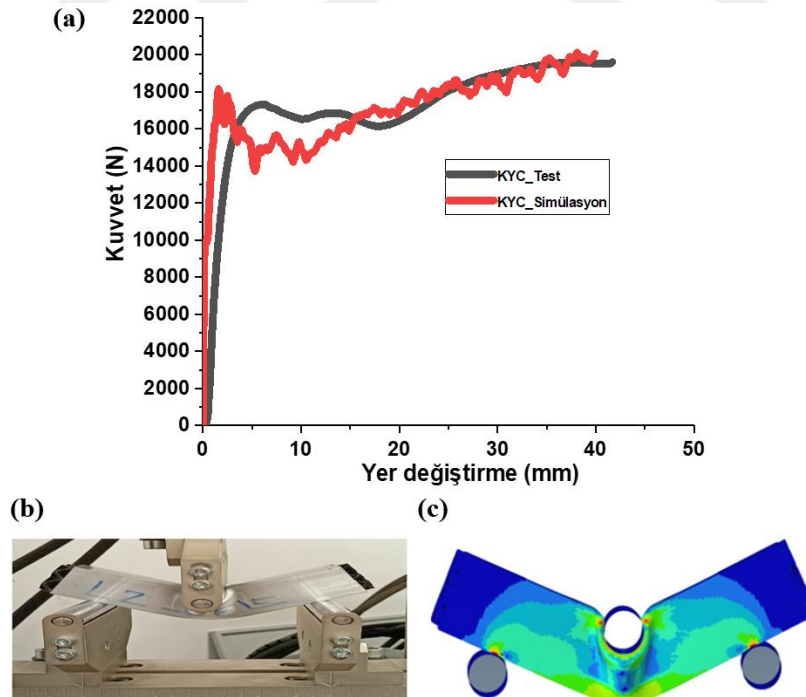
Tablo 4.36’da KYP kodlu kapı barının test ve simülasyon sonucunda elde edilen veriler sunulmuştur. Tablo 4.36 incelendiğinde maksimum kuvvet noktalarında test ve simülasyon sonucunda hata oranlarının %12, ortalama kuvvet ve enerji emiliminde bu oran yaklaşık olarak %10 olarak geręekleřmiřtir. Enerji emilimi açısından KYP’nin K’dan yaklaşık olarak %67 oranında daha yüksek olduğu, KYA’dan ise yaklaşık olarak %35 daha yüksek enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir. Burada iç kısmında takviye edici olarak bulunan kafes yapı malzemelerinin sahip oldukları eğilme dayanımlarının önemli etkisinin olduğu ve üç nokta eğilme testleri sonucunda elde edilen değerlerin tamamını etkilediği tespit edilmiştir. ABS malzemesinin PLA malzemesine göre daha düşük enerji eğilme direnci gösterdiği belirlenmiştir.

**Tablo 4. 36.** KYP kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | Maksimum Kuvvet (N) | Ortalama Kuvvet (N) | Yer Değiştirme (mm) | Enerji Emilimi (kJ) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>KYP Test</b>       | 20685               | 17350,18            | 40                  | 0,694               |
| <b>KYP Simülasyon</b> | 18460               | 15744,84            | 40                  | 0,629               |
| <b>Hata oranı (%)</b> | -12                 | -10                 |                     | -10,1               |

#### 4.5.10. KYC Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.66'da KYC kodlu kapı barlarının test ve simülasyon sonrası görüntüleri ile kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 4.66(a) incelendiğinde test sonrasında maksimum kuvvet dayanımının ilk zirve noktasının yaklaşık olarak 18000 N olduğu belirlenmiştir. Bu değer K kodlu kapı barı ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %28, KYA ile kıyaslandığında %8,5 oranında daha yüksek olduğu ancak KYP ile kıyaslandığında ise %13 daha az olduğu belirlenmiştir. Kuvvetin maksimum kuvvet noktasına ulaşmasının hemen ardından belirli oranda düşüş gerçekleşse de diğer yüzey merkezli kübik takviyeli yapılarda olduğu kuvvet tekrardan artmaya başlamıştır. Şekil 4.66(b-c) incelendiğinde test ve simülasyon sonrasında yan kapı barlarının görünüşlerinin birbirlerine benzer oldukları kafes yapı sayesinde gerilmenin belirli bölgelerde birikmediği belirlenmiştir. Ayrıca kafes yapısı eğilme kuvveti altında ikin katlanarak ilerleme sağlamış ve alüminyum yapının her iki ucundan da çıkma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.



**Şekil 4. 66.** KYC kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntü

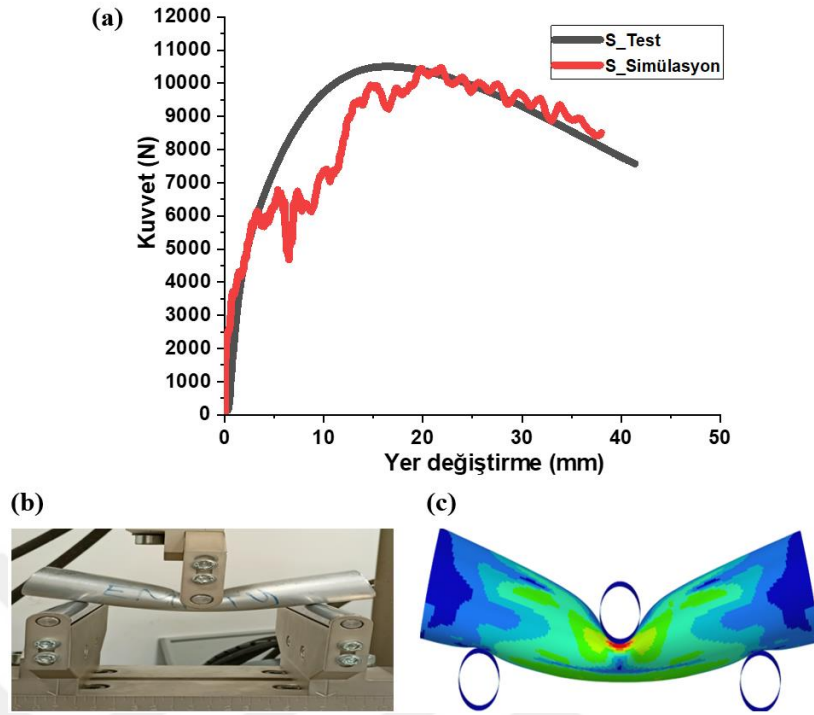
Tablo 4.37’de KYC kodlu kapı barının test ve simülasyon sonrası elde edilen değerler verilmiştir. Tablo 4.37 incelendiğinde test ve simülasyon sonrasında maksimum kuvvette %12, ortalama kuvvet değerinde %0,18 ve enerji emiliminde %0,29 oranında sapma olduğu belirlenmiştir. Enerji emilimi açısından KYC kapı barının K ve KYA kapı barlarından daha yüksek enerji emilimi sağladığı ancak KYP’ye göre daha düşük enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 37.** KYC kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>KYC Test</b>       | 19622,1                    | 17128,82                   | 40                         | 0,685                      |
| <b>KYC Simülasyon</b> | 20133,91                   | 17096,55                   | 40                         | 0,683                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | +2,6                       | -0,18                      |                            | -0,29                      |

#### 4.5.11. S Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.67’de S kodlu kapı barının test sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği, test ve simülasyon sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.67(a) incelendiğinde kapı barının test sonucunda maksimum kuvvet dayanımının yaklaşık olarak 10509,7 N olduğu belirlenmiştir. Üç nokta eğme testinde kuvvet maksimum noktaya ulaştıktan parabolik eğim göstermiş ve kare tipi yan kapılarından farklı olarak düşüş göstermiştir. Şekil 4.67(b-c) incelendiğinde yan kapı barılarında eğilme sonrası görüntülerin birbirleri ile uyumlu oldukları ve bundan dolayı kuvvet- yer değiştirme grafiğine ki eğrilerinin oldukça yakın oldukları belirlenmiştir. Burada silindir kapı barları, kare yapının keskin köşelerinin bulunmamasında dolayı gerilme birikmesi yalnızca kuvvetin uygulandığı alanda oluşmuştur.



**şekil 4. 67.** S kodlu yan kapı barının **(a)** kuvvet- yer değiştirme grafiği, **(b)** test sonrası görüntü, **(c)** simülasyon sonrası görüntü

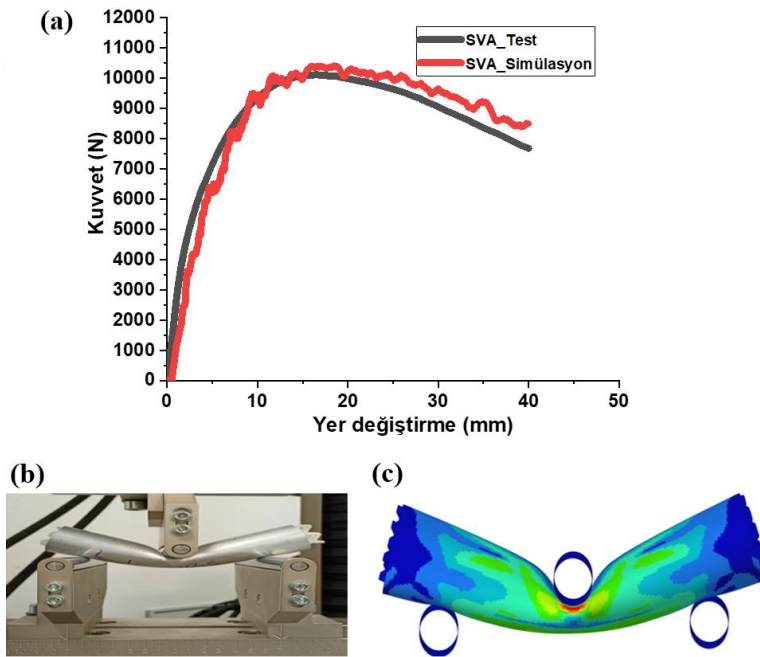
Tablo 4.38’de S kodlu kapı barlarının test ve simülasyon sonucunda elde edilen değerler verilmiştir. Burada test ve simülasyon sonucu arasında %0,3 sapma meydana gelmiştir. Maksimum kuvvet değerleri S kodlu kapı barında K kodlu kapı barına göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ortalama kuvvet ve enerji emilimi açısından sapma oranları ise yaklaşık olarak %4,75 olarak geręekleřmiřtir. S kodlu kapı barı ile K kodlu kapı barlarının enerji emilim değerleri kıyaslandığında S kodlu kapı barının yaklaşık olarak %17,5 oranında daha az enerji emilimi gösterdiği belirlenmiştir.

**Tablo 4. 38.** S kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | Maksimum Kuvvet (N) | Ortalama Kuvvet (N) | Yer Değiştirme (mm) | Enerji Emilimi (kJ) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>S Test</b>         | 10509,7             | 8818,43             | 40                  | 0,352               |
| <b>S Simülasyon</b>   | 10475,26            | 8405,61             | 40                  | 0,336               |
| <b>Hata oranı (%)</b> | +0,33               | -4,9                |                     | -4,75               |

#### 4.5.12. SVA Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.68’de SVA kodlu kapı barlarının test ve simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği, test ve simülasyon sonrası ezilme görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.68(a) incelendiğinde maksimum kuvvetin yaklaşık olarak 10680 N olduğu belirlenmiş ve S kodlu kapı barına göre kuvvet dayanımının yaklaşık olarak %1,5 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Burada da kuvvet grafiği eğrileri S kodlu grafikte olduğu gibi parabolik olarak hareket etmiştir. Şekil 4.68(b-c) incelendiğinde test ve simülasyon sonucunda birbirlerine oldukça benzer görüntü elde edilmiş ve bu benzerliğin de kuvvet- yer değiştirme grafiğinin birbirlerine yakın değerlerde olduklarını belirlemiştir. Eğilme görüntüleri incelendiğinde alüminyum yapının iç kısmında bulunan kafes yapılar yapının her iki ucundan esneme yaparak dışarı çıkmıştır. Test sonucunda kafes yapılarda kırılma meydana gelmediği belirlenmiş olup kafes yapıların katlanarak ilerlediği belirlenmiştir. Kafes yapı malzemesi olan ABS’nin sahip olduğu uzama etkisi ile kırılmaların gerçekleşmeyerek daha düzgün katlanmalar olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4. 68.** SVA kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntü

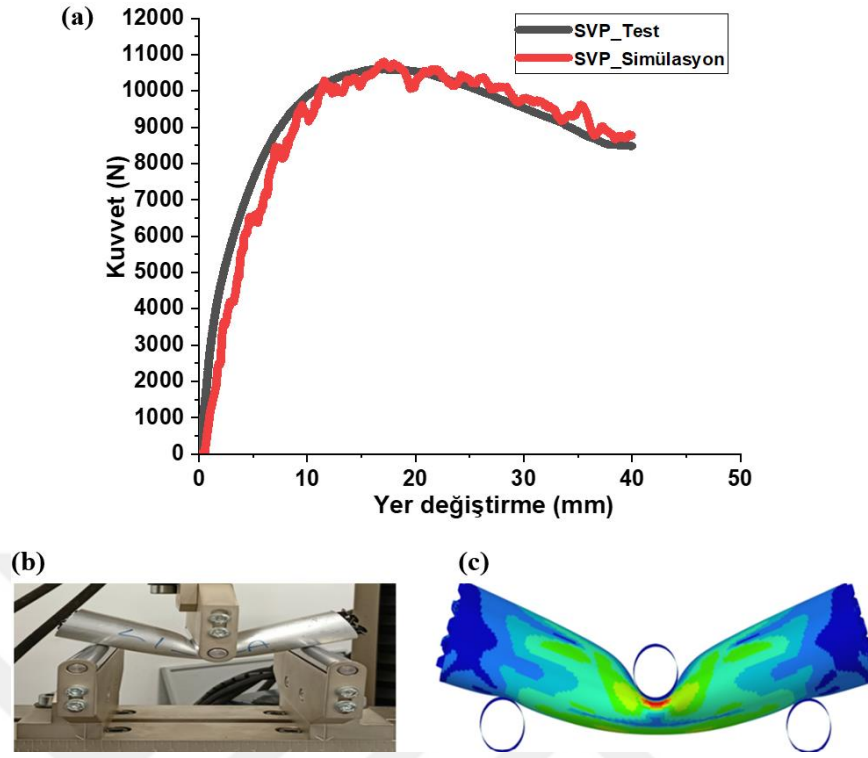
Tablo 4.39’da SVA kodlu kapı barlarının test ve simülasyonları sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Tablo 4.39 incelendiğinde SVA kodlu kapı barının maksimum kuvvet dayanımında test ile simülasyon sonucunda yaklaşık olarak %1,1 sapma olduğu belirlenmiştir. Ortalama kuvvet ve enerji emilimleri kıyaslandığında ise sırasıyla %0,8 ve %1,9 sapma olduğu belirlenmiştir. SVA kodlu kapı barının S tipi kapı barı ile kıyaslandığında SVA kapı barının yaklaşık olarak %4,8 daha yüksek enerji emilimine sahip olduğu ve kafes yapısının enerji emilimine etkisine pozitif yönde etkisi olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 39.** SVA kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>SVA Test</b>       | 10605,2                    | 8928,43                    | 40                         | 0,369                      |
| <b>SVA Simülasyon</b> | 10475,26                   | 8855,61                    | 40                         | 0,362                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | -1,1                       | -0,8                       |                            | -1,9                       |

#### **4.5.13. KVP Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi**

Şekil 4.69’da SVP kodlu yan kapı barlarının kuvvet- yer değiştirme grafiği, test ve simülasyon sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.69(a) incelendiğinde KVP kodlu yan kapı barının maksimum kuvvet değerinin 10650,2 N olduğu belirlenmiştir. Ayrıca grafik incelendiğinde test ve simülasyon eğrilerinin birbirlerine oldukça benzer olduğu belirlenmiştir. Maksimum kuvvet değerinde KVP kodlu kapı barına benzer değerler sergilediği gösterilmiştir. Şekil 4.69(b-c) ‘de verilen test ve simülasyon sonucu verilen görüntülerde hem test hem de simülasyon sonrası görüntülerin benzer oldukları belirlenmiştir. SVP kodlu yan kapı barlarının iç kısmında bulunan kafes yapılar alüminyum borunun her iki uç kısmından esneme sonucu çıkmıştır. Ancak kafes yapılarda herhangi bir kırılma meydana gelmemiştir.



**şekil 4. 69.** SVP kodlu yan kapı barının **(a)** kuvvet- yer değiştirme grafiği, **(b)** test sonrası görüntü, **(c)** simülasyon sonrası görüntü

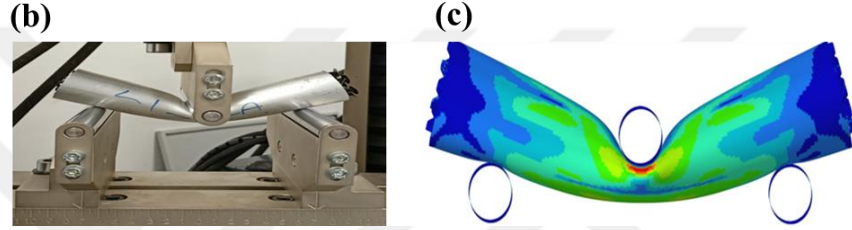
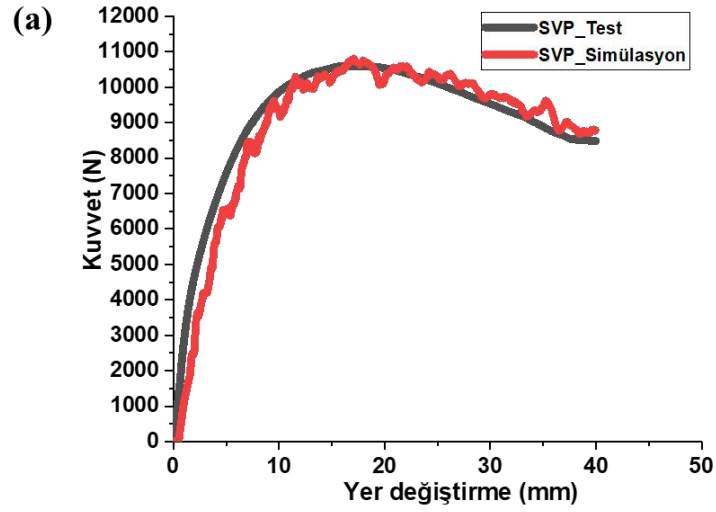
Tablo 4.40’da SVP kodlu kapı barının test ve simülasyon sonucunda elde edilen değerler sunulmuştur. Tablo 4.40 incelendiğinde maksimum kuvvet değeri için test ve simülasyon sonuçları arasında yaklaşık %0,7 oranında sapma meydana gelmiştir. Bu sapma oranı ortalama kuvvet ve enerji emilimi için yaklaşık olarak %2,8 oranında olduğu belirlenmiştir. SVP kodlu kapı barında S’ye göre yaklaşık olarak %1,7 ve KVA’ya göre yaklaşık %0,2 oranında daha yüksek enerji emilimi olduğu belirlenmiştir. Alüminyum i kısımlarında bulunan kafes yapıların malzemeleri olan PLA ve ABS farklı uzama değerlerine sahip olmalarına rağmen hacim merkezli kübik yapılarda birbirlerine benzer katlanma ve enerji emilimi sağlamışlardır. Burada kafes yapı tipinin oluka etkili olduğu düşünülmektedir.

**Tablo 4. 40.** SVP kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>SVP Test</b>       | 10620,2                    | 8953,41                    | 40                         | 0,358                      |
| <b>SVP Simülasyon</b> | 10696,09                   | 8726,015                   | 40                         | 0,348                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | -0,7                       | -2,6                       |                            | -2,8                       |

#### **4.5.14. KVC Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi**

Şekil 4.70’de SVC kodlu kapı barının kuvvet- yer değiştirme, test ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 4.70(a)’da verilen grafik incelendiğinde SVC kodlu kapı barının maksimum kuvvet noktasının 10694,1 N olduğu belirlenmiştir. PLA, ABS ve CF15PET malzemeli kafes yapıların test sonuçlarında maksimum kuvvet değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları belirlenmiştir. Burada kafes yapıların malzemeleri farklı olsa da benzer maksimum eğilme dayanımı sergilediği belirlenmiştir. Şekil 4.70(b-c)’de verilen test sonrası eğilme görüntüleri incelendiğinde test ve simülasyon görüntülerinin benzer oldukları ve bundan dolayı da grafik eğrilerinin yakın oldukları belirlenmiştir. KVC kapı barları içinde bulunan kafes yapılar kuvvet etkiyle alüminyum yapının iç kısımdan her iki yöne benzer oranda çıkış gerçekleştirmiştir. Ayrıca kafes yapılarda kırılma meydana gelmemiş olup düzgün katlanma sergilemiştir.



**şekil 4. 70.** SVC kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntü

Tablo 4.41’de SVC kodlu kapı barlarının test ve simülasyon sonucu değerleri verilmiştir. Tablo 4.41 incelendiğinde maksimum kuvvet, ortalama kuvvet ve enerji emilim değerlerinin birbirlerine yakın oranda sapma geręekleřtięi belirlenmiştir.

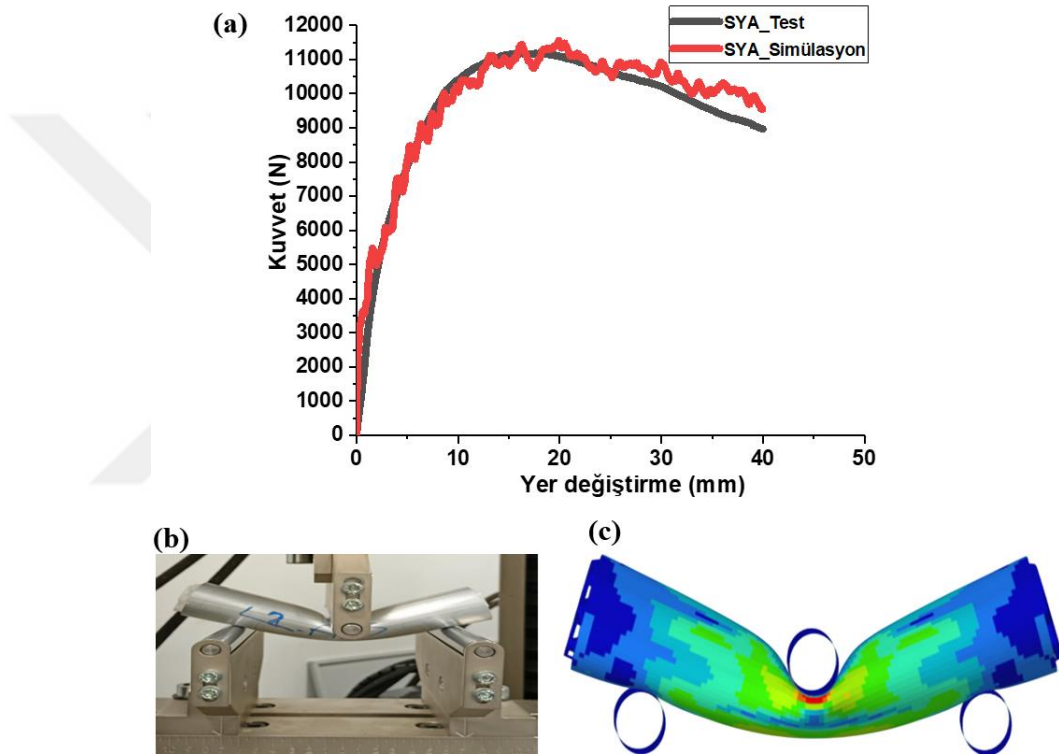
**Tablo 4. 41.** SVC kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | Maksimum Kuvvet (N) | Ortalama Kuvvet (N) | Yer Değiştirme (mm) | Enerji Emilimi (kJ) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>SVC Test</b>       | 10694,1             | 9033,338            | 40                  | 0,361               |
| <b>SVC Simülasyon</b> | 10516,56            | 9005,076            | 40                  | 0,360               |
| <b>Hata oranı (%)</b> | -1,6                | -0,3                |                     | -0,27               |

#### 4.5.15. SYA Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

şekil 4.71’de SYA kodlu kapı barlarının kuvvet- yer değiştirme grafiği, test ve simülasyon sonunda elde edilen örüntüler verilmiştir. şekil 4.71(a)’da verilen grafik incelendiğinde maksimum kuvvet dayanımının 11003 N olduğu belirlenmiş ve S kodlu

kapı barında göre yaklaşık olarak %4,7 oranında daha yüksek kuvvet dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yüzey merkezli kübik kafes yapısının, hacim merkezli kübik kafes yapıya göre daha yüksek kuvvet dayanımı sağladığı belirlenmiştir. Grafikte verilen eğriler incelendiğinde hem test hem simülasyon eğrilerinin birbirlerine benzer oldukları belirlenmiştir. Şekil 4.71(b-c) incelendiğinde ise hem test hem de simülasyon sonu görsellerinin yakın oldukları belirlenmiş ve iç kısımda bulunan kafes yapılarının alüminyum içerisinden her iki yönde çıktığı görülmüştür.



**Şekil 4. 71.** SYA kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntü

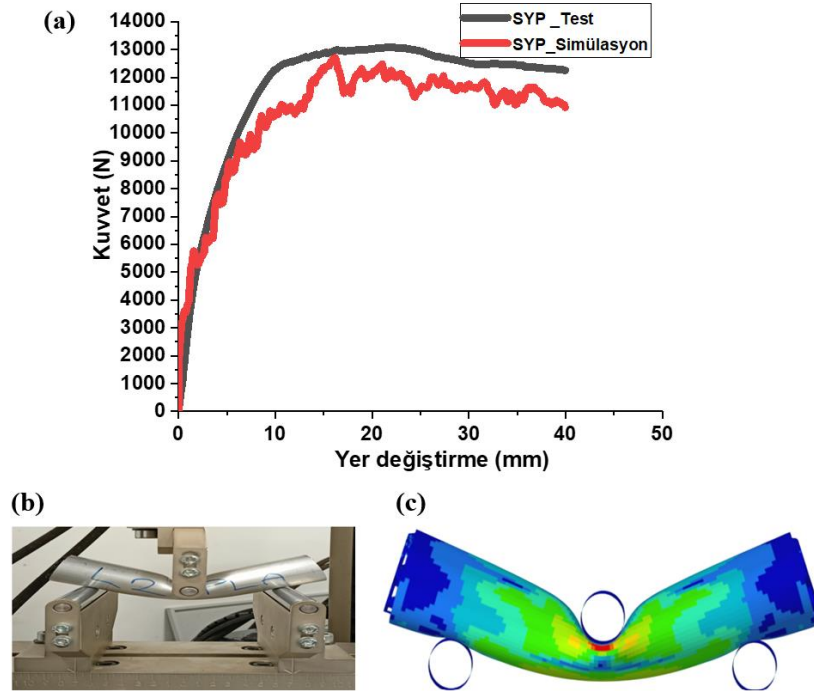
Tablo 4.42’de SYA kodlu kapı barlarının test ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Tablo 4.42 incelendiğinde maksimum kuvvet noktalarında test ve simülasyon sonucunda sapma oranının +4,6 olduğu belirlenmiştir. Bu sapma ortalama kuvvet için %4,3, enerji emilimi için %5,9 olduğu belirlenmiştir. İç kısımda takviye edici olarak bulunan kafes yapı sayesinde SYA’nın enerji emiliminin SVA’ya göre yaklaşık olarak %6, S’ye göre ise %6,8 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 42.** SYA kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                | Maksimum Kuvvet (N) | Ortalama Kuvvet (N) | Yer Değiştirme (mm) | Enerji Emilimi (kJ) |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| SYA Test       | 11003,1             | 9400                | 40                  | 0,376               |
| SYA Simülasyon | 11533,41            | 9811,47             | 40                  | 0,392               |
| Hata oranı (%) | +4,6                | +4,3                |                     | +5,9                |

#### 4.5.14. SYP Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.72’de SYP kodlu kapı balarının test ve simülasyon sonucunda kuvvet- yer değiştirme, test ve simülasyon sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.72(a)’da verilen grafik incelendiğinde maksimum kuvvet değerinin 13079 N olduğu belirlenmiştir. SYP kapı barının maksimum kuvvet değerinin S kodlu kapı barından yaklaşık olarak %24,5 ve SYA’dan %23,3 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.72(b-c)’de verilen test ve simülasyon sonrası görüntüler incelendiğinde ise birbirleri ile uyumlu eğilme davranışı sergilemiş ve test sonunda iç kısımda bulunan kafes yapısının iki uç noktadan dışarı çıktığı belirlenmiştir.



**Şekil 4. 72.** SYP kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntü

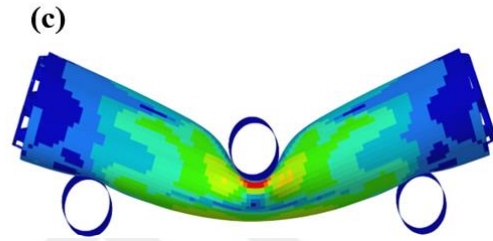
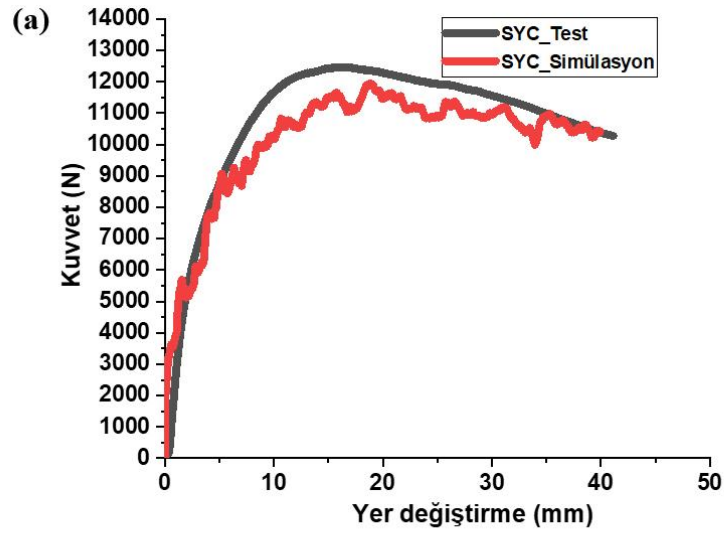
Tablo 4.43’de SYP kodlu kapı barının test ve simülasyon sonrası elde edilen değerler verilmiştir. Test ve simülasyon sonucunda maksimum kuvvet sapma oranı %2,8 ve ortalama kuvvet değerinde sapma oranı yaklaşık olarak %9,5, enerji emiliminde ise %9,6 oranında sapma olduğu belirlenmiştir. SYP kodlu kapı barlarının SYA’ya göre yaklaşık olarak %24, S’ye göre ise %32 oranında enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 43.** SYP kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>SYP Test</b>       | 13079                      | 11650,01                   | 40                         | 0,466                      |
| <b>SYP Simülasyon</b> | 12718,28                   | 10640,74                   | 40                         | 0,425                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | -2,8                       | -9,48                      |                            | -9,6                       |

#### 4.5.15. SYC Kodlu Yan Kapı Barının Test ve Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 4.73’de SYC kodlu kapı barlarının kuvvet- yer değiştirme, test ve simülasyon sonrasında elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.73(a) incelendiğinde test sonrasında maksimum kuvvet değerinin 12465,6 N olduğu belirlenmiş ve bu maksimum kuvvet değerinin SYP’den SYA ve S’den yüksek olduğu ancak SYP’den düşük olduğu belirlenmiştir. Burada kafes malzemelerin türünden dolayı farklılıkların olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.73(b-c) incelendiğinde ise test ve simülasyon sonrasında kafes yapıların alümin yapı içerisinden her iki yönde çıktığı belirlenmiş olup, kafes yapılarda kuvvet etkisi ile kırılma meydana gelmediği tespit edilmiştir.



**şekil 4. 73.** SYC kodlu yan kapı barının (a) kuvvet- yer değiştirme grafiği, (b) test sonrası görüntü, (c) simülasyon sonrası görüntü

Tablo 4.44’de SYC kodlu kapı barlarının test ve simülasyon sonrası elde edilen değerler verilmiştir. Tablo 4.44 incelendiğinde maksimum kuvvet değerinde test ve simülasyon sonucu arasında yaklaşık olarak %4,3 sapma olduğu, ortalama kuvvet ve enerji emilimi içinse yaklaşık olarak %6 oranında sapmaların meydana geldiği görölmüştür. SYC kodlu kapı barının SYP’den %7,7 daha az enerji emilimi sağladığı, SYA’dan %14 ve S’sen %22 daha yüksek enerji emilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4. 44.** SYC kodlu yapının test ve analiz sonrası elde edilen veriler

|                       | <b>Maksimum Kuvvet (N)</b> | <b>Ortalama Kuvvet (N)</b> | <b>Yer Değiştirme (mm)</b> | <b>Enerji Emilimi (kJ)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>SYC Test</b>       | 12465,6                    | 10760,77                   | 40                         | 0,43                       |
| <b>SYC Simülasyon</b> | 11954,59                   | 10116,38                   | 40                         | 0,405                      |
| <b>Hata oranı (%)</b> | -4,27                      | -6,36                      |                            | -5,8                       |

## 5. SONUÇ

Eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen numunelere yapılan test sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

- Çekme testi sonuçları incelendiğinde PLA filament kullanılarak üretilen test numunelerinin  $\pm 45^\circ$  tarama açısına sahip olan numunelerin  $0-90^\circ$  tarama açısı ile üretilen numunelere göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak ABS, PETG ve CF15PET numunelerinde  $0-90^\circ$  tarama açısına sahip numunelerin  $\pm 45^\circ$  tarama açılı numunelere göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.
- Çekme testi hızının artmasına bağlı olarak numunelerin tamamında gerilme değerinin arttığı ve dolayısıyla çekme hızının malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde etkisinin olduğu belirlenmiştir.
- Üç nokta eğme testi sonuçları incelendiğinde PLA, PETG ve CF15PET malzemeli numunelerde  $\pm 45^\circ$  tarama açılarında eğilme dayanımının daha yüksek olduğu ancak ABS malzemeli test numunelerinde bu durum tersi olarak gerçekleşmiştir. Dolayısıyla tarama açılarının eğilme dayanımına etkisini doğrudan etkilediği belirlenmiştir.
- Basma testi sonuçlarına göre ABS malzemeli numunelerde maksimum kuvvet dayanımının benzer olduğu belirlenmiş iken, PLA, PETG ve CF15PET malzemeli numunelerde  $\pm 45^\circ$  tarama açılı numunelerde daha yüksek basma kuvvetine sahip olduğu ancak tüm numunelerinde az miktarlarda sapma olduğu belirlenmiştir.
- Izod darbe testi sonuçları incelendiğinde tüm malzemelerde  $\pm 45^\circ$  tarama açılı numunelerin daha yüksek enerji emilimi sağladığı belirlenmiş. Dolayısıyla  $\pm 45^\circ$  tarama açılı malzemelerin doğrudan darbe etkisi çalışma durumunda kullanılabileceği düşünülmektedir.

- SEM görüntüleri incelendiğinde tarama açılarının yüzeylerin birbirleri ile yapışmasına etkisinin olduğu ve bundan dolayı yüzey yapışmalarının malzemelerin çekme testi sonuçlarına etkisinin olduğu incelenmiştir.

PLA, ABS, PETG ve CF15PET filamentler kullanılarak eklemeli imalat yöntemi ile üretilen çarpışma kutularının düşey darbe testi sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

- Tez kapsamında tasarlanan iki farklı tasarıma sahip olan çarpışma kutularında sekiz adet silindir geometrili çok hücreli yapıları kullanılmıştır. Burada hücre yapılarının bulundukları konumların çarpışma performansı üzerinde etkisinin olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak simetrik veya merkeze yakın konumlandırılan hücrelerin daha iyi performans sağladıkları belirlenmiştir.
- ABS, CF15PET, PLA ve PETG malzemeli çarpışma kutularının düşey darbe testi sonuçları incelendiğinde 2 kJ düşey darbe kuvveti altında özgül enerji emilimi performansı en yüksekte küçüğe doğru sıralanırsa bu sıralamanın ABS, PLA, CF15PET ve PETG olduğu belirlenmiştir. Burada ki sonuçlar çekme dayanımına göre benzer sıralama vermiştir. Kısacası çekme testi sonucunda yüksek uzama değerine sahip olan malzemelerin çarpışma kutularında kullanılmasının daha iyi performansa sağlayacağı düşünülmektedir.
- Düşey darbe testi sonucunda uzama değeri en düşük olan PETG malzemesinin ilk kuvvet etkisi ile tamamen kırıldığı ve parça bütünlüğünü sağlayamadığı belirlenmiştir. Bundan dolayı PETG malzemesinin çarpışma kutularında kullanılması sonucunda olumlu etki sağlayacağı düşünülmemektedir.
- Düşey darbe testi sonuçlarının simülasyonlarının gerçekleştirilmesinden sonra en yüksek özgül enerji emilimine sahip olan ABS ve PLA çarpışma kutuları genetik algoritma kullanılarak belirlenen değişken, amaç ve kısıtlarda şekilde optimizasyonları yapıldığında ABS malzemeli çarpışma kutusunun ağırlığı 240 gr.dan yaklaşık 215 gr. ağırlığa, PLA malzemeli çarpışma kutusu ise 257 gr.dan yaklaşık 225 gr. ağırlığa düşmüştür. Her iki malzemeli çarpışma kutusunda da

geometrik değişkenlerin birbirlerine oldukça yakın ölçülerde olduğu belirlenmiştir.

Şekil optimizasyonu yapılan çarpışma kutuları eklemeli imalat yöntemi kullanılarak yeni ölçülerde tekrardan üretilmiştir. Bu çarpışma kutularının çarpışma performanslarının geliştirilmesi amacıyla tam otomatik filament sarma makinesi kullanılarak  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$  sarım açılarına sahip olan karbon ve cam lifi takviyeli epoksi kompozit çarpışma kutuları ile hibrit hale getirilmiştir. Hibrit çarpışma kutuları 4 kJ yük altında düşey darbe testi ile çarpışma performansları incelenmiştir. Test sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

- Düşey darbe testi ile 4 kJ yük altında gerçekleşen plastik çarpışma kutusu takviyesi olmayan ve takviyeli olan çarpışma kutularının tamamında enerjinin emildiği belirlenmiştir. Ancak yer değiştirme miktarı açısından takviyesiz kompozit çarpışma kutularının daha yüksek değere sahip olduğu ve bundan dolayı darbe kuvvetinin arttırılması sonucunda daha fazla enerji Emilimi sağlamama durumu ile karşılaşılabileceği düşünülmektedir. Takviyeli çarpışma kutularında yer değiştirme daha az olduğundan dolayı darbe kuvvetinin arttırılması sonucunda enerji Emilimine devam edeceği düşünülmektedir.
- Hem cam hem de karbon lifler kullanılarak üretilen kompozit çarpışma kutularının üretiminde kullanılan sarım açılarının çarpışma kutularının maksimum kuvvet, ortalama kuvvet ve özgül enerji Emilimi gibi çarpışma performans kriterlerini etkilediği belirlenmiştir.
- Hem cam hem de karbon lifler kullanılarak üretilen kompozit çarpışma kutuları ekonomik olarak kıyaslandığında cam liflerin daha ucuz olmasından dolayı çarpışma kutularında kullanılmasının daha uygun olabileceği tahmin edilmektedir.

Genel olarak kıyaslama yapıldığında çok hücreli çarpışma kutularında bulunan hücre sayısı ve konumlarının çarpışma performansı üzerine etkisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca son yıllarda mühendislik uygulamalarında oldukça fazla kullanılmaya başlanan optimizasyon algoritmalarının çarpışma kutularının tasarlanmasında etkili olabileceği düşünülmektedir. PLA, ABS, CF15PET ve PETG plastik malzemelerinin tek başına kullanılması durumunda yüksek hızlı çarpışma dayanımına sahip olamayabileceği belirlenmiştir. Ancak bu yapılar kompozit malzemeler ile güçlendirildiğinde beklenen performansı karşılayabileceği belirlenmiştir. Kompozit malzemelerin üstün mekanik özellikleri ve hafifliklerinden dolayı geleneksel malzemelerden olan alüminyum, çelik gibi malzemelere alternatif olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Tez kapsamında otomotiv yan kapı barlarının geliştirilmesi amacıyla PLA, ABS ve CF15PET malzemeli hacim ve yüzey merkezli kafes yapılarla takviye edilen alüminyum yan kapı barları kendi aralarında şu şekilde kıyaslanabilir;

- Farklı polimer malzemeler kullanılarak üretilen L1 tip kafes yapılarla takviye edilen kare hibrit yapıların test sonucuna göre en yüksek enerji emilimine sahip olan yapının ABS polimer malzemeli hibrit yapının olduğu belirlenmiştir. Burada hibrit yapı, alüminyum yapıya yaklaşık olarak %15 oranında enerji emilimini arttırdığı belirlenmiştir.
- Kare geometrili L2 tip kafes yapıların üç nokta eğme testleri sonucunda ise PLA polimer malzemeli yapının en yüksek enerji emilim değeri sağladığı ve takviyesiz alüminyum yan kapı barının enerji emilim değerini yaklaşık olarak %67 oranında enerji emilim takviyesi sağladığı belirlenmiştir.
- L1 ve L2 tipli silindir kafes yapılar ile alüminyum silindir boru ile hibritleşmesi yapıldığında L2 tip kafes yapısının L1 tip kafes yapısına göre daha yüksek enerji emilimi performansı sergilediği belirlenmiştir. L1 tip silindir hibrit yapılardan en yüksek enerji emilimine sahip olan yapının CF15PET polimer malzemeli kafes yapısının olduğu ve takviyesiz alüminyum yan kapı barının enerji emilimine yaklaşık olarak %2,5 oranında takviye sağladığı belirlenmiştir.

- L2 tip kafes yapılarla takviye edilen silindirik hibrit yapılar incelendiğinde en yüksek enerji emilimi değerine sahip olan yapının PLA polimer malzemeli alüminyum yapının olduğu belirlenmiş olup, takviyesiz yan kapı barının enerji emilimini yaklaşık olarak %22 oranında arttırdığı belirlenmiştir.
- Kare ve silindirik geometrili hibrit yapılar karşılaştırıldığında kare yapıların daha yüksek enerji emilimi değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca L2 tip kafes yapıları ile takviyelendirme işlemi yapılması sonucunda daha yüksek enerji emilimi değerine ulaşıldığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak kafes yapıların otomotiv yan kapı barlarının enerji emilim performanslarını geliştirme amacıyla kullanılabileceği düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Agarwal, S., & Pai, Y. (2022). Mechanical characterization of quasi-isotropic intra-ply woven carbon-Kevlar/epoxy hybrid composite. *Materials Today: Proceedings*, 52, 971–978. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.431>
- Al-Tashi, Q., Abdulkadir, S. J., Rais, H. M., Mirjalili, S., Alhussian, H., Ragab, M. G., & Alqushaibi, A. (2020). Binary Multi-Objective Grey Wolf Optimizer for Feature Selection in Classification. *IEEE Access*, 8, 106247–106263. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000040>
- Albak, E. İ. (2021a). Crashworthiness design for multi-cell circumferentially corrugated thin-walled tubes with sub-sections under multiple loading conditions. *Thin-Walled Structures*, 164(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107886>
- Albak, E. İ. (2021b). Multi-objective crashworthiness optimization of thin-walled multi-cell tubes with different wall lengths. *International Journal of Crashworthiness*, 26(4), 438–455. <https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1724015>
- Alimirzaei, S., Ahmadi Najafabadi, M., Bani Mohammad Ali, A., & Pahlavan, L. (2023). Buckling assessment of GFRP and carbon fiber-reinforced plastic filament-wound tubes using an acoustic emission-based methodology. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. <https://doi.org/10.1177/07316844231197531>
- Alkhatib, F., Mahdi, E., & Dean, A. (2021). Design and evaluation of hybrid composite plates for ballistic protection: Experimental and numerical investigations. *Polymers*, 13(9), 1–15. <https://doi.org/10.3390/polym13091450>
- Azeem, M., Ya, H. H., Alam, M. A., Muhammad, M., M Sapuan, S., Kumar, M., Gemi, L., Maziz, A., Ismail, A. R., & Khan, S. H. (2024). Impact response of filament-wound structure with polymeric liner: Experimental and numerical investigation (Part-A). *Results in Engineering*, 21(December 2023), 101730. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101730>
- Beylergil, B. (2021). Design and discrete optimization of hybrid aluminum/composite drive shafts for automotive industry. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, 9(3), 248–263. <https://doi.org/10.36909/jer.v9i3B.8815>
- Bhushi, U., Suthar, J., & Teli, S. N. (2019). Performance analysis of metaheuristics optimization techniques for drilling process on CFRP composites. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1106–1114. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.091>
- Boria, S., Belingardi, G., Fiumarella, D., & Scattina, A. (2019). Experimental crushing analysis of thermoplastic and hybrid composites. *Composite Structures*, 226, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111241>
- Bui, T. N., & Moon, B. R. (1996). Genetic algorithm and graph partitioning. *IEEE Transactions on Computers*, 45(7), 841–855. <https://doi.org/10.1109/12.508322>
- Chatterjee, S., & van der Veldt, T. (2015). Hybrid welding processes in advanced high-strength steels (AHSS). *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*, 121–136. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-436-0.00007-2>
- Ciampaglia, A., Fiumarella, D., Boursier Niutta, C., Ciardiello, R., & Belingardi, G. (2021). Impact response of an origami-shaped composite crash box: Experimental analysis and numerical optimization. *Composite Structures*, 256(October 2020), 113093. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113093>
- Ciampaglia, A., Patruno, L., & Ciardiello, R. (2024). Design of a Lightweight Origami Composite Crash Box: Experimental and Numerical Study on the Absorbed

- Energy in Frontal Impacts. *Journal of Composites Science*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/jcs8060224>
- Costas, M., Díaz, J., Romera, L. E., Hernández, S., & Tielas, A. (2013). Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers. *International Journal of Impact Engineering*, 62, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.06.011>
- Czigány, T. (2005). Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. *Materials Science Forum*, 473–474, 59–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.473-474.59>
- Doğru, M. hanifi. (2019). Çoklu Yükleme Koşulları Altında Kamyon Şasisinin Topoloji Optimizasyonu. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2019(3), 856–867. <https://doi.org/10.31202/ecjse.612531>
- Doungkom, P., Jearsiripongkul, T., & Jiamjiroch, K. (2023). An Investigation of Quasi-Static Compression and Shock Responses under a Pneumatic Exciter on Brittle Truss Lattice Structures Fabricated with a Vat Photopolymer Resin. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/app13106087>
- Egala, R., Jagadeesh, G. V., & Setti, S. G. (2021). Experimental investigation and prediction of tribological behavior of unidirectional short castor oil fiber reinforced epoxy composites. *Friction*, 9(2), 250–272. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0332-0>
- EMEL, G. G., & Taşkın, Ç. (2002). Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları GENETİK ALGORİTMALAR ve UYGULAMA ALANLARI. *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 129–152.
- Erkek, B., Kosedag, E., & Adin, H. (2024). Hybridization effect on energy absorption capacity of composite crash boxes. *Polymer Composites*, 45(13), 12349–12361. <https://doi.org/10.1002/pc.28640>
- Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Zheng, G., & Li, Q. (2015). Dynamic crashing behavior of new extrudable multi-cell tubes with a functionally graded thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*, 103, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.08.029>
- Fu, X., Zhang, X., & Huang, Z. (2021). Axial crushing of Nylon and Al/Nylon hybrid tubes by FDM 3D printing. *Composite Structures*, 256(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113055>
- Ghannadpour, S. A. M., Mahmoudi, M., & Hossein Nedjad, K. (2022). Structural behavior of 3D-printed sandwich beams with strut-based lattice core: Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 281(October 2021), 115113. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115113>
- Ghasemnejad, H., Blackman, B. R. K., Hadavinia, H., & Sudall, B. (2009). Experimental studies on fracture characterisation and energy absorption of GFRP composite box structures. *Composite Structures*, 88(2), 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.04.006>
- Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 57(3), 133–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
- Gunaydin, K. (2024). Energy absorption ability of crush boxes filled with strut based and TPMS lattice structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical*

- Sciences and Engineering*, 46(11). <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05207-z>
- Gunaydin, K., Türkmen, H. S., Airoidi, A., Grasso, M., Sala, G., & Grande, A. M. (2022). Compression Behavior of EBM Printed Auxetic Chiral Structures. *Materials*, 15(4), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ma15041520>
- He, W., Luo, W., Zhang, J., & Wang, Z. (2023). Investigation on the fracture behavior of octet-truss lattice based on the experiments and numerical simulations. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 125(May), 103918. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103918>
- Hu, Y., Yang, M., Zhang, J., Song, C., & Zhang, W. (2015). Research on torsional capacity of composite drive shaft under clockwise and counter-clockwise torque. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(4), 1–7. <https://doi.org/10.1177/1687814015582109>
- Huang, Z., Zhang, X., & Yang, C. (2019). Static and dynamic axial crushing of Al/CRFP hybrid tubes with single-cell and multi-cell sections. *Composite Structures*, 226(May). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111023>
- Hussain, N. N., Regalla, S. P., & Rao, Y. V. D. (2022). Techniques for correlation of drop weight impact testing and numerical simulation for composite GFRP crash boxes using Ls-Dyna. *International Journal of Crashworthiness*, 27(3), 700–716. <https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1837478>
- Ivanov, E., Kotsilkova, R., Xia, H., Chen, Y., Donato, R. K., Donato, K., Godoy, A. P., Di Maio, R., Silvestre, C., Cimmino, S., & Angelov, V. (2019). PLA/Graphene/MWCNT composites with improved electrical and thermal properties suitable for FDM 3D printing applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/app9061209>
- Jiang, Z., Zhao, J., Xing, S., Sun, X., Qu, M., & Lv, H. (2024). Crashworthiness design and multi-objective optimization of 3D-printed carbon fiber-reinforced nylon nested tubes. *Polymer Composites*, 45(12), 11289–11311. <https://doi.org/10.1002/pc.28566>
- Karsli, N. G., Aytac, A., & Deniz, V. (2012). Effects of initial fiber length and fiber length distribution on the properties of carbon-fiber-reinforced-polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(15), 1053–1060. <https://doi.org/10.1177/0731684412452678>
- Khan, M. I., Umair, M., Hussain, R., Karahan, M., & Nawab, Y. (2021). Investigation of impact properties of para-aramid composites made with a thermoplastic-thermoset blend. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/08927057211021464>
- Kim, H. C., Shin, D. K., Lee, J. J., & Kwon, J. B. (2014). Crashworthiness of aluminum/CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application. *Composite Structures*, 112(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.042>
- Koloushani, M., Forouzan, M. R., & Niroomand, M. R. (2024). On the crashworthiness performance of thin-walled circular tubes: Effect of diameter and thickness. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(20), 4805–4817. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2206839>
- Lambora, A., Gupta, K., & Chopra, K. (2019). *Genetic Algorithm- A Literature Review*. 1998.
- Lang, D., & Radford, D. W. (2021). Design Optimization of a Composite Rail Vehicle

- Anchor Bracket. *Urban Rail Transit*, 7(2), 84–100. <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00144-9>
- Lau, S. T. W., Yuhazri, M. Y., Amirhafizan, M. H., & Sihombing, H. (2020). Performance Comparison on Using Metal and Kenaf FRP Composite Hollow Structure in Oblique Crushing. *Technology Reports of Kansai University*, 62(09), 5581–5585.
- Lee, B. L., Walsh, T. F., Won, S. T., Patts, H. M., Song, J. W., & Mayer, A. H. (2001). Penetration failure mechanisms of armor-grade fiber composites under impact. *Journal of Composite Materials*, 35(18), 1605–1633. <https://doi.org/10.1106/YRBH-JGT9-U6PT-L555>
- Li, M. F., Chiang, T. S., Tseng, J. H., & Tsai, C. N. (2014). Hot stamping of door impact beam. *Procedia Engineering*, 81(October), 1786–1791. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.233>
- Li, T. T., Wang, R., Lou, C. W., & Lin, J. H. (2014). Static and dynamic puncture behaviors of compound fabrics with recycled high-performance Kevlar fibers. *Composites Part B: Engineering*, 59, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.063>
- Liu, X., Shen, W., Fu, J., Natsuki, T., & Zhu, L. (2024). A novel pultrusion method and axial compression behavior of 3-D braiding-winding-pultrusion composite tubes at different temperatures. *Composites Science and Technology*, 245(November 2023), 110340. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110340>
- Liu, Z., Chen, H., & Xing, S. (2020). Mechanical performances of metal-polymer sandwich structures with 3D-printed lattice cores subjected to bending load. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(3), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00095-1>
- Mansour, G., Tzikas, K., Tzetzis, D., Korlos, A., Sagris, D., & David, K. (2016). Experimental and Numerical Investigation on the Torsional Behaviour of Filament Winding-Manufactured Composite Tubes. *Applied Mechanics and Materials*, 834(April), 173–178. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.834.173>
- Masoumi, M., Abdellahi, S. B., & Hejazi, S. M. (2022). Investigation flexural behavior of hybrid-reinforced layered filament wound pipes using experimental tests and numerical model. *Journal of Industrial Textiles*, 51(3\_suppl), 5219S-5242S. <https://doi.org/10.1177/15280837211034244>
- Mohammad, V. H. (2010). Evaluation of New Steel and Composite Beam Designs for Side Impact Protection of a Sedan As Per Fmvss 214, Iihs and Side Pole Tests Requirements. *Bachelor of Engineering, Osmania University, May*.
- Nguyen-Van, V., Choudhry, N. K., Panda, B., Nguyen-Xuan, H., & Tran, P. (2022). Performance of concrete beam reinforced with 3D printed Bioinspired primitive scaffold subjected to three-point bending. *Automation in Construction*, 134(November 2021), 104060. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104060>
- Nie, D., Du, R., Zhang, P., Shen, F., Gu, J., & Fu, Y. (2022). Force and Microstructure Variation of SLM Prepared AlMgSc Samples during Three-Point Bending. *Materials*, 15(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma15020437>
- O’Neil, J., Salvato, M., & Yang, J. (2023). Energy absorption behavior of filament wound CFRP origami tubes pre-folded in Kresling pattern. *Composite Structures*, 304(P2), 116376. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116376>
- Obradovic, J., Boria, S., & Belingardi, G. (2012). Lightweight design and crash analysis

- of composite frontal impact energy absorbing structures. *Composite Structures*, 94(2), 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.08.005>
- Papon, E. A., Haque, A., & Spear, S. K. (2020). Effects of functionalization and annealing in enhancing the interfacial bonding and mechanical properties of 3D printed fiber-reinforced composites. *Materials Today Communications*, 25(June), 101365. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101365>
- Quanjin, M. A., M Sahat, I., Mat Rejab, M. R., Abu Hassan, S., Zhang, B., & Merzuki, M. N. M. (2019). The energy-absorbing characteristics of filament wound hybrid carbon fiber-reinforced plastic/polylactic acid tubes with different infill pattern structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(23–24), 1067–1088. <https://doi.org/10.1177/0731684419868018>
- Quanjin, M., Salim, M. S. A., Rejab, M. R. M., Bernhardt, O. E., & Nasution, A. Y. (2020). Quasi-static crushing response of square hybrid carbon/aramid tube for automotive crash box application. *Materials Today: Proceedings*, 27, 683–690. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.161>
- Rafiee, R., Shahzadi, R., & Speresp, H. (2022). Structural optimization of filament wound composite pipes. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(8), 1056–1069. <https://doi.org/10.1007/s11709-022-0868-3>
- Sadighi, A., & Asgari, M. (2023). A novel corrugated carbon-fiber composite tube with circular corrugations on the lateral surface for crashworthiness: Manufacturing method, experimental and numerical analysis. *Journal of Composite Materials*, 57(22), 3557–3572. <https://doi.org/10.1177/00219983231190700>
- Savran, M., & Aydin, L. (2018). Stochastic optimization of graphite-flax/epoxy hybrid laminated composite for maximum fundamental frequency and minimum cost. *Engineering Structures*, 174(March), 675–687. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.043>
- Sehhat, M. H., Mahdianikhotbesara, A., & Yadegari, F. (2022). Impact of temperature and material variation on mechanical properties of parts fabricated with fused deposition modeling (FDM) additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(7–8), 4791–4801. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09043-0>
- Sharma, A., Anand Kumar, S., & Kushvaha, V. (2020). Effect of aspect ratio on dynamic fracture toughness of particulate polymer composite using artificial neural network. *Engineering Fracture Mechanics*, 228(December 2019), 106907. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106907>
- Sharma, D., & Hiremath, S. S. (2023). Experimental and FEM study on the in-plane and out-plane loaded reversible dual-material bio-inspired lattice structures with improved energy absorption performance. *Composite Structures*, 303(September 2022), 116353. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116353>
- Shubham, P., Aggarwal, C., & Joshi, S. (2018). Optimization of Process Parameter to Improve Dynamic Mechanical Properties of 3D Printed ABS Polymer using Taguchi Method. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 6, 2321–2071. <http://iraj.in>
- Shubhra, Q. T. H., Alam, A. K. M. M., & Quaiyyum, M. A. (2013). Mechanical properties of polypropylene composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26(3), 362–391. <https://doi.org/10.1177/0892705711428659>
- Stabla, P., Smolnicki, M., & Błażejowski, W. (2021). The Numerical Approach to

- Mosaic Patterns in Filament-Wound Composite Pipes. *Applied Composite Materials*, 28(1), 181–199. <https://doi.org/10.1007/s10443-020-09861-z>
- Sun, G., Wang, Z., Hong, J., Song, K., & Li, Q. (2018). Experimental investigation of the quasi-static axial crushing behavior of filament-wound CFRP and aluminum/CFRP hybrid tubes. *Composite Structures*, 194, 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.005>
- Szczepanik, S., & Nikiel, P. (2020). Influence of Structural Characteristics on the Mechanical Properties of FDM Printed PLA Material. *Journal of Casting & Materials Engineering*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.7494/jcme.2020.4.1.1>
- Taşdelen, M. E., Keleştemur, M. H., & Şevkat, E. (2016). Torsional Behaviour and Finite Element Analysis of the Hybrid Laminated Composite Shafts: Comparison of VARTM with Vacuum Bagging Manufacturing Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 10–16. <https://doi.org/10.1155/2016/9490375>
- Tunay, M. (2024). Bending behavior of 3D printed sandwich structures with different core geometries and thermal aging durations. *Thin-Walled Structures*, 194(PB), 111329. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111329>
- Umair, M., Hamdani, S. T. A., Asghar, M. A., Hussain, T., Karahan, M., Nawab, Y., & Ali, M. (2018). Study of influence of interlocking patterns on the mechanical performance of 3D multilayer woven composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(7), 429–440. <https://doi.org/10.1177/0731684417751059>
- Usta, F., Türkmen, H. S., & Scarpa, F. (2021). Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures. *Thin-Walled Structures*, 163(November 2020), 107738. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107738>
- van Mierlo, C., Burmberger, L., Daub, M., Duddeck, F., Faes, M. G. R., & Moens, D. (2022). Interval methods for lack-of-knowledge uncertainty in crash analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 168(December 2021), 108574. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108574>
- Vu, C. H., Le, T. H. T., & Nguyen, P. K. H. (2022). *Analysis of Thin Wall Structures for Energy Absorption Applications by ABAQUS*. 4, 73–55. <https://doi.org/10.29007/6w78>
- Wang, H., Yang, L., & Wu, H. (2021). Study on mechanical and thermomechanical properties of flax/glass fiber hybrid-reinforced epoxy composites. *Polymer Composites*, 42(2), 714–723. <https://doi.org/10.1002/pc.25860>
- Xie, R., Fan, W., He, Y., Liu, B., & Shao, X. (2022). Crushing behavior and protective performance of varying cores in UHPFRC-steel-foam sandwich structures: Experiment, optimal selection and application. *Thin-Walled Structures*, 172(January), 108886. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.108886>
- Xing, S., Jiang, Z., Zhao, J., Sun, X., & Wang, Y. (2025). Failure mechanism and crashworthiness optimization of variable stiffness nested origami crash box. *Engineering Failure Analysis*, 167(August 2024), 108953. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108953>
- Yin, H., Guo, D., Wen, G., & Wu, Z. (2022). On bending crashworthiness of smooth-shell lattice-filled structures. *Thin-Walled Structures*, 171(December 2021), 108800. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108800>
- Zakki, A. F., & Windyandari, A. (2023). Numerical study on crushing damage and energy absorption of multi-cell glass fibre-reinforced composite panel: Application

- to the crash absorber design of tsunami lifeboat. *Curved and Layered Structures*, 10(1). <https://doi.org/10.1515/cls-2022-0211>
- Zarei, H., Kröger, M., & Albertsen, H. (2008). An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. *Composite Structures*, 85(3), 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.028>
- Zhang, J., Yang, R., Hu, Y., Ding, G., Xu, Y., & Niu, J. (2013). Dynamic characteristics research of a steel/CFRP drive shaft. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/609309>

